前　言

随着冶金工业高速的发展，金属矿山选矿厂排出的尾矿量逐年增加，数量很大，如能将尾矿予以综合利用，并同时回收其中的有用矿物，不仅能充分利用国家资源，为国家创造财富，同时还能在不同程度上减少尾矿的堆存与危害。为此我们编写了这本书。但是，必须指出的是，由于目前国内对尾矿的综合利用大多处于试验研究阶段，加之综合利用的技术条件也比较复杂，各个矿山的尾矿在矿物组成和化学成分及粒度组成上又各不相同，在特定条件下的试验成果差异较大，因此对具体矿山尾矿的综合利用必须通过试验研究获得成果后才能采用。

本书在编写过程中得到了有关科研设计单位和矿山的大力支持和协助。湖南省建筑材料科学研究所，湖南省建筑设计院、株洲玻璃工业设计研究所、长沙矿山研究院、重庆市建筑科学研究所等单位协助审阅并提出了宝贵意见；李欣、张功镛、王定远、魏良等同志给予了支持和帮助，在此一并表示感谢！

本书执笔人：第一、四、五、六章黄焕文、黄堃；第二章潘键；第三、七章黄焕文。

由于我们水平有限，错误之处请批评指正。

编　者

一九七八年十二月

34845

目　录

第一章　概论 ……1
　第一节　尾矿综合利用的意义 ……1
　第二节　尾矿的物理性质和化学成分 ……3
　第三节　尾矿的矿物组分与矿床成因的关系 ……5
　第四节　尾矿综合利用的途径及其要求 ……15
第二章　利用尾矿作采空场的充填材料 ……20
　第一节　尾矿水力充填 ……21
　第二节　尾矿胶结充填 ……30
第三章　利用尾矿烧制水泥 ……39
　第一节　概述 ……39
　第二节　烧制水泥对于尾矿原料的技术要求 ……40
　第三节　水泥的矿物组成 ……42
　第四节　硅酸盐水泥生料的配料计算 ……52
　第五节　生料的制备 ……62
　第六节　煅烧工艺与窑型 ……64
　第七节　尾矿水泥的性质 ……83
　第八节　尾矿生料含硫与窑的技术作业状况和尾矿硅酸盐水泥质量的关系及其二氧化硫的净化处理 ……101
　第九节　拟建的尾矿水泥厂 ……116
　第十节　合理确定水泥厂的规模 ……125
第四章　利用尾矿制造硅酸盐建筑制品 ……130
　第一节　硅酸盐砖 ……130
　第二节　加气混凝土 ……141
第五章　利用尾矿制造其他建筑材料 ……156
　第一节　铸石 ……156
　第二节　玻璃 ……164
　第三节　耐火材料 ……172
　第四节　陶粒 ……177
　第五节　型砂 ……181

第六节　混凝土的掺合料……183
第六章　利用尾矿堆积场种植农林作物……186
第七章　国外尾矿的利用研究概况……202
一、概述……202
二、用尾矿制加气混凝土……202
三、用尾矿制作蒸压硅酸盐建筑材料……206
四、用铁矿尾矿制重混凝土……209
五、用铜尾矿烧制红砖……211
六、用尾矿烧制陶瓷制品……212
七、用尾矿烧制陶粒……214
八、硅质尾矿烧制玻璃和花砖及微晶玻璃……215
九、用石棉尾矿制矿棉……217
十、各种尾矿在建筑材料方面的利用研究情况……218
十一、利用尾矿修筑公路……219
十二、其他废料的利用研究……219

第一章 概 论

第一节 尾矿综合利用的意义

一、尾矿的堆存与危害

尾矿是矿石经磨矿后进行选别，将有用矿物❶选出后，所排弃的残渣，它含有多种脉石矿物❷。是冶金矿山的一种工业废料。它具有量大、集中、颗粒细小的特点。

国内外对于尾矿的处理，不论尾矿中有用矿物是否有回收价值，大都是在地面予以堆存。由于尾矿的产出量庞大，自然安息角小，如采用自然堆存的方法，则不能堆得太高，因而必须建坝堆存，占用大量田地。此外，由于尾矿的体重小、表面积大，遇水容易流走，而在原地干燥之后，遇风又容易飞扬，因此，必须进行防洪，尾矿堆表面覆土等措施，否则，被风吹扬，尾矿粉尘污染大气；被水冲走，流入农田，危害农业生产；流入江河，污染河水，破坏水质，填塞河道，造成公害；如建坝不稳固，防洪不周密，尾矿随洪泛滥，尾矿坝溃决造成淹没村庄，毁坏田地，甚至死伤人畜，所造成的灾害损失，更是无法估计。

随着现代工业的飞跃发展，钢铁和有色金属产量的不断增长，矿山选厂排出的尾矿量与日俱增，同时伴随着富矿资源的日益枯竭，贫矿资源开采比重的不断增大，金属矿山选厂的数目日益加多，选厂的规模日益扩大，因此，金属矿山选厂排出的尾矿量急剧增加，在有的国家已堆积成山，造成灾害，据有关文献报导：美国1965年选矿厂排出的尾矿量约有11亿吨。苏联、加拿

---

❶ 矿物是指化学成分及物理性质上比较均一的固态、液态或气态的自然体，是由地质作用形成的一种或多种化学元素组成的化合物。能被人们利用的矿物叫做有用矿物。

❷ 不含有有用矿物的岩石叫做脉石。组成脉石的矿物称为脉石矿物。

大、日本三个国家单在1969年生产铁、铜、铅、锌四种金属时，选厂所排出的尾矿量就达 5.6 亿吨。具有“铜矿之国”之称的赞比亚，从 1962 年至 1971 年的十年时间，所排出的铜尾矿量约为 1.6 亿吨。在这些国家中尾矿堆存所占用的田地是相当惊人的，如1965年美国选矿厂排出的尾矿竟占地 200 万英亩（折合1200万市亩），人口稠密、国土狭小的日本，迄今为止，尾矿堆积场就达 730 余个，目前已感到由于尾矿的堆存而购置土地是非常困难的了。在矿业开发较发达的一些国家中，因尾矿的堆存处理不善，而造成严重公害的则比比皆是：如1933年德国别尔鲍尔苏打厂尾矿坝坍陷，致使几万立方米的矿泥流入查阿拉河；1936年11月日本尾去泽矿山中泽尾矿坝的后期坝采用内填式加高沉积法冲积，发生破坏后，死伤数人；1959年12月苏联阿库尔斯克选厂尾矿坝发生坝体冲毁事故和马格尔尼托矿山的尾矿池初期坝发生溃决，均造成人身伤亡；1970 年 9月25日赞比亚的穆富利拉铜矿的尾矿池，因位于矿体的上盘崩落区的岩层上，由于地下崩落法的开采，而导致了71万米^{3}的尾矿涌入彼得森矿区坑内，死亡89人，在435米中段以下至732米中段“几乎全部彼得森矿区都被淹没，水平范围达600米”。“在坑内作业区的泥浆估计约45万米^3”，“大约还有 26 万米^{3}的尾矿停积在上盘围岩内，必须着重指出的是，现在还没有确实证据表明这些尾矿本身已经滤干了或者已经稳定了，因此目前的局面仍然是非常危险的”❶。1964 年英国威尔士北部的巴尔克铅锌矿尾矿池被洪水冲刷，尾矿流失后毁坏了大片肥沃的草原，其覆盖层厚达 0.5 米，在一般土壤中，铅锌含量超过 500ppm就会严重毒害植物和牲畜，而覆盖的尾矿层中，有的铅锌含量高达 6～8 万 ppm，对土壤污染的严重性可以想见。美国由于选矿与选煤及尾矿池与废石堆所产生的化学与物理污染，使900英里（14480公里）以上河流的水质恶化。美国佛罗里达州的磷酸盐矿，在开采和选矿过程中产出大量的呈悬浮状的胶质尾

---

❶ 摘自赞比亚政府五人委员会“穆富利拉铜矿事故调查报告”。

矿与矿泥，由于储存池的两座高坝倒坝，因而磷酸盐泥浆淹没周围地区，河流和平原地带矿泥泛滥成灾，造成了非常严重的大范围的环境污染；英国特罗根铅锌矿的尾矿粉尘被吹到弗林特撒尔地区，而弗龙勾茨铅锌矿的尾矿粉尘又被刮到威尔士中部地区，造成了大范围的空气污染。由此可见，由于尾矿的堆存不善而造成的危害是非常严重的。

综观国外尾矿堆存不善所造成的危害教训，如何正确认识、妥善堆存和综合利用尾矿，是具有重要意义的。

二、尾矿综合利用的重大意义

我国对尾矿的处理，是利用荒地筑坝堆存，并采取一系列可靠的措施，同时进行维护管理。随着冶金工业的迅速发展，金属矿山选厂的处理量日益加大，相应排出的尾矿量日益增多，据长沙有色冶金设计院初步调查50余个矿山年排出的尾矿量约达数千余万吨，占田地上万亩，为了妥善堆存尾矿需要建坝。根据32个矿山的统计，建坝工程费约达5370万元。近年来，不少工矿企业和科研部门积极地对尾矿进行了综合利用的试验研究工作，如利用尾矿充填采矿空场，在尾矿堆积场上覆土造田，利用尾矿制造各种建筑材料等，已取得了一定的成绩。

尾矿的综合利用，不仅可以减少尾矿的堆存，节约建坝、防洪等工程费用，改善矿区的环境卫生，而且还能为国家创造财富。这不仅充分利用了国家资源，为人民兴利除害，而且还为建筑材料的原料开辟出了一条新的途径，对于积极发展材料工业，推动国民经济的迅速发展具有积极的作用。同时，尾矿的综合利用，还可少占地或采取占地还田的方式，这对于解决工业建设与农业争地的矛盾，体现工业支援农业，贯彻“以农业为基础，工业为主导”的方针，加强工农联盟，是具有重要政治意义的。

第二节　尾矿的物理性质和化学成分

尾矿的物理形态和砂子相似，但矿物组分较砂子复杂，因它比砂子含有较多的金属矿物，同砂子一样，一般属惰性材料。

尾矿的比重取决于所含各种岩石的比例，岩石的比重一般为2.7～3.0，干尾矿的容重和其粒级组成有关，大约为1.0～1.7吨/米^3。

尾矿的粒级组成取决于有用矿物在矿石中晶体嵌布粒度的大小以及使有用矿物与脉石分离所采用的选矿工艺。重选、磁选、浮选所排出的尾矿，一般粒度如下：

重选	小于0.074毫米	约占10～60%
磁选	小于0.074毫米	约占50～70%
浮选	小于0.074毫米	约占40～80%

重选、浮选、磁选等混法选厂所排出的尾矿，一般含水约70～90%的料浆。

尾矿的渗透系数是指水通过尾矿的渗透速度，单位以毫米/小时表示。尾矿在某种状态下的渗透系数与尾矿的孔隙率、水力坡度等因素有关。当利用尾矿作充填材料时，该项指标非常重要。

尾矿一般由多种矿物组成，其主要化学成分为：SiO_2，CaO，

常见火成岩的平均化学成分 **表 1-1**

岩石名称 / 化学成分 含量(%)	各时代的花岗岩	正长岩包括碱性正长岩	霞石正长岩	石英闪长岩	闪长岩(石英闪长岩除外)	辉长岩(橄榄辉长岩除外)	橄榄辉长岩	辉长岩	橄榄岩
SiO_2	70.18	60.19	51.63	61.59	56.77	49.50	46.49	51.29	41.09
TiO_2	0.39	0.67	0.86	0.65	0.84	0.84	1.17	0.58	1.16
Al_2O_3	14.47	16.28	19.89	16.21	16.67	18.00	17.73	3.52	4.80
Fe_2O_3	1.57	2.74	3.37	2.51	3.16	2.80	3.66	1.82	3.96
FeO	1.78	3.28	2.20	3.77	4.40	5.80	6.17	6.00	7.12
MnO	0.12	0.14	0.35	0.10	0.13	0.12	0.17	0.13	0.10
MgO	0.88	2.49	0.87	2.80	4.17	6.52	8.86	21.06	32.25
CaO	1.99	4.30	2.51	5.38	6.74	10.64	11.48	13.88	4.42
Na_2O	3.48	3.98	8.26	3.37	3.39	2.82	2.16	0.30	0.49
K_2O	4.11	4.49	5.46	2.19	2.12	0.98	0.78	0.16	0.96
H_2O	0.84	1.16	1.35	1.22	1.36	1.60	1.04	1.20	3.53
P_2O_5	0.19	0.28	0.25	0.26	0.25	0.28	0.29	0.06	0.12

常见沉积岩的平均化学成分　　表 1-2

岩石名称 / 化学成分 含量(%)	页岩平均	高岭土	砂岩平均	石灰岩平均	建筑用石灰岩平均	方解石	白云岩
SiO_2	58.90	46.5	78.64	5.20	14.09		
Al_2O_3	15.63	39.5	4.77	0.81	1.75		
Fe_2O_3	4.07	—	1.08	0.54	0.77		
FeO	2.48	—	1.30				
MgO	2.47	—	1.17	7.92	4.49	—	21.90
CaO	3.15	—	5.51	42.74	40.60	56.04	30.4
Na_2O	1.32	—	0.45	0.05	0.62		
K_2O	3.28	—	1.32	0.33	0.58		
H_2O	3.72	14.0	1.33	0.56	0.88		
TiO_2	0.66	—	0.25	0.06	0.08		
P_2O_5	0.17	—	0.08	0.04	0.42		
CO_2	2.67	—	5.03	41.70	35.58	43.96	47.7
其　他	1.48	—	0.07	0.05	0.48		

Fe_2O_3，Al_2O_3，MgO，Na_2O，K_2O 等，至于各种化学成分所占的百分比与采出矿石中脉石的矿物组分密切相关。如脉石为火成岩类岩石，则以硅酸盐类矿物为主，其化学成分主要为SiO_2，其次为 Al_2O_3；如脉石为沉积岩类岩石，则在砂岩中是以硅酸盐类为主，一般富含SiO_2，在石灰岩或方解石中是以碳酸盐类矿物为主，一般富含 CaO，在高岭石中则富含Al_2O_3和 SiO_2，现将一些常见火成岩和沉积岩的平均化学成分列于表1-1和表1-2。

第三节　尾矿的矿物组分与矿床成因的关系

金属矿山尾矿的矿物组分与送往选厂的矿石所含的脉石矿物大致相同，而脉石的矿物组分因矿床的成因类型而异。因此，研究矿床的成因、工业类型，分析研究脉石的矿物组分，这对于矿山开发前进行规划、考虑尾矿综合利用的有关工厂或其设施，是具有重大意义的。

对于不同成因、不同工业类型的矿床，其脉石的矿物种类及

序号	矿山名称	矿床成因	工业类型
1	二道甸子矿	中温热液裂隙充填	含金石英脉金矿床
2	招远矿		热液石英脉型
3	五龙矿	中高温热液充填含金石英脉	硫化物含金石英脉型矿床
4	夹皮沟矿	高-中温热液石英脉型矿床	热液石英脉型矿床
5	大吉山矿	内生矿床中岩浆期后的汽化与高温热液裂隙充填矿床	高温热液石英钨型黑钨矿床
6	归美矿	高温热液充填矿床	高温热液石英脉型黑钨矿床
7	游坑矿		热液石英脉型
8	汝城矿	高-中温热液充填矿床	热液石英脉型黑钨矿床
9	莲花山矿	中温热液矿床	热液网脉状硫化物——黑白钨矿床
10	大王山矿		热液石英脉型
11	下龙矿		同上
12	漂塘矿	高温热液石英脉矿床	热液石英脉型钨矿床

为主的矿山实例　　表 1-3

脉石矿物		尾矿化学成分（%）			
主要的	次要的	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO
石英	方解石等	90	微	3.0	微
石英	方解石、白云母	87.36	2.53		0.329
石英、斜长石、绢云母、高岭土、方解石	绿泥石、黑云母、蛇纹石、磷灰石、角闪石、普通辉石、白云母、滑石、锆英石、柘榴子石	88.5	5.3		0.6
石英	菱铁矿、绢云母、绿泥石、方解石				
石英	云母、电气石、萤石、绿柱石、长石、绿泥石、方解石、高岭土	72.44	9.69	5.91	
石英	透辉石、柘榴子石、透闪石、符山石、阳起石、斜长石、萤石、方解石	80			0.164
石英		87.16			0.46
石英		77.78	7.75	4.00	1.63
石英	白云母、绢云母、绿泥石、黑云母、电气石、柘榴子石、红柱石、磷灰石、独居石	62.70			
石英		93.79	1.95		0.01
石英		85.36			0.799
石英		78.15	4.14		3.09

序号	矿山名称	尾矿化学成分（%）						
		MgO	K_2O	Na_2O	Fe	S	烧失量	其他
1	二道甸子矿					少量		
2	招远矿	0.0333			2.17			
3	五龙矿	0.7			1.89	0.3		
4	夹皮沟矿							
5	大吉山矿					0.19		0.195
6	归美矿				3	0.067		
7	许坑矿				0.56	0.19		
8	汝城矿	0.69	2.96	0.27		0.13		
9	莲花山矿				4.57	0.77		
10	大王山矿	0.17			1.08			
11	下垄矿				1.23	0.032		
12	漂塘矿		0.57	1.82	1.985	0.061		

续表 1-3

尾矿粒级组成(%)								
(16目)0.991毫米	(32目)0.495毫米	(60目)0.246毫米	(80目)0.175毫米	(100目)0.147毫米	(150目)0.104毫米	(200目)0.074毫米	(400目)0.038毫米	(400目以下)0.038毫米以下
		10	50		40			
		15.49	7.05	2.97	15.74	5.0	53.75	
							34.98	65.02
		4.63	11.27	13.61	12.30	5.26	49.17	
	33.17	35.20		9.27	7.32	6.5	8.54	
40.49	26.51		13.14		18.16			
0.8	1.88	54.77	0.8	4.76	21.96	14.83		
	30.08	24.65			14.87	12.41		
33.27	20.00	2.51	6.44	10.86		10.05		
10.81	43.38	16.75	5.80	8.96	6.06	4.42		
	11.1	9.34		20.86	11.93	46.76		

脉石矿物以长石、石英为主的矿床实例　　表 1-4

矿床类型	类型名称	产地	主要脉石矿物
一、稀有金属花岗岩矿床类型	Ⅰ．磷钇矿独居石黑云母花岗岩型矿床	中南	钾长石（条纹长石，微斜长石），奥纳长石，石英，黑云母，角闪石，白云母
	Ⅱ．褐钇铌矿铌铁矿黑云母花岗岩型矿床	中南	钾长石，斜长石，石英，黑云母，角闪石
	Ⅲ．褐钇铌矿锆石钠闪石化碱性花岗岩型矿床	西南	钠长石，霓石，条纹长石，正长石，钠长石，石英
	Ⅳ．硅铍钇矿氟碳铈钙矿钾长石化（白云母化）花岗岩型矿床	华东	微斜长石，钠长石，白云母，黑云母
	Ⅴ．铌铁矿（锆石）钠长石化黑鳞云母化（天河石化）花岗岩型矿床	中南、华东 华北	钾长石，钠长石，石英，黑云母，黑鳞云母（铁锂云母）
	Ⅵ．黄钇钽矿钇钽铁矿钠长石化云英岩化花岗岩型矿床	华东	钾长石，钠长石，钠奥长石，石英，白云母（锂云母）
	Ⅶ．铌钽铁矿细晶石锰钽矿钠长石化云英岩化（锂云母化）花岗岩型矿床	中南、华东	钠长石，钾长石，石英，锂云母，含锂白云母
	Ⅷ．绿柱石钠长石化云英岩化花岗岩型矿床	西北、西南 华东、中南	钠奥长石，微斜长石，白云母，（含锂白云母），钠长石
二、稀有金属花岗伟晶岩矿床类型	Ⅰ．铌稀土矿物黑云母奥长石微斜长石伟晶岩	华北、东北	奥长石，微斜长石，石英，黑云母，白云母
	Ⅱ．绿柱石铌铁矿白云母微斜长石伟晶岩	华北、东北 西南	微斜长石，奥钠长石，石英，白云母（黑云母）
	Ⅲ．绿柱石钽铌铁矿钠长石（微斜长石）伟晶岩	中南、西南 西北、华东	钠长石，钠奥长石，微斜长石，石英，鳞片白云母
	Ⅳ．钽铌铁矿锂辉石钠长石伟晶岩	西南、西北	钠长石，石英，锂辉石，锂白云母
	Ⅴ．铌钽铁矿细晶石铯锆石白云母微斜长石钠长石伟晶岩		钠长石，钠奥长石，石英、白云母，微斜长石
	Ⅵ．绿柱石锰钽矿细晶石铯榴石铯锆石锂云母钠长石	中南、西北	钠长石，石英，锂云母，含锂白云母，绿磷云母

续表 1-4

矿床类型	类型名称	产地	主要脉石矿物
	云母钠长石伟晶岩	西北	
三、稀有金属细晶岩型矿床	铌钽化细晶岩型矿床	中南	长石，石英
四、稀有金属碱性岩型矿床	稀有金属碱性岩型矿床	东北	长石，石英
五、稀有金属碱性伟晶岩型矿床	稀有金属伟晶岩型矿床	西南	长石，石英
六、稀有金属钠长岩型矿床	稀有金属钠长岩型矿床	西南	长石，石英
七、稀有金属风化壳矿床	稀有金属风化壳矿床	中南	长石，石英

化学组成是不相同的，即使是同一成因和同一工业类型的矿床，也不完全相同。就是同一矿床，其上部和下部亦有差异，因此，只能根据脉石所含的主要矿物组分来考虑利用和划分类别。兹就目前国内外对尾矿利用的研究情况和尾矿的矿物组分及矿床成因的关系等划分为下列几种类型：

一、脉石矿物以石英为主的矿床

在热液石英脉型矿床、伟晶花岗岩型矿床、残积、坡积砂矿床、机械沉积砂矿床、胶体沉积硅质砂岩型矿床以及变质沉积石英岩矿床中，主要脉石矿物一般都富含石英，这类矿床经开采选别后所排弃的尾矿中SiO_2的含量可达60～90%，部分矿山实例见表1-3。这类尾矿可用于生产蒸养(压)硅酸盐尾矿砖；蒸压加气混凝土制品；混凝土拌合时的掺和料；普通硅酸盐水泥的配料；当二氧化硅的含量在90%以上时，可作为玻璃或耐火材料的原料。

二、脉石矿物以长石、石英为主的矿床

在稀有金属花岗岩型矿床、稀有金属花岗伟晶岩型矿床、稀有金属细晶岩型矿床、稀有金属碱性岩型矿床、稀有金属碱性伟晶岩型矿床、稀有金属钠长石岩型矿床和稀有金属风化壳矿床中，主要脉石矿物一般都富含长石、石英，矿床实例见表1-4及表1-5。这类矿床经开采选别后所排弃的尾矿中R_2O (Na_2O+K_2O)可达4～9%。部分矿山实例见表1-6，表1-6中所列的尾矿，可用作平板玻璃的配料（代替部分纯碱）生产平板玻璃。而表1-4和表1-5中的矿床，经开采选别所排弃的尾矿则可作为平板玻璃、瓶罐玻璃、纤维中碱球、低碱无硼玻璃以及结晶玻璃材料等的原料进行研究和利用。

三、脉石矿物以方解石、石灰石为主的矿床

热液碳酸盐型、胶体沉积和生物化学沉积碳酸盐型的矿床经开采选别后所排弃的尾矿，一般都富含方解石或石灰石，CaO的含量可达10～30%，有关矿山实例见表1-7。这类尾矿可用作水泥生料的配料以烧制普通硅酸盐水泥。

四、脉石矿物以高岭土为主的矿床

热液蚀变型高岭土矿床，花岗岩风化壳高岭土矿床，蛇纹岩风化壳的含镍高岭土矿床和碱性岩风化壳的三水铝矿床，一般都富含高岭土，Al_2O_3的含量在20%以上，在这类矿床中同时富含石英。热液蚀变高岭土矿床的矿山实例见表1-8。这类尾矿可用作半硅耐火材料制品，或用作水泥生料的铝质校正原料。

五、脉石矿物的种类较复杂的矿床

在超基性和基性的岩浆矿床中，脉石矿物主要为橄榄石、辉石、角闪石、蛇纹石、基性斜长石、柘榴子石等。

在胶体沉积和机械沉积钙、镁质砂岩型矿床中，脉石矿物主要为白云石、石灰石。

有关矿山实例如表1-9。

这类矿床经开采选别后所排弃的尾矿中矿物组分较复杂，尾矿的化学成分中SiO_2、CaO、Al_2O_3的含量低，而MgO、Cr_2O_3、

脉石矿物以长石、石英为主的矿山实例

表 1-5

序号	矿山名称	矿床工业类型	脉石矿物		原矿化学成分（%）									
			主要的	次要的	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	MnO	烧失量
1	广西某稀有矿*	花岗岩型	长石、石英	绢云母、高岭土	75.31	15.34	0.41	0.54	0.11	0.17	2.86	4.20		
2	广东某稀有矿*	风化壳型	长石、石英		72.05	15.40	2.56		0.33	0.11	4.37			4.92
3	江西某稀有矿*	花岗伟晶岩型	长石、石英	电气石	68.70	15.70	2.83		—	—	3.50	2.62	0.09	

* 表中所列为原矿的化学成分，对于稀有矿山，一般说来，其原矿中稀有元素的含量均在1%以下，因此，原矿的化学成分与尾矿大致相近。

脉石矿物以长石、石英为主的矿山实例

表 1-6

序号	矿山名称	矿床工业类型	脉石矿物		尾矿化学成分（%）								尾矿粒度组成（%）			
			主要的	次要的	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Fe	(150目)0.104毫米	(200目)0.074毫米	(400目)0.038毫米	(400目以下)0.038毫米以下
1	江西某稀有矿	花岗伟晶岩型	钠长石 钾长石 石英	锂云母	72.98	14.08		1.835	0.056	1.90	4.70	0.543	35.70	21.76	21.75	20.79
2	湖北某稀有矿	花岗伟晶岩型	长石 石英		80.26～80.92	11.28～11.54	0.07～0.12	0.04～0.17	0.09～0.12	4.03～4.44	2.99～3.50					

脉石矿物以方解石为主的矿山实例

表 1-7

序号	矿山名称	矿床成因	工业类型	脉石矿物		尾矿化学成分(%)			
				主要的	次要的	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO
1	凡口	形成于中深条件下的中—低温热液交代矿床	碳酸盐岩石中矿物组分比较简单的似层状透镜状热液交代矿床	方解石、石英	高岭土、云母	24.52	4.59	3.57	32.01
2	水口山	中温中深热液矿床	石灰岩中形体复杂的中温交代矿床	方解石、石英	绿泥石、柘榴子石、透辉石、符山石、云母、石膏等	30.98	6.09	21.03	17.63
3	黄沙坪	高温到中温中深热液矿床	碳酸盐岩石中的裂隙充填交代矿床	方解石、石英	萤石、白云母、绢云母、绿泥石	39.12	5.49		9.71

序号	矿山名称	尾矿化学成分（%）						尾矿粒级组成（%）								
		MgO	K_2O	Na_2O	Fe	S	烧失量	(16目)0.991毫米	(32目)0.495毫米	(60目)0.246毫米	(80目)0.175毫米	(100目)0.147毫米	(150目)0.104毫米	(200目)0.074毫米	(400目)0.038毫米	(400目以下)0.038毫米以下
1	凡口	2.79			4.97	4.72	27.27						22.62	77.38		
2	水口山	0.83				10.67	10.74				26	10.84		10.84	52.21	
3	黄沙坪				6.26	2.45				2.77		16.04	12.94	19.30	24.49	25.69

注：广西融县和湖南的慈利铅锌矿床，属石灰岩中的层状及脉状的超低温热液矿床。脉石矿物主要为方解石、石英。

东川铜矿属石灰岩中的中温热液交代充填矿脉。脉石矿物主要为方解石、石英。

江苏某热液蚀变型高岭土矿床　　表 1-8

序号	项目名称		内　　容
1	矿床成因		热液蚀变型矿床
2	矿物种类	主要	高岭石
		次要	石英、褐铁矿、玉髓、绢云母、明矾石、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿
3	尾矿的化学成分%		SiO_2 69～71　Al_2O_3 19～21　Fe_2O_3 1.5～2　SO_3 1　烧失量 6～8
4	尾矿粒度		粒径大于 0.25 毫米占 37% 粒径小于 0.25 毫米占 63%

注：该矿床的特点是，矿石含 SiO_2 高，含 Al_2O_3 低，与一般沉积-风化型矿床有很大差别，矿石须经漂泥后才能作为陶瓷配料，故产出的尾矿中富含石英、高岭土。

TiO_2、Fe_2S、Fe_2O_3、MnO_2等的含量较高，对于这种类型的尾矿可用作铸石的配料，试制铸石制品，或用于烧制陶粒。

第四节　尾矿综合利用的途径及其要求

目前国内外对于尾矿的利用大致可以概括为下列几种途径：

1. 用作矿山地下开采采空场的充填料：水砂充填材料或胶结充填的集料。

2. 用作建筑材料的原料：制作水泥、硅酸盐尾矿砖、瓦、加气混凝土、铸石、耐火材料、陶粒、玻璃、混凝土集料、微晶玻璃、溶渣花砖、泡沫材料和泡沫玻璃等。

3. 在尾矿堆积场上覆土造田，种植农林作物。此外，还有用于修筑公路、路面的集料、防滑材料、海岸造地等。

尾矿的综合利用应立足于：尾矿用量大、产品销路广、燃料用量省、生产周期短、基建投资省、上马快、经济效果显著。在此应指出的是，尾矿综合利用还是一项新兴事业，应考虑到将来工艺过程的不断革新和改进，产品用途的逐渐推广，经营管理的

脉石矿物较复杂的矿山实例

表 1-9

序号	矿山名称	矿床成因	工业类型	脉石矿物		尾矿化学组分（%）		
				主要的	次要的	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3
1	901 矿	岩浆晚期熔离矿床	铜镍硫化矿床	辉石、橄榄石	蛇纹石、长石、闪石、柘榴子石、黑云母	39.69	4.79	
2	886 矿	岩浆矿床	铜镍硫化矿床	蛇纹石、橄榄石	辉石、滑石	33.67	1.33	
3	铜官山	岩浆期后矽卡岩型铜官山式	矽卡岩型	绿帘石、透辉石	透角闪石、阳起石、矽灰石、方柱石、符山石、绿泥石、蛇纹石、滑石、石英、方解石、白云石	39.22	5.03	
4	程　潮	矽卡岩热液交代矿床	矽卡岩型铁矿床	方解石、金云母、透辉石、长石、绿泥石	蛇纹石、石膏、绿泥石、石英、阳起石	46.12	12.20	
5	鞍山某铁矿	变质沉积矿床（部分受热液作用的影响）*	前震旦纪条带状及层纹状变质沉积铁矿床（鞍山式）*	石英、角闪石类矿物	柘榴石、黑云母、方解石	62.00	1.02	17.50
6	綦　江	化学的沉积矿床*	上侏罗纪成层鲕状赤铁矿床（綦江式）*	石英	其他非金属矿物……	55.16	3.99	
7	彭　县	高温热液矿床	高温热液透镜体	石英		50.7	9.9	
8	攀枝花	晚期岩浆矿床	钒钛磁铁矿床	斜长石、辉石	磷灰石……	34.57	13.26	
9	立　新			石英……		76.83	0.87	18.33

续表 1-9

序号	矿山名称	尾矿化学组分（%）								尾矿粒级（%）				
		CaO	MgO	TiO_2	Cr_2O_3	Fe	S	其他	烧失量	(80目)0.175毫米	(150目)0.104毫米	(200目)0.074毫米	(400目)0.038毫米	(400目以下)0.038毫米以下
1	901 矿	8.41	20.27		0.35	10.29			5.4		17.79	31.86	9.37	40.88
2	886 矿	1.19			0.52	11.25	1.7					36.86	14.83	48.33
3	铜官山	15.45	3.82	0.292	0.005	18.66	2.55							
4	程 潮	10.06	8.38			5.53	0.56	P 0.21		28.82	11.55	7.7	18.23	34.7
5	鞍山某铁矿	1.99	0.72				0.031		1.27					
6	綦 江	1.60	1.69				0.70		2.4	57.69	6.8	12.79	3.89	18.83
7	彭 县	7.22	8.14			10.66	3.12			16.7		42	41.3	
8	攀枝花	7.41	11.64	9.82		13.23	1.16			22.77	10.5	25.56	10.41	30.76
9	立 新	0.45	0.59	0.23					1.40	4.7		57.45	36.8	

• 根据程裕淇的中国铁矿床成因类型的划分。见“矿床学上册，地质出版社，朱照人编著”p169～170页。

提高，目前虽少盈利，但能做到少占地，不危害农业，达兴利除害之目的，就应大力探索研究，并兴建相应的工厂，以期将来的发展。

至于矿山的尾矿怎样利用，首先应根据尾矿的物理化学性质和矿物组分，选择适宜的利用途径，同时根据矿山的开发和建设的需要，矿区附近对建筑材料的需要情况，并考虑矿山的交通运输、电力、材料、燃料等的供应条件合理确定。例如某矿的井下需充填，而该矿的尾矿不易风化水解、不产生有毒有害气体、粒级大部分在0.037毫米以上时，则可将尾矿用作井下充填材料；对于尾矿中含石英很高，当地对建筑材料的需用量大，则可考虑利用尾矿生产蒸压硅酸盐砖、瓦，当尾矿中的石英含量高，同时有害组分（硫、铁、钛、铬等）的含量又很微时，还可用作玻璃的原料；又如当矿山产出的尾矿中含CaO较高，而MgO的含量又很低时，则可用作水泥的原料；再如当矿山产出的尾矿中富含Al_2O_3和SiO_2，则可考虑用作耐火材料的原料。此外，对于成分复杂的尾矿，当尾矿中的矿物组分和化学成分符合生产铸石制品的原料要求时，则可用来试制铸石制品，或用于烧制陶粒。总之，尾矿的综合利用应根据矿山的具体条件，全面考虑确定。

但是不论将尾矿利用于那种途径，必须注意下列几点：

1. 尾矿中有用金属或有用矿物的含量很微，预计在较长年限内在选矿技术上难以回收。

2. 尾矿中不含有放射性元素或含量极微，如用以制作建筑材料，其放射剂量不致危害人体健康。

3. 尾矿的物理化学性质和矿物组成（包括有用矿物和微量有害元素）基本符合于利用途径的要求。

4. 在利用尾矿之前，对其所含选矿药剂和油类，应采取适当措施妥善处理。

5. 利用尾矿制作建筑材料时，必须注意回收尾矿中所含微量的有用金属和稀、贵金属。

为此，在利用尾矿时，应对尾矿进行化学成分的全分析、粒

级组成的分析、药剂和油类含量的分析，并对其比重、容重、孔隙率、压实系数、渗透率、水解难易度等进行测定。

参 考 文 献

〔1〕矿床学，中等专业学校教材试用本，上册，朱熙人编著，地质出版社，1957年1月。

〔2〕化工矿物原料知识，连云港化工矿山设计研究院编写，燃料化学工业出版社，1973年9月。

〔3〕矿床工业类型，B.M.克列特尔著，地质出版社，1959年。

〔4〕钨矿地质与找矿常识，康永孚著，地质出版社，1959年8月。

〔5〕非金属矿物，〔美〕R.B.拉杜、W.M.迈耶斯合著，地质出版社，1958年7月。

〔6〕化工原料，化工商品学，下册，上海化工原料采购供应站，1960年6月。

〔7〕岩石手册，〔美〕Frankf格鲁特著，科学技术出版社，1954年。

〔8〕矿物岩石学简明教程，中央人民政府燃料工业部推荐中等技术学校教材试用本，〔苏〕伏·伏·克利茨基，斯·德·契特维里柯夫合著，北京矿业学院编译室翻译，北京矿业学院地质教研组审订，燃料工业出版社，1954年。

〔9〕中国稀有金属矿床类型，地质科学研究院地质矿产所稀有组，地质出版社，1975年。

第二章　利用尾矿作采空场的充填材料

在采矿工业的地下开采中，当开采地表需要保护的矿床；稀有、贵重金属或有色金属的高品位矿床；有自燃危险的金属矿床；地表水体下或强含水层下的富矿；赋存条件复杂的富矿；以及深部矿体的开采等，往往要用到充填采矿法。充填采矿法中的一个重要工序就是将采出矿石后的空场用充填材料加以充填，其目的是减少采矿的损失和贫化、限制围岩的移动、防止坑内火灾或水灾。

采用充填法的金属矿山，每采出一吨矿石要回填0.25～0.4米^3(或0.4～0.6吨)的充填材料。一个日产千吨的矿山，除了完成开采和运输这一千吨矿石的生产任务外，还必须向采矿场回填400～600吨充填材料。当用碎石作充填材料时，往往还要建设采石场、破碎站、运输设施，致使充填工艺既费力又花钱。因此充填采矿法常被称为“一高两低”（成本高、劳动生产率低和产量低）的采矿方法。

充填采矿法在开采富矿和复杂条件矿床方面具有独特的优点。在一定条件下，它的综合技术经济指标要胜过其他采矿方法。随着社会主义建设的蓬勃发展，采掘工业必将成倍增长，为解决复杂条件矿床的开采问题，使用充填法的机会必然有所增加。因而改革充填工艺、充分利用尾矿等废料作充填材料，以降低采矿成本对于改善充填法“一高两低”的状态具有重要意义。

尾矿是选矿厂排弃的废料，只要处置得当，却是一种较好的充填材料。它具有就地取材，来源丰富和输送方便等优点。当采用水力输送尾矿时，用水量不大，对管道的磨损也小。尾矿送入采空场内，经滤水设施脱水，能够形成相当致密的充填体。当用尾矿作水力充填料而采选场地相距不远时，充填费用较低，仅为碎石水力充填费用的$\frac{1}{4}$～$\frac{1}{10}$。即使某些并不一定用充填法的矿山，

为了解决尾矿堆存与农业争田的矛盾，在技术经济合理的前提下，也可将尾矿送入地下充填采空区。

为了将尾矿用于充填，要在矿山建立一套充填系统，通常包括：尾矿的分级和储存；尾矿浆的地面和井下管道输送；充填工作面脱水；充填水的沉淀和排泥等，如图 2-1 所示。尾矿用于充填，就其作用和充填工艺又分为尾矿水力充填和尾矿胶结充填两种。

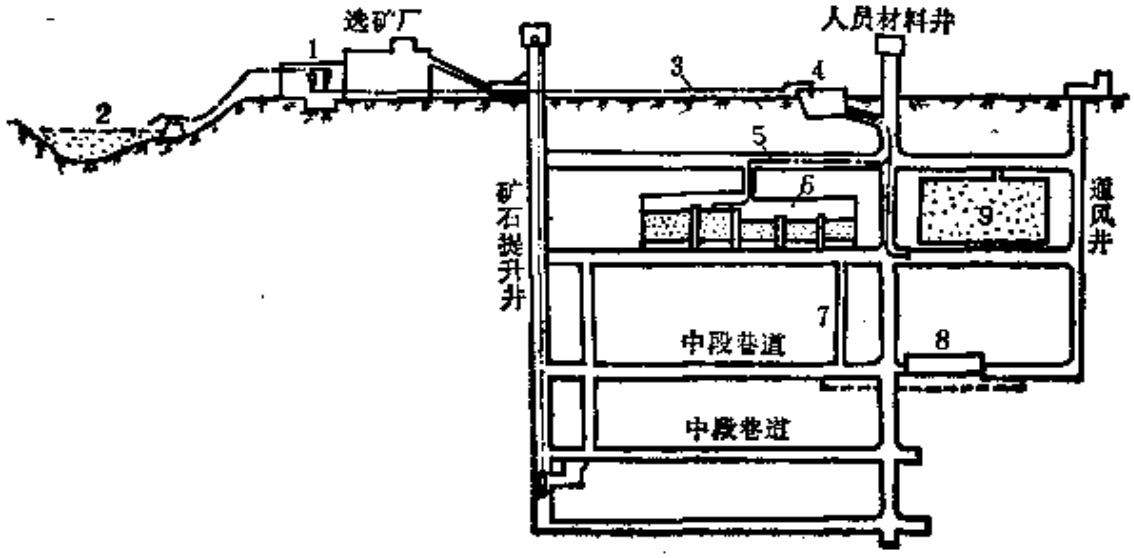


图 2-1　尾矿充填系统示意图

1—尾矿分级站；2—尾矿坝（堆存细粒级尾矿）；3—尾矿浆输送管；4—尾矿贮仓；5—井下充填管；6—充填工作面；7—导水钻孔；8—水仓和水泵房；9—已充填的采空区

第一节　尾矿水力充填

尾矿与水混合制成尾矿浆，用管道输送到井下充填工作面，脱水后形成松散的，但相当致密的充填体，这种充填工艺称为尾矿水力充填。尾矿水力充填可用于水平分层充填法，空场法采后一次充填或老采空区的处理。

一、对尾矿物理化学性质的要求

选矿厂排出的尾矿是一种含有多种脉石矿物的工业废料，除

脉石矿物外，还有选矿药剂、有机质、酸或碱、以及油脂等。用作充填材料，对尾矿的化学成分和物理性质的要求主要有：

1. 有用矿物含量甚低，预计在几十年甚至更长时期内选矿技术难以经济地回收。

2. 尾矿中绝大多数矿物的性质稳定，不易风化或水解，不易氧化自燃，不析出大量有毒、有害或剧烈臭味的气体。

尾矿用于充填，在物理性质方面的要求主要是其粒级组成有利于迅速脱水和形成致密的充填体。

尾矿的颗粒大小和组成比例与原矿的磨细程度有关。磨细原矿的目的是为了矿石中有用矿物和脉石达到单体分离，以利于在选矿工序中最大限度的选出有用矿物。原矿的磨细度常以小于0.074毫米（200目）的颗粒所占的百分率来表示。例如：磨细到－0.074毫米占80%的原矿就比－0.074毫米占60%的原矿要更细一些。同样，前者经选矿后所排弃的尾矿也就比后者的尾矿要细一些。拿磨细的原矿粒级组成与尾矿粒级组成相比较，在粗颗粒（＋0.074毫米）和细颗粒（－0.020毫米）所占的百分率方面，一般而论，尾矿比磨细的原矿要大一些。完全用粗颗粒尾矿进行充填，脱水就快，这样能加快充填作业和提高采矿场产量，但形成的充填体不够密实。尾矿中的细颗粒太多，脱水就慢，延长了采矿和充填的循环作业时间，不但会降低采矿场的产量，还会有充填体溃决的危险。那些小于0.020毫米的颗粒，很难在水中迅速沉淀，大多随充填水流到巷道和水仓，要花不少人工和设备进行清理和运出地面。对这一部分在充填过程中留不住的细粒级尾矿，与其放到井下去清理，不如充填前在地面上用简单的办法清除掉，这就是尾矿的“分级脱泥”。分级后用于充填的尾矿常称粗粒级尾矿，包含有全尾矿中的绝大部分粗粒级和小部分细粒级。它的脱水速度能满足要求，形成的充填体较致密，利用尾矿充填的百分率高。尾矿的脱水速度常用“渗透率”来表示，它表征水在尾矿中的渗透速度，单位为毫米/时，用测量水文地质和工程地质砂样的渗透系数的仪器来测定。一般认为：当尾矿的渗速

率大于100毫米/时，已能满足充填料脱水速度的要求。

二、尾矿用水力旋流器分级脱泥

水力旋流器是一种无运动部件的分级设备，其构造如图 2-2 所示。为了增加旋流器的耐磨性，常在其内壁衬以铸石或橡胶，对于直径200 毫米以上的旋流器，以衬铸石的为好。

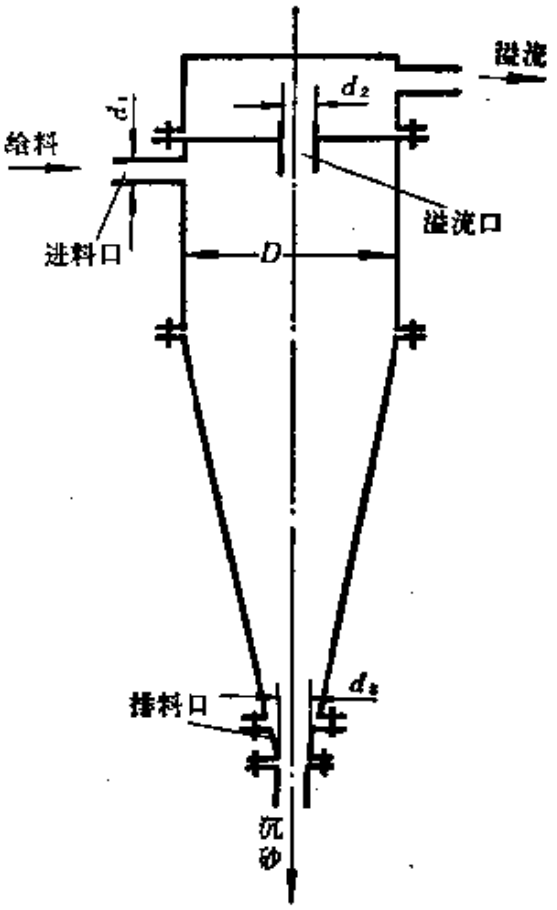


图 2-2　水力旋流器结构示意图

水力旋流器的工作原理，是利用一定压力的尾矿浆从进料口以切线方向射入旋流器后所产生的离心力，使不同粒度和比重的尾矿在离心力和重力的作用下作不同回转半径的螺旋运动。粗颗粒或比重大的颗粒由于其径向速度大而富集在旋流器的内壁附近，并沉降至排料口排出。径向速度与之相当的微粒则作等直径的回转运动并沉降在锥形内壁上与粗颗粒一起呈相当浓的尾矿浆排出。径向速度比水小的细颗粒则产生向心运动而富集于旋流器中央，形成浓度较低的溢流从溢流口排出。

影响旋流器工作性能的因素主要是：旋流器直径D，进料口直径d_1，溢流口直径d_2，排砂口直径d_3，尾矿浆在进料口处的压力值和尾矿浆的给料浓度等。当尾矿分级脱泥采用标准的、衬铸石的旋流器时，只需确定旋流器的直径、尾矿浆的给料压力和浓度。由于尾矿的脱泥是一种成熟的工艺，上列数值可通过实验室试验或参照类似矿山的经验用计算方法确定。大多数情况下，尾矿分级脱泥的旋流器直径为 200～500毫米，给料压力 1.5～2.0公斤/

厘米²，给料浓度（指重量浓度，即尾矿浆中尾矿所占重量百分率）为10～25%。

尾矿用旋流器分级脱泥有一段和两段之分，如图 2-3 所示。一段分级所用设备较少，多用于尾矿粒级较粗，而且分级后的粗尾矿产量大于充填量的情况下。两段分级用于尾矿较细而又要尽量利用尾矿充填的情况下。两段分级除使用设备较多外还要增加用水量，因旋流器的沉砂浓度一般为60～70%，给入第二段砂泵和旋流器前要加水冲淡到合理的给料浓度。

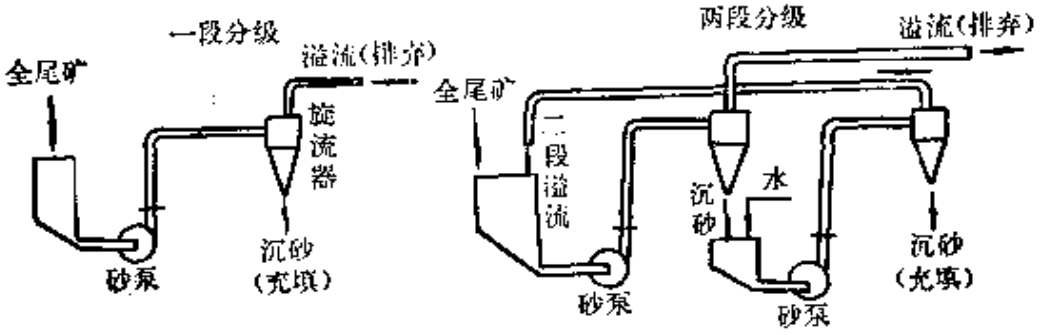


图 2-3　一段和两段旋流器分级脱泥

为满足脱水迅速和充填体较密实的要求，尾矿分级脱泥的界限一般为0.030～0.037毫米，即用于充填的粗粒级尾矿的95%的颗粒粒径应大于0.030～0.037毫米。

至于粒级较粗的尾矿，当用于采空区处理时，也可不必分级而用全粒级尾矿进行充填。

国内各矿山尾矿充填的粒级见表2-1。

三、尾矿的贮存和输送

选矿和充填的作业制度是不同的。选矿厂连续不断地排出尾矿，其延续时间以上千小时计，而充填作业在不少情况下是间断进行的，一次连续充填的时间以数小时或数十小时计。对于中小型矿山，尾矿分级后的粗尾矿小时产量常常小于充填设施的小时充填能力。为了使尾矿尽量用于充填和弥补尾矿供给和尾矿充填之间在时间上和数量上的不平衡，常常在充填设施范围内修建粗

尾矿粒级表　　表 2-1

矿山名称	尾矿类型	产出率(%) +200目 +0.074毫米	+400目 +0.037毫米	-400目 -0.037毫米	备注
凡口	全粒级	63.38	82.05	17.95	一段分级
	粗粒级	73.31	91.07	8.93	
铜录山	全粒级	24.70	59.30	40.70	一段分级
	粗粒级	40.90	91.06	8.94	
红透山	全粒级	60.94	74.97	25.03	一段分级
	粗粒级	77.04	100.00	0	
凤凰山	全粒级	44.29	59.62	40.38	两段分级
	粗粒级	73.72	95.69	4.31	
黄沙坪	全粒级	35.15	70.10	29.90	一段分级
	粗粒级	50.65	93.80	6.20	
招远	全粒级	44.02	62.30	38.70	一段分级
	粗粒级	57.70	84.50	15.50	
锡矿山	全粒级	53.88	63.88	36.12	一段分级
	粗粒级	69.60	81.45	18.55	

粒尾矿的贮存场地，通称为尾矿仓。用于充填的尾矿仓通常有三种：即平底尾矿仓、斜底尾矿仓和立式尾矿仓，如图2-4所示。

平底尾矿仓由块石砌成，可用电耙耙出含水10～15%的“干”尾矿。由于受耙运设备的限制，尾矿仓的有效容积较小，一般为50～200米^3。斜底尾矿仓的底坡度为15%或更大，用水枪冲刷尾矿而经阀门放出，多用块石砌筑，有效容积500～3000米^3。斜底尾矿仓是尾矿水力充填设施中常见的储存方式，但放出的尾矿浆的浓度不易保持稳定，还要用一定容积的搅拌桶进行二次造浆，以保证尾矿浆的合理浓度。立式尾矿仓多采用钢筋混凝土结构、金属结构、或建于井下围岩稳固的孤立矿体中，有效容积500～

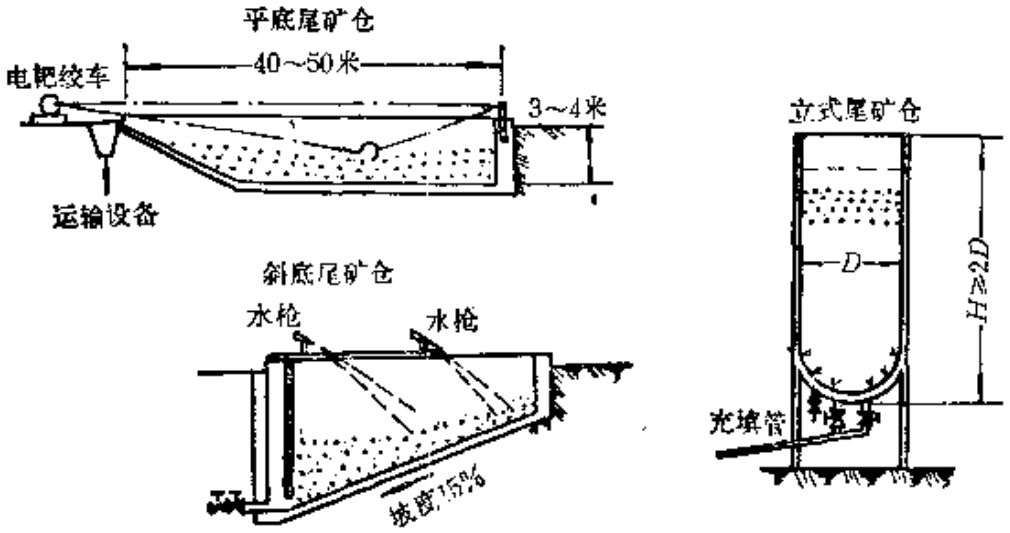


图 2-4　充填用尾矿的贮存方式

1000米³或更大。仓底装有高压水的喷嘴，可用阀门放出饱和水浓度为65～70%的尾矿浆。立式尾矿仓易于实现遥控和自动化，但投资较高，多用于大型矿山尾矿水力充填和尾矿胶结充填的联合设施中。

当选矿厂与充填设施不在一处时，就有尾矿地面输送问题，新建的矿山多用砂泵、管道输送尾矿浆。从地面的充填设施向井下充填工作面输送尾矿浆多为重力自流输送。为衡量充填设施的服

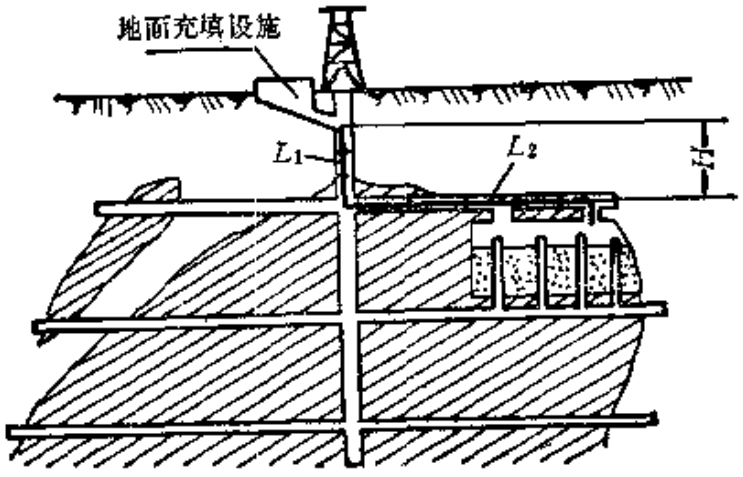


图 2-5　充填倍线示意图

务范围，常用充填“倍线”的概念。倍线为充填管的总长度与充填管入口和出口（最远充填天井的上口）的高差之比，如图2-5所示。在图中，L_1为竖井内充填管的长度，L_2为中段巷道内充填管的长度，H为中段巷道内最远充填天井口与充填管入口处之高差，充填倍线N：

$$N=\frac{L_1+L_2}{H}$$

充填倍线虽然是一个粗略的数字，但在规划充填系统时相当有用。根据尾矿充填的生产实践，当尾矿浆的浓度为40～50%时，充填倍线为10的自流输送是很可靠的，若再降低尾矿浆的浓度，充填倍线为20的自流输送也是可能的。例如：在图2-5中，最上一个中段距离地表的高度为100米，充填管入口在地表下20米，则$H=L_1=100-20=80$米，若以充填倍线N为10计，则自流输送很可靠的范围L_2为：

$$10=\frac{80+L_2}{80}$$

$$L_2=800-80=720\text{米}$$

这样，一个走向长度1500米、距地表深度100米的矿床，只要在矿床中部建立一套充填设施，就能达到对全部采场进行可靠的自流充填。

充填管在输送尾矿的过程中不断受到磨损，因而采用重量较轻、来源较广的焊接钢管。井下充填管多用公称直径D_g80（3英寸）和D_g100（4英寸）的水、煤气输送钢管（YB234—63），壁厚4～5毫米。中段巷道内的主干管每节长4～6米，充填工作面的管道每节长2～3米，多采用法兰盘螺栓连结，每米管道的折算重量（包括管道、法兰、连结件和悬吊件的重量）3英寸管取11公斤，4英寸管取15公斤。井下安装好的焊接钢管每吨约为1500元。当充填倍线在10以内，输送浓度50%左右，3英寸管的小时充填能力为20～30米^{3}尾矿，4英寸管为40～60米^{3}尾矿。我国在岩石中用钻孔代替垂直钢管已成功，并正在研究使用塑料管和耐

磨的钢管。

四、尾矿在充填工作面的脱水

虽然尾矿浆的输送浓度达50%，但水在其中所占的体积约为三分之二。而充填后可供人员和设备在其上进行采矿作业的"干"尾矿含水约10～15%，将那些多余的水从充填体的上部迅速排除，对于加速采充循环、提高采场产量关系很大。尾矿水力充填料的脱水有溢流和过滤两种，而以过滤为主。溢流是指澄清的充填水从脱水天井上部漫出或用管道将澄清水引出。过滤则在脱水天井外面包裹滤水材料。一般每个采场应架设脱水天井两个，外面包一层14号铅丝编织的2×2厘米孔眼的金属网，一层亚麻布或麻袋片，一层或两层稻草帘，如图2-6所示。

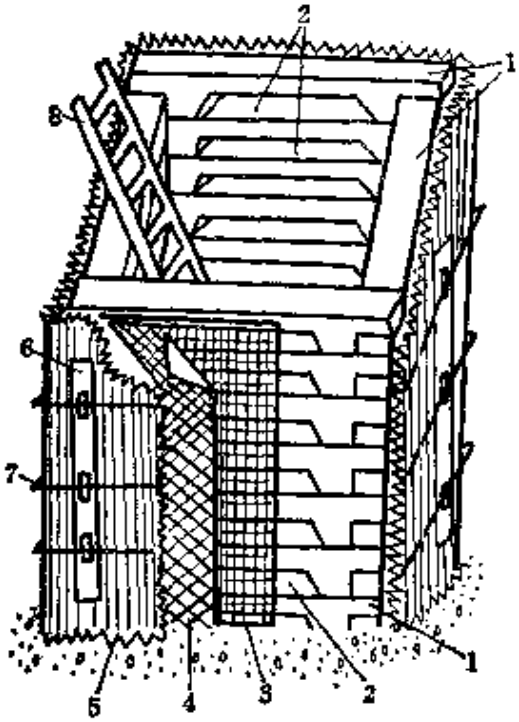


图 2-6　脱水天井示意图

1—架设天井的混凝土预制件；2—泄水孔；3—金属网；4—亚麻布或麻袋片；5—稻草帘；6—木板；7—铁丝箍（12号铅丝）；8—梯子

对于水平分层充填法的采场，当中段高度较大时，应注意滤水材料在水的浸泡下不致过早地腐烂，一般以2～3年为期，即在采场结束以前，滤水材料不致破坏而使已充填的尾矿溃出。对于一个采充循环安排得很紧凑的采场，充填体的中下部常常处于饱和含水状态，最下面的一些细粒级尾矿富集区域，甚至处于流体状态，承受上部尾矿孔隙中充填水的静压力，如图2-7所示。当滤水材料腐烂后很容易发生尾矿溃决事故。

五、充填系统和主要技术经济指标

根据矿山情况，将尾矿的分级脱泥、粗尾矿的贮存、地面充填设施的数量和位置、通往采场的充填管布置、充填工作面脱水

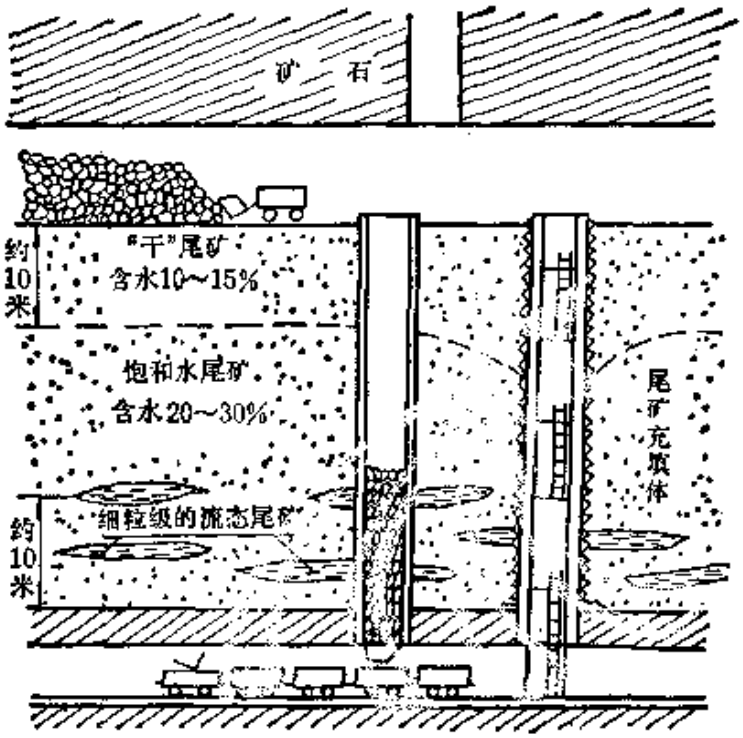


图 2-7 生产采场尾矿充填体中含水情况

以及充填水的处理等方面组合起来，就成为一个矿山的充填系统。由于矿山的情况各有不同，因时、因地制宜地选择充填系统甚为重要。一般应作两、三个方案进行比较，以便选出一个技术先进、生产可靠、经济合理和设备材料易解决的充填系统。

尾矿水力充填主要技术经济指标如下：

充填成本：每米^{3}尾矿充填体的成本一般约为0.50～2.00元，波动范围是由于从选矿厂到充填设施的尾矿扬送距离和高度、分级段数以及充填水扬出地面的高度等条件不同而产生的。

