

基于某矿山固废处置的水泥和 胶固粉选择初探

Preliminary Exploration on Selection of Cement and Glue-Powder for
Solid Waste Disposal in a Certain Mine

耿碧瑶^{1,2}, 贺茂坤^{1,2}, 温震江^{1,2}, 张敬^{1,2}, 任海锋^{1,2}

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 金属矿膏体充填安全绿色开采国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

摘要: 本文以某矿固废处置及露天坑回填综合治理为背景, 由于该矿全尾砂为细粒级尾砂且尾砂内含有对充填体强度具有负面作用的硫及黏土类矿物, 为了选择更适合该矿全尾砂的胶凝材料, 选用水泥和胶固粉两种胶凝材料对充填料浆性能进行试验研究。研究结果表明: 虽然泌水沉降特性方面水泥胶结充填体较胶固粉更优, 但在充填体强度及流动性两个关键性指标方面, 胶固粉性能较水泥更优且成本更低, 说明胶固粉更加适用于该矿固废处置及回填治理; 通过敏感性分析可知, 胶固粉胶结充填体强度对灰砂比最为敏感, 其次为养护龄期, 最后为料浆浓度。

关键词: 固废处置; 胶凝材料; 料浆性能; 充填体强度; 敏感性

中图分类号: TD985 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)01-0048-05

Abstract: Against the background of solid waste disposal and comprehensive treatment of open-pit backfilling in a certain mine, due to the fact that the unclassified tailings of the mine are fine faction tailings and contain S and clay minerals that have a negative impact on the strength of the filling body, in order to select a cementitious material that is more suitable for the full tailings of the mine, select cement and glue-powder as two types of cementitious materials to contact the experimental study on the performance of filling slurry, results indicate: although SBT filling body have better characteristics at the aspect of bleeding and settling compared to glue-powder, in terms of the two key indicators of filling strength and fluidity, the performance of glue-powder is superior to that of cement and the cost is lower, showing that glue-powder is more suitable for solid waste disposal and backfilling treatment in this mine; through sensitivity analysis, it can be concluded that the strength of cemented by glue-powder is most sensitive to the ash sand ratio, followed by the curing age, and finally the slurry concentration.

Key words: solid waste disposal; cemental materials; properties of slurry; strength of filling body; sensibility

1 前言

矿山在资源开采、选矿过程中会产生大量的固体废弃物, 其中主要为尾矿, 而尾矿的处置关系到矿山的绿色发展和可持续发展要求。尾矿的处置方式主要为将尾矿排放至尾矿库, 根据相关数据统计^[1], 2019年期间, 全国金属矿山共排放尾矿量达到12.72亿t, 至今, 已有大量土地资源因为尾矿库的建设和尾矿的排放而被占用, 同时, 尾矿库潜在的溃坝危害^[2-4]也一直备受国家的重视。随着绿色矿山的发展要求以及采矿技术的发展, 充填采矿逐渐

成为尾矿处置的方式之一, 充填采矿法既在可以保证资源开采过程中的安全性, 又可以提高资源回采率, 同时, 将尾矿充填至井下空区, 也符合建设“无尾矿山”理念, 相较于其他开采方式, 具有明显的优势^[5-8]。近年来, 在某些露天矿山开采结束转地下开采的背景下, 国内外有关学者^[9-14]提出了利用选厂尾砂进行露天坑回填综合治理的尾矿处置方式。此种方式, 既实现了露天坑安全治理, 生态环境修复和改善, 还能在一定程度上避免出现地质灾害, 减少新增地表扰动、环境生态破坏和安全风险, 同时最大程度减少了尾矿的外排, 是未来绿色矿山建设的

[作者简介] 耿碧瑶(1987—), 男, 博士后, 工程师, 主要从事矿山充填及大宗工业固废资源化设计研究工作。

[基金项目] 高应力下金属矿规模化低放热高强充填体的成型技术与装备(课题项目号“2023YFC2907203”); 山东省重点研发计划(编号: 2022CXPT032)。

[引用格式] 耿碧瑶, 贺茂坤, 温震江, 等. 基于某矿山固废处置的水泥和胶固粉选择初探[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(1): 48-52, 82.

