译 者 的 话

1978年5月23日至25日，加拿大国家岩石力学委员会、劳伦梯安大学及坎布里昂应用技术及工艺学院主办了第十二届加拿大岩石力学讨论会。加拿大矿冶学会把讨论会上的20篇文献编辑成“充填采矿”(Mining With Backfill)出版。该书介绍加拿大、美国、澳大利亚一些矿山应用充填法采矿的工艺状况和研究成果，在一定程度上反映了当前国际上充填采矿的水平。我们将本书译出，以供国内从事矿山开发的科研、设计、生产的广大采矿专业人员参考，也可供大专院校教学、情报研究、生产技术管理的有关科技人员参考。

在翻译过程中，曾得到《有色矿山》编辑部及有关同志的支持和帮助，在此表示感谢。

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

原　　序

鉴于作为地压支护介质的充填料的重要性，目前人们对该课题的兴趣，以及自1973年澳大利亚讨论会以来在该领域所取得的许多进展，特为第十二届加拿大岩石力学讨论会选编了这本《充填采矿》文集。

讨论会选在萨德伯里召开，就有可能通过安排到国际镍金属公司及鹰桥镍矿业公司的矿山去进行会前参观，让代表们对一些会议论文的应用情况作现场考察。

讨论会第一天回顾了加拿大和其它国家的充填采矿工艺的技术水平，第二天则探讨充填采矿技术的研究方向及革新。会上提供了共20篇文献。讨论会以热烈的小组自由讨论而结束。

把第十二届加拿大岩石力学讨论会的论文集印成加拿大矿冶学会（CIM）的专册出版，我们相信这些文章将对广大读者有所裨益。

J.C. 威尔逊

地信网论坛
BBS.3WW.COM
顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/

目　　录

第一部分　工艺现状

福克斯矿充填采矿实践与技术的评论……（2）
斯特拉思科纳矿胶结充填实践……（24）
国际镍金属公司桦树矿108深孔回采法采场的充填系统……（37）
芒特艾萨矿采场充填的发展……（50）
不伦瑞克12号矿开采的充填实践……（71）
国际镍金属公司安大略分公司充填采矿法的进展……（89）
布利登金属公司胶结尾矿充填法……（102）
深部金矿的充填支护系统——脱水机原型和经济分析……（117）
诺兰达矿业公司利用胶结充填法回采矿柱……（138）
埃尔多拉多核能公司比弗洛吉矿充填法采矿实践的评论……（158）
美国亚利桑那州马格马矿水砂充填系统……（172）

第二部分　研究与革新

充填体稳定性的测定……（194）
用模拟法预测垂直走向矿柱回采过程中充填料的稳定性……（217）
锌公司和新布罗肯希尔联合公司所属矿山矿柱回采时的充填研究……（238）

地质论坛 BBS.3s001.com
顶尖地质论坛：http://bbs.3s001.com/

尾矿充填——一种新方法…… (267)
水力充填料的原地脱水性能…… (283)
水砂充填的动电脱水…… (303)
胶结充填中细磨艾萨矿炉渣在高炉渣-水泥比时的
凝硬性…… (318)
鹰桥镍矿业公司用炉渣作充填料中的胶结剂…… (329)
充填料的渗透率及其在矿山充填实践中的重要性 …… (346)

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

第一部分　工艺现状

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

福克斯矿充填采矿实践与技术的评论

R.A.福特*

摘　要

福克斯（Fox）矿使用分段深孔空场法回采，然后进行水砂充填。该矿自1966年开始建设，1970年建成投产。在这段期间内，为使矿柱回采获得成功和贫化最小，按照岩石力学研究提供的控制和改进生产的参数，进行了大量的关于充填型式的试验。

曾经采用水泥-尾砂比为1：30的混合物作充填料，并用掘进巷道的废石及地面采石场的砂砾作为补充，以减少水泥费用。根据实践经验及矿柱回采前后用多簧应变计对围岩应力分布情况广泛监测的结果，决定用非胶结充填代替胶结充填。1976年采用了这一措施，在爆破技术、回采顺序及矿块尺寸方面稍有改变。

到目前为止，已有22个采场及10个间柱采充完毕，回采率达到85—90%，贫化率很小。

本文叙述了充填系统的规划、试验和设计，及其在希里特戈登（Sherritt Gordon）公司福克斯矿七年的采矿实践中的进展。

---

* R.A.福特（Ford）是希里特戈登矿业公司福克斯矿矿山总工程师。

前　言

属希里特戈登矿业公司所有和经营的福克斯矿位于曼尼托巴省，北纬56°以北，里恩湖镇（town of Lynn Lake）西南30英里处。里恩湖位于温尼伯城北面696英里，550航空英里处。矿区是希里特公司人员用地球物理方法于1961年首先发现的。

矿山于1966年开始开发，1970年投入生产，年生产能力约100万吨。到目前为止，已生产矿石700万吨，每作业日平均产量为3000吨。现在保有矿石储量830万吨，铜品位为1.8%，锌品位为2.1%。

地　质

福克斯矿的矿体产于太古代火山带中部的块状硫化矿矿床中。矿带呈层状透镜体，走向北东65°，倾向北西，倾角70°。沿走向平均长1000英尺，厚度变化于15英尺至150英尺之间。

矿体为变质火山熔岩、火山灰及火山碎屑所包裹。矿石为细粒状黄铁矿及磁黄铁矿，并且黄铁矿多于磁黄铁矿，以及伴生具有经济价值的黄铜矿和闪锌矿。

闪锌矿含量以沿边缘部分及矿体上部的西端为最高。黄铜矿含量在中心部分较高，并随深度的增加而增高，而闪锌矿含量则相应减少。在平面上，富闪锌矿的矿带围绕富黄铜矿的矿带呈等倾斜褶皱出现，并受剪切分力作用而变长。假如把矿体看成翻转的，那么从富锌的顶部到富铜的底部可以把硫化矿分成区域，并覆盖于热液变质脉上。

构造上盘的最下部是中间体及长石矿物的碎屑交替互换，并伴有次生的燧石层。上盘的蚀变带包含黑云母-金云母，堇

青石-堇闪石及石英-绢云母片状共生体。这些矿物被认为是由上部覆盖的相应的碎屑层蚀变生成的。构成的下盘由一层不连续的石英-绢云母片麻岩所标出。这一岩层突然中断而埋于中间体至镁铁质碎屑层序之下。在这些碎屑之下是厚层块状及枕状玄武岩岩流，它是矿区岩层下部界限的标志。

采矿方法

福克斯矿采用一断面为18×13英尺，延深到2300水平以下，井深为2343英尺的五格竖井。它用来提升岩石、材料、人员并兼作进风用。在2000水平以下的矿体是通过一条坡度为15%，断面13×15英尺的斜坡道进行开采。现时斜坡道已掘到2400水平。

在2000水平以上，爆破下来的矿石从采场用4立方码柴油铲运机铲运，经一个中央溜矿井借重力下放到2100水平的42×48英寸颚式破碎机。2000水平以下的爆下矿石，从采场用4立方码铲运机装入26吨柴油卡车经斜坡道向上运至2000水平的卸矿点，通过中央溜矿井自重下放到2100水平的破碎机。

矿石在破碎到5英寸以后，用36英寸宽的皮带运输机运至2200水平的箕斗装矿仓上部的中间矿仓，再用8吨底卸式箕斗提升到地面。

矿山采用两段排水系统从2300及1200水平排水。两处均安装有相同的设备，即两台马瑟(Mather)与普拉特(Platt)多叶片10级水泵，排水量400加仑/分。

在采用分段空场、事后充填的采矿方法时，炮孔直径为2英寸。放矿水平或主水平的垂高间距是400英尺，但是2000水平以下的除外（见图1）。在主水平之间开有三个分段，其

间用倾斜的人行材料天井连通。在各水平的下盘，与矿体走向平行并距下盘矿体接触面50英尺处，开凿脉外平巷。该平巷供作出入通道、探清矿体形态为目的的金刚石钻探施工场地，以及在主水平作主要运输平巷之用。

矿体沿走向分为100英尺宽的矿房及45英尺宽的矿柱，其垂高均为400英尺。为了方便上部采场及矿柱的回采，采场可在阶段巷道以上40英尺处展开，使随后采场的放矿漏斗修筑在充填体中。漏斗也可以设在矿石中，但须留临时底柱，这些底柱待开采下部采场时一并回采。

2000水平以下，由于岩层条件不好，矿房及矿柱高度减为200英尺，放矿漏斗均开凿在岩石中。设计考虑每下降200英尺把矿房和矿柱位置交替变更，这样就减少了回采底柱所需的采准工程量。继而第一步骤矿房宽度也减为75英尺，使它等于矿柱平面上的尺寸，从斜坡道开凿的平巷尺寸与2000水平以上的相同。

沿每一个矿柱的中心线开凿穿脉直到上盘。由这些穿脉在矿体与岩石接触带开凿凿岩巷道，使它与横向切割平巷连通。虽然要根据岩层情况来确定，但是切割平巷通常布置在采场最宽部位并切穿矿体全厚度。按采场整个垂高钻凿一个5英尺直径的切割井。

目前，主水平及斜坡道以外的掘进均用双臂或三臂柴油台车打眼，用铲运机装运。分段巷道的开凿用气腿凿岩机打眼，用卡沃310型自动装运机装运。2英寸直径的落矿炮孔用装于台架或三轮或四轮气动台车上的BBC120F凿岩机打眼。

原来，矿山采用每周7个工作日，每日3个班的工作制度。1976年3月减为每周5个工作日的制度。1977年矿山部门（包括职员）的采矿效率为20吨/人班，全矿全员效率（包

括职员）为11吨/人班。

福克斯矿充填料的矿物成分

1973年作过锌最终尾矿的显微镜分析。这些浮选尾矿经脱去细粒部分以后送井下作充填料。锌浮选尾矿主要由单体的硅酸盐脉石(54.1%)；黄铁矿(32.5%)及磁黄铁矿(10.0%)组成。尾矿中含的铜和锌大部分呈单体的闪锌矿（0.4%)及黄铜矿(0.1%)。单体的脉石主要是石英、金云母、云母、绿泥石及滑石。金属含量的重量百分比是铜0.09%，锌0.38%。1977年锌浮选尾矿平均含铜0.13%，含锌0.31%。因此，目前充填料比1973年的充填料实际上含有较多的黄铜矿及较少的闪锌矿。

根据铁和硫的原子量计算出上述样品中的铁含量的百分比是22%。最近几个月尾矿中的铁含量已接近32%。假设黄铁矿与磁黄铁矿的比例不变，则近来尾矿中黄铁矿含量应为50%，磁黄铁矿应为15%。所以，除了闪锌矿及黄铜矿外，充填料中的全部硫化物含量约为65%，而硅酸盐脉石含量则下降。

胶结充填

希里特戈登矿业公司研究和发展部于1967年初首先研究了用作采场充填料的尾矿的稳定性。对上下盘岩石及矿带的初步评价表明，它们具有适应深孔采矿法的足够的稳固性。但是采准的设计布置是足够灵活的，如果一旦围岩不太稳固时，可以改用充填法回采。研究部门的研究目的在于确定从试验厂来的黄铁矿多于磁黄铁矿的尾矿是否会氧化，是否密实到足以用作下一步回采的良好基础，正如充填法所要求的

那样。

曾经把一个脱泥的尾矿试样在压力送风的干燥炉中加热，使之湿润并让干燥炉排出的气体通过一个气体处理连续装置。试验结果表明，即使是在88℃的高温，黄铁矿的氧化程度也很小，可以忽略不计。这说明在环境温度较低的矿山，如果矿坑水中不存在催化这一反应的物质时，那末氧化作用几乎是不存在的。

根据上述情况，曾经确定在充填料中加入一些增强剂来提高强度。为此做了一系列的试验。在尾矿矿浆中加入1％至5％的普通水泥、无水石膏及熟石膏来提高黄铁矿充填料的强度。试验结果表明，要使充填料有足够的强度和内聚力，任何上述胶结料需要加入的最低量为3％。

1968年经井下掘进及金刚石钻孔资料证明，只要回采完毕后就尽快充填，用分段空场法回采确属可行。

加拿大拉法吉水泥公司（Cement Lafarge Ltd.）被委托进行一项实验室研究项目，以确定不同比例的水泥及分级过的尾矿混合物的物理特性及强度。此项试验于1968年开始，用试验厂提供的尾矿作研究，并一直继续进行到1973年，改用生产厂的充填料。

经过上述项目的研究，得出以下的观察结果和结论。

1．渗透速率随时间的增长和水泥含量的增加而下降（图2a）。

2．使用矿坑水作混合剂对水泥-尾矿充填料的抗压强度的不利影响很小（表1）。

3．水泥-尾矿混合料的强度随时间推移及水泥量的增加而增加（图2b）。

4．用尾矿-水泥砂浆来胶结骨料比单独用水泥-尾矿砂

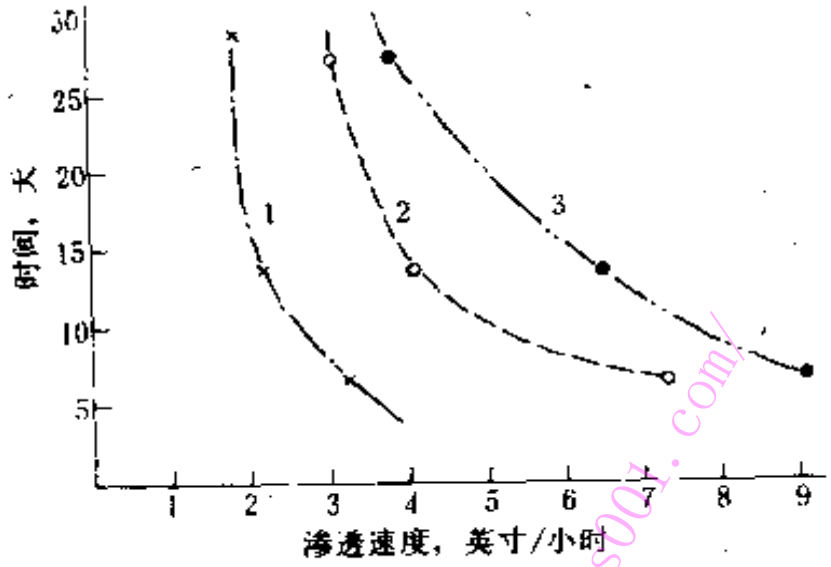


图 2a 渗透速率曲线，显示水泥含量及时间增加的变化情况

1 ——1:15水泥-尾矿平均渗透速率＝2.4英寸/小时；

2 ——1:20水泥-尾矿平均渗透速率＝4.8英寸/小时；

3 ——1:30水泥-尾矿平均渗透速率＝6.5英寸/小时。

BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

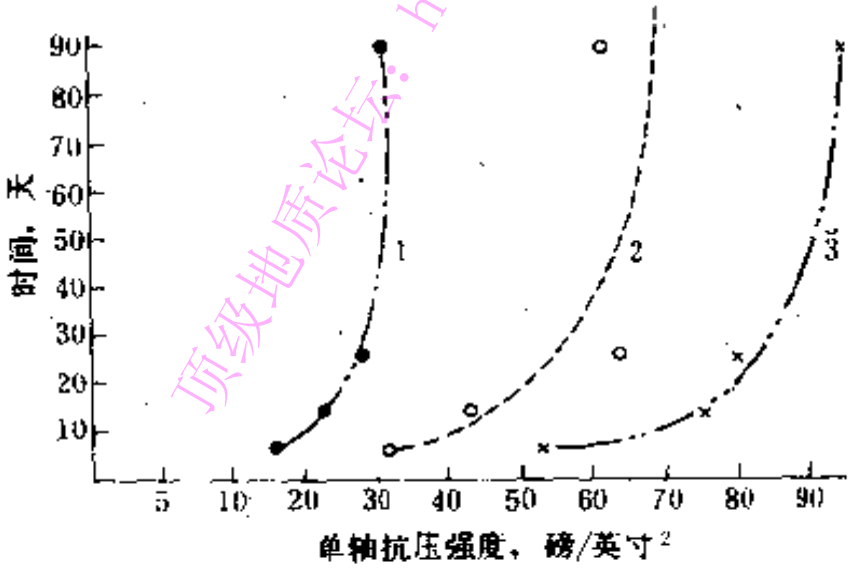


图 2b 抗压强度曲线，显示水泥含量及时间增加的变化情况

1——水泥与尾矿比1:30；2——水泥与尾矿比1:20；3——水泥与尾矿比1:15。

表 1　2英寸立方体强度(磅/英寸^2)

水泥：尾矿——1:2.75
水分——65.9%
流量——112%

混合水	养护水	14 天	28 天	90 天
矿坑水	矿坑水	2920	3210	3660
蒸馏水	矿坑水	3050	3460	3730
蒸馏水	蒸馏水	3160	3300	3800

浆作充填料时强度稍高。这可能由于产生悬料及蜂窝作用所致。

5．在低水泥含量的水泥-尾矿砂浆中增加水泥量只能稍稍增加容重。

6．充填料在输送管路系统中输送时会产生破碎作用(表2)。

7．粗磨的物料能提高容重及渗透速率，但强度稍有下降。

8．水泥-尾矿砂浆的最大强度的75%可在最初的28天内获得。

9．加入絮凝剂将降低水泥-尾矿混合料的容重，因此随着渗透速率的增高水泥及尾矿的需要量将减少。然而，载荷的承受力将有很大的下降（图3a及3b)。

矿柱回采中水泥-尾矿充填料的应用

投产前，希里特公司聘请J.D.史密斯工程联合有限公司总裁史密斯进行岩石力学研究，用以弄清矿山几何形态及

地信网论坛 BBS.3S001.COM 测绘地质论坛：http://bbs.3s001.com/

表 2　筛分析筛上物累计百分比

网目	加拿大水泥厂试验		福克斯厂试验		
	1970年10月样品（矿浆浓度=75%固体）	1971年9月样品（矿浆浓度=68%固体）	充填料厂旋流器底流1971年12月（矿浆浓度=73%固体）	20-3采场尾矿管线排出物1971年12月（矿浆浓度=73%固体）	充填料厂旋流器底流1977年9月（矿浆浓度=72%固体）
+35			1.57	2.05	2.32
+48			5.66	7.32	7.24
+65			25.30	19.80	14.64
+70	14.1	15.6			
+100	28.4	29.1	47.10	38.04	25.95
+140	47.5	48.2			
+150			78.79	58.55	40.69
+200	64.2	71.2	87.85	75.46	62.96
−200	100.0	100.0	100.00	100.00	100.00

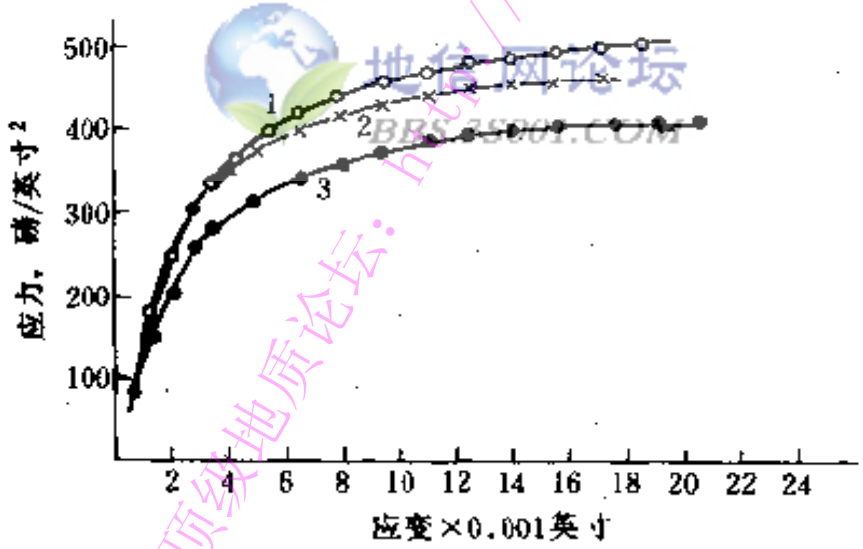


图 3a　应力应变曲线，显示因使用絮凝剂变形阻力的减少

1——1:30水泥-尾矿不加絮凝剂时的容重=123.7磅/英尺³；

2——1:30水泥-尾矿加Cyanafil-142絮凝剂时，容重=119.3磅/英尺³；

3——1:30水泥-尾矿，加Nalco-81 CO 4絮凝剂时，容重=121.8磅/英尺³。

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

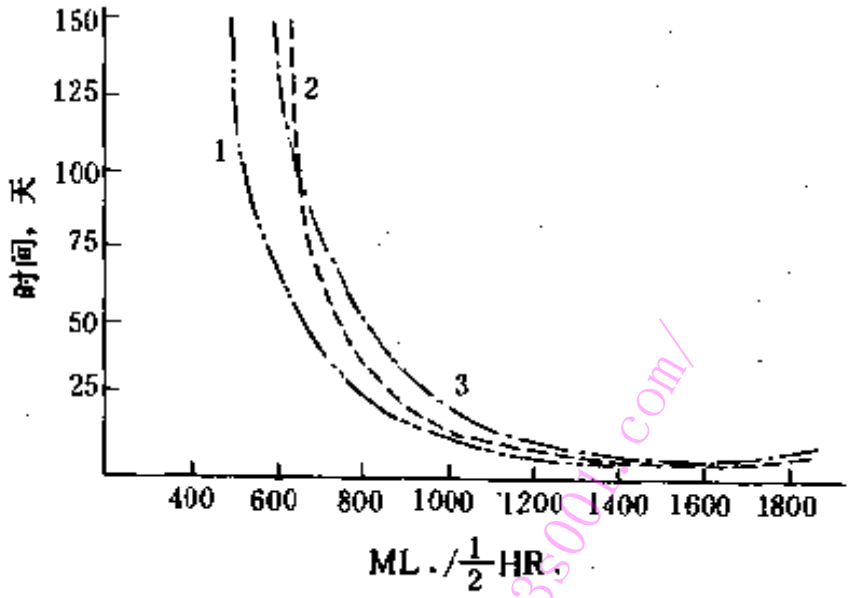


图 3b 圆筒渗透速率，显示因使用絮凝剂而增加

1——1:30水泥-尾矿混合料，不加絮凝剂；

2——1:30水泥-尾矿混合料，加Cyanafil-142絮凝剂；

3——1:30水泥-尾矿混合料，加Nalco-81CO4絮凝剂。

北矿网论坛 BBS.53001.COM

确定能够成功地进行矿柱回采的准则。影响成功地进行矿柱回采的主要因素之一是，在不破裂情况下胶结充填体可能暴露的最大高度。史密斯假设胶结充填体的作用好似一个加强梁，它被沿间柱线引入到每一个分段上并插入底柱漏斗中，据此计算出其自由稳立的高度。把一些非胶结的物料充填到采场的中心以降低充填费用。

加拿大拉法吉水泥公司对 1 :20及 1 : 30的水泥-尾矿混合料的物理特性及强度的研究成果给确定加在上面的载荷的承受能力提供了计算基础。据信有两个力作用于自由稳立的充填体上。第一个力是岩石向空区移动，产生的上下盘之间的闭合力。第二个力是同土壤力学原理一样，充填料自重作用于底柱及间柱梁上的压力。

研究结果表明，估计有2至4个月的短期的稳定时间可用来代替房间矿柱。这种条件结果形成梁中心的零边界构造应力。

依据不同的自由稳立高度计算必需的胶结梁的宽度。然而在实践中，由于充填料的安息角较平缓，胶结梁的宽度是无法控制的。因此结果是整个采场都采用了胶结充填，实际上形成了沿走向100英尺宽的梁。把这个数字代入和上下盘间宽度有关的梁的方程式中，所期望的充填料自由稳立高度会超过200英尺，或超过采场高度的一半。如果上盘与下盘的闭合值为2英寸左右，则这个高度的充填体是稳定的。如果此种应变接近3英寸，破坏就可能会发生。若采用上述那种同样厚度的胶结矿柱，那末矿柱回采就有可能达到采场的全高。由于崩下的矿石能起支护作用，并设想矿石以最快的速度运出，因此上述情况是可能的。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

研究工作还表明，1：20的水泥-尾矿混合料的强度虽高于1：30的混合料，但这不足以使它成为一种经济上更合算的混合料。必须提醒的是，现场充填体的强度应进一步测定，以验证从制备厂直接取的试样所计算的承载能力是否准确。

第一个回采的矿柱是20-4采场的东矿柱。在20-3及20-4采场采完后，20-3采场用30：1的尾矿-水泥混合料充填，并用碎石结束上部充填工作，以提供一个自然安息角。此时还不能证实原地充填体强度是否足够使该充填体保持自由稳立，因此确定在采场下部留一部分矿柱作扶壁不采，以减少充填体的暴露高度和宽度，并提供作为检查充填体的通道。由于最后一次崩矿的一个月以后上盘冒落了，采下的矿石及片帮的上盘岩石盖住了暴露面，因此充填料的高度再无法观察到。

在回采下一个矿柱之前（12-3采场东矿柱），在相邻的12-2采场中取胶结的水力浇灌充填样品作现场雪尔拜（Shelby）管试验。胶结的充填样品与直接从充填料制备厂所取样品的物理性能比较见表3。

根据土壤力学的概念，可以用原地充填料的物理特性来计算保持稳态的充填料暴露高度。

设想有两种破坏类型存在。一种是由于上部充填体的重量引起暴露的充填料坍塌入空采场。计算结果表明阻力大于破坏力，因此用这种方法破坏是不可能发生的。另一种很可能的破坏机理是一个楔形块滑入因矿柱回采造成的空区中。计算表明，如果自由稳立的充填料的高度不超过200英尺，则这种破坏机理也不会出现。

表3 胶结充填料的物理性质（充填料制备厂产品与采场原地样品的比较）

性　　质	充填料制备厂产品	原位置胶结的水力浇灌的充填料
比重——固体（G_s）	3.42	3.63
孔隙度	42%	45.8%
孔隙比（e）	0.725	0.845
全饱和水含量（$\frac{e}{G_s}$）	21%	23%
内聚力（C′）	*1728磅/英尺^2	2938磅/英尺^2
抗剪角（ϕ'）	*34.5°	24.6°

*总应力状态。

因此，12-2采场用30:1尾矿-水泥混合料充填到440英尺的全高，而12-3采场则只采到1030副中段以上40英尺处。在12-2采场充填毕以及12-3采场采至上述高度后，把矿柱矿石爆落到12-3采场的空区，暴露出一个200英尺高的自由稳立

的充填体。随着矿柱矿石的回采把采场充填到1030副中段以上40英尺处。在1030副中段掘凿放矿点，在充填体中形成放矿漏斗。剩余的12-3采场部分及矿柱部分仍按上述的方法予以回采。

12-3采场东矿柱的下部一排孔继一排孔地分七次爆破，减少每茬炮的单位炸药消耗量及每段的装药量。在爆破过程中曾用地震仪在12-2采场监测爆破震动对充填体的效应。测得的爆破振动频率很高，而振动的时间则小于一秒。由于频率很高，振动周期很短，胶结充填体对很高的加速度是否会来得及反应值得怀疑。

最后的矿柱爆破爆出一个清晰的断裂面，但是在靠充填料上面留下了一层3$\frac{1}{2}$至4英尺的矿皮。当12-3采场下半部在九个月以后充填时矿皮仍然完好。从这一因素并结合观察得知，回采的矿柱内聚集起来的压应力随着每一次爆破而增加，因此改进当前所实践的矿柱回采工艺就显得非常重要了。

经过更多的实践发现，矿柱的剩余部分（矿皮）在400英尺的采场全高面上都能保持完好。此外，把一个矿柱回采的爆破次数减少到最低限度并使每段的装药量仍保持在300至500磅，能更有效地回采矿柱而不会由于应力积累而发生切断炮孔的危险。这种用胶结充填回采矿柱的工作一直进行到1975年。然而基于矿柱矿皮能保持良好这一事实，使用昂贵的胶结充填料的必要性是值得研究的，并推动了对使用非胶结充填料细节的观察研究工作。

非胶结充填料

实验室试验结果表明，非胶结充填料更易脱水并产生与

胶结充填料相似的孔隙度。然而非胶结充填料的粘结因数为零，不支护是不稳定的，也较容易压缩。由于这一因素，非胶结料容易全面流动，在一些区域会使岩石应力增高。

非胶结充填料最重要的潜在问题是由于爆破或地震活动引起的振动负荷所导致的液化现象。这种称为液化的现象大大降低了物料的抗剪强度，这是由于脉冲或周期的动力作用在饱和湿度微粒间产生瞬间孔隙水压造成的。因此如果把这些物料保持在一个不饱和状态，而且振动载荷在该物料的临界水平之下，那末液化所造成的强度损失是可以避免的。

胶结尾矿的水平衡计算表明，在浇灌后期充填料饱和度约减少到30%，而在浇灌过程中饱和度通常少于60%。根据渗透试验测知饱和状况能够改善，因为在实验室条件下非胶结充填料的渗透系统是胶结充填料的两倍。从文献资料得知，每次爆破的一段炸药量在200至500磅时，将使约50英尺距离内的饱和非胶结尾矿产生液化。因此在不使用精密的监测仪器的情况下，防止液化的唯一办法是保持邻近爆破地区的非胶结充填料的饱和度在一相当低的状况以使液化不致于发生。

从曲型非胶结充填料的浇灌测知，如果饱和度低于65%，则充填料将不会产生液化现象。从研究工作进一步得出建议，考虑到排水估算的固有误差，在非胶结充填料浇灌完毕后的一个月的时间内，不允许在紧靠此充填料的矿柱进行爆破。同时，在爆破后必须在矿柱上留一层完整的矿皮来支护非胶结充填料。所需要的矿皮厚度约为10至15英尺。要通过计算使因增加矿柱矿皮所造成的矿石损失比所减少的水泥费用为低。

从1975年到现在，上述的建议已付诸实行，非胶结充填料用得很成功，回采率达到85—90%，贫化率很小。这里须

指出，在1977年已成功而有效地回采了5个间柱及3个顶柱，最大爆破量超过80000吨。

干式充填

自1972年开始，在福克斯矿采用冰川砂砾作补充充填料。原先干式充填技术是用来节省水泥费用和充填时间。充填料用汽车运至矿区，通过充填井分配到井下。在需要卸载充填料的放矿水平用铲运机把充填料运送并卸入需要充填的采场去。

冰川砂砾具有与非胶结尾矿充填料相似的物理特性（参阅表4）。

表 4　冰川砂砾与非胶结尾矿充填料的物理特性的比较

性　　质	冰川砂砾	非胶结尾矿
粒级及粒度	D_{50}=1.15毫米	D_{50}=0.1毫米
均匀系数	C_u=6.3	C_u=1.7
固体的比重	2.65	3.60
原位置的孔隙度	n=0.47	n=0.48
浇灌密度	γ^d=117磅/英尺^3	γ^d=123磅/英尺^3
渗透系数	K=2.4×10^{-3}英尺/分	K=5×10^{-3}英尺/分
内聚力	C′=0	C′=0
抗剪角	φ=35°	φ=35°
应力对数周期的轴应变	C_ε=0.06	C_ε=0.06

冰川砂砾的物理特性使它适合于作充填料。由于露天开采、地面运输及重复的地下运搬等高费用，全用冰川砂砾作非胶结尾矿的代替物经济上是不可行的。

目前，非胶结尾矿作为基本的充填材料，冰川砂砾只用来赢得充填时间。在2000水平以上的采场，居于同样的目的，

并为了减少破碎及提升等不同的运搬工作，掘进的废石也用作充填料。2000水平以下，主要的充填材料是掘进废石。

充填料挡墙

最初，在铲运机出矿点修筑钢筋混凝土挡墙并经“鼠笼式排水管”疏干排水。它们被设计成能够承受120英尺的静水压头，在9×13英尺的巷道中挡墙厚度为5英尺。在第一次浇灌时，采用传感器、压力计、水压表来测定是否确已产生120英尺静水压头。同时每日记录矿浆浓度，充填料制备厂生产时间，以及挡墙处的排水量。

当充填体垂直高度达到挡墙以上110英尺时，在阶段放矿点水压表测得的最大压力是8磅/英寸^{2}或18.4英尺水头。而充填体高度在挡墙以上275英尺时即降至3磅/英寸^{2}或6.9英尺水头。在分段巷道上充填料高度为150英尺时，分段挡墙上压力计测得的最大压力为5.3英尺水头。挡墙的压力被认为是由于“鼠笼式排水管”排水系统的失效而产生的。

地矿网论坛 BBS.3500U.COM

橡胶应变仪用来测量作用于挡墙上的固体压力。记录到的变形为0.01英寸。变形很低说明固体压力很低，这是因为内聚力由水泥很快传给充填料，以及挡墙是设置在进采场的通道的眉线后面3—5英尺的缘故。

排水测量表明，84%的水是由阶段放矿点的挡墙排出的。此外，如果砂浆浓度保持高于63%，充填料上部就不会积水。这就产生小于1的水力坡度，而且由于良好的排水性能，充填料在任何时候都只是部分饱和，这就是说充填料孔隙中的空气泡及表面张力支持着残留水，因而减少了对挡墙的压力。因为有流动，不会出现静水压头情况，所以压力更加减少。

根据以上叙述，可以认为木挡墙能安全又经济地代替混

凝土挡墙。

充填料木挡墙的设计

参数

1．作用于阶段巷道挡墙上的固体压力会由于破碎岩石充填于放矿漏斗而实际上消失。

2．如有四个放矿点或每天有近于4000立方英尺的水，那末每一个阶段的挡墙应设计成能过滤每日流量的四分之一。

3．按计算，作用于挡墙上的压头是：分段巷道上为500磅/英尺^2，而阶段巷道放矿点挡墙则为750磅/英尺^2。实际设计数为1500磅/英尺^2，安全系数分别为3及2。

4．木挡墙的实际排水特性依充填料木格栅的宽度及间隔而变化。依计算得知，用8×8英寸木材作格栅时所需的间距为0.5英寸。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

5．阶段巷道挡墙必须在巷道中设干净的、松散的砂坝，以保证尾矿浆不被流水带走而进入巷道。

6．分段巷道的挡墙设在采场眉线以外6英尺处，使水力充填料形成一个巷道坝以抵抗及重新分配充填料的侧压力。

结合上述参数所推荐的木格栅是一个简单的梁式挡墙，主要由8×8英寸的双横木支撑的8×8英寸的立柱构成。横木用3/4或1英寸直径的钢筋做的螺栓按16英寸间距固定在底板及顶板上。所有挡墙周边的空隙都用水泥或其他胶结物料填塞起来以防止当充填料面高过挡墙时砂浆流失。

如果挡墙高度小于10英尺，不需要安设中间横梁。超过10英尺直到20英尺时则挡墙在二分之一高度处要用8×8英寸横梁加固。横梁两端用U型钉固定，并用锚固于挡墙的采场一侧的顶板及底板上的0.5英寸钢绳固定。钢绳必须绕过横

梁并穿过立柱。横梁的支撑柱间距不超过5英尺。

在安设8×8英寸立柱之前必须先在一个锚固于岩石面上的木框架上钉上搭接的或是两层的麻布。麻布必须搭铺于边墙、巷道底板及顶板并加以固定。

放矿点挡墙装有水压表。水压表的导管是由4英寸直径的水管构成，并带有麻布包裹的有钻孔的短端管。端管置于巷道端部的滤水层的采场一侧。在穿过挡墙以前，4英寸管子换接2英寸管子。

根据图4，实际上现在所用的挡墙与以前描述的挡墙相似，只是水压表端管置于一个顶部敞露、盛有干净过滤砂的"鼠笼式"木箱中，而干净的过滤砂并不布满紧靠挡墙后面的整个面积。在距每个挡墙前面约3英尺处筑一道2英尺高的小水堰用以较精确地测量排水量。在分段上此种小水堰是木结构的。在放矿点，为了使水不进入运输大巷，小水堰用混凝土筑成，形成浅的水仓以便于把水经管线泵送到主放矿水平的水仓去。

随着具有挠性的木挡墙的开始安设，用一个弯曲计来监测木材的弯曲度以检验设计参数的正确性。根据最大的弯曲度计算了水的压力及其相应的水头，所得数字均在设计参数范围之内。木挡墙首先用于分段上。当在此获得了安装及使用挡墙的经验以后，放矿水平也予采用。随着采用非胶结充填的进程，放矿漏斗应用胶结充填料充到50英尺高度，好象篱笆那样以防止液化。为了同一目的，同时要严格监测排水速度及读取压力表数据。

充填料制备厂及输送分配系统

图5是充填料制备厂总布置示意图。锌浮选最终尾矿在

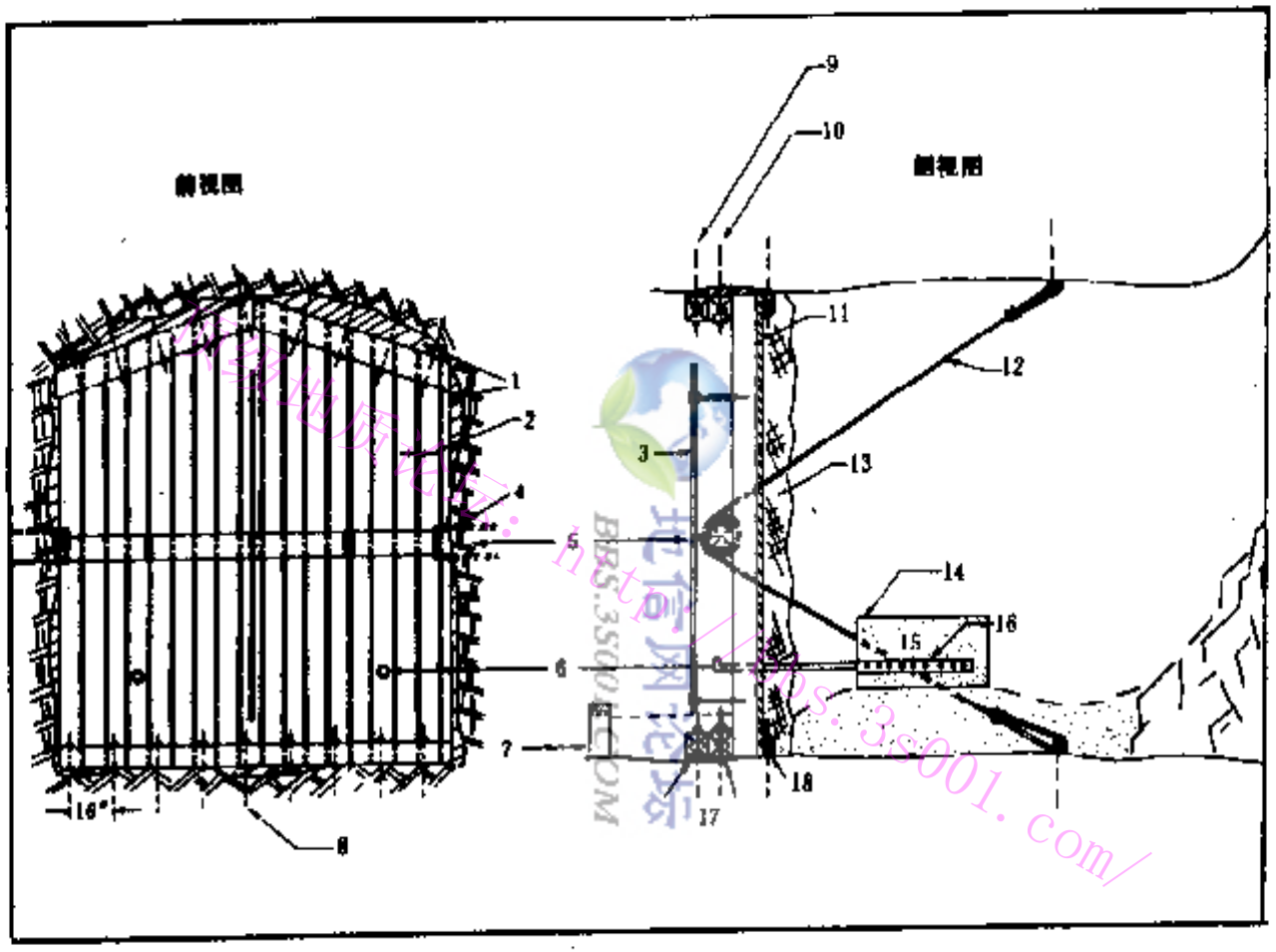
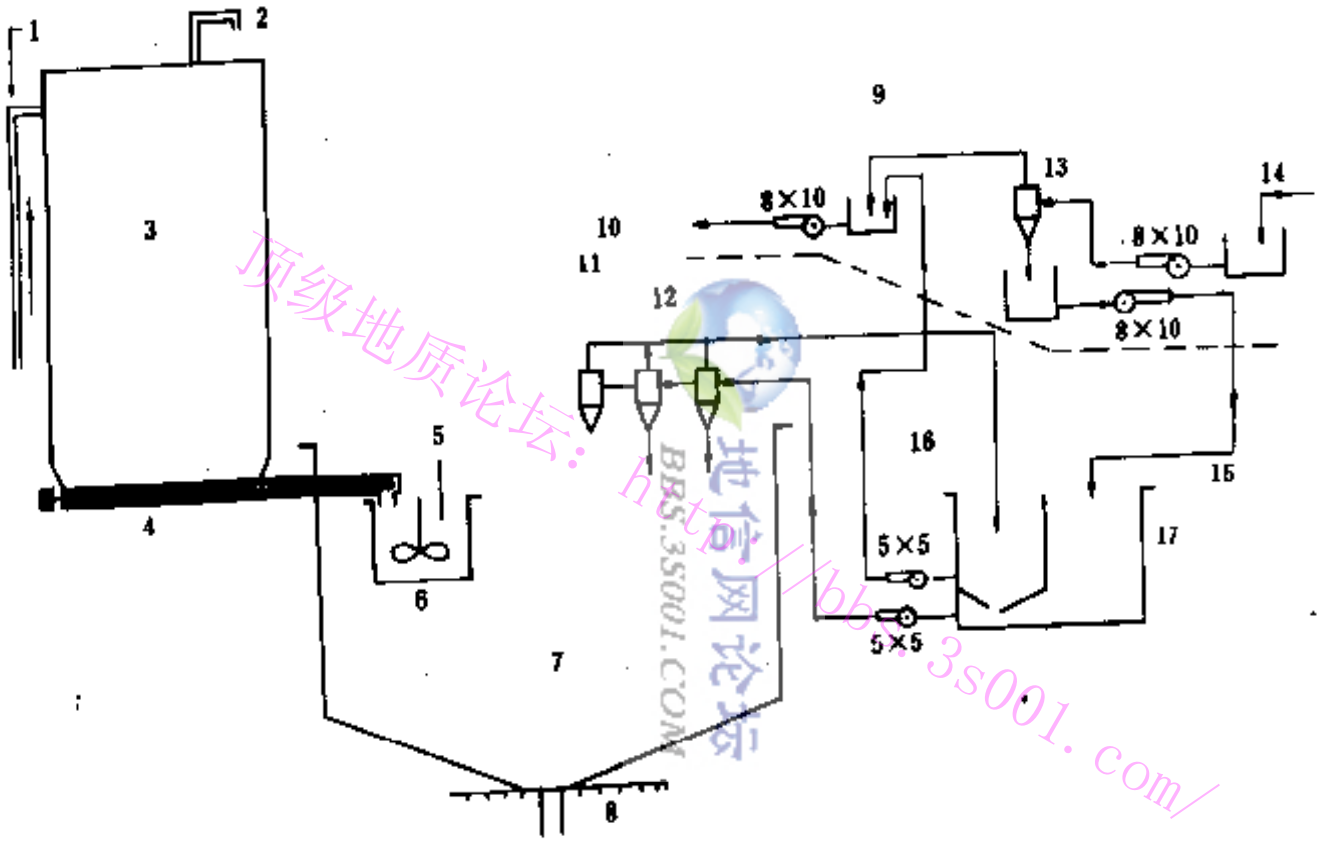


图 4　标准的充填料挡墙

1——麻布固定于岩壁；2——1/2英寸空隙；3——偏移棒；4——U型钉；5——如果挡墙高超过10英尺需水平安装 8 × 8 英寸横柱；6——压力表；7——水堰；8——3/4——1英寸钢筋；9——钢筋；10——锚杆；11——麻布过滤层；12——1/2英寸钢绳锚固于顶、底板并绕过横木；13——麻布搭接在墙上；14——48×24×24英寸"鼠笼"；15——砂；16——4英寸开孔管并用麻布包裹；17——8 × 8 英寸顶及底横木；18　4 × 6 英寸木框。



顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/
地信网论坛 BBS.3S001.COM

图 5　福克斯矿充填料制备厂流程图

1——风力进料管；2　—排气过滤器；3——水泥筒形仓，100吨容积；4——螺旋给料机；5——水；6——水泥搅拌槽；7——分配仓；8——3英寸钻孔，自重输送到井下；9——选矿厂；10——至尾矿池；11——充填料厂；12——10英寸水力旋流器组（共3台，同时只开动2台）；13——20英寸水力旋流器；14——锌尾矿；15——来自选矿厂送至充填料制备厂；16——细泥，至尾矿泵；17——沉淀仓。

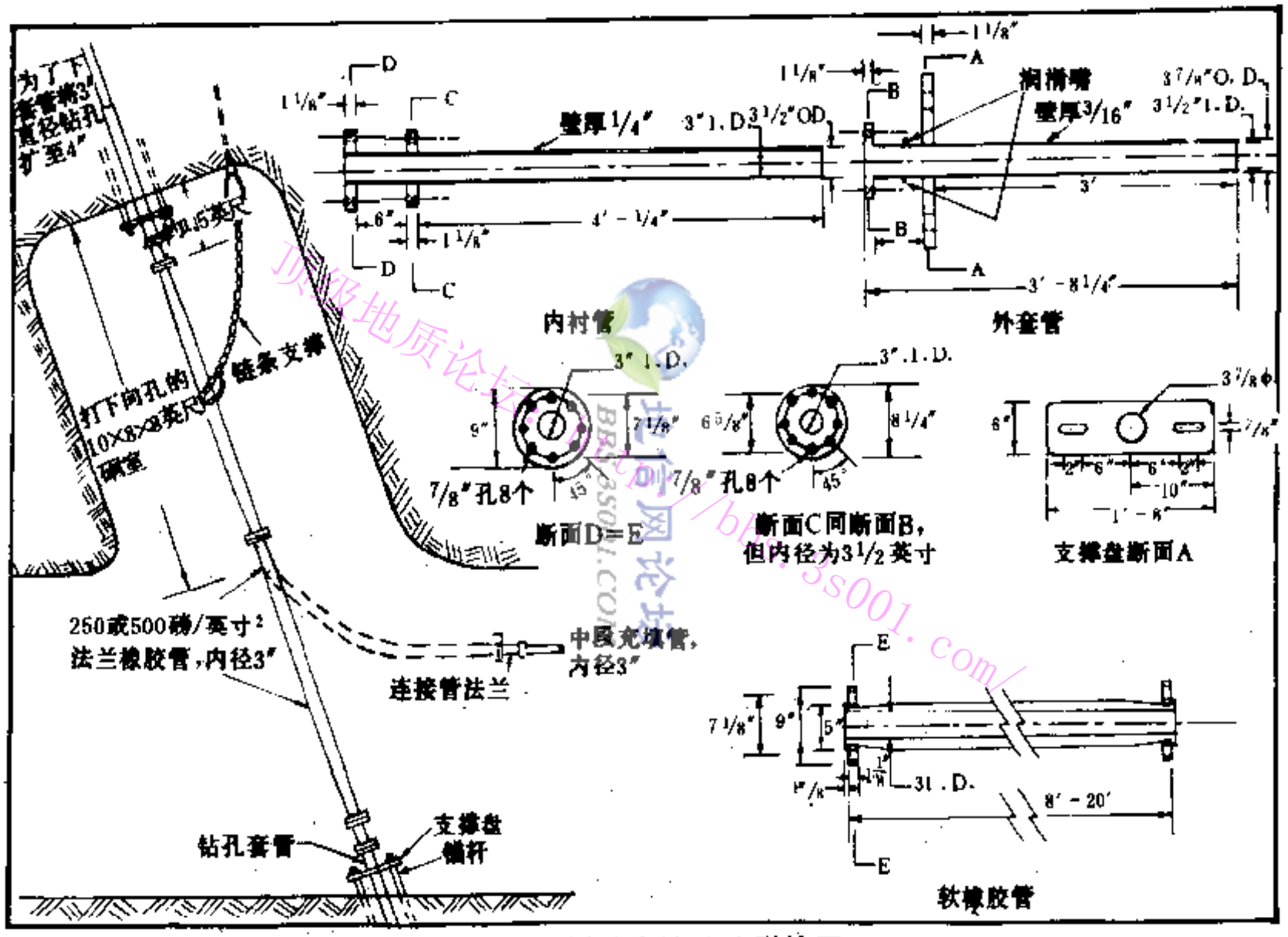


图6 尾矿充填钻孔联接图

顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/

通过选矿厂的两个20英寸克雷伯（Krcb）水力旋流器组后送到充填料制备厂。分级后的尾矿进入厂内的泵箱被泵送至第二级希里特厂制造的直径为10英寸的脱水旋流器组（共3台，同时只使用2台）。旋流器底流被送到与金刚石钻孔相连接的分配槽。钻孔是充填料输送到井下的通道。旋流器溢流被送到泵箱，从那里再泵送到尾矿池去。当用水泥时，干水泥从筒形仓用螺旋给料机给到混合槽，然后把水泥和水的混合料在分配仓内与尾矿混合。

操作全部自动化，并用闭路电视系统不断监视。如遇故障，水力旋流器即短路，操作水泥螺旋给料的液压装置关闭，一个水阀开启，冲洗水进入井下管路历时约5分钟。在故障期间，在充填料制备厂及选矿厂控制室的警报器发出警报。

如前所述，充填料经一个3英寸直径的钻孔自重输送到个别水平。如图6所示，用250磅/英寸^{2}及500磅/英寸^{2}强度钢丝加强软管来实现管道的分岔。支线使用3英寸直径的塑料管或钢管。

在1977年，矿浆浓度维持在72.3%，每小时产出固体物66.7吨。系统中的利用率可达到83%，可浇灌381000吨水砂充填料。35800吨巷道掘进的废石及44600吨砾石充入采场作为水力充填料的补充。

结　语

本文所叙述的充填系统的演变历时已超过了8至10年。理论研究与实验室研究结合，并经现场的仔细测量与监测得出了一套简化而又有效的系统。这个系统费用低，需要劳力少，可生产出令人满意的产品。

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级GIS论坛 http://bbs.3s001.com/

斯特拉思科纳矿胶结充填实践

G.A.毛鲁济*

摘　要

本文叙述和分析了鹰桥镍公司斯特拉思科纳矿在使用胶结充填方面的采矿实践。讨论了几种回采方法的特定例子，以说明充填料的使用、特性及从使用中所获得的利益。当回采一些与老采场毗邻的采场时，充填体在采场侧壁规则地暴露出来，在用深孔爆破法回采两侧矿柱时，充填壁暴露高度达200多英尺，仍然能自由稳立。

地信网论坛
BBS.35001.COM
顶级地质论坛 http://bbs.35001.com/

前　言

鹰桥镍公司加拿大分公司的斯特拉思科纳(Strathcona)矿位于萨德伯里盆地北区。1968年开始生产，年产矿量200多万吨。该矿是在六十年代初期和中期，在大力研究胶结充填时计划建设的。

矿体[1]大体分为三个矿带：

主矿带占原计算矿量的70%左右。该矿带沿走向长约3000英尺，沿倾斜延深约1500英尺。西端矿体向南倾斜约50°，东端变缓到20°左右。可采宽度从10英尺变化到300英尺以上。母

*G.A.毛鲁济(Moruzi)是鹰桥镍矿山有限公司加拿大分公司的斯特拉思科纳采矿工程师。

岩主要是花岗角砾岩。

深部矿带占原计算矿量的20%左右，它比主矿带更深地埋藏在下盘花岗片麻岩层系中。该矿带的长、宽、高各约500英尺。

上盘矿带占原计算矿量的10%左右，由许多分散在苏长岩和苏长角砾岩中的一系列透镜状矿体组成。

基本的开采布置是由42英尺宽垂直于走向的盘区组成，盘区由20英尺宽的矿柱隔开。但在矿山西部，除2750和2500水平间的矿段用深孔崩矿外，一般用沿走向的充填法回采。1969年曾引进方形矿柱充填法，它成为第一步骤回采的主要采矿法[2]，并用到1971年。这时，当各采场采到上部水平的标高时，条形矿柱变为一排排方柱。

充填料特性

尽管其他作者[3]已经详细论述了充填料的特性，但图1

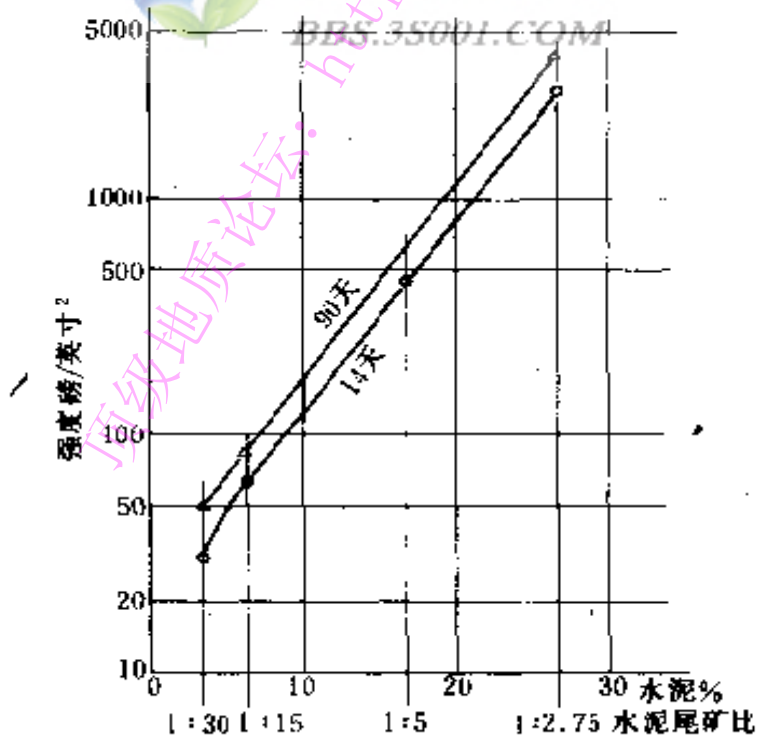


图 1　鹰桥水泥-尾矿充填混合料的单轴强度

和图 2 对鹰桥胶结充填料的特性仍是有益的评述。水泥-尾矿比约1 :30的混合料14天的强度为30磅/英寸^2，90天时强度增加65%，达到50磅/英寸^{2}左右。使用1:15的混合料取代1:30的混合料，90天的强度不会完全成倍增加。表示三轴强度的图 2 只是从四个有关试验（只列举两个圆）推导出来的，使

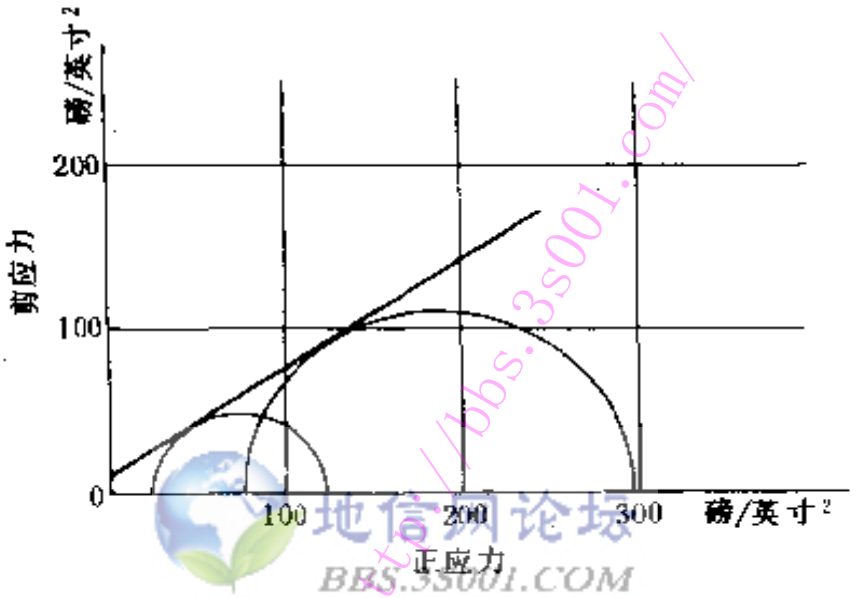


图 2　1:30水泥-尾矿混合料28天的莫尔图

表 1　粒　　径

泰勒筛序、网目	筛上物的平均粒径，毫米	筛上产品留存量，%
28	0.520	3.0
35	0.356	6.0
48	0.251	11.0
65	0.177	14.7
100	0.126	17.0
150	0.086	16.3
200	0.063	8.9
270	0.049	6.8
325	0.035	14.7
325	0.006	1.6

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛: http://bbs.3s001.com/

用时必须注意。图中，25磅/英寸²的侧限压力，会使充填体强度增加到125磅/英寸²；75磅/英寸²的侧限压力，会使强度增加到300磅/英寸²。

表1是斯特拉思科纳矿充填料的粒度分析。粒径的加权平均值为0.14毫米。

一般的充填实践

采用水砂充填时，水的控制具有头等重要意义，所有采场应备有良好的脱水系统。这些系统是设在充填法采场中的人行道和在空场法采场内的3英寸多孔的排水管道，并用塑料纤维布把靠近0.5英寸孔的夹板裹好，夹板的规格为1×0.5英寸。每个深孔爆破采场，从顶部到底部至少有四条这样的管道。在充填砂浆注入采场的地区应有两条管道，而另两条管道则铺在充填时充填料面可能出现的低洼地方。矿柱充填时脱水设施不是很关键的问题，因为水还能流进破裂的上下盘岩石中和毗邻的老采场充填体中。尽管如此，还是要象矿房那样安装脱水管路。一般水的渗透率每小时约为4.5英寸。胶结充填料中，水的含量将影响充填体的极限强度。因此，在大量浇灌胶结充填料时，砂浆重量浓度应在62%以上，最好在67%以上，浇灌每层底板的砂浆浓度为68%。

水平分层充填采场一般采用1:32的水泥尾矿胶结料充填。采场底板则用1:8的水泥尾矿混合料，它占整个采场充填量的10—12%。

在计划阶段和直到现在，一直选用胶结充填作为各种采矿法的充填料。因为：

（1）预期能较好地支承岩石压力，减少地面沉降量和岩爆危险性，方柱水平分层采矿法的成功显示这种预计是正确

的；

（2）不需沿矿柱壁筑废石隔离墙；

（3）回收遗留的房间矿柱时，可用深孔崩矿法取代方框支柱法或下向充填法；

（4）能防止主干道、运输道、人行道由于爆落矿石直接冲击到这些木框架上面或相邻的底板而引起的破坏；

（5）避免了新充填料的排水从主干道、运输道和人行道上面或邻近的地方冲刷老充填体。

水力分层充填法的实践和效果

图3所示为典型的方柱水平分层充填法采场平面图。东侧为房间矿柱，同样地西侧为26-24-25采场，该超前采场已采到房间矿柱边界线。当26-26-27采场顺次切采时，即按一定间距切割其西侧的间柱，从而留出一排规则的方柱。同样，在切采东侧的滞后采场时将把26-26-27采场留下的间柱切割成方柱。每次切采爆破时形成中心矿柱。滞后采场在每一个方柱间的切槽都暴露出充填体来。充填体能很好地自立。充填料不论是在充填体中，还是在底板中明显地分层，底板的实际位置主要靠沿老矿柱线残留的崩落矿石来确定。这些切割槽所暴露的充填体高度达25英尺，超前采场正在充填的底板比滞后的采场顶板高20英尺到30英尺。如果不保持这一高差，超前采场的充填水将流入滞后采场。

还发现1:8的胶结充填料可用来加强20×20英尺方柱的强度。该方柱由于爆破超挖、岩石破坏或其他原因，尺寸已显著减小。必要时，当矿石发生意外错动，需要一个新方柱支撑，但又没有作准备，就可用高强度的充填料作方柱的基脚。

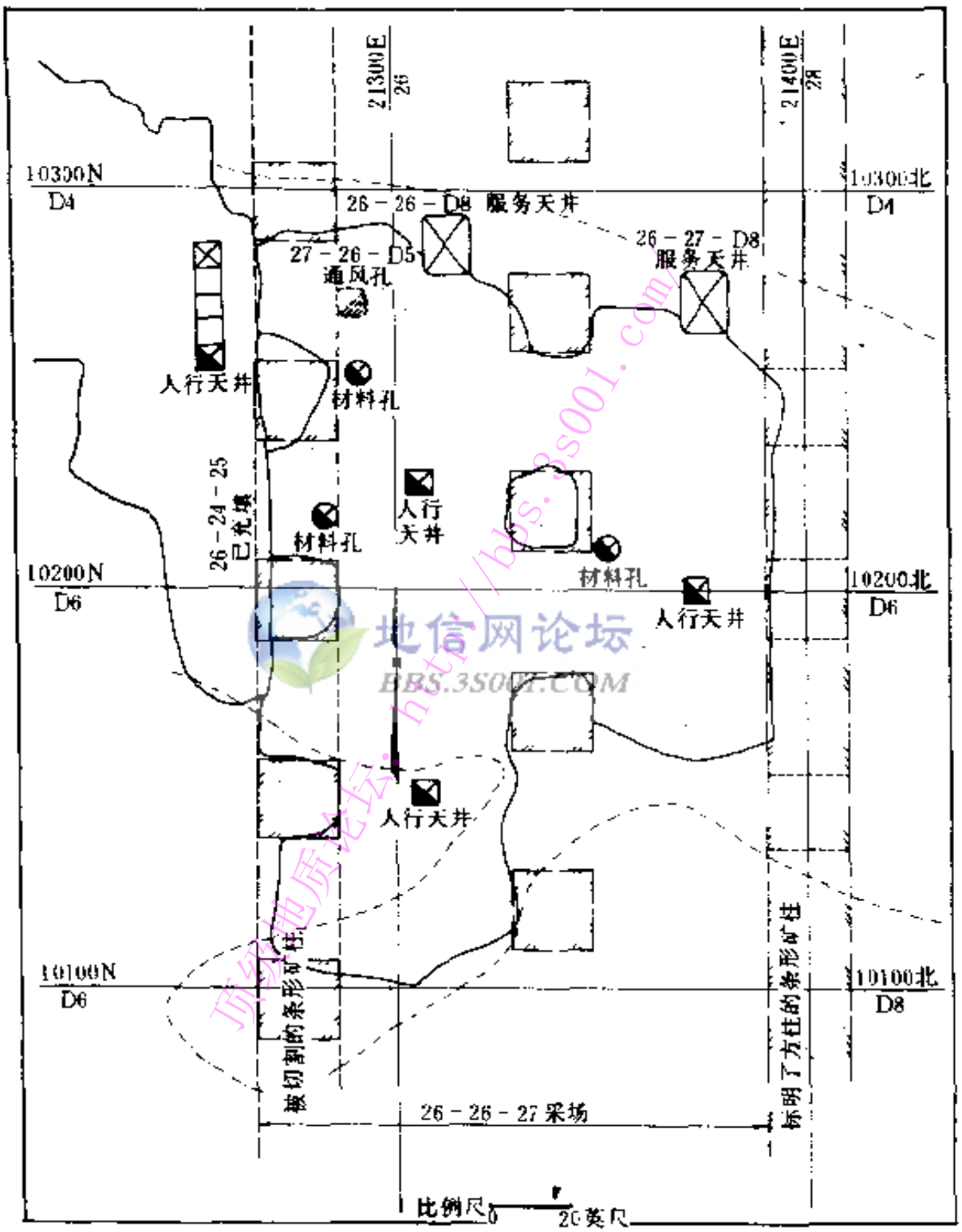


图 3　26-26-27采场典型的“方”柱水平分层充填法铲运机出矿的平面图

特别要提及的是方柱法开采时，灰砂比为1：8、厚度为9—12英寸、每隔9—12英尺构筑一层底板，对矿柱起着水平加固构件的作用。这时，可把它视为一个整体支撑系统的组成部分。采场浇灌点沿每个盘区的中心线分布，可使这一支护系统进一步增强。因充填料中含水泥量高的细砂向矿柱方向漂流，可填充到各方柱中以及方柱周围早期已形成的裂缝中去。

深孔爆破充填法实践和效果

斯特拉思科纳矿有两个采区采用深孔爆破法采矿：

在2750和2500水平之间的西部矿体，大约在20450 E到20950E剖面之间（图4和图5）；

深矿带的房间矿柱（图6和图7）。

在西部，27-10-EO，12-EO和15-EO是矿房，27-11-EO和14-D 9是矿柱。这是原先设计的深孔爆破采场。目前我们正设计和准备用深孔爆破两个矿房和三个矿柱来回采东部余留矿块。如图4所示，所有这些矿房和矿柱均被充填。用纯尾矿和两种混合比的胶结料来确定最好的充填料。直至1979年秋季，准备充填27-14-D 9矿柱时，才能作出最终抉择。图5表示27-11-EO矿柱的断面及其在矿井的相对位置。矿柱尺寸厚60英尺，长200英尺，高250英尺。用直径$2\frac{1}{8}$英寸的深孔后退式分段法自上而下回采。如果相邻的充填体破坏，矿石损失将会最小。该区爆破主要使用铵油炸药。

27-11-EO矿柱的矿石在1974—1975年爆破放出，1976年充填完毕。值得注意的是：虽采场顶板冒落高度达250英尺以上，但在放矿点放出的充填料却很少。尽管不可能准确地

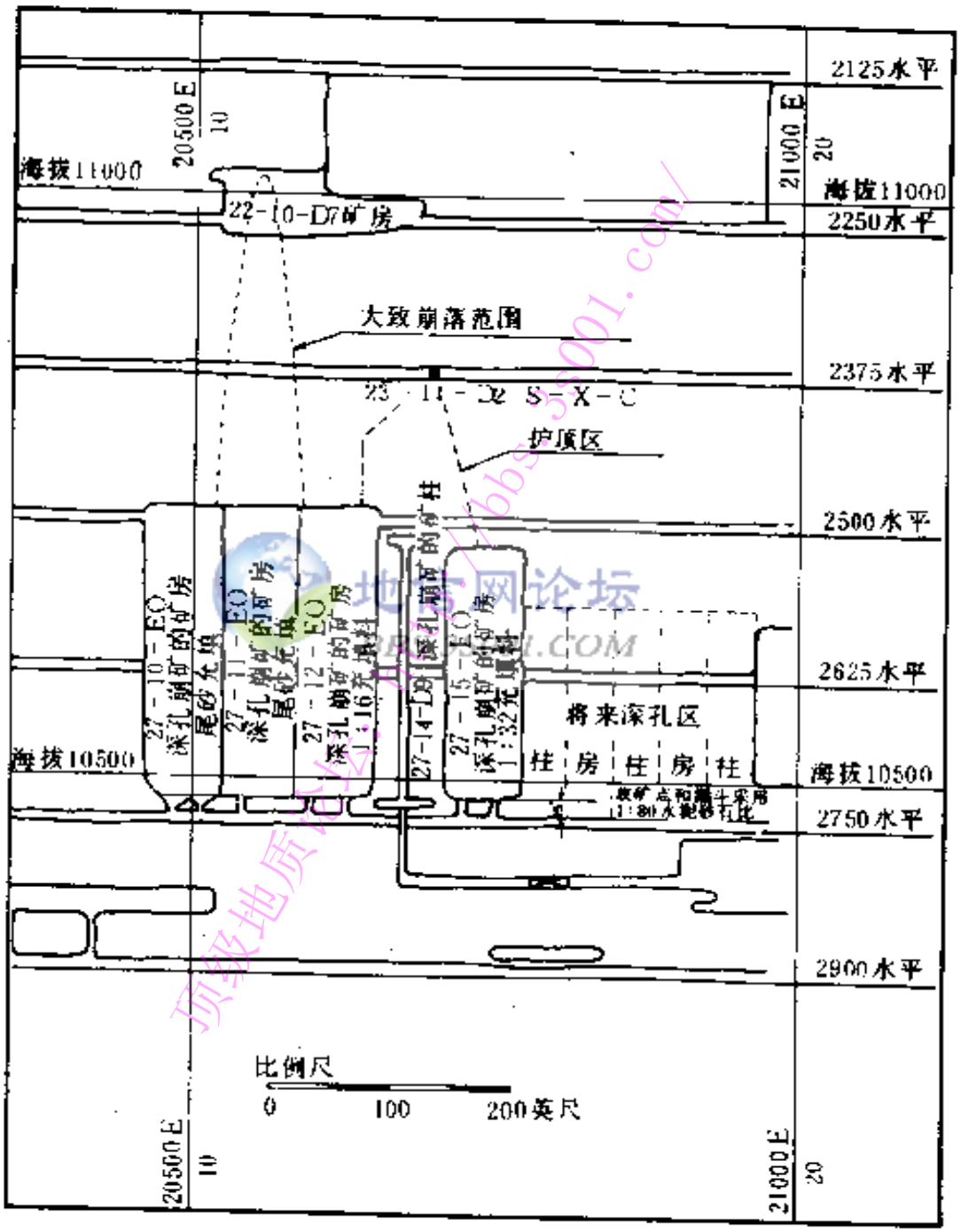


图 4　表示西部深孔采场总布置的矿山纵剖面图

地学网论坛 BBS.GEOL.COM
顶级地质论坛 http://bbs.55001.com/

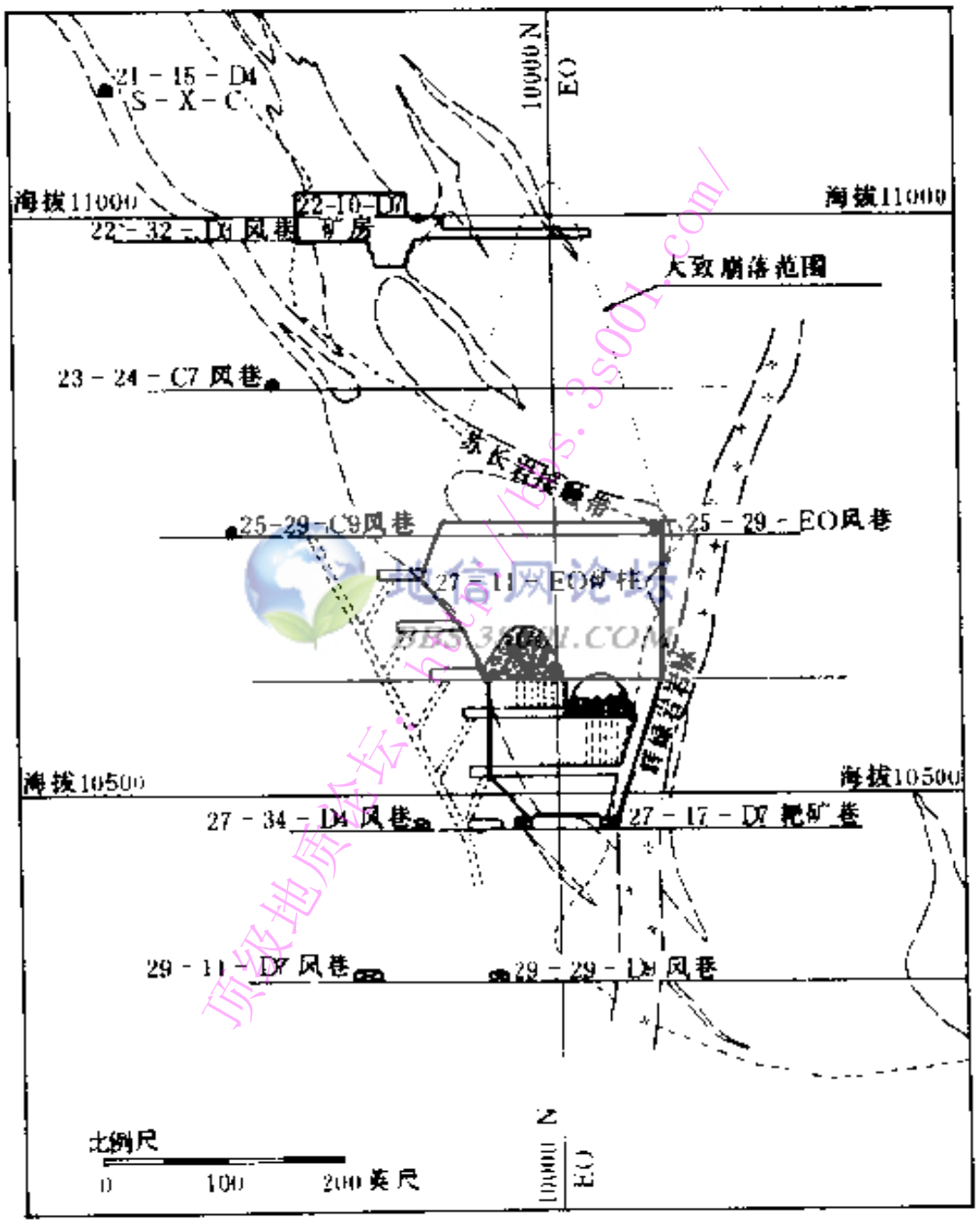


图 5　深孔爆破的27-11-EO矿柱的剖面图

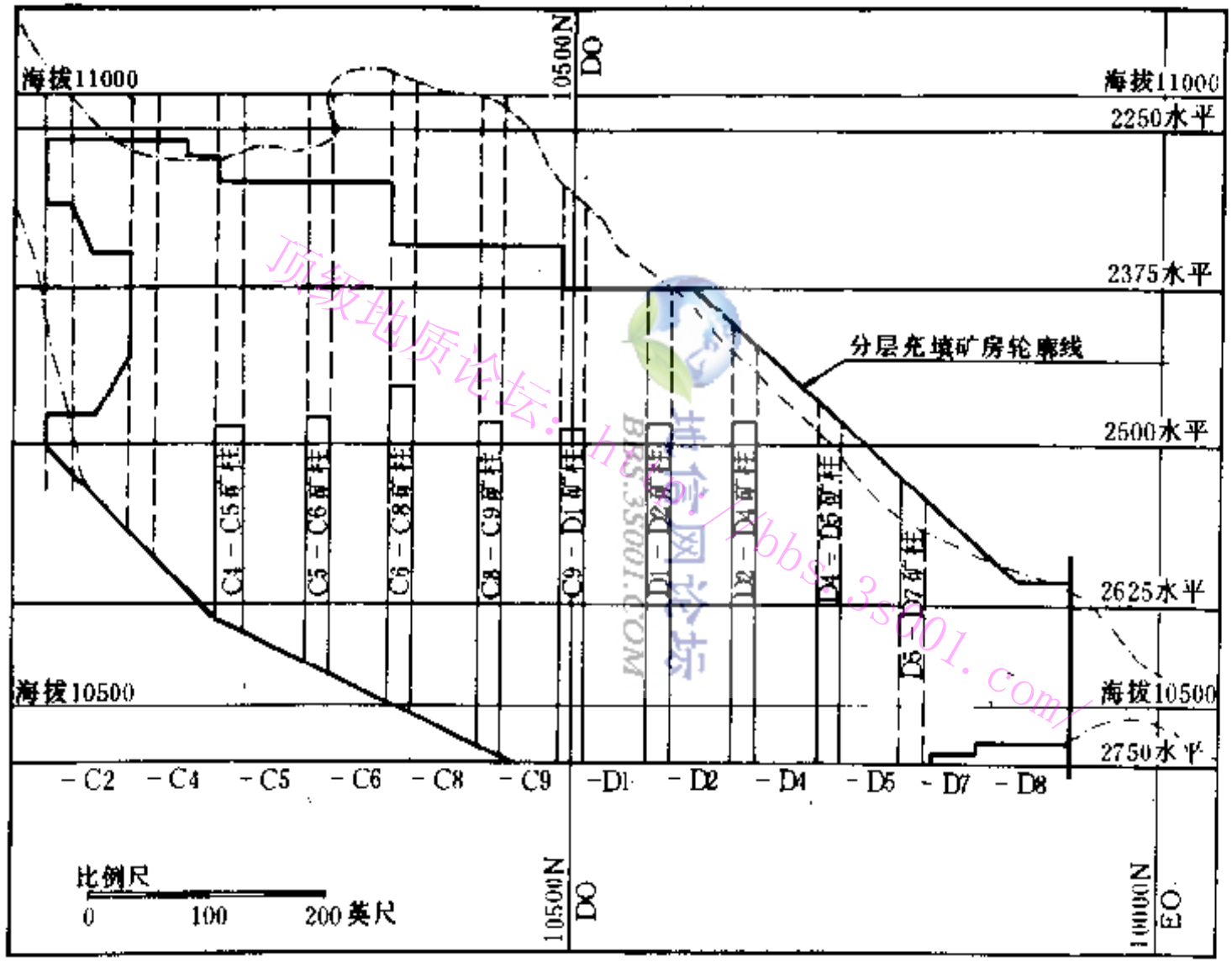


图 6　表示深孔垂直后退法回采房间矿柱相对位置的深矿带采场横剖面图

顶级地质论坛：http://bbs.35001.com/
BBS.35001.COM

测定落下多少充填料和哪个充填壁已破坏，但与冒落岩石相比是很少的。一旦废石开始连续出现于放矿点，则要用纯尾矿充填矿柱。最后的浇灌是从22-10-D7采场经过钻孔进行的。

通过对该主要矿柱回采所获得的经验，对27-14-D9矿柱采用了钻头直径为6$\frac{1}{2}$英寸的潜孔钻机凿岩。精心地分段并逐步爆破成切割槽，预期会得到好结果。因为一方面矿柱两侧有胶结充填体，另一方面该区段的顶板已用砂浆锚杆加固了。从23-14-D2S石门在矿柱全长上安装了一些长达140英尺的扇形钢绳锚杆。矿柱上部切割巷道顶板进一步用30英尺的灌浆锚杆支护。

如上所述，深部矿带用普通和方柱水平分层充填法回采。间柱留在2750和2500水平之间。这些间柱有90万吨左右的可采矿量，原设计用下向充填法回采。该法进度慢，花钱多，故在27-D5-D7矿柱试用了水平分层充填法，十分成功。但由于矿柱中心部位的岩石相当不稳固，故在2625水平以上区段必须采用方框支柱。尔后，27-D4-D5矿柱按分段深孔采矿法做准备。矿柱分两个区段回采：西段宽22英尺、长85英尺、高188英尺；东段宽22英尺、长230英尺、高175英尺。同样，充填壁问题不大，从壁上垮下的充填料不超过5—7英尺。遇到的问题是钻孔塌落或岩层很破碎。

回采27-11-EO和27-D4-D5西矿柱以后，计划用深孔爆破法继续回收深部矿带的全部矿柱。对直径6$\frac{1}{2}$英寸深孔的使用，特别是在垂直后退法中的使用进行了评价。该法优点很多，并被定为回采剩下的7个矿柱的标准方法。1977年初

就成功地回采了27-D 2-D 4矿柱的试验盘区（图 7 ）。目前正在回采27-C 9-D 1矿柱相类似的盘区。 8 年多的时间，西部所有这些矿柱都将用宽22英尺、长100英尺、高200英尺的盘区回采。东部矿柱回采的盘区尺寸有所减少。这些盘区有的可合并为一个较大的盘区。

27-D 2-D 4矿柱的 1 号盘区的锥形漏斗是用改进的阿沃卡（Avoca）倾斜沟形工作面分层充填法形成的，从而使采准工作量最少，并获得最高的矿石回收率。这一盘区分两个区打眼，一个在26-D 2-D 4凿岩穿脉的下面，另一个在穿脉上面。2600水平凿岩穿脉以下厚30英尺的底柱用一次爆破崩落。由于正在试验垂直后退爆破法，由于木垛支护的人行道布置在矿柱壁 6 英尺以内，因此，大约有10英尺的充填体从每个相邻采场中崩落出来。然而，当26-D 2-D 4凿岩穿脉以上再继续用分段爆破时，充填体壁就会被带下来，这时估计总贫化率平均为30％。根据试验的情况，这一贫化率可认为是令人满意的。在这里，重要的观察结果是第一期水平分层充填法矿房的充填体能很好地经受多次爆破的能力，以及与改进后的采矿步骤相适应。

结　　语

低达1:32灰砂比的胶结充填料已在鹰桥镍有限公司各矿正常使用了15年左右。这种充填体在水平分层充填法采场连续暴露，贫化很小。在斯特拉思科纳矿，已经以满意的贫化率回采了不同水泥含量充填料所包围的两个矿柱和另外两个矿柱中的两个盘区。在矿柱采空后依次充填之前，充填壁暴露高达250英尺，暴露的时间可达数月之久。

参 考 文 献

[1] Cowan, J. C., Geology of the Strathcona Ore Deposit, CIM Bulletin, Jan, 1968.

[2] Cleland, R. S., and Singh, K. H., Development of "Post" pillar Mining at Falconbridge Nickel Mines Limited, CIM Bulletin, April 1973.

[3] Espley, G. H., Beattie, H. F., and Pasieka, A. R., Cemented Hydraulic Backfill Within the Falconbridge Group of Companies, CIM Bulletin, Sept, 1970.

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

国际镍金属公司桦树矿108深孔回采法采场的充填系统

R.W.克尔*

摘　要

桦树（Birchtree）矿从地表钻凿充填井为特征的充填系统，可以利用矿山开采出的废石作为深孔回采的大采场的充填料。目前，采场已从2300水平上采到1900水平。所用的充填系统提高了采矿能力及劳动生产率。本文概述了充填系统的设计、开拓和管理，以及它对所用的采矿方法所作出的贡献。

地质网论坛 BBS.3S001.COM
资源地质论坛：http://bbs.3s001.com/

前　言

国际镍金属公司经营着一个位于加拿大曼尼托巴省温尼伯以北400航空英里的汤普森矿（Thompson），它是一个镍的开采、选矿、冶炼及精炼的联合企业。公司曾进行了多年的勘探工程，于1956年在本地区发现了矿床。同年国际镍金属公司与曼尼托巴省订立协议，着手建造采矿和加工的设备并建设一个居民镇和服务性设施。1961年3月在汤普森开始了电解镍的生产。

现有人口超过18000人的汤普森城是工业和政府的一个

*R.W.克尔（Kerr）是国际镍金属公司矿山计划工程师。

区域性分配及服务中心。

现有三个生产矿山：汤普森矿位于汤普森南3英里处，生产能力为日产6500吨，用上向水平分层充填法及下向水平分层充填法开采；派浦(Pipe)露天矿，位于汤普森南20英里处，生产能力日产5000吨；桦树矿，位于汤普森南6英里处，生产能力日产3000吨，采矿方法采用深孔空场法及上向水平分层充填法。在1977年末桦树矿停产，1978年汤普森矿及派浦矿处于减产状态。

1972年为探索高产量的采矿方法，桦树矿选择了一个适用深孔回采法开采的矿块。本文将叙述充填系统的布置及其对这个矿体的有成效的开采所作出的贡献。

地　质

桦树矿床赋存于块状和浸染状的硫化矿脉中。倾角一般很陡。厚度由几英尺到150英尺。矿化为在片岩、变质沉积岩及片麻岩中含磁黄铁矿与镍黄铁矿、及少量的黄铜矿，并常伴生有蛇纹石化橄榄岩。

位于2300及1500水平之间、矿量略少于100万吨的108矿体（图1及图2）的一个矿块被选定进行深孔法回采。矿体厚度变化于10英尺至50英尺。在走向长度650英尺范围内，倾角稳定于70°左右，矿石及围岩相当稳固。

采　矿

采场设计

桦树矿最初设计用常规的水平分层充填法开采，中段高200英尺。后来在开拓过程中改变为机械化充填法，采用采场台车及柴油铲运机开采。

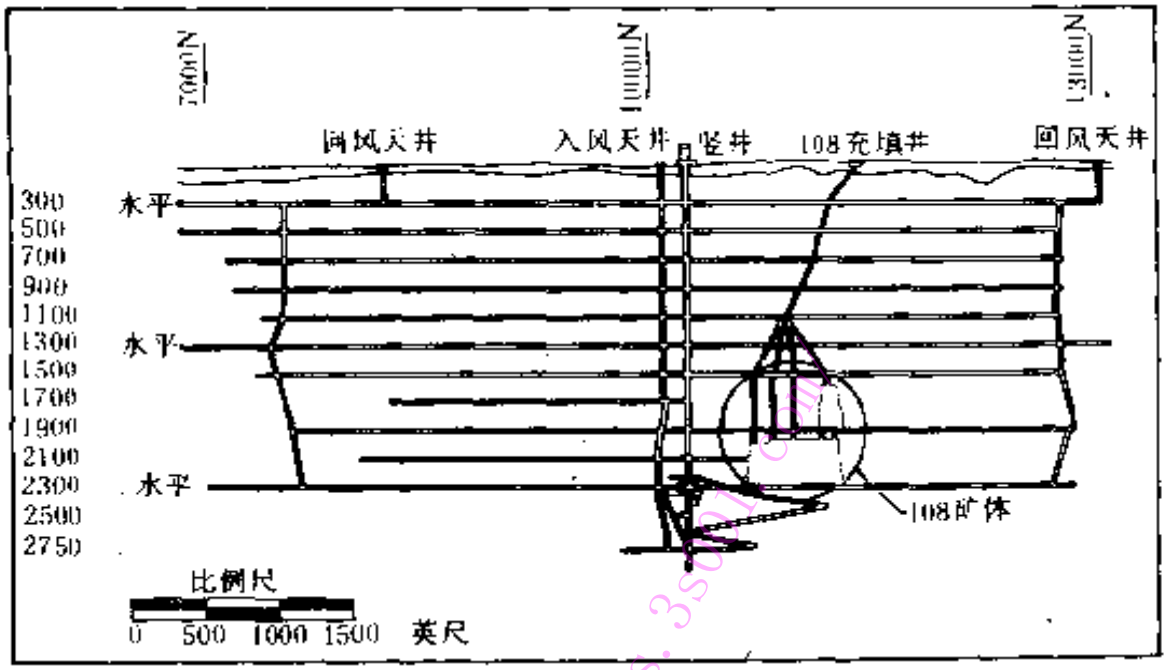


图 1 桦树矿的纵投影图

为了从有限数量的采场获得较高的生产量，在一个800英尺高的矿块内，根据下述条件改用深孔回采法回采。

1．日产600吨至700吨，矿块矿量至少可以生产四年的时间；

2．现有的采准工程可以利用；

3．充填法的回采还在初期阶段，在2300及1900水平只采了大约三个分层（25英尺）。

在2300水平把下盘的回采巷道刷大，使之适合使用5立方码的铲运机（见图3及图9）。在上盘也掘了回采巷道以提高回采率。由1500至1900水平及1900至2300水平在矿体中钻凿了5英尺直径的采准天井，还钻凿了服务天井，直径6英尺。

在矿体中靠上盘开垂距约为60英尺的分段巷道。矿体较窄时，把这些沿脉巷道刷大到下盘以便打下向炮孔（见图4）。

地层支护

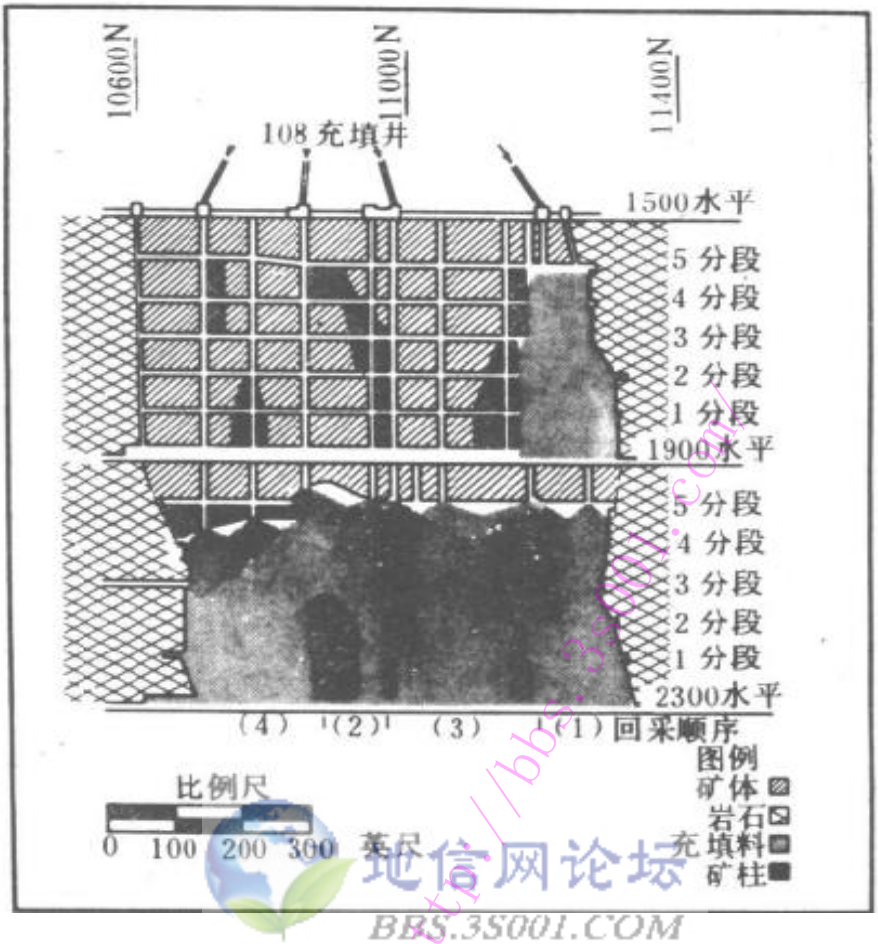


图 2 桦树矿108采场的纵投影图（1500—2300水平）

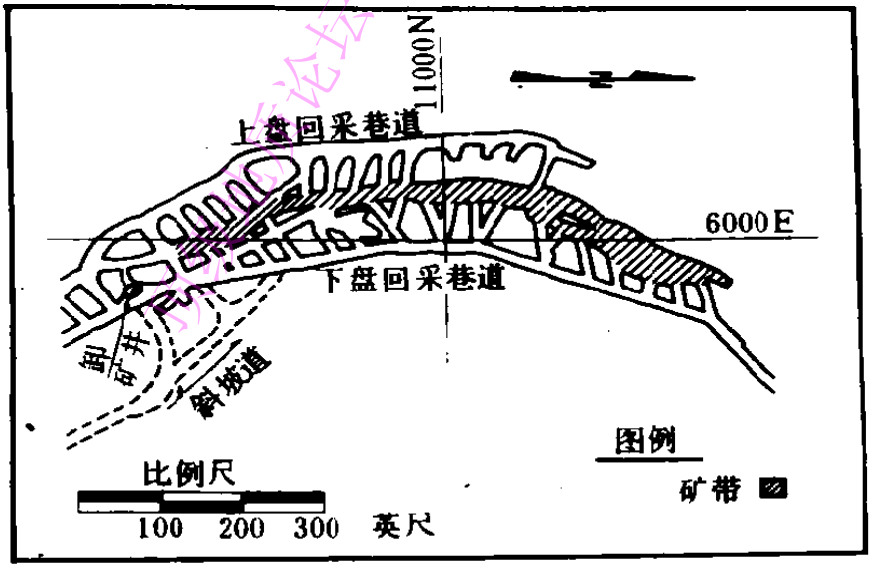
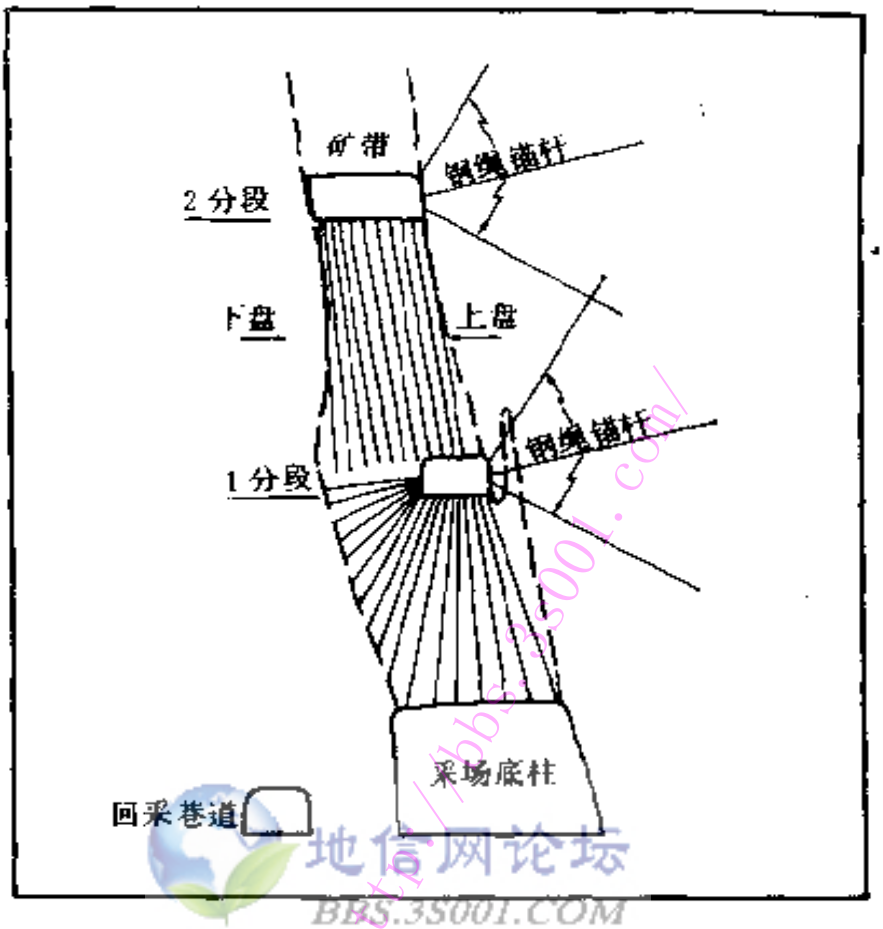


图 3 2300水平108采场平面图



地信网论坛
BBS.3S001.COM

图 4 108采场典型横剖面图

在每一分段巷道，上盘以中心间距为8英尺布置三根长50英尺的一组钢丝绳锚杆（见图4、图7及图8）。把钢丝绳锚杆固定住、张紧，并将其全长灌入水泥固结。留下的矿柱见图2。

凿岩、爆破及装岩

首先从2300水平矿体北端的第一分段开始回采（图2），以直径2英寸的垂直炮孔向切割槽方向进行爆破，由北向南后退回采。回采工作继续从第二分段向上进行到第五分段，四个矿块按顺序回采（见图2）。

产量扩大了四倍，这就要求增加贮矿仓及运输能力。在

2300水平以下靠近采场处开凿了一个200吨的矿仓（见图3的卸矿井）。从矿仓到2300水平以上100英尺的主要溜矿井开凿了一个运输斜坡道。矿石用20吨汽车由矿仓经11%坡度的斜坡道运到卸矿井。

充填系统

充填井开凿

为了保证所用的采矿方法获得成功，矿块采空后须立即充填。

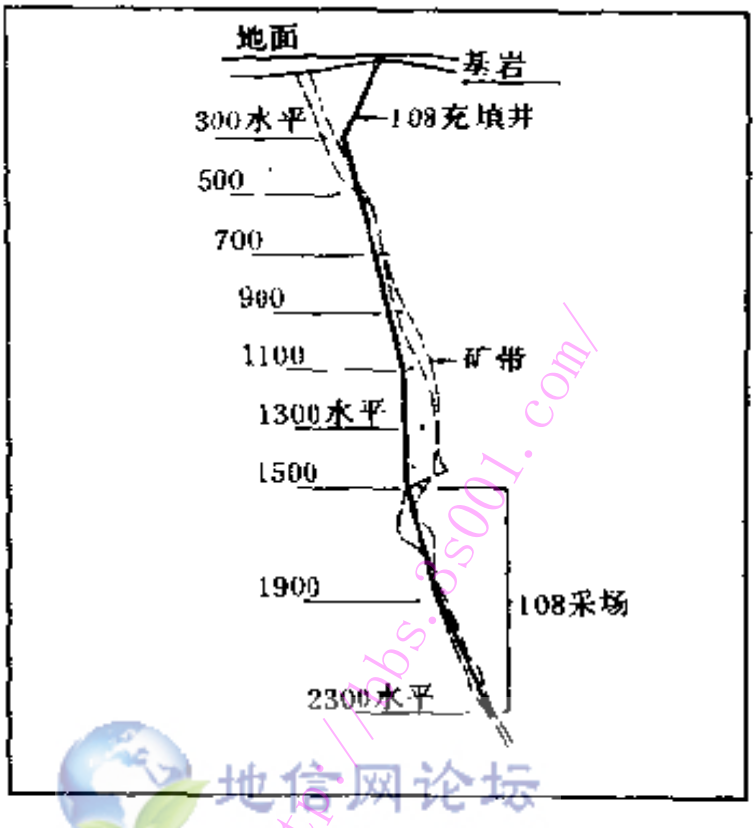
设计

从地表到1100水平钻凿了一组5英尺直径的充填井（见表1）。地表充填井位于距矿体上盘200英尺处，因该处表土层厚度最小，只有30英尺。从300至700水平的充填井由上盘经过矿带无矿部分穿入下盘。从700水平起，充填井近似平行于下盘向下延伸，并在1500水平终于穿过矿体（图5）。从1100至1500水平钻凿四个扇形充填井，以便为108矿体的整个走向长度服务（图1）。从1500水平往下，充填井便有着双重的采准作用。例如在1900水平，充填料通过以后用作第三矿块的切割井的天井放到第一回采矿块（图6）。

充填井口砌筑内尺寸为10英尺×14英尺，高17英尺的钢筋混凝土锁口圈，并在其表面敷设3英寸的耐磨钢板以保护混凝土。安装三根WF钢梁做格筛。

精度

在多数情况下，导向孔口定位时其倾角比设计的稍大，这主要是根据地质构造和以往的经验确定。不作方位角校正。在导向孔穿透之前下部坑道已经打好。钻进偏差可调整到5英尺以内。有时需要稍微把它刷大以保证充填料溜行通畅，



地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

图 5　108充填井示意图

表 1　充填井钻凿

段　　高	长度，英尺	倾　　斜　　度			
		设　计	孔口定位	全　　孔	扩孔日期
地表至 300水平	292	56°56′	56°56′	55°56′	72年 9 月
300至 700水平	440	59°44′	60°08′	—	73年 6 月
700至1100水平	447	58°58′	60°12′	57°41′	73年 7 月
1100至1500一分段	475	56°11′	56°40′	55°40′	73年 9 月
1100至1500二分段	399	83°44′	84°30′	—	73年10月
1100至1500三分段	439	61°17′	62°17′	—	74年10月
1100至1500四分段	398	78°13′	79°13′	—	74年12月

扩孔的平均速度为3.3英尺/小时。

导孔的平均钻进速度为10英尺/小时。

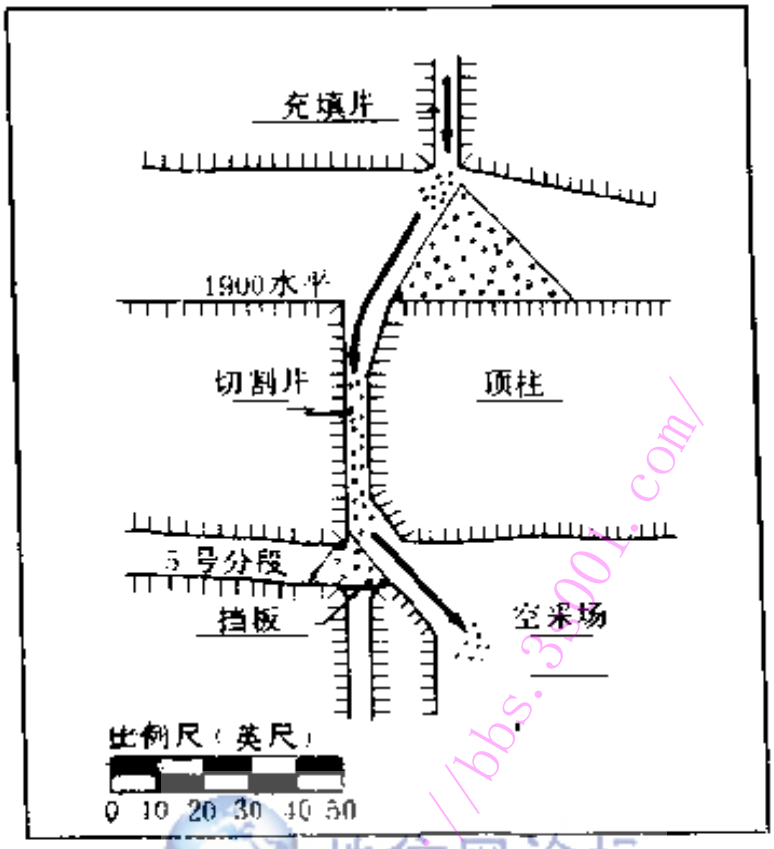


图 6 典型充填料分配图

或者安装扩孔器。

钻井作业

充填井钻进应和其他天井钻进一起优先完成。

充 填 料 分 配

可资利用的废石堆

在矿区内有过去形成的废石堆可以利用作充填料，因而不需再花原料费用。这些废石堆紧靠充填井，只要用装载机运搬即可。

地表废石运搬

地面废石用 5 立方码前端装载机以 8 小时工作班运1000吨的速度放入井下。装载机和冬天使用的松土机的费用是唯

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

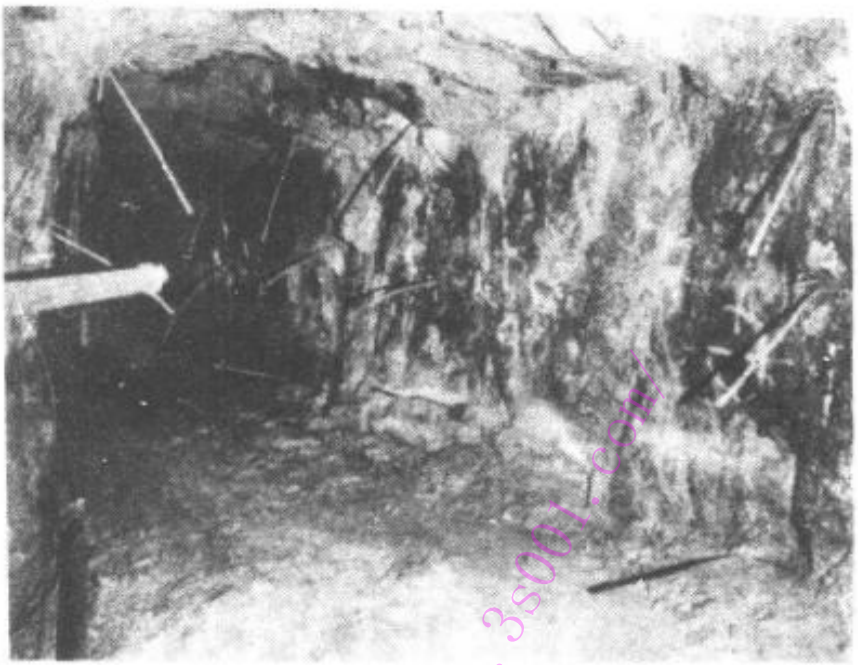


图 7　用钢丝绳锚杆支护的分段巷道，在第五分段上打五个锚杆以加强顶柱的支护

一的运搬费用。

分配

所用的充填方法要求2300至1900水平的矿体先采。因此必须做好采准、凿岩、爆破及充填等工作的协调安排，以便做到仅从一个水平就能够生产足够的矿石。根据需要量从地表供给废石，只需用木板在1100水平把充填井中的三个井盖住，就可以把废石下放到需要充填的矿块中去。