水平分层充填法采场的生产能力：

采场面积	采场平均产量
<300米^2	60～80吨/日
300～500米^2	80～100吨/日
500～1000米^2	200～300吨/日
500～1200米^2（铲运机出矿）	400～800吨/日

矿石贫化率：5～10%；

采下矿石的损失率：2～3%。

地面充填设施基建投资：尾矿分级每日1000～2000吨、块石砌平底尾矿仓1000～2000米^3、包括尾矿的制浆和搅拌共约10～20万元。

图2-8为铲运机在尾矿充填工作面。

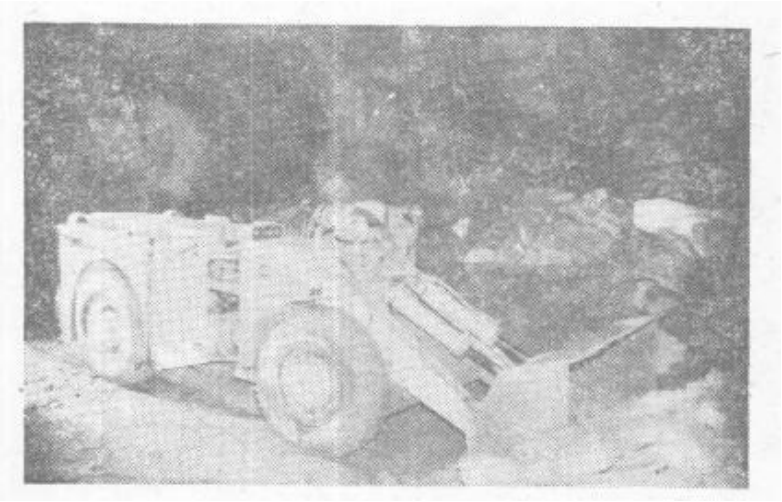


图 2-8　铲运机在尾矿充填工作面

第二节　尾矿胶结充填

尽管尾矿水力充填具有工艺和设备简单、输送范围广、充填成本低和基建投资少等优点，但建成的充填体是松散的，不能保证矿柱的有效回采。同时，在采场内使用机械化的出矿设备，例如电耙或自行式的装运机、铲运机，在松散的尾矿充填面上装运矿石，由于充填体是松散的，容易引起矿石的损失或贫化，并降低运矿设备的生产效率。因此，对于稀有金属、有色金属富矿中的厚大矿体，当矿柱矿量所占比例较大时，就在尾矿水力充填料中加入适量的水泥（或其他胶凝材料），使松散的尾矿凝聚而成具有一定强度的整体，以改善矿柱的回采条件、降低损失贫化、便利大型设备作业、或兼顾其他方面之目的。尾矿胶结充填是在尾矿水力充填的基础上发展起来的，而且尾矿胶结充填系统又可进行尾矿水力充填，两者相似之处极多，现仅将前者的特点介绍如下：

一、对尾矿物理性质之要求

用于胶结充填的尾矿，其物理化学性质之要求除与尾矿水力

充填相同外，应特别注意尾矿和尾矿水中不得含有破坏水泥安定性、降低充填体强度的过量的有害成分。金属硫化矿床中的有用矿物多为硫化物，尾矿中也就遗留有硫化物，特别是高品位金属硫化矿床常含有大量的黄铁矿(FeS_2)，因而在尾矿中的黄铁矿含量换算成硫可能达到3～5%。经过旋流器分级脱泥，由于黄铁矿比重大而富集到粗尾矿中，使充填用的尾矿含硫量大于全尾矿含硫量一倍以上。尾矿中磨得很细的黄铁矿和其他硫化物，在空气和水的作用下，发生氧化而在水中生成硫酸根离子(SO_4^{--})。当SO_4^{--}的浓度达到250～1500毫克/升时，对胶结充填体的破坏作用主要是与水泥结构中的铝酸盐生成硫铝酸盐的晶体($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$)，由于含大量结晶水而使体积增加2.5倍。当$SO_4^{--}$的浓度增加到5000～10000毫克/升时，与水泥水化物中的氢氧化钙($Ca(OH)_2$)相作用而生成二水石膏($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)，体积增加2.2倍❶。胶结充填体凝固后受到SO_4^{--}的侵蚀而使水泥结构中的部分矿物体积增加2倍以上，必然产生巨大的内应力，最终导至胶结充填体的开裂或崩解。因此，高硫尾矿用于胶结充填应该慎重，必须通过试验以确定其危害程度。已氧化的高硫尾矿是不能作胶结充填料的，其试块在28天龄期以后均发生崩解。水泥与尾矿之比为1：20的高硫尾矿之试块抗压强度见表2-2。水泥用量更大的试块也出现类似的结果。

高硫尾矿的强度试验 **表 2-2**

尾矿类型	水泥类型	料浆浓度(%)	抗压强度（公斤/厘米²）							
			7天	14天	28天	60天	90天	180天	270天	365天
高硫尾矿	普通硅酸盐水泥	70	3.52	3.80	4.71	12.95	2.39	1.20	1.05	1.34
高硫尾矿	抗酸硅酸盐水泥	71	—	2.32	3.66	—	4.08	4.85	2.25	1.20
已氧化高硫尾矿	普通硅酸盐水泥	70	—	0.56	0.7	崩解	崩解	崩解	崩解	崩解

❶$Ca(OH)_2$的克分子体积为33.2厘米³，$CaSO_4 \cdot 2H_2O$的克分子体积为74.3厘米³，从$Ca(OH)_2$转化为$CaSO_4 \cdot 2H_2O$，其体积增加了2.237倍。

为了提高胶结充填料的强度和在充填工作面迅速脱水，一般是使用分级后的粗粒级尾矿，但由于矿物成分和粒径组成之不同，也有个别矿山报导了试验结果，认为分级与否对胶结充填体的强度差别不大。考虑到选厂尾矿的粒级也是在不断波动，为了生产可靠，当前胶结充填实践中均采用粗粒级尾矿。

二、尾矿胶结充填料的配比选择

尾矿胶结充填所用胶凝材料通常是普通硅酸盐水泥，标号一般为400号。水泥的代用胶凝材料有湿磨的高炉炼铁矿渣、反射炉炼铜的炉渣。以及粉煤灰等。尾矿胶结充填料的配比选择主要是决定料浆浓度和水泥（或其他胶凝材料）用量。由于输送浓度可达60～72%，故浓度对充填体的强度影响很大。在水泥量相同的条件下，浓度越高充填体的强度越大，如图2-9所示。

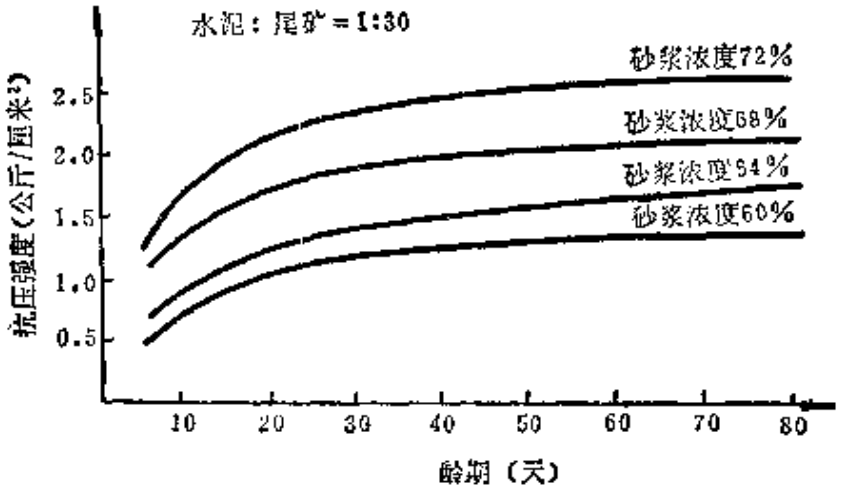


图 2-9　料浆浓度与充填体强度之关系

当采用地面制备好的水泥尾矿胶结充填料并用泵扬送或自流输送时，料浆的输送浓度与尾矿的比重有关。当尾矿比重在 2.6 左右时，输送浓度可取65～68%，当尾矿比重在 2.8 以上时，输送浓度可取70～72%。

当浓度确定以后，影响胶结充填体强度的主要因素是水泥用量。尾矿胶结充填实践中：水泥用量为 60～300公斤/米^3，相当于水泥尾矿比为1:30至1:5。用凡口矿的粗尾矿和400号矿渣硅酸

盐水泥（实际标号为300号）所作的 7.07×7.07×7.07 厘米的试块强度试验见表2-3。

水泥尾矿不同配比时的试块强度 **表 2-3**

水泥尾矿比	尾矿浆浓度（%）	水灰比	水泥用量（公斤/米³）	抗压强度（公斤/厘米²）	
				28天	90天
1:2	75	0.065	643.7	140	
1:3	75	1.00	466.6	124	
1:4	75	1.33	378.5	85	118.9
1:5	75	1.66	311.8	50.7	90
1:6	75	2.00	280.1	44	74
1:8	75	2.66	209.4	29.3	43
1:10	75	3.33	164.8	23.0	34.8

用400号矿渣硅酸盐水泥与凡口全粒级尾矿（含硫3.14%）所作试块强度试验见图2-10。从图2-10中可以看出，尾矿胶结充填料的后期强度增长较大，6个月龄期的抗压强度比28天的强度提高70～80%。

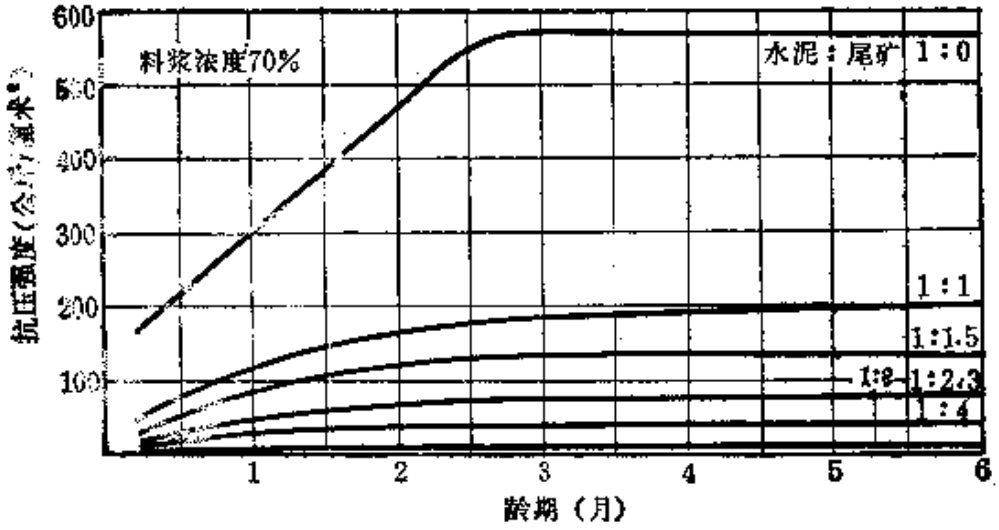


图 2-10 尾矿胶结充填料6个月龄期之强度增长

对于胶结充填体所需强度，目前还没有一个通用的计算方法，一般是按试验和生产实践经验来选取。根据矿床条件和回采方案

之不同，充填体所起的作用，亦即所需的强度差别甚大。在水平分层充填法中，为便利大型设备运矿和减少损失贫化，往往在充填面上浇一层约15厘米厚的运矿底板。此层要求凝结快，早期强度高，常取水泥尾矿比1：5或1：6，相当于28天龄期抗压强度40～50公斤/厘米^2。暴露面积达300米^{2}的人工顶柱所要求的强度值也与运矿底板相仿。空场法中之人工间柱有较大的垂直暴露面积，常取水泥尾矿比1：8～1：10，相当于28天龄期抗压强度20～30公斤/厘米^{2}或90天龄期抗压强度40～50公斤/厘米^2。至于为使尾矿充填料在垂直暴露高度4～6米以下不致倒塌而引起矿石贫化，常加入1：30的水泥，28天的抗压强度在2公斤/厘米^{2}以下。

有了浓度和强度两个数值，就可参照表2-2和图2-10中提出配比的大致范围，最终应通过不同配比的实验室试块强度试验以后再确定。

三、尾矿胶结充填料的制备和输送

尾矿胶结充填料之制备较之尾矿水力充填之不同点在于：稳定的料浆浓度、按需要量加入水泥和搅拌成均匀的料浆。保持稳定的料浆浓度是指不得出现时稠时稀的状况，要做到这一点必须用定量水表给水、尾矿的供给要计量，以及尾矿的含水量较稳定。为达到此要求，胶结充填设施中的尾矿仓多采用平底仓和立式仓。水泥的计量多用调速电机驱动的叶轮式给料机、单管或双管的螺旋喂料机等，用改变设备的转速来调节水泥量。

根据矿山之特点，尾矿胶结充填料的制备基本上有三种形式，即：平底尾矿仓和水泥用螺旋输送机制浆；立式尾矿仓和水泥用搅拌桶制浆；水泥浆和尾矿浆的分离输送。

平底尾矿仓和水泥螺旋输送机制浆的工艺流程如图2-11所示。尾矿用管道送来后在平底仓内脱水，由于气候及脱水时间的不同，使尾矿的含水量相差较大，故需在尾矿耙入尾矿输送螺旋后加水以调节水量和便利输送。尾矿浆在进入搅拌桶前先经一个计量螺旋以调节电耙供尾矿之不均衡。水泥经单管螺旋喂料机计量后进入螺旋输送机，加水制成水泥浆流入搅拌桶。搅拌好的水

泥尾矿浆经钻孔流入井下充填管。这种制备方式的优点是工艺简单，操作方便，基建投资少。建设一套包括200～800米^{3}平底尾矿仓、150～400吨水泥库的制备设施之总投资约20～40万元。缺点是尾矿的计量和浓度控制不够准确，但只要加强管理，还能基本满足充填要求。

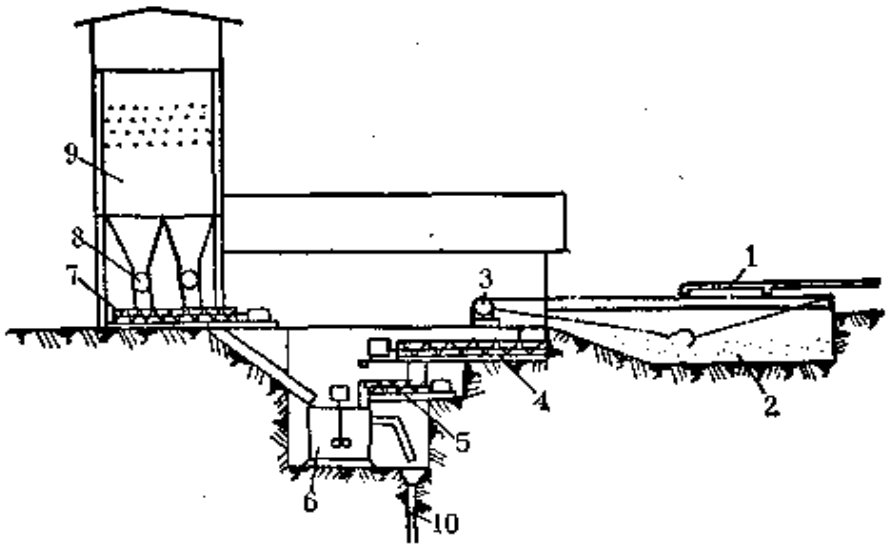


图 2-11　平底尾矿仓和水泥螺旋输送机制浆

1—尾矿输送管；2—平底仓；3—电耙绞车；4—尾矿输送螺旋；5—尾矿计量螺旋；6—搅拌桶；7—水泥制浆螺旋；8—单管螺旋喂料机；9—水泥库；10—充填钻孔

立式尾矿仓和水泥搅拌桶制浆的工艺流程见图2-12。立式尾矿仓可用闸阀放出浓度65～70%的饱和水尾矿，经管道导入搅拌桶。水泥经弹性叶片叶轮式给料机计量后，用一小搅拌桶加水制浆，用管道导入搅拌桶。当采用自动控制桶内液面高度的设备后，也可将干水泥粉直接送入搅拌桶。这种制备方式的优点是浓度控制比较准确、生产能力大，易于实现自动化。缺点是基建投资较高。建设一套包括两个1000米^{3}立式尾矿仓、两个200吨水泥库的制备设施总投资约为100～120万元。

当矿体附近没有修建尾矿胶结充填设施的适宜场地，或干水泥粉送到制备设施处要新建投资较大的运输线路时，则可考虑尾

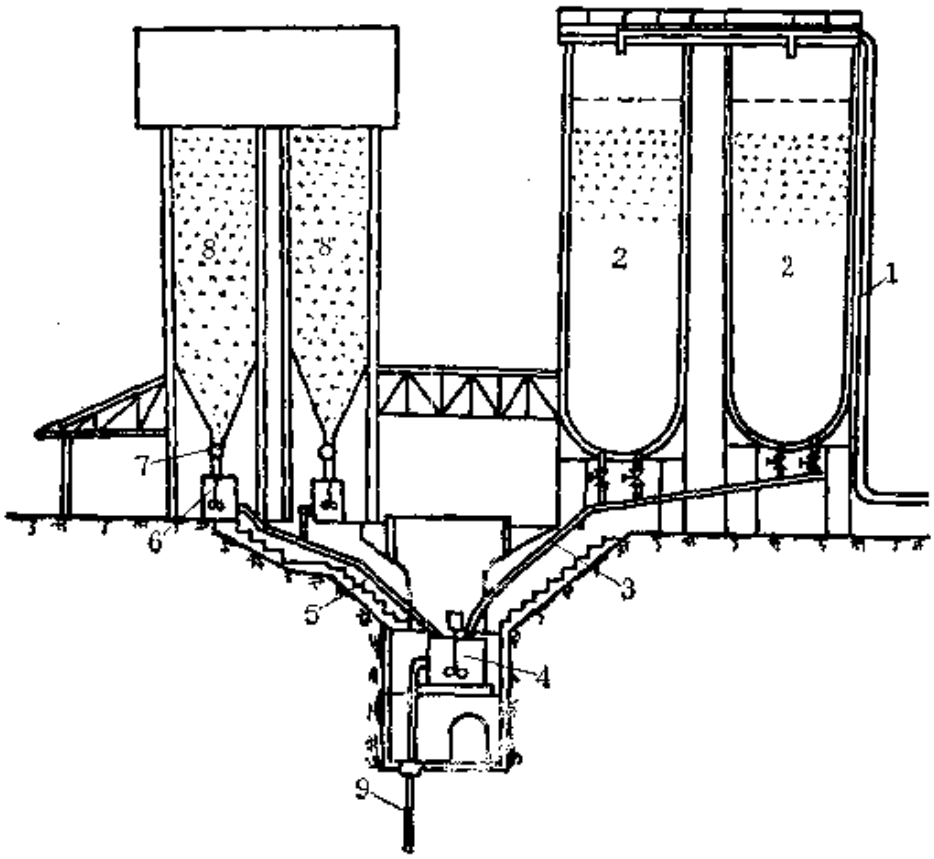


图 2-12　立式尾矿仓和水泥搅拌桶制浆

1—由分级站来的尾矿管；2—立式尾矿仓；3—尾矿浆输送管；4—搅拌桶；5—水泥浆输送管；6—水泥制浆搅拌桶；7—弹性叶片叶轮式给料机；8—水泥库；9—充填钻孔

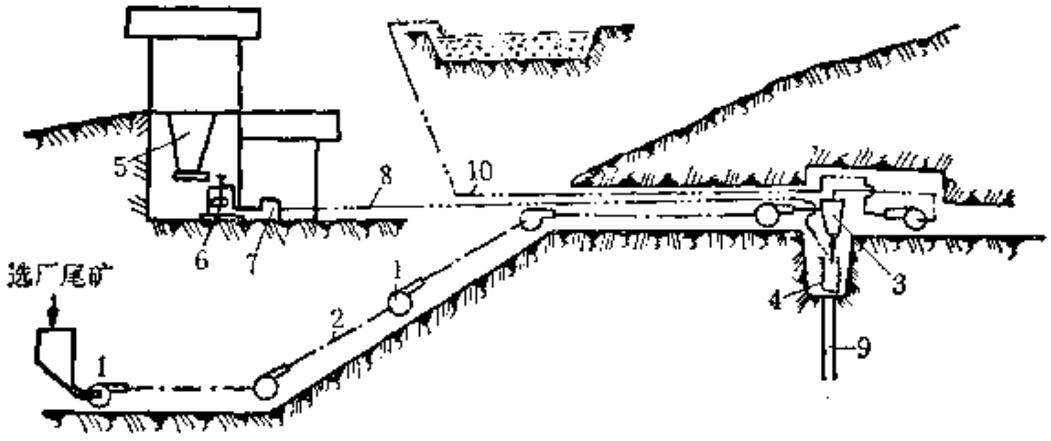


图 2-13　尾矿浆与水泥浆分离输送

1—砂泵；2—尾矿输送管；3—水力旋流器；4—软胶管；5—水泥仓；6—制浆搅拌桶；7—隔膜泵；8—水泥浆输送管；9—充填钻孔；10—通往尾矿坝之细粒级尾矿管

矿浆与水泥浆分离输送，而在充填工作面附近进行混合的方式，其工艺流程如图2-13所示。尾矿经数段砂泵串联送入坑内，再用水力旋流器脱水脱泥，沉砂浓度约68～72%。水泥用搅拌桶制成浓度为50～60%的水泥浆，用隔膜泵扬入坑内在充填钻孔和充填管道内与尾矿浆混合。这种制备方式的优点是系统灵活性大，基建投资较低。缺点是浓度和配比的控制不够理想。

尾矿胶结充填料之输送与尾矿水力充填相似。井下充填管多为D_g100（4英寸）和D_g80（3英寸）焊接钢管。由于浓度较高，为防止堵塞管道，料浆的流速较大，因而自流输送的充填倍线较小。一般认为：充填倍线为5～6是很可靠的，充填倍线达到10是可能的。尾矿胶结充填料在充填工作面的脱水与尾矿水力充填相同。图2-14为尾矿胶结充填一分层充完后采场的情况。

四、主要技术经济指标

尾矿胶结充填料的成本：

尾矿胶结充填的成本主要决定于水泥的用量和水泥价格。水泥的调拨价格约为每吨45元，即使是通行标准轨铁路的矿山，运到充填设施内的袋装水泥每吨可能高达80～100元。将袋装水泥用汽车长距离运到矿山的费用更高。对于大中型胶结充填的矿山，要考虑自建水泥厂和使用散装水泥。尾矿胶结充填料的水泥用量为60～300公斤/米^3，幅度很大，因而充填料的成本也相差较大。国内各矿山的水泥用量约为150公斤/米^{3}以上，胶结充填体的成本约为每立方米15～25元。

水平分层充填法的采场生产能力：

采场面积	采场平均产量
＜300米^2	50～60吨/日
300～500米^2	80～100吨/日
500～1200米^2（铲运机出矿）	400～800吨/日

分层充填时间：当分层充填量为1000～2000米^{3}时，充填时间约7～14天。其中准备工作、充填、巷道清理工作各占三分之一。

矿石贫化率：5～15%。

矿石损失率：5%。

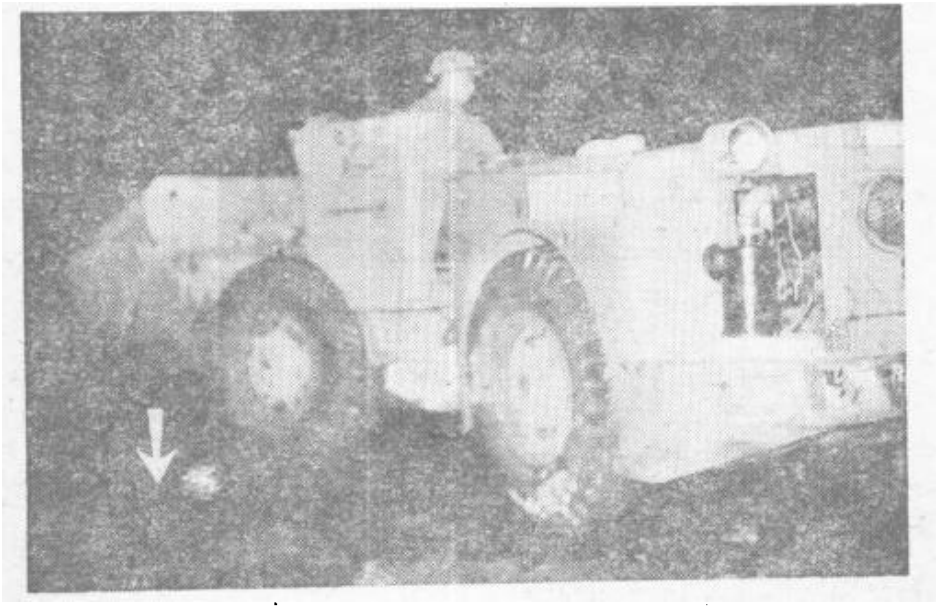


图 2-14　尾矿胶结充填一分层充完后之采场

（图中箭头所示为充填体表面之平滑光洁情况）

参 考 文 献

〔1〕冶金矿山设计参考资料，上册，《冶金矿山设计参考资料》编写组，冶金工业出版社，1979年 4 月。

〔2〕胶结物质工学、硅酸盐工学、硅酸盐工学第一分册，南京化工学院，北京建筑工业学院编，中国工业出版社，1961年 8 月。

〔3〕水泥和混凝土化学，〔英〕F.M.李著，唐明述、胡道和译，黄大能校，中国工业出版社，1966年 3 月。

第三章　利用尾矿烧制水泥

第一节　概　　述

本书第一章中已介绍了金属矿山选矿厂排出的尾矿是一种磨细的、量大的工业废料，其粒径细小，与水泥生料的颗粒略同。因此，研究并利用以方解石、石英为主的尾矿作为水泥生料的配料，烧制水泥是有着重要意义的。

一般金属矿山产出的尾矿为全粒级尾矿，亦称原粒级尾矿。所谓全粒级尾矿是指从矿山选厂产出的、不经分级处理的、自然级配状态的尾矿。当矿山井下采用水砂充填时，常将全粒级尾矿进行分级，粒径在30～37μ以上的尾矿称为粗粒级尾矿，而粒径在30～37μ以下的尾矿称为细粒级尾矿。

矿山通常是把全粒级尾矿或细粒级尾矿排弃于尾矿库中堆存。因此，研究这两类尾矿作为水泥的原料，对解决尾矿的堆存及为建筑材料开辟了原料的新途径等，都具有重要的意义。

1966年北京建筑材料科学研究院、凡口矿、长沙矿山研究院、长沙有色冶金设计院、原北京水泥工业设计院等单位❶，对凡口尾矿进行了试验研究工作，并获得了优异的成果，试验研究证明：

1. 利用含适宜组分的全粒级（或细粒级）尾矿可烧制成质量良好的井下胶结充填的低标号水泥，产品28天的强度可达100～200公斤/厘米，其强度基本上能满足井下胶结充填的要求。

2. 含适宜组分的尾矿经一定的温度煅烧后，可作硅酸盐水泥的混合材，其用量可达15～55%。掺入15%的尾矿熟料作混

❶ 利用尾矿为原料烧制水泥是北京建筑材料科学研究院承担的试验研究项目，其他单位参加了试验。

合材时，水泥标号仍能维持600号；掺入30%时，水泥标号可达500号；掺入50%时，水泥标号达400号。其掺入量为15～30%时，水泥性能良好，凝结、安定性正常。

3. 利用含适宜组分的全粒级（或细粒级）尾矿，作为硅酸盐水泥的原料代替粘土，可烧制出品质优良的尾矿硅酸盐水泥，其标号在400号以上，水泥性能良好，凝结、安定性正常。

所谓尾矿硅酸盐水泥是指用适宜成分的尾矿与适量的石灰石混磨后，烧至部分熔融，得以硅酸钙为主要成分的熟料，再加入适量的石膏磨成细粉而制成的水硬性胶凝材料。

第二节　烧制水泥对于尾矿原料的技术要求

一、烧制低标号水泥对于尾矿成分的要求

根据试验，用全粒级尾矿或细粒级尾矿为原料，烧制井下胶结充填用的低标号水泥，其尾矿的矿物组分应以石英、方解石为主，化学组分应为：

$$\frac{CaO}{SiO_2}>0.5\sim0.7\%$$

其中：

$$CaO>18\sim25\%$$

$$Al_2O_3>5\%$$

$$MgO<3\%$$

$$S<1.5\sim3\%$$

当尾矿中的CaO含量低于18%，而$\frac{CaO}{SiO_2}$小于0.5时，则可采取外配石灰（或石灰石）的方案，以调节尾矿生料中CaO的含量，满足上述要求。

二、烧制普通硅酸盐水泥对于尾矿成分的要求

用于烧制（400号以上的）普通硅酸盐水泥的尾矿原料，按其原料的矿物组分划分，可分为以方解石为主和以石英为主这两类尾矿。用作硅酸盐水泥的尾矿原料，对于化学组分有一定的要求：

1. 有益组分：

氧化钙（CaO）：是水泥原料的主要成分，对于尾矿来说，氧化钙含量越高，钙硅比$\left(\frac{CaO}{SiO_2}\right)$越大，则石灰石的用量越小。

氧化硅（SiO_2）：也是水泥原料的主要成分，对于以石英为主的尾矿，由于CaO含量低，故SiO_2应大于55～60%。而对于以方解石为主的尾矿，由于CaO含量增加，因而可按$\frac{CaO}{SiO_2}$比进行水泥生料的配料计算工作。

氧化铝（Al_2O_3）：一般尾矿中Al_2O_3的含量不高，因而可在水泥生料配料时，用铝质校正原料来调节。

氧化铁（Fe_2O_3）：增加水泥熟料中氧化铁的含量，能降低水泥熟料的烧成温度。当在水泥生料配料时，尾矿中氧化铁的含量不够，则可用铁质校正原料来调节。而当尾矿中铁质含量过高时，则应采取选矿方法予以降低。

2. 有害组分：

氧化镁（MgO）：是水泥原料中的不良杂质，在煅烧过程中呈游离状态。含量多时，使水泥安定性不良。故要求尾矿中MgO的含量应小于3%。

氧化钛（TiO_2）：尾矿中要求不高于3%，含量高时，会引起水泥强度降低。

碱分（K_2O，Na_2O）：尾矿中要求$Na_2O+K_2O<4\%$，含量高时会引起水泥不定期的凝结并发生风化。在水工混凝土中，如骨料里含有矽质页岩，蛋白石或其他各种无定形的硅酸时，碱分将和这些物质发生作用，在混凝土内引起膨胀，产生裂缝。

硫（S）：尾矿中要求小于3～5%，而且含量愈低愈好，（最佳在1%以下），当尾矿中硫的含量过高时，应采取选矿及其他措施（将硫化物）降低或除去，避免在煅烧过程中产生大量的SO_2，污染环境。同时对于水泥熟料，要求SO_3的含量要低，过高了将破坏水泥的体积安定性。根据国家标准，对于硅酸盐水泥、矿渣

硅酸盐水泥来说，其三氧化硫的含量不得超过3%。

总的原则，对于以方解石为主或以石英为主的尾矿，当和石灰质原料配合使用以生产硅酸盐水泥时，须保证制成熟料中：

石灰饱和系数　　$KH=0.8\sim0.95$

硅率　　$n=1.7\sim3.5$

铁率　　$p=1.0\sim2.5$

有害杂质　　$MgO<4.5\%$

$SO_3<1.5\%$

$K_2O+Na_2O<1.0\sim1.2\%$

其石灰饱和系数、硅率、铁率的计算公式将在本章第三节中介绍。

三、烧制高或低标号水泥对于尾矿粒度的要求

生料的粉磨细度对于煅烧反应和水泥熟料的强度有很大影响。这是因为，生料粉磨得较细时，颗粒的比表面积增加，增加了组分间的接触面积，同时表面的质点自由能增大，易于参加反应，因而细度增加时就加速了反应速度。而且生料易于均匀混合，从而增加各组分的良好接触，这对于加速固相反应的进行，是非常有利的。

根据利用尾矿烧制高标号或低标号水泥的试验资料，并参照普通水泥生料对于原料的细度要求，尾矿细度应为4900孔/厘米^{2}筛（相当于170号筛）筛余不大于10%（其粒径约为88微米），超过此数值时，应在混料粉磨中解决。然而对于细粒级尾矿，由于粒径在37微米以下，已经满足要求，故不需粉磨。

第三节　水泥的矿物组成

一、尾矿熟料的矿物组成

1. 尾矿熟料的化学成分

含适宜组分的尾矿经一定的温度煅烧后，称为尾矿熟料，可作为井下胶结充填用的低标号水泥，同时还可以作为普通硅酸盐水泥的混合材。尾矿经煅烧后，其熟料是由氧化钙（CaO）、氧

化硅（SiO_2）、氧化铝（Al_2O_3）及氧化铁（Fe_2O_3）所组成，这四种氧化物的含量在熟料中约占85～90%。此外还含有氧化镁（MgO）、硫酐（SO_3）及其他微量的金属氧化物（如PbO、ZnO、TiO_2、CuO）等。

2. 尾矿熟料的矿物组成

尾矿熟料并不是一种均匀的产物，而是多种矿物的集合体。而且随着煅烧温度的不同，其矿物的组成和含量也不相同。据北京建筑材料科学研究院对凡口尾矿在800°C、900°C、1000°C、1100°C及尾矿熔点下，所煅烧的尾矿熟料，用岩相鉴定与X-射线分析结果（如图3-1）证明，其主要矿物组成为：

1）硅酸二钙（亦称贝利特，其分子式为β-$2CaO \cdot SiO_2$缩写β-C_2S）

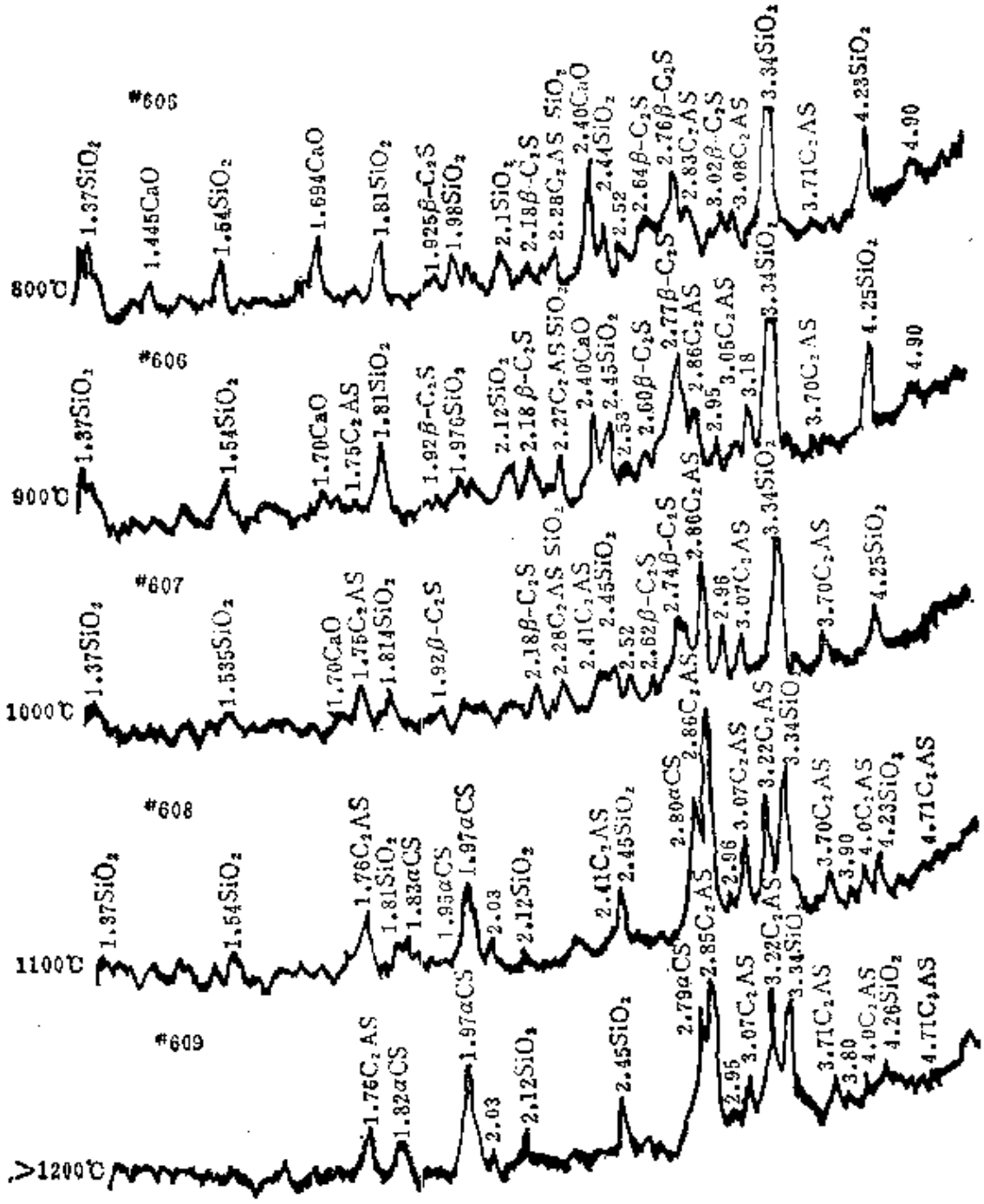
尾矿分别经800°C、900°C、1000°C煅烧后其尾矿熟料中均可见到β-C_2S，以900°C煅烧下的尾矿熟料中β-C_2S含量最高，经反光观察（HF蒸气侵蚀20秒）矿物呈单个出现，一般为圆粒及不规则的圆粒；或椭圆形，长40μ，宽32μ。有较明显的交叉双晶。但边缘的侵蚀凹陷很严重，内部包裹石英颗粒等。而在1000°C煅烧下的尾矿熟料中，β-C_2S亦呈单个出现，但形状多呈叉枝形，更不规则。

2）铝酸-钙（其分子式为$CaO \cdot Al_2O_3$缩写为CA）

尾矿经900°C或1000°C煅烧后，尾矿熟料中有铝酸-钙生成，但含量较微。尾矿熟料中矿物均以不规则的长短形或短形细粒晶体出现，有时同Fe_2O_3固熔，结晶体中有时能见到明显的解理。

3）黄长石（$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_3 + 2CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$）

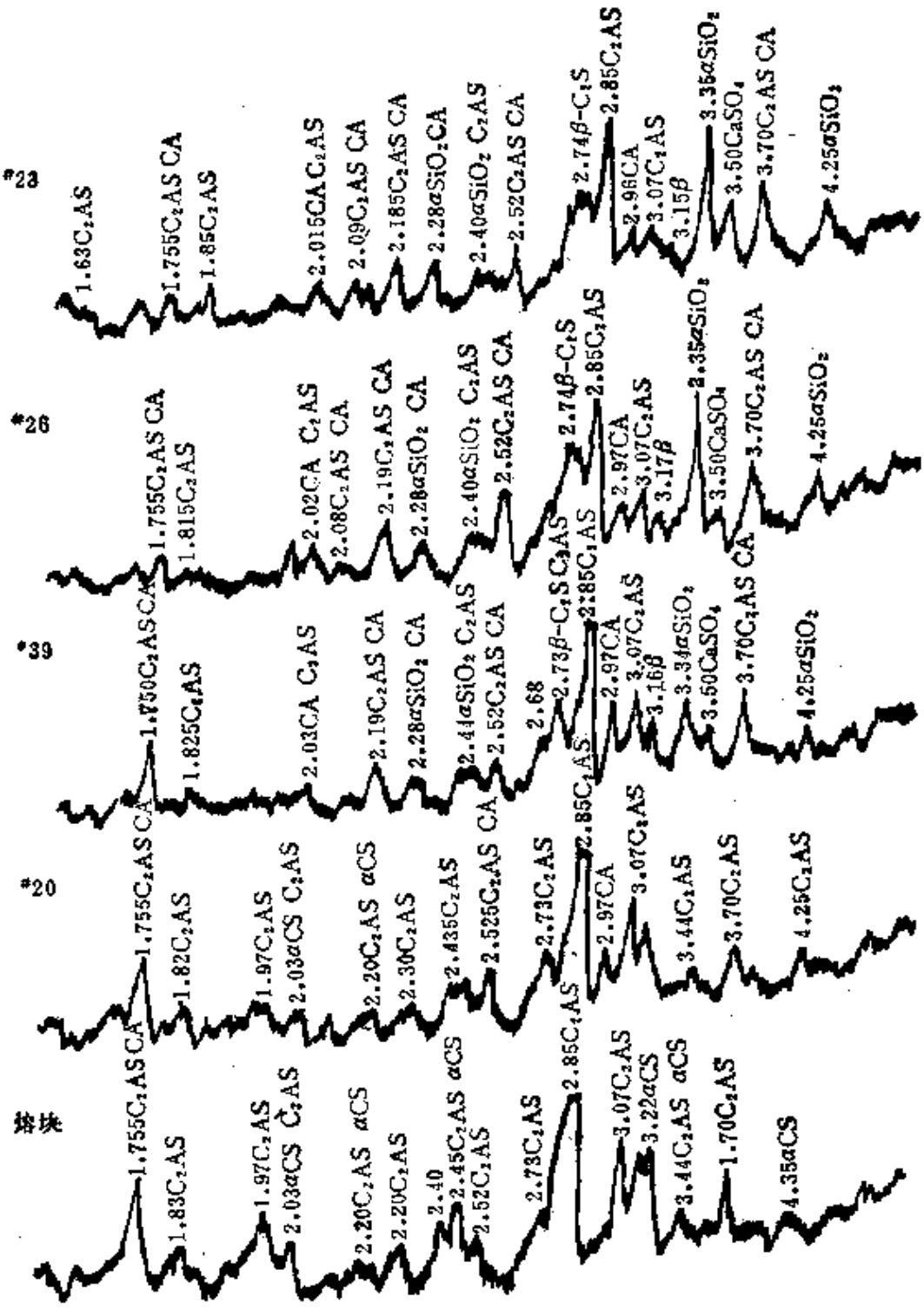
在800°C、900°C、1000°C、1100°C和熔点的尾矿熟料中黄长石普遍存在。据油浸薄片中观察的结果，有明显的（001）解理，平行消光，干涉色为一级灰白色$N_o \approx 1.667$。矿物含量最多均系以细粒集晶形式存在。以不规则的细长条形，长圆形最多，矿物颗粒大小均一，分布一般均匀。特别在较高温度下煅烧的熔块，其黄长石含量较多。



a

图 3-1 尾矿熟料

a—全粒级；


#23
#26
#39
#20
熔块
1.63C₂AS
1.755C₂AS CA
1.85C₂AS
2.015CA C₂AS
2.09C₂AS CA
2.185C₂AS CA
2.28αSiO₂CA
2.40αSiO₂ C₂AS
2.52C₂AS CA
2.74β-C₂S
2.85C₂AS
2.96CA
3.07C₂AS
3.15β
3.35αSiO₂
3.50CaSO₄
3.70C₂AS CA
4.25αSiO₂
1.755C₂AS CA
1.815C₂AS
2.02CA C₂AS
2.08C₂AS CA
2.19C₂AS CA
2.28αSiO₂ CA
2.40αSiO₂ C₂AS
2.52C₂AS CA
2.74β-C₂S
2.85C₂AS
2.97CA
3.07C₂AS
3.17β
2.35αSiO₂
3.50CaSO₄
3.70C₂AS CA
4.25αSiO₂
1.750C₂AS CA
1.825C₂AS
2.03CA C₂AS
2.19C₂AS CA
2.28αSiO₂ CA
2.44αSiO₂ C₂AS
2.52C₂AS CA
2.68
2.73β-C₂S C₂AS
2.85C₂AS
2.97CA
3.07C₂AS
3.16β
3.34αSiO₂
3.50CaSO₄
3.70C₂AS CA
4.25αSiO₂
1.755C₂AS CA
1.82C₂AS
1.97C₂AS
2.03αCS C₂AS
2.20C₂AS αCS
2.30C₂AS
2.435C₂AS
2.525C₂AS CA
2.73C₂AS
2.85C₂AS
2.97CA
3.07C₂AS
3.44C₂AS
3.70C₂AS
4.25C₂AS
1.755C₂AS CA
1.83C₂AS
1.97C₂AS
2.03αCS C₂AS
2.20C₂AS αCS
2.20C₂AS
2.40
2.45C₂AS αCS
2.52C₂AS
2.73C₂AS
2.85C₂AS
3.07C₂AS
3.22αCS
3.44C₂AS αCS
1.70C₂AS
4.35αCS

б

X-射线分析

б—细粒级

4）假硅灰石（分子式为$\alpha CaO \cdot SiO_2$，缩写为α-CS）

在1000°C、1100°C及熔块的尾矿熟料中均可见到α-CS存在，随着煅烧温度的增高，α-CS含量急剧增加。在1000°C煅烧的尾矿熟料中偶见（含量甚微），在1100°C煅烧的尾矿熟料中含量较多，特别是在熔块中能普遍见到。其矿物的折光率$N_g \approx 1.615$，有明显的一轴晶正光性，高级干涉色达二级蓝红并有色环；清晰的闪凸起（$N_g - N_p = 0.044$）和四方形及长方形粒状。在熔块中α-CS一般尺寸为长30μ，宽15μ，小颗粒9～12μ，有时5～6个小颗粒紧合在一起形成晶堆。

5）钙长石（分子式为$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$缩写$CAS_2$）

出现在1100°C的尾矿熟料及熔块中。

6）无水石膏（$CaSO_4$）

在800°C、900°C、1000°C煅烧的熟料中有$CaSO_4$存在。据岩相鉴定结果，等粒状$N_g = 1.612 \pm 0.03$，$N_p = 1.572 \pm 0.03$。X-射线分析结果，衍射图上亦出现$CaSO_4$的特征峰（$d = 3.5$，2.85，2.325）。

7）方解石（$CaCO_3$）

仅在800°C煅烧的熟料样品中见到。

8）游离石灰（f-CaO）

仅在800°C及900°C煅烧的熟料中出现。

9）石英（SiO_2）

为残存的矿物，在所有的尾矿熟料中均存在，但随着煅烧温度的升高，其石英的含量逐渐减少。

此外，还有含铁的固熔体及玻璃质。

根据上述结果，尾矿熟料的形成过程概括为：

800°C——$CaCO_3$已部分分解，CaO与SiO_2化合开始形成β-C_2S，同时C_2AS也开始形成。大量的SiO_2仍呈游离状态存在，仍含有多量的游离CaO。

900～1000°C——$CaCO_3$已大部分分解。在此温度下得到的高分散度的CaO具有较高的活性，而且由于温度的提高，加速固

相反应的进行，形成较多的β-C_2S。同时出现少量的CA。

1100°C以上——固相反应 β-$C_2S+S\rightarrow 2\alpha$-CS得以进行，因而$\alpha$-CS取代$\beta$-$C_2S$，同时CA消失，$CAS_2$代替CA而出现。

各种煅烧温度下的尾矿熟料经岩相鉴定出现的矿物情况见表3-1。

各种煅烧温度下的尾矿熟料中所出现的矿物　　表 3-1

煅烧温度℃	800	900	1000	1100	熔块>1100
β-C_2S	△	△	△	⊗	⊗
CA	⊗	△	△	⊗	⊗
α-CS	⊗	⊗	⊗	△	△
CAS_2	⊗	⊗	⊗	△	△
C_2AS	△	△	△	△	较多
$CaCO_3$	△	⊗	⊗	⊗	⊗
CaO	△	△	⊗	⊗	⊗
$CaSO_4$	△	△	△	⊗	⊗
SiO_2	△	△	△	△	△
C_3A	⊗	微量	⊗	⊗	⊗
CF	⊗	微量	微量	⊗	⊗

注：△表示存在，⊗表示不存在。

二、硅酸盐水泥熟料的组成

1. 硅酸盐水泥熟料的化学组成

硅酸盐水泥主要是由氧化钙（CaO）、氧化硅（SiO_2）、氧化铝(Al_2O_3)及氧化铁（Fe_2O_3）四种氧化物所组成。在水泥熟料中，这四种氧化物的含量、通常在95%以上。根据现代所生产的硅酸盐水泥熟料的化学成分统计，这四种氧化物的含量，波动在下列范围内：

CaO	62～67%
Al_2O_3	4～7%
SiO_2	20～24%
Fe_2O_3	2～5%

此外，氧化镁（MgO）及硫酐（SO_3），其含量一般共约

2～3%。其次还可能含有少量的氧化钛（TiO_2）、氧化锰（Mn_2O_3）、五氧化二磷（P_2O_5）、碱（Na_2O和K_2O）等。

据用全粒级尾矿和细粒级尾矿作配料烧制硅酸盐水泥熟料的试验结果可以看出，标号在600号以上的熟料的化学成分为：

CaO	63.98～65.49%
Al_2O_3	3.25～5.46%
SiO_2	21.81～22.79%
Fe_2O_3	4.13～4.86%
MgO	1.45～3.28%

此外，还含有少量的氧化锌（ZnO）、氧化铅（PbO）等。

2. 硅酸盐水泥熟料的各率

水泥熟料中各氧化物的含量，对水泥的性质有十分重大的影响，从氧化物的含量，可以大致推测水泥的性质。而用率（模数、系数）来表示水泥熟料的成分比单独用氧化物的含量来表示水泥熟料成分，更能表示出水泥的性质。因为在水泥熟料中，并不是以单独的氧化物存在的，而是以两种或两种以上的氧化物结合而成的化合物存在的。因此各氧化物之间的相对含量就极其重要。其各率的计算公式如下：

$$\text{硅率 } n=\frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3+\%Fe_2O_3}$$

$$\text{铁率 } p=\frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3}$$

石灰饱和系数

$$KH=\frac{CaO-(1.65Al_2O_3+0.35Fe_2O_3+0.7SO_3)}{2.80SiO_2}$$

目前在我国水泥工业中，上述各率被广泛应用着。

3. 硅酸盐水泥熟料矿物组成的确定

硅酸盐水泥熟料主要是由硅酸三钙（C_3S）、硅酸二钙（C_2S）、铝酸三钙（C_3A）及铁铝酸四钙（C_4AF）四种矿物组成。同时，这四种矿物也决定了硅酸盐水泥的各种主要性质。

在绝大多数水泥工厂所生产的水泥熟料中，这四种矿物的含量达95～96%，而其中硅酸盐（C_3S和C_2S）占75～82%，熔剂性矿物（C_3A和C_4AF，在水泥熟料煅烧过程中，这两种矿物一度变成液相，故称熔剂性矿物）占18～25%。

通常成分的硅酸盐水泥熟料，其矿物组成波动于下列范围：

C_2S	37.5～60%
C_3S	15～37.5%
C_3A	7～15%
C_4AF	10～18%

根据用凡口尾矿作配料烧制硅酸盐水泥熟料的试验结果，其熟料标号为600号，矿物组成为：

C_2S	18.84～21.58%
C_3S	58.02～58.23%
C_3A	0.37～7.37%
C_4AF	12.74～14.74%

其中硅酸盐（C_3S和C_2S）占77.07～79.6%，熔剂性矿物（C_3A和C_4AF）占15.11～20.11%，四种矿物的总含量达94.71～97.18%。

从上述结果可看出，尾矿硅酸盐水泥熟料的矿物组成是符合普通硅酸盐水泥熟料矿物组成要求的，故用尾矿作配料是可烧制出品质优良的普通硅酸盐水泥熟料。

关于水泥熟料矿物组成的确定有直接测定法和根据化学分析的结果利用计算的方法。

直接测定法中有岩相分析法、X-射线法及化学分析法。岩相分析法是利用水泥熟料磨片在偏光显微镜下直接数出单位面积中各矿物所占的面积，然后根据各矿物的密度计算出各矿物的重量百分含量。这种方法的优点是结果可靠，符合实际情况。利用X-射线法来测定水泥熟料的矿物组成时，由于X-射线法对各种矿物有一定的灵敏度，故要求熟料中，各矿物的含量不少于下列数值：

C_3S	8%	C_4AF	15%
β-C_2S	15%	CaO	2.5%
C_3A	6%	MgO	2.5%

此外，还根据硅酸二钙和铝酸三钙在碳酸及醋酸中的溶解度的不同，所制定的直接定量的化学方法。

除上述方法外，水泥熟料的矿物组成还可以根据熟料的化学分析资料计算出其矿物成分，这种方法是为制得某种设计成分的熟料而计算生料的唯一可行的方法。因为这时熟料尚未制得，不可能用直接法来确定，虽然计算的矿物组成与实际的有些出入，但是，根据计算结果，一般已能说明矿物组成对水泥性质的影响。因此，这种方法，在水泥工业中，仍然得到广泛的应用。

关于计算方法有好几种，下面仅介绍B．A．金德法计算各矿物含量的公式：

熟料中C_3S和C_2S含量的计算式：

$$\%C_3S=3.8(3KH-2)S_C$$

$$\%C_2S=8.61(1-KII)S_C$$

式中 S_C——水泥熟料中氧化硅的总百分含量减去游离氧化硅的百分含量；

KH——水泥熟料的石灰饱和系数；

对普通成分的熟料，即Al_2O_3/Fe_2O_3的分子数比大于1，或Al_2O_3/Fe_2O_3之重量比（即铁率p）大于0.64的熟料，其饱和系数（KH）之值采用下式计算：

$$KH=\frac{CaO-CaO_{游}-1.65Al_2O_3-0.35Fe_2O_3-0.70SO_3}{2.80(SiO_2-SiO_{2游})}$$

在Al_2O_3/Fe_2O_3的分子数比小于1，或在p值小于0.64的熟料中，将不生成铝酸三钙，而是将全部氧化铝和氧化铁与氧化钙结合成铁铝酸四钙，而多余的氧化铁则生成铁酸二钙。这时，石灰饱和系数KH之值应以下式计算：

$$KH=\frac{CaO-CaO_{游}-1.1Al_2O_3-0.70Fe_2O_3-0.70SO_3}{2.8(SiO_2-SiO_{2游})}$$

熔剂性矿物（铝酸三钙、铁铝酸四钙或铁酸二钙）的计算公式如下：

当 $p=\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}\geqslant 0.64$，

$$\%\quad C_4AF=3.04F$$

$$\%\quad C_3A=2.65(A-0.64F)$$

当 $p=\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}\leqslant 0.64$，

$$\%\quad C_4AF=4.77A$$

$$\%\quad C_2F=1.70(F-1.57A)$$

式中 A、F——熟料中Al_2O_3及Fe_2O_3的百分含量。

硫酸钙的百分含量，用下式计算：

$$\%\quad CaSO_4=1.7\%SO_3$$

用尾矿作配料烧制硅酸盐水泥熟料，其矿物组成的计算实例如下：

例：在$\phi 1\times 20.5$米的回转窑上，用全粒级尾矿作配料烧制尾矿硅酸盐水泥熟料，其尾矿硅酸盐水泥熟料的化学成分为：

氧化物	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	其他	总和
百分含量	21.58	4.31	3.75	63.08	2.90	4.38	100

求：熟料的矿物组成

解：

$$p=\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}=\frac{4.31}{3.75}=1.15$$

$\because$

$$p=\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}>0.64$$

$$其KH=\frac{CaO-1.65Al_2O_3-0.35Fe_2O_3-0.70SO_3}{2.80SiO_2}$$

$$=\frac{63.08-1.65\times 4.31-0.35\times 3.75}{2.80\times 21.58}=0.905$$

$$\%\quad C_3S=3.8\times 21.58(3\times 0.905-2)=58.5\%$$

$$\%\quad C_2S=8.61\times21.58(1-0.905)=17.76\%$$

$$\%\quad C_3A=2.65(4.31-0.64\times3.75)=5.06\%$$

$$\%\ C_4AF=3.04\times3.75=11.4\%$$

$$\%\quad MgO=2.90\%$$

$$其他=4.38\%$$

$$总和=100\%$$

第四节　硅酸盐水泥生料的配料计算

水泥生料的配料计算是为了确定原料各组分(尾矿、石灰石、调节性原料)的数量比例，以得到成分和质量合乎要求的水泥熟料，要得到高质量的水泥，首先配料必须符合要求，否则是不可能的。

在进行水泥生料的配料计算时，不仅应当从希望得到所需矿物组成的熟料的愿望出发，而且应当考虑到原料的矿物组分和实际可行的煅烧制度。例如，在生料中，$C_3S:C_2S$的比值过高，即饱和系数KH值过高，可能使水泥熟料中形成大量的游离石灰，而使水泥的安定性不良，或水泥的强度显著下降，减少熔剂性矿物（C_3A及C_4AF），而提高硅酸盐矿物（C_3S及C_2S）之含量，即提高硅率n之值，迫使熟料烧成温度升高，窑的产量降低，衬料的耐久性也降低。过于提高熟料中C_3A的含量，即提高铁率p之值，能使液相粘度增加，使煅烧发生困难；过于提高熟料中C_4AF的含量，即过于降低铁率p之值，能使液相粘度过低，因而形成了大块熟料，甚至引起窑中结圈。因此，四种矿物间的相互比例关系，应当是同时保证成品的优良品质和熟料的易于烧成。

苏联国立水泥工业科学研究设计院曾对水泥熟料矿物组成对水泥性质和熟料烧成的影响进行了研究以后，建议在配料时，采用下列数值。

饱和系数KH　0.87 ± 0.2，即0.85～0.89

硅率n　　2.1 ± 0.3，即1.8～2.4

铁率　　$p=1.3\pm0.3$，即1.0～1.6

其相应的矿物组成为：

$C_3S+C_2S=75\pm3\%$，即72～78%

$C_3S=51\pm4\%$，即47～55%

$C_3A+C_4AF=22\pm2\%$，即20～24%

$C_3A=8\pm2\%$，即6～10%

表3-2列出了几个水泥工厂熟料各率的控制范围。

几种主要窑形的熟料矿物组成和各率控制数值　　表 3-2

窑　型	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	KH	n	p
湿法长回转窑	49～59	17～25	6～11	10～16	0.87～0.9	2.0～2.4	1.1～1.8
干法回转窑	46～57	19～28	6～11	11～18	0.85～0.89	2.0～2.75	1.0～1.6
立波尔窑	45～55	21～30	6～11	11～18	0.85～0.88	1.9～2.3	1.0～1.6
立　窑	33～53	22～41	6～12	10～14	0.80～0.89	1.9～2.8	1.1～1.3

在进行水泥生料的配料计算时，可以采取首先肯定一个或几个率的办法，也可以首先确定部分或全部矿物组成。但必须指出确定率或矿物组成愈多，则所需原料组分也愈多，在生产过程中配料也就愈复杂。表 3-3 列出确定率的数目与所需原料组分数的关系。

水泥生料配料时所确定率的数目与所须原料组分数的关系　表 3-3

编　号	规定的率	规定的矿物组成	必要的和足够的原料组分数
1	KH、n及p	$C_3S:C_2S:C_3A$(或C_2F)$:C_4AF$	4
2	KH及n	$\%C_3S$及$\%C_2S$	3
3	KH及p	$\%C_3S$及$\%C_3A$	3
4	KH	$C_3S:C_2S$	2

在大多数水泥工厂中，生料是由三种原料组分配成，在个别工厂中，也有利用五种原料组分配成水泥生料的，这当然是在不

得已的情况下才采用。

现将水泥生料的配料计算公式叙述如下：

1. 不考虑煤灰掺入时的两种原料组分的配料公式

在进行水泥生料配料时，如果不考虑煤的灰分掺入，则计算要比考虑煤灰掺入时简单得多。在煅烧水泥熟料时，如果采用气体或液体燃料时，则将没有灰分掺入熟料。其次将煤灰掺入量的因素预先考虑在决定各率中，则虽然煅烧时有灰分掺入水泥熟料，但配料时仍可按不掺入煤灰时的公式计算。

在采用两种原料组分进行配料时，都是首先确定饱和系数KH值。然后再计算第一组分和第二组分的配合比。

倘饱和系数KH已确定，拟生料由x分（按重量计）第一组分（石灰石）和1分第二组分（尾矿或粘土）所组成。其两种原料配合时的比值计算式为：

$$x=\frac{2.8KHS_2+1.65A_2+0.35F_2-C_2}{C_1-(2.8KHS_1+1.65A_1+0.35F_1)}$$

式中符号见表3-4。

主要氧化物重量百分含量的简写 **表 3-4**

氧化物	在第一组分中	在第二组分中	在第三组分中	在熟料中	在生料中
CaO	C_1	C_2	C_3	C	C_0
SiO_2	S_1	S_2	S_3	S	S_0
Al_2O_3	A_1	A_2	A_3	A	A_0
Fe_2O_3	F_1	F_2	F_3	F	F_0

两种原料的配比用百分数表示的计算式为：

石灰石：$$Q_1=\frac{x}{x+1}\cdot 100\%$$

尾矿（或粘土）：$$Q_2=\frac{1}{x+1}\cdot 100\%$$

2. 不考虑煤灰掺入时的三种原料组分的配料公式

1）已确定熟料的KH及n值：

假设生料由x分为第一组分，y分为第二组分及1分第三组分组成，则生料的组成计算式为：

$$x=\frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}=\frac{c_1b_2-c_2b_1}{a_1b_2-a_2b_1}$$

$$y=\frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}=\frac{a_1c_2-a_2c_1}{a_1b_2-a_2b_1}$$

