

减水剂对膏体流变特性的影响及管道输送调控研究

吕伟鹏¹, 郑伯坤^{1,2,3,4}, 江科^{1,3,4*}, 戴科伟^{5,6}, 李劲⁵, 邹永伟⁶, 余锦柱¹

1. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2. 湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3. 国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
4. 国家战略性稀有金属矿产高效开发技术创新中心, 湖南 长沙 410012;
5. 江西赣锋锂业集团股份有限公司, 江西 新余 338000;
6. 镶黄旗蒙金矿业开发有限公司, 内蒙古 锡林郭勒 026000



摘要:随着选厂磨矿细度逐渐减小,极细含泥尾砂成为普遍现象,但超细尾砂高浓度料浆输送存在黏性大、流动性不足和临界浓度低等问题。通过开展充填物料粒度测试和坍落度试验,确定充填料浆最佳输送质量浓度为72%~74%。研究表明,当料浆灰砂比为1:8,减水剂最佳添加量为0.6%时,能够显著改善料浆流动性能。通过L型管道输送试验可知,当掺入0.6%减水剂后,质量浓度为74%料浆的屈服应力和黏度系数较未添加减水剂时显著下降,输送阻力降低约34.9%,实现了提浓度、保输送的目标。数值模拟进一步验证,在重力作用下模拟自流状态,无减水剂时管道内流速较低且分布不均,掺入减水剂后质量浓度为74%料浆的流速提升约54%,能够有效抑制分层,降低堵管风险。从Zeta电位分析减水剂的静电排斥和空间位阻作用机理,结果表明,减水剂的添加实现了充填料浆浓度提升和输送阻力降低的协同效应。将综合尾砂用于某矿山充填每年可多消耗尾砂约13.5万t,通过减少胶结剂来降低充填成本,为提高尾砂利用率及高浓度料浆输送调控技术提供了一定参考。

关键词:膏体充填;减水剂;流变特性;管道输送;超细尾砂;充填料浆

中图分类号:TD853.34 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2026)03-0743-13 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.03.024
引用格式:吕伟鹏,郑伯坤,江科,等.减水剂对膏体流变特性的影响及管道输送调控研究[J].黄金科学技术,2026,34(3):743-755.LV Weipeng, ZHENG Bokun, JIANG Ke, et al. Study on the Influence of Water-reducing Agents on the Rheological Properties of Paste and the Regulation of Pipeline Transportation[J]. Gold Science and Technology, 2026, 34(3): 743-755.

随着矿产资源不断被开发利用,易采易选矿产资源越来越少,加之选矿技术迭代升级,为获得更高的矿物回收率,矿石被磨得越来越细,从而产生更多超细尾矿。为实现超细尾矿综合利用,膏体充填技术应运而生。膏体充填技术是绿色开采的新理念和新技术,关于膏体的典型定性特征可概述为:不离析、不沉淀和不脱水(陈秋松等,2016;吴爱祥等,2016,2018,2021;李广波等,2024)。为了将更多尾

砂充填至井下,提高全尾砂利用率,实现高浓度充填,关于超细尾砂高浓度料浆输送中存在的黏性大和流动性差等问题亟需得到解决(翟永刚等,2010;彭亮,2023;孔翔生等,2024;郑伯坤等,2025)。

管道输送是充填的关键环节,充填料浆的流变特性是影响输送的主要因素。现有关于减水剂应用的研究主要从提升流动性与输送浓度(方林等,2023;江科等,2025)、增强充填体强度(魏微等,

收稿日期:2026-01-16;修订日期:2026-03-10

基金项目:国家科技重大专项“采选固废无害化高密充填协同资源化利用技术体系与工程示范”(编号:2026ZD1208602)资助

作者简介:吕伟鹏(2000—),男,河南郑州人,硕士研究生,从事矿山绿色开采及安全相关研究工作。E-mail:1418627352@qq.com

*通信作者:江科(1992—),男,湖北天门人,高级工程师,从事矿山绿色开采及安全相关研究工作。E-mail:Jiangk92@163.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