趋势。

然而,无论是井下充填还是露天坑充填的方式,都对充填体强度有一定要求,充填体强度的主要影响因素包括尾砂理化性质、粒径分布、灰砂比、养护龄期、料浆浓度等,其中胶凝材料的选择直接关系到充填成本的大小,以往矿山充填时多采用水泥作为胶凝材料,然而水泥成本较高,其占充填成本 50% 以上,同时,水泥对超细尾砂的固结性能较差、配置的料浆输送性能一般,因此在保证矿山井下或露天坑充填要求的前提下,选择合适的胶凝材料以降低矿山充填成本,是充填的主要研究方向之一。近年来,许多学者对胶凝材料的相关问题进行了大量研究,吴岩佩^[12]等通过研究得出贵州锦丰矿业以胶固粉代替水泥制备充填体每年可节约成本近 950 万元;杨晓炳^[13]等阐述了固结粉胶凝材料推广应用亟待解决的关键技术以及开展研究实施方案,展望了固结粉胶凝材料在金川矿山推广应用技术指标以及预期经济效益和社会效益;温震江^[14]等为了使镍渣胶凝材料更好地应用于矿山充填,对其力学新能与水化机理进行了研究,得到了镍渣、脱硫石膏、电石渣和熟料的最佳比表面积。

本文以某矿露天坑回填治理与井下协同开采为背景,通过尾砂理化性质、粒径分布分析、充填体强度对比分析,为矿山选择了合适的胶凝材料,对矿山充填具有实际的工程价值。

2 尾砂理化性质分析

2.1 尾砂粒径分布分析

尾砂粒径分布通常采用不均匀系数和曲率系数两个指标表征其优劣。经统计分析,尾砂不均匀系数 $C_u = 12.52 > 10$,尾砂曲率系数 $C_c = 1.66 \in [1, 3]$,说明尾砂的级配较好且连续性较高。尾砂中小于 $20 \mu\text{m}$ 细尾砂约占 68.70%,大于 $74 \mu\text{m}$ 的较粗尾砂约占 12.83%,属于细尾砂,需要重点关注其对回填料浆输送的影响。

2.2 尾砂化学及矿物成分分析

经测试分析,该矿全尾砂中的主要元素成分为 Si、Al、Fe、K、Ca、S,主要矿物成分为石英、云母、黄铁矿、绿泥石、高岭石、滑石、长石、方解石、白云石等,尾矿图谱如图 1 所示。其中 S 的含量是 1.82%,根据以往工程经验,S 的存在会对以水泥作为胶凝材料的充填体强度造成一定负面影响;同时,尾砂中也含有对回填料浆强度有负面作用的黏土类矿物,如云

母、绿泥石、高岭石以及对含水泥的充填体长期强度有负面作用的黄铁矿。但尾砂中含量较高的石英对充填体强度具有积极作用。

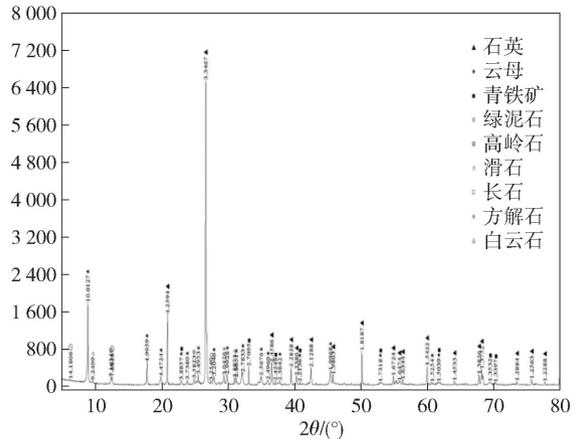


图 1 尾砂 XRD 图谱

3 充填料浆性能实验研究

3.1 实验参数设置

结合尾砂矿物成分分析研究结果,由于尾砂中 S 和黏土类矿物的存在,该矿进行井下或露天坑充填时,需探究水泥的适用性,同时寻求其他合适的胶凝材料以保证充填体强度、流动性并降低充填成本。充填料浆性能实验以该矿尾砂作为充填骨料,选用胶固粉和 P0425 水泥作为胶凝材料,使用自来水配置充填料浆,进行两种不同胶凝材料的充填料浆配比实验研究。实验选取配比参数如下:

料浆质量浓度:60%、62%、64%、66%;

料浆灰砂比:1:3、1:4、1:8、1:10、1:15;

养护龄期:3 d、7 d、28 d、90 d;