式中 $a_1=(2.8KHS_1+1.65A_1+0.35F_1)-C_1$；

$a_2=n(A_1+F_1)-S_1$；

$b_1=(2.8KHS_2+1.65A_2+0.35F_2)-C_2$；

$b_2=n(A_2+F_2)-S_2$；

$c_1=c_3-(2.8KHS_3+1.65A_3+0.35F_3)$；

$c_2=S_3-n(A_3+F_3)$。

三种原料配合时用百分比表示其计算式为：

第一组分(石灰石)：$Q_1=\frac{x}{x+y+1}$

第二组分(尾矿或粘土)：$Q_2=\frac{y}{x+y+1}$

第三组分(其他调节性原料)：$Q_3=\frac{1}{x+y+1}$

2）已确定熟料的KH及p值：

计算公式与上同，唯一不同之点为a_2、b_2、c_2之值被下式所代替。

$$a_2=pF_1-A_1$$

$$b_2 = pF_2 - A_2$$

$$c_2 = A_3 - pF_3$$

3. 不考虑煤灰掺入时的四种原料组分的配料公式

当水泥生料由四种原料组分配成时，则熟料的三个率（KH、n 及 p）应该完全被确定。

计算四组分的配料公式为：

$$x = \frac{\begin{vmatrix} d_1 & b_1 & c_1 \\ d_2 & b_2 & c_2 \\ d_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}} = \frac{d_1(b_2c_3 - b_3c_2) - d_2(b_1c_3 - b_3c_1) + d_3(b_1c_2 - b_2c_1)}{a_1(b_2c_3 - b_3c_2) - a_2(b_1c_3 - b_3c_1) + a_3(b_1c_2 - b_2c_1)}$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & d_1 & c_1 \\ a_2 & d_2 & c_2 \\ a_3 & d_3 & c_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}} = \frac{a_1(d_2c_3 - d_3c_2) - a_2(d_1c_3 - d_3c_1) + a_3(d_1c_2 - d_2c_1)}{a_1(b_2c_3 - b_3c_2) - a_2(b_1c_3 - b_3c_1) + a_3(b_1c_2 - b_2c_1)}$$

$$z = \frac{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & d_1 \\ a_2 & b_2 & d_2 \\ a_3 & b_3 & d_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}} = \frac{a_1(b_2d_3 - b_3d_2) - a_2(b_1d_3 - b_3d_1) + a_3(b_1d_2 - d_1b_2)}{a_1(b_2c_3 - b_3c_2) - a_2(b_1c_3 - b_3c_1) + a_3(b_1c_2 - b_2c_1)}$$

四种原料配合时用百分比表示其计算式为：

第一组分（石灰石）：$$Q_1 = \frac{x}{x + y + z + 1}$$

第二组分（尾矿或粘土）：$$Q_2 = \frac{y}{x + y + z + 1}$$

第三组分(调节性原料Ⅰ)：　$Q_3=\frac{z}{x+y+z+1}$

第四组分(调节性原料Ⅱ)：　$Q_4=\frac{1}{x+y+z+1}$

4. 计算生料时，不考虑燃料灰分掺入的例子

为了计算方便及便于检查，宜将原料的化学分析数据换算成100%。当化学分析数据的总和超过100%时，用普通的方法将所有分析的原料成分量均按比例减少，当化学分析数据总和低于100%时，则在化学成分中加入其他化合物，以得到100%。

实例：在$\phi1\times20.5$米回转窑上，用广东某矿的尾矿作为水泥生料的配料，煅烧普通硅酸盐水泥熟料，其生料的配比计算如下：

原料的化学分析数据列于表3-5。

用烟煤作燃料时，由于煤灰掺入熟料中，故计算水泥生料的成分时，将煤灰掺入量的因素预先考虑在所决定的各率中进行配料计算。

熟料的饱和系数$KH=0.97$，求配合比。

将表3-5中的化学分析数据代入二组分配料公式中，得

$$x=\frac{2.80KHS_2+1.65A_2+0.35F_2-C_2}{C_1-(2.80KHS_1+1.65A_1+0.35F_1)}$$

$$=\frac{2.80\times0.97\times24.52+1.65\times4.59+0.35\times3.57-32.01}{53.68-(2.80\times0.97\times2.39+1.65\times0.60+0.35\times0.18)}$$

$=0.94$

要制备饱和系数为0.97的熟料，其生料应当由0.94分第一组分及1分第二组分所组成，以百分比表示为：

石灰石：　$Q_1=\frac{x}{x+1}100\%=\frac{0.94}{0.94+1}100\%=48.5\%$

全粒级尾矿：　$Q_2=\frac{1}{x+1}100\%=\frac{1}{0.94+1}100\%=51.5\%$

即生料的配比为：

原 料 的 化 学 成 分 **表 3-5**

序号	名称	化学成分 (%)											
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	PbO	ZnO	烧失量	其他	总计	n	p
1	石灰石	2.39	0.60	0.18	53.68	0.97	—	—	42.07		99.89		
2	全粒级尾矿	24.52	4.59	3.57	32.01	2.79	0.45	0.36	27.27		95.50		
		换算成100%以后											
3	石灰石	2.39	0.60	0.18	53.68	0.97	—	—	42.07	0.11	100	9.93	3.33
4	全粒级尾矿	24.52	4.59	3.57	32.01	2.79	0.45	0.36	27.27	4.44	100	3	1.28

全粒级尾矿:石灰石=51.5:48.5

为了检查计算结果是否正确，可采用表3-6。

用于校对计算正确与否的数据 **表 3-6**

序号	组　成	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	PbO	ZnO	烧失量	其他	总量
1	48.5分石灰石	1.16	0.29	0.08	26.00	0.47	—	—	20.40	0.05	48.45
2	51.5分全粒级尾矿	12.63	2.37	1.84	16.50	1.44	0.23	0.19	14.05	2.30	51.55
3	100 分生料	13.79	2.66	1.92	42.5	1.91	0.23	0.19	34.45	2.35	100
4	换算成100分熟料后	21.10	4.05	2.92	64.8	2.91	0.35	0.29	—	3.58	100

表中数据可以用来计算水泥生料的化学成分，也可以用来计算水泥熟料的化学成分。

用表中熟料成分计算KH值如下：

$$KH=\frac{c-1.65A-0.35F}{2.80S}=\frac{64.8-1.65\times4.05-0.35\times2.92}{2.80\times21.10}$$

$$=0.97$$

所得KH值，与原先确定之值相等，故计算结果是完全正确的。

再计算熟料的硅率及铁率

$$n=\frac{SiO_2}{Al_2O_3+Fe_2O_3}=\frac{21.10}{4.05+2.92}=3.02$$

$$p=\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}=\frac{4.05}{2.92}=1.39$$

5. 考虑燃料灰分掺入时的两组分原料的配料公式

在用烟煤作燃料煅烧水泥时，有煤灰掺入熟料中，在计算水泥生料成分时，可以采用两种方法来消除掺入灰分对熟料成分所引起的影响，即

1）把掺入的灰分考虑在计算中；

2）把生料的各率（KH、n、p）作适当的调整。

当工厂是用成分比较固定及燃料灰分波动不大的燃料，并用喷管煅烧时，第二种方法是完全可以采用的，因为这时燃料灰分的成分一定，掺入熟料的灰分数量也就保持一定。

由于不考虑燃料灰分掺入的配料计算，要比考虑燃料灰分掺入时的配料计算简单得多，故有可能的话，最好采用预先调整生料各率的办法来进行配料计算，这时可以直接应用上面所列的配料公式。

考虑燃料灰分掺入时的配料计算，必须知道下列数据：

（1）燃料的消耗量，以占熟料的百分数表示，P公斤/100公斤熟料；

（2）燃料的灰分含量，以百分数表示，A公斤/100公斤煤；

（3）灰分的掺入量，以百分数表示，B公斤/100公斤灰分。

灰分的掺入量，首先决定于水泥煅烧设备的类型。对立窑（特别是黑生料球煅烧时），实际上可达100%，对回转窑，这个数值波动在30～100%之间。波动范围由生料的制备方法(干法或湿法)、回转窑的规格、喂料方式、煤粉细度等因素所决定。

要正确的确定回转窑中灰分的掺入量，只有将入窑时的生料、窑灰、成品和燃料灰分进行系统的化学分析，在此结果的基础上，才能正确地计算出燃料灰分掺入量的数量。

考虑灰分掺入时的配料计算，按下列程序进行。

设熟料中灰分的掺入量为q，则

$$q=\frac{P\cdot A\cdot B}{100\cdot 100}\text{公斤灰分/100公斤熟料}$$

100分熟料(按重量计)是由x分第一组分，y分第二组分及q分灰分组成。

其生料的组成计算式为：

$$x=\frac{\begin{vmatrix} c_1 & b_1 \\ c_2 & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}=\frac{c_1b_2-c_2b_1}{a_1b_2-a_2b_1}$$

$$y=\frac{\begin{vmatrix} a_1 & c_1 \\ a_2 & c_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix}}=\frac{a_1c_2-a_2c_1}{a_1b_2-a_2b_1}$$

式中 $a_1=2.80KHS_1+1.65A_1+0.35F_1-C_1$;

$b_1=2.80KHS_2+1.65A_2+0.35F_2-C_2$;

$c_1=[c_3-(2.80KHS_3+1.65A_3+0.35F_3)]q$;

$a_2=1$;

$b_2=1$;

$c_2=100-q$。

6. 考虑燃料灰分掺入时的三组分原料的配料公式

考虑燃料灰分掺入时的三组分原料配料公式与不考虑燃料灰分掺入时的四组分原料的配料公式相同，唯 x、y、z 表示的意义不同，方程式的系数亦略有不同。即

x 为第一组分在熟料中所占的百分数；

y 为第二组分在熟料中所占的百分数；

z 为第三组分在熟料中所占的百分数；

q 为燃料灰分在熟料中所占的百分数。

$$x+y+z+q=100$$

$a_1=2.80KHS_1+1.65A_1+0.35F_1-C_1$;

$b_1=2.80KHS_2+1.65A_2+0.35F_2-C_2$;

$c_1=2.80KHS_3+1.65A_3+0.35F_3-C_3$;

$d_1=q[C_4-(2.80KHS_4+1.65A_4+0.35F_4)]$;

$a_2=n(A_1+F_1)-S_1$;　　$a_2=pF_1-A_1$;

$b_2=n(A_2+F_2)-S_2$；　或　$b_2=pF_2-A_2$；

$c_2=n(A_3+F_3)-S_3$；　　$c_2=pF_3-A_3$；

$d_2=q[S_4-n(A_4+F_4)]$；　　$d_2=q(A_4-pF_4)$；

$a_3=1$；　$b_3=1$；　$c_3=1$；　$d_3=100-q_3$。

第五节　生料的制备

从矿山选厂排出的尾矿，除少数矿山用干磨干选法产出的尾矿接近原矿自然含水状态外，一般湿法选厂所排出的尾矿，均为含水70～90%的料浆。

根据尾矿的产出状态和含粒级尾矿或细粒级尾矿的脱水特性，用尾矿烧制水泥，其生料制备方法可分为干法和湿法两种。

一、干法生料制备

烧制井下胶结充填用的低标号水泥，或烧制普通硅酸盐水泥的掺合材，其干法的生料制备，以利用干磨干选厂排出的干尾矿粉或湿选厂排出的堆积于尾矿堆积场中的尾矿粉为优，根据窑型的不同，有将尾矿粉直接入窑煅烧，也有将尾矿粉加水制粒成球入窑煅烧。干法生产时，生料的煅烧可在回转窑中进行，也可在其他适宜的窑型中进行。

烧制普通硅酸盐水泥时，用干法制备的生料是将原料干燥后，磨成细粉，即为生料粉。因此，利用尾矿烧制400号以上普通硅酸盐水泥时，用干法制备生料的方法是将干磨干选厂排出的干尾矿粉，或尾矿堆积场中所堆积的尾矿粉经过干燥后，再与石灰石等掺配料一起混磨成细粉，即得生料粉。干法煅烧时，可将生料粉直接入回转窑中煅烧，或将生料粉经制粒成球后入回转窑或立窑中煅烧。

尾矿的制粒，可用机械的方法，其设备有成球盘或成球筒。据尾矿半工业性制粒试验表明，对于纯尾矿，当细度为4900孔/厘米^{2}筛筛余5～10%，采用成球盘，可制得粒径为2～4毫米和5～16毫米的料球，含水分约10%，经烘干后料球强度可达1000～2000克/个，可满足干法回转窑或沸腾炉粒矿焙烧的要求。但必

须指出的是，随着尾矿中含硫量的增加，煅烧时硫化物的分解，料球碎裂得厉害，故要求尾矿中含硫量越低越好。

二、湿法生料制备

湿法制备生料适用于利用湿选厂排出的全粒级尾矿，或井下水砂充填时溢流排弃的细粒级尾矿以烧制普通硅酸盐水泥。其湿法制备，是将尾矿浆与石灰石等配料一起混磨制成一定浓度的生料浆入窑煅烧。湿法生产时，由于料浆含水分高，故生料的煅烧只能在回转窑中进行。

对于利用湿法选厂排出的尾矿，由于料浆含水很高，故生料制备方法的选择，必须通过技术经济比较，以确定合理的脱水方式。影响生产方法的主要因素是尾矿的粒度组成。

对于全粒级尾矿，一般说来可用浓密机浓缩的脱水方式，但脱水效果，则视尾矿的粒度组成而异，试验表明，+ 30 微米占66%的全粒级尾矿，经过浓密机脱水，料浆含水可由81～88%降至30～45%。

对于40或30微米以下的细粒级尾矿，由于颗粒细小，特别是5～10微米的极细颗粒，在较长时间内仍呈悬浮状态，给浓密脱水带来极大的困难，因而细粒级尾矿的脱水问题，目前尚未取得良好的结果。试验表明，对于40微米以下的细粒级尾矿，经浓密后其料浆含水分为55～60%。再经过圆筒真空过滤，滤饼水分达25～28%，此时滤饼粘结力强，给运输和进一步干燥带来困难。

用粘土为原料烧制普通硅酸盐水泥时，其生料的制备是：将含水分为60～70%的黄泥浆与破碎后的石灰石碎块，共同加入生料磨中粉磨，出磨料浆经调节后，泵入窑中煅烧。因此，利用细粒级尾矿或全粒级尾矿烧制400号以上的尾矿硅酸盐水泥，可将细粒级尾矿或全粒级尾矿经过浓密，使尾矿浆所含水分降至55～70%，然后与尚需加入的石灰石等配料一起粉磨，再将料浆浓度调节至入窑浓度的要求。根据湿法回转窑工业生产的实践，经济的入窑料浆，含水分控制在32～35%时，所获得的经济指标为优。

在此应特别指出的是，上述的生料制备方法，对于解决细粒级尾矿的脱水问题，达到满足烧制水泥在料浆浓度上的要求，从而在根本上解决占分级尾矿总量约30～40%的细粒级尾矿的堆存问题是具有重大意义的。

对于烧制普通硅酸盐水泥来说，其干法或湿法的生料制备方法的选择是关系着生产工艺和窑型的，故合理地选择制备方法是很重要的。影响选择生料制备方法的是尾矿脱水的难易程度和化学成分的均匀性。当尾矿脱水困难（如细粒级尾矿），而且化学成分不均匀，或在外配多种校正原料时，为了获得均一的入窑生料，则用湿法是比较合理的。当干磨干选厂产出的尾矿，或尾矿堆积场中的尾矿为含自然水分时的松散状态，用于干燥及煅烧尾矿所需之热量小于湿法生产时煅烧生料浆所需的热量，此时采用干法生产是比较经济的。

湿法制备水泥生料的主要优点是容易获得成分均匀的生料浆，卫生条件好，缺点是用于煅烧水泥生料所需的热耗量大。干法的优点是用于煅烧水泥生料所需的热量一般较湿法生产时为低，缺点是不易获得成分均匀的生料，机械设备较多，劳动卫生条件差。

第六节　煅烧工艺与窑型

一、尾矿的煅烧性质

矿石经磨细，然后进行选别，所排弃的尾矿，经活性测定和物相鉴定，一般属于惰性材料，必须经过高温煅烧处理才具有胶凝性。

据凡口尾矿的煅烧试验表明：尾矿的烧成范围较窄，温度达1100°C时就易结大块，此时窑内易出现结圈。温度达1160°C时已接近尾矿的熔点，当煅烧温度大于1250°C时尾矿已被烧熔而失去胶凝性。由试验结果（如图3-2和图3-3）可以看出，凡口尾矿的适宜煅烧温度为900～1000°C，温度过高或过低均对强度有不良影响。温度过低，煅烧不完全，具有胶凝性的物质尚未生成。而

煅烧温度过高，接近尾矿的熔点，此时，水硬性高的矿物β-C_2S和CA转化为水硬性低的α-CA和C_2AS，从而使胶凝性大大降

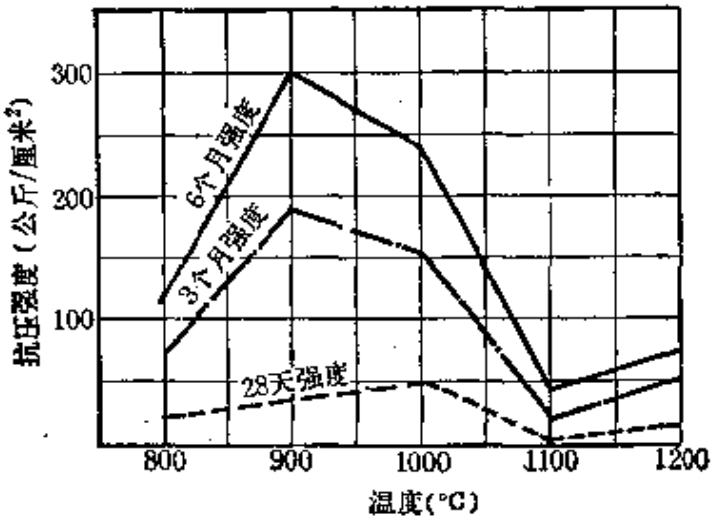


图 3-2 煅烧温度和水泥强度的关系

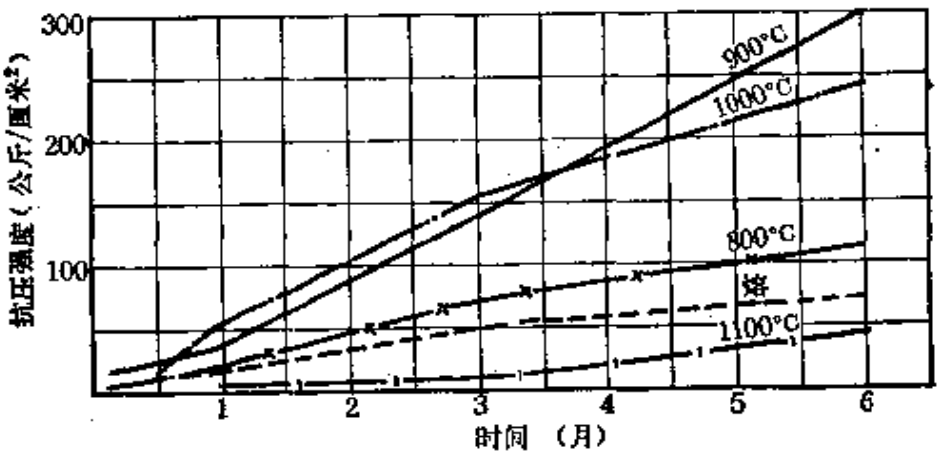


图 3-3 不同煅烧温度下的尾矿熟料后期强度增长情况

低，因此，应根据尾矿的化学成分和矿物组成，经煅烧试验后确定适宜的煅烧温度。

二、煅烧工艺与窑型

就当前水泥工业的窑型来说，有回转窑和立窑两种，近年来还试验了沸腾炉。对于用尾矿烧制水泥来说，根据尾矿的煅烧特性，按烧制水泥的标号与炉型的关系划分如下：

烧制低标号（井下胶结充填用）水泥，其炉型有：干法回转

窑；湿法回转窑；沸腾炉。

烧制高标号（400号以上普通硅酸盐）水泥，其炉型有：干法回转窑；湿法回转窑；立窑。

现将烧制低标号水泥和高标号水泥时的工艺和窑型分述如下：

1．烧制低标号水泥时的工艺和窑型

根据凡口尾矿烧制井下胶结充填用的低标号水泥或烧制普通硅酸盐水泥的混合材的试验，其烧成温度为900°～1000°C，因而适宜的窑型为回转窑，也试验了沸腾炉。

1）回转窑

回转窑可分为干法和湿法两种。

干法回转窑，其生料的制备为干法，尾矿经制粒后呈料球状入窑煅烧，或者以尾矿粉直接入窑煅烧，工艺过程如图3-4所示。

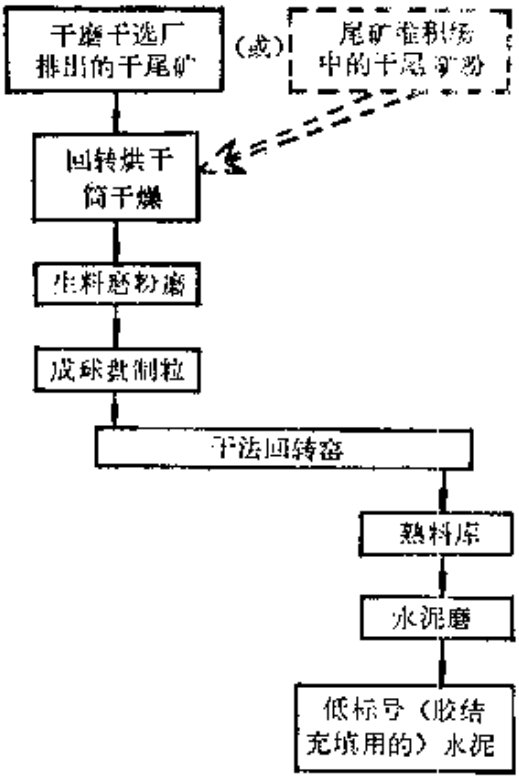


图 3-4 干法回转窑烧制低标号（胶结充填用的）水泥工艺流程

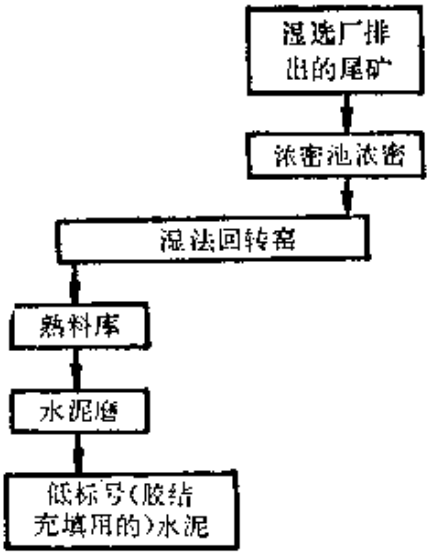


图 3-5 湿法回转窑烧制低标号（胶结充填用的）水泥工艺流程

为减少窑灰损失和保证烧成质量，以用制粒煅烧为好。

湿法回转窑，其生料的制备为湿法，尾矿以料浆状态入窑煅烧，工艺过程如图3-5所示。由于回窑内悬挂有热交换装置的链条，料浆入窑后水分逐渐蒸发，出链条带后即为粒状，而后在窑内煅烧。为降低热耗，在保证料浆可泵性的前提下，应尽量将入窑料浆的含水分降低。对于用尾矿烧制井下胶结充填用的低标号水泥来说，以用干磨干选厂排出的干尾矿粉和湿选厂排出的堆积于尾矿堆积场中的尾矿粉，采用干法回转窑煅烧为好。

根据半工业性1×20.5米回转窑煅烧凡口尾矿，采用干法和湿法两种方案的煅烧试验结果说明，无论是湿法料浆（入窑含水38～47%），或干法料球入窑（含水分小于10%）煅烧，均可烧制出井下胶结充填用的低标号水泥。其窑的生产能力，干法回转窑的产量比湿法回转窑的产量增大15%，而窑的飞灰损失，干法回转窑比湿法回转窑降低20%。由于尾矿烧制低标号水泥时的烧成温度（900～1000°C）比烧制普通硅酸盐水泥时的温度（1300～1450°C）低，故其煤耗也降低20～25%，同时窑的产量也有所提高。煅烧试验证明，凡口尾矿的煅烧温度较窄，温度超过1050°C时就易结大块，结圈，而且温度越高结成的圈越结实，越难处理，当尾矿生料含硫量大于5%时，窑的结圈更为频繁。

湿法回转窑煅烧尾矿料浆时，由于入窑料浆含水分高（38～47%），而烧成温度(900～1000°C)又低，因而窑的干燥带负荷特别大。试验表明，当入窑料浆含水分为47%时，其干燥带的长度占窑全长的70%，而烧成带仅占5～8%，故碳酸盐的分解与熟料的烧成是在较短的时间内完成的。

尾矿低标水泥熟料的煅烧过程，可简单概括为：

自由水分的蒸发；

尾矿中各矿物结晶水烧失；

碳酸盐（$CaCO_3$和$MgCO_3$）类和硫化物(FeS_2、ZnS、PbS)的分解；

具有胶凝性矿物（$\beta 2CaO \cdot SiO_2$、$CaO \cdot Al_2O_3$）和其他矿物

（$CaSO_4$、$2CaO\cdot Al_2O_3\cdot SiO_2$、$2CaO\cdot SiO_2$、$CaO\cdot Al_2O_3\cdot 2SiO_2$等）的生成。

用湿法回转窑煅烧尾矿低标号水泥熟料时，其物料沿窑长的温度变化如图3-6所示。煅烧物料的性能如表3-7。

尾矿生料煅烧时沿窑各取样点的气流温度与煅烧物料的性能 **表 3-7**

名称	各取样点							
	窑头	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#
气流温度(℃)	1180	720	540	500	320	300	280	260
物料温度(℃)	1050	400	240	190	130	110	100	57
物料含水分(%)	—	—	7.1	15.0	17.4	20.8	—	28.8
物料烧失量(%)	1.94	20.52	20.35	20.45	20.49	19.51	19.34	19.24
物料含SO_3(%)	2.39	3.83	3.76	3.53	3.38	3.50	3.39	4.37

用回转窑烧制尾矿低标号水泥熟料时，其煅烧过程如下：

（1）干燥带：温度范围在20～200°C。当湿法煅烧时，料浆入窑后温度增高，粘度降低，失去水分之后逐渐变稠。在挂链条的窑内，最易形成泥巴圈，此后继续失去水分，物料从链条上脱落而成球，在窑内继续干燥。而干法煅烧时，物料是在窑内干燥和预热。在此带内，尾矿中水分蒸发和选矿药剂挥发。

（2）预热带：温度在200～750°C时，尾矿中的选矿药剂与有机物质分解；尾矿的脱水变成无定形的SiO_2和Al_2O_3；尾矿中碳酸镁分解。在此带内料球已开始物理化学变化。

（3）煅烧带：750～900°C，在这一带中碳酸镁和碳酸钙部分分解，由于尾矿中含有硫，故一部分与CaO生成$CaSO_4$，另一部分变成SO_2的气体逸出。在这一带内，分解产物之间开始产生固相反应。开始时形成低碱性的铝酸盐（CA）和硅酸二钙（βC_2S），也可能有铁酸盐（CF），同时黄长石（C_2AS）也开始形成。

（4）放热反应和烧成带：如前所述，由于碳酸钙的分解与熟料的烧成是在较短的时间内形成的，故将放热反应带和烧成带合为一带，此带的火焰温度约1050～1150°C，其物料温度为900～

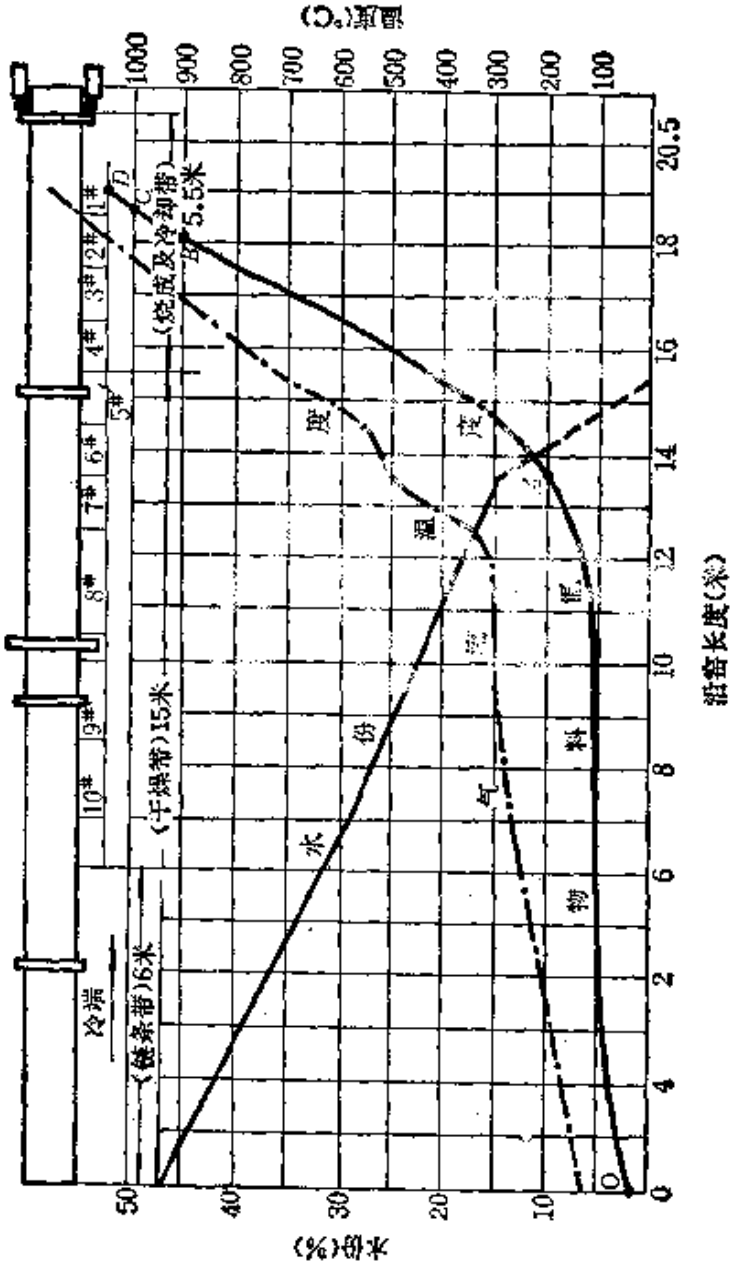


图 3-6 物料在窑中的温度和水分变化

1000°C，在这一带内碳酸钙已大部分分解，在此温度下得到的高分散度的CaO具有较高的活性，由于温度的提高，因此加速了生料组分间的固相反应的进行，此时产生放热反应，同时具有胶凝性的物质贝利特（βC_2S）已较多的形成，并出现少量的铝酸-钙（CA）。当火焰温度为1200°C，物料温度达1050～1100°C，已接近尾矿的熔点，故此时容易烧结，烧熔结圈，温度越高，结圈越严重。当物料的温度达1100°C以上时，此时物料已被烧熔，具有

胶凝性的物质βC_2S已逐渐转化为αCS，同时CA消失，而被C_2AS所代替，从而失去胶凝性。

（5）冷却带：经900～1000°C煅烧后的熟料颗粒往前滚动，而落入冷却机中。

应该特别说明的是，上述各带的划分是根据低温（900～1000°C）煅烧条件下划分的，故与高温（1350～1450°C）煅烧普通硅酸盐水泥时在窑的各带上划分是不同的。

凡口尾矿在煅烧时当温度过高或者过低，均对其水泥熟料的质量有不良影响，随着煅烧温度的不同，其熟料颜色变化敏感，如在800°C煅烧时的熟料颜色为土灰色，900°C煅烧时的熟料颜色为棕褐色，1000°C煅烧时的颜色为浅黑色，以900°C煅烧下的熟料质量较好。因此，可根据煅烧熟料的颜色来鉴别烧成的质量，因而有利于烧成时的生产操作。其干法回转窑和湿法回转窑在上述温度下的熟料照片如图3-7和图3-8所示。

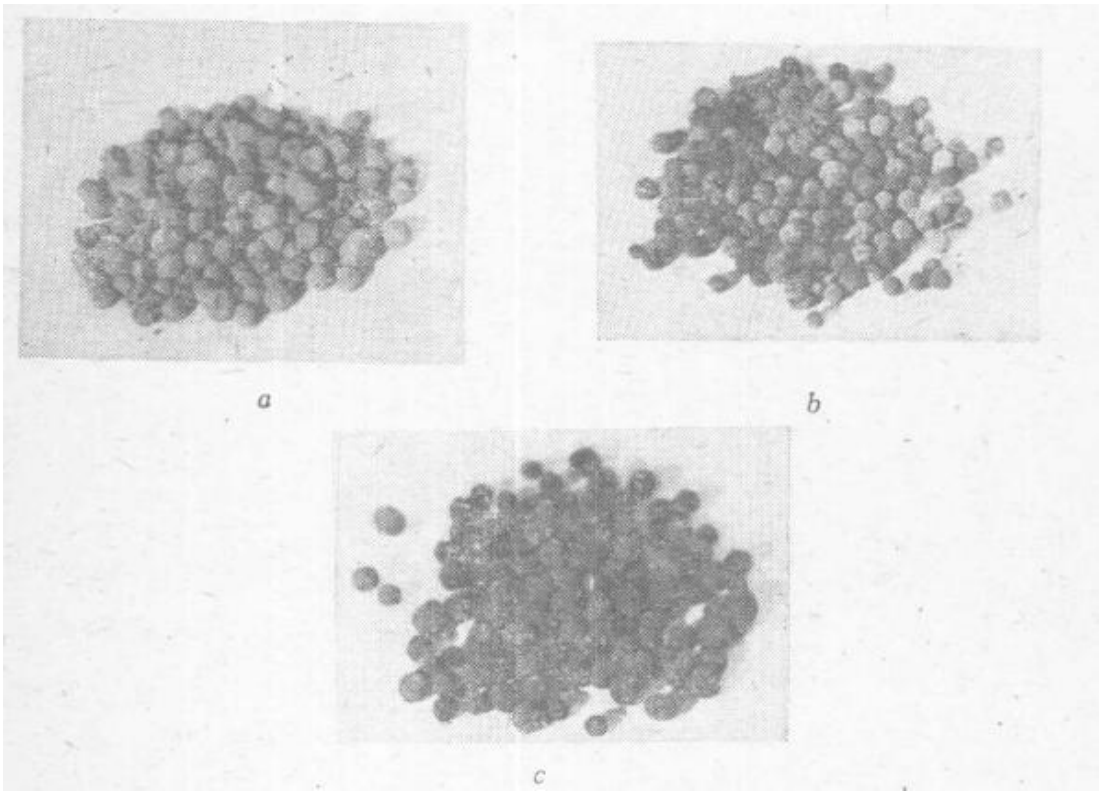


图 3-7　干法回转窑煅烧的尾矿熟料

a—800℃煅烧下的尾矿熟料，颜色土灰色；*b*—900℃煅烧下的尾矿熟料，颜色棕褐色；*c*—1000℃煅烧下的尾矿熟料，颜色浅黑色

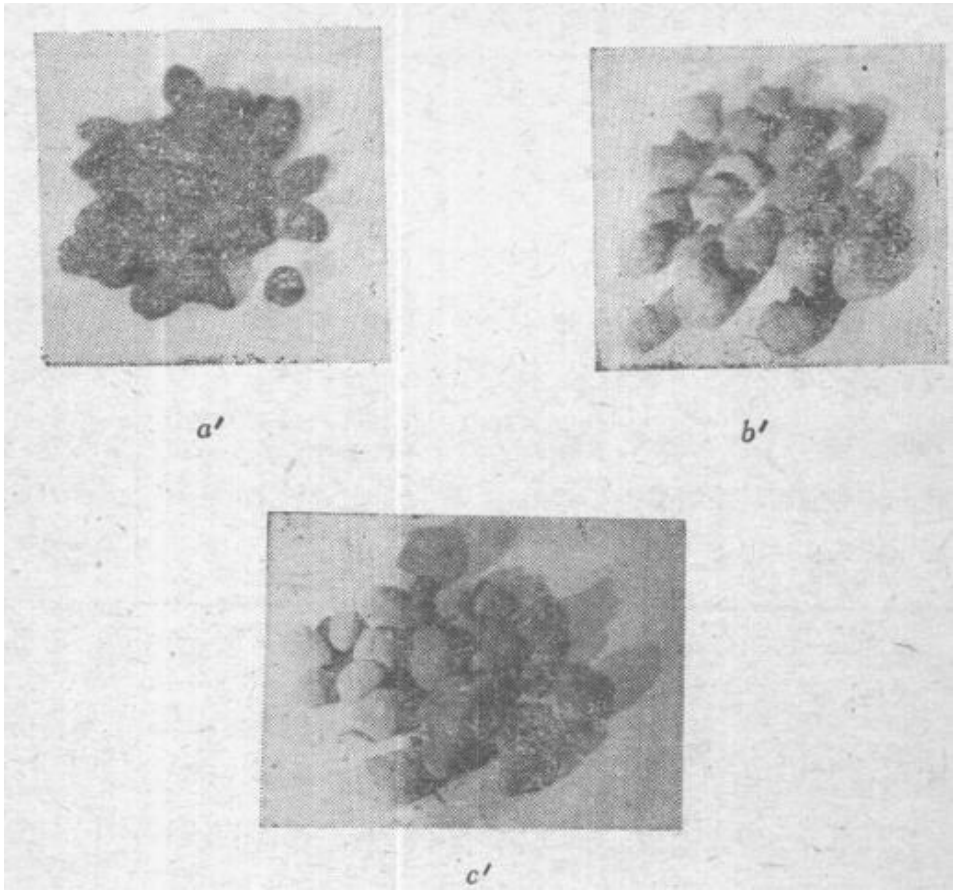


图 3-8　湿法回转窑煅烧的尾矿熟料

a'—800℃煅烧下的尾矿熟料，颜色土灰色；b'—900℃煅烧下的尾矿熟料，颜色棕褐色；c'—1000℃煅烧下的尾矿熟料，颜色浅黑色

尾矿原料在加热煅烧过程中所发生的物理化学变化有吸热反应和放热反应。各反应发生的温度和热性质如表3-8。

尾矿在窑内不单纯是升高温度，而且是会发生一系列的物理化学变化，因此就会出现接近于等温的吸热过程，甚至也出现放热过程，所以物料在窑内各带的升温情况就大不相同。根据尾矿物料在湿法回转窑内的煅烧试验结果，如图3-6所示，在OA段是水分蒸发，故温度升高较慢，接近等温吸热过程，在AB段升温较快，这一段碳酸盐分解吸热和硫化物的燃烧为放热，其反应如下：

$$MgCO_3 \xrightarrow{550\sim750℃} MgO + CO_2\uparrow \qquad \text{吸热}$$

$$CaCO_3 \xrightarrow{900℃及以上} CaO + CO_2\uparrow \qquad \text{吸热}$$

尾矿煅烧过程中的温度和热性质　　表 3-8

反　　应	温　　度	热　变　化
自由水分的蒸发	100℃ 以上	吸　热
尾矿中各矿物结晶水烧失	500℃ 以上	吸　热
硫化物（FeS_2、ZnS、PbS）的燃烧	325～647℃	放　热
碳酸镁的分解	550～750℃	吸　热
碳酸钙的分解	(600℃开始，800～850℃加快) 900℃及以上	吸　热
尾矿中无定形脱水产物结晶	900℃及以上	放　热
具有胶凝性矿物的形成	900℃～1000℃	从总的平衡来看可能是吸热*

* 在 900～1000℃ 煅烧下，部分矿物的形成为放热，而煅烧物料的变化主要为吸热，因此，从总的热平衡来看可能是吸热。

$$4FeS_2+11O_2 \xrightarrow{(着火点325\sim472℃)} 2Fe_2O_3+8SO_2+815千卡 \quad 放热$$

$$2ZnS+3O_2 \xrightarrow{(着火点554℃以上)} 2ZnO+SO_2+121千卡 \quad 放热$$

$$2PbS+3O_2 \xrightarrow{(着火点647℃以上)} 2PbO+2SO_2 \quad 放热$$

由于窑内为氧化气氛，故在氧化焙烧的条件下，一部分二氧化硫被氧化为SO_3即：

$$SO_2+O_2 \xrightarrow[(Fe作用下)]{(500℃)} SO_3+46.4千卡 \quad 放热$$

游离态的CaO和SO_3作用生成硫酸盐即：

$$CaO+SO_3 \rightarrow CaSO_4 \quad 放热$$

在BC段升温最快，在这一段一部分碳酸钙继续分解吸热，与此同时大部分具有胶凝性矿物及其他矿物的生成（如$\beta 2CaO \cdot SiO_2$、$CaO \cdot Al_2O_3$、$CaSO_4$、$2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$、$2CaO \cdot SiO_2$、$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$等）放热，因此升温较快。

回转窑与单纯的加热炉不同，在加热炉内只考虑燃料的燃烧发热，但在回转窑的煅烧条件下，一方面燃料在窑内燃烧，同时尾矿也在窑内进行热加工。因此在考虑燃料的燃烧时，要特别注意，使其能改善尾矿的热加工条件，以改善熟料的质量。因

此，对于火焰的位置、形状、长短的选择很重要。据试验证明，低温煅烧尾矿时，宜加大排风，拉大火焰，以避免温度过度集中，造成物料烧熔结圈，从而达到保证熟料的烧成质量。

回转窑是煅烧水泥熟料的主要设备，但其主要缺点是热效率低。在湿法回转窑中煅烧硅酸盐水泥熟料时，实际热利用率只有30%左右。其热量主要消耗于蒸发水分，废气带走和散热损失。因此采用降低入窑料浆的水分，在窑内加装热交换装置（如链条或金属热交换器等），对于采用湿法回转窑用尾矿烧制低标号水泥，在干燥带负荷很重的情况下，是具有重大意义的。

2）沸腾炉

沸腾层式焙烧炉简称为沸腾炉或称为流态化床焙烧炉。

在沸腾焙烧时，常用气体来使固体颗粒流态化，由于在流态化床中常出现固体颗粒分布不均匀的现象，瞬间地观察床层，固体一部分较浓密地聚集在一起，一部分较稀疏地聚集在一起，稀疏的这部分带有更多气体，在整个床层中形成许多的气泡（图3-9）。这些“气泡”相继涌出，从现象上看与水沸腾时很相似，故称之为沸腾层式焙烧。

沸腾焙烧是尾矿固定料层被空气从下面吹起，尾矿颗粒在气体中翻滚，并进行物理化学变化的过程。

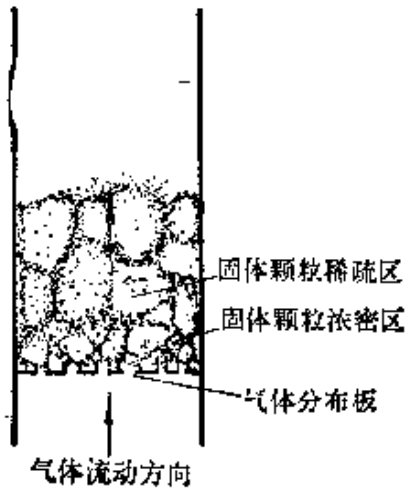


图 3-9 气体-固体颗粒流态化床沸腾示意图

往尾矿料层鼓风时，固体颗粒所占的体积大大增加，随着气流速度的增大，体积继续增加，到流化点时，物料开始沸腾。沸腾焙烧时，粉状的尾矿颗粒或经制粒后的尾矿料球，在一定高度的沸腾层内处于湍流状态，运动很激烈，为气体分子向固体传递创造了极好的条件，因此，许多被传递速度所控制的化学反应过程，在流态床中都被大大地加强

了，由于反应过程的加快，这对于提高生产强度是非常有利的。

沸腾焙烧时，沸腾的尾矿颗粒和空气中的氧良好接触和在炉内较长时间的停留，故使物料的反应充分，同时，也使尾矿中的硫化物较完全氧化。

沸腾炉是柱形或矩形竖式炉，炉膛空间有扩散的与不扩散的两种，目前应用较多的是圆柱形扩散炉膛。炉体由钢壳内衬保温砖和耐火砖所构成（见图3-10，图3-11和图3-12），由下往上炉体可分为四个部分：（1）风室；（2）分布板；（3）沸腾层；（4）沸腾层上部燃烧空间。另在炉体的一侧有加料机，另一侧为焙烧产品的排料口。

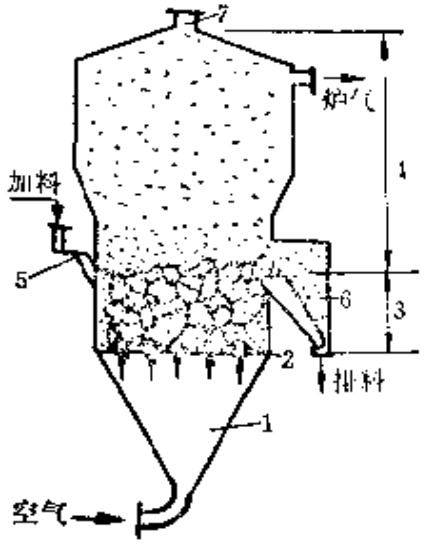


图 3-10　沸腾炉示意图

1—风室；2—分布板；3—沸腾层；4—上部燃烧空间；5—加料机；6—排料口；7—放空口

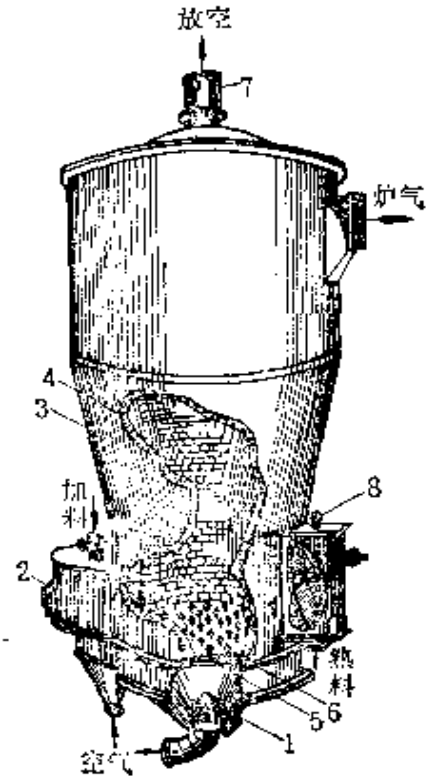


图 3-11　沸腾炉

1—风室；2—前室；3—壳体；4—耐火砖；5—耐热混凝土；6—风帽；7—放空烟道；8—清理口

沸腾炉的炉床为空气分布板（由带孔的金属板及插在孔中的金属风帽）组成，空气经炉床风帽的孔送入炉中，使物料沸腾，物料在炉内从进料口的一端移到另一端，然后由卸料口排出。

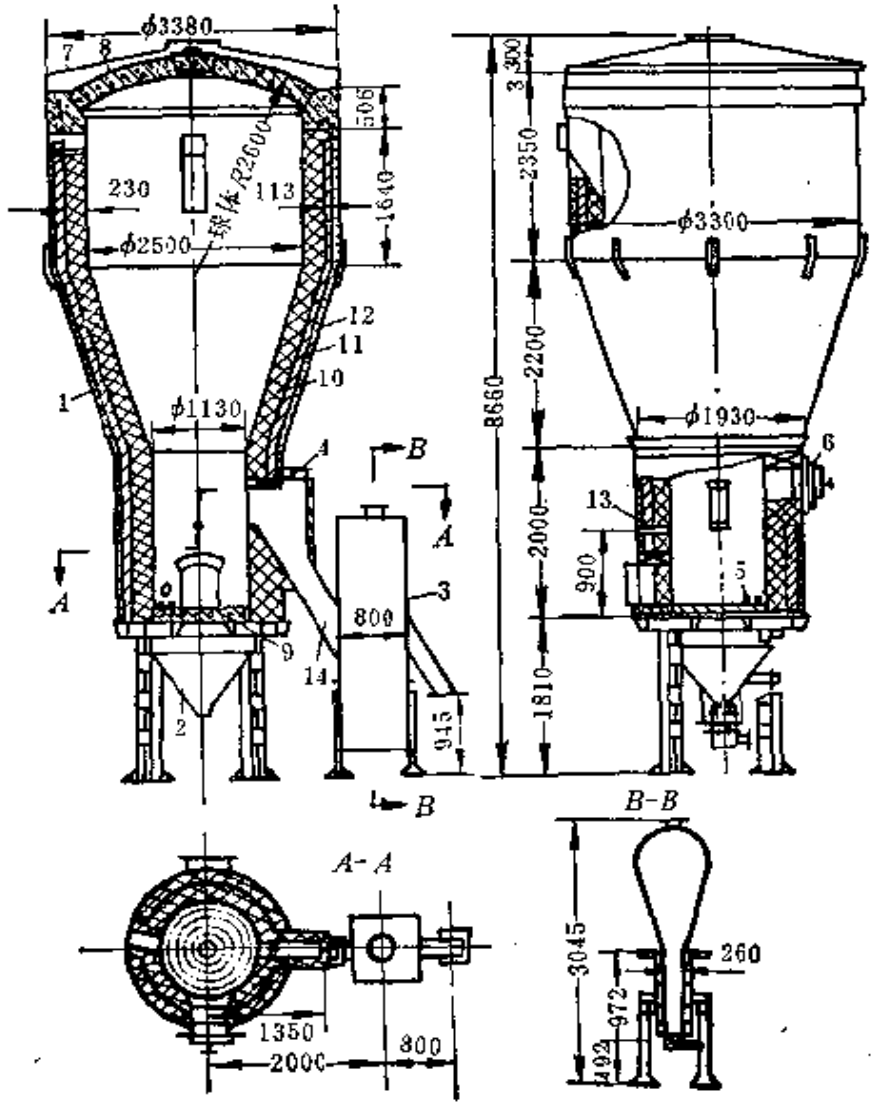


图 3-12　1米²沸腾炉

1—壳体；2—风斗；3—沸腾冷却箱；4—清理口；5—风帽；6—操作门；7—顶盖；8—拱顶；9—分布板；10—粘土砖；11—轻质粘土砖；12—填料；13—进料口；14—排料口

1米²沸腾炉技术特性：炉底面积1米²；床能力6～12吨/米昼夜；沸腾层温度900～950℃；沸腾层高度900～1100毫米；鼓风量360标米³/时；炉底压力500～700毫米水柱；沸腾冷却箱床面积0.2米²；冷却面积1.6米²；冷却箱鼓风量70～90标米³/时；冷却箱炉底压力500～700毫米水柱；冷却箱沸腾层高度900毫米；焙烧排出温度小于200℃

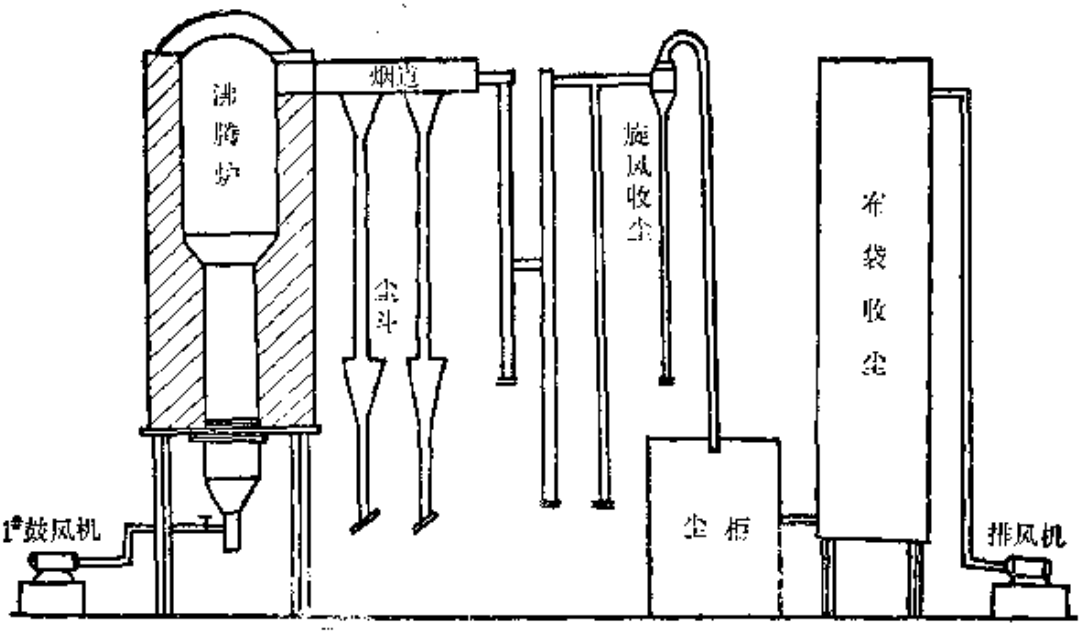


图 3-13　0.2米²沸腾炉工艺

用尾矿烧制井下胶结充填用的低标号水泥的试验，所用的沸腾炉和工艺示意图见图3-13、图3-14和图3-15。

尾矿用沸腾炉焙烧时，生料的制备方法为干法（其制备方法见前述），尾矿以粉状（粒度为4900孔/厘米²筛筛余8～18%）或尾矿制粒成料球（粒径为0～4毫米），经干燥后，由下料口入炉焙烧。其尾矿粒度（制粒或粉状）直接关系到沸腾层所需的风速和炉床的生产能力及烟尘量的大小。平均粒度越大，需要风速越大，否则不能正常沸腾，粒度变大（如尾矿粉经制粒后），需要风速大了，相应地可增加单位面积上的原料处理量，因而，这对于提高床的能力和降低烟尘率是极其有利的。而粒度变小（如尾矿粉焙烧时），则所需风速变小，炉床能力降低，而被气流带出的烟尘量增多，因而会增加除尘设备的负荷。由此可见，尾矿经制粒后入炉焙烧，其优越性是很大的。尾矿由加料机经加料孔进入炉内，经沸腾焙烧后，由卸料口排出。对于沸腾焙烧，其层内同一截面上的各点温度都十分接近。混合均匀，温度均匀，传递过程快，这是流态化床焙烧的特点。焙烧过程中发出的热量一部分被炉气带出炉外，另一部分被烧成水泥熟料带出炉外。尾矿

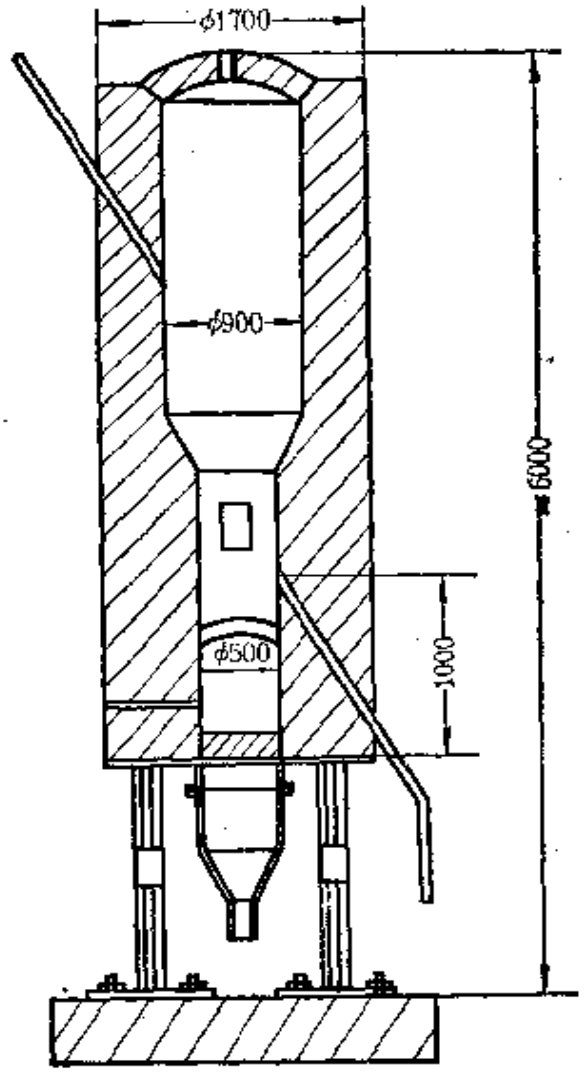


图 3-14　0.2米²沸腾炉

沸腾焙烧时，其炉内为氧化气氛。

试验表明：粉状尾矿或制粒后的尾矿料球，经沸腾焙烧后，其水泥熟料的质量良好（28天的抗压强度可达100～200公斤/厘米²），尤以制粒后的料球，水泥熟料强度最佳。适宜的焙烧温度仍为900～1000°C。温度过低，则反应不够完全，温度过高接近尾矿的熔点，物料易被烧熔结块，从而导致料层沸腾不均，严重时会被迫停炉。因此，沸腾层内的温度以控制在900～950°C为宜。

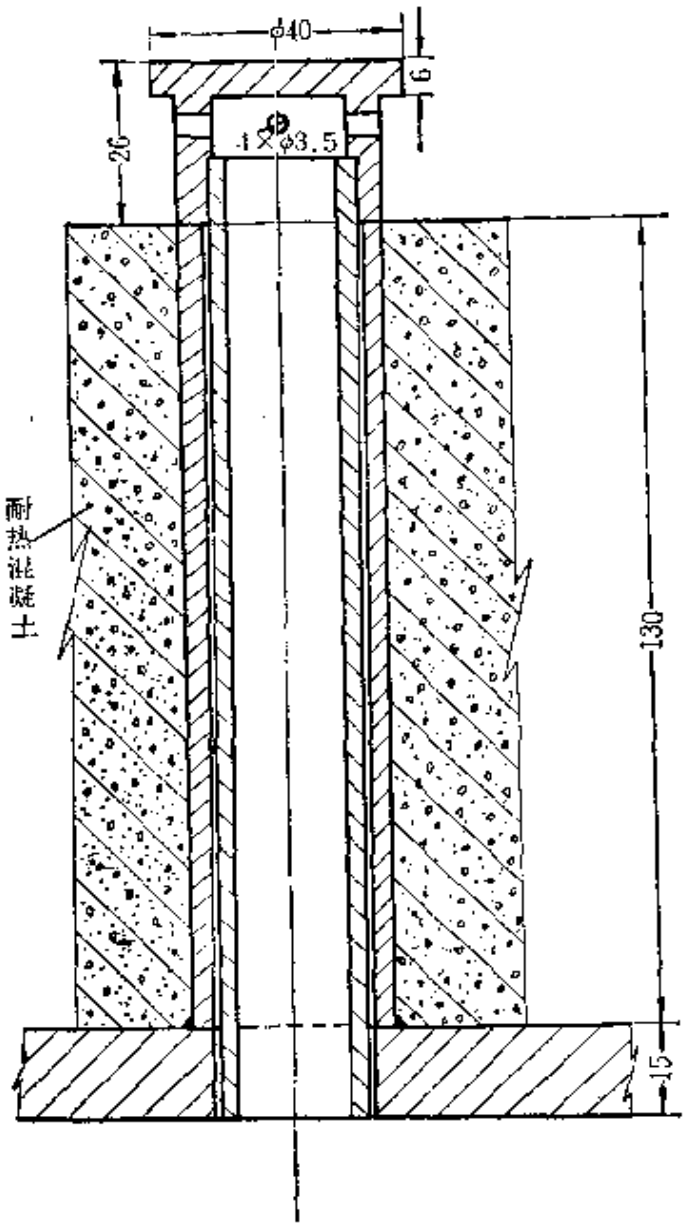


图 3-15　0.2米²沸腾炉风帽装配

粉状尾矿煅烧试验表明：加料不均匀，煅烧温度波动较大，易造成沸腾不均，料层出现沟流、穿孔和部分沉积的现象（如图3-16 a、b），沉积区局部低温、穿孔区局部高温，因而产生烧熔结块，并继续发展，终至死炉。而且，炉壁不光滑，高温煅烧易产生炉壁粘性挂料现象（如图3-17），导致炉膛面积缩小，同时炉壁挂料也易掉块，从而造成沸腾不均等。因此，根据煅烧的尾矿物料的特点，选择设计适宜的炉型和风帽结构，扩大上部炉

膛空间和炉壁光滑，这显然是非常重要和必要的。

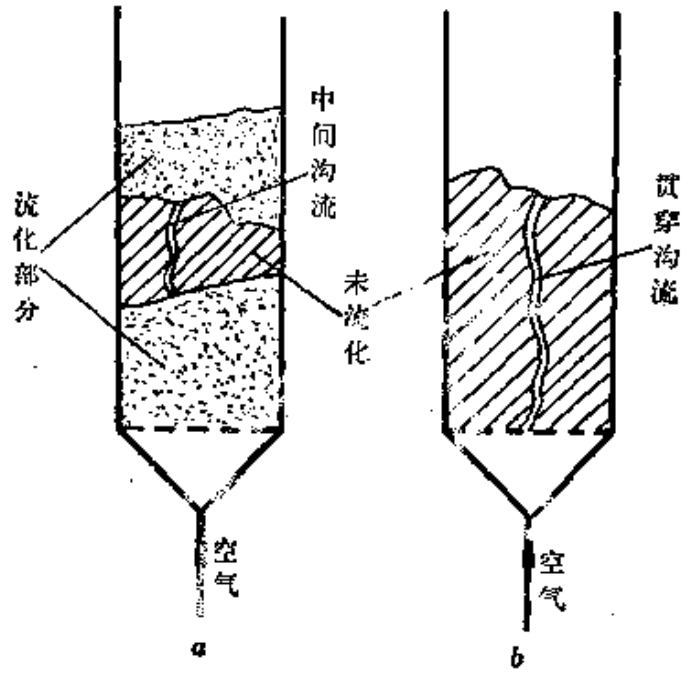


图 3-16　固体床中的沟流现象

根据0.2米²沸腾炉煅烧试验的结果，尾矿的粒度为 4900孔/厘米²筛筛余8～18%，粉煤的粒度为0～3毫米时，其沸腾层的线速度为0.42～0.46 米/秒，床能率为 10～15吨/米²·日，烟尘率为 15～20 %。空气的单位消耗约为860标米/吨尾矿，熟料的产出率约65%，煤耗（视尾矿含硫量的不同而增减，当尾矿含硫量 7%时）为 50～60公斤/吨熟料。