废石胶结充填

当2300水平的1号矿块用废石充填到高度达30英尺时，曾用6:1砂灰比的砂浆沿矿柱进行浇注以固结废石充填料，砂浆不受粗粒充填料的阻滞。以后把废石充填高度增加到60英尺，再浇注砂浆。此时，砂浆搅成糊状，没有渗入充填料中。为了不影响生产，因此停止上述试验而改为只用废石充填料来加速第一矿块的充填。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

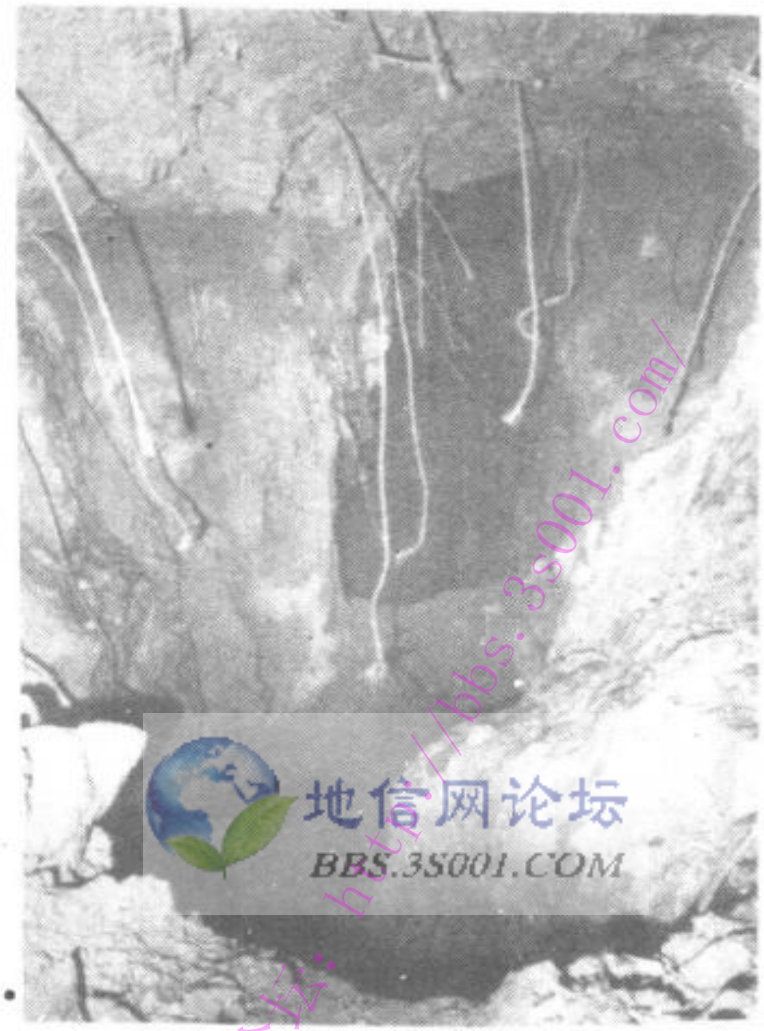


图 8　1500水平下的第五分段的矿脉，
矿已采完，空区已部分充填

当第二矿块等待充填时，在废石料中掺合了水泥砂浆以改进充填料的固结程度。每2500吨废石加入500吨10：1 砂灰比的砂浆，胶结情况不够稳定。在两次试验后，决定停止加入胶结充填料。废石充填料被破成细粒部分，不能保证足够的孔隙度（图10），因此决定用废石只作充填介质。

为了补偿废石充填料脆弱的胶结性，曾留下许多不规则的矿柱来把采场分隔开来。除少数情况外，矿柱都留在矿脉很窄及品位低的地方。



图 9　左边是回采巷道，右边是放矿点

费　用

废石充填与汤普森选厂尾矿充填的费用比较见表 2 。

表 2　废石与尾矿充填费用比较表

1．废　石　充　填	每吨矿石的充填费用，美分
掘到1500水平充填井的费用，每英尺65美元	20
地表矿石运搬	15
冬季松土	15
夏季每吨矿石费用	35
冬季每吨矿石费用	50
2．水力尾矿充填	**每吨矿石的充填费用，美分**
汤普森选厂水力旋流分级及过滤	12
运至桦树矿的汽车运费	14
在桦树矿的尾矿运搬费	15
砂料置放人工费	15
充填料制备，混凝土挡墙及排水费	15
总费用	71

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

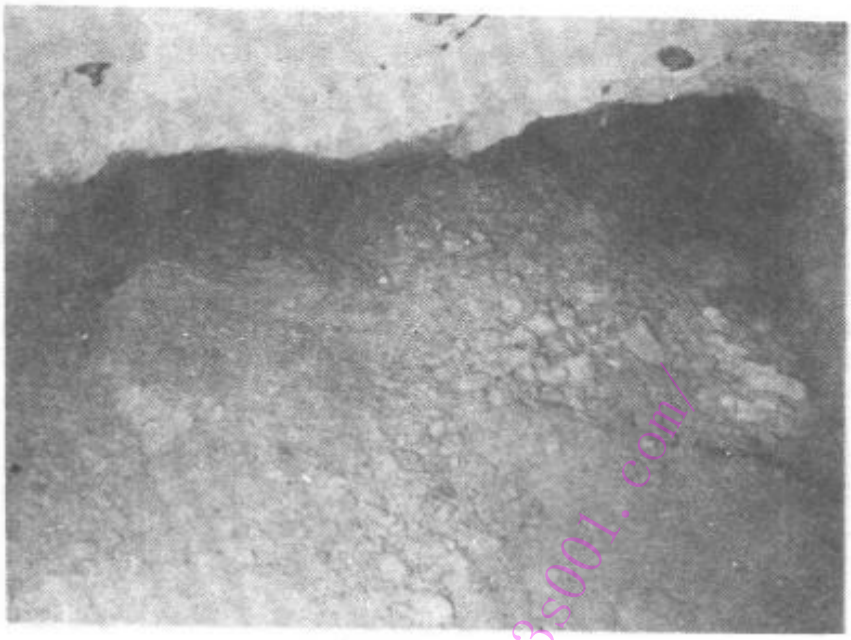


图 10　废石充填的放矿点，注意充填料的细粒度

结　语

1．天井钻进法开凿的充填井系统对深孔回采矿块能提

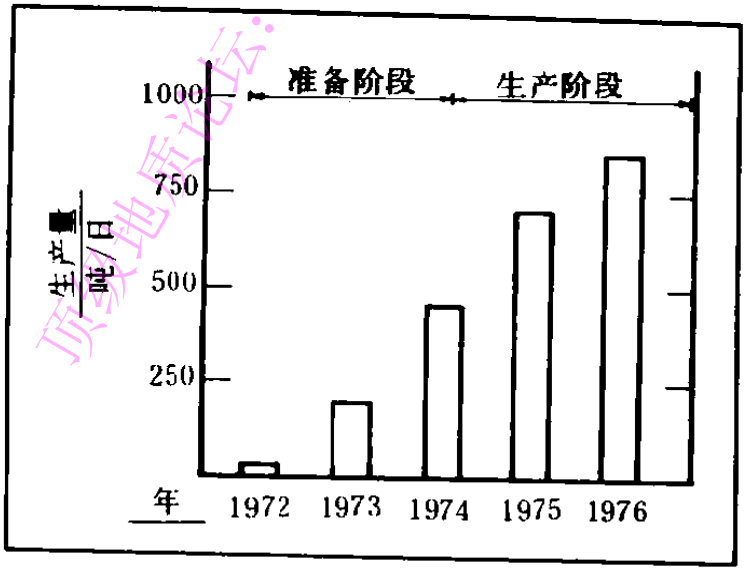


图 11　108深孔法采场矿石生产能力

地信网论坛
bbs.3s001.com
原发地质论坛：http://bbs.3s001.com/

供经济的和能力大的充填料分配系统。

2．快速地充填深孔回采采场能很好地控制地压和保持较高的开采强度。

目前，1500及2300水平之间的53％的矿石已经以平均日产670吨的速度进行生产（见图11）。

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

芒特艾萨矿采场充填的发展

F. J. 莱希　R.考林*

摘　要

在芒特艾萨矿业公司铅锌银矿石的开采是从1925年开始的。除第二次世界大战期间一段短时间外，自1953年又进行了铜矿石的开采。目前铜矿石仅来自埋藏深的1100大矿体，该矿体于1967年才开始开采。铅锌银矿石则采自较深水平的约20个急倾斜、厚度与间距均不相同的板状矿体，其中有的已生产了二十几年。

最初，1100铜矿体的产量是来自按规则布置的、垂直单侧的、沿矿体全高的分段空场采场。这些采场采完后，即用废石胶结充填以便回收矿柱。矿柱回收包括：在废石充填料下放矿的分段崩落法，空场大爆破法，或大爆破及在废石充填料下放矿等方法。

铅矿体的采矿方法视矿体厚度和围岩的稳固情况而定，采用分段空场法并随后进行垂直矿柱回采，或是采用机械化水平分层充填法。空场法采场之间的矿柱使用在废石充填料下放矿的分段崩落法或空场大爆破回采。前者的第一步骤矿房用不胶结的废石充填，而后者需用尾矿胶结充填。用于薄矿脉的水平分层充填法要求规则地浇灌尾矿充填料。

在充填方法中，特别关心的问题是从采石场将分级的废石充填料放置到空场法采场的运搬工作，以及用铜反射炉炉渣部分取代尾矿胶结充填中的普通硅酸盐水泥。

* F.J.莱希(Leahy)是芒特艾萨矿业公司采矿研究工程师；
R．考林(Cowling)是芒特艾萨矿业公司充填研究工程师。

充填研究的中心问题在于确定废石胶结充填料的性能和研制用应力分析的计算机程序来预测胶结充填料的特性。此外还进行增加铜反射炉炉渣应用的研究，以及研制一种－25毫米骨料的胶结水砂充填料的井下泵送系统。

前　言

芒特艾萨矿业有限公司是芒特艾萨矿业控股公司最大的子公司，并且是昆士兰西北芒特艾萨铜和铅锌银矿的经营者。芒特艾萨矿位于昆士兰州府布里斯班西北1550公里，在供应品和产品出入港敦斯维尔以西770公里。

该矿的矿体于1923年发现，1931年即开始开采和冶炼铅。铜是1943年至1946年第一次开采，1953年再行开采和冶炼。虽然该矿初始只生产铅，但现在铜已成为该矿的主要经营部分。到1977年6月30日为止的年度生产了铜矿石484万吨，平均品位3.1%，以及生产了平均品位含铅7.9%、含锌6.0%、含银212克/吨的铅矿石233万吨。截至1977年6月30日总共生产铜矿石6441万吨，平均品位3.1%，以及平均品位含铅7.3%、含锌6.0%、含银176克/吨的铅矿石4357.6万吨。

本文概述了充填在各种采矿方法中的作用和为达到计划生产水平所采取的对策。特别把重点放在对每种采矿方法的充填料的选择、不同充填料类型的生产和浇灌，以及用这些类型的充填料所获得的经验。也列出了若干有关充填工艺的某些研究项目的参考文献。

矿　床

矿山位于一个强烈变形的、多次被侵入的和不同变质带的中元古代西部盆地内。具有经济价值的矿化只限于 Urqu-

hart 页岩建造，它在矿区中包含下列三种主要岩相：

1．块状的、再结晶的白云岩和硅化含铜角砾岩，当地称为“硅白云岩”；

2．层理明显的含黄铁矿凝灰质页岩，它是铅锌银矿石的母岩；

3．含凝灰岩，无矿的碳质白云岩质页岩和粉砂岩。

如图 1 所示，矿化走向长4500米、宽1000米、深1600米。现时采矿深度为1000米。

1976年 6 月底的储量为 13300 万吨铜矿石，铜的平均品位3.2%；5800万吨铅矿石，该矿石中铅的平均品位为6.6%，锌6.5%，银 150 克/吨。更详细的地质报告已由马赛厄斯(Mathias)和克拉克(Clark)提供[1]。

作业描述

中央竖井群把矿山采矿作业分为南北两部分，即南边采铜，北边采铅。该中央竖井群由三个竖井组成，它们是：P 61(人员和材料井)，R 62(人员、材料和铅矿石提升井) 以及U62(铜矿石提升井)。另一个用来提升铜生产区人员的X 41竖井，在它们南面2000米处。总共5000名劳动力之中约1500人从事地下工作。全矿有 9 个通风井，其设计通风风量为2210米^3/秒。

现时铜的生产全部来自1100矿体。就目前来说，空场法采场与矿柱生产量之比各为50%，三年内其比例将为35:65。日采矿量和提升量约20000吨，每周生产五天。

目前开采铅主要是在13和15水平。13水平和13水平以上主要使用水平分层充填法，其余为矿柱回采。该区域的生产将在八十年代初期结束。15至13水平的开采于1976年开始，

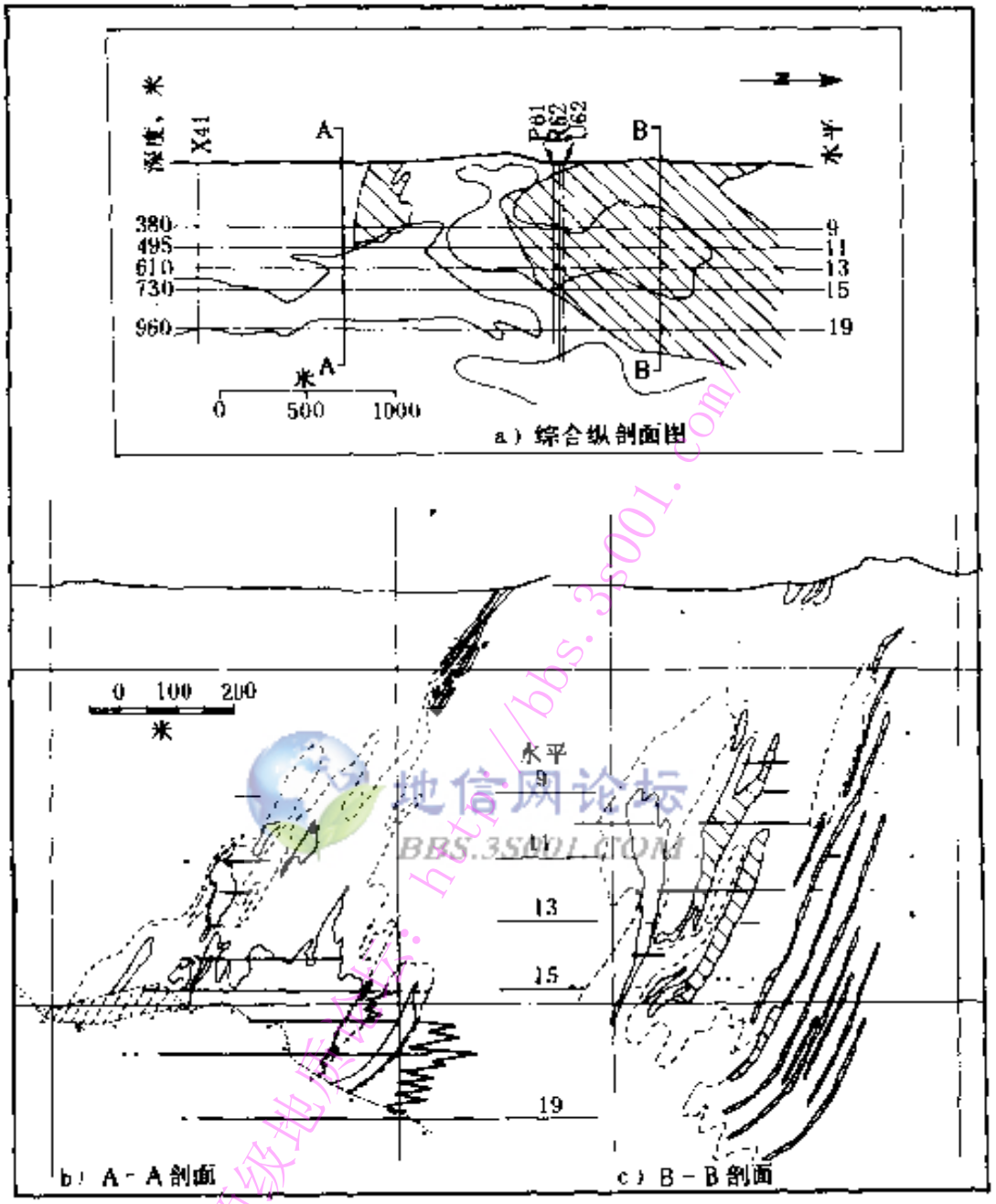


图 1　芒特艾萨矿综合纵剖面图（a），典型横剖面图（b）和（c），图中画影线的为铅矿体

最初只用空场法回采。至13水平开采结束时，水平分层充填法和空场法及矿柱回采将各占一半。铅矿石的总产量为9000吨/日。

铜、铅矿石均通过轨道运输和溜矿井集中于中央竖井群

底部的井下破碎站。铜废石由两个30吨箕斗提升，铅矿石则通过两个24吨箕斗提升。铜矿石经就地选矿和熔炼后，产品由铁路送至敦斯维尔铜精炼公司（芒特艾萨控股公司的子公司）进行精炼。含银的铅矿石也是就地选矿和熔炼，产品送另一子公司——伦敦附近的布里塔尼亚（Britlania）铅公司——精炼。锌则以精矿形式出售。

作业的详细情况已由戴维斯在参考文献[2]中进行了描述。

采矿方法

铜

1100矿体是块状的、埋藏较深的矿体，其尺寸为：走向长度2000米，断面300×300米(图1b)。该矿体正在用全高空场法采场和在每列空场采场之间留垂直走向矿柱以及每行采场之间留间柱这种布置方法进行开采。所有采场均象垂直走向矿柱一样南北向为38米宽，而东西方向的尺寸和个数则视矿体宽度、品位和地质构造不同而异。图2为1100矿体北区的理想平面，它表明采场、间柱和垂直走向矿柱，以及采矿和充填的状况。

第一步骤是，矿房用尾矿胶结充填料和分级废石充填料的混合物构成的废石胶结充填，以利于矿柱回采。

在引用废石充填的情况下，矿柱回采从最北面两个垂直走向矿柱开始，用上向孔梯段法进行。在650矿体矿柱回采中用得很成功的方法是分段崩落法。由于胶结废石充填料的大面积暴露，回采率是令人满意的，但废石充填后，出现了大量贫化，故该法只得放弃。在1977年前，曾计划在南端采用空场法，或是采用大爆破法回采全部矿柱，如马修斯[3]描

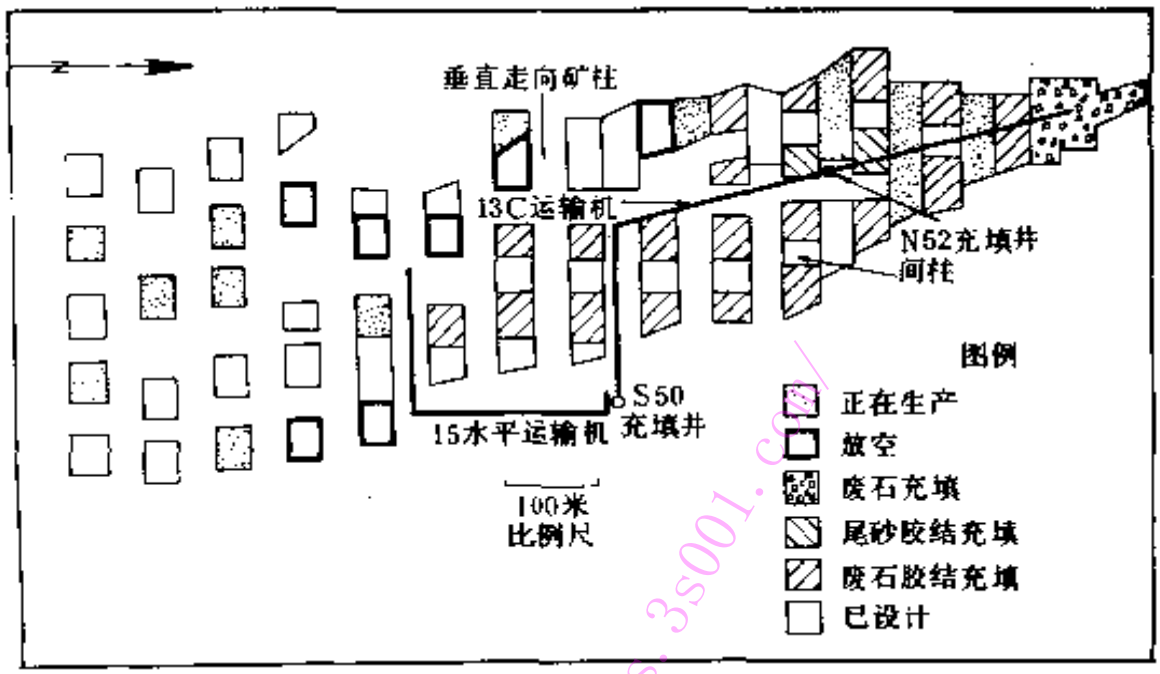


图 2　1100矿体生产和充填的理想平面图

述的那样，在第二、三步骤中在废石充填料下放矿。最近，霍姆斯比、沙利文[4]以及柯克比等[5]都谈到一种代替间柱和垂直走向矿柱回采顺序的方法上的改变已取得成效。

铅

铅矿石是从大约20个急倾斜、宽3—30米、走向连续长度1000米的板状矿体采出的。目前，采矿在11与15水平之间进行，主要生产水平是13和15两水平。采矿方法取决于单个矿体的宽度和围岩的稳固情况，但一般10米以上的较厚矿体用分段空场法开采并进行矿柱回收，而薄矿体则用水平分层充填法开采。在实践中，这就是说，在15至13水平之间，西头三个上盘矿体是用空场法开采的。13水平以上矿体较薄，只有两个上盘矿体使用空场法。13水平以上的空场法采场的走向矿柱，有一部分计划用分段崩落法回采。在15至13水平中段，在这些矿体中的三个矿体里用“三个一组”的空场法

开采。在这种型式中(图 3)，第一个空场法采场先采，并用胶结水砂充填料充填，第二个采场回采后成为空场，第三个即剩下的矿柱用大爆破崩入空区。该方法要求尾矿胶结充填体在高 100 米、宽达30米范围内保持自立。在相邻“三个一组”采场之间的中间矿柱将用分段崩落法或小的横向空场采场进行回采。

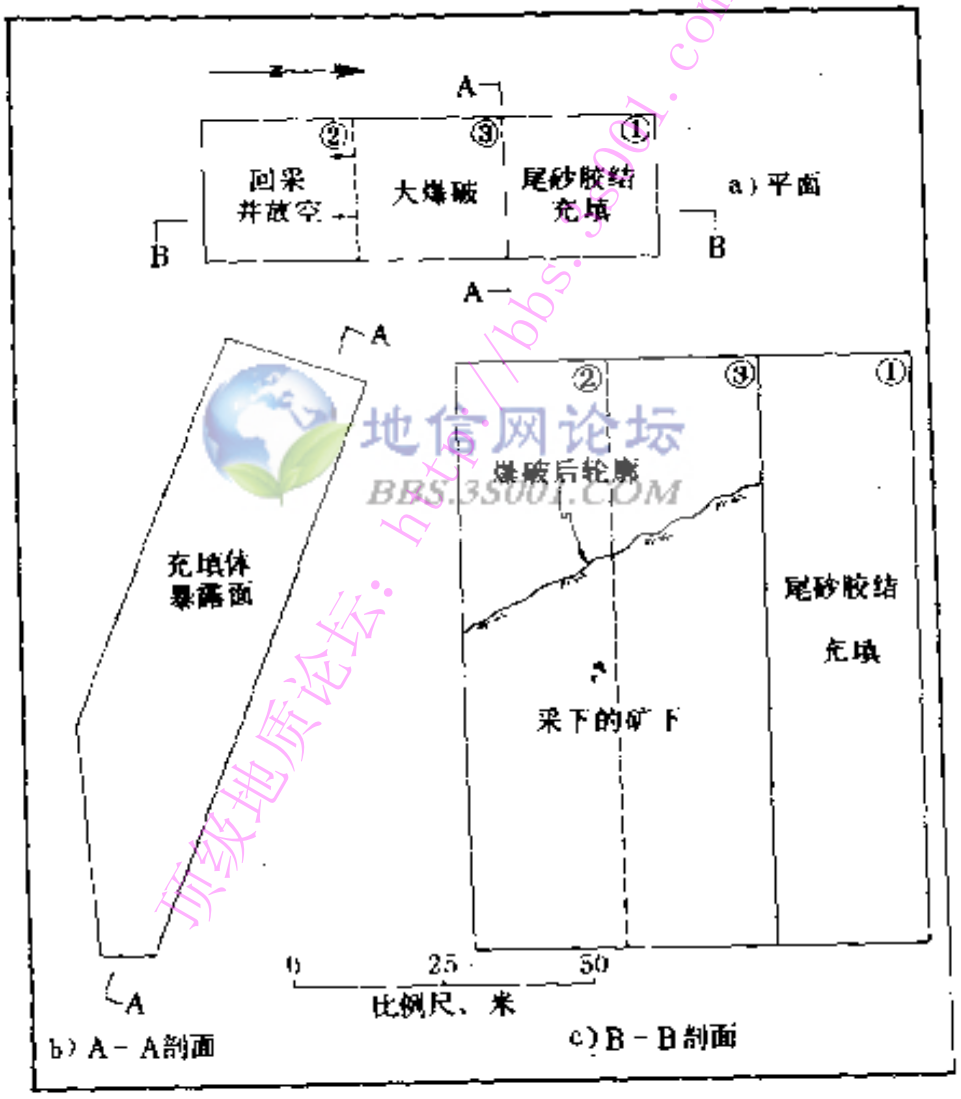


图 3　15 B—13水平理想的“三个一组”空场法采场布置

13水平以上的水平分层充填采场按由西至东的顺序进行回采，且大部分是相互独立的。一般只有 5 — 7 个矿体同时

开采。在15水平至13水平之间，全部水平分层充填采场均同时开采，并相互连通以便转换采矿设备。图 4 所示为15及13水平中典型的水平分层充填采场布置。

铅矿石开采方法已由戈达德(Goddard)和布里奇斯(Bridges)[6] 作了进一步描述。

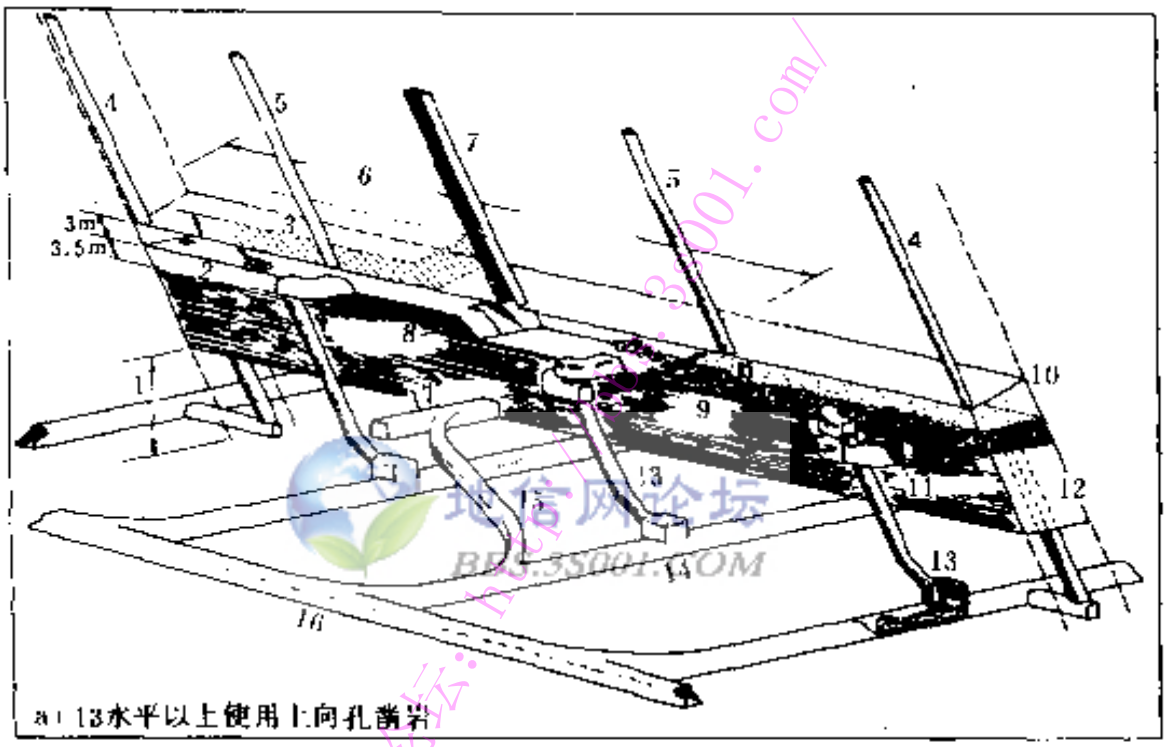
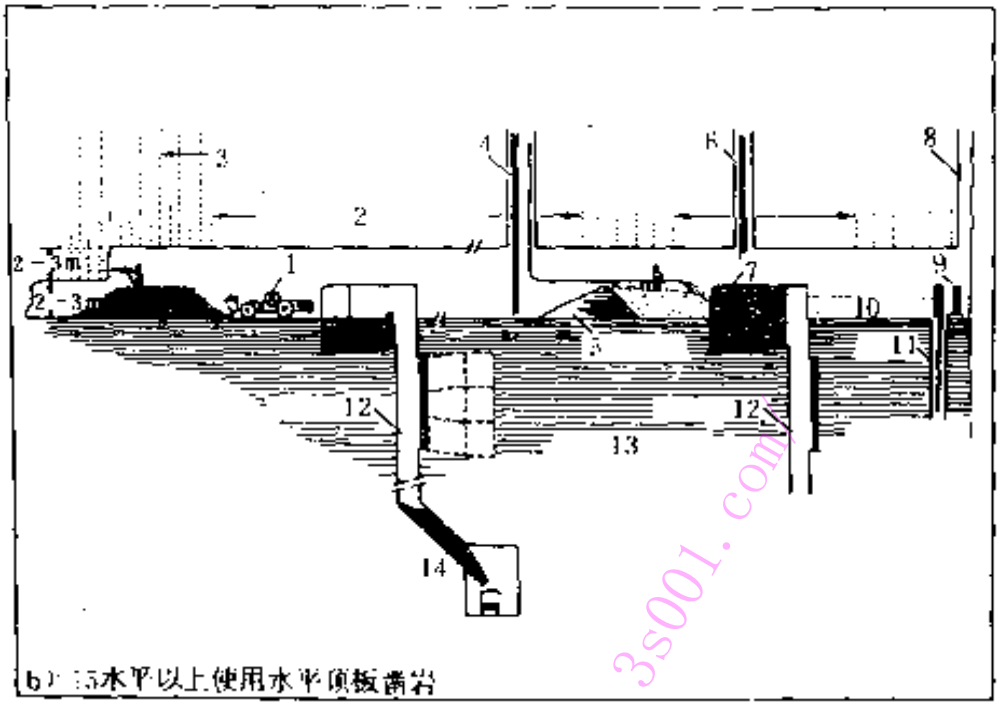


图 4　芒特艾萨矿水平分层充填法示意图

（a）13水平以上使用上向孔凿岩

1——垂直12米；2——湿式充填料；3——上向孔凿岩；4——通风井；5——通路天井；6——锚杆安装完毕；7——辅助天井；8——充填料挡墙；9——充填料；10——适应顶角的人字形顶板；11——挡墙；12——排水天井；13——溜矿井；14——运输横巷；15——通向充填料底层的斜坡道；16——主运输巷；17——充填料底层的穿脉。

地宫网论坛 BBS.35001.COM



（b）15水平以上使用水平顶板崩岩

1—3.8米³铲运机；2—全部锚固；3—钢绳锚杆(需要时安设)；4—辅助天井；5—充填料挡墙；6—通路天井；7—溜井隔墙；8—回风天井；9—排水塔；10—充填水；11—泄水井；12—下盘溜矿井；13—早先充填体；14—漏斗。

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

充填料型式的选择

水平分层充填

选用水平分层充填法开采薄铅矿体也就决定了所采用的充填料型式。水力充填料浇灌的经济易行，以及容易获得的选厂脱泥尾矿(水力充填料)这一理想物料，就是选择尾矿充填的理由。

铅矿体的空场回采法

13水平以上那些已充填的空场法采场为走向矿柱所隔开，而北部一些矿柱计划在废石充填料下用分段崩落法回采。该方法中，矿房的充填料不需良好的胶结，单独的废石充填即可适应。可用采准工程所获得的岩石和采石场剥离的覆盖物

作充填料。

13水平以上那些上盘铅矿体的矿房或矿柱，选用废石充填之所以可能，是由于回采工作直达矿体的最上部的全部边界。地面充填井可设置在不致于影响更西头的已采矿体。

13水平以下情况就不一样了，除北区以外，由于回采工作更靠近上盘，废石充填料不能用重力下放，故必须进水充填。然而，空场采场使用非胶结的水砂充填是不容许的，其原因是它太细、易流动，以及在矿柱回采时会引起过量贫化。当13水平以下5矿体空场法采场于1975年开始进行胶结充填时，曾计划以2或3个垂直块段来回采走向矿柱，限制充填体暴露30—50米的高度。由于这些暴露面等于或小于1100矿体的计划暴露面，故认为也需要同样强度的充填体。因此要使用相当于6％普通硅酸盐水泥的混合料。

铅矿体矿柱的回采后来发展为如上所述的“三个一组”法。为了获得良好的结果，该方法需要较高质量的胶结充填体，以确保高100米和宽30米以上充填体的稳定性。故又一次根据当时1100矿体暴露面的经验、实验室强度比较试验，以及极限稳定性计算，确定用相当10％硅酸盐水泥的胶结充填料。

1100矿体

用留有许多间柱和垂直走向矿柱的大空场法回采1100矿体的方法，意味着在第一轮回采中只能回采35％的矿石。

为了限制生产在走向方向上的发展和充分利用整个开拓采准工程，计划用一种矿房和矿柱的整体回采顺序。矿柱回采方法的主要准则是：

1．有象第一步骤矿房那样高的生产率；

2．高品位矿石充分回收；

3．整个回采期间岩层稳固；

4．矿房要尽早充填，以便早些回收矿柱。

根据这些准则，要求第一步骤矿房具有高强度的胶结充填体。

可行性研究表明，从现有选矿厂不能获得足够的尾矿充填料，用挖泥船从老尾矿池回收尾矿成本太高。该研究还强调了硅酸盐水泥的需要量很大，于是开始进行关于硅酸盐水泥代用材料的研制[7]。另外也进一步对废石部分地取代胶结充填料的效果进行了研究，其结论是，当获得适宜的废石时，矿房的充填应该是采用废石与尾矿胶结充填料同时浇灌的办法。（当时还准备在废石充填料下回采一些矿柱，这就必须准备好岩石充填设施。）关于废石胶结充填系统发展的基本情况已在澳大利亚矿山充填会议上[3,8]提供了很好的资料。

初期的实践是使所有的采场用两份废石及一份胶结尾矿（按重量计）作充填，并且在采场的下、中、上各三分之一处分别使用含普通水泥 8％，7％和 6％的胶结废石充填料。为了能回收矿柱，要求该充填料在36米高和12米宽范围内保持自立。

充填料的生产和浇灌

尾矿充填和尾矿胶结充填

尾矿充填料和尾矿胶结充填料均由 4 号铜选矿厂尾矿制成。湿式充填站将尾矿通过两段旋流器脱泥，依选矿厂尾矿的特性制得重量浓度为68—72％的水力充填料。图 5 所示为适于尾矿充填和尾矿胶结充填物料的粒度分布。应用于水平分层充填法时，该产品用大扬程、封闭式的 6/4 Warman系列A型离心泵以200吨/小时的速度直接送入地下。

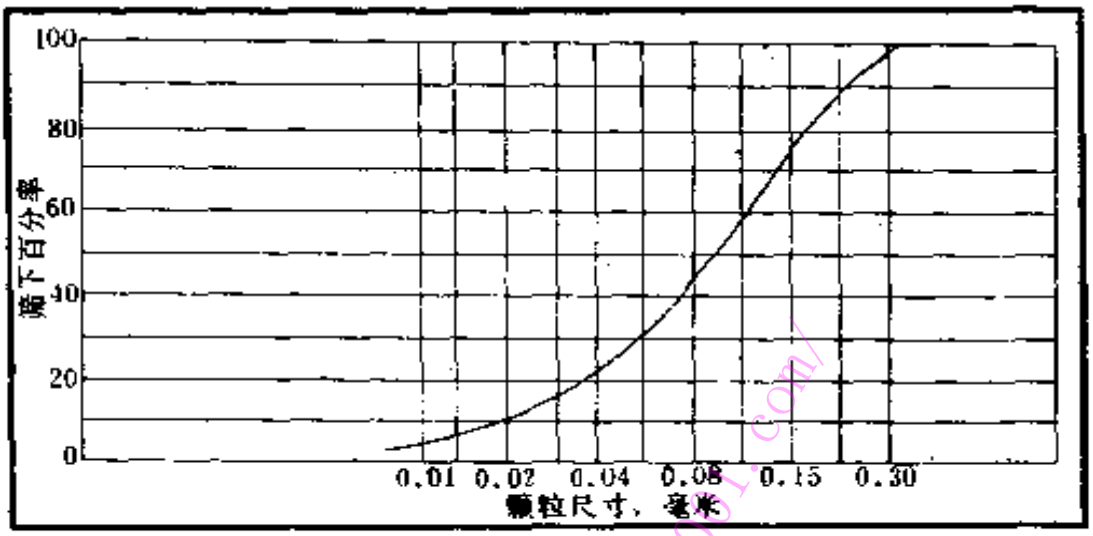


图 5　尾矿充填料粒度分布

尾矿胶结充填料的制备是上述系统的继续。硅酸盐水泥和磨细的铜冶炼反射炉渣浆以1:2的比例混合，然后在同样的Warman泵输入地下前，把它泵入胶结充填料仓与尾矿充填料混合。湿式充填站对组分比例、浓度和泵的抽送实行大量的监控。

两种充填料均能通过三个直径150毫米钻孔的任何一个泵入地下充填系统网路，这些钻孔除井口外均未加衬套。早先输送管线的直径在某些中段为100毫米，现正改成直径150毫米的标准管。两种充填形式的地下脱水（即使是将胶结充填料用在废石胶结充填中）是用渗滤法和倾析法联合进行的。所有的挡墙均装有阀门，以便当充填料在任何水平以上时能实现渗滤，以及当充填料达到某一高度时使之能够倾析。在水平分层充填中，则用倾析塔来处理表层水。

废石充填

经过一系列试验（包括坠落与溜放试验）以后，决定选择Kennedy粉砂岩为最合适的废石胶结充填的岩石。大量粉砂

岩露头位于矿山北面。在把它用于废石充填之前，需设置采石场，建设一个生产能力为30万吨/四周的破碎筛分厂和2500米皮带运输机，钻进直径2.4米、深550米的溜井，以及在1100矿体顶上掘进和装备一条多运输机水平。

采石场装备了直径310毫米的加德纳·丹佛GD-120型钻机，P&H 1900型和1600型电铲，5辆Cat型50吨卡车，以及辅助设备。从2130×1520毫米破碎机出来的产品送到并联筛上，总能力为1300吨/小时(－300毫米为100%，－25毫米的占5%)。抽掉挡板后，粉砂岩通过溜井溜放，－25毫米级随即增至20%。到目前为止，已通过溜井的粉砂岩为650万吨。通向每个采场上面溜井的地下皮带运输机每小时运输能力为1000吨。

第二个充填溜井和皮带运输水平已投产；该溜井深700米，主皮带运输线设于下盘而不是在矿体的顶部。两个溜井均有能贮40000吨充填料的、顶部为倒锥形的大料仓，它们除了起缓冲作用外，还能起到保证石料的装满水平不致降到溜井颈以下。

废石充填料和尾矿胶结充填料通常给到同一溜井中，并且以1:2至3.5:1的废石充填料与胶结充填料的比例同时浇灌；也就是说，依溜井位置、矿房形状和相邻回采矿柱的位置的不同，浇灌速度为300—900吨/小时。当复杂的几何形状限制了溜井的位置或是矿柱回采要求高质量充填料时，偶尔也将胶结充填料通过四个单独的钻孔浇灌。已取得了持续浇灌长达48小时的经验，但最常用的是18—24小时。该系统允许临时改变充填料浇灌的地点。在矿山开拓区的北部，废石和采石场覆盖层充填料目前堆在两个露天溜井的附近，当需要时就用推土机推入溜井并通过指状天井来分配。充填料流向的

改变只能按固有的顺序进行，或是用去掉保护岩柱的办法来实现。

经验和研究

水砂充填

1964年以来，在水平分层充填采矿中使用了水砂充填，这已由艾索康加斯等报道过[9]。在充填8小时后人就能在充填体上工作，两天后即能使用机器。水平分层充填中的脱水速度总是相当令人满意的。没有试图对改善这些速度和改变充填料的级配问题进行研究。

水砂胶结充填

水砂胶结充填在1969年首次用于650铜矿体10水平底柱回采中，这已由琼斯[10]作过描述。

根据在该处获得的经验，为了帮助矿柱回采，水砂胶结充填料已广泛用于空场法采场的充填。迄今为止，只有一个矿柱使用“三个一组”法回采。至写本文之时，充填体已暴露出50米高、25米宽，并未发现损坏的迹象。水砂胶结充填体也已在1100矿体的第一步骤矿房中暴露出来，这一点将在下面“废石胶结充填”中进行讨论。

近十年来对水砂胶结充填尚在进行着不同程度的研究。用铜反射炉渣部分地取代硅酸盐水泥的工作是很有价值的，托马斯对此已作过很好的论述[7]。该课题，包括低水泥和高炉渣量的研究，炉渣磨的细度和水泥与炉渣离析的研究仍在继续中。胶结充填体强度性能的研究也已进行，并将在下面讨论。

废石胶结充填

1973年在1100矿体开始了废石胶结充填，从那以后已充

填了17个采场。矿柱回采过程中已出现几个大的充填体暴露面，最大的有90米宽、65米高。另一些暴露面面积在12×30米至55×45米范围内。这个最大暴露面(N538南面，图6)就是用上向倾斜炮孔梯段法回采北端的一个垂直走向矿柱而揭露的。原目的是想从废石充填料之下放矿（或用“分段崩落法”回收矿石)，但由于充填体壁是稳固的，故放矿一直持续到上述暴露面的尺寸。当时，一个相邻的较小的暴露面出现崩塌征兆，随即采用废石充填来作支撑。不过，Kennedy粉砂岩由于易磨成圆形，易于流动和缺少粉粒作为粘结材料，故它很快会穿过采下矿石的缝隙，造成过量贫化。

鉴于这种情况，在废石充填料下的回采业已停止。然而，迄今从充填壁暴露面所获得的经验，增强了对其稳定性的信心，在其他矿柱的回收方法中将充分利用这种经验。

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛: http://bbs.3s001.com/

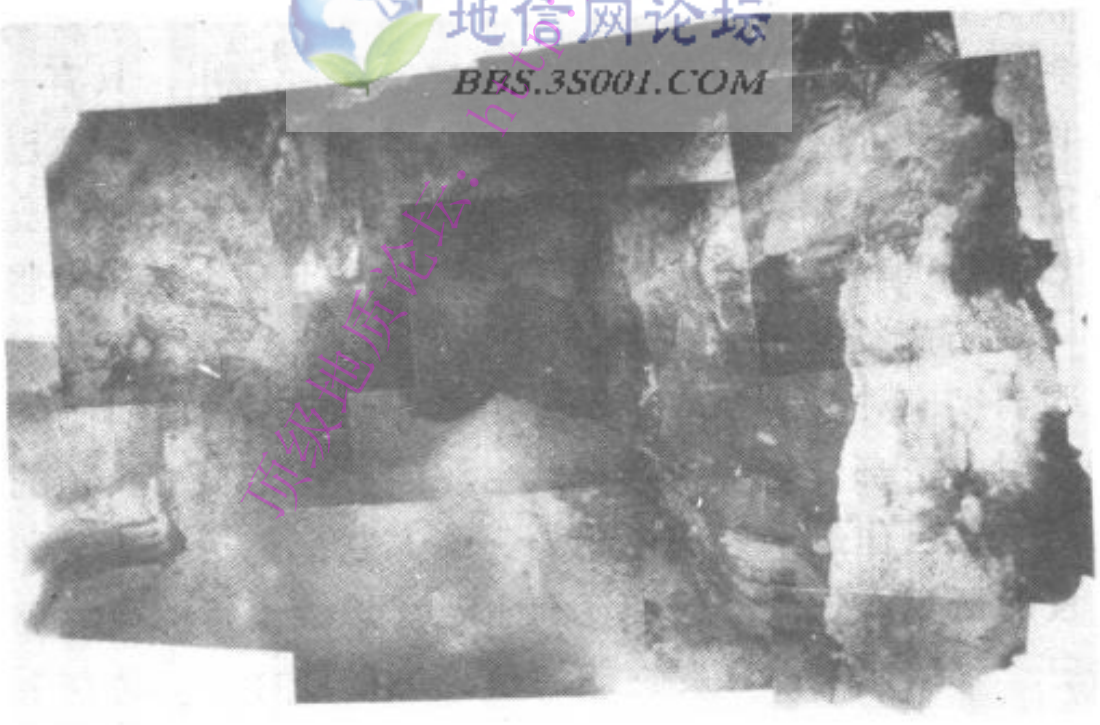


图 6　通过534垂直走向矿柱的照片，右边是N538充填体，左边是O530和M530充填体及它们之间的M530矿柱

现计划将一些矿柱用空场法采场进行回采，这就会使暴露面增至100米高、40米宽。另一矿柱将需要有一条200米高、8米宽的切割槽，槽的两端将暴露出充填体。根据进一步取得的经验，由废石胶结充填体自由稳立能力所产生的灵活性将被充分利用。

这个研究废石胶结充填的主要内容已被澳大利亚矿物工业研究协会(AMIRA)确定为一项科研项目。在该项目——“采场支护和稳定性”——中，几个澳大利亚采矿公司联合筹集资金，通过AMIRA与联邦科学和工业研究组织(CRIRO)的应用土岩工程学部订立合同对矿山设计和支护的一些问题进行研究。其中之一，“胶结充填的技术要求”，就是CSIRO和芒特艾萨矿业有限公司合作的成果。

以“胶结充填合理设计程度研究”为目的的项目已完成了下列调查研究：1)废石胶结充填体和水砂胶结充填体的现场强度[12]，2)利用能试验直径380毫米、高760毫米试块的特制容器作胶结废石充填体的三轴特性，3)测量充填和养护期间所产生的压力。这些研究仍在进行中，包括利用安装在充填体钻孔内的测斜仪和应变仪在内的广泛监测计划，以及废石胶结充填浇灌和充填体稳定性(根据三维有限元法)的数学模型研究。整个项目的更详细报告已由考林和戈纳诺[13]提供。表1是研究工作迄今对充填体强度性质所测得数值的详细情况。

废石充填

在第三期矿柱回采中，放矿高度很大时废石充填料单独地用作覆盖材料。但是第一次则是被用于1100矿体北端的一个区段，该区段三次大爆破崩落矿石达250万吨，最多的一次为130万吨[5]。废石充填是在矿石放出高度达40米、矿石

表 1 充填体强度数据

性能	充填类型	
	废石胶结充填	水砂胶结充填
弹性模数，兆帕	280	150
粘结力，兆帕	0.50	0.21
摩擦角，度	35°	35°—40°
无侧限抗压强度	2.2	0.85
废石充填料与水砂胶结充填料之比	9:1	—
硅酸盐水泥与铜反射炉渣之比	$3\frac{1}{2}:7$	$3\frac{1}{2}:7$

已回收88%之后充入的。

后来，废石充填被用上面介绍过的垂直走向矿柱的回采中。那里很少或没有可导致过量贫化和甚至放弃崩落的矿石覆盖物。剩余的矿柱将在顶柱下用空场法小采场回采。

单独的废石充填仍将用于放矿高度很大的矿柱回采中。计划安排用大爆破回采一个垂直走向矿柱的一部分，并在废石充填料下放矿。一个平面为75×36米、高160米的矿块将由大爆破和在废石充填料下放矿进行回采。正在掘28个放矿点以确保均衡放矿和控制矿石与废石充填料的分界面(图7)。上述分段崩落的经验证明，严格的放矿控制步骤将是必要的。

将来的充填研究和实践

正在进行和未来充填研究的主要目的，是研制可能的胶结剂及充填料型式来降低硅酸盐水泥在胶结充填中的用量，并确定所研制的充填料的最佳应用方法。为此，一项进一步采用铜反射炉渣的研究项目已由新南威尔士大学着手进行[11]。

正在进行的主要研究项目是胶结骨料充填法(简称CAF)的物料泵送、浇灌及其应用。这是从铅矿石重介质预选中的

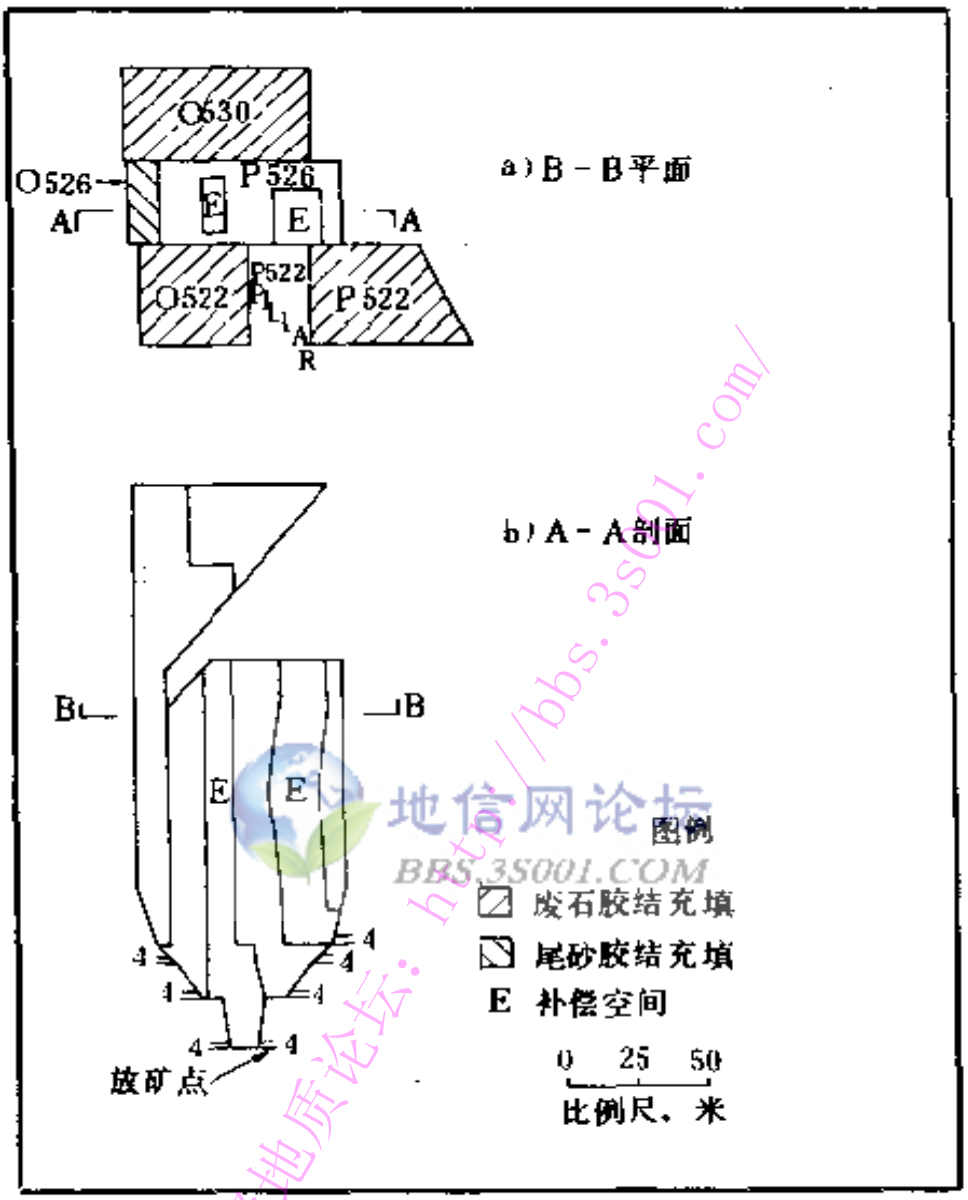


图 7 P526大爆破和废石充填料下放矿

一项重大研究项目开始的。该研究断定，如果采用重介质选矿，则每年必须排泄数十万吨能作充填骨料的重介质选矿中－25毫米的漂浮物。然后对水力充填料和骨料的地表混合及泵送进行进一步的中间性试验，试验表明，现有水力充填料泵送和网路系统的地表部分能输送高达40%(重量)的骨料。至写本文之时，正在进行胶结骨料的地下泵送和浇灌的研究。

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

与此同时，直径150毫米、高300毫米胶结骨料试块的三轴试验系列正在由斯诺维山脉工程公司（Snowy Mountains Engineering Co.）进行。所有该工作的结果将在完成后发表。

实践中，期望胶结骨料（CAF）大大降低水泥用量，提供强度较高的充填体和提高充填法的灵活性。倘若胶结骨料充填采场中骨料胶结成块，那末就倾向于用分开充填，亦即粗骨料胶结块是用在胶结充填与水砂充填的中间，这样一来，胶结充填料就将只浇灌那些需要之处，而不是必须充填整个采空区，即再次降低了硅酸盐水泥的耗量。

为充填体应力和稳定性分析的二维和三维有限元计算机程序的研究正由联邦科学与工业研究组织和昆士兰大学的米克(J.Meek)博士进行。联邦科学与工业研究组织的工作情况由巴雷特等[14]作了报道。由米克博士研究的三维程序(SOLID)已成功地用来模拟随充填、采掉一壁，以及往后上盘闭合的影响而出现的应力增高。已进行了“三个一组”结构的一个组成部分的研究工作，并计划扩大该程序，以便用于1100矿体的复杂形状和各回采顺序。

正在考虑的将来的研究工作是对复杂的薄铅矿体中，不同刚度的充填体充填效果的测定，目的在于改善总的岩层稳定性。诸如振动密实、动电固结，当然还有使用硅酸盐水泥等提高充填体刚度的方法，只要可能，都要进行考察和进一步研究。

结　语

象芒特艾萨矿那样的上覆岩石不塌陷的任何矿山，充填是采矿的重要组成部分。在芒特艾萨矿的采矿作业中，尾矿

胶结充填的应用约占75%，并且已可能用铜反射炉渣部分取代普通硅酸盐水泥。铜反射炉渣的应用已非常成功，从1973年使用以来，已节省了1000万元的水泥费用。

废石充填料用于补充尾矿胶结充填大大改善了它的物理性能。迄今表明，在加快充填速度及较快地回采矿柱中，它已显示了在很大程度上直接和间接地节省费用。

芒特艾萨矿所发展的废石充填系统提供了选择浇灌地点的灵活性，这一点用常规溜放系统是困难而费钱的。废石胶结充填强度的试验工作表明，必须将一些细粒组分除掉，但其界限还没有进行定量。然而，这种方法产生的废石充填料作为留矿法回采矿柱的覆盖物是不理想的。

参 考 文 献

[1] Mathias, B.V., and Clark, G.J., Mount Isa Copper and Silver-Lead-Zinc Orebodies — Isa and Hilton Mines, *Economic Geology of Australia and Papua New Guinea*, Vol.1, Metals, 1976, pp.351—372, Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

[2] Davies, E., Mining Practice at Mount Isa Mines Limited, Australia, *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*, Vol. 76, 1967, pp. A14—A40.

[3] Mathews, K.E., and Kaesehagen, F.E., The Development and Design of a Cemented Rock Filling System at the Mount Isa Mine, Australia, *Jubilee Symposium on Mine Filling*, 1973, pp.13—23, Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

[4] Hornsby, B., and Sullivan, B., Excavation Design and Mining Methods in the 1100 Orebody, Mount Isa Mine, Australia, 12th National Convention of Mining, Metallurgy and Geology of Mexico, Acapulco, Mexico, October 16—20, 1977.

[5] Kirkby, R.W., Blair, J.R., and Hutton, R.C., The Development of a Pillar Extraction Strategy for the 1100 Orebody, Isa Mine, Mount Isa, Australia, 11th Commonwealth Mining and Metallurgical Congress, Hong Kong, May 6—12, 1978.

[6] Goddard, I.A., and Bridges, M.C., Developments in Lead-Zinc Mining

地信网论坛 BBS.3S001.COM

Methods at Mount Isa, Australia, Lead-Zinc Update, SME-AIME, 1977.

[7] Thomas, E.G., A Review of Cementing Agents for Hydraulic Fill, *Jubilee Symposium on Mine Filling*, 1973, pp.65—75, Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

[8] Russell, R.E., Barrett, J.R., and Blair, J.R., Design and Evaluation of Dry Fill, *Jubilee Symposium on Mine Filling*, 1973, pp.129—137, Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

[9] Isokangas, T.A., Purdie, T.F., and Boyd, R.J., Mount Isa Cut-and Fill (MICAF) Stoping, *Proceedings of the Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, No.226, 1968, pp.185—211.

[10] Jones, T.O., Pillar Recovery in a Section of the 650 Orebody Floor Pillar Using Cemented Fill, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Regional Conference, Tennant Creek, May-June 1970.

[11] Thomas, E.G., and Cowling, R., Pozzolanic Behaviour of Ground Isa Mine Slag in Cemented Hydraulic Mine Fill at High Slag/Cement Ratios, 12th Canadian Rock Mechanics Symposium, Sudbury, Canada, May 24—25, 1978. (This Volume.)

[12] Gonano, L.P., and Kirkby, R.W., In-Situ Investigation of Cemented Rockfill in the 1100 Orebody, Mount Isa Mine, Queensland, CSIRO, Division of Applied Geomechanics, Technical Report No.47, 1977.

[13] Cowling, R., and Gonano, L.P., Cemented Rockfill Practice and Research at Mount Isa Mines Limited, Australia Mineral Industries Research Association, Technical Meeting, Wollongong, May 1976.

[14] Barrett, J.R., Coulthard, M.A., and Dight, P.M., Determination of Fill Stability, 12th Canadian Rock Mechanics Symposium, Sudbury, Canada, May 24—25, 1978. (This Volume.)

顶级地质论坛 http://bbs.gs001.com/
地信网论坛 3S001.COM

不伦瑞克12号矿开采的充填实践

L．吉格纳克*

摘　要

不伦瑞克12号矿用沿走向的水平分层充填采矿法开采，日产矿石8400吨。由于尾矿特别细，并大都由黄铁矿组成，故选用了该公司6号露天矿剥离废石作为充填料。废石充填料经破碎、运输，并通过一套由充填天井和钻孔组成的复杂网路，溜放到生产采区。

尽管充填料铺得很厚，但经无轨设备在上面多次行走以及凿岩设备的振动和凿岩用水的渗透，使之变成相对来说较密实的介质。为了使出矿时由于充填废石引起的矿石贫化降到最低程度，建立了严格的操作规程。

最后，就充填体的强度、岩壁控制、贫化和经济等方面对废石充填和传统的尾矿充填进行了比较。

前　言

主要由诺兰达矿业集团（Noranda Mining Group）所有和控制的不伦瑞克矿冶公司（Brunswick Mining & Smelting Corporation）经营着两个地下矿山，矿山离新不伦瑞克省的巴瑟斯特（Bathurst）约32公里。12号主矿体

---

* L．吉格纳克（Gignac）是不伦瑞克矿冶有限公司采矿部设计工程师。

用沿走向的机械化水平分层充填采矿法开采，日产量 8400 吨。6 号露天矿在1977年底已达到最终开采深度，剩余的矿体也用水平分层充填法回采，日产量850吨。

矿　　床

不伦瑞克12号矿体是新不伦瑞克已知的最大的硫化矿床，矿石储量107067000吨，金属含量为：Zn 9.22%，Pb 3.77%，Cu 0.32%，Ag 2.81盎斯/吨。矿床赋存于经多次构造活动而受到变质作用和强烈变形的沉积岩和火山岩的共生体中。

12号矿体由 4 个较大的矿带或透镜体构成：主矿带、西矿带、东矿带和V-2矿带。1900水平地质平面图（图 1）表示各矿带的空间分布。目前主要是开采较大的主矿带和西矿带。主矿带从地表向下延深至少1128米。硫化矿体露头长400米，厚46米。这两个尺寸均随深度增加而增加：从 650 水平到1900水平主矿带厚度由61米增到91米，长度由 451 米增到671米。1900 水平以下，在2350水平和2800水平处，矿体继续向南和南北扩展，位于主矿带以西 152 米的西矿带规模较小，其顶部位于地表以下 107 米，在1400水平矿体长度超过457米，厚度达46米。在1900水平以下西矿体倾角变陡，使主矿带和西矿带在深部连成一片。

一般说来，这些硫化矿透镜状矿体向西倾斜，倾角约75°左右，局部变化±20°。上盘和下盘大都由平行于矿体的、层理发育的沉积变质岩组成；局部地方，在硫化矿和上盘沉积变质岩层夹有铁质层。就其取向、倾斜和出现频率来说，硫化物矿带的节理是多种型式的，这反映了矿床复杂的地层构造史。有关岩石类型的物理性质如下：

	沉积变质岩	铁 质 层	硫 化 物
抗压强度	5000—10000磅/英寸^2	9000—15000磅/英寸^2	20000—50000磅/英寸^2
弹性模量	$5—10\times10^6$磅/英寸^2	$9—12\times10^6$磅/英寸^2	$15—30\times10^6$磅/英寸^2

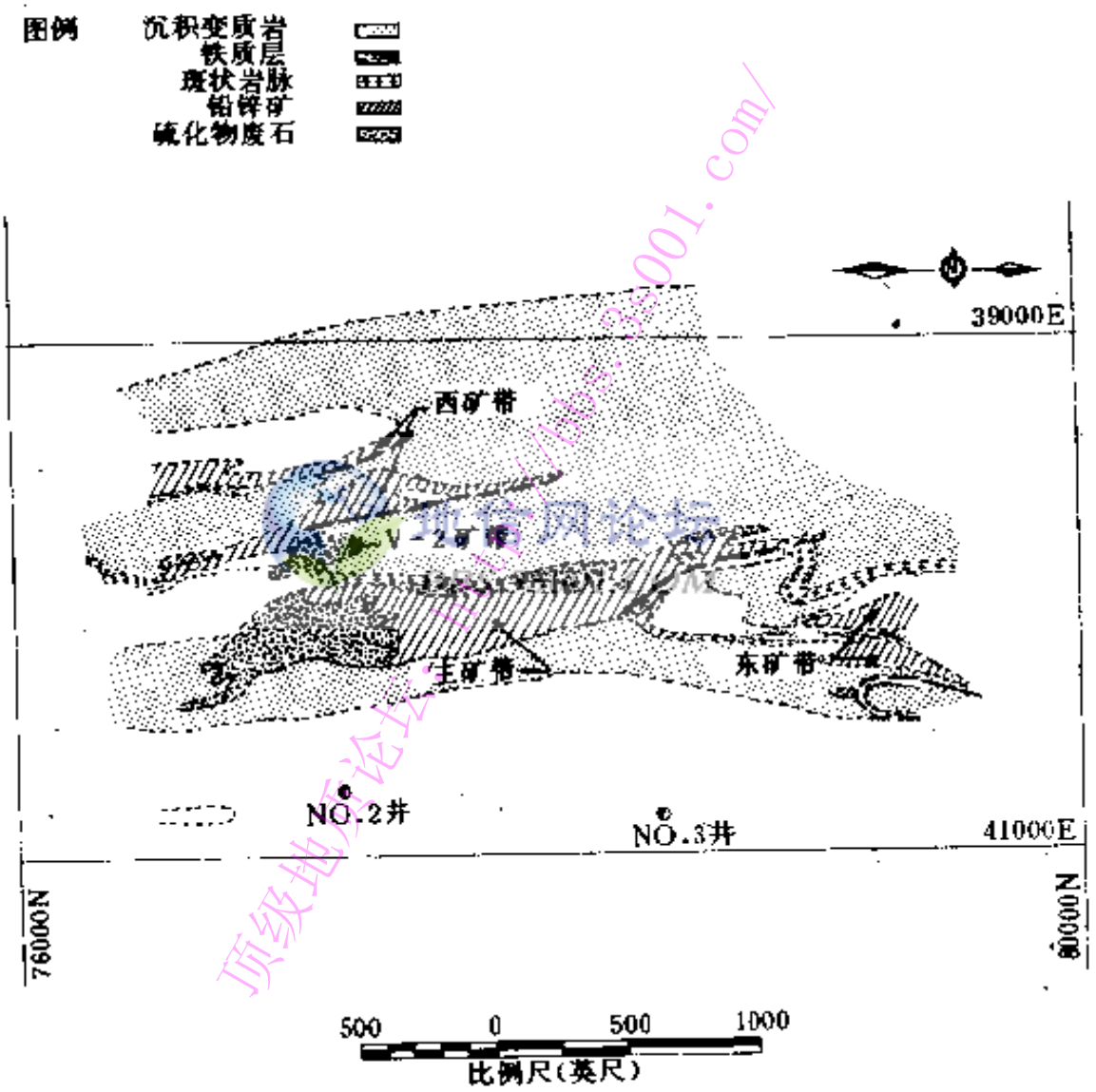


图 1　1900水平地质平面图

不伦瑞克12号矿体基本上由较坚硬的硫化矿透镜体组成，

围岩松软。最近对2800水平所作的取岩心圈试验证明东西方向有相当高的似水平地应力。这与构造地质学家[1, 2]提出的共生矿模型相吻合，包括硫化矿体在内的岩层被夹在主轴呈南北向的密实急倾斜褶皱中。2800水平的主应力值为8000磅/英寸^2，或等于垂直应力（γ^{11}）的两倍。

黄铁矿是该矿体中的主要矿物。具有工业价值的主要矿物是闪锌矿、方铅矿、黄铜矿，它们都呈包裹体物存在于块状黄铁矿中或充填于粒状黄铁矿集合体的空隙中。闪锌矿和黄铜矿的粒径 1 —500微米，方铅矿的粒径 2 —200微米[3]。其结果是70%的矿石需要磨到－400目，才能保证将这些矿物充分地分离。

不伦瑞克矿的水平分层充填法

最初，采用深孔空场采矿法开采主矿带1400水平以上部分。1969年曾需要在该水平以下开辟新采场，并预料会出现下列问题：

1. 上盘沉积变质岩冒落，引起矿石贫化，并使放矿点装矿困难。

2. 穿过整个矿体的斑岩岩脉的移动和许多含硫化物废石的混入，使空场采矿法的贫化率大大增加。

鉴于上述情况，需要一种能控制不稳固围岩的选择性开采法，因此决定改用无轨设备开采的水平分层充填法。

主要布置

矿块高 137 米，长度等于透镜状矿体的全长。开采沿矿体走向进行，废石夹层和低品位硫化矿留作永久矿柱。回采跨度一般控制在17米内，有时根据经验和地质构造认为合适时，可加宽至24米。有时需要留下矿石柱，但只占可采矿量

的5%以下。

图2为采场的理想设计。采场通道是从下盘分段平巷以－17%坡度向采场掘进的运输穿脉；随着回采向上推进，即在该穿脉内进行挑顶，以保持通道空间。因而一个穿脉能为4个高3.66米的分层或3个高4.88米的分层服务。从下盘斜坡道每隔14.6米垂高掘进分段平巷，其长度等于矿体的长度。分级平巷的硐室用作堆放钎钢、锚杆、坑木和其他供应物品的库房。溜矿井最好在低品位矿石中钻进，通过回采矿块全高到达破碎硐室。在每个分段平巷，开掘指状分枝天井与溜矿井连接。

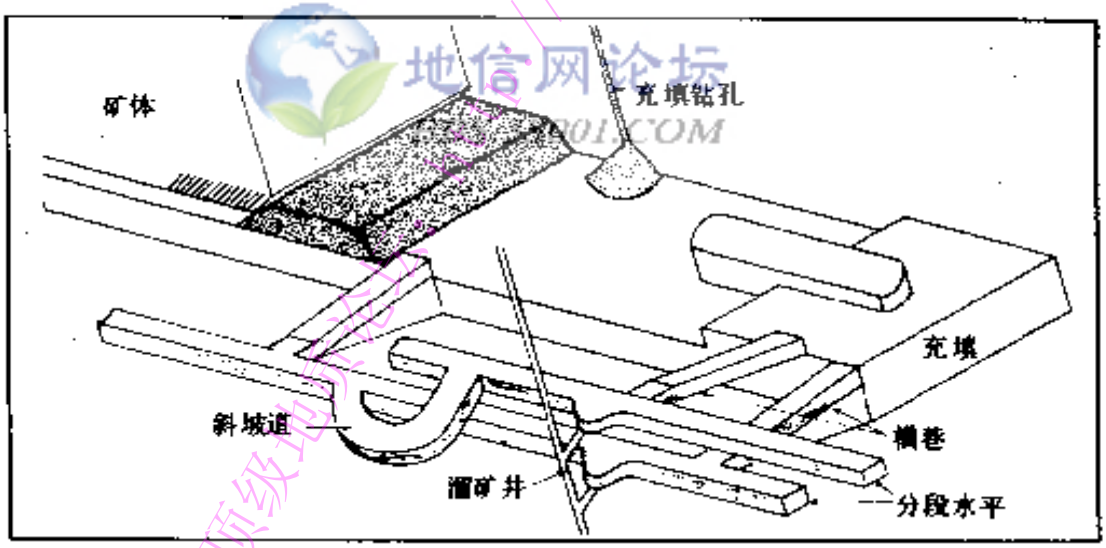


图2　不伦瑞克矿机械化充填法标准设计图

沿采区布置一些直径1.83米的充填钻孔，其位置按所计划的矿块回采循环而定。这些钻孔还用来排出废风。当需要时，可在矿块两端靠上盘一侧钻凿补充钻孔作回风用。每隔一个分段开联络道与进风天井联通，新鲜风流通过穿脉进采

场，经充填-回风钻孔，排到上面的回风系统。

车库设在各主要水平，装备有现代化设施，以备无轨设备的预防性保养、修理和更换部件之用。

不伦瑞克的分层充填法设计方案，保证有效地利用无轨设备。斜坡道、分段平巷和联络横巷的结构提供了到达任何工作面的通道，使人员和设备运行最佳化。这一机动性必须权衡掘进工程的需要量。下面是各开采矿块实际的生产矿石与掘进废石的重量比：

1400水平西矿带：8.61

1900水平西矿带：8.80

1900水平主矿带：8.33

2350水平主矿带：16.84

回采作业

分层充填回采是循环作业，每个循环要有5个工序：凿岩、爆破、打锚杆、装矿和充填。12号矿的经验指出，在一给定的矿块年最高采矿强度是3—4个分层，这只有在最优的条件下才能做到。这一速度要求若干所需的联络横巷和充填钻孔。下面是不同采场所计划的开采速度：

	每分层矿石量，吨	开采速度，分层/年
顶　柱	119500	2.56
1400水平西矿带	119100	3.36
1900水平西矿带	143000	3.04
1900水平西矿带	242000	2.64
2350水平西矿带	528300	1.50

凿　岩

所有分层都是打上向炮孔。不伦瑞克矿研制了采场凿岩

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/

台车；它是由一台埃姆柯630型装载机安装水平臂，在臂上装有两台阿特拉斯·科普科BBC 100凿岩机组成的。最近又引进了加德纳-丹佛TE1894型和麦克兰-沃辛顿(MacLean-Worthington)的两种新型台车。

上向炮孔直径41.3毫米，网距1.22×1.83米，所有炮孔均向爆破方向倾斜65°，孔深4.27米或5.49米，因而每分层推进高度分别为3.66或4.88米。目前约占74%的生产矿石是由分层推进高度为4.88米的水平分层充填采矿场采出的。自1977年初以来，在一些缓倾斜节理的顶板上采用超前锚固技术以控制顶板。不伦瑞克的超前锚固技术是将上向炮孔每隔一排炮孔超凿2.44米，然后将9号钢筋插入，并用树脂锚固其端部于孔底，余下炮孔作为正常上向炮孔爆破。图3为超前锚杆示意图。经验表明，超前锚固提高了锚杆安装的效率，因此除大大地减少了耽误的工作时间和降低这类岩层固有的

BBS.35001.COM

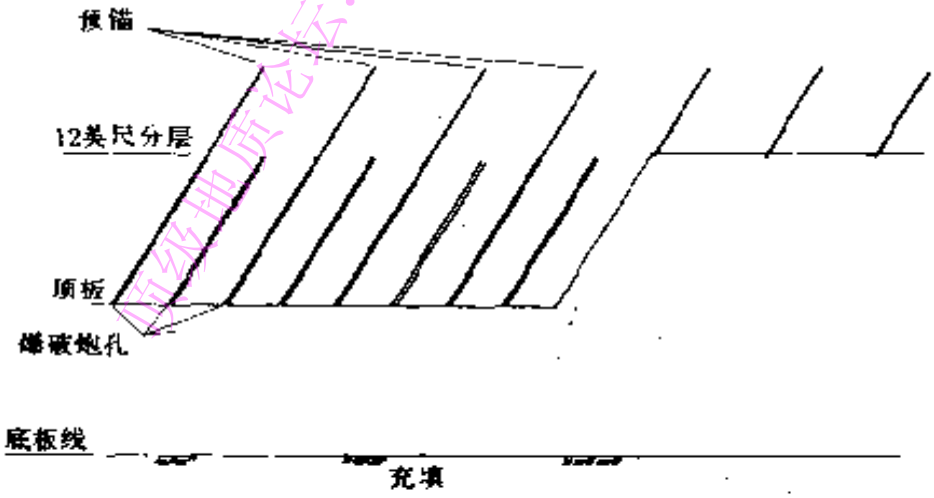


图 3　不伦瑞克的超前锚固技术图

冒顶危害性外，还节约了生产成本。超前锚杆是凿岩工序的重要组成部分，它完全是由台车来完成的。

爆　破

所有采场均用铵油炸药爆破，用加拿大工业有限公司的诺内尔延发雷管起爆。通常在一排上向炮眼中，除边眼外，都用同段延发雷管起爆，而边眼则用滞后一段的雷管起爆。这就保证形成距顶板1.83米的均匀爆堆。在下午班末用电起爆。最多一次爆破150排炮孔。单位炸药消耗量平均为0.45磅/吨，二次破碎量很少。上向孔装药使用安装在贾维斯·克拉克JUT-43型服务车上的容积1000磅的压气装药器，它有两套遥控操作系统。

锚杆安装

两人组成的作业组在矿堆上安装锚杆。锚杆工用气腿子凿岩机和伸缩式上向凿岩机打眼，按1.52×1.52米的网度安装长1.52米的锚杆；锚杆是直径15.9毫米的涨壳型锚杆。边帮岩壁用长2.13米的锚杆锚固。

升降式锚杆机用来支撑锚杆机，以便照顾到那些矿堆太高或太低的区域，锚杆机很难到达的地点。重要的是大部分锚杆安装必须在爆堆上进行，这样装矿作业就可连续进行，不致于耽误时间。

锚杆安装是水平分层充填采矿循环中唯一没有实现机械化的工序。超前锚固技术能改善岩层状况和减少锚杆安装工作量，但不能取消锚杆支护。

出　矿

从采场装运的矿石经穿脉沿着分段平巷被送到最近的溜矿井。最初，是在采场下盘沉积变质岩中布置很多溜矿井。由于运距相当短，故选用一台瓦格纳ST-4A型铲运机运矿。

以后的采场，溜矿井布置在每个采场南端的低品位硫化矿石中。这样运距较长，故采用瓦格纳MTT-420型推卸式卡车和卡特彼勒966-C型装载机配套。最近研究[4]表明，当平均运距超过200米时，采用卡车和装载机配套系统是可取的。

充填作业

充填料选择

因为从矿石中分离出有用矿物，需要进行大量磨矿工作，尾矿的粒径分布如下：

粒径	%（重量）
+105微米	4.00
-105微米→+37微米	26.75
-37微米→+5微米	51.13
-5微米	18.12

由于65%的尾矿是矿泥或微粒，分级后是不能满足充填的全部需要量。另外，尾矿中含有约80%的黄铁矿和5%的磁黄铁矿；含这种硫化物的分级尾矿充填料将会发热、产生有害气体和酸性水等径流问题。因此这种尾矿作为可用的充填料被否定了。

选用6号露天矿剥离的废石作代替物是很吸引人的。这些废石的岩性组分如下：

沉积变质岩和凝灰岩	60%
眼状片岩	20%
铁质层	15%
流纹岩	5%

选用露天矿废石作充填料有下述理由：

1．有足够的数量；

地信网论坛 BBS.3S001.COM http://bbs.3s001.com/

2. 成本较低。

掘进废石是充填料的第二个来源。由于采准安排在一个回采水平之上的某个分段，故采准巷道废石可溜放到下一分段，运回到要充填的分层底部。来自采准巷道的废石约占所需充填量的25%。

充填料的运搬和碎裂

水平分层充填法采场所需的充填料最初经设在6号矿的42×65圆锥破碎机进行破碎。-15.24厘米的碎石用85吨瓦布科（Wabco）卡车经9.65公里的公路运到12号矿，卸入充填钻井或料堆中。

充填料在井下的流程比较复杂(图4)。充填系统是靠自重将充填料溜到采场上部，然后运到指定的充填钻孔，经钻孔最后溜到适当的采场。使用了不同的输送系统。在800水平，由一列5.66米^{3}的侧卸矿车和一台8吨电机车组成的轨道输送系统运送1400水平西矿带采场的充填料。在1550水平和1900水平，则用瓦格纳MTT-420型推卸式卡车或瓦格纳ST-4A铲运机等无轨设备分别向1900和2350水平采场输送充填料。

充填料的溜放和倒运使粒径进一步减小。对充填料进行了粒径分析，样品取自地表主充填井口、地表以下335米的采场和701米左右的另一采场。所得资料与盖茨-高丁-舒曼(Gates-Gaudin-Schuman)方程相符(图5)：

$$\left(\frac{W}{100}\right)=\left(\frac{X}{K}\right)^m$$

式中：W——通过筛孔X的重量百分比；

K——最大块度尺寸；

m——分布指数。

下面是根据上式所得的系数：

	地表样品	1100水平样品	2300水平样品
$K(d_{100})$	100毫米	54毫米	29毫米
m	0.7	0.5	0.45
$Cu=\frac{d_{60}}{d_{10}}$	13	30	24

上述结果告诉我们：

1．每溜放335.5米（1100英尺）垂高，最大块度几乎减少一半。这一数值可能随充填井的倾角和自由落体的实际高度的不同而不同。

2．再裂碎或者细粒数量的增加可用均匀系数(Cu)的增大和分布指数(m)的减小来表示。但是看来在分布指数接近0.4时达到平衡。

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

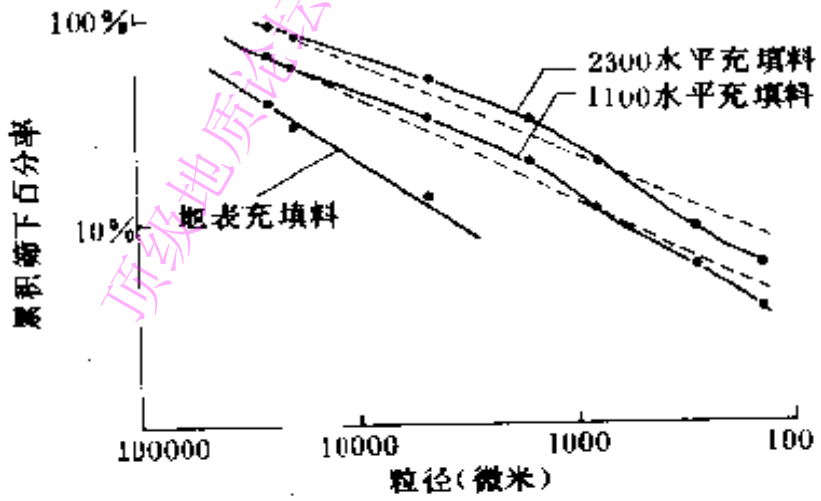


图 5　不同水平充填料的粒径分布

压实和相对密度

采场充填料系用瓦格纳ST-4A型铲运机铺放。当采场出完矿并撤出人员和设备后，即进行充填。充填料畅通地溜到采场，直到料堆高达充填钻井的下口为止。一旦充填料紧接井口，铲运机即可开进采场，在采场铺放充填料。上部充填料的运输和下部充填料的铺放同时进行。始终使充填料水平控制在充填钻井内。这样作业即防止废石滚下的危险，也可使粉尘降至最低限度。充填高度决定于采场分层的高度，一般为3.66米或4.88米。用卡特彼勒D-4型推土机或卡特彼勒814型轮胎式推土机推平工作底板并把充填料向边帮挤紧。这时测量员要在需要充填标高上部的两帮标出1.75米长的平场线；该充填标高对3.66或4.88米分层高度来说分别离顶板的平均高为3.66或4米。最后平整好的充填面的最大容许误差为±10厘米。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

利用各种作用力压实充填料，其方法如下：

1．充填期间受22吨铲运机压实40到1000次。

2．用5吨重采场台车凿岩水渗水震动约40分钟。

3．最后一分层爆破时，矿石从5.5米的平均高度落下，有每平方米18吨的冲力。

4．装矿时，22到44吨重的无轨车辆再压50至1000次。

铺放充填料后曾将钢板埋在充填料上部，在爆破前进行水准测量。测出的下沉率为20—40厘米，平均30厘米。最常用的密度控制测定法是美国复田局(Bureau of Reclamation)采用的相对密度测定法，表示如下[5]：

$$\text{相对密度}\ (R.D.)\% = \frac{D_{最大}(D - D_{最小})}{D(D_{最大} - D_{最小})}$$

式中：$D_{最大}$——在极密实状态下充填料的干密度，磅/英尺^3；

$D_{最小}$——在极松散状态下充填料的干密度；

D——现场测得的干密度。

假定最初铺放的充填料的密度最小，我们计算了整个分层的相对密度变化在35—50%之间，这属于中等密度。自然，在给定的分层内相对密度是不相同的，充填体顶部密度最大，下部密度最小。这可解释为压实载荷随深度的增加而迅速消失。图6表示带状载荷的理论分布，它非常接近在采场运行机器给予充填体的压实载荷。它说明传递到充填分层下半部分的载荷不到20%。但在压实载荷集中的充填料顶部1.22米范围内，其密度是很高的。

对比美国矿业局研究工作者的报告[7]，水砂充填的相对密度约为55%，比我们的废石充填略好一些，但仍然是中等密度范围。

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

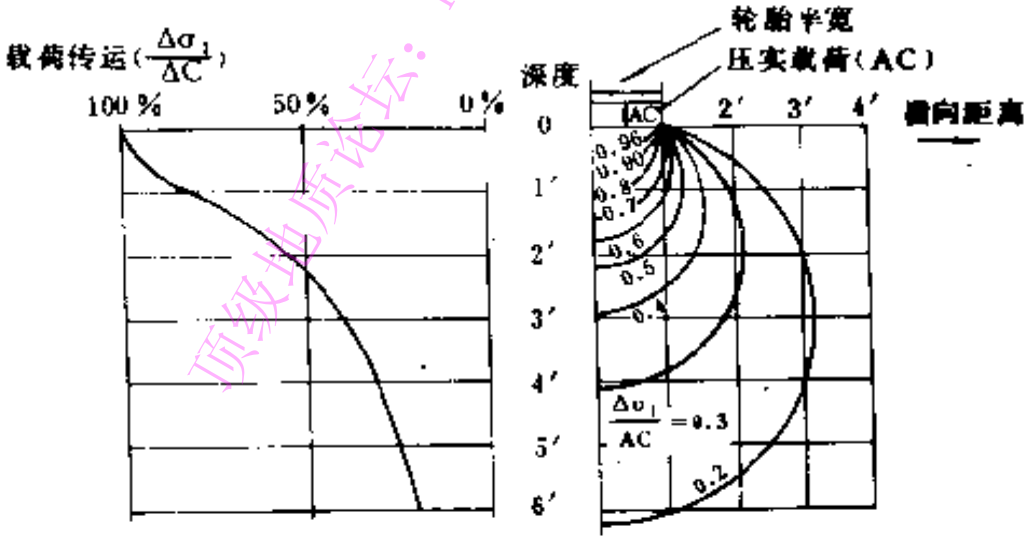


图 6　充填分层内压实载荷的理论分布

强度性能和岩壁控制

充填料强度或刚度的重要性在文献[8,9]中作了充分的论证。当然，相对密度大以及充填料刚度大将使岩壁闭合的可能性减少，它能吸收较大部分的横向应力、并相应地减少对底柱的应力作用。进而认为，预期的地压条件更确切地说取决于充填料的刚度与岩壁刚度之比。

在不伦瑞克矿开采中，认为再进一步压实充填料是不经济的，其原因如下：

1．实际上较高的充填密度使我们可能用分层充填法取代后退式崩落法多采约两个分层。两种采矿方法的成本相差无几，但后退式崩落法的贫化率约高20％。

2．由于充填料需要量增加和充填分级费用较高，故采用高密度充填时，每吨矿石的成本要增加0.15元。

3．假设每分层为10万吨矿石，则最低限度8年所采24个分层所用的高密度充填料需要增加的成本净现值（贴现率＝15％）为20.2万美元。

4．从这一意义来看，用水平分层充填法多开采的两个分层可减少贫化矿石约4万吨，如贫化矿的临界成本每吨8.00美元，则节约净现值仅9.1万美元。

尽管这一分析是简单的，但类似的结论对水砂充填可能也是正确的，因为压实费用至少也象干式充填一样昂贵。

通常当倾角小于65°时，上盘沉积变质岩经逐次分层采矿会逐渐冒落。这时应采用岩石锚固技术。如图7所示，将长3米的8号钢筋插入预注水泥砂浆的钻孔中。这些孔与片理或其他软弱面以45°—60°的夹角倾斜相交，1.83米间距的锚杆在相邻分层爆破前是不受张力的；爆破后，岩壁向新空区松弛，并使注浆锚杆张紧，直至达到平衡为止。自从使用这

一特殊的岩壁锚杆以来，已成功地回采了分层高度为4.88米，宽度为3.96米到6.1米的矿体。装矿时，形成的空场高9.14米。在一段时间，同样的采场曾一度用高度为2.44米的工作面向前推进。当在没有工业价值的硫化矿或沉积岩旁边的有价值部分需选择性回采时，也使用类似的锚固技术将前者锚固在采场壁上；回采分层两帮的侧向移动曾达到6.1米。

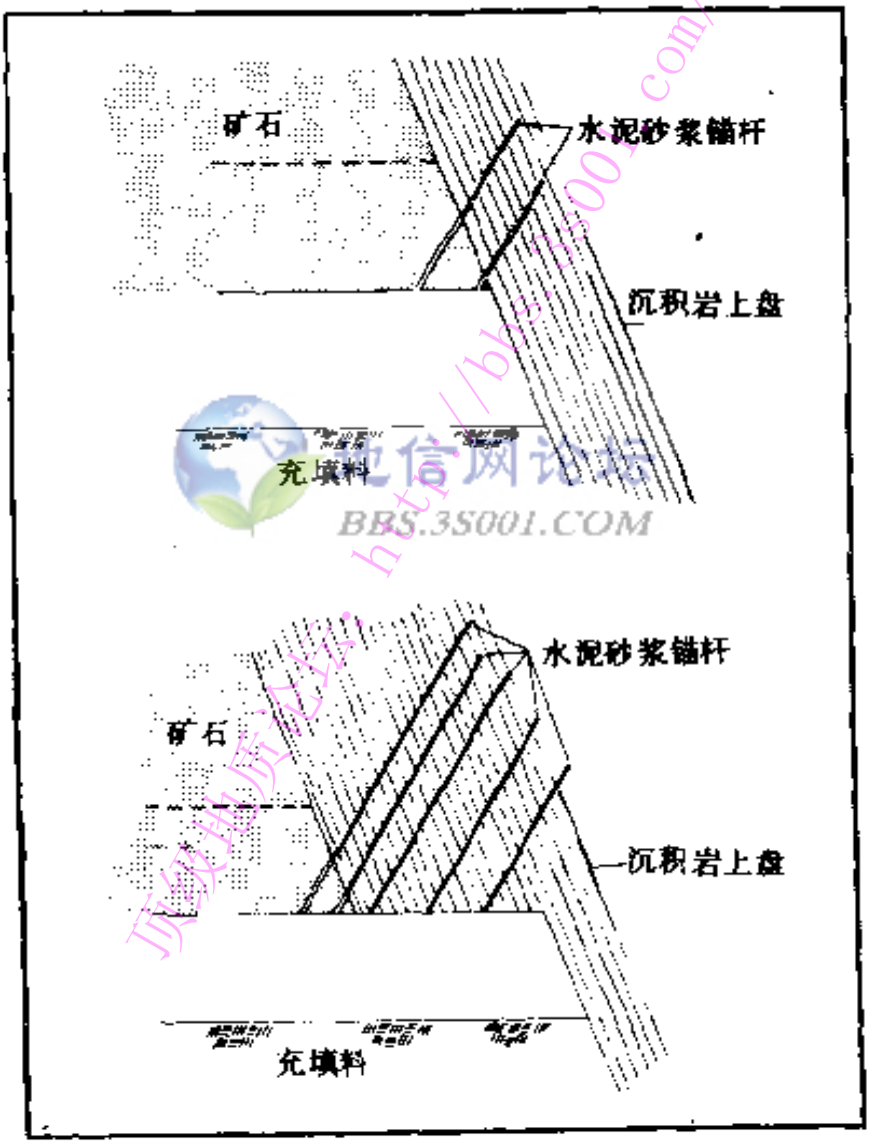


图 7　各种上盘岩壁状况下的岩石锚固

贫化的控制

非胶结型充填料的一大缺点是出矿时底板充填料会使矿石贫化，不伦瑞克矿的标准做法是在爆破前在采场底板上以1.22米的间隔铺设隔板作为矿石铲装的标示。此外是根据在充填期间先由测量人员标出的坡度线检验底板标高。最后，地质人员每天检查出矿工作面。由于管理严格，估计装矿时充填料引起的贫化率小于1%。

经济效果

选择充填料最重要的因素仍是它的成本。尾矿充填的净成本一般很难计算，因为诸如额外的排水、巷道排泥和道路维修等所有间接的和不可预见的费用均与它有关。最近调查[10]表明，6个采用尾矿充填矿山的充填成本为0.50—1.70美元/吨矿。不伦瑞克矿每吨矿石成本为1.10美元，似乎有竞争能力。

然而，废石充填系统的投资是较高的。除破碎厂外，废石充填系统需要地表和井下的水平倒运设备。当利用自重输送时，充填井的直径最小应为1.83米，以防堵塞。与此相比，尾矿充填用152毫米（6英寸）的钻孔与101.6毫米（4英寸）的管道输送即可。不伦瑞克12号矿，实际充填料分配系统估计花费900万美元(1978年美元)。据估计，同样能力的尾矿充填系统的费用却不到200万美元。

结　　语

不伦瑞克12号矿废石充填提供了良好的回采工作面底板和充分的岩壁控制。它对底柱回收的影响还不清楚。干式充填作业简单，但需严格控制，以使贫化率达到最小。最大缺点可能是粉尘污染，但较之尾矿充填所产生的水和矿泥的处

理，还是容易解决些。

选择干式（废石）或水砂（分级尾矿）充填取决于当地情况：（1）岩层控制的要求；（2）充填料的可利用性；(3)成本。对不伦瑞克矿来说，后两个因素有利于废石充填。

我们认为，在下述方面进一步研究对我们的生产是适当的。

1．充填料中不同粒径和品位的黄铁矿和磁黄铁矿的氧化效应和速度。

2．矿床的倾角和相当松软的围岩对上盘岩壁、采场顶板和底柱中应力的影响。

参 考 文 献

[1] Luff, W. M., Structural geology of the Brunswick No. 12 Open Pit, *CIM Bulletin*, June 1975.

[2] Luff, W. M., Geology of Brunswick No. 12 Mine, *CIM Bulletin*, June 1977.

[3] Owens, D. R., Mineralogical investigation of pyritic base metal ore from the No. 12 orebody of Brunswick Mining and Smelting, Mineral Sciences Laboratories Report MRP/MSL 75—236, 1975.

[4] Gignac, L., Comparison of LHD and truck-and-loader systems for ore handling at Brunswick Mining, presented at CIM Underground Operators Conference, Winnipeg, Feb., 1977.

[5] Sherard, J. L., *et al.*, *Earth and Earth Rock Dams*, J. Wiley & Sons, 1963, pp. 634—635.

[6] Lambe, T. W., and Whitman, R. V., *Soil Mechanics*, J. Wiley & Sons, 1969, p. 105.

[7] Nicholson, D. E., and Wayment, W. R., Properties of hydraulic backfills and preliminary vibratory compaction tests, R. I. 6477, U. S. Bureau of Mines, 1964, p. 21.

[8] McNay, L. M., and Corson, D. R., Hydraulic sandfill in deep metal mines, I. C. 8663, U. S. Bureau of Mines, 1975, pp. 51—52.

[9] Hill, J. R., *et al.*, Support performance of hydraulic backfill,

地信网论坛 BBS.3S001.COM http://bbs.3s001.com/ 资源地质论坛

R. I. 7850. U. S. Bureau of Mines, 1974, 11 p.

[10] Underground mining operating and cost data. *Canadian Mining Journal's Reference Manual and Buyer's Guide*, 1976—1977, pp. 12—59.

