

全尾砂结构流体胶结充填的理论与实践^{*}

姚中亮^{1,2}

(1. 长沙矿山研究院, 湖南 长沙 410012; 2 国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:随着对矿产资源不可再生性的认识加深及环境保护要求的日趋严格,全尾砂充填在金属矿山的应用越来越普遍。论述了国内外全尾砂充填现状,提出了全尾砂结构流体充填方法。在实验室试验的基础上,进行了全尾砂结构流体流变参数的测定及输送性能的理论分析计算。结合矿山充填实践,介绍了该种充填方式的工艺流程及其应用效果。

关键词:全尾砂胶结充填;全尾砂结构流;流变参数;工程实例

中图分类号:TD853.34 文献标识码:A

文章编号:1005-2763(2006)S1-0015-04

Theory of and Practice in Cemented Filling with Unclassified Tailings Structure Fluid

Yao Zhongliang^{1,2}

(1. Changsha Institute of Mining Research, Changsha, Hunan 410012, China; 2 National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: With a further understanding of mineral resources not to be regenerated and increasingly strict requirements of environment protection, the application of unclassified tailings filling is getting wider and wider in metals mines. The author describes present situation of unclassified tailings filling in China and other countries, puts forward unclassified tailings structure fluid filling technique, carries out theoretical analysis and calculation of the rheological parameters and transport property of unclassified tailings structure fluid based on lab experiments, and makes an introduction to technological flowchart and operation results of this filling method in combination with practice in mine fill.

Key Words: Cemented filling with unclassified tailings, Unclassified tailings structure fluid, Rheological parameter, Engineering example

1 国内外全尾砂充填的现状与评述

选矿尾砂历来是矿山充填的首选材料。将尾砂充填于井下不但可提高矿石回收率,防止矿山上覆岩层崩落及地表塌陷从而保护矿区地表,还可大幅

度减少尾矿堆放占地及减轻或消除尾矿库等遗留的安全隐患。国内外广泛运用的充填方式是分级尾砂充填,即将选厂尾砂(总尾或全尾砂)进行分级,粗颗粒用于井下充填,而细颗粒则排放至尾矿库。该种充填方式虽可使充填料渗透系数满足生产技术要求,但细颗粒尾砂未能得到利用,且细颗粒尾砂堆存困难,尾矿库建设要求高,在尾砂产率较低或磨矿细度小的条件下,尾矿充填利用率低,还需用其它材料(如河砂、山砂、棒磨砂、戈壁集料等)进行补充。

全尾砂充填则不对尾砂进行分级而充入井下,从而可避免尾砂分级所带来的上述问题。在尾砂产率较高的高品位铁矿山、多金属共存的铅锌矿山等,选矿尾砂可全部充入井下,从而可不设尾矿库而实现尾废“零排放”。高质量的全尾砂充填能给采矿作业提供良好的作业条件,能有效地保护矿区地表及周边环境,矿山整体技术经济效益高,社会环境效益好,所以越来越受到矿山企业的重视和运用。可以预见,随着对矿产资源不可再生的认识加深及对环境保护的要求越来越严格,全尾砂充填在金属矿山的运用将越来越普遍。

由于全尾砂含有细颗粒,与分级尾砂充填相比,技术要求更高,其突出的特点是必须提高充填料浆浓度,否则充填料浆充入采空区后,细粒级尾砂将悬浮于充填体表面,凝固缓慢;充填体渗透性差,充填料浆脱水困难,若溢流脱水,则大量细颗粒及水泥将涌入井下巷道,造成巷道污染;充填料浆离析造成充填质量差,给采矿作业带来困难。所以,当采用全尾砂充填时,必须实现高浓度,以避免充填料浆的离析及跑浆现象。为了提高全尾砂充填料浆浓度,国内外进行了大量的研究,目前应用最为广泛的充填工艺是对全尾砂进行浓密-过滤两段脱水,使全尾砂滤饼含水率降至10%~12%或更低,全尾砂滤饼经计量后供料给强制搅拌机,在搅拌机中添加水泥、其