2013;李金鑫等,2021)以及优化料浆微观特性(陈怀成等,2015;吴再海等,2020)等方面考察减水剂对充填料浆的影响,丰富了充填料浆外加剂的研究内容。然而,针对超细尾砂充填料浆管道输送调控方面的研究尚显不足。随着选矿技术的发展,尾砂粒度日趋细化。然而,高浓度超细尾砂存在流动阻力大和临界浓度低等问题,对管道输送性能造成显著影响,且尾砂综合利用率偏低。因此,研究减水剂对充填料浆流变特性的影响及其对管道输送的调控作用,具有重要的实际意义。

综上所述,现有研究多集中于减水剂类型和掺量对料浆流动性和强度等性能的影响,但鲜有综合探讨管道输送参数(如充填倍线和流动阻力等)的关联分析,尚未系统揭示外加剂对管道输送的调控机制。鉴于此,本研究基于坍落度、L管试验和数值模拟的多维度量化分析,探究减水剂对膏体流变参数及管道阻力的影响,从而在提升料浆浓度的同时有效降低管道输送压力,为外加剂调控管道输送机制提供了新思路,也为提高尾砂利用率和高浓度充填料浆输送调控提供理论支撑。

1 矿山概况

某矿山设计采用空场嗣后充填采矿法,采用全尾砂充填方式(王贤来等,2011;郑伯坤等,2013;祝鑫等,2022),由选矿厂输送尾砂浆至进风井旁充填站中并由膏体仓储浓密机进行浓密,浓密机中包含设浓密系统与造浆系统,具备浓密与储存作用,砂仓的溢流水则回流至选厂进行重复利用(黄仁东等,2021)。浓密后的料浆由砂仓底部放出与水泥进行搅拌混合制备成充填料浆,由地表及井下管网泵送至井下空区完成充填,其工艺流程如图1所示。

该矿山的充填站建设于矿区北部,靠近选矿厂,年充填量约为70万 m^3 ,单套充填系统能力为180~200 m^3/h ,充填质量浓度为70%,采用泵送方式充填至井下各个空区。随着采矿范围和规模的不断扩大,对于南部超过4 km的井下空区来说,使用现有充填系统和浓度无法泵送达到,但降低充填浓度的同时会降低充填体质量,给矿山带来安全隐患,需要一种可以在不降低浓度的情况下仍能充填至南部空区的充填工艺方法,此时添加减水剂就是

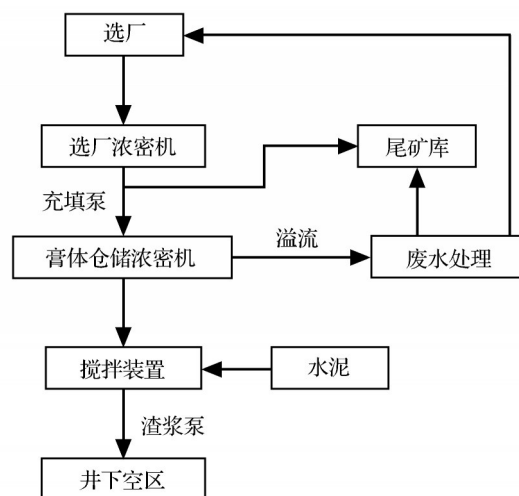


图1 充填工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of filling process

较为合适的选择。

减水剂作为外加剂时,利用静电排斥作用和空间位阻效应分散颗粒,通过改善流变特性来调控管道输送性能。减水剂能够显著提高尾砂利用率,改善料浆流动性与强度,同时在泵送时降低泵送成本(胡才富等,2022;Deng et al, 2024; Li et al, 2026)。减水剂的添加方式如下:在均匀混合尾砂浆和胶凝材料时定量加入减水剂溶液,有效搅拌时间需超过60 s,确保减水剂在拌合物中均匀分散,减水剂添加量的误差不超过1%。本研究重点从试验、数值模拟、微观分析和工程应用等方面,逐步揭示减水剂对充填料浆输送的调控机制。