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

国际镍金属公司安大略分公司充填采矿法的进展

C.巴尔索悌*

摘　要

国际镍金属公司安大略分公司所属矿山的开采越来越深。开采深度逐渐增加这个事实以及对改善工作场所的安全及环境保护所进行的不断努力业已表明，需要研究代替现有的分层充填法和下向充填法的有效可行方案。本文论述了充填采矿法在安大略分公司矿山的演变过程以及在研究可供选择的采矿方法和合适的充填料方面，目前所做的努力。

前　言

充填工艺的发展如同新型采矿设备的发展一样，是与国际镍金属公司采矿业的进展密切地联系在一起的。

本文表明，为解决特殊问题而进行的充填质量的改善是如何促进更有效的采矿方法的发展的，并阐述了国际镍金属公司在研究能被采用在更安全而有效的采矿方法的廉价充填料上，正在进行什么工作。

*C．巴尔索悌(Barsotti)是国际镍金属公司安大略分公司的总工程师助理。

历史情况

充填采矿法是在二十世纪二十年代末，为了克服恶劣的地层条件而被国际镍金属公司采用的。当时，所用的采矿方法是方框支柱及水平分层充填采矿法。所用的充填料多半是废石。

废石充填料难以运搬，通风风流可穿过它产生循环并易坍塌下沉。故早在四十年代初就着手研究一种既坚实而又容易运搬的充填料。在用干式充填料（砂、卵石）作过一些不成功的尝试后，证明水砂充填是一种最有前途的选择。四十年代后期，水砂充填就基本上代替了充填法中的废石，当时所用的砂是经过分级的选矿厂尾矿。

水砂充填要比松散的废石充填好得多，但它仍需铺设装矿用的木垫板和安设充填料隔墙。因此，在二十世纪五十年代后期即开始研究胶结充填料的手段。当时存在着两种选择：使尾矿中的硫化物氧化或添加水泥。试验证明，选择后者是唯一可行的一种方法。实验室试验和生产试验表明，按1份水泥加30份砂的比例（以重量计）将水泥加入尾矿中制成充填料，则可省掉木制隔墙。而每浇灌一分层，在充填料顶部浇一层高灰砂比料后，就可取消装矿用的木垫板。从而，使水砂胶结充填成了采矿作业的一个组成部分。图1表示从1962年以来，国际镍金属公司安大略分公司用于充填的水泥耗量情况。

水砂充填的采用对发展新采矿工艺的影响不大。因为，它虽比岩石容易运搬，但它仍然是一种松散的充填料。然而，水砂胶结充填在固结后即成为一种具有支撑本身能力的、不十分坚固的固体。所以，它有助于现有采矿工艺的成功。

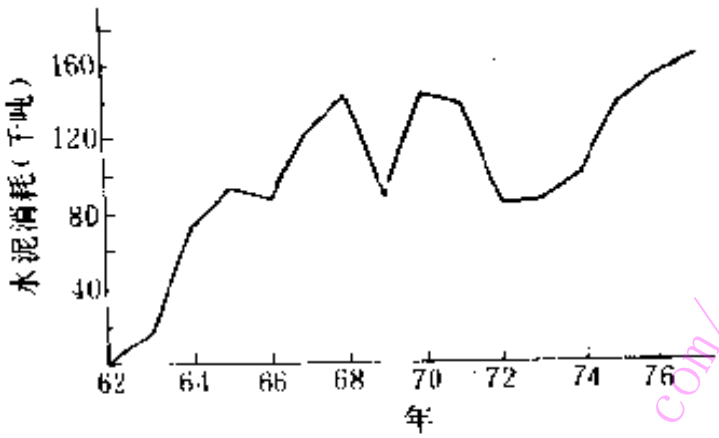


图 1　用于充填目的的水泥消耗量

例如，在采用水砂胶结充填以前不久，即已研究发展了下向充填采矿法(U.C.&F.)。但是使用不胶结的砂，充填体经常会产生崩塌并需要大量的坑木支护。由于有了水砂胶结充填下向充填法开始盛行，并很快地代替了方框支柱法，才使得发展机械化充填法和用大量崩矿法回收矿柱成为可能。

图 2 表示使用不同充填料的充填采矿法的发展情况。

图 3 表示最近四十年用充填法开采的矿石实际产量和今后二十年的规划产量。该图清楚地表明，自从三十年代以来，用充填法开采的矿石产量以实际上恒定的速率在增长，并在可以预见的将来，以同样的速度继续增长下去。

我们近年来所使用的采矿方法（机械化充填法和下向充填法）能满足未来的需要吗？我们认为：随着矿山开采深度的不断增加，加上环境保护方面的规定，以及存在着招募劳动力上的种种困难，将会使充填采矿法的应用很难保持在我们预期所需要的规模上。

鉴于这种情况，我们已开始的研究计划是以发展能代替机械化充填法和下向充填法的回采工艺为目标。

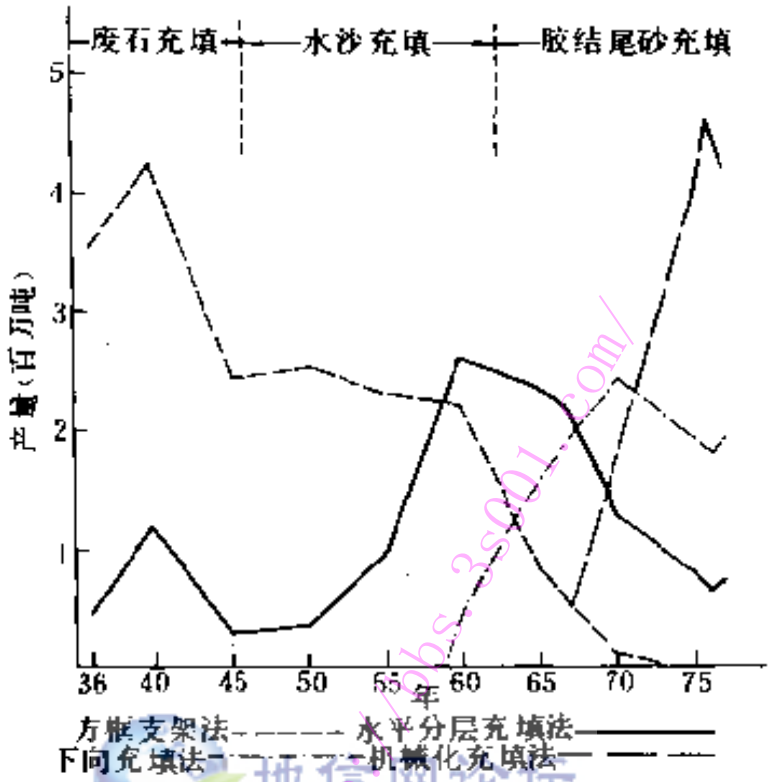


图 2　使用不同充填料的充填采矿法的演变情况

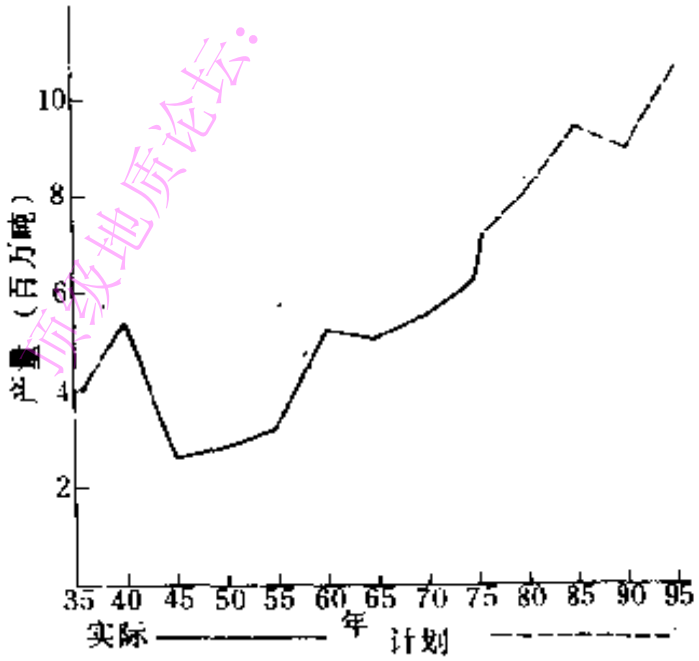


图 3　充填法产量增长图

顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/
地信网论坛

本研究工作分为两部分：采矿方法的研究和经济合理的充填料的研究。

目前的研究工作

采矿方法方面

我们目前的研究是针对一种短循环的充填和采矿方法，并考虑在工作面以外进行的全部采矿作业。这种方法将改善工作的安全状况，减少笨重体力劳动以及避免在保持采矿工作面的良好环境中所产生的问题。这个方法不但可用于矿房的回采，也可用于矿柱的回收。

图 4 表示的是一种典型的布置。主要根据岩石性质和根据工作地点的差异（是矿房还是矿柱）来确定直径 6 英寸炮孔的不同网度。矿体被分为垂直的竖块段（见图 4 的尺寸“a”），它们分别交替进行开采和充填。每一个竖块段从底部到顶部用漏斗爆破法按水平分层一层一层地进行回采。视矿石性质的不同，矿房回采时，通常每分层厚度为 6 — 8 英尺。为了容纳下次爆破所崩落矿石的膨胀体积，就象留矿法那样，每次爆破后，需要从底部放出足够量的矿石。为了避免工人在剩下的薄层矿石上工作，最后的 3 — 4 个分层通常总是一次分段爆破。

和下向充填法比较，该方法是较安全的，它提供了更好的工作环境，而费用大约只有下向充填法的一半。

到目前已开采了总产量为31.5万吨的几个采场和矿柱。曾预计在矿房回采中不会有什么问题，实际上也未遇到过问题。然而，残留在采完的水平充填采场之间的狭窄间柱（小于20英尺），它们已遭到严重破坏，以致影响我们对它进行凿岩和爆破。但在实际工作中，我们没有遇到困难，矿石的平

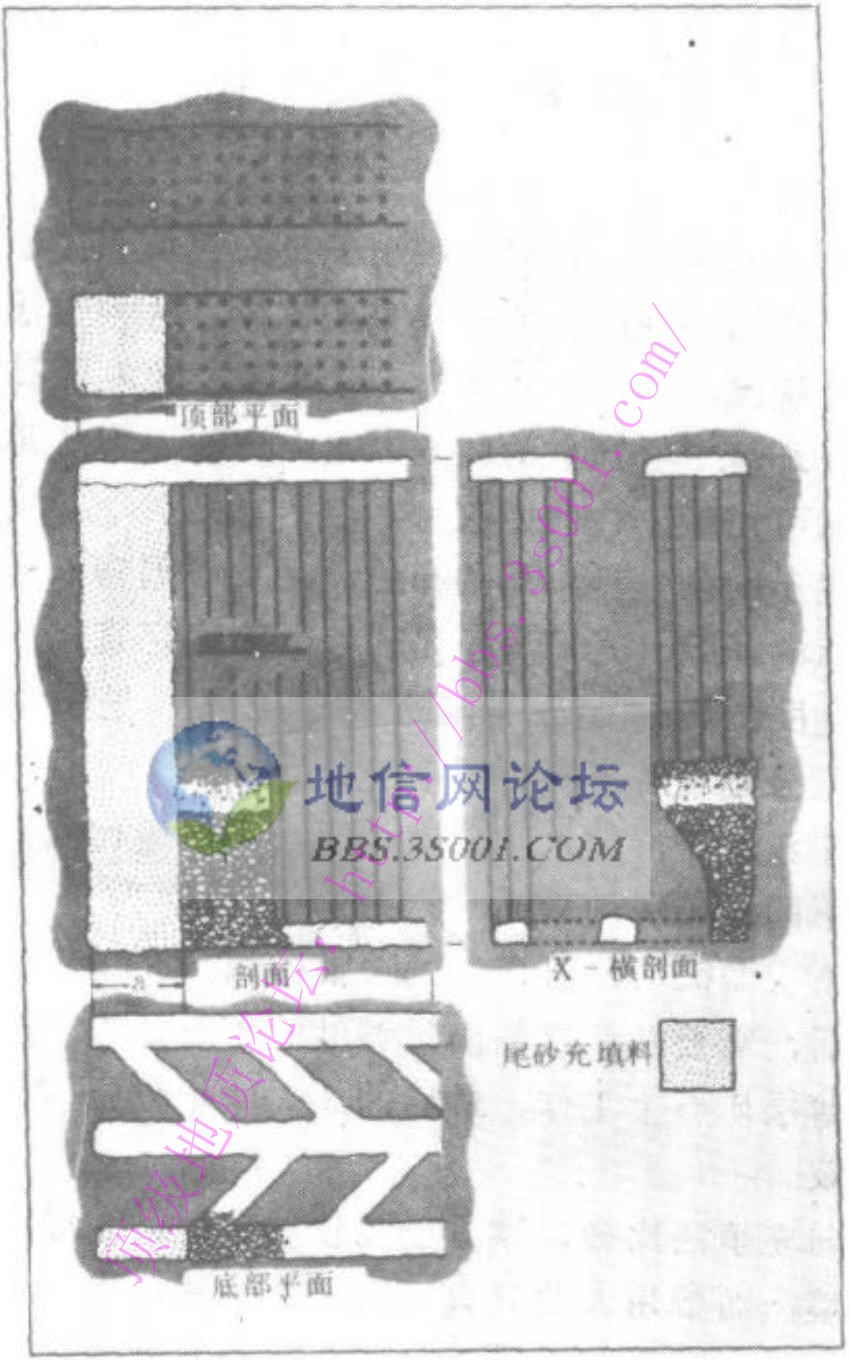


图 4 典型的采矿布置图

均回收率达90%。尾矿充填料所造成的贫化率平均为15%。矿柱高度为80—140英尺不等，相邻采场使用的充填料是含水泥3.8%的选矿厂尾矿。充填体未发生破裂，充填矿造成的贫

地信网论坛 BBS.3S001.COM 资源地质论坛：http://bbs.3s001.com/

化率似乎主要是由于放矿期间采下矿石对充填体壁的刮落，以及位于老人行道或溜井旁狭窄的充填料柱倒塌所引起的。

根据每段所用的炸药量，每次爆破时产生的震动是很大的。图 5 相应地表示四种质点速度对时间的扫描曲线，所记录到的情况分别为：

① 用漏斗法爆破回采矿柱（每段爆破的炸药量为75磅）的情况；

② 靠近①的充填体内的情况；

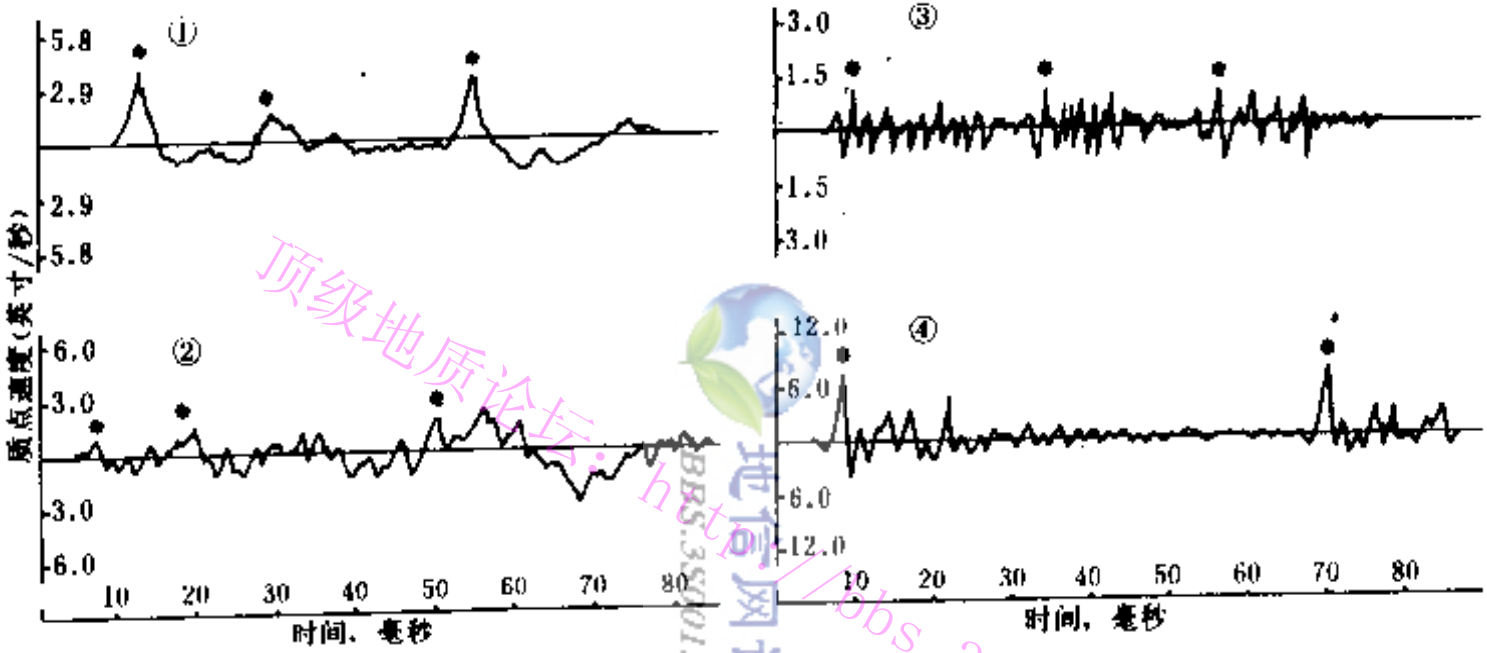
③ 用漏斗爆破法回采矿房（每段爆破的炸药量为75磅）的情况；

④ 用分段装药的深孔爆破法回采矿房（每段爆破炸药量为800磅）的情况。

所有测量工作均在离开装药点约100英尺的地方进行的。如果把第①和第④项记录进行对比，则可以看出，漏斗爆破法所产生的质点速度的峰值（P.P.V.值）大约是分段深孔装药法的一半。然而，每磅炸药的质点速度峰值却要高出四倍。尽管这样，没有发现充填体有任何倒塌。但是，炸药的使用可能很不理想，需要今后进一步加以改进。

充填方面

至今我们所碰到的未支护充填体最大暴露高度是 140 英尺。然而，开采中段的段高使未来大部分采矿工作面具有200英尺高的自由面。因此，我们预计充填料中的水泥含量要比现在的用量高些，应达到 8 %或10 %。考虑到这一情况，在一定的水泥价格条件下，我们早在三年以前就恢复了寻找水泥代用品的研究工作。六十年代早期就对使用各种火山灰质材料广泛地进行过研究。但当水泥含量低到 3 %时，这种材料就不适用了。因其早期强度明显地下降，而这对当时的采



采矿方法	扫描号	爆破地点	监测地点	装药量(磅)	爆破点至测量器的距离	雷管号
垂直后退漏斗爆破法(VCR)	①	矿柱	上部底柱	75	105′	1.2.3
	②	矿柱	胶结尾砂充填体中的上部底柱	75	105′	1.2.3
	③	采场	上部底柱	75	150′	1.2.3
分段爆破法	④	采场	放矿水平	800	80′	9.10

图 5　爆破震动扫描图形

顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/
地信网论坛 BBS.3S001.COM

矿方法来说也是不能被接受的，所以该项研究被放弃了。

虽然这种研究还未完成，但我们已能确定如下几点：

1．来自C.C.渣堆的镍反射炉空冷炉渣，尽管其玻璃质含量很少（＜20％），但磨细到比表面积3500—4000布莱恩（厘米²/克）时，具有良好的凝硬性[据美国材料试验标准（ASTM）第C-595号，七天的强度达到964磅/英寸²]。

2．陶瓷质化的镍反射炉渣比磨细到相同细度的空冷炉渣强度高。但是，强度的增加不足以证明炉渣的研磨费用是合理的。

3．加碳酸钙和碳酸镁于镍反射炉渣并使之陶瓷质化会改善它的凝硬性，但还不能达到经济合算的程度。

4．如水泥含量为4％，则炉渣的最佳含量看来约为8％。

图6表示第56天时无侧限抗压强度和不同类型的炉渣加入量之间的关系。试验是用75％（按重量计）的砂浆浓度进行浇灌以及在温度80°F和湿度100％的养护条件下做成直径2英寸、长4英寸的试样进行的。在试验时，试样的平均剩余含水率为17％。为了进行比较，我们还浇灌了没有炉渣的、含水泥量为4.8％和9.1％的试样，其56天的强度分别为57磅/英寸²和207磅/英寸²。

与此同时，加拿大拉发格水泥公司为我们用镍反射炉空冷炉渣和经过分级的选矿厂尾矿进行了一系列试验。试验条件略有不同（试样尺寸：直径6英寸、长12英寸，浇灌的砂浆浓度为68％，养护温度73°F，湿度100％，试验时的剩余含水率18％）。但是，相对来说，对应于不含炉渣的标准试样（水泥含量分别为3.8％和11.1％），两者强度的增加是一样的。图7表示不同水泥-炉渣配比的无侧限抗压强度的增长情况。

图8表示，第56天后，当水泥含量保持3.8％不变，随着

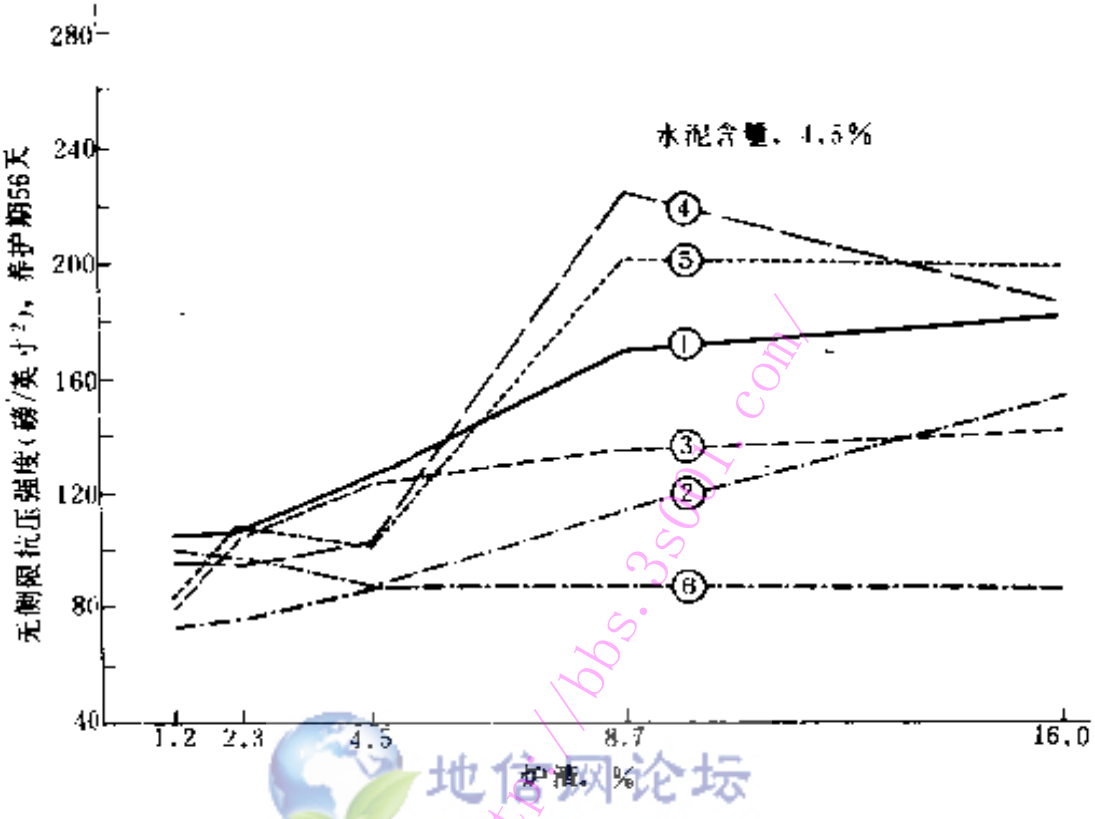


图 6　无侧限抗压强度与炉渣添加量的关系

炉渣加入量的增加，强度不断增高的情况。这和图 6 的结果形成鲜明的对照。从图 6 中看来，炉渣的最佳含量为 8 %。

为了对这种差异进行评价，并确定用不同混合比的原料所制备的充填料的内聚力和内摩擦角，我们又进行了一系列试验。遗憾的是，在撰写本文时这些试验尚未结束。

根据迄今已作的试验可以看出，用一种水泥含量为 4 %、磨到比表面积为3500—4000布莱恩（厘米²/克）的镍反射炉空冷炉渣含量为 8 %、尾矿含量为88%的混合材料，能制备出一种充填体，它不加支护能稳定直立的高度达 200 英尺，而且能抵御爆破震动。除非最近所进行的最后的一系列试验结果与以前的试验差别很大，否则我们计划在最近将进行生产性试验。

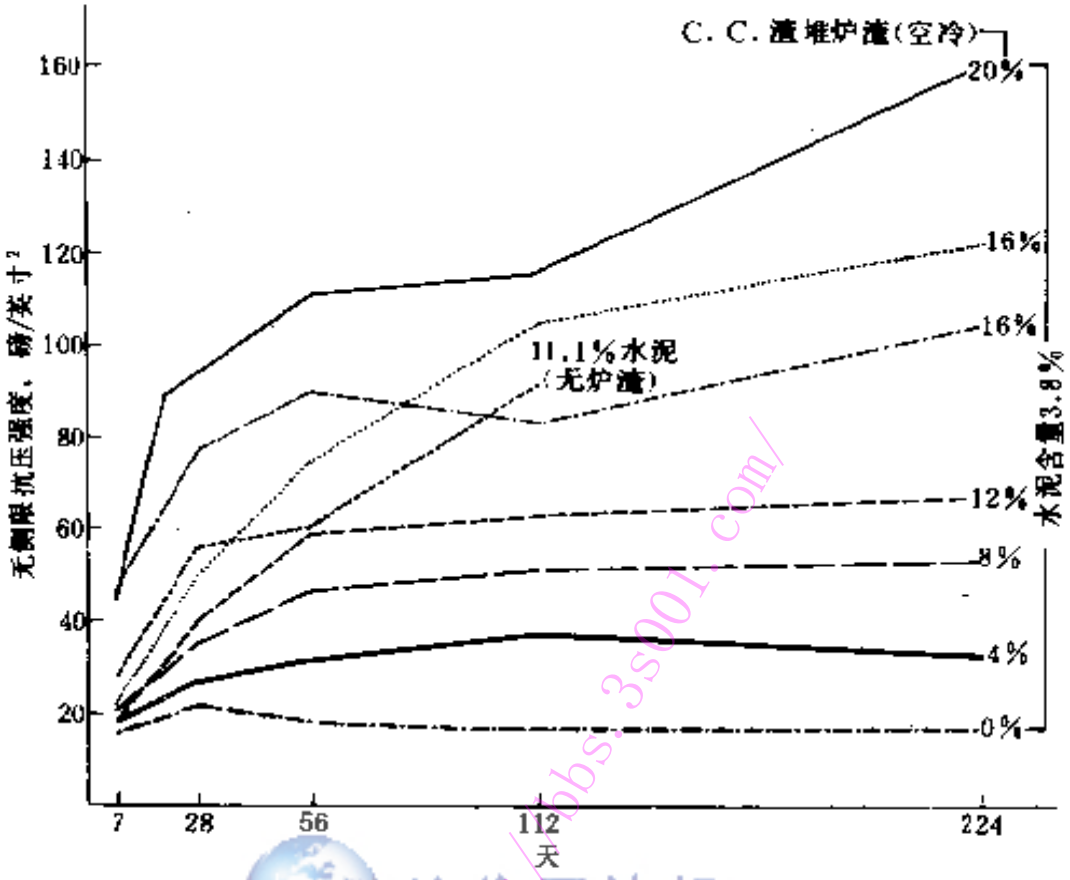


图 7　无侧限抗压强度随时间的增长情况

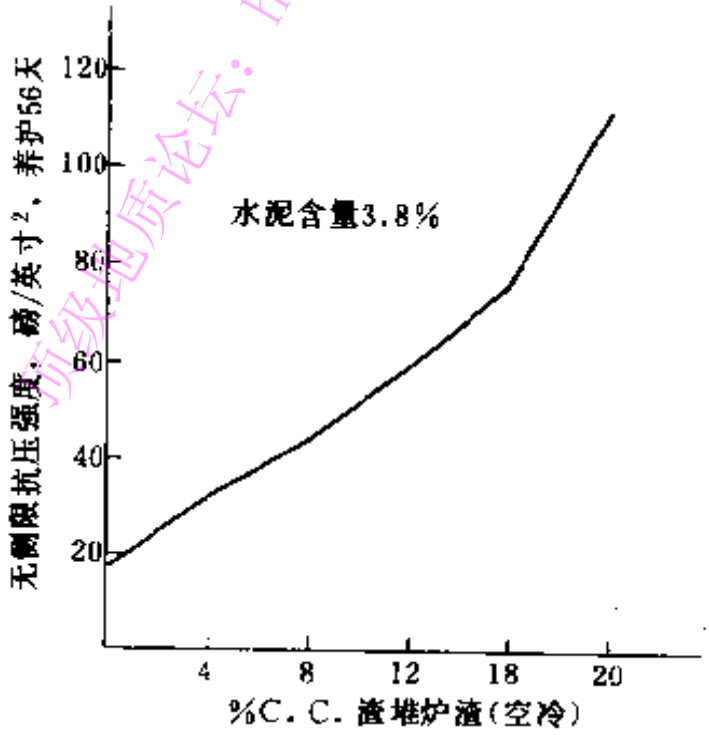


图 8　无侧限抗压强度随空冷炉渣添加量的增长情况

地信网论坛 BBS.3S001.COM
资料来自质论坛：http://bbs.3s001.com/

结　语

总之，在最近四十年中，充填料已经由一种只能充填洞穴的松散材料演变成一种在充填采矿法中必不可少的、具有支撑其本身能力的、稳固而且强度大的产物。随着充填料的改进和发展，在不能用空场法开采的、条件恶劣的岩层里，采矿方法已由方框支柱法发展到水平分层充填法和下向充填法的综合采矿方法，并且进一步再发展到以上所叙述的方法。本方法应用的结果，使得从前采矿工作中绝大多数的笨重体力劳动被排除了，工作场所的安全和环境条件也得到了很大的改善。

参 考 文 献

[1] Parker, R.D., Mining at Creighton, *Engineering and Mining World*, November, 1930.

[2] Brock, A.F., and Taylor, W. T., Square Set Stoping at the Frood Mine of the International Nickel Company of Canada, Limited. 6th Commonwealth Mining and Metallurgical Congress, 1957.

[3] Hall, R. J., and Clarke, A. R., Sand Filling at the Frood Mine of The International Nickel Company of Canada, Limited, 6th Commonwealth Mining and Metallurgical Congress,

[4] McCreedy, J., and Taylor, W. J., The Use of Hydraulic Fill Underground at the Mines of The International Nickel Company of Canada, Limited, *Canadian Mining Journal*, September, 1960.

[5] Stoneman, E. G., and Morrison, G. H., The Levack Mill and Sandplant, Annual Meeting, CIM, Quebec City, March 1961.

[6] Pigott, J. A., and Hall, R. J., Undercut-and-Fill Mining at the Frood-Stobie Mine of The International Nickel Company of Canada, Limited, *CIM Bulletin*, Vol. 54, No, 590, June, 1961.

[7] Thorpe, G. M., Mine Research at The International Nickel Company of Canada, Limited, *CIM Bulletin*, Vol. 56, No. 612, April, 1963.

[8] McCreedy, J., and Hall, R. J., Cemented Sand Fill at the International Nickel Company, *CIM Bulletin*, Vol. 59, No, 651, July, 1966.

地信网论坛 BBS.3S001.COM

[9] Conibear, J. K., The Use of Alluvial Sand and Improvements in Hydraulic Filling Operations at the Mines of The International Nickel Company of Canada, Limited, Ontario Division, AIME Annual Meeting, Denver, Colorado, February, 1970.

[10] Weaver, W, S., and Luka, R., Laboratory Studies of Cement-Stabilized Mine Tailings, *CIM Bulletin*, Vol. 63, No. 701, September, 1970.

[11] Dickout, M. H., The Role and Behaviour of Fill in Mining. Jubilee Symposium on Mine Filling, Mount Isa, August, 1973.

[12] Anderson, D. E., Vertical Retreat Mining at Inco Limited's Levack Mine. CIM Underground Operators Conference, Winnipeg, February, 1977.

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

布利登金属公司胶结尾矿充填法

M．萨勒特*

摘　要

本文简要评述了布利登金属公司尾矿胶结充填采矿法的发展情况。同时讨论了卡彭贝里矿下向充填采矿法和克里斯汀贝里矿巷道充填采矿法所用的专门技术。对实践结果及今后的研究和改进也作了叙述。

地信论坛 BBS.3S001.COM

前　言

布利登金属公司（Boliden Metall AB）是布利登集团的一个企业，它担负着瑞典硫化矿开采的主要任务。该企业在谢累夫特汉（Skelleftehamn）的栾斯卡（Rönnskär）冶炼厂的铜产量达到瑞典国内消耗量的60％左右。银的产量相当于国内消耗量，而铅、金、砷及硒的产量超过国内的消耗量。雇员约5800人。1977年的订单销售额估计为11亿瑞典克朗。

组织机构

布利登金属公司分为若干部门，其中3200人的矿山及1800人的冶炼厂两个部门最大。此外还有管理部门，研究与发展、财务、销售与市场开发等部门。

---

*M．萨勒特(Sallert)是布利登金属公司采矿技术及系统工程部采矿工程师。

布利登金属公司总办事处设在布利登及谢累夫特汉市的谢累夫特欧(Skelleftea)。采矿部门由布利登进行管理，销售与市场开发部门的办事处设在斯德哥尔摩。

生产

布利登公司的矿山位于瑞典的北部及中部。目前，它的十八个矿山每年开采矿石1100万吨。从矿石中选出铜精矿17万吨，铅精矿10万吨，锌精矿16万吨，黄铁矿精矿36万吨。

布利登的大多数矿山都较小，不能单独负担选矿厂的费用。所以布利登采用建立中心选矿厂的体系，这些选矿厂由若干矿山供给矿石。在布利登地区有四个矿山和一个中心选矿厂。克里斯汀贝里（Kristineberg）地区也作了同样的布局。另一些矿山，例如年产650万吨矿石的艾梯克（Aitik）矿、年产140万吨矿石的莱斯瓦尔（Laisvall)矿，年产60万吨的斯特肯约克（Stekenjokk)矿都有它们自己的选矿厂。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

采矿方法

布利登金属公司有一个露天矿，以及两个用房柱法回采、十四个用充填法回采、及一个用房柱法和充填法回采的地下矿山。采矿方法的发展情况见图1。

虽然露天开采及房柱法开采的矿石量占产量的重要部分，但主要的劳动力还是用于充填法矿山。不同采矿方法的生产量及其劳动量所占比例情况见下表。

采矿方法	生产量		劳动量，百分数
	百万吨/年	百分比	
充填法	2.5	22	53
房柱法	1.7	15	13
露天开采	6.7	58	21
其他	0.6	5	13

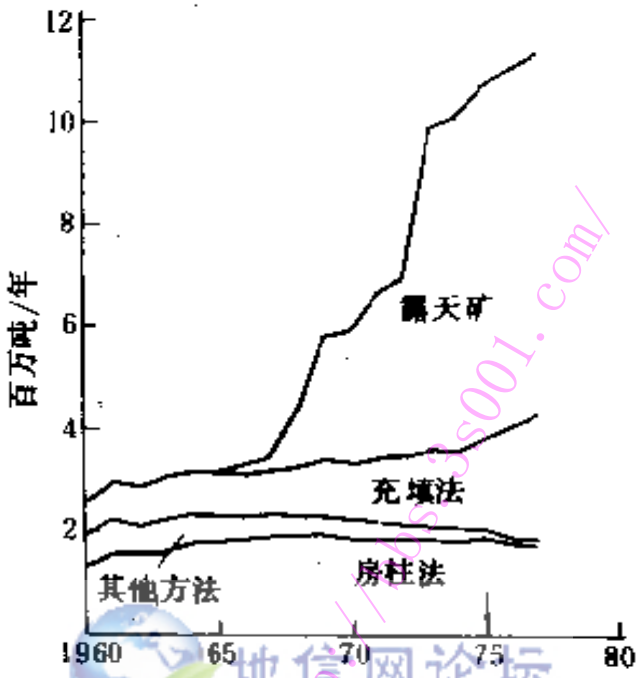


图 1　采矿方法的发展

采用充填法开采的主要理由是：

倾角陡、不规则、规模小的矿脉；

矿石价值高；

围岩强度低，有时矿体的强度也低；

矿物成分复杂，选矿费用高。

由于上述因素相互影响，所用充填法有四个不同方法，即垂直回采法、水平回采法、巷道充填法及下向充填法。其示意图见图 2 。

布利登金属公司采用了一种垂直开采的特殊形式，用于岩石条件好、产状较规则、价值不太高的矿体。开采时，第一阶段先在矿体中每隔 8 至12米的垂高切采若干 4 米高的分层，然后充填最下面的采场。充填采场以上的底柱用台阶法

回采，充填后继续上一个底柱的回采。

水平回采是瑞典充填法中用得最多的方法，它用于价值高、产状不规则、要求回采率高、贫化率低、围岩强度低的矿体。

巷道充填法用于强度不允许一次暴露其全采场宽度的不稳固矿体。

下向充填法用于因矿体强度低而不可能有一个稳固顶板的矿体。此种方法需建造人工假顶。

布利登金属公司四种不同的充填法生产矿量的比例见图2。

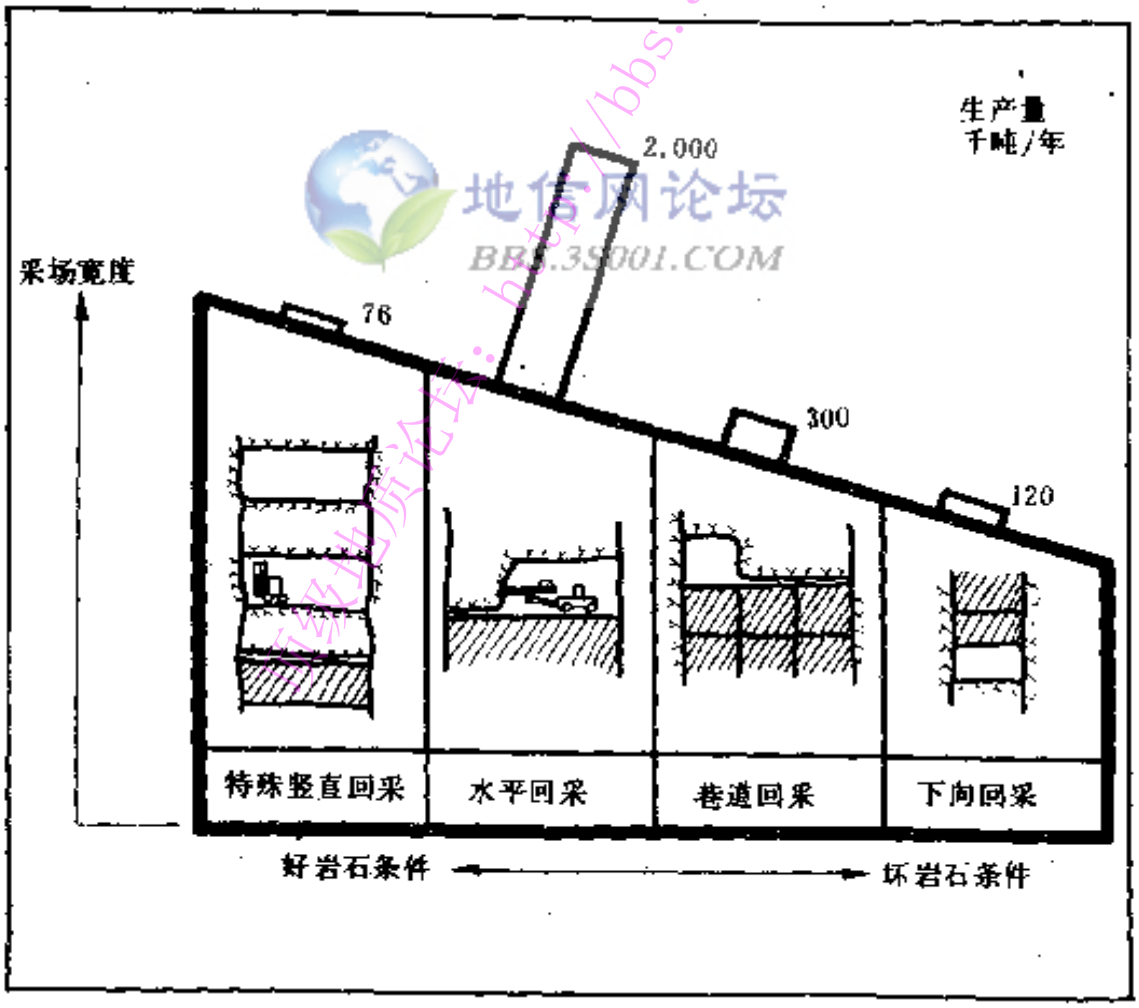


图 2　充填采矿法

地信网论坛
BBS.3S001.COM
测绘地质论坛：http://bbs.3s001.com/

充填技术

垂直回采中所用的充填料为采准工程的废石与尾矿或天然砂的混合物。水平回采常用尾矿或天然砂作充填料。垂直回采及水平回采通常不加水泥，但迄今在巷道充填法及下向充填法中则必须加水泥。

用水泥胶结充填料的采矿法的改进

布利登金属公司于1955年在卡彭贝里矿用下向充填法回采风化、松软矿体时开始了胶结充填方法的改进。

该方法包括开凿3米宽的木支护进路为采场。在采场底板敷设20厘米厚的一层混凝土，采场其余部分用尾矿充填。当回采下一分层时，上一分层的混凝土底板即为顶板。采场沿矿体走向和垂直走向交替分层采掘。这种方法于1967年因运送充填料存在困难而放弃不用，改用木支护的普通充填法开采。

1970年初，克里斯汀贝里矿因岩石条件恶劣，常常发生冒顶，于是又重新试用下向充填法。此时设采场横向敷设原木，其上铺金属网，然后安设锚杆使之插入充填料及上盘围岩（见图3）来增强底板作为人工假顶。随后用水泥胶结充填料充填采场。水泥是在地面充填料制备厂加入到充填料中去的。水泥用量的重量比约为15%。此法后来也放弃了，这是因为充填料产生液化，导致了有些层位中没有足够的水泥量，顶板质量不好，容易冒顶。

卡彭贝里矿用水平分层充填回采时常因冒顶造成多次生产中断。这一情况说明需要其他的采矿方法。1972年该矿决定用下向充填法回采。然而，实践证明，克里斯汀贝里矿及卡彭贝里矿早先用过的那些方法都不能使顶板达到足够的强

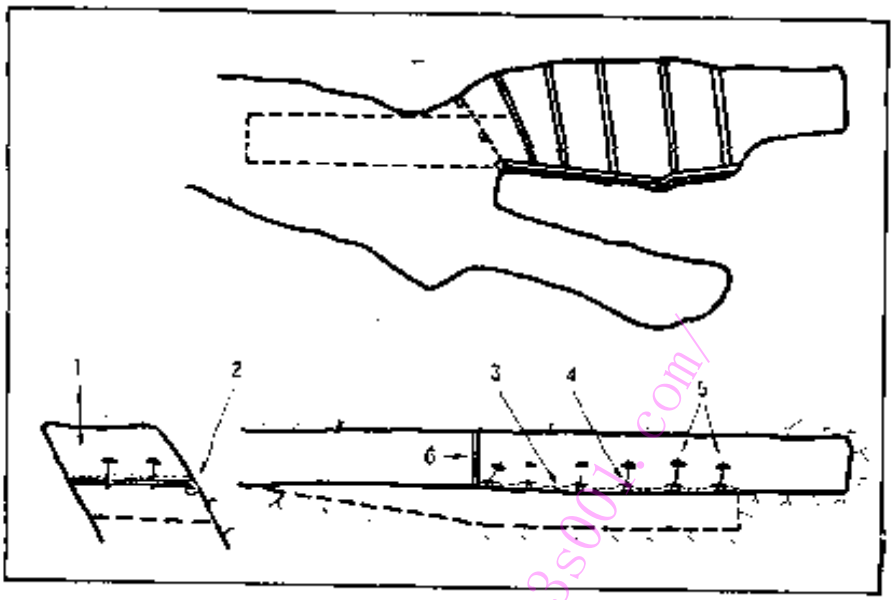


图 3　下向充填采矿法

1——尾矿充填，水泥含量15%；2——沿上盘铺原木；3——焊接金属网，4英寸×4英寸，直径5毫米；4——半原木，3英寸×6英寸，中至中2米；5——锚杆，直径20毫米，长1.6米，用木垫圈；6——挡墙。

地矿网论坛 BBS.3S001.COM

度。

克里斯汀贝里矿胶结充填料强度差，主要原因是含水量太高，重量比达到40%，因此大量的水必须排出，因而使砂和水泥分离，有些水泥被水带走。由于控制不了水泥在充填料中的分布，水泥的胶结作用就大成问题。液化及分层作用导致这种非均质的充填料很不适于作顶板材料。

基于上述原因，矿山着重从充填技术方面开始了改革，目的在于能够做到对充填料进行全面控制。这就需要实现自动控制，调节好砂、灰、水的比例，搅拌均匀及使充填料中水分减少到最低量。含水量重量比约30%的砂浆是一种流动缓慢的浆体。

通过中间试验工厂一系列的试验，第一个工业规模的胶结充填料制备厂于1974年在卡彭贝里选矿厂建成了。1975年

在克里斯汀贝里矿也建成了同样的厂。

胶结充填料制备厂的介绍

如图 4 所示，胶结充填料制备厂包括砂仓及水泥仓、搅拌器、泵及一些调控仪器。该厂位于选矿厂的旁侧。

尾矿用选矿厂中的水力旋流器处理。旋流器底流的筛分结果见图 5 。该底流经一鼓式过滤机把水分降到15%（重量比）。过滤机处理能力为每小时30吨。最终产品用皮带运输机送到800吨砂仓。

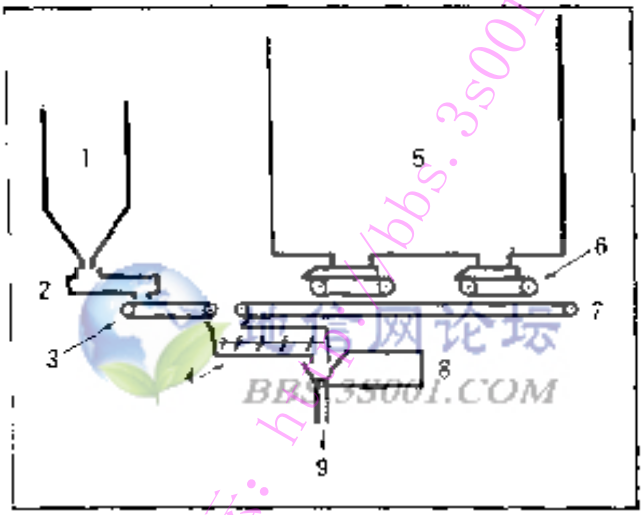


图 4　卡彭贝里矿地面充填料制备厂

1——水泥筒仓，100米³；2——螺旋给料机；3——称重皮带；4——搅拌器；5——砂仓，800米³；6——皮带给料机；7——称重皮带；8——混凝土泵，最大压力60千帕/厘米²；9——至井下，最大60米³/小时。

砂仓下用不同能力的四个皮带给料机把砂送给称重皮带。水泥从一个100米³的筒形仓给料。筒仓底部出口部分由变速马达驱动的螺旋给料机及一个称重皮带组成。水泥及砂子卸入一台搅拌器中并在此加水。在充填过程中，搅拌器不停地工作。

从控制室中用自动控制或手工操作可进行控制与调节。

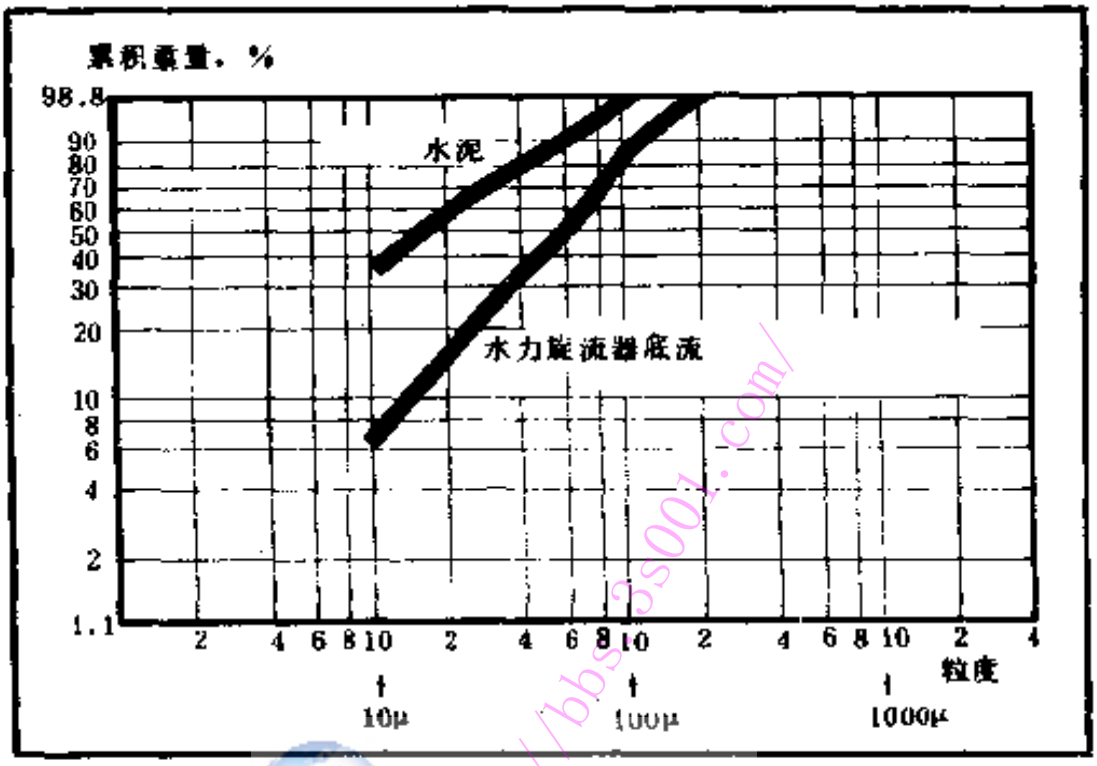


图 5 筛 析

地信网论坛 BBS.3S001.COM

砂浆浓度可以控制，必要时可改变，但通常保持在固体物质重量比为75%的范围。

充填料经过焊接钢管泵送到井下。该系统有两条管线，井下每一中段都安装有可以放出充填料的出口。最大泵送能力为每小时60米^3。

胶结充填法的应用

目前克里斯汀贝里矿及卡彭贝里矿胶结充填法的生产量占全部充填法产量的20%。将来当伦斯特栾（Renström）矿也在充填料中使用水泥后，这个比例将增到25%。

胶结充填料用于下向充填法及巷道充填法，此外还可以用于矿柱回收，以及固结底层及底板。这些方法在布利登金属公司用得并不普遍，本文不作叙述。

下向充填法

1974年在卡彭贝里矿的380米及420米中段开始采用“新”的下向充填法。在下盘中掘进斜坡道及溜矿井来开拓矿体。采场用4×4.5米的进路开采。这个断面尺寸可满足所使用的机械设备的要求，如双臂台车、柴油铲运机、服务车等。采场布置见图6。

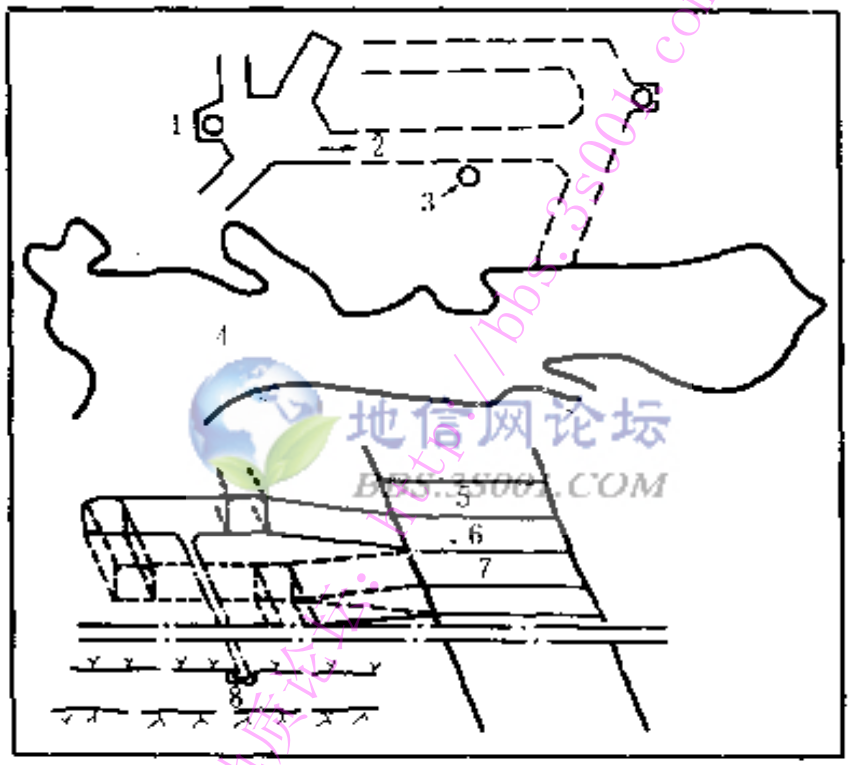


图6 卡彭贝里矿下向充填法布置图

1——溜矿井；2——1:7斜坡道；3——通风天井；4——矿体，~1500米；5——第一分层；6——第二分层；7——第三分层；8——运输水平。

当一个采场采尽，底板铺上30厘米的矿石层并找平，在其上敷设外层涂塑料的焊接金属网。矿石层是用来保护充填料（即下层顶板），以免在下部进路中放炮时把顶板崩坏。

筑好挡墙后开始用重量比为20%的水泥充填料进行充填。充填到1.5米高时即停止，直到第二天再用含水泥为9%

（重量比）的充填料充填剩下的2.5米高度，如图7a和7b所示。不需要排水的特殊装置。

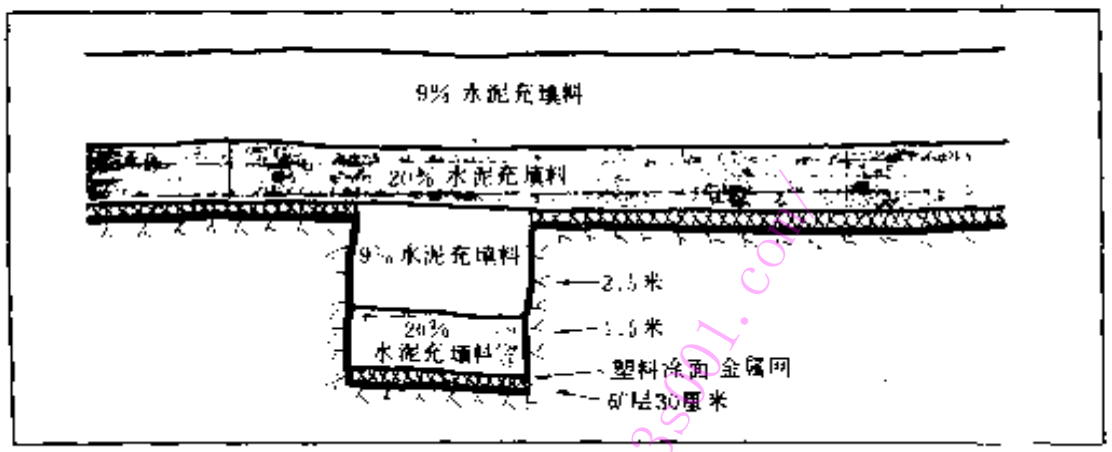


图 7a　卡彭贝里矿充填后的下向充填采矿法

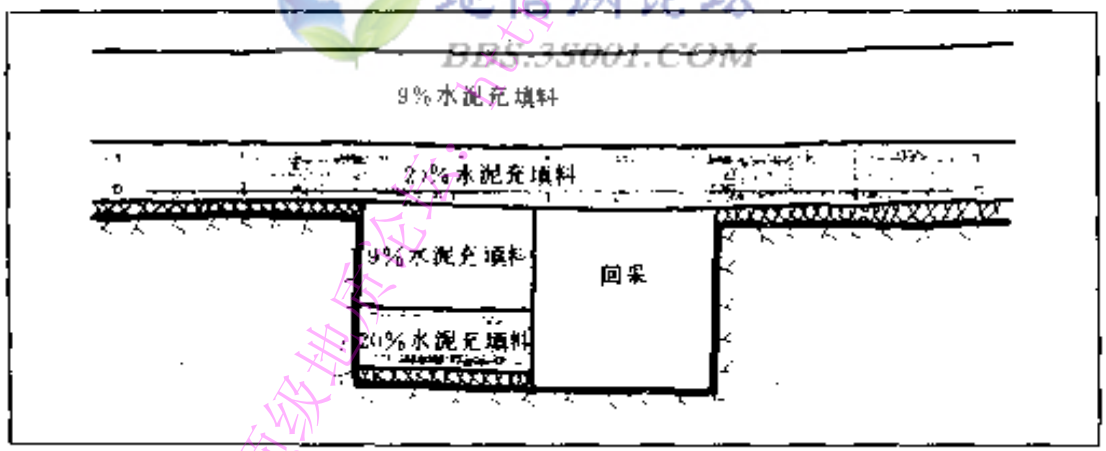


图 7b　卡彭贝里矿下向充填采矿法

经过几天的养护就可开始采相邻的进路。这样做，除外观以外不至于有破坏充填体的危险。采用这种形式的胶结充填后，用木材、金属网、锚杆等增强材料做成的十分繁重的结构形式就一步步完全消失了。现在已不再需要增强措施。在采下面一个分层时，进路的方向垂直于上一分层进路的方向。

地信网论坛 BBS.35001.COM http://bbs.35001.com/ 顶级地质公众平台

巷道充填法

胶结充填法的优点被人们用来作为费用比下向充填法少的巷道充填法。在巷道充填法中，矿体宽度不超过6米时用水平分层充填法回采。矿体宽度超过6米时，采场分成两个或两个以上的平行沿脉进路回采。一个进路采完，在相邻进路尚未开采之前，用胶结充填料把采场充填到顶。最后一个进路回采时不加水泥，只用普通尾矿分层充填，见图8a和8b。

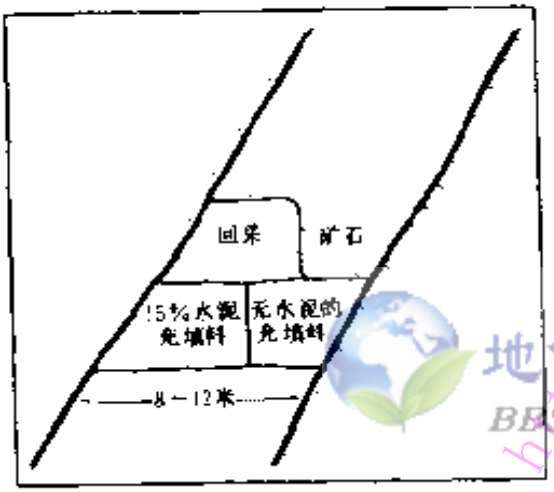


图 8a　克里斯汀贝里矿巷道回采法，第一沿脉进路

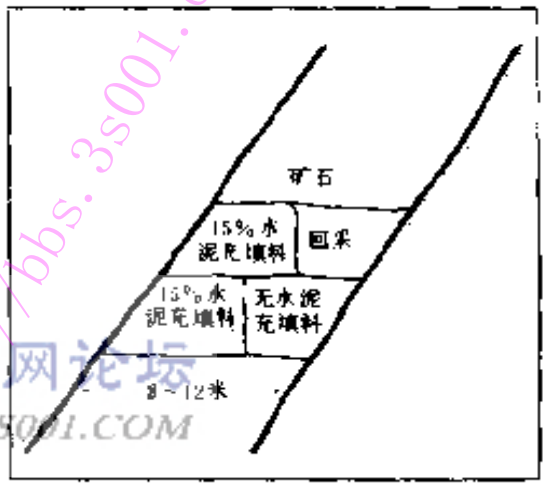


图 8b　克里斯汀贝里矿巷道回采法，最终沿脉进路

地信网论坛 BBS.3S001.COM http://bbs.3s001.com/

此法的采准巷道都布置在下盘。机械设备采用凿岩台车、服务车、柴油铲运机。铲运机大多数是瓦格纳ST-2B和ST-5B型。

目前，克里斯汀贝里矿的成果是令人满意的，年产量40万吨的75%计划用巷道充填法回采。

研究工作

根据过去考察的结果，决定由布利登金属公司及皇家技术学院（Royal Institute of Technology）着手进行一项科研项目。与实验室工作进行的同时，在卡彭贝里矿作了调查

研究，目的在于弄清重量比为25%含水率的砂浆中，水泥含量与力学性能之间的关系。

用组成充填料的材料做成立方体试块。试验前在矿里贮存28天，然后将这些立方块所作的试验结果与从充填于采场的充填体钻取下来的岩心所作的试验结果进行比较。试验结果见图 9。钻取的试块的抗压强度比同样水泥含量的试块的略高。这可能是由于充填体养护时间较长，压实程度较好及水分较低所致。

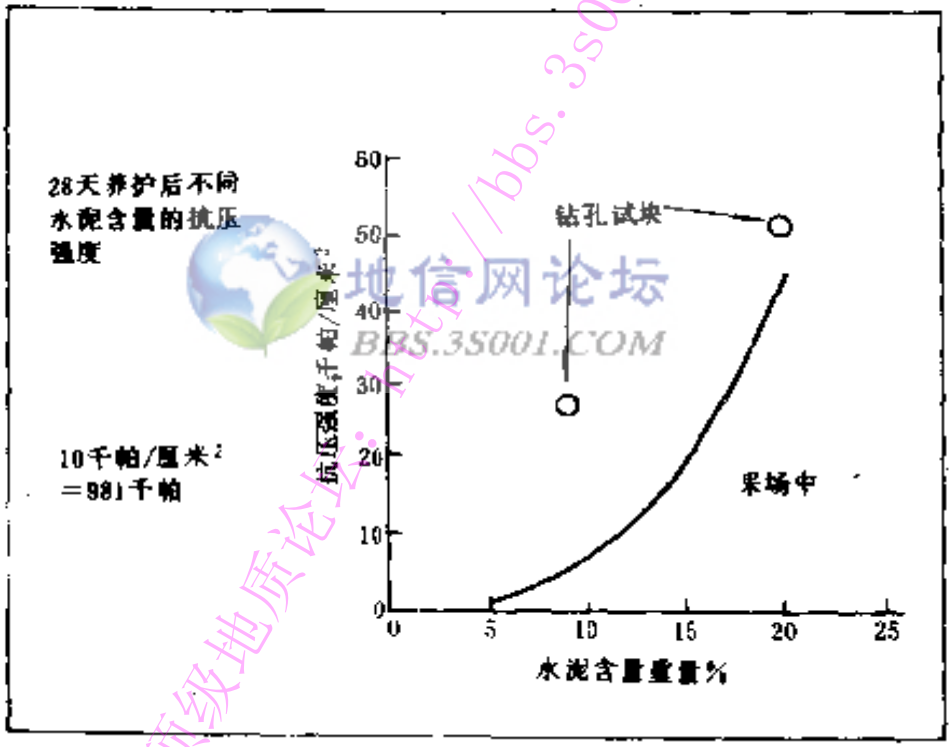


图 9　卡彭贝里矿胶结充填料

与EUROC集团的西门塔公司合作，用不同的石渣材料继续进行广泛的试验，目的在于降低费用及提高充填料的强度。在试验中，用不同的水泥含量来控制抗压强度及抗挠强度（断裂模量）。试验显示胶结充填料具有意外高的抗挠强度（见图10）。混凝土正常的抗压强度与抗挠强度之比约为10：1，

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

而胶结充填料却得到3:1的试验结果。

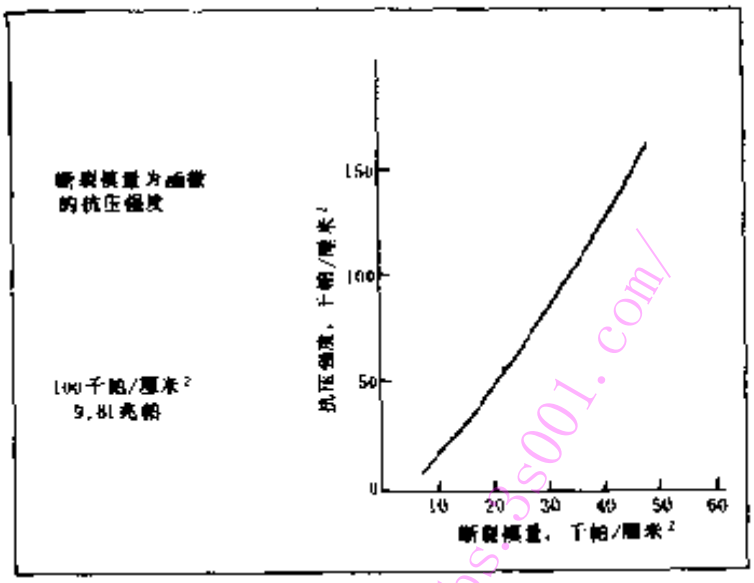


图 10 胶结充填料，抗压强度及断裂模量

胶结充填法的评价

自开始采用胶结充填以来，卡彭贝里矿已浇灌了20万吨水泥胶结充填料，这足以开采30万吨矿石，相当于在胶结充填下掘进了2800米进路。

对采场顶板进行了观测，包括裂纹的出现及顶板挠曲度的水准测量。水准测量结果并不能清楚地说明挠曲度及稳定性的关系。在裂纹附近可见到有一些小的顶板冒落。但没有裂纹的部位未发生过顶板冒落。裂纹处出现冒落，导致了在胶结充填体中进行锚杆试验。用含20%水泥的砂浆注入顶板的锚杆，它具有与打在坚固岩石中锚杆同样的拔出强度。

迄今的经验表明，裂纹加上充填料中含水过多会导致冒落。在这些场合，常常采用锚杆支护。

严重的问题在于水，不论是来自充填料中的，还是来自

围岩中的。因此，彻底弄清水流情况进行有效排水是一个非常重要的问题。

水泥胶结充填存在的问题

对上述矿山来说，由于在生产过程中避免了生产中断，采用水泥胶结充填获得了较高的生产量，生产计划工作容易了，生产指标的完成也成为可能。

虽然采用水泥胶结充填解决了许多严重问题，但也带来了新的困难。水中加入水泥增加了pH值，当用铵油炸药崩矿时会产生氨气，因此有些地方必须放弃使用铵油炸药。如果pH值变化太大，当采用浮选时，水泥对矿水的作用也将影响到冶炼厂的工艺过程。

当用尾矿作充填料时，Zn^{2+}[①]和SO_4^{2-}离子会影响胶结充填料的强度。Zn^{2+}和SO_4^{2-}二者延缓水泥反应，但迄今还看不出对水泥的最终强度有什么影响。当用加有水泥的充填料时，在养护期间会产生热，因而增高井下气温。

今后的改进

为了克服上述的问题，曾经制订了进一步改进的计划：

1．研究新的添加剂来中和氨气。

2．试用不同的碎石材料以提高充填料的强度或降低充填费用。

3．采用振动法来密实充填体。

4．调整搅拌器以便得到更均匀的混合体。

5．研究采用除水泥以外的添加剂的可能性。

---

①原文为Zn'，疑误。——译注

6．试验浮游添加剂。

7．先确定所需要的强度，然后选用水泥量及（或）碎石材料。

结　　语

到目前为止，因发展起来的技术部分还是新的，还需要进一步仔细地试验，以求得更多的有关技术和材料的知识。实践清楚地证明，对岩石强度低、不支撑顶板就会冒落的矿体，采用上述的充填回采方法是有用的，严重和致命的事故次数已大为减少。

经济上的收益表明了这些矿山的发展趋势是正确的。用过去所用的方法难以开采的矿体已经变为可采的了。

由于开采越来越深，回采工作须在恶劣的条件下来实现，因此进一步的改进工作是很必要的。

地质论坛 BBS.35001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.35001.com/

深部金矿的充填支护系统——脱水机原型和经济分析

S．J．帕　切　特*

摘　要

为了应付成本上升和深部采矿方式预期的变化，正在研究一种适于开采南非深部金矿的技术。选矿尾矿很细，矿体薄、倾角平缓并呈板状，这些因素使问题变得更为严重。正在发展的一种技术是用物理原理脱水，及沿走向间柱的改进的风力浇灌技术。经济分析表明，该系统似乎不仅从直接代替现有技术上看是可行的，而且还能提高生产率和贴现经营利润。地下原型脱水机系统正在奥伦治自由邦的西霍尔丁斯公司（Western Holdings Ltd）安装，本文将加以详细描述。选矿厂正在进行改进和扩建。带有陶瓷文丘里管的衬胶充填料输送管道正在竖井内安装。回采区的充填设备由脱水、充填料分配和泵送设备组成。关于这些装置各方面的初步试验结果也作了叙述。

顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/
地质3S论坛 BBS.3S001.COM

前　言

矿物工业中许多人都知道南非在世界金生产中的优先地位。在1977年的第三季度，南非有限公司的英美公司金铀分

* S．J．帕切特（Patchet）是南非有限公司英美公司技术发展服务机构岩石力学部负责人。

公司所属矿山每月生产矿石约230万吨，其中包括金约23000公斤和相当数量的铀。这些矿山估计每月赚取的总利润为3560万兰特(表1)。考虑到这些矿山矿脉薄、平缓并呈板状，以及平均作业深度大，还有地热、通风、地压控制和其他问题等因素，这就是一个很大的成就。

尽管该项工业的规模很大，但由于种种原因，劳动强度仍然是很大的，并且近来工资和材料费用急剧上升，加上世界范围内的通货膨胀，浅部的矿脉减少和品位下降，引起了对采金工业前途的关注。英美公司通过其技术发展服务机构提出了许多重要的机械化计划。技术发展服务机构的岩石力学部近期着手进行利用选厂尾矿作采场充填料的研究。

地质和采矿方法

威特沃特斯兰(Witwatersrand)的地质情况[1]和采矿方法[2,3]已在参考文献中作了很详细的论述，但为了帮助对所述技术的了解和着重说明与这些矿山机械化有关的一些困难问题，这里将进行简要的介绍。

威特沃特斯兰系的含金矿脉是一些范围很大、薄而平缓的层状矿体，它们赋存于前寒武纪沉积盆地所沉积的一系列砂质和含粘土的岩石中。尽管地质年龄很老，但并未经历过实际的造山运动及岩浆侵入活动，含钙成分几乎是轻微的。巨大的区域断层作用把较深的矿脉向上升举至浅部可以通达的标高，从而有助于开采。全部产金区均受岩脉和几种年龄岩层的切割。这些侵入体往往是地震活动的中心，并且给脉外采准和回采带来各种各样的问题。

矿脉的实际含金部分一般很薄，大多数矿脉厚约5—20厘米。在这些区域中，超采1厘米就是采了废石，从而引起

贫化。许多新的区域，金富集带的厚度大得多，有时达2米以上。如果全厚度均需开采，那末由于倾角平缓而产生一个棘手的问题，即大部分常用的机械化技术不能在此应用，而且南非的技术发展很慢，生产率很低。

现时南非深部金矿使用两种基本相似的采矿方法：分散工作面采矿法和长壁法。在分散工作面采矿法中(图1)，运输巷和回风巷的垂直间距约60米，掘在矿脉下约50米的位置。用规则方格网式布置，以约150米的间距掘穿脉巷道至矿脉。然后，在地质条件允许的情况下，沿倾斜掘脉内上山尽量连通同一网格线上的穿脉巷道。沿顶板划分约30米的工作面，并且在穿脉和上山之间掘溜井来完成初步的采准工作。

回采作业循环由凿岩、爆破，出矿和支护等工序组成。凿岩采用手持式气腿风动凿岩机。孔深一般为80—150厘米，平均每一循环约推进1米。在工作面，在走向耙矿巷道及中央耙矿上山内，一般均使用38千瓦电耙出矿。为了限制爆破下的物料，在最近的支护线上设置隔墙。使用“清扫法”作辅助出矿工作，即将底板上的松散物料全部铲取并清扫干净。

支护是回采中最后的一项重要作业，在大多数情况下，它是回采循环作业中最费钱、劳动强度最大的作业。坑木主要是从东德兰士瓦和纳塔尔种植场采伐的水杨和荆树，在铁路运输之前即进行加工，运抵矿山后立即送往井下穿脉内。虽然单绳索道很快得到应用，但坑木运搬却是非常费事的。一旦运到工作面后，坑木立即被组装成木垛就地楔紧。架设工作很费体力，很麻烦，特别是矿脉较陡（>20°）、采场窄（<90厘米）或空间高度较大(>1.8米)的那些地方更是如此。每架木垛通常支护面积为9米^2。虽然液压支架的使用日益广泛，但工作面的立即支护一般都是使用原木。

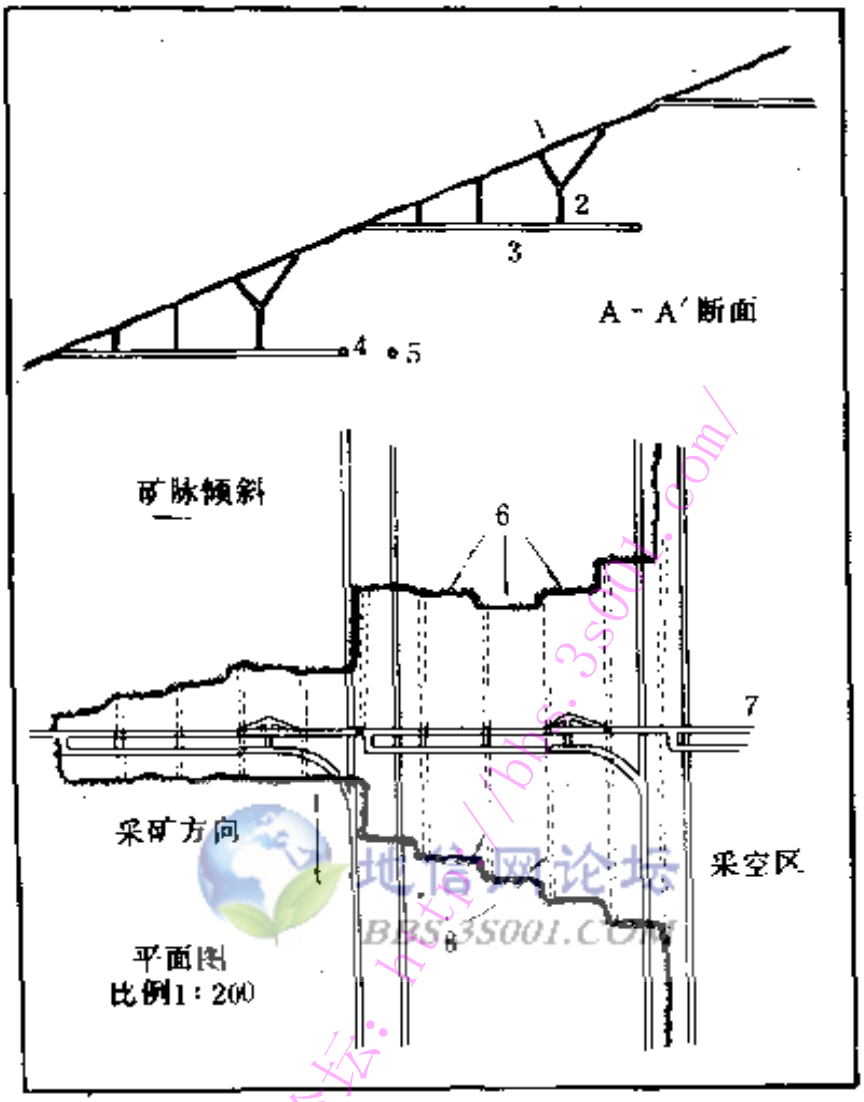


图 1　分散工作面回采法理想布置

1——矿脉；2——溜井；3——石门；4——运输巷；5——回风巷；6——盘区；7——上山(中央耙矿巷道)；8——沿走向耙矿巷道。

在长壁法中，回采工作面先于脉外下盘巷道掘进。因而，脉外掘进是在应力释放的上部采场下进行的。长壁法如果不是不可能的话，也是难于用在高度破碎区的。再者，在出现断层和岩脉的地方，往往需采下大量废石。长壁法只在英美公司的西部深矿中使用。

很明显，改善支护材料及其运输系统即能获得较好的地

压控制，可大大降低采场工人的劳动强度，提高劳动生产率，以及能节省材料费用和其他劳动力。回采循环中的另一些作业，如果不受架设木垛所需时间的制约，则工作面的推进速度就会更快些，许多别的非直接费用也可能节省。

推荐的充填系统

已做过详细的实验室研究工作来评价充填料的性质及金矿尾矿的特性，以及依此充填支护系统的初步方案。这已在参考文献[4]中作了详细的讨论。实质上，该系统是由采场附近的用物理方法脱水的矿浆分配网路组成的。脱水后的物料经分配并泵送至采场。在工作面上，将该材料吹进沿走向矿柱的端部。这些矿柱初期的宽/高比为8，充填率按面积计约为50%（图2）。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

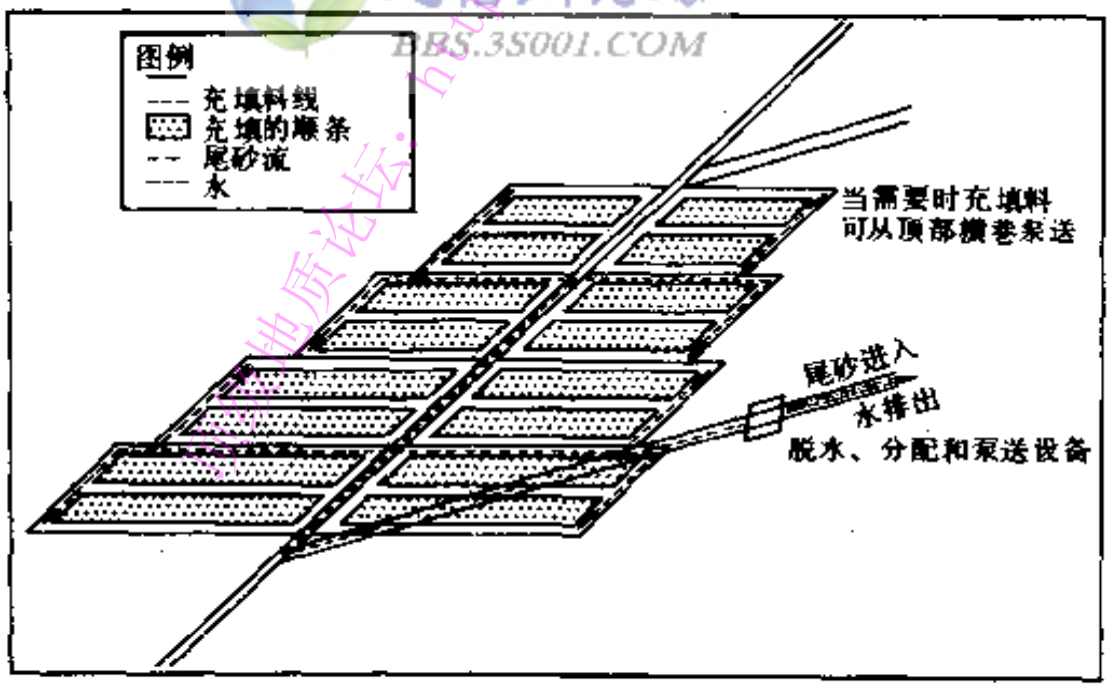


图 2　工作面布置示意图

主要问题是超细粒尾矿的性质(－10微米占25%)和需要在最后的充填产物中保持相当部分的这种微粒物料。实验室试验表明，如果仔细控制含水量就能获得良好的最终充填产物。

原型脱水机试验和装置

图2表示的充填支护系统设想方案与常规水砂充填作业有许多不同的地方，而在许多方面它却又是常规水砂充填技术、煤矿充填技术和混凝土泵送及浇灌技术的集合。

地表初步试验

为了评价所推荐系统的实用性，做了一系列初步的地表试验。这些试验不是想显示所推荐的实际系统或可能使用的设备，只是想试验所涉及的这种混凝土。尾矿浆取自西霍尔丁斯矿尾矿管，其固体含量约为50%，并在46×71厘米的离心机中脱水。脱水后的物料再用一种具有混合搅拌及浇灌性能的湿混喷射混凝土机进行处理。在这种物料内加入少量水泥，混合后即吹入模拟的采场。

如果考虑到初始的目标，这些试验是完全成功的。完全未受过培训的人能很快地操纵所有这些设备，并能很熟练地浇灌这种物料。照这样共浇灌了约30米^3，获得的产品干比重为1.7—1.9。由这些试验和获得的结果能得出这样的结论：总的设想是合理的，并为发展一个完整的充填支护系统提供了足够的根据。

地下原型脱水机装置

现在看来，考虑进一步的、更广泛的试验是合理的。因此，决定安装一套地下原型脱水机装置，以便估价该装置和操作这样一个系统的一些实际问题以及评价充填材料的原地

性能。在总方案确定时，有几个设计问题尚未解决，在进一步的试验过程中仍然继续不断地改变一些细节。西霍尔丁斯矿1号竖井原型脱水机装置的流程如图3所示。

从图3可见，该系统不同于参考文献[4]中的原始方案。主要差别是取消了地面脱水步骤。在很大程度上，该系统还是一种在研究和发展中的系统。因此，在操作程序和能力方面它远比一个正常生产系统更为复杂和多变。该系统设计能力最少为12吨/小时干重。估计费用为314960兰特，它们可分为：

选矿厂改进和地面装置费	74500兰特
竖井内的输送管道费	44460兰特
地下装置费	196000兰特
合计	314960兰特

尾矿得自两个回转鼓式真空过滤机，滤饼固体含量平均为75—85%。将它再制成含固体65%的矿浆，并泵送到地面贮槽内进行最终浓度调节。为了清除尾矿中的粗木屑，进入贮槽前矿浆经过一道震动筛。地面的贮存装置均装有流量计和密度计。一般来说，矿浆给至安装在竖井中的管道内时，其固体含量控制在62—63%，流速控制在220—260升/分之间。

对运尾矿浆到井下的方法作了很多设想和讨论。看来现时充填料的输送大都是使用钻孔，但有的则宁可在竖井中敷设管道。该矿决定在竖井内敷设管道，理由有三：

1）费用大大低于钻孔；

2）如果需要，管道可作别的用途；

3）鉴于作业区分布在很宽的范围，各区对尾矿的需要量

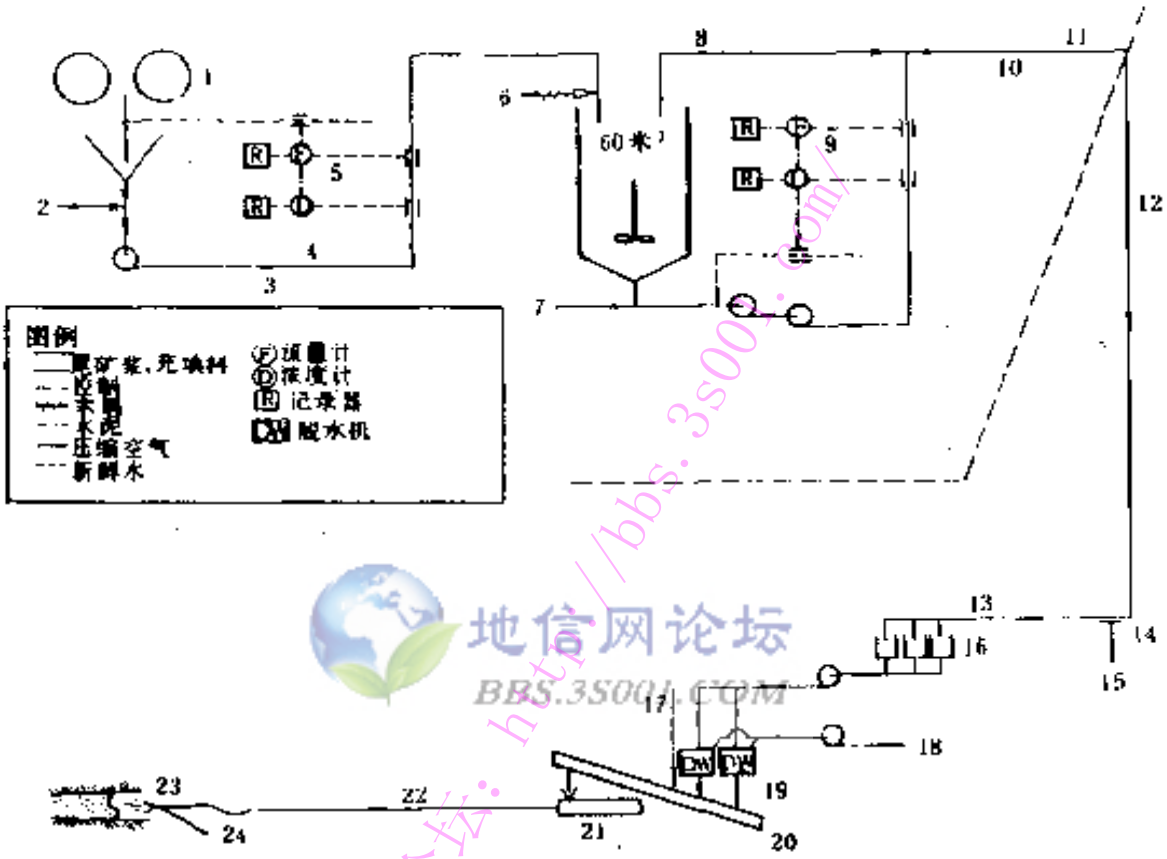


图 3 原型脱水机系统的流程示意图

1——过滤机，25吨/小时，滤饼75—85%固体；2——去选矿厂沉淀池；3——管道长75米，直径50毫米；4——65%固体；5——见注1；6——木屑；7——去选矿厂沉淀池；8——见注2；9——见注1；10——管道长290米，直径50毫米；11——62%固体；12——竖井中管道长1382米，直径63.5毫米，内衬橡胶，每隔80米安装文丘里管；13——管长960米，直径50毫米；14——弯头；15——井下水仓；16——贮槽；17——水泥；18——脱水机溢流送井下水仓；19——脱水机底流，浓度78%；20——螺旋运输和分配机；21——浇灌泵；22——管线长约2000米，直径100毫米；23——喷射器；24——压缩空气。

注：1. 控制系统自动调节浓度，其余全部手控；

2. 精确控制浓度的回流（仅适用于研制阶段）；

3. 诸如阀、水封等小件图中未示出。

地信网论坛 BBS.3S001.COM http://bbs.3s001.com/

较少，以及矿浆输送频繁等情况表明，对生产系统来说，需要一个中央贮存和缓冲贮存装置。

在垂直管道设计中，一般均按北美的经验做。正在敷设的管道是一种直径75毫米、内衬6.5毫米软橡胶的带法兰的80号钢管。它将是自流给料并借助于陶瓷文丘里管在全满流条件下作业。也考虑了使用衬聚氨酯的管子，但磨损对比试验表明，至少现有的这种类型材料不如橡胶衬里那样耐磨。

竖井中安装的管道全长1382米，如果要避免过量磨损，则需采取限制流速的方法，尤其是初期当管道未达到能力时。为此，一般采用节流孔，而这种节流孔也适于这一型式的管道。设计是按液体通过节流孔和文丘里管的常用公式进行的。最后的文丘里管设计直径为12.5毫米，长50毫米的喉管，有平滑的进口与出口部分，它们分别为136毫米和270毫米长。文丘里管下部还装有一段610毫米的陶瓷耐磨管。初始计算表明，把管道摩擦考虑进去，文丘里管以80米的间隔配置。

节流孔设计尚有一些没有经过考验的系数和假定，在设计时没有时间对它们作出评价。例如，通过文丘里管的流速约为30米/秒，设计公式在这些条件下是否能成立还是未知数。在企图对这些系数进行的一项研究中，用泵把矿浆通过用环氧树脂铸的文丘里管，但是并未显示出压力降与预期值近似，证明试验是无结果的，因为文丘里管磨损得太快了。

管道安装在竖井的服务格中。每节长6.1米，安装是从上至下，用夹子固定在井筒罐道梁的托架上。管子装完后，即按要求间隔安装带有必需的隔离垫的文丘里管和耐磨部件，最后将整个管道校直。这样做，即使是文丘里管在加工制造之中也不致于耽误管道安装，并且假如日后要处理大的流量的话，对文丘里管的间隔重新调整或更换也容易。

从竖井至采场的水平管线共960米长，由竖井中管道的静压头来补偿这一距离所损失的压力。这对试验是允许的，但生产系统中无疑需在井底增设贮存、缓冲装置。结果证明，自重法矿浆分配不如泵送法好。

回采区充填砂浆的处理由脱水、分配和泵送三个主要作业步骤组成。脱水机采用专利设计，已在西霍尔丁斯矿进行了广泛的地表试验。该设计采用的是离心原理，现一般能提供浓度达75—80%的底流产品。由于尾矿很细，故底流相当于非坍落水泥砂浆。事实上溢流是含有超细粒尾矿的水。为了使现有的装置和工厂能处理该产品，正在继续进行改善溢流质量的工作。

底流产品的分配是由具有敞口涡槽的双螺旋输送机来完成。它从脱水机下运出底流，混合2—3分钟，然后压入浇灌泵的进口。水泥是用常规螺旋给料机给入。脱水和分配后的尾矿泵送比开始想象的困难要大些。与其磨蚀性相关的粘性及稠性是难以解决的复杂问题。

用100毫米直径的钢管所作的泵送试验表明，在预期作业条件下，摩擦造成的压力损失约为20千帕/米。因此，泵送120米距离时，泵的压力约需2.4兆帕。这是引起阀和阀座堵塞的原因。一旦出现这种情况，高压和磨蚀物料共同作用使阀零件很快被磨损。

试验了几种不同型式的泵，结果均不能令人满意，通常都是由于泵堵塞、过量磨损或是阀的问题。现时正在集中进行用正排量泵进行矿浆泵送试验。其中的阀已由制造商为本用途进行了专门改进。阀的孔道已相应增大，物料的流线也更为平滑。堵塞现象实际上已消除，阀的寿命已有相当改善，但要使机器完全适用于井下还需作大量的工作。

除泵阀磨损问题外，泵送这种高浓度物料已没有别的问题。输送网路的前段所用的管子直径为100毫米的标准高压低碳钢管，后段部分则使用普通低碳钢及塑料管。用50毫米管做了试验，但摩擦损失相当高（大于50千帕/米），因而在最初阶段放弃未用。试验中输送网路管道的磨损迄今不能测定。

经 济 分 析

该充填方案早期所进行的初步经济分析表明，在直接替换基础上来看，该系统可能在经济上是可行的。但在那个阶段，不可能评价对单个矿山的影响或计算出投资额，因为许多作业和系统还处在设想之中，还没有获得实质性的实践结果。然而到1977年年中，已取得了足够的经验和信心来对充填工作进行详细的经济估价。这也受到本文所讨论的地下原型脱水机方案的进一步推动。情况虽然如此，但企图在分公司的基础上来评价显然是不可能的，只好决定集中对一个矿山进行分析。

通过分析研究，选择了西霍尔丁斯矿作分析对象，其原因有三：第一，全部试验工作是在该矿进行的；第二，原型脱水机地下布置方案给一个矿山的系统提供了基本估价的一些数据；第三，也许是最重要的一点，就是在集团的任何矿山中，每吨矿石的作业费用唯它最低。因此，若西霍尔丁斯矿能改善经济效果，那末似乎有理由设想其他矿山可获得相等的或更好的结果。

在1977年9月结束的一年里，西霍尔丁斯矿每月的选矿处理量约为258000吨，其中矿脉矿石约为225000吨。废石来源于实际上不能把它与矿脉分开的地方（如耙矿巷道）。矿石中废石的产出量似与支护方法无关。为了进行经济分析，以

1977年11月的计划生产数字作为基准(表 2)，该数字对矿山具有一定的代表性。为了帮助分析，数据按10厘米回采宽度为单元进行分组。大回采宽度时数据发生很大波动是因为每个单元中盘区数过少。在这个月中，计划以75—295厘米的回采宽度开采284个盘区。以频数多边形形式绘制的图 4 和图 5 表示各作业参数与回采宽度之间的关系。矿山月平均工作面推进速度为6.7米。从图中可见，比值大于在回采宽度大于225厘米时的值。

生产损失的一个原因是“无效爆破”，也就是说，应该获得进尺或矿量的爆破，由于这样或那样的原因而没有获得。其中有的可与受充填支护系统影响的各种工作面相比较。在平均推进值较低的例子里，订立的赔偿损失权规定，对939米^{2}面积可避免40个无效爆破，并与每个回采宽度单元的盘区数目成比例。

下面研究五个具有不同设想的假定例子。每例均假设每

表 1　英美公司各矿月平均作业结果和经济效果（1977年第三季度）

矿　山	处理矿量，吨	金含量，克/吨	金，千克	收入/吨，兰特/吨	成本/吨，兰特/吨	利润/吨，兰特/吨	利润，百万兰特
F.S.Geduld	239300	13.06	3909.7	53.19	21.94	31.25	9.35
F.S.Saaiplaas	104000	3.85	400.3	15.83	20.69	(4.86)	(0.51)
Pres.Brand	262700	9.33	2450.7	38.69	23.36	15.33	4.03
Pres.Steyn-	269700	8.88	2395.7	36.75	24.51	12.24	3.30
Vaal Reefs	613000	9.34	5727.7	37.08	27.32	9.76	5.98
Welkom G.M	184300	6.34	1169.7	24.63	21.35	3.28	0.60
West.Deep Levels	254700	14.45	3681.0	56.07	30.01	26.06	6.64
Western Holdings	271700	11.15	3030.0	42.67	19.95	22.72	6.17
	2259400	10.08	22764.8	40.18	24.44	15.74	35.56

表 2　经济分析中的假想例子的作业结果和经济效果

	项　　目	基准例	例 1*	例2A*	例2B**	例 3 A*	例 3 B*
作业结果	工作面推进，米/月	平均6.7	最小6.7	平均7.4	平均7.4	平均10.0	平均10.0
	盘区个数	284	269	267	259	221	193
	平方米	57742	59658	60292	57498	66372	57900
	矿脉矿石，吨	225687	226707	225878	226146	226805	226638
	总劳动力	7914	7643	7643	7643	6927	6915
	米²/回采段	19.6	21.0	21.3	20.3	31.3	27.5
	要求避免无效爆破	—	是	是	是	不	不
经济效果	矿山寿命，年	15.4	15.8	15.8	15.9	15.6	16.3
	金回收量，克/吨	11.8	11.8	11.9	11.6	12.5	11.5
	总计金，吨	563	579	582	572	604	578
	年总收入，百万兰特	128.1	128.0	129.2	125.9	135.8	124.4
	年作业利润，百万兰特†	64.3	67.1	68.1	64.8	76.4	65.2
	折现后总作业利润，百万兰特‡	200	208	210	202	232	204
	"GOLDPLAN"作业成本，兰特/吨	19.39	18.47	18.44	18.51	17.79	17.89

注：† 上交税利之前。
‡ 上交税利之后。

* 扣除大回采宽度的小回采宽度所获吨量（比基准例品位高而尺寸小）。
** 保持目前回采宽度的配合比例（储量与基准例同）。

月的选矿处理量为257750吨，其中225000吨为矿脉矿石，其余为废石。

例 1　假设小于矿山平均进尺的每个工作面的数值提高到平均值，而大于矿山平均值的则仍按计划进尺进行。由于加快推进在较低的回采宽度下生产的吨数，按相反次序由最高回采宽度中扣除。要求对避免的"无效爆破"进行赔偿。

例 2 A　假设矿山平均工作面进尺为7.4米，并假设每个单元均达到该值。这比目前矿山平均值提高10%。其他方面如例 1 。

例 2 B　平均推进如例 2 A，但现时回采宽度的组合是由减少每个回采宽度单元的盘区数来控制。其他方面如例2A。

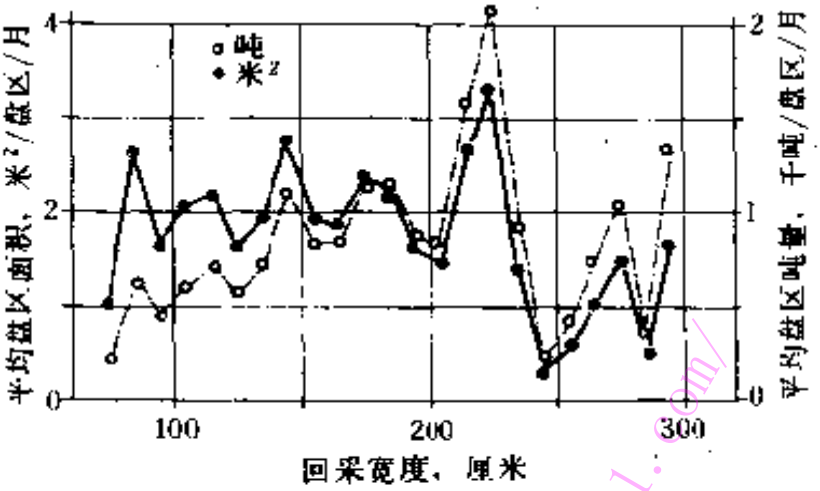


图 4　1977年11月西霍尔丁斯矿以频数多边形表示的每一盘区的平均平方米和平均吨量

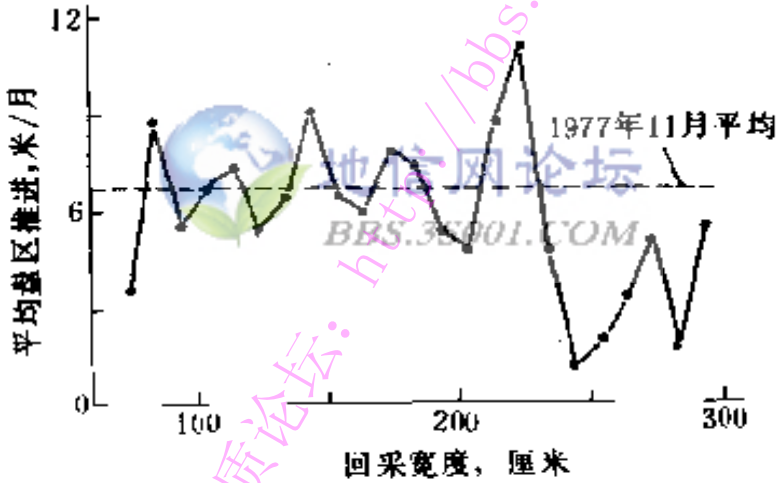


图 5　1977年11月西霍尔丁斯矿以频数多边形表示的平均盘区推进量

例 3 A　假设矿山平均工作面推进为10.0米，并假设每个单元达到该值。这代表了比现时矿山平均值提高了50%。其他方面如例 2 A，但没有因避免“无效爆破”而取得贷款。

例 3 B　平均推进如例 3 A，其他方面如例 2 B，没有因避免“无效爆破”而取得贷款。

假设条件和预测结果的总括情况列于表 2 。

利用“GOLDPLAN”电子计算机程序进行经济评价

曾对如采用充填料可能出现的作业结果作了估价，现在只剩下把它换算为货币形式。为此，使用一种称作“GOLDPLAN”的交互式数字计算机程序，它是为比较矿山寿命的研究而编制的。目的是要简要地说明所建议的矿山条件变化产生的主要影响，而不涉及细节[5]。

在今天的时代，这可能是有些牵强附会，但是金价已被稳定在3500兰特/公斤，而通货膨胀定为0％。这样做是为了不掩盖或不歪曲由于使用充填法而带来的作用。10％折现率是随意选择的。根据现行条例“GOLDPLAN”程序把征税和租借权及费用均考虑在内。南非采金条例要求一个金矿山按储量的平均量进行开采。经营费用的变化直接影响这一要求，而“GOLDPLAN”自动地考虑到这一点。

基建费用

为了估算所涉及的基建费用，准备按原型脱水机系统来估算。这里不考虑由于规模及技术和设备的改进所引起的任何经济效果，因此是相当保守的估算。该系统使用充填料的60％（按体积计）。充填料的比重为2.0。

允许的富裕能力约为10％，则充填料的总需要量为106000吨/月，即

$$225000\times0.6\times\frac{2.00}{2.78}=97122\ \text{吨/月}$$

$$10\%\text{富裕量}=9712\ \text{吨/月}$$

$$\text{总需要量}=106834\text{吨/月}$$

按该需要量计算的基建投资额为6442000兰特，分配如下：

1. 选厂改进 9000兰特
2. 地面充填料制备厂（包括制备和贮存槽、泵、仪器设备和管道） 820000兰特

3. 竖井管道(2条80号加文丘里管的衬胶管)		89000兰特
4. 地下设备（包括贮存装置、泵、管子）		505000兰特
5. 充填设备(脱水、分配、浇灌管子)		4433000兰特
	小计	5856000兰特
6. 10%不可预计费用		586000兰特
	合计	6442000兰特

该系统的费用为61兰特/月吨能力。按现时的经验不能切实地估计所期望的寿命。为了进行经济分析，假设全部系统安装需要两年，而且没有考虑更新。

作业费用

1977年9月结束的财政年度，西霍尔丁斯矿磨一吨矿石的平均作业费用为19.74兰特。在用于“GOLDPLAN”程序时调整为19.39兰特。不象基建投资的估算那样，必须对各种情况的估计都相当准确，作业费用的计算因各因素不同而各不相同，如每种情况下的劳动力费用就不同。此外，其他作业费用也受其变化的影响，这一点应予以考虑。主要数字已由西霍尔丁斯矿提供，但分配比例和作为节省额的比例只是作者的估计。

现行的支护费用包括下面三个主要方面：直接材料费、地面和地下运搬费。估算结果分别为每吨1.19、0.10和0.81兰特，合计每处理一吨矿脉矿石支架安装费用为2.1兰特。由于井下还需要少量的坑木，也因为并不是每项费用都能节约，故上述数字的75%，即1.58兰特的支护费用由于采用了充填而省掉。

所建议的充填的主要作业费用有：水泥、电力、劳动力和维修。在充填料设计能力为106000吨/月时，若水泥与细磨的选矿厂尾矿比为1:30，则每月需水泥3419吨。假定细磨尾

矿可从地面厂免费获得。该系统的劳动力则从现有人力中抽取，它不包括在此项内，但给出在各种情况下的总劳动力需用数。同样，水的消耗没有限额，因为事实上使用该系统时水是纯节约的。维修费用按其他正在运行的充填系统的数值进行估算，并根据现有的经验进行调整。

每月作业费用估算如下：

1. 水泥（单价30.12兰特/吨）　　102980兰特

2. 电力（单价0.01715/千瓦小时）

地面	6363	共计	55680兰特
井下	49317		

3. 维修

地面设施	0.1兰特/吨充填料	
竖井管道	0.05兰特/吨充填料	
井下设备	0.25兰特/吨充填料	
其　他	0.05兰特/吨充填料	
	共计0.45兰特/吨充填料	47700兰特

4. 清扫、救护及其他　0.05兰特/吨充填料　5300兰特

合计211660兰特

若以产量计，此项作业费用对应每吨选厂处理量为0.82兰特，每吨矿脉矿石量为0.94兰特，每吨充填料为2.00兰特。每月维修费用为每月作业费用的23%，而年维修则占基建用的8.9%。

因为空场法的巨大空间和木支架的广泛使用，在南非金矿地下火灾是特别危险的，并且有破坏性。仅就这一点来讲，任何能降低或消除火灾的技术都是重要的。然而，在作业费用中要建立专门一项是很困难的，原因是火灾的发生和规模两者都是无规律的。在西霍尔丁斯矿，每年的直接保险费为

110000兰特，而几年来该矿侥幸未发生重大的火灾。火灾的最大的经济问题是使生产受损失，而不是火灾本身造成的实际损失。过去几年，按矿山工业范围内标准计算的火灾费用约为2兰特/米^2（或0.57兰特/吨）。从这些数字看，在我们的例子中要求节省作业费用0.05兰特/吨(或该工业平均数字的10%）看来是合理的。

广泛使用沿走向的充填分条能大大改善通风管理和改善工作面的作业条件。但是，当火灾发生时，西霍尔丁斯矿不象有些矿山那样有通风困难或降温问题，因此费用的节省将不能达到其他矿山的数字。西霍尔丁斯矿回采的全部通风费用曾估计约为0.33兰特/吨。

威利尔等[7]对高温矿山达到允许的温度环境列举了四个重要措施，它们是：

1）正确控制通风；

2）消除可避免的热源；

3）保持工作面快速掘进；

4）抽排热水。

显然，充填法将对前三点可起直接的帮助作用，应能改善高温条件。作者们估算通风的作业费用为0.12—0.16兰特/吨。于是，把降低的通风费用和提高的生产率考虑进去是合理的，由于充填，要求节省上述的0.33兰特的20%，即0.07兰特/吨。

由于提高生产率而节省的费用也许是最难估计的，因为固定费用和可变费用包含范围很宽的各种变化因素。表2中基准例子里的采场劳动力是按现时开采系统配备，往后的每个例子是按新的盘区分布进行调整的。让竖井和运输的劳动力任意减少10%。这并不代表所涉及的真实数字，而真实数

地信网论坛 BBS.3S001.COM

字要比这个大，因此能给充填系统的运转再调配劳动力。所有其他劳动力仍保持不变。

非洲的劳动力按现时的效率，采每吨矿石的可变费用为1.91兰特。假设效率与可变费用间有一个反比关系，则预计例1的劳动力费用为：

$$1.91\text{兰特}\times\frac{19.6}{21.0}=1.78\text{兰特/吨}$$

年节省劳动力费用应为

$$(1.91-1.78)\quad(258000\times12)=402480\text{兰特}$$

$$(0.13\text{兰特/吨})$$

要计算由于提高欧洲人的生产率而产生的节省是不容易的。鉴于作业更加集中和机械化水平的提高，调配而不是淘汰所有起作用的管理人员和技工位置看来是合理的。费用的主要节省很可能是来自减少作业的盘区个数。现采矿工人的平均费用约为956兰特，节省费用已按新的盘区分布来进行计算。

由于集中回采及随之而来的管理的改进，改善岩层控制条件及随后的士气和环境的改善，以及降低地表尾矿坝水的损失等原因，将是节省费用的潜在因素。还应有一个可估计到的安全事故的降低，特别是那些岩层冒落所引起的事故，因为所有的活动均在由高密度液压支架支护的区域里进行。然而，不可能估算出所有这些的经济意义，故在这些分析中未予考虑。

结果的总结

根据表2的经济效果，即使是用很保守的估算，似乎所建议的充填系统不仅在直接替换的基础上看经济上是可行的，而且其他作业和财务指标也得到改善。

1）非洲劳动力需要量可能减少3.4—12.6%。

2）每吨的作业费用可能降低0.88兰特(－4.5%）至1.6兰特（－8.3%）。

3）年经营利润(在上交税利之后)可能提高0.8—18.8%。

4）折现总经营利润（在上交税利之后）可能提高1—16%。

值得指出的是，纳税后的折现总利润的最佳改进出现在如假设例1、2A和3A中用减少回采宽度来提高矿体的有效品位的时候。在品位和吨量与基准例子相同的例子2B和3B中，这种改善就少得多。其原因是在作业费用降低与由于品位提高而收入增加之间对利润作用的差异。

如果情况是这样，那末就意味着：充填将对品位较低或作业费用较高，或者两者兼有的矿山有相当大的影响。所有其他集团所属矿山的情况就是这样。对每个集团所属矿山的详细分析研究是发现所涉及的确切关系的最好方法，但作为快速验算，我们可随意假定（根据例1）每个矿山的作业费用降低5%。如果用表1的值照这样去做，那末每个集团的矿山每吨矿石利润的改善情况如下：

F. S. Geduld	+1.01兰特	+ 3.5%
F. S. Saaiplaas	+1.03兰特	+21.1%
Pres. Brand	+1.17兰特	+ 7.6%
Pres. Steyn	+1.23兰特	+10.1%
Vaal Reefs	+1.07兰特	+32.6%
West. Deep Levels	+1.50兰特	+ 5.8%
Western Holdings	+1.00兰特	+ 4.4%

这些数字似乎证明这种关系。只有F. S. Geduld矿比西霍尔丁斯矿（Western Holdings）改善的百分率低，这

很可能是由于每吨矿的最初利润高之故。

结　　语

广泛的实验室试验表明，从南非金矿选厂所生产的很细的尾矿可得到满意的充填料。但必须采用包括物理脱水作业和泵/风力浇灌形式的方法，而不是常规水力浇灌的办法。初步的地面试验表明，这样的充填系统的构思是正确的，为更广泛试验用的地下原型脱水机现正在进行安装。适宜的脱水设备已由外部制造商研制。但还没有适于泵送脱水后的矿浆的完全满意的设备。保守的经济分析表明，这样的系统可能大大降低作业费用，还能改善金的回收率和生产率。

参　考　文　献

[1] Coetzee, C. B., (ed.), *Mineral Resources of South Africa*, 5th ed., Pretoria, 1976, pp. 39—75.

[2] Given, I. A., (ed.), *S. M. E. Engineering Handbook*, Soc. of Mining Engineers of AIME, New York, 1973, pp. 12—154 to 12—159.

[3] Woodruff, S. D., *Methods of Working Coal and Metal Mines*, Pergamon, London, 1966, v. 3, pp. 378—381.

[4] Patchet, S. J., Fill Support Systems for Deep-Level Gold Mines, *S. A. Inst. Min. & Met.*, v. 78, no. 2, Sept. 1977, pp. 34—46.

[5] Splaine, M., and Beeforth, C., *GOLDPLAN Users Manual*, T. D. S. Management Science Department, Welkom, August 1976.

[6] Whillier, A., Fire Protection in Gold Mine Stopes, *Fourteenth Annual Research Review*, Chamber of Mines of South Africa, Johannesburg, 1977, pp. 73—85.

[7] Whillier, A., Van der Walt, J., and Ramsden, R., Improving the Underground Environment in Deep Mines, *Thirteenth Annual Research Review*, Chamber of Mines of South Africa, Johannesburg, 1976, pp. 1—9.