* 收稿日期:2006-07-16

作者简介:姚中亮(1960-),男,湖南望城人,教授级高级工程师,硕士,主要从事采矿技术与开发工作。

它充填集料及浓度调节后,搅拌制备成膏体充填料,然后用液压双缸活塞泵加压或通过自然压头经充填钻孔及井下管网输送至井下进行充填。

2 全尾砂结构流体胶结充填的定义和特点

全尾砂结构流体胶结充填是指采用选矿全尾砂作为主要充填集料,以水泥或水泥代用品为胶结剂,充填料中 $-20\mu\text{m}$ 颗粒含量不低于 $15\%\sim 20\%$;充填料浆坍落度为 $23\sim 25\text{cm}$;充填料浆在管道及采场中呈结构流动;充填料浆在采场空区中不产生离析脱水;充填料流平性好,坡积角小于 $3^\circ\sim 5^\circ$;凝固硬化后充填体整体性及均匀性好,充填体强度满足采矿方法要求的一种充填方式。

从以上定义可得出全尾砂结构流体胶结充填具有以下几个方面的特点:

(1) 全尾砂和胶结剂的充填料粒级组成含有 $15\%\sim 20\%$ 以上的 $-20\mu\text{m}$ 极细颗粒。在管道输送过程中,极细颗粒在压力作用下而趋于管壁,在管壁形成润滑层,从而一方面减轻管壁磨损,另一方面可降低管道输送阻力,给料浆的顺利输送创造条件。

(2) 充填料浆坍落度为 $23\sim 25\text{cm}$ 。膏体充填一般设定坍落度为 $15\sim 23\text{cm}$ 。实验室试验及理论分析计算表明,坍落度小于 22cm 时,充填料浆流动阻力较大,在充填倍线较小的条件下($<2\sim 3$)难于实现自流输送,而需采用泵压输送。坍落度小,充填料各组分特别是全尾砂浓密-过滤、计量供料工艺复杂,充填料制备难度较大。而将充填料浆坍落度提高至 $23\sim 25\text{cm}$,可使充填料浆制备输送工艺大为简化,从而使充填更易于实施。

(3) 充填料浆在管道及采场中呈结构流动。即充填料浆在管道及采场中流动的过程中粗细颗粒之间不存在速度梯度,而呈整体结构流动。当充填料浆坍落度小于 25cm 时,自身即具有初始抗剪力 τ_0 ,由于 τ_0 的存在,充填料浆在管道中可实现低速满管流,静止一段时间不会产生离析现象,短时间静止后还可重新启动而不产生堵管,这与分级尾砂充填料浆的两相流管道输送具有本质的区别。

(4) 充填料浆在采场中不产生离析脱水现象。呈结构流性态的充填料浆自身可不脱水,加之可实现低流速管道输送,充填前不需引管水而只用少量水润滑管道,充填结束只需 $2\sim 3\text{m}^3$ 水即可冲洗管道,从而可使水的影响减小到最低限度。整个充填作业可使充填料浆在采场中不产生离析及脱水现

象。少量泌水及洗管水可通过充填体自身吸收和采场围岩裂隙渗透,采场中不存在积水,更不会产生溢流等现象,从而使采场及井下巷道作业条件大为改善。

(5) 充填体平整性好。由于充填料浆流平性好,坡积角小于 $3^\circ\sim 5^\circ$,所以充填料浆凝固硬化后平整性好,这一方面可大为改善采场作业条件,有利于减少矿石损失贫化,另一方面有利于长条形采场的充填作业,更有利于各类采场空区充填接顶。

(6) 充填体整体性好,充填质量高。由于充填料浆在采场中呈结构流动,不存在离析分层现象,所以充填体整体性好,质量均匀,通过调整灰砂比可获得不同强度的充填体,从而满足不同采矿方法或充填部位的技术要求。

3 全尾砂结构流体胶结充填的实验室试验及半工业试验

为了实现全尾砂结构流体胶结充填,必须进行较系统的实验室试验及半工业试验,并依据矿体开采技术条件所选用的采矿方法,确定合理的充填体强度,根据矿体产状及赋存特点布置充填管网。通过实验室试验及半工业试验,可确定合理的充填料浆制备参数(浓度、灰砂比、流量等),根据流变参数测定及输送性能分析计算确定充填料浆的输送方式(自流或泵压输送)。具体的试验研究内容如下。

(1) 全尾砂全粒径测定及基本物理化学参数测定。由于各金属矿山矿石性质不同,选矿工艺条件相差较大,致使全尾砂粒级组成及基本物理参数(如比重、容重、孔隙率等)和化学性能(如化学成分、矿物组成、有用成分含量等)相差较大。不同的全尾砂充填料浆在不同浓度时呈现不同的流动状态。当全尾砂中 $-20\mu\text{m}$ 颗粒含量大,比重较小时,充填料浆最大浓度可能低于 70% ,而全尾砂颗粒较粗,比重大时,最大浓度可达 $76\%\sim 78\%$ 。