实验项目:单轴抗压强度实验、泌水沉缩试验、流变特性试验。

3.2 充填体强度试验

3.2.1 充填体强度变化规律

对不同配比及养护龄期充填体试块进行单轴抗压强度测试,得到充填体强度随料浆浓度、灰砂比、养护龄期变化曲线,具体如图 2 所示。

采用水泥或胶固粉作为胶凝材料充填体强度,养护龄期一定时强度随料浆浓度变化规律、灰砂比一定时强度随养护龄期的变化规律与料浆浓度一定时强度随灰砂比的变化规律基本相同,故上图分别以养护龄期 28 d,料浆浓度 66%,灰砂比 1:3 为例,分析充填试块强度变化规律。

由图 2 可知,全尾砂水泥胶结充填体强度总体

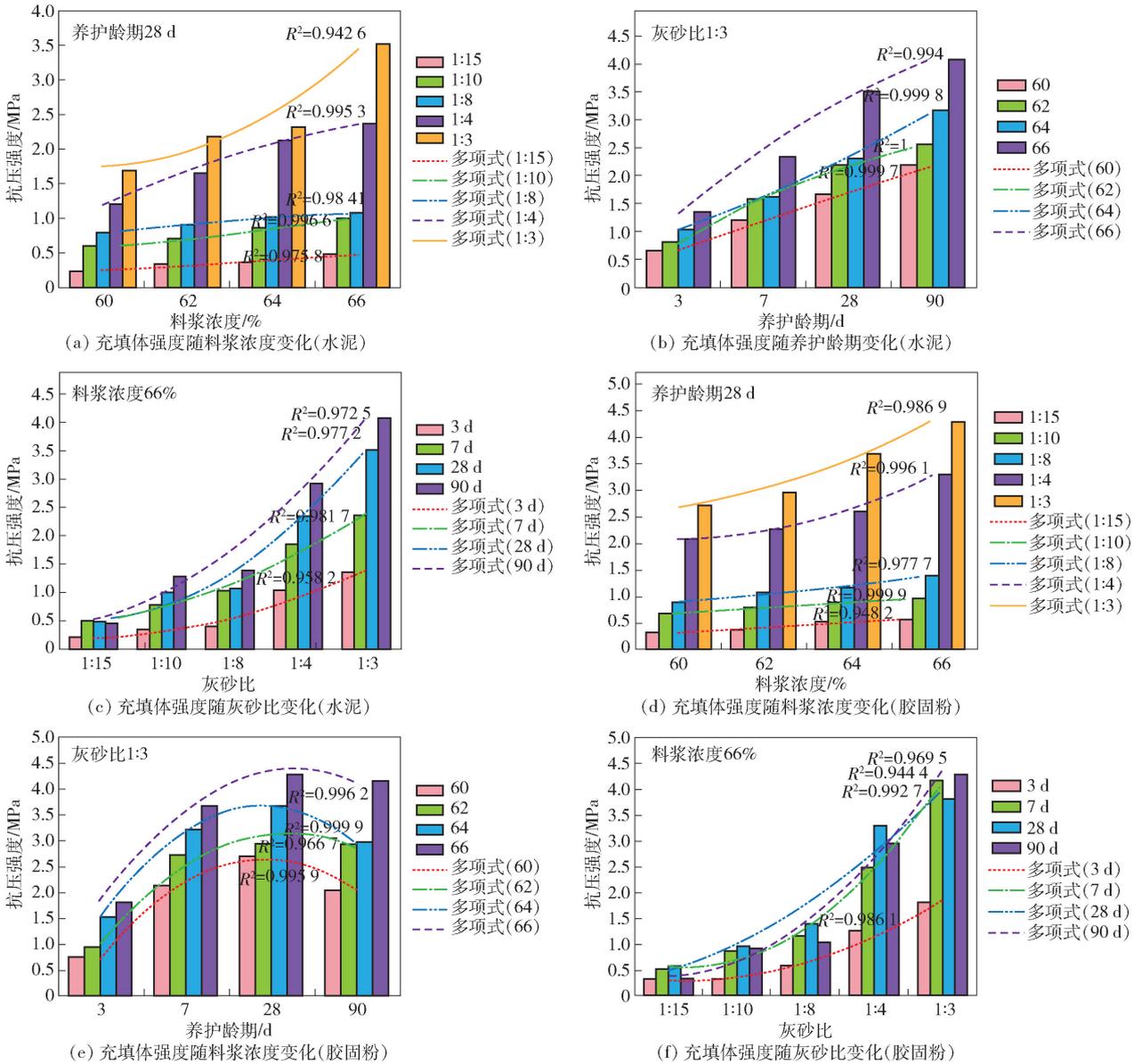


图2 充填体强度变化规律

上随料浆浓度、灰砂比的增大而增大。当灰砂比一定时,若灰砂比较大,充填体强度随养护龄期的增大而增大,若灰砂比较小(1:10、1:15),充填体强度随着养护龄期增加呈现出先升后降的趋势,强度多于28 d达到最高,并且浓度越低,强度倒缩现象出现的越早。对比充填体强度随料浆浓度、养护龄期、灰砂比变化曲线,虽然各配比条件下强度拟合曲线均符合 $y = ax^2 + bx + c$ 多项式型增长规律,但强度随灰砂比增大时强度增长斜率明显更大,强度拟合曲线逐渐符合 $y = ae^{bx}$ 指数型增长规律。

全尾砂胶固粉胶结充填体强度随灰砂比、料浆浓度、养护龄期变化规律与全尾砂水泥胶结充填体