地矿网论坛 BBS.95001.COM

诺兰达矿业公司利用胶结充填法回采矿柱

A．施瓦茨*

摘　要

早先采矿时留下的走向长120—150英尺的较大矿柱，它们占现时矿量的很大一部分。现在正在回采这些矿柱。本文在详细介绍矿柱回采之前，简略描述了该矿的历史和矿房的回采情况，它包括支护系统、拉槽、大量爆破、贫化和地压控制问题。

地信网论坛 BBS.35001.COM

前　言

吉科（Geco）矿坐落于苏必利尔湖（Lake Superior）北面，大约在安大略省的雷湾（Thunder Bay）和苏圣玛丽（Sault Ste. Marie）两地的中间。

矿山于1957年9月末开始生产。从那以后至1977年底，共采出矿石29689368吨，生产铜金属551224吨，锌金属937141吨，银40076757盎司，以及金9460盎司。

上述采出矿量中约85%为深孔法所生产，其余15%从水平分层充填法和采准中获得。

层状硫化矿体产于石英-白云母片麻岩中，该岩石是拖曳褶皱变质沉积岩带的组成部分。

矿体倾角很陡，上盘或下盘难以分辨。矿体走向的方位

* A．施瓦茨（Schwartz）是诺兰达矿业公司吉科矿总工程师。

角约为98°。底部以32°倾角向东倾伏。矿体赋存于东向倾伏的拖曳褶皱之中，其平均水平长度为2500英尺，宽65英尺。由于矿体赋存于石英-白云母片麻岩的包体中，应意识到矿体的北岩壁和南岩壁的不稳固情况。这种软弱地带是由南-北走向的辉绿岩脉、伟晶岩脉等侵入以及切入矿体的薄石英闪长岩脉等构成（图1）。

采矿作业

生产的前四年(1957—1961)，在矿体西端很成功地使用了深孔空场法。该方法单纯由一系列垂直走向布置的第一步骤矿房和矿柱组成。这些矿房直采至地表，矿石用电耙耙至溜矿井。最终，为了实现全部回采，矿柱被爆入矿房下的耙矿巷道。矿房和矿柱以类似的顺序向东采了500英尺。但东端与西端有本质的不同，即东端回采作业完全限于地下。

切割刚开始就发生塌落，当回采继续六个月时，两个矿柱局部被破坏。为了解决这个问题，在靠近崩落区的顶部的地方掘一充填井通至地面，随即将采石场的石料充在塌落的和采下的矿石混合物的上面。因此，“损失”矿石的全部回收即成为可能。

由于经济上有利可图，在将来的回采作业中仍打算继续使用深孔法。但是，将通过使用采石场废石充填、放矿控制程序、运用钢丝绳锚杆支护，以及使用胶结料最终稳定充填废石等来改进深孔法。许多采区已开始使用这些新方法，而且获得未料到的效果。

然而，尽管任何一个矿房的回采可能是成功的，但矿房间的矿柱回采问题则是另一回事。

在介绍矿柱回采详细情况之前，需对该矿所用主要采矿

系统作一简单介绍。这也就可以使矿柱回采本身得到说明。

主矿体的下部较厚部分是按垂直走向的矿房矿柱系统布置的。矿房沿走向长70英尺，矿柱为120英尺，被称为“边界”矿柱的每第三个矿柱长为150英尺。

典型的每一步骤盘区平均高度为800英尺(图2)。该盘区平分成上下两层。每层即称为一个矿房。上层先采，耙矿巷道和拉底巷道位于该层的底部。从主溜矿井系统掘一溜矿井至耙矿巷道。该层的顶部扩大至矿体边界，一般为20—40英尺宽。矿房的顶板用钢绳锚索锚固，并从这里掘一充填井至最近的主充填井系统。相距100英尺垂距掘分段巷道，并从拉底巷道掘切割天井至该层顶部。该切割天井扩大至这一采场总体积的25—40%已爆破，并由耙矿巷道将矿石运走为止。剩余部分用一次大爆破法回采。

紧接耙矿作业的恢复，即将废石充填料放入采落矿石上面的空区。必须指出，当矿石由耙矿巷道放出时，须连续充入这种充填料，以防不稳固围岩壁塌落。在全部矿石放完之前，下层已进行了采准，并开始生产形成了初期空区。上层和下层开采中，主要的不同点是在贯通最上面分段巷道与上层耙矿巷道的凿岩天井中钻水平孔。用这种水平环形钻孔加上耙矿巷道矿柱中的其他钻孔方法，即能使下层爆通上层。当全部采下的矿石从上部采场放完并且在下部采场中形成足够的空区时，后者则用另一次大爆破崩矿。

继续放矿直至所有漏斗口均出现废石充填料为止。继续充入废石充填料，所有时间都保持充满空区。现准备在盘区内加注尾砂胶结充填料。通至盘区的所有平巷（除最上面的外）均筑牢固的隔墙；底部耙矿巷道均设“鼠笼”式排水箱或泄水箱，并与埋在耙矿巷道混凝土隔墙内的金属管连接起

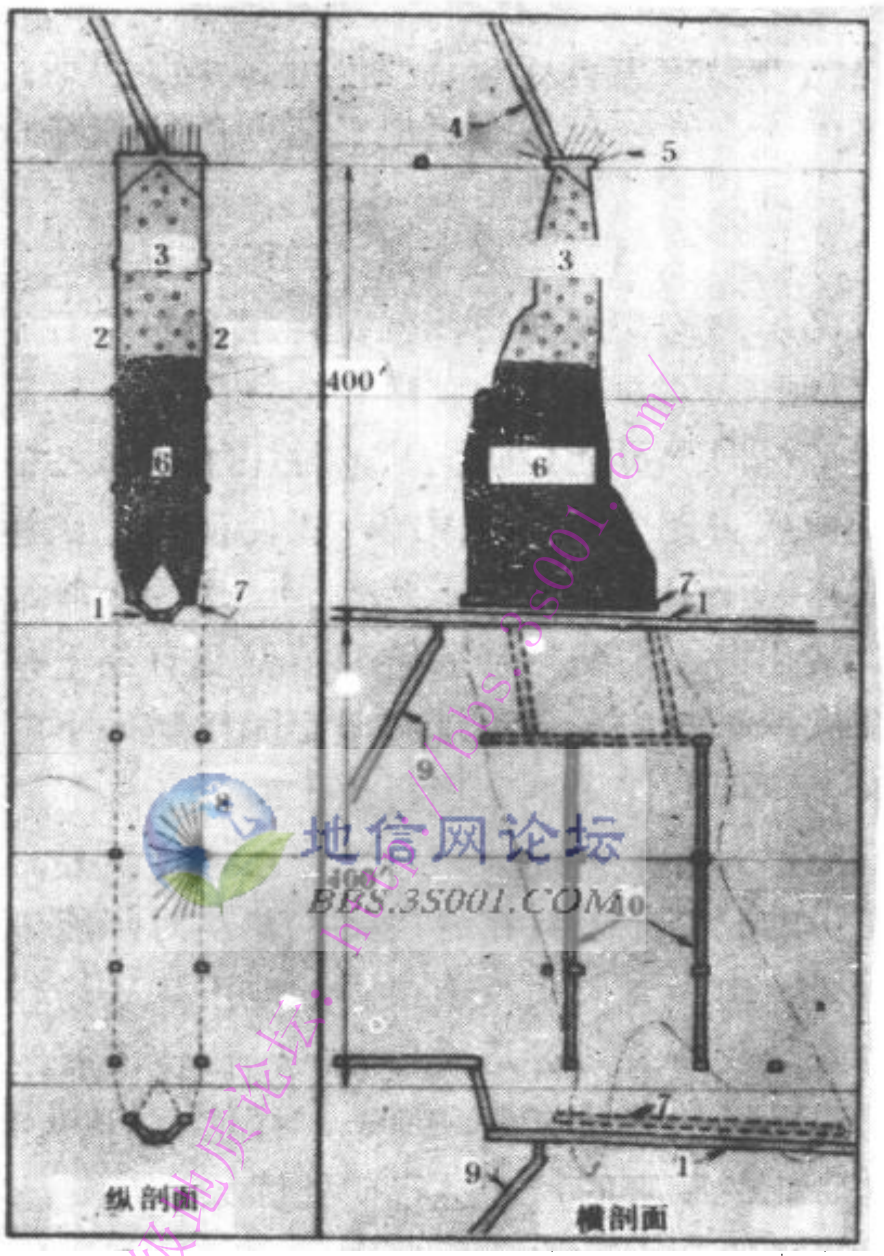


图 2　典型的第一步骤矿房

1——耙矿巷道；2——矿柱；3——采石场废石；4——充填井；5——钢绳锚索；6——采下的矿石；7——拉底巷道；8——炮孔布置；9——溜矿井；10——切割天井。

来（图 3）。混凝土隔墙能很好地将充填砂料阻留在盘区内，而鼠笼式排水箱或泄水箱将充填料中的水分离出来，并把它

纳入井下排水系统。

加入3%（按重量计）普通硅酸盐水泥的水砂充填料从盘区顶上导入，它穿过废石充填料之间的空隙并将其填满，而水则从下部耙矿巷道排出。

简要地说，这就是矿房的回采和胶结充填的方法。采石场的废石充填料的初期作用，就是当采下的矿石放空时支撑采场围壁(图4)。添加尾砂胶结料使之固结，实质上就是当回采毗连矿柱时尽可能地防止从矿柱采下的矿石遭到贫化。其目的是使矿房充填料充分固结，以便矿柱耙矿巷道的漏斗口优先放出采下的矿石，而不是毗连矿房的“胶结”充填料(图5)。这里并不期望这样胶结充填壁具有象土建工程所说的那种强度或粘结力。只不过希望它能比新采下的矿柱矿石的移动性小，矿石优先于充填料放出而已。

第三点，它与前面提及的两个作用一样重要，即与矿柱毗连的矿房的胶结充填料在岩层发生移动时，能维持矿柱的尺寸(图6)。由于岩层相当不稳固，地压从采场转移到矿柱而使矿柱破裂及断裂。这是很自然的，假使没有废石充填以及后来毗连采场的胶结充填，那末矿柱就会坍塌。这些措施确保了以后能按原来的尺寸进行矿柱回采。

矿柱回采的先决条件是两毗连矿房充填废石的胶结。已用该方法采完了两个矿柱。为了简单起见，下面就专门讨论这两个作业。

矿柱回采

29号矿柱的回采（图7,8,9,10，11及15）

该矿柱走向长120英尺，它处在27号矿块以西和30号矿

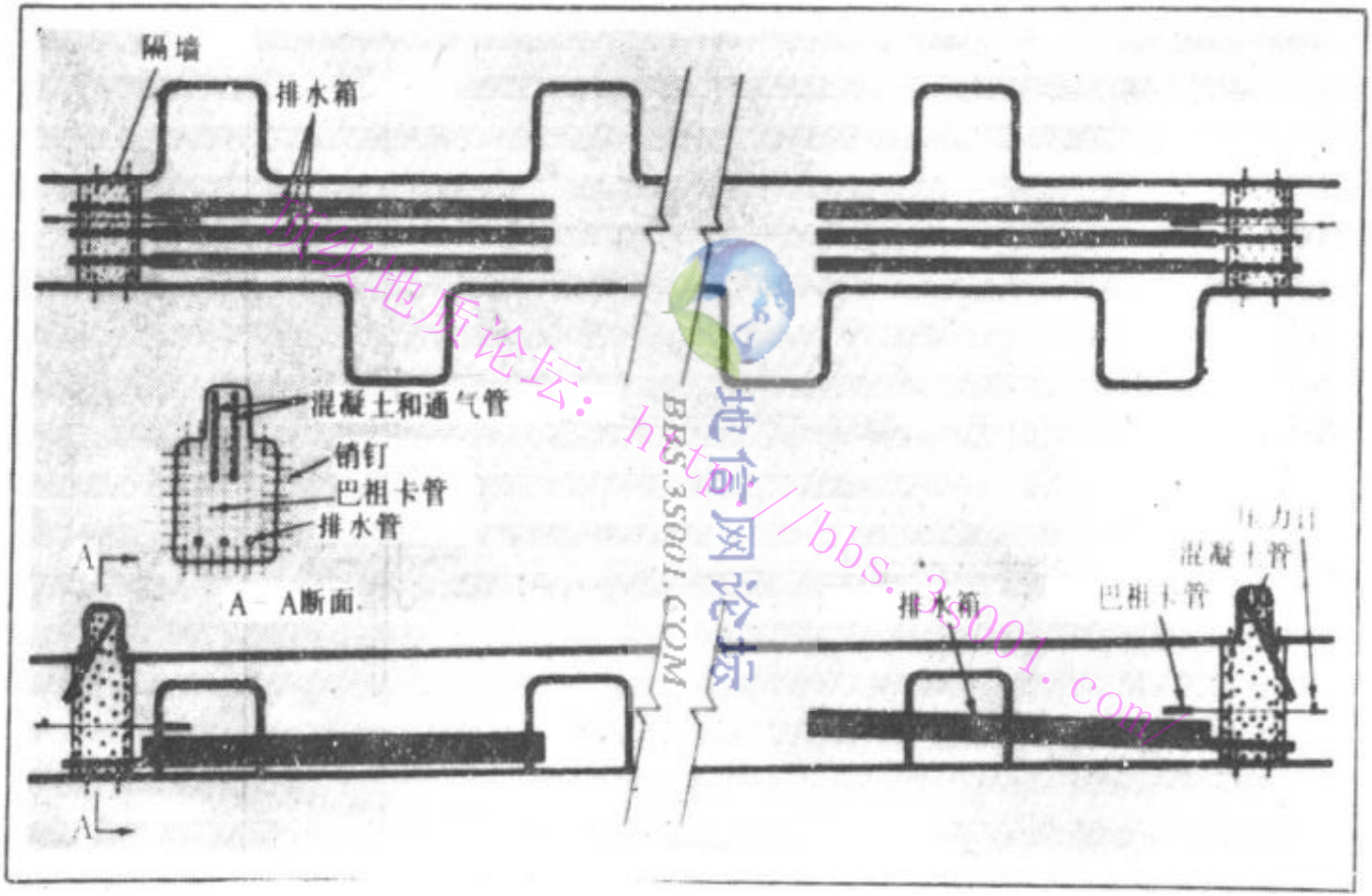


图 3　耙矿巷道中水砂充填隔墙和排水箱总布置

煤炭地质论坛：http://bbs.35001.com/
地信网论坛
BBS.35001.COM

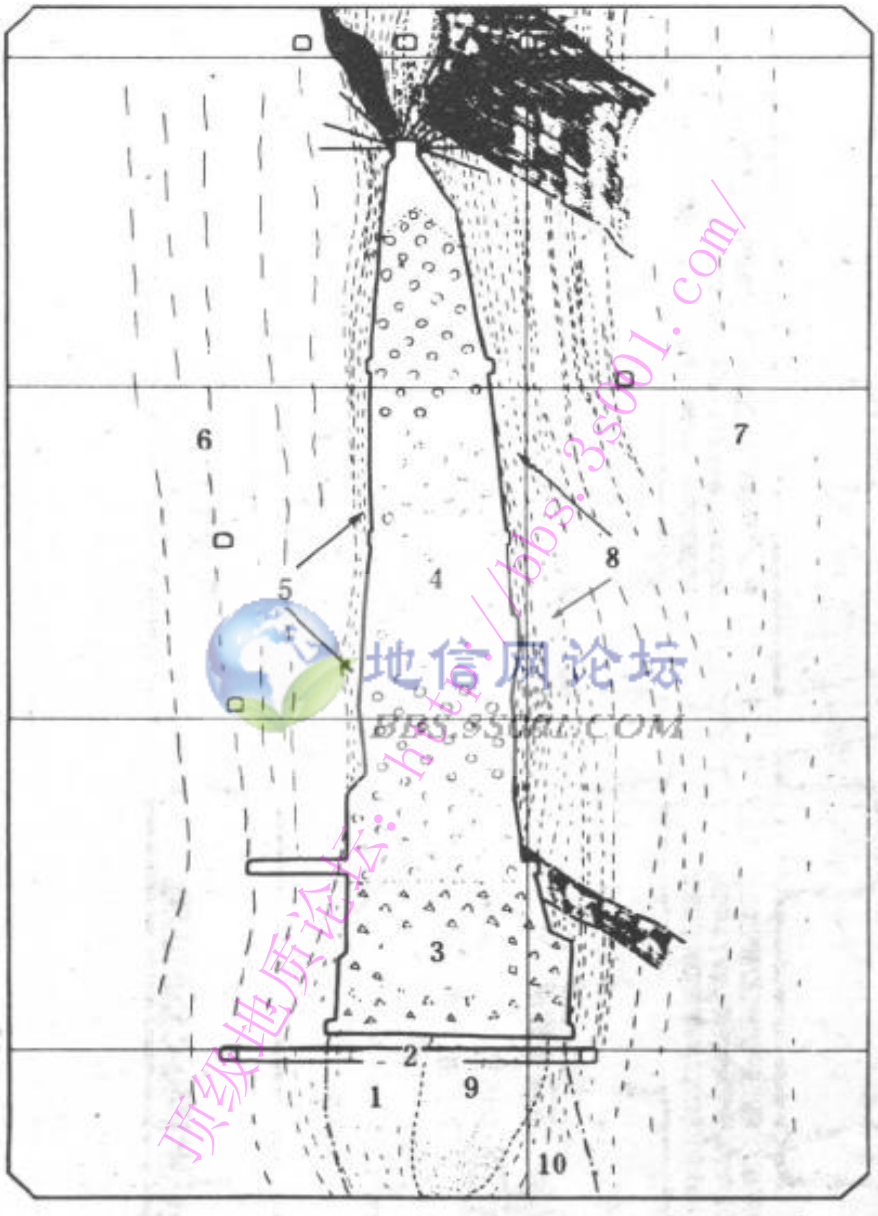


图 4　用废石充填支护岩壁

1——浸染矿；2——靶矿巷道；3——采下的矿石；4——采石场废石；5——绢云母片麻岩；6——夹有石英闪长岩的灰片麻岩；7——夹有石英闪长岩的黑云母片麻岩；8——夹有石英闪长岩的绢云母片麻岩；9——块状矿；10——浸染矿。

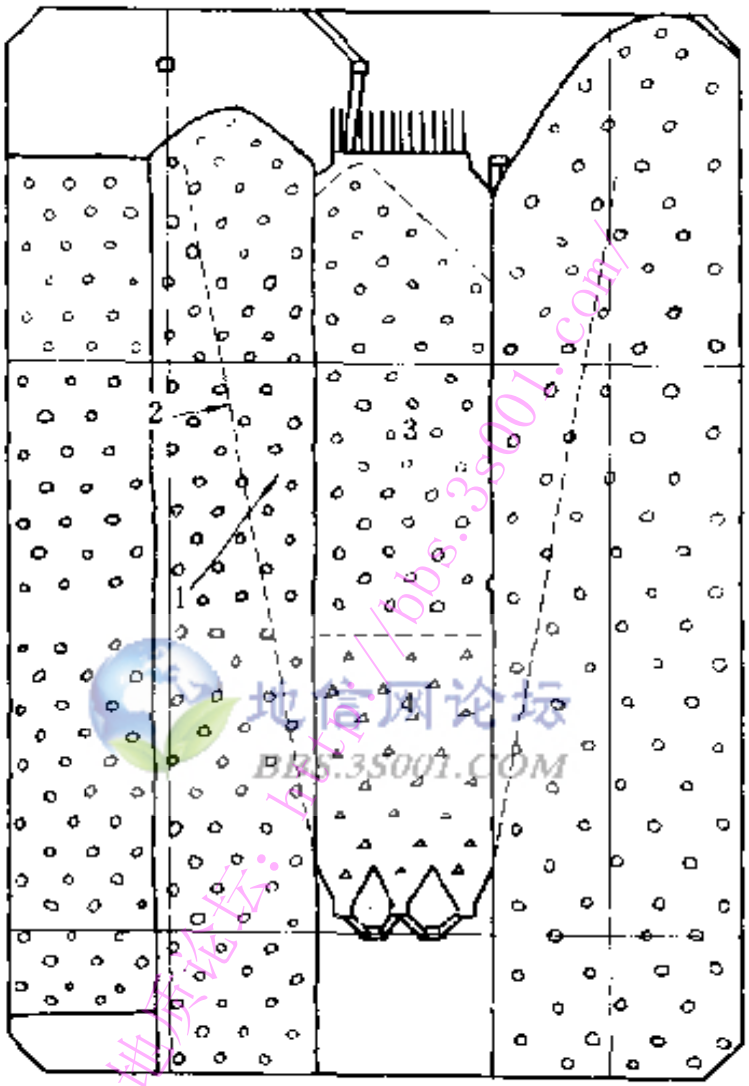


图 5　采下矿柱矿石的优先放矿

1——放矿时胶结充填料留在原位；2——放矿时的自然界线；
3——采石场废石；4——采下的矿石。

块以东之间。走向长290英尺的27号矿块已生产了138万吨矿石，需要776000吨充填废石，218000吨的尾矿充填料，以及为胶结需5200吨普通硅酸盐水泥。该矿块的垂直高度为700英尺。走向长230英尺的30号矿块已生产2198000吨矿石，

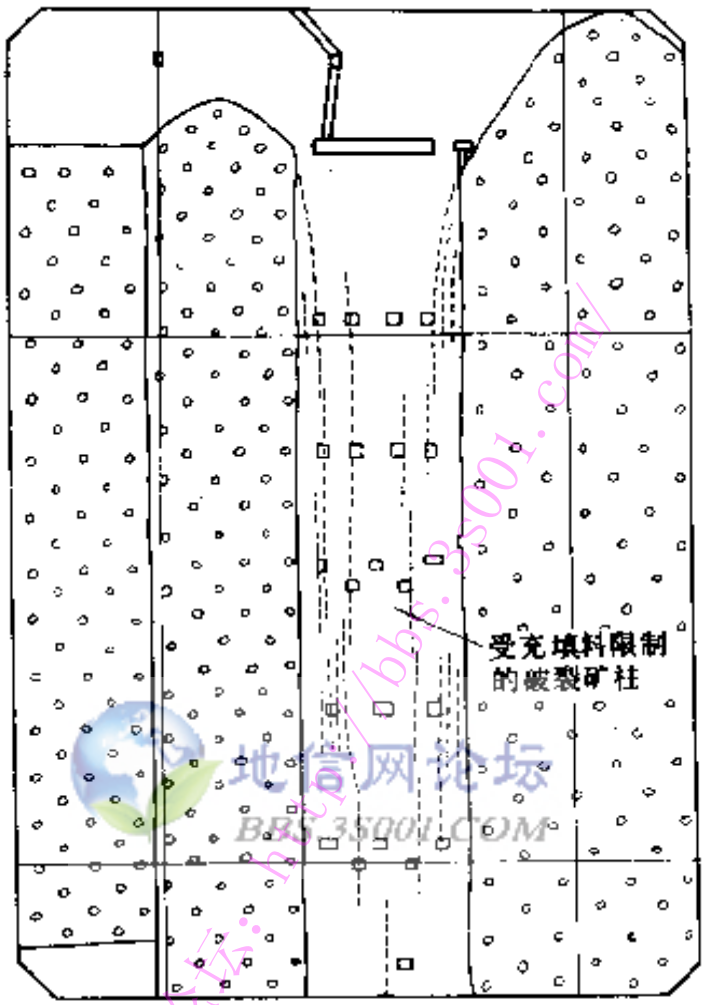


图 6　由胶结充填料保持矿柱尺寸

需1187000吨充填废石，165000吨尾矿充填料和4449吨作胶结的水泥。

该矿柱高800英尺，分三层回采而不是象矿房那样为二层。当充填岩石发生大量侵入时，该附加层作为一个安全措施。贫化量因而仅限于一层，使矿柱回采的整个过程中不能连续贫化。平面布置和断面如图6、7、8、9所示。在本阶段第一层（12-29）放矿期间，需停止废石充填，结果胶结壁暴露高度达200英尺。不久后即用废石充填料填满空区。

顶级地质论坛：http://bbs.35001.com/

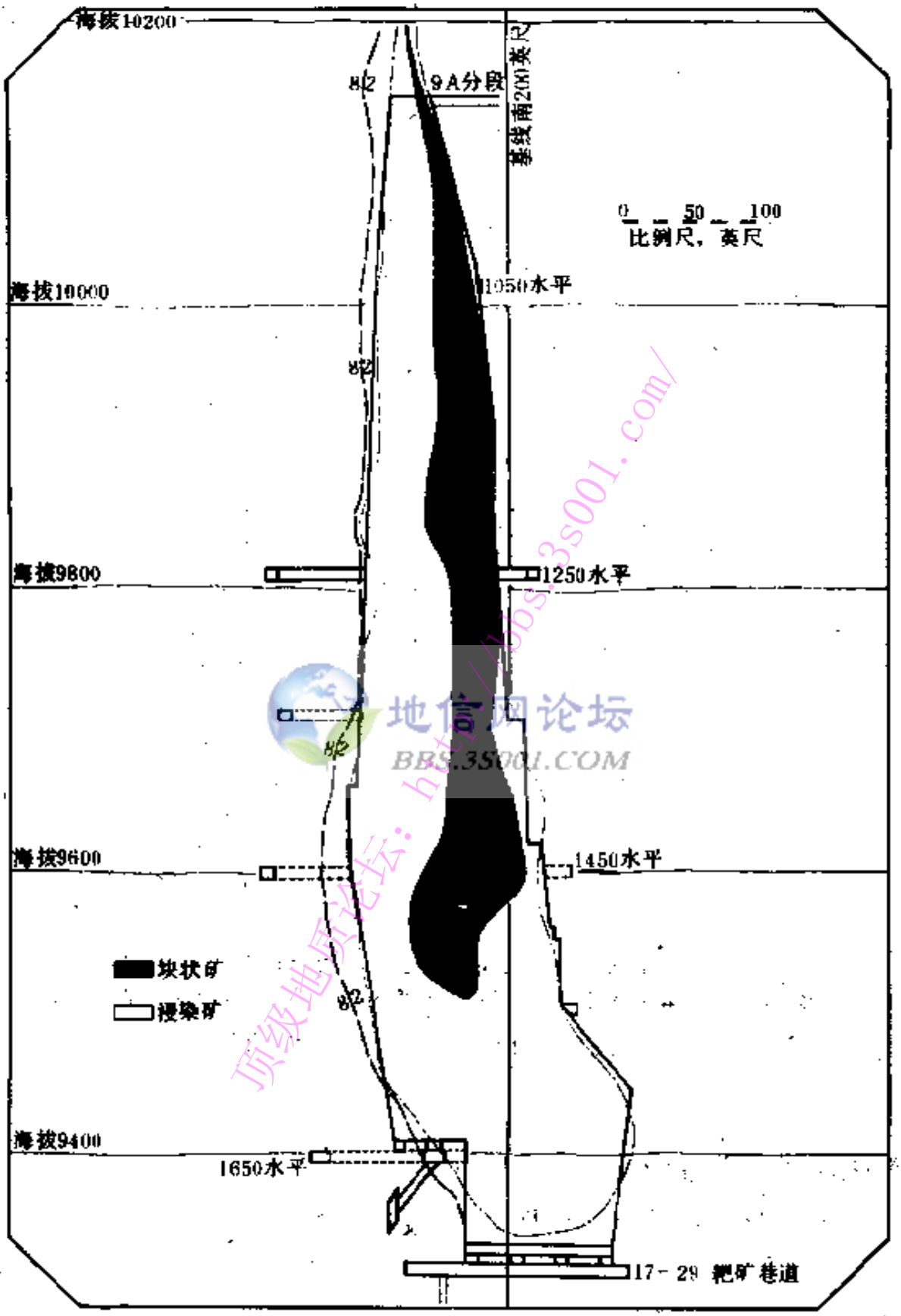


图 7　29号矿柱－矿体剖面

顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/
地信网论坛
BBS.3S001.COM

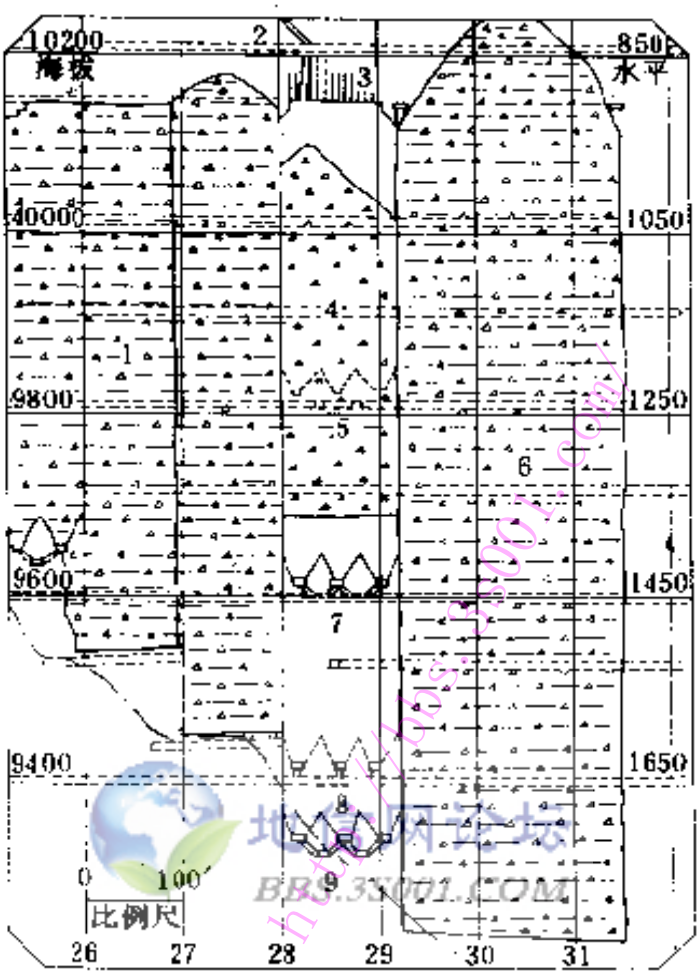


图 8　29号矿柱的支护

1——27号回采矿块；2——充填井；3——钢绳锚索；4——采石场废石；5——耙矿巷道；6——18-305采场；7——14-29耙矿巷道；8——16-29铲运机出矿点；9——17-29耙矿巷道。

矿柱回采统计如下：

1）原位矿石858000吨，回收矿石825000吨；

2）原位铜2051000单位，回收1897000单位；

3）原位锌3385000单位，回收2891000单位；

4）填入废石充填料464000吨。

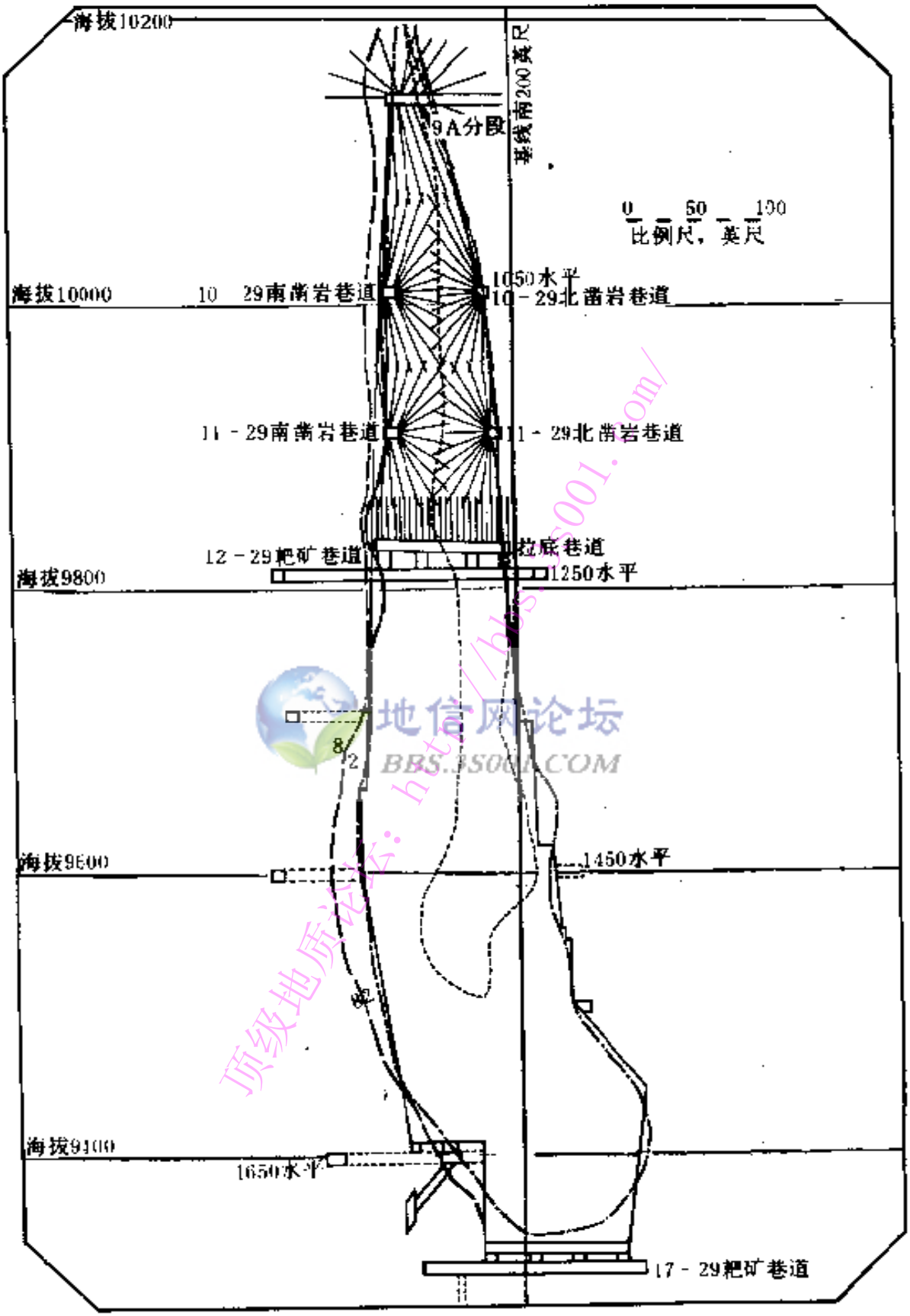


图 9　29号矿柱第一层凿岩布置

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

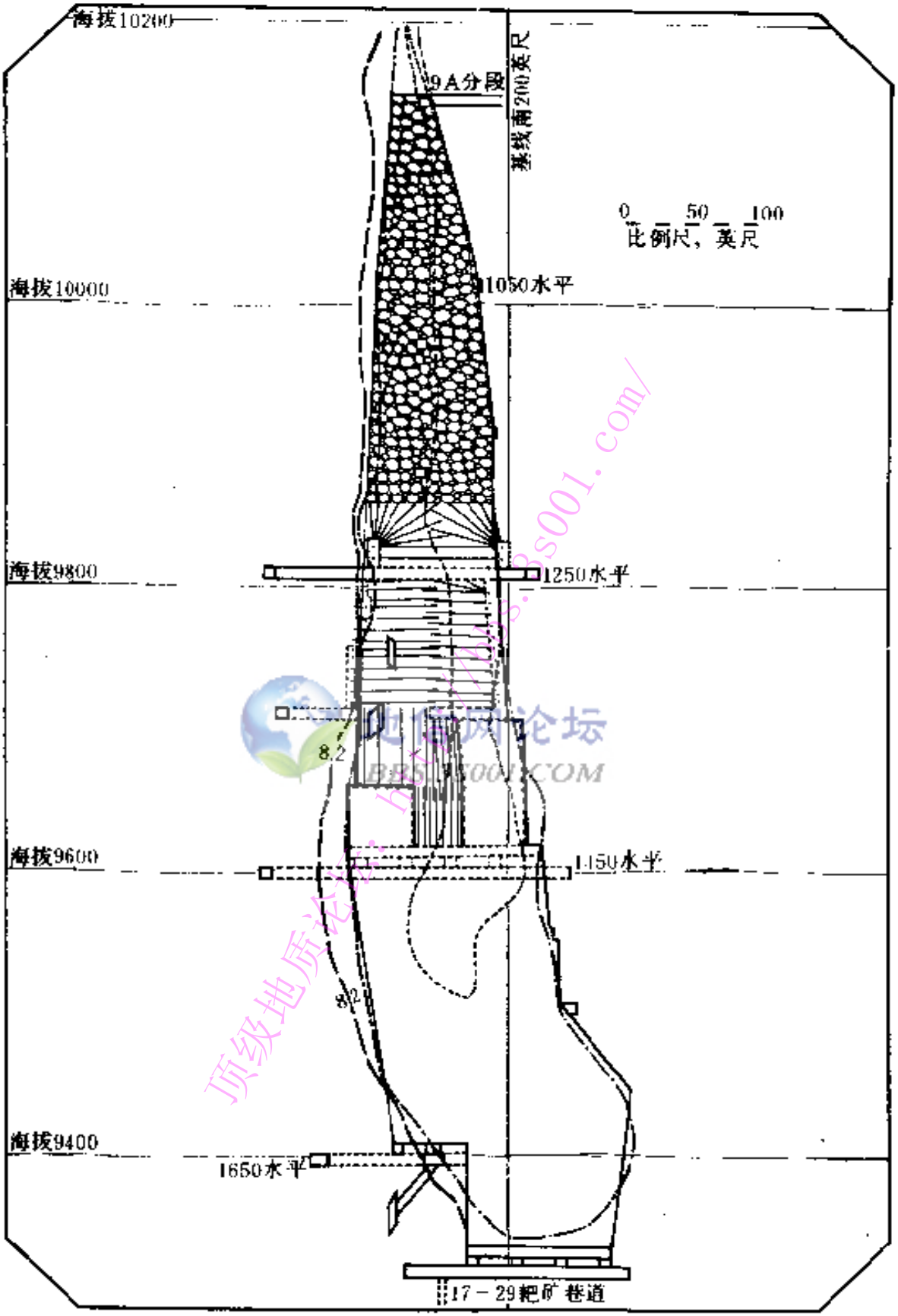


图 10　29号矿柱第二层凿岩布置

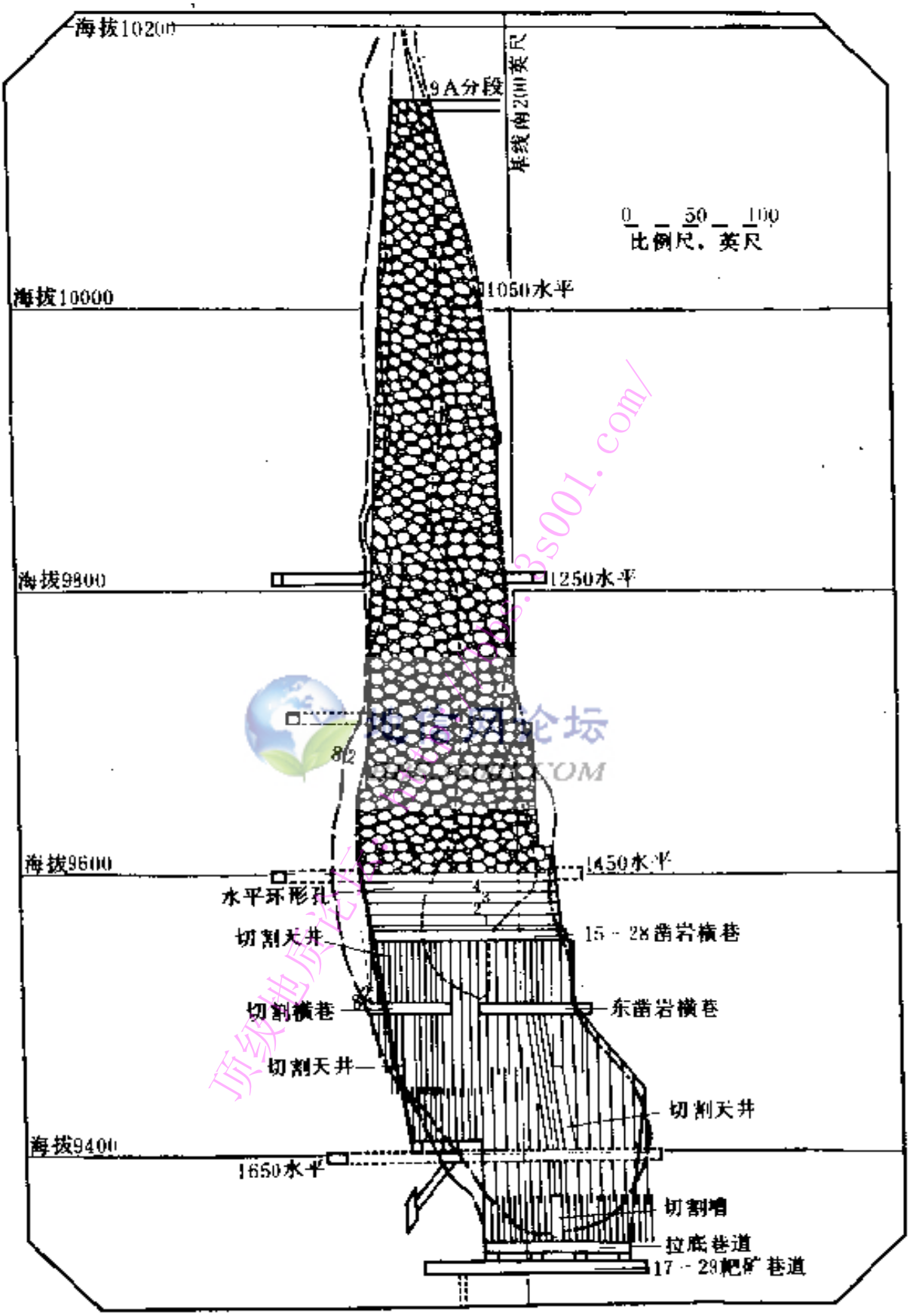


图 11 29号矿柱第三层凿岩布置

由于29号矿柱上的顶柱出现一定的冒落，为了给回采上述残余顶柱提供底板，故决定用水砂充填（不加水泥）固结废石充填料。

34号矿柱回采（图12，13，14）

该矿柱走向长仅80英尺，处在两个相当小的采场之间。33号采场（走向长60英尺）生产了365000吨矿石，使用了205000吨废石充填料，27000吨水砂充填料和370吨作胶结剂用的水泥。另一采场（34.5号至东）走向长90英尺。它已生产了556000吨矿石，并使用了313000吨废石，44000吨水砂充填料，以及1200吨水泥作胶结料。采场和矿柱高约700英尺。矿柱象相邻的采场一样分两层回采。矿柱回采统计如下：

1）原位矿石676000吨，回收801000吨；

2）原位铜1568000单位，回收1416000单位；

3）原位锌2205000单位，回收2033000单位；

4）充填废石380000吨。

应当指出，回采该矿柱时由于一次不应有的爆破顺序，引起了大量“充填料”侵入。其后果是造成严重的贫化，这可从上述统计中看到。然而，可以看出贫化和回收率并不理想。深孔空场法在该矿有时还是得到实际应用。而此法贫化率一般约为50%。因此我们有理由说，我们的主要回采方法，除作一个整体稳定矿山以外，还能提供获得较好的回收率的手段。

地信网论坛 BBS.35001.COM

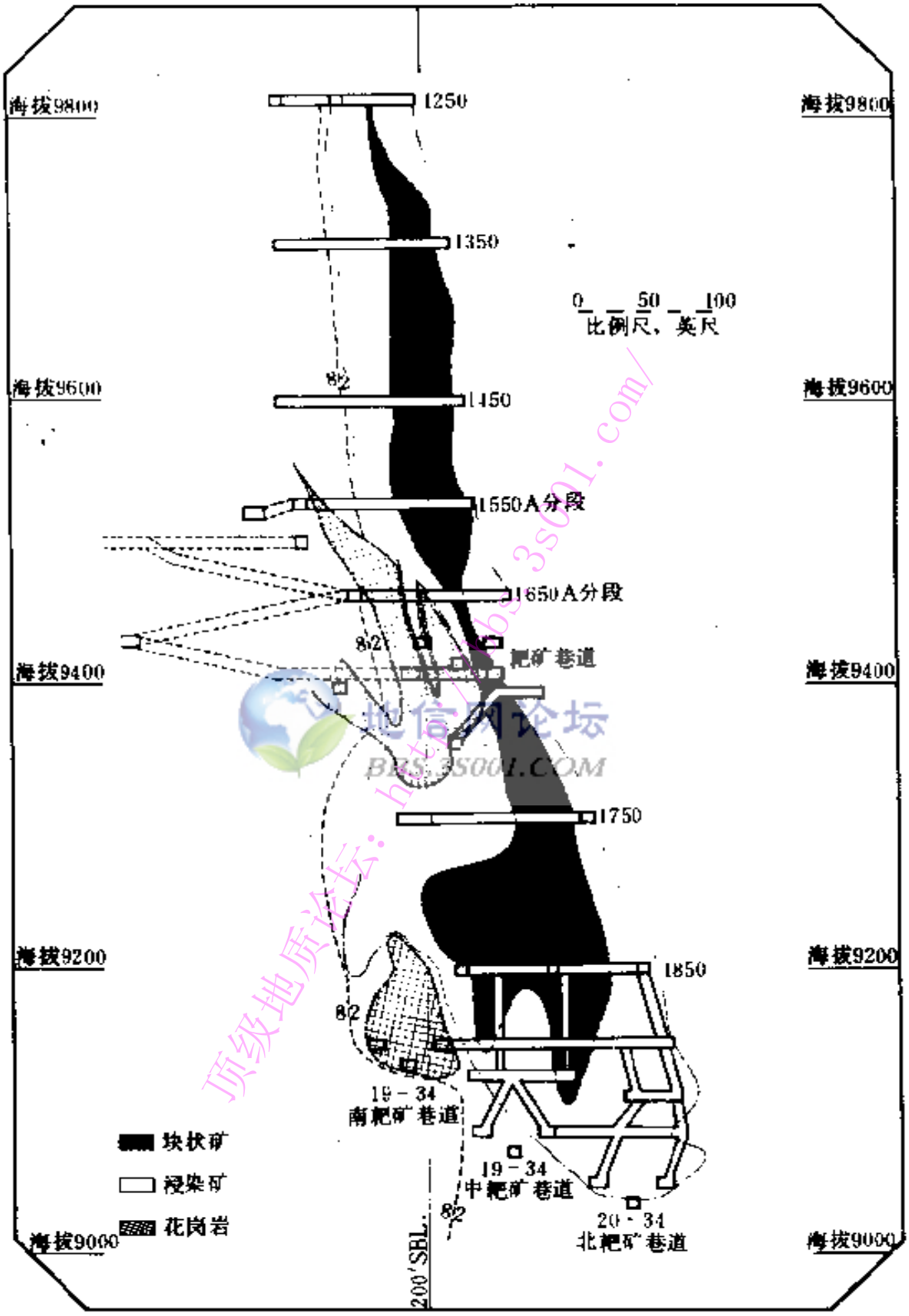


图 12　34号矿柱矿体外形

顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/
地信网论坛 BBS.3S001.COM

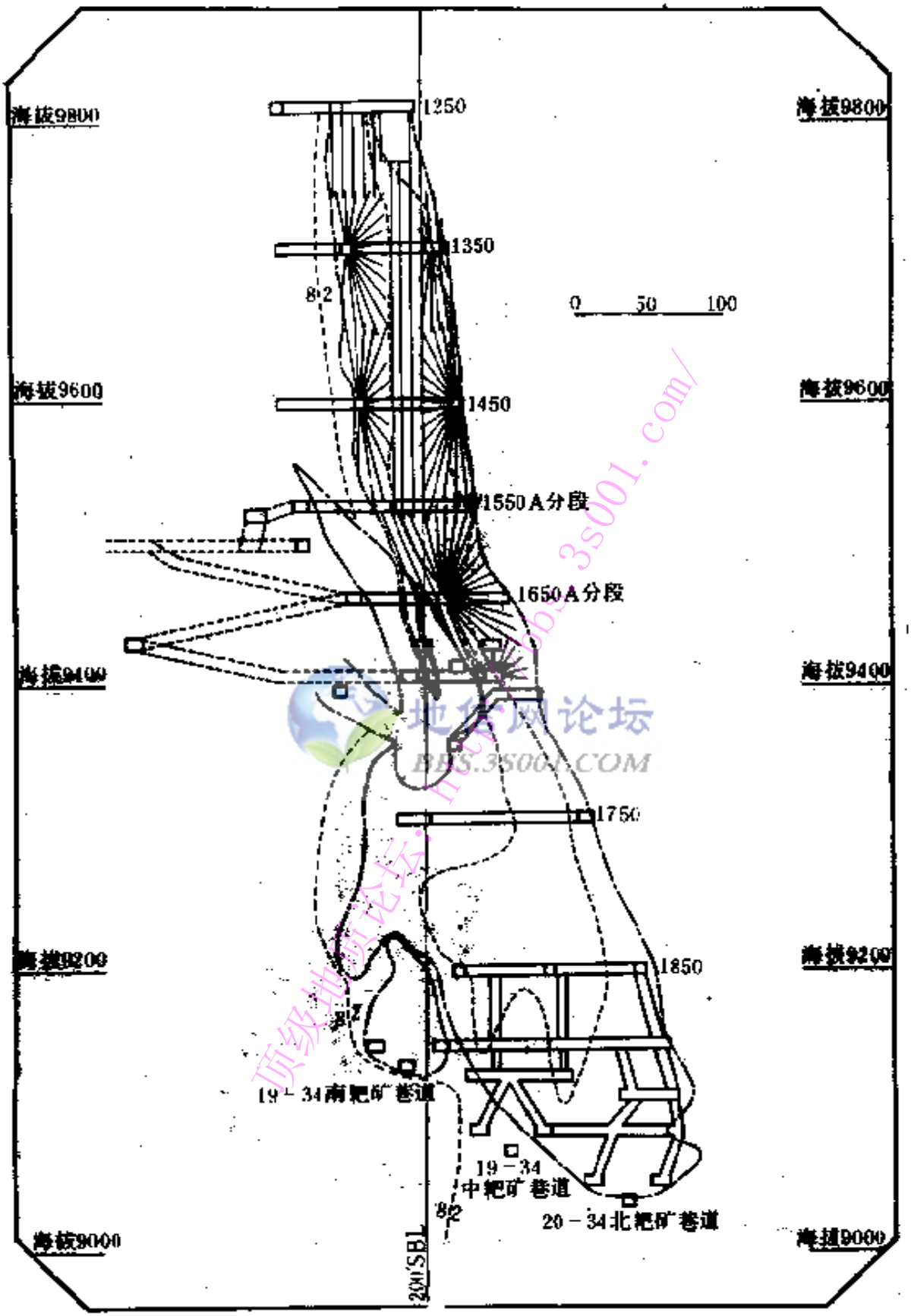


图 13　34号矿柱第一层凿岩布置

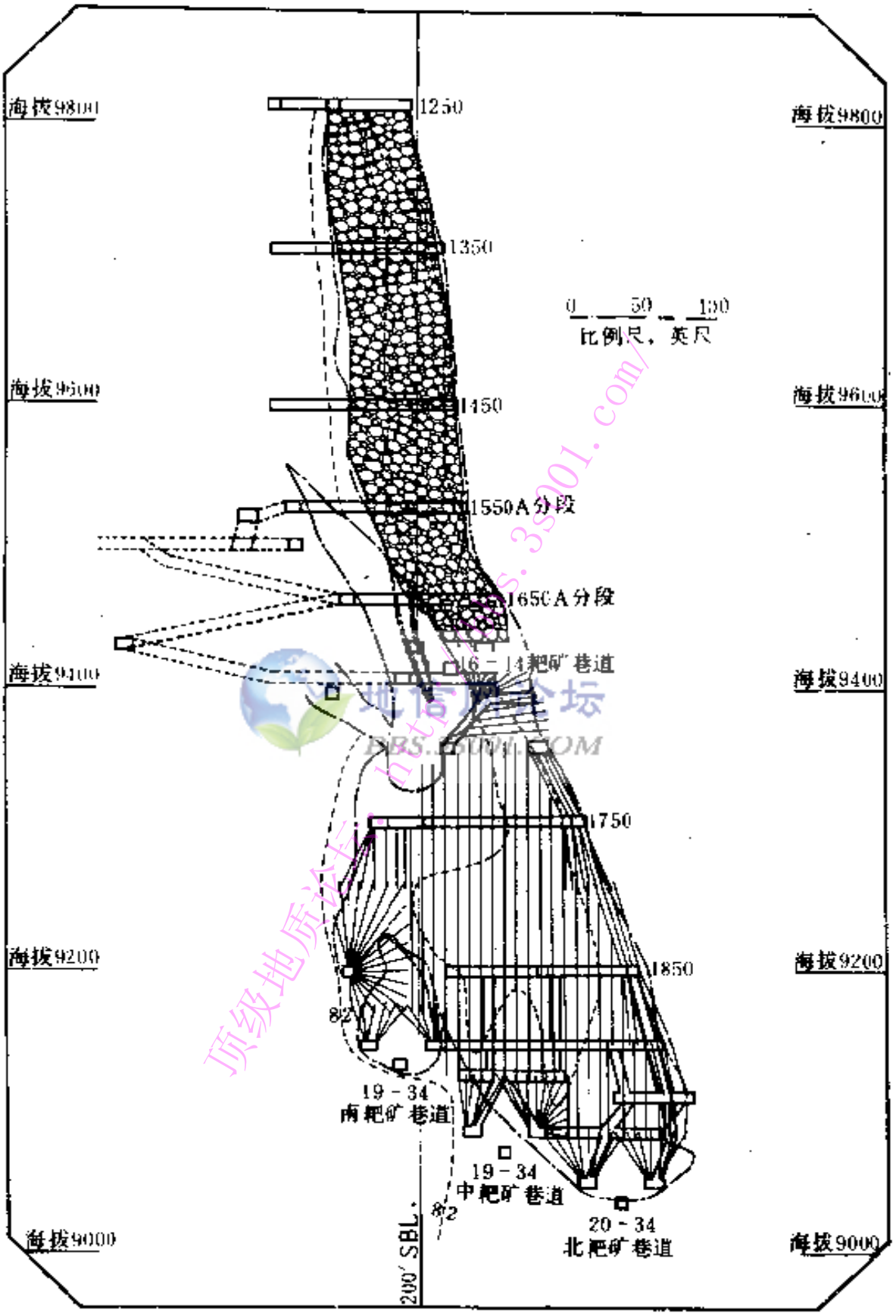


图 14 34号矿柱第二层凿岩布置

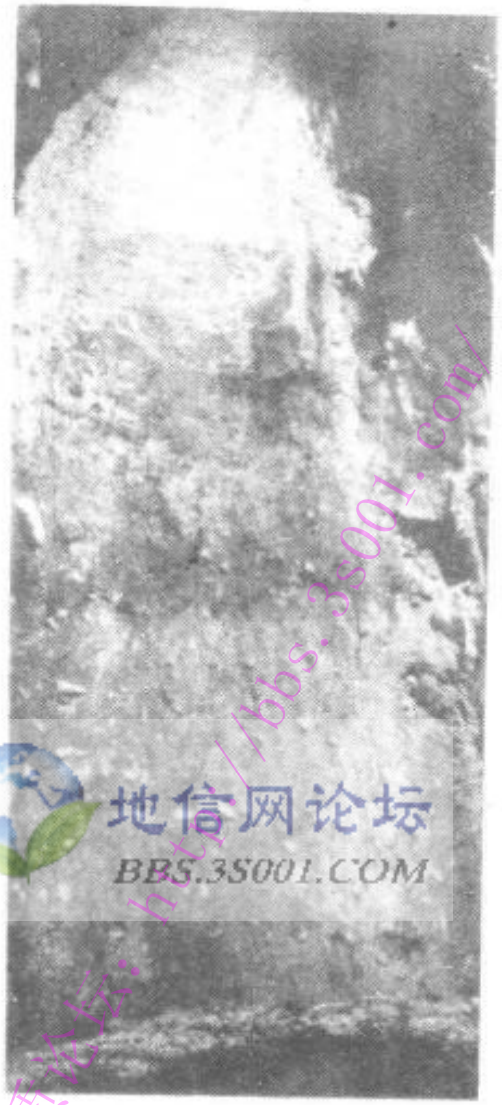


图 15　1150水平至 9 A 分段
29号矿柱暴露的充填体壁

结　　语

认为这种胶结充填法是唯一可行的矿柱回采的有效方法是不公正的。围壁和顶板钢绳锚固以及放矿的控制方法，对取得成功也是重要因素，但因为它们不是本文讨论的主要问题而被省略。

胶结充填壁的目测检查和正在进行的地下观察，并结合

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

上述统计资料，证实该充填系统的重要作用，即对于垂直矿柱的回采具有异常好的回收率。另一些矿柱也正在回采。

值得注意的是，自从使用该方法以来，已充填了废石8846000吨，水砂充填料2540000吨，以及水泥35000吨。

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

埃尔多拉多核能公司比弗洛吉矿充填法采矿实践的评论

R.H.宾涅特*

摘　要

自1953年开始满负荷生产以来，使用脱泥尾矿制成的水砂充填料已成为水平分层充填采矿法地层支护的主要方法。充填料的生产、贮存及分配系统均已得到极大的改进，主要体现在广泛使用钻孔作为通向各个采区的主要分配系统，及沿着充填料供给路线采用搅拌料贮仓系统。本文将叙述这些系统的改进。作为一种地层支护方法的水砂充填法的效率，由于方法上的及制备物料方面的改进而有所提高。所有这些改进，以及落矿循环充填料浇灌的整个过程，本文都将予以阐述。

前　言

埃尔多拉多核能有限公司的比弗洛吉矿（Beaverlodge Operation）位于阿萨巴斯卡湖（Lake Athabaska）北岸的萨斯喀彻温省的西北角。该地到南面460英里的埃德蒙顿有航线，四季通航。解冻季节可通船到南面大约220英里的麦克麦里堡（Fort McMurray）。

---

* R.H.宾涅特(Bennett)是埃尔多拉多核能公司辐射防护与安全卫生负责人。

矿山联合企业包括沿主要区域构造圣路易斯断层分布的两个主要矿区。开发的最大矿区由紧靠圣路易斯断层下盘内的法伊（Fay）01及09矿带组成，并在塔仁（Tazin）变质沉积岩（云母片岩及绿泥-绿廉石泥板岩）中由相对整合的网状沥青脉系组成。另一主要矿区包括维尔纳（Verna）73，76及79矿带，也由与变质沉积岩接触大致整合的网状脉构成，并在圣路易斯断层上盘中逆转向斜内含有相似类型的岩石。它位于法伊矿带东约5000英尺。虽然圣路易斯断层的倾角通常是向南倾50°，但矿带内局部地区的倾角则几乎垂直或几乎水平。平均开采宽度约10英尺，由最小4英尺到最大50至60英尺。

比弗洛吉矿的矿石生产能力为1800吨/日。但目前的生产水平为1250吨/日，其中250吨/日是从分散的地面小矿体用露天开采法回采的。其余1000吨/日是用地下水平分层充填法回采的。采场由从各矿带下盘的沿脉巷道进行准备。掘凿联络天井至距沿脉巷道顶板15英尺处的分段巷道，由此按10英尺采高，用气腿凿岩机打水平孔崩矿，采用水平巷道采矿法。采下的矿石用电耙耙至按100英尺间距设置的放矿漏斗。在较宽的采场内设置直径为48英寸钢盘或木盘支护的放矿井，较窄的采场设置横撑支护放矿井。为了使通风区域减少到最低限度和达到最好的岩层支护效果，采场计划按每100英尺分段进行充填。

基本的充填料回收、贮存和输送系统过去已有文章[1，2]做过详细的叙述。虽然为了了解该系统还要介绍有关详情，但是着重点将放在近期的发展方面。最重要的两个方面的改进是沿充填料供应线路采用贮仓系统以及大量采用钻孔来输送和分配充填料。

充填系统

五十年代后期安装的现有充填料回收系统的设计是要得到最好的充填料利用率。当时选矿厂的给料全部来自充填法采场，只有少数来自采准工程。然而目前，以及今后一个时期，约有20％的选矿厂给料来自小露天采场，将来有希望从其他矿山按合同得到矿石。这将使现有充填料厂生产获得最好的充填料质量。

原尾矿用泵从选矿厂送到位于法伊和艾斯（Ace）竖井之间高地的充填料准备厂。经过标准的破磨工序，有75％通过 200 网目的选矿厂尾矿，以20—30％重量浓度的浆状形式输送。采用两段杜尔-奥利维-朗（Dorr-Oliver-Long）水力旋流器（直径12英寸，锥度20°）进行分级，第一段为 6 台，第二段为 5 台。经过这两段水力旋流器处理，－325网目的细泥有92％可以脱去，固体回收率可达60％，矿浆最终重量浓度为55—60％，比重为1.6，渗透速率为每小时 6 — 8 英寸。地面充填料制备厂也包括主要的充填料贮存设施，即两个容量为 350 吨的搅拌仓，一个容量为 650 吨的干贮仓或沉积仓。图 1 为充填系统的总体布置示意图。

在两个固体搅拌仓内的悬浮用杜尔-奥利维-朗耙式搅拌器和低压空气共同实现搅拌。干贮仓有一个滗析装置，并装有风水喷管的球形底，用来再制浆。厂内所有主要控制阀均由中心控制盘进行遥控。充填料的制备，以及经井下充填料输送路线上第二段贮仓系统，把充填料送到采场的整个控制中，每班只需要一个操作工。

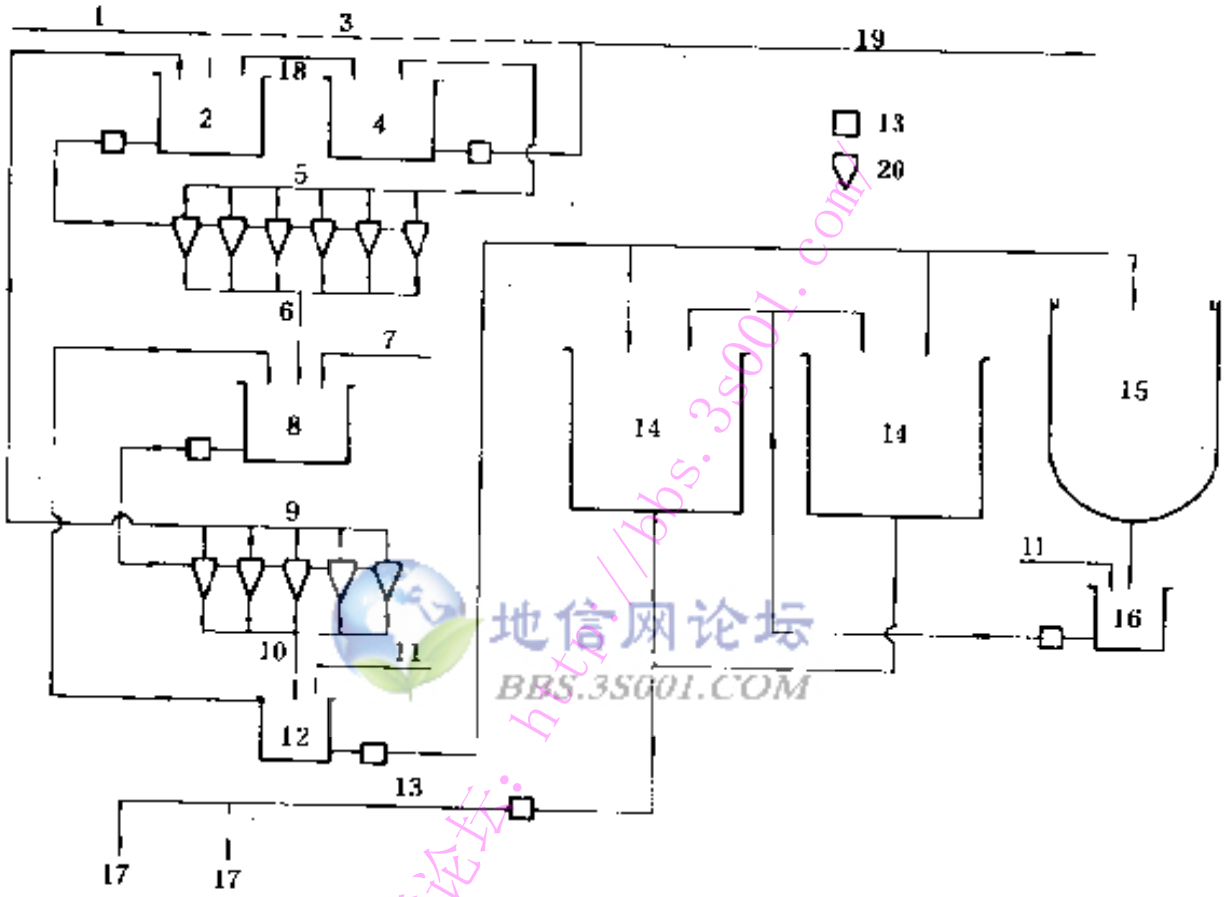


图 1 充填料制备厂流程图

1——选矿厂尾矿；2——初级进料仓；3——旁通；4——矿泥缓冲仓；5——初级溢流；5——初级底流；7——加水；8——二级进料仓；9——二级溢流；10——二级底流；11——加水；12——取样仓；13——泵；14——350 吨杜尔搅拌仓；15——650 吨沉积贮存仓；16——再制浆槽；17——经 3 英寸钻孔送井下去贮存；18——溢流；19——尾泥浆池；20——12英寸×20°水力旋流器。

井下充填料贮存

象比弗洛吉矿这样宽阔这样深的矿山，所遇到的主要问题是充填料输送系统的压力及输送管线过长对浇灌速度的不

地信网论坛 BBS.3S001.COM
资源地质论坛：http://bbs.3s001.com/

利影响。为了克服存在的问题和获得增加贮存能力所附加的优越性，决定在两个主采区中的每一个采区，每2000英尺的垂直高度安设一个遥控的搅拌充填料贮仓。

井下贮仓的尺寸必须与每个地面搅拌仓的容积相匹配。井下仓是在岩体中开凿的硐室，它的几何形状是依据所选择的搅拌器型号来确定的。为了克服耙式搅拌器所固有的缺点，为了全部采用遥控，选用了螺旋桨式搅拌器。它的主要优点在于不需要压缩空气来悬浮固体物料，可以在沉积的状态下起动。虽然这些搅拌器正常工作时需要的原动力较多，但可由节约的压缩空气来补偿。一般的维修工作量相当少，它们适应完全遥控以及相应地节省操作工人，故整个费用可以降低。

图2为比弗洛吉矿井下充填料标准贮仓的布置略图。我们最近安装的搅拌器选用的是格雷伊搅拌设备公司（Greey Mixing Equipment Limited）制造的莱特宁（Lightnin）搅拌器。这种直径94英寸、4个叶片的衬胶叶轮搅拌器，由60英制马力电动机，经液压联结器与32:1的齿轮减速器驱动。旋转运动使充填料通过4片垂直安装于仓壁上的宽24英寸的导向板，转换为沿轴向的上向流动。

仓内的装料、搅拌器的控制及仓内充填料的排放，都由地面充填料制备厂的操作人员远距离控制。操作员也可用电话与采场内的充填料浇灌人员直接联系。所需要的18个监测及控制功能经过一个尤涅太尔(Unitel)音频讯号传送系统传递。该系统定期对所有输入讯号进行扫描、编码、转换载波频率并传送到另一端。在那里，译码信号启动相应的继电器或指示器。这种安装系统可以避免使用多芯线电缆。距离过长的多芯电缆费用很高。

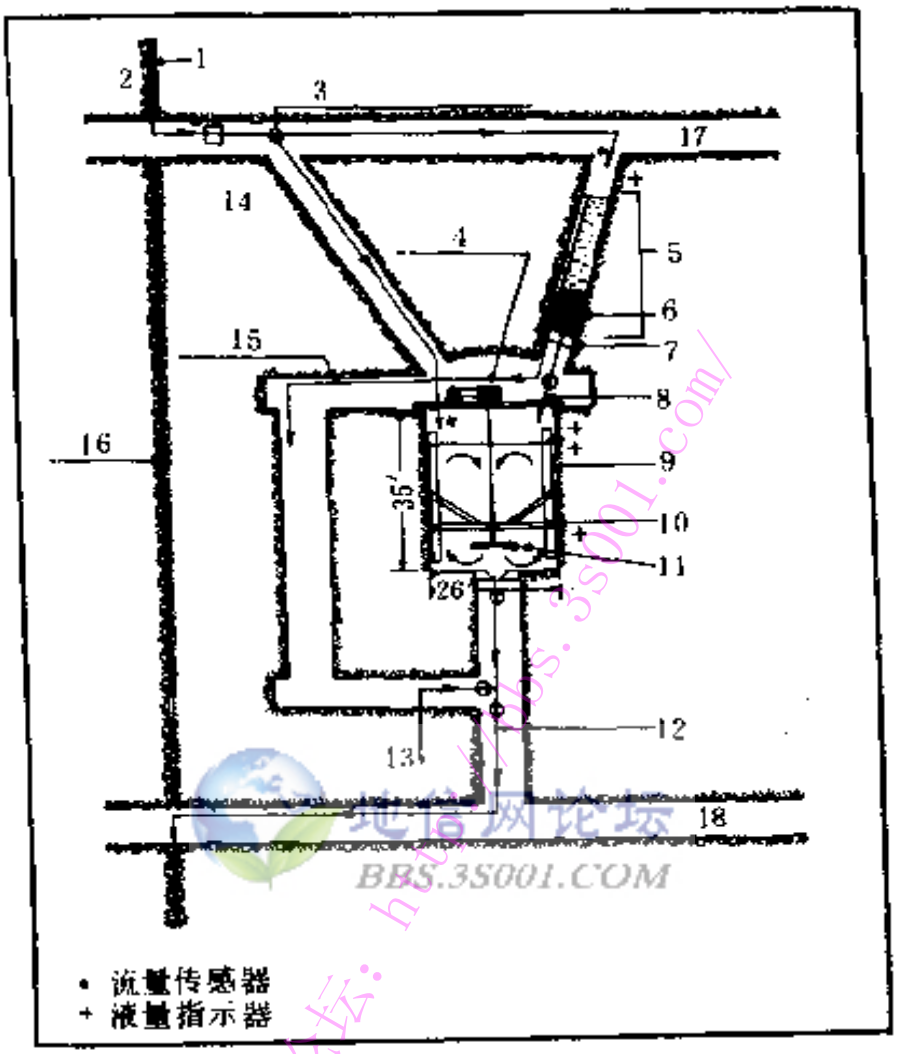


图 2 井下充填料贮仓示意图

1——由制备厂经3英寸直径钻孔来的充填料；2——Y密度计；3——3路分配阀；4——60马力电动机及32:1减速器；5——废水池；6——沉积固体物；7——封闭墙；8——泥浆排放管；9——4×24英寸导向板；10——稳定器；11——4叶×94英寸直径搅拌桨；12——到采场的充填料；13——矿山供给的冲洗水；14——充填料、材料、人员天井；15——废水溢流至明渠；16——旁通孔（Φ3英寸）；17——14水平；18——15水平。

这些贮仓的某些操作是自动的。它包括各种安全装置，如热力断路开关和振动开关，它们能防止各种装置超负荷运转，以及在机械事故时保护搅拌装置。在把冲洗水从贮仓送

地信网论坛 BBS.3S001.COM

到下部或采场去的输送管的阀门上安有定时器，当发生误操作时能自动关闭阀门。用一个Y密度计来检查通向贮仓管道中的水及充填料的分界面并相应控制三通阀，使冲洗水进入滤析装置，或使充填料进入贮仓。

目前，在法伊及维尔纳采区各有一套充填料贮仓在运行。法伊矿还有尚处于准备阶段的第二套设施。至今，上述装置操作可靠。但是已发现，要使沉积仓再制浆，必须在搅拌叶片底下的锥体内使用压缩空气管。在作业初期发生过另一个较小的问题，就是仓壁上小块岩石的移动，这会导致仓内锥体下部排放阀运转失灵。在排放锥体口设置适当的筛子解决了这个问题。

在今后采用多仓系统情况下，必须考虑仓与仓之间的输送必须完全联锁和自动。为了减少地面充填料制备厂操作人员的工作量，从最后一个仓到采场的给料部分的控制，必须由采场的充填料浇灌人员来掌握，这就需要研制一套适合的通讯系统。

充填料输送

随着矿内上部水平的报废，及进出通道与各服务性设施失去作用，要维护好主充填料管路已是不实际的。主充填料管路包括经过第一水平及艾斯竖井，然后经过各水平间一系列较短的直径为3英寸的钻孔，到达法伊井的第13水平及维尔纳的第9水平的整个系统（见图3）。为了取代该系统并免除必要的管道维修，决定从地面到13水平打一些平行钻孔。

这些钻孔分三次钻完：从地面垂直下到第6水平，从第6水平到第9水平成－50°角，从第9水平到第13水平成－50°角。钻孔孔位曾仔细选定，以避免遇到不利的地质条件，并

保证钻孔通过稳固岩层。

钻孔目标的偏移范围定为 8 × 8 英尺。钻孔从地表开始的部分长 800 英尺。因此，要使钻孔偏离最小，必须严格用测量仪控制钻机的安设，用钢绳钻及一个微偏导向管与NQ钻头配套来打直径 3 英寸的钻孔。钻孔打好后由依斯特曼（Eastman）油井测量公司用D.T.多点测量仪，按间距25英尺作钻孔详细测量。在六个目标中，除一个外，其余都需要开凿岩巷以便在平面上与钻孔接通。与预定目标比较，钻孔最大偏移为25英尺。

为了使管内充填料速度达到每秒 6 英尺左右的最佳值，第 9 水平到维尔纳竖井，第13水平到法伊竖井的主要输送管道选用 5 英寸直径的水平管线。全部采用标准非镀锌管道及快速接头。管道和钻孔用锚杆固定的填料箱式联接器联接。钻孔口每端直径扩大到 $4\frac{1}{2}$ 英寸，并使用H型套管。由于垂直的和水平的管线都较长，导致了较大的动压力，因此有必要使联接器的安装深度至少为10英尺，以避免从小的裂缝中向外泄漏。有时还必须在钻孔口地段进行注浆以完全消除这样的泄漏。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

当主要充填管线需要变换方向时，用重型管做成专用的大曲率半径的弯管。直角拐弯处用三通接头，把一头堵死并装入砂料作为防磨垫。

法伊及维尔纳的充填仓的充填速率分别为每小时95吨及115吨固体物料。到采场的充填速率为每小时 100 吨左右。至今，新的充填系统的管道，以及包括过去的旧的管线，磨损并未成为一个危险因素，我们还没有任何替换管道的计划。由于操作中的失误和钻孔壁局部脱落，曾发生过线路的堵塞

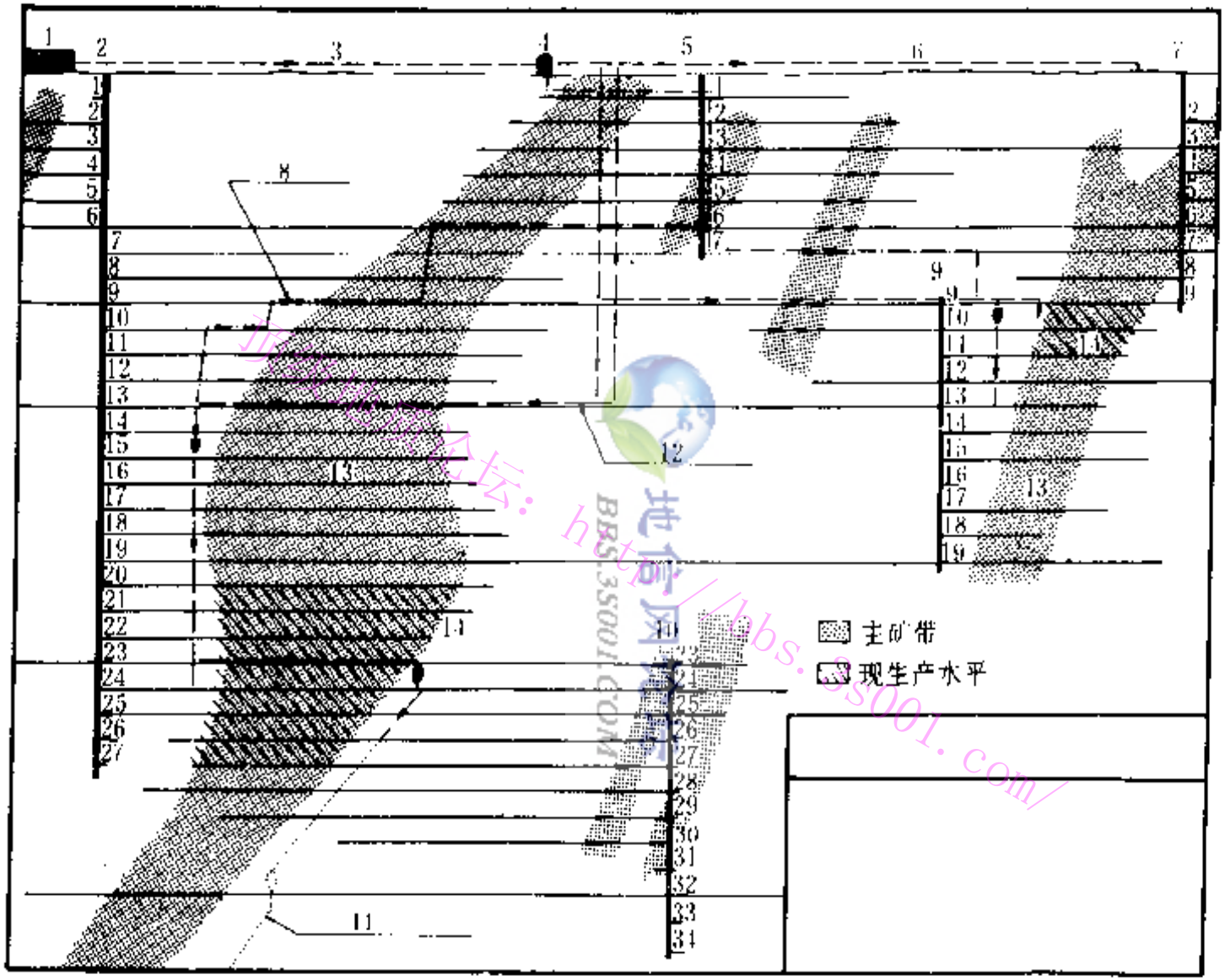


图 3　充填料贮存及分配系统布置示意图（无比例）

1——选矿厂；2——法伊竖井；3——原尾矿；4——充填料制备厂；5——艾斯竖井；6——泥浆，送尾矿池；7——维尔纳竖井；8——老充填管路；9——维尔纳盲井；10——法伊盲井；11——计划充填料管路；12——新充填料管路；13——主矿带；14——现生产水平。

故障。但是，这些情况并不经常发生。

充填料的制备

如果用作容纳充填料空场的准备方法以及材料不是很有效的话，那末，对作为一种地压支护方法的水砂充填的效果会有不利的影响。自1953年开始满负荷生产以来，水砂充填已成为地压支护的主要方法。随着新材料的采用及工艺的不断发展，充填方法也不断发展。在生产的初期几年间出现的充填料泄漏及其清理，至今仍然是主要问题。

在充填过程中最大的改进是采用合成纤维过滤材料来代替过去常用的黄麻布料。所采用的合成纤维过滤材料的商品名称是法布林AY型（Fabrene Type AY），其经线为24×500支，纬线为6×1500支，每平方码重2.9盎司，抗拉强度每平方英寸75磅。对这种材料的编织方法和重量作过各种不同组合的试验。如果滤析速度及矿浆滞留之间关系得到妥善处理，所选用的这种材料可获得最佳的排水效果。这种材料优于黄麻布的要点是它有较大的初期强度，可以允许支撑的木结构间有较大的间隔。更主要的是它不易腐烂，使用寿命长。在比弗洛吉矿，黄麻布的寿命最长为5年，这常常比一些采场的生产期短，所以当黄麻布腐烂时就产生矿浆泄漏现象，维修木支架及清除矿泥要花大量的费用。

配合法布林滤布（Fabrene）用粘胶来使过滤墙与岩石接触处充分密封的效果是好的。使用麻布时的密封是用“香肠式包扎法”实现的，这种方法不能用于法布林过滤材料。各种型号的粘胶都试用过，大多数都是有效的。目前所采用的这种粘胶是橡胶基底压敏粘胶剂，商品名为Plastikon169。不论使用什么型号的粘胶，重要的是在准备接受充填料的区

域内至少有2英尺宽的围岩带充分进行冲洗，并在使用粘胶前使之干燥。用6英寸的刷子把粘胶刷到岩层上，把法布林过滤材料片的边压贴在刷有粘胶的位置上。必须注意提供良好的通风条件，因为大多数粘胶有有害气体。

由于引进了象法布林这样的过滤材料，木材支撑方法有所改变，其中有许多改变是为了降低材料消耗，另一些则是为了提高结构质量。这些改革中最值得提出的是使用锚固板条以保证所有格栅和支柱在围岩接触处达到充分稳固。很明显，过去许多充填料的泄漏就是由于充填料挡墙没有被足够地支撑，因而在围岩接触处产生小的位移所致。为了确保各支撑点的稳定性，初期的充填料挡墙和溜井支柱是用3×8英寸的木板锚于围岩上作为固定装置。这些木板用30英寸的短锚杆锚固在岩壁上，并常常被切短以适应围岩的外形条件。该方法的详细情况见图4。该图表明了标准的充填料挡墙的结构。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

在沿脉巷道底板以上4英尺高的壁上，以及采场泄水井每一边都安设这种永久墙板，以便当浇灌充填料时，滗析水通过的泄水井能快速安上临时挡墙及衬上法布林布，作为由滗析水携带而来的矿泥及粉渣的贮存池，避免采场附近的水沟被泥砂沉积填满。

最近所引进的另一项革新是在一些不能采用滗析设施的地方采用预制构件滗析塔。这些滗析塔为筒状结构，每个塔长8英尺，直径1英尺，由4×4英寸焊接金属网构成。一端的周长略有减少，以便把它们组装在一起。这些塔通到一个滤水墙，一个挡墙，有时接通一个已废弃的溜井并包上法布林材料。过去用过相类似的结构，即把两架矿用木梯子钉在一起，构成所谓“鼠笼式”，然后用法布林布包裹好。金属网

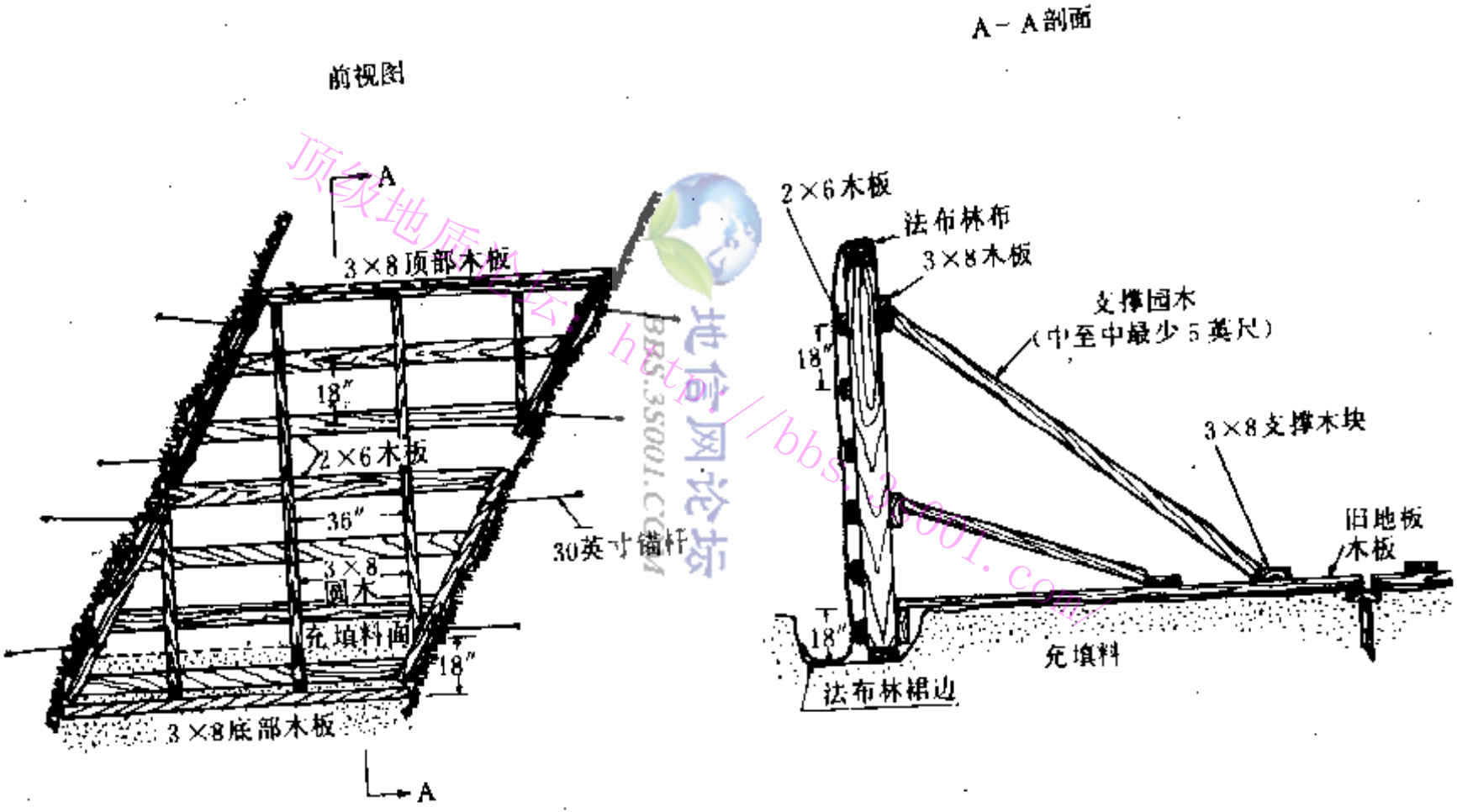


图 4　标准的充填料挡墙结构详图

顶级地质论坛 http://bbs.35001.com/ 地信网论坛 BBS.3S001.COM

塔在费用上并不便宜，但它铺设方便，排水性能好。

回采循环及岩层支护

在矿井深度不断增加，地层条件不断恶化，以及通风要求不断受到限制的情况下，在采场充填以前，在可能的地方，回采作业不应远过100英尺。除此以外，采场的回采循环周期也受到采场总长度、矿石构造的复杂性以及局部地层条件的限制。所有这些变化因素，在短周期之外，都会使得详细的采矿计划变得很不可靠，并不可避免地会使回采循环的效果不好。有时使人感到一个大的充填料波动能力是很必要的。

充填回采所产生的采空区被认为是胶结尾砂充填料的首要的地层支护作用。当充填料与第二类支护方法，如锚杆、立柱、木垛等配合使用时，它被认为是地层支护的辅助手段。充填料的辅助支护作用用于采场趋向平缓或上盘矿脉尖灭时。在这些情况下，在新充填体上沿采场走向构筑栅墙来保持充填料，使下一分层的估计矿体接触面以外的整个顶盘得到支护。采用这种技术使顶盘具有足够的稳定性，从而避免了大量贫化并防止由于清理狭窄楔形巷道而崩落的矿石的损失。

分层通常是后退式回采。用直径为5/8英寸、长5或8英尺锚杆，按4×4英尺网格的布置支护顶板及上盘，这是标准落矿循环工序的一部分。在应力较高的地区往往产生大量片帮，这时要采用焊接的金属网配合锚杆来作支护。

通常，只要认真遵循采矿顺序，结合使用标准的第二类和第一类地层支护方法，在正常回采中比弗洛吉矿的顶板管理不存在严重问题。然而，根据我们的观察，当回采工作面顶板进展到底柱以上30英尺（±5英尺）范围内时，在剩余矿柱内出现一个应力释放周期，矿柱出现大量片帮并有时产

生岩爆。在宽度大于12英尺的采场内，我们利用这个应力释放周期，作为恢复使用方框支架来最后回采矿柱的信号。对于宽度小于12英尺的采场，在平巷一端拉一个切割槽直到底柱，并以后退形式按锯齿形回采其余矿柱，分成短至50英尺的齿段，按10英尺标准垂高分段单独进行充填。在这些情况下，有时安设改进的点柱或A形框架作为崩矿与充填工序之间的临时支护。

结论与展望

经过25年多的满负荷生产期，尾矿充填已成为以水平分层充填法回采950万吨矿石的主要的地层支护手段，可采矿量的回采率达到了100%。由于对充填物料的制备、贮存、运输及浇灌的系统改进，提高了尾矿充填的效果。随着可能的变更而考虑采用水泥添加剂和深部采矿方法的合理改进，可以预料，尾矿充填料的应用将贯穿于比弗洛吉矿的整个矿山开采期。因此能够明确判定，可以期望我们将抛弃过去使用的那种依靠经验和估计来作直观决策的办法，而更好地用岩石力学的专门技术来指导。

参 考 文 献

[1] Burton, J.F. (1957). Cut-and-Fill Stoping Using Hydraulic Tailing Fill at Eldorado, Beaverlodge, CIM Special Vol., *Mining in Canada*.

[2] Management and Staff (1960). Eldorado Beaverlodge Operation, *Can. Mining Jour.*, Vol. 81, No. 6, pp. 75—149, 1960.