(2) 充填料浆配比优化试验。根据矿山内外部技术条件,选定充填料组成,进行不同浓度、不同灰砂比的强度试验,得出充填体的强度变化规律,根据采矿方法要求,确定合理的灰砂比。

(3) 充填料浆流变参数测定及输送性能分析计算。对全尾砂充填料浆进行坍落度试验及流动性试验(L型管道试验),在条件具备时还可进行泵送环管试验,以得出不同浓度充填料浆的流变参数,从而分析计算不同流量时沿不同管径流动的管道阻力,

为矿山充填管网的设计及确定充填料浆输送方式(自流或泵送)提供依据。

4 全尾砂结构流体流变参数测定及输送性能分析计算

全尾砂结构流体呈宾汉流体特性,其流变参数是决定其输送性能的核心参数,可用屈服剪切应力 τ_0 及粘性系数 η 表示。 τ_0 的物理意义为料浆在静止状态下抵抗剪切变形的能力, η 为料浆在运动状态下的抵抗剪切变形的能力。 τ_0 、 η 的测定可用各种粘度测定仪测定,亦可采用泵送环管试验测定。在实验室则可采用 L 型管道自流输送试验进行测定,试验装置如图 1 所示。配制不同浓度不同配比的充填料浆,由该装置可测得料浆流量、流速及流动结束后静止状况下竖管中料浆柱的高度,并可由以下公式计算 τ_0 、 η 。



图 1 实验室 L 型管道自流输送试验装置

$$\tau_0 = \frac{r \cdot h_0 \cdot D_0}{4(h_0 + L)} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{(3 - 4\tau_0) D_0}{24V} \quad (2)$$

式中： r ——料浆容重， kN/m^3 ；

h_0 ——静止状态下竖管中料柱高度， m ；

D_0 ——试验管道直径， m ；

L ——试验管道水平长度， m ；

V ——料浆在试验管道中的流速， m/s ；

τ_0 ——试验工况下所计算的剪切应力， Pa 。

工业生产过程中,可根据以下公式计算料浆流动阻力 i

$$i = \frac{16\tau_0}{3D} + \frac{32\eta V}{D^2} \quad (3)$$

式中： i ——料浆管道内流动阻力， Pa/m ；

V ——工业生产时料浆在充填管道中的流速， m/s ；

D ——充填管道内径， m 。

设实际充填时局部阻力损失及出口损失之和为沿程阻力的 15%，则实现自流输送所能达到的最大充填倍线为：

$$N = \frac{H+L}{H} = \frac{r}{1.15i} \quad (4)$$

式中： H ——充填管网的垂直管道高度之和， m ；

L ——充填管网的水平管道长度之和， m 。

在充填管网优化设计时,可根据 L 型管道自流输送结果计算不同浓度时充填料浆的 τ_0 和 η ,再根据不同的充填料浆流量及管道直径计算料浆流速,列表计算出不同浓度时所能达到的最大充填倍线,从而最终确定充填料浆制备参数及管网布置参数,以实现充填料浆的顺利输送。

5 矿山工程应用实例

某铅锌银矿位于城郊风景区,矿体正上方有城镇及河流,地表不允许陷落,矿区及周边生态环境必须得到严格保护,无尾矿库建设条件,加之矿石品位及价值高,所以必须实现高质量的全尾砂胶结充填。

为了实现全尾砂结构流体胶结充填,先后进行了较系统的实验室试验,半工业试验及理论分析计算,其中包括全尾砂全粒级测定、全尾砂基本物理化学性能及参数测定、充填料浆配比优化试验、全尾砂沉降特性试验、全尾砂充填料浆坍落度测定、实验室 L 型管道自流输送试验、现场地表 L 型管道自流输送试验、液压双缸活塞泵(混凝土泵)环管试验等。其中全尾砂料浆坍落度试验结果见表 1。

表 1 全尾砂坍落度试验结果

| 重量浓度 (%) | 坍落度 (cm) | 重量浓度 (%) | 坍落度 (cm) | 重量浓度 (%) | 坍落度 (cm) |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 80 | 11 | 74 | 23 | 68 | 28 |
| 78 | 18 | 72 | 25.5 | 66 | 28 |
| 76 | 21 | 70 | 27 | | |