2 充填材料试验

在研究充填料浆的流变特性之前,需要了解尾砂和水泥的基础物化参数,分析该尾砂的粒径分布以及适宜尾砂进行自流或泵送的最佳浓度,不同粒径大小对输送的临界浓度波动较大。采用马尔文 Mastersizer 3000 激光粒度测试仪、标准坍落度测定仪和L型管道自流设备进行试验,上述试验装置在以往文献中均有描述(方林等,2023;孔翔生等,2024),此处不再赘述。

2.1 粒度测试

对尾砂和水泥进行粒度和化学成分检测,尾砂和水泥粒径分布如图2所示。由图2可知,该

尾砂属于超细尾砂类型,其中, $d_{10}=1.582\ \mu\text{m}$, $d_{30}=6.216\ \mu\text{m}$, $d_{60}=23.893\ \mu\text{m}$, $d_{90}=75.035\ \mu\text{m}$,不均匀系数 $C_u=15.103$,曲率系数 $C_c=1.022$ 。根据土力学规范,级配良好的物料不均匀系数大于10,曲率系数为1~3,由此可见该尾砂级配较好,适合做充填骨料。水泥的 $d_{30}=2.855\ \mu\text{m}$, $d_{90}=15.458\ \mu\text{m}$,比尾砂更细。

2.2 坍落度流动性试验

充填料浆流动性是表示料浆在自重或外力作用下流动的顺畅性,流动性是充填料浆输送的重要特性之一。坍落度值随料浆质量浓度的降低而增大,即流动性越来越好,流动性较好的充填料浆,有助于提高采场充满率。结合工程实践经验,得出坍落度小于25 cm为泵送困难区,加压泵送坍落度为25~27 cm,自流输送坍落度大于27 cm。

根据该矿山充填高强度和低强度的2种需求,暂定灰砂比为1:8和1:15进行试验,减水剂添加量

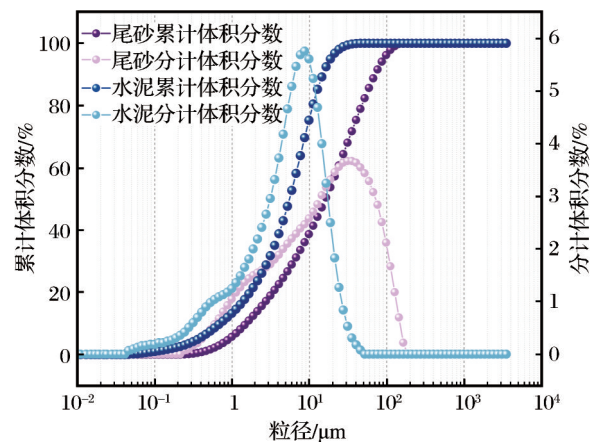
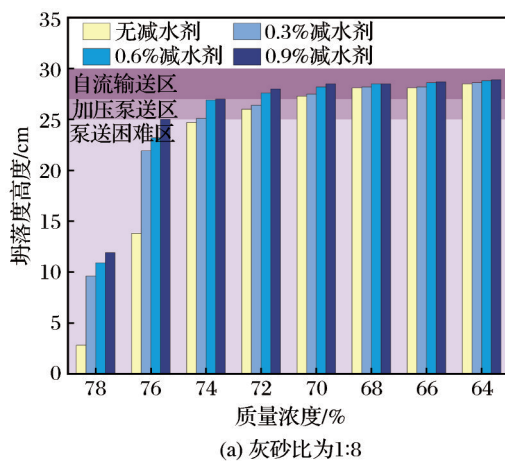