美国亚利桑那州马格马矿水砂充填系统

B.赫尔*

摘　要

马格马矿的恶劣岩层条件迫使该矿采用以分级的选矿厂尾矿及磨碎的炉渣混合物作充填料的下向充填法。回采是在垂距22英尺的分段上进行的。沿走向掘进10英尺宽的盘区。当几个盘区完成后，敷设一层包括纵梁、横木及金属网的假顶。在开始浇灌头3英尺高的充填料时，尾矿和炉渣与水泥的比例是16:1。其余部分为28:1或35:1。

当一个分段回采及充填工作结束后，就进行下一分段的回采。埋在充填料中的梁及其他支护构筑物提供了比原岩更安全、更快的回采条件。这种方法可获得100%的回采率及较小的贫化率，这是目前对马格马矿床最成功的采矿方法。

前　言

采用水砂胶结充填法使马格马铜公司（Magma Copper Co.）开采位于美国亚利桑那州苏必利尔（Superior）的交代及脉状矿床获得成功。该地区于1915年开始生产。目前约有1200个雇员。平均日产2600吨含铜4.50%的矿石。

*B.赫尔(Hull)是纽芒特(Newmont)矿业公司子公司马格马铜公司的计划工程师。

矿　史

在先锋地区（Pioneer District）对“银王”（Silver King）及“银后”(Silver Queen)露头的第一个所有权申请书于1875年已登记在册[1]。由于矿床位于菲尼克斯城东南95公里，地处偏僻，在发现后仅仅开采过“银王”区的最富的银矿石。虽然对“银后”区做过一些工作，但是直到博爱斯·汤普逊上校于1910年来到现场后，“银后”区才开始大规模开发[2]。汤普逊组建了马格马铜公司进行开矿。该公司现为纽芒特矿业公司（Newmont Mining Corporation）的子公司。

当“银后”的马格马矿脉开发时，在其北面的“银王”矿区已在衰退，它的零星生产于1920年结束。自那以后，马格马矿就成了该地区仅有的大矿。

在原发现的矿体东部及西部仍继续进行富铜银矿脉的开采。至1937年止已凿了8个竖井，沿脉巷道掘进了2150米。同年也安装了冷却和制冷设备[3]来对付深部所遇到的岩石高温。向西面的开采一直延续到1961年。当时，由于作业深度大（1500米），以及矿脉被断层所截断等原因而停产。

在东部，1950年沿矿脉发现了第一个石灰岩交代型矿床。在1965年前，全部采矿工作均在马丁（Martin）石灰岩交代型矿床内进行。1965年在马格马矿脉南面，密西西比的艾斯开伯罗沙（Escabrosa）及宾夕法尼亚的奈可（Naco）石灰岩中发现了现正在开采的交代型矿床。这些储量相当大的矿床导致了巨额的新投资。新开凿了一个1450米的竖井，建设了新的地面设施，选矿能力由每天1350吨扩建到每天3125吨，从而完成了苏必利尔矿的现代化改造。这些新的设施于1973

年开始运转。在交代型矿床的南面紧接着又发现了一条矿脉并于1976年开始生产。

矿　　床

目前全部采矿工作是在与向东倾斜30°的石灰岩母岩相整合交代矿带的四个及一个交代型矿床南面的急倾斜、东西向矿脉中进行。

交代矿带的走向长60至150米，真厚度5至40米[4]。矿脉赋存于砾岩中，已知其走向长200米，最大宽度约7米。

交代型矿床及砾岩矿脉平均含铜4.5%，含少量金和银。

采矿方法

马格马矿脉早期用方框支柱法回采，也采用过一些留矿法。交代型矿体初期用改进的方框支柱法回采，从端部后退回采，在回采完毕后让顶板冒落。此法对回采5—8米厚、远离竖井及通地表主巷的矿体是有效的。

截至1963年，马格马矿引进了水砂充填法，就在那些厚度过大、不能有效地用旧法回采的矿体中使用。由于1100米覆盖层的地压，加上松软、蚀变、块状结构及节理等因素要求改变回采方法。

于是改用下向充填法回采，用胶结尾砂充填料及木材支护提供比原岩更为安全的工作环境。

目前的标准做法是在矿体中掘进7米高、3米宽的回采进路。这些进路往往是东西向地穿过岩层，全部用木材支护，每架棚间距1.5米。在每架框架中间一半高的地方敷设中梁及假顶。垂直或接近于垂直这些回采进路、平行于矿层走向，按同样的尺寸开凿盘区巷道到达矿体端翼，或是到达各矿块

之间的人工边界线。这些盘区巷道长度可达90米，但以45米的距离最为理想。采下矿石用气动胶轮铲运机运到溜井，溜放到主运输巷。在一些小采场用风动或电动耙矿机代替铲运机。当必须在一个矿层的底盘上开凿盘区分条时，任何采场都可使用耙矿机。在这些盘区中为了避免采废石只采用顶部支架。

当在每个采场的开始水平，或在上切割层回采时（图1a），在能安全地架设木支架以前要花较多的时间来对付顶板。放炮后顶板常常冒落，这就需要在顶梁上架设1或2米的木垛。有时几个框架一起坍塌，顶板会冒落到顶梁以上5至8米。此时该盘区在冒落区用尾砂充填并使岩层稳固以前，只能暂时放弃。由于该作业的这种特点，开凿切割层的效率相当低。

当盘区分条全长都采完，并装运到与立柱底面齐平后，矿工即开始敷设假底。关于假底以后再作描述。当采区的两个或多个盘区分条作好充填准备时，每个盘区分条安设滤水墙，采场作好浇灌的安排。

充填完毕后，就回采紧靠此充填好的相邻盘区分条。支架联结到已埋没的立柱上以节约费用。在其他方面，这些盘区分条同前。回采与充填循环接连地进行，直至整个水平采完为止。

此后矿工工作队向下降7米，并另开新的回采穿脉。通常是，但不经常是，在上面的穿脉下面开新的穿脉，然后在上面的老盘区分条之下进行回采（图1b）。除了必须在顶盘下回采的采场东部边界的一、二个盘区分条外，这些新穿脉的回采效率比切割层的效率高。此时顶板是平整的胶结充填料，它沿上部已采进路的全长由两层假底支撑着。当进路向

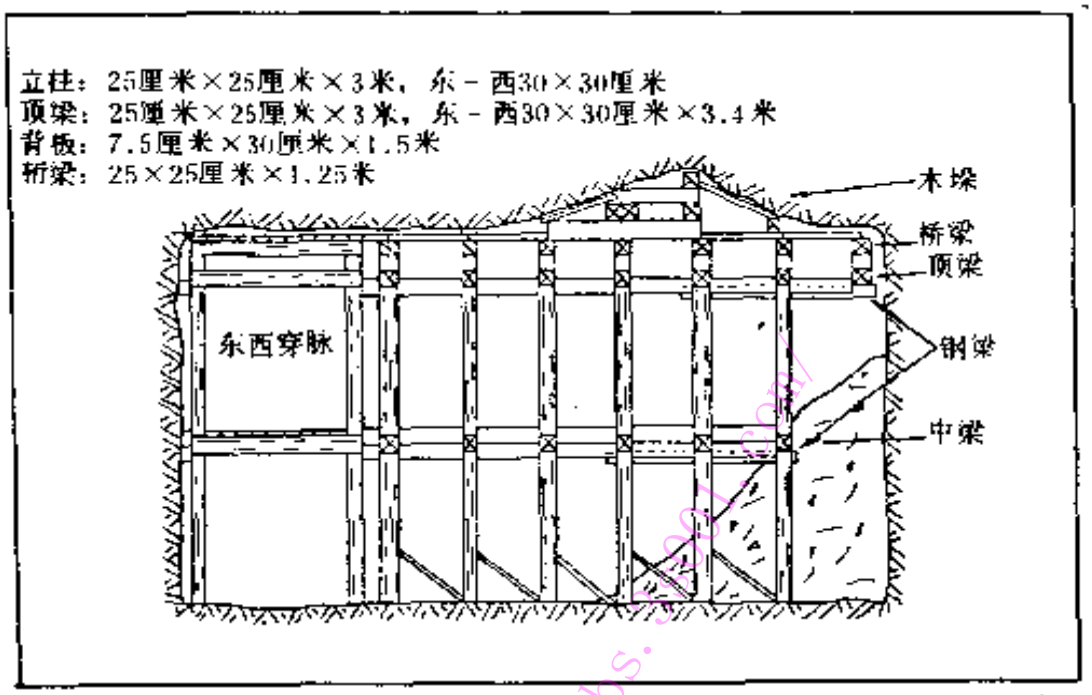


图1a　上切割层

前掘进时，放炮后的顶板用木支架支护，木支架前面的顶板用架于未被爆破的矿石上的假底支护。撬毛工作仅限于撬下挂在进路假顶下的少量充填料和间柱附近。通常不需要顶梁。进路顶部木框的立柱可直接支撑假底。假底下的回采要比在切割层的速度快40％到50％。

脉状矿用差不多相同的方法回采，只是盘区断面尺寸为3米×3米，并且通常每一层只有一个盘区在开采。在切采巷道下回采时，由于矿脉倾角及宽度的关系，常常只暴露出头顶上盘区的一半，所以只需要一层假底。

包括在矿脉内的采场总共约有40个采场。充填进度安排是矿山生产的关键。如果有多于二至三个采场没有盘区分条可回采，而采空的盘区分条正等待充填，那末整个矿山的生产就要受影响。

图2a 及2b表明一般的回采设计。

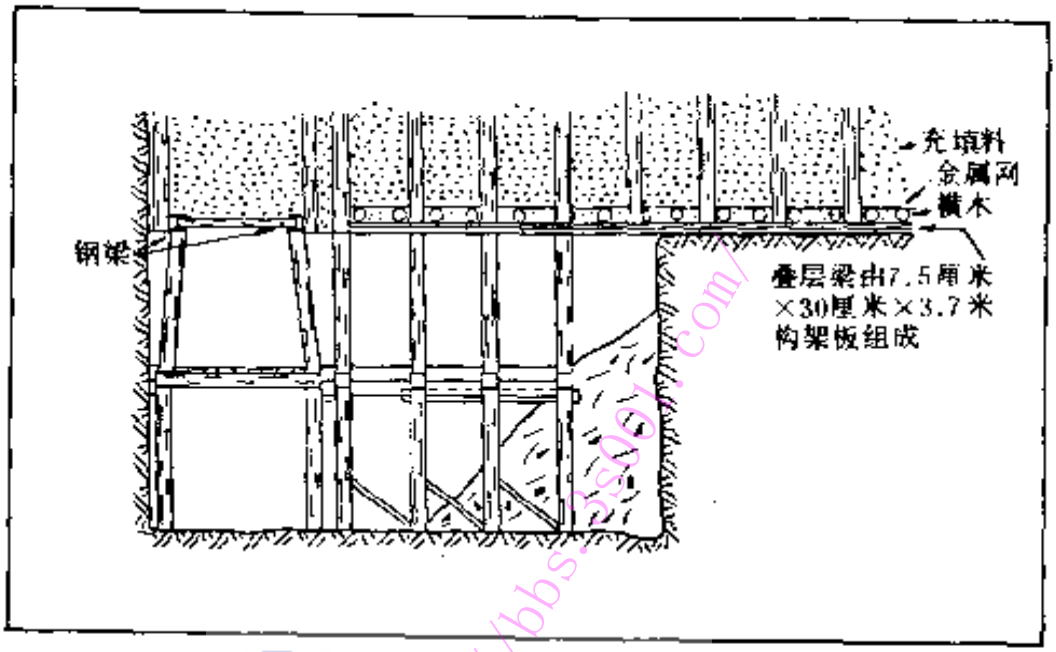


图16 假底下回采

地信网论坛
BBS.3S001.COM

水砂充填的演变过程

在1963年以前，马格马矿没有应用水砂充填。需要时从掘进工作面及露天漏斗开采的废石作充填料。

初期的充填采用的是非胶结砂。泄漏是难于控制的，特别是在靠近老充填区充填时。非胶结砂的疏水缓慢，使滤水墙长期处于静压力之下。当泄漏真的发生时，内部强度不能抵抗冲刷。同样没粘结物来促使矿泥堆的固化，使它能长期阻挡水浆。

初期浇灌是用7.5厘米内径的钢管向单个盘区分条浇灌充填料，每小时输送充填料40吨。持续浇灌72小时是常见的。

经过一个改进过程后，采用了水泥为胶结剂。改用直径10厘米钢管来提高浇灌速度，每小时输送尾矿边125吨。必

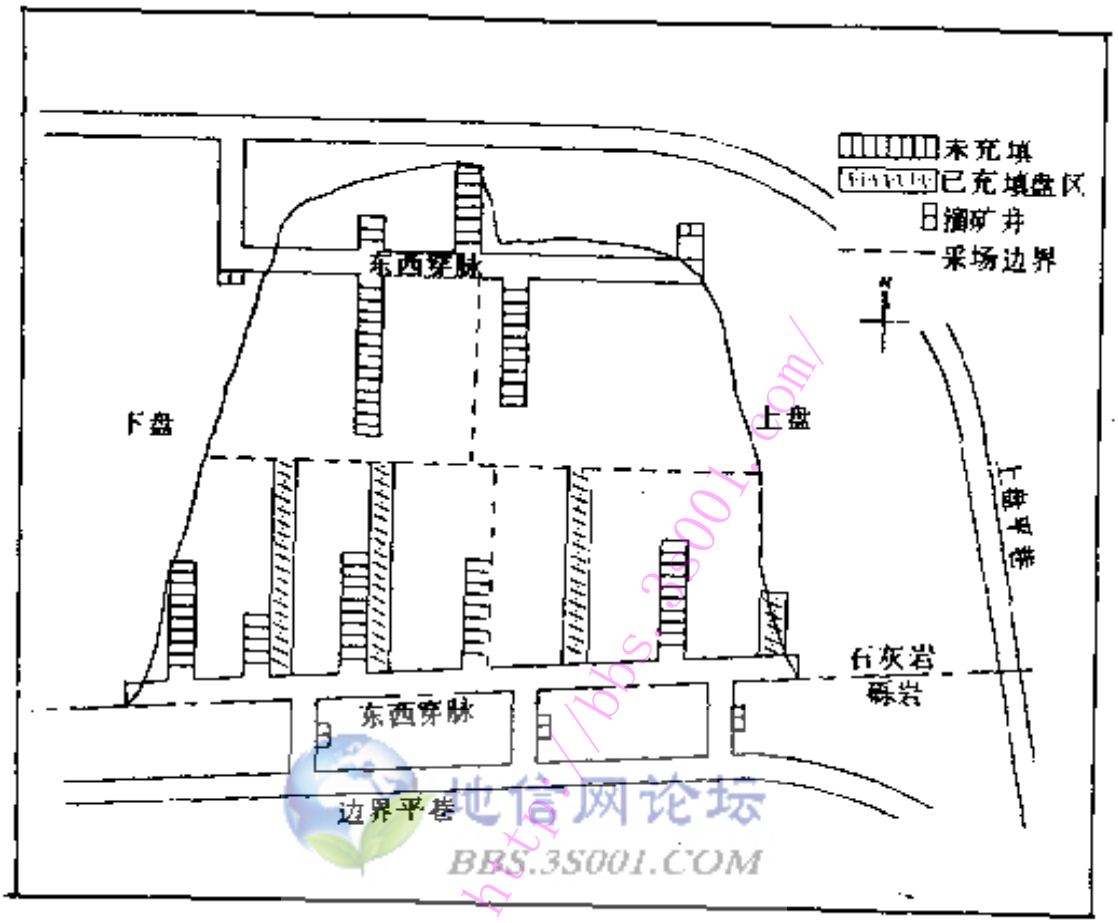


图2a C矿层理想采场布置图

须准备几个能在同一时间内充填的盘区分条，以便在遇到困难时进行替补。曾配备专职准备人员，以便统一地构筑滤水墙。用球磨机磨碎的炉渣作补充充填料。泵送添加剂用来增进浇灌密度及固化矿泥。

因马格马矿试图使采矿循环中的充填工序更快更有效，目前改进过程尚在继续进行。可靠的充填和加快采场的周期对采矿成本有极大的影响。

地信网论坛 BBS.35001.COM

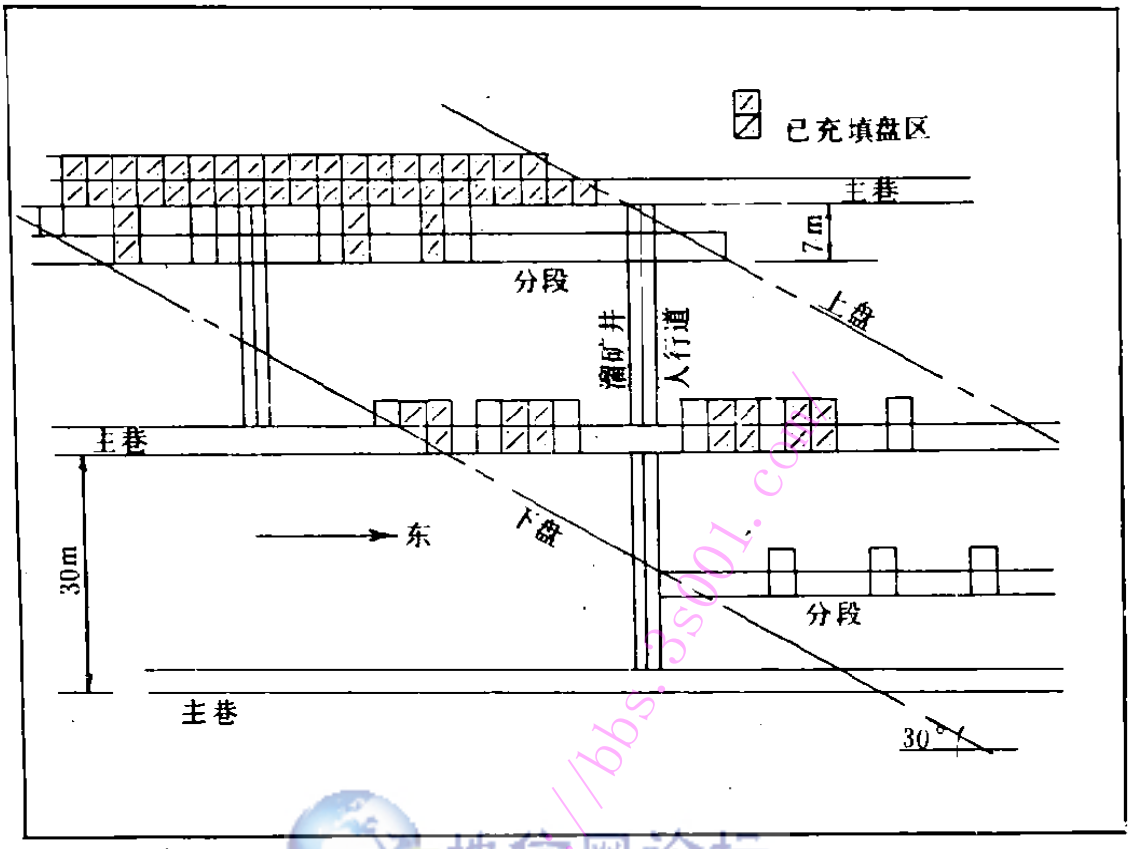


图2b C矿层理想剖面图



图 3 5号竖井附近500英尺水平充填料制备厂

充 填 料

部分脱泥的尾矿是充填的主要物料。选矿厂每天大约有2600吨尾矿，其中的40%，即1050吨返回作充填料。由于现场矿石的密度（每吨0.25立方米）与现场充填料的密度（每吨0.4立方米）的差别，理论上的尾矿回收利用率为62%。考虑到所加水泥的体积及留于采场中木材体积，回收利用率下降到53%。差数可用每天约275吨的掘进废石加入选矿厂的给料及用单独磨矿系统每天研磨265吨冶炼炉渣来补充。由炉渣所含的铜中回收约40%铜可以补偿磨矿费用。磨细的炉渣的凝硬性降低了用来使充填料固结的水泥需要量。有时地表堆放的废石也经过磨碎用作充填料的补充来源。

一个典型的筛分析[5]如下所示

粒度		百分比	累积百分比
	+65网目	11.9	11.9
−65网目	+200网目	52.2	64.1
−200网目	+325网目	21.1	85.2
−325网目	+20微米	10.8	96.0
−20微米		4.0	100.0

地信网论坛 BBS.35001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

充填料制备厂

选矿厂有两个450吨的贮仓。由此把尾矿经垂直20米、水平300米的距离泵送到充填料制备厂的一个500吨贮仓。尾矿输送的重量浓度为40%至50%。溢流水由贮仓返回选矿厂。

尾矿从贮仓输入混合搅拌仓，在此，根据井下充填的要求按预定的比例加入水泥。这是一个连续工作过程，在进到

井下之前混合砂浆由仓底流出，流经浓度计及流量计以及一个筛分箱。

砂浆从贮仓到混合搅拌仓的流动由充填料制备厂的操作人员用一个气动阀控制。从一个80吨水泥仓供给水泥，给量用可变速柏拉脱（Prator）阀门来实现。加入输送添加剂及泥浆絮凝剂可以得到较高的浇灌密度，并在采场内沉积较多的矿泥。图4描绘了充填料制备厂的总布置。尽可能把浓度保持在70%到75%的固体（按重量计）范围内，降低浓度会使井下水量超过合理的处理量。使用输送添加剂曾使浓度达到80%。但是只要浓度超过75%，就会导致充填管道的堵塞。

充填料与水泥之间的比例，根据系统中的物料种类及充填的地点而变化。目前用下列比例：

1) 12:1——当系统中不使用炉渣时，此比例可用于将在其下面进行回采的盘区分条底部1米高的部分。

2) 16:1——系统中使用炉渣时，用于盘区底部1米部分。

3) 28:1——用于各盘区分条的其余2至6米的部分。

4) 35:1——用于旁侧不采矿的盘区分条顶部2至6米部分。

在养护1—2个月后，最好可以达到约14至17.6公斤/厘米^{2}的抗压强度。

记录仪记录浓度及水泥消耗量的变化，并作为检查每日操作的手段。这有助于对某些突然出现的异常情况作出解释，并可找出操作上的失误。

井下管线

从距离最后一个筛分箱仅几英尺处起便是充填系统的井下部分。筛箱筛选出绝大部分穿过充填料制备厂的木屑、砾

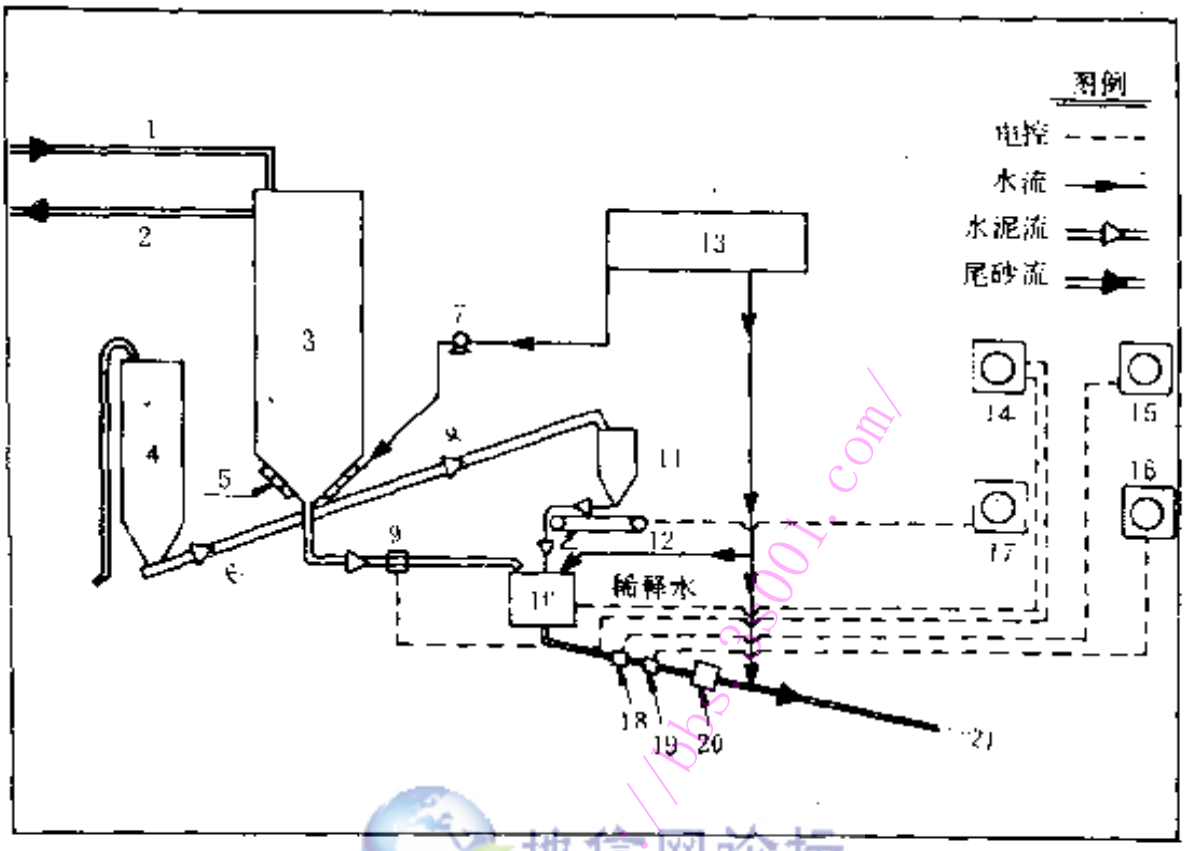


图 4　充填料制备厂示意图

1——由选矿厂来的尾砂；2——溢流；3——500吨砂仓；4——90吨水泥仓；5——喷射器；6——螺旋运输机；7——泵；8——螺旋运输机；9——气动控制阀；10——混合仓；11——4吨水泥缓冲仓；12——称重皮带；13——10000加仑水仓；14——混合仓液面指示器；15——流量计；16——浓度计；17——水泥记录器；18——流量计；19——浓度计；20——筛箱；21——至井下。

地信网论坛
顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/

石及水泥结块。

有两条独立而平行的10厘米直径的钢管从充填料制备厂敷设到采区，管线垂直及水平长度共5000米。两条管线均用法兰连接的40号及80号管子，沿5号竖井下降625米。其中一条管线敷有1厘米厚的橡胶衬里，另一条敷有1.2厘米厚的聚氨基甲酸乙酯内衬。因试验证明氨基甲酸乙酯的耐磨性能比橡胶好，故代替了橡胶。橡胶容易撕裂成鳞片，造成堵

管。因为管道放空后鳞片弹回至管壁，故难查找。橡胶也容易被豌豆粒大小的砂砾擦损，这些来自选矿厂的砂砾有时有相当多的数量通过了筛箱。有一个例子，长约60米的新橡胶管道在第一次浇灌中就被豌豆粒大小的砂砾破坏。在5号井筒内的管线中安装有节流孔以控制自由下落，它们在700英尺水平到1900英尺水平之间按200英尺间隔安设。曾用过陶瓷衬里的节流孔，但已被氨基甲酸乙酯衬里所代替。

两条管线在2550英尺水平离开井筒，沿水平方向拐了几个弯，延伸2650米后到达6号竖井。然后进入竖井，下降135米到达3000英尺水平。在2550英尺水平，管道曾用罗斯塔博特（Roustabout）接头联结，但是大部分已改用标准快速接头（见图5）。罗斯塔博特接头在正常浇灌中支撑较稳固，但

地信网论坛
BBS.3S001.COM

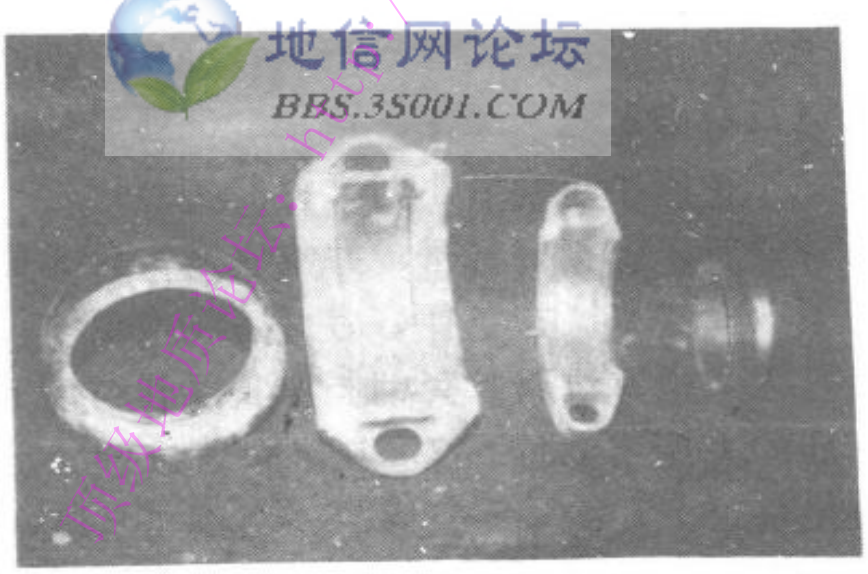


图 5　从左至右：a)接头衬垫，b)罗斯塔博特接头，c)快速接头，d)套管尾

是管路中周期性的水锤效应经常使管子脱开。6号竖井中的一根管子是用橡胶衬里和法兰联结的。而另一根是用氨基甲酸乙酯衬里，并用标准快速接头联结的。由半径大(1米)的、

用氨基甲酸乙酯衬里的直管弯成的弯管安设在垂直进料管底部以保护这些管道的易磨部位。

管线离开6号竖井，经过3000英尺水平，到达另一垂直管道，垂直管道把尾矿输送到工作采区。另一条管线经过3000英尺水平的其余部分到达南矿脉。3000英尺水平全长约1450米（图6）。

10厘米直径的主管线到达距采区几百米范围时改为直径7.5厘米钢管。7.5厘米管子敷设到主要回采穿脉，在此装有矩形孔旋塞阀门以便从一个盘区分条转换到另一盘区分条。从这些阀门开始安接直径7.5厘米40号超高密度聚乙烯管，把尾矿送入采场。这种管子能对头焊接到所需要的长度。一般用6米公称长度的管子焊接成50至75米长的一段管线。使用塑料管的理由是因为价格便宜（比钢管便宜25%），容易安设。长段的管子在主水平的管子库附近焊接好后由两个人拖拽经过急弯巷道及木滑道送入采场，再用0.65厘米的麻绳吊挂于顶梁上。一个两人小组在8小时班内能够测量好一个采场所需管量，备好料，焊接好管子，并将它拖入盘区分条，把75米长的管子敷设起来。在条件好时可完成得更多。

塑料管用一端有快速管套钢卡盘联接到钢管上。钢卡盘用一个标准的去掉密封圈的7.5厘米快速接头固定在塑料管中。只发生过很少几次塑料管事故，起因是从旋塞阀门以上产生逆灌，或是由于采场中管线堵塞产生过高的反压力。40号塑料管具有比正常浇灌时所需要的压力为高的耐压强度（在阀门处量得的浇灌时的压力为1.75公斤/厘米^{2}至2.1公斤/厘米^2），但是这些管道要能适应把充填料转换为吹扫管子的压缩空气后的压力（约为6.7公斤/厘米^2）。

如果初期浇灌管道沿着靠近下一个盘区分条的立柱敷设，

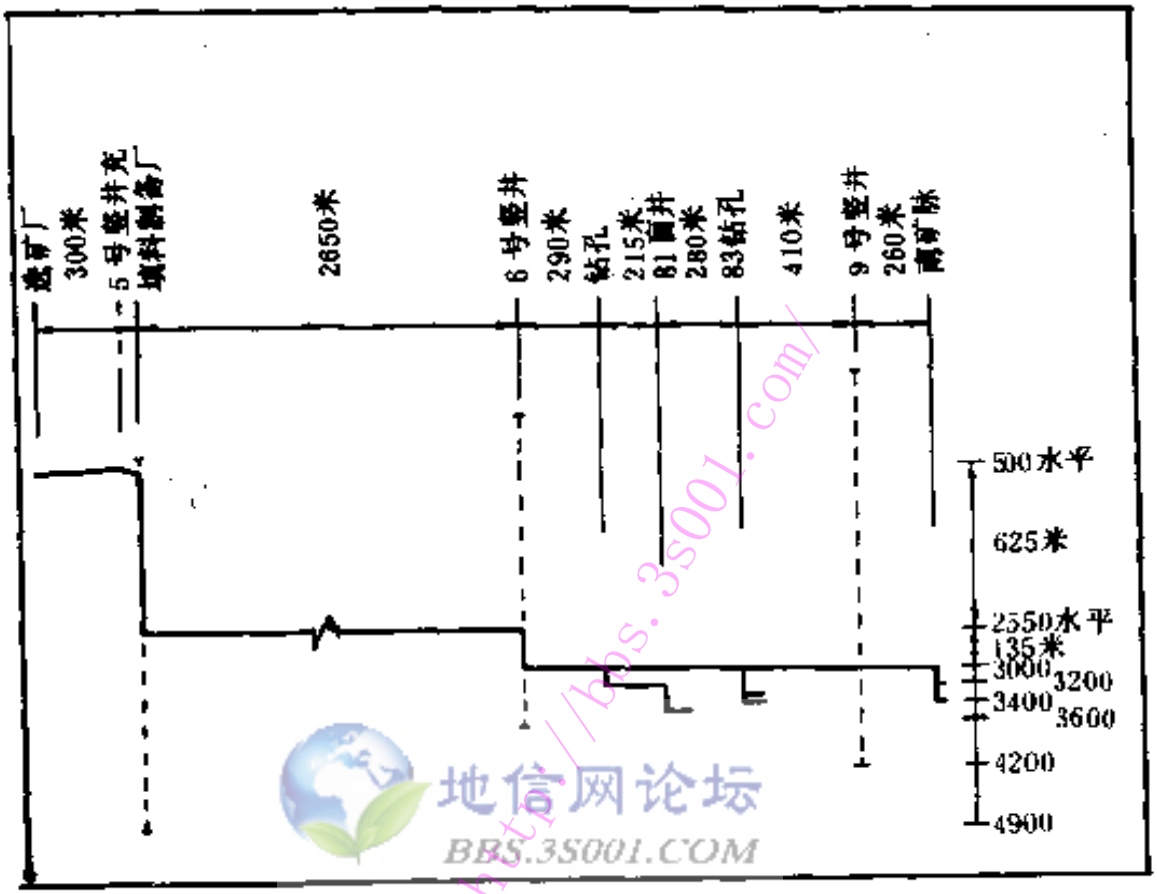


图 6 管道长度示意图

那末这些管道以后还可再用。矿工们只需把老管子的端部敞露，吹扫到能够再用的程度，并把管道接长到新盘区分条即可。这种方法常常可使一条塑料管线连续浇灌 2 — 4 次才报废。

在南部矿脉中，从阀门以上成功地使用过耐压为10.6公斤/厘米^{2}的塑料管。之所以用这种管子是因为矿脉上从3000英尺水平到3200英尺水平之间没有人行道可以用来安设主要进料管线。结果不得不一个钻孔中放下 2 根75米长的管子，把它们连接到平行的阀上。如果有一条管子出事故，就临时使用另一条来代替。在所记录的任何一次浇灌中还不曾启用

这条应急的管线。

用来排泄采场溢流水及矿泥的排泥管也是聚乙烯管。

不能用标准方法进行浇灌的地区，即在采区安设15厘米直径的水力旋流器来浓缩矿浆。这种方法常用在地层条件很坏的地方、或者天井附近，在这些地方泄漏不可能控制。旋流器的溢流送到附近能采用低浓度尾矿浇灌的盘区中去。旋流分级的主要缺点是大多数水泥会随溢流跑掉而使充填料强度降低，而且旋流分级增加管线压力约10倍左右。曾经尝试过在用旋流分级的采场加入水泥，但效果却不令人满意。

采场准备工作

由于在充填料制备中工作质量差，以及由于采矿工人的平均生产量低，目前滤水墙是由专职充填工作队来完成，结果效率提高，在采场中充填料也很少出问题。每个工作队都订有奖励合同。通常工人得到比正常的日工资多20%到30%的奖金。

采场工作队负责清扫每一个盘区分条及敷设假底。垫层结构包括沿每一排立柱线放置假底，再在该假底上放间距为1米的横木，横木上面铺放网度为10×10厘米的金属网，以及在立柱上钉上固定背板使整个结构不易滑动。假底用7.5厘米×30厘米×3.7米的枞木枋板构成，一块叠放在另一块上面，接头错开1.8米。每隔0.6米把上下板钉牢。横木直径为15至20厘米。也曾用过20×20厘米的方木。有时在主要回采穿脉用30.5×30.5厘米的宽边工字钢梁代替木梁(图7)。

专职工作队负责敷设密封墙及滤水墙。在盘区分条的前端安放一根25×25厘米的中心柱并使之与回采穿脉中的沿脉立柱封闭而成滤水墙。不用穿脉的木支柱做滤水墙，因为如


地信网论坛
BBS.3S001.COM
http://bbs.3s001.com/

图 7　尾矿充填料假底

这样做，在以后需要修理这些木支柱时就会产生困难。从中心柱向盘区分条的第一架棚子立柱的1米处安设标准的7.5厘米×30厘米×1.5米的背板，然后在背板内面钉10×10厘米的金属网，并钉挂麻布。两边墙也作同样的构筑。如果金属网不易获得，也常采用整体背板。滤水墙前端的背板从中心柱一面向另一面交错安设，以便浇灌工人能不断地排水。边墙上的背板不必交错安设(图 8)。密封墙由标准背板构成，一端切成肋骨状。每一块背板从立柱的一面向底板倾斜，因此砂浆压力将使背板靠紧底板。环绕滤水墙的内侧，从一个密



图 8　建造中的滤水墙前墙内壁及边墙

封墙到另一个密封墙连续敷设麻布。底部的被覆物的一半铺设在假底下的底板上。用这种方法不需要安设木底板。有时从盘区分条的一边到另一边用单独的底板封闭，这时就需要木底板。上一层麻布覆盖物应搭接盖住下一层约0.3米。每架棚子和穿过滤水墙的管子都必须分别用麻布包扎封闭好，否则将出现大泄漏。

在特殊情况下，可能需要给顶板卸载并安设顶封。如果妥贴地施工，可以把矿料压到盘区分条顶板上的冒落区内。

因为大多数盘区分条是按上行缓坡掘进的，所以在充填料未溢出前端滤水墙之前，盘区分条很难充填密实。为了获得较好的充填质量，可在一个盘区分条内构筑一个或几个从顶板向下延伸1.5至3米的吊挂滤水墙，同时每边设底封。这

些吊挂滤水墙常常能使滤水墙后面的盘区分条顶板充填密实，只是前边 2 至 4 架棚子不能充实。

另外安排一人或二人在紧靠底封处用自喷式底胶喷射0.3米宽的一条底层，在其上贴上一条麻布，把它搭盖在木底封上并卡固。

浇　　灌

采场浇灌之前，在回采穿脉中进路的每一侧修筑小隔墙。这些小隔墙虽粗糙但很有用。它由三个7.5厘米×30厘米×3.7米的脚手板筑成并在其上固定聚乙烯板。在塑料板上挂麻布防止撕裂。

在每个小隔墙的邻近设置一台 5 厘米隔膜泵排溢流水。

浇灌班长用电话通知充填料制备厂操作人员和告知水泥比后开始浇灌。充填料约经30至40分钟可以送到。充填料从制备厂只靠重力流放。浇灌是由一个盘区分条到另一个盘区分条以便尽可能使充填料平整。如果发生漏砂可转换到另一盘区分条去浇灌直至漏砂处修复。

浇灌班一般由班长及 3 个充填工组成。通常 1 人看管泥浆堆，1 人看管采场砂泵，第 3 人巡视各处有无漏砂。安排若干充填小组保持24小时连续作业，以避免由于换班使连续的充填料浇灌中断。

泥　　浆

溢流水及泥浆被泵送到泥浆堆。有时在最终泥浆堆前面用 1 个采场进路做临时的中间泥浆堆。泥浆堆及正式进路的唯一差别在于用尼龙织物代替麻布，它能较好地保持住更细的砂粒，而且能减少磨损，延长泥浆堆寿命。

最近，在3600英尺水平安装了一台 101 马力、380升/分扬量的大泥浆泵，把泥浆泵送到3000英尺水平一个老下山，以充填用其它方式不能充填的工作面，并可解决一些因泥浆带来的清除工作。当开泵时指派 1 人去看管该泵（图 9）。

安　　全

与碱性水泥接触所引起的皮肤烧伤对充填工是最大的危害，它可能严重到需要住院治疗。参与工作的人都被告知如何防范这个问题。所有充填工如果预知要接触水泥水都要求涂用保肤膏。

其他的潜在危害是很少发生的滤水墙倒塌及在压力管线下工作。

伴随充填出现的问题很多。在矿山的40个采场每一个采场的浇灌只需 2 至 3 天的时间，必须要有均衡的速度来及时准备出必要的采场以备充填。地表砂仓的容积有一定限度，为使选矿厂的尾矿不被泵往尾矿池，每转换一次充填地点的时间不能超过 8 至12小时。

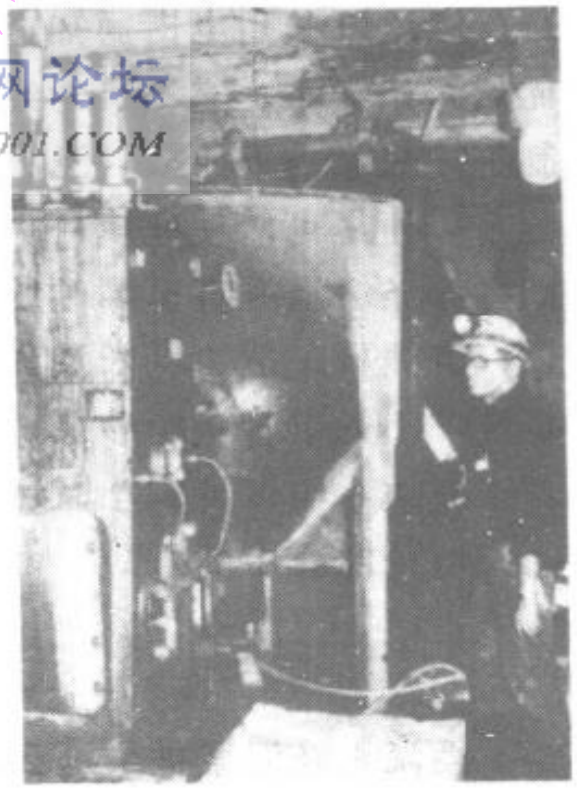


图 9　在 100 马力泥浆泵旁的充填料领班存在问题

充填料制备厂设施的维修是困难的，因为绝大部分时间里，这些设施都在使用。

浇灌中如砂浆浓度低将造成采场淹没。如果发生淹没，水及泥浆就要流入主运输巷，

使生产及清扫工作受到阻碍，而且当水泄入邻近的采场将导致地压控制问题。

大量的细泥不会被阻止在麻布里面，因而引起小隔墙及泥浆堆很快淤积。少量的矿泥可以保持较大的强度，但是任何过量常常麻烦多于好处。

在管道中的粗砂、水泥块、橡胶鳞片以及过大的浓度、管道上的孔洞和阀门的误操作都将产生管道堵塞。马格马矿有很长的充填管道，一旦堵塞将造成3天的停工。在疏通堵管时，可利用另一条备用管浇灌。然而在实际工作中事情并不如此顺利，因为常常缺乏熟练工人来疏通堵管，同时又能管好浇灌工作。一般用引到充填料制备厂的水来清洗管道。在尾矿中加入炉渣后，砂浆似乎胶结得快一些，这给清理管道带来更多的麻烦及需要更多的时间。

在那些距离电话机相当远的采场，通讯也许是最大的困难。过去曾经使用现场电话，但是已经放弃不用。准备让充填工使用新型的井下无线电通讯系统，这将使工人们能及时与充填料制备厂及其他矿山监督人员联系。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

未来展望

在最近的将来，将修建一个粉煤灰或飞灰系统来减少水泥用量。试验曾经表明，用粉煤灰能代替20%的水泥而不降低强度。

进一步的试验将是：采用输送添加剂；试用硬化钢管；在井下试用声波流量计以便更好地监测尾矿流量。计划采用尾矿回收器作为目前给料的一个补充途径。这种回收器将在尾矿仓装满时，把不得不泵送尾矿池的充填料回收再用。

结　　语

马格马矿充填系统实现了几乎100%的矿床回采率。回收率过低将使矿床的开采无利可图。这个系统的发展与演变仍在进行中。进一步的改进有希望在今后产生更有效的系统。

参考文献

[1] Johnson, Bruce, A Brief History of the Pioneer Mining District and the Magma Mine, presented at the Spring Session, Geological Section, Arizona Chapter, AIME, Superior, May 11, 1974, pp. 1—9, unpublished.

[2] Ramsey, Robert H., *Men and Mines of Newmont—A Fifty-Year History*, Octagon Books, pp. 146—156, 1973.

[3] Johnson, Bruce, Ventilation and Cooling at the Magma Mine, presented at the Spring Session, Underground Section, Arizona Chapter, AIME, Superior, May 11, 1976, pp. 1—2, unpublished.

[4] Florez, Frank M., Undercut and Fill Mining at Magma.

[5] Gerhart, Tom, Magma Copper Company, Superior Division, Copper Company, Superior, Arizona, unpublished. Sandfill System, pp. 1—2, 1976, unpublished.

顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/
地质网论坛 BBS.3S001.COM

第二部分　研究与革新

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

充填体稳定性的测定

J.R.巴雷特　M.A.库尔萨德

P.M.戴特*

摘　要

为了成功地回采矿柱，许多矿柱回采方法取决于相邻矿房胶结充填体垂直壁的稳定性。水泥含量是矿柱回采成本的重要组成部分，但是水泥需要量的估计，过去大都靠经验确定。

暴露的胶结充填体垂直壁的稳定性，是用二维或三维有限元分析来研究的。考虑了施加在充填体上的外部载荷来源，研究了这些载荷对充填体的影响。充填体的稳定性不完全取决于暴露高度，还取决于横向尺寸和回采顺序。看来充填体最有效的作用是促进成拱作用，其稳定性取决于充填矿房的最小尺寸。

地质论坛 BBS.35001.COM http://bbs.35001.com/ 顶级地质论坛

前　言

充填被用于地下矿山作为区域性的岩层支护。与胶结充填矿房相邻的矿柱回采作业包括用下向分层充填法，大爆破、废石充填料覆盖下放矿和空场法回采垂直走向的矿柱。每一

---

* J.R.巴雷特(Barrett)、M.A.库尔萨德（Coulthard）是澳大利亚联邦科学和工业研究组织应用地球力学部高级研究员；P.M.戴特（Dight）是该部实验干事。

种工艺施加在充填体上的载荷各不相同，但在每种情况下，胶结剂可能是矿柱回收成本的重要组成部分。确定充填体暴露面的稳定性问题引起澳大利亚金属矿采矿业的关心。包括充填体稳定性研究在内的一项合作研究项目已由澳大利亚矿物工业研究协会（Australian Minerals Industry Research Association，简称AMIRA）和联邦科学和工业研究组织（Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization，简称CSIRO）联合进行。该研究计划是以芒特艾萨1100矿体的开采为中心。关于芒特艾萨采矿和充填的详细情况已在本文集里由莱希（Leahy）和考林（Cowling）的文章做了论述[1]。

胶结充填的典型应用包括着回采急倾斜透镜状矿体的矿柱。图1表示一个已充填的矿房和矿柱回采作业。充填体承受本身重量和支承邻近岩石的侧压力和剪力。它还要承受顶板、两侧和崩下矿石或已充填废石的潜在载荷。在每种具体条件下，在研究矿柱的稳定性时，必须估计这些力的重要性。

充填被用来作为区域性支护和作为一种减少可能因塌落而被充填的空场的手段。随后的矿柱回采将大大释放垂直作用于矿体上的应力。这样就导致矿房各侧壁松弛、节理扩大、矿柱壁中的块段移动和地层活动增加。但是胶结充填的目的不是承受绝大部分的岩石原始应力，而是减少岩壁内岩体的松弛，使岩石本身保持承载能力，并将减轻顶柱和支柱所承受的载荷。由于这一作用，胶结充填体暴露面可能是受侧向压缩应变的影响。这一活动不一定会降低稳定性，但可能降低存在于充填体暴露面后的拉应力，于是提高了充填体的稳定性。

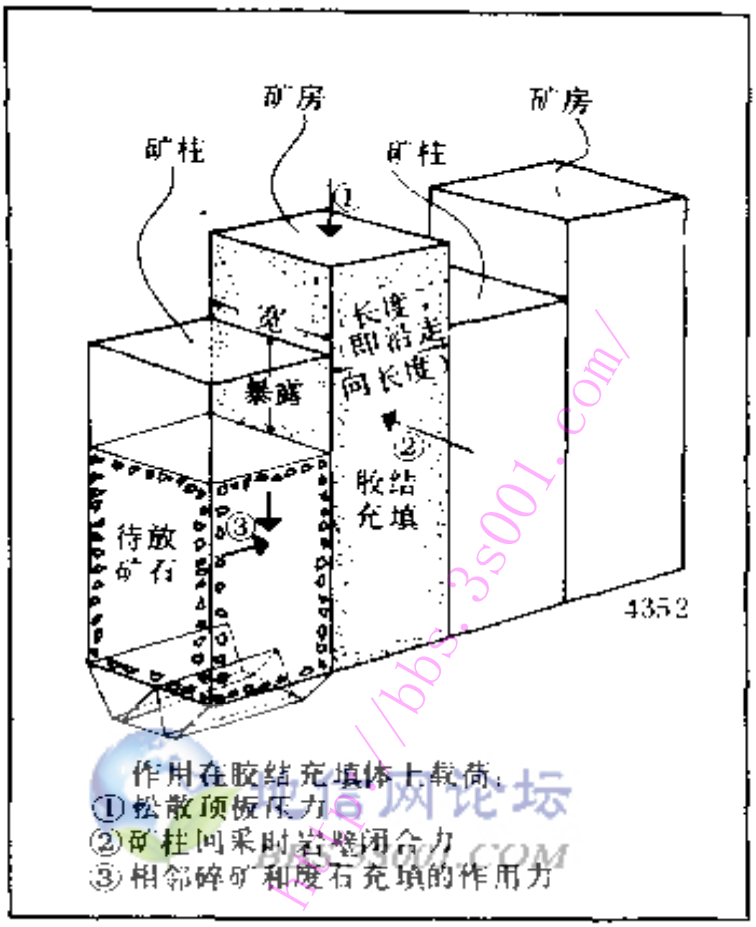


图 1　与胶结充填矿房相邻的矿柱回采

下面简要探讨一下确定胶结充填体垂直壁稳定性的方法。当讨论稳定性时，提出的第一个问题就是“什么是稳定性？”“稳定性”通常是指不发生破坏的条件。在许多矿柱回采作业中，只要工作人员没有危险，矿石贫化在一定限度内，胶结充填柱体保持其区域性的支撑能力，那末一定程度的充填体破坏是允许的。由于摩擦或破坏（片帮或向深处破坏），从暴露的充填体壁上脱落的充填料贫化了矿石。充填体受相邻采场放出矿石的摩擦，是随放矿控制和放矿点与充填壁的相对位置而变化的。在某些情况下，可以调节回采顺序，使充填体暴露面最小，以及防止破坏直至矿石全部崩完为止。在这

些情况下，只要矿石爆破块度和放矿控制适宜以及胶结充填料不会破碎和混入矿石中，充填体破坏并不是不可以的。

本文研究矿柱回收的一些变量，以便确定控制充填体稳定性的诸因素，使采矿工程师了解充填体的特性，以及确定能分析充填体行为的数学模型的要求。

充填体并不是均质体，尤其是废石胶结充填体，在这种充填体中，大孔隙区容纳的水砂胶结充填料比含细碎石区所容纳的多。充填体性能随充填类型不同而异。其弹性模量取决于浓度和胶结性——密度愈大，或胶结性愈好，则模量愈大。摩擦角随粒度和密度的增加而加大，而与水泥含量无关。粘结力看来只随水泥的含量而变化。典型物料的性质列于表1。

鉴于本文的目的，假设充填体是均质的和各向同性的，来作为胶结充填体的近似算法。所采用的强度与刚度的参数相当于含6%波特兰水泥的充填体。

在个别情况下，可能不知道影响充填的一些变量值，或者一些外因可能改变已设计的开采顺序。在这种情况下，可能需要对充填体和（或）周围岩石进行监测。已发展了与此相应的技术。这些技术包括形变仪、孔隙压力传感器和充填体压力计。

数学模型

矿房充填和随后回采相邻矿柱的数字分析已用有限元法完成。这些计算得出整个充填体的应力分布的估计，并且能在开采期间评价充填体的稳定性。关于有限元法模型已由库尔萨德等人进行了充分讨论[5]。

本文讨论的大部分计算为二维平面应变近似解及用弹塑

表 1　典型的充填料性质

类　　型	水泥添加量、固体重量比	强　度 C、兆帕	脱水物料的摩擦角 Φ、度	弹性模量、兆帕
1. 水砂胶结充填，在18个月后的采场中测定	3％的波特兰水泥和6％的细磨铜反射炉炉渣	0.22[42]	35[24]	285[23]
2. 养护28天的水砂胶结充填	a）6.25％的波特兰水泥	0.17[43]	36[31]	90[45]
	b）4.8％的波特兰水泥	0.14[32]	26[31]	60[45]
3. 废石胶结充填（稳定区）	废石密实充填，废石间空隙灌注3％波特兰水泥和6％磨研铜反射炉渣的水砂胶结充填料	0.60[24]	35—40[27]	280[23]

地信网论坛
资源地质公示：http://bbs.3s001.com/

性屈服判据和有限元拉强度测得材料的非线性特征。在计算本工程时，对电子计算机程序TNJTEP[46]作了相当大的修改。可以确定充填体中发生张力破坏和（或）塑性屈服的区域，并且根据弹塑特性数值上不能收敛的区域的扩张，来估算充填柱体的整体稳定性。

应用改进的NONSAP[47]程序进行了三维计算。到目前为止，仅研究了一个关于充填体的线性变化的弹性模型，而这第三维的作用是用相同程序计算得到的二维结果进行比较来评价的。

已模拟了若干分层的充填柱体结构，它们中的每个分层新浇灌的充填料的重量是瞬时施加的，对各新老分层的合应力增量进行了计算。对于新充填料通常采用半流体特性（即低刚度和零边界抗剪强度），各老分层的硬度和强度逐渐增加，

表现在充填物料性质的变化上，以及施加于端部的边界条件上。这些计算的结果将在后面讨论。

关于相邻的空场是用逐渐撤去充填柱体一侧或几侧由岩石提供的支护的办法进行模拟。在这些情况下最影响充填体稳定性的一些参数在“空场法回采矿柱”一节中讨论。

一个采场的充填

充填过程中所产生的压力分布一般只是在设计充填挡墙时考虑。但是充填体中初始应力的计算在往后开采相邻采场时，对测定其稳定性是必不可少的。当岩石采出时，岩石初始应力被释放，并在空场周围重新分布。岩石稳定性的评价基于采前的应力。在充填体被暴露时，有着相同的情况：一些支承充填体的岩石被移去，接触面的情况发生变化，因此在充填体内和在留下支承充填体的岩体中产生新的应力分布。

地信网论坛 BBS.35001.COM

采场壁和挡墙上的充填体压力由孔隙水压力和颗粒间压力（即由充填料颗粒产生的压力）组成。孔隙水压力的大小取决于脱水情况、充填料渗透性和充填速度。例如：当连续浇灌充填一个充填井扣负量时，在挡墙上的孔隙水压力将比逐层缓慢充填一个大空场的压力要高。同样，颗粒间压力将受充填速度的影响，因为充填体的强度和刚度随时间变化。模拟带有孔隙水和颗粒行为的充填过程是很复杂的。理论尚未很好建立，有关充填料的参数还很不清楚。本文在分析充填体时，仍把它当作具有脱水性的材料。与脱水状况一致的孔隙水压力在估算挡墙压力时可一并考虑进去。

考虑充填一个40米宽、200米高的采场。这样一个典型采场的实际充填工作，要6个多月时间，浇灌50多次。按照

线弹性平面形变分析计算，充填期间产生的应力分布如图 2 所示。沿充填体中心线的垂直应力[图 2（a）]主要取决于模拟的充填是一次浇灌、五次浇灌还是十次浇灌。在这些分析中，对每次新浇灌体的模拟是把物料当作已固化的，然后用充填体的重量进行加载。当模拟充填料逐渐增加时，采场顶部的侧向剪应力较小，而水平压力较大。所得结果表明，大于十次浇灌不会显著改变计算的应力，因此后来采用了十次递增浇灌的结构。

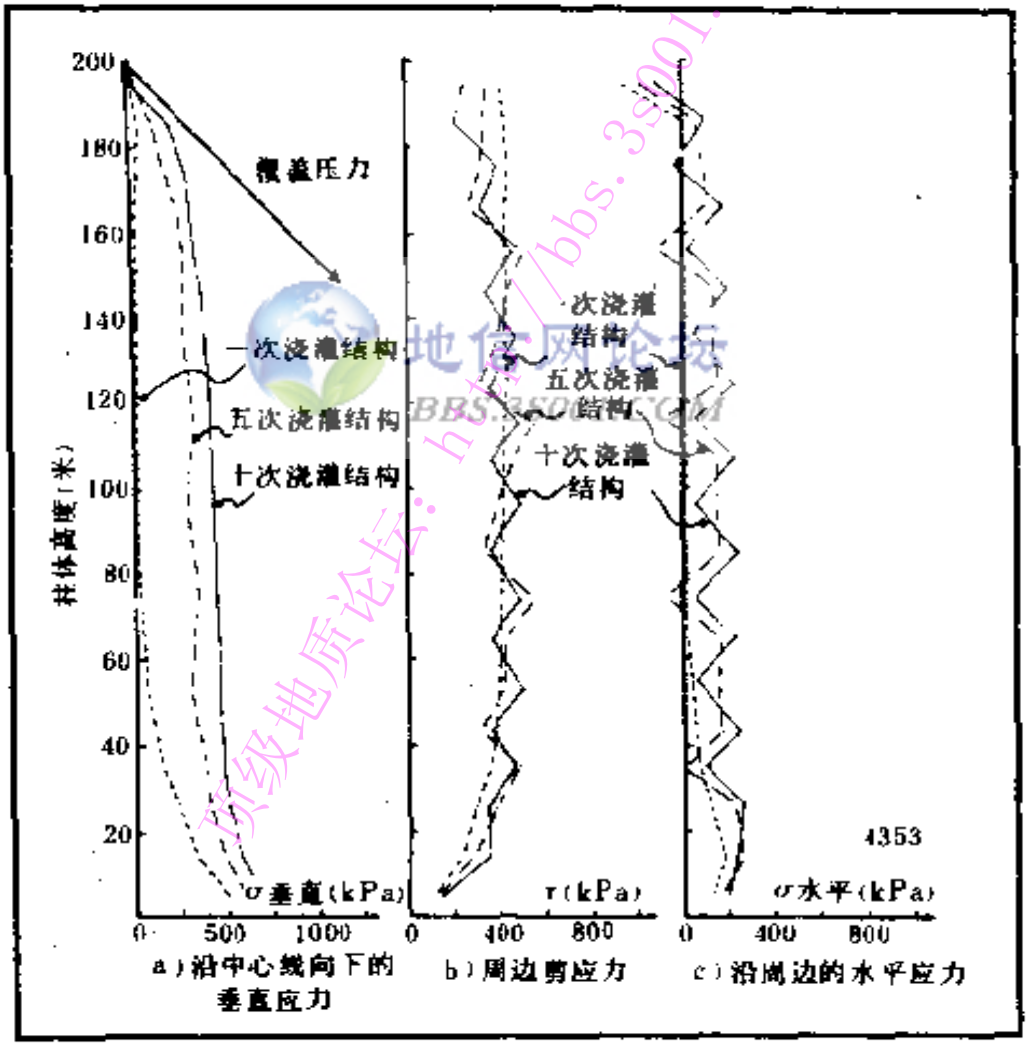


图 2　在充填40米宽的矿房期间产生的应力

（线弹性，平面变形，固定边，E＝300兆帕，

ν＝0.3，　ρg＝22.5千牛顿/米^3）

图 2 所示的应力值，从高度50米到150米是相同的。这说明充填期间产生了成拱作用。在采场底部50米高，由于矿柱的刚性基底阻止充填体的垂向弯曲和拱形的发展，垂直应力增加，侧向剪应力降低。在矿房顶部50米，拱形得到了发展。

由于最上面几次充填料浇灌形成拱形，这几次浇灌所用的物料参数必定支配充填体中的最终应力分布。约经一个月，典型的波特兰水泥胶结充填体达到它全部的强度和刚度[4]。对于充填 6 个月模拟十次浇灌的采场来说，每个阶段最后两次浇灌料应比较松软。以较松软充填体形式所模拟的顶部浇灌的逐渐递增结构，导致充填体顶部剪力降低和垂直应力增大，如图 3 所示。当不考虑非线性特性时，如图 3（b）和图 3（c）所示，能把剩余应力固定于每次浇灌的充填料中，并反应在侧向剪应力和法向应力的变化范围上。

应用非线性分析可以得出，分10次浇灌的充填体的垂直和水平应力比 1 次浇灌结构的垂直和水平应力要大（图 3）。充填体内产生的应力比覆盖层压力小得多。这一结果已为现场测量所证实。

大多数已充填采场实际上不可能很好地用二维模拟表示。在一个 200 米高的采场，平面上40米见方，采场的充填体在横向和纵向都能形成拱形。图 4 所示为顶部各层较松软的 7 次浇灌递增结构的线弹性三维分析所获得的应力分布。中心线的垂直应力比等值二维模型的结果减少20%。中心线垂直应力（图 4）大量减小，已被特扎吉（Terzaghi）[9] 用简易盒式流变计（bin-flow）所预测。特扎吉模型进一步显示粘结力较好的充填料能承受边界增长的剪应力，从而降低了垂直应力。因此，当开采期间岩壁支承力降低时，较坚实的充

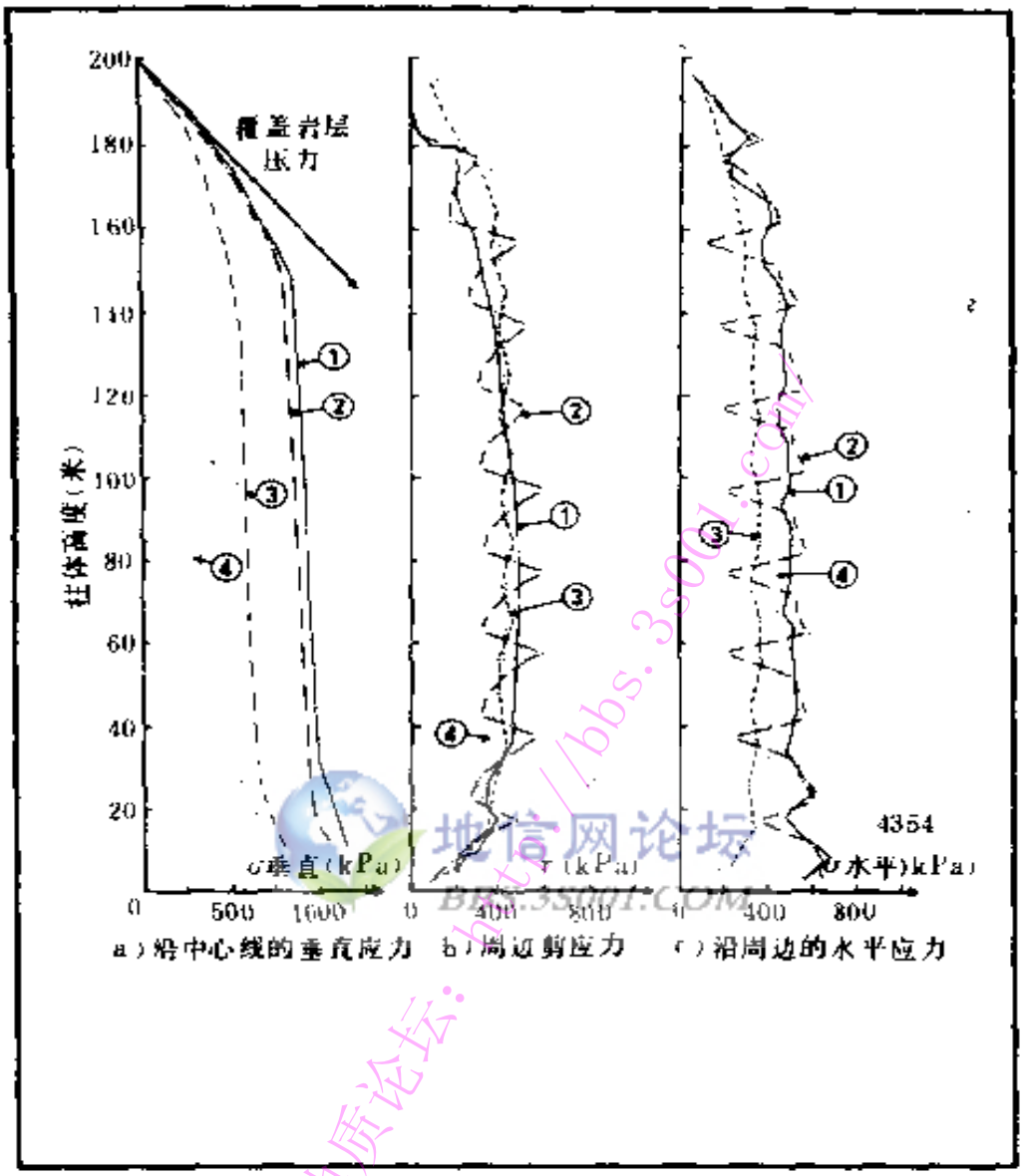


图 3 充填时充填量对产生的应力响应，平面应变分析

解1. 弹塑性分析；C =0.15兆帕、Φ =40°；10次浇灌结构，顶部各层较松软。

解2. 线性弹性分析：10次浇灌结构，顶部各层松软。

解3. 弹塑性分析：C =0.15兆帕，Φ =40°；10次浇灌结构。

解4. 弹塑性分析：C =0.15兆帕，Φ =40°，1次浇灌结构。

填体可能受到旁边的岩壁很好地支撑，并将承受较大的卸载力。

从这些分析可以看到，在已充填采场内的应力分布是随

采场几何形状、充填速度和充填体强度而变化的。为了模拟充填过程，必须采用递增结构，以显示浇灌后充填体降低的刚度以及充填体和岩石接触面较低的强度。在这些分析中产生的水平压力作用于采场围壁上。作用在挡墙上的压力可能小于这些值，这取决于挡墙刚度和它随一采准巷道掌子面远离采场的位置变化。水压力是除充填体中产生的颗粒间压力以外的隔墙载荷的一部分，必须予以考虑。

空场法回采矿柱

矿柱回采最简单的方法之一是空场法——即在邻接已经胶结充填的矿房处，创造一个空场。或者，如果矿柱是使用上向炮孔梯段回采或采用大爆破和崩落矿石放矿，那末充填体的暴露高度可能是有限的。

在宽40米、高200米的充填柱体中，离顶部50米的充填体显现的应力是个常数。如果暴露面在该水平以下，那末根据20—50米高度上暴露面的二维分析所预测的破坏区如图5所示。暴露高度为10米时未发现破坏；50米高度破坏区已是那么大，因此更大的暴露面就不需要考虑了。暴露高度达40米时，破坏是局部的，并呈现出暴露面脱落。但50米的暴露高度时，破坏可能发展到充填体的较深处。

当矿柱采完时，支撑充填体的矿石被清除了，正在充填体中暴露面上部和下部的剪应力和水平应力增加了。边界应力分布的变化如图6（b）和6（c）所示。中心线垂直应力分布[图6（a）]仅在40米和50米暴露高度时变化显著。

曾使这些暴露面出现在离充填体顶部以下50米。当暴露面紧靠充填体顶部时，40米暴露高度的破坏区是较小的[图7与图5（c）相比较]。这一特性是由于紧靠充填体顶部的充

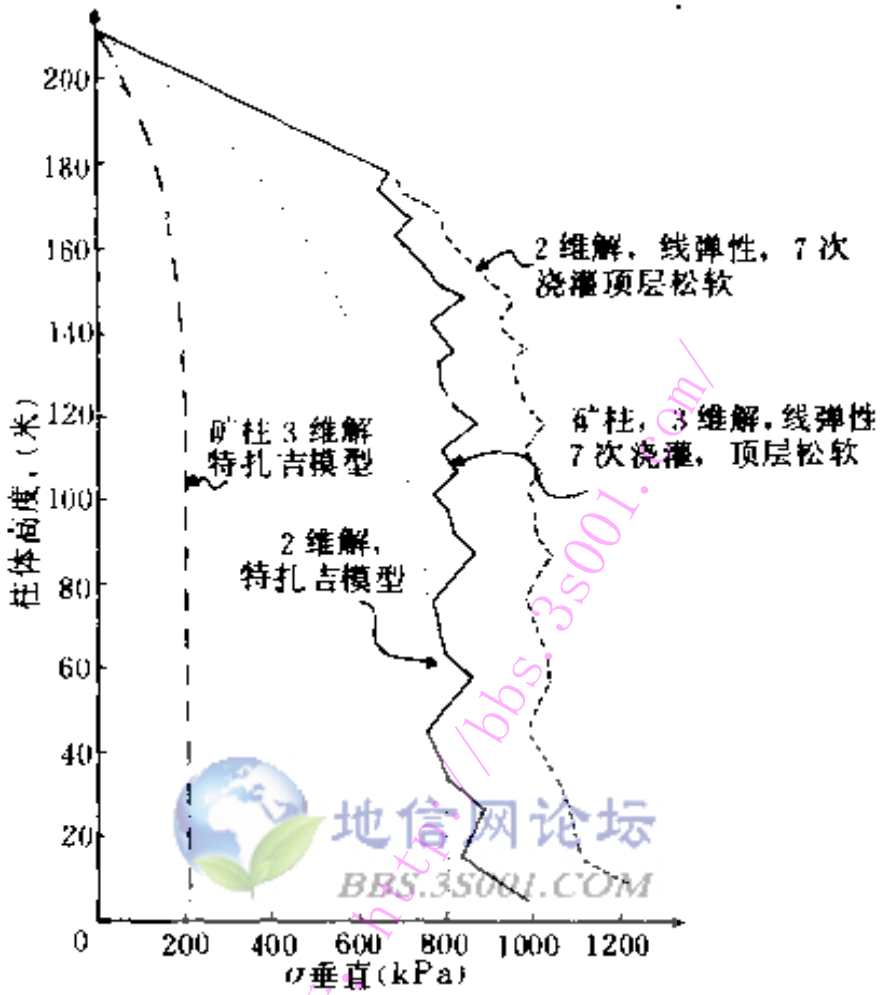


图 4　充填应力——二维和三维分析

填体与采场接触面上的低应力释放。

当形成一个暴露面，被释放的一些边界应力是通过充填体到采场顶板的岩壁重新分布。因此柱长度（即沿走向尺寸）必定影响暴露部分的稳定性。对40米暴露高度和不同的矿柱长度来说，20米长度的破坏区比40米或80米长度的要小。在这些情况下的破坏区尺寸如图 8 所示。就三维情况来说，这时长度和宽度几乎一样，在两个方向均产生成拱作用。这时采场长度对破坏区尺寸的影响不大。

由此可见，当充填采场一侧暴露时，如果另一侧早于或

地信网论坛 BBS.3S001.COM http://bbs.3s001.com/

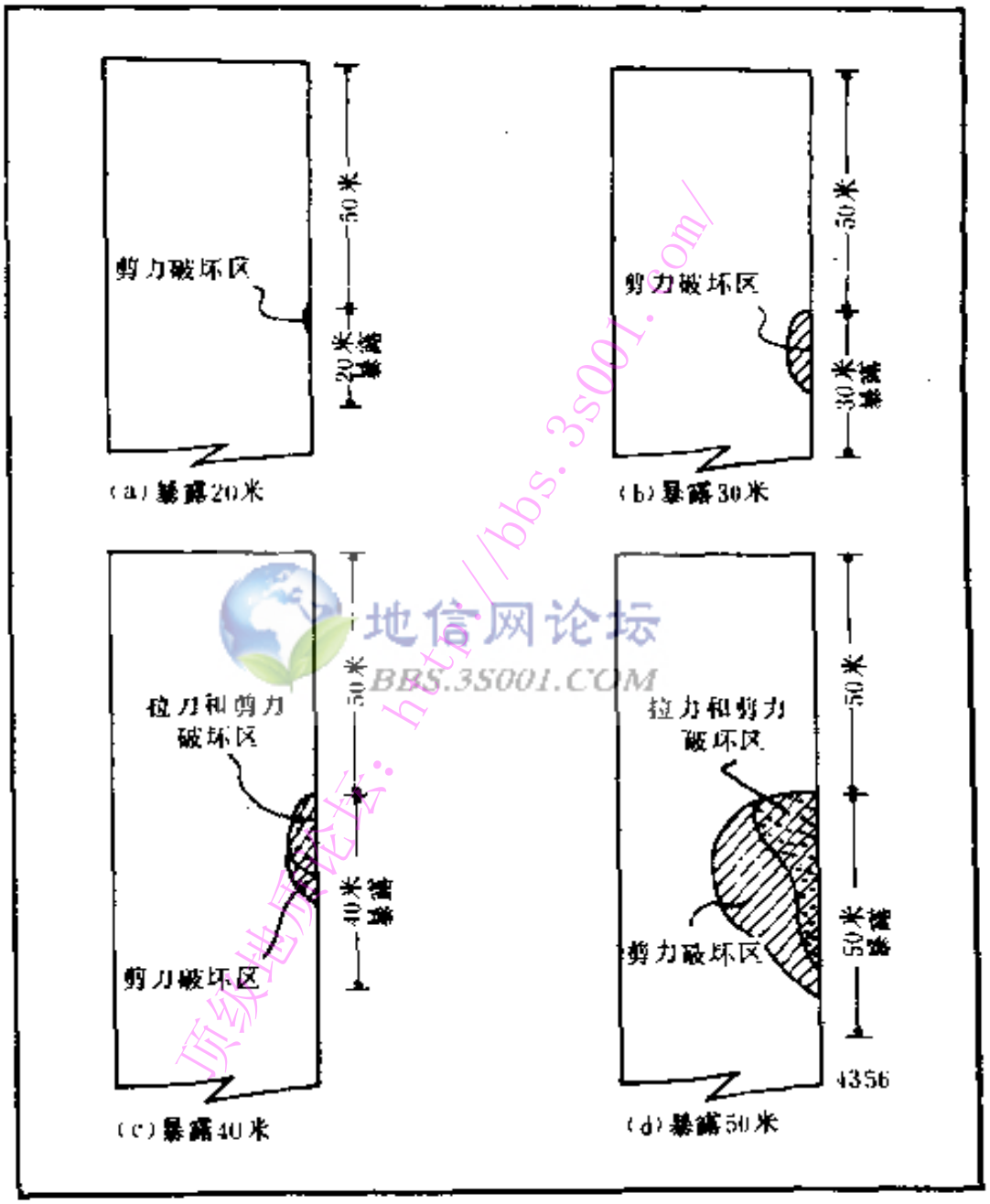


图 5 用二维分析预测破坏区

(C=0.15兆帕, ϕ =45°)

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

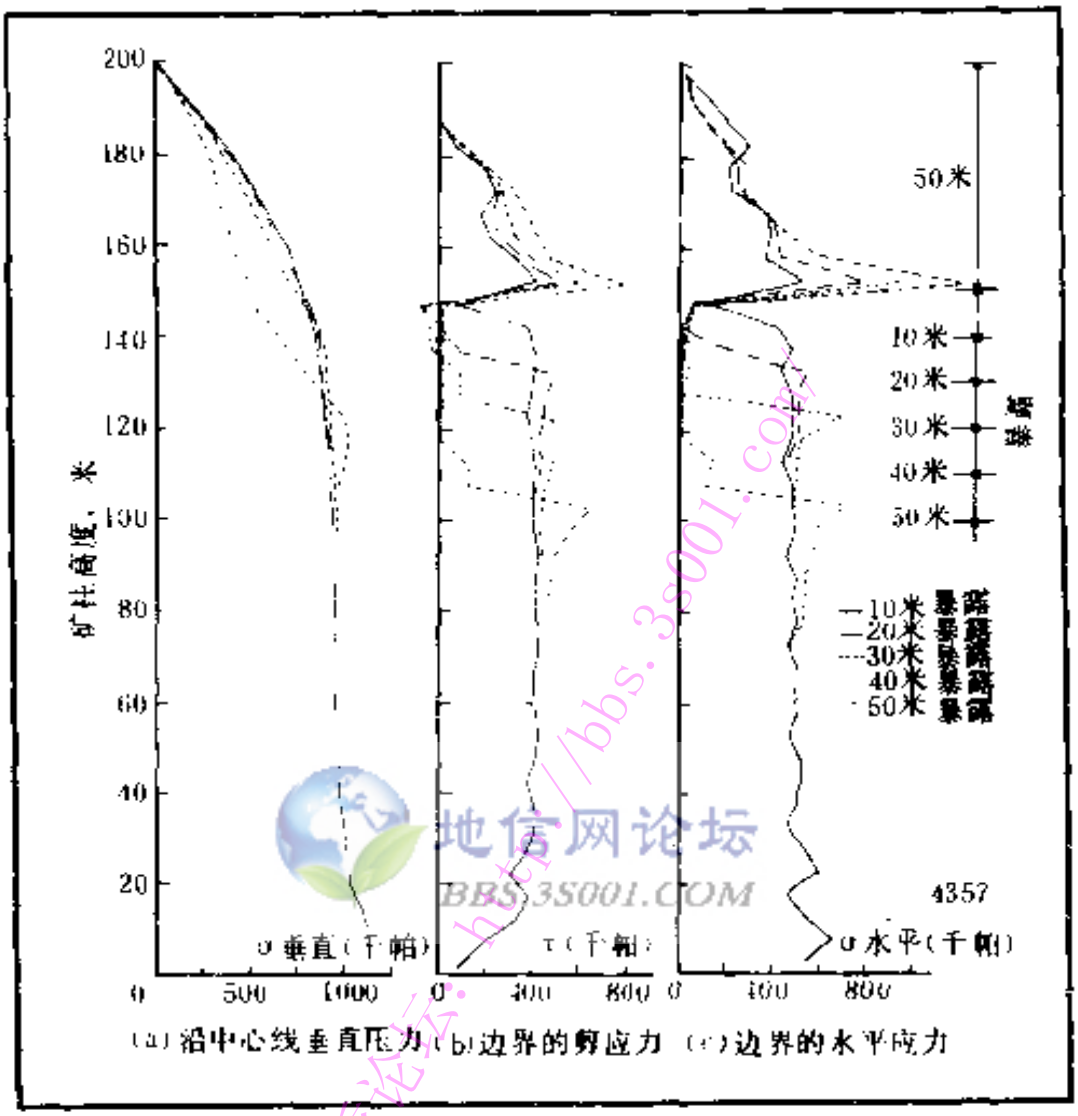


图 6 不同暴露高度的应力分布图
（弹塑性平面应变分析）

与它同时暴露，则这一侧的暴露面稳定性较差。图 9 展示了这一趋向。图中对矿柱的单侧40米暴露高度的破坏区与双侧分别为20和40米暴露高度的破坏区进行了比较。单侧40米暴露高度的形变图如图10所示，它说明采场帮壁是如何保持充填体的。

用线弹性模型分析了采场长度大致与暴露尺寸相等的三维状态。如前所述，充填的模拟包括了顶部较松软的浇灌。

地信网论坛 BBS.3S001.COM 资源地质论坛 http://bbs.3s001.com/

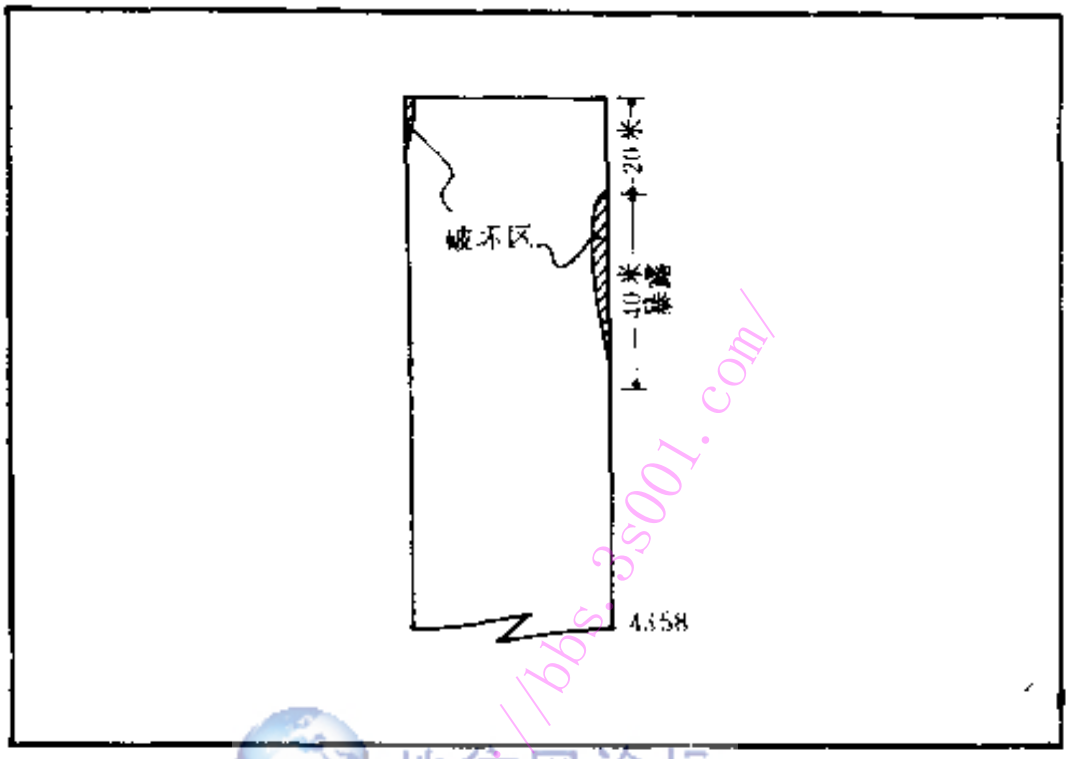


图 7 靠近采场顶部的暴露面破坏区

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/

关于通过暴露面中心的垂直面上的位移如图11(a)所示，与相应的二维例子相比，位移显著降低[图11(b)]。由于三维空间的作用是提供垂直和水平两方向的附加拱能力，因而减少了充填体暴露面后的超应力区范围[比较图11(c)与图11(d)]。

回采矿柱的其他方法

以单一空场来回采一个矿柱是个理想方法。但岩层条件往往不可能允许用空场法，且采场几何形状可能与“充填采场”一节中所分析的迥然不同。因此，有着一些考虑这些变化的重要方法。

第一，矿柱窄，品位很高，适宜下向分层充填采矿法。该法如图12所示。矿房充填体最初受矿柱矿石的限制。当该

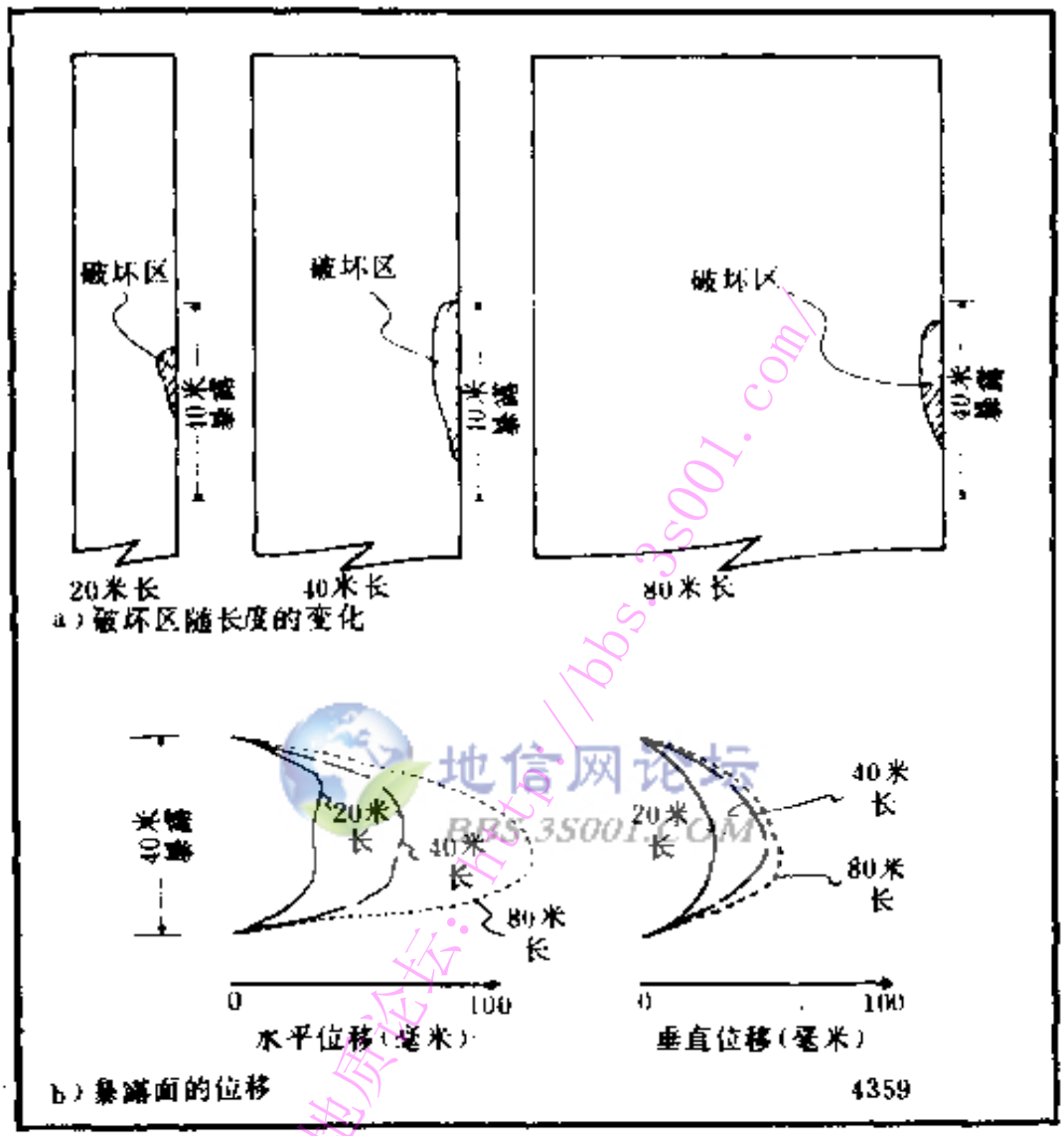
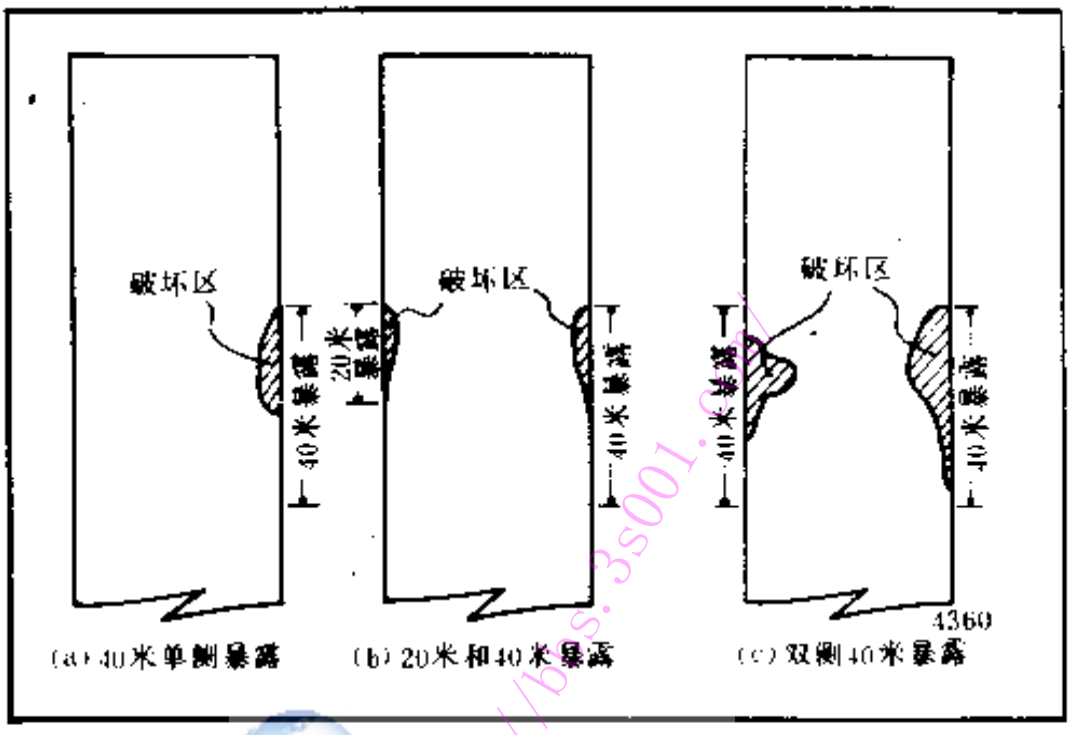


图 8　采场长度（沿走向长度）对充填性质的影响

矿柱矿石采掉后，作用在充填体上的边界应力即被释放。在分层充填期间，新充填料将受到矿房充填体的支撑。在采用人工顶板的某些情况下，在每次充填浇灌体上面可以看到空隙，因此矿柱充填体在侧面必须由矿房充填体支撑。如果在每个新分层使用木支架，也可能产生成拱作用，但该作用可能需要充许多分层才能形成。再者，有一个顺序问题。矿柱和矿房接触面的剪力最初支撑着矿房的充填体，但开采一个



(a) 40米单侧暴露　(b) 20米和40米暴露　(c) 双侧40米暴露

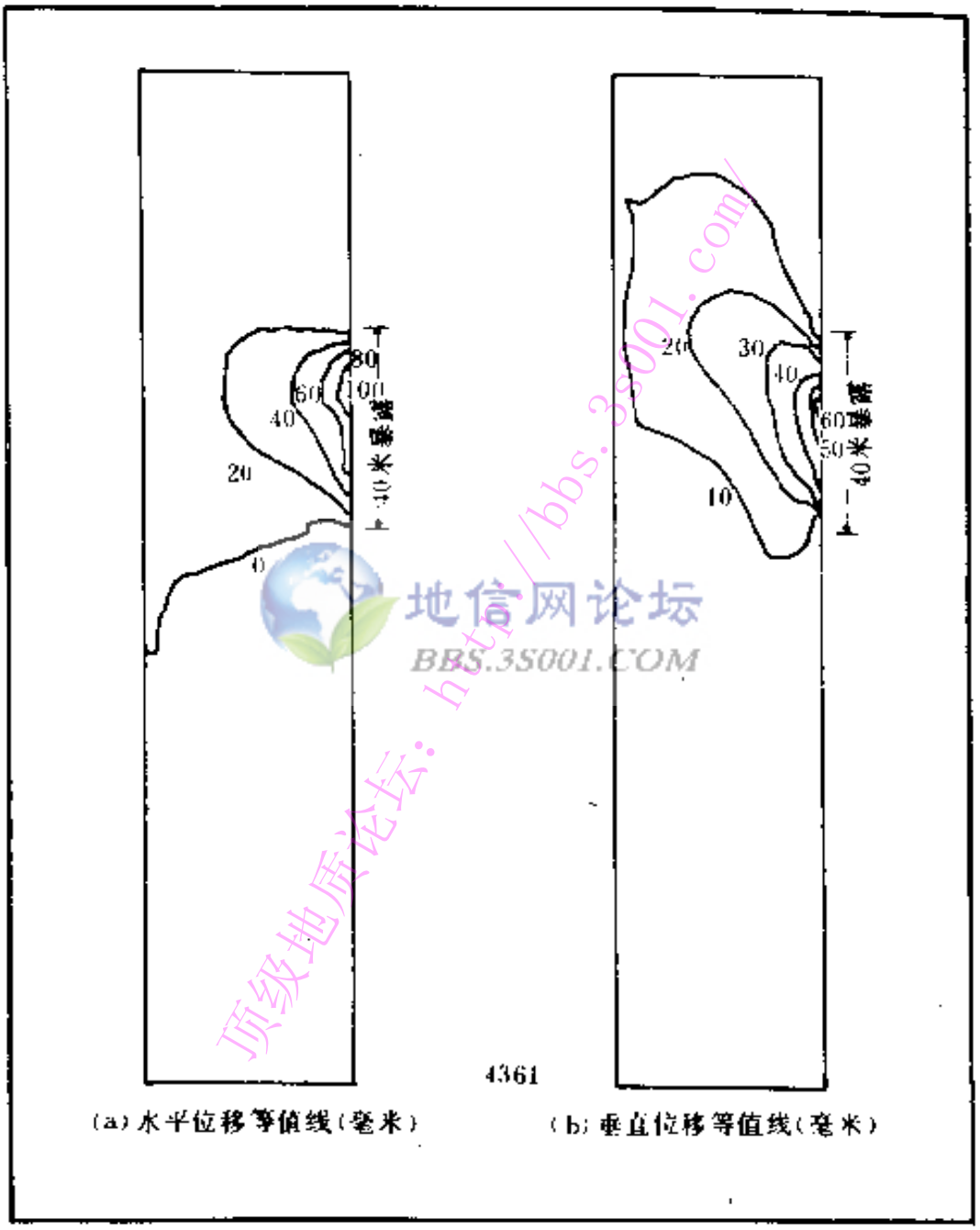
图 9　破坏区尺寸随开采顺序而变化

分层后，这种支撑作用就消失了，矿房的充填体支撑了矿柱的充填料（见图12）。

回采矿柱的第二个变革方案是先用大爆破崩矿，继而在废石充填料覆盖下控制放矿的方法。当矿石崩落后，它可能将矿柱填实，增加了对矿房充填体的水平应力。在放矿开始时，水平压力即降低，放下的矿石（和加入的废石充填料一起）沿着矿房充填体的两侧下降。在一项分析中，预期的受力状态很大程度上取决于作用在充填体和矿柱间的边界应力。无论是在放炮之后还是放矿期间，这应力的大小实际上是很少知道的。

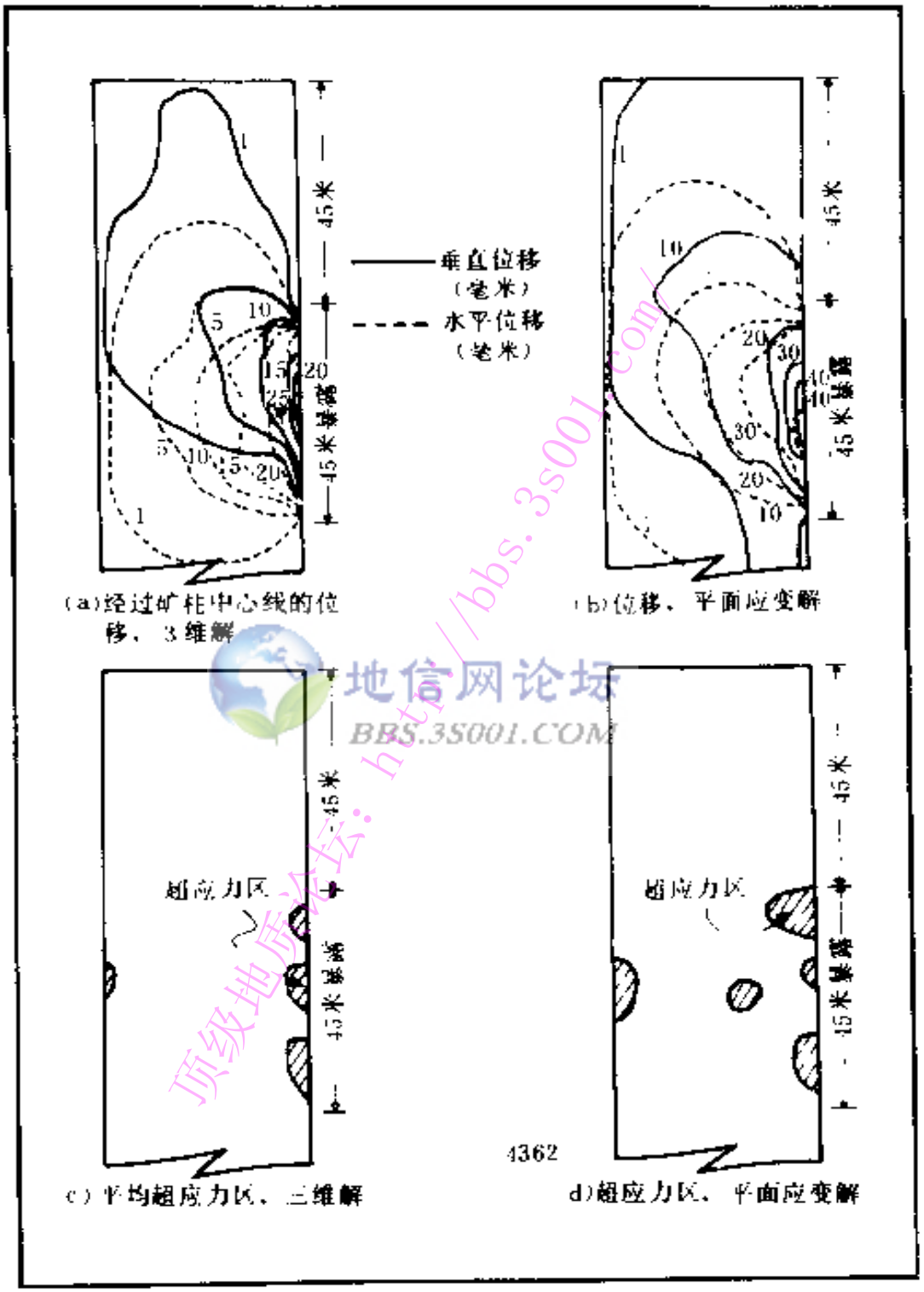
类似的矿柱回采工艺方法是：

（1）上向炮孔凿岩的梯段回采法，矿石爆破，放矿是从矿柱顶部至底部逐次进行；



地信网论坛
BBS.35001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.35001.com/

图 10　暴露高度40米时充填体发生的位移



(a)经过矿柱中心线的位移，3维解

(b)位移，平面应变解

(c)平均超应力区，三维解

(d)超应力区，平面应变解

图 11　充填体的动态，15米高的暴露面，40米见方的采场（线弹性解）

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

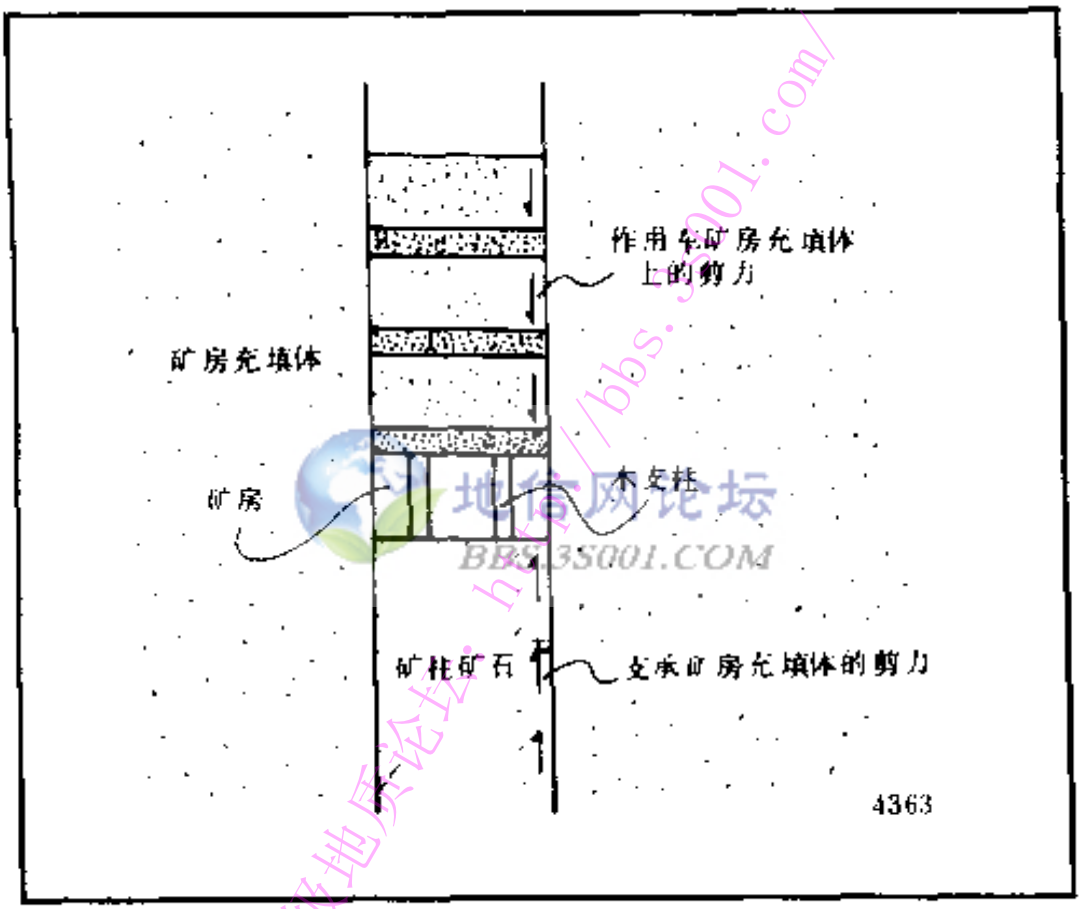


图 12　下向充填法垂直剖面图

(2) 漏斗爆破法[10]，是矿石自下而上分层爆破，放矿只将爆破时体积增大那部分矿石放出，直到矿柱采完。

矿柱回采的第三个变革方案，根据前面分析，此变革方案用于矿体倾角很大或采场几何形状不规则的条件下。充填料的重量可能主要压在下盘上。在某些采场中，矿房周边和暴露面可能非常不规则。这一现象可能出现在采场底部，要

考虑放矿点的要求，每一种情况都需要认真考虑。当周边不规则时，高度和宽度的最大值都不可能是预测稳定暴露面尺寸的可靠标志。

胶结充填的第四个变革方案使用于充填体为非均质体时。由于充填法矿房有特殊的胶结底板层，胶结水砂充填料有可能呈层状铺设。无论是各充填组分同时浇灌（如基德克里克矿[11]、芒特艾萨矿[2]），还是采用渗滤法（如吉科矿[12]），废石胶结充填均有离析的倾向。如果把粘结力较大的物料浇灌在有拉应力的地方，而把廉价的摩擦力大的物料铺设在压力区，那末这种非均质性就可能很有效。艾斯丘（Askew）等[13]考虑了这一可能性，并且研究了一些局部强化技术。

还可能出现另外两种矿柱回采方案，但不是普遍使用的。在厚矿体中，先采的矿房的充填体无论是有目的地还是由于采场上面的物料的崩落可能必须支撑顶板。采场顶部充填体的压力最低，并且作用在暴露区顶部充填体的垂直压力的附加作用可能改变充填体的特性。在很厚的矿体中，充填料不可能在上盘和下盘之间，而是在四个矿柱壁之间浇灌。当诸壁按顺序采去和用充填料取代矿柱时，各岩壁对矿房充填体提供的支撑作用就为充填料所取代，该充填料又需矿房充填体来支撑。

讨　论

文中所提出的分析忽略了充填体性能的某些问题。本分公司进行的三轴试验和水泥固化物料[10]的试验说明，当应力超过破坏应力值70%时，蠕变应变不可忽略。对有限的充填体膨胀与应力从属性的确切表示没有涉及。关于充填体性质随养护时间而变化还需要更多的资料。对岩壁闭合和放矿影

响尚未进行分析。

表示充填体稳定性的必要条件已作了规定，并需要用相当复杂的数学方法的专门工作来解决。在这一阶段，充填体稳定性的参数研究看来是适当的，因为没有足够的经验来确定简化方法，并使它们是很经济的。此外，大多数开采条件有许多因素（诸如几何形状或充填体性质）可能需要专门的表示。

有限差分法作为本文所描述的技术的一种可能的代替方案作了简单的探讨。非线性动态有限差分法在说明破坏方面可能是有效的，但需规定一连续结构。

结　论

当一个采场充填后，充填体即受到周围岩石的支撑，因此充填体内的应力比充填体覆盖层应力小得多。这些应力只能用模拟充填顺序和描述充填体的刚性和强度随时间而增加的办法来预测。充填体的非均质性，例如废石胶结充填，也必须阐述。

一个充填体暴露面的形成包括采出支撑充填体的矿石及在充填体和残留岩体中的应力重新分布。充填体的稳定性取决于它的强度和采场的几何形状。对均质充填体来说，如果暴露面靠近充填体的顶部而不是靠近采场底部，那末充填体就较稳定。暴露面稳定的高度关键在于暴露的宽度和采场长度——如果暴露面窄，那末在相当软弱的充填体中，预期能得到一个高的暴露面。

有关充填体稳定性各方面的满意模拟，还需要进一步探讨。需要更多地了解有关充填体性能随时间变化的情况以及爆破和放矿对相邻充填体产生压力方面的情况。有关影响充

填体稳定性诸因素的更多认识，可以用如有限元法的数字法获得。

已经看到研究计划应包括具有非线性物料性质的三维分析、合适的破坏判据、连续结构和采掘。在这一分析中，充填体的破坏似乎能用数值化的非稳定区表示出来。

为了节省昂贵的数字工作，首先应进行详细的初步评价，以便尽可能精细地确定所要求的充填体性质，暴露面的大小和顺序。初步评价应以矿柱回采的总成本最低为目的来进行。这时，有一个要么增加胶结剂比例以保证稳定性，要么进行有限数量的稳定性分析，以较好地确定充填体性能的选择问题。本文提出的开采实例和已公布的典型例证分析能用以达到初步评价解决办法的目的。

地矿网论坛 BBS.35001.COM

参 考 文 献

[1] Leahy, F. J., and Cowling, R., Stope Fill Developments at Mount Isa, *Proc. 12th Canadian Rock Mechanics Symposium*, 'Mining with Backfill, CIM Special Volume, 1978.

[2] Cowling, R., and Gontano, L. P., Cemented Rockfill Practice at Mount Isa Mines Limited, *Proc. Symposium 'Influence of Excavation Design and Ground Support on Underground Mining Efficiency and Costs'*, AMIRA, Wollongong, May, 1976.

[3] Weaver, R.S., and Luka, R., Laboratory Studies of Cement-Stabilized Mine Tailings; *CIM Bulletin*, Vol. 63, No. 701; *Trans. CIM*, Vol. LXXIII; 1970.

[4] Thomas, E. G., Fill Technology in Underground Metalliferous Mines, Australian Mineral Foundation, Adelaide, October, 1976.

[5] Coulthard, M. A., Dight, P. M., and Barrett, J. R., Numerical Analysis of a Three-Dimensional Stability Problem—Cemented Fill Pillars, Research Paper, CSIRO, Division of Applied Geomechanics, 1978.

[6] Chang, C.-Y., and Nair, K., A Theoretical Method for Evaluating Stability of Openings in Rock, Final Report on Contract No. H0210036, U.S. Bureau of Mines, 1972.

[7] Bathe, K. J., Wilson, E. L., and Iding, R. H., NONSAP—A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Non-Linear Systems, SESM Report No. 74-3, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1974.
[8] Mitchell, R. J., Smith, C. D., and Libby, D. J., Bulkhead Pressures Due to Cemented Hydraulic Mine Backfills, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 12, No. 3, August, 1975.
[9] Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley, New York, 1943.
[10] Lang, L. C., The Application of Spherical Charge Technology in Stope and Pillar Mining, *Engineering and Mining Journal*, May, 1976.
[11] The Ecstall Story, *CIM Bulletin*, Vol. 67, No. 745, May, 1974.
[12] Schwartz, A., Trends in Sublevel Stoping Practice at the Geco Mine, 36th Annual Mining Symposium, University of Minnesota, 1975.
[13] Askew, J., McCarthy, P., Fitzgerald, D. J., and Bailey, B. L., Backfill Research for Pillar Recovery at ZC NBHC, *Proc. 12th Canadian Rock Mechanics Symposium*, "Mining with Backfill", CIM Special Volume, 1978.
[14] Wang, M.-C., and Lee, K-Y., Creep Behaviour of Cemented Stabilized Soils, *Highway Research Record*, 112, 1978.