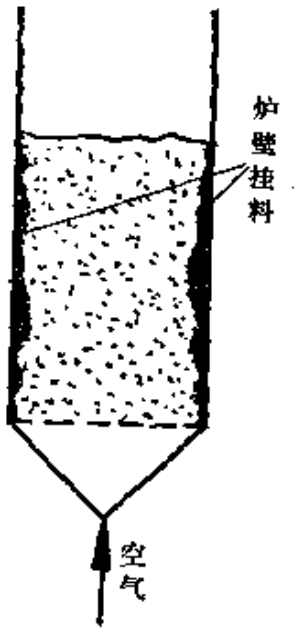


图 3-17　沸腾层中炉壁挂料现象

沸腾炉具有结构简单，基建投资费低，基建时间短，上马快的优点。同时沸腾炉还具有占地少，厂房少，操作管理简单，温度条件的变化反应灵敏和易于控制，劳动强度低，劳动条件好，开停工都快的优点。其缺点是，烟尘量大，焙烧工序的动力费用大，由于煅烧尾矿是干法入

窑，故生料制备工艺较为复杂。

最后应指出的是，尾矿用沸腾炉焙烧，虽然获得了一定的成果，水泥熟料的质量良好，但对于焙烧尾矿，还存在着炉子运转周期（炉龄）短，烟尘量大和水泥熟料煅烧过程的物理化学变化与熟料的矿物组分等问题，还待继续试验研究解决。

2．烧制高标号水泥时的工艺和窑型

如前所述，烧制（400号以上）普通硅酸盐水泥时，其生料的制备方法分为湿法和干法。窑型有回转窑和立窑。湿法生产时，生料的煅烧只能在回转窑中进行，而干法生产时，生料的煅烧可在回转窑中进行，也可在立窑中进行。

湿法烧制普通硅酸盐水泥：生料制备为湿法，它适用于尾矿组分不均的全粒级尾矿或细粒级尾矿，特别适用于37微米以下难于脱水的细粒级尾矿。尾矿采用湿法回转窑烧制普通硅酸盐水泥的工艺流程如图3-18。曾用$\phi 1 \times 20.5$米回转窑进行了湿法煅烧试验，用凡口尾矿作配料与适量的石灰石掺配后入生料磨一起混磨，所制备的入窑料浆含水分30～32%，经湿法回转窑煅烧后，水泥熟料的质量良好，凝结安定性正常，水泥标号达600号。试验还表明，用尾矿作配料与用粘土作配料烧制普通硅酸盐水泥，其窑的生产能力基本接近，同时尾矿生料好烧成，煅烧操作较好控制。用尾矿作配料与用粘土作配料烧制普通硅酸盐水泥时的熟料升重和游离CaO见表3-9，从表中可看出，其前者所烧成的熟料之升重比后者低些，同时游离态的CaO含量也约低0.5～1.0%。

干法烧制普通硅酸盐水泥：生料的制备为干法，干法烧制普通硅酸盐水泥适用于干磨干选厂产出的干尾矿，或用尾矿堆积场中沉积的尾矿粉，用$\phi 0.38 \times 3.5$米回转窑的干法进行了煅烧试验，证明：用全粒级尾矿（或细粒级尾矿）作普通硅酸盐水泥生料的配料，与石灰石混磨后，经制粒，入窑煅烧，其熟料的质量良好，水泥标号仍达600号以上。干法回转窑烧制尾矿硅酸盐水泥熟料的工艺流程如图3-19所示。致于用立窑煅烧尾矿硅酸盐水泥，

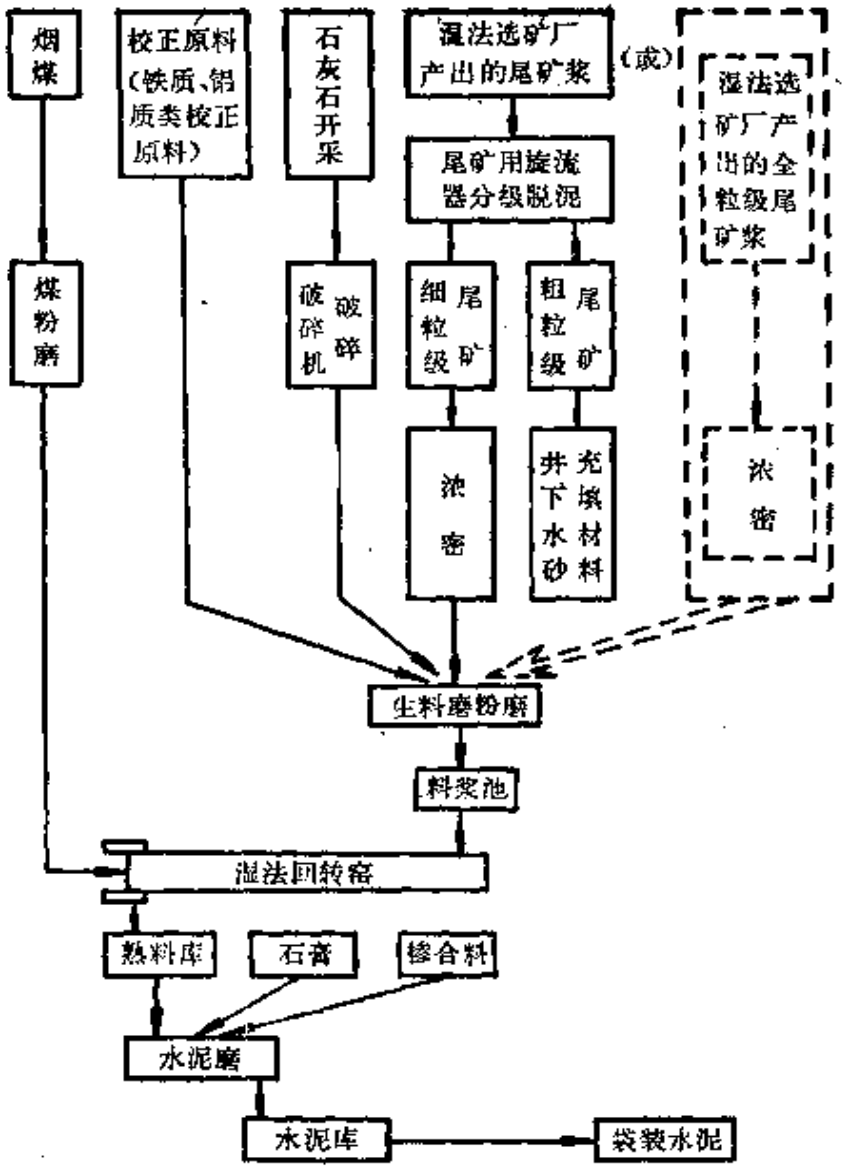


图 3-18 湿法回转窑烧制尾矿硅酸盐水泥工艺流程示意图

则尚需进行试验。但据制粒试验表明，当尾矿用量为39～52%，外配石灰石量为48～61%，所制得的料球性能良好。此外，还可考虑再掺配粘土，以改善和提高料球的强度，达到能用立窑煅烧之目的。

3．合理的选择煅烧工艺和窑型

煅烧工艺和窑型的选择是关系到熟料的质量与产量和技术经济指标的优劣，因而合理的选择确定是很重要的。

熟料的升重和游离 CaO **表 3-9**

方　　案	试验日期	班　次	升　重（克/升）	游离CaO %
尾矿硅酸盐水泥	16/6	1	1189	1.28
		2	1370	0.97
		3	1349	1.28
	17/6	1	1337	1.26
		2	1322	1.12
		3	1355	1.49
普通硅酸盐水泥	10/6	1	1457	1.61
		2	1452	1.87
		3	1460	1.09
	11/6	1	1455	1.60
		2	1449	1.37
		3	1459	1.18

注：本表系 1×20.5 米回转窑煅烧试验结果。

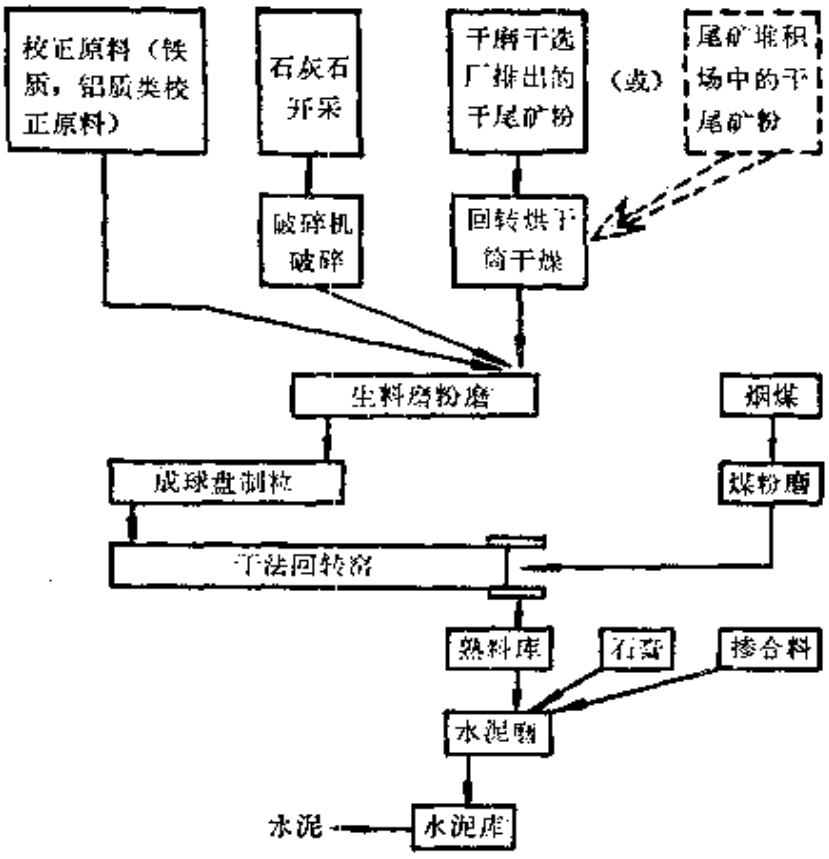


图 3-19　干法回转窑烧制尾矿硅酸盐水泥工艺流程

如前所述，用尾矿为原料烧制水泥，其窑型有回转窑、立窑以及沸腾炉。兹将各特点与适用条件简述如下：

回转窑具有生产能力大、产品质量高、成本低、生产易操作和温度易控制的优点。但基建投资费大、基建时间长，钢材用量大，同时大型设备不易运输。因此对于大中型矿山，当要求尾矿处理量大或地区需用水泥量大时，则采用（干法或湿法）回转窑是适宜的。干法回转窑适用于干磨干选厂排出的干尾矿粉，或用尾矿堆积场中的尾矿粉，将其尾矿粉用作配料以烧制普通硅酸盐水泥；或将尾矿粉烧制普通硅酸盐水泥的混合材；或用尾矿粉烧制井下胶结充填用的低标号水泥。湿法回转窑适用于尾矿成分变化较大的全粒级尾矿或难于脱水的37微米以下的细粒级尾矿，将尾矿用作配料烧制普通硅酸盐水泥。

立窑具有基建投资费用低、钢材少、基建时间短、投产快的优点。但其产量低、质量差、劳动强度大。因此，立窑适用于中小型矿山，但用尾矿作配料选用立窑煅烧普通硅酸盐水泥，尚需进行试验。

如前所述，沸腾炉具有结构简单、基建投资低、上马快、产品质量好等优点，但用于烧制（井下胶结充填用的）低标号水泥时，还存在着炉龄短和烟尘量大的问题，尚待继续试验解决。

第七节　尾矿水泥的性质

一、井下胶结充填用的低标号水泥

1．强度

含适宜组分的尾矿，经一定的温度煅烧后，所制成的水硬性材料，具有较好的强度，可用于井下作胶结充填。试验表明，尾矿的化学成分为：CaO大于18～25%，CaO/SiO_2大于0.5～0.7，MgO小于3%时，经900～1000°C煅烧后，制成的井下胶结充填用的低标号水泥，其水泥熟料的抗压强度7天为30～40公斤/厘米^2，28天为80～100公斤/厘米^2，三个月为150～300公斤/厘米^2。28天至三个月龄期强度增长较大，是尾矿烧制低标号水

泥的一大特点。

2．水泥熟料的凝结时间

水泥的凝结时间对于井下胶结充填体的施工和加快回采循环是有着重要意义的，时间过长，使胶结充填体的强度形成较慢，增长了一个循环的充采时间，时间过短，给施工带来困难不利于操作。因此，对于凝结时间的控制和调整是很重要的。

用尾矿所煅烧的胶结充填用的低标号水泥熟料，其明显特征为凝结较快，一般可分为急凝（初凝在10分钟以内）、正常凝结（初凝30分钟以上，终凝在20小时以内）、慢凝（初凝超过3小时，终凝超过20小时）。影响水泥熟料凝结时间快慢的因素是多方面的，一般来说，熟料中SO_3低于2%时，凝结时间就慢；若SO_3超过3～4%则往往是快凝；而当煅烧温度过高，接近尾矿的熔点（熟料粘结成大块）时，则凝结时间显著增长。其凝结的快慢可能与熟料中铝酸盐矿物的存在及含有无水石膏的形态有关。在温度较低时有CA存在，使熟料凝结快；随着温度提高，CA转化为C_2AS，从而使凝结减缓。此外，低温时无水石膏活性大，凝结硬化快。随着温度的升高，无水石膏活性显著减少。

试验表明，用尾矿煅烧的低标号水泥熟料的凝结时间不能用掺加二水石膏来调节，但可采用改变稠度增加水量或在胶结充填

调节尾矿水泥熟料凝结时间的试验结果　　表 3-10

序号	配料比	加水量	凝结时间（时:分）		抗压强度（公斤/厘米²）			
	尾矿水泥熟料：尾矿集料	(%)	初凝	终凝	7天	28天	3个月	6个月
1	100:0	26～27	0:15～0:50	0:20～1:30	30～40	80～100	150～200	
2	100:0	46.6	2:35	3:10	25	78	138	164
3	100:0	50	5:23	8:38	10	37	72	102
4	80:20	44	4:21	5:36	35	82	110	154
5	80:20	45	6:18	10:38	13	68	83	97
6	60:40	44	>12:00	25:35	15	52	80	78
7	60:40	45	—	—	6	40	72	78

时外掺填充性集料的办法调节，可是对其强度有一定影响。例如用凡口尾矿所煅烧的水泥熟料中有快凝，当采用上述办法后其试验结果如表3-10所示。从表中可看出，加入集料或增加用水量使凝结时间显著减慢。

3．熟料的安定性

安定性是水泥在硬化时体积变化的均匀性，不产生龟裂的性质。水泥粉在调水硬化的过程中，一般有体积变化。但如果这种变化不很显著，或在水泥石硬化以前完成，则对构筑物的质量没

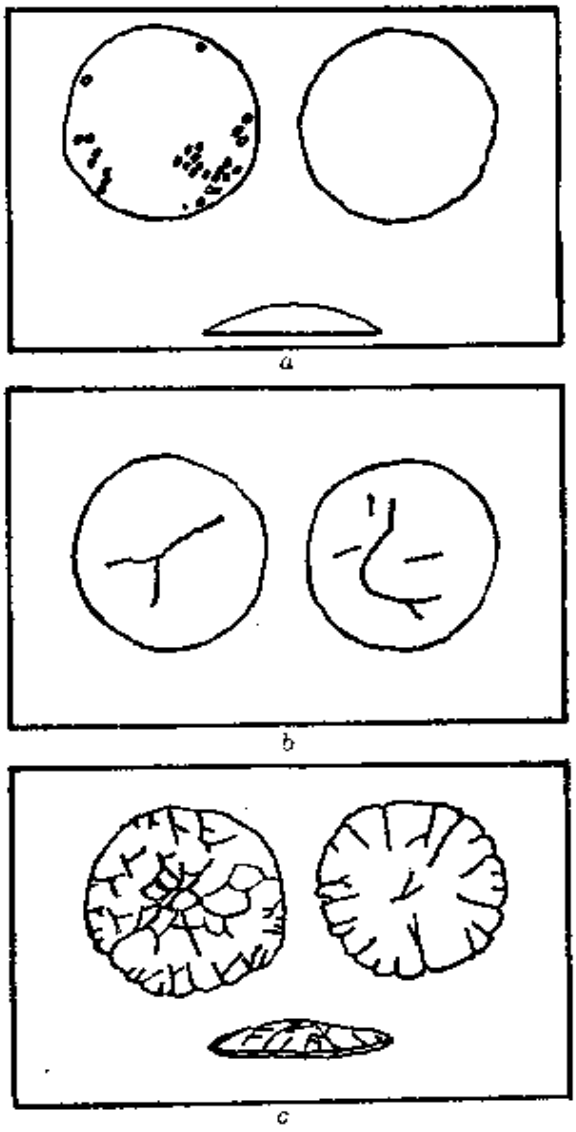


图 3-20　水泥安定性试验图解

a—安定性良好之水泥试饼；*b*—安定性良好之水泥试饼（有收缩裂纹）；*c*—安定性不良之水泥试饼

有什么影响，但如果在水泥硬化以后，产生剧烈的不均匀的体积变化，会降低构筑物的质量，甚至产生崩溃事故，这对于井下胶结充填来说是不允许的。

体积变化的安定性是水泥的重要性质。图3-20为水泥安定性试验。

根据试验，煅烧尾矿所得的水泥熟料，一般安定性正常（如图3-21），但有个别样品的安定性不良，这可能与尾矿中含过量的硫有关，因为在900～1000°C煅烧的过程中，熟料中生成过多的$CaSO_4$或含过量的SO_3，由于水泥硬化后可能生成含水硫铝酸钙（$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$），因其体积膨胀，故产生安定性不良。因此，对于用尾矿烧制的水泥，要严格控制其含硫量是非常重要的。

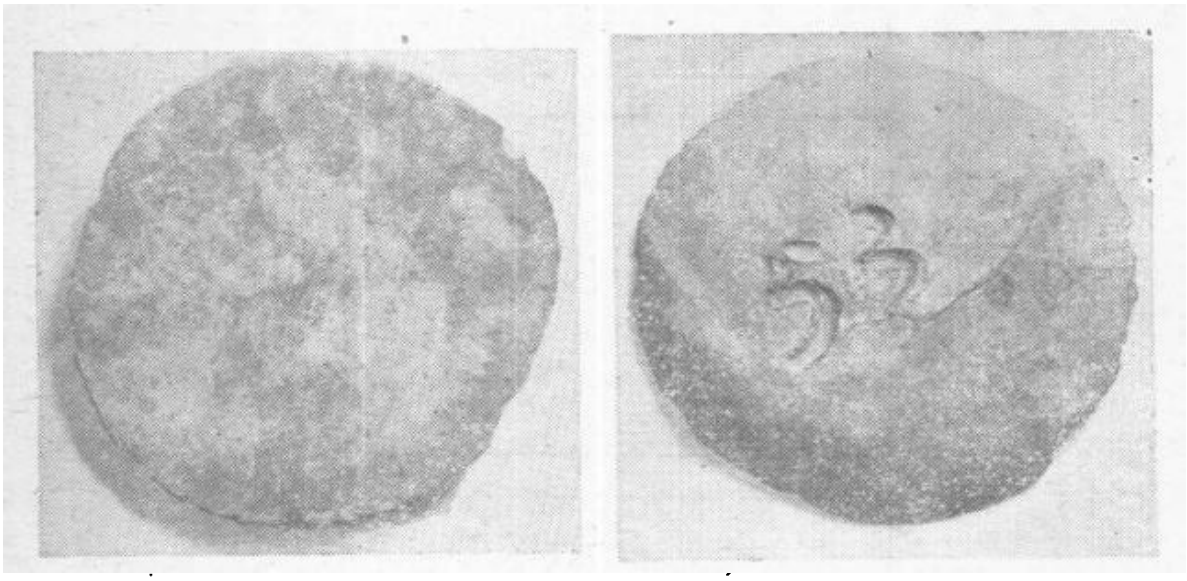


图 3-21　低标号尾矿水泥熟料安定性试验结果

4．熟料的容重和细度与易磨性

煅烧尾矿所得熟料升重小，波动在700～1100克/升。试验还表明，熟料的质量与升重之间无一定规律，因此在熟料烧成时尚不能用升重来控制熟料的质量。

水泥的细度是指水泥颗粒的粗细程度。水泥的细度对于水泥的凝结硬化过程和早期强度的形成都有很大的影响。对于用尾矿

所煅烧的水泥，要求粉磨细度为4900孔/厘米²筛筛余量小于10%。试验表明，尾矿熟料易于粉磨，磨机的台时产量比粉磨普通硅酸盐水泥时为高。

5．现场胶结充填试验

在广东某矿的井下胶结充填采矿法中，曾用三百余吨全粒级尾矿烧制的尾矿水泥熟料，进行了现场胶结充填试验。

胶结充填前曾进行了室内的胶结充填强度配比试验。试验所用的尾矿水泥熟料的化学组分如表3-11。集料用30微米以下的细粒级尾矿、卵石和碎石等，砂浆稠度按输送条件控制在10～19厘米，其胶结充填的强度配比试验结果见表3-12和表3-13。试验结果表明：掺加40%细粒级尾矿后，胶结充填体28天的抗压强度可达52公斤/厘米²，3个月后可达70～80公斤/厘米²；而以卵石为

尾矿水泥熟料的化学成分（%） **表 3-11**

编　号	烧失量	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	PbO	ZnO	SO_3	S
F1	1.47	36.00	8.80	8.14	34.71	3.06	0.48	0.25	6.05	0.33
F2	0.83	37.95	9.51	7.49	35.01	3.18	0.54	0.30	3.43	0.08

细粒级尾矿与尾矿水泥熟料的强度配比 **表 3-12**

编号	配合比（尾矿水泥熟料：细粒级尾矿生料）	加水量（%）	砂浆稠度（厘米）	凝结时间（时:分）		抗压强度（公斤/厘米²）			
				初凝	终凝	7天	28天	3个月	6个月
T1-1	100:00	46.6	11.80	2:35	3:10	25	78	138	164
T1-2	80:20	44.0	10.50	4:21	5:36	35	82	110	154
T1-3	60:40	44.0	10.30	>12:00	25:35	15	52	80	78
T2-1	100:00	50.0	12.70	5:23	8:38	10	37	72	102
T2-2	80:20	45.0	10.60	6:18	10:38	13	68	83	97
T2 3	60:40	45.0	10.70	—	—	6	40	72	78

胶结充填体的强度　　表 3-13

编号	配合比 尾矿:水泥熟料:水:骨石	坍落度 (厘米)	抗压强度（公斤/厘米²）		
			7天	28天	3个月
1	1:0.35	—	17	74	216
2	1:0.45	—	10	45	148
4	1:0.5:1	—	5	20	91
5	1:0.45:1	19.5	10	40	143
6	1:0.45:1.5	9.5	10	21	118
7	1:0.50:1.5	19.0	7	31	120
8	1:0.45:2	6.5	12	20	154
9	1:0.50:2	14.0	8	29	114

集料，当掺加量达50%时，其胶结充填体，28天的抗压强度达20～40公斤/厘米²，3个月以后都达100公斤/厘米²以上，符合胶结充填对水泥强度的要求。

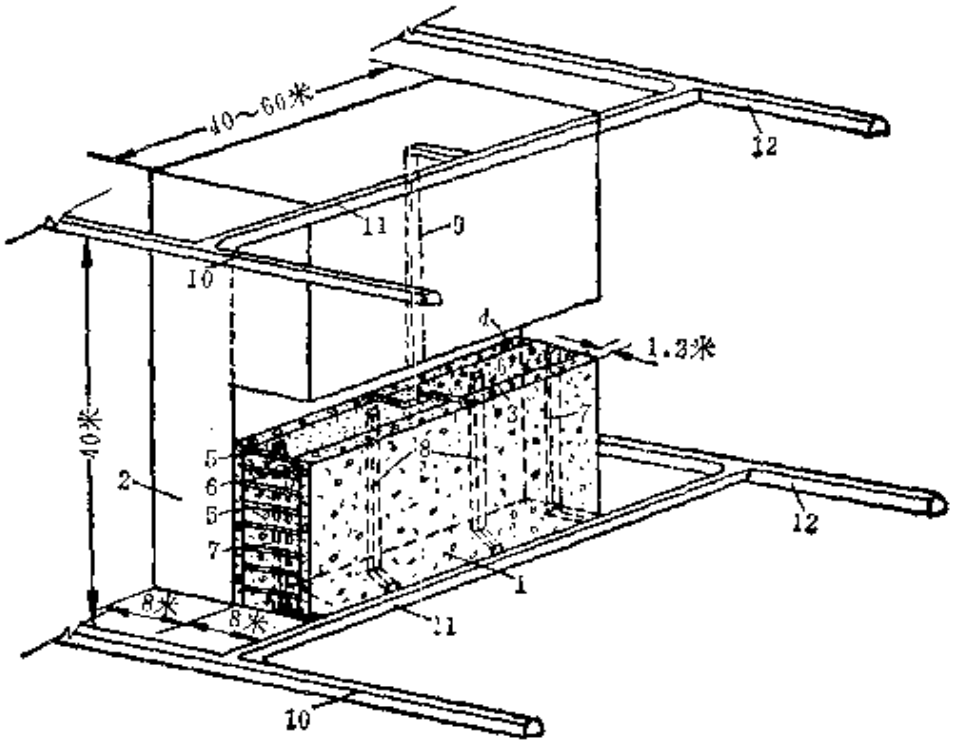


图 3-22　胶结充填采矿法

1—矿柱胶结充填（第一步骤）；2—矿房尾砂充填（第二步骤）；3—尾矿水泥胶结充填东帮隔墙；4—尾矿水泥胶结充填西帮隔墙（厚1.2米）；5—分层胶结充填顶（运矿底板厚10厘米）；6—充填尾砂；7—顺路人行天井；8—矿石溜子；9—通风天井；10—运输平巷；11—穿脉平巷；12—回风平巷

现场的胶结充填是在3号采场进行的，充填地点是3号采场的东西两帮隔墙（如图3-22），充填所构成的人工混凝土矿柱为1.2米。充填西帮隔墙时的配比为尾矿熟料：水：卵石＝1:0.6:1，坍落度为15厘米，充填的混凝土体积为37米^3，充填时留制的试块抗压强度7天为12公斤/厘米^2，28天为75公斤/厘米^2，30天为77公斤/厘米^2。充填东帮隔墙时的配比为尾矿熟料：碎石：水＝1:1:0.65，充填时用混凝土搅拌机拌和之后，经天井下料管送至3号采场，再由压气罐用1.0～1.5公斤/厘米^{2}压力输送至东帮隔墙。此外，还充填了北帮回风巷道约7米。

充填试验经一年后进行现场回采（经爆破）揭露，其充填体坚实、完整无损。证明用尾矿所烧制的胶结充填材料能满足井下充填的要求。

二、尾矿硅酸盐水泥

1．强度

含适宜组分的尾矿，作为普通硅酸盐水泥生料的配料，可烧制出质量良好的尾矿硅酸盐水泥熟料。据用凡口尾矿所作试验证明，水泥性能（表3-14）符合国家标准（表3-15），其标号可达600号。

尾矿硅酸盐水泥的物理性能 **表 3-14**

名称	班次	比面积	稠度	安定性	凝结时间（时：分）		抗拉强度（公斤/厘米^2）			抗压强度（公斤/厘米^2）		
					初凝	终凝	3天	7天	28天	3天	7天	28天
尾矿硅酸盐水泥	1	2870	23.25	合格	1：31	3：49	24.0	25.9	29.8	338	518	＞600
	2	3090	23.25	合格	2：00	3：45	23.4	28.4	32.5	413	560	＞600
	3	3080	23.0	合格	1：40	3：37	24.8	27.5	35.7	410	558	＞600
	4	2940	22.5	合格	1：25	2：40	19.4	19.9	27.8	329	482	592
	平均样	2960	24.25	合格	4：06	5：41	25.1	30.5	35.5	343	507	705

注：平均样在建材院物理室测定。其余各样均在琉璃河中间试验厂检验，抗拉强度偏低2公斤，由于压力机所限，耐压强度超过600公斤/厘米^{2}无法测定。

2．凝结时间和安定性

根据国家标准规定，普通硅酸盐水泥的初凝时间不小于45分

普通硅酸盐水泥的强度指标　　表 3-15

水泥标号	抗压强度（公斤/厘米²）			抗拉强度（公斤/厘米²）		
	3天	7天	28天	3天	7天	28天
200	—	100	200	—	12	18
250	—	140	250	—	12	18
300	—	180	300	—	15	22
400	160	260	400	15	19	24
500	220	350	500	19	23	27
600	260	420	600	21	27	32

钟，终凝时间不超过12小时。尾矿作配料所烧制的尾矿硅酸盐水泥的凝结时间（表3-14，初凝为1～4个小时，终凝时间不超过6个小时）符合国家标准，同时安定性合格。

3．熟料的升重

用尾矿作配料所烧制的尾矿硅酸盐水泥的特点是，其熟料的升重（1189～1355克/升）比普通硅酸盐水泥熟料的升重(大于1400克/升）小。

4．水泥的粉磨细度

尾矿硅酸盐水泥经粉磨后，采用比表面积测定，其数值为2870～3080厘米²/克，与普通硅酸盐水泥的细度（比表面积2500～3500厘米²/克）一致。

5．标准稠度的需水量

需水量是指水泥所需要加入水的数量，是以满足水泥的水化和水解反应及具有一定的流动度来控制，对于普通硅酸盐水泥而言，标准稠度的需水量为24～30%，而尾矿硅酸盐水泥标准稠度的需水量为22～24%，与普通硅酸盐水泥的需水量相接近。

三、煅烧尾矿作为硅酸盐水泥的混合材

1．尾矿混合材的化学成分

如前所述，含适宜组分的尾矿经一定温度煅烧后，称为尾矿熟料，可用作普通硅酸盐水泥的混合材。凡口矿的全粒级尾矿和细粒级尾矿经900～1000°C煅烧后的尾矿熟料化学成分如表3-16

煅烧尾矿熟料的化学成分

表 3-16

尾矿熟料名称	熟料编号	化学成分（%） 烧失量	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	S	SO_3	f-CaO	PbO	ZnO	各率数值 CaO/SiO_2	碱性率 M_o	活性率 M_a	质量系数 K
全粒级尾矿熟料	Ⅰ	0.99	36.05	7.24	5.22	42.59	3.95		1.31	3.16	0.43	0.64	1.18	1.08	0.201	1.49
	Ⅱ	−3.30	35.00	7.40	10.44	38.94	3.72		1.86	0.87	0.15	0.96	1.11	1.00	0.211	1.43
	Ⅲ	−0.54	35.78	7.43	10.09	38.58	3.33		2.36	0.23	0.18	0.62	1.08	0.995	0.208	1.38
	Ⅳ	0.22	36.08	7.56	6.50	40.87	3.73		2.72	0.79	0.20	0.97	1.13	1.02	0.210	1.44
细粒级尾矿熟料	1#	0.65	35.89	9.49	7.84	33.68	2.73		3.42		0.69	0.56	0.94	0.8	0.267	1.28
	2#	1.47	36.00	8.80	8.14	34.71	3.06	0.33	6.05	微	0.48	0.25	0.96	0.87	0.244	1.29
	3#	0.83	37.95	9.51	7.49	35.01	3.18	0.08	3.43	微	0.54	0.30	0.925	1.02	0.25	1.25
	7#	−0.07	37.83	9.14	7.93	36.18	3.07	0.03	1.84	微	0.35	0.18	0.96	1.06	0.24	1.28

国内各地高炉矿渣化学成分

表 3-17

序号	高炉矿渣产地	化学成分（%） SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3	MnO	S	碱性率 M_o	活性率 M_a	质量系数
1	鞍山	38.9	8.02	46.43	1.96	0.68	0.1	0.75	1.023	0.205	1.45
2	本溪	38.26	9.04	49.06	1.96	0.46	0.98	1.04	1.08	0.236	1.60
3	石景山	37.42	14.97	39.89	8.05	−	0.872	0.85	0.916	0.45	1.70
4	武汉	34.06	15.02	43.45	5.35	0.68	0.21	0.66	0.99	0.44	1.88
5	太原	37.00	10.99	45.10	3.025	1.00	0.27	0.088	1.00	0.295	1.59
6	故县	43.4	19.03	30.05	3.79	1.464	1.686	0.0157	0.543	0.438	1.25
7	新乡	40.4	11.1	40.06	4.73	3.88	0.075	0.69	0.865	0.275	1.38
8	郑州	30.92	21.59	42.21	1.44	1.45	0.11	0.48	0.83	0.698	2.15

所示；国内高炉矿渣化学成分如表3-17所示。

由表3-16和表3-17可看出，尾矿熟料的化学成分和高炉矿渣的化学成分相近。尾矿熟料的碱性率 $M_c \approx 1.00$，活性率 $M_a > 0.2$。符合我国1956年对急冷却的高炉矿渣用作胶凝材料的技术条件规定(如表3-18)。

制造水泥用高炉矿渣化学成分的要求标准　　表 3-18

序号	技术指标 \ 类别	酸性矿渣	碱性矿渣
1	碱性率 $M_c = \frac{\%CaO + \%MgO}{\%SiO_2 + \%Al_2O_3}$ 不小于	0.65	1.0
2	活性率 $M_a = \frac{\%Al_2O_3}{\%SiO_2}$ 不小于	0.33	0.20
3	氧化亚锰含量（%MnO）不大于	4.0	4.0
4	硫化物含量（%S）不大于	不规定	3.6

2．尾矿熟料掺入量与水泥强度的关系

在硅酸盐水泥熟料中，加入一定数量的尾矿熟料作混合材，同时再掺入适量的石膏，磨成细粉所制成的水硬性材料，称为尾矿混合材硅酸盐水泥。

尾矿熟料与硅酸盐水泥熟料的质量，明显地影响到所生产的尾矿混合材硅酸盐水泥的性能。当尾矿熟料与硅酸盐水泥熟料为既定原料时，则尾矿熟料与硅酸盐水泥熟料的掺合比例决定着所生产的尾矿混合材硅酸盐水泥的质量、标号。根据试验结果（图3-23和3-24）：随着尾矿熟料掺入量的增加，其水泥的抗压强度显著下降，而抗拉强度却有显著的改善。从试验结果（表3-19）可以看出，当掺入15%的尾矿熟料时，水泥的标号仍能维持600号；掺入30%的尾矿熟料时，水泥的标号为500号；掺入50%的尾矿熟料时，水泥的标号为400号。掺加尾矿熟料后的凝结时间如图3-25所示，随着尾矿熟料掺入量的增加，其凝结时间显著缩短。掺入15～55%的尾矿熟料时，水泥的凝结时间、安定性符合硅

酸盐水泥的国家标准。

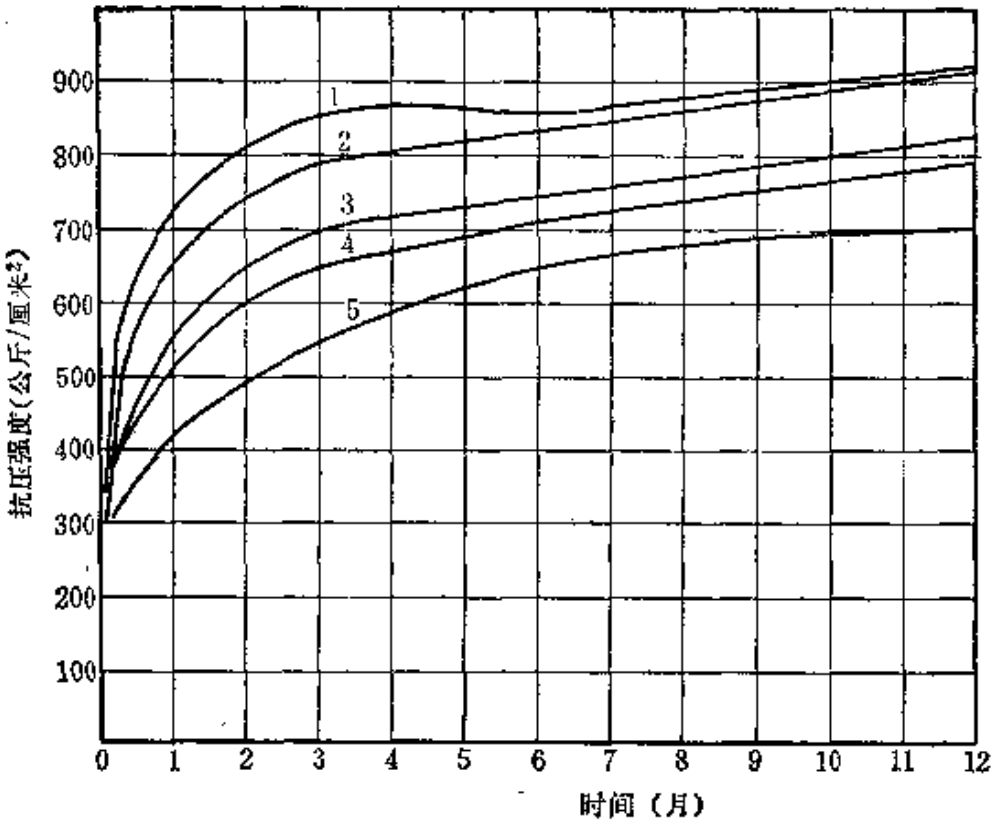


图 3-23 尾矿熟料与硅酸盐水泥熟料不同配合比时的抗压强度

1—硅酸盐水泥熟料；2—硅酸盐水泥熟料中尾矿熟料掺入量15%；3—硅酸盐水泥熟料中尾矿熟料掺入量30%；4—硅酸盐水泥熟料中尾矿熟料掺入量45%；5—硅酸盐水泥熟料中尾矿熟料掺入量55%

掺入尾矿熟料的水泥，其特点是：初期的强度较低，而后期的强度增进率较大，特别是抗拉强度的增进率更大。

3．掺入尾矿熟料的水泥特性

1）水泥水化热

水泥与水的作用为放热反应，随着硬化过程的进行，不断放出热量，这种热量即为水化热。

对于掺入尾矿熟料的硅酸盐水泥，用直接法测定的结果见表3-20。从表中可以看出，随着尾矿熟料掺入量的增加，其水泥的水化热逐渐降低。

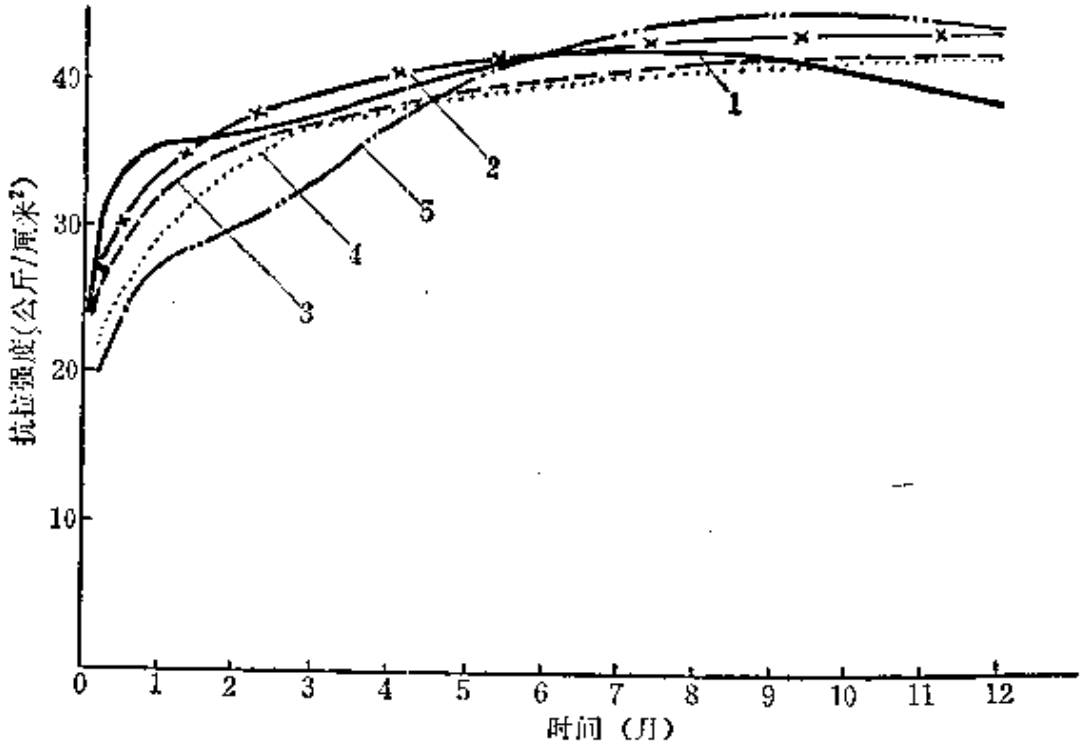


图 3-24　尾矿熟料与硅酸盐水泥熟料不同配合比时的抗拉强度

1—硅酸盐水泥熟料；2—硅酸盐水泥熟料中尾矿熟料掺入量15%；3—硅酸盐水泥熟料中尾矿熟料掺入量30%；4—硅酸盐水泥熟料中尾矿熟料掺入量45%；5—硅酸盐水泥熟料中尾矿熟料掺入量55%

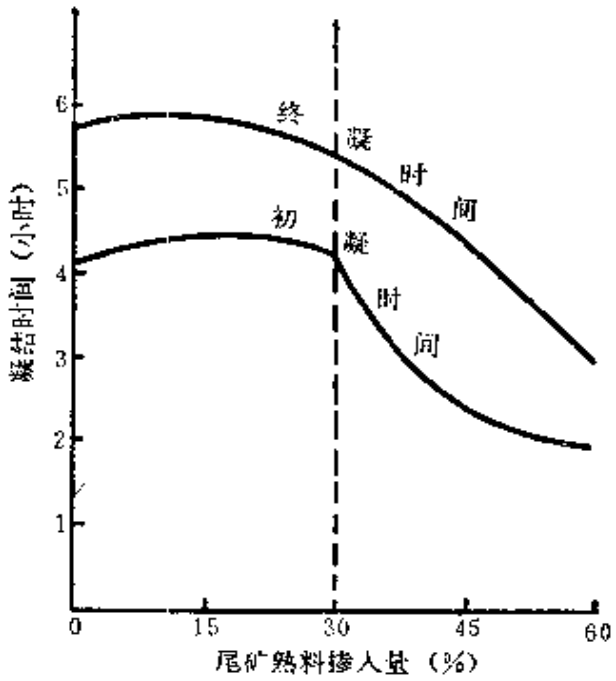


图 3-25　硅酸盐水泥熟料中尾矿熟料的掺入量和凝结时间的关系

尾矿熟料与硅酸盐水泥熟料不同配比时的水泥物理性能

表 3-19

水泥样品编号	配合比（%）			粉磨细度 4900孔/厘米²筛筛余（%）	标准稠度（%）	安定性		凝结时间（时：分）		抗压强度（公斤/厘米²）						抗拉强度（公斤/厘米²）					
	硅酸盐水泥熟料	尾矿熟料	石膏			蒸煮	浸水	初凝	终凝	3天	7天	28天	3月	6月	1年	3天	7天	28天	3月	6月	1年
C-1	97	0	3	3.0	24.25	合格	合格	4:06	5:41	343	507	705	861	862	917	25.1	30.53	35.45	37.63	41.80	38.68
C-2	82	15	3	2.0	24.50	合格	合格	4:24	5:49	314	466	638	791	830	915	24.43	27.60	33.30	39.35	42.25	43.45
C-3	67	30	3	3.2	26.25	合格	合格	4:15	5:23	—	402	550	703	710	833	—	25.60	31.68	36.80	40.03	42.25
C-4	52	45	3	2.6	27.50	合格	合格	2:23	4:19	—	378	500	651	745	790	—	22.2	28.95	37.30	39.88	42.68
C-5	42	55	3	2.0	28.25	合格	合格	1:52	3:02	—	308	416	547	650	705	—	19.88	27.00	33.18	40.73	43.73

尾矿熟料与硅酸盐水泥熟料不同配比时水泥的水化热*

表 3-20

水泥品种编号	配合比（%）			水化热（卡/克）	
	硅酸盐水泥熟料	尾矿熟料	石膏	3天	7天
硅酸盐水泥	97	0	3	58.46	67.16
C-2	82	15	3	53.83	63.72
C-3	67	30	3	43.24	49.23
C-4	52	45	3	42.35	50.68
C-5	42	55	3	38.57	46.17

* 系按照标准TC139—67水泥水化热试验方法测定。

在硅酸盐水泥熟料中掺入尾矿熟料后的水泥，其优点是水泥的水化热（表3-20）比其他品种的硅酸盐水泥的水化热(表3-21)为低。

各种硅酸盐水泥水化热　　表 3-21

水泥品种	水化热（卡/克）	
	3天	7天
500号硅酸盐水泥	55.7	72.2
400号矿渣硅酸盐水泥	55.5	60.5
400号混合硅酸盐水泥	50.5	63.4
400号凝灰岩硅酸盐水泥	52.1	59.2
300号矿渣硅酸盐水泥	(57.1)	53.3

2）水泥抗硫酸盐侵蚀性能

硅酸盐水泥熟料中掺入尾矿熟料后，能改善水泥的抗侵蚀性能。从表3-22中可以看出，对于掺入45%尾矿熟料的水泥在3% Na_2SO_4溶液中具有良好的抗蚀性能。

尾矿熟料与硅酸盐水泥熟料不同配比时水泥的抗硫酸盐侵蚀性能　　表 3-22

水泥品种及编号	配合比（%）			3% Na_2SO_4			(%)8000毫克/升 Na_2SO_4		
	硅酸盐水泥熟料	尾矿熟料	石膏	K_c^1	K_c^3	K_c^6	K_c^1	K_c^3	K_c^6
硅酸盐水泥	97	0	3	0.87	0.65	0.61	0.94	0.89	0.77
C-2	82	15	3	0.86	0.83	0.69	0.95	0.89	0.87
C-3	67	30	3	0.88	0.74	0.64	0.88	0.87	0.81
C-4	52	45	3	0.91	0.96	0.85	0.95	0.96	0.78
C-5	42	55	3	0.86	0.85	0.85	0.94	0.89	0.88

注：1. 水泥的抗硫酸盐侵蚀性能，系按照GB749—65水泥抗硫酸盐侵蚀试验方法测定。

2. 表中K_c^1、K_c^3、K_c^6 分别为水泥的1个月、3个月、6个月稳定性系数。

3）水泥的胀缩性

普通水泥在水中硬化时，体积稍有膨胀，但在空气中硬化时，却产生体积收缩。若收缩过大时，可能引起裂缝。特别是在水泥中掺活性的矿渣等混合材后，水泥的干缩性大，易产生裂

缝。而在硅酸盐水泥中掺入尾矿熟料后，其胀缩性能与普通水泥接近，如表3-23所示。

水泥的胀缩性能 **表 3-23**

水泥名称	尾矿熟料掺入量（%）	胀缩率（%）					
		空气中			水中		
		7天	14天	28天	7天	14天	28天
普通水泥	0	−0.057	−0.067	−0.077	0	0	0.004
尾矿混合材硅酸盐水泥	30	−0.044	−0.058	−0.066	0	0	0
尾矿混合材硅酸盐水泥	50	−0.034	−0.082	−0.089	0	0	0

注：水泥的胀缩性能，系按照标准GB751—65水泥胶砂胀缩试验方法测定。

4）存放时间对水泥强度的影响

掺入尾矿熟料的水泥存放时间过长，对水泥强度的影响较大。这是因为水泥在空气中长时间放置时，受了水分和碳酸气作用，则水泥中的$Ca(OH)_2$含量会降低，使水泥产生不凝结和损失部分强度。试验结果如表3-24所示。存放半年后，其水泥的强度下降约一个标号。而且所配制的混凝土的强度也低，钢筋粘结力也差。

混凝土的性能 **表 3-24**

水泥名称	尾矿熟料掺入量（%）	水灰比	坍落度（厘米）	水泥用量（公斤/厘米²）	容量（公斤/米³）	抗压强度（公斤/厘米²）			28天龄期钢筋粘结力（公斤/厘米²）	钢筋锈蚀	
						7天	28天	6个月		28天	6个月
普通水泥	0	0.6	7.0	302	2500	226	439	575	41	无	无
尾矿混合材硅酸盐水泥*	30	0.6	7.0	296	2450	101	171	350	21	无	无
尾矿混合材硅酸盐水泥*	50	0.6	6.0	293	2425	75	146	283	13	无	无

*表中尾矿混合材硅酸盐水泥系存放半年后的水泥。

5）混凝土的性能

在硅酸盐水泥熟料（化学成分和矿物组成如表3-25）中掺入

30%的尾矿熟料和2%的石膏，经粉磨后，所制得的尾矿混合材硅酸盐水泥的物理性能良好(如表3-26)。所配制的混凝土性能如下：

硅酸盐水泥熟料的化学成分和矿物组成　　表 3-25

硅酸盐水泥熟料	化学成分（%）						
	烧失量	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	f-CaO
	0.32	21.88	6.27	4.55	65.16	1.64	0.27
硅酸盐水泥熟料	矿物组成（%）				率值		
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$K \cdot H$	$S \cdot M$	$I \cdot M$
	49.22	24.62	8.90	13.83	0.864	2.02	1.38

（1）水灰比对混凝土强度的影响

现场施工试验表明：用尾矿混合材硅酸盐水泥所配制的混凝土，其强度与水灰比的关系是符合一般规律的，在水灰比为0.7时，水泥用量为240公斤/米^3，可配制成200号混凝土；水灰比为0.6时，水泥用量为284公斤/米^3，可配制成300号混凝土，其配比如表3-27所示。混凝土的和易性好，后期强度也有较大的增长。

（2）混凝土的抗冻性和钢筋粘结力

尾矿混合材硅酸盐水泥所配制的混凝土经25次、50次冻融循环后(结果见表3-28)，其强度下降不超过25%，耐冻性标号为M50。28天龄期钢筋粘结力达38.8公斤/厘米^2。

（3）养护条件对混凝土强度的影响

混凝土硬化过程中，强度的发展与养护的温度和湿度的关系很大。北京市房屋建筑综合装配公司对用尾矿混合材硅酸盐水泥所配制的混凝土，进行了试验，其结果见表3-29。这种混凝土在较低气温下的强度发展仍然较快，宜采用蒸气养护来加速硬化，但蒸养制度要控制合适，温度太高，升温太快都是不利的。

（4）现场浇注圈梁与预制过梁

在北京市综合建筑装配公司的汽车库工程上，利用尾矿混合材硅酸盐水泥配制的混凝土浇制圈梁(断面为240×180毫米)和过

尾矿混合材硅酸盐水泥的物理性能

表 3-26

水泥名称	尾矿熟料掺入量（%）	粉磨细度 4900孔/厘米² 筛筛余（%）	稠度（%）	凝结时间（时：分）		抗压强度（公斤/厘米²）						抗拉强度（公斤/厘米²）					
				初凝	终凝	1天	3天	7天	28天	3月	6月	1天	3天	7天	28天	3月	6月
尾矿混合材硅酸盐水泥	30	7.0	22.5	2：01	2：58	224	476	561	689	779	828	17.6	24.23	29.65	34.6	39.4	42.05

混凝土的性能

表 3-27

水泥名称	尾矿熟料掺入量（%）	水灰比	砂率	配合比 水泥：砂：石子	坍落度（厘米）	抗压强度（公斤/厘米²）			
						3天	7天	28天	3月
尾矿混合材硅酸盐水泥	30%	0.5	39.1	1：2.35：3.66	7	208	340	483	536
		0.6	39.3	1：2.76：4.27	9	162	261	382	444
		0.7	42.0	1：3.46：4.78	5.5	110	202	297	347

混凝土的抗冻性、钢筋粘结力 **表 3-28**

水泥名称	硅酸盐水泥熟料中尾矿掺入量(%)	抗冻性				28天龄期钢筋粘结力(公斤/厘米²)
		25次		50次		
		抗弯试件强度	检验试件强度	冻融试件强度	检验试件强度	
尾矿混合材硅酸盐水泥	30	399	407	332	426	38.8

不同养护条件下的混凝土强度 **表 3-29**

	水灰比	坍落度(厘米)	混凝土抗压强度(公斤/厘米²)									
			标准养护				自然养护				蒸养	
			3天	7天	14天	28天	3天	7天	14天	28天	第一次	第二次
尾矿混合材硅酸盐水泥	0.56	5.5	103	174	228	238	93	137	203	237	88	184
备注			按工厂制度一般预制构件所用制度				在室外养护，最高气温7～8℃，最低气温10～11℃				成型后六小时置入蒸箱，一小时升温到90～100℃恒温10小时，降温3小时	成型后8小时放入蒸养池，升温12小时，80℃恒温36小时，降温12小时

梁(尺寸为240×240×3180毫米)，成型时水灰比为0.56，混凝土配合比为1：2.26：3.54，集料用碎石(粒径5～20毫米)和粗砂。成型时留制的混凝土试块，经标准条件养护28天，其抗压强度为216公斤/厘米²。

现场施工说明，用尾矿混合材硅酸盐水泥所配制的混凝土和易性好，易于施工，没有出现泌水现象，拆模时试件表面完整。无论是混凝土的早期强度或28天强度，均能满足制作构件的要求。但其耐久性，尚待长期观察。

第八节　尾矿生料含硫与窑的技术作业状况和尾矿硅酸盐水泥质量的关系及其二氧化硫的净化处理

在生产普通硅酸盐水泥时，所用的粘土或页岩中，常含有少量的硫或者硫化铁、硫酸盐或其他有机硫化合物。但在烧制普通硅酸盐水泥时，对于粘土中SO_3的含量要求须小于1%。而用尾矿(代替粘土)作为配料烧制普通硅酸盐水泥时，由于尾矿中通常含有(FeS_2、ZnS、PbS等)硫化物，因此，要注意尾矿中硫的含量。对于用含硫量大于1%的尾矿所配制的水泥生料在煅烧时，硫的挥发程度与生产工艺的关系；烧成过程中的问题；窑的技术作业状况；热工参数和技术经济指标以及对硅酸盐水泥熟料质量的影响和废气的净化处理等，均应予以查明，为此，北京建筑材料科学研究院和原北京水泥工业设计院，专门为尾矿的含硫问题，在上海水泥厂ϕ3.1/2.8×78米回转窑上，进行了模拟试验。试验是在粘土中掺加硫铁矿，按尾矿含硫3～5%，与石灰石掺配时的用量为30%，所配制的水泥生料含硫为1.5%时的煅烧试验，现将煅烧试验所获得的结果叙述如下。

一、窑的技术作业状况

1．窑的技术经济指标

试验所获窑的技术经济指标如表3-30。从表中可以看出，煅烧高硫水泥生料与煅烧普通水泥生料时，技术经济指标相差不大，在料耗、煤耗、熟料的热耗等方面略有差异，这是由于生料中硫铁矿(FeS_2)的加入，在煅烧时硫呈SO_2挥发逸出，从而使生料料耗增加，而使熟料热耗降低的缘故。据电收尘废气含尘率测定结果，其含尘率没有显著增加，因而说明料耗增加不是很大的。

2．窑与冷却机表面的热损失

试验所获的窑与冷却机表面的热损失如图3-26。从图中可以看出，煅烧高硫水泥生料与煅烧普通水泥生料时，其窑与冷却机表面的热损失略有差异，如AB段其高硫水泥生料的热损失比

窑的技术经济指标

表 3-30

序号	项目	单位	普通水泥生料	高硫水泥生料
1	窑的小时产量	吨/时	8.49	8.45
2	窑的单位面积产量	公斤/米^2·时	15.12	15.10
3	窑的单位容积产量	公斤/米^3·时	25.2	25.15
4	窑的单位截面积产量	公斤/米^2·时	1870	1860
5	烧成原煤耗	吨/吨	0.263	0.276
6	原煤热值	大卡/公斤·煤	5546	5320
7	烧成热耗	大卡/公斤·熟料	1455	1468
8	燃烧带截面热强	$\times10^6$大卡/米^2·时	2.07	2.08
9	窑的发热能力	$\times10^6$大卡/时	12.32	12.4
10	干燥生料消耗量	吨/吨·熟料	1.485	1.525
11	理论生料消耗量	吨/吨·熟料	1.46	1.47
12	料浆水份	%	32	33.2
13	电收尘回灰量	公斤/时	572	525
14	飞灰量	公斤/时	75	104
15	一次风量	标米^3/时	3890	3990
16	一次风	%	25.75	24.8
17	喷煤喷出口风速	米/秒	40	43
18	二次风量	标米^3/时	9450	10700
19	二次风	%	65.15	66.8
20	二次风温度	℃	420	400
21	熟料进冷却机温度	℃	1180	1195
22	熟料出冷却机温度	℃	234	215
23	出窑废气温度	℃	200	214
24	排风机进口温度	℃	162	150
25	出电收尘废气温度	℃	130	120
26	电收尘出口废气量	米^3/时	48200	47500
		标米^3/时	32700	33000
27	窑体表面热损失	大卡/公斤·熟料	229.8	174.0
28	冷却机表面热损失	大卡/公斤·熟料	91.2	92.0
29	水冷却水量	公斤/时	27930	27930
30	电收尘出口含尘	克/米^3	1.49	2.2
31	窑尾废气量	标米^3/时	25700	26370
32	窑尾到电收尘出口漏风	标米^3/时	6000	6630

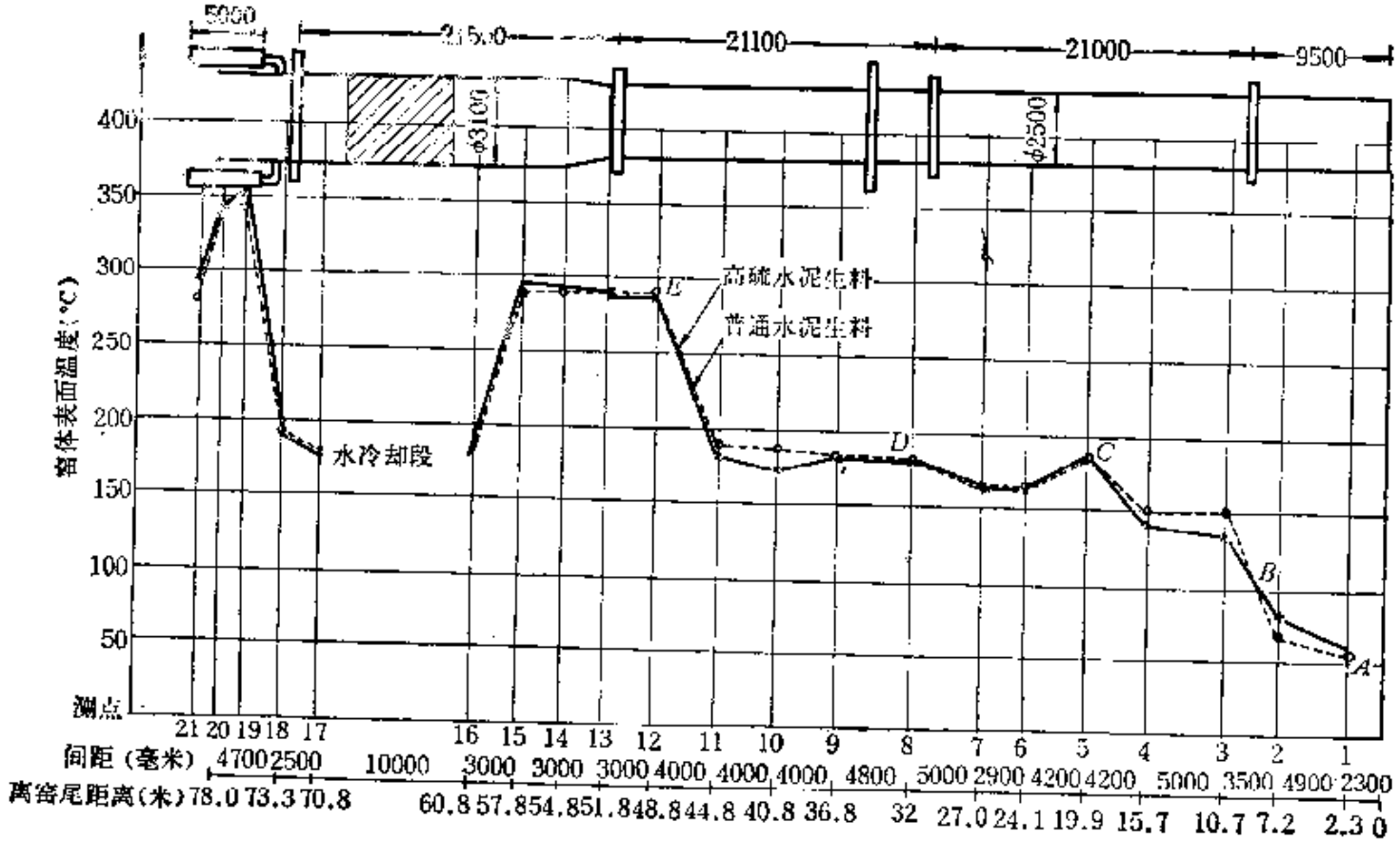


图 3-26 窑与冷却机表面热损失测定和计算结果

-----为煅烧高硫水泥生料时窑与冷却机表面热损失结果;