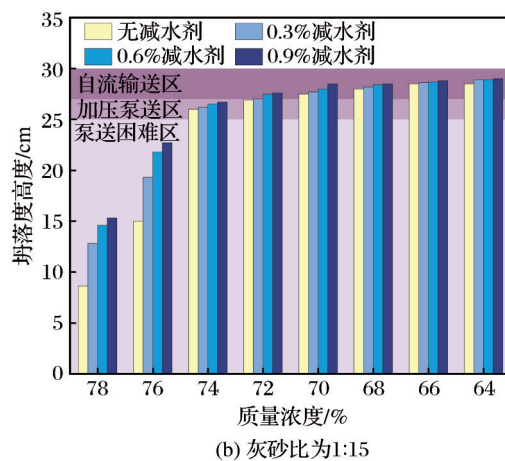
图2 尾砂和水泥粒径分布曲线

Fig. 2 Particle size distribution curves of tailings and cement

确定为水泥添加量的0.3%、0.6%和0.9%,进行正交试验。坍落度试验结果如图3所示,最佳充填浓度为72%~74%。



(a) 灰砂比为1:8



(b) 灰砂比为1:15

图3 坍落度试验结果

Fig. 3 Results of slump test

由图3可知,当灰砂比降低时,坍落度增大,说明水泥在该尾砂充填料浆中主要表现为增稠增黏作用,与粗尾砂中水泥的润滑作用存在显著差异。在粗尾砂颗粒组成的充填料浆中,水泥填充在尾砂颗粒间的空隙中,减小粗颗粒锋利棱角之间的摩擦力,削弱充填料浆的抗变形能力。

由图3可知,当灰砂比为1:8时,减水剂作用效果显著,其原因是在此灰砂比条件下水泥用量大,使得减水剂添加量较大。通过分析坍落度增量图(图4)可知,减水剂添加量为0.3%、0.6%和0.9%均

可使得料浆的坍落度增大。同时,当减水剂添加量为0.3%时坍落度有所增大,减水剂添加量为0.6%时坍落度进一步增大,但减水剂添加量为0.9%时坍落度增势有所放缓,从图4可以看出,各料浆质量浓度均有此变化趋势,即料浆质量浓度越高,坍落度增量越大。因此,确定减水剂添加量为0.6%时效果较好。

2.3 L型管道自流输送试验

料浆的坍落度只能从宏观上反映充填料浆的流动性能,不能从本质上反映料浆的流变特性。因

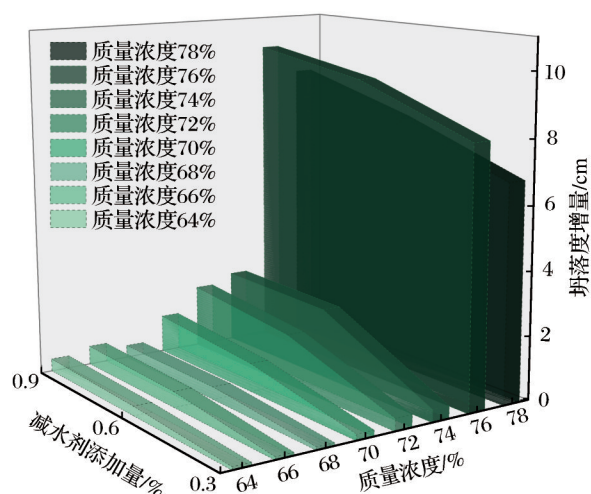


图4 灰砂比1:8减水剂作用下坍落度增量图

Fig. 4 Slump increase diagram under the effect of water-reducing agent of cement-sand ratio 1:8

此,通过开展L型管道自流输送试验来获得充填料浆的屈服应力 τ_0 和黏性系数 η ,从而了解料浆在管道中的阻力 i 和不同管道输送条件下的料浆自流充填倍线,为矿山充填系统管网设计提供参照(康志强等,2020;任建平,2020;刘伟涛等,2023)。

由图3可知,当灰砂比为1:8时,实现自流输送的质量浓度需在72%及以下,当添加减水剂时,自流输送浓度可提升至74%。由此来制定L管试验方案,即灰砂比设定为1:8,无减水剂时料浆质量浓度设为72%、70%、68%和66%,当减水剂添加量为0.6%时料浆质量浓度设为74%、72%、70%和68%,共8组试验。

根据该矿山充填系统进行计算,采用表1中充填倍线和流动阻力,以内径140 mm管道和100 m³/h流量为基准进行计算。

表1 L管试验数据
Table 1 L-tube test data

编号	减水剂添加量	浓度/%	屈服应力/Pa	黏度系数/(Pa·s)	充填倍线	流动阻力/(MPa·km ⁻¹)
1	无	74	78.62	0.98	2.86	5.875
2		72	38.56	0.79	4.42	3.791
3		70	27.33	0.55	6.06	2.657
4		68	13.25	0.43	8.84	1.768
5	0.6%	74	40.22	0.78	4.40	3.824
6		72	15.89	0.52	7.68	2.133
7		70	16.52	0.41	8.68	1.834
8		68	10.96	0.33	11.18	1.387