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

用模拟法预测垂直走向矿柱回采过程中充填料的稳定性

P．坎德尔　J．H．希尔拉比尔

G．赫格特*

摘　要

1976年应工业的要求，加拿大矿物及能源技术中心（CANMET）和戴姆斯及穆尔公司签订了一项用计算机模拟法帮助预测在垂直走向的矿柱回采过程中充填体及围岩稳定性的合同。所得到的交互式模型采用的是一种三维显式朗格拉日有限差分编码，它只限用在矩形几何条件及小的应变情况下。

本文提出了8个假设性的试验结果。在这些试验当中，该模型通过回采、充填及矿柱回收等接连的工序预测出岩石和充填体的响应特性。除了预测出应力和应变以外，还得出看来是合理的破裂机理。

前　言

当回采早先两个已充填采场之间的垂直走向的矿柱时，要获得现代大爆破开采方法的充分效益就常常意味着要使充填体的暴露高度至少达到150英尺。由于经营者们关心的是

---

* P．坎德尔（Cundall），J．H．希尔拉比尔（Snillabeer）为戴姆斯及穆尔公司高级工程师。

G．赫格特（Herget）为加拿大矿物及能源技术中心的科学工作者。

如何用最低费用保证已暴露充填体的稳定，加拿大矿物及能源技术中心对工业界请求研究一种合适的工程设计方法作出了自己的反应。加拿大矿物及能源技术中心于1976年11月聘请戴姆斯及穆尔公司帮助在典型的垂直走向矿柱回采条件下，预测充填体能自由稳立的高度。

本文总结了最初研究阶段（从1976年11月到1977年3月）的结果，其中包括：课题的确定，编写数字模型程序并研究几种假想的例子。现在仍在进行中的第二阶段包括取得现场试验数据和通过对实例的研究来验证模型。

课　　题

矿山设计人员需要知道，在矿柱回采过程中，暴露出来的矿房充填料是否会倒塌。需要有一种合理的分析方法来帮助设计人员为了安全和经济这一目的去改进采矿方法或充填料的配比。

地矿网论坛 BBS.35001.COM

在相邻矿柱回采以前，充填采空区的目的之一是提供对整个地层的支撑。为了把回采矿柱的负荷重新分布到周围充填料和两帮的岩石上去，充填体必须具有足够的抗变形能力。在矿柱爆破后，崩落的矿石运走以前，充填体必须能够自由地稳定直立。

理论分析必须判明以下变量：

充填料

经济方面：浇灌较大强度的充填料所需的最高限定价格。

物理特性：强度和变形特性及其对含水量的关系。

动态反应特性：对爆破冲击波的反应，包括液化的潜在趋势如何。

均匀性：充填以后充填料就地分离成不同材料的情况，它们通常是非均匀的。

自然条件

矿体的几何形状；

场应力；

围岩及矿石特性。

开采条件

采场及矿柱的布置；

开采顺序和速度；

充填料的垂直和水平暴露面积；

采矿工艺；

与矿柱回采相适应的充填进度；

各种充填料破裂的潜在影响。

地信网论坛

研究方法

选择数字模拟法来研究充填体稳定性的原因在于：

① 这是一个三维命题，通过充填体的每一边所处的条件均不一样，并且无论是平面应力或者是平面应变的假定都不能符合实际；

② 用了几种类型的充填料进行模拟（如碎石胶结充填和尾砂胶结充填），而每种类型的充填料，其弹性模量和塑性度是不相同的；

③ 观察到充填体本身按粒度大小有分离成几个带的现象，每个带可能有各不相同的特性，充填体的稳定性可能受一个或者几个带的控制；

④ 对于常规的分析方法来讲，矿体的几何形状和条件有时显得很特殊和复杂。

于是决定编制一种专用的三维显式有限差分程序[4]，该程序只限于在应变很小的长方形几何形态条件下使用。用该方法就避免了三维模拟通常要求太多的计算时间和存储量的问题。相反，在带的数量很多、各带分布又不均匀和各带的材料又不相同的情况下，得到了快速的程序执行时间。文献[3—5]可作为本方法的参考。

所采用的显式解方法与大多数有限元解所使用的隐式解方法，形成显明对照。在显式解程序中，每个带内的变量在每步时间内只用直接相邻带的变量来及时修正。隐式解则容许所有的带与在一个步时里其他所有的带用数字进行联系。显式解原理是：因所取每一步计算时间非常之小，以致于"计算波前"总超前于最快的物理波前，具体来说即超前于压力波前。

该计算程序被用于对岩壁-充填体的相互关系更深入地了解、预测充填体破裂的方式以及对不同类型材料的结果进行比较。在所有情况下，假想场应力、岩石及充填料的性质是特定的。

我们研究了一种几何形状简单的采场和矿柱（如图1）。图中这种特定的场应力值可在加拿大地盾地下约4000英尺（1200米）处找到。

有关岩壁的特性和充填参考材料列于表1。全部充填料的参数数值均取自文献调研，并且认为它们是典型的。第一类是一种弱胶结性的尾砂充填料（水泥-尾砂比约1:30）。第二类也是尾砂胶结充填料（水泥-尾砂比约1:8），也就是充填法中通常用来作工作底板的那种典型材料。第二类与第一类材料联合进行研究。第三类是碎石胶结充填料。

几点假设

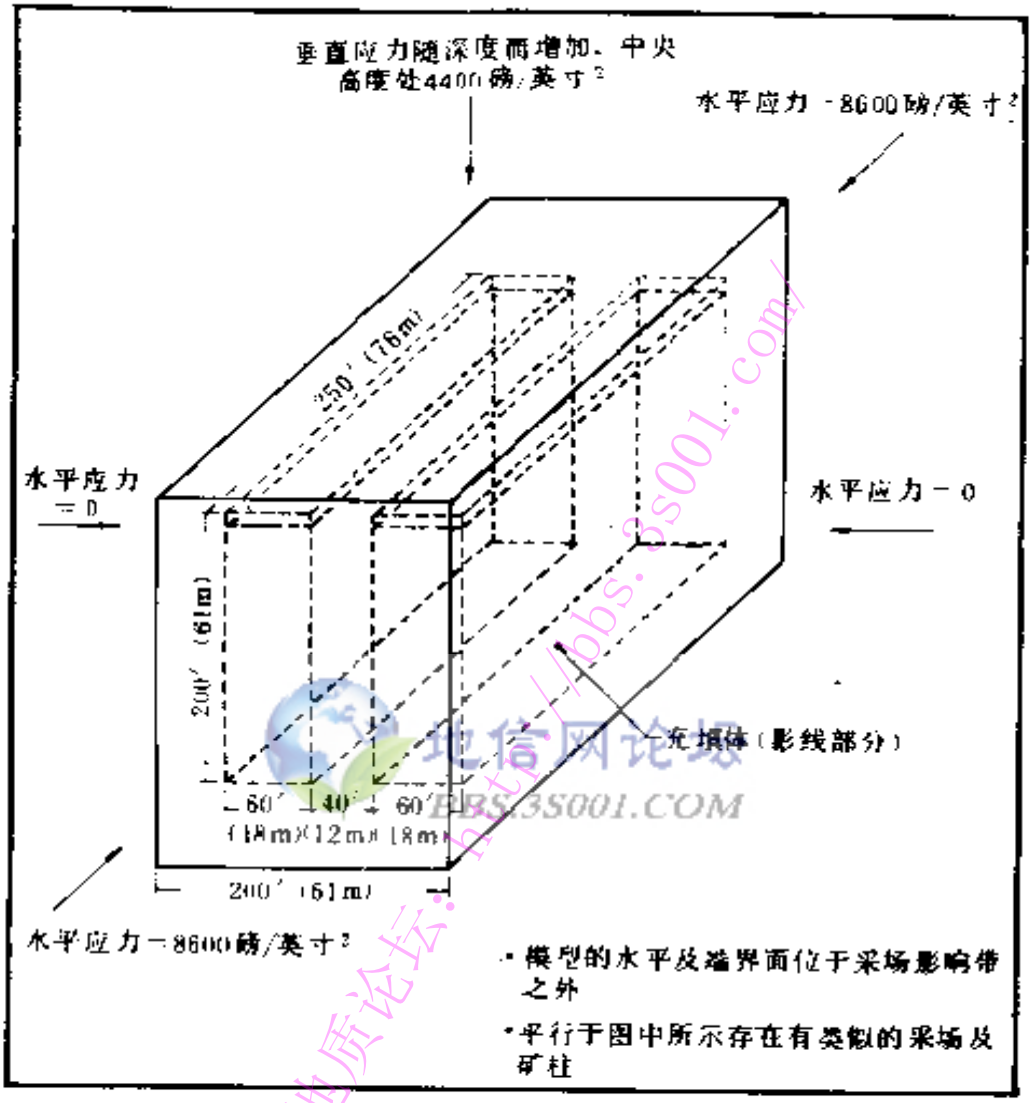


图 1 模型几何尺寸及外加岩石应力

所作的许多约束性假设反映了研究初期的情况，缺乏可靠的资料和行政上要求在短暂而又紧张的研究期内完成这项工作。下述各主要假设不是研究计划所固有的：

（1）岩石和充填料均为符合莫尔-库仑屈服包络线的弹塑性体。在屈服点上两种材料都被认为是不膨胀的。也就是说，在塑料流动时无体积变化。

（2）采用无明显拉力破坏准则，然而，实际上是将这些

表 1　有关材料的物理性能表

特　性	岩　石	充　填　料		
		第一类	第二类	第三类
弹性模量，磅/英寸^2	3×10^6	6×10^3	3.6×10^4	3×10^5
弹性模量，牛顿米$^{-2}$	(2.1×10^{10})	(4.1×10^7)	(2.5×10^8)	(2.1×10^9)
泊松比	0.3	0.25	0.25	0.33
密度，磅/英尺^3	163	145	145	155
密度，公斤/米^3	(2.61×10^3)	(2.32×10^3)	(2.32×10^3)	(2.48×10^3)
摩擦角	45°	30°	36°	40°
塌落角	0°	0°	0°	0°
内聚力，磅/英寸^2	2071	15	68	135
内聚力，牛顿米$^{-2}$	(1.43×10^7)	(1.03×10^5)	(4.68×10^5)	(9.31×10^5)
抗张强度，磅/英寸^2	1500	25	50	—
抗张强度，牛顿米$^{-2}$	(1.03×10^7)	(1.72×10^5)	(3.45×10^5)	

材料所能承受的拉力限制在莫尔-库仑包络线与拉伸应力轴交界范围内。在第 8 次程序运行时（将在后面描述）对此假设不得不加以修正。

（3）塑性流动时无强度损失。剩余强度等于最大强度。没有充填料剩余强度的资料。模型给出的某些大的位移仅是这一假设的简单函数。若已知剩余强度值，则充填体早期的破裂就可以被预测出来。

（4）岩石和充填料是均质的、各向同性的，塑性流动不影响其各向同性的性质。

（5）充填料的含水量大大低于饱和点。

（6）已开采区域内的变化，只是在有限的距离内影响周围岩石。因此，在采场和矿柱周围可画出一条数值界线，它与采场和矿柱间有足够的距离以致可以确信在这界线上产生的变形是微不足道的。

(7) 模型的下部水平界面是固定的和无摩擦的。这就容许在重力载荷作用下，其内部物质可任意变动，不会引起平移损失和失去力矩的平衡。

试验程序

在相同几何条件下，共做了8次程序试验运行。只要可能，所有运行均采用通用步骤。计算机程序基本上是一种动态程序。它用提供足够的时间使系统在高阻尼下达到平衡的办法来计算“静”应力。这样，在“采矿”引起扰动的每一计算步骤中，必须提供足够的时间来使计算周期收敛而达平衡。

模拟了下列各步骤：

(1) 将均匀体积的岩石加以特定的边界应力并使内应力也具有同样数值。

(2) 将采场“采空”并迅速用低模量的模拟材料充填所要求的空间。然后把模型调整到给定的新条件，并继续进行计算直到变形稳定为止（矿柱中的应力保持接近于屈服点）。

(3) 充填料以流体状引入模型。规定了相应于流体静力状态的初始应力，以加速收敛而达到平衡。计算继续进行直到调整已稳定为止。

(4) 用规定强度和剪切特性立即养护好充填料。然后，用分段方式进行矿柱“开采”，迅速地将等于矿柱总体积十分之一的一段采掉。除第5次运行以外，在所有其他运行当中，均以矿柱一端向另一端以垂直梯段式顺次进行“开采”。第5次运行则模拟“垂直后退式”采矿法，即矿柱逐次水平分层回采。在矿柱采掉了十分之一并又建立平衡后，即用同样方式继续进行回采，直到采掉的矿柱体积累计分别达到1/4，$\frac{1}{2}$以

及最后把全部矿柱采完为止。

决定从三个方面来研究这个课题。看起来充填料中塑性流动的发展好象是由于岩石挤压效应，或者是由重力引起的应力，或者是由两者同时作用所引起的。首先，模拟了无重力的全部应力-负荷系统(运行1及运行2)。其次，在运行3、4、5中将岩石予以忽略，充填料被固定的粗糙平面所限制(无挤压效应)。最后，在运行6、7、8中模拟了完整的岩石和充填料系统。

试验结果

运行1

用垂直分条法开采矿柱。确定使用第一类充填料(水泥-尾砂比为1:30)，无重力作用。

当矿柱被采掉1/10时，在充填体垂直暴露面附近(图2a)发现微小的变形。

矿柱逐次开采的每个阶段，充填体均出现轻微的附加变形（图2b，c及d)。充填体自始至终保持较低的应力。最大主应力不超过36磅/英寸^2(2.48×10^5牛顿米$^{-2}$)，这是当矿柱采掉1/10时计算得到的。

总之，充填体与岩石之间的相互作用很小，其原因是由于矿柱被采掉所引起的岩石移动很小（如上下盘的最大闭合度只有2英寸，即50毫米)。充填料的刚性较低。第一类充填料与岩石的弹性模量比为0.002。

运行2

除对第三类充填料（碎石胶结充填料）另有规定外，本次运行和运行1相似。第三类充填料与岩石的弹性模量比则为0.1。

地矿网论坛 BBS.3S001.COM

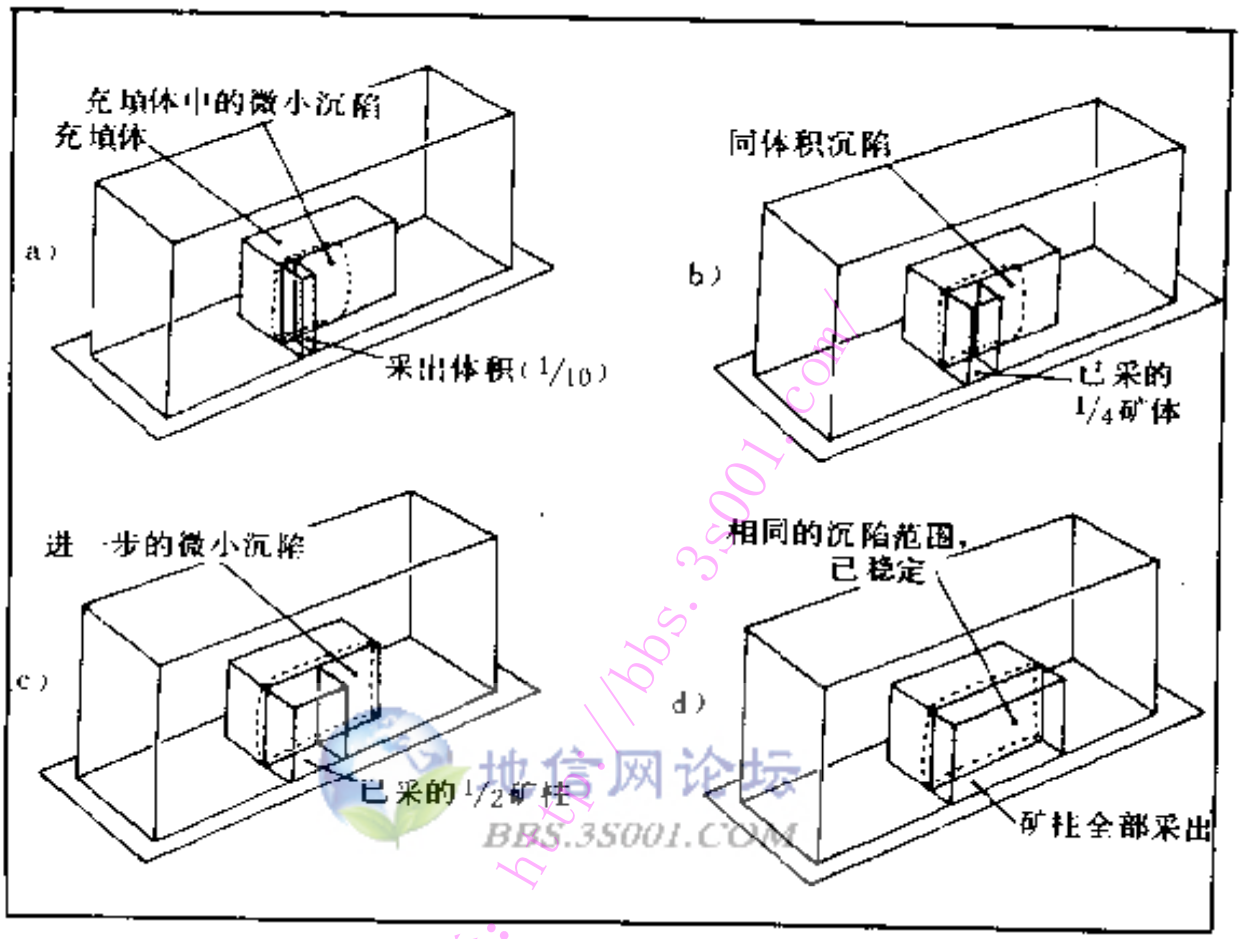


图 2 充填料的沉陷——运行 1

当矿柱被采掉1/10时，整个充填体均产生沉陷，然后稳定下来（图3a)。尽管产生了沉陷，但由于没有重力作用，故在岩石恢复平衡后，由于没有拉力，充填体不可能受到完全破坏。

在矿柱被采掉一半时，又产生微小的附加沉陷，但充填体随后又稳定下来。

本运行一直做到充填体完全破坏为止。然而，在没有重力作用的情况下，直到屈服点充填体仍保持其稳定性。

总之，岩石挤压的后果比运行 1 明显得多。表 2 比较了运行 1 和运行 2 计算所得的上下盘闭合度值。第一类充填料

地信网论坛 BBS.3S001.COM

的弹性模量低，其闭合度值则较高。图 2 表示运行 1 中充填体的沉陷体积。这点可与运行 2 （图 3 ）进行比较。

表 2　中等高度采场所得的上下盘闭合度计算值

矿柱采出百分率，%	闭合度值，英寸(毫米)	
	运　行　1	运　行　2
10	1.02(26)	0.51(13)
25	1.30(33)	0.55(14)
50	1.30(33)	—
100	1.97(50)	—

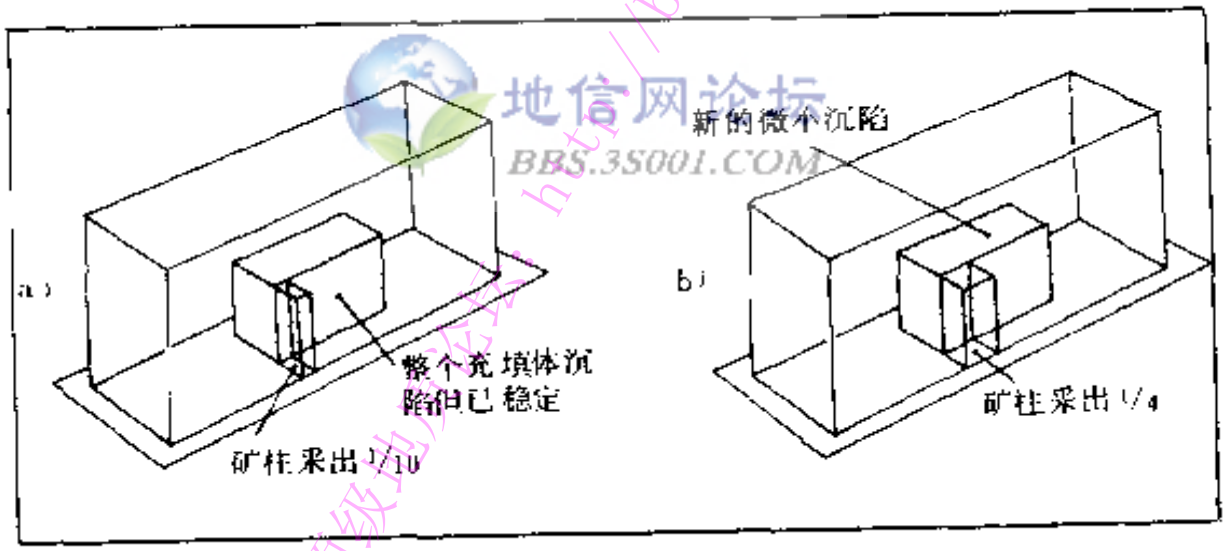


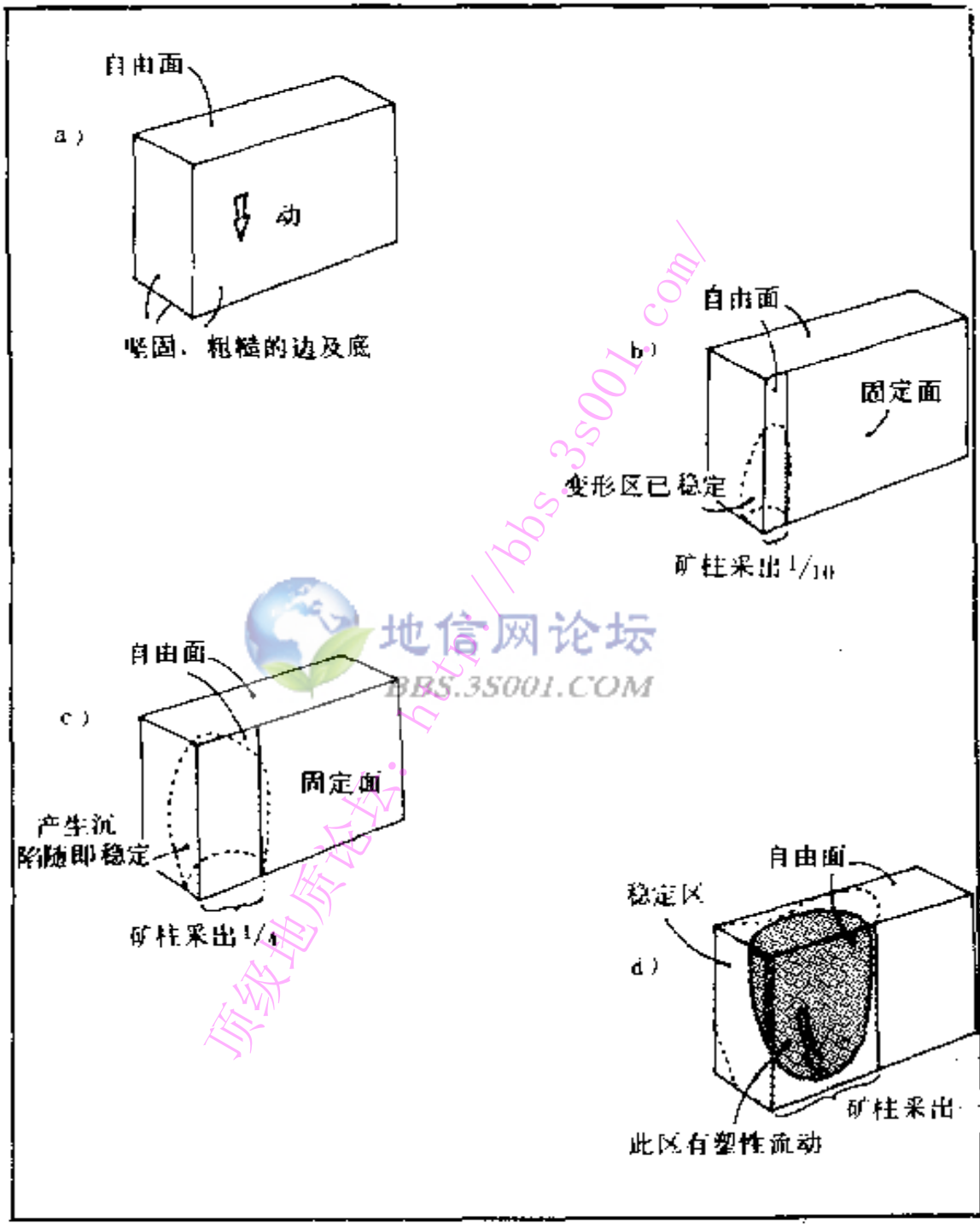
图 3　充填体的沉陷——运行 2

运行 3

本运行是检验第一类充填料(水泥-尾砂比为1:30）在单一的重力作用下的稳定性。充填料放置一固定的、界面粗糙的盒子内进行模拟。

当“矿柱”被采掉1/10时，开采区附近的有限范围内产生沉陷，随后即稳定下来（图4 b)。

地信网论坛 BBS.3S001.COM http://bbs.3s001.com/ 顶级地质论坛



地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/

图 4　充填体的沉陷和自行破坏——运行 3

当矿柱被采掉1/4时，沉陷体积更大，但随后即稳定下来（图4c）。暴露面附近的位移以水平位移为主。当一半“矿柱”被采掉时，紧接着就发生了完全的破坏。从图4d中可见，破坏面呈一匙形，从自由面向上延伸。

运行 4

本运行除用稳定的碎石胶结充填料作试验（第三类材料）外，其余条件均和运行 3 相同。

第三类充填料没有破裂。在矿柱“开采”的任何时候都没有产生塑性流动。位移是非常小的。运行 3 和 4 中充填体暴露面上计算所得的最大水平位移及垂直位移在表 3 中作了比较。运行 4 中得到的位移要比较软的尾砂充填料（运行 3）小很多倍。

运行 5

把第一类充填料（水泥-尾砂比为1:30）置于界面固定而粗糙的盒子内，在重力作用下再次进行模拟。运行 5 与运行 3 的区别在于：“矿柱”是用一系列水平分层开采的；水平分层被接连地采掉逐渐达到盒子的一面。

当“矿柱”被采掉1/10时，紧靠自由面出现塑性流动，随后即稳定下来。当矿柱接连地用水平分层开采时，塑性流动区即随之扩大（图5a、b、c、d）。当矿柱全部被采掉时，出现完全的自行破坏，它呈一匙形面一直延伸到充填体的顶部（图 5 d）。

在其他类似情况下，矿柱用水平分层开采（垂直后退法）延迟了自行破坏的起始点。在运行 3 中（第一类充填料处于单一的重力作用下），当矿柱被采掉一半时才出现自行破坏；而在运行 5 中，则推迟到全部矿柱被采掉后方才出现。运行 5 中已暴露的充填体的垂直位移比运行 3 的要大些（表 3）。

表 3　暴露上计算所得的最大水平及垂直位移（运行 3、4、5）

矿柱采出百分率	最大水平位移，英寸(毫米)			最大垂直位移，英寸(毫米)		
	运行 3	运行 4	运行 5	运行 3	运行 4	运行 5
10	30.5 (776)	0.2(6)	25.8 (655)	3.4(87)	—	
25	34.6 (878)	0.2(5)	29.8 (758)	4.3(109)	0.04 (1)	11.1(283)
50	AF	0.3(7)	34.7 (882)	AF	0.08 (2)	17.1(434)
100	—	0.3(7)	AF	—	0.08 (2)	AF

AF = 自行破坏。

注：假设在屈服点外强度不减弱。自行破坏的开始和大的位移是本假设的一个函数。

运行 6

本运行是模拟岩石及充填料复合体在重力作用下的第一个试验。第一类充填料(水泥-尾砂比为1:30）是特定的。矿柱采用一系列垂直梯段开采。

当矿柱被采掉第一个1/10时，充填体中出现微小沉陷并稳定下来。当矿柱被采掉1/4时，塑性流动区逐渐扩大（图6a)。然后，这种流动区再次稳定下来。当矿柱被采掉一半后，紧接着发生了充填体的自行破坏。这种自行破坏还伴随着周围岩石的微小变形。

图6b中所见的破坏形式和运行 3 （第一类充填料处于单一重力作用下）的情况很相似，并假定岩石的变形在决定充填料的性质中作用很小。第一类充填料与岩石的弹性模量比为0.002 。

表 4 表明运行 6 中计算所得的位移例子，它可与运行 7 和运行 8 中不同充填料的给定值进行对比。

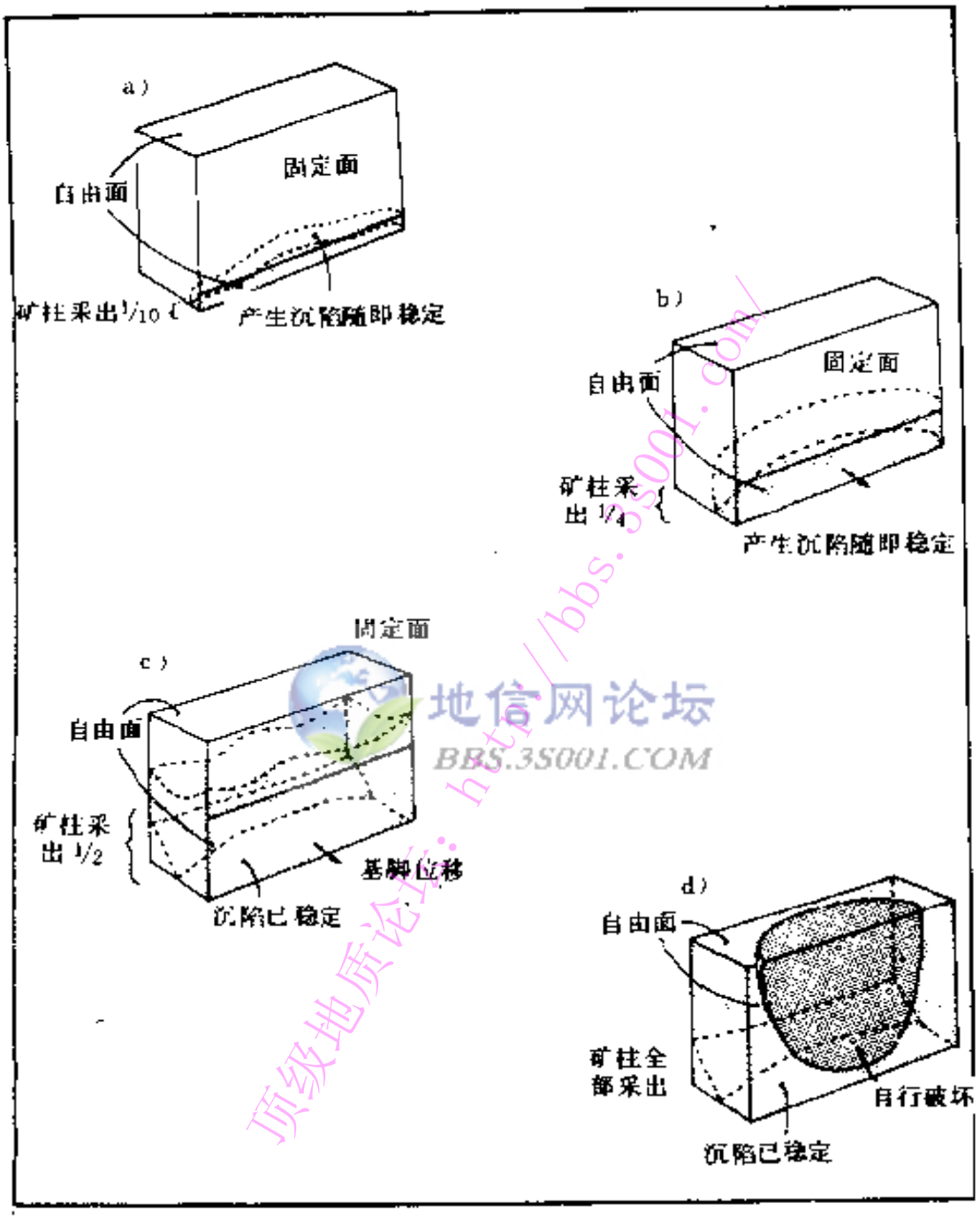


图 5　充填料中的沉陷及其自行破坏——运行 5

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

运行 7

除规定的第三类充填料（碎石胶结充填料）外，本运行的条件与运行 6 是相同的。

当矿柱被采掉1/10时，除底部20英尺（6.1米）外，塑性

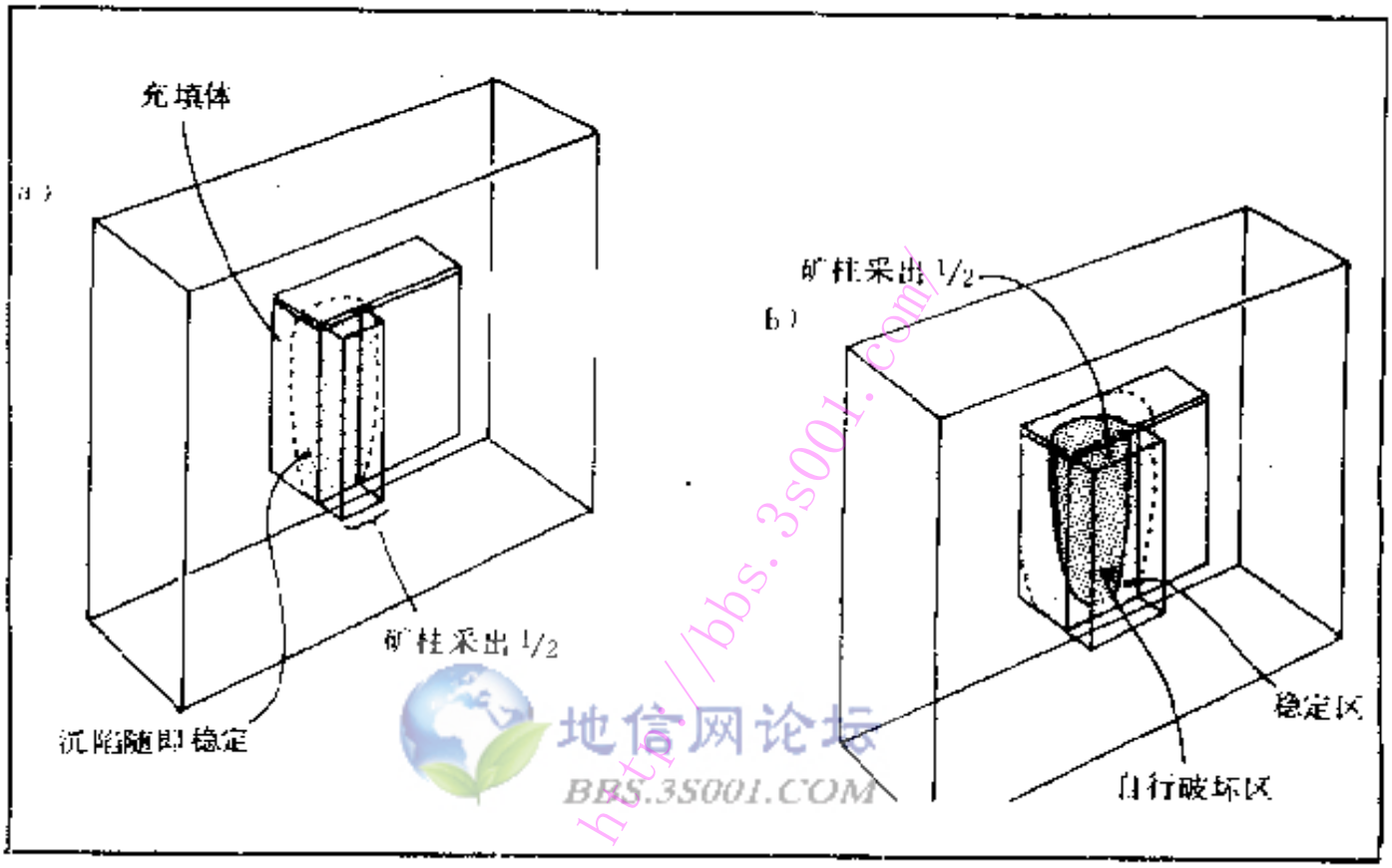


图 6　充填料中的沉陷及其自行破坏——运行 6

表 4A　矿房岩石的变形（运行 6 、 7 、 8）

矿柱采出百分率	矿房中心闭合度，英寸(毫米) 盘下鼓			矿房中心闭合度，英寸(毫米) 垂直		
	运行 6	运行 7	运行 8	运行 6	运行 7	运行 8
10	0.94(24)	0.43(11)	0.43(11)	0.08(2)	0.43(11)	0.28(7)
25	0.94(24)	1.10(28)	1.22(31)	0.24(6)	0.28(7)	0.51(13)
50	AF	1.30(33)	2.32(59)	AF	0.79(20)	0.67(17)
100	-	2.36(60)	AF	-	1.89(48)	—

AF = 自行破坏。

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

表 4 B　暴露面中心充填料的水平位移（运行6、7、8）

矿柱采出百分率	水平位移，英寸(毫米)		
	运　行　6	运　行　7	运　行　8
10	0.04(1)	0.08(2)	0.20(5)
25	17.5 (445)	2.76(70)	22.6 (575)
50	AF	0.79(20)	26.6 (677)
100	—	0.55(14)	AF

AF＝自行破坏。

注：较大的位移是“沉陷后无强度降低”这一假设的函数。

流动遍及全部充填体。充填体是稳定的。然而，如图 7 所示出现了一条明显的斜线，计算机程序说明变形仍在继续发展。这一斜线可能是张力或者是压力引起的剪切裂纹。

当矿柱被采掉1／4时，充填体全部体积均产生变形，但随即又稳定下来。当矿柱被采掉一半时，产生了局部的变形。在全部矿柱被采掉时，出现了持续不断的塑性流动的局部带，可是，充填体仍是稳定的。

总之，第三类充填料的性能和运行 2 相似(无重力作用)。但是，不同于第一类充填料的性能，第三类充填料的性能似乎受岩石挤压效应的支配。第三类充填料与岩石的弹性模量比为0.1。然而，倾斜裂缝这一特征可能表示一种包括围岩挤压效应和重力载荷双重作用的新特性。

运行 8

本运行所规定的几何条件、岩石和场应力状况与运行6、7 相同。本来打算模拟经过充填法开采后所留在采场中的那种充填料。在全部32层充填料中都是由11英尺厚的第一类充填料层和 1 英尺厚的第二类充填料交替组成。然而，由于以下两个原因，要按这一规格运行计算机程序是不切实际的：

即计算用时过多和薄充填料的长厚形态比太大。如按原设想进行试验，那么4830个带和6192个网格点在PDP11/45型计算机上需要计算8天半的时间（或者用CDC6600型计算机算1天多）。然而，1英尺厚充填料层的长厚尺寸比例至少是20:1，还不知道有一种能给出这种尺寸比连续元精确结果的数字法。所以，得到的结果是非常值得怀疑的。

于是，决定用减少分层的办法来代替，但第一类对第二类充填料的尺寸比仍保持不变。第二类与第一类充填料相应按5英尺和55英尺厚进行模拟。

在运行时遇到了第二个问题。在强度较大的第二类充填料层内部和周围产生了相当大的拉应力。为了解决这个问题，在程序中临时加入了一个不够完善的拉力破坏准则（参见假设2）。一个实际的准则应需表征该区内各个方向的裂纹并将未来的基本性能建立在这些裂纹基础上。所使用的拉力破坏准则只试验每一主应力并逐个地和材料的抗拉强度相对照。如它超过了强度值，就要使应力等于强度。没有模拟真正的裂纹。

当矿柱被采掉1/10时，按应变只限于充填体上部两层以内（如图8a）。

当矿柱被采掉1/4时，充填体的变形体积增大(见图8b)，但充填体仍保持其稳定。强度更大的第二类充填料层能承受更高的应力。在第二类充填料中是拉应变，而在第一类充填体中则主要是剪应变。

在矿柱被采掉一半时，观察到的已经开始的变形过程仍继续进行（见图8c)。进一步的变形出现后又稳定下来。指出了充填料的大位移（表4）。

在剩下的一半矿柱被采掉时，自行破坏(图8d)产生了，

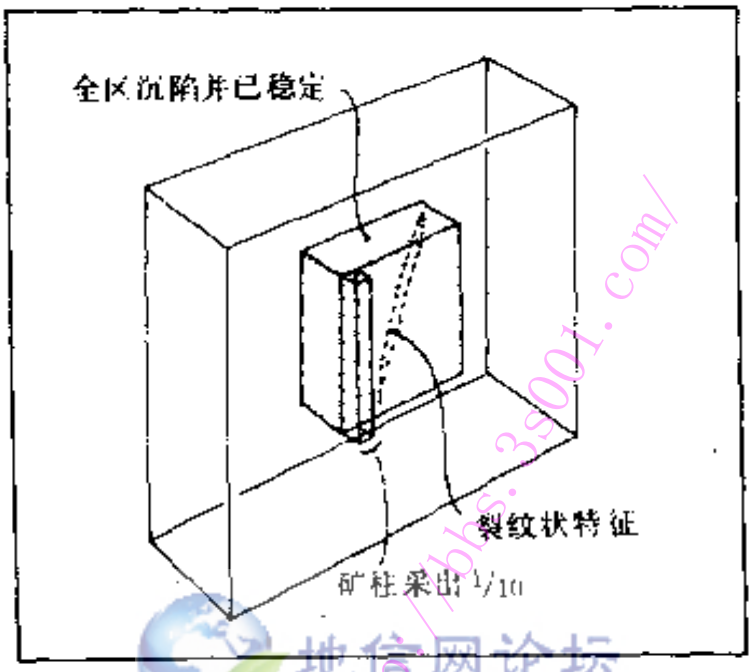


图 7　充填料中的变形——运行 7

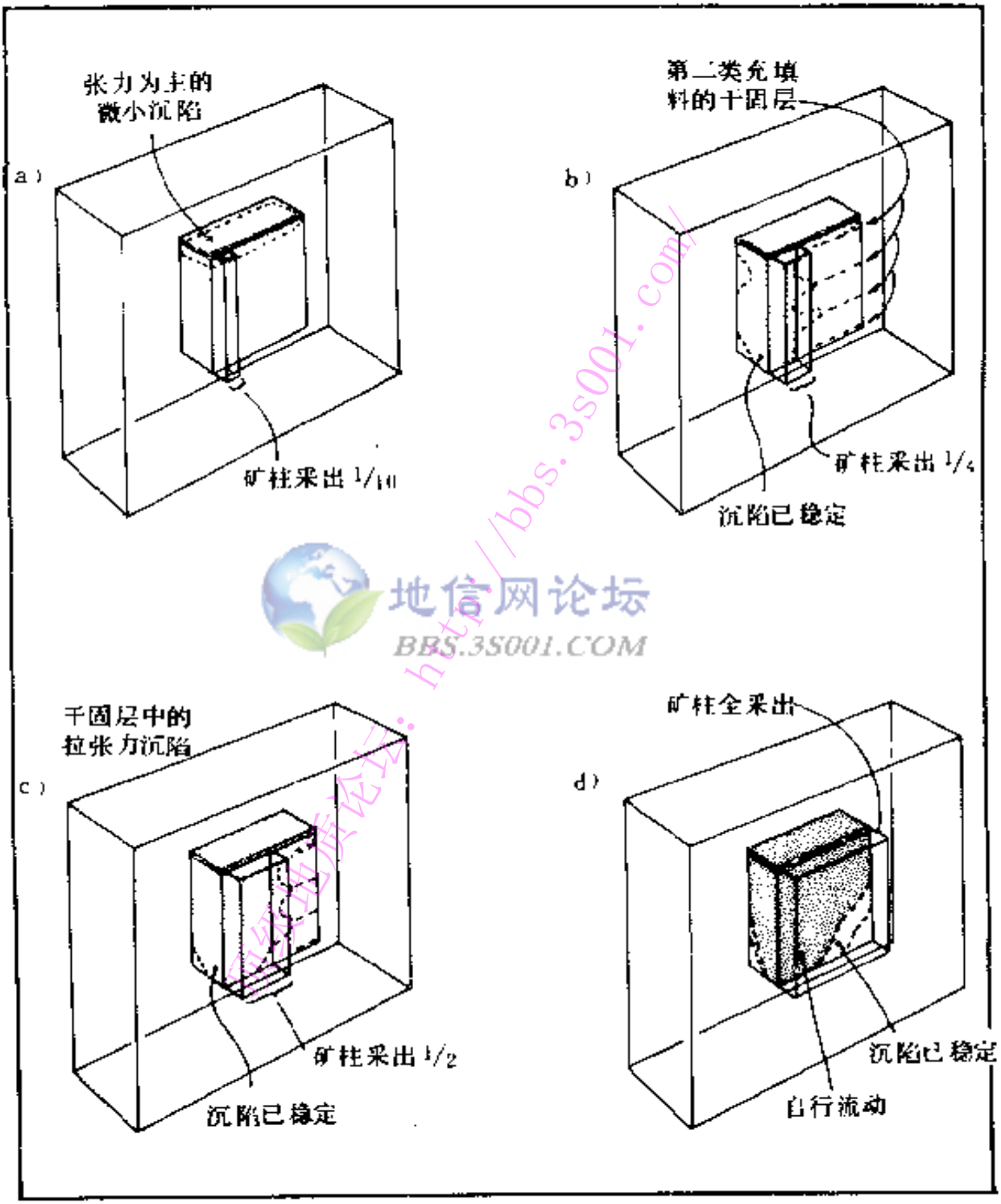
强度大的充填料层为拉力所破坏，而其余则为剪力所破坏。

由于应用了不太完善的拉力破坏准则，以及在变形后无强度降低的假设（对各次运行都有效），运行 8 的结果必须特别小心地予以对待。但是，似乎强度大的第二类充填料层会使充填体的稳定性提高。

结　　语

在所确定的几何尺寸，岩石和充填料性质，及场应力条件下，本模拟试验表明：

1．第一类充填料（水泥-尾砂比为1:30的典型尾砂胶结充填料）与岩壁间的相互作用很小，它的稳定性受由重力引起的应力所支配。第三类充填料（碎石胶结充填料）的稳定



地信网论坛
BBS.3S001.COM
http://bbs.3s001.com/

图 8　充填料中的变形和自行破坏——运行 8

性受岩壁变形的强烈影响。

2．碎石胶结充填料(第三类)容许比第一类充填料或比层状的尾砂充填料有更大的稳定暴露面。然而，实际上破坏可能在比计算暴露面更小的时候就会发生，因为充填料的剩余强度大概要比其最大强度要小得多。

3．对于一个给定体积的矿柱，用“垂直后退法”回采时，第一类充填料不稳定的发作时间比普通梯段回采法要迟。

4．当紧靠着第三类充填料进行矿柱回采时，与第一类充填料以及层状的充填料相比，其计算所得的岩石变形很小。所以，第三类充填料对地层提供了更好的支撑。

5．计算机模拟程序显示了似乎可取的破裂机理。

6．从安全和经济角度来看，这一合理的设计方法的补充发展是正确的。运到萨德伯里矿区的波特兰水泥现行价格是每吨45美元以上。用从充填料暴露面上减少水泥耗量和含量，以及预测充填料的支护性能并有把握地在充填体暴露面更大的条件下进行回采，可以获得显著的效果。有必要在现场就地对充填料特性作定量测定，以及改进模型以便更好地考虑到存在于采矿领域中的几何形状不规则的问题和不同岩石条件及爆破效应等实际问题。

参 考 文 献

[1] Cundall, P. A., Explicit Finite-Difference Methods in Geomechanics. ASCE Engineering Foundation Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, Virginia, 1976.

[2] Dames & Moore, A Computer Model to Predict the Free-Standing Height of Backfill in Pillar Recovery Operation, Report prepared for CANMET, Elliot Lake Laboratory, March, 1977.

[3] Otter, J. R. H., Cassell, A. C., and Hobbs, R. E., Dynamic Relaxation, *Proc. Inst. Civil Eng.*, Vol. 35, pp. 633—656

[4] Wilkins, M. L., Calculations of Elastic-Plastic Flow, Lawrence Livermore Laboratory, Report UCRL-7322, Rev. 1, 1969.

[5] Wilkins, M. L., Blum, R. E., Cronshagen, E., and Grantham, P., A Method for Computer Simulation of Problems in Solid Mechanics and Gas Dynamics in Three Dimensions and Time, Lawrence Livermore Laboratory, Report UCRL-51574, 1971.

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

锌公司和新布罗肯希尔联合公司所属矿山矿柱回采时的充填研究

J．E．艾斯丘，P．L．麦卡锡
D．J．菲茨杰拉德*

摘　要

应用深孔法回采矿柱会使胶结充填体暴露很大的面积，因此需要研究充填中最佳水泥加入量的设计准则。这方面的研究目标已经达到，并描述了为首次试验性应用所作的设计。

按常规方法进行了广泛的实验室试验，获得了充填料性能的可靠参数。此外，还探讨了添加玻璃纤维和配筋法的理论。对于非胶结充填料事后固结所进行的试验表明，在井下环境中，该方法难以实行。

迄今的现场结果局限于深孔空场法采场内非胶结充填体中监测的压力。这些均与模拟试验结果紧密相关。

在确定锌公司和新布罗肯希尔联合公司（以下简称ZC和NBHC公司）现有充填系统具有的局限性过程中，许多缺陷被测定出来，因此导致了安装质量流量测试设备。

前　言

布罗肯希尔（Broken Hill）位于澳大利亚新南威尔士州的西部，约在悉尼以西800公里。矿床于1883年发现，在91

* J．E．艾斯丘（Askew）是锌公司研究和发展部采矿高级工程师。
P．L．麦卡锡（McCarthy）是锌公司采矿工程师。
D．J．菲茨杰拉德（Fitzgerald）是澳大利亚采矿顾问。

年的生产中，共采出了银铅锌矿石11900万吨。

ZC和NBHC公司分别从1912年和1936年起在布罗肯希尔经营着几个地下矿山。它们矿山的租借地互相邻近，并位于布罗肯希尔矿床的南部。1976年这两个公司成为澳大利亚矿冶有限公司独家的子公司。

ZC和NBHC公司目前年生产200多万吨矿石，其中NBHC公司占总量的56%。矿石平均品位为：8.2%Pb，68克/吨Ag和10.9%Zn。矿体为层状和带状，倾向北西，倾角80°，走向北东-南西。有六条可采的独立矿脉。其中ZC开采部分倾角平均为30°向南倾伏，而NBHC开采部分则较平缓。可采矿脉的厚度在2.5和140米之间。产状为从块状至浸染状硫化矿。主要金属矿物为方铅矿和闪锌矿。

所使用的采矿方法有多种。表1所示为1977年的采矿方法和各种方法的矿石产量。近年来深孔空场法的矿石产量有明显增大的趋向，而水平分层充填法和机械化水平分层充填法的产量则趋于下降。传统的矿柱回采方法为方框支架法，但它已为下向充填法所取代。

两个公司矿山的矿柱矿量（包括今后十年可能产生的矿柱）为1100万吨。对这些矿柱回采方法的初步评价表明，有70%左右的矿柱矿量必须使用下向充填法。需继续使用这种高成本方法的原因包括：保证已知的矿石能全部回采；留在支柱法和水平分层充填法矿房之间的矿柱外形很复杂；各阶段上、下的顶底柱的矿量占19%之多。在大多数情况下，这些水平矿柱为残余的顶柱。

剩余的30%矿柱不属于下向充填法开采范围，将使用大量崩矿开采技术。对这一类未来矿柱，特定回采技术的成功应用对充填体质量的依赖性迫使成立了一个设计小组，其任

表 1　1977年ZC和NBHC的矿石产量统计

方　　法	产量，%	吨/工班	相对采矿成本（深孔空场法=100）
深孔空场法	39	63	100
机械化水平分层充填法	8	38	175
水平分层充填法	22	32	200
方框支架法	16	15	400
下向充填法	6	19	325
其他（包括采准）	9		

务是制定采用各种矿柱大量回采技术所需的充填料参数。设计包括与采用强化充填料有关的经济条件。

ZC和NBHC公司的充填系统

所有回采区都主要是用分级的选矿尾砂进行水力充填。也使用少量开拓废石。在需要的地方，可在分级尾砂中加水泥以提高其强度。

1968年，斯门尼奥托（Smaniotto）和科茨（Coates）一道，以及斯门尼奥托单独对充填料的输送、水泥添加量和充填网路的基本系统作了介绍。图1是该系统的示意图。ZC和NBHC公司每年浇灌90万吨充填料。

脱水后的矿砂送入混合槽，在那里喷水器把砂再配制成重量浓度63—70%的砂浆。每个槽的处理能力约为120米^3/小时。充填料水平输送网路都是外径为127毫米、衬胶后内径为114毫米的钢管。阶段间的输送网路，在可能的地方使用钻在坚硬岩石中的无套管钻孔。

所用的全部水泥为80%水泥加20%奥古斯塔港烟灰(flyash)的掺合物。烟灰为低碳、石灰含量高的、非常细的

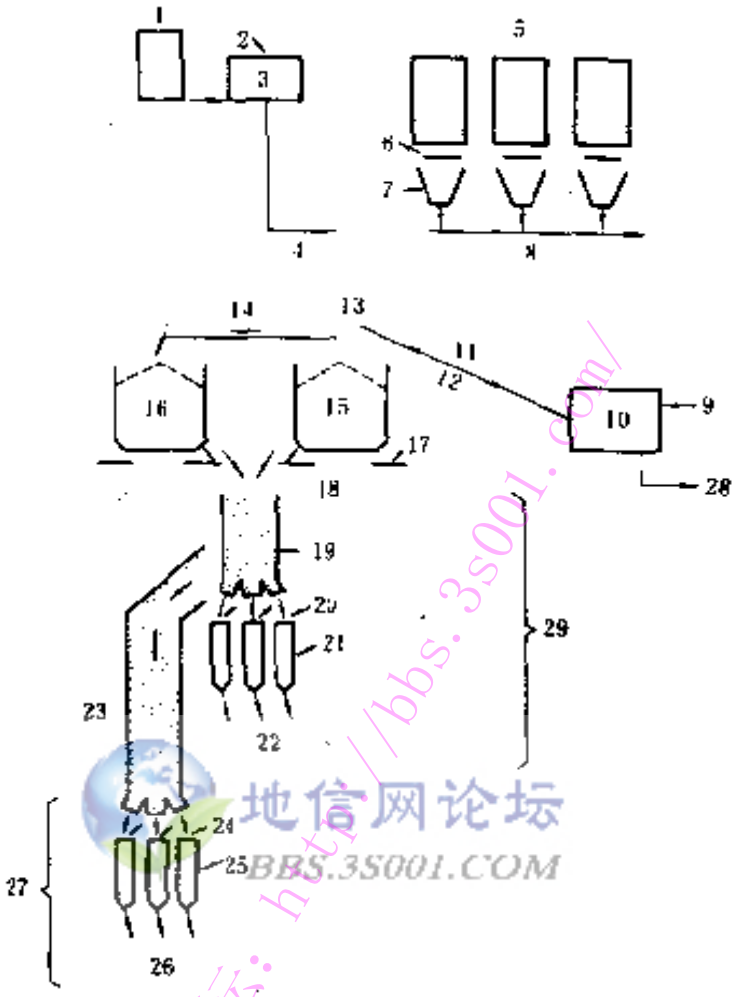


图 1 ZC和NBHC的充填系统

1——浓聚合物槽（4500升）；2——水；3——1%溶液；4——稀聚合物去地表混合站；5——水泥仓（3×200吨）；6——皮带秤；7——水泥浆槽；8——水泥浆或水去混合站；9——来自ZC和NBHC选矿厂全尾矿；10——尾矿处理车间；11——脱水皮带；12——脱泥尾矿；13——含80%固体的砂；14——回转式运输机；15——1号砂仓（3000米^3）；16——2号砂仓(3000米^3)；17——环式运输机；18——浓度85%的砂；19——砂溜道；20——水或水泥浆和聚合物；21——地表下25米混合槽（各115米^3）；22——去ZC和NBHC采场（含70%固体充填料）；23——砂溜道；24——水或水泥浆；25——地面下500米混合槽（各115米^3）；26——去ZC和NBHC采场（含70%固体的充填料）；27——ZC12水平混合站；28——矿泥送尾矿池；29——“地表”混合站。

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

材料。这种掺合水泥的供应是用散装罐车由铁路运至布罗肯希尔，然后用风力输送至水泥仓。

全部胶结充填料均要加聚合物，以改善水泥和细料在充填体中的分布。这样就减少了水泥在倾析溢流中的流失，并消灭了在作为采场工作底板的充填料表面上的打滑现象。1973年布雷斯（Braes）叙述了聚合物选择和使用的结果。Alfloc 6701聚合絮凝剂以1%的溶液浓度、0.075公斤/吨固体的添加量加入。它在“地面”混合槽之前加入充填系统之中。

充填管道中充填料的流速为5.2米/秒，输送距离达1800米，故一部分絮凝剂的作用下降。没有找到满意的替换办法。现行每吨充填料所需絮凝剂的成本为0.08澳元。

矿柱回采的充填研究

为了确定ZC和NBHC公司的充填料如何最有效地应用于成本低的矿柱回采技术中，1976年提出了一项研究课题。该课题还包括已有相当矿量的矿柱周围的非胶结充填料事后固结的研究。

1968年以来曾进行过少量的充填研究。1973年，在NBHC公司对一个用深孔剥采矿柱，使之与相邻矿房分离因而暴露57米宽、48米高的胶结充填体进行了试验，但这一尝试未能成功。该试验使用了4000吨水泥，约损失高品位矿石15000吨。（这次失败事后的分析将在后面讨论。）关于暴露相当大的胶结充填体而成功回采矿柱的近期报告又一次促进了对ZC和NBHC公司充填体的重新评价。

用废石作充填料组分的许多优点几年前就已为人们所认识，但井下供应经过分级的废石在经济上的详细评价排除了

对它的进一步考虑。

自从采用规则的矿柱和矿房布置以来，ZC 和 NBHC 公司的矿柱可采矿量已稳步上升。由于尺寸适宜的规则矿柱能改善矿房的稳定性，并认为回收留下矿柱经济上通常是合理的，故解决矿柱尺寸和位置的特定方法在战后有所改变。截至1977年，相当数量的矿柱矿量遗留在非胶结充填体之间，它们就成了研究非胶结充填体事后固结技术的目标。如可行，该方法还能用于那些充填料浇灌后相当时间不要求充填体强度的地方。

1976年年中开始的充填体研究课题的任务是：

订出一个设计方法以计算垂直充填体大暴露面能令人满意的稳定性的强度要求；

精确测定已使用的胶结充填体的力学性能，以及不同强化材料和浇灌技术对它们的影响；

确定已建立的ZC和NBHC公司充填系统的限制参数，以及它们对改进中的充填方法的影响；

确定应用充填体大暴露面的经济可行性；

进行所推荐方案的现场试验并对监测到的性能进行验算。

该课题的现状是：完成了大部分实验室试验，发展了理论设计方法并将它用于现场设计（暴露充填体尚未进行），以及在计划更多的矿柱回采中大大提高对充填系统的局限性和经济因素的认识。该课题将在1979年结束。

数学模拟

数学模拟的目的是研究一个在给定的充填体暴露高度和宽度条件下，计算充填体内聚力的方法。早期的计算曾用于

矿柱回采试验。假定为侧面无限暴露，对坡面稳定性进行了简单的土建工程分析。

改进的Bishop滑移圆分析，正如斯潘塞（Spencer，1967）和赖特（Wright，1973）等所证实的那样，得出柱脚内聚力需要量为220千帕，这时用于最大临界滑移圆的安全系数为1.0。对于同样的内聚力，如图2所示的简单楔体理论分析获得的安全系数为1.02。图中“最坏情况”的拉力裂纹长度等于暴露高度的一半。安全系数（F）为：

$$F=\frac{cA+W\cos\phi\ \tan\theta}{W\sin\theta} \tag{1}$$

式中：c——内聚力；

W——一个单位厚度分层的重力作用力；

A——W所作用的滑移面的面积；

ϕ——内摩擦角；

θ——坍塌角，等于$45^\circ+\phi/2$。

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

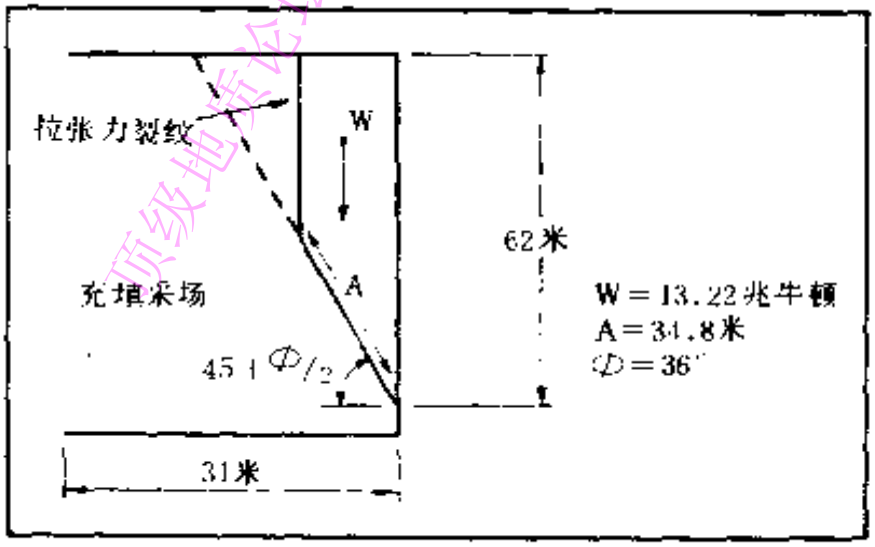


图2 楔体理论分析

在上述分析中，当邻近的采矿作业在进行时出现的各围

壁之间充填料的成拱作用或由上下盘闭合造成的闭合压力均未予考虑。这种侧向闭合导致抑制充填块的充填压力，从而提高了安全系数。J．D．史密斯及其副手利比等人(1975)对福克斯（Fox）矿考虑了这个闭合作用，给楔体理论分析的安全系数[公式(1)]加了一个附加因子(Fc)：

$$Fc=\frac{2cAs/B+hAs/B\tan\phi}{W\sin\phi} \qquad (2)$$

式中：As——滑移的充填料块与岩石的接触面积；

h——平均闭合压力；

B——暴露充填面的宽度。

该公式被用于试验问题，并取公称100千帕为闭合压力。安全系数为1.0时，获得所需的内聚力为190千帕。

由于史密斯等计算法的数学有效性尚未证实，因此想寻求一种具有更完善实验基础的设计方法。最终采用的设计方法是计算砂成拱作用的特扎吉（Terzaghi）技术的变形，是从活板门实验（1943）以及对隧道支架载荷的观察(1946)中发展而来的。非胶结水砂充填料的成拱作用是作为砂粒和采场壁之间的摩擦作用形式而存在的或者如同胶结充填料内聚力的结果那样。矿山，尤其是在下向充填采矿法中，对立柱承载载荷的观察表明，在一采场两壁之间可能形成强有力的拱。

在该方法中，充填体中任何深度的垂直应力（δz）为：

$$\delta z=\frac{B\gamma-C_1}{k\tan\phi}\left(1-e^{\frac{-kz\tan\phi}{B}}\right) \qquad (3)$$

式中：B——采场宽度；

γ——充填料密度；

φ——得到养护的胶结充填料的摩擦角；

k ——垂直应力与水平应力之比；

z ——被考虑水平的覆盖层高度；

C_i——充填期间充填料所产生的小内聚力。

该公式与假定采场的二维有限元模型的结果进行了比较，如图3所示。虽然特扎吉公式未给采场底部增长的应力，但两种方法符合得较好。其原因是有限元模型中的充填体为10次分层浇灌，每一层最初被确定具有新鲜充填料的特性，然后它们在下一分层浇灌前已得到了养护。跨距与充填高度比值开始时是很大的，不能形成明显的拱。当充填高度增大时，成拱作用则得到充分发展。

在特扎吉公式中，内聚力的重要性如图4所示。当内聚力从零增至70千帕时，深部的垂直应力即减少一半。

图5中垂直应力和水平应力的等值线是从有限元模型获得的，并表明了拱的型式。它们还表明垂直应力与水平应力之比(k)在采场内各点可能是不相等的。k值的变化也可能是由于水力浇灌而造成各向异性的充填体性质，特别是不同颗粒尺寸的分层的影响。然而人们以为，现场测量矿柱壁中的压力应能确定所关心区域中的k值，并认为为了产生充填体内偏高的应力，最好是稍微低估k值。

模型还表明，为了减少覆盖层的压力，希望以慢速进行充填。从这点来看，上向水平分层充填法是理想的，每层充填料在下一分层浇灌之前均能充分增进其内聚力和成拱作用。在空场法采场充填中，这就受到矿山实际计划要求的限制。

应用特扎吉公式时必须注意，因为粘结力这项不一定就是指充填料的内聚力；它可存在于充填料与采场壁接触面之

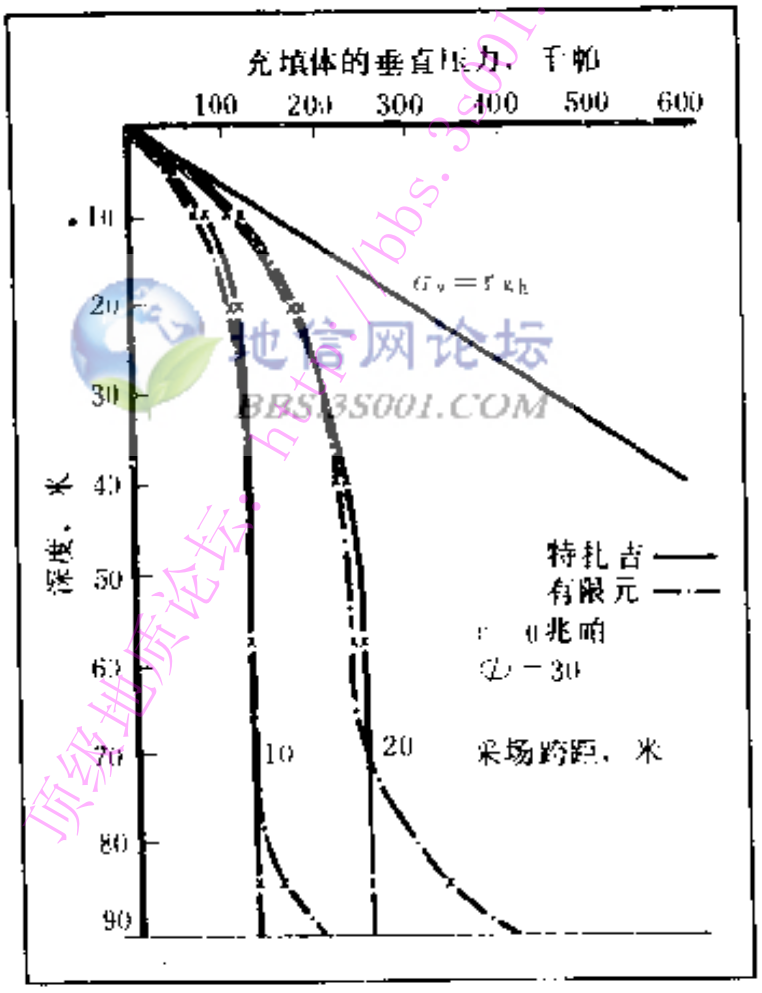


图 3　特扎吉成拱作用预测与简单有限元模型的比较

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/

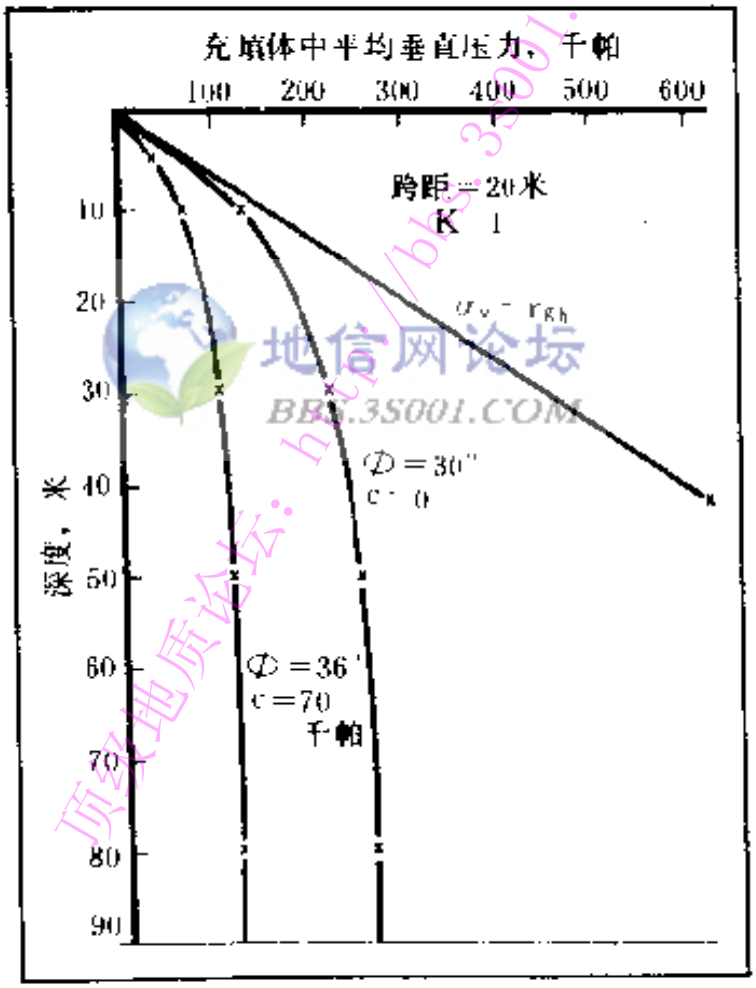


图 4　由于内聚力和较大的摩擦角成拱作用增高

顶级地质论坛：http://bbs.35001.com/
地信网论坛
BBS.35001.COM

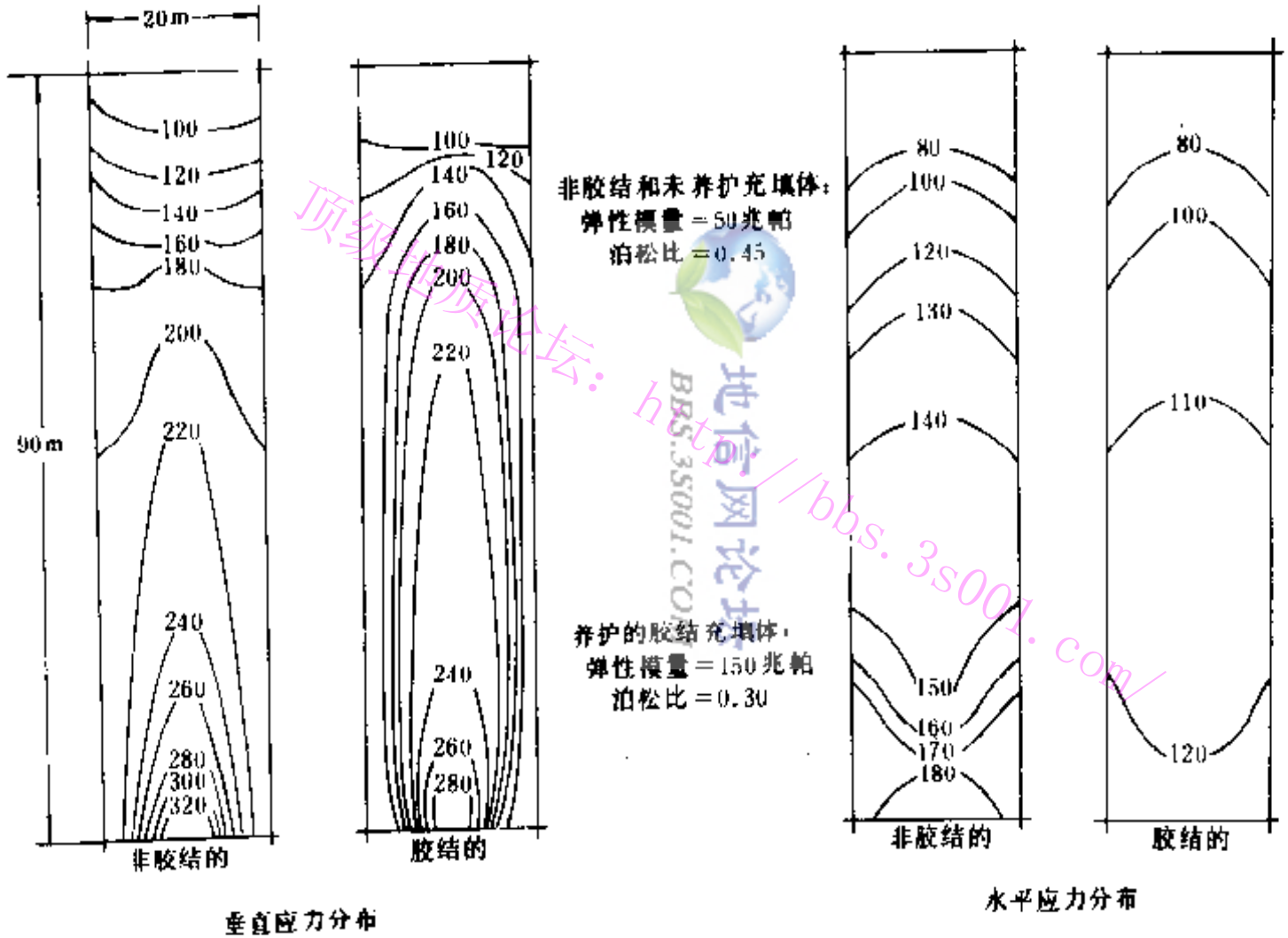


图 5　连续充填的有限元模拟

顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/
地信网论坛 BBS.3S001.COM

间。采场壁若是接近垂直并且是粗糙的，则该粘结力不会低于充填料的内聚力。然而，当采场各壁为倾斜时，该接触面的粘结力即可能低于充填料的内聚力。

设计公式化

为了确定特定位置空场法采场的事后充填的水泥费用，计划工程师利用特扎吉公式能得出下列设计程序：

1．利用方程(3)计算给定水平充填体的平均垂直应力。

2．按1.25系数加大此应力，使暴露面的中跨应力达到峰值（该系数是从有限元模型试验中获得的垂直应力分布推导出来的）。

3．假设垂直应力作用在从采场中心至暴露面的充填体中。还假设从采场中心至暴露面的充填体中的水平应力等于零。

4．利用具有这些应力的莫尔-库仑图来估算达到极限平衡暴露面所需的充填体内聚力。利用从实验室试验所获得的摩擦角值。

5．将选定的安全系数用于所需的内聚力：边坡稳定性计算的安全系数为1.3，但在地下条件下，如果不存在因坍塌对人员造成危害的情况，该系数可以减小。并需考虑这期间爆破震动的影响。

6．从胶结充填的实验室和现场试验，以及原地充填体性质如何变化的实际评价，推荐一个能获得所需内聚力的水泥含量。

为提供一个不同等级水泥量的设计，对于不同Z值（覆盖层厚度），以上步骤要反复地进行。

在试验采场中，在安全系数为1.0时，该方法对柱脚内聚

地信网论坛 BBS.3S001.COM 资源地质论坛 http://bbs.3s001.com/

力的要求为200 千帕。

进一步的模型试验

准备了一个包括井下试验采场在内的矿区三维有限元模型。对充填和事后的矿柱回采进行了模型试验，并获得了充填体内的应力和挠曲情况。充填体面出现了向矿柱空间弯曲0.5米的现象。该结果被用于设计仪器的布置系统，以便取得充填内应力和挠曲情况的现场数值。这些测量值将与有限元模型的预测值加以比较。通过改进假设模型的充填体性质和重复计算机程序，这些预测将与实测值趋于一致。

模型特性应接近实际值，这时使模型充填体破坏，这样一来保险设计量进而是使用过量水泥的数值也就可以得知。

戴姆斯（Dames）和穆尔（Moore）为加拿大矿物和能源技术中心（CANMET）对由于矿柱回采引起的充填体暴露的模拟，研制了三维显式有限差分模型。该程序允许考虑爆破震动和其他实时效应，并且将与早先的有限元模拟相比较。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

实验室试验

工程项目需要关于充填体不同添加物和粒度的相对机械性能的基本资料。实验室试验就是为了提供这种相对性资料。计划建立从实验室测定值到现场结果的转换指标。由于准备工作与本研究课题所选用的步骤有些不同，在胶结充填引进到ZC和NBHC公司时，只作了有限的试验。后来的试验是为了验证这个计划的。

运用单轴和三轴条件下常规的充填试验技术，任何一组的试件最少为六件。试件直径为53毫米，长约125毫米。浇

灌试件的砂浆重量浓度为75%。外加的应变率为每分钟0.1%。测定了与试件强度相关的水分含量和孔隙率。全部水泥含量均以重量百分比表示。将试件分成若干组，除选几组作蠕变试验外，大多数试件组均作了14、28和112天养护时间后的断裂试验。

图6a为胶结充填体无侧限压力试验结果，图6b为胶结充填体三轴试验获得的粘结力和内摩擦角的变化。所有这些试验结果在统计学上都具有很好的重复性。图7为含十水泥中的烟灰百分率对强度变化的影响，它表明应考虑适当加大烟灰的百分率。关于来自皮里港布罗肯希尔联合冶炼公司的铅冶炼炉渣的添加率、可磨性和粒度变化的试验正在进行中。在结束时，将对细磨炉渣添加率和烟灰添加率进行比较，以确定最经济的凝硬材料。

地信网论坛
BBS.35001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.35001.com/

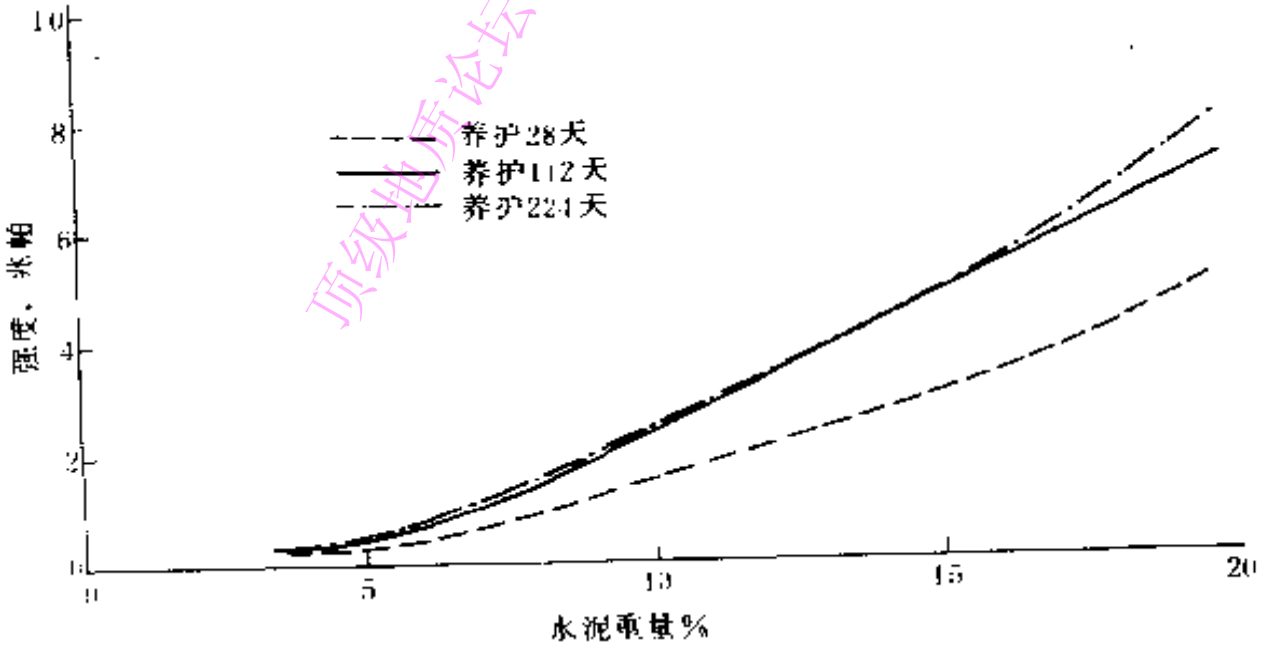


图 6a　胶结充填体无侧限压力试验结果

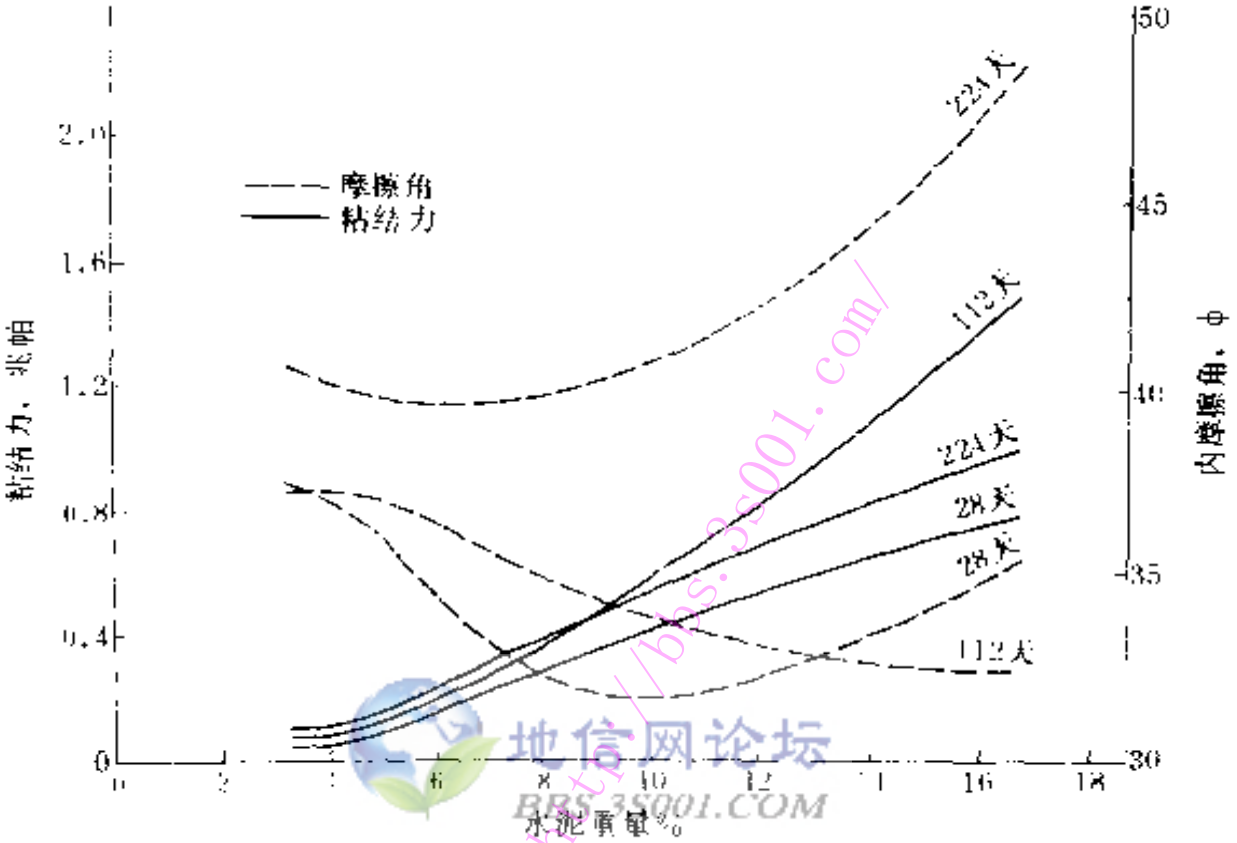


图 6b　胶结充填体三轴实验室试验结果

如图 8 所示，ZC和NBHC 公司用作充填的分级尾矿是相当粗的，－74微米粒级占20.0%。ZC 和 NBHC 公司调整旋流器以生产细粒含量更高的充填料是可行的，因此实验室试验使用22.0%和30.5%－74微米的级配物料来测定相对强度，其结果示于图 9 中。加入 9.1%的水泥量时，在标准细粒含量较多的（－74微米粒级占22.0%）和细粒级含量最多的（－74微米粒级占30.5%）试件之间，28天和 112 天养护期的强度差别，在统计学上是可忽略不计的。但只加4.8%水泥，养护期为28天时，对于标准细粒的细粒级含量最多的试件，强度的差别则相当大。因此计划要做细砂料的级配和降低水泥量的进一步试验。

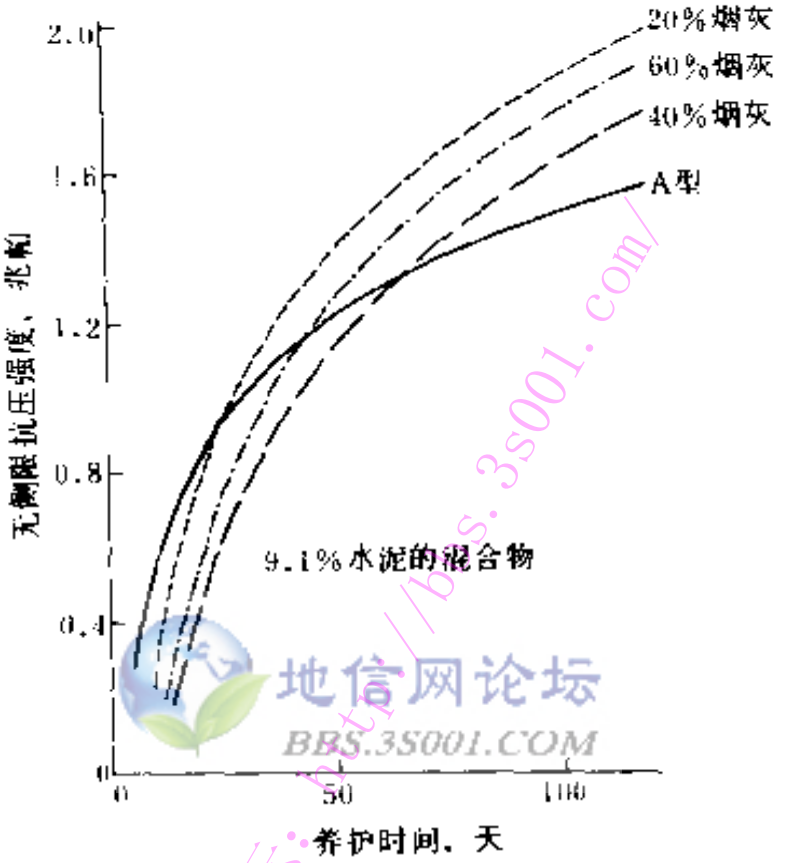


图 7　烟灰加入量对胶结充填体抗压强度的影响

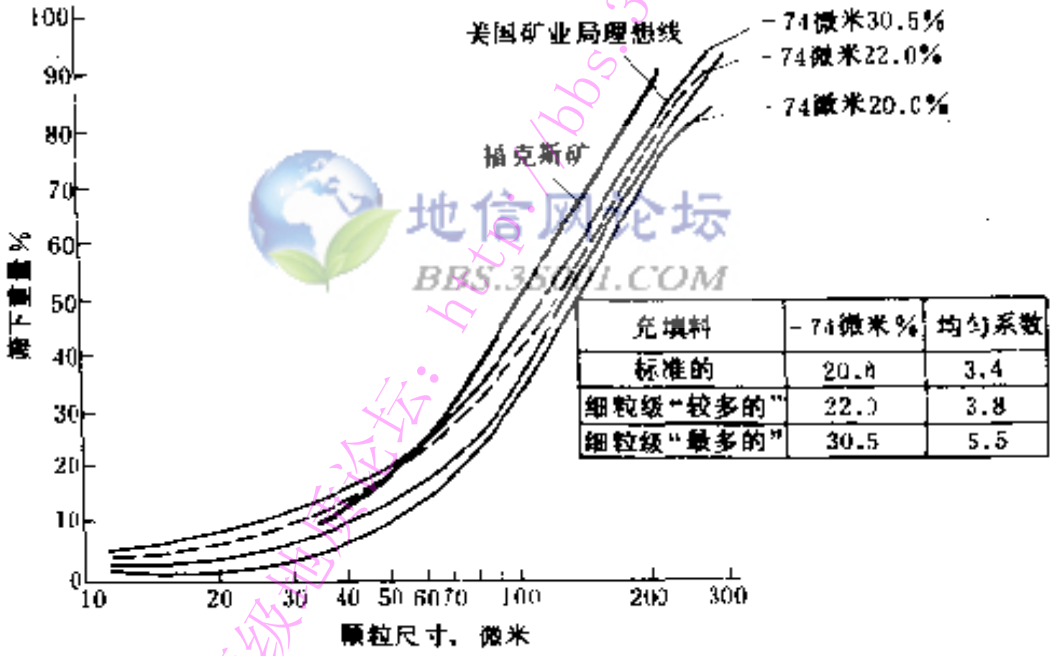
一般认为，纤维增强喷射混凝土将大大提高其机械性能，于是对加有耐碱性玻璃纤维的砂和水泥比为20：1的充填料进行了试验。纤维加入的重量百分率是：长度为10、12毫米的为1.07%和0.5%，18毫米长的为1.0%。

结果表明，长度10—12毫米的纤维对抗压强度是有害的，而长度18毫米的纤维能略微提高了充填料的强度。但这种提高与增加更多的水泥相比就逊色了。使用玻璃纤维是很昂贵的，按1%的加入量时，每吨充填料的成本约为32澳元。

浇灌前尾矿浆与水泥的混合时间看起来对充填体强度有一定的影响。添加水泥时强度的增加看来取决于水泥微纤维

地信网论坛 BBS.3S001.COM

的形成和胶体覆层现象(Double等，1977)。基于这点，延长整个充填砂浆的搅拌，由于水泥微纤维的磨损，就会降低充填体的长期强度。然而，广泛的实验室试验表明，当搅拌时间从5分钟增至25分钟时，养护28天的混凝土抗压强度略有增高的趋向。这可能是受磨水泥胶体和微纤维的广泛扩散，因此通过粘结大量砂粒而提供早期强度，正如用细磨的水泥产生早期强度那样。普通硅酸盐水泥缓慢的水合速度可能意味着较短的搅拌时间会对长期强度有利。



充填料	-74微米%	均匀系数
标准的	20.0	3.4
细粒级"较多的"	22.0	3.8
细粒级"最多的"	30.5	5.5

图8 ZC和NBHC公司充填料的粒度分布

在水泥浆加入到实验室充填料浆之前，进行5分钟到25分钟的预先搅拌能获得类似于整个充填料浆预搅拌的作用。在含水率相同的试件中，增加搅拌时间所得到的抗压强度比标准的充填料制备方法或多或少要好些。ZC和NBHC公司使用的充填料在输送网路系统中的转运时间最长可达10分钟，假定在管道中进行了一定程度的搅拌，那末就可认为搅

地信网论坛 BBS.3S001.COM

拌时间足够了。

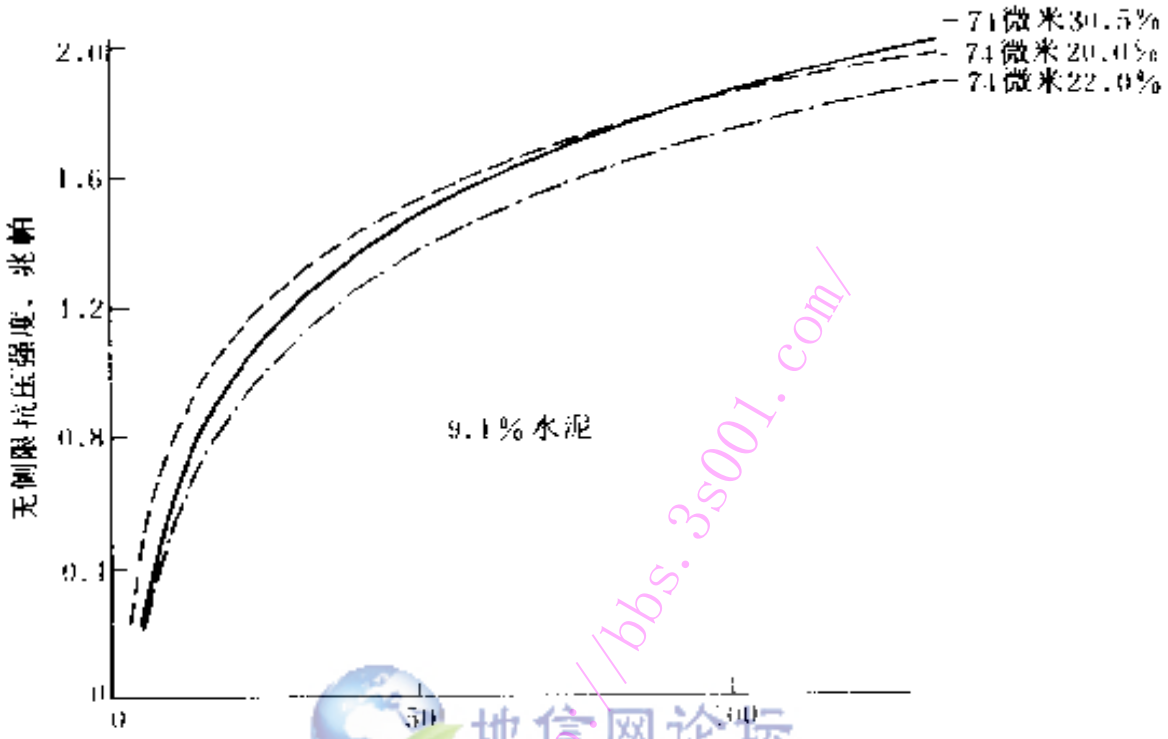


图 9　充填料粒度对抗压强度的影响

土建工程中用来稳定垂直暴露面的配筋技术可用于稳定充填体，这时采用薄的连续金属板条或塑料网做筋，随着浇灌充填料以一定垂直间距分层水平敷设于充填体中。在土建工程实践中，垂直暴露面上还可用面板来加固，可是在大多数采矿条件下不可能使用这种方法。因而代之以对充填料加入少量水泥，预计会防止表面局部损坏。

在各种充填料闭合压力下，对10毫米网口和2毫米直径的塑料网进行了实验室试验，以测定充填体在加筋条件下的技术性能。发现这种塑料网对45千帕侧限压力时具有30千牛顿/米的线性强度，在零侧限压力时为3千牛顿/米。每一条3×80毫米的镀锌钢带(在减去锚杆孔尺寸和允许腐蚀值后，估计有效尺寸为2×66毫米)，具有26.5千牛顿的抗拉强度。

设计准则是用表面摩擦效应强化，必须在水平面上提供足够的牵制力，以确保充填体应力的莫尔圆在充填体库伦破坏包络线的界限之下。

计算的增强所需加筋量列于表2中，设计安全系数为1.5。因为在ZC和NBHC公司现场条件下可望有远远大于45千帕的闭合侧限压力，故确定的塑料网需要量是很保守的。

在空场法矿房中设置塑料网或钢带所遇到的实际问题妨碍了它的应用。然而这种方法可用于象水平分层充填法那种矿房用逐层回采技术的地方。虽然如此，由于按1米的垂直间距设置加固物，需要频繁地中断充填过程，这在操作和经济上都是难以接受的。

表2 加筋法加固充填体

垂直高度，米	塑料网需要量，层/米	镀锌钢带需要量，条钢带/米
20		
30	$\frac{1}{2}$	0.6
45	1	1.1
70	$1\frac{1}{2}$	1.7
90	2	1.8

选择了加入重量9.1%和3.2%水泥的有代表性的充填料作蠕变试验。所取水泥掺合物料为20%的烟灰和40%的烟灰。当所加载荷达到预计的无侧限抗压强度的80%时，仅观察到初始蠕变。当载荷提高到预计的无侧限抗压强度时，呈现了二重蠕变，并且很快发展到三重蠕变，随即试件破裂。

这些实验结果可解释如下，作为设计的就地充填料的应

顶级地质论坛：bbs.3001.com/

力水平，蠕变将只限于以广义凯尔文模型表征的最初形式。因为没有可测出的膨胀度，故体弹性模量假设为常数，并导出初始的和长期的剪切弹性模量，以提供现场条件下蠕变数学模拟的阻尼常数计算。例如，掺入9.1%水泥的充填料(20%烟灰)所得到的阻尼常数为2.7×10^{11}帕·秒。

蠕变时的现场响应持续时间预计比实验室试验的试件要长得多。因此，由大爆破回采矿柱产生的大暴露面，以及由于区域主应力再分布，暴露面对采场围壁随之而来的闭合的响应，预计会延长至几个星期。在充填体暴露之前，由于k值达到1，蠕变将是最小的。

非胶结充填体的事后固结法

如上所述，ZC和NBHC公司有大量的矿柱矿量处在与非胶结充填体邻近的地方。为了回采这些矿量，研究了该充填体的事后固结技术，以便在下向充填法中，至少需4米高暴露面具有足够的强度。打板桩和开槽灌浆来获得高强度隔墙的方法，对于地下开采来说是不实际的和不经济的。由于充填体渗透性很差，因而放弃使用特殊材料注浆法。稀薄的硅酸盐注浆液用在预先混合各组分的方法并作一次注射时是适用的。但由于可能在充填体留下不稳定的“窗口”，以及注浆材料和注浆成本太高，故所有非胶结充填体事后固结的注浆法终于被放弃了。

充填体破坏的典型例证

对早先所指出的充填体大暴露面不成功的尝试，用本充填课题的实验结果和设计准则进行了一次事后分析。

充填体破坏发生在两个阶段。当夹于两个矿房间的矿柱

上半段爆破时，充填体立即遭到破坏，如图10所示。塌落的充填料混入崩落矿石中。塌落表面呈弧形水平断面。一部分矿石运走后，在爆破剩余的矿柱时，即出现了充填体第二次坍塌。

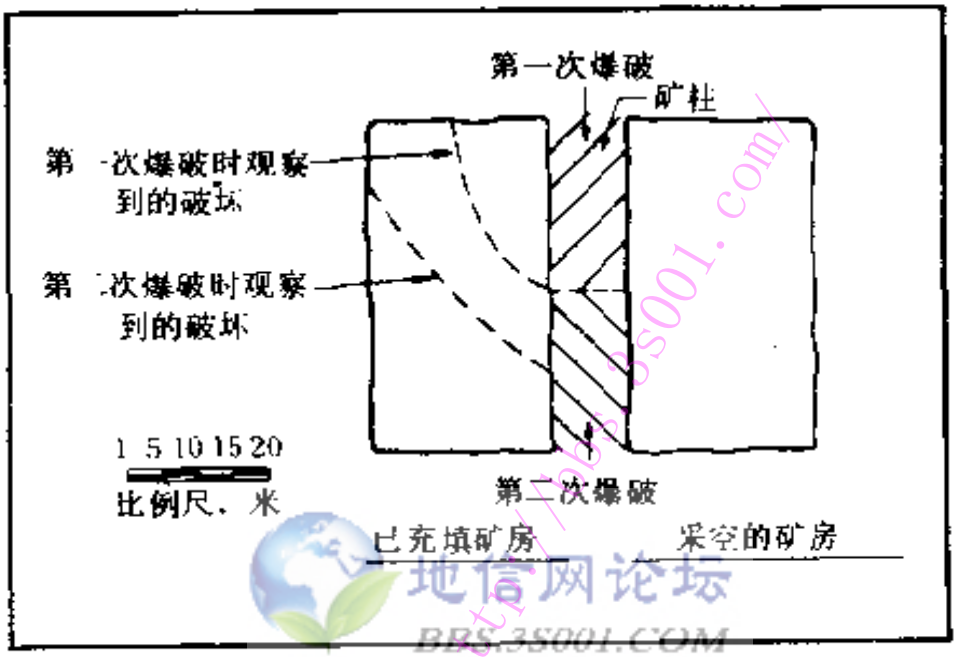


图 10　暴露充填体破坏垂直剖面图

当采场放矿点开始出现充填料时，即应进行选别装矿。含水泥的充填料卸入邻近采场。充填料使矿石贫化约增至50%，这种含水泥的矿石会给浮选性能以严重的影响。最后，当该采场报废时，矿柱矿石已回收了75%。

充填料设计是根据不考虑充填体养护或成拱的简单二维有限元模型所预测的应力状况进行的。在暴露面的基脚预测得到的最大应力为780千帕，而在基脚上 4 米的地方，则降至400千帕。根据该数值，充填体基脚的水泥含量为9.1%就足够了，并认为水泥量将随高度的增大而急剧减少，最大高度时为3.2%。关于实验室或现场充填体强度的资料是很少的。

采场充填期间水泥耗量的记录表明，在几个层位上有低

水泥含量充填料的薄层。事后对这种充填体的分析，所得到的不同暴露高度的安全系数为0.57至1.09。只有水泥含量为9.1%的充填料层预计是稳定的。虽然难以预测低水泥含量的薄层可能对充填体暴露的影响，但这些结果表明，在将来矿柱大量回采试验时，把新近发展的设计程序用于水泥添加速率是有信心的。

大量回采矿柱时的充填设计

ZC和NBHC公司将于1978年晚期使用本研究课题所获得的结果，设计充填体大暴露面稳定性的第一次试验。暴露高度为35米，其布置如图11所示。

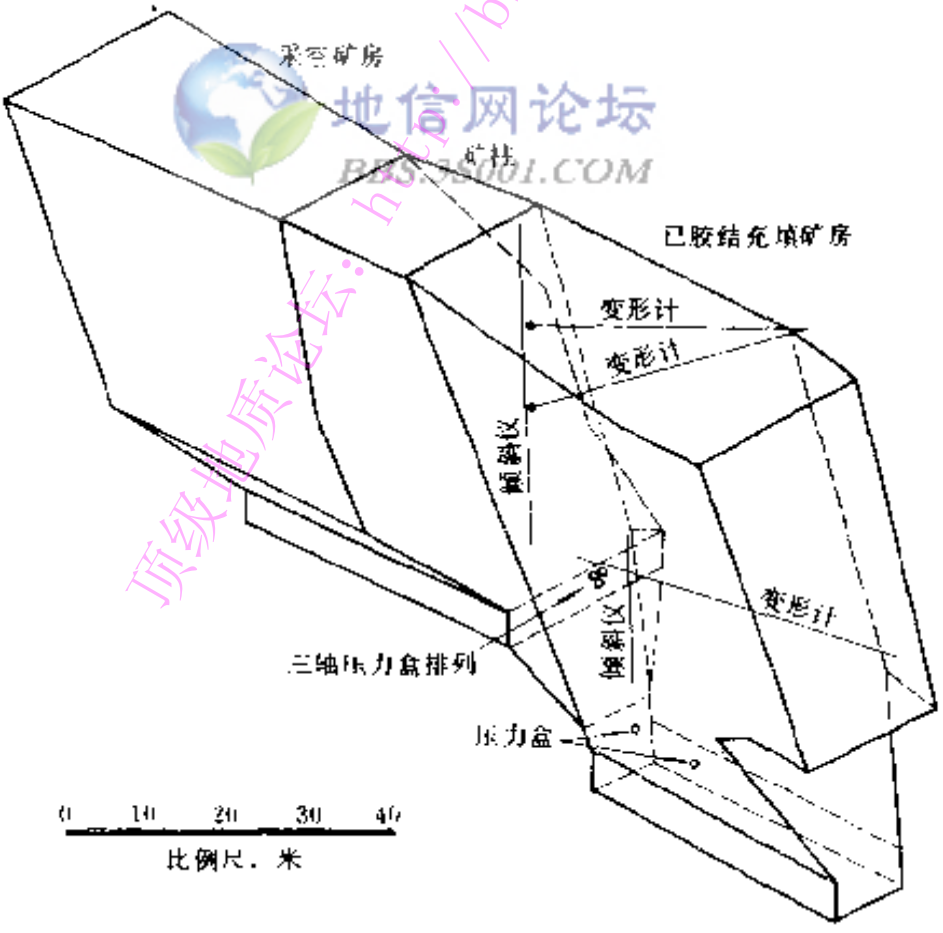


图 11　矿柱深孔法回采试验位置

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

水泥的添加率由前面所述的设计步骤来确定。所用的参数为：

充填料密度（γ）＝2吨/米^3（现场取样确定的）；

垂直应力与水平应力之比（K）＝0.5；

摩擦角（ϕ）＝34°（养护112天的三轴试验结果）；

原地抗压强度＝0.66实验室强度（参阅Gonano,1975）。

充填、养护和矿柱回采期间，充填体的特性由图11所布置的仪器进行监测。充填期间充填料的密实程度用简单的沉陷计进行记录。在矿柱壁附近四个点上安装Kyowa BE20KE型压力盒和Kyowa BP5KC型测压计。在设计基脚上面3米处也安设三个正交的压力盒。矿柱壁中线内侧3米处安装一排倾斜仪。它与扇形排列的12个形变仪所记录到的变形情况，给出在矿柱回采期间和回采后胶结充填体响应的详细资料。

这些仪器均由能将数据记录在盒式磁带上的数据记录器来控制。磁带经一小型计算机处理，其结果均绘成能供解释用的曲线。

回采矿柱时，使用低密度铵油炸药，以便使充填体产生尽可能小的震动。在充填体中从前测到的爆破震动加速度小于1g，该震动级对稳定性计算的影响因为震动是瞬时的而受到忽视。然而，矿柱回采爆破期间，将在充填体内布置震动记录器。

水泥添加和充填料浇灌的质量控制是非常重要的。关于ZC和NBHC公司浇灌系统有效的水泥添加量和充填料流速的详尽检验表明，存在着严重的毛病。参照图1所示，砂仓中分级尾矿按重量计的水分含量波动在9％与22％之间。这就导致了自重流入搅拌槽时流量的变化，以及有效水泥添加量的相应变化。在最坏的情况下，水泥添加量可低于设计

数字的40%以上。为此，已安装了质量流量测量仪来精确控制水泥添加率。充填砂浆和砂仓的定期取样，对质量控制是必不可少的。

一旦胶结充填料经养护达到合理的强度，即开挖一个采准工作面，以便利充填体原地机械性能的试验，用三管金刚石钻孔法测试已浇灌充填料的密实度。该矿柱将于1978年晚期回采。

空场法采场中充填体的压力

矿房充填期间形成的充填体压力测量，对隔离墙设计和

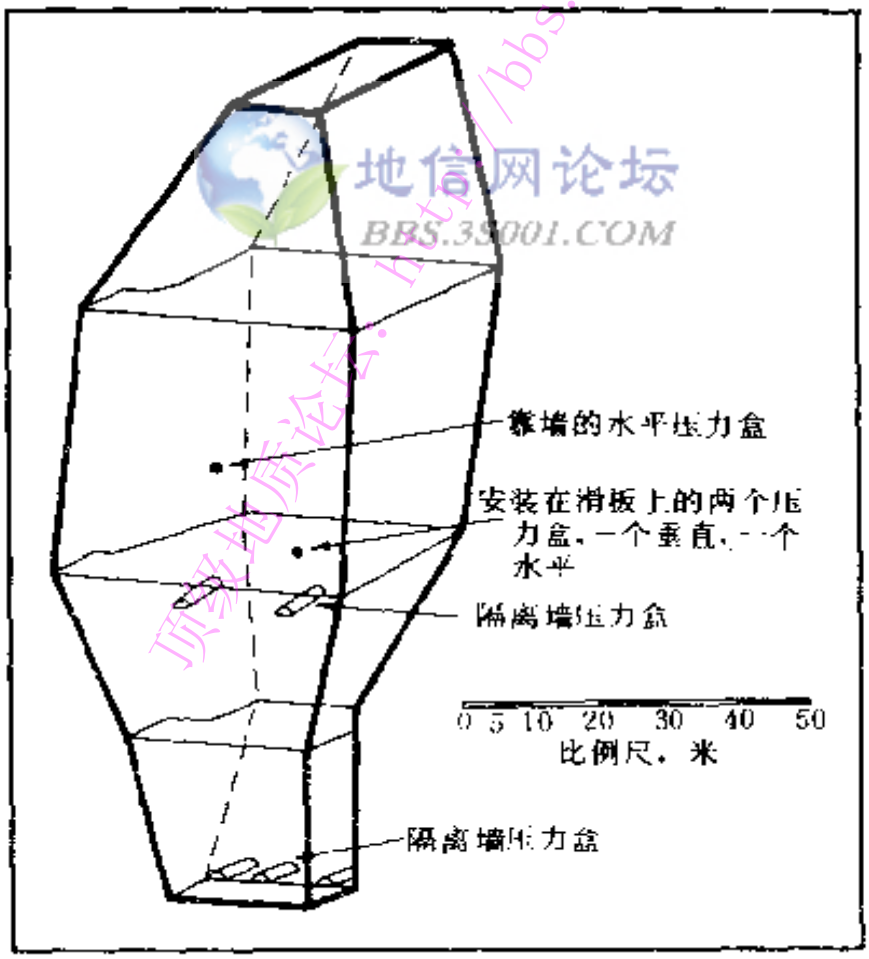


图 12　为监测充填体压力的空场法采场

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

理论压力预测的判定是重要的。图12所示的空场法采场是用分级尾矿充填的。压力盒安装在隔离墙上，其在充填体内测得的压力示于图13。

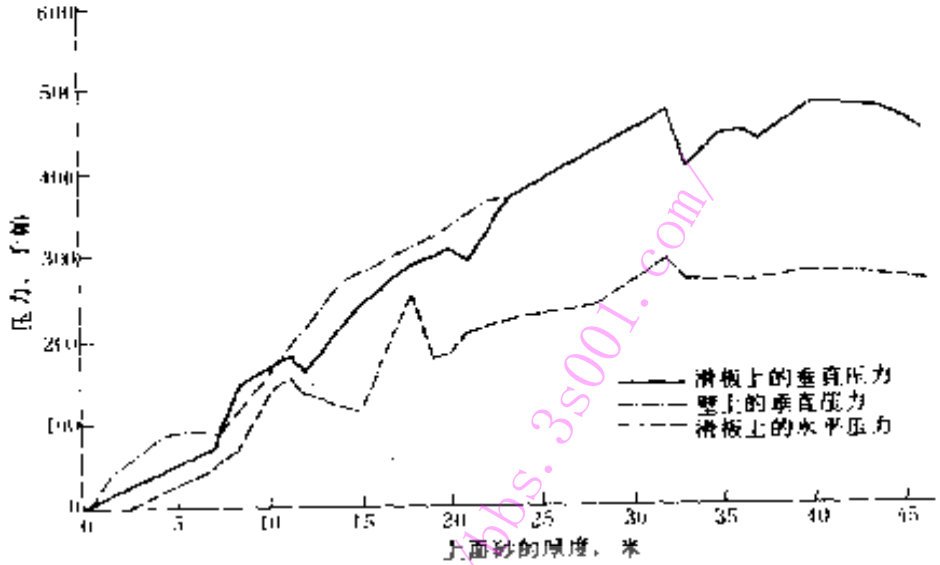


图 13　非胶结充填体测得的压力

作用在充填隔离墙上的压力在三个位置上测得。在每一情况中，当充填料完全盖住隔离墙时约产生20千帕的压力，并且当矿房被充填满时该压力增加得很少。人们认为这种低压现象是由于充填料的成拱作用，使压力转移到隔离墙前的围壁而产生局部自承作用所造成的。测量表明，标准的木隔离墙效果很好，并与充填高度无关。充填料的液化作用，由于其渗透性很高而未予考虑。

充填体内的压力根据充填速度的不同而不同。矿房中心的最终压力比为0.58。这和对非胶结充填作的预测(图 5)很一致。在充填料覆盖压力盒30米以后，垂直压力稳定。校正在非胶结充填和胶结充填中压力盒，得出线性响应，但压力盒少记录20%左右的超载压力，则是未料到的，因为充填体的刚度大大低于压力盒的刚度。图13的结果是未经标定校准

的记录压力。

充填-矿柱回采的经济评价

使用强化充填料效果的经济评价必须作为任何充填研究课题的组成部分。存在着广泛的影响因素，它们最终必须表现为使降低有效开采费用和（或）提高矿石回收率方面达到有利可图的地步。矿山设计必须详细分析矿体形状和地层条件，以确信获得最佳的充填体性能和费用。

检验用提高水泥添加量以促进在充填体旁全部用深孔法回采矿柱的可能性，包括如下主要途径：

1）根据矿石品位，确定矿柱矿石的净价值；

2）计算全部稳定暴露面所需的水泥量及其费用；

3）计算可能有利于下向充填或垂直漏斗爆破后退式矿柱回采所需的水泥量（3.2%）的价值；

4）评价留一薄层矿柱矿石（矿皮）来控制非胶结充填料的可能性；

5）比较上述方案以确定成本最低的矿体回采方法。

按照托马斯1973年提出的最终的选择取决于“一般外表上无关因素的复杂的相互作用”的建议，选择了采矿方法，进行了详细的设计和生产安排。因为正在研究的利用充填体强度的采矿方法预期在浇灌充填料两年内回收全部矿柱，故不使用充填物料的折现现金流量（简称贴现法）评价法。

关于留一层矿皮（几米厚）来保持矿房中非胶结充填料的成功应用，表明该方法似乎对薄矿脉是可能的。但是，延迟采用该方法的原因是因为还没有设计准则，在矿皮形成、防止矿柱矿石大量贫化，以及上盘可能不稳固等方面都尚无把握，特别是暴露宽度达35—50米时更是如此。

ZC 和 NBHC 公司正在设计胶结充填体暴露下的深孔矿柱回采法，以便确定留矿皮层的厚度和宽度，并且希望能得出其设计的经验性准则。矿皮的稳定性看来完全取决于当地的地层条件和爆破实践。在深孔法回采矿柱期间，使用留矿皮来维持充填料的办法具有显著的优点，在 ZC 和 NBHC 公司的生产条件下能使一些无利可图的矿柱回采成为有经济价值的。

结　　语

ZC 和 NBHC 公司的充填研究课题，在制订一种确定矿柱回采技术在经济和实践上可行的大范围充填体稳定性设计方法上，已取得了重大的进展。有待于解决的是，确定胶结充填料的实验室特性与现场特性的相关关系，以及对照监测到的现场特性来确定设计参数的准确性。

地信网论坛
BBS.35001.COM
http://bbs.35001.com/
顶级地质论坛

参 考 文 献

Braes, B. E., The Application of Polymeric Flocculants in Underground Backfill at The Zinc Corporation, Limited and New Broken Hill Consolidated Limited, Jubilee Symposium on Mine Filling, Australasian Inst. Min. Metall., 1973.