——为煅烧普通水泥生料时窑与冷却机表面热损失结果

普通水泥生料的略小些，而 BC 段又要比普通水泥生料要大些。从窑与冷却机表面的热损失测定结果(表3-31和表3-32)可以看出，在窑体表面的热损失上，煅烧高硫水泥生料比煅烧普通水泥生料要小，而在冷却机表面的热损失上，高硫水泥生料与普通水泥生料却接近。

普通水泥生料窑与冷却机表面的热损失　　表 3-31

测点	测定数据					计算结果					
	距窑尾长(米)	表面温度(℃)	大气温度(℃)	大气风速(米/秒)	段长(米)	段面积(米²)	段温度(℃)	散热系数		散热量(千卡/时)	
								α_1	α_2	1	2
1	2.3	55	5	3.7	2.3	18.2	50	23.7	23.7	21600	21600
2	7.2	75	5	3.7	4.9	38.55	60	21.5	21.5	49600	49600
3	10.7	130	5	3.7	3.5	27.55	98	24.7	24.7	66500	66500
4	15.7	140	5	3.7	5.0	39.30	130	26.5	26.5	135500	135500
5	19.7	180	6	3.7	4.2	33.00	151	28.2	28.2	143400	143400
6	24.1	160	9	3.1	4.2	33.00	161	28.3	28.3	150000	150000
7	27.0	160	8	1.2	2.9	22.80	152	20.2	23.2	67000	80400
8	32.0	180	10	1.2	5.0	39.30	160	20.5	23.2	129000	146000
9	36.8	180	11	1.2	4.8	37.75	160	21.0	23.2	134000	143500
10	40.8	170	13	1.2	4.0	31.25	162	20.6	23.2	104500	117500
11	44.8	180	13	1.2	4.0	31.25	162	20.6	23.2	104500	117500
12	48.8	285	13	0.4	4.0	31.25	220	19.5	24.0	134500	165000
13	51.8	285	13	0.4	3.0	25.60	272	21.1	24.8	135500	159300
14	54.8	290	14	0.4	3.0	26.40	274	21.1	24.8	153000	179500
15	57.8	290	12	0.4	3.0	29.30	278	21.1	24.8	172000	203000
16	60.8	180	11	0.4	4.5	43.90	169	16.2	18.4	120000	136500
17	70.8	180									
18	73.3	190	22	0.4	5.0	48.70	168	16.2	18.4	132500	150500
19	1.5	350	29	0.6	1.5	55.20	289	21.1	24.8	338000	396000
20	2.5	340	29	0.6	2.0	73.50	316	21.1	24.8	490000	576000
21	3.5	290	29	0.6	1.5	55.20	286	21.1	24.8	333000	392000
合计										3114100	3529300
扣除冷却筒热损三分之一										2727100	3142300
每公斤熟料的单位热损失（千卡）										321	370

表3-31和表3-32的计算未包括水冷却的散失热量，该损失测

定和计算结果如表3-33。

计算结果说明：水冷却热损失为34.1千卡/公斤·熟料。

高硫水泥生料窑与冷却机表面的热损失 **表 3-32**

测点	测定数据					计算结果					
	距窑尾长(米)	表面温度(℃)	大气温度(℃)	大气风速(米/秒)	段长(米)	段面积(米²)	段温差(℃)	散热系数		散热量(千卡/时)	
								α_1	α_2	1	2
1	2.3	50	23	0	2.3	18.2	27	8.4	8.4	4130	4130
2	7.2	60	23	0	4.9	38.55	32	8.4	10.45	10350	12900
3	10.7	150	23	0	3.5	27.55	87	11.0	13.2	26400	31700
4	15.7	150	24	0.8	5.0	39.30	126	18.5	21.5	91500	107500
5	19.9	180	25	0.8	4.2	33.00	140	15.0	23.2	69300	107400
6	24.1	160	25	0	4.2	33.00	145	15.0	17.2	71700	82200
7	27.1	160	25	0	2.9	22.80	135	14.1	16.0	43400	49200
8	32.0	180	25	0	5.0	39.30	145	15.0	17.2	85300	97800
9	36.8	180	25	0	4.8	37.75	155	15.0	17.2	87500	101000
10	40.8	185	25	0	4.0	31.25	158	15.6	17.2	77100	85000
11	44.8	185	25	0	4.0	31.25	160	15.6	17.2	78000	86000
12	48.8	285	25	0.5	1.0	31.25	210	18.0	20.2	118500	131500
13	51.8	285	28	0.5	3.0	23.10	257	21.0	23.2	125000	138000
14	54.8	285	25	0	3.0	26.60	260	21.0	23.2	145200	160500
15	57.8	285	25	0	3.0	29.30	260	21.0	23.2	160000	177000
16	60.8	180	31	0	4.5	43.90	202	18.0	20.2	161600	181500
17	70.8	180	31	0							
18	73.3	190	31	0	5.0	48.70	154	15.0	17.2	112700	129100
19	1.5	340	34	0	1.5	55.20	306	21.0	23.2	354000	392000
20	2.5	340	34	0	2.0	73.50	306	21.0	23.2	471000	521000
21	3.5	280	34	0	1.5	55.20	246	21.0	23.2	285000	315000
合计										2577680	2910430
扣除冷却筒热损失三分之一										2244680	2541430
每公斤熟料的单位热损失（千卡）										266	301

3．窑的热平衡

煅烧高硫水泥生料与普通水泥生料时，窑的热平衡如表3-34。从表中可以看出，煅烧高硫水泥生料时，其热量的支出比煅烧普通水泥生料时低，这是由于煅烧高硫水泥生料时，熟料的形

窑水冷却的热损失　　表 3-33

水冷却段别	测定数据						计算结果	
	测定孔数	测定时间（秒）	接水量（公斤）	冷水温度（℃）	热水温度（℃）	本段总孔数	总淋水量（公斤/时）	淋水热损失（千卡/时）
I	4	15	3.95	13	25	52	125000	150000
II	5	15	4.57	13	22	51	11200	101000
III	5	15	3.52	13	22	25	4230	38100
合计							27930	289100

成热、熟料的带走热、窑灰的带走热、窑体的散失热等均比煅烧普通水泥生料时低的缘故。但在料浆的水分上比煅烧普通水泥生料时高，因而蒸发水分所需支出的热量比普通水泥生料时大。由于高硫水泥生料中含硫，因而其热含量比普通水泥生料时高。从总的热平衡来说，由于煅烧高硫水泥生料时热量的总收入比煅烧普通水泥生料时要大，而热量的总支出却又小，因此煅烧高硫水泥生料时，热耗的收支相差比煅烧普通水泥生料时高。

煅烧高硫水泥生料与煅烧普通水泥生料时，窑的物料平衡如表3-34，从表中看出，其物料的收支相差比普通水泥生料时大，这显然是因生料中含硫铁矿，而在煅烧时SO_2挥发逸出的缘故。

二、废气中的SO_2浓度和露点温度

由于尾矿中含有硫化物(FeS_2、ZnS、PbS等)，当作为硅酸盐水泥原料时，在高温煅烧下，尾矿中的硫化物则被分解为SO_2：

$$4FeS_2 + 11O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3 + 8SO_2 \uparrow$$

$$2ZnS + 3O_2 \longrightarrow 2ZnO + 2SO_2 \uparrow$$

$$2PbS + 3O_2 \longrightarrow 2PbO + 2SO_2 \uparrow$$

据试验，当含硫量为1.34～1.61%的高硫生料在正常煅烧操作情况下，生料中的硫大部分以SO_2形态逸出，废气中SO_2的浓度随煅烧条件而波动在0.1～0.5%。因此，随着生料中含硫量的增加，其废气中SO_2含量增大。同时，废气中SO_2的含量还与燃料的含硫量有关。如果生料含硫量一定、而使用的燃料含硫量不

窑的热平衡及物料平衡表　　表 3-34

一、热量的支出

序号	项目	单位	普通水泥生料	高硫水泥生料
1	熟料的形成热	大卡/公斤	390.3	376.0 （因生料中含硫，故使形成热减少 28.8 大卡/公斤·熟料）
2	蒸发水份带走的热	大卡/公斤	416	452
3	废气带走热损失	大卡/公斤	230	232
4	熟料带走热损失	大卡/公斤	48.4	46.5
5	窑灰带走热损失	大卡/公斤	13	11.6
6	窑体散热损失	大卡/公斤	386.1	300.2
7	热量总支出	大卡/公斤	1483.7	1418.3

二、热量的收入

1	燃料的化学能	大卡/公斤	1455	1468
2	燃料的热含量	大卡/公斤	3.7	3.9
3	生料的热含量	大卡/公斤	30	32.1
4	空气的热含量	大卡/公斤	17.6	23.2
5	热量的总收入	大卡/公斤	1506.3	1527.2
	收支相差	大卡/公斤	22.6	109.2
	为热耗的	%	1.55	7.7

三、窑的物料平衡

	收入物料			
1	煤	公斤	0.263	0.276
2	干生料	公斤	1.485	1.525
3	物理水	公斤	0.698	0.759
4	一次风	公斤	0.593	0.614
5	二次风	公斤	1.49	1.647
6	窑头漏风	公斤	0.21	0.21
7	窑尾漏风	公斤	0.915	1.06
	物料总收入	公斤	5.654	6.091

续表 3-34

序号	项目	单位	普通水泥生料	高硫水泥生料
	物料支出			
1	熟料	公斤	1.00	1.00
2	废气	公斤	4.63	4.80
3	飞灰	公斤	0.009	0.012
4	大烟囱气体和飞灰若干物料总支出	公斤	5.640	5.902
	收支误差	%	1.4	3.20

四、电收尘的物料平衡和效率

序号	项目	单位	普通水泥生料	高硫水泥生料	
			11月10日	11月23日	11月24日
1	进电收尘气体温度	℃	150	150	150
2	出电收尘气体温度	℃	130	130	120
3	出电收尘风量	米³/时	48500	47500	49500
4	电收尘内风速	米/秒	0.51	0.548	0.545
5	实际料耗	公斤/公斤	1.485	1.525	—
6	理论料耗	公斤/公斤	1.460	1.470	—
7	出窑飞灰	公斤/公斤	0.025	0.055	—
8	电收尘回灰	公斤/时	572	525	504
		公斤/公斤	0.076	0.062	0.064
9	出电收尘含尘率	克/米³	1.49	2.25	1.37
10	出电收尘飞灰	公斤/公斤	0.009	0.012	0.0085
11	电收尘效率	%	88.5	83.7	88.1

同，则废气中SO_2的含量差异极大。例如在煅烧含硫量为1.5%的高硫水泥生料时，用枣田的煤，含硫量为3.4%，废气中SO_2的含量为0.3～0.5%；而用大同的煤，含硫量为1.1%，废气中SO_2的含量却降低到0.06%。因此，烧制水泥时，选用含硫量低的燃料，对于降低废气中SO_2的浓度仍然是重要的。

煅烧高硫水泥生料时，尾矿中的硫化物被分解为SO_2逸出，据文献介绍，硫铁矿煅烧时形成SO_2，其中一部分SO_2可能转化为SO_3，微量的SO_3可以使废气的露点温度降低。如果废气的温

度低于或接近于露点温度则可能引起低温腐蚀。根据对生料含硫量为1.34～1.61%，废气中SO_2含量为0.04～0.37%所测得的结果如表3-35，露点温度为77～84°C，与废气温度145～151°C相差60～70度，因此，预计这样的气体不致于对设备有低温腐蚀的影响。

废气的露点测度 **表 3-35**

项目	试验测定编号		
	B-1	B-3	C-1
生料中含 S(%)	1.34	1.61	1.41
废气中 SO_2(%)	0.33	0.37	0.04
测定点废气温度 (℃)	151.3	151.9	145.2
露点温度 (℃)	84.1	77.5	79.0
室温	24..	23.0	26.0

三、二氧化硫的净化吸收处理

如上所述，用含硫3～5%的尾矿所配制的水泥生料含硫量为1.5%，在正常煅烧情况下，生料中的硫大部分成SO_2逸出，排出的废气中SO_2浓度在0.1～0.5%，对这种低浓度SO_2的处理，北京建筑材料科学研究院曾在上海化工研究院进行了净化吸收处理及综合利用的试验研究。

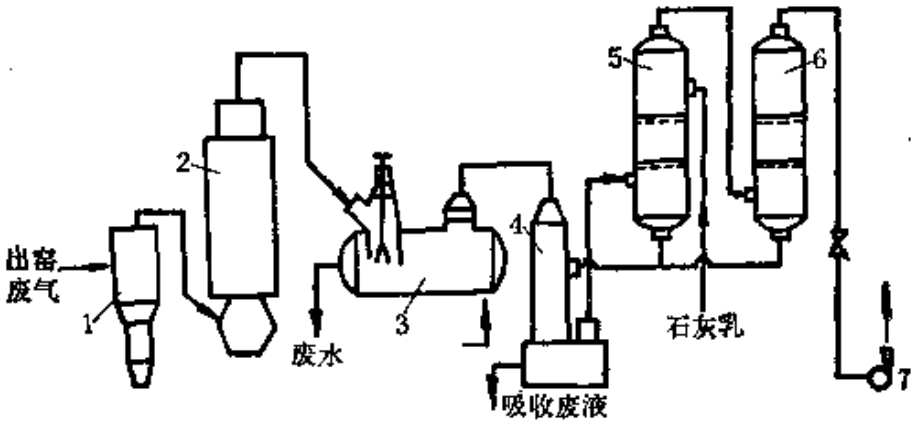


图 3-27 废气中SO_2净化吸收流程

1—旋风除尘器；2—旋流除尘器；3—冲击式洗涤器；4—新型塔；5—1#泡沫塔；6—2#泡沫塔；7—排风机

图 3-28 吸收产物$CaSO_3 \cdot 2H_2O$的X-射线分析

试验流程如图3-27。用Ca(OH)溶液净化废气中的SO_2，试验结果如表3-36。从表中可以看出，含SO_2浓度为0.12～0.15%的废气，经$Ca(OH)_2$吸收净化处理后，废气中的SO_2浓度降低到0.003～0.013%，其吸收效率达90%。另外，根据国外文献介绍，西德曾用石灰与白云石粉在窑尾废气中去除二氧化硫，效果显著，美国的燃烧工程公司，在5000标米³/时的试验工厂中，用石灰石粉喷射湿式洗涤法，湿式吸收，副产品为$CaSO_4$，脱硫率达95%，因此，对低浓度的SO_2，用$Ca(OH)_2$吸收净化处理，可取得良好的效果。

其吸收产物的化学成分如表3-37，X-射线分析和差热分析结果列于图3-28和3-29。

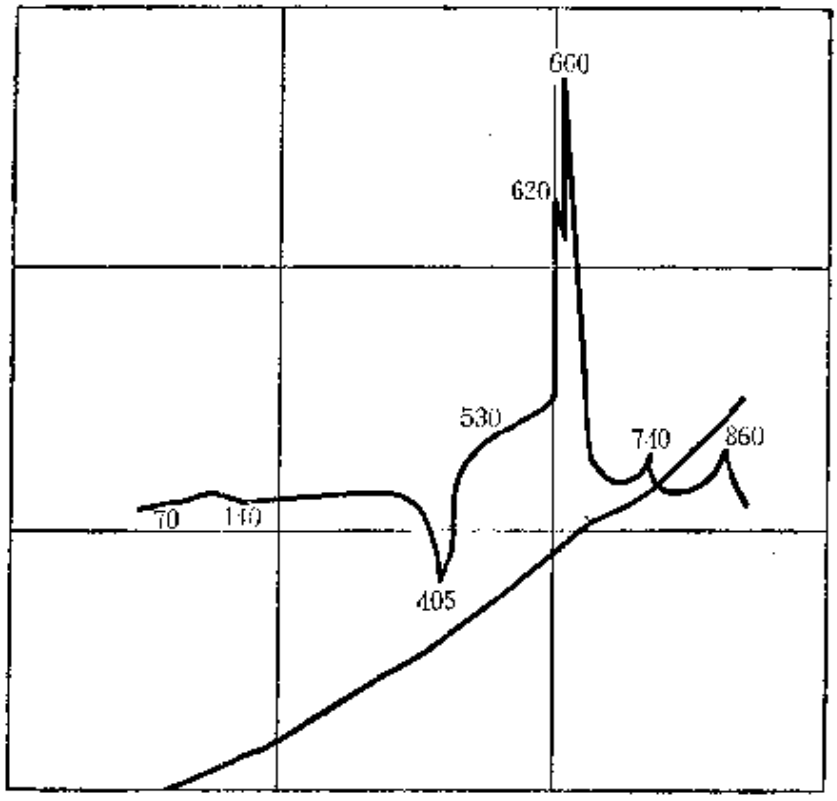


图 3-29　吸收产物$CaSO_3 \cdot 2H_2O$的差热分析

从X-射线分析结果看出，吸收产物的主要组成为$CaSO_3 \cdot 2H_2O$(d=3.15A、2.62A、5.5A)。差热图上405°C时出现一吸热效应，这是由于吸收产物中残存的$Ca(OH)_2$的分解所致，而

各装置的吸收效率 **表 3-36**

序号	冲击式洗涤器				新型塔			1# 泡沫塔			2# 泡沫塔		总吸收率
	吸收液 pH 值	进口 SO_2 (%)	出口 SO_2 (%)	吸收率 (%)	吸收液 pH 值	出口 SO_2 (%)	吸收率 (%)	吸收液 pH 值	出口 SO_2 (%)	吸收率 (%)	出口 SO_2 (%)	吸收率 (%)	(%)
1	7～8	0.12～0.15	0.05～0.08	40～60	7～8	0.03～0.05	35～45	8～10	0.007～0.020	75～85	0.003～0.009	40～60	93～99
2	6～7	0.12～0.13	0.07～0.10	21～41	6～7	0.05～0.09	9～27	7	0.0167～0.0254	62～81	0.0127	24～50	90～90.2

吸收产物的化学成分（%） **表 3-37**

样品编号	结晶水	烧失量	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO
G-1	4.02	3.16	0.52	3.86	0.52	43.10
G-2	7.03	2.40	0.99	0.69	0.29	43.51
G-3	5.80	13.02	1.22	0.83	0.25	47.31

样品编号	MgO	P_2O_5	SO_2	SO_3	备注
G-1	0.45	2.98	—	44.24	小时瞬间样
G-2	微	—	37.38	49.25	小时瞬间样
G-3	0.06	—	23.63	31.67	混合样

在620～660°C间有显著的放热效应，这可能与$CaSO_3 \cdot 2H_2O$的转化有关。

吸收产物的利用问题，根据试验可用作水泥的缓凝剂。将吸收产物沉淀，经60～70°C干燥后，用作水泥缓凝剂的试验结果如表3-38。根据试验，吸收产物$CaSO_3 \cdot 2H_2O$作为缓凝剂掺量2％时可起到缓凝效果，水泥的凝结、安定性正常，但掺入量过大时，会引起快凝。掺加$CaSO_2 \cdot 2H_2O$后，其水泥的强度会有所降低，特别是早期强度的降低较大。

水泥物理性能试验结果 **表 3-38**

样品编号	配合比（%）			SO_3 (%)	比面积 (厘米²/克)	凝结时间(时：分)		安定性
	硅酸盐水泥熟料	大原二水石膏	吸收产物 $CaSO_3 \cdot 2H_2O$			初凝	终凝	
C-1	97.0	3.0	—	1.38	2600	2：50	4：12	合格
C-2	98.0	—	2.0	0.62	3510	4：16	6：46	合格
C-3	95.5	—	4.5	1.39	3680	0：16	0：26	合格
C-4	93.0	—	7.0	2.10	4020	0：11	0：29	合格
C-5	90.0	—	10.0	3.10	4100	0：31	9：16	合格

样品编号	抗压强度(公斤/厘米²)				抗拉强度(公斤/厘米²)			
	1 天	3 天	7 天	28 天	1 天	3 天	7 天	28 天
C-1	182	455	682		21.58	31.63	34.30	
C-2	89	369	544		9.95	25.68	28.28	
C-3	38	343	545		5.35	27.78	29.75	
C-4	58	409	630		8.28	26.08	28.89	
C-5	61	347	519		5.63	23.43	27.55	

四、水泥生料含硫对硅酸盐水泥熟料质量的影响

用来生产硅酸盐水泥的原料中，硫的来源有二，一是粘土或页岩中常含有少量硫，或者硫铁矿、硫酸盐或其他有机硫化合物。硫的第二个来源是燃料。当生料进入回转窑后，在通常的氧化气氛中，含硫化合物最终都被氧化成为三氧化硫。由于水泥生

料为碱性，当其进入回转窑时就会吸收煤燃烧所产生的气态硫化物，于是生料中含硫化合物逐渐增多，当生料进入高温区时，所有存在的硫酸钙都会部分分解，因而生料中的含硫量是先增至最大值，然后再降低。相当数量的硫最终随飞灰离窑而去。

利用含FeS_2或ZnS、PbS等硫化物的尾矿作配料烧制普通硅酸盐时的反应情况与上述相同。

尾矿含硫量为3～5%，如果与石灰石掺配时尾矿用量为30%，则所配制的高硫水泥生料含硫量为1.5%。用高硫生料烧制水泥时，熟料中残存的SO_3含量与煅烧操作控制有关。例如用含硫量为1.34～1.61%的水泥生料，同时用含硫为3.4%的煤煅烧时，由于操作控制较好，因而熟料中残存的SO_3含量仅0.56～0.68%，硫0.23～0.35%；然而在水泥生料含硫量不变，当燃料改用含硫量为1.1%的煤时，由于煅烧操作控制不好，因而熟料中的SO_3含量增高达0.78～1.2%，硫0.92～0.98%。由此可见，其熟料中的含硫量可由煅烧操作来控制。

高硫生料烧制水泥时，对于熟料中SO_3的含量应严格控制，过高了对水泥的强度不利。根据试验，当生料（化学成分如表3-39）含硫量为1.34～1.58%时，经回转窑煅烧后，生料中的硫大部分以SO_2形态逸出，残留在熟料中的SO_3为0.6～0.78%，个别达1.2%，这符合普通硅酸盐水泥熟料中SO_3含量需小于1.5%的要求。而对SO_3含量为0.56～1.2%的水泥熟料（化学成分见表3-40）的物理性能试验结果（表3-41）说明，虽然所有水泥熟

入窑生料的成分 **表 3-39**

样品编号	烧失量	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	S	率值		
								KH	*SM*	*IM*
S-1	32.26	12.34	3.21	3.87	43.10	0.93	1.34	1.08	1.74	0.82
S-2	31.63	11.34	3.01	4.17	43.33	0.83	1.61	1.16	1.58	0.72
S-3	31.95	12.02	3.27	3.87	43.04	0.62	1.23	1.08	1.68	0.84
S-4	31.40	11.84	3.01	4.08	43.04	0.72	1.41	1.10	1.67	0.74
S-5	31.29	11.76	3.14	4.29	43.04	0.72	1.58	1.10	1.58	0.73

硅酸盐水泥熟料的化学成分（%）

表 3-40

样品编号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	f CaO	SO_3	S	K_2O	Na_2O	率值			矿物组成			
											KH	*SM*	*IM*	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
S-1	21.12	5.31	6.29	64.86	1.55	0.60	—	—	—	—	0.90	1.82	0.82	56.18	18.18	3.39	19.12
S-2	20.48	6.29	6.82	64.29	1.14	0.90	0.60	0.25	0.40	0.22	0.88	1.56	0.92	49.81	21.16	2.84	17.33
S-3	20.28	5.24	6.83	63.71	1.14	1.32	0.68	0.35	0.42	0.23	0.89	1.86	0.77	51.63	19.21	2.30	20.76
S-4	20.68	5.34	6.71	64.14	1.45	0.96	0.56	0.23	0.35	0.20	0.89	1.71	0.88	52.65	19.59	2.86	20.40
S-5	20.16	5.24	6.66	63.57	1.35	1.92	0.78	0.92	0.27	0.15	0.89	1.69	0.79	51.33	19.09	2.60	20.25
S-6	19.84	5.44	6.87	63.42	1.24	1.42	1.20	0.98	0.49	0.23	0.90	1.61	0.79	52.77	17.08	2.76	20.83

水泥的物理性能

表 3-41

样品编号	硅酸盐水泥熟料中含		比面积	标准稠度	凝结时间（时：分）		安定性	抗拉强度（公斤/厘米²）			抗压强度（公斤/厘米²）		
	SO_3（%）	S（%）	（厘米²/克）	（%）	初凝	终凝		3 天	7 天	28 天	3 天	7 天	28 天
S-1	—	—	3007	24.75	2：12	3：19	合格	31.1	32.3	33.4	465	632	757
S-2	0.6	0.25	3027	24.75	1：36	2：41	合格	29.4	30.9	34.9	441	622	766
S-3	0.68	0.35	3003	24.75	1：35	2：45	合格	29.2	30.6	32.2	472	605	702
S-4	0.56	0.23	3003	24.50	2：19	3：04	合格	30.2	31.7	33.7	470	590	760
S-5	0.78	0.92	3018	24.75	1：48	3：03	合格	25.6	26.2	32.1	416	518	633
S-6	1.20	0.98	3029	24.50	2：18	4：26	合格	24.6	26.5	30.6	386	486	616

料的凝结、安定性正常，但当水泥熟料含硫量较高（S＞0.92%）时，其水泥熟料的强度较低，28天的抗压强度约低50～100公斤/厘米^2，而且特别是早期抗拉强度的降低较大。因此，用高硫生料烧制水泥时，正确的操作以严格的控制熟料中SO_3的含量是非常重要的。

第九节　拟建的尾矿水泥厂

某矿用尾矿作配料烧制普通硅酸盐水泥，水泥标号为500号，部分用于井下作胶结充填，其余由国家统一调拨，该矿拟建的水泥厂建厂设计有关资料如下：

一、产品品种

设计用30微米以下的细粒级尾矿与石灰石一起粉磨以烧制尾矿硅酸盐水泥熟料。尾矿用量约占30%。

二、窑型选择

选用两台$\phi3/\phi2.5\times90$米湿法回转窑。

三、生料制备

1．所用原料及其配比

1）石灰质原料：自矿区57公里处的产地运进厂。

2）粘土质原料：采用分级后的细粒级尾矿，含水约60%，粒径在30微米以下。

3）原料配比：石灰石与30微米以下的细粒级尾矿的配料比为：

石灰石：细粒级尾矿=65～70%:35～30%

2．尾矿浆的输送和入窑料浆的浓度

分级后的细粒级尾矿经泵扬送至水泥厂内的50米浓密机，经浓密后，含水量为60%的细粒级尾矿浆可用泵扬送，与石灰石一起粉磨后制备含水量为33～35%的料浆入窑。

四、生产工艺流程

生产工艺流程示意图如图3-30。

熟料的煅烧：经调整后的料浆由泥浆泵送至窑尾小池，然后

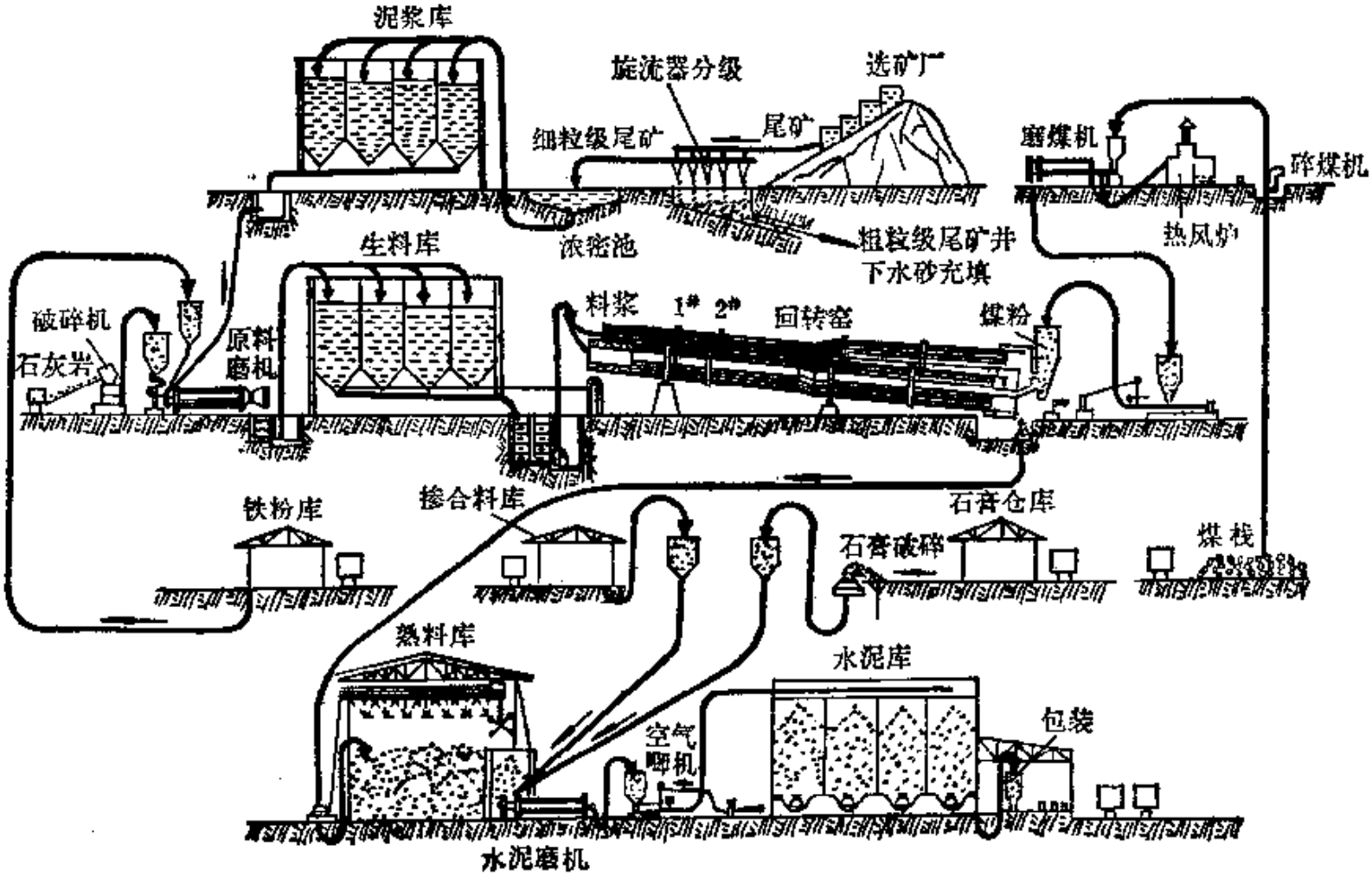

泥浆库
旋流器分级
选矿厂
细粒级尾矿
尾矿
磨煤机
碎煤机
浓密池
粗粒级尾矿井
下水砂充填
热风炉
生料库
破碎机
石灰岩
原料
磨机
料浆
1#
2#
回转窑
煤粉
铁粉库
掺合料库
石膏仓库
石膏破碎
煤栈
熟料库
水泥库
空气
唧机
包装
水泥磨机

图 3-30　生产工艺流程

经勺式喂料机送入窑内煅烧。

水泥熟料的煅烧采用两台$\phi3/\phi2.5\times90$米回转窑，当入窑料浆水分为35～37%时，其生产能力为10吨/时，两台窑的年利用率均为90%。

熟料由冷却筒出来后，大块经锤式破碎机破碎，小块则与碎熟料经斗式输送机入卸料机，然后由抓斗送入联合储库中分堆储存。

为净化烟气，窑尾设置20米^{2}电气除尘器，窑灰经螺旋输送机、提升机至窑尾喂料小仓后与料浆共同入窑重行煅烧。

水泥运输：充填用水泥用散装水泥汽车运往采矿工业场地。外销水泥包装后铁路运出。

五、主要设备

主要设备见表3-42。

主 要 设 备 表　　表 3-42

序号	设备项目	数量	技术性能
	一、主要设备		
1	回转窑$\phi3/\phi2.5\times90$米	2台	产量10吨/时
2	生料磨$\phi2.4\times13$米	1台	产量30吨/时
3	水泥磨$\phi2.4\times13$米	1台	产量24吨/时
4	煤磨$\phi2.2\times1.4$米	1台	产量 8～8.5 吨/时
5	6嘴回转式包装机	1台	产量40～55吨/时
	二、辅助设备		
6	颚式破碎机400×600毫米（破碎石膏用）	1台	当入料粒度为350毫米，出料粒度为400～100毫米，此时生产能力为20吨/时
7	锤式破碎机521～1000×800毫米（中碎煤与石膏用）	1台	115千瓦当入料粒度小于200毫米，出料粒度小于20毫米时，生产能力为40～70吨/时
8	窑尾主风机Y，73-11排风机20号	2台	动力80千瓦，风压120毫米水柱，风量157000米^3/时

六、回转窑规格及技术性能

1. $\phi3/\phi2.5\times90$米回转窑见图3-31。
2. $\phi3/\phi2.5\times90$米回转窑的技术性能见表3-43。

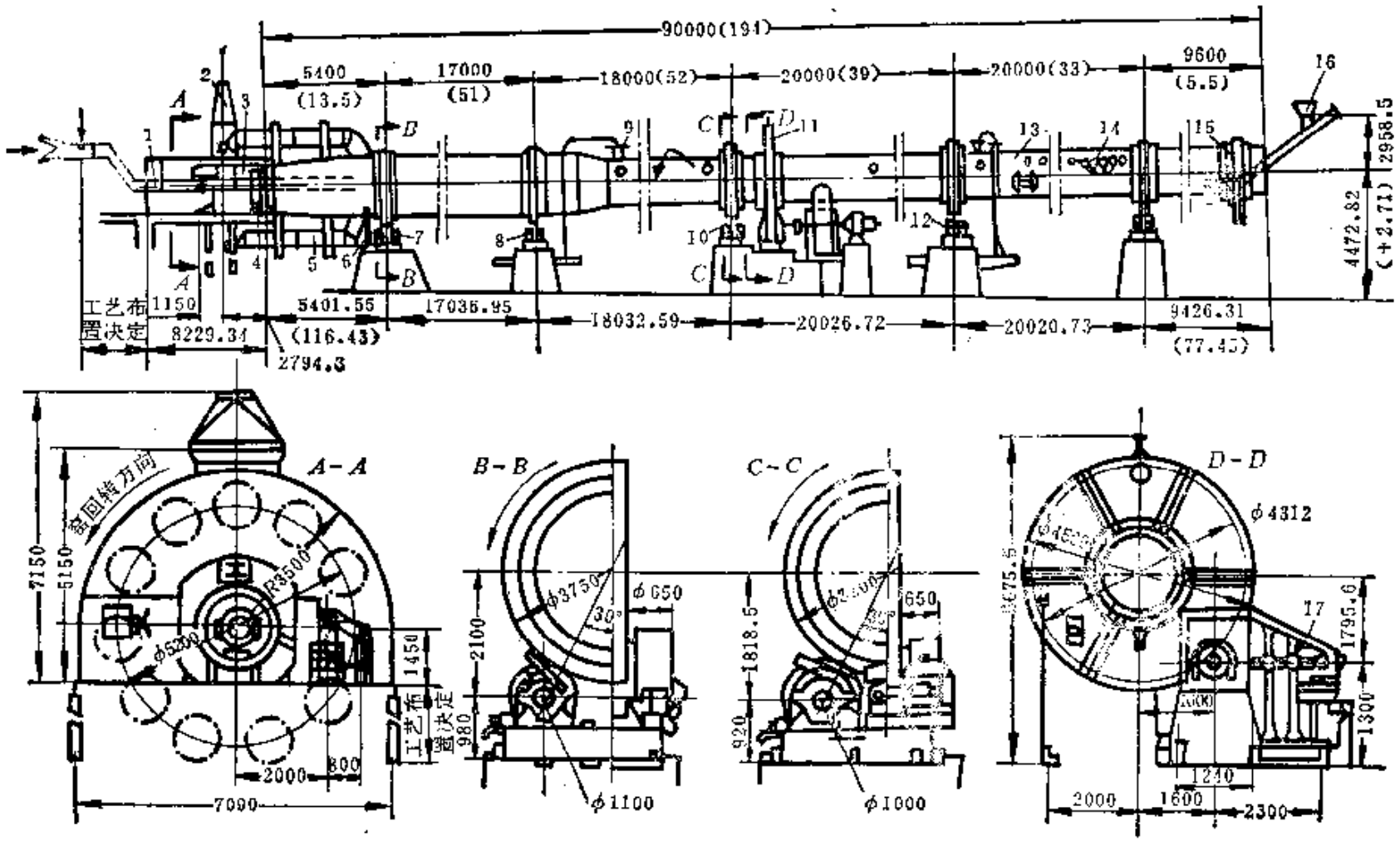


图 3-31 $\phi3/\phi2.5\times90$米回转窑

1—喷煤管装置；2—下料溜子；3—防灰防热罩；4—窑门；5—多筒冷却器；6—遮热板；7—第一档支承装置；8—第二档支承装置；9—热电偶骨环装置；10—第三档支承装置；11—传动装置；12—第四、五档支承装置；13—筒体部分；14—链条装置；15—窑尾密封装置；16—下料管；17—2SN215减速器润滑管路

$\phi 3/\phi 2.5\times 90$米回转窑技术性能　　表 3-43

型式	湿法气产热增扩大带多筒式冷却器		
规格	$\phi 3/\phi 2.5\times 90$米		
斜度	3.5%		
产量	10吨/小时		
料浆水份	35%		
废气温度	200～220℃		
热耗	1500千卡/公斤·熟料		
料耗	1.5公斤/公斤·熟料		
窑体转速	用主传动		0.43～1.28转/分
	用辅助传动		4.06转/小时
支座数	5档		
链条装置	链条带长		18.5
	挂法		二直迭斜花环热端先起
	密度		4.03
	总面积		558.9米^2
	链环节距与规格		t = 64毫米　　d = 22毫米
主传动装置	电动机	型号	Z_2-111
		额定功率	75千瓦
		额定转速	750转/分
		额定电压	220伏
		调速范围	300～880转/分
	测速发电机	型号	ZYS 3
		功率	23.1千瓦
		测速范围	0～1900转
		最高电压	110
	减速机	型号	ZSN215-75.816 Ⅱ
		总中心距	2150毫米
		总速比	75.816
		铜热电阻温度计	WZG-210，L = 300毫米插入深度150毫米
辅助传动装置	电动机	型号	JQO_2-51 4
		额定功率	7.5千瓦
		额定转速	1450转/分
		额定电压	380伏

续表 3-43

型　式	湿法生产热端扩大带多筒式冷却器		
辅助传动装置	减速器	型　号	ZL50-14-I
		总中心距	500毫米
		总速比	31.16
		低速轴键	A14×110两个成180°配置
	液压推杆制动器	YWZ-220	（附加一根慢松制动块用的手柄）
开式齿轮传动	模　数	$m=28$	
	齿　数	$Z_1=17$，$Z_2=154$	
	速　比	$i=9.06$	
冷却筒	规　格	ϕ1.1×5米	
	个　数	11个	

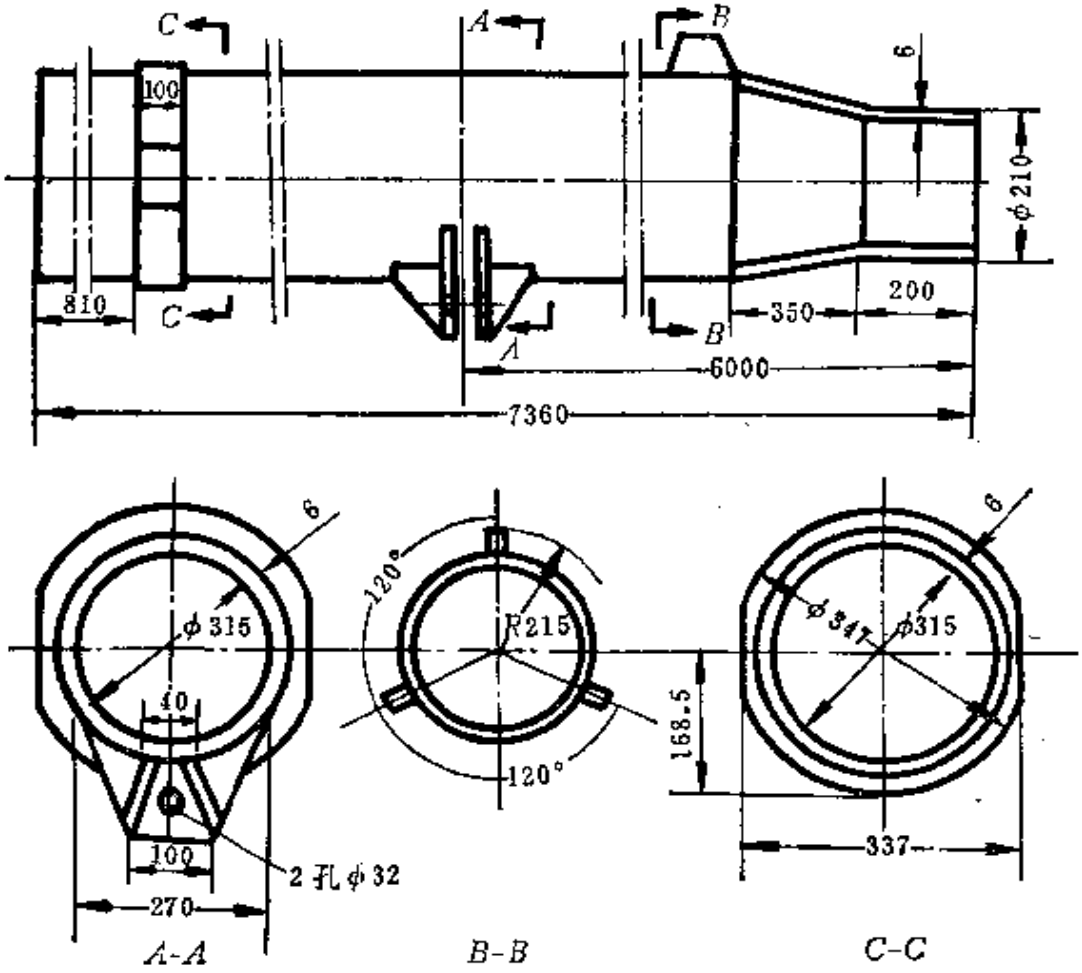


图 3-32　喷嘴

3. 煤喷嘴规格尺寸为：

喷嘴φ210×7360毫米和喷煤管装置见图3-32、3-33。

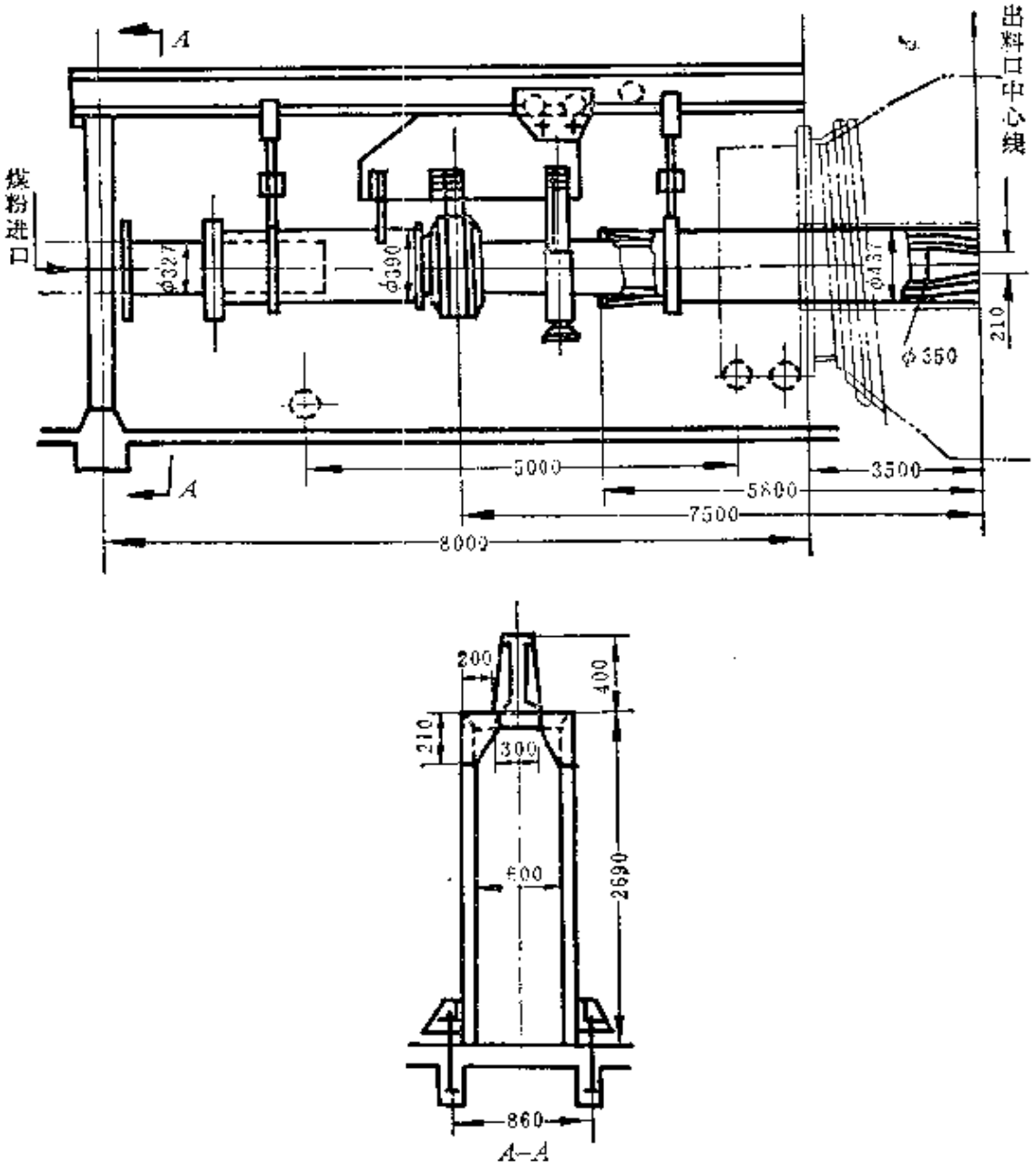


图 3-33 喷煤管装置

4. 回转窑链条带及其装置

各段链条挂法参见表3-44。

其技术要求为：

该链条挂法为二重迭斜花环，在链条互相穿插时应不影响链

各段链条挂法 **表 3-44**

序号	项目	平挂	第Ⅰ段	第Ⅱ段	第Ⅲ段	全链条
1	各段跨号		1～3	4～13	14～19	1～19
2	圆周结点数（个）	32				
3	花环重选数		2			
4	中心角（度）	135		101.25	135	
5	跨距（米）	间距0.5		1.8		
6	空洞高（米）	0.75		1.0	0.9	
7	链环规格（毫米）	ϕ22				
8	链环节距（毫米）	64				
9	链条长度(包括首环)(米/根)	3.212	3.66	3.34	3.212	
10	链条节数(不包括首环)（米/根）	47	54	59	47	
11	各段长度（米）	0.5	3.15	9.00	5.85	18.5
12	各段排数（排）	2	3	10	6	21
13	各段链条面积（米^2）	51.2	87.6	266.5	153.6	558.9
14	各段密度	13.0	3.54	3.93	3.64	4.03
15	各段链条根数（根）	64	96	320	192	672
16	链条重量（包括首环）（公斤/根）	34.3	39	35.7	34.3	
17	链条重量（吨）	2.2	3.75	11.4	6.6	23.95

条的自由下垂。

5. 冷却筒

冷却筒的规格为ϕ11×5米，数量11个。

冷却筒内为高铝耐热钢扬料板，其材料的化学成分为：

C0.6～0.8%　　Si0.6～0.8%

Mn0.6～0.65%　　Al28～30%

S ≤0.015%　　P ≤0.02%

七、投资估算

投资估算约1800万元。

水泥厂工艺设施平面布置见图3-34。

水泥厂全景见图3-35。

图3-36为8×φ8米水泥库。图3-37为φ50米细粒级尾矿浓密池。

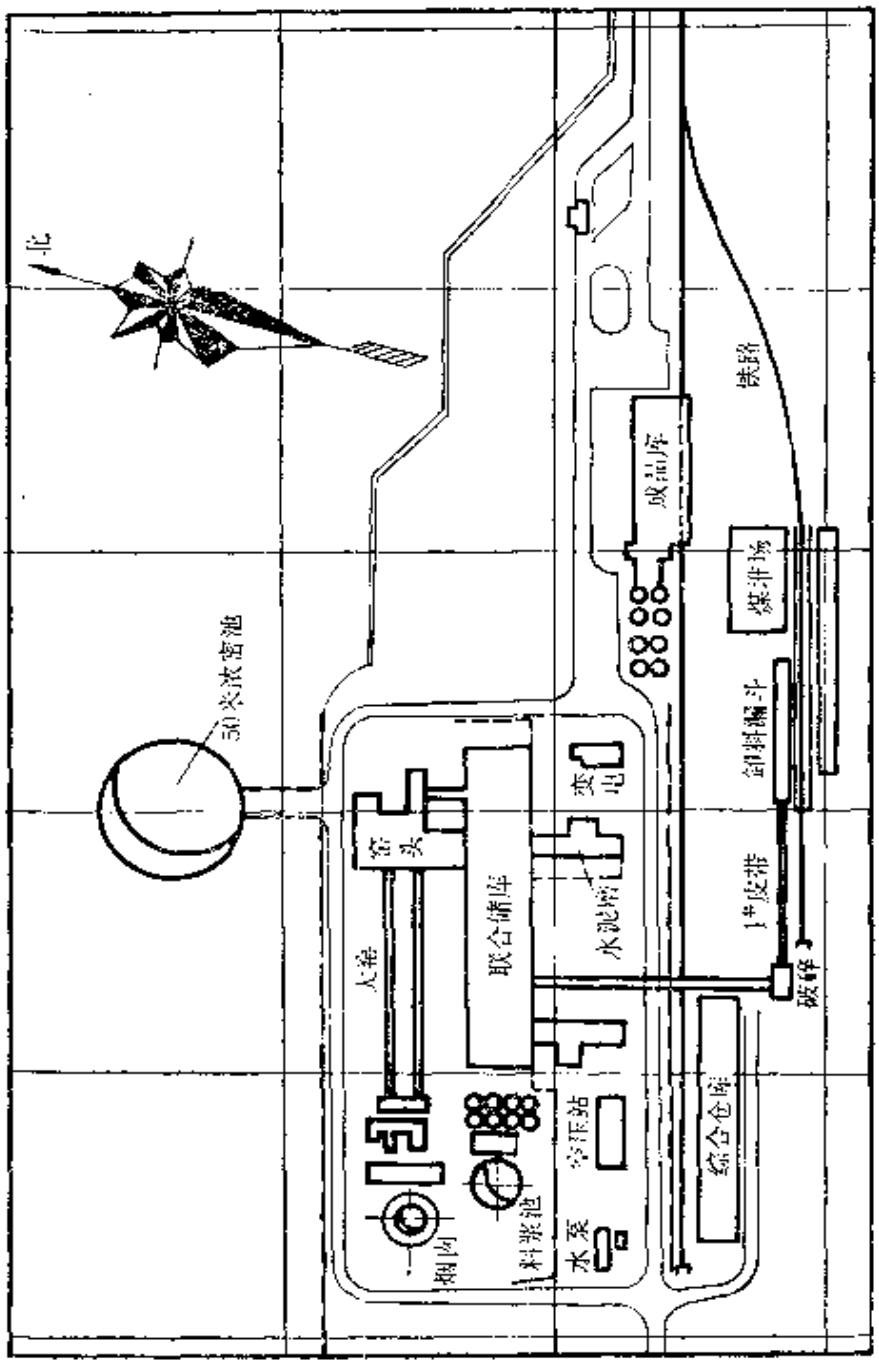
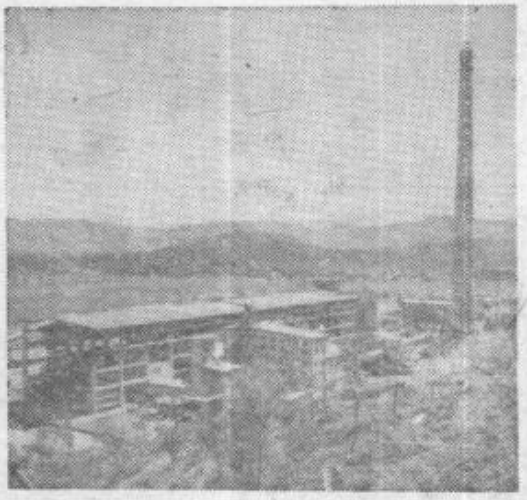


图 3-34 水泥厂工艺设施平面布置



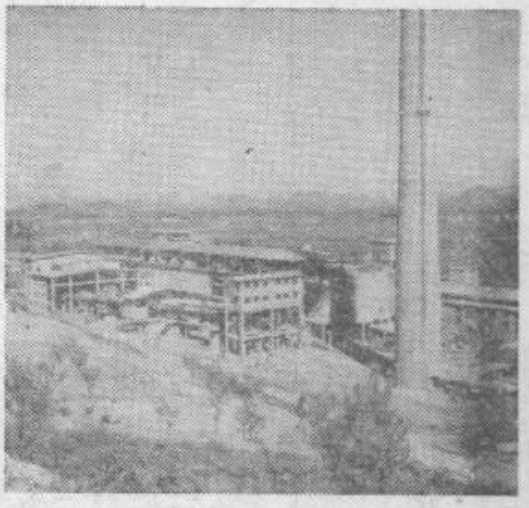


图 3-35　建设中的水泥厂全貌

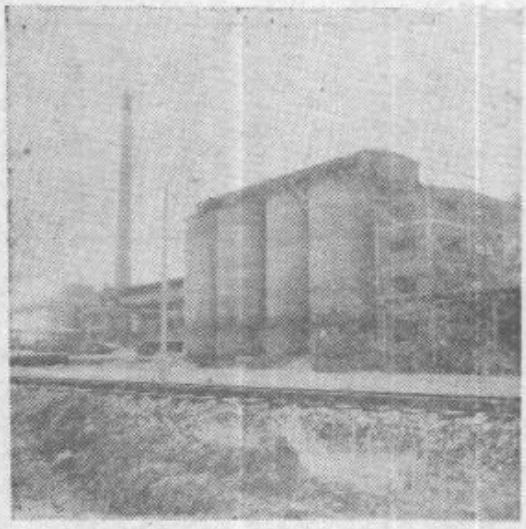


图 3-36　8×ϕ8米水泥库

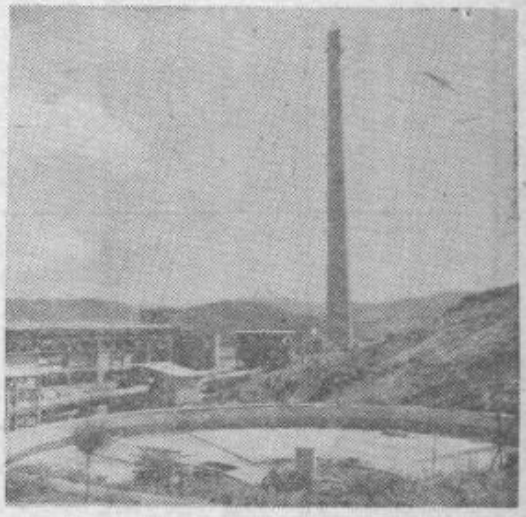


图 3-37　ϕ50米细粒级尾矿浓密池

第十节　合理确定水泥厂的规模

有色金属矿山的规模和尾矿的产出量　　**表 3-45**

矿山类型	矿山规模		矿山选矿厂尾矿产出量		矿山服务年限
	年产矿量（万吨/年）	日产矿量（吨/日）	年产出量（万吨/年）	日产出量（吨/日）	（年）
大　型	>1000	>3000	>90	>2700	>30
中　型	20～100	600～3000	18～90	540～2700	>20
小　型	<20	<600	<18	<540	>10～15

注：表中尾矿产出率是按90%计算。

不同规模窑型水泥厂概略的建厂技术经济指标　　表 3-46

指标名称	单位	一台窑 φ2.5×78米	二台窑 φ2.5×78米	二台窑 φ3.5×145米	一台××立窑	一台塔式立窑
1. 工厂规模：熟料	万吨/年	5.8	11.6	40	3.7	5.6
水泥	万吨/年	6.5～7.5	13～15	40～50	4.1～5	6.2～7.5
（混合材掺合比）	%	10～23	10～23	10～20	10～25	10～25
2. 原料：石灰石	万吨/年	8	16	54	5	7.5
粘土（含水15%）	万吨/年	2	4	14	1.3	1.9
铁粉（含水 5%）	万吨/年	0.35	0.5	1.7	0.16	0.25
石膏	万吨/年	0.26～0.3	0.52～0.6	1.8～2.0	0.16～0.2	0.25～0.3
混合材（干料）	万吨/年	0.7～1.7	1.4～3.4	5～10	0.4～1.3	0.6～1.9
混合材（30%水份）	万吨/年	1～2.4	2～4.8	7～14	0.57～1.9	0.86～2.7
3. 燃料（标准）	万吨/年	1.3～1.45	2.6～2.9	9～10	0.55～0.70	0.75～1.0
原煤(5800大卡/公斤，10%水份)	万吨/年	1.6～1.75	3.2～3.5	11～12	0.66～0.85	0.9～1.2
4. 供电：耗电量	万度/年	680～750	1350～1500	4000～4500	400～450	600～680
电动机设备电容量	千瓦	3000～3500	5200～5800	11000～12000	1200～1600	1600～2000

续表 3-46

指标名称	单位	一台窑 φ2.5×78米	二台窑 φ2.5×78米	二台窑 φ3.5×145米	一台××立窑	一台塔式立窑
最大负荷	千瓦	1500～2000	3000～3500	7000～8000	700～1000	1600～1500
5. 供水：用水量	米³/天	2000～2500	2500～3000	3500～5000	500～700	600～800
其中：生活水	米³/天	150～200	200～300	400～500	100～150	100～150
6. 全厂职工人数	人	370～420	500～550	1000～1200	300～350	370～420
其中：生产工人	人	300～350	400～450	800～900	250～300	300～350
7. 占地面积						
厂区（围墙内）	公顷	5～6	6～7	13～16	3	3～4
工人村	公顷	1.5～2	2～3	4～7	1.2～2	1.5～2
8. 全厂设备重量	吨	1200～1400	2300～2500	5000～5500		700～800
9. 全厂总投资	万元	700～900	1300～1600	3600～4500	350～400	500～600
10. 水泥全部成本						
普通水泥	元/吨	35～45	32～38	27～35	35～45	32～40
400号矿渣水泥	元/吨	35～42	30～35	23～30	33～40	30～38

由于有色（或黑色）金属矿山，尾矿产出量极大(见表3-45)，因而，倘若要求尾矿不堆存，将日产出的尾矿全部用作水泥原料的配料烧制400号普通硅酸盐水泥，按尾矿掺配量为30～50%计算，则所建立的水泥厂规模是相当庞大的，投资额既大，服务年限又短，这显然是不合理的。因此，应根据矿山的规模、对水泥的需用量、建厂的具体条件和尾矿允许堆存的情况等诸因素综合考虑，从而合理的确定水泥厂的规模和投资。

不同规模窑型水泥厂概略的建厂技术经济指标见表3-46。

参 考 文 献

〔1〕胶凝物质工学，高等学校试用教科书，硅酸盐工学，第一分册，南京化工学院、北京建筑工业学院编，1961年8月。

〔2〕水泥和混凝土化学，〔英〕F.M.李著，唐明述、胡道和译，黄大能校，中国工业出版社，1966年3月。

〔3〕铅锌冶金学，苏联高等学校教学用书，下册，Ф.М.罗斯库托夫著，冶金工业出版社，1960年4月。

〔4〕冶金理化原理，中等专业学校教学用书，И.П.戈弗曼著，重工业出版社翻译组译，重工业出版社，1956年2月。

〔5〕湿法冶锌读本，苏联技工学校教学用书，А.П.斯努尔尼柯夫著，冶金工业出版社，1959年。

〔6〕矿渣水泥，〔苏〕Я.М.谢尔金、М.Е.弗连克利著，戚昌民译，中国工业出版社，1965年6月。

〔7〕水泥，物资供应干部培训讲义，水利电力部供应司编，水利电力出版社，1960年3月。

〔8〕小型水泥厂普通立窑的设计及其生产技术，水泥工业管理局、水泥工业设计院合著，建筑工程出版社，1959年4月。

〔9〕土法生产水泥经验汇编，建筑材料工业编辑部、建筑工程出版社合编，建筑工程出版社，1958年9月。

〔10〕赤泥硫酸盐水泥，建筑工程部水泥研究院编著，冶金工业出版社，1960年3月。

〔11〕建筑材料基本知识，刘长荣、李午曦、于兆吉、聂章矩，中国建筑工业出版社，1972年9月。

〔12〕建筑材料，高等学校教学用书，B.A.伏罗比也夫编著，清华大学土木系大连工学院水利系建筑材料教研组译，建筑材料工业出版社，1957年。

〔13〕水泥混凝土，富文权编著，人民铁道出版社，1959年5月。

〔14〕硅酸盐建筑制品厂工艺设计，辽宁工业建筑设计院，中国建筑工业出版社，1975年7月。

〔15〕硫酸工业，化学工业知识丛书，汤桂华、郑冲编著，化学工业出版社，1966年2月。

第四章　利用尾矿制造硅酸盐建筑制品

第一节　硅酸盐砖

一、概述

砖瓦是建筑的重要材料，占建筑工程造价的15%，占一般建筑物自重的80%。由于粘土砖的原料大多取自农田，不另找新的途径来增加砖的生产，则势必发生与农业争地的矛盾。如一个年产一百万块红砖的砖厂，每年约需挖掉良田一亩。