图5(a)和图5(b)中图例加*的折线代表加入0.6%减水剂数据图像,可知添加减水剂可有效降低屈服应力、黏度系数和流动阻力,增加充填倍线,有利于料浆输送。屈服应力由料浆内各颗粒之间的附着力和摩擦力产生,是阻碍料浆塑性变形的最大应力,其影响因素主要有尾砂颗粒粒径、料浆质量分数和水泥掺量等。膏体屈服应力随质量分数的增加呈指数增加趋势,料浆质量分数增大,水分减少,颗粒间的作用力迅速增加,颗粒间的相对滑动困难。膏体屈服应力随尾砂比表面积而增大,黏度越小,尾砂比表面积越大,料浆颗粒间以及颗粒与管道接触面积越大,摩擦阻力越大。

屈服应力和黏度系数的增大直接导致流动阻力增大,工程实践中表现为充填倍线减小,在相同高差下自流输送水平距离缩短,需通过加压泵送实

现远距离输送。减水剂可使料浆在质量浓度提升2%的情况下,其屈服应力和黏度系数仍低于原浓度水平,从而实现充填浓度升高和输送压力降低的目标。在料浆能够自流输送的情况下,加入减水剂后还能减少泵送能耗。

通过L管试验对不同料浆的充填倍线和流动阻力进行研究。在相同质量浓度条件下,当添加减水剂后,充填倍线提升效果显著,最大提升幅度达1.74倍,数值从4.42提升至8.01;最小提升幅度达1.27倍,数值由8.84提升至11.18。通过对比试验数据发现,添加减水剂后,料浆的流动阻力显著低于质量浓度提高2%但未添加减水剂的料浆。以具体数据为例,当料浆质量浓度为70%、不添加减水剂时,流动阻力为3.39 MPa/km;当料浆质量浓度为72%、减水剂掺量为0.6%时,流动阻力降至

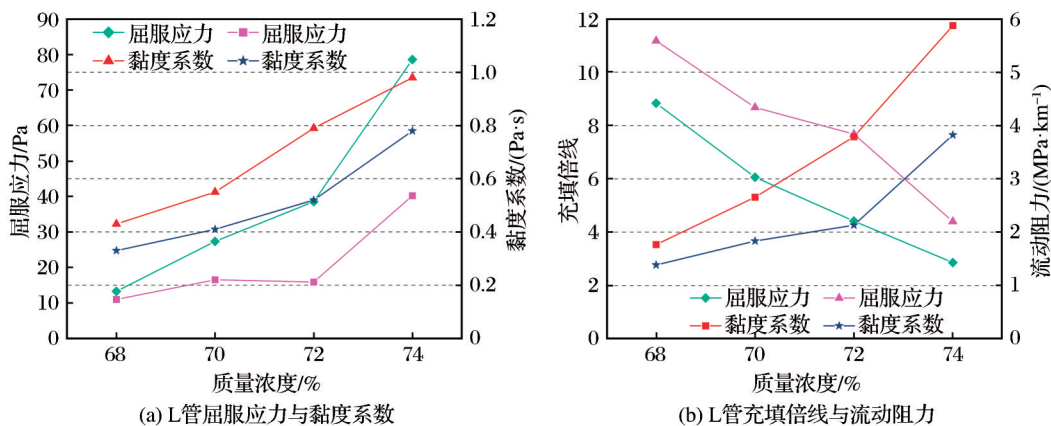


图5 L管数据分析图

Fig. 5 L-tube data analysis chart

2.72 MPa/km, 实现了在提高质量浓度的同时,使流动阻力低于原浓度料浆的目标。

3 料浆输送模拟研究

充填管道输送特性直接影响到充填材料的配比和整个充填系统的设计,其中试验实测劳动强度大、费用高且易受外界环境影响,产生的误差大。数值模拟具有适用性强和方便快捷等优点。Fluent软件是基于有限体积法进行流体分析的数值模拟计算工具。本文基于该矿山实际管道参数进行建模仿真,对管道数据进行可视化仿真研究。