Double, D. D., and Hellawell, A., The Solidification of Cement, *Scientific American*, July, 1977, pp. 82-90.

Gonano, L. P., The Mechanical Properties of Hydraulic Fill Pillars at Mt. Isa, AMIRA Project Report No. 1, Support and Stabilisation of Stopes, 1975.

Libby, D. J., and Smith, J. D., Development of a Sublevel Mining Method with Delayed Pillar Recovery at Sherritt's Fox Mine, Manitoba; *Proceedings J. M. M.*, Jan., 1975; *CIM Bulletin*, Vol. 68, No. 753, Jan., 1975.

Smaniotto, L., Cemented Sandfill at The Zinc Corporation, Limited and New Broken Hill Consolidated Limited, *Broken Hill Mines*——

1968, Monograph Series No. 3, Australasian Inst. Min. Metall., 1968.

Smaniotto, L., and Coates, H. F., Hydraulic Sand Filling at The Zinc Corporation, Limited and New Broken Hill Consolidated Limited, *Broken Hill Mines*——1968, Monograph Series No. 3, Australasian Inst. Min. Metall., 1968.

Spencer, E., A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces, *Geotechnique*, 1967, Vol. 17, pp 11—26.

Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley and Sons, 1943.

Terzaghi, K., *Rock Defects and Loads on Tunnel Supports*, reprinted from Procter and White, Commercial Shearing and Stamping Company, 1946.

Thomas, E. G., Cemented Hydraulic Fill; An Approach to its Use in Mining Engineering, *Min. Mag.*, March, 1973, pp. 181, 187.

Wright, S. G., Kulhawy, F. H., and Duncan, J. M., Accuracy of Equilibrium Slope Stability Analysis, *Int. Soil Mech. Found. Div. ASCE*, Vol. 99, No. S M10, 1973, pp. 783—791.

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

尾矿充填——一种新方法

W.R.韦曼特*

摘　要

本文叙述了用选厂尾矿作为地下矿山充填料的优点，也指出了常规充填技术的缺点及其局限性。叙述了使用不分级尾矿的充填新方法、以及在地下处理矿浆的新方法。指出了这一新的机械化充填方法较广泛的适用性，对可能使用新充填概念的不同采矿方法实例作了提示。

地信网论坛
BBS.35001.COM

尾矿充填

过去三十年来，充填采矿法的应用遍及整个采矿领域。其原因不同且多变，包括地压控制的改善，降低采矿费用，改善通风条件，以及差不多可完全避免火灾危险等好处。充填料可以是采石场采下并经过破碎的岩石，天然砂或其他材料。今天，用作充填料的最普通材料大都是选矿厂尾矿，它以矿浆形式输送到采场。通常尾矿是经过分级的，分级的程度视开采地区的不同而异。分级往往将排除相当部分－200网目的矿泥，从而提高尾矿的沉降速度和渗透率。

在一些适合充填的金属矿床中，经适当处理并浇灌于采

---

* W.R.韦曼特(Wayment)是乔伊机械制造公司硬岩采矿部工程和研究经理。

场的选厂尾矿构成一个极好的支护系统。来自某些矿区的尾矿，其支护效果比来自另一些矿区的尾矿要好。例如，以石英为主的尾矿，其支护效果则优于由较软的物料组成的尾矿。级配较好的尾矿，其可压缩性通常比级配差的要低。与木支护相比，尾矿支护系统通常是成本更低，更灵活，而且一般地说，在防止围岩移动或控制岩壁闭合方面能提供更好的支护。

尾矿充填法与大部分其他支护方法相比较还具有不少重要的优点。尾矿充填的后勤工作显然是个重要优点。将该方法的后勤工作与诸如木支架、钢支架，甚至锚杆支架等方法相比较，尾矿充填料是以一根直径相当小的管道从地表输送到采场，而任何别的方法，成形的混凝土件可能除外，均需要将分散的构件或结构型材，利用罐笼和地下水平运输系统从地面送至采场。这种多重搬运随着开采深度越深，变得越困难了。由于深度大时，地下运送支护型材的复杂性和费用高，故多重搬运会限制开采的深度。从选矿厂至采场敷设直径3英寸的管道则容易得多。

再一个优点是，当诸如采场宽度、倾角和长度等矿体几何形状变化时，尾矿充填是一个非常灵活的方法。使用该方法时，采场中要留下低品位矿石或废石夹石则变得很简单了。它能提供一个供人员或大型设备（如5立方码和8立方码铲运机）使用的廉价工作底板。如前所述，当使用尾矿充填时，一般能改善井下通风条件。恰当地说，充填体实质上是不能通过风流的，有效风能全部用于工作面，不会象在未充填的采空区那样风量大量损失。

问题和局限性

使用选矿厂尾矿作为支护手段的一般方法，存在一些问

题和有一定的局限性。局限性之一是，常规尾矿充填法有其固有的周期性；即，当充填做完时，采场需停止生产。而且，停产时间需延续到充填料脱水达到给定值为止。这显然随尾矿的粒度分布和充填速度而异。

另一个局限性是，对某些类型的矿体使用常规的尾矿充填有困难；例如，使用于板状矿床时就很困难，特别是当充填要求接顶的情况下更困难。

常规尾矿充填法中可能出现的一个最大问题，可归结为一个字——水。输送固体物至采区的最经济办法是将尾矿制成矿浆。然而水的使用却给地下带来一个严重的问题。

例如，充填前采场需进行大量的准备工作。必须构筑一些隔墙，依据尾矿的类型和所使用的特定采矿方法，这些隔墙需要精心地构筑，因而成本很高。它们必须敷设过滤材料，以便使水泄出而将固体物留下。此外，根据岩石致密程度，上盘和下盘岩壁可能需部分或全部覆盖过滤材料。这种准备工作无论对材料和人力来说均是昂贵的。

准备工作即使做得周密，一旦充填开始，还可能发生与水有关的一些问题。例如，在排水和水倾析期间，一些固体物料会从采场流失。显然，固体流失的数量将随充填材料和充填速度的不同而异。隔墙中或隔墙四周的漏洞会流失相当数量的尾矿，这样一来就给底板和水沟的清理带来困难。

乔伊机械制造公司的参与

这里的一个明显问题是，为什么乔伊机械制造公司(Joy Manufacturing Co.)要参与充填材料方面的工作？回答这个问题需作一番推敲。当该公司于1970年在加拿大安大略省坎布里奇（Cambridge）开办高尔特（Galt）试验研究中心

时，它就担负研制地下硬岩采矿的新型设备的任务。乔伊公司是发展煤矿连续采矿设备的倡导者之一。很自然，高尔特试验研究中心的任务之一就是研究地下硬岩的连续（即非爆破的）采矿设备。

在分析对地下硬岩采矿设备所提的要求中，其结论是，必须研究的主要辅助工艺是一种能适用所选用的采矿方法的支护系统。对金属矿床的进一步分析表明，象方框支架、机械化锚杆安装或移动式垛式支架等支护方法，对今天的地下金属矿山已并不是那么适用了。

另一方面，如果随排水而来的问题得到消除，使用尾矿连续充填系统则具有很大潜力。这当然只有在充入采场之前将矿浆脱水才有可能。如果水的问题能解决，那末尾矿充填不仅能起支护作用，还能在开采急倾斜矿床时作采矿设备的工作底板。若水的问题能解决，这种充填系统就能用于更多类型的矿床，并且还可满足机械化的需要。能连续地进行浇灌的充填支护系统需能跟上采矿的速度，并与采矿作业相一致。这个问题就给乔伊公司提供一个研制设备的机会，即发展一种用于充填法的尾矿脱水机。

概括地说，结论是：需要一种能以最佳浓度使充填尾矿以矿浆的形式输送到地下去的方法，就象目前所进行的那样。在靠近采场的地方，如果尾矿浆能通过一种将大部分水从固体中分离出来的脱水机，那将是很理想的。分离出来的水或溢流能在控制之下从该区域通过管道或水沟排除。分离出来的固体与适量水泥混合送到采区，并用机械或压风进行浇灌。

关于对乔伊脱水机的性能要求，一开始便确立如下原则：

1．由于这设备是用于井下，要尽可能紧靠回采工作面，故必须紧凑和轻便。

2．它必须在50—65%固体（按重量计，以下同）的给料浓度中运转。

3．它在机械方面必须相当简单并在井下易于维修。

4．它的生产能力必须与变化很大的矿体所预计的采矿速度相适。

5．除可能含的粘土型颗粒外，这一设备最好能处理或将全尾矿流脱水。

6．必须产生这样一种底流，即当加入最少量水泥将其浇灌入采场时，它的含水量很低，以致于形成一种相当稳定的和不需脱水的物料。

7．理想的溢流应不含固体物，但事实上，含1—5%固体可能更为现实。

地信网论坛 BBS.3SWH.COM

尾矿脱水机——“尾矿旋转脱水机”

对这种脱水概念的研究即由乔伊公司于1972年开始进行。从那以后，进行了一种商标名称为尾矿旋转脱水机的研制工作。此设备尚处于样机阶段，并满足了上述大部分性能要求。

尾矿旋转脱水机是一种有专利的离心机，外形如图1所示。它的直径为24英寸，高约36英寸。整个封装在一个捕集罩里，并装有一个驱动装置，整机占有空间约为一个4英尺的立方体，因此，它能很容易地运进一般的井下巷道。尾矿旋转脱水机为固-液离心分离提供了一个崭新的概念。

从操作观点来看，尾矿旋转脱水机不同于其他用于脱水的离心机。它的四个主要部分是：一个空心的中轴，一个上部碗形转筒，一个下部碗形转筒和一个环形转筒周边密封装

置。该装置在壳体的上下两个轴承上旋转，这两个轴承装在机壳或外罩上。离心机就在这个壳体内工作，它由转速为1500—3000转/分的电动机或液压马达驱动。尾矿砂浆通过同空心轴连接的旋转联轴节送入离心机。

离心机启动顺序如下：1)关闭转筒的周边密封装置，2)开动驱动马达，并使离心机达到工作转速，3)给入大约40—60%浓度的尾矿浆。给料是通过中心轴向下加入的，经过轴下端的、可将料排到下转筒底部的槽口，进入由上下碗形转筒所构成的料室，当矿浆进入料室的时候，固体颗粒立即甩向周边。很快地从周边向中心轴方向产生一层事实上不透水的沙床或固体"沙层"，形成一道几乎不透水的阻挡层。几秒钟以后，当"沙层"达到几英寸厚时，周边密封装置按预定的空隙开启，以形成周边连续排料的通道。其后（第四步），控制给料速度和旋转速度来获得均衡的作业，而固体从周边通道连续排泄的速度与"沙层"的补充速度相同。与此同时，水则在轴周围以相当薄的环带向上移动，并通过靠近上部碗形转筒顶部的排水孔排出。分级的或未分级的尾矿均可用尾矿旋转脱水机进行脱水，但它在处理未分级的尾矿时更为有效。关于离心机设计和工作原理的详细情况，将另写文章报道。

目前，使用原型尾矿旋转脱水机处理全尾矿流，每小时生产能力为15吨干尾矿。给料浓度为20—65%不等，但为了获得优质底流，给料的最佳浓度为60%左右。坎布里奇实验室试验了镍、铜、金和铀矿尾矿（表1），根据特定尾矿的不同性质所得底流含固体量分别为76—85%。是否能达到85—95%的回收率还是取决于尾矿的特性和是采用一段或者两段作业。这里所说的回收率指的是从底流中捕获的物料中固体



图 1　尾矿旋转脱水离心机

物质的百分率。

从上述回收率看，给料中的固体物约有 5 —15％进入溢

表 1　脱水特性数据

尾矿类型	生产率，（干砂）吨/小时	底流浓度，（按重量计）固体％
镍	11.8	77
铜	12.2	84
铀	11.0	78
金	13.9	76

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

流，并且必须在井下对它进行处理。要么在井下水仓中沉淀，要么与水一同返回地面。降低溢流中的固体含量是今后继续研究的课题，我们确信，溢流中的固体含量将会降到不影响井下作业的程度。

尾矿旋转脱水机排出的底流很稠，可称得上是一种介于液体与固体之间的一种物料。图 2 表示一典型的底流，请注意靠溜槽边的平滑情况（视在内聚力）。在实际作业中，底流一直保持平滑直到该物料脱落和坠入容器为止。

在我们的工艺过程中，在底流中加入 3 %或更多的水泥，这就使含水量降低 1 — 2 %。因此，物料呈现出相当强的粘结力，很象浓的或稠的灰浆。

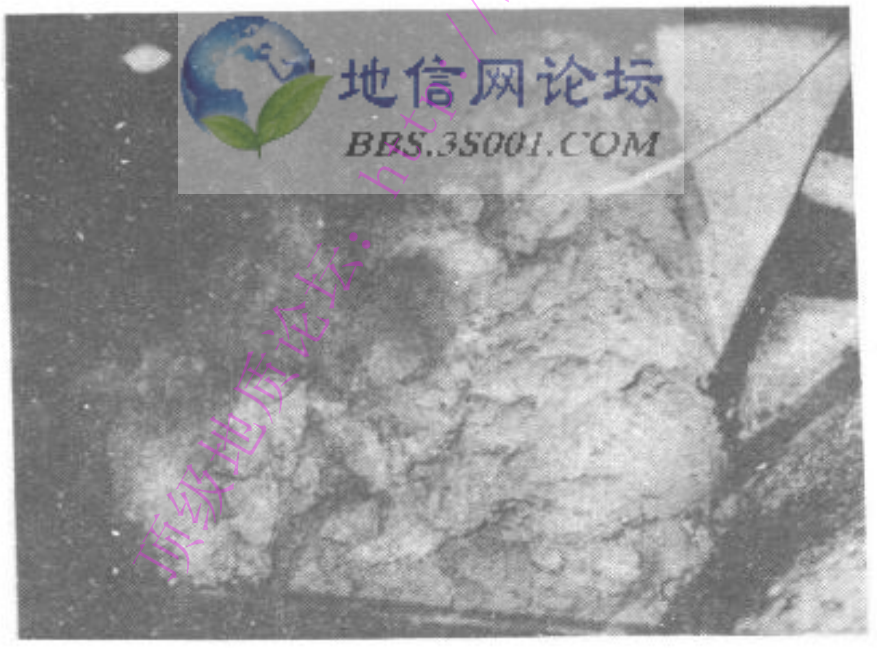

地信网论坛
BBS.35001.COM

图 2　尾矿旋转脱水机处理金尾矿时的底流

大部分初始研究工作使用的是经过分级的和未分级的镍-铜尾矿，如图 3 所示。分级的和未分级的尾矿均能用该机脱水或浓缩，但未分级尾矿浆进行脱水更为有效，产品也稍好些，亦即含水量低些。我们的工艺过程，在一定程度上取决

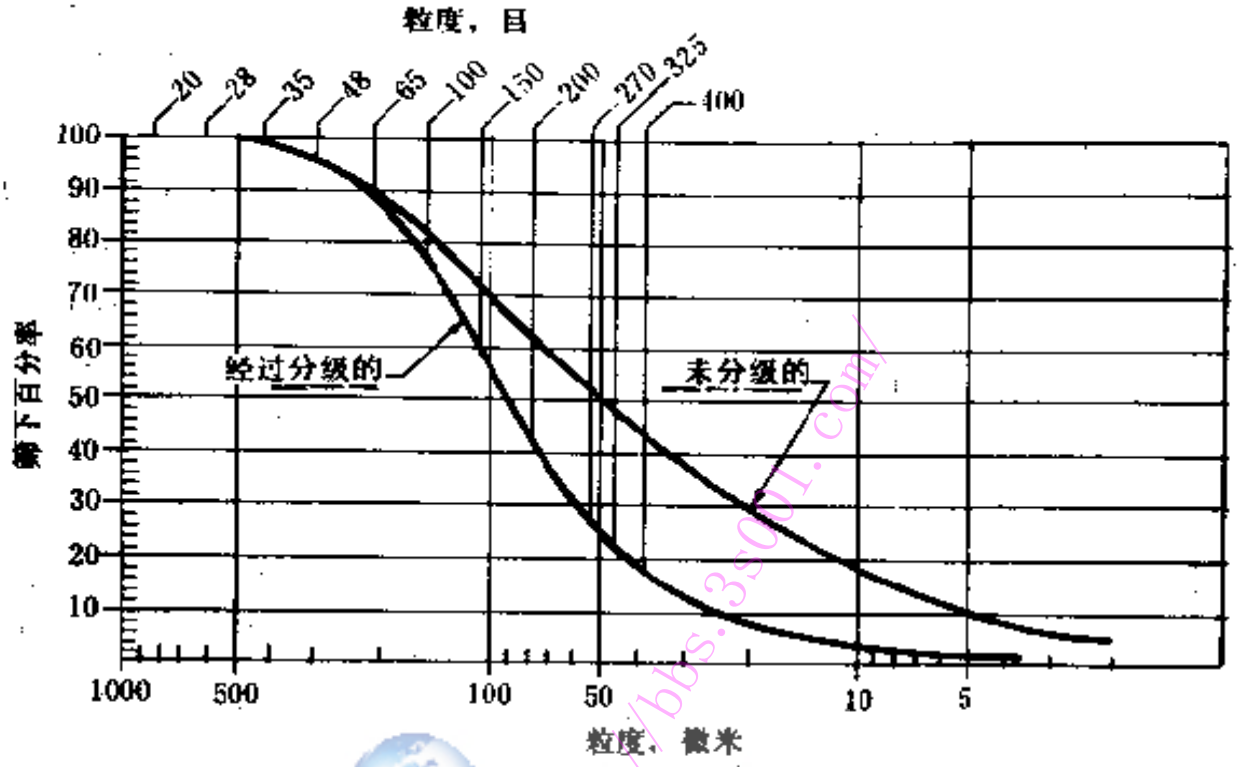


图 3 粒度分布——原始尾矿

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地信论坛：http://bbs.3s001.com/

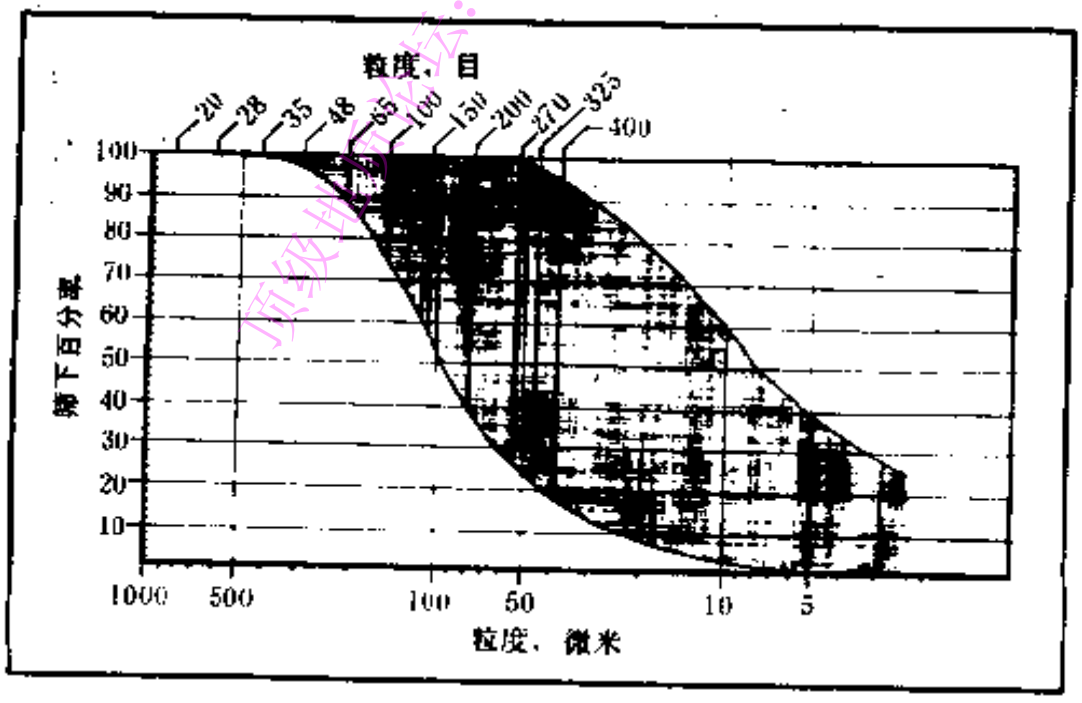


图 4 粒度分布——已证明的应用范围

于是否用级配优良的物料作为给料，或者说，我们的设备对一种渗透率很低的无粘结力物料工作最有效。

图 4 所示为迄今已成功脱水的各种尾矿物料的粒度范围和粒度分布。非常细的物料是第一段脱水时的溢流，它用作第二段的给料。第二段溢流的最大粒径为20微米。

强度试验

在坎布里奇实验室，使用如图 5 所示的闭路（回流）矿浆循环。关于尾矿浆连续回流的主要问题之一是物料磨细。由于物料磨细，试验时每批料只用三次；对于关键性试验使

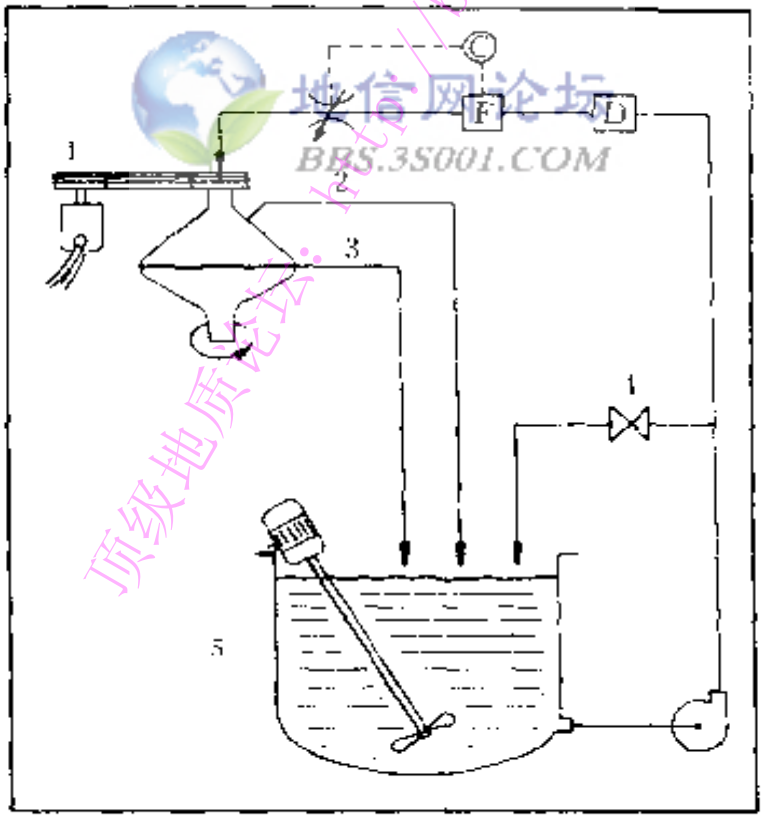


图 5 脱水分批给料循环示意图

1——22千瓦马达；2——溢流；

3——底流；4——回流阀；5——给料槽

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

用新的批料。

1976年秋，在南非建立了一座半移动式地面试验厂（图6）。该厂设在英美公司西霍尔丁斯矿（Anglo American's Western Holdings mine）的选矿厂附近，用选矿厂的新鲜尾矿进行试验。该工作是与英美公司的技术发展服务公司（Anglo's Technical Development Service）岩石力学部合作进行的。

该厂已运转了18个月。研究了南非以石英为主的、很细的金矿尾矿脱水中的若干变量。底流是按英美公司的技术要求而确定的。结果，决定在井下安装两台脱水机，并将底流与水泥混合作为一个正在作业的采场的充填料。这两台设备最近刚安装于井下。这些设备的流程示意图如图7所示。导致安设这种装置的试验工作，以及该矿充填的基本情况已由本书中帕切特（S.J.Patchet）的文章作了叙述。帕切特博士是英美技术发展服务公司岩石力学部负责人。

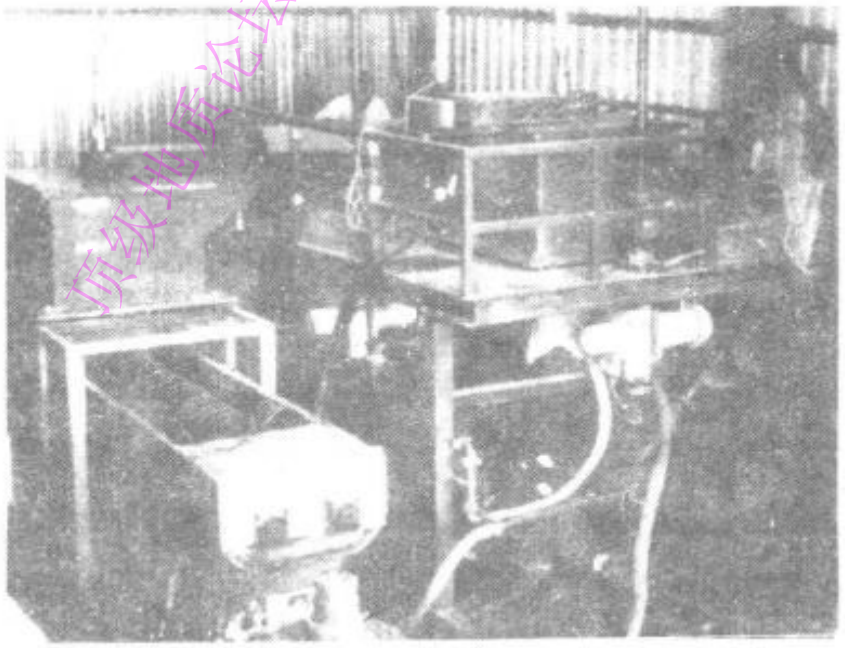


图 6　南非半移动式地面试验厂

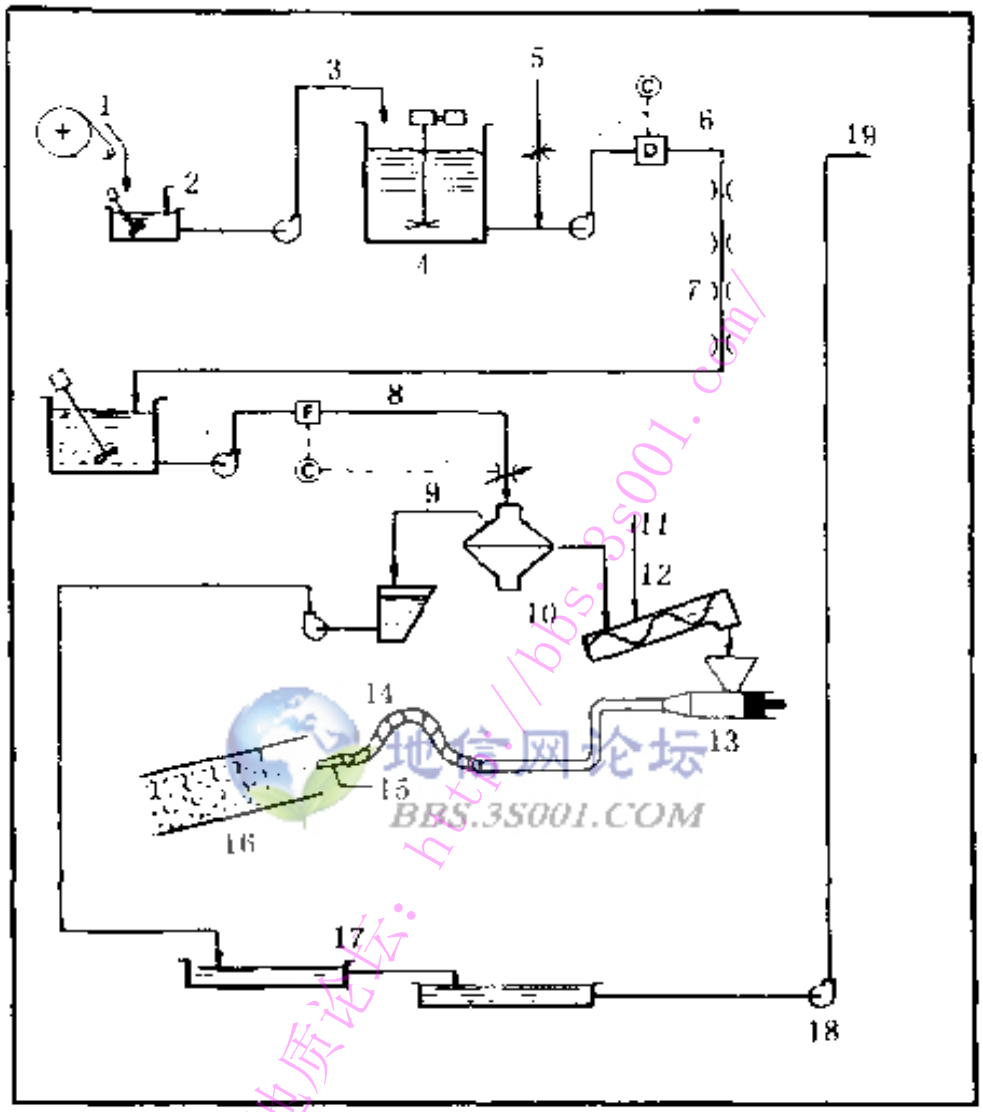


图 7　南非充填系统示意图

1——过滤后的尾矿，85%固体；2——再制浆水；3——68%固体；4——搅拌槽；5——稀释水；6——62%固体；7——装在竖井中的管柱；8——60%固体，60转/分，230升/分；9——溢流；10——底流；11——水泥；12——混合器；13——充填料浇灌；14——软管喷嘴；15——供风；16——采场；17——井下水仓；18——排水泵；19——矿井水处理。

从一开始，我们的计划就包括了底流与不同数量的水泥混合物的一系列强度试验。不同尾矿的有代表性的无侧限抗压强度列于表2。这一强度明显地大于在地面用常规方法加

地矿网论坛 BBS.3S001.COM
地质论坛：http://bbs.3s001.com/

等量水泥并含过量水时所得到的强度。

表 2　养护28天的无侧限抗压强度

单位：磅/英寸^2，括号内为兆帕

尾矿：水泥 尾矿来源	5:1	10:1	20:1	30:1	混合料浆浓度，固体%（重量）
A 矿山	931(6.42)	316(2.18)	143(0.986)	109(0.752)	74
B 矿山	1679(11.6)	436(3.01)	178(1.23)	111(0.765)	77
C 矿山	3150(21.7)	700(4.83)	349(2.40)	188(1.30)	82

注：1.圆柱体试件高 4 英寸、直径 2 英寸；
2.在震动台上制备；
3.在塑料袋中养护。

混凝土技术告诉我们，在其他条件相同的情况下，较干的或较稠的混凝土其强度也较高。换句话说，降低水与水泥比例时，其强度增高。这可用重量比来表示。在混凝土作业中，该重量比低于 1。对于高强度混凝土，该比值可等于0.4或0.5。比值为 1（水泥与水的重量相等）意味着混凝土很稀薄（低坍落度），强度也就相当低。

象尾矿那样细的物料，水-水泥与强度之间的关系将由于比表面积大大增加而不同。然而，趋向应是一致的。就是说，加水泥于固体重量为55%的尾矿浆时，其结果是强度要比加相同数量水泥于含水量为20%（重量比）尾矿浆的强度低得多。

当水泥加于该脱水机的底流产品时，由于浇灌后水不移动，或即使移动也非常慢，故水泥不会穿过物料而流失。这在采矿作业中是非常重要的，并意味着用等量的水泥能获得较高的强度，或者反过来说，如果希望达到现时实践的同样

地信网论坛 BBS.3S001.COM http://bbs.3s001.com/

强度，就可减少加入的水泥量，从而节省水泥费用。

象南非金矿尾矿那样细的物料，其比表面积很大，以致在相同含水量的情况下作对各种水泥含量的强度试验时，从尾矿旋转脱水机来的底流在水泥含量为20%是不能用的。因此，这些特定试验均在固体含量为74%的底流情况下进行（表2）。若减少水泥用量，那末可使用固体含量为76—78%的底流，这时最终强度却比表2中金矿尾矿的为好。

即使样品与样品之间有很大差别，迄今试验过的各种尾矿表明，当与水泥混合时，与常规技术相比，它确能增高无侧限抗压强度。还值得指出的是，试验时观察到分级和未分级的尾矿之间的不同。一般说来，未分级尾矿级配较好，显示的强度比分级尾矿要高。此外，浇灌级配较好的充填料，在其他条件相同的情况下，假定没有相当数量的粘土型颗料存在，其可压缩性较小。而存在粘土型颗粒时则可能相反。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

结　语

现型尾矿旋转脱水机适用于许多地下用途。使矿浆脱除大量的水，处理全尾矿流和控制溢流的能力，给矿山规划、设计工作者们提供了另一种工具。固体回收率、生产率或生产能力的改进，以及控制水（溢流）和底流（充填料）能力的提高，给研究更经济的采矿方法开辟了途径。除某些领域可直接应用之外，我们认为，这种充填设备对硬岩连续采矿系统的最终成功是必不可少的。

该设备对尾矿浆的连续脱水能力展示出以下的可能性：

1．能充填象南非金和铂矿床那样的典型缓倾薄矿体。充填料可在工作面后面用风力充填，在长壁法中差不多象喷射混凝土那样。

2．水平层状或板状矿床能被充填接顶，而只需少量的挡墙或封闭结构。

3．在使用机械化的水平分层充填大采场中，充填料浇灌可与采矿作业同时进行，不需构筑大量挡墙或脱水设施。安大略省萨德伯里地区矿山一些机械化水平分层充填的大采场即是一例。

4．添加更多水泥可获得作为特殊充填目的的高强度充填体。其例子如下：在第一分层切采中在底柱上面充填，使得往后打联络小巷更为容易；在采场末端边界上浇灌充填料，以便紧接着该充填体进行下一轮采矿；在特别重要的区域（如竖井、矿石或废石溜井、通风井等）中或在其周围充填；以及在已崩落或正在崩落的地段充填，因为不希望水流通过该区或者因为不能修筑适当的挡墙，从而不希望这种地段使用常规的水力充填。

地信网论坛 BBS.35001.COM

5．该系统可用于有效的矿柱回采中，在某些情况下可利用该脱水-充填概念来控制矿柱。

6．由于充填料能以矿浆形式从选矿厂输送到采矿工作面附近，能脱水和能容纳以及控制水分，并能用风力或机械浇灌这种用水泥稳固的充填料，这就给矿山设计工作者开辟了新的途径。例如，用所谓的“倾斜分层充填法”代替水平分层充填法自然是可能的。在这种最简单的形式中，设想一个采场是沿斜面从一底柱往上向另一底柱回采。其斜率可比崩落矿石的安息角稍大一点，于是矿石借重力即可从采场自溜到下一底柱，很象矿石在上向倒V形梯段回采工作面那样从工作面溜下。在这样的采场中，回采可用常规的凿岩爆破法进行；自然也可实行机械化采矿。在切采进行到上一底柱或副中段后，与水泥混合的脱水充填料就可沿斜面浇灌象切

采的那样宽度。这将是一种后退式采矿法，便于通风，易于充填，而且采准量最小。

7. 当生产能力提高时，尾矿旋转脱水机有相当大的可能性用来对贮存于地表的尾矿进行脱水。世界上许多地方水是宝贵的，因而回收它进行再循环使用是值得的。

8. 在某些工艺过程中，尾矿旋转脱水机配合或取代浓密机及过滤机的可能性是存在的。

尾矿旋转脱水机实际上可能应用于任何尾矿需要脱水的地方。随着时间的推移，会揭示出这种新概念将如何广泛地应用于尾矿加工过程。

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

水力充填料的原地脱水性能

G.赫格特　V.德·科龙佩*

摘　要

在水平分层充填采矿和矿柱回采中大量地使用充填料来给采矿过程提供工作底板和岩壁支护手段。希望使用细粒的选矿厂尾矿，但采矿作业的限制要求水力充填后的物料迅速地脱水和沉积。

本文讨论了影响充填料脱水性能的一些因素。当矿泥（－38微米）含量为10—25%时，渗透率下降到5厘米/小时以下。添加水泥则会更进一步降低渗透率。例如，对于尾矿与水泥比为30:1的混合料，两天内渗透率即可降到1厘米/小时以下。

在许多情况下，实验室和现场观察到的渗透率之间的相互关系不大，绝对渗透率和有效渗透率这些术语是有用的。为了测定原地渗透率，还描述了最近研制的测量仪器。

前　言

水力充填已成为采矿，特别是水平分层充填作业和矿柱回采的不可分割的组成部分。充填法能选别回采，为设备提供工作底板和改善围岩稳定性。用选矿厂尾矿作充填料既提供了廉价的充填料，也减少了尾矿在地面堆置时所需的场地。选矿厂尾矿一般可分级成细粒砂，这就关系到脱水性能，因

*G.赫格特（Hergel）和V.德·科龙佩（De Korompay）均为加拿大能源、矿业与资源部矿物和能源技术中心采矿研究实验所埃利奥特湖实验室研究员。

为这些性能直接影响到充填料液化趋势及设备能在充填体上面作业所需的时间。

目前，采矿工业使用标准的渗透率试验来预测采场充填料和渣料的脱水性能。然而，这些试验的结果很少能表达原现场物料的真实物理状态。为了补救这一不足，加拿大矿物和能源技术中心（CANMET）的埃利奥特湖实验室研制了现场测试仪器来测定现场充填料脱水性能。本文对这种测量仪和典型充填料的脱水性能作了描述。

水力充填料的脱水参数

在讨论渗透率的测量之前，先讨论一下粒状物料脱水的一些复杂性是合适的。

达西定律

在100%饱和条件下液体层流通过粒状物料时，是在连通的孔隙中进行的，可由达西定律描述如下：

$$v = k \cdot S \qquad (1)$$

式中：v——流速或脱水速度，其因次（距离/时间）可由流率（体积/时间·断面积）确定；

S——水力坡度，没有因次，亦即高度/距离；

k——渗透系数，与脱水速度的因次相同，常表示为厘米/秒。采矿中通用为渗透率，表示为厘米/小时。

举例来说，物料渗透率为0.1厘米/小时时可认为是不透水的。

液体粘滞性

对相同的粒状材料，渗透率随渗透液的粘滞性增加而急剧下降。水的粘滞性是随温度而变化的。例如，如图1所示，

当水温每变化4℃时，其渗透率将变化10%。因此，在渗透性试验期间必须测量液体温度；为了便于比较，都记录20℃时的渗透率。其他温度时所获得的渗透率则乘以粘滞系数（C_v）。

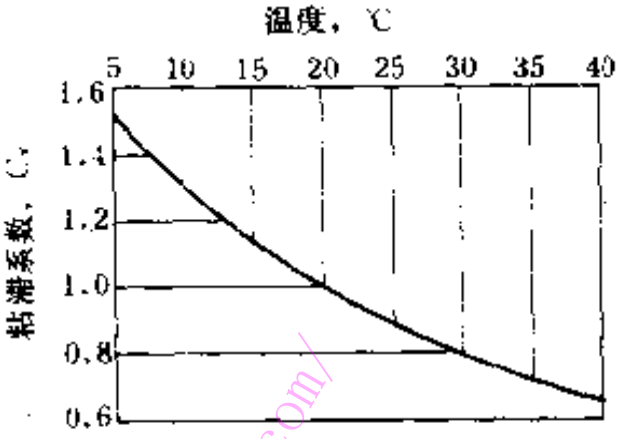


图1 水的粘滞系数值，C_v

饱和度

引起误差的另一点是要求100%的饱和度。在局部脱水粒状物料中，由于俘获空气的存在，这一饱和度很难达到。饱和度低于100%时，渗透率的变化具有重要的意义。华莱士[2]（Wallace）指出，饱和度愈高，渗透率也愈高。饱和度下降10%，很容易导致渗透率下降50%。这一点是十分重要的，因为早先浇灌的已部分脱水的充填料将具有低得多的透水性。由于各种粒状物料结构的差异，要得到该影响的数值关系是不可能的。

实验室条件与现场情况下的饱和度有很大的不同，“有效渗透率”这一术语在描述给定饱和度的渗透性时是有用的。水的有效渗透率（k_s）与绝对渗透率（k）在100%饱和度时之比叫做相对渗透率。这类似水库工程所用的术语[3]。

图2所示为萨德伯里地区矿山充填料的相对渗透率，它是由对应于液体饱和度的百分率而绘成的曲线。值得注意的是，当液体饱和度约为50%时，相对渗透率降到零。这表示已无重力脱水作用。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

胶结充填料中的水分含量按干重计约为10—15%[4]，若颗粒密度为2.9克/厘米^{3}和孔隙率为43.5%，则它相当于38—57%的液体饱和度，从而使图2与现场观察的水分含量很一致。

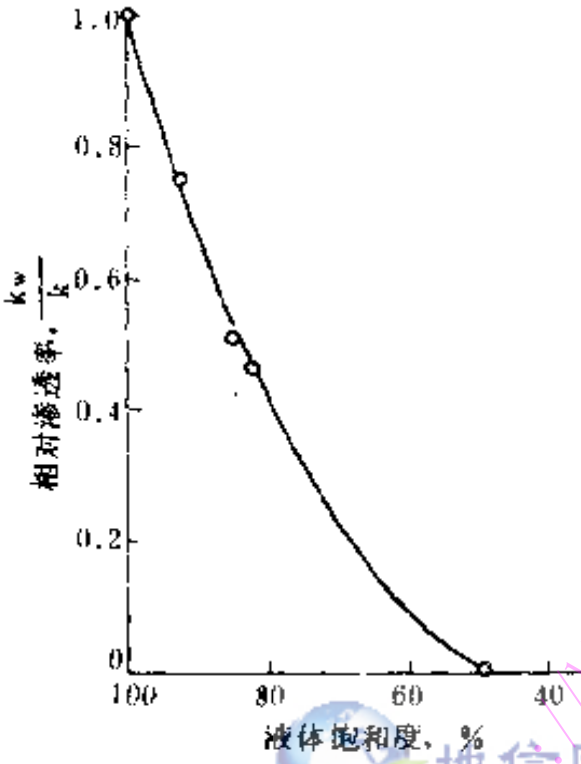


图2 水力充填样品的相对渗透率（孔隙率43.5%）

粒度分布

粒径分布影响到用来容纳和输送液体的孔隙的大小和孔隙的连通状况。通常描述粒径分布的参数是有效粒径和均匀系数。

有效粒径＝在粒径分布中细粒部分为10%时的物料粒径（D_{10}）

$$\text{均匀系数}=\frac{\text{占总物料60\%的最小颗粒的最大粒径}}{\text{有效粒径}}$$

根据黑曾（Hazen）按粒径分布对过滤砂得出的关系式[5]，可粗略预测粒状物料的渗透率。

$$k=C\cdot D_{10}^{3} \qquad (2)$$

式中：

k——渗透率，厘米/小时；

D_{10}——在分布为10%时细粒点的有效粒径，毫米；

C——系数，最常用的值为3600/厘米·小时。

一般说来，选矿厂尾矿是相当均匀的细砂，其均匀系数

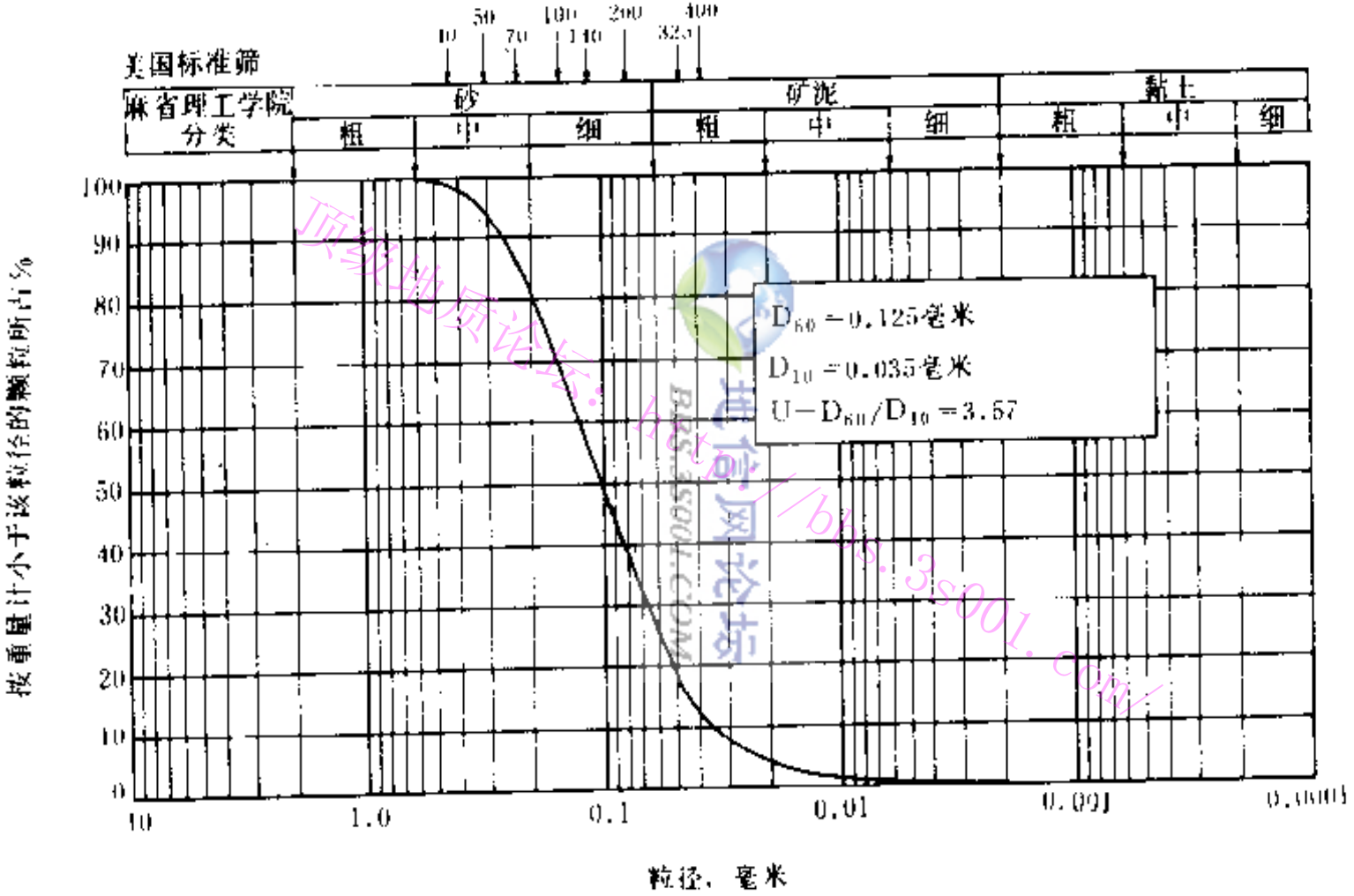


图 3　用作充填料的选矿厂尾矿粒径分布实例

顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

约为2。图3所示为一典型的粒径分析。D_{10}为0.035毫米时得到的渗透率为4.4厘米/小时。磨碎的大多数颗粒是多角形的。非常细的部分称为矿泥，其粒度为－400网目或－38微米。这些矿泥的存在将使渗透率大大下降。

图4所示为不同研究工作者在实验室中对各种充填料测得的矿泥含量百分率与渗透率之间的关系。该图表明，当矿泥含量百分率增至12—25%以上时，渗透率则下降至5厘米/小时以下。颗粒形状、密实度、粒径分布和孔隙率的差异，可能是所得结果变动范围较大的主要原因。

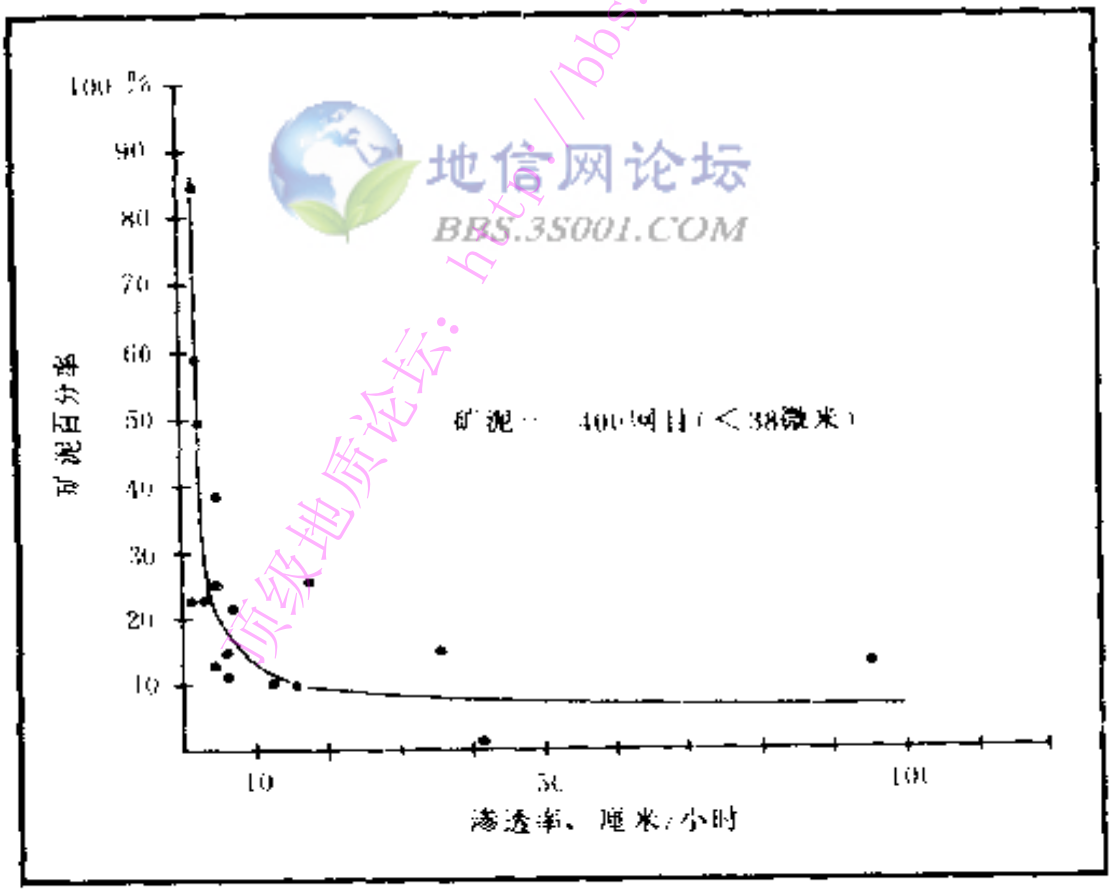


图 1　矿泥百分率和渗透率之间的大致关系曲线

地信网论坛 BBS.3S001.COM
资源地质论坛：http://bbs.3s001.com/

孔隙率

随着浇灌期内时间的进程或密实度的增大，充填料的固结将由于有效孔隙率的变化而使渗透率大大下降。有效孔隙率(n)定义为连通的孔隙体积(V_v)与总体积(V)之比：

$$n = \frac{V_v}{V} \qquad (3)$$

砂质物料具有0.3～0.5的有效孔隙率，在低流速水形成的沉降物中该值一般较低。

科泽尼(Kozeny)[6]指出，渗透率(k)取决于单位体积中孔隙率(n)和颗粒总表面(S_v)，表示如下：

$$k = \frac{1}{5 S_v^2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \qquad (4)$$

确定粒状物料的渗透率和孔隙率就能算出精确度达±5%的比面积[7]。影响颗粒比面积的主要因素是粒径，颗粒比面积反比于粒径。因此，对于给定的粒径，由密实度引起的渗透率的变化，主要取决于孔隙率。根据上面的公式，孔隙率从0.37变到0.47就会使渗透率增加1.8倍。

水泥的添加

为获得较高强度的充填体而在选矿厂尾矿中加入水泥的做法，对脱水性能带来不利的影响。渗透率通常随养护时间的增长而降低[8]。图5表示普通硅酸盐水泥与尾矿之比为1:30和1:8时，时间对脱水的影响。图中表明：两天后，水泥与尾矿之比为1:30时，渗透率约降至1厘米/小时，而通常用作工作底板的1:8的水泥尾矿混合物，则几乎是不透水的。但是，在该工作底板上行驶的机械设备会使充填体产生许多裂隙，故现场的脱水性能比实验室试验所预期的要高得多。

分层作用

地矿网论坛 BBS.35001.COM

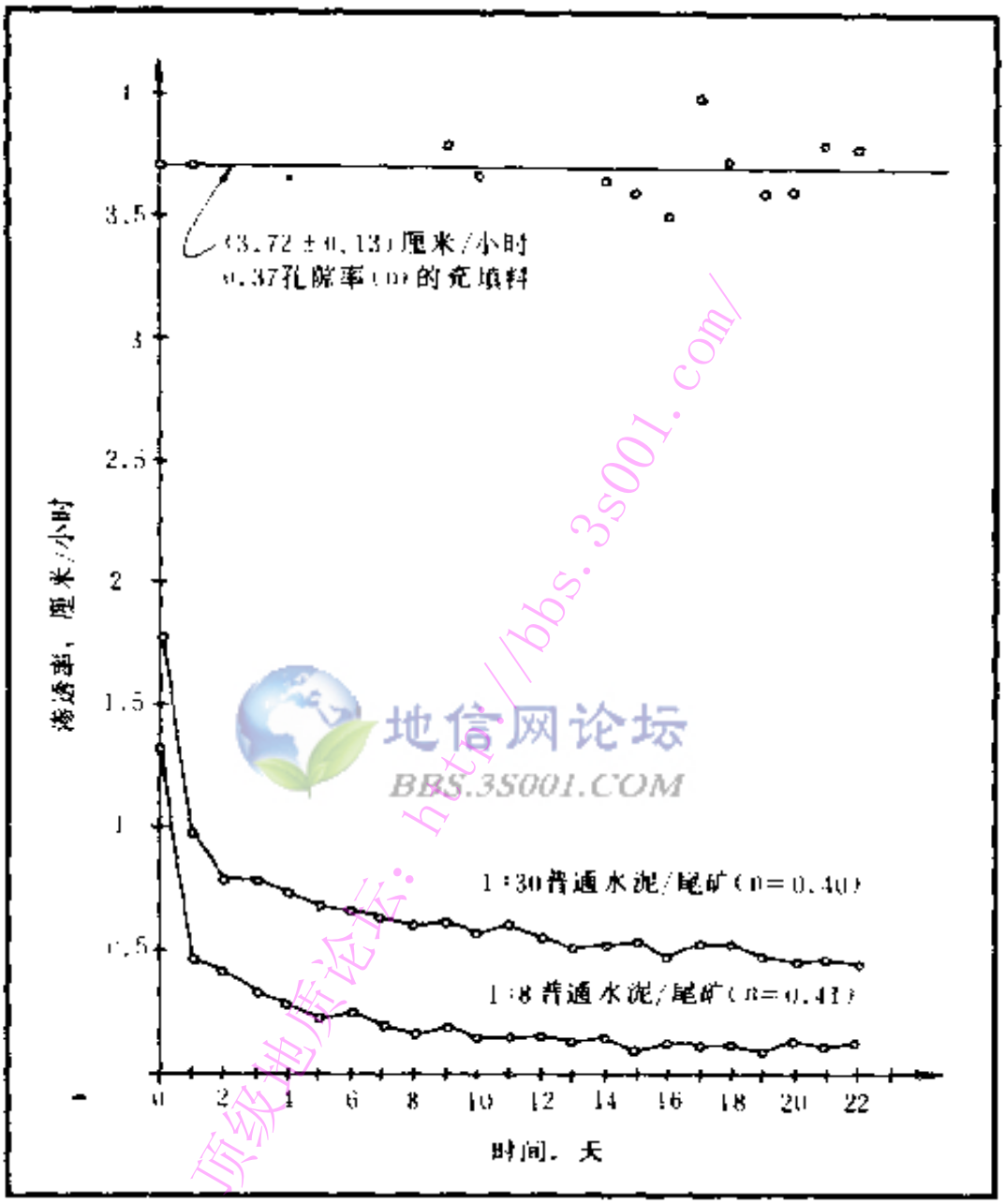


图 5　100 %饱和度时渗透率随时间变化

在水力浇灌充填料时，细粒级的沉降速度比粗粒级慢得多。一部分细粒级将随倾析水流走，但采场中物料的沉降则由于粗、细粒级沉降速度的差异而出现分层作用。即使在所谓大量浇灌情况下，通常观察到的粗粒级料层和细粒级料层的厚度在1.5毫米与100毫米之间。渗透率测量显示出，水平

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

方向的渗透率比垂直方向的高一倍[9]。当普通水泥随细粒级一同沉降时，各向异性更为显著。

渗透率的测定

前面已概述了控制充填料脱水性能的一些因素。这些复杂因素导致人们期望用实验室手段来预测和控制渗透率。

实验室测定

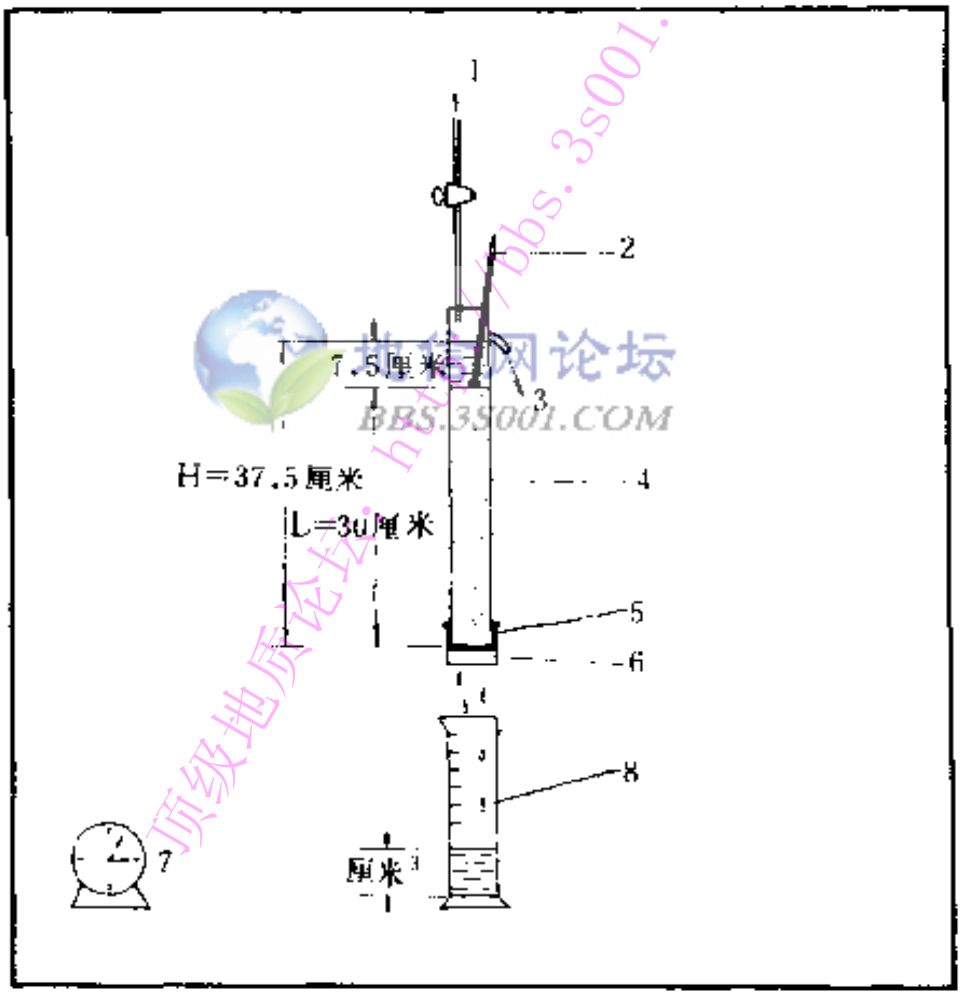


图 6　实验室渗透率试验

1——供水；2——温度计；3——排水；4——渗滤管，直径 3.2 厘米（A＝断面）；5——100 网目筛网；6——座圈；7——计时器；8——测液量和计流率（厘米/小时）的量筒。

顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/
地质网论坛 BBS.3S001.COM

给定充填料的脱水性能的大多数预测都以实验室的试验为依据。图6显示了一个典型的试验装置。试验的要素有：获得全饱和度、用恒定水头得到稳定液流、以及记录液体的温度和孔隙度。

按如前所述的液流参数，显然渗透率随温度和饱和度的不同而不同。因此，实验的结果应作为绝对渗透率（k）来提出。k值的定义是：在20℃时，在1厘米水头的水力坡度影响下，在饱和度为100%的材料中的水流速（以厘米/小时为单位）除以视流径（厘米）。例子如下，式中使用图6的符号。

渗滤管断面（A）	=8.04厘米^2
样品高度（L）	=30厘米
水柱高度（H）	=37.5厘米
流量（F）	=50厘米^3/小时
温度（T）	=24.2℃
粘滞系数（C_v）24℃/20℃	=0.9

$$k=\frac{F\cdot L\cdot C_v}{A\cdot H}=4.5\text{厘米}\ \text{小时} \qquad (5)$$

如果没有特殊说明，本报告中所援引的全部渗透率均为以标准渗透率试验为依据的绝对渗透率。

现场测定

如上所述，显然绝对渗透率并非从现场获得，即使根据实验室试验结果来预测现场的有效渗透率也是困难的。此外，在管道输送中会出现粗粒级磨碎的现象，正象一个实例所表明的那样，在输送1800多米时，渗透率在地表时为15厘米/小时，运到采场后降为5—7.5厘米/小时[7]。

现场脱水性能的测定可在水井中用落压试验法进行，但

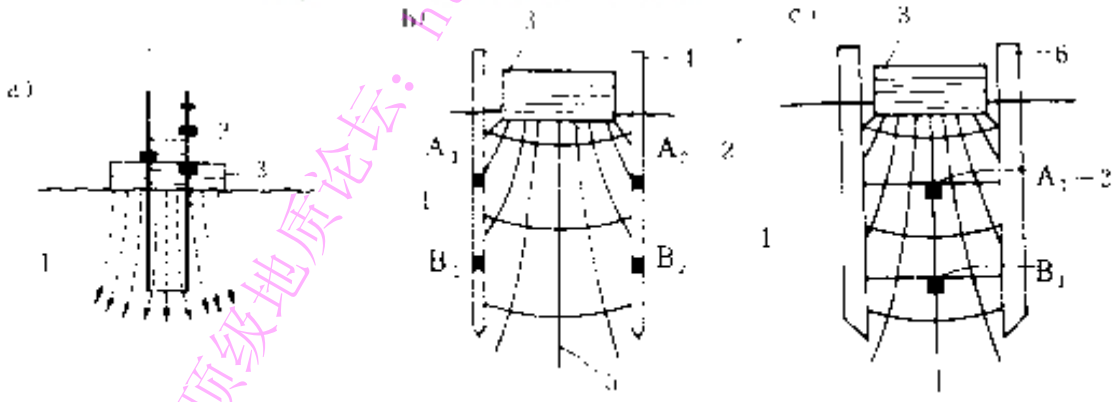
在地下开采情况下使用此法却往往是不可能的。用作实验室渗透试验的充填料的现场取样能引起许多误差，如孔隙率和饱和度的变化等，并且考虑到试样尺寸，也不大可能提供真实答案。

为了填补适合现场仪器测量的空白，加拿大矿物和能源技术中心埃利奥特湖实验室研制和试验了三种现场测垂直方向渗透率的方法[31,127]。

方法之一称为管式渗透试验仪；将装有一组电极的一根钢管插入充填料，脱出的水量用一个电压计和一个秒表来测量（图7a）。

另两种方法是使用示踪技术，用氯化钠盐水和交流电极组来测量两电极水平之间通过示踪液流的时间间隔。其中之一称为双棒式渗透试验仪，它要求将装有电极的棒装入在充

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/



a）管式渗透试验仪测单位时间的脱水体积　b）无扰动充填料中测量渗透率的双棒式渗透试验仪　c）浇灌充填料期间埋设电极的测量电极式渗透试验仪

图7　三种现场渗透试验仪。
1——充填料；2——电极；3——给水环；4——安有电极的棒；5——近似流线；6——支承柱。

填料中用麻花钻钻成的孔内；另一种是测量电极式渗透试验仪，它可在浇灌充填料之前进行埋设（图7b和图7c）。

管式渗透仪操作原理比较简单。钢管直径约7.5厘米，高40厘米，管子一半高处有一标志，并将管子埋入充填料中直至标志处为止（图8），用水平仪校正使其垂直。

在实际采矿条件下的水力充填料，由于排水和蒸发而通常只是局部饱和。为了进行有代表性的试验，需要在实际测量之前在管内和靠近管子处向充填料注水，使充填料回复原来的饱和度。注水时间一段1—2小时即可。

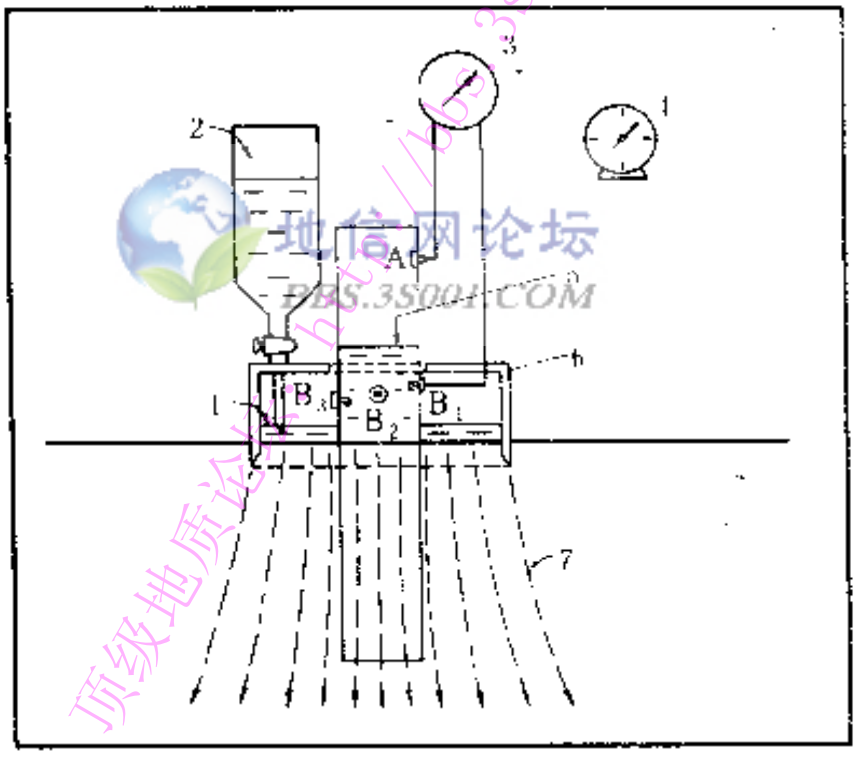


图8 管式渗透性试验仪

（A——接地；B——水位接触电极）

1——给水环内液位；2——供水；3——电压表；4——计时器；5——管式渗透仪中的水位；6——改善液流状况的给水环；7——近似流线

管子接一根地线（A）和间距约1厘米的三个正极（B），

如图 8 。测量之前，借助滴管将水排到正好在正极之上。电压表联结于管子上，当水位下降到电极 B_1 以下而断开电流时，即开动秒表。当依次降至接触电极 B_2 和 B_3 时，电流断路时间也予以记录。两次电流断路之间的脱水体积是在实验室用实验的方法获得的，因为表面张力对接触电极的影响不能直接测得。

渗透率（k_f）计算如下：

$$k_f = \frac{60H}{t} \qquad (6)$$

式中：H ＝各电极间的垂直距离，厘米；

t ＝电极间水位的过渡时间，分。

紧靠管子的充填料所造成的干扰，以及从管底脱水时间的扩散，会给结果带来一些误差。为了减少水从管底排出时的扩散，可在管子外设一提供水分的给水环，如图 8 所示。

更精确的方法是双棒法和测量电极法，它们能在充填料不受破坏的情况下测量渗透率。两种方法均是用交流电测量向前推进的示踪液（氯化钠盐水）的位置。双棒式渗透试验仪如图 9 所示。它由装有电极的两根棒、装有安培表的仪器盒、变压器、电极选择器、连接线、带供水管的水箱、盐水箱和给水环组成。

在胶结充填料中以约24厘米的距离钻孔，并将测量棒置于孔中。测量棒是由几段塑料管和几个相距10厘米的电极（不锈钢环）组成。所用的14伏、60周的交流电源可从常规115伏、60周的动力线经一小型变压器获得，或从轻便的电源组获得。电极间交流电的强度由安培表测得。试验期间，电极选择开关联结相应的电极。

试验之前，在两棒之间将直径22厘米的给水环压入充填

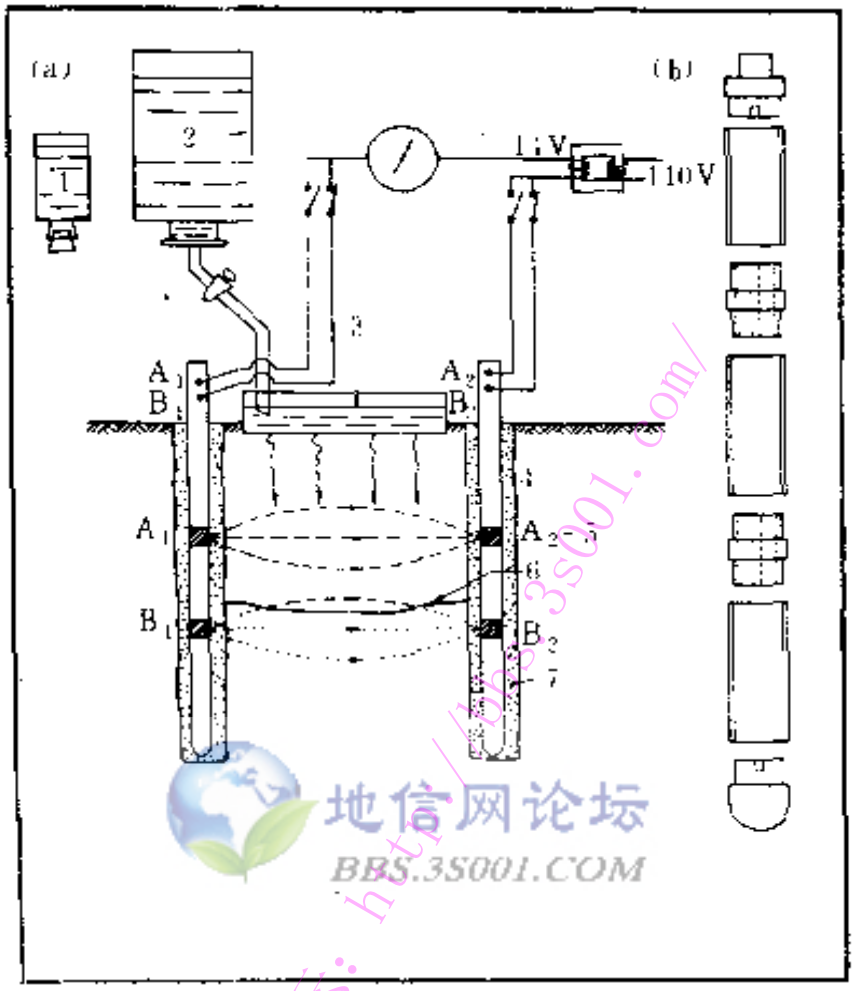


图 9　双棒式渗透性试验仪和棒组件

a）现场布置：1——盐水；2——水；3——恒定水位；4——充填料；5——电极；6——示踪液面；7——重浇的充填料。

b）棒组件（未按比例）：1——塞头；2——塑料管（直径1英寸）；3——不锈钢电极；4——底塞，连结全部零件的中心棒和铅丝未示出）。

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

料中大约1.5厘米的深度，对充填料注水一段时间，以获得高的饱和度。试验期间，在充填料上面保持约2厘米高的恒定水位。随后在给水环内加盐水（约6000ppm NaCl），并用秒表测量盐水面从电极A_1-A_2降至B_1-B_2的时间。电流强度随仍在电极位置之上的示踪剂（盐水）面而变化，利用具有

同样孔间形状的电极即能自动消除该电场效应。典型现场试验的记录如图10所示。从图中可见，当盐水面通过电极时，电流强度即升至一峰值，盐水面经过电极后即下降。实验室试验表明，电流强度增高是示踪剂位置的最可靠指示标志，已观察到，如盐水和孔隙空间的液体之间存在密度差时，氯化钠盐水将在多孔介质中向下运动。所用的盐水，其浓度低于8000ppm时，能防止使水力坡度计算产生误差的低粘性和高粘性液体混合物的形成

应当考虑到在盐水和孔隙水之间由于存在盐分差而发生

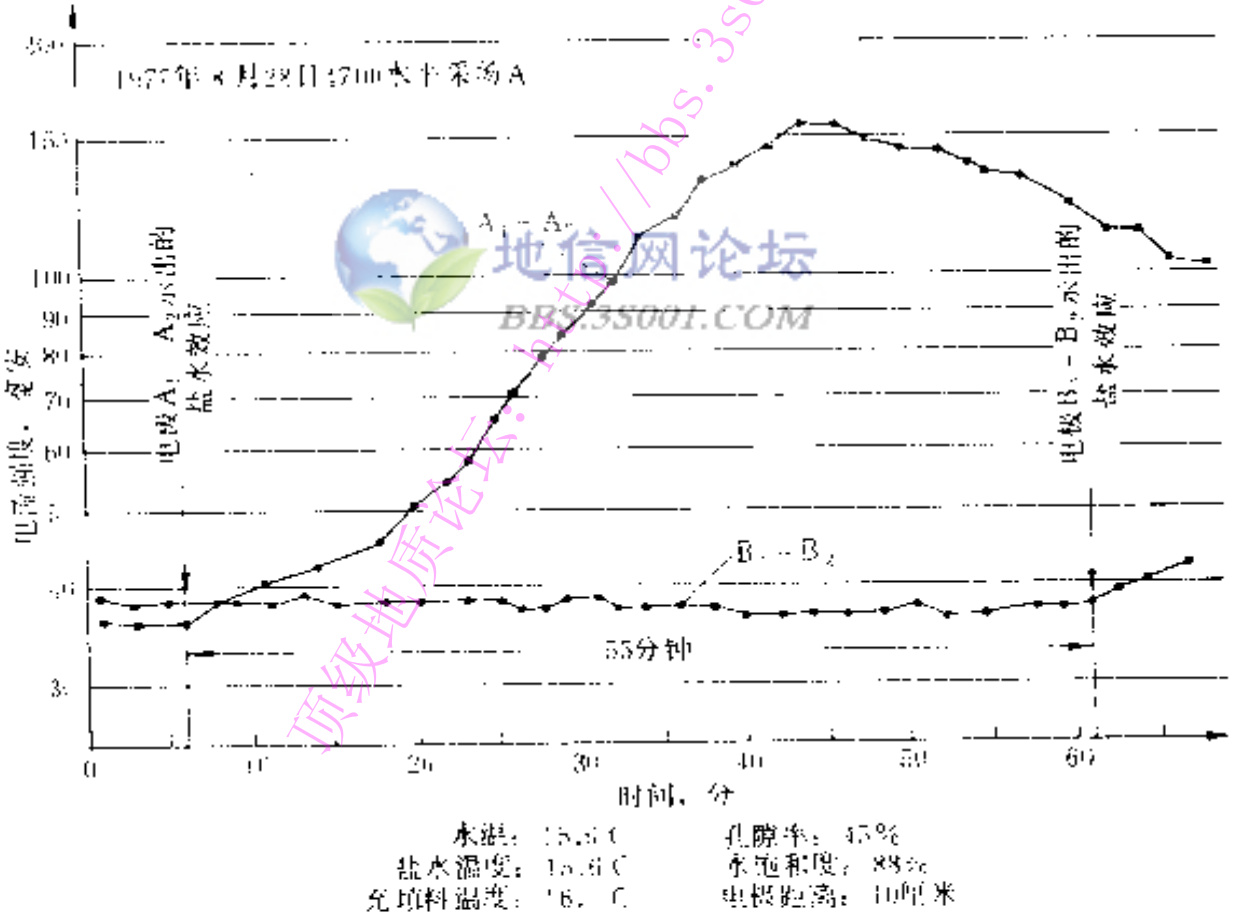


图10　双棒式渗透仪的现场记录

扩散。但实验表明，该扩散速度约为0.02厘米/小时，因而其

影响可忽略不计。

如果给水环中液位高度保持在距充填料表面2厘米以下，渗透率的计算即可简化。在这种情况下，水力坡度保持为1，即一个单位的水头/一个单位充填料饱和长度[13]。现场渗透率（k_f）的计算如下：

$$k_f = \frac{D \cdot n}{T} \qquad (7)$$

式中：D——电极间的垂直距离，厘米；

T——电极间的过渡时间，小时；

n——有效孔隙率（十进制小数）。

一个典型例子，T＝0.92小时，D＝10厘米，n＝0.45时得到的现场渗透率为4.9厘米/小时。

如果将电极放在支柱之间，并在充填料浇灌期间埋设（图7c和图11），安装两棒就能少花力气。这些测量电极是由外径12毫米、内径8毫米、长32毫米的塑料管组成。塑料管末端用两个环氧树脂隔开的石墨塞塞住。铅丝连接在石墨塞上并汇集于中部。它的测量原理、电源要求和示踪液体的使用均与双棒式渗透仪相同。

实验室和现场的观察结果

为了把实测的渗透率校准到标准状态，现场试验必须取得下列数据：水温、盐水温度、充填料温度、孔隙率和水饱和度。后两个数据是根据实验室充填料样品测得的。

对各种现场测量装置进行对比性试验是有意义的，为此将上述三种仪器在井下两个地点进行了试验。多电极渗透仪是在浇灌充填料之前设置的，并在充填一周后进行现场渗透率试验，然后进行双棒式和管式渗透试验仪的试验，如图11所示。

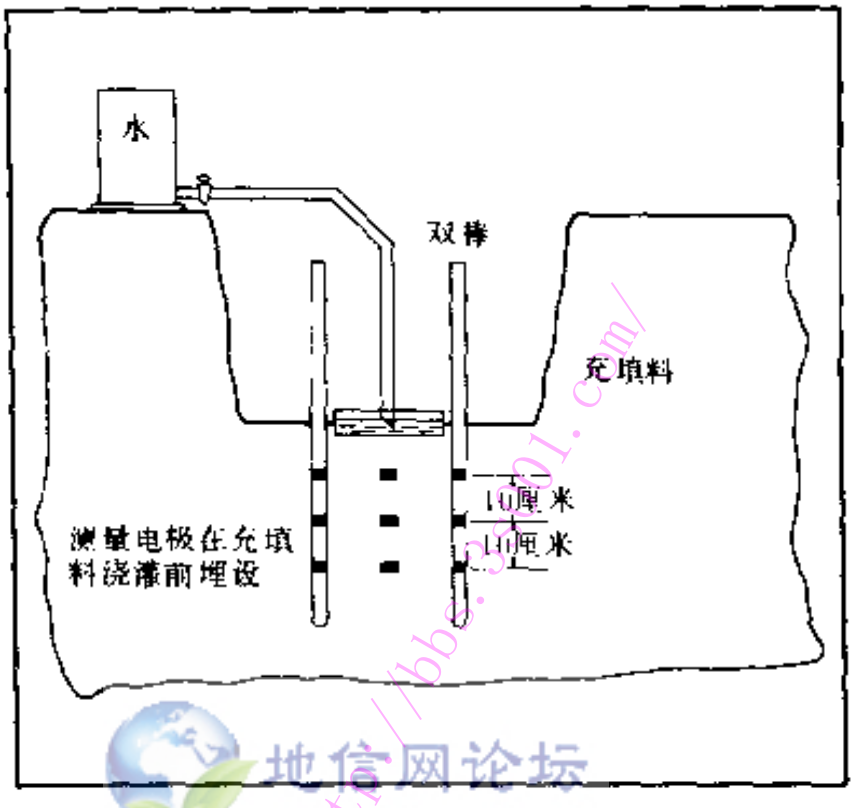


图 11　现场评价时双棒和多电极的布置情况

结果如表1所示。表中的结果表明，这三种不同型式的装置所获得的渗透率具有良好的一致性。但实验室数据与现场数据的一致性是不显著的。首先，现场结果是在20℃时调整水的粘滞性。试验点充填料样品水饱和度的分析表明，即使试验点注水1.5小时，所得物料的饱和度仅为88%。图2提示，在100%饱和度时，渗透率应约高出60%以上，约9厘米/小时。

同样充填料的实验室渗透率约为3.7厘米/小时，大大低于预期的数字。然而，实验室样品的孔隙率为0.37，而现场样品则约为0.47。这一差别值得注意，据方程(4)如果实验室样品的孔隙率为0.47，则渗透率增加1.8倍。这样校正就使实验室的值达到10.1厘米/小时，与现场数据得到了较好的一

表 1　某矿山4700水平充填料渗透率、厘米/小时

现场渗透率（T = 15.6℃，饱和度85.5%）				
位置	孔隙率n	双环式仪	测量电极式仪	管式仪
A	0.45	4.7±0.2厘米/小时	4.9±0.3厘米/小时	5.1±0.1厘米/小时
B	0.48	5.2±0.2厘米/小时	5.0±0.3厘米/小时	5.4±0.2厘米/小时
现场渗透率（调整到T = 20℃，饱和度100%）				
位置	孔隙率n	双环式仪	测量电极式仪	管式仪
A	0.45	8.6厘米/小时	8.8厘米/小时	9.5厘米/小时
B	0.48	9.3厘米/小时	9.0厘米/小时	9.7厘米/小时
实验室渗透率（T = 20℃，饱和度100%）				
标准试验		n = 0.37		8.7厘米/小时
标准试验		n = 0.47		10.1厘米/小时
“黑普”关系式		D[illegible]=0.[illegible]毫米		7.8厘米/小时

地信网论坛 BBS.3S001.COM
http://bbs.3s001.com/
资源地质论坛

致性，并且与矿山职员预期的10厘米/小时很接近。未校正的现场数据与黑普关系式得到的实验室值之间的良好一致性是巧合的

充填料的脱水要求

这里，我们已评述了脱水参数的复杂性，介绍了实验室和现场渗透率的测量方法。我们也懂得，为了改善脱水性能可以使用水力旋流器来排除充填料中的一些矿泥，以及在降低渗透率的条件下用全级配物料来改善充填料的稳定性及强度。

从充填作业的调查[1]得知，均匀系数在2.4至8的范围，绝对渗透率在5至35.5厘米/小时之间，矿山经营者谁都不抱

怨充填体未能起主要作用。

这里当然要分析通常引用的10厘米/小时这一数字作为有效渗透率的最低要求。所谓最低要求似乎为颇灵活的数值，它取决于采矿周期和充填料的特定功能。鉴于为现场脱水控制已研制了相当简单的装置，因而人们希望，能够进行进一步的现场测量来评价某一特定采矿作业中可取的渗透率。但是，由于孔隙率、液体的粘滞性和饱和度等的变化，渗透率可发生急剧的变化，因此单用渗透率这一参数来恰当地表征充填料就不够了。

参 考 文 献

[1] Tschebotarioff, G. P., *Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures*; McGraw-Hill Book Co., Inc.; pp. 654; 1951.

[2] Wallace, M. I., Experimental investigation of the effect of degree of saturation on the permeability of sand; S.M. thesis, Dept. of Civil Engineering, M. I. T., Cambridge, Mass.; quoted in *Soil Mechanics*, by Lambe, T. W., and Whitman, R. V.; John Wiley and Sons, Inc.; pp. 553; 1969.

[3] Calhoun, J. C., Jr., *Fundamentals of Reservoir Engineering*; University of Oklahoma Press; pp. 417; 1957.

[4] Singh, K. H., Cemented hydraulic fill for ground support; *CIM Bulletin*, Vol. 69, No. 765, pp. 69-74; 1976.

[5] Hazen, A., Discussion of dams on sand foundations; by H. C. Koenig; *Trans. Am. Soc. C.E.*; Vol. 73, p. 199; 1911; quoted in (1).

[6] Kozeny, J., Uber kapillare Leitung des Wassersim Boden; *Wien Akad. Wiss. Sitz. Berichte*; Vol. 132-A; pp. 271 ff.; 1927; quoted in Pirson, S.J. (7).

[7] Pirson, S.J., *Elements of Reservoir Engineering*; McGraw-Hill Book Co., Inc., pp. 411; 1950.

[8] Weaver, W. S., and Luka, R., Laboratory studies of cement-stabilized mine tailings; *CIM Bulletin*, Vol. 63, No. 701, pp. 988-1001; *CIM Transactions*, Vol. 73, pp. 204-217; 1970.

[9] Pellibone, K. C., and Kealy, C. D., Engineering properties of mine

tailings; *Proc. A. S. C. E.*; pp. 1207-1225; 1971.
[10] Stewart, R. M., Hydraulic fill slurries; *CIM Bulletin*, Vol. 53, No. 581, pp. 687-702; 1960.
[11] de Korompay, V., Determination of the in-situ vertical permeability of mine backfills and waste materials; Dec. 1976; unpublished report.
[12] de Korompay, V., Tube permeameter to measure the insitu permeability of deposited hydraulic backfills and waste materials; Nov. 1976; unpublished report.
[13] Wisler, C. O., and Brater, E. F., *Hydrology*; J. Wiley and Sons Inc., New York; 1965.
[14] Dickhout, M. H., The role and behaviour of fill in mining; Int. Symp. Mine Filling, Mt. Isa; Aust. I.M.M.; pp. 1-11; 1973.

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

水砂充填的动电脱水

R．H．斯普鲁特　D．J.凯尔什*

摘　要

在水砂充填中，对慢速沉降的细颗粒（矿泥）用埋设在充填料中的电极通入直流电进行脱水和密实以形成坚实的充填体。脱水速度和电力消耗取决于所处理尾矿浆的物理性质和化学性质。在实验室试验中，来自美国爱达荷州、科罗拉多州和墨西哥州金属矿山的尾矿的动电效应良好。超细粒矿泥和煤矸石脱水试验的结果也很鼓舞人心。

美国矿业局的这个报告评述了爱达荷州北部两个矿山的现场试验，描绘了科罗拉多州亨德森矿和墨西哥州的拉斯托里斯矿最近使用的动电脱水装置的情况。此外还讨论了关于动电处理方法、成本，以及有关矿工保健和安全方面等问题。

前　言

水砂充填的效果如何往往受易于脱水的粗颗粒砂的可利用量的限制。当选矿厂采用较细的磨矿循环来提高矿物回收率时，这个问题就显得更为严重，它使－20微米粒级尾砂（矿泥）的比率增多了，这种沉降速度很慢的细粒物料用作充填

* R．H．斯普鲁特（Sprute）和D．J．凯尔什（Kelsh）分别为美国矿业局斯波坎采矿研究中心电气工程师和化学研究员。

砂是令人讨厌的。大多情况是将矿泥用水力旋流器或沉淀池从粗粒中分离出来，然后细泥送往地面的大尾矿池中，只有粗粒部分用作矿山充填。

在充填砂中加入更多的矿泥既能增加充填料的来源，又能减少地面的细泥贮存设施。如果这种细颗粒物料能均匀分布并充填在粗颗粒空隙中，就可能获得强度大而密实的充填体。但是要成功地使用更多的矿泥，则需要一种能加速其沉降和有效的脱水方法，以形成密实和强度高的充填体。

运用悬浮于水中固体颗粒表面带有电荷的有利条件，在布置于尾矿浆内的电极间施加相当高的直流电位差，可使颗粒较快地沉降和沉积脱水。美国矿业局的研究表明，对爱达荷州北部一些金属矿山的含硅尾矿[1-5]，阿巴拉契亚山脉两个洗煤厂浓密机底流[6]，以及一些未发表过的煤矿、金属矿物的物料，使用该技术一般是成功的。但是，并非所有的矿泥或泥浆对动电脱水都有响应能力，例如，来自酸性矿井水处理厂的泥浆[7]和来自一个大火力发电站洗涤器的泥浆（资料未发表过）用该方法就不成功。影响其使用效果的矿浆物理性质有：电导率、粒度组成、含水量和表面电荷密度。一些化学性质也影响动电脱水效果，但其重要性视每种物料的具体情况而不同，故难以表征。

电泳*和电渗的动电现象是所观察到的效应的主要原因。在适当方位加一个电场，即对于带负电荷的颗粒，可在接近矿浆底部放置一水平方向的正电极，而在矿浆表面则设置漂浮的负电极，这样就能加速颗粒的沉降。对爱达荷州华莱士的星矿（Star mine）浓密矿泥的现场试验是电泳沉降有效性

---

* 电泳是指受外电位作用的带电荷小颗粒通过静止液体而进行迁移。

的例子，这将在后面叙述。

沉降完成后，可用变换其极性来促进其进一步脱水，用设在底部的负极来脱水。靠近带负电荷周围颗粒的水含有大量溶解的正离子，因此事实上赋予这些水以正电荷。在假设下矿浆中两个分离的电极之间的电场中，由于密实度相当大，固体颗粒不会明显地移动。但水则受迁移正离子的粘滞电力作用趋向带负电荷的负极。水受直流电位差作用而移动称之为电渗作用。

电渗流与孔隙尺寸没多大关系，因此，该方法对于细颗粒浓密矿浆的脱水对人们具有很大的吸引力，此时由于孔隙尺寸小，通过沉积物的水流极微。该方法对这种材料的效果可从下面试验结果的叙述中得到说明。

实验室试验

对于特定矿浆动电脱水的可行性，可由实验室的直接试验得到最好的确定。影响该过程效率的诸因素相互间复杂的作用排除了单独使用这些物理特性作为性能的可靠预测。诸如电流密度、电流转向、电极形状、沉降时间等使用方法上的变化，也可以对给定矿浆的动电效应起特殊的和重要的作用。

图1所示为斯波坎采矿研究中心用来评价动电效应的实验室装置。该装置可对分别制订的不同试验条件的几个样同时进行试验。每半小时数据可自动打印出来。该装置运行一次或二次，通常就能确定脱水效率、电力消耗及优先选用的处理方法。



图 1　动电脱水试验装置

现场应用

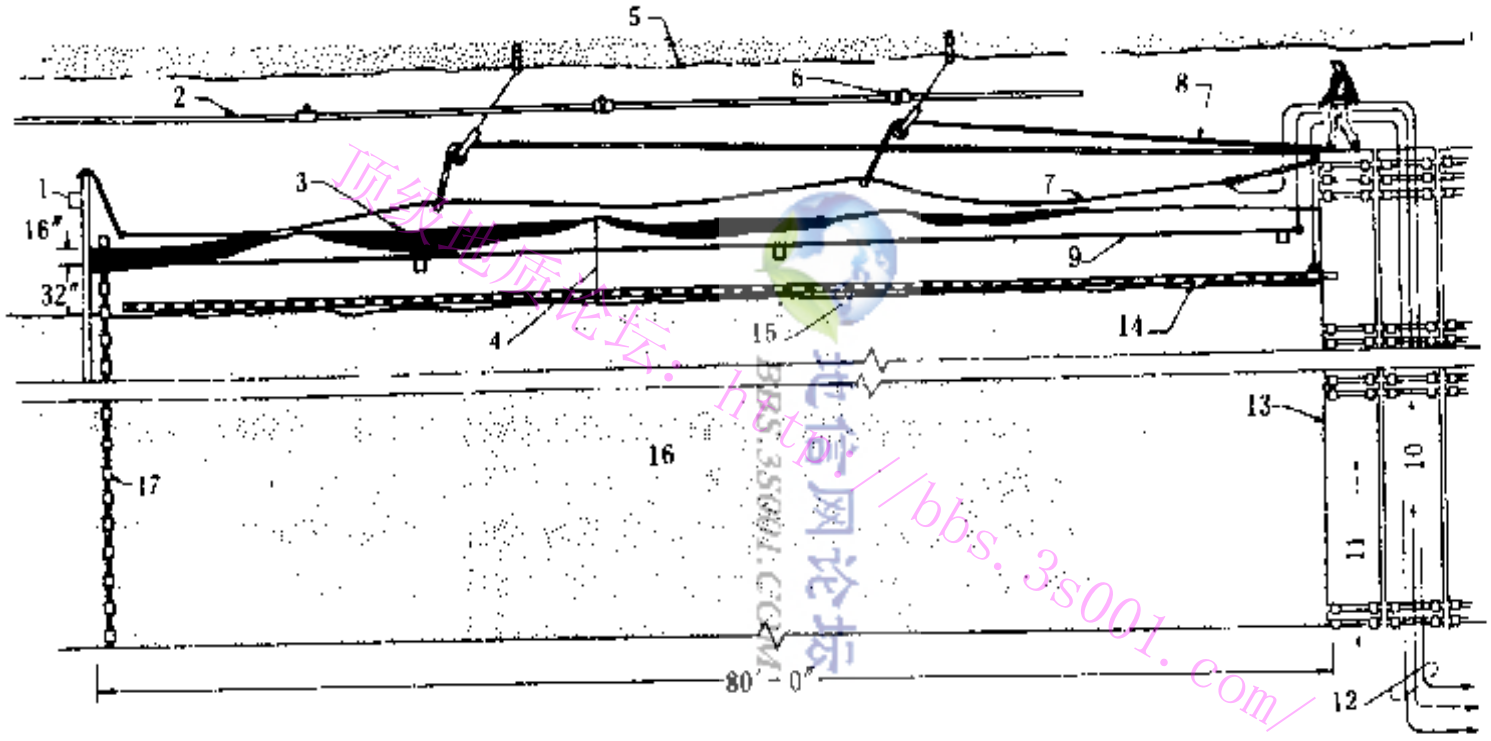
爱达荷，未分级尾矿试验

1974年在爱达荷州赫克拉矿业公司(Hecla Mining Co.)经营的两个金属矿山首次进行了动电脱水的井下现场试验。试验的详细结果已在美国矿业局的研究报告中发表[4,5]，这里只作一简单介绍。

第一个试验是在“星”矿，尾矿直接从选矿厂取得。几乎没有分级，即矿泥仍与通常作为充填料的较粗组分混在一起。

采场被充填至防水砂墙的顶部，固体完全沉降后即将表层水倾析掉，充填料顶部留下四处深达16英寸的稀粥样矿泥注（图 2）。

该试验使用的三层电极系统将充填料分成两层：上层为难脱水的矿泥，32英寸厚的下层为容易脱水的粗粒砂。55安



顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/
地质网论坛 BBS.3S001.COM

图 2 “星”矿试验采场布置纵剖面

1——木制砂墙；2——尾矿充填管线；3——矿泥沉淀物；4——为试验浇灌的充填料；5——顶板；6——三通接头；7——上部电极金属网；8——尼龙绳；9——中部电极金属网；10——人行道；11——矿石溜井；12——直流电源电缆；13——木支护天井；14——直径为2英寸的铁管作底部电极；15——充填料底板；16——分级尾砂充填料；17——直径2英寸溢水塑料管。

塔的直流电在两层中交替使用。具体作法如下：对上面一对电极供电25分钟，水被吸引到带负电荷的中部电极；停电30秒；对下面一对电极供电3.5分钟，水即被吸引到充填料底部。这种30分钟的循环在整个脱水期间反复地进行。

两个半小时以后，充填材料即变硬到能在表面上行走。再继续处理13小时，矿泥部分的强度即达475磅/英寸^2，粗粒部分为125磅/英寸^2，形成一个干燥而坚固的表面。耗电量计为300千瓦小时（单价0.005美元/千瓦小时，即等于1.5美元），但事实上可更早些就停止处理。动电处理大约密实了矿泥 7码^3，粗砂34码^3。

据矿工们报告，固结的矿泥给往后采矿提供了比常规情况更好的工作底板。但是，如沉降期内矿泥不与粗砂离析的话，就可获得更好的充填体。在浇灌之前将矿浆进行较大量的脱水，可把这种离析降至最低限度。我们的实验室试验表明，来自爱达荷州北部矿山未分级尾矿的矿浆可用沉降70%重量的固体（按体积计则为47%）来密实。该产物是摇溶性的，当再制成浆时很难进一步沉降，在缓和搅拌下还很容易流动。这些浓矿浆的动电脱水是很有效的，能获得一种很少离析的密实而均质的充填体。我们在现场未曾得到试验该项目的机会，但建议对浓的、良好级配的矿浆应进行流变学、泵送要求、管道堵塞可能性等方面的详细研究。如果输送性能是合适的，象我们提出的那样，在输往地下之前将尾矿脱除大量的水，就减少了水量、泵送量和所需的贮藏体积，并通过动电处理获得一种优良的充填料。美国矿业局的五年计划中列入了一项为实现这些可能性的实用规模的现场试验计划。

爱达荷州，矿泥试验

为了将浇灌水砂充填料的时间减至最低限度，操作工以分级砂的沉降所允许的最快速度滗析表面水，结果呈悬浮状态的细颗粒随滗析水流走。滗析水进入井下大水仓后，让细粒物料经足够时间沉降成"浓汤"，并将表面的清水抽到地面。然而，将剩下的这种浓的矿泥浆埋在分级砂料下面的处理方法是不成功的，因为它们会被较稠密的粗砂排挤，浆化成稀泥浆并再回到充填料表面。

"星"矿和"幸运星期五"矿(Lucky Friday)的现场试验证明，动电处理法对老的和新的浓集矿泥沉淀物都是有效的[5,6]。在试验一年前的老沉淀物（85%小于20微米）时，电渗作用将水引至顶部，然后通过表面形成的小沟引至坝的端部。用被矿泥淹没的采场底板的已有矿车轨道作正极，用设在上部表面的金属网作负极。以125安培、225伏（电流密度0.78安/英尺^2）间歇性通电53小时（开25分钟，停5分钟）后，使充填料固结到可以用装运机运搬。当矿泥流往集水仓时，它经由漏有粉矿的运输区而使品位大大增高，那末这部分脱水的淤泥即送回选矿厂再处理。浓密物料脱水的电力消耗约为35千瓦小时/码^3。矿山经营者计划用该方法来处理其他沉淀物。

在"星"矿7500英尺水平下面一个专门准备的采场进行最新的浓缩矿泥的电渗处理。悬挂的金属网电极如图3所示。采场先筑一道6英尺高的防水砂墙，然后充填150码^{3}来自一个集水仓的浓缩矿泥(65%－20微米)。充填后立即在漂浮于充填料表面的泡沫聚苯乙烯块上悬挂金属网电极，并由一台12.5千瓦电机供电。电泳沉降比只用重力沉降快得多（后者需数天或数星期），用55安、150伏电能，4.5小时即能排除清晰的表层水5000加仑。耗电量为37千瓦小时（每千瓦小时

0.005美元，即等于0.19美元）。

移走漂浮电极后，给埋在下部的电极供电，把水吸向底部负极。这台12.5千瓦作脱水试验用的发电机只能处理260英尺^{2}的面积，因此，将采场分成各14英尺长的四块，逐块进行电渗处理。共51小时的电渗处理（耗电 492 千瓦小时），获得了60码^{3}能覆以常规充填料的、相当干而坚实的固结矿泥。

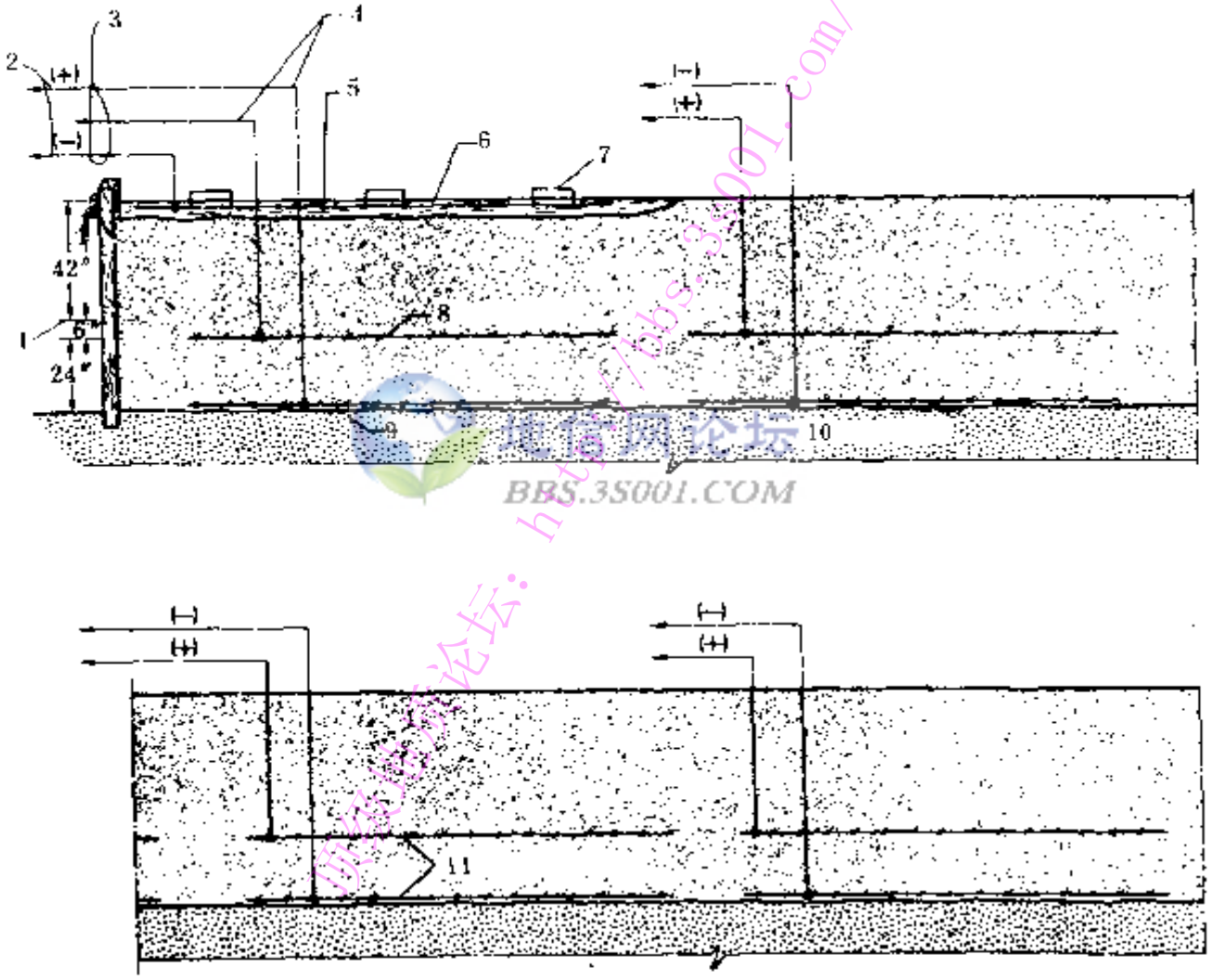


图 3　星矿7500英尺水平试验布置

1——排除表层水后剩余水平；2——澄清水的导线；3——绝缘线接通12.5千瓦发电机；4——脱水沉淀物的导线；5——表面清水；6——漂浮电极；7——泡沫聚苯乙烯块；8——上部电极；9——负极；10——原有的分级的充填尾砂；11——14号铁丝网。

亨德森矿

靠近科罗拉多州恩派尔(Empire)的亨德森矿(Henderson)由AMAX公司的子公司克莱马克斯(Climax)钼公司经营。最近，这个矿建成了一个大的井下沉淀池（15英尺×100英尺），以容纳动电处理时的矿泥。矿泥脱水是用将水集于表面并泵送排除的办法，然后用前端式装载机最后清除固结的矿泥。沉淀池的一端开一条斜坡道入口，以便装载机进出作业。

埋在混凝土底板中的钢轨（钢轨圆头朝下）用作正极。这些长11.5英尺的钢轨沿100英尺长的沉淀池，以2英尺的间隔安设。靠近表面处则布置铁丝网作负极。

目前，电极是使用配有稳流器的250千瓦固体电路整流器进行供电，它能将输出电流调至80—900安之间的任何所需的数值。

还未获得该处的现场试验结果，但对亨德森矿泥的动电效应的实验室试验已于1977年由斯波坎采矿研究中心完成，取得的一些结果表明现场使用成功的可能性很大。我们过去的经验是，动电效应在大规模使用时比在实验室试验槽中要好些。

亨德森矿泥的物理性质如下：

矿浆21℃时的电阻率	900欧-厘米
矿浆22℃时的pH值	7.5
电导率（水）	2350微姆/厘米
初始水分含量	48.9%（按重量计）
固体含量	51.1%（按重量计）
正离子交换能力	7.30毫克当量/100克
ζ电位	－16毫伏

粒度分布	－200网目占87%
	－20微米占60%

矿泥定量分析表明，主要元素的含量为：

铝4.78%	钙3.40%	铁1.34%
镁0.12%	钠0.33%	硅28.6%

所有物理性质都在有利于动电脱水的范围之内。

不同的电流密度、电极形状、充填料深度等的影响可用标准的实验室模型（图1）来评价。为了正确评价水被引至表面时的脱水效应，需制作一个较大的矩形槽，该槽有一些在固体沉降时能依次打开的排水口。槽（图4）内装有矿泥9英寸深，浓度51%。给电以后，将槽前壁排水口中橡胶塞拔掉以排出表层清水。该试验方法在前5小时中，结果没有全部令人满意，澄清的表层水只能排出到固体物面以上约半英寸。试图超出那一点用虹吸排水，将细粒悬浮物随水一同排出。表层水不能全部排除，这就降低了总效率。因此，这里得出的脱水率是近似值。试验结果如下：

平均供电电流密度	2.0安/英尺^2
初始供电电压	5.9伏/英寸
平均供电电压	7.2伏/英寸
最大脱水率（近似值）	7.1加仑/小时·码^3
平均脱水率（近似值）	4.2加仑/小时·码^3
脱水时间	16小时
平均最终固体含量	67%
平均最终密度（近似值）	108磅/英尺^3
平均电能消耗率	3.0千瓦/码^3
耗用电功率	54千瓦小时/码^3
达到最高温度	50℃

实验结束时，物料的下半部分远比上半部分干燥，但全都可用装载机装运。

收集的水是清的，其20℃时pH为11.3。电导率未记录。

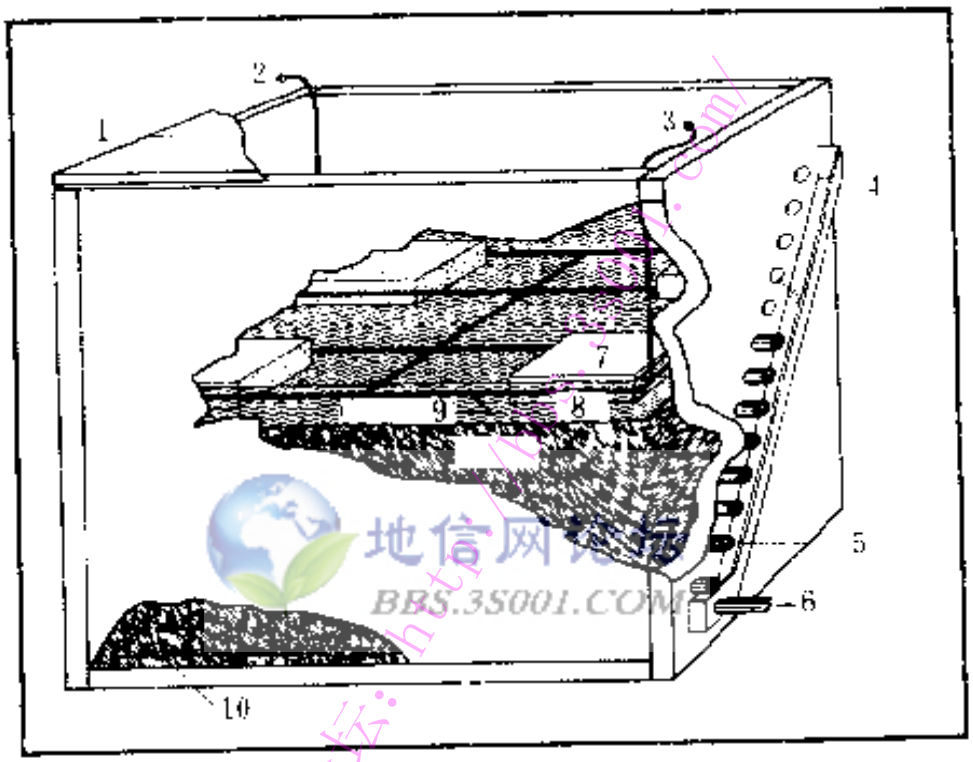


图 4 测量水澄清率的实验室试验槽

1——塑料盖；2——接下部电极的导线；3——接上部电极的导线；4——排水槽；5——胶塞；6——水排至收集槽；7——泡沫聚苯乙烯块；8——泥水；9——上部电极；10——下部电极

亨德森矿泥在实验室小规模试验中对动电脱水法的效应是良好的。固体含量从初始给入的31%很容易提高到67—70%。这时物料可称为硬泥，它可用装载机顺利地装运，并很可能适合作充填材料。获得该结果所需耗电量一般为17—68千瓦小时/码^3，依电流密度和使用方法而异。使用高的电流密度（2.2安/英尺^2）时耗电量最高。脱水时间从2.2安/英

尺^{2}电流密度时的8.5小时到0.6安/英尺^{2}电流密度时的20.5小时。若只用自然脱水，实验室槽中6英寸矿泥层经44小时的时间仅脱水至59%的固体含量。

拉斯托里斯矿

1976年6月，墨西哥瓜纳华托的拉斯托里斯矿（Las Torres)的经营者请求美国矿业局协助处理其尾矿问题。该矿地面建尾矿坝的面积很不足，而矿泥化学处理所获得的结果也很差。因而该矿的经营者面临严重的河流污染问题，希望能将动电固结矿泥法有效地用于或者井下或者地面。

(1) 实验室试验结果

尾矿样品实验室试验结果表明，在中等电力消耗的情况下，矿泥在几小时内即能转变成有用的充填料。1976年11月提交给该公司的结果概括如下：

22℃矿浆的电阻率	2150欧-厘米
22℃矿浆的pH值	8.5
电导率（水）	918微姆/厘米
初始水分含量	57%（按重量计）
正离子交换能力	17.53毫克当量/100克
ζ电位	−27.9毫伏
粒度分布	−200网目占98%
	−20微米占62%

矿泥定量分析表明，主要元素的含量如下：

铝4.78%　钙3.86%　铁1.10%　镁0.65%

钠1.23%　铅0.02%　硅21%

这些物理性质大部都有利于动电脱水。

在图1动电脱水试验槽中用固定电极和用漂浮电极系统都获得了良好的脱水效果，但以漂浮电极更为有效。从稀薄

顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

的、非粘结的（水分含量按重量计为57%）矿浆，处理3.5小时即转变为坚实的、粘结的材料（水分含量按重量计为26—31%）。而用自然饱水，经110小时水分含量仅降至40%（按重量计）。

在很宽的电流密度范围内（0.76—3.43安/英尺^2），动电效应一般是均匀的（0.31±0.03加仑/安培-小时）。当处理之前将物料自然沉降一星期时，耗电量和动电处理时间均显著下降。若将澄析掉表层水后的自然脱水物料进行再混合，也能降低最终产品的颗粒离析。获得坚实而粘结物料的耗电量约为30千瓦小时/码^3。

（2）现场结果

在研究了美国矿业局的实验室结果以后，拉斯托里斯矿的工程师们在A．M．莫拉莱斯指导下对该矿尾矿坝的几个区段开展了试验工作。在尾矿坝矿泥区中联结混凝土涵管系统架设了用粗麻布包裹的脱水木垛。1米宽、20米长的金属网负极埋在距木垛外侧约0.5米的矿泥中。对埋在池中的负极和正极通电使水流向木垛，从那里水靠自重排出。观察到的水流分布至少在极端以外1米。虽然试验中大尺寸尾矿池和小功率发电机妨碍了脱水效率的测定，但公司的工程师们承认该方法的可行性。

将该方法用于地下的计划已暂停至需要更多的充填料时为止；因为现时粗砂部分能满足该矿的需要，另外尾矿化学处理的当前进展也减少了河流污染问题的严重性。

安全问题

虽然在我们所涉及的整个动电方法中实行了各种预防措施，但该技术在各种状况下存在一些令人关注的潜在危险。

例如，可燃或有毒气体的产生，邻近电爆破区的杂散电流，电化学腐蚀，漏电对人员产生的危险，以及已脱水矿泥往后为水饱和和液态化等。准备让美国密西西比州维克斯堡的陆军水道实验站承包这项用于地下矿山的方法全部潜在危险的研究，并制订应用指南和安全规程，以避免或将危险降至最低限度。

安排在1978年完成的这项工作将会加速该方法在采矿工业中的应用。

结　　语

在爱达荷州两个矿山进行的现场试验证明，动电法能以适度的电耗使未分级的选矿厂尾矿或矿泥有效地脱水和密实，以用作为充填料。美国一个矿山正准备将这种方法作为常规作业方法来进行地下矿泥的脱水，另一个矿山打算在需要把老尾矿所占空间腾空作别的用途时，将使用这方法。

使用规程正在承包的研究工作中制订，它将鉴定和评价井下使用该方法的危险，并提供将这些危险降至最低限度或消除掉的方法。该资料的存在会促进采矿工业对这种技术的运用。

在矿业局五年计划中包括一个目的在于充分降低尾矿含水量，以便在运往地下之前，使细颗粒的离析降至最低限度的研究项目。这种物料的动电处理产生很密实的充填料，另一方面也大大减少地面的贮存设施。

对于我们的工作，本文讨论很有限，详细工艺过程和结果可在出版的矿业局报告中得到。

参 考 文 献

[1] Sprute, R. H., and D. J. Kelsh, Laboratory Experiments in Electrokinetic Densification of Mill Tailings (in two parts)—1. Development of Equipment and Procedures, BuMines RI 7892, 1974, 72 pp.