硅酸盐砖瓦等建筑制品是一种新型建筑材料，是将胶凝材料与含硅、铝原料和催化结晶材料按一定颗粒级配，均匀掺合，压制成型，进行蒸压或蒸养，使之成为水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化硅铝酸钙等多种水化产物的建筑制品。

硅酸盐砖具有普通粘土砖的技术性能，并且在某些技术性能上硅酸盐砖还超过了粘土砖。硅酸盐砖的原料取自工业废渣，发电厂的煤渣，冶炼厂的炉渣等。金属矿山选厂的尾矿是取之不尽的含硅、铝原料。从一九五八年开始，不少工矿企业利用煤渣或炉渣等工业废渣掺以石灰或水泥制成硅酸盐砖等建筑制品，不仅部分地满足了对建筑材料日益增长的需要，改变毁田造砖的状况，而且大量减少了堆放工业废渣占田占地的面积，节省了处理工业废渣的人力、物力和财力，扩大了工业废渣的利用范围。

不少金属矿山的尾矿含硅较高，同时还含有一定量的铝，具备做硅酸盐砖原料的基本条件，北京铁矿、本钢南芬铁矿利用该矿尾矿均试制成了硅酸盐尾矿砖，北京铁矿还建设了生产硅酸盐尾矿砖的砖厂，此外，还有不少矿山利用尾矿进行硅酸盐砖的试制工作。

二、制造硅酸盐砖的原料

制造硅酸盐砖包括原料选配、混合搅拌、压制成型、蒸压或

蒸养等工艺过程。

制造硅酸盐砖的原材料，按其在生产工艺过程中所起的作用，可分为胶凝材料，含硅、铝原料和催化结晶材料。

1. 胶凝材料：主要用生石灰和电石渣，有时采用少量水泥。

2. 含硅、铝原料：即含二氧化硅和三氧化二铝的原料。这类原料种类很多，有天然原料与工业废渣，有活性的与惰性的。现列于表 4-1 中。

含二氧化硅、三氧化二铝的原料分类　　表 4-1

分　类	活　性	惰　性
天然原料	火山岩渣，凝灰岩（目前很少采用）等	砂、砂岩、卵石等
工业废渣	煤渣、粉煤灰、水淬矿渣、重矿渣、工业炉渣等	尾矿、石屑、废型砂等

3. 附加材料：有石膏、水淬高炉炉渣、高分散度的二氧化硅、三氧化二铝、水铝石等，目前使用得最普遍的是石膏。

对上述原材料的技术要求，在BJG13—64部颁标准《蒸养粉煤灰混凝土砌块生产应用规程》（试行）中已规定。其中对惰性材料砂与砂岩质量的技术要求见表 4-2 。

砂与砂岩质量技术要求　　表 4-2

化学成分（%）		均匀分布的粘土（%）	有机杂质	夹杂物	自然含水率（%）	颗粒级配（%）		
SiO_2	K_2O+Na_2O					>1.2毫米	0.15~1.2毫米	<0.15毫米
>65	<2.5	<15	比色试验颜色不应深于标准溶液	不含砾石、树根、草根等	<6%	<10%	>60	<30

尾矿系惰性材料，其矿物组成和化学成分与砂和砂岩接近。因此，对其质量的技术要求可以参照表 4-1。

为了使制出的硅酸盐砖达到所要求的质量标准，对选用各种

原材料的配比非常重要。通常选定配比的原则是：应满足产品质量标准中所规定的各项物理力学性能指标；就地取材，优先利用各种工业废渣；尽量节约石灰、石膏和水泥的掺量，以降低成本；配比中原材料的种类不宜过多，以减少工艺处理环节，相应地减少基建投资；各种原材料是否适用，可通过半工业性试验，并运用优选法决定其用量。通常在决定各种原料的配比时，首先针对制品坯料中所选定的主要含硅铝原料的化学成分（主要是二氧化硅、三氧化二铝的含量）和颗粒级配，以及产品质量要求的指标，确定坯料中的有效氧化钙含量，计算生石灰或电石渣的用量，一般生石灰或电石渣的用量为5～12%。然后计算石膏用量和成型水分，石膏用量为0.5～2%，成型水分为7～27%。

当用尾矿作为硅酸盐砖建筑制品的主要原料，如其粒度级配不符合制品的要求时，则需用旋流器分级脱去一部分细粒矿泥，或掺入一部分粗粒含硅原料，使其颗粒级配符合制品的要求。

尾矿中一般含水分较多，在与其他原料混合之前，需浓缩脱水。

三、利用尾矿制造硅酸盐砖

1．蒸压硅酸盐尾矿砖

北京铁矿建立了一个年产数千万块硅酸盐尾矿砖的砖厂。该矿的选矿是采用干磨干选法，尾矿砖的生产是采用88%的干尾矿与12%的生石灰相掺合，外加5%的成型水分，用8个大气压、温度为150～200°C的饱和蒸气养护，已生产出200标号以上硅酸盐尾矿砖。其生产工艺流程见图4-1。主要生产设备见表4-3。

为了扩大硅酸盐尾矿砖的生产，在河北拟建硅酸盐尾矿砖的砖厂，北京市建筑材料科学研究所和河北某尾矿砖厂筹建处利用河北某铁矿的尾矿试制了五十万块蒸压尾矿砖。其试制的工艺流程及成果如下：

1）原料选配

（1）尾矿：北京铁矿的尾矿（干选尾矿）主要为石英、其

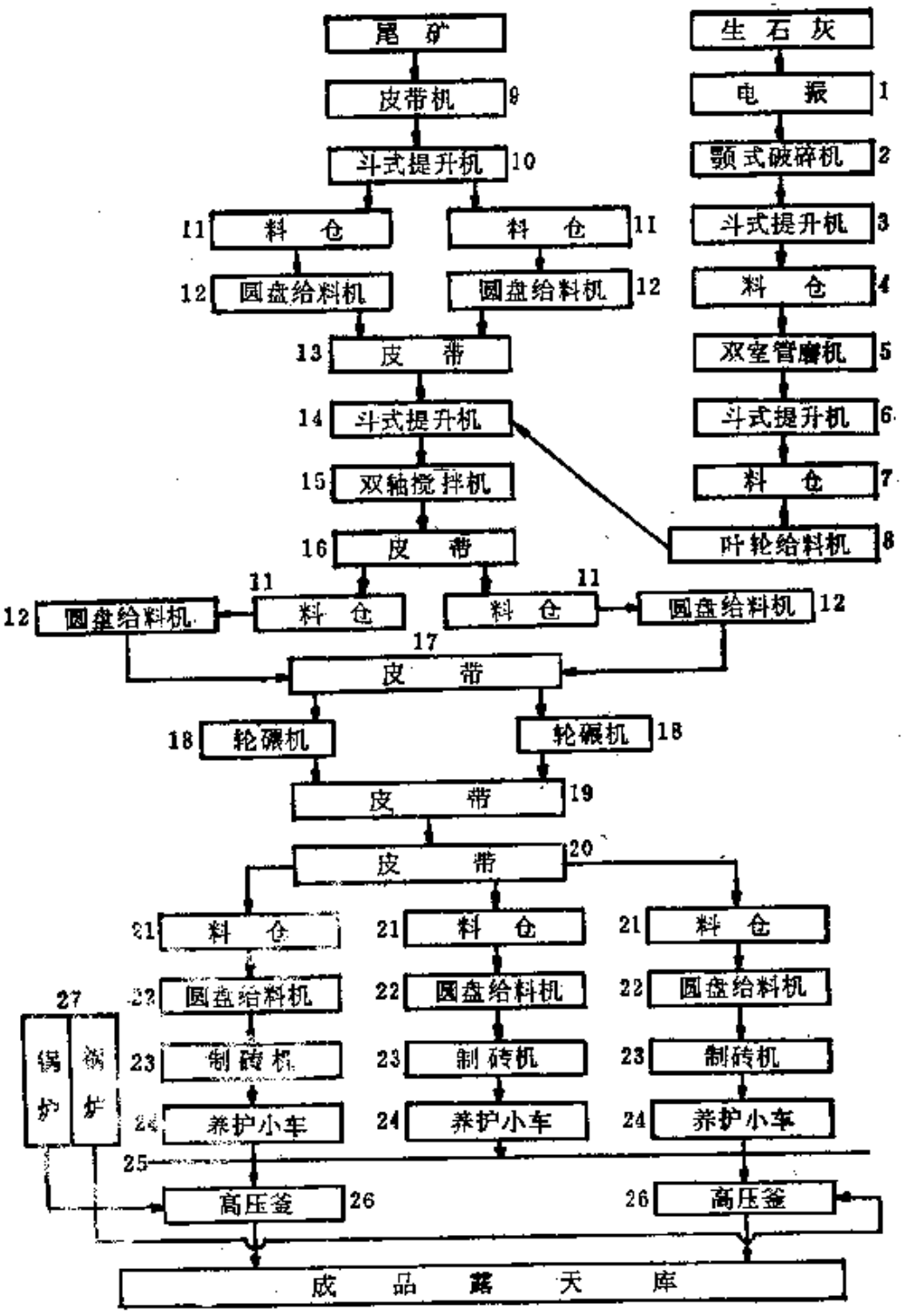


图 4-1 蒸压硅酸盐砖生产工艺流程

1～27为设备编号，详见设备表4-3

次为角闪石、铁闪石、黑云母、绿泥石等矿物组成。其化学成分和颗粒级配见表4-4和表4-5。

设　备　表　　表 4-3

序号	设备名称	规格	生产能力	数量
1	DZ1型电磁振动给料机。粒度150毫米	电功率0.06千瓦	5吨/时	2 台
2	颚式破碎机	φ400×250	7～9 吨/时	
3	D250型斗式提升机	左装，提升高度8.8米		1
4	料　仓	8.7米³		
5	双室管磨机	φ1500×5700	5吨/时	
6	D160 型斗式提升机	左装，提升高度13.2米	3.1 米³/时	1
7	料　仓	40米³		
8	φ280×480 弹性叶轮给料机	左　装	11.6米³/时	1
9	皮带输送机	带宽500毫米，带长 6 米		1
10	D350型斗式提升机	左装，提升高度15.3米	25米³/时	1
11	料　仓	64.8米³		4
12	座式圆盘给料机	φ1500 毫米		4 台
13	皮带输送机	带宽500毫米，带长24米		1
14	D,350型斗式提升机	左装，提升高度15.3米	25米³/时	1
15	双轴搅拌机	φ400×2320	25吨/时	
16	皮带输送机	带宽500毫米，带长20米		1
17	皮带输送机	带宽500毫米，带长30米		1
18	湿式轮碾机	φ1600×450	4.5吨/时	2 台
19	皮带输送机	带宽650毫米，带长30米		1
20	皮带输送机	往返式，带宽 500 毫米，带长15米		1
21	料　仓	6 米³		3 个
22	吊式圆盘给料机	φ400毫米，左装		3 台
23	8 孔圆盘压砖机			3
24	养护小车			100 辆
25	横行小车			2 辆
26	高 压 釜	φ2000×21000		2 个
27	2T三回程快装锅炉			2 台

从表4-5所列数据可以看出，大于1毫米的颗粒为11.32%，小于0.1毫米的颗粒为44.9%，与砂和砂岩的颗粒级配要求接近。而尾矿的可塑性比砂要好。

北京铁矿尾矿化学成分表（%）　　表 4-4

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	烧失量
58.64～64.04	10.23～13.58	13.38～18.85	3.60～5.01	2.76～3.16	1.40～1.57

注：由于选矿厂目前生产不够正常，因此尾矿中含铁量较高，正常生产后，含铁量可降低到10%以下。

尾矿颗粒级配　　表 4-5

筛孔尺寸（毫米）	0.1	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
分计筛余（%）	44.90	28.80	8.50	8.40	2.40	0.52
累计筛余（%）	93.52	48.62	19.82	11.32	2.92	0.52

（2）生石灰：试制尾矿砖所采用的胶凝材料生石灰的技术性能见表4-6。

生石灰的技术性能　　表 4-6

化学成分（%）						消化速度（分）	消化温度（℃）
SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	烧失量		
5.76	0.47	3.50	79.21	1.24	9.40	12.0～14.5	70～75

将生石灰磨细使其粒度通过4900孔筛的筛余量在10%左右。

试制选定各种原料的配合比为

尾矿　　88～92%

生石灰　　8～12%（使坯料中活性氧化钙为7%左右）

成型水分　　7～8%（湿基）

2）试制工艺：

工艺流程如图 4-2 所示。

3）产品质量

按上述原料配比及生产工艺试制的尾矿与粘土砖及其它硅酸盐砖的性能比较如表4-7。

经X-射线衍射及显微照相鉴定，尾矿与石灰发生水化硬化反

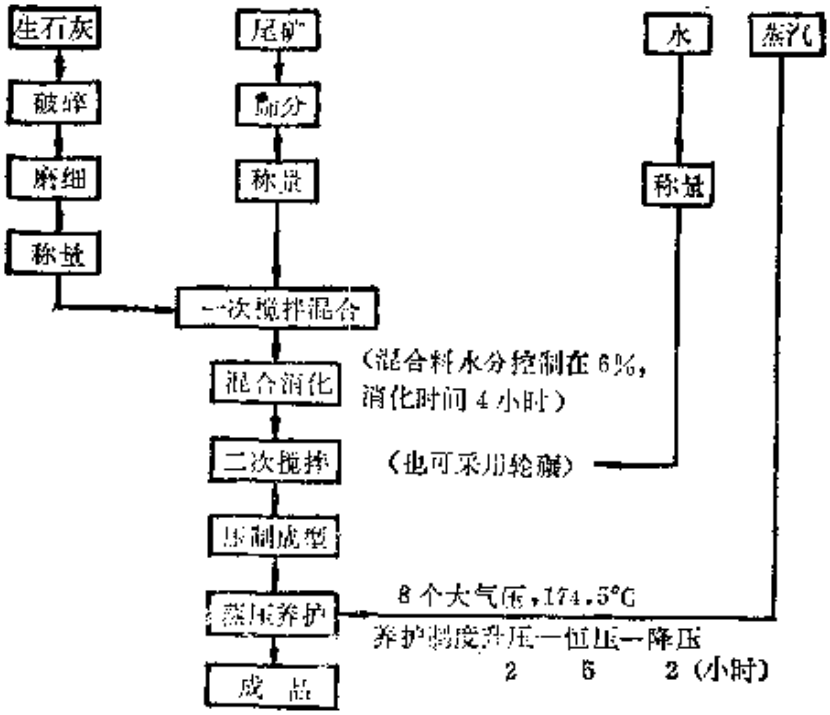


图 4-2 尾矿砖试制流程图

应，在尾矿的表面及与石灰有接触的地方形成了水化硅酸钙，在尾矿中含有石英颗粒的表面及裂缝处生成了硬硅钙石（C_6S_6H）；同时尾矿中的磁铁矿和赤铁矿也发生了析出现象，另外还有透闪石〔$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$〕的结晶体。这些新矿物不规则地充填于原有矿物中间形成网络，把所有的尾矿颗粒连结在一起，使制品产生强度。

通过酚酞矿巢鉴定，没有发现游离的CaO，说明试制的成品基本是成功的。

图4-3是尾矿砖的单偏光100倍照片。照片中的白色部分是石英。在石英周围和石英的缝隙处的束状物是新生成的水化产物硬硅钙石（C_6S_6H）及透闪石〔$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$〕。照片中比较规则的黑状块体是尾矿中磁铁矿或赤铁矿的析出物。

图4-4是尾矿砖X-射线衍射图。

从图中可以看出尾矿砖经蒸压养护后，新生成的硅酸钙水化产物如下：

尾矿砖与粘土砖及其它硅酸盐砖性能比较 表 4-7

指标 \ 砖品种	尾矿砖	粘土砖	灰砂砖	矿渣砖	烟尘砖
抗压强度（公斤/厘米²）	150～200	100～150	150～200	130～150	100
抗折强度（公斤/厘米²）	40～50	20～28	40～55	22～28	22
长期强度	增长	增长	增长	增长	增长
抗冻性	合格	合格	合格	合格	合格
容重（公斤/米³）	1950～2000	1400～1600	1800～1900	2000左右	1500～1600
吸水率（%）	13～16	8～16	15～16	11～16	20～25
软化系数	0.75～0.90	>0.80	0.80～0.90	>0.80	0.70～0.80
导热系数(千卡/米·时·℃)	0.67～0.77	0.5～0.6	0.65～0.68	0.50～0.65	0.45～0.65
收缩（毫米/米）	0.4～0.5	—	未测	1.0～1.2	未测
干湿循环	合格	—	合格	合格	合格
碳化性能	合格	—	合格	合格	全碳化后强度降低20～30%
耐热性能	400℃以下强度不降低	—	400℃以下强度不降低	400℃以下强度不降低	200℃以下强度不降低
耐腐蚀性能	较差	—	较差	合格	差

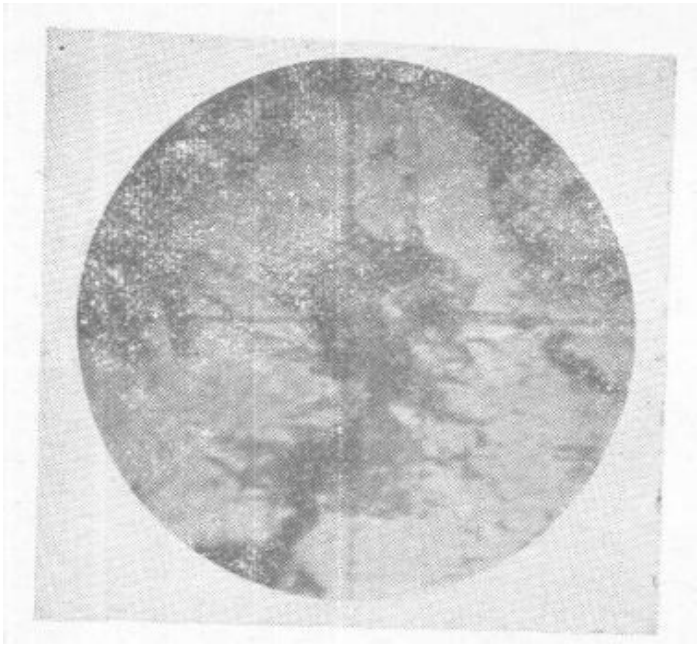


图 4-3　尾矿砖显微结构（单偏光100倍照片）

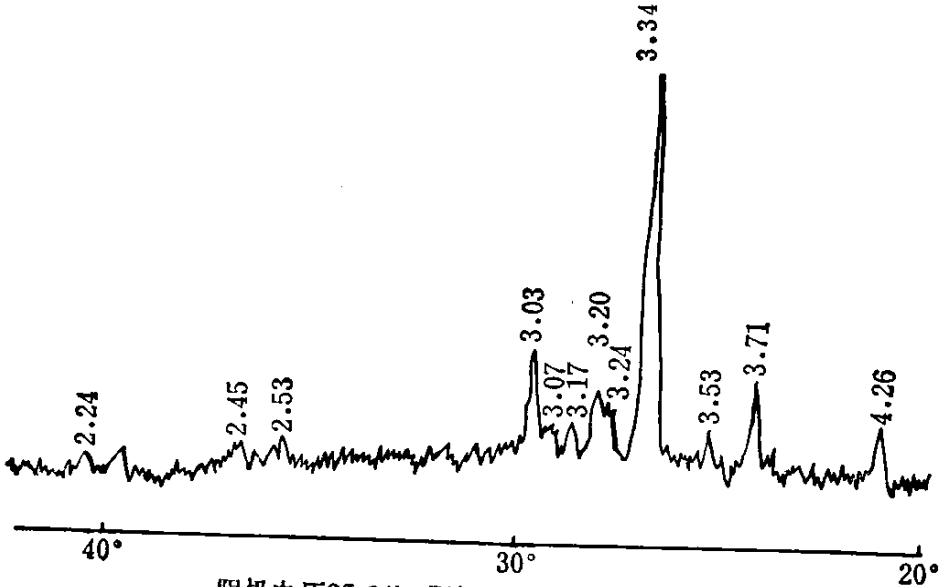


图 4-4　尾矿砖X-射线衍射

$6CaO、6SiO_2、H_2O$的峰值为：3.65,3.23,3.07,2.04,1.95；

$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$的峰值为：8.38，3.27，3.12，2.70；

$xCaO\cdot SiO_2yH_2O(x=1,y=1)$的峰值为:11.5,3.06,2.97,2.80。

在试制中曾将生石灰掺量提高到15%左右，用5个大气压蒸压养护，尾矿砖的标号可达100～150号左右。此外，如用电石渣为

原料代替生石灰，采用8个大气压蒸压养护，尾矿砖的标号也可达到100～150号左右。

从表4-7中可以看出，尾矿砖的技术性能不次于灰砂砖，矿渣砖，烟灰砖。与粘土砖比较，除容重较大，吸水性较强外，其它技术性能比粘土砖好，且色泽美观。因此，在建筑工业厂房及公共建筑物时，除基础和勒脚以下等经常接触地下水及流动水的部位不宜采用尾矿砖外，其它部位均可采用。此外，尾矿砖不宜用于长期高于400°C的部位，因为温度达到500°C时$Ca(OH)_2$和含水硅酸钙即行分解，温度达600°C时，尾矿砖中的SiO_2即发生体积膨胀，引起砖的破坏。

2. 蒸养硅酸盐尾矿砖

冶金部建筑研究院等单位采用南芬铁矿的尾矿用常压养护试制出硅酸盐尾矿砖，其结果如下：

1）原料

尾矿砖所用的原料为：尾矿粉、粉煤灰、生石灰和石膏。其化学成分如表4-8。

试制尾矿砖原料化学成分　　表 4-8

原料名称	化学成分（%）								
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	Fe_2O_3	SO_3	Fe	S
尾矿粉	72.16	14.82	1.63	3.25	0.95	—	—	0.74	0.27
粉煤灰	60.94	72.13	3.92	2.20	0.53	8.76	0.42	—	—
生石灰	4.04	0.75	85.77	1.71	—	0.96	—	—	—
石膏	0.67	—	37.85	—	—	—	54.33	—	—

原料配比：

尾矿粉	65～67%
粉煤灰	15～20%
生石灰	8～12%
石膏	3%

因尾矿为惰性材料，在常压养护下，尾矿中掺入活性材料粉煤灰后，在石灰石膏的激发下，粉煤灰中的活性氧化硅、活性氧

化铝与石灰中的有效氧化钙进行水化反应，生成具有强度的水化硅酸钙和水化铝酸钙，使砖具有良好的物理性能。

2）试制工艺

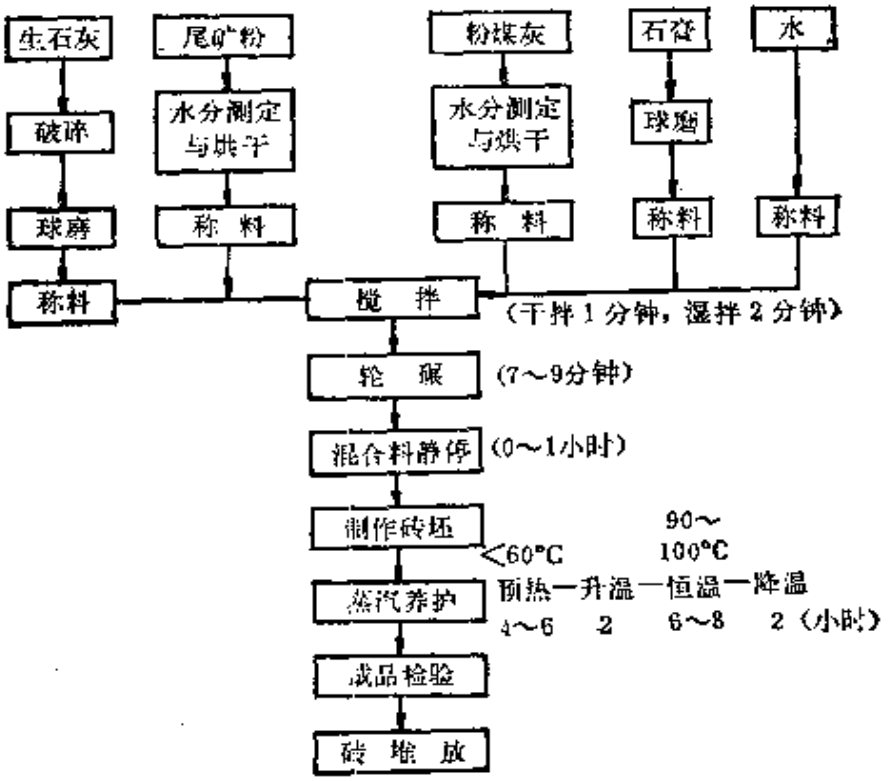


图 4-5 蒸养硅酸盐尾矿工艺流程

尾矿砖与其它砖类技术性能比较 **表 4-9**

指标 \ 砖品种	尾矿砖	机制红砖	矿渣砖	粉煤灰砖
容重（公斤/米³）	1600～1700	1400～1600	2000～2100	1700～1800
吸水率（%）	10～19	8～16	9～10	20～25
软化系数	>0.8	>0.8	0.946	0.7～0.81
导热系数（千卡/米·小时·度）	0.49～0.52	0.5～0.6	0.42～0.5	0.451～0.655
抗压强度（公斤/厘米²）	150～250	100～150	140～170	130～165
抗折强度（公斤/厘米²）	24～45	20～28	24～28	20～38
冻融强度损失（%）	<25	>25	<25	<25
后期强度（%）	增长	稳定	增长	三年增长 19～30
碳化强度损失（%）	<25	—	增长	<25

原材料的准备、搅拌、轮碾、成型、养护和成品检验等的工艺流程如图 4-5 所示。

3）试制产品质量

试制蒸养硅酸盐尾矿砖的技术性能与机制红砖、矿渣砖、粉煤灰砖的比较见表4-9。

第二节　加气混凝土

一、概述

加气混凝土是一种轻质多孔建筑材料、具有容重轻、保温效能高、吸音好和可加工等优点。它可以制作配筋构件(如墙板、屋面板、楼板)和无筋砌块、保温块、保温管等，几年来这种产品在工业及民用建筑中得到了较广泛的应用。

北京、天津、华北和东北等地区，用加气混凝土建成的建筑物有：车间、发电厂、冷藏库、住宅、学校、食堂、浴室以及商店等，其造价比砖墙建筑低15%左右。

这种新型建筑材料取材容易，不仅用砂子配矿渣和水泥可以制作，用尾矿配矿渣和水泥也可制成。辽宁工业建筑设计院、鞍山矿渣砖厂等单位利用大孤山铁矿的尾矿生产出蒸压加气混凝土砌块与板材，建成了两层和三层试点建筑物，建筑面积共计1200米^2，经初步测定：产品的出釜强度可达25～30公斤/厘米^2，绝对干容重为550～650公斤/米^3，干燥状态的导热系数为0.1千卡/米·时·度，抗冻性合格。现将试制情况介绍如下。

二、试制原料

生产加气混凝土的主要材料为水泥、矿渣和砂。其他原料有发气剂：铝粉；气泡稳定剂：油酸、三乙醇胺；调节剂：纯碱(碳酸钠)、硼酸钠、菱苦土、水玻璃；钢筋及钢筋防腐涂料：生石灰、石油沥青、苯酚、甲醛、烧碱(氢氧化钠)、水泥；辅助材料：塑料卡、铝丝钩、涂模油。对上述材料的技术要求，北京加气混凝土厂根据生产实践提出了各项指标。其中对砂的技术要求是：

SiO_2	70～80%
Na_2O	<2%
K_2O	<3%
Cl^-	<0.02%
烧失量	<5%
有机酸	<3%
不含有石子、粘土杂质	

在加气混凝土中砂的用量约占全部材料用量的45%，如果矿山的尾矿化学成分符合上述要求时，可用以做加气混凝土的配料。

辽宁工业建筑设计院、鞍山矿渣砖厂用尾矿试制了加气混凝土，其试制所使用的各种原料如下：

1．尾矿粉

大孤山铁矿尾矿粉的主要矿物为石英，尾矿比重2.92，松散容重1516公斤/米^3，化学成分见表4-10。

大孤山尾矿粉化学成分 **表 4-10**

化学组分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	烧失量
含量 (%)	69.52	1.32	18.05	2.80	微	0.25	0.20	4.16

2、水泥

采用大连水泥厂500号普通水泥与小屯水泥厂500号矿渣水泥。其化学成分见表4-11。

水泥的化学成分(单位：重量%) **表 4-11**

水泥品种	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	烧失量
小屯500号矿渣水泥	25.33	4.36	5.54	54.03	4.47	—	—	3.37
大连500号普通水泥	21.92	3.51	4.61	59.98	3.59	1.34	—	3.70

使用小屯500号水泥时，料浆发气时间稍晚，浇注过程较易控制，但制品强度略低。

3．矿渣

采用鞍钢水淬高炉矿渣，其碱性率为1.06，比重2.92，松散容重1130～1245公斤/米^3，化学成分见表4-12。

水淬高炉矿渣化学成分　　表 4-12

化学成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	MnO	FeO	烧失量
含量（%）	40.64	6.77	0.84	42.98	6.18	0.15	1.07	0.01

4．发气剂

利用哈尔滨101厂FLU$_3$铝粉。

将铝粉加入于40°C左右的料浆中，2～3分钟后开始发气，4～8分钟后发气最强烈。产生的氢气以近似圆球形的气泡分散在料浆中，使料浆体积膨胀，造成制品的多孔结构。铝粉应具有较高的活性铝含量和要求的颗粒细度。

5．气泡稳定剂

气泡稳定剂是由花生油酸和三乙醇胺配合而成的皂类表面活性物质，通称为可溶油。它的作用在于降低料中气泡表面张力，提高气泡膜的强度，并使气泡小而均匀，能经受外力的作用，从而改善料浆的浇注稳定性。

6．调节剂

一般在生产加气混凝土过程中，需要在料浆中加入一定的调节剂，以使料浆获得良好的浇注稳定性。常用的调节剂有：纯碱（碳酸钠）、硼砂、水玻璃、菱苦土、废料浆。

在生产中，纯碱和硼砂是先按一定比例配成碱液而后加入料浆的。水玻璃则视水泥品种及浇注情况而决定是否加入。

在生产加气混凝土板材时，为了消除垂直裂缝，需要在混合物中加入一定量的菱苦土。

利用废料浆不但节约原料，而且可以改善和稳定料浆性能，并使膨胀后的坯体周围与中心的温度差减少。此外，废料浆有很强的碱性，可以减少碳酸钠的用量。实际使用时，系将切割下来的

废料加水搅拌成稀浆，然后加到混合料中，废料浆的比重控制在1.25～1.30公斤/升之间。

三、试制工艺

一般生产加气混凝土需要经过原料加工制备、钢筋网片加工、防腐涂料配制、钢筋网片组装、配料浇注、切割、蒸压养护、拆模、板材铣磨及修补等十道工序。鞍山矿渣砖厂试制了表4-13中七种规格产品。

试制工艺流程见图4-6。

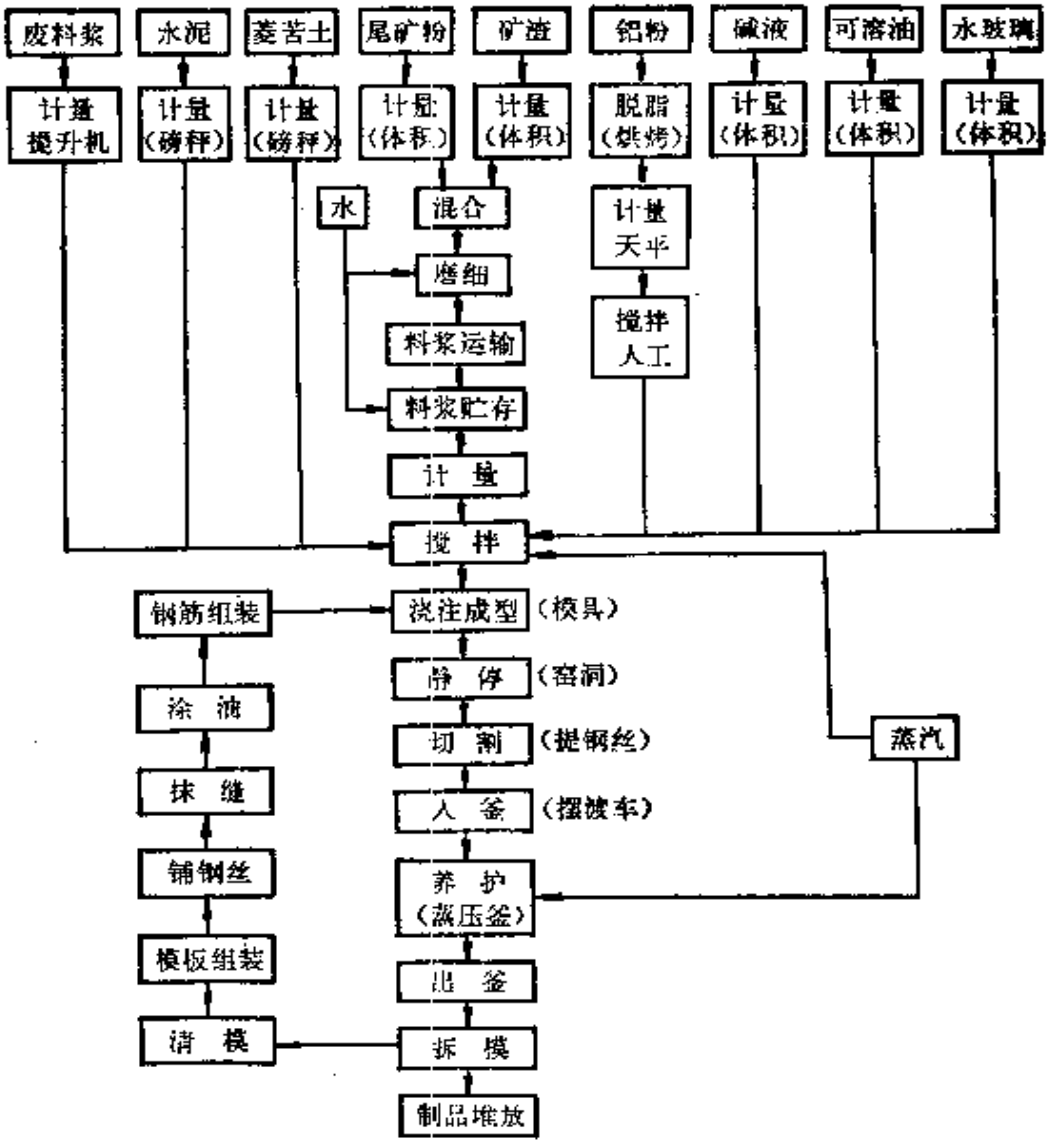


图 4-6 生产工艺流程

鞍山矿渣砖厂试制加气混凝土的产品规格　　表 4-13

规格 \ 品种	产品规格						
	砌块	屋面板	屋面板	屋面板	屋面板	屋面板	楼板
长（毫米）	600	3300	2900	2800	1800	1600	3300
宽（毫米）	250	600	600	600	600	600	600
厚（毫米）	150	150	150	150	150	150	150

1．原料加工制备

1）原料磨细

将尾矿粉、矿渣按一定的比例混合，加水进行湿磨。混合料出磨细度控制在4900孔/厘米^{2}筛余量5～8%。出磨料浆比重0.03～0.05公斤/升。

2）铝粉脱脂

铝粉颗粒表面带有一层硬脂酸薄膜，具有憎水性，影响发气反应，在使用前必须进行脱脂处理。脱脂采用加热烘烤法。检查脱脂是否完全可用一容器盛水，将少量铝粉放在水中搅拌，如能完全沉落，表示铝粉脱脂完全，否则说明脱脂不好。

3）可容油配制

可容油的配方(体积比)是：油酸：三乙醇胺：水＝1：3：36。

将40～50°C的温水，加入容器中，然后依次加入三乙醇胺、油酸进行搅拌，直至物料全部溶解。

4）碱溶液配制

配1米^{3}碱液的原料用量：纯碱360公斤；硼砂45公斤；水950升。

将纯碱硼砂按配比放入缸内，然后按量加水，在不断搅拌下，通入蒸气加热，使其全部溶解，水温应保持在80°C以上。

碱液浓度及配合比正确与否，对浇注的稳定性影响很大。因此要经常进行检查，并注意在使用前要搅匀，防止在贮存过程中结晶析出。

2. 配料浇注

1）原料配合比

浇注一模(1.88米³)的原材料用量见表4-14。

原 材 料 用 量 **表 4-14**

项目名称 / 数值 / 单位		原料									
		水泥	矿渣	尾矿粉	废料浆	水	铝粉	碱液	可溶油	水玻璃	菱苦土
		公斤	公斤	公斤	升	升	克	升	升	毫升	公斤
容重(公斤/米³)	550（砌块）	210	315	473	105	494	800～760	20～22	1.25	15～50	
容重(公斤/米³)	600（板）	250	315	473	105	494	760	20～22	1.25	15～50	19

2）加料顺序

（1）用手推车将磨好的矿渣和尾矿粉混合料浆运至地下贮料罐中，并进行搅拌，以防物料沉淀。冬季生产时应作适当保温。

（2）从贮料罐中把混合料浆注入浇注车内，此时开动搅拌机，并按要求加温料浆。

（3）把备好的废料浆从另一贮料罐中按量注入浇注车内。

（4）料浆达到规定温度后，加入水泥、菱苦土与可溶油继续搅拌。

（5）加入碱液、铝粉和水玻璃，继续搅拌。最后放料浇注。

3）浇注工艺参数

浇注料浆比重	1.62～1.64公斤/升
废料浆比重	1.25～1.30公斤/升
浇注料浆温度	40～43°C
加入水泥后搅拌时间	3.5分钟
加入铝粉后搅拌时间	15～20秒

4）浇注中的工艺问题

在试制初期，由于缺乏经验，没有掌握好浇注料浆的特性，所以常出现坯体收缩、下沉、料浆胀不满模以及沸腾塌陷等现

象，影响制品质量。

（1）收缩下沉

料浆膨胀后0.5～1小时，坯体产生收缩和下沉，轻者下沉0.3～1厘米，严重的下沉4.0～5.0厘米。使坯体内部气孔破坏，制品容重增大，强度降低，尤其当水泥品种改变时，这种现象更易出现。

分析产生这种情况的原因：

①料浆温度过高，铝粉发气快(可以适当降低料温或加入少量水玻璃，延缓铝粉发气时间)。

②料浆过稀，影响了水泥稠化速度。

③水泥品种改变，引起铝粉发气速度随之变化。

④碱液浓度小，水泥稠化缓慢。

（2）塌模

在料浆膨胀过程刚要结束时，坯体局部或整个塌陷；或者是在料浆膨胀结束后0.5～1小时内，坯体整个塌陷，造成废品。

分析产生这种情况的原因：

①抹模缝的灰浆太软，模缝跑浆，这是造成坯体局部塌陷的主要原因。应注意灰浆配比的控制，并掌握好抹缝的时间，保证模缝不跑浆。在膨胀过程中如发现漏浆，须及时用干灰堵住。

②料浆太稀，稠化慢。当发气结束时，浆体仍未稠化，致使坯体中、下部气孔薄壁支持不住上部的压力而塌陷。调整料浆稠化速度及控制铝粉发气速度，可消除此现象。

③碱液用量过大，引起料浆沸腾(翻花)而塌陷。

（3）不满模

料浆膨胀后不满模也是造成废品的一种原因。尤其是在生产板材时，因坯体不够高，致使钢筋外露，板材无法使用。

分析产生这种情况的原因：

① 料浆稠化过快。对此可适当提高料浆的水料比。

② 水玻璃用量过大，推迟了铝粉发气时间。根据经验，当采用小屯500号矿渣水泥时，每模（1.88米^3)料浆用水玻璃10～20

毫升；若使用大连500号普通水泥，水玻璃用量为50～100毫升，浇注均较正常。

③ 因模缝跑浆造成不满模。

④ 浇注车放料口堵塞，致使料浆不能完全注入模具内。

⑤ 料浆温度过高，铝粉发气过早，使模内气泡被破坏。

⑥ 模具不平，两端高度不一，料浆浇注后，从一端流出模外，造成另一端不满模。

综合上述，在浇注过程中，欲保证料浆的稳定性，使坯体获得良好的质量，根本的问题是如何使铝粉发气速度与料浆稠化速度相适应。

3．坯体静置与切割

料浆浇注完后，通常在25°C以上的室温中经5～8小时的静置，方可进行切割。如果坯体太硬，切割困难；坯体太软，经蒸压后切割缝会重新粘结。

坯体的切割采用预埋钢丝法。此法设备简单，操作容易，但效率低，尺寸偏差大，不易保证质量，预埋钢丝法的操作要点是：

1）铺设预埋钢丝时，应按顺序先纵后横。

2）抹模缝的灰浆配比要适当，以免钢丝抽断。通常夏季采用：矿渣50%；尾矿粉50%。冬季采用矿渣70%；水泥30%。

3）切割时靠尺要对准刻位，以免制品尺寸偏差。

4）切割拉钢丝时，用力要均衡，以免钢丝拉断。

5）一般掌握在抹模缝后6～8小时开始浇注为好。若时间长，抹模缝灰浆已硬化，钢丝不易抽出；时间过短，模缝易跑浆。

4．蒸压养护

蒸压养护是在ϕ1.95×21米蒸压釜内进行。

蒸压制度如下：

抽真空（450～600毫米汞柱）	15～20分钟
升压（0→11表压）	4～6小时
恒压（11表压）	10小时
降压（11～0表压）	2～3小时

四、试制产品的物理力学性能

1. 主要物理力学性能（表4-15）

主要物理性能　　表 4-15

项目 \ 设计容重（公斤/米³）			700	600	500	400	试件尺寸（厘米）
实际烘干容重（公斤/米³）			844	720	570	456	15×15×15
抗压强度（公斤/厘米²）			56.3	38.0	26.1	19.6	15×15×15
抗拉强度（公斤/厘米²）			4.0	3.6	2.2	1.7	15×15×15
抗剪强度（公斤/厘米²）			19.6	16.2	11.7	8.2	4×4×16
抗折强度（公斤/厘米²）			25.1	18.8	13.9	10.0	4×4×16
钢筋粘结力（公斤/厘米²）			—	—	11.2	—	10×10×20
棱柱强度（公斤/厘米²）			43.2	28.6	23.1	—	10×10×30
静弹性模量（公斤/厘米²）			2.57×10^4	2.12×10^4	1.39×10^4	1.1×10^4	10×10×30
软化系数			0.68	0.80	0.69	0.85	15×15×15
干燥收缩（毫米/米）			—	—	1.04～1.87	—	4×4×16
导热系数（千卡/米·小时·度）			0.162	0.143	0.103	—	5×20×20
抗冻性	15次冻融后	重量损失（%）	1.88	1.22	2.44	2.08	10×10×10
		强度损失（%）	无损失	5.31	无损失	4.39	
		外观	完好	完好	轻微掉边	完好	
	50次冻融后	重量损失（%）	0.4	0.6			10×10×10
		强度损失（%）	2.1	无损失	未作试验	未作试验	
		外观	完好	完好			

注：1. 测定各种标号的试件均预先在105℃下烘干至恒重。

2. 在50±1℃、相对湿度31%条件下，收缩值为0.79～1.07毫米/米²。

2. 吸水率和吸水速度

加气混凝土出釜后自然含水率随季节和天气变化而有所不同，一般在17.4～28.5%之间。它的饱和吸水率高达57.3～71.9%

（见图4-7）。饱和吸水后制品抗压强度会显著下降。因此加气混凝土制品不宜用于地下建筑和潮湿环境。

加气混凝土的吸水速度比矿渣砖和红砖均慢（见图4-8），在砌砖时要注意这些性能。

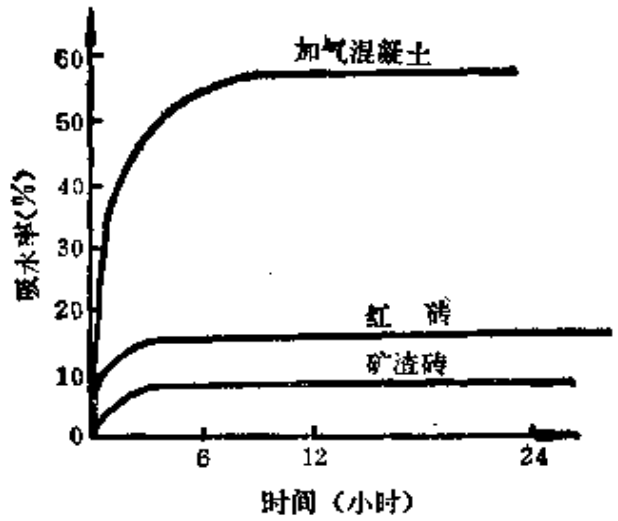


图 4-7　吸水率曲线图

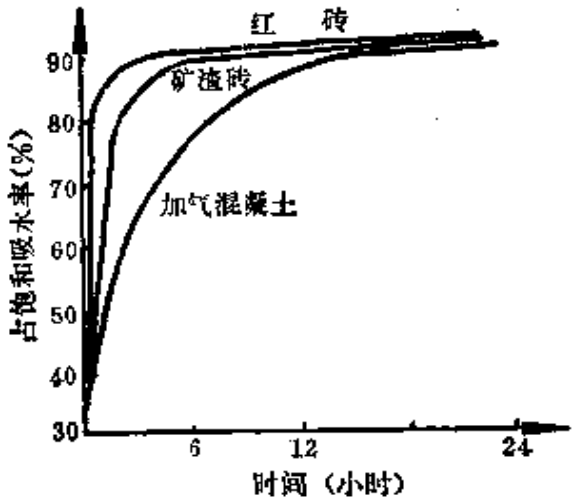


图 4-8　吸水速度曲线图

3．砌体强度

用130×100×15厘米的砌体，在200吨长杆压力机上进行了砌体强度试验，砌体是轴心受压。试验时采用分级加荷，每级2吨，待第一道裂缝出现以后，连续加荷至破坏。试验结果见表4-16。

砌体强度试验结果 表 4-16

砂浆强度（公斤/厘米²）	砌块立方强度（公斤/厘米²）	砌体尺寸为130×100×15厘米		$\frac{R_{初裂}}{R_{破坏}}$
		初裂强度（公斤/厘米²）	破坏强度（公斤/厘米²）	
45.8	23.8	10.35	13.83	0.76
28.9	23.8	8.84	11.86	0.76

4. 板材荷载试验

将板材支承在两支座上，支承点距板端面为7.5厘米或10厘米，板的有效跨度为315厘米或310厘米，在板的两支承点上部和跨中下部分别安设百分表。试验时分级加荷，每级加荷为标准荷载的20%，每次加荷后10分钟读数，加至标准荷载时停30分钟读数。以后分两次卸荷，测其残余变形。随后分两次再加至标准荷载，继续按上述步骤加荷至破坏。记载出第一条裂缝时荷载和破坏荷载。最后计算标准荷载下的总挠度及相对变形。试验数据见表4-17。

板材荷载试验结果 表 4-17

板材种类	标准荷载时			出现第一条裂缝时载荷（公斤/米²）	安全系数	设计标准载荷（公斤/米²）	板自重（公斤）	板材水分（%）	有效跨度（厘米）	破坏特征
	残余变形（毫米）	总挠度（厘米）	相对变形*（f/l_0）							
楼板(1)	0.551	1.1279	1/275	900	2.42	300	231.5	23	310	受压区混凝土破坏
楼板(2)	0.329	0.7861	1/401	1140	2.96	300	245.0	28.4	315	支座端混凝土破坏
屋面板	0.376	0.9336	1/337	917.5	3.28	200	218.0	24.5	315	同上

* l_0是板材计算长度（有效跨度）；f 是标准荷载下的变形与板自重变形之和。

试验结果表明

1）加气混凝土板材，其构件主要性能（强度和刚度）均能达到设计要求（屋面板 $l_0/f \geqslant 300$、安全系数≥2.3）。在标准荷载下没有出现裂缝，且残余变形很小。

2）板材受荷后出现的裂缝较均匀，基本上是轴对称。而且破坏时裂缝宽度均较小(未超过1毫米)。这说明产品具有较好的抗裂性。

3）板材的挠度随荷载的增加近似成正比，看不出屈服现象。其原因可能是加气混凝土本身强度较低，且配筋量较高，在钢筋应力未达到屈服点时，受压区及两端的混凝土已经破坏。

4）受力筋保护层厚度对板材性能影响较大，所以在生产板材时一定要按设计要求保证保护层的厚度。

5．墙体保温性能

结合辽宁地区的气候条件，在室内进行了墙体保温性能的试验工作。

试验结果表明，当加气混凝土含水率为10%左右，墙厚为15、20、25厘米时，其总传热阻应为1.02、1.19、2.92米^2·小时·度/千卡。

因此建议辽宁地区三层及三层以上的住宅建筑的墙厚以15～20厘米左右为宜。

由于普通水泥浆有较大的导热系数，因此墙体灰缝处易结露，尤其当灰缝内灰浆不饱满或灰缝过大，这种现象更易出现。所以曾试用膨胀珍珠岩砂浆与加气混凝土细粒砂（其体积比为1：1.35，实际标号为6.7～22.2公斤/厘米^2）代替普通水泥砂浆。试验结果表明：采用保温砂浆后，砌体内表面温度可提高2～3°C，因此，采用保温砂浆对提高加气混凝土墙体的保温性能是有效的。

在一般情况下，房内墙角处也易结露。在同一气温条件下，墙角内表面温度比墙体内表面温度降低4～5°C(普遍低于露点)。因此，建议在内墙抹灰的同时，于墙角处抹一层保温砂浆（最好采用膨胀珍珠岩砂浆），使墙角圆化或钝化，这样可以收到良好的保温效果。

加气混凝土房屋的构造方法对其保温性能也有影响。如钢筋混凝土圈梁、门窗、过梁等节点处理不好，也易出现结露，在东北地区尤为突出。因此在设置钢筋混凝土圈梁时，应注意在外侧

或内侧砌筑加气混凝土砌块。

为了进一步提高加气混凝上房屋建筑的耐久性和墙体保温效能，外墙面宜作饰面处理。

五、技术经济分析

1972年用蒸压尾矿粉加气混凝土砌块与板材建成试点建筑物1284米^2。

1．试点建筑的设计与施工

试点建筑建于鞍山市矿渣砖厂内，除基础用矿渣砖外，地面以上的内外墙体、楼板与屋面板全部采用加气混凝土制品。开间3.3米，进深4.8～5.8米，层高3.2米。

1）基础工程：基础深为1.4米，矿渣砖砌筑，带型基础，50号水泥砂浆砌筑。

2）墙体结构：砌体材料用抗压强度为25～30公斤/厘米^{2}的加气混凝土砌块，规格为15×25×60厘米。砌体强度为12～14公斤/厘米^2。内间墙及山墙承重，前后围壁不承重。内间承重墙及楼梯间承重墙厚为25厘米，50号水泥砂浆砌筑。在各转角处，每隔三层砌块加ϕ4钢筋拉条一根。并在每层楼的纵横墙上设置钢筋混凝土圈梁，梁高15厘米，梁宽与墙体同。圈梁的作用除增加刚度外，更重要的是增加墙身局部耐压强度。北侧外墙与窗台下外墙做饰面，其余部位勾缝。

3）粉饰工程：北侧外墙的踢脚线、勒脚等均用50号水泥砂浆打底，表面抹100号水泥砂浆。内墙面用砂子灰打底并找平，表面抹麻刀白灰压光。因加气混凝土吸水较慢，因此在粉饰前先在墙体上浇2～3遍水。

4）屋面工程：为卷材防水，一纸二毡四油，与一般作法相同。

5）门窗框用4英寸钉固定。窗户均为单层玻璃。

6）屋面板铺设：屋面板两端直接搁在圈梁上（用砂浆找平）。因板材未裁口，灌缝较困难，故每隔2～3块板，浇筑一根板间小梁以增加板的刚度。

技术经济效果　　表 4-18

比较项目	加气混凝土结构建筑	混合结构建筑	前者占后者的（%）	说明
基础				
砌体量	80.6米³	352.4米³	22.9	加气建筑用矿渣砖，实际用料计；混合建筑用石材，按0.45米³/米³计
重量	169.3吨	846.7吨	20.1	矿渣砖2.1吨/米³；石材2.4吨/米³
造价	2334元	8432元	27.7	矿渣砖30.2元/米³；石材23.9元/米³
墙砌体				
外墙	150米³	253米³	60	加气建筑山墙厚25～30厘米前后墙厚15厘米，混合建筑外墙厚37厘米
外墙重	119.8吨	535.5吨	22.8	加气墙0.8吨/米³，砖墙2.1吨/米³
内墙	196.5米³	192米³	100.2	加气建筑内墙厚25厘米，混合建筑内墙厚24厘米
内墙重	157吨	383吨	41.8	
造价	12128元	13439元	90	加气砌块35元/米³，矿渣砖30.2元/米³
板材				
体积	105米³	98.6米³	106	加气板厚15厘米，钢筋混凝土空心板厚12厘米
重量	65吨	246.5吨	26.5	加气板1.62吨/米³，钢筋混凝土空心板2.5吨/米³
造价	6825元	12122元	56.3	加气板65元/米³，钢筋混凝土空心板127元/米³
综合比较				
总重量	511.4吨	2012吨	25.2	基础、墙身、板材的重量
按单位建筑面积重量	0.66吨	2.26吨	25	
总体积	532米³	896米³	56.7	基础、墙身、板材的体积
总造价	21286元	33993元	62.6	基础、墙身、板材的造价

7）挑檐的做法是，将加气混凝土屋面板沿屋面方向伸出30厘米，并在板下抹一道砂浆以利滴水。但据实际观察，由于伸出长度太短，因此当风级较大时，雨水容易滴落在墙面上，甚至渗透进墙内。

2. 技术经济比较

由于加气混凝土制品重量轻，因此大大减轻了建筑物自重，显著降低工程造价。从表4-18可知，加气混凝土试点建筑物总重量（包括基础、墙身、板材等）仅为普通混合结构建筑的25%。若按每平方米建筑面积的重量计，前者为0.65吨，后者为2.26吨。试点工程造价(据粗略计算)，仅就基础、墙身、板材而言，其造价约为普通混合结构建筑的62.6%。

参 考 文 献

〔1〕硅酸盐建筑制品厂工艺设计，辽宁工业建筑设计院，中国建筑工业出版社，1975年7月。

〔2〕多孔混凝土制品生产工厂，И.Т.库得略雪夫、Б.Н.卡乌夫曼、М.Я.克里维次克、П.М.罗仁弗得合著，建筑工程出版社，1957年3月。

第五章　利用尾矿制造其他建筑材料

第一节　铸　　石

一、概述

铸石是硅酸盐的结晶材料之一，是一种新型工业材料，性能如表5-1所示，其耐磨性比锰钢高5～10倍，比一般碳素钢高10多倍；耐腐蚀性比不锈钢、铅和橡胶高得多，除氢氟酸和过热磷酸外，其耐酸碱度几乎接近百分之百。此外，铸石还具有良好绝缘性和较好的机械性能。在一定条件下，它是钢铁、有色金属、合金材料、橡胶等较为理想的代用材料。可用作风力和水力输送管、槽和贮酸、碱槽的衬板、衬管等。

目前我国已有三十多个铸石厂生产板材、管材、溜槽和设备

铸石的主要性能　　表 5-1

项　　目	单　　位	数　　据
容　　重	克/厘米^3	2.8～3.0
抗压强度	公斤/厘米^2	4700～5500
抗折强度	公斤/厘米^2	600～700
抗拉强度	公斤/厘米^2	180～290
硬　　度	莫氏硬度	7～8
抗冲击强度	公斤·厘米/厘米^3	49～86
磨损率	克/厘米^2	0.30～0.77
热稳定性	100℃水冷至13℃（或180℃至常温）	5次（3次）
热膨胀系数	1/℃	24～100℃ 6.4×10^{-6} 100～630℃ 8.57×10^{-6}
耐酸碱度	20%H_2SO_4	99.54%
	20%HCl	99.4%
	20%HNO_3	99.5%
	20%NaOH	99.16%

的衬里，耐酸粉等四千余种，为国内五百多个企业提供了铸石制品，节约代用各种金属材料近百万吨，解决了生产中不少问题。

国内外除利用辉绿岩、玄武岩、角闪石生产铸石外，目前还利用工业废渣或选厂尾矿进行生产和试制铸石制品。

二、制造铸石的原料

铸石是利用天然基石和工业废渣经配料熔融、浇铸、结晶、退火等工序制成。

铸石的一般化学成分是：

二氧化硅（SiO_2）	47～49%
三氧化二铝（Al_2O_3）	15～21%
三氧化二铁和氧化亚铁（Fe_2O_3+FeO）	14～17%
氧化钙（CaO）	8～11%
氧化镁（MgO）	6～8%
氧化钠和氧化钾（Na_2O+K_2O）	2～4%
三氧化二铬（Cr_2O_3）	1%左右

铸石的主要原料为辉绿岩、角闪石、玄武岩，附加原料为石灰石、白云石、蛇纹石、菱镁矿、萤石等，其作用为调整铸石的化学成分，铬铁矿或铬铁渣作结晶剂。

按大连辉绿岩铸石厂的生产经验，对原料的要求如下：

辉绿岩：	SiO_2	45～51%
	$Al_2O_3+TiO_2$	15～20%（TiO_2 5%左右）
	Fe_2O_3	12～17%
	CaO	9～11%
	MgO	4～7%
	K_2O+Na_2O	<3%
角闪石：	SiO_2	46～49%
	$Al_2O_3+TiO_2$	6～12%
	Fe_2O_3	8～12%
	CaO	5～12%
	MgO	18～25%
	SO_3	0.13～0.2%
白云石：	MgO	>18%
	CaO	>30%
萤　石：	CaF_2	>85%
铬铁矿：	Cr_2O_3	>10～20%
	SiO_2	<10%

因此，对于尾矿中含石英、角闪石、橄榄石、辉石、斜长石、蛇纹石、白云石、方解石、萤石等的矿物组分则可考虑作为铸石的原料，进行铸石制品的试制工作。

但不论那种原料制造铸石，各种原料配合后的化学成分应符合铸石的一般化学组成之要求，不可过高或过低，否则，影响制品质量。

三、利用尾矿试制铸石

1. 利用铁尾矿试制铸石

国外某企业利用77%铁尾矿（主要矿物为角闪石）为主要原料，附加20%石英砂和3%的铬铁矿制成铸石。铁尾矿和铸石的化学成分见表5-2。

铁尾矿和铸石化学成分（%）　　表 5-2

项目 \ 化学成分	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O+Na_2O
铁尾矿	44～46.7	18.7～19.7	6.3～8.4	11.8～14.9	0.6
铸　石	49～53	10～15	12～16	8～11	1.5～2.0
项目 \ 化学成分	FeO	Fe_2O_3	TiO_2	Cr_2O_3	MnO
铁尾矿	3～6	4.0～6.3	1.0	—	0.12～0.23
铸　石	10～15	2～3	未化验	1～1.5	未化验

制成的铸石用显微镜观察其矿相组成为：3～5微米的铬铁矿菱面体的结晶核心，铸石成隐晶结构，颜色褐色，是辉石骸晶。制品的物理和化学性能如下：

抗压强度：　1998～2683公斤/厘米²

抗折强度：粗组织结构　300～400公斤/厘米²

　　细组织结构　593～649公斤/厘米²

耐磨性：粗组织结构　0.01～0.02克/厘米²

　　细组织结构　0.004～0.006克/厘米²

耐酸性：良好

我国重庆市建筑科学研究所利用綦江铁矿重选尾矿，加配重

庆大溪沟页岩及重庆东风化工厂生产红矾钠的下脚料铬渣试制成铸石。

1）配料：原料的化学成分及配比见表5-3

铁尾矿铸石原料配比　　表 5-3

	原料种类	配比(%) \ 化学组成	烧失量	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Cr_2O_3	其他
原料化学组成	铁尾矿	100	8.91	48.5	4.09	33.66	1.44	0.86		
	页岩	100	6.03	60.24	17.34	5.04	4.67	0.48		
	铬渣	100	6.46	13.63	5.94	8.33	36.76	13.20	2.73	
	萤石		$CaF_2=82.88$							
炉料化学成分	铁尾矿	25	2.22	12.12	1.02	8.42	0.36	0.22		
	页岩	50	3.02	30.17	8.67	2.52	2.34	0.24		
	铬渣	25	1.62	3.11	1.73	2.08	9.19	3.33	0.68	
	萤石	外加								
	合计	100	6.86	45.40	11.42	13.02	11.89	3.76	0.68	6.97
扣除烧失量后理论上计算的铸石成分				48.70	12.27	14.00	12.78	4.04	0.73	7.46