强度变化规律基本相同。各配比条件下强度拟合曲线均符合 $y = ax^2 + bx + c$ 多项式型增长规律,但强度随灰砂比变化时,强度拟合曲线也逐渐符合 $y = ae^{bx}$ 指数型增长规律。另外,不同于全尾砂水泥胶结充填体,全尾砂胶固粉胶结充填体强度随养护龄期变化时,在灰砂比较大时便出现了更加明显倒缩现象。

两种胶凝材料胶结充填体均出现强度倒缩现象,主要是由于尾砂中含有硫化物及黏土类矿物,硫化物被氧化后产生的硫酸根离子等氧化产物会和进一步与 C_3A 和 $Ca(OH)_2$ 发生反应形成钙矾石和次生石膏等膨胀相产物,次生石膏多生成于胶凝材料

水化中后期,其生长膨胀会挤压周围已经形成的水化产物结构,使回填体内部产生较大的拉应力,当水化产物之间的黏聚力不足以抵抗拉应力时,会产生微裂隙,造成回填体后期强度降低;同时酸的生成将降低水化产物存在环境的 pH 值,使 C-S-H 凝胶出现脱钙现象,导致已有水化产物减少,因此降低回填体力学性能。

3.2.2 不同胶凝材料充填体强度对比分析

由图 3 可知,养护龄期 28 d 以前,同一配比条件下,整体上全尾砂胶固粉胶结充填体强度明显大

于全尾砂水泥胶结充填体强度,且灰砂比、料浆浓度越大,充填体强度差别越大;虽然养护龄期达到 90 d 时,由于全尾砂胶固粉胶结充填体强度倒缩现象较全尾砂水泥胶结充填体更加明显、严重,同一配比条件下,全尾砂胶固粉胶结充填体强度较全尾砂水泥胶结充填体强度较小,但差别并不明显。