[2] Sprute, R. H., and D. J. Kelsh, Laboratory Experiments in Electrokinetic Densification of Mill Tailings (in two parts)—2. Application to Various Types and Classifications of Tailings, BuMines RI 7900, 1974, 43 pp.

[3] Sprute, R. H., and D. J. Kelsh, Limited Field Tests in Electrokinetic Densification of Mill Tailings, BuMines RI 8034, 1975, 47 pp.

[4] Sprute, R. H., and D. J. Kelsh, Electrokinetic Densification of Hydraulic Backfill —— A Field Test, BuMines RI 8075, 1975, 19 pp.

[5] Sprute, R. H., and D. J. Kelsh, Electrokinetic Consolidation of Slimes in an Underground mine, BuMines RI 8190, 1976, 29 pp.

[6] Sprute, R. H., and D. J. Kelsh, Using Slimes for Backfill in Deep Mines, *Mining Congress Journal*, April, 1976, pp. 22—26.

[7] Sprute, R. H., and D. J. Kelsh, Dewatering and Densification of Coal Waste by Direct Current—Laboratory Tests, BuMines RI 8197, 1976, 68 pp.

顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/
地质网论坛 BBS.3S001.COM

胶结充填中细磨艾萨矿炉渣在高炉渣-水泥比时的凝硬性

E．G．托马斯　R．考林*

摘　要

本文报告并讨论了水力充填料、普通硅酸盐水泥和来自艾萨矿的细磨铜反射炉炉渣的各种混合物的实验室试验结果。该试验项目的主要特点是普通水泥添加量很少（按重量计低至1%）和炉渣添加量却相当高（按重量计高达16%）。另一重要特点是全部试件均以10℃的温度进行养护。

凝硬材料及其在胶结充填中的作用

能与物料中的石灰和水反应并生成性质和普通水泥水合物相类似的稳定、不溶于水、有粘结力的硅或硅-铝材料可定义为凝硬材料。凝硬材料通常必须具有活性大的细粒形状，以便获得令人满意的反应动力。

内维尔[1]列举了几种凝硬材料，包括天然火山灰、浮石、蛋白石页岩类和燧石、锻烧的硅藻土、煅烧粘土和烟灰。炼铁高炉渣和炼钢渣也呈现显著的凝硬性能，并且，如李[2]和

* E．G．托马斯（Thomas）是澳大利亚新南威尔士大学采矿工程系高级讲师；R．考林（Cowling）是澳大利亚芒特艾萨矿业有限公司充填研究工程师。

埃默里[3]所述，它们被广泛用来制备特种硅酸盐水泥。

如下所述，各种有色金属的冶炼炉渣的凝硬性能，在一定程度上可用于矿山胶结充填中。炉渣的作用是部分地代替普通硅酸盐水泥，因此对于给定的性能就降低了胶结充填的成本。成本的下降，既改变了胶结充填的经济性，也给矿山设计提供了广阔的灵活性。当然，当矿区能产生炉渣，而水泥是又靠远地供应的时候，炉渣利用的经济性是最有利的。

在炉渣胶结充填实践中，由水泥的水合作用引起氢氧化钙与炉渣之间发生凝硬反应。因此，凝硬材料在消除氢氧化钙的弱化作用和它本身可形成具有粘结力的材料这两方面，都促进了充填体强度的提高。

关于艾萨矿材料早期的研究情况

关于芒特艾萨采选冶联合企业所产生的炉渣用于矿山充填方面的研究已有过不少报告。艾萨矿业公司将炉渣用于胶结充填是受了各种刺激因素所致：

1）距水泥供应地遥远（800公里）；

2）当地有合适的炉渣；

3）广泛地使用了胶结充填采矿法；

4）采场环境温度足以保证有利的反应动力；

5）炉渣与水泥价格的比例关系为1：20。

托马斯[4-6]所报告的结果表明，艾萨矿炉渣的特性是：

1）炉渣需淬冷以保持玻璃质状态，当把炉渣细磨到普通硅酸盐水泥的细度时，足能起凝硬作用；

2）包括铜反射炉、铅鼓风炉和铜转炉等所有生产的炉渣均显示出凝硬性质；

3）虽然养护温度的高低使最终强度可能相似，但40℃时

的养护速度比25℃时高。

几年来艾萨矿炉渣胶结充填使用的是铜反射炉渣，下面的讨论也仅限于这种材料。托马斯[4—6]报告的试验条件包括普通水泥含量4—16%(按重量计的百分率，以下同)，炉渣含量0—30%，炉渣与水泥比最大为4，并且几乎全都在25℃的温度下养护。这些试验并不限制炉渣的含量或炉渣与水泥的比例，而是以较低的水泥含量和较高的炉渣/水泥比例的试验来表明这种可行性，目的在于使炉渣胶结充填获得最佳的经济性。本文要探讨的是低的水泥含量和高的炉渣/水泥比例的范围，特别是迄今还很少评价过的水泥添加量小于3%的胶结充填料。

在艾萨矿现行工业格局情况下，该题目涉及到铜反射炉渣的研磨细度。倘若使用较高的炉渣与水泥比，那末就须增加磨矿设备或将炉渣研磨得不要那么细才能满足需要。

再者，由井下炉渣胶结充填料的目检情况得知，水泥和细磨炉渣会出现较严重的离析，这个问题可能由于增大炉渣比和粗粒炉渣的使用而加重。这些因素正在由芒特艾萨矿业公司在新南威尔士大学采矿工程系的研究项目中进行研究，其目的是：

1) 评价低于3%的水泥添加量；

2) 评价高的炉渣/水泥比；

3) 确定炉渣和水泥的离析能否在实验室中测定。

试验用的材料

水砂充填料

艾萨矿水砂充填料的粒度分析列于表1。

如莱昂(Lyon)、斯劳特(Slaughter)和克尔(Kerr)[7-

所述，所试验的材料是艾萨矿硫化铜选矿厂的脱泥尾矿。试验材料的固体密度为2.81吨/米^3。

铜反射炉炉渣

试验所用炉渣的化学成分列于表 2 。

该材料经淬冷和球磨机细磨法制取，试验用材料的比表面积为0.295米^2/克，固体密度为3.59吨/米^3。

表 1　近期研究中所使用的艾萨矿水砂充填料的粒度分析

粒度，微米		粒级，%（重量）
+300		2.30
−300	+212	8.10
−212	+150	13.39
−150	+106	15.99
−106	−76	15.42
−76	+53	13.64
−53	+38	4.84
−38	+29	11.10
−29	+20	6.94
−20	+14	2.63
−14	+11	0.91
−11		4.72

地信网论坛 BBS.3S001.COM 测绘地质论坛：http://bbs.3s001.com/

普通硅酸盐水泥

所使用的普通硅酸盐水泥是由昆士兰斯图尔特(Stuart)的北澳大利亚水泥公司供应的澳大利亚标准 AS 1315水泥，为了计算试件的孔隙率其固体密度为3.17吨/米^3。

试验用混合料

试验用的各种混合料情况列于表 3 。

表 2　艾萨矿铜反射炉炉渣的化学成分

成　　分	%（重量）
Fe	36.0
SiO_2	35.5
CaO	7.9
Al_2O_3	3.6
MgO	1.9
S	0.9

试验程序

混合、浇灌、养护

试验所用21个混合样品中的每一个都是在40℃的温度下，以固体含量为69%的矿浆形式混合10分钟。然后将它浇灌到直径38.10毫米、长约130毫米的养护圆筒中，圆筒底部垫有一块约 8 毫米厚的多孔石材。将浇灌好的20个试验用试件进行密封，并在40℃的温度下分别养护7、14、28、42和56天。

抗压强度试验

经过适当养护后，每个试件修整成76.12毫米长，在能力为10吨的恒定应变率加载架上，在0.1兆帕侧限压力下进行抗压强度试验。应变率随试件强度和测力环刚度而异，在加载3—5分钟时发生破裂。

根据实际的试件断面，在加载期间获得的最大应力作为抗压强度。对试件孔隙率和水分含量（按总重量计）也进行测量。

表 3　试验用混合料（干重）

水砂充填料，%（重量）	普通硅酸盐水泥 %（重量）	细磨的炉渣 %（重量）
99	1	0
95	1	4
93	1	6
91	1	8
89	1	10
98	2	0
94	2	4
92	2	6
90	2	8
88	2	10
97	3	0
91	3	6
88	3	9
85	3	12
82	3	15
96	4	0
88	4	8
86	4	10
84	4	12
80	4	16
95	5	0

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

结　果

1 %、2 %、3 %和 4 %普通水泥加入量时全部抗压强度结果列于表 4 和分别绘于图 2、3、4、5。表和图中的每一数值分别为四次强度测量的算术平均值。为了进行比较，在表 4 中还列入了未加炉渣、水泥添加量为 5 %的试件的抗压强度。在所有图表值中，抗压强度均以所应用的轴向压力

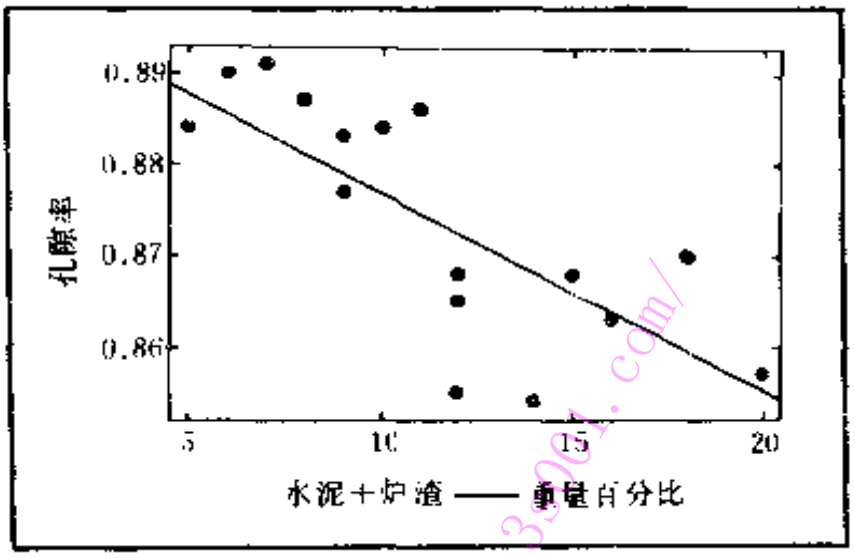


图 1　孔隙率与普通水泥加炉渣之间的关系。所画的直线很符合最小均方值

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

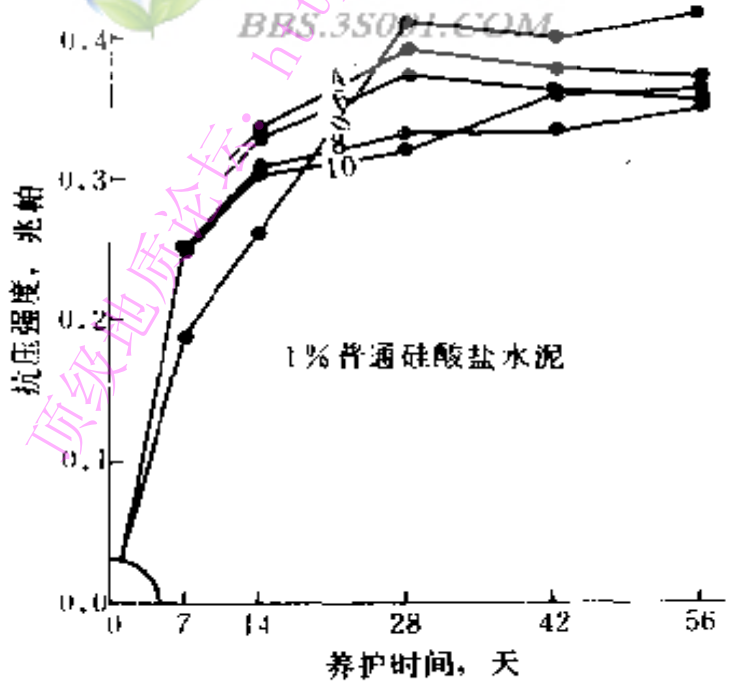


图 2　1％水泥、铜反射炉渣 4—10％时的抗压强度与养护时间的关系曲线

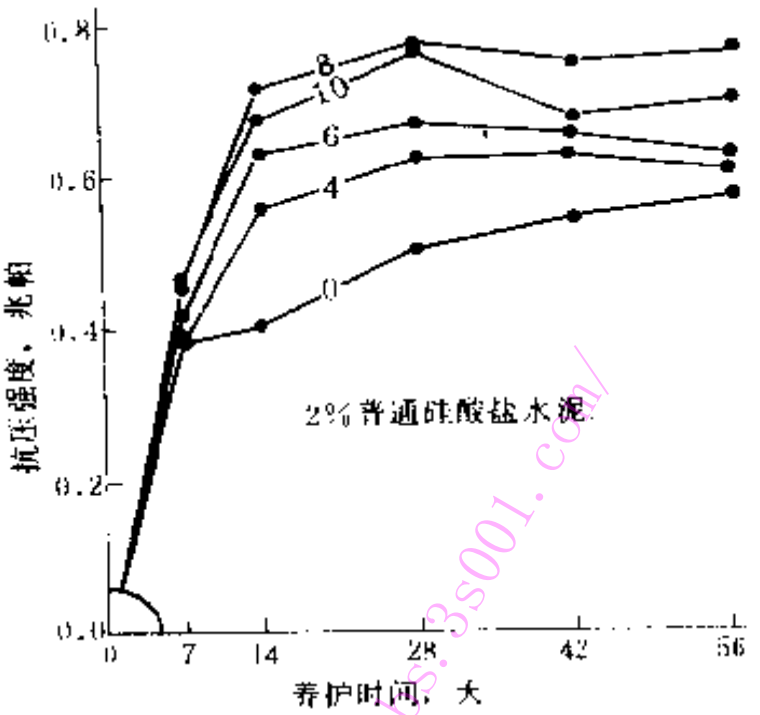


图 3　2％水泥、铜反射炉渣 4—10％时抗压强度与养护时间的关系曲线

地信网论坛
BBS.3S001.COM
资源地质论坛：http://bbs.3s001.com/

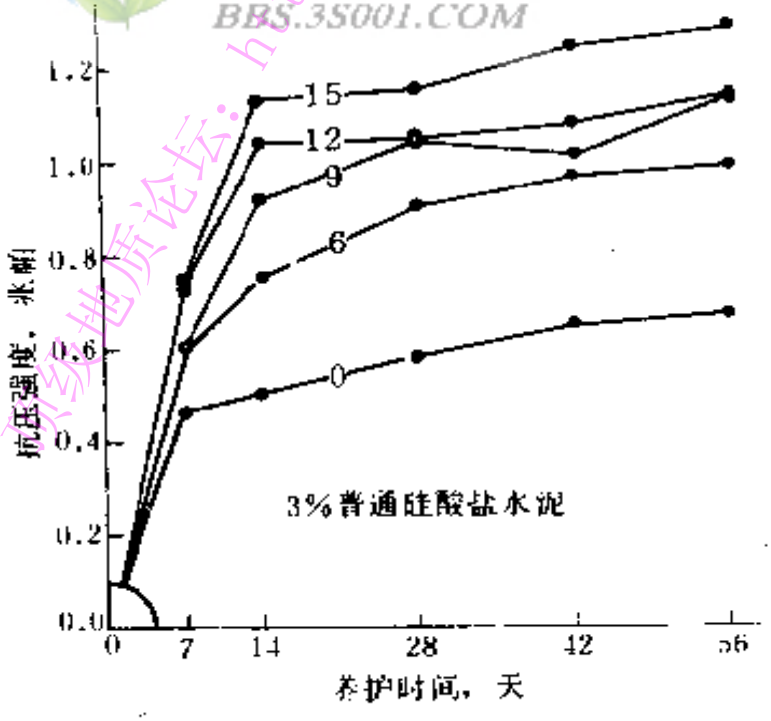


图 4　3％水泥、铜反射炉渣 6—15％时的抗压强度与养护时间的关系曲线

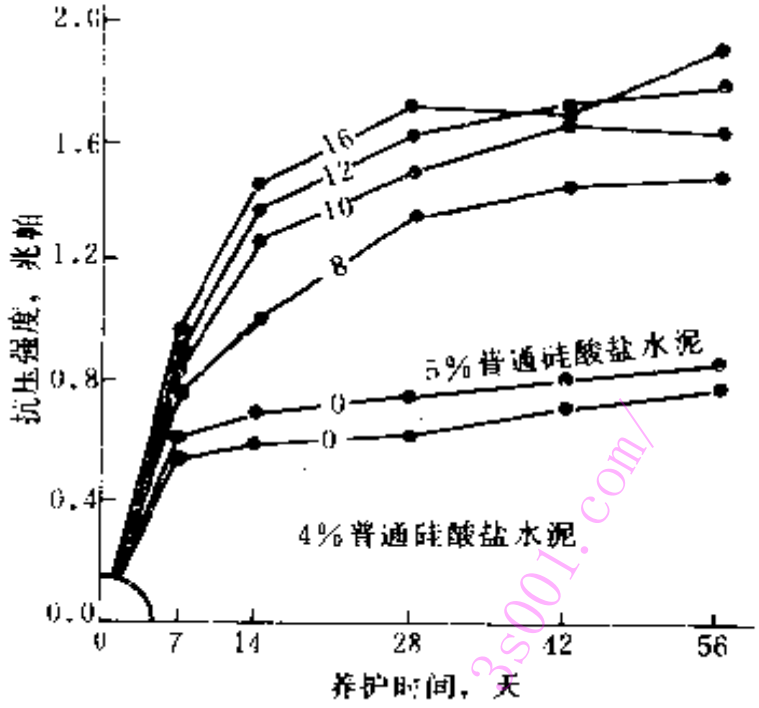


图 5　4%水泥、铜反射炉渣 8 — 16[1] %时抗压强度与养护时间的关系曲线(图中还画出了5%水泥未加炉渣时的曲线)

地信网论坛
BBS.3S001.COM

为基础，而排除侧限压力。

在含水泥量为 3 %和 4 %的试验结果中，其强度随炉渣添加量的加大而增高，这与以前报告的大量数据是一致的。炉渣量四、五倍于水泥添加量时仍能证明产生有利的影响。

普通水泥添加量为 2 %时，随炉渣添加量增至 8 %，强度也随之增高，炉渣量超过 8 %则强度下降。这种倒转情况表明，无论是早先所有报告的结果，还是在近来一些试验中，这是第一次获得这样最大有利的炉渣添加量。

加 1 %普通硅酸盐水泥的试验结果表明，虽然不完全如此，但一般强度是随炉渣添加量的增高而降低的。普通硅酸盐水泥添加量为 1 %时养护过程按通常的样子进行，但炉渣添加量对强度没有显示有利的作用，这可能是因为没有足够

① 原文为10，疑误。——译注

表 4　在侧限压力0.1兆帕时的抗压强度（兆帕）

水泥添加量，%（重量）	细磨炉渣添加量，%（重量）	不同养护时间的抗压强度，兆帕				
		7 天	11 天	28 天	42 天	56 天
1	0	0.189	0.263	0.413	0.403	0.421
	4	*	0.337	0.393	0.381	0.375
	6	*	0.328	0.375	0.365	0.360
	8	0.249	0.310	0.333	0.336	0.354
	10	0.252	0.304	0.321	0.361	0.366
2	0	0.384	0.405	0.507	0.548	0.567
	4	0.389	0.561	0.630	0.633	0.606
	6	0.421	0.632	0.676	0.658	0.628
	8	0.432	0.721	0.782	0.755	0.763
	10	0.465	0.676	0.769	0.684	0.700
3	0	0.467	0.511	0.589	0.652	0.680
	6	0.593	0.755	0.909	0.975	0.995
	9	0.599	0.922	1.050	1.023	1.139
	12	0.731	1.047	1.058	1.088	1.118
	15	0.750	1.138	1.160	1.253	1.259
4	0	0.535	0.592	0.629	0.724	0.788
	8	0.759	1.003	1.352	1.473	1.508
	10	0.838	1.268	1.511	1.676	1.658
	12	0.901	1.386	1.638	1.750	1.807
	16	0.969	1.464	1.732	1.711	1.932
5	0	0.669	0.692	0.761	0.815	0.870

* 没有获得显著的强度结果，原因在于建立实验技术问题比所述试件中固有的不可试验性的问题更多。

的普通水泥水合产物与炉渣发生有效的反应。因此加入炉渣只成为一种从物理上来看有损于强度的增高和对胶结作用没有多大影响的细粒惰性材料。

地信网论坛 BBS.35001.COM 测绘地质论坛：http://bbs.35001.com/

结　　语

1．普通水泥添加量降至1%时，尾矿胶结充填料仍能在通常的方式下进行养护。

2．加1%普通水泥时，添加炉渣并无益处；普通水泥量在3%和3%以上时，炉渣添加量对强度始终是有利的；而普通水泥量在2%时，炉渣量对强度的影响出现过渡变化现象。

3．对2%至3%的普通水泥添加量这一范围，有必要进一步进行试验。

参　考　文　献

[1] Neville, A. M., *Properties of Concrete*, (Pitman's, London), 1972.

[2] Lee, A. R., *Blast Furnace and Steel Slag-Production, Properties and Uses* (Edward Arnold, London), 1974.

[3] Emery, J. J., New Uses of Metallurgical Slags, *CIM Bulletin*, December 1975, pp. 60—68.

[4] Thomas, E. G., Cemented Fill Practice and Research at Mount Isa, *Proc. Austral. Inst. Min. Metall.*, 240:33—51, 1971.

[5] Thomas, E. G., A Review of Cemented Agents for Hydraulic Fill, Austral. Inst. Min., Metall. Jubilee Symp. on Mine Filling, Mount Isa, 1973.

[6] Thomas, E. G., Cemented Hydraulic Fill Mix Design as it Applied to Mine Scheduling, Austral. Inst. Min. Metall. Jubilee Symp. on Mine Filling, Mount Isa, 1973.

[7] Lyon, G. C., Slaughter, P. J., and Kerr, M. H., The Design and Operation of the Cemented Hydraulic Fill Station, Mount Isa Mines Limited, Austral. Inst. Min. Metall. Jubilee Symp. on Mine Filling, Mount Isa, 1973.

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/

鹰桥镍矿业公司用炉渣作充填料中的胶结剂

A．J．麦克古里*

摘　要

向水力充填的尾矿充填料进行水泥灌浆以产生有粘结力的矿山充填料是一种广泛应用的技术。硅酸盐水泥价格的增高促使人们去寻求其代用品。对在类似于井下的条件制备和养护的胶结尾矿充填料样品进行了试验。样品内含有不同比例的硅酸盐水泥及含95%的玻璃质、磨到比表面为3000布莱恩的鹰桥粒状铜镍炉渣。试验是在一直到224天的养护龄条件下做的。大多数混合料中加入炉渣均提高了强度。贫混合料的表面强度降低导致了这些样品的整个强度降低。50%的硅酸盐水泥用炉渣代替的室外试验结果是令人满意的。

地质网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/

前　言

用水力浇灌分级的选矿厂尾矿作井下空区的充填料已广泛用于采矿工业。在这种充填料中加胶结剂使产生粘结性也是广泛应用的方法。这些胶结充填料能提供比非粘结的充填

---

* A．J．麦克古里（McGuire）为鹰桥镍矿山有限公司采矿工程服务部工艺发展高级工程师。

料更好的工作底板，更稳定的自立的充填体暴露面，以及更好的岩层支护。

市场上能获得并散装发交矿山使用的硅酸盐水泥是一种便利而有效的充填料胶结剂[1]。这种水泥在技术上来看几乎没有缺陷，它在萨德伯里地区的供应是良好的。它的应用已使矿石的开采比不用它更为经济。

硅酸盐水泥的生产和运输是耗费大量能源的作业。随着能源价格的上涨（它最终体现在矿山的成本增高），充填料中用硅酸盐水泥所产生的经济效益正日趋减少。

在萨德伯里地区生产中有大量未被利用的炉渣，加上在其他地方硅酸盐水泥与炉渣结合使用成功的报道[2]，导致了用鹰桥炉渣代替部分胶结充填料中的硅酸盐水泥并试验其胶结性能。

地信网论坛 BBS.35001.COM

最初的试验工作

关于在充填复合混合物：硅酸盐水泥、炉渣和水中引起粘结力的机理只是一般地为人们定性地了解。所以，决定开始试验性地制备一种假设会起胶结作用的炉渣，并测试含这种材料的水砂混合物的强度。这些混合物是在实验室内模拟实际操作条件的方法制备的。

炉渣的选择

试验选用了鹰桥镍公司的铜镍电炉炉渣，其主要成分见表1。炉渣比重为3.49。预计今后鹰桥镍公司的炉渣成分变化不大。这种炉渣的钙含量很低，所以，为了通过生成水合硅酸盐以获取良好胶结作用，生石灰（CaO）必须取自别的来源。在养护期间，充填料混合物为硅酸盐水泥所释放出来的氧化钙就是这种石灰的来源。

玻璃质数量

炉渣和石灰组合所产生的胶结作用是一种凝硬作用。为了进一步改善炉渣的凝硬性能力，决定把它做成事实上的非晶体或玻璃状态。预计这种形成[2]比晶体状态具有更高的反应性。把炉渣用水迅速淬冷造粒是用以阻碍结晶形成的方法。玻璃质含量[3]常用来量度事实上是非晶质的粒状炉渣的比例。实验发现，主要是由于铁含量过高，因此炉渣显得过暗以致影响了用偏光光学法来检定确实的玻璃质数量。

于是，改用X射线衍射法[1]，并证明它是可靠的。混合充填料中所使用的粒状炉渣的玻璃质数量为95%。

细度

细的研磨可提高产生反应的表面积。粒状炉渣是在球磨机中研磨到比表面积为3000厘米^2/克，它是用布莱恩法测定的。这种研磨细度通常叫做3000布莱恩。磨细后的粒状炉渣的粒度分析以及尾矿充填料的粒度分析详见表2。

表1 粒状炉渣主要成分表

成分	百分比，%
CaO	2.2
SiO_2	35.5
Al_2O_3	4.3
MgO	3.8
Fe	40.0

水泥和尾矿充填料

试验采用的是普通硅酸盐水泥。所用的尾矿充填料是鹰桥矿正常送往井下的水力旋流器底流。尾矿充填料的固体比

重为2.96。

表 2　细磨粒状炉渣和充填料的粒度分布

颗粒尺寸，微米	重量百分比	
	炉渣	充填料
+208	0.5	9.5
+147	0.5	17.2
+104	0.7	16.7
+74	2.4	16.3
+53	9.7	11.3
+38	19.9	15.9
+27	29.7	12.2
+19	9.7	0.4
+13	9.9	0.2
+9	6.9	0.1
+7	1.42	0.05
+5	1.97	0.05
+3	1.97	0.05
+2	3.38	0.03
−2	1.36	0.01

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

试样的制备

开始准备了四种混合料，每种含6％（按重量）的硅酸盐水泥。细磨粒状炉渣的重量百分比在四种材料之中有三种分别为：6％、12％和18％。每种混合料都制成含70％固体砂浆，把这些砂浆浇注成直径为$15\frac{1}{4}$厘米，长30.5厘米的单轴抗压试验用的圆柱形试件，以及直径为5厘米，长10厘米的三轴试验用的圆柱形试件。所有圆柱形试件都在100％的湿度下进行养护。单轴试验在分别养护了7天、28天、56天、112天和224天后进行。三轴试验则在养护28天以后进行。

最初的试验结果

抗压强度

在所有情况下，凡含有磨细的粒状炉渣的试件，它们的单轴抗压强度均有所增加。如图 1 所示，该强度的增加是随养护龄的增加而相应地加大的。

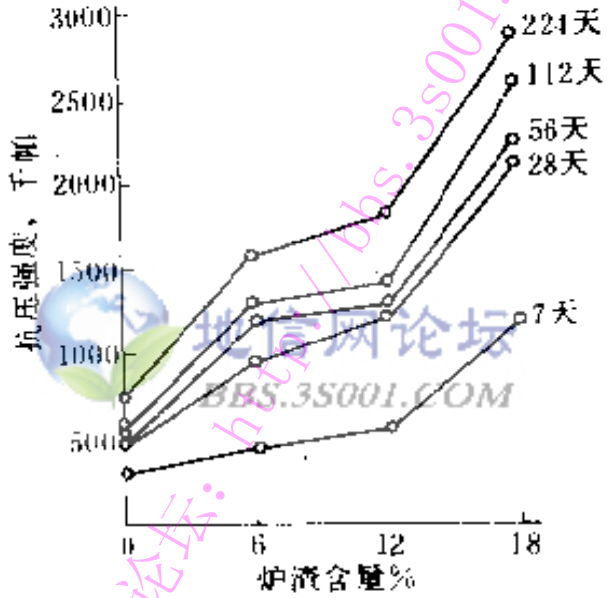


图 1　细磨粒状炉渣含量对含 6 %硅酸盐水泥的胶结充填料的单轴抗压强度的效应

化学粘结作用

当充填料中含有炉渣时，引起其强度增加的原因还不十分清楚。但从长远观点来看，这一结果通常是与预期的凝硬性炉渣[2]的水合作用相一致的，因此被用来说明化学粘结作用曾在发展中。水合作用要求把获得的水变成化合水。按照潘菲尔德(Penfield)法，在不同养护期，对混合料中化合结合水数量的分析[6]，即可获得对此化学作用的某些了解。

质级地质论坛：http://bbs.3s001.com/
地质网论坛 BBS.3S001.COM

这些分析表明，有粒状炉渣存在比没有时，化学结合水有较大的增加，这说明炉渣参与了水合反应。养护龄达56天的化学结合水的增长情况表示在图2中。超过该养护时间，化学结合水的增加量是很小的，以致无法用上述方法予以可靠地测定。

骨料特性

养护7天的第一批试验表明，随着炉渣量的变化，强度意外地明显增高。这种早期强度的增加和利用潘菲尔德法检验出的该时期的水合量是不一致的。在含最大数量炉渣的混合料中，这种强度的增加不太明显。这种意外早期的强度可以认为是炉渣起了一部分骨料的作用而不是化学胶结剂作用。含炉渣的炉渣-尾矿骨料和纯尾矿骨料的粒度分布表示在筛

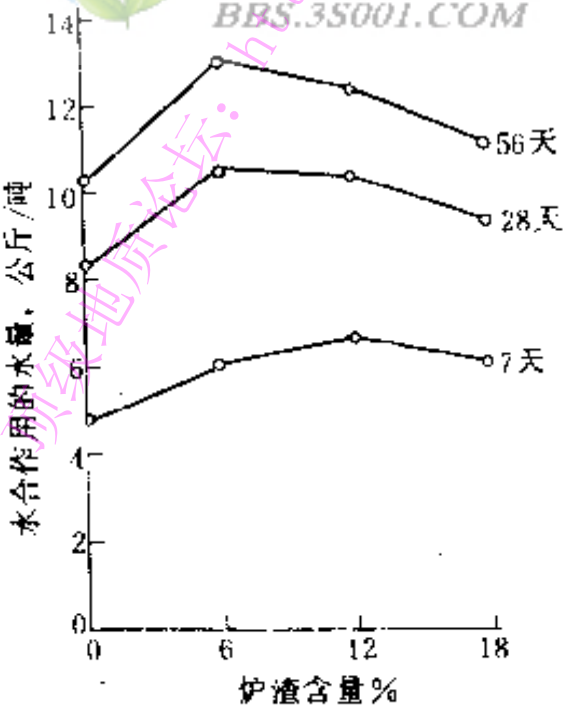


图2 含6%硅酸盐水泥的胶结充填料内细磨粒状炉渣的水合作用效应

地信网论坛 BBS.35001.COM 资源地质论坛：http://bbs.35001.com/

分析的累积对数图中。在该图中，炉渣-尾矿骨料的曲线更接近于用在喷射混凝土[7]里的令人满意的混凝土骨料粒度分布形状(当然不是指粒度的分布范围)。这一点说明了骨料的特性有所改善。图 3 分别表示尾矿充填料和含大量炉渣的炉渣-尾矿骨料的粒度分布，并且用虚线表示了令人满意的混凝土骨料的粒度分布，但不是粒度范围。

三轴试验

为了使井下专用的胶结充填料设计成为可行的，我们还进行了在侧限压力下的试件强度的三轴试验。它能提供从单轴试验中不能获得的胶结充填料的工程特性资料[8]。试验结果对每种混合料简化为两个莫尔剪应力参数：

内聚力 c，它是和垂直于剪应力平面的应力无关的那一部分抗剪强度；

内摩擦角φ，用它可导出内摩擦系数。

BBS.35001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3500.com/

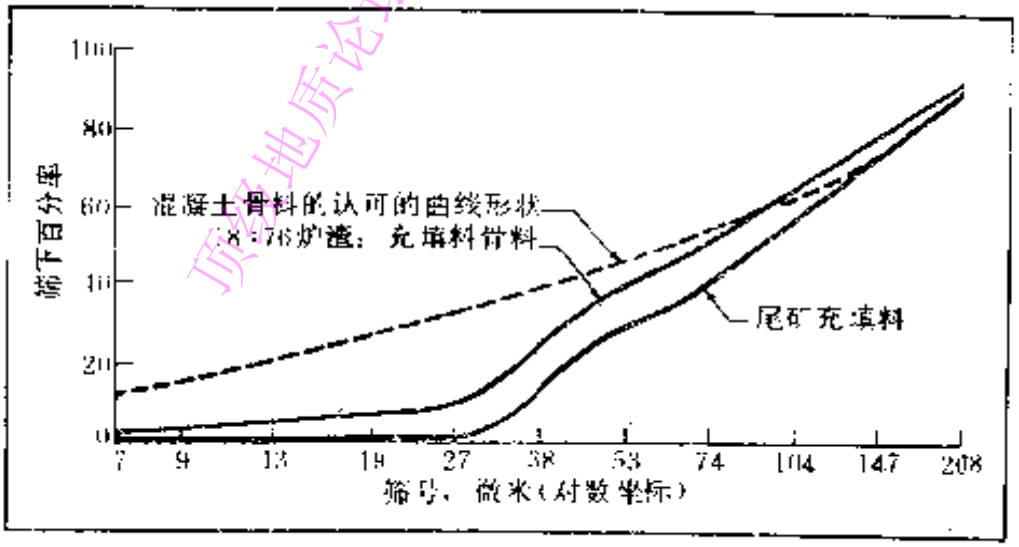


图 3 尾矿充填料及炉渣充填料组合体的粒度分布与混凝土骨料的认可曲线形状

试验表明，如以前在其他地方所做的试验那样[8]，在胶结充填料中，正应力与剪应力实质上是一直线关系。试验设备无法脱水，但在试验前，试样要干燥到含水分15%左右；以保证它们是非饱和的。

当内聚力c，以千帕为单位；内摩擦角φ，以度为单位；容重γ，以吨/米^{3}为单位，用9.80665米/秒^{2}表示重力加速度g，则利用上述直线关系就可推导出充填料技术性能的一些公式。下面列举五个在静态下非饱和胶结充填料的公式。

用千帕表示的单轴抗压强度公式为：

$$Q_u = 2c\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \tag{1}$$

用米表示的充填料自立的高度公式为：

$$h = \frac{2Q_u}{\gamma g} \tag{2}$$

在粗糙的岩壁表面上，粘结力可以支承住任一高度（米）的胶结充填体重量的采场最大宽度为：

$$w = \frac{2c}{\gamma g} \tag{3}$$

主应力关系斜率，即由单位侧限压力提供的轴向强度的增量为：

$$m = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi} \tag{4}$$

当岩壁开始闭合时，裂纹倾向于延伸到暴露的胶结充填体表面的角度为（度）：

$$\alpha = 45^\circ - \varphi/2 \tag{5}$$

裂纹的角度α越小，预期的崩塌量也越少。

检验以上五个公式表明：当内聚力c和φ同时增加时，

材料的技术性能可望得到改善。对硅酸盐水泥含量为6％的混合料试验的结果表明，当增加炉渣含量的时候，内聚力也增高。炉渣含量达到6％时，内摩擦角出现最大值。因此，从技术上来看，这种混合料中炉渣的有利添加量至少应等于硅酸盐水泥的添加量。

应变特性

所有混合料的孔隙比接近于0.9.这表明每种混合料几乎都有象固体材料那样多的孔隙。正由于所有混合料的孔隙比大体相同，故它们最终均能压缩到大致相同的程度。但是由于含炉渣的混合料强度较大，所以，在给定应力时，它的应变量比只含硅酸盐水泥的混合料要低些，含炉渣混合料的变形模量因此也要高些。养护244天的单轴抗压试验的轴向应变情况表示于图4中。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

粒状炉渣的进一步试验

最初的试验表明，炉渣在三种混合料中均有胶结作用。为了扩大范围进一步进行了改变混合料中细磨炉渣量的试验。养护时间与以前相同，并增加一个14天的养护期。单轴试验所用的试件是直径7.5厘米，长15厘米的圆柱体，三轴试验所用的圆柱形试件尺寸与前相同。

表面强度的下降

含3％硅酸盐水泥，3％或3％以上炉渣的所有混合料试样，经14天养护后出现单轴抗压强度下降现象。这种下降还伴有褐色表面的退色现象。在112天内，这种退色现象已深入到圆柱体3.75厘米处。其他混合料没有出现强度下降或退色现象。这种强度下降被认为是一种表面现象，并为更大试样上的试验所证实。

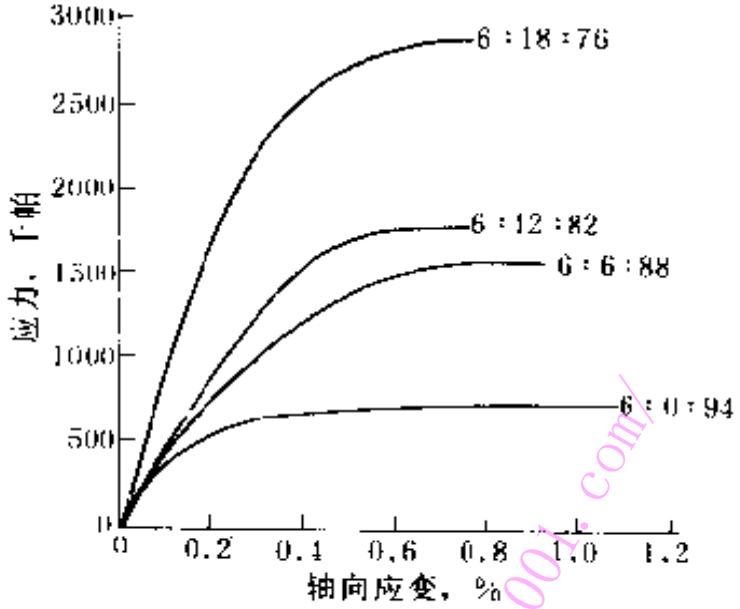


图 4　养护224天的6％水泥-炉渣混合充填料试验所得的应力-应变曲线(图中比例是指水泥：炉渣：尾矿)

这种较大的试样是一种含3％的硅酸盐水泥，3％的细磨粒状炉渣和94％的尾矿，并在井下浇灌的200升的充填混合料样品。样品的四面和底部是密封的，顶面仍暴露在矿井空气中。在224天以后，把这个样品切成10厘米见方的立方块，并进行单轴试验。用0.85这个形状系数把获得的立方体强度换算成等同的圆柱体的强度。这些结果是：

在30厘米深处等于451千帕；

在60厘米深处等于704千帕。

从这个试验可以看出，强度下降的确是一种表面现象。704千帕这个数值可作为大量浇灌时的代表数据。细磨粒状炉渣的单轴试验结果，包括最初的试验结果和在60厘米深处试验的结果均列于表3之中。

三轴试验结果

抗剪强度的莫尔参数，包括最初试验获得的参数均列于表4中。由于小圆柱形试件的表面强度下降向内层发展含3％

的硅酸盐水泥和不同数量炉渣混合料的内聚力可能比大量浇灌时深部的内聚力要小些。比较表3和表4后可见，内聚力是随着抗压强度发展趋向而变化的。当硅酸盐水泥加炉渣含量百分比总和为12%时，内摩擦角出现最大值。当这些细粒材料的含量总和超过12%时，内摩擦角降低则可归因于平均粒度减小所产生的一个较光滑的剪力面。肉眼观察该剪力面可证实这一点。

表 3　硅酸盐水泥、粒状炉渣及尾矿充填混合料的单轴抗压强度，千帕

水泥:炉渣:尾矿	7 天	14 天	28 天	56 天	112 天	224 天
3 : 0 :97	124	145	197	229	273	274
6 : 0 :94	300	372	480	509	572	729
12: 0 :88	1525	1733	1817	1843	2044	2299
3 : 3 :94*	--	--	--	--	—	704
3 : 3 :94**	173	234	222	200	194	145
3 : 6 :91**	202	275	255	251	224	201
3 : 9 :88**	239	268	255	268	281	210
6 : 6 :88	457	681	970	1201	1312	1589
6 :12:82	567	925	1201	1316	1431	1793
6 :18:76	1198	1585	2122	2256	2613	2883
12: 6 :82	1853	2002	2005	2133	2424	2461
12:12:76	2082	2395	2401	2523	2967	2996

* 地下样品，从63厘米深取出。

** 表面强度下降的小圆柱样品。

地信网论坛 BBS.3S001.COM 顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

表 4　硅酸盐水泥、粒状炉渣及尾矿混合充填料28天时的三轴试验结果

水泥：炉渣：尾矿	内聚力、千帕	内摩擦角、度
3：0：97	50	36
6：0：94	125	35
12：0：88	452	37
3：3：94	58	35
3：6：91	68	31
3：9：88	63	37
6：6：88	242	37
6：12：82	346	30
6：18：76	730	21
12：6：82	510	36
12：12：76	638	34

地信网论坛 BBS.3S001.COM

炉渣水泥比

水泥当量

为了寻求合适的炉渣和硅酸盐水泥胶结剂的比例，需要确定不同混合料的水泥当量。水泥当量的定义是在保持混合料的单轴抗压强度不变的条件下，1公斤炉渣所能取代的硅酸盐水泥的重量。因为大量浇灌时的长期强度被视为炉渣-水泥胶结剂的主要应用价值，故通常把224天的单轴抗压强度作为计算的基础。由于表面强度下降那些样品的试验结果不能代表大量浇灌时的强度，故略去不计。

具体作法如下：

首先，把只含硅酸盐水泥和尾矿的每种混合料的抗压强度对应硅酸盐水泥的含量绘制成曲线图。如图5中下面那条

线所表示的。

其次，把含有炉渣、硅酸盐水泥和尾矿的每种混合料的抗压强度对应其水泥含量绘制成图。

为便于展示该方法将炉渣和水泥比为1：1的混合料强度曲线表示于图5中。由图中可见，一种含5.8%硅酸盐水泥的混合料与含3%炉渣和3%水泥的混合料具有相同的强度。所以，在这种情况下，1公斤炉渣的水泥当量为2.8÷3＝0.93公斤硅酸盐水泥，在胶结料中炉渣-水泥比为3%：3%，亦即1：1。

表5　作为硅酸盐水泥代用品，炉渣的水泥当量值

水泥含量百分比	炉渣水泥比	炉渣的水泥当量
3	1：1	0.93
6	1：1	0.53
	2：1	0.33
	3：1	0.46
12	0.5：1	0.12
	1：1	0.29

地信网论坛 BBS.35001.COM

表5中所列的其他比例的硅酸盐水泥和炉渣混合料，是用类似方法进行试验所获得的结果。

推荐的炉渣水泥比

以上计算结果（同时也表示在表5第一行中）表明，基于3%的硅酸盐水泥，炉渣-水泥比为1：1的胶结剂，和纯硅酸盐水泥差不多一样好。根据水泥含量为6%计算，炉渣-水泥比为1：1时得出最佳水泥当量值。按水泥含量12%计算，1：1的炉渣-水泥比给出的水泥当量较其他炉渣-水泥比值要好些。

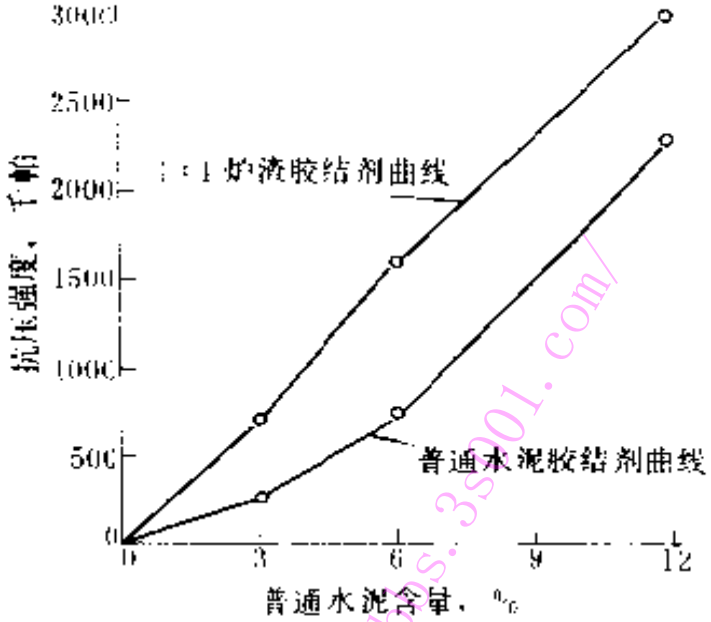


图 5　224天的胶结充填料中，1:1炉渣-水泥混合料和硅酸盐水泥混合料的抗压强度对应水泥含量图

细磨炉渣是一项昂贵的作业。为了减少细磨炉渣的用量，应当选择具有高水泥当量的炉渣-水泥比用于胶结充填混合料中。根据已作过的试验，1:1的炉渣-水泥比，亦即50%的水泥由炉渣代替是合适的。

为了达到同样的强度，1:1炉渣-水泥组合胶结剂的用量要大于纯硅酸盐水泥的用量，除掉很贫的混合料外。例如：从图5中可见，用12%的1:1炉渣-水泥的胶结剂代替9.2%的纯硅酸盐水泥胶结剂得到1589千帕的强度。

气冷炉渣

曾经做过细磨气冷炉渣的试验以便观察这种材料能否被用作凝硬添加剂，而使水淬造粒费用降低。为此，要将气冷

炉渣磨到很细的粒度(即4000布莱恩)，以期能把其中可参与凝硬反应的玻璃质颗粒暴露出来。含硅酸盐水泥6%和相应地加入6%和12%的细磨气冷炉渣混合料，224天的强度分别为951和980千帕。而掺有同样数量水淬冷的细磨粒状炉渣的混合料却有1589和1793千帕的强度。这说明气冷炉渣不是一种很合适的凝硬性材料。然而，它和只含硅酸盐水泥的混合料相比，强度略有增加。这主要归因于作为骨料的尾矿充填料物理性能的改善。

用同样材料作对比试验表明，只磨到3000布莱恩的炉渣比磨到4000布莱恩的炉渣强度要低一些。

试 验 工 作 量

当用直径为$15\frac{1}{4}$厘米的圆柱形试件作试验时，单轴抗压强度所取的值是56天养护龄每种混合料两个样品的平均值，以及养护56天以后的3个样品的平均值。如用直径为7.5厘米的圆柱体作试验，则所取的值是14天养护龄每种混合料3个样品的平均值，以及养护14天以后每种混合料4个样品的平均值。如用立方体作试验，则试验结果应是6次试验结果的平均值。三轴试验结果是以每种混合料6个圆柱形试件的结果为基础。这种试验工作量对于确定各种混合料的强度特性被认为是足够的。

结 语

对于用硅酸盐水泥、鹰桥镍公司细磨粒状炉渣以及该公司的尾矿所制成的水力混合充填料，以70%的重量浓度制备成料浆并浇灌。经过实验室鉴定可作出以下几点结论：

1．细磨粒状炉渣使胶结充填体的抗压强度增加。这是因为炉渣的凝硬作用以及作为骨料的尾矿充填料的物理性能得到改善所致。

2．含胶结剂少的混合料，在长期放置以后，炉渣所起的增强效应最为明显。加入大量炉渣以期获得早期高强度看来没有经济上的优越性。

3．50%的硅酸盐水泥用炉渣代替是最适合的置换量。但这种混合胶结剂的用量在多数混合料中必须大于纯硅酸盐水泥的用量才能获得所期望的强度。

4．为了增进炉渣的凝硬能力，水淬造粒是需要的，单是细磨是不够的。

5．在含炉渣少的贫混合料中出现表面强度下降现象。这种现象初始时以每月10厘米的速度渗入充填体内部。

6．加入炉渣对孔隙比的影响很小，但却使变形模量增加了。

7．加入炉渣使内聚力增加。

8．当炉渣和水泥的总量按重量百分比约占12%时，内摩擦角达到最大值。

9．实验室的模拟不可能全部都象生产条件那样，因此关于生产使用的最终结论必须有待于现场实验。

10．在实验室试验中，1:1的炉渣-水泥比所显示出来的强度特性可以作为现场试验时用鹰桥细磨粒状炉渣代替50%的硅酸盐水泥的依据。

参 考 文 献

[1] Espley, G. H., Beattie, H. F., and Pasieka, A. R., Cemented Hydraulic Backfill Within the Falconbridge Group of Companies. *CIM*

Bulletin, Vol. 63, No. 701, pp. 1002-1010, 1970.

[2] Thomas, E. G., A Review of Cementing Agents for Hydraulic Fill, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, papers concerned with Mount Isa Mines Limited reprinted from the Jubilee Symposium on Mine Filling, pp. 65-75, August 1973.

[3] Emery, J. J., Kim, C. S., and Cotsworth, R. P., Base Stabilization Using Pelletized Blast Furnace Slag, paper presented at the ASTM Symposium on Graded Aggregate Bases and Base Materials, Atlanta, U. S. A., December 1974.

[4] Roy, N. N., Method for Determination of Glass Content in Quenched Slags, internal Falconbridge Nickel Mines Limited Report, August 20, 1975.

[5] ASTM Designation: C 204-73, Standard Method of Test for Fineness of Portland Cement By Air Permeability Apparatus, pp. 187-193, Part 9, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, 1973.

[6] Hillebrand, W. F., Lundell, G. E. F., Bright, H. A., and Hoffman, J. I., *Applied Inorganic Analysis*, Second Edition, pp. 827-828, John Wiley & Sons, Inc., 1953.

[7] Bawa, K. S., Development of Shotcrete for Metro Construction in Washington, Use of Shotcrete for Underground Structural Support, *Proceedings of the Engineering Foundation Conference*, Berwick Academy, South Berwick, Maine, U. S. A., pp. 33-49, July 16-20, 1973.

[8] Weaver, W. S., and Luka, R., Laboratory Studies of Cement-Stabilized Mine Tailings, *CIM Bulletin*, Vol. 63, No. 701, pp. 988-1001, 1970.

地质网论坛 BBS.35001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.35001.com/

充填料的渗透率及其在矿山充填实践中的重要性

E.G.托马斯*

摘　要

简要评述了充填料渗透率的重要性和测量渗透率的实验室方法。阐明了渗透率和渗透速率的差别。

报道了综合性实验室渗透率试验项目的成果，以及用仅仅测量颗粒粒度 d_{10} 和最小孔隙比来预测矿山充填料渗透率的实际应用。由此发展起来的相互关系对多孔介质中流体流动的研究具有十分重要的意义。

进一步报道的成果指出，最小颗料对控制充填料渗透率的重要性，这是一个能从选矿厂尾砂中最大限度地回收充填料而又不影响充填料排水的重要因素。对水砂胶结充填料的渗透率试验结果也作了报道。

前　言

矿山水砂充填料浇灌时的含水重量百分比通常在30—40%左右，并在它能承受地压或产生作用之前须先脱水到20%左右。虽然沉淀分流能脱去相当一部分的水，但大量的

*E.G.托马斯（Thomas）为澳大利亚新南威尔士大学采矿工程系高级讲师。

水是由渗出及渗滤排出的，而这两者的脱水机理均与充填料的渗透率有关。在充填料上人和设备能重新行走前，重力渗透是在这段时间内起作用的唯一脱水机理，这对回采循环周期的长短是很重要的。

随着充填料开始脱水以后，要考虑到充填料被淹没经常是可能的。在这种情况下，充填料的安全可靠性与其渗透率有直接关系。

采矿实践中充填料渗透率的重要性由下述事实显示出来，即最小渗透率（相当于100毫米/小时的渗透速率）是被广泛地用来确定充填料可利用性的唯一质量标准。

充填料渗透率的测量

渗透率及渗透速率的定义

如下所述，渗透率与渗透速率之间是有数学上的关系的，它们每一个都是流体在多孔介质中流通难易程度的一种量度。

渗透率的定义由下式给出：

$$K=\frac{Q\cdot L\cdot \eta}{h\cdot A\cdot \rho^2\cdot g}$$

式中：K——渗透率，米^2；

Q——流体流经多孔介质的质量流量，公斤/秒；

L——多孔介质沿流向的长度，米；

h——通过多孔介质的静压差，米；

A——多孔介质垂直流向的横断面积，米^2；

η——流体流的动力粘滞度，帕秒；

ρ——流体流的密度，公斤/米^3；

g——重力加速度，米/秒^2。

渗透率是一个与多孔介质有关的特性，而和流体流及水力坡度无关。包括在渗透率定义中的唯一条件是流动特性必须符合达西定律。这是一个在水砂充填实践中不受约束的要求。

渗透系数的定义由下式给出：

$$k = \frac{q \cdot L}{h \cdot A}$$

式中：k——渗透系数，米/秒；

q——流体通过多孔介质的体积流量，米^3/秒；

L——沿流向的多孔介质长度，米；

h——通过多孔介质的静压差，米；

A——多孔介质垂直流向的横断面积，米^2。

渗透系数应用于特定温度下特定流体的流量，因此它是一个多孔介质及流体流的综合特性。

地信网论坛 BBS.3S001.COM

渗透速率的定义由下式给出：

$$V_p = \frac{q}{A}$$

式中：V_p——渗透速率，米/秒；

q——流体通过多孔介质的体积流量，米^3/秒；

A——多孔介质垂直流向的横断面积，米^2。

渗透速率也应用于特定温度下的特定流体，附加的约束条件是取水力坡度h/L的比值为1。

因此渗透率只是与流体流无关的特性。理解介质及流体对渗透速率的综合作用的重要性在下列例子中可得到阐明。在热带地区，温度为40℃，渗透速率为100毫米/小时的矿山充填料，当采用水的粘滞性及密度值时，在北极或亚北极，温度为5℃时的渗透速率将只有44毫米/小时。因此，要想得

到相同的渗透速率，较冷地区充填料的渗透率必须是温暖地区的230%。

测量方法

有三种可用来测量充填料渗透率或渗透速率的实验室技术，现简述如下：

恒压头渗透率仪

恒压头渗透率仪用于土力学已有相当时日。阿克罗德(Akroyd)[1]曾作过很好的介绍。托马斯介绍过一个特别适合测试非胶结水砂充填料的试验装置[2]。

落压头渗透率仪

正如阿克罗德描述的那样，落压头渗透率仪对土力学也是一种可用的工具。图1所示为用于胶结水砂充填中测试的落压头仪，在托马斯的一篇文章中有这种仪器的照片[3]。

非胶结水砂充填料的恒压头渗透率测量及胶结水砂充填料的落压头渗透率测量，这两者相结合被认为对充填料绝对渗透率的基础研究是很理想的。由一种测量技术转换到另一种测量技术看来是一个约为10^{-13}米^{2}的渗透率。

渗透速率试验

此法广泛应用于采矿工业，主要是由于它制造和操作很简易。韦门特(Wayment)及尼科尔森(Nicholson)描述过最近改进过的型号[4]。罗林(Rawling)等人描述过该方法在胶结水砂充填料中的应用情况[5]。

渗透率测定中的问题

综合的经验

在考察渗透率及渗透速率测定中所固有的一些问题之前，

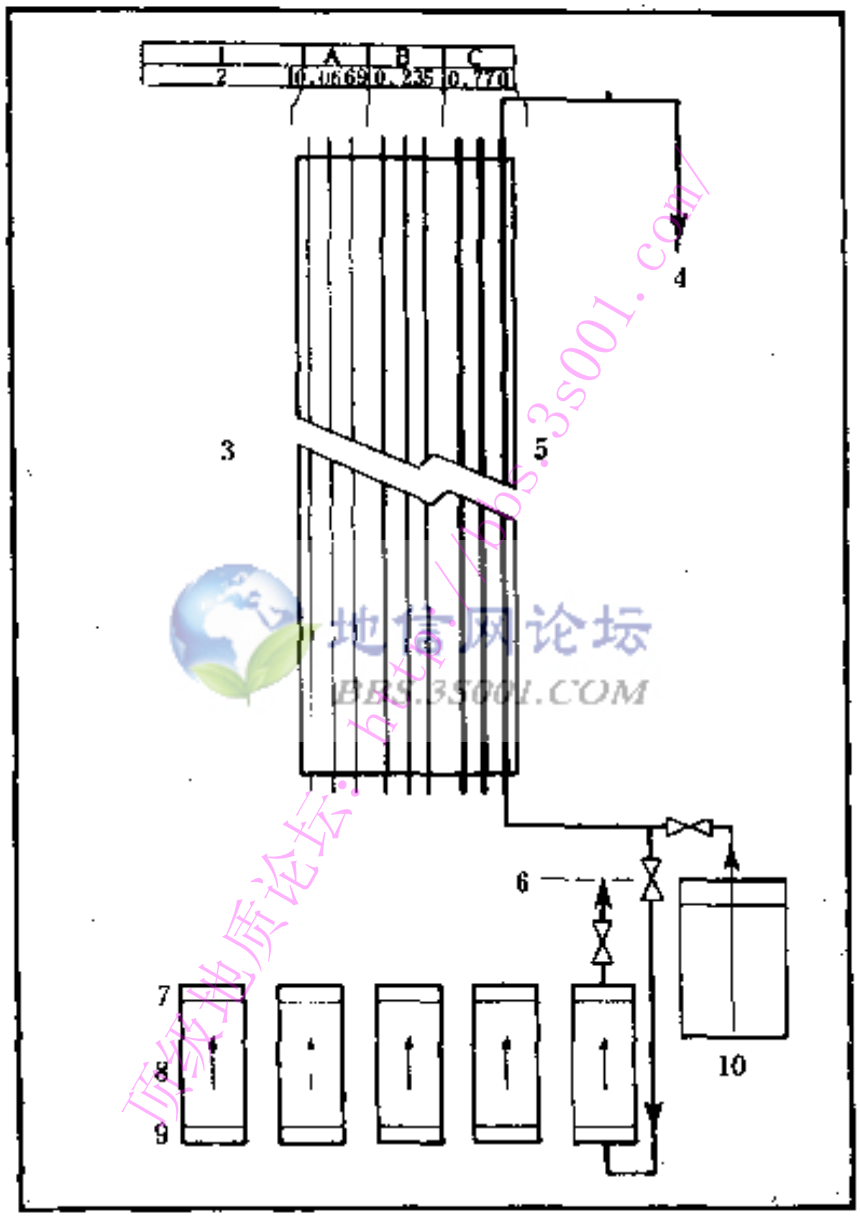


图 1　胶结水砂充填料用的落压头渗透率装置，可用于同时做 5 个不同水泥含量的试样

1——立管组；2——内孔断面；3——10—40分钟范围内的排泄时间；4——通向充填料立管的虹吸管；5——立管长1.5米；6——排泄标高变换；7——多孔石块；8——试样长0.15米，面积40×10^{-4}米^2；9——多孔石块；10——脱气蒸馏水供应。

顶级地质论坛：bbs.3s001.com/
地信网论坛
BBS.3S001.COM

先介绍一些有经验的作者的一般结论。拉姆(Lambe)及惠特曼(Whitman)[6]叙述说:“土壤渗透率的实验室测定从根本上是简单易懂的，但要获得可靠的资料需要细致的技术。”阿克罗德指出:“在所有的渗透率试验中，所得结果无例外地都变化很大。”最后托马斯[7]写道:“渗透率（或渗透速率）的精确测定是充填技术最困难的问题之一。只有愚人及没有经验的人才会完全相信和满足于渗透率测定的精度。”

有关问题

器壁效应 在渗透率仪器壁之内破坏砂粒密实结构人为地增大了计示的渗透率数值，而这种器壁效应随样品粒度的增大而增大，随渗透仪断面和非圆形渗透率仪断面的减小而增大，并取决于器壁的结构材料。为使器壁效应充分地降低，渗透率仪的截面应是圆形，面积至少应4000毫米^2。玻璃器壁不如塑料器壁好。

端部效应 任何顶部的或底部的有孔堵塞都会增加流动阻力，从而降低了计示渗透率。恒压头渗透率仪可以消除这种效应。在试样制作中，让其顶部有任何一层细粉末都会使计示渗透率大大地减少。可以设想，1毫米厚的一层粉粒能产生相当于300毫米试样长度的流动阻力。这种效应可在恒压头渗透率仪中被除掉。

试样均匀度 试样在垂直和水平方向都必须是均匀的。恒压头渗透率仪至少能检查垂直方向的均匀度。制作的试样可以是干的、湿的或是浆状的。然而，每一种形式都有其相应的问题存在。

温度控制 流体粘滞度对温度很敏感。一个温度可控制的室或柜对获取满意的结果是重要的。

压实密度控制 渗透率对试样的孔隙比很敏感。试样的

地信网论坛

孔隙比从最低到最高的变化可使渗透率成百分之几百的变化。在试验中必须测定孔隙比。托马斯[2]提出的$e^3/(1+e)$的关系函数用于把试验时的渗透率换算成能用于矿山孔隙比的渗透率。

水力坡度控制 为了计算流动速度的灵敏度，细粒的试样要求增大水力坡度以获得足够的流量。非常粗粒的试样要求降低水力坡度以保证与达西定律相一致。在渗透速率试验中假定一个单位的水力坡度，要求渗透率严格与试样顶部相吻合，这是不可能达到的一个试验约束条件。

试样充气 不论怎样注意排出试验水所含的空气，但试验进行中流速常常下降。这种现象可解释为由于试验水分解出的气体使试样充气所致。为了使这种现象降到最低程度需把温度的变化、压力的变化，以及流动的方向综合加以考虑。

地信网论坛 BBS.3S001.COM http://bbs.3s001.com/

粉粒的移动 非胶结充填料是无粘性粒状物料，它含有少量粘土颗粒。这些颗粒可能移动到临界流线上并发生可常常观察到的流速逐渐下降现象。上向流动对把这种效应减至最小，可能比下向流动要好些。

胶结充填料 胶结充填料特有的问题是，随着养护的进展孔隙比逐步下降。胶结充填料在试样制备，试液浸出及孔隙比控制中也会出现特有的问题。

渗透率的间接测定

文献资料

由于各种原因，曾从有关特性的测定，特别是粒度分析，做了许多预测多孔介质渗透率的尝试。在采矿工业中，在用选矿厂尾矿制备充填料的过程中，间接地通过对充填料流，

甚至可能对最后的尾矿流的颗粒进行载流粒度分析，进行产品渗透率的连续监测，来对质量控制作较大的改进。更广义地说，对多孔介质的流动机理与控制更清楚的理解可能起因于一个以根本的、非经验的介质特性来确定渗透率的能力。

贝茨（Bates）及韦门特[8]把多变量最小二乘法回归分析用于约135个矿山充填料样品的渗透管试验结果，根据孔隙比，较细直径占10%、50%及60%的充填料样品，导出了一个预测渗透速率的公式。这个公式受到托马斯[9]的批评，认为大体上是个经验公式，其应用范围无必要受作者们的限制。托马斯随后进行的试验（下面还要讨论）并提出建议认为，贝茨及韦门特公式不适当地强调了大颗粒的效应。

拉姆与韦特曼[6]研究了几个预测方程式。最简明的公式是黑曾(Hazen)提出的。它完全是根据10%较细直径的平方，因而强调了在渗透率控制中较细粒度的重要性。

回顾了文献之后，作者曾作了一个综合实验计划，意欲导出类似充填物料渗透率的非经验性预测公式，并达到两个目的，即：提供一个工业上有用的技术及增进对流体通过类似充填料型多孔介质的机理。

试验工作

物料

试验的物料是洗过的海滩石英砂。对所取原样并经过球磨、分级和参照实际的充填料预先选定的粒级混合配制成批料来进行试验。对28个不同粒级作过试验。其粒度分析见表1及表2。第28批是未经加工的原砂样，具有滚圆的颗粒。然而，其他批料的球磨产生物皆为角状颗粒，这是由尾矿所产生的充填料的特征。

基于化学惰性和粒级的固体密度较稳定，所以选用石英砂做试样比用实际的充填料为好。因这些性质对孔隙比计算和微粒分级都是重要的因素。

表 1　硅石渗透率试验物料的粒度分析

批号	粒度分析，%（重量）						
	粒级，微米						
	425/300	300/212	212/152	152/106	106/75	75/53	−53
1	5.00	20.00	40.00	20.00	10.00	5.00	0.00
2	5.00	10.00	20.00	40.00	20.00	5.00	0.00
3	5.00	10.00	10.00	20.00	40.00	15.00	0.00
4	5.00	10.00	10.00	15.00	20.00	40.00	0.00
5	5.00	30.00	30.00	20.00	10.00	5.00	0.00
6	5.00	15.00	30.00	30.00	10.00	10.00	0.00
7	5.00	10.00	15.00	30.00	30.00	10.00	0.00
8	5.00	10.00	10.00	15.00	30.00	30.00	0.00
9	5.00	15.00	40.00	15.00	10.00	5.00	10.00
10	5.00	5.00	10.00	15.00	40.00	15.00	10.00
11	5.00	25.00	25.00	15.00	10.00	10.00	10.00
12	4.76	9.52	14.29	23.81	23.81	14.29	9.52
13	5.00	10.00	40.00	10.00	10.00	5.00	20.00
14	5.00	5.00	10.00	10.00	40.00	10.00	20.00
15	4.76	23.81	19.05	14.29	9.52	9.52	19.05
16	5.00	10.00	10.00	20.00	20.00	15.00	20.00
17	5.00	10.00	30.00	10.00	5.00	10.00	30.00
18	5.00	5.00	10.00	10.00	30.00	10.00	30.00
19	5.00	20.00	20.00	10.00	5.00	10.00	30.00
20	5.00	5.00	10.00	10.00	20.00	20.00	30.00
21	5.00	5.00	5.00	5.00	10.00	30.00	40.00
22	5.00	0.00	0.00	5.00	15.00	35.00	40.00
23	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	25.00	50.00
24	5.00	0.00	0.00	0.00	10.00	35.00	50.00
25	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	15.00	60.00
26	5.00	0.00	0.00	0.00	5.00	30.00	60.00
27	2.20	15.70	20.36	27.22	17.51	10.74	6.29
28	15.88	59.47	22.90	1.52	0.14	0.07	0.03

顶级地质论坛 http://bbs.3s001.com/
地信网论坛 BBS.3S001.COM

表 2　表 1 中各批料的－53 微米物料的粒度分析

批　号	粒度分析，%（重量） 粒级，微米					
	53/44	44/33	33/23	23/15	15/11	－11
1 — 8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9 —11	1.55	2.95	1.84	1.12	0.59	1.95
12	1.48	2.81	1.75	1.07	0.56	1.86
13—14	3.10	5.90	3.67	2.24	1.18	3.90
15	2.95	5.62	3.50	2.14	1.13	3.71
16	3.10	5.90	3.67	2.24	1.18	3.90
17 ~ 20	4.65	8.85	5.51	3.37	1.78	5.85
21—22	6.20	11.80	7.35	4.49	2.37	7.80
23—24	7.76	14.75	9.19	5.61	2.96	9.75
25—26	9.31	17.69	11.02	6.73	3.55	11.70
27	3.30	2.75	0.13	0.08	0.01	0.02
28	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

地信网论坛
BBS.3S001.COM
质量论坛：http://bbs.3s001.com/

粒度筛分技术

托马斯[7]广泛详述了粒度筛分技术。大于53微米的颗粒作筛分析，小于53微米的用沃曼旋流分级器（Warman Cyclosizer）分级，并作循环周期、流速及水温的全部修正，所采用的固体计算密度为2.65吨/米^3。

渗透率的测定

用托马斯[2]所叙述的恒压头渗透率仪测定每批料的渗透率。大多数是在两种独立的孔隙比情况下进行测定。反复进行各种渗透率的试验，获得了带有78个独立的渗透率测定的40个试验的最终方案。

最小孔隙比 $e_{最小}$ 的定义及测定

$e_{最小}$的含义是在颗粒不碎裂情况下，每一批料所具有的

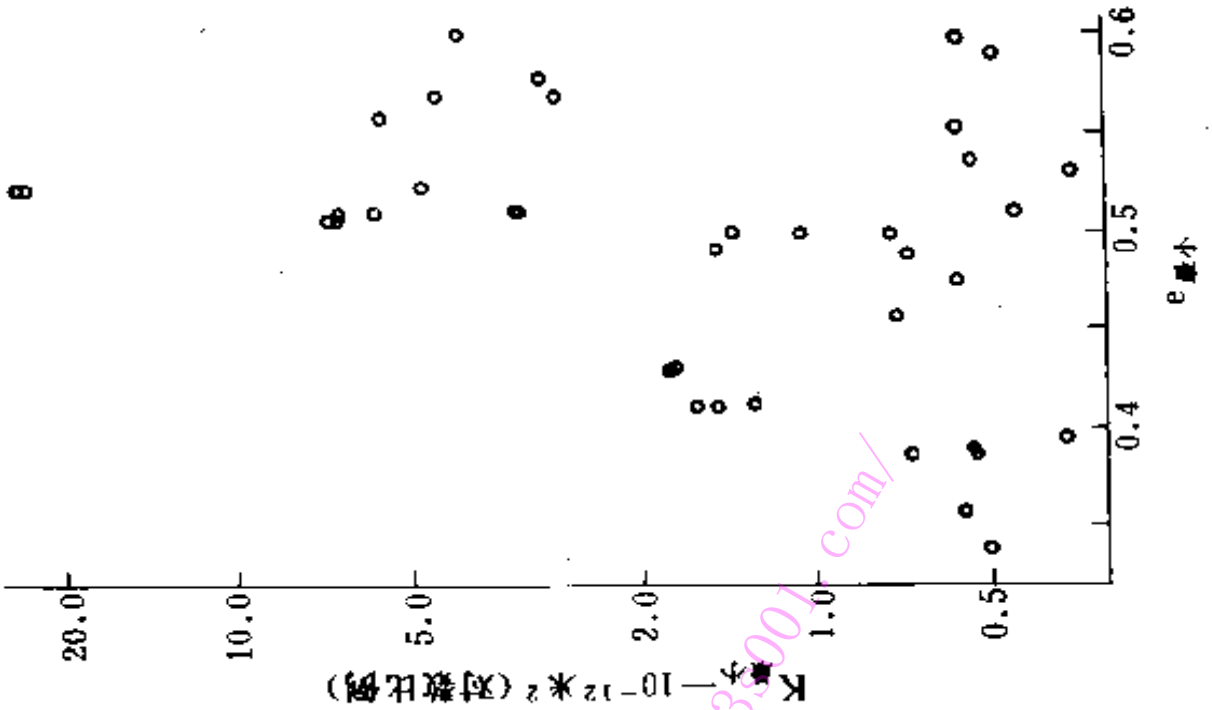


图 2　$K_{最小}$ 对 $e_{最小}$ 关系图

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

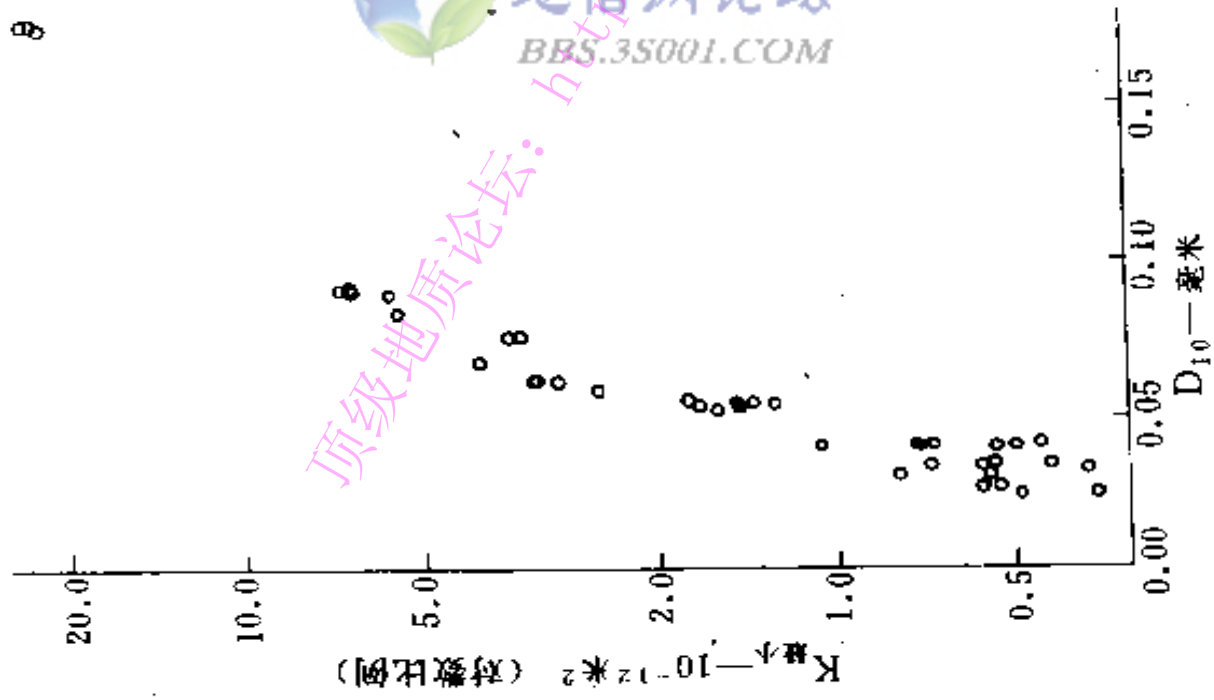


图 3　$K_{最小}$ 对 d_{10} 关系图

最小孔隙比。每一批料的$e_{最小}$用在垂直荷载下的竖圆柱体样品经过持续的、大量的振动来测定。当连续的振动不再产生能觉察的压实程度时，测得的值即为$e_{最小}$值。

孔隙比最小时的渗透率$K_{最小}$可用托马斯[2]提出的、能用于充填物料的下列比例式求得：

$$K_{最小}=K_{试}\frac{e_{最小}^{3}(1+e_{试})}{e_{试}^{3}(1+e_{最小})}$$

几乎毫无例外，每批料都在两种孔隙比下作测定。在计算$K_{最小}$前用上式先确定$K_{试}$及$e_{试}$。

试验结果

试验结果表示于$K_{最小}$对$e_{最小}$的关系图表中(见图2)，$K_{最小}$对d_{10}的关系图表(见图3)和$K_{最小}$对$e_{最小}\times d_{10}$的关系图表(见图4)中。

地信网论坛
BBS.3S001.COM

关于结果的讨论

从图4可以看出，$K_{最小}$明显地与$e_{最小}\times d_{10}$的积有关。后者提供了计算$K_{最小}$的基础，进而是任何所期望的孔隙比渗透率的计算基础。图4中，目测最佳吻合线的吻合质量已足以满足包括渗透率测量在内的任何试验方法。

对照图2及图3，很明显，$K_{最小}$对d_{10}的依赖关系比$e_{最小}$更为明显。这说明最小粒度，继而是最小孔隙比在控制渗透率中的重要性。

$e_{最小}$被看作是多孔介质的许多特性的一个简单描述符号，最重要的是颗粒形状，及不同大小颗粒的相对比例。然而，$e_{最小}$与颗粒的绝对尺寸无关。它正象只表明流动路径的弯曲而不表示这些流动路径的绝对尺寸一样。$e_{最小}$不是一个经验的描

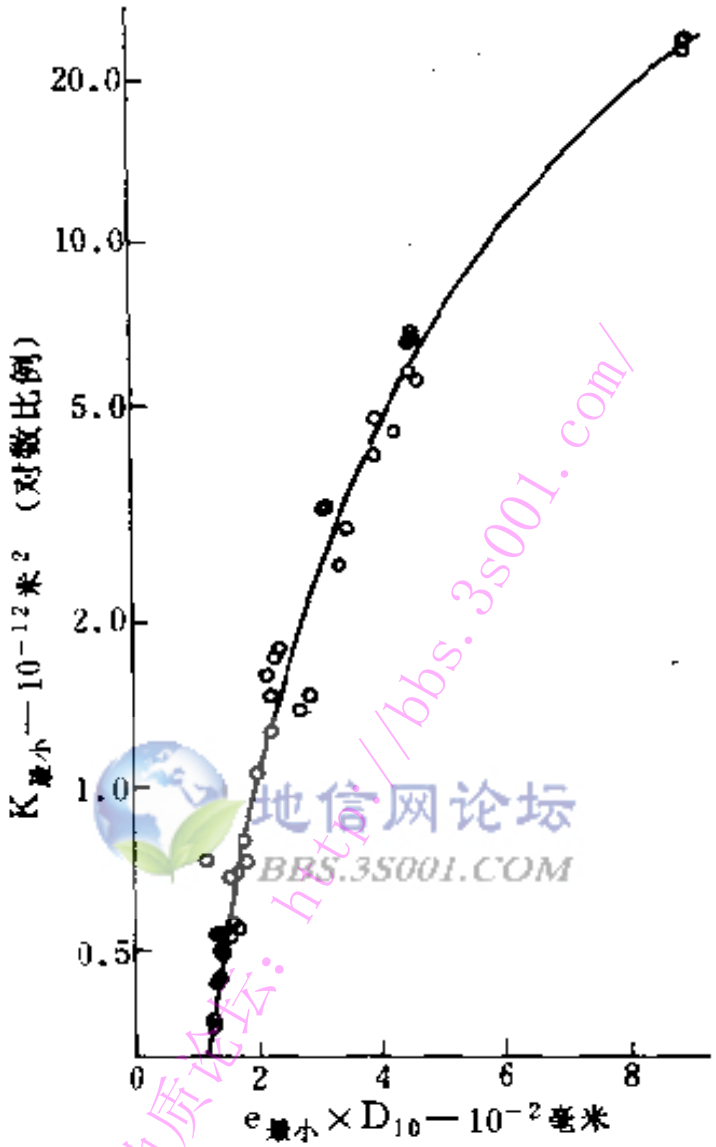


图 4　$K_{最小}$对$e_{最小}\times d_{10}$乘积关系图

述符号。

选用d_{10}而不选别的细粒百分比数字在某种程度上是凭经验而定的。对结果的进一步分析可显示出用d_5有更好的关系曲线。

图 4 中最佳吻合线相对纵坐标呈渐近线，对横坐标它的斜率相对地逐渐增大，这两者都是渗透率控制中评价最细颗粒作用的十分重要的因素。当然，在不忽视渗透率情况下，

地信网论坛 BBS.3S001.COM
页岩地质论坛：http://bbs.3s001.com/

表 3　尾矿及制备的充填物料的筛分结果

粒级，微米	重量，%			
	尾　矿	1号充填料	2号充填料	3号充填料
+425	0.01	0.00	0.00	0.00
425/300	0.01	0.01	0.00	0.01
300/212	0.02	0.03	0.03	0.02
212/150	0.33	0.81	0.68	0.88
150/106	3.90	8.21	7.34	9.14
106/75	12.60	24.87	22.31	26.54
75/53	17.09	30.83	27.80	29.54
53/41	5.68	9.67	13.21	14.13
41/31	16.57	17.10	19.31	15.65
31/22	13.58	3.19	5.86	3.07
22/15	6.67	0.62	1.05	0.37
15/11	5.32	0.58	0.60	0.20
−11	18.22	4.07	1.81	0.45

地信网论坛

这与尾矿最大限度地用作充填料有实质性的关系。

在实用上，图 4 与$e_{最小}$及d_{10}的测定相结合，可用以预测$K_{最小}$，进而预测任何所要求的孔隙比的渗透率。

渗透率控制中细颗粒的重要性

试验计划

曾用三个独立的实验室研究来进一步评价细颗粒在渗透率控制中的重要性。

1．用选矿厂尾矿在实验室中制备各种粒级的充填料。

2．对预定粒级的石英砂批料作渗透率试验。

3．胶结水砂充填料的渗透率试验。

下面详细叙述研究工作及其成果。

选矿厂尾矿的试验

应用反复倾析技术把一个选矿厂尾矿大样制备成三种不同的充填物料。尾矿及充填料的筛分结果见表3。各个充填料筛分结果的特点是，除－11微米这个最细的粒级外，全部结果都很近似（＋53微米用筛子筛析；－53微米用旋流器分级）。

用韦门特和尼科尔森[4]所介绍的并经过改进的技术作渗透率试验，其结果见表4。在同一试验系列中对来自一个生产矿山作参考用的充填料试验结果，也列于表中以供对比。

所列成果着重表明，在渗透率控制中细颗粒的重要性，以及在适当地降低渗透率情况下，在充填料制备实践的选择中，最大限度地提高尾矿用作充填料的量是很重要的。

表 4　制备的充填物料渗透率的试验结果

充填料	尾矿充填料回收率	－11微米粒级	20℃时的渗透速率
	重量%	重量%	毫米/小时
1	51.9	4.07	20.9
2	53.0	1.81	40.6*
3	43.6	0.45	69.9*
参考	—	—	28.4

* 两次渗透速率测定的平均数。

地信网论坛 BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

分级细磨石英砂的试验

和伯特里季（Bettridge）[10]一起，把仔细均匀分级的细磨石英砂以53微米为界进行湿筛，筛下物用沃曼旋流器分为不同粒级。用标准的恒压头渗透率仪对＋53微米物料及每一个混合试料进行渗透率试验。每个混合试料是由在＋53微米试料中按顺序逐次加入旋流器分级的细粒级的物料所组成。

因此在每个试料中的最小的颗粒的尺寸已完全被控制住了。作为一种磨细了的物料，包含着全部粒级，也作了试验。7个试料的筛分结果见表5。

表5　限制最小粒度尺寸的分级磨砂试样的粒度筛析

筛分析结果，重量%							
粒　级	试　样						
微　米	1	2	3	4	5	6	7
+425	0.15	0.14	0.11	0.09	0.08	0.08	0.07
425/300	13.59	12.79	10.64	8.74	7.68	7.20	6.16
300/212	51.88	48.85	40.62	33.36	29.33	27.50	23.52
212/150	16.57	15.60	12.98	10.66	9.37	8.78	7.51
150/106	2.42	2.28	1.89	1.56	1.37	1.28	1.10
106/75	5.01	4.71	3.92	3.22	2.83	2.65	2.27
75/53	10.39	9.78	8.13	6.68	5.87	5.51	4.71
53/44	0.00	5.85	4.86	3.99	3.51	3.29	2.82
44/33	0.00	0.00	16.83	13.83	12.16	11.39	9.75
33/23	0.00	0.00	0.00	17.88	15.72	14.73	12.60
23/15	0.00	0.00	0.00	0.00	12.08	11.32	9.69
15/11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.26	5.35
−11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.45

7个试料中的每一个试料做了4次渗透率试验。把每个试料的渗透率平均值，用其孔隙比函数$e^3/(1+e)$换算成孔隙比为0.5时的数值，所得结果绘制成图，如图5所示。

图5表明，在不到约为10微米的最小粒级时，渗透率曲线总是稳定下降的，而不产生偏离情况。这再次说明控制渗透率中细颗粒的重要性。

曲线在粒度上部末端偏离了线性关系，与图4相关。大颗粒对渗透率的控制影响较小。

胶结水砂充填料的渗透率

因为加入水泥消除了充填料液化的可能性，以及水泥的

地质论坛：http://bbs.35001.com/
地质网论坛 BBS.35001.COM

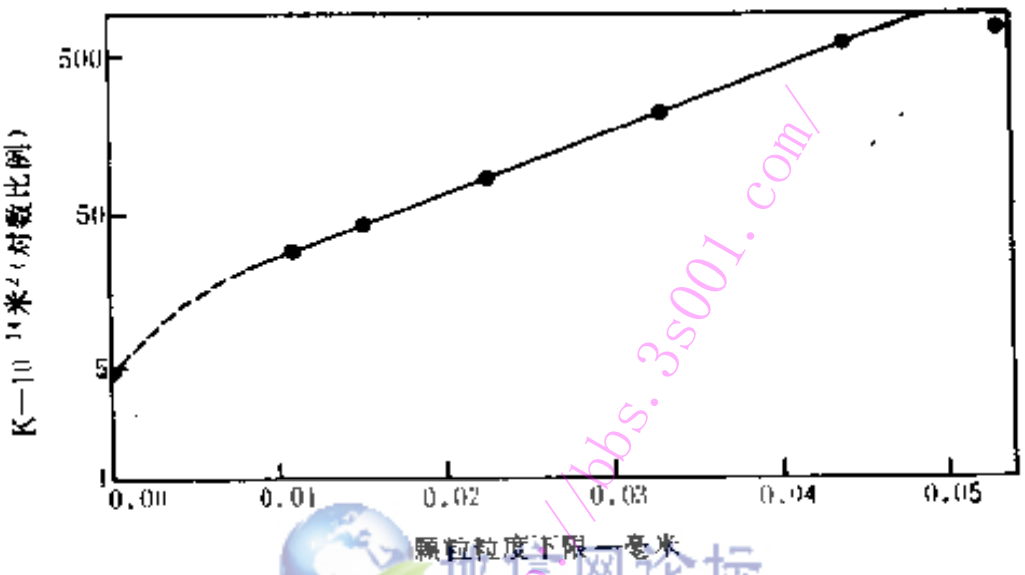


图 5　渗透率与最小粒度的关系

水合作用促使充填料脱水，故很少关心胶结充填料的渗透率，因而也很少测定，而测定也更为困难，所测得的结果比非胶结充填料更为含糊。

与泰勒[11]配合，用图 1 的落压头渗透率仪装置作了逐步增加普通水泥含量时的渗透率试验。用20℃的渗透速率表示的渗透率见图 6。渗透率是依试验孔隙比而得的数值，压实作用力在试料制备中按标准程序进行。

图 6 显示出两个要点。

1．加入16％重量的普通水泥使渗透率减少到非胶结充填料的2.4％左右，不过降低的速度是随加入量增加而减少。

2．只需去掉4％重量的普通水泥，渗透率就增加约400％，这再次说明在渗透率的控制中细颗粒的绝对重要性。

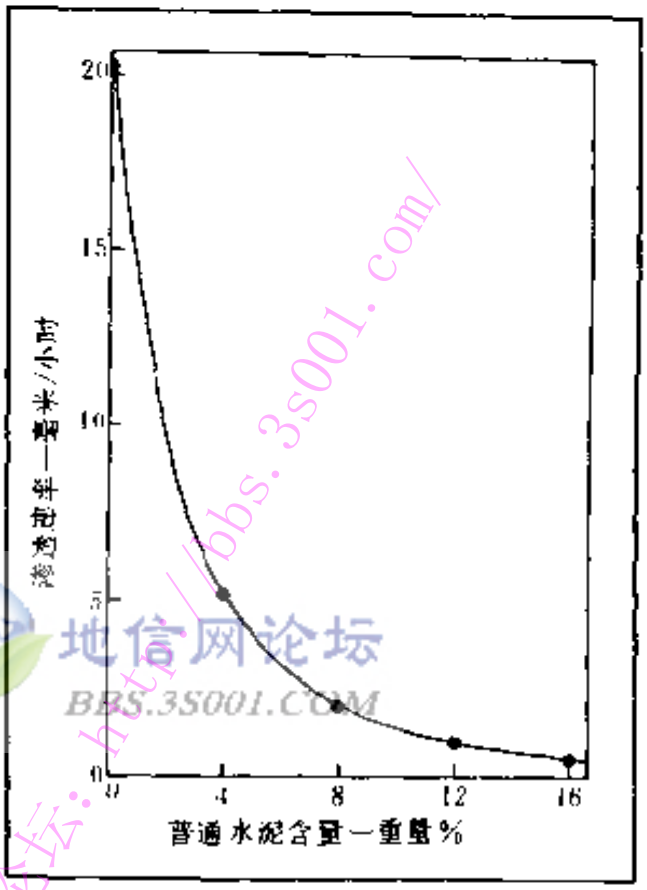


图 6 添加水泥的渗透速率的变化曲线(7 天养护期)

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/

结　　语

1. 实验室测定渗透率和渗透速率是十分简便的，但是需要仔细的技巧才能获得可靠的结果。

2. 充填料的渗透率能从测定 d_{15} 及 $e_{最小}$ 来进行预测。

3. 充填料的渗透率受含有的最小颗粒所控制，大颗粒的影响很小。

4. 加入普通水泥大大降低了充填料的渗透率。

参 考 文 献

[1] Akroyd, T. N. W., *Laboratory Testing in Soil Engineering*, Marshall Press: London, 1957.

[2] Thomas, E. G., The Important Properties of Hydraulic Fill, with Particular Reference to Mechanized Cut and Fill Mining Operations, *Proc. Austral. Inst. Min. Metall.*, 220: 1-20, 1966.

[3] Thomas, E. G., Cemented Hydraulic Fill — An Approach to its Use in Mining Engineering, *Min. Mag.*, Vol. 128, No. 3, pp. 181-187, 1973.

[4] Wayment, W. R., and Nicholson, D. E., A Proposed Modified Percolation-Rate Test for Use in Physical Property Testing of Mine Backfill, U. S. Bur. Mines, Rept. Inv. 6562, 1964.

[5] Rawling, J. R., Toguri, J. M., and Cerigo, D. G., Strength and Permeability of Cement Stabilised Backfill, *Can. Min. J.*, Dec. 1966, pp. 43-47.

[6] Lambe, T. W., and Whitman, R. V., *Soil Mechanics*, Wiley: New York, 1969.

[7] Thomas, E. G., Fill Technology in Underground Metalliferous Mines, Aust. Mineral Foundation: Adelaide, 1976.

[8] Bates, C. R., and Wayment, W. R., Laboratory Studies of Factors Influencing Waterflow in Mine Back Fill, U. S. Bur. Mines, Rept. Inv. 7034, 1967.

[9] Thomas, E. G., Characteristics and Behaviour of Hydraulic Fill Material, Ph. D. thesis, Univ. of Queensland, 1969.

[10] Bettridge, R. T., The Relationship Between Permeability and Size Fractions with Respect to Underground Hydraulic Fill, B.E. (Mining) Thesis, Univ. of Queensland, 1966.

[11] Taylor, H. B., Permeability of Cemented Hydraulic Mine Fill, B.E. (Mining) thesis, Univ. of New South Wales, 1972.

地信网论坛 BBS.3S001.COM http://bbs.3s001.com/

地信网论坛
BBS.3S001.COM
顶级地质论坛：http://bbs.3s001.com/