将页岩磨细到1.0厘米以下，铬渣到1.0毫米以下，按表5-3配比均匀混合后，装入坩埚。

2）熔化：采用ϕ48×80厘米直筒型坩埚窑，用焦粉作燃料，一次装入50公斤，用700瓦吹风机吹风。熔化周期，从装入坩埚到出炉一般需2.5～3小时，开始熔化温度在1350～1400°C，完全熔化温度为1450～1500°C，熔化时间1～1.5小时，在熔化过程中加强搅动，以保证三种原料互相扩散，达到均化和脱氧。

3）浇铸：熔化好的岩浆出窑后，稍停片刻，用瓢除去面上的渣，即可浇铸。浇铸的速度不要太快，以免底部铁水冲出、混入制品，影响质量。浇铸的温度一般为1300～1350°C，此时，岩浆流动性较好。低于1300°C，则岩浆粘度大，成型困难，制品表

面不平整，有时还产生玻璃线，影响浇铸数量和制品质量；如浇铸温度太高，浇铸后又马上放入结晶炉，则因岩浆散热慢，入炉后仍处于软化状态，导致结晶缓慢，甚至出现不结晶的产品，因此当浇铸温度过高时，浇铸后就不忙立即送入结晶炉，待开始凝固后再放入炉内结晶。

4）结晶：在12千瓦箱型电阻炉进行，加热室尺寸200×300×500毫米，结晶温度控制在860～900°C，结晶时间为20～40分钟，结晶制度控制是否合理，将影响制品的质量，根据试验，制品厚度每增加1～2厘米，结晶温度可降低10～20°C，结晶时间可增长5～10分钟。至于结晶过程是否已经完成或结晶制度是否合理，可间隔一定时间后，从结晶炉内取出一块制品，打断后，观察断面来判断，如断口为瓷状，则表示结晶良好；如断口很粗或呈暗亮色，略具玻璃光泽，则需分析原理，调整结晶制度。

5）退火：退火在马弗炉中进行，开始退火温度为660～700°C，冷却速度为10～20°C/小时，250°C以下在炉内自然降温，至50～60°C出炉，全部退火时间为40～50小时，按这样的退火制度，一般都能防止产品发生炸裂。

6）产品

试制铁尾矿铸石化学组成：

二氧化硅（SiO_2）	45.86%
三氧化二铝（Al_2O_3）	14.14%
三氧化二铁（Fe_2O_3）	8.57%
氧化钙（CaO）	16.81%
氧化镁（MgO）	8.39%
三氧化二铬（Cr_2O_3）	1.29%

铸石的断面为紫灰色、断口呈细瓷状，肉眼观察结晶很好，矿物相经X-射线粉末法鉴定为普通辉石。

试制铸石的物理和化学性能：

容重	3克/厘米^3
抗压强度	6600～8500公斤/厘米^2
抗折强度	675～800公斤/厘米^2
抗拉强度	288公斤/厘米^2

抗冲击强度	64.4公斤厘米/厘米³
磨损率	0.262克/厘米²
耐酸碱度	99%以上

2. 利用铜尾矿试制铸石

安徽省基本建设局科学研究所利用铜官山的铜尾矿为主要原料，附加铝矾土、蛇纹石、白云石、硅石、萤石、铬铁矿试制成铸石板材。

1）配料：各种原料的化学成分见表5-4。

铜尾矿铸石的原料化学成分 **表 5-4**

原料名称	产地	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Cr_2O_3	CaF	烧失量
铜矿原尾矿	安徽铜官山	39.22	5.03	18.66	15.45	3.82			15.00
铜矿螺旋尾矿	安徽铜官山	44.58	7.02	11.43	11.83	4.48			15.00
铝矾土	河南	9.11	73.28	2.11	1.40	0.60			14.12
蛇纹石	安徽屯溪	43.40	1.95	8.35	0.15	35.43			11.08
铬铁矿	安徽歙县						35.00		
萤石	安徽庐江				0.98			91.15	
白云石	安徽	1.12	0.27	0.73	32.45	22.60			40.0
硅石	安徽	95.00							4.00

试制铸石的原料采用了表5-5三种配比。

原料的配比（%） **表 5-5**

编号	铜矿原尾矿	铝矾土	蛇纹石	铬铁矿	萤石
1	100	—	—	—	—
2	90	10	—	—	2
3	78	10	8	4	2

2）试制工艺：各种原料都破碎到2.5毫米以下（但铬铁矿需碎到经4900孔筛，筛余量20%），按配合比称料拌匀后装入坩埚、入炉。

炉子用扇形耐火砖砌，内径40厘米，高70厘米，炉篦用铁丝网制成，可以从炉子的上口装入或取出，在炉内用三块红砖支炉篦，灰膛高20厘米，炉子下部有直径15厘米小孔，用白铁皮管与0.75千瓦的鼓风机相连。燃料用焦炭，炉子最高温度可达1600°C。

坩埚每次装料5～8公斤，熔化时间约30～50分钟，熔化后用钳子夹出，放入有柄的铁筒运到浇铸地点，将坩埚装在能转动的铁框子里，倾斜坩埚向标准板材的铁模中浇铸，浇铸温度约1300°C。

浇铸后立即转入高温炉中结晶，结晶温度850°C左右约20分钟，经脱模后再移入另一高温炉中退火。从680°C开始至50°C取出板材。

3）铸石成品的物理和化学性能：铜尾矿铸石制品的化学成分见表5-6。

化学成分（%） **表 5-6**

编号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
2（三种配料）	46.10	18.26	13.59	18.06	4.06
3（五种配料）	47.24	16.21	12.79	15.71	8.08

耐酸碱腐蚀性能见表5-7。

耐腐蚀性能 **表 5-7**

编号	耐酸度（硫酸比重1.84）	耐碱度（烧碱浓度20%）
1	接近 100%	98.63%
2	99.92%	98.00%
3	99.36%	98.30%

物理性能见表5-8。

物理性能 **表 5-8**

编号	抗压强度（公斤/厘米²）		抗折强度（公斤/厘米²）		抗冲击值（公斤·厘米/厘米³）		耐磨率（克/厘米²）		容重（克/厘米³）
	平均	最高	平均	最高	平均	最高	平均	最高	
1	--	—	—	107	—	—	—	—	—
2	1630	2400	241.6	319.6	68.1	80.8	0.231	0.177	3.06
3	1470	1843	325.7	367.7	90.3	133.6	0.127	0.096	2.94

试验中曾以铜矿螺旋尾矿（即提出少量金属后的铜尾矿）代替

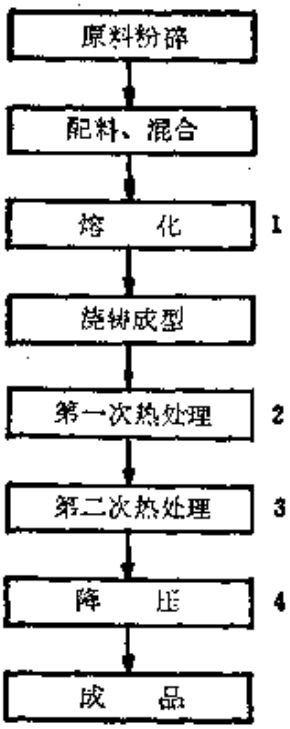


图 5-1　工艺流程图

1—熔化温度约1400℃；2—第一次热处理析出晶核700～740℃小时；3—第二次热处理结晶化850℃，3小时；4—在高温炉中自行降温

以铜矿为主料的铸石抗折强度　　表 5-9

编号	试验尺寸		热处理情况		抗折强度	附注
	宽	厚	第一次	第二次	(公斤/厘米²)	
10	16.6	1.65	700℃，1.5小时	850℃，3小时	545.9	未做加工的原板材试验跨距为10和15厘米
11	2.25	1.50	700℃，1.5小时	850℃，3小时	1140.7	已加工的板

物理性能　　表 5-10

名称	抗折强度 (公斤/厘米²)	抗压强度 (公斤/厘米²)	抗冲击值 (公斤·厘米/厘米³) 平均	抗冲击值 (公斤·厘米/厘米³) 最高	耐磨率 (克/厘米²)	容重 (克/厘米³)	第二次热处理 (小时)
以铜尾矿为主料的铸石	545.9	3045.0	69.3	147.2	0.086	—	3
嘉山厂玄武岩铸石	355.0	3605.0	66	—	0.184	2.85	—

原尾矿，仍按3号配合比做过一次试验，从所得板材敲击声音和外观来看，并不次于用原尾矿按3号配合比所制的板材。

另以铜尾矿67%、白云石8%、硅石15%、铝矾土10%、铬铁矿(外加)4%，按图5-1工艺流程试制180×110×20毫米铸石板材。

制品的抗折强度见表5-9。

以铜尾矿为主料的铸石制品与玄武岩铸石制品的物理性能对比见表5-10，耐急热、急冷的情况见表5-11和5-12。

耐急热情况 **表5-11**

名称	热处理	试件尺寸(毫米)	耐急热温度(℃)	变化情况
玄武岩铸石	一次	4.5×4.5×2.2	1200	软化
铜尾矿铸石	二次	4.3×4.3×1.5	1200	面包状

耐急冷情况 **表5-12**

温度(℃)	玄武岩铸石	铜尾矿铸石	备注
100	未发现裂缝	未发现裂缝	热稳定性能试验参照《铸石》一书，试验水温为19.5℃
200	发丝裂纹	未发现裂缝	
300		发丝裂纹	

第二节 玻 璃

一、概述

玻璃是一种由熔融物过冷而获得的无定形非结晶体的均质同向的固体材料。它具有良好的机械性能：抗压强度达5000～20000公斤/厘米^2，抗弯强度不低于450公斤/厘米^2，容重2500公斤/米^3，导热系数0.6～0.75之间，硬度在5度以上。玻璃同时又是一种化学稳定性很高的材料，除氢氟酸以外，对其它酸类的安定性相当好，碱类溶液甚至纯水虽能损坏玻璃的表面，但作用不强，进度极为缓慢。

玻璃用途很广，除用于工业技术方面，一般建筑物都需要玻璃，不少日用器皿也可用玻璃制作。

玻璃是硅酸钾、钠、钙、镁、铝等的络合物，其化学成分主要是：二氧化硅(SiO_2)、其次是：氧化钠(Na_2O)、氧化钾(K_2O)、氧化钙(CaO)、氧化镁(MgO)和三氧化二铝(Al_2O_3)等。

制造玻璃的主要原料为石英砂或石英砂岩；其次为：长石、石灰石、白云石、萤石、纯碱、芒硝、硼酸、重晶石、钾碱、红丹、锌白等。

除上述原料外，目前国内外还利用以石英或长石为主的尾矿作为玻璃的主要原料或添加配料，进行熔制玻璃的试验研究，并且有的已用于生产。

为便于选用与玻璃原料接近的尾矿作为玻璃的主要原料或添加配料以熔制玻璃，下面介绍生产玻璃所用的主要原料之质量要求：

1．石英或石英砂岩

石英或石英砂岩的质量要求见表5-13。

质 量 要 求 表 5-13

品 级	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	Cr_2O_3 (%)	TiO_2 (%)
一类玻璃要求	>99	<0.5	<0.05	<0.001	<0.05
二类玻璃要求	>98	<1	<0.1	—	—
三类玻璃要求	>96	<2	<0.2	—	—

注：氧化铁(Fe_2O_3)，氧化铬(Cr_2O_3)，氧化钛(TiO_2)均为有害杂质组分，它们使玻璃带上颜色。

石英砂和石英砂岩的颗粒大小在0.1～0.75毫米之间。最好70～80%在0.1～0.5毫米。

2．添加料

1）白云石

一级品：MgO>20%；Fe_2O_3<0.1%。

二级品：MgO>19%；Fe_2O_3<0.2%。

颗粒大小：0.75～1.0毫米。

2）石灰石

一级品：$CaO>54\%$；$Fe_2O_3<0.15\%$。

二级品：$CaO>47\%$；$Fe_2O_3<0.2\%$。

做玻璃适用白云质石灰岩及硬度不大的石灰岩。颗粒大小0.75～1.0毫米。

3）长石

$Al_2O_3>18\%$；$Fe_2O_3<0.2\%$；$SiO_2<70\%$。

颗粒大小：0.1～0.5毫米。

4）萤石

$CaF_2>80\%$；$Fe_2O_3<0.2\%$。

5）芒硝

$Na_2SO_4>94\%$；不熔残渣$<3\%$；$NaCl<1.2\%$；$CaSO_4<1.5\%$；$Fe_2O_3<0.2\%$。

颗粒大小：1.0～1.5毫米。

制造高级玻璃要求原料的质量要好，不仅对原料中SiO_2，Al_2O_3，K_2O，Na_2O，CaO，MgO等各组分有一定的要求，而且含量还要求稳定，同时Fe，Cd等有害组分要低。否则，玻璃产生着色、气泡、玻筋或斑痕。然而，在制造某些普通玻璃和日用器皿，对原料的质量可以适当放低时，则如下类型矿山的尾矿可考虑利用：①富含二氧化硅的石英脉型金矿、钨矿；②富含石英、长石的伟晶岩型钽铌矿；③富含方解石、白云石或萤石的碳酸盐矿床等。当其有害杂质的含量很低时，则可根据质量不同的尾矿，用以制造不同用途的玻璃。

二、利用尾矿熔制玻璃

1．以长石为主的尾矿作玻璃生产的原料

株洲玻璃厂现生产三种质量较高的玻璃，其产品成分见表5-14。

该厂所用石英原料，除广东的海砂，湖南雷子排石英砂岩外，还利用中南03矿的尾矿，该尾矿主要矿物为石英、长石。化学成分见表5-15。

现将利用中南03矿的尾矿生产平板玻璃的情况简介如下。

株洲玻璃厂三种玻璃产品成分　　表 5-14

产品种类 \ 化学组分(%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	R_2O	SO_3
平板玻璃	>2.0	2.3		6.45	4.2	14.75	0.3
压花玻璃	71.8	1.20		11.0	1.5	14.20	0.3
玻璃球	67.3	6.60	<0.4	9.5	4.2	12.0	

中南03矿尾矿化学成分　　表 5-15

化学组分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O
含量(%)	80.26～80.92	11.28～11.54	0.09～0.12	4.03～4.44	2.99～3.50

1）配料：各原料的化学成分如表5-16，各种配料用量及其计算的化学成分见表5-17。

2）生产工艺

将表5-17中各种原料破碎(并筛分)到要求粒度，分别用空气管路输送入库，并按表中配比分别称量，混合后，送入池窑中熔化成玻璃融体，然后沉清、冷却、送入压延机成型，再冷却后，切割成板。

此外，最近上海化工学院为了节约制玻璃时纯碱的消耗，对利用花岗岩类型尾矿作为玻璃原料进行了有关厂矿的调查工作，并对两个矿山的尾矿做了初步熔制玻璃的试验。从所调查的矿山尾矿矿物组成来看，其主要矿物为长石、石英、其次为云母族类矿物，化学成分大都很接近。而合肥玻璃厂利用瓷石作原料生产了瓶罐玻璃，上海日用器皿公司所属玻璃六厂和八厂也用瓷石和宿迁砂生产了棕色药用瓶和食品罐头瓶。因而指出利用花岗岩类型尾矿作某些玻璃用品的原料是完全可能的。各矿花岗岩型的原矿和尾矿化学成分见表5-18。

在利用长石类的尾矿生产玻璃时，为避免因尾矿含铁量过高而使玻璃着色、产生气泡、玻筋或斑痕，因此，须研究尾矿中含

原料化学成分表

表 5-16

原料名称	产地	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Na_2CO_3	Na_2SO_4	C
海砂	广东	98.40	1.20	0.06	0.01						
砂岩	湖南雷子排	98.72	0.48	0.08	0.08	0.05					
长石尾矿	中南03矿	80.80	11.13	0.10	0.10	0.10	7.61				
白云石	湖南临湘	1.87	0.36	0.07	30.62	20.43					
石灰石	湖南东安	1.27	0.14	0.06	54.12	0.68					
纯碱	辽宁大连								99.01		
芒硝	山西运城				0.38	0.04				94.75	
焦炭	本厂										86.59

铁物质与共生或伴生矿物的关系，晶体嵌布粒度等，以便能选别分离，降低尾矿中的含铁量。对于含铝较高的尾矿，可用来制瓶罐玻璃，纤维中碱球，低碱无硼玻璃等，从发展新品种建筑材料方面来看，利用尾矿来制造有色微晶平板玻璃、彩色微晶玻璃"马赛克"，彩色微晶玻璃饰面砖，以及其他微晶玻璃建筑材料等都有广泛的应用前途。

玻璃配料化学成分表　　表 5-17

原料名称	生成100公斤玻璃需用原料	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	SO_3 (%)
海　砂	30.16	29.93	0.36	0.20					
砂　岩	30.12	29.77	0.14	0.02	0.02	0.02			
长石尾矿	15.36	12.41	1.71	0.02	0.02	0.02	1.17		
白云石	20.36	0.38	0.07	0.01	6.23	4.16			
石灰石	0.31				0.17				
纯　碱	20.32						11.71		
芒　硝	3.92				0.01		1.62		
焦　炭	0.25								
合　计	120.70	72.20	2.28	0.07	6.45	4.20	14.50		0.30
计算玻璃成分指标		72.20	2.35		6.45	4.20	14.50		0.30

2. 铁矿的尾矿试做玻璃器皿

鞍山焦耐设计院利用鞍山一个选矿厂的尾矿试制玻璃器皿，进行了初步的探索试验，尾矿的化学成分见表5-19。

1）采用84%尾矿加16%的碳酸钠用石墨小坩埚置于焙烧炉中加热，原料在1200°C时开始熔化，到1380°C时将坩埚取出，把玻璃液倾倒出来。玻璃为墨黑色，组织较密实，在玻璃中含有未熔的小颗粒，有时其中夹有较多的气泡。

2）采用硝酸钠和氯化钾来助熔和脱色，试用下列三种配

各矿花岗岩型的原矿和尾矿化学成分

表 5-18

名称	产地	化学组成									
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	烧失
锂云母化钠长石花岗岩原矿	江西	67.94	17.35	0.07	0.22	0.14	0.14	—	2.51	6.15	1.74
尾矿（甲）	江西	74.20	15.01	0.26			0.57	—	1.61	6.20	
尾矿（乙）	江西	71.36	15.60	0.37			0.55	—	2.46	4.79	
尾矿（丙）	江西	69.62	15.72	0.095			0.38	—	2.56	5.00	
白云母花岗岩原矿	广西	75.31	15.34	0.41	0.54		0.41	0.17	2.86	4.20	
白云母花岗岩原矿	广西	76.28	13.09	0.74	0.66		0.48	0.16	4.53	2.27	
伟晶花岗岩原矿	江西	68.70	15.70	2.83		0.09	—	—	3.50	2.62	
粗粒花岗岩风化壳	广东	72.05	15.40	2.56			0.33	0.11	4.37		4.92
瓷石（Ⅰ）	安徽	77.08	12.62	0.45			0.15	0.17	8.69		
瓷石（Ⅱ）	安徽	77.24	13.07	0.23			0.53	0.20	7.56		
宿迁砂	江苏	83.3	9.1				0.30		6.20		

料方案：

鞍山某选厂尾矿化学成分（%）　　表 5-19

成　份	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	烧　减
含　量	6.87	17.50	62.00	1.99	0.72	1.019	0.031	1.27

1）尾矿：碳酸钠：氯化钠：硝酸钠＝100:25:11:7，将混合料在温度为1300°C以下的坩埚内烧制。

2）尾矿：碳酸钠：硝酸钠：熟石灰＝100:25:10:15，将混合料在炉温能达1380°C的坩埚内烧制。

3）尾矿：碳酸钠：硝酸钠：熟石灰＝100:25:18:20，将混合料在炉温能达1380°C的坩埚内烧制。

试验结果：第1）种配料方案所烧出的玻璃呈咖啡色，不透明，并含有很多细小未熔化的砂粒。第2）种配料方案，在1240°C时玻璃呈淡黄色，到1380°C时则呈绿色，透明性较好，但玻璃仍留有砂的微粒和气泡。第3）种配料方案结果较差，熔化物类似炼铁矿渣。

此后，又在鞍山某厂内进行较大型试验，熔炼在坩埚窑内进行，坩埚容量为400公斤，原料分三次加入，4小时后，温度为1230°C，取出之样品呈茶色，未发现气泡和未化颗粒；再经9小时，温度到1270°C样品呈深咖啡色；又经4小时，温度至1320°C，样品颜色更深且转黑。在温度为1270°C时，进行了人工吹制和机械吹制玻璃瓶，在空气中和冷却窑内冷却后，结果尚好，只是颜色呈黑色。

由此看来，利用尾矿熔制玻璃，对尾矿中所含有害组分，特别是氧化铁和硫等的含量不能太高，因氧化铁在熔化过程中，使热量不易传至熔融体的中部，原料难以烧透，同时使玻璃的颜色深。如用选矿方法将尾矿中的铁、硫、钛、铬等杂质去掉，再加适当的其它配料，烧制日用玻璃器皿是完全可能的。

第三节　耐火材料

一、概述

耐火材料是主要用于热工设备中抵抗高温作用的结构材料和用作其他高温容器或部件的无机非金属固体材料。

工业炉窑等热工设备对耐火材料的性能要求是：

耐火度须在1580°C以上；

常温耐压强度和高温荷重变形温度(或称荷重软化点)高，一般炉窑建筑荷重不超过0.5～1公斤/厘米^2，为了使用安全，对耐火材料的要求超过此指标；

热稳定性高，热膨胀系数小；

化学稳定性高，抗渣性强；

外形整齐，尺寸准确。

耐火材料按照耐火基体的化学矿物组成可以分为多种，为了更好地使用尾矿，下面介绍两种与尾矿化学成分较接近的耐火材料。

1. 硅砖

硅砖是含$SiO_2$93%以上的耐火材料，是以富含石英的硅石或石英岩为原料，加入少量石灰作结合剂，经高温煅烧使石英转变为鳞石英和方石英与残余的石英以及高温形成的玻璃质共存的变相组织，属酸性耐火材料。

对用于制造硅砖原料的基本要求见表5-20。

各级硅砖原料的基本要求　　表 5-20

级　别	SiO_2(%)	Al_2O_3(%)	K_2O(%)	耐火度(℃)
I	>97	≤1.2	≤0.25	>1750
II	>96	≤1.6	≤0.25	1750～1730
工业原料	>95	≤2.1	≤0.25	>1730

原料要求纯净，杂质分布均匀。不能局部集中，否则，使烧成后的制品产生熔洞和熔疤，使用时就从这些熔洞和熔疤侵蚀深

入内部而损坏。原料中必须含Al_2O_3和TiO_2低，因为少量的Al_2O_3或TiO_2能与SiO_2形成1545℃的共熔点，严重降低硅砖的耐火度和高温强度。原料如含有泥土，应洗涤干净。

2. 半硅砖

半硅砖是含$Al_2O_3+TiO_2<30\%$而$SiO_2>65\%$的耐火材料，属半酸性制品。

制造半硅砖可以利用天然的含石英杂质的粘土和高岭土资源，在耐火粘土、高岭土或石英岩选矿时所得到的尾矿也可以用作半硅砖。

我国冶金焦炉用粘土质及半硅质耐火制品的标准见表5-21。

冶金炉用粘土质及半硅质
耐火制品部颁标准（YB402—63） **表 5-21**

序号	制品理化指标	牌号及数值	
		(JN)-35	(JB)
1	Al_2O_3含量，不小于	35	
2	SiO_2含量，不小于		60
3	耐火度℃，不低于	1690	1670
4	2公斤/厘米²荷重软化开始温度℃，不低于	1300	1320
5	重烧线收缩%，　1350℃ 2小时，不大于	0.5	
6	显气孔率%，　不大于	24	25
7	常温耐压强度，公斤/厘米²，不小于	200	150

苏联对半硅砖分为三级，质量指标见表5-22。

苏联半硅砖的质量指标 **表 5-22**

指标	A 级	Б 级	B 级
耐火度℃，不低于	1710	1670	1610
残存收缩或膨胀%，　不大于	0.5(1400℃)	0.5(1350℃)	1.0(1250℃)
荷重变形温度℃，2公斤/厘米²，不低于	1400	1300	—
耐压强度，公斤/厘米²，不小于	100	150	100
气孔率%，　不大于	27	30	—

二、利用尾矿制造耐火材料

一般工业国家的耐火材料约有60～70%是用于冶金工业，其中55～65%是用于钢铁工业。因此，在发展冶金工业的同时必须发展耐火材料工业。不断革新耐火材料，可为提高冶金技术创造条件。制造高质量的耐火材料必须从选用优质原料着手。但是，也有某些热工设备对耐火材料的技术性能要求不是很高，可以考虑利用工业废渣制作，如金属矿山的尾矿当其矿物组分基本符合某种耐火材料的组分时，可以利用作为原料。

鞍山焦耐设计院曾利用鞍山某选厂尾矿和鞍山附近粘土在硅砖窑内试烧耐火砖。

尾矿和粘土的物理性质及化学成分列于表5-23、5-24。

尾矿物理性质及化学成分 **表 5-23**

物理性质	颜色灰色，粒度通过4900孔/厘米²筛的筛余量为0～40%一般在20%以下。比重2.61～2.97容重850～1330公斤/米³一般为1100公斤/米³左右。								
化学成分	TFe	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	S	烧失量
性质含量(%)	21.88	6.87	17.50	6200	1.99	0.72	1.019	0.031	1.27

鞍山附近粘土物理性质及化学成分 **表 5-24**

物理性质	颜色红黄色，颗粒坚硬，可塑性好。			
化学性质	成分	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO
	含量(%)	65.20	20.19	—	—

采用表5-25的四种配比将尾矿与粘土混合，用摩擦式压砖机按国家规定的标准砖尺寸压制成型，送入硅砖窑内煅烧，烧成温度在1300°C以上。据初步试验结果，用尾矿与粘土配比为90：10较好。但还不够理想，主要原因是尾矿中含铁太高。

江苏某瓷土矿利用选厂尾矿配以适量的焦宝石、4号瓷土自烧熟料等原料烧制成耐火砖，其试验结果如下：

尾矿与粘土的配比和耐火砖的理化指标 **表 5-25**

序号	配合比		常温抗压强度 (公斤/厘米²)	常温抗折强度 (公斤/厘米²)	耐火度 (℃)	荷重软化点		湿孔隙率 (%)	吸水率 (%)	真比重 (克/厘米³)
	尾矿	粘土				开始点 (℃)	破裂点 (℃)			
1	95	5	174.0	83.2	1580～1610	1480	1480	45	—	2.88
2	90	10	367.6	115.2	<1580	1520	152.0	38.8	17.4	2.74
3	88	12	346.3	110.5	<1580	1490	149.0	33.4	10.1	2.76
4	85	15	308.0	100.5	<1580	1280	1380	—	—	—

该瓷土矿系热液蚀变矿床，其主要矿物为高岭石，其次为石英、玉髓、绢云母、明矾石、褐铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等。淘选瓷土后尾矿的化学成分：

SiO_2	69～71%
Al_2O_3	19～21%
Fe_2O_3	1.5～2%
SO_2	1%
烧失量	6～8%

尾矿粒度：最大颗粒0.5毫米、细粒0.2～3毫米，最细颗粒小于10微米。以65孔筛（0.25毫米）过筛，筛上量占37%，筛下量63%。尾矿的耐火度为1690～1710°C，软化温度为1469°C，体积缩小率20%。

4号瓷土和自烧熟料化学成分如表5-26。

4号瓷土和自烧熟料化学成分 **表 5-26**

原料种类	化学成分 (%)				
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_2	烧失量
4号瓷土	52.00	28.00	<3.00	<3.00	13.00
自烧熟料	64.03	2.69	33.78	—	—

试验选择了四个方案，其结果如表5-27。

表5-27中，三、四方案的耐火材料制品，已基本达到了国家标准（见表5-21）。

江苏某瓷土矿利用尾矿烧制耐火砖试验　　表 5-27

试验方案	原料配比（%）					烧成温度（℃）	气孔率（%）	耐火度（℃）	荷重软化温度（℃）	抗压强度（公斤/厘米²）	备注
	尾矿	焦宝石	自烧熟料	4号瓷土	自烧废火砖						
第一方案	100	—	—	—	—	1500	20	1690	1490	299	成型时，可塑性差，成型困难
第二方案	70	—	—	30	—	1370				100	强度低，同时烧结性能差
第三方案	30	20	20	30	—	1380	29.7	1690	1350	160	生产了300吨耐火材料制品
第四方案	15	—	15	35	15		28～28	1700～1710	1380～1440	200～220	

该矿已利用所排出的高岭土尾矿生产了三百余吨耐火砖，而且还建成了两座倒焰窑，一座为20米³，另一座为30米³。其生产工艺流程见图5-2。

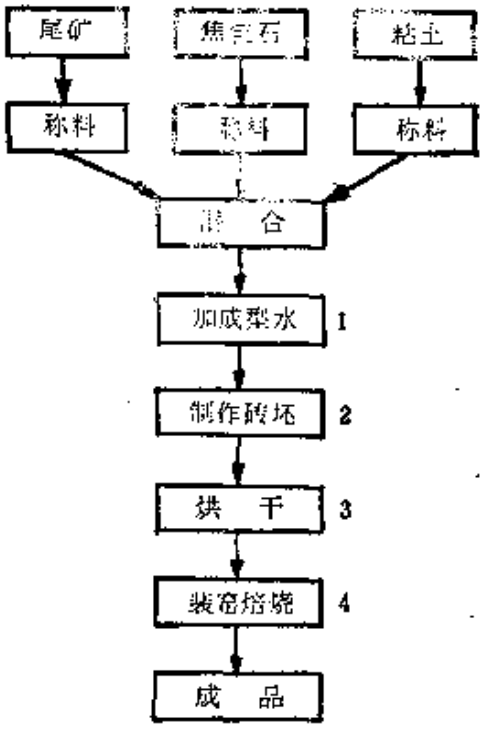


图 5-2　生产工艺流程

1—加水成型：手工成型水分10～11%；机器成型水分6～8%；2—制作砖坯用夹板打砖机；3—烘干利用烟道余热；4—装窑焙烧控制温度1370～1380℃，保温四小时

第四节 陶　　粒

一、概述

陶粒是一种质量较轻而强度较高的球状轻集料，其作用与浮石、火山凝灰岩、火山熔岩、石灰凝灰岩、冶金炉渣，燃料炉渣等相似，可掺合于水泥中制成轻质混凝土。

轻混凝土具有重量轻和导热性低的特点，用作保暖建筑物和高层建筑物的墙板和楼板具有一定的优越性。上海于1965年用粉煤灰陶粒混凝土建成了10000米^{2}的五层楼试点住宅。

陶粒可分为轻、重两种：轻陶粒的容重为400～600公斤/米^3，块状抗压强度极限25～100公斤/厘米^2；重陶粒的容重为700～800公斤/米^3，块状抗压强度极限50～200公斤/厘米^2。

在城市，冶金炉渣和燃料炉渣是易得的集料，在矿山则有大量的尾矿可利用于烧制陶粒，作为轻质混凝土的集料。

二、利用尾矿烧制陶粒

1973年沈阳市第一建筑工程公司和辽宁工业建筑设计院，利用沈阳地区的尾矿粉掺配煤矸石制成，容重为640～1000公斤/米^3，松散容重为420～700公斤/米^{3}的陶粒。陶粒的外壳坚硬，内部有均匀细小而互不连通的蜂窝状孔洞，可用作配制各种用途的轻集料混凝土。

1. 原材料

1）尾矿粉

采用沈阳立新铁矿排渣场的废料。尾矿化学成分见表5-28，颗粒组成见表5-29。

尾矿粉化学成分（重量%）　　**表 5-28**

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	烧失量	K_2O	Na_2O	MnO	SO_3	P_2O_5
76.83	0.87	18.33	0.23	0.45	0.59	1.40	0.20	0.05	0.05	0.02	0.11

2）煤矸石

尾矿粉颗粒组成　　表 5-29

筛孔尺寸（毫米）	1.2	0.6	0.3	0.15	0.075	−0.075
累计筛余(%)	0	2.1	4.7	9.25	62.15	93.95

煤矸石是煤矿生产中排出的废料。所用煤矸石系沈阳煤矿前屯二井所排出的泥质矸石，其化学成分见表5-30。

煤矸石化学成分　　表 5-30

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	烧失量	含碳量
46.99	29.79	6.21	0.66	0.44	1.49	0.89

2. 工艺流程

工艺流程示意图见图5-3

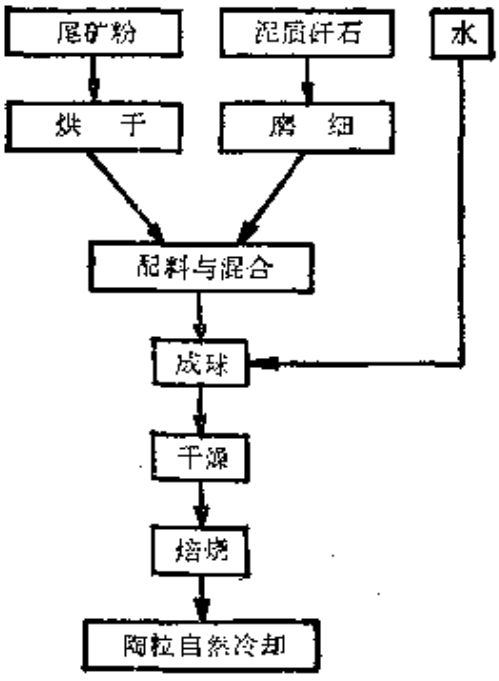


图 5-3　工艺流程

3. 试验结果

1）实验室试验

通过多次试验，得出了一些比较理想的工艺操作参数，见表5-31。

工艺操作参数　　表 5-31

序　号	名　　称	参　　数　　值
1	泥质矸石细度	<0.25毫米
2	原料配比（重量比）	尾矿粉：矸石＝4～6：6～4
3	料球粒径	φ5～20毫米
4	料球干燥温度	200～400℃
5	料球干燥时间	20～40分
6	焙烧温度	波动于1050～1250℃，对于前屯二井泥质矸石以1120～1150℃为宜。
7	焙烧时间	8～12分
8	最佳膨胀温度范围	30～35℃
9	焙烧气氛	氧　化
10	膨胀倍数	2～3
11	陶粒颗粒容重	640～900公斤/米³

2）回转窑焙烧试验

利用回转窑焙烧陶粒，回转窑内径600毫米，窑长12000毫米，安装斜度2%，窑转数2.16转/分。

尾矿粉用干燥坑烘干，矸石用球磨机磨细，人工配料与混合，圆盘成球机成球。所成料球强度高，含水15%，再用干燥坑

回转窑焙烧试验结果　　表 5-32

试验序号	原料配合比（%）			下料速度（公斤/时）	室内停留时间（分）	高温带长度（米）	窑内温度（℃）			陶粒松散容重（公斤/米³）	备　注
	尾矿粉	矸石	粘土				火焰	高温带物料	窑尾		
I*	40	40	20	300	50～57	3～4	1330～1340	1050～1070	120～150	420～550	连续试烧15小时
II**	57	43		260～300	50～57	3～4		1120～1140	160～200	630～700	连续试烧8小时，

* 所用矸石是沈北砖厂制砖用的混合煤矸石，它与尾矿粉配料成球焙烧，其粘土是沈阳立新铁矿附近的红粘土。

** 采用前屯二井泥质矸石

干燥，入窑前料球水分5%。燃料用重柴油，燃烧器用高压喷嘴使油雾化，进行了两次试验，结果列于表5-32。

3）烧结机焙烧试验

用18米²烧结机试烧陶粒。点火器燃料为重油。

曾采用料球内掺煤粉、外掺小煤块（含煤量分别占料球重量的6%、8%、10%），料层厚度为150、180、200毫米，试烧都未获得成功。主要原因是由于料层厚，料球膨胀时无力使料层整体上升，只得向料球的空隙处膨胀，从而使阻力大大增加，造成通风不良，致使上层物料过烧和粘结，下层物料欠烧。

后采用料球内外不掺煤，减薄料层厚度，在点火器下直接焙烧，获得了较好的效果。结果见表5-33。

烧结机焙烧试验结果 **表 5-33**

原料重量配合比		料球粒径	料层厚度	点火器						台车速度	陶粒松散容重
				预热段			焙烧段				
尾矿粉	矸石	(毫米)	(毫米)	长×宽(毫米)	温度(℃)	时间(分)	长×宽(毫米)	温度(℃)	时间(分)	(米/分)	(公斤/米³)
1	1	10～15	50～80	500×1500	800～900	2	1000×1500	1250～1270	3	0.3	560～700

注：陶粒无粘结现象，整个料层上升3厘米左右。

4. 陶粒物理力学性能

1）吸水率见表5-34

试验陶粒吸水率 **表 5-34**

序号	试验类型	陶粒松散容重(公斤/米³)	吸水率(%)				
			15分钟	30分钟	1小时	1天	7天
1	回转窑焙烧	395	7	9	13	22	31
2	烧结机焙烧	635	6.6	8.3	8.3	14	
3	烧结机焙烧	700	6.6	8.3	8.3	14	

2）容器强度见表5-35

试烧陶粒容器强度　　表 5-35

序号	试验类型	陶粒松散容重（公斤/米³）	容器强度（公斤/厘米²） 压入深度 2	3	4	5
1	回转窑焙烧	395	3.6	4.6	5.7	7.6
2	烧结机焙烧	561	9.5	13.0	16.2	23.6
3	烧结机焙烧	635	14.7	19.8	26.4	36.3
4	烧结机焙烧	700	26.7	35.3	47.1	71.3

第五节　型　　砂

一、概述

造型用砂历来都是用硅砂。因其SiO_2含量高达98%以上，在铸造过程中产生大量高浓度的游离SiO_2粉尘，对工人的身体危害极大。1970年以来研究采用了石灰石加工的“七〇砂”大大减少了矽肺的危害，“七〇砂”成功后，旅大市劳动卫生研究所和辽宁某石棉矿加工铸造试验了一种新型的造型材料。1974年以来，大连有四个单位进行了铸钢试验，有六个单位进行了铸铁试验。试验表明：它在保护工人身体健康和简化铸铁造型工艺、提高铸件质量等方面都取得了较好的效果。

采用白云质石棉尾矿作型砂，大大简化了造型工艺，白云质石棉尾矿中加入5%的膨润土和3%左右的水，经混砂机搅拌5分钟后就可直接造型，可节约圆钉95%以上。芯模不须干燥，只要用喷灯将表面干燥约10毫米厚，再用稠液铅粉涂刷两遍，就可以合箱浇铸(即潮模浇铸)，其质量高，表面光滑，便于清砂。有的单位在同种工件硅砂造型时废品率曾高达70%，改用白云质石棉尾矿造型时废品率却下降到5%以下。白云质石棉尾矿与硅砂用同样的操作方法造型，白云质石棉尾矿的透气性好，而且，白云质石棉尾矿，可以多次使用，复用性比“七〇砂”好，80%以上可以再用，吃砂量占5%左右，白云质石棉尾矿可以长期保存，不怕风化，不怕水浸。且成本比“七〇砂”低。

二、白云质石棉尾矿的技术性能

1. 白云质石棉尾矿的化学成分（见表5-36）

白云质石棉尾矿化学成分　　表 5-36

名　称	烧失量	SiO_2	CaO	MgO	$Al_2O_3+Fe_2O_3$
含量(%)	34.7	12	31	20	2.3

2. 白云质石棉尾矿的物理性质

硬度：莫氏4～5度；

形状：多角形；

耐火度试验：1000°C无烧结，

1050°C变色，

1100°C玻璃化开始，

1160°C玻璃化

发气温度：750°C；

发气量：34.7%；

成型抗压试验：湿压强度0.2公斤/厘米^2；

干压强度：3～5公斤/厘米^2。

白云质石棉尾矿与“七〇砂”、硅砂的性能及造价比较见表5-37。

白云质石棉尾矿与“七〇砂”、硅砂的性能造价比较　　表 5-37

名称 \ 项目	结合SiO_2含量(%)	游离SiO_2含量(%)	形　状	硬度(莫氏)	发气温度(℃)	发气量(%)	耐火度(℃)	成　本(元/吨)
硅　砂	96～98	90	似圆形	7		4.3	1730	100
七〇砂	5～10	2	多角形	3	530	44	920	50
白云质石棉尾矿	11～12	2	多角形	4～5	750	34.7	1160	20

三、粒度要求

根据试验的要求，曾分别生产过：10/20、16/30、20/30、

30/70、40/70、50/100及－70目七个粒级的品种，造型成功后，把多品种合为单一品种仍能满足造型要求，但小于70目的产物不应过多，否则会影响铸件质量。其粒级分析如表5-38。

粒 级 组 成 表 5-38

粒 级（目）	－10＋20	＋30	＋70	－70
%	0.6	18.8	75	5.6

据两年来生产试验结果，白云质石棉尾矿是铸铁造型很有前途的一种新材料，但因熔点较低，因而直接用于铸钢还需进行一些研究工作。

第六节 混凝土的掺合料

一、概述

有不少混凝土建筑物、构筑物和混凝土预制件，要求标号为140、110、90、70就可以满足强度要求，至于某些工程的混凝土垫层或基础，要求标号可低到70～50，而当前国内生产的水泥、大多数标号为400，在确保工程质量安全可靠的前提下，为了节约水泥用量，可在现场施工拌制混凝土时，掺以适量的活性的（水硬性的）或填充性的（非活性的）材料。使水泥的标号达到不超过混凝土标号的2～2.5倍，这不但可提高混凝土的和易性，并可增加混凝土的密实性。特别对于蒸压或蒸养的混凝土，加以适量的掺合料时，可以加速混凝土硬化并提高混凝土的标号。

二、利用尾矿作混凝土的掺合料

填充性的材料一般为河砂或山砂，只要其中硫化物和硫酸盐中的SO_3含量不超过1%，有机质含量用比色法试验不深于标准色，粒度65%在4900孔/厘米^{2}以下，就可作为掺合料。但是，如果某些混凝土工程，当取用河砂或山砂的运距较远，而就地有符合上述标准的尾矿，则可利用尾矿作为河砂或山砂的代用品。例如鞍山建筑公司，于1957年曾利用尾矿作混凝土的掺合料，该尾矿

含$SiO_2$70%，含SO_3很低，用量在200公斤/米^{3}以内的混凝土，效果甚好。掺尾矿粉的混凝土使用范围较广，该公司曾用于工业建筑的厂房基础，瓦斯管道基础，烟囱基础以及民用住宅的板、梁等工程上。施工时混凝土的和易性与保水性是良好的，而且在混凝土硬化以后经较长时间的观察，其表面亦无不良的迹象。至于使用在浸水或循环潮湿的冻结的结构中，还没有作系统的试验，在未明确它的结果前暂以不使用为妥。

尾矿作为掺合材料掺用时，可以采用湿法或干法，要求严格掌握配合、拌和、浇捣、养护等操作技术，这样就可以做出品质优良的混凝土。

须特别指出的是，根据苏联一般《土建工程施工验收技术规范》中规定，细添料的掺入，只限用于普通水泥的混凝土内，其它水泥不得掺入。

由于在水泥厂中掺混合材制造低标号水泥并不是最经济的，所以我国水泥生产趋向高标号，而在一般民用建筑工程上140号，110号、90号、70号等低标号混凝土又用得很多的情况下，在现场掺加就地取材的掺合材料降低水泥标号的措施，合理地使用和节约烧结性胶结材料，相对地增加水泥产量，降低工程造价，是具有重大意义的。

参 考 文 献

〔1〕铸石制品的应用，《铸石制品的应用》编写组，中国建筑工业出版社，1974年3月。

〔2〕铸石制品生产工艺，大连辉录岩铸石厂，中国建筑工业出版社，1974年。

〔3〕矿产工业要求参考手册，《矿产工业要求参考手册》编写组，地质出版社，1972年12月。

〔4〕建筑材料基本知识，刘长荣、李午曦、于兆吉、聂章矩，中国建筑工业出版社，1972年9月。

〔5〕矽酸盐工艺学普通教程，第二卷，П.П.布德尼可夫主编，Г.Н杜杰罗夫、М.А.马特维耶夫、Г.Г.先迪林，高等教育出版社，1956年3月。

〔6〕耐火材料工艺原理，谭丙煜，科学出版社，1963年12月。

〔7〕建筑材料，高等学校教学用书，В.А.伏罗比也夫编著，清华大

学土木系、大连工学院水利系建筑材料教研组译，建筑材料工业出版社，1957年。

〔8〕工业废水废气废渣的处理和利用，上海市环境卫生局编，上海市科学技术出版社，1966年3月。

〔9〕合理使用水泥和水泥外掺料的基本知识，韩廷藻编著，科学技术出版社，1957年。

〔10〕水泥混凝土，富文权编著，人民铁道出版社，1959年5月。

〔11〕混凝土及钢筋混凝土工程须知，韩廷藻编著，上海新科学书店出版，1953年10月。

第六章　利用尾矿堆积场种植农林作物

一、概述

第一章中已介绍了国外金属矿山的尾矿堆存所占用田地的面积是很惊人的。在国内，为了堆存尾矿，也占用了不少田地。将尾矿用作地下开采采空场的充填料或用作建筑材料的原料，虽然可以减少一部分甚至大部分堆存量，但仍得占用一些田地。至于今后尚有回收价值而需堆存的尾矿或无回收价值但送往地下采空场充填很不经济或不存在充填的露天矿以及不适用于作建筑材料者，则只能予以堆存因而需占用大量的田地，随着采矿工业的发展，选厂处理矿石量的日益增加，尾矿堆存则显得愈来愈突出，特别是在平原地区或小丘陵地区的矿山，更是一个严重的问题。从国民经济的发展来看，特别是从发展农业的需要来说，扩大种植面积是一项很重要的措施，因此，在尾矿堆场上采取一些措施，覆土造田与施肥相结合，种植农林作物，为农业生产所利用，或直接施肥后，种植生命力强的作物，对于保护环境，防止污染，是具有积极作用的，这些都是开发矿业中的一项很重要的工作。特别是露天开采沉积型砂矿，一面开矿，一面同时造田，更具有重要意义。对于在尾矿堆积场上覆土造田种植农林作物，不仅可以发展农业生产，同时还可以防止尾矿遇水流入江河，污染河水，侵蚀农田；尾矿粉遇风飞扬，污染环境，并且还能增强尾矿坝的稳定性，真是一举多得，达兴利除害之目的。

关于尾矿层的农业种植问题，从农林作物的生长来说，必须在具有一定肥力的土壤上才能生长。所谓肥力就是土壤供水供肥的速度、强度和持续力。土壤是由原生矿物，如长石、石英、云母和次生矿物（经风化作用后产生的），如氧化物和可溶性盐类，以及经生物作用后的腐植质有关的各种菌类等组成。

尾矿是粉碎了的岩石，纯系一种无机矿物，它是一种人工土

壤，这种人工土正处于土壤形成的开始阶段，如果原生矿物的颗粒越细，则对于四周介质进行化学作用的面积就越大，结果促使原生矿物质变成次生矿物质，这个过程时间越长，变化越大，这就是风化过程。在这个过程中倘能产生植物所需要的养料，这就是土壤中的基本肥力。这个过程可以等待，靠它自然发展，也可用积极的办法采取不同的农业技术措施加以改良，促进土壤的转化过程，如施土肥，种绿肥，掺土，覆土等。此外，尾矿粉还具有与土壤不同的特性，如炎热的夏天尾矿粉表面热度高，能烧死作物的根，见水结板、发沉，在自然状态下发干，遇风易于尘扬，没有胶体，不成团粒结构，但一经适当的改造工作，就会转化为适于耕种的土壤。因此，尾矿层要为农林业所利用，必须进行适宜的改造，才利于种植。如果当地取土容易，且运输方便，则可在尾矿层上覆土造田，或掺土以改良土壤，达到能种植之目的。如取土和运输困难，则可在其上直接种植生命力强的作物，以增加尾矿坝的稳定性。以上两种方法，国内外已有不少矿山采用，在尾矿堆积场上覆土造田，不仅能免除强风暴雨所造成的尾矿的流失，避免尾矿污染和毒化江河、湖泊及影响环境卫生，有利于农业、渔业及水利工程的发展，而且还能为农业生产增加耕种面积，达到兴利除害之目的。特别对于气候干燥、风大、降雨量小的地区或受台风严重影响的地区，采用覆土造田具有积极的作用。此外，尾矿堆积场内覆土造田，还有利于尾矿的妥善保存，既避免了尾矿中目前不能回收的有用金属在地表氧化，又避免了含有有用金属的尾矿在地表流失。

二、种植农林作物的实例

1.沈阳农学院于66年对三九工程浮选铁尾矿进行小麦和水稻室内盆栽试验，其结果如表 6-1 和表 6-2 。小麦盆栽生长情况见图6-1。

三九公司选矿厂利用尾矿层种植农作物进行了试验，试验结果如下：

将浮选尾矿在戈壁滩铺厚约 500毫米，用污水浇灌，白菜长

小麦盆栽试验 **表 6-1**

序号	项目 / 种植条件	植株高（厘米）	分蘖数（个）	茎粒总重（克/盆）	粒重（克/盆）	千粒重（克）	产率（%）
1	全尾矿粉（无肥）	34.00	1.00	1.50	0	0	0
2	全尾矿粉（有肥）	56.16	1.10	6.93	2.30	21.29	29.3
3	上层尾矿粉 下层土壤（有肥）	55.89	1.00	8.30	2.80	20.75	35.7
4	土壤和尾矿粉混合（有肥）	49.50	1.25	11.15	3.60	23.68	45.9
5	上层土壤 下层尾矿粉（有肥）	74.30	1.35	22.85	7.83	26.35	100
6	全土壤（有肥）	66.34	1.65	23.70	6.83	23.51	87.2

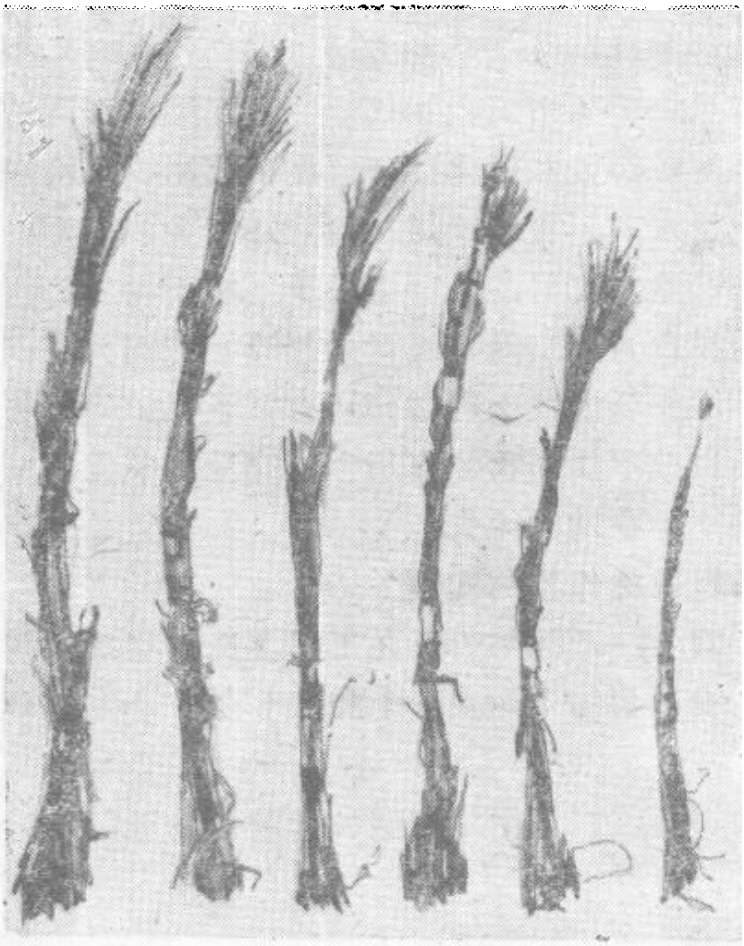


图 6-1 小麦盆栽生长情况

水稻盆栽试验　　表 6-2

序号	项目 / 种植条件	茎粒总重（克/盆）	稻谷重（克/盆）	稻谷产率（%）
1	全尾矿粉（有肥）	25.00	7.35	33.80
2	上层尾矿粉 下层土壤（有肥）	55.75	17.75	81.60
3	土壤尾矿粉混合（有肥）	61.00	17.40	80.00
4	上层土壤 下层尾矿粉（有肥）	63.00	20.75	95.40
5	全土壤（有肥）	72.50	21.75	100.00

势良好，棵重1.5斤。1967年种“白大头”小麦，植种面积0.7厘地，施硫酸铵化肥2斤，灌水四次，收割小麦4.44斤，折合亩产750～800斤。同时，种水稻、土豆、向日葵、豆夹、香菜、萝卜等均获得了成功。

2．鞍山黑色金属矿山设计院对国内12个矿山的调查情况：

1）东鞍山河边地，在尾矿粉上掺炉灰种高粱，豆子。

2）东鞍山前峪，在尾矿粉上铺1厘米厚土，种水稻1.5亩。

3）东鞍山河边地，尾矿粉掺1/3土，种豆子、土豆。

4）东鞍山河边唐家地，尾矿粉掺50～60%的土种水稻，且收成高。

5）鞍山大孤山第一总砂泵站，在尾矿粉上覆10～20厘米的土，种红薯、绿豆。

6）大营盘，在尾矿粉上铺30厘米黄土种黄豆。在尾矿粉中掺1～2%的土种水稻。

7）鞍钢烧结总厂的西侧，尾矿粉厚1.5～2厘米，当年冲积，翌年种植，水稻产量达500斤/亩。

12个矿山尾矿层农业利用的基本情况是：“在尾矿粉上种植水稻的约有200亩，亩产达500～800斤，还有种植高粱、玉米、土

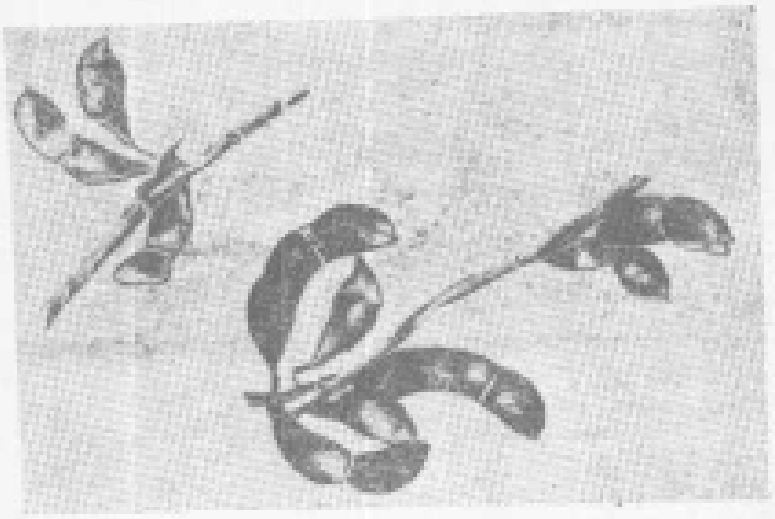


图 6-2　在尾矿粉上种植的大豆生长情况

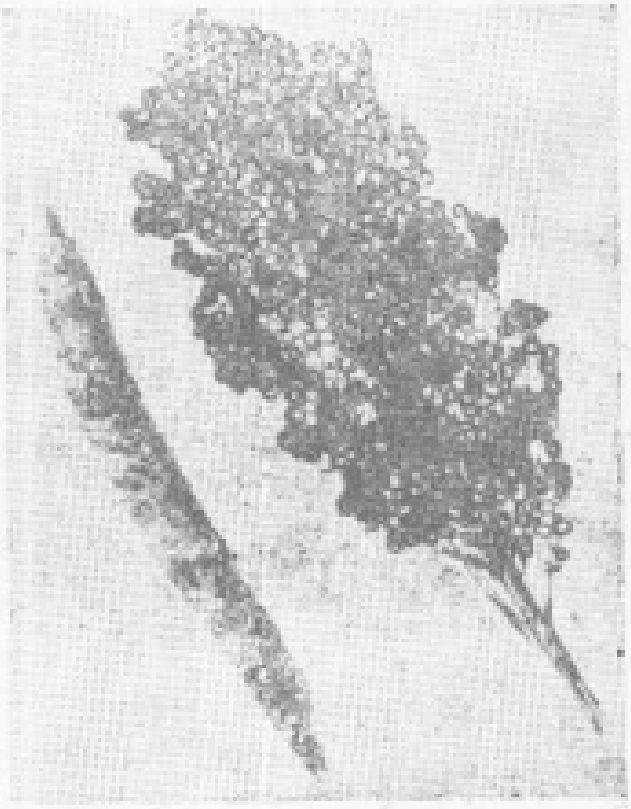


图 6-3　在尾矿粉上种植的高粱、小米生长情况

豆、青椒、红薯等作物。此外，还有种植杨树的。这些农林作物，有的是种植在早年淤填的尾矿上，如柳西屯水稻田；有的是种在当年堆存的尾矿上，如老烧结厂小南门西侧地；有的是种在全尾矿上，如东鞍山尾矿坝上的水稻试验田；也有的是种在掺拌有10～20%泥土的尾矿上，如弓长岭尾矿坝64年种上谷子，亩产达300斤;67年又在尾矿冲积层上种植樟子松、油松等，都长得很好”。在尾矿粉上种植的大量实例证明，在尾矿粉上种植庄稼不仅是可能的，而且是成功的。在尾矿粉上种植的大豆、高粱、小米、小麦、水稻的生长情况见图6-2、6-3、6-4、6-5。

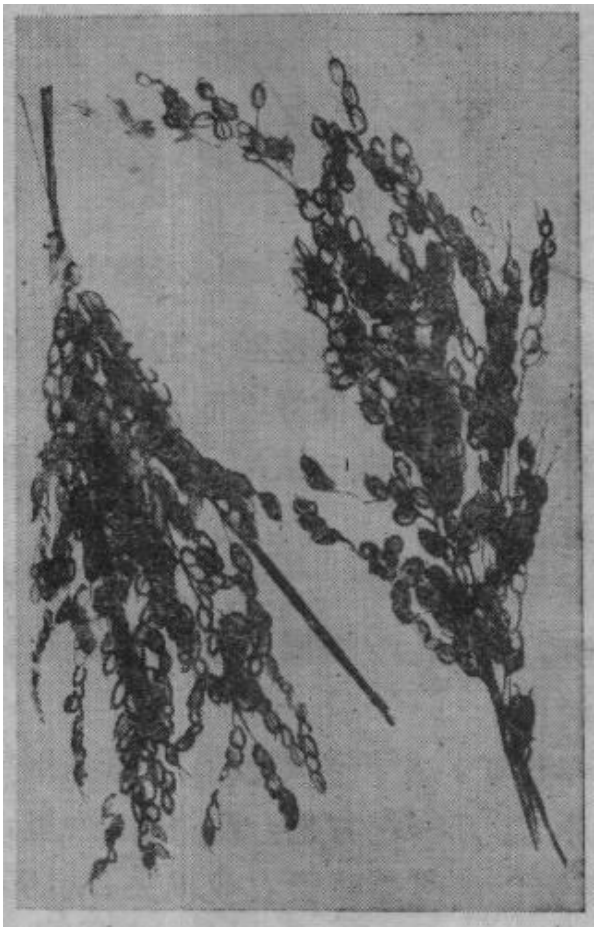


图 6-4　在尾矿粉上种植的水稻生长情况

3．国内其它矿山对尾矿在农业利用改造的情况

云锡在已停用的尾矿库及流散的尾矿层上均种植了蔬菜和庄稼，在老厂五级尾矿库和黄茅山木登洞尾矿库停用以后，已利用

种植白菜、萝卜、京豆、花生、红薯、小麦等。在尾矿流散淤积层厚达1～8米的田心，红土坡等地的尾矿层上多年来已利用种植玉米、稻谷、小麦等，其长势良好。

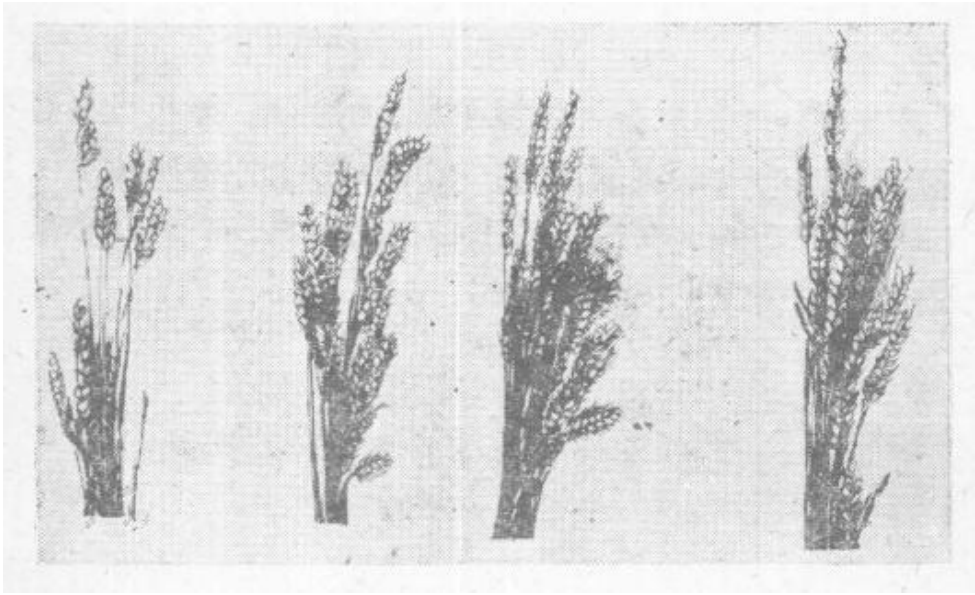


图 6-5　在尾矿粉上覆土长的小麦

清水塘矿，在尾矿堆积场内覆20～30厘米厚的黄土，种植水稻的面积约0.57亩，水稻长势良好，而且获得了收成。

通化矿在老尾矿坝中，撒土植树，种植农作物。

4．坂潭矿覆土造田

坂潭矿属河流冲积型砂矿，下盘为风化花岗岩，在矿层上部覆盖5至10米的砂质粘土，剥离系数0.5～1.5，地面除河流外，均为水田和村庄。

该矿自1957年建矿，生产初期没有考虑利用尾矿覆田，造成了黄泥浆流入河中11万余立方米，污染29公里，沿河三个公社2850多亩农田受害，矿山为赔偿农业损失，从1958年到1963年五年内就亏损380多万元。1963年开展覆田工作，从1964年到1975年已覆田1800余亩，为总征用田亩的75%，综合回收的产品产值占企业总产值的64%，从1964年至今除购买10台推土机、铲运机等覆田设备外，并增添了一大批采矿和选矿设备，实现了矿山开采机械化，为国家盈利180多万元。做到既覆田支农、又发展了矿山生