因此,由于全尾砂胶固粉胶结充填体早期强度优势更加明显,长期强度虽有所降低,但与全尾砂水泥胶结充填体相比差距较小,故从充填体强度角度出发,胶固粉较水泥性能更优。

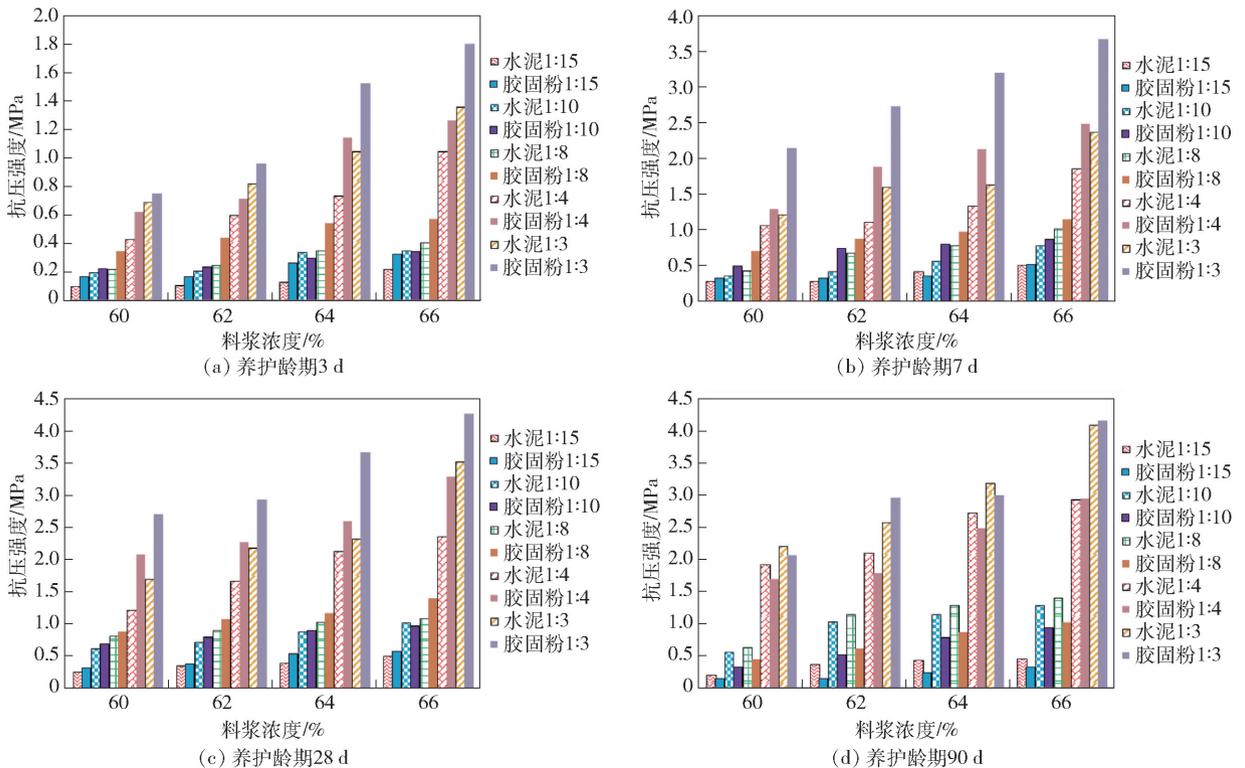


图 3 不同胶凝材料充填体强度对比

3.3 充填料浆泌水沉缩试验

按照设置实验参数,对不同配比充填料浆进行泌水沉缩实验研究(因涉及保密性,不再列出详细实验数据)。

实验数据表明,相同配比条件下,全尾砂水泥充填料浆泌水率和沉缩率均较全尾砂胶固粉充填料浆小,说明在泌水和沉缩性能方面,水泥较胶固粉更优。

3.4 充填料浆流变特性实验

按照设置实验参数,对不同配比充填料浆进行流变特性实验研究(由于涉及保密性,不再列出详细实验数据)。

实验数据表明,相同配比条件下,使用胶固粉作为胶凝材料所制备出的料浆的屈服应力低于使用水泥作为胶凝材料所制备出的料浆,相应的临界浓度也是全尾砂胶固粉组高于全尾砂水泥组,说明全尾砂胶固粉充填料浆的流动性更好。

3.5 胶凝材料选择

综合充填体强度试验、泌水沉缩试验、流变特性试验结果,虽然在泌水沉缩特性方面胶固粉较水泥性能稍差,但在充填体强度方面及流动性、临界浓度方面,胶固粉性能优于水泥,且胶固粉成本更低,更有利于矿山充填料浆输送和降低充填成本,因此胶固粉更适合作为矿山充填料浆的胶凝材料。

4 全尾砂胶固粉胶结充填体强度敏感性分析

为确定灰砂比、料浆浓度、养护龄期对充填体强度敏感性程度,利用双因素交互作用分析方法,选取灰砂比、龄期和料浆浓度、龄期两组影响因素分析其对充填体强度影响规律。由于胶固粉充填体在养护龄期为 90 d 时,均出现强度倒缩现象,因此分析时舍弃养护龄期 90 d 这一变量。

灰砂比、龄期组、料浆浓度为 60%、62%、64%、66% 各选取灰砂比 1:3、龄期 3 d,灰砂比 1:8、龄期 7 d;灰砂比 1:15、龄期 28 d 三种不同变量条件,研究强度随变量变化的变化规律;料浆浓度、龄期组、灰砂比为 1:15、1:10、1:8、1:4、1:3 各选取浓度 66%、龄期 3 d;浓度 64%、龄期 7 d;浓度 62%、龄期 28 d 三种不同