通过实验室 L 型管道自流输送试验结果,计算出不同浓度全尾砂料浆的流变参数见表 2。通过理论计算,得出不同浓度、不同流量及不同充填管道直径条件下,所能实现的最大充填倍线见表 3。

表 2 不同浓度全尾砂料浆的流变参数

| 料浆浓度 (%) | τ_0 (Pa) | η (Pa·s) | 料浆浓度 (%) | τ_0 (Pa) | η (Pa·s) |
|----------|---------------|---------------|----------|---------------|---------------|
| 76 | 42.04 | 24.79 | 72 | 14.61 | 0.524 |
| 74 | 25.01 | 17.41 | 70 | 7.95 | 0.227 |

表 3 不同输送参数下可实现的自流输送倍线

| 料浆浓度 (%) | 管道内径 (mm) | 料浆流量 (m ³ /h) | | | | | | |
|-------------|--------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 74 | 80 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 90 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 100 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 110 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 125 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 140 | - | - | - | - | - | - | - |
| | 150 | 1. 04 | - | - | - | - | - | - |
| 72 | 80 | 2. 468 | 2. 033 | 1. 729 | 1. 504 | 1. 328 | 1. 193 | 1. 081 |
| | 90 | 3. 73 | 3. 10 | 2. 657 | 2. 321 | 2. 063 | 1. 855 | 1. 686 |
| | 100 | 5. 295 | 4. 455 | 3. 845 | 3. 383 | 3. 019 | 2. 726 | 2. 485 |
| | 110 | 7. 172 | 6. 112 | 5. 322 | 4. 714 | 4. 23 | 3. 786 | 3. 462 |
| | 125 | 10. 476 | 9. 091 | 8. 03 | 7. 19 | 6. 51 | 5. 947 | 5. 473 |
| | 140 | 14. 22 | 12. 564 | 11. 26 | 10. 195 | 9. 32 | 8. 578 | 7. 95 |
| | 150 | 16. 91 | 15. 122 | 13. 674 | 12. 479 | 11. 477 | 10. 623 | 9. 88 |
| 70 | 80 | 5. 352 | 4. 436 | 3. 788 | 3. 306 | 2. 932 | 2. 634 | 2. 391 |
| | 90 | 6. 627 | 6. 695 | 5. 765 | 5. 062 | 4. 512 | 4. 069 | 3. 706 |
| | 100 | 11. 21 | 9. 526 | 8. 28 | 7. 322 | 6. 563 | 5. 947 | 5. 436 |
| | 110 | 14. 97 | 12. 89 | 11. 31 | 10. 09 | 9. 094 | 8. 139 | 7. 505 |
| | 125 | 21. 41 | 18. 81 | 16. 76 | 15. 12 | 13. 76 | 12. 64 | 11. 69 |
| | 140 | 28. 49 | 25. 50 | 23. 08 | 21. 08 | 19. 39 | 17. 96 | 16. 72 |
| | 150 | 33. 48 | 30. 30 | 27. 67 | 25. 46 | 23. 61 | 21. 99 | 20. 57 |

综合上述试验研究结果,结合该矿具体条件,确定充填料浆制备输送参数为:充填料浆浓度 70% ~ 72%,流量 60 ~ 80 m³/h,充填管道内径 90 ~ 100 mm,管内流速 2.12 ~ 3.5 m/s,输送阻力 8.10 ~ 1.97kPa/m,充填倍线 2.07 ~ 8.28。

在上述试验研究基础上,确定了充填系统工艺流程,新建了充填系统。充填系统主体工艺流程为:选厂全尾砂经浓密后浓度约 50%。通过渣浆泵加压后经管道输送 1.4 km 的距离至充填站的卧式砂池中进行自然沉降。待沉降至最大沉降浓度后,排除全尾砂料面以上的澄清水,然后采用压气造浆使砂池中全尾砂浓度均匀。充填时打开砂池底部的放砂阀,将全尾砂浆定量输送至搅拌机中,水泥则经散装水泥仓底部的双管螺旋给料机给料,螺旋电子秤计量,按配比加入搅拌机。采用双卧轴搅拌机+高速活化搅拌机两段搅拌,搅拌均匀后的全尾砂充填料浆呈结构流性态,经流量及浓度检测后进入料斗,再通过充填钻孔及井下管网自流输送至井下充填。