产。

新覆的田第一年种花生（见图 6-6），亩产可达 200 多斤，第二、三年种水稻（见图 6-7），亩产可达300～400斤，四、五年以后水稻就可以恢复到开采以前的生产水平（见图 6-8）。

在覆田过程中，通过反复实践，创造出一整套尾矿沉淀池的水力堆砌技术，只用很少的人力和资金，就可以做到安全堆砌上百万立方米大型尾矿沉淀池，使尾矿和黄泥浆水经过沉淀后变成清水，重新循环用于生产，与农业用水不发生矛盾，并消除了泥浆淤塞河流和淹没农田，河床逐年下降，河水清莹透亮。

每年覆田平均成本如下：

1965年	1138元/亩
1966年	1282元/亩
1967年	913元/亩
1968～69年	2172元/亩
1970年	2841元/亩
1971年	1916元/亩
1972年	1928元/亩
1973年	1838元/亩
1974年	1655元/亩



a　　b

图 6-6　覆田第一年种植的花生

a—花生地；b—收获花生



图 6-7　覆田后第二、三年种植的水稻

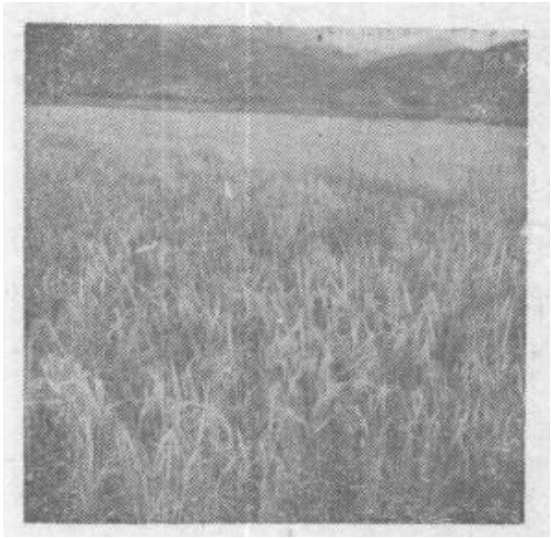


图 6-8　覆田后的第四、五年种植的水稻

在上列成本中人工工资约占60～70%，推土机、铲运机费用约10～20%，材料及管理费约10～15%。

开采和覆田工艺见开采和覆田平面示意图 6-9。其开采和覆田步骤如下：

1）按每年采剥计划征购农田，将被征范围内农田的所有排灌水渠及道路重新安排整理，移到开采范围以外，并对新采区进行防洪围堤和挖掘排洪水沟。

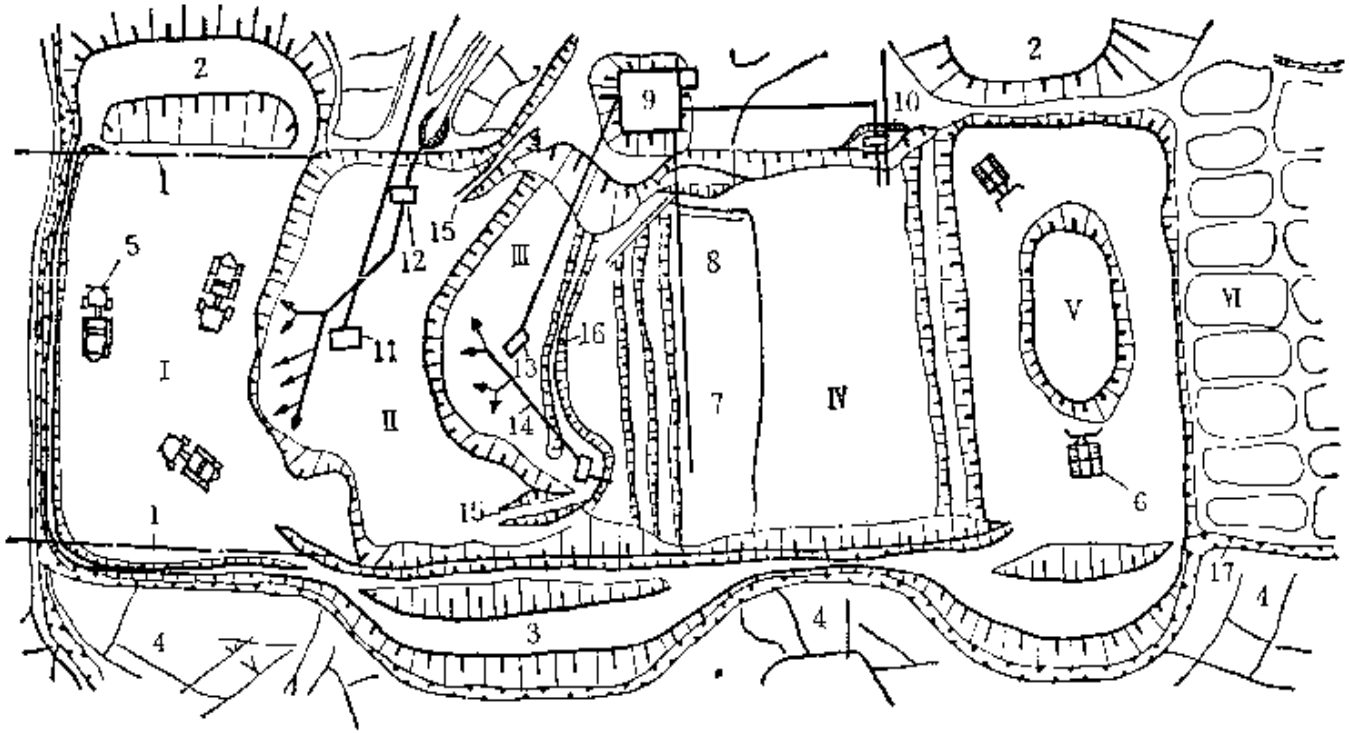


图 6-9　开采和覆田工艺平面示意图

Ⅰ—保存耕植土及黄土区；Ⅱ—水力剥离区；Ⅲ—水力采矿区；Ⅳ—尾矿回填沉淀区；Ⅴ—疏水晒干区；Ⅵ—覆田区。
1—矿体边界线；2—耕植土保存堆；3—黄土保存堆；4—农田；5—C_{4-3}型拖拉式铲运机；6—T 54型推土机；7—尾矿；8—水闸；9—粗选厂；10—选矿供水泵及尾矿沉淀池排洪泵；11—剥离砂泵，尾矿排至剥离尾矿沉淀池；12—剥离水枪泵；13—采矿砂泵；14—采矿水枪泵及水枪；15—采矿场通道；16—临时堤坝；17—排洪水沟及农田排灌水沟

2）为了保持覆田后土壤的肥力，用 T-54 型推土机和C_{4-3}型铲运机将被征田地上面的耕植土剥离后（一般厚0.2米，每亩约130米^3）集中保存，一般堆集在采场边界附近或直接运往后面覆田区使用。

3）耕植土下的黄土为砂质粘土，用铲运机剥离后也集中保存，每亩要求保存650米^{3}左右，即厚约10米，部分也可以运到后面覆田区使用。

4）进行水力剥离和水力采矿。

5）采空区回填。

回填采空区就是覆田区，在回填之前应对覆田的标高，排灌渠道，田间道路等进行全面规划，一般要掌握好尾砂坝的堆砌顺序，泥浆的脱除和沉淀清水的回流及防洪等四个环节。用尾矿回填采空区见图6-10。

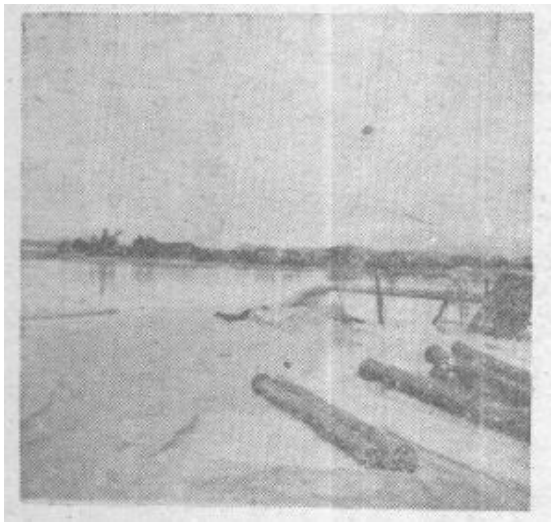


图 6-10　用尾矿回填采空区

回填后的尾砂池，四周是较粗粒的砂坝，中间为沉淀后的泥浆，一般堆放后的高度，要求比覆田后的标高高出 2.0 米左右，而且堆放平整，以便为下一步创造有利条件。

6）疏水晒干。

尾砂池回填完后，就在四周开沟滤水，中间的泥浆随着水分的排除逐步干缩下沉，一般经过一年左右便下沉 1 ～ 2 米，表面结硬，呈现出深达 1.0 米左右的裂缝，周围可以站人，中间一般还稀软并有积水。

7）挤压疏水

为使中间泥浆得到干缩，用推土机将四周堤坝的粗砂按覆田设计的要求标高推向中间，见图6-11，这样中间稀软泥浆被挤压突起，得到进一步疏水晒干和收缩。进而又推砂挤压，见图6-12，直到全部泥浆都干缩硬化，并被压在砂层下面时方止。盖在泥浆

上面的砂层厚度应有2.0米左右，这样把泥浆完全包在中间。这段时间一般约需1～2年。

疏水晒干和挤压疏水这两步是费时较长的，是整个覆田工作中关键的两步，要进行得比较细致，使泥浆得到彻底的干缩，以免覆田后发生大面积下沉现象。

8）平整基底

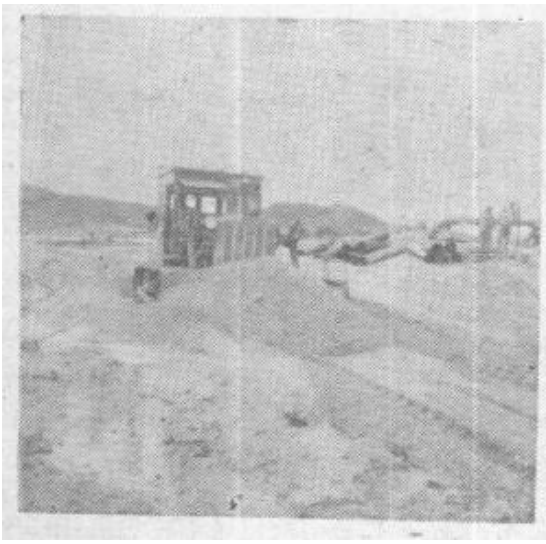


图 6-11 推土机将四周坝堤的粗尾矿推向设计要求的覆田标高

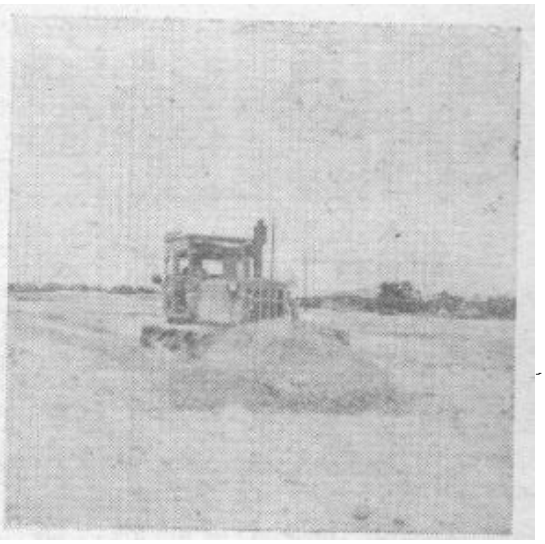


图 6-12 在覆田区内进一步推砂挤压

根据排灌需要，一般要求按水源流向有0.5%以上的坡度，用人力进行平整。

9）覆盖黄土

基底平好以后，用C_{4-3}型铲运机装运黄土覆盖，覆盖厚度要求有0.45米以上，个别机械不能到达的地方用人力覆盖，见图6-13。

10）修筑排灌水渠道路，划分田块，修筑田埂，盖上0.15米左右的耕植土。覆盖耕植土一般用手推胶轮车，在覆盖时同样要掌握好标高，在相邻两块田之间大致保持0.1米的落差（即0.5%左右），见图6-14。

覆田后就可进行耕种，一般第一年种花生或旱粮，第二年就可以种水稻，少数田在种植三年之内，还可能有局部下沉现象，

可采取开挖疏水沟划分为小田块再予以填平。

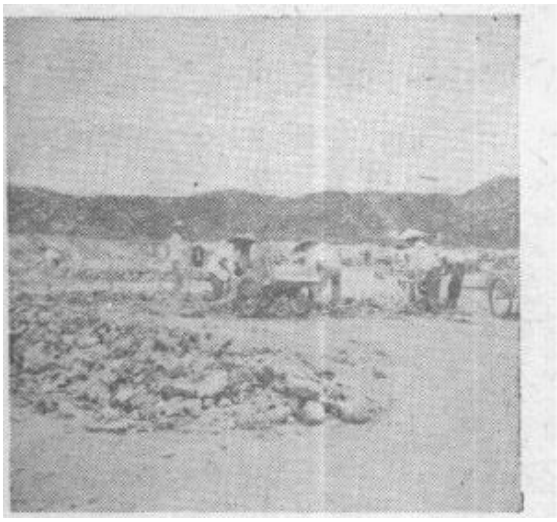


图 6-13　覆盖黄土



图 6-14　覆盖耕植土

5、国外尾矿堆积场覆田工作情况

1）加拿大多木金矿尾矿堆积场覆田工作

加拿大多木金矿是开采60多年的老矿山。这个矿山共有5个采矿场。其中2个已经停止使用，占地350英亩，从1967年开始进行覆田工作，种植面积已有112英亩，并按每年覆田30英亩继续工作。覆田后的尾矿场种上了植物，改变了面貌，风天减少了灰尘飞扬。

覆田办法是先用推土机把尾矿库边缘陡岸搞成平滑的缓坡。然后用胶轮农用拖拉机和推土机分别把平缓地段和有坡度的地方耙平。接着再平整、施肥、撒种。种植的是牛草、野豌豆、车轴草、三叶草等混合种籽。牧草生长两年即开始衰落，而豆科植物能自供肥料，再生再长。

覆田费用，每英亩300～900美元。

2）日本石山选厂尾矿库覆田工作

日本石山选厂于1964年4月停止运转，1965年7～9月进行覆田工作。1970年10月草籽发芽后，呈现出一片绿油油的景象，现在野草生长的非常好。

覆土施工方法是：

（1）在尾矿库停止使用前一年，把粗粒尾矿用旋流器分离后将粗粒放到上游。

（2）尾矿库停止使用后放置一年，尽量使库内积水排除，使能直接覆土的范围扩大。

（3）当直接覆土开始产生隆起时，改为柴排法覆土。

（4）覆土完成后，修排水沟，进行绿化种植。

所谓柴排法覆土，就是在泥面上敷设的苫席（如树枝、炕席、草帘、布帘等重叠数层，也有用粘结的，目前是把几片尼纶，维尼纶铺盖粘起来以代替柴排的）。利用苫席和泥面间产生的摩擦力来承受覆土及荷载的重量。该矿用的苫席尺寸为10×20米^2，苫席与苫席之间用ϕ5毫米的尼龙绳缝合起来。以防止在苫席接缝处矿泥冒出来。

直接覆土部分覆土厚0.6～0.8米，最大覆土厚度3.0米，推土机和汽车就可在上面运行。直接覆土占总面积的23%，为13000米^2。在尾矿沉积比较软弱的地方需覆土厚需3.0米左右，湿地压路机可在上面运行。

在苫席上覆土要用轻型推土机。完成全库的覆土后，需要找平排水坡度，敷设混凝土排水沟，然后播种百慕草和龙须草草籽进行绿化。覆田工程费用如表6-3

石山选厂尾矿库覆田工程费 **表 6-3**

项　目	数　量	单　价（日元）	合　价（日元）	备　注
准备工			1030	排水、修路
覆　工	57000米^2	204	11428	附近火山灰
苫　席	30000米^2	312	9360	克列蒙纳、F型
排水沟	1527米	1800	2760	V型，180～600混合
绿　化	575000米^2	63	2600	
合　计			28178	495元/米^2

三、关于尾矿堆积场的农业利用及其应注意的问题

国内农业种植试验证明，尾矿堆积场农业利用的途径是覆田

或掺土以改良土壤和施肥相结合。国内农业种植的实践是，一般掺50～60%的土可改良土壤，覆30～45厘米厚的土造田。同时，采取施土肥，种绿肥，合理灌溉等措施，即可种植农作物。实践证明，以覆土造田的方式较好，既能形成很好的隔水层，防止水的渗漏，又能避免夏季时尾矿粉表面温度高烧死作物的根，因而能确保作物的良好生长。更重要的是，对于含有有毒物质、重金属及有害元素（如砷、汞、铜、铅、锌、镍、镉、铬、钴、钍……等）的尾矿堆积场，采用覆土造田，以隔离有害组分，避免有毒有害元素、重金属离子、选矿药剂等吸收到农作物中去，从而不致给人畜带来危害。如果种尾矿层经过试验不宜种植食用作物时，则可考虑进行绿化造林，在造林的同时施种绿肥，以利树木的生长。此外，在尾矿堆积场上覆土造田，还能保持尾矿不致被冲积的泥砂混入，以利于将来从尾矿中回收有用矿物。

必须指出的是：

1．对于不含有有毒物质、重金属及有害元素的尾矿堆积场，可采用掺土以改良土壤或复土造田，同时采取种绿肥、合理施肥、合理灌溉等农业上的措施，将尾矿层改造成适合耕种的土地。

2．对于含有有毒物质、重金属及有害元素的尾矿堆积场，则以覆土造田的方式为宜。至于合理的覆土厚度与选择适宜的栽培作物，尚待逐步实践解决。

此外，目前国内有少数矿山利用尾矿池养鱼，这对于符合卫生标准、不含有重金属及有毒、有害元素的尾矿池是可以的。但当尾矿池中的水质不符合卫生标准，含有大量的重金属、有毒有害元素及选矿药剂时，则利用尾矿池养鱼是不适宜的。因为，由于水质污染不仅使鱼类受害，畸形发展，而且由于鱼类不断摄食，将有害物质蓄积体内，从而危害人类健康的事实，必须引起我们的高度重视，如日本发生世界有名的“骨痛病”和“水俣病”等，就是由于吃了含镉含汞等有毒物质的鱼类和食物而引起的。因此，利用尾矿池养鱼和利用尾矿水灌溉时，对于水质应进行化验，是否符合卫生标准，鱼类可否供食用，尾矿水是否适宜于灌溉等，

这些都是今后必不可少的工作。

参 考 文 献

〔1〕土壤学基础与土壤地理学，高等学校交流讲义，南京大学、北京师范大学、华东师范大学地理系编，人民教育出版社，1961年。

〔2〕土壤肥料学，湖南省中等农业学校教材，上册（农作物、果蔬栽培、茶业、植物保护专业适用），湖南省农业厅编，湖南人民出版社，1959年3月。

〔3〕加拿大采矿杂志，1973年11月。

〔4〕日本《鉱山》杂志，1973年6期。

〔5〕从保护环境说起，《工业“三废”综合利用普及读物》，北京化工研究院，郑权仁、徐叔元、王伯英编，燃料化学工业出版社，1973年8月。

第七章　国外尾矿的利用研究概况

一、概述

在资本主义国家中，由于资源的日趋枯竭，因而面临的重大课题是资源的充分利用，随着科学技术的不断发展，对尾矿也进行了一些利用研究，并取得了一定的成果。本章介绍国外利用尾矿制作蒸压硅酸盐制品、加气混凝土、重混凝土、烧制红砖、陶瓷、陶粒、熔渣花砖、微晶玻璃、泡沫材料以及其他方面的建筑材料制品的概况。

二、用尾矿制加气混凝土

国外某矿业冶金公司，利用铜尾矿和炼铜废渣试制成多孔混凝土(即加气混凝土)，其试制工艺如下：

1．原料

1）铜尾矿：主要组分为石英，含二氧化硅70～80%，绢云母20～30%，还含有氧化钙3～12%，尾矿的粒度小于0.3毫米占90%。其粒度组成见表7-1。

铜尾矿的粒度组成　　**表 7-1**

序号	名称 \ 项目 \ 数值	筛余量%（筛孔尺寸为毫米）							
		5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.085	-0.085
1	巴尔哈什公司的尾矿	—	0.3	0.2	1.0	5.8	38.4	42.1	11.9
2	巴尔哈什公司的矿浆	—	—	0.2	0.3	1.5	15.0	19.0	64.0
3	哲兹卡兹干公司的尾矿	—	—	0.3	0.7	4.85	38.9	43.2	11.2

2）水泥：用400号硅酸盐水泥。

3）生石灰：含氧化钙96%。消化温度为90°C，消化速度为3分钟。为了减慢石灰的消化速度，在混合料中掺入3%的二水

石膏，使石灰的消化时间延缓为10分钟，消化温度降到60～70°C。

4）发气剂：采用NAK-1铝粉。

5）起泡稳定剂：用树脂皂角。

试验所用的原料化学成分列于表7-2。

试验用的原料化学成分(%) **表 7-2**

原料	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	MgO
巴尔哈什公司尾矿	80.80	1.76	10.15	1.30	0.80
哲兹卡兹干公司尾矿	72.56	2.24	11.72	3.90	0.57
巴尔哈什公司炼铜废渣	45.70	27.52	11.46	11.70	1.52
生石灰	1.40	0.75	0.75	96.10	微量
卡拉干达厂水泥	20.85	4.75	7.45	59.00	1.17

原料	SO_3	Na_2+K_2O	烧失量	备注
巴尔哈什公司尾矿	2.55	1.05	2.35	矿物为石英和绢云母
哲兹卡兹干公司尾矿	0.73	4.51	3.80	
巴尔哈什公司炼铜废渣	0.36	未分析	—	黄长石、橄榄石
生石灰	—	—	1.7	
卡拉干达厂水泥	1.85	—	4.35	

2. 试制工艺

将铜尾矿、炼铜废渣、石灰分别磨细，过0.085毫米筛，使铜尾矿筛余量为8～10%，炼铜废渣筛余量为3%，石灰筛余量为5%。然后将尾矿和炼铜废料与水泥或生石灰掺配制成混合料。再加入铝粉悬浮液和气泡稳定剂。浇注入模后，静置10～15小时，送蒸压养护。

3. 试制成果

采用不同配比的混合料，在养护制度为：升温4小时，恒温6小时，降温3小时，8个大气压养护下，得出成品强度和容重如表7-3。

各种配比的多孔混凝土试验结果 **表 7-3**

序号	多孔混凝土	混合料组成					容重（吨/米³）	抗压强度（公斤/厘米²）
		石灰	水泥	尾矿 非粉磨	尾矿 粉磨	炼铜废渣		
	巴尔哈什公司废料							
1	加气硅酸盐*	17	—	83	—	—	0.83	12
2	同上	17	—	58	25	—	0.92	50
3	同上	17	—	41.5	41.5	—	0.92	54
4	同上	17	—	—	83	—	0.92	70
5	泡沫硅酸盐	17	—	58	25	—	0.72	35
6	加气混凝土	—	36	64	—	—	0.94	45
7	同上	—	36	44	20	—	0.94	60
8	同上	—	36	44	—	20	0.82	42
9	同上	—	36	32	32	—	0.91	62
10	同上	—	36	—	64	—	0.94	82
11	泡沫混凝土	—	36	44	20	—	1.10	84
12	泡沫矿渣混凝土	—	36	—	—	64	1.08	100
13	加气矿渣混凝土	—	36	—	—	64	0.80	53
	哲兹卡兹干公司废料							
1	加气硅酸盐**	14	—	86	—	—	0.90	38
2	同上	14	—	61	25	—	0.90	62
3	泡沫硅酸盐	14	—	61	25	—	0.92	45
4	加气混凝土	—	36	44	20	—	0.80	57
5	同上	—	36	44	20	—	0.93	68

* 料浆活性为15%。

** 料浆活性为12%。

用不同配比的水泥和尾矿或粉磨炼铜弃渣制作加气混凝土及加气矿渣混凝土，其水泥的用量为250和350公斤/米³。水泥：非粉磨尾矿：粉磨尾矿的配比为1：1.2：0.5最为有利。这种配比制成加气混凝土在容重为0.8～0.9吨/米³时强度为55～65公斤/厘米²，是符合普通加气混凝土技术条件规定的。

用尾矿和炼铜弃渣制成容重为1.1吨/米³的泡沫混凝土试件时，具有均匀细孔的结构和较高的强度(85～100公斤/厘米²)。

根据许多研究资料来看，以石灰代替混合料中的部分水泥制

作多孔混凝土时，不仅能节约水泥，而且能改进料浆的膨胀条件，消除收缩现象，从而提高制品的物理力学指标。因此，根据国外在制作装配式蒸压多孔混凝土制品的技术条件中，建议在加气混凝土中掺入粉磨生石灰50%来代替部分水泥。

尾矿制作蒸压结构的多孔混凝土试验结果　　表 7-4

多孔混凝土的种类	蒸压养护饱和压力（大气压）	容重（吨/米³）	烘干至恒量	在水中贮存18～20天即相当于试件进行短期抗冻性试验以后	15次冻融（-20℃～+20℃）循环以后	软化* 系数	抗冻** 系数
	巴尔哈什公司废料						
加气硅酸盐	8	0.80	40	30	30	0.75	0.75
	10	0.80	51	41	38	0.80	0.75
	8	0.90	51	35	38	0.70	0.75
	10	0.90	64	50	48	0.78	0.75
加气混凝土	8	0.73	49	—	—	—	—
	8	0.91	70	—	—	—	—
	10	0.93	76	61	58	0.80	0.76
泡沫硅酸盐	10	0.70	35	26	28	0.75	0.80
加气矿渣混凝土	8	0.80	52	39	41	0.75	0.79
	哲兹卡兹干公司废料						
加气硅酸盐	8	0.80	48	42	45	0.88	0.94
	10	0.81	68	65	63	0.93	0.91
	8	0.95	66	60	62	0.90	0.93
	10	0.95	73	70	72	0.96	0.98
加气混凝土	8	0.80	57	13	54	0.88	0.88
	10	0.80	56	52	53	0.87	0.86
	8	0.93	68	64	63	0.94	0.93
	10	0.92	67	63	62	0.93	0.92
泡沫硅酸盐	10	0.92		36	32	0.78	0.68

* 在水中贮存后，试件的抗压强度与干燥状态下的试件抗压强度之比。

** 15次冻融循环以后，试件的抗压强度与干燥状态下的试件抗压强度之比。

表7-4列出了用尾矿制作蒸压多孔硅酸盐制品的试验结果。

试验说明，用尾矿制作蒸压硅酸盐制品是适宜的，而且可制成容重为700公斤/米^3，强度为40～50公斤/厘米^{2}的多孔硅酸盐制品，同时其制品还具有优质的结构、高抗冻性和抗水性的良好性能。因此，国外经工厂试验后，开始在个别工厂中应用和生产。

三、用尾矿制作蒸压硅酸盐建筑材料

对于利用天然砂制硅酸盐砖有一定的技术标准。国外某大学曾对某金矿的尾矿废料进行了鉴定，并和所规定的标准作了对比分析。同时对其他一些矿山的尾矿废料，也作了同样的分析，试图利用这类尾矿制砖，根据试制产品的性能和原料对比分析的结果认为，优质建筑材料常常来源于不合标准的矿石废料。因此，适用于矿石废料的新标准，正在制订中。新标准的制定，需要考虑原料的特征，煅烧变形和破坏，以及影响成品的性能等情况。

现将利用尾矿制造建筑材料的技术问题介绍如下：

1．制品的生产工艺

硅酸盐建筑材料的一般制作程序是：将石英砂、消石灰和少量的水混合后压制成坯，装入高压釜内，用高压蒸气养护，使石灰与石英砂发生化学反应，生成硅酸钙类化合物，从而形成具有一定强度的建筑材料。其制品一般可分为致密的和泡沫的两种。

2．影响硅酸盐建筑材料质量的因素

1）砂的性质：包括矿物组成，化学杂质。

砂的纯洁程度，粒度组成以及颗粒形状等都直接影响到硅酸盐建筑制品的强度。

经研究认为：间断搅拌较连续搅拌的强度要大。

砂的形状对于制品的强度有一定的影响。圆形的不如带棱角的好，而且棱角越多越好。

纯洁的硅质材料效果较好，加入杂质会降低强度，粘土加入量大于3％时，强度就显著降低。

2）石灰用量：石灰是一种重要的掺配原料，在制造一定强度的产品时，用量尽量少，然而配量要适宜，一般石灰用量是4～12％。强度和石灰用量是成直线关系的。如果要求收缩率小，

则需要增加石灰的用量。通常根据砂的粒度，石灰用量一般为5～15%。

3）石灰质量：要求MgO小于3%。

4）水的性质：要求纯洁的水。

5）搅拌过程：要求均匀混合。

6）消化过程：要求完全消化。但用消石灰时，不存在此问题。

7）成型用水：水量6～8%。

8）坯的压实程度：制坯机的压力为3.1公斤/厘米^2，一般工作压力为0.62～1.24公斤/厘米^2。

9）蒸养条件：25个大气压下2小时，8个大气压下20小时。

3. 尾矿作硅酸盐建筑材料的技术要求

生产硅酸盐砖时，对砂的选择有一定的标准。对于尾矿的利用问题，美国建筑材料研究部门提出了用尾矿作硅酸盐建筑材料的技术指标如下：

1）物理标准

（1）最大粒度不大于4.8毫米。

（2）－150μ不大于10～15%，细粒含量增加，将增大石灰用量，不仅在经济上不合算，而且还引起产品的收缩。

（3）粒度组成：大多数界于150～600μ(100～30目)，粒级曲线间断的比连续的好。

（4）粘土和细泥（<20μ）不大于10%。

2）化学标准

（1）全部可溶盐类<0.1%。

（2）全部碱金属(K_2O+Na_2O)<3.0%。

（3）可溶氯化物<0.03%。

（4）可溶硫酸盐<0.05%。

（5）可溶碱金属<0.05%。

化学杂质过多，将引起“粉化”和生成有害的化合物。

3）矿物标准

（1）石英>50%，石英越多，强度越高。

（2）长石<15%，过多会引起粉化。

（3）石灰石<40%，过多了不生成有益的结构。

（4）膨胀类矿物<5%，过多使成品松散。

（5）易氧化的矿物<1%，如黄铁矿、褐铁矿、石膏等。

砂质分析 **表 7-5**

矿山编号	粒度 大于4.8毫米 (%)	粒度 小于150μ (%)	粘土淤泥 (%)	可溶解盐类总量 (%)	碱类总量 (%)	石英 (%)	长石 (%)	备注
1 *	—	39.7	3.5	0.24	0.74	80	10	矿脉
2	—	10.3	1.5	0.45	2.38	54	43	
3	—	49.2	4.1	0.30	2.36	28	50	矿脉
4 *	37.2	34.8	20.1	0.40	0.93	77	18	冲积砂矿
5 *	34.4	21.6	21.5	未测	0.83	87	6	
6 *	12.6	3.9	0.6	0.40	0.59	92	4	河流沉积砂
7	—	37.5	15.7	未测	未测	未测	未测	
8 *	—	99.2	45.8	0.76	2.11	85	15	矿脉
9 *	—	97.1	48.3	0.58	1.04	95	5	矿脉
10	—	91.1	59.5	0.40	4.38	72	23	
11 *	28.2	3.4	21.4	未测	0.17	95	1	
12	78.4	18.7	未测	未测	1.55	74	20	
13	—	23.3	57.5	未测	1.55	36	—	
13	—	98.3	未测	未测	4.42	42	—	
13	—	93.1	84	1.3	3.24	51	—	
14	48.3	97.9	21.6	未测	1.37	77	17	
15	—	49.3	57.8	未测	未测	未测	未测	
16	—	24.8	7.5	0.79	3.15	80	20	自然砂
17	—	53	6.7	0.20	4.43	85	未测	矿脉
18	—	98	70.2	0.52	9.00	46～85	未测	矿脉
19	—	9	1.6	0.82	12.08	60	未测	矿脉
20 4	—	7	0.8	未测	未测	未测	未测	
20 5	—	9	0.7	0.05	1.65	95	未测	自然砂
21	—	29	23.4	2.67	8.55	50～75	未测	钨尾矿

* 该矿山的尾矿符合建筑材料研究部门所制定的规范。

按照上述标准，美国曾对21个矿山的尾矿进行了物理的、化学的和矿物组成等的检验，经检验结果(见表7-5)，只有七个矿山的尾矿符合标准。同时为了检验前述标准可用于矿石废料，因而又选用了十二种符合上述要求的各种砂子(如表7-6)，作致密的和轻质的硅酸盐建筑材料制品的技术特性研究，结果见表7-7和表7-8，表中十二种砂子所制成的制品与目前美国硅酸盐砖制造部门的规范(表7-9)相比较可以看出，所有十二种砂子的试验结果已超出了二级规格，其中有八种还超过了一级规格，而且这些制品都是按照一般的制造程序，而没有用特殊的加工方法，如果改变石灰的用量和烘干情况，其强度还可以提高。试验中发现，当砂子粒度过细时，其制品的收缩率偏大，然而混入一些粗粒度的砂子时，则其收缩率可以降低。

砂样检验 **表 7-6**

矿山编号	矿床	致密的	轻质的	选择原因
20	自然砂	X		从合格的砂子中选出来的
6	河流沉积	X	X	
1	矿脉	X	X	
4	冲击砂矿	X		
8	矿脉	X		
9	矿脉	X	X	
3	矿脉	X		石英量低、长石量高
17	矿脉	X		地方需要
16	自然砂	X		碱类和长石都高
18	矿脉	X		过于微小，矽质上量高
19	矿脉	X		距市场近
21	矿脉	X		钨尾矿

在建筑材料领域里，尚需在原料、制品工艺及技术经济上作更多的探索研究，这对于建筑材料工业的发展，大量利用工业废料，是有着极其重要的作用的。

四、用铁矿尾矿制重混凝土

苏联利用精选铁矿的尾矿制重混凝土，所用尾矿的粒度为

试制的致密硅酸盐建筑材料制品的技术特性

表 7-7

矿山编号	铸模加压（公斤/厘米²）	烘干		抗压强度						收缩率（%）	吸收		霜化
		温度（℃）	时间（小时）	湿度	样品 1（公斤/厘米²）	样品 2（公斤/厘米²）	样品 3（公斤/厘米²）	平均强度（公斤/厘米²）	用室内湿度校对强度（公斤/厘米²）		5小时（%）	最初速率（%）	
1	393.7	192	8	饱和				267.1	333.9	0.041	10.9	13.9	边沿霜化为白色
3	393.7	192	8	饱和				372.6	466	0.052	11.7	13.9	看不出霜化
4	393.7	192	8	饱和				189.8	237.6	0.055		12.1	同上
6	393.7	192	8	饱和				203.9	254.5	0.023	12.14	13.7	同上
9	393.7	192	8	饱和				323	404.3	0.045	—	—	边沿稍有霜化
16	393.7	192	8	饱和				182.8	228.5	0.032	—	11.7	看不出霜化
17	562.5	204	8	室内温度	616.6	596.2	611.7	608.2	608.2	0.056	13.1	12.0	无霜化
19	562.5	204	8	同上	207	196.1	213.7	205.7	205.7	0.045	16.1	27.3	同上
20 5	562.5	204	8	同上	340	397.2	362.1	366.5	366.5	0.038	17.9	33.3	同上
21	562.5	192	8	同上	375.4	359.9	368.4	367.9	367.9	0.11	14.5	9.9	圆柱顶部有些霜化
8	393.7	192	8	饱和				232	290.3	0.041	—	—	边沿霜化为白色
18	562.5	192	8	室内温度	431.7	437.3	471	446.7	446.7	0.16	—	93.5	无霜化

0.14～5毫米。

试制轻质硅酸盐建筑材料制品的技术特征　　表 7-8

矿山编号	容重 (磅/英尺³)	容重 (公斤/米³)	抗压强度 (公斤/厘米²)	收缩率 (%)	霜化
1	35.6	570	78	0.100	轻微霜化
6	36.8	589	70.3	0.075	同上
9	36.2	577	78	0.075	无霜化
参考资料				0.100	轻微霜化

生产硅酸盐砖部门的规范　　表 7-9

等级	最小抗压强度 (公斤/厘米²)	
	五个样品平均	个别
1	316.38	246.07
2	175.77	140.61
3	105.46	105.46

在制重混凝土的配料中，当天然砂与尾矿的配合比为70：30时，制成的混凝土的强度比用纯天然砂要高，随着尾矿用量的增加，强度也增高，但其工艺性能受到影响，需要加入表面活性添加剂。当天然砂与尾矿的比例为50：50时，制成的混凝土在正常硬化条件下，经过60天后的强度比用天然河砂制成的混凝土高12%，180天后的强度约为28天强度的1.3～1.5倍，轴向拉伸和弯曲拉伸强度也提高约11～22%。同时，这种混凝土每立方米的成本只有普通河砂混凝土的3/7。

五、用铜尾矿烧制红砖

美国某企业研究用铜尾矿制红砖。铜尾矿的化学成分为：SiO_2 70～80%，Al_2O_3 8～12%，Fe 1～3%，碱性物质6～9%。在铜尾矿中加入25～50%的塑性蒙脱伊利粘土❶，压制成砖坯，在900～1000°C温度下烧制成红砖。其红砖的性能如表7-10。

❶蒙脱伊利粘土的矿物组分为：
蒙脱石（皮岭石）Al，MgO和Na的一种复杂的含水酸盐。
伊利石Al，Fe，MgO和K的一种复杂的含水硅酸盐。

铜尾矿烧出的红砖性能　　表 7-10

坯料配比		抗折强度（公斤/厘米²）（950℃）	焙烧时的收缩（%）	吸水率（%）	抗冻融性循环次数	起霜（按ASTM C-67试验）	颜色
尾矿	粘土						
50	50	130	4.5	6	40⁺	不	橙红
60	40	126	4	9	40⁺	稍起霜	橙红
75（粗尾矿）	25	210	4	10	40⁺	不	同上
50～70（细尾矿）	25～50	260	5	11	40⁺	不	同上

此外，国外还研究了尾矿（或脱硫尾矿）采用干压缩法制成建筑用砖，压制砖坯的压力为352公斤/厘米²。用木质素磺酸钙作胶结剂以提高砖坯的强度，而后将砖坯置于1148℃的炉子焙烧三小时。在砖坯中加入氧化铁、氧化锰和氧化钙，可以使砖坯呈现出各种不同颜色，而不影响其物理性质。目前美国正在研究利用浮选尾矿制造挤压砖、瓶用玻璃和特制陶瓷材料。

六、用尾矿烧制陶瓷制品

日本某企业利用足尾选厂排出的尾矿作为陶瓷的原料，烧制陶管、陶瓦、溶铸陶瓷、耐酸耐火质器材等。日本足尾选厂的尾矿化学成分列于表7-11，与本国生产的陶管、陶瓦等陶制品所用的原料组成（表7-12）颇相接近，因此，日本进行了实际试验，并取得了比粘土为原料所制成的陶制品的强度还高。尾矿生产陶瓷制品是用隧道窑连续烧制的，工艺流程如图7-1所示，用尾矿所生产的产品是下水道用的厚陶管。

足尾选矿厂尾矿的化学分析结果　　表 7-11

粒径	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	烧失量
+104μ	79.56	10.43	0.15	0.65	4.80	1.50	0.30	0.16	1.92
104μ～44μ	78.59	10.54	0.32	0.80	5.48	1.37	0.22	0.23	1.76
-44μ	60.52	18.61	0.40	0.83	9.82	3.44	0.82	1.05	3.40

陶瓷制品原料的化学组成（%） **表 7-12**

名称 \ 成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O+Na_2O	烧失量
制陶管用的粘土原料	67.75	22.06	2.76	1.74	0.38	0.40	5.09
	67.29	23.59	1.38	1.44	0.99	1.69	6.01
	65.49	20.80	4.01	1.81	0.38	1.06	5.74
	63.10	21.73	2.79	2.44	0.77	1.40	7.51
制陶瓷用的粘土原料	82.49	7.8	3.63	1.06	0.71	2.08	1.78
	76.43	12.49	3.60	1.24	1.27	3.09	2.49
	75.79	8.09	3.64	2.75	1.27	2.27	3.42
	74.18	13.36	4.38	7.33	1.35	1.91	7.56
制耐酸耐火质器材原料	71.63	14.13	0.87	4.20	2.47	6.70	—
	71.01	23.69	1.48	0.31	0.45	2.88	—
	59.23	26.32	8.53	痕	痕	5.92	—
制瓦用的粘土原料	63.68	20.39	4.30	0.81	0.67	—	7.48
	60.23	20.84	4.78	1.20	0.72	—	6.89
	58.8	22.73	2.96	1.32	0.75	—	8.14

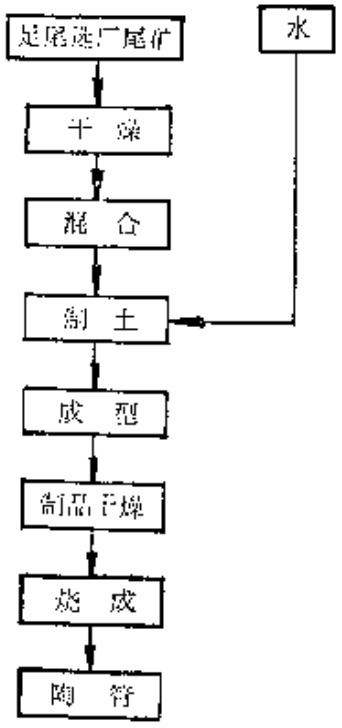


图 7-1 陶管制造流程

七、用尾矿烧制陶粒

1．利用尾矿烧制陶粒

日本秋田县北鹿的黑矿，其尾矿的矿物组成主要是绿泥石、绢云母，此外，还含有黄铁矿、石膏、重晶石等。用这种尾矿经制粒，煅烧（在回转窑内，1200～1220°C下烧成）后，即可得到抗压强度为300～400公斤/厘米^2，假比重为1.4，粒径10～15毫米的陶粒。但其陶粒中SO_3的含量，较工业标准中规定（为0.5%以下）稍高一些。轻集料的比重为1.2～1.6，用以配制混凝土的抗压强度可达225公斤/厘米^{2}以上。

2．利用磷酸盐矿泥烧制陶粒

美国佛罗里达州磷酸盐矿泥的产出工艺如图7-2。

磷酸盐矿泥中含蒙脱石、绿波罗石、银星石等粘土矿物40%，石英35%，磷氟灰石（磷酸盐岩）25%。

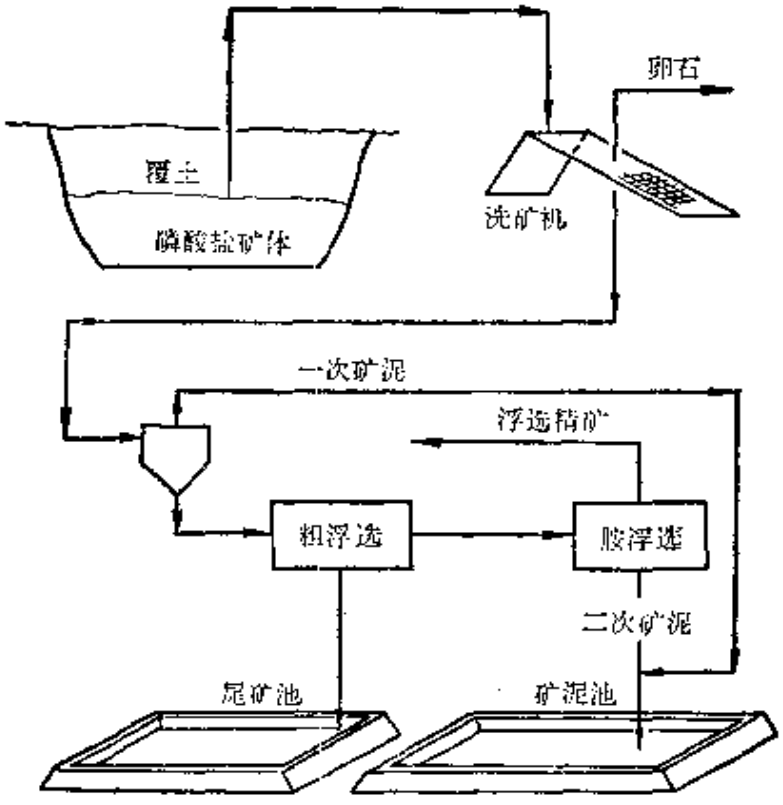


图 7-2　佛罗里达州磷酸盐矿生产工艺流程

由于磷酸盐矿泥含水高达70%，据试验证明，用回转窑干燥和喷射干燥均不经济，因而最后选用了截流式干燥机，其干燥方法如图7-3所示。含固体30%的磷酸盐泥浆经过连续干燥后，得到一固体含量为95～99%的粉末，干燥机的原料效率为75%，据半工业试验证明，这种干燥机的效率高，可用于工业生产。

经过干燥的磷酸盐矿泥用圆盘式成球机制粒成球，然后入回转窑中煅烧，烧成温度为1050～1100°C，所烧制陶粒的松散容重为20～30磅/英尺^3(320～480公斤/米^3)，质量良好(见表7-13)，抗压碎强度高，可用以配制高强度的轻质混凝土，而且容重大大低于美国材料试验协会规定的最大值115磅/英尺^3 (即1841公斤/米^3)。用磷酸盐矿泥烧制的陶粒作为集料所配制的各种混凝土，

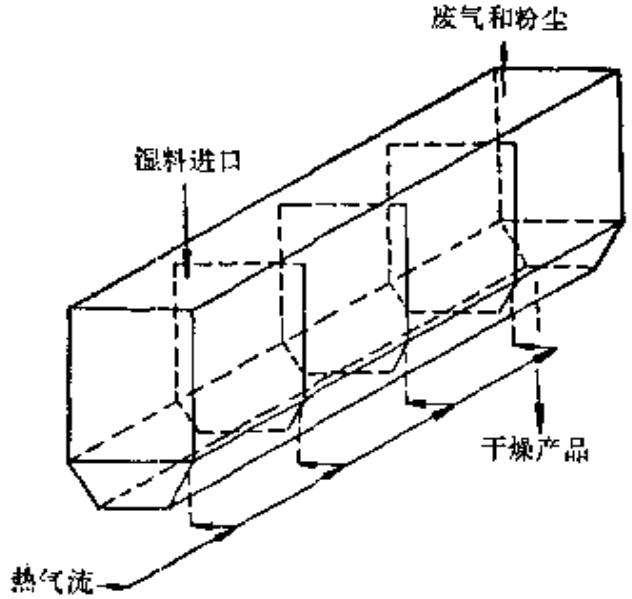


图 7-3　流态化床干燥机

与用细集料砂子所配制的混凝土对比试验结果说明，用磷酸盐矿泥生产的陶粒集料所配制的各种混凝土是符合美国材料协会规范的。

八、硅质尾矿烧制玻璃和花砖及微晶玻璃

硅质尾矿含有大量的石英、长石或硅酸钙等，这种尾矿可用以制造玻璃，但由于尾矿中含有硫化物和铁质，因而所制玻璃呈微绿色。制造钙钠玻璃时，其尾矿的用量占配料比的60%。用溶

用磷酸盐矿泥制备的陶粒轻集料之性能　　表 7-13

试验内容	方　法	结　果
钢筋锈蚀	ASTM C330	钢筋锈蚀度为轻~极轻锈蚀背板40～20
烧失量	同　上 C114	化学分析表明，挥发份<0.6%
有机杂质	同　上 C40	无明显有机物
易碎颗粒	同　上 C142	无
细　度	同　上 C142	5.62（粗集料）
单位重量	同　上 C29	平均27.92磅/英尺³（以干燥计）
容　重	同　上 C127	1.16
吸水率	同　上 C127	32.2%
安定性（硫酸钠）	同　上 C88	～4.8%粒度减少

渣制成的玻璃板可做墙壁的嵌板（规格为153×305厘米）或30.5×30.5厘米的花砖，供建筑应用。

国外某矿山的铜尾矿，富含SiO_2和Al_2O_3，其化学成分如表7-14，经脱硫后，外配其他原料，试制微晶玻璃。所制的微晶玻璃甲和乙是用尾矿加$CaCO_3$和Cr_2O_3，经过球磨后，煅烧溶化铸模（规格为1×1×7.5厘米），冷却后，再回火加热到结晶温度（甲750°C，乙800°C）然后保温至1～4天。除个别样品外，其余表面均有磨损。

样品的抗弯强度（破损系数）是用四点弯曲法测定的，测定结果列于表7-15。

尾矿和微晶玻璃的化学组成　　表 7-14

序号	名　称	尾矿成分（%）	微晶玻璃甲（%）	微晶玻璃乙（%）
1	SiO_2	73.8	56.8	61.2
2	Al_2O_3	12.0	9.2	10.0
3	Fe_2O_3	2.4	1.8	2.0
4	MgO	3.0	2.3	2.5
5	CaO	0.8	23.6	17.3
6	K_2O	6.3	4.8	5.2
7	Na_2O	0.9	0.7	0.7
8	Cr_2O_3	—	0.4	0.4

微晶玻璃破损系数测定结果　　表 7-15

烘热天数	平均最大强度			
	甲		乙	
	(磅/英寸²)	(公斤/厘米²)	(磅/英寸²)	(公斤/厘米²)
1	6900	485	11300	795
2	7200	506	9300	654
3	5900	415	40500	2847*
4	6900	485	8600	605

* 样品表面的结晶层，试验前未磨损过。

从表中可以看出，氧化钙含量低，则强度较大，而且结晶时间不必过长。

表面磨损对于强度的影响不大，表面晶化则需进一步研究。很可能因为表面和内部膨胀系数不同，表面受压，增加了强度。

关于玻璃晶化问题，尚需作大量的工作。据初步实验认为，Cl_2O_3是促进结晶的催化剂。Cl_2O_3在750°C～800°C的温度下，由于F^{++}、Cu^{+}等的还原作用，改变了原子价，形成了金属胶体物质的缘故。

为了检验上述的假设，曾按表中甲，乙制品的原料组成，不外加Cl_2O_3，在800°C温度下焙烧24小时后，则可明显看出其结晶情况。因此，可以断定，除Cl_2O_3外，其它接触剂也可以起相同作用。

另将比较纯的CaO和SiO_2按表7-14中，甲、乙制品的原料组成进行配制，而后进行焙烧，所制玻璃结晶很好。上述情况说明，不管任何熔渣或尾矿，也不管CaO高，MgO高或SiO_2高，只要配料适当，均可导致较好的结晶。

九、用石棉尾矿制矿棉

加拿大魁北克南部的石棉矿，每年产出130万吨的石棉尾矿，其尾矿主要是蛇纹石并含有少量磁铁矿和铁-镍矿物。魁北克三个矿山石棉尾矿的化学成分列于表7-16。

魁北克三个矿山石棉尾矿化学成分　　表 7-16

试　样	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	H_2O	Al_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	Ni	烧减	总计
尾矿 1	41.37	37.50	6.76	0.54	0.30	0.40	0.05	0.05	未验	13.29	100.26
尾矿 2	38.85	38.65	8.32	0.54	0.83	0.56	0.06	0.09	未验	12.59	100.49
尾矿 3	40.07	37.84	7.65	0.38	0.31	0.20	0.07	0.05	未验	13.41	99.98

矿棉的试制是将石棉尾矿和高纯度的石英，按70～85%与30～15%的配比，在单相、双电极、60千伏安的电弧内，于1540°C的温度下熔化，熔体的化学成分列于表7-17。将熔体从炉子倒出，用高压空气喷管鼓吹，使之分散成小颗粒，这些颗粒即形成矿棉纤维丝。然后用风机将矿棉抽入一个集中仓中。而镍-铁留于炉底，据初步估计其镍含量在5%以上，这种镍铁可加以回收并补石棉的生产费用。用配比为70%的石棉尾矿和30%的纯石英砂的混料，可获得优质矿棉。

配料熔体的化学成分　　表 7-17

配　料	重　量　(%)										
熔　体	MgO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	K_2O	Ni	H_2O	Na_2O	烧减	总计
熔体3（20%石英砂，80%尾矿）	39.44	53.46	5.74	0.85	0.84	未验	0.08	未验	未验	未验	100.51

十、各种尾矿在建筑材料方面的利用研究情况

1．黄铜矿选矿尾矿可制硅酸盐墙材，制取蒸压致密混凝土及泡沫混凝土。通过半工业性试验制出250～400号致密混凝土，其软化系数为0.911～0.96，抗冻系数为0.85～0.92。

2．利用黄铜矿尾矿制作容重为550～1000公斤/米^{3}泡沫混凝土，其抗压强度为35～150公斤/厘米^2，符合(CH-287-65)泡沫混凝土制品(*A*级)要求。

3．钛锆矿尾矿可用于玻璃工业生产各种玻璃及容器。

4．在铜矿尾矿含碱废料中加入珍珠岩、苏打和窗玻璃粉可制成泡沫材料。

5．浮选锰矿石的浸出泥(或渣)可用于生产有色玻璃及石膏熟料。

6．磁铁矿石的选矿尾矿可用于生产蒸压混凝土。

7．铜钼矿石尾矿用作泡沫玻璃。

8．浮选排出的含SiO_2较高的铅锌尾矿是一种很好的蒸养混凝土集料，可用于生产建筑砖及其他建筑材料制品。

十一、利用尾矿修筑公路

1963年美国爱达荷州公路局，在靠近爱达荷州克劳格90英里(144.837公里)州际公路上，利用沉积的粗粒尾矿修筑了长约4英里(6.437公里)的一段公路。填筑范围由九英尺到20英尺，这段公路已经出色地运行了七年。

为选取适宜粒度的尾矿作建筑材料，日本将尾矿过筛，用细粒尾矿作沥青填料。

苏联利用矽铁矿的尾矿作为修筑道路的材料，使用时与沥青混合，其效果很好。

十二、其他废料的利用研究

1．磷石膏废料制作石膏灰泥❶

用磷矿石制作肥料或磷酸时，石膏常作废料排弃。

废料脱水成为石膏粉，当含有杂质时即为低级石膏粉。

二水石膏加热脱水后即成为石膏灰泥粉，即半水石膏，其化学反应方程式如下：

$$\underset{\text{石膏}}{CaSO_4\cdot 2H_2O}\xrightarrow{\text{加热}}\underset{\text{石膏粉}}{CaSO_4\cdot\frac{1}{2}H_2O}+\frac{3}{2}H_2O$$

❶我国在生产磷酸时常用硫酸分解天然的磷矿石萃取磷酸，在萃取法的生产过程中产生的硫酸钙是很多的，如以干基来表示约为所用磷矿石量的1.3～1.6倍。

$CaSO_4$是无水石膏，可以将半水石膏过烧形成，但没有硬化特性。因此应该特别注意的是，在脱水工作中，不应产生石膏过烧现象，而应尽量控制烧成半水石膏粉。

将磷石膏废料经过不同时间和不同温度的加热脱水试验，可得出最佳的煅烧时间和加热温度。例如，对某矿的石膏进行加热脱水工作，得到最佳的生产条件时间是55分钟，温度是160°C。

石膏灰泥凝结时间的长短，对于加工是很重要的。因质量和用途不同，终凝时间可由15分钟到4～5个小时。研究凝结时间有两个标准，一个是开始大量结晶的时间，即为初凝时间。从理论上讲，石膏灰泥在这个时间其强度较差。另一个是产生热能结晶完成时间，即终凝时间，其强度较高。而某些物质的加入则会影响凝结时间，如柠檬酸钠就是一种缓凝剂。

表7-18列出石膏废料产品的抗压强度。从这种废料产品的强度和凝结时间来看，磷石膏废料是适用于工业产品的生产的。

石膏废料产品抗压强度 **表 7-18**

标记	样品编号	平均抗压强度（公斤/厘米²）	备注
U、S、G、P	16	349.4	加压速度为每分钟
S、P	4	161.0	3.1638公斤/厘米²
S、P（含1/2%柠檬酸钠）	6	377.6	

2．铁屑制陶瓷磁铁

用铁屑制的陶瓷磁铁，无论在化学成分上和在物理性质上，都引起了在工业上应用的重视。用这种磁铁所制造的电动机很快在工业上处于优势地位。特别是小于3马力的小电动机，因为它不仅可减少铜线的用量，而且还可减少电耗。

由于陶瓷磁铁具有较高的保磁性（即陶瓷磁铁抵抗消磁的能力），因而它可用于高电场而不会消磁。如有需要，可在同一块陶瓷磁铁上配制成几个磁极。它不象一般的金属磁铁那样需要几

个磁极来维持磁化。因为，它有陶瓷的性质，所以较少受到毁损和腐蚀，可用于比一般磁铁更不利的环境中。

制造陶瓷性质的永磁所用的原料是单一的，它不包含任何稀贵元素，如钴、镍、铂等，因而这是它的优点。然而金属永磁的制造则是需要稀贵些元素的，二者对比说来，陶瓷磁铁又需要氧化钡或氧化锶和氧化铁。氧化钡是用碳酸钡，氧化铁是用赤铁矿。钡质永磁的化学成分是$BaFe_{12}O_{19}$，通常用$BaO \cdot 6Fe_2O_3$表示。有时也渗入微量的高岭土，硅藻土和矾土。其含钡较高和密度较大的为$Ba \cdot 5.5Fe_2O_3$。

目前用高质纯洁的赤铁矿制造永磁和非永磁。最近又建议采用轧钢的铁屑代替赤铁矿。铁屑是在轧钢过程中经过氧化的氧化铁。用铁屑制造永磁不但成本低，而且利用了废料。

已经有成功的方法比较磁的强度，$BaO \cdot 6Fe_2O_3$为六方晶系结构，是关系到永磁性质的。将碳酸钡和赤铁矿一起研磨成粉，均匀混合后，煅烧成化合物，形成永磁。用 X-射线分析，以检验和鉴定化合物的形成，这个形成是关系到用铁屑制造永磁成败的关键。用化学作用沉淀下来的氧化铁粉末比铁屑经磨细所得的粉末要微细得多，对于原料磨得越细而且混合得越均匀越好。

3．利用石棉废屑制耐火材料

石棉矿在生产过程中，产出大量的石棉废屑，这种废料经电炉熔炼后将铁和镍除去，其熔渣硅酸镁则是制造砖和陶瓷的理想原料，而最有价值的则是作耐火材料和绝缘材料。

参 考 文 献

〔1〕 Строительные материалы. No.5 1961.

〔2〕 П.И.Соловьев и О.С.Богданов. Обогащение медных руд Коунрадского месторождения. ОНТИ НКТП СССР, 1935.

〔3〕 Т.И.Реброва, Некоторые данные петрографических исследований состава Джезказганских медистых песчаников. «Вестник Академии наук Казахской ССР» No.8, 1948.

〔4〕 Ж.П.Леви, Легкие бетоны, Госстройиздат, 1958; И.Т. Кудряшев. Автоклавные ячеистые бетоны и их применение в стро-

ительстве, Стройиздат, 1949; К.М.Ильинич, «Строительные материалы» No.6, 1959; О.Е.Бенеисон, то же, No.11, 1958; А.С. Валор, Ячеистые бетоны. Переводы ЦИНИ АСиА СССР, 1957.

〔5〕 Технические условия на изготовление сборных изделий из автоклавных ячеистых бетонов. Научно-исследовательский институт бетона и Железобетона Академии строительства и архитектуры СССР. Гос. издат литер. по строительству, архитектуре и строительным материалам. Москва, 1959.

〔6〕 Proceedings of the Second Mineral Waste Utilization Symposium Cosponsored by the U.S. Bureau of Mines and IIT Research Institute. 1970年3月, p. 139—165.

〔7〕 廃棄物の処理再利用，無公害システムへのアプローチ，廃棄物の処理，再利用編集委員会編，株式会社，建設産業調査会刊，p 264—265頁，選鉱廃さい.

〔8〕 Proceedings of the Third Mineral Waste Utilization Symposium. Industrial Wastes-Scrap Metal-Mining Wastes-Municipal Refuse. March 14. 15. and 16, 1972 Chicago Illinois. p. 171—177.