变量条件,研究强度随变量变化的变化规律,从而确定强度对这三个因素的敏感程度。

由图 4(a)可知,各料浆浓度充填体强度随着灰砂比的减小、养护龄期的增长均呈现出减小的趋势,说明充填体强度对灰砂比的敏感性更大,且浓度较高条件下,灰砂比较低时,随着灰砂比减小,养护龄期的增长,强度下降斜率才有所放缓,说明强度对养护龄期的敏感性没有对灰砂比高。

由图 4(b)可知,各灰砂比充填体强度随着料浆浓度的减小,养护龄期的增长整体上均呈现出增大的趋势,说明充填体强度对养护龄期的敏感性更大,且在充填体养护后期,随着料浆浓度的降低,强度增长斜率才有所放缓,说明强度对料浆浓度的敏感性没有对养护龄期高。

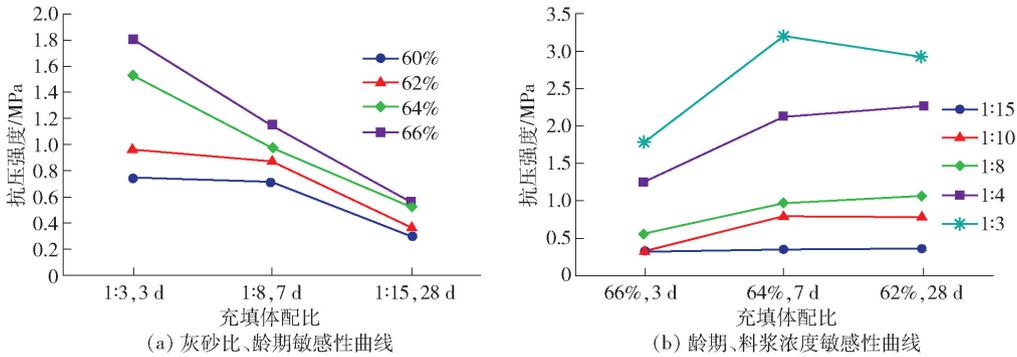


图 4 强度敏感性曲线

同时,综合 3.2 节充填体强度变化规律,充填体强度随灰砂比增长斜率明显大于充填体强度随养护龄期的增长斜率,强队随料浆浓度的增长斜率最小。故可最终得出:充填体强度对灰砂比变化最为敏感、其次为养护龄期,最后为料浆浓度。

5 结论

(1) 该矿尾砂为细粒级尾砂,级配较好且连续性较高;尾砂中含有对充填体强度具有负面作用的 S 和黏土类矿物,但对充填体强度具有积极作用的石英含量较高。

(2) 以水泥和胶固粉为胶凝材料的充填体强度随料浆浓度、养护龄期、灰砂比变化规律基本相同;由于尾砂中 S 和黏土类矿物,充填体强度在养护龄期后期均出现了强度倒缩的现象。

(3) 综合从充填体强度、泌水沉缩特性、流变特性多个角度考虑,胶固粉更适合作为矿山充填体的胶凝材料。

(4) 全尾砂胶固粉胶结充填体强度对灰砂比的

敏感性最高,其次为养护龄期,最后为料浆浓度。

(5) 建议对胶固粉做进一步研究改进,降低尾砂中 S 及黏土类矿物对充填体强度的影响,从而在一定程度上减少充填体长期强度倒缩。

[参考文献]

[1] 李云清. 三维设计在尾矿库设计中的应用[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(5): 71 - 74.

[2] 閃淳昌, 张振东, 钟开斌, 等. 襄汾“9·8”特别重大尾矿库溃坝事故处置过程回顾与总结[J]. 中国应急管理, 2011(10): 13 - 18.

[3] 周振民, 李香园. 我国尾矿坝溃坝事故成因及生态环境影响评价[J]. 金属矿山, 2012(11): 121 - 124, 167.

[4] 刘瀚和. 巴西 Brumadinho 尾矿库溃坝对上游式堆坝的启示[J]. 有色冶金设计与研究, 2020, 41(4): 49 - 51.

[5] 黄明发. 大型矿山低成本胶结充填关键技术研究与应用[J]. 矿业研究与开发, 2023, 41(1): 21 - 22.