进入充填钻孔的料浆性态见图 2。充填料浆进入采场空区的流动状态见图 3,充填料浆凝固硬化后所形成的充填体表面状况如图 4。

充填系统投入运行已近 2 年,并在生产中取得以下效果。

(1) 系统工艺流程畅通,运行稳定,特别是放砂浓度及充填料浆浓度稳定,从而使配比参数稳定,为保证充填质量稳定提供了前提条件。

(2) 充填料浆在管道及采场中呈结构流动,不产生离析及脱水。

(3) 充填料浆凝固速度快,强度满足上向水平分层采矿方法要求,当灰砂比为 1.4~1.6 时,充填后第 2 天即可进入采场进行作业。



图 2 充填料浆进入钻孔

(4) 实现了尾废“零排放”。选厂全部尾砂均充入井下空区,掘进废石亦充入采场,矿山未建尾矿库,从而实现了严格意义上的全尾砂充填及尾废

(下转第 48 页)

液压传动等技术国际合作的经验,合作要把握的要点是,其一,掌握技术方案的决策权,最终形成的技术成果所有权为我方所有;其二,合作方提供的单元技术,必须是其特征技术,是可开放、可集成的技术,并可改造成为我方的平台技术;其三,技术力量配置具有互补性,关键环节,我方应派人直接参加境外的技术工作,身临其境,深度介入。通过合作,有利于掌握其核心技术。

3.4 加速构建深海采矿产业

深海采矿技术是未来海洋产业中的先导性行业技术,经过 15 年的发展,我国深海采矿技术已经形成了一批具有产业化开发价值的技术成果,这些成果为构建新的产业奠定了坚实的基础。基于现状,在建立国家深海产业的总体框架下,优先构建深海矿物资源开采业、深海技术装备制造业等深海高技术产业群,势在必行。组建国家深海产业基地。未来 5~15 年,是孕育并催生我国深海矿物资源开采及深海技术装备制造业等产业的重要机遇期,抓紧

筹建深海产业基地,对深海产业的形成和发展具有战略意义和现实意义。

积极推进国家有关的技术发展规划与产业发展相关计划间的链接互动。在规划解决深海矿物开采技术发展的“瓶颈”问题的同时,同步对解决制约研究成果产业化的关键技术问题等进行规划。通过深海开采技术发展创立深海矿物开采产业,通过深海矿物开采产业发展创新深海开采技术。

参考文献:

- [1] 陈新明. 深海采矿中试集矿机技术设计课题研究报告[R]. 长沙:长沙矿山研究院,2000.
- [2] 中国大洋协会. 进军大洋十五年[M]. 北京:海洋出版社,2006.
- [3] 金建才,毛彬,张克宁,等. 国际海底管理局十年[M]. 北京:海洋出版社,2005.
- [4] 长沙矿山研究院. 深海采矿技术经济研究[R]. 长沙:长沙矿山研究院,1997.
- [5] 陈伯镛,李桂香. 海洋高技术[M]. 上海:上海科学技术出版社,1994.

(上接第 18 页)

“零排放”,有效地保护了矿区及周边生态环境。



图 3 填充料浆在空区的流动状态



图 4 填充体表面状况

6 结 论

通过较系统的实验室试验、理论分析及生产运用,可得出以下结论:

(1) 全尾砂结构流体充填料浆具有流动性好、在管道及采场空区中呈结构流动,不离析、脱水,充填料浆凝固快、充填体整体性好的特点,强度满足各种采矿方法要求,是一种行之有效的充填方式。

(2) 该种充填方式工艺流程畅通,系统运行稳定,较国内外通常采用的全尾砂浓密-过滤两段脱水相比,系统建设投资及运营成本大为降低,技术可靠性更高,更易于实施。

(3) 高质量全尾砂充填不对尾砂进行分级而充入井下,既可保护矿区地表、减少或避免尾矿堆放占地,有效地保护矿区及周边生态环境,还可为采矿作业提供良好的条件,从而可最大限度地提高矿石资源回收率,使矿山获得最大的总经济效益及良好的社会环境效益。

综上所述,全尾砂结构流体胶结充填具有十分广阔的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 王方汉,姚中亮,曹维勤. 全尾砂膏体充填技术及工艺流程的试验研究[A]. 第八届国际充填采矿会议论文集[C]. 长沙:《矿业研究与开发》编辑部,2004,(Sup.): 51~5.