3.1 模型构建

利用Fluent软件进行建模模拟,该模型纵向垂直管道总长为92 m,横向水平管道总长为400 m,其中包含3个直角弯管,管道内径为0.14 m。网格无关性检验表明,当网格单元数达到一定数量时,继续加密网格,出口流速的最大相对偏差小于2%,计算结果不受网格密度的影响,满足网格无关要

求,采用Ployhedra多面体网格,此时六面体网格总数量为15 662 745个,管道尺寸模型如图6所示。管道表面及管道截面的局部网格划分如图7所示。模拟参数设置(王少勇等,2018;陈九艳,2021;王平等,2024)如下:多相流模型选择流体体积函数模型(VOF);垂直方向重力加速度为 9.8 m/s^2 ;黏度模型选择层流。使用L管流动试验测得的不同质量分数及添加减水剂后料浆的密度和黏度系数进行模拟和迭代计算。根据L管流动情况,输送模拟试验方案如表2所示。

3.2 模拟结果分析

管道中料浆出口流速大小如图8所示,自流状态下4种料浆的流速分布一致,在管壁处速度接近0,管道中心处速度最大,根据料浆密度和有无减水剂的不同,最大速度有所差异。从图中可看出,无减水剂和减水剂掺量为0.6%的2组试验中,随着质量浓度的增大,料浆的最大流速均呈减小的趋势,但当添加0.6%减水剂后,料浆流速提升约54%,如:在质量浓度为74%条件下,料浆出口处最大流

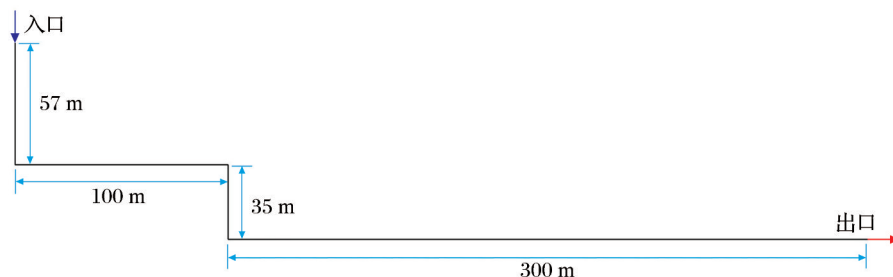


图6 管道模型

Fig. 6 Pipeline model

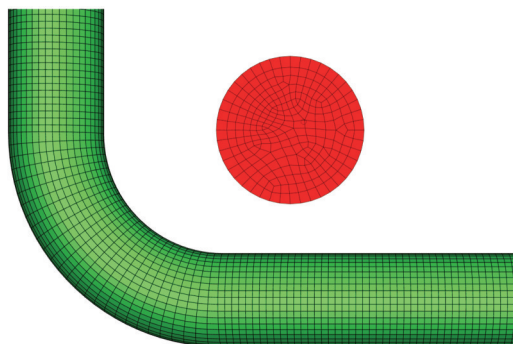


图7 局部网格划分图

Fig. 7 Partition diagram of local grid

速从2.01 m/s提升至3.1 m/s。从图中可看出,当无减水剂添加时,料浆流速较低,小于最小输送流速,导致管道上部流速与下部流速差值较大,流速不

表2 输送模拟试验方案

Table 2 Test scheme of transportation simulation

序号	质量浓度/%	减水剂掺量/%	黏度系数 /(Pa·s)	密度 /(kg·m ⁻³)
1	72	无	0.79	1803
2	74	无	0.98	1851
3	72	0.6	0.52	1803
4	74	0.6	0.78	1851

均,无法维持均匀流动状态,容易出现料浆分层和颗粒沉降现象,管道内较易形成沉积层或局部堵塞。添加减水剂后流速显著增大,流速切面较均匀,说明减水剂改善了料浆的流动性,降低了料浆的黏度系数和屈服应力,减小了输送过程中黏壁现象和堵管的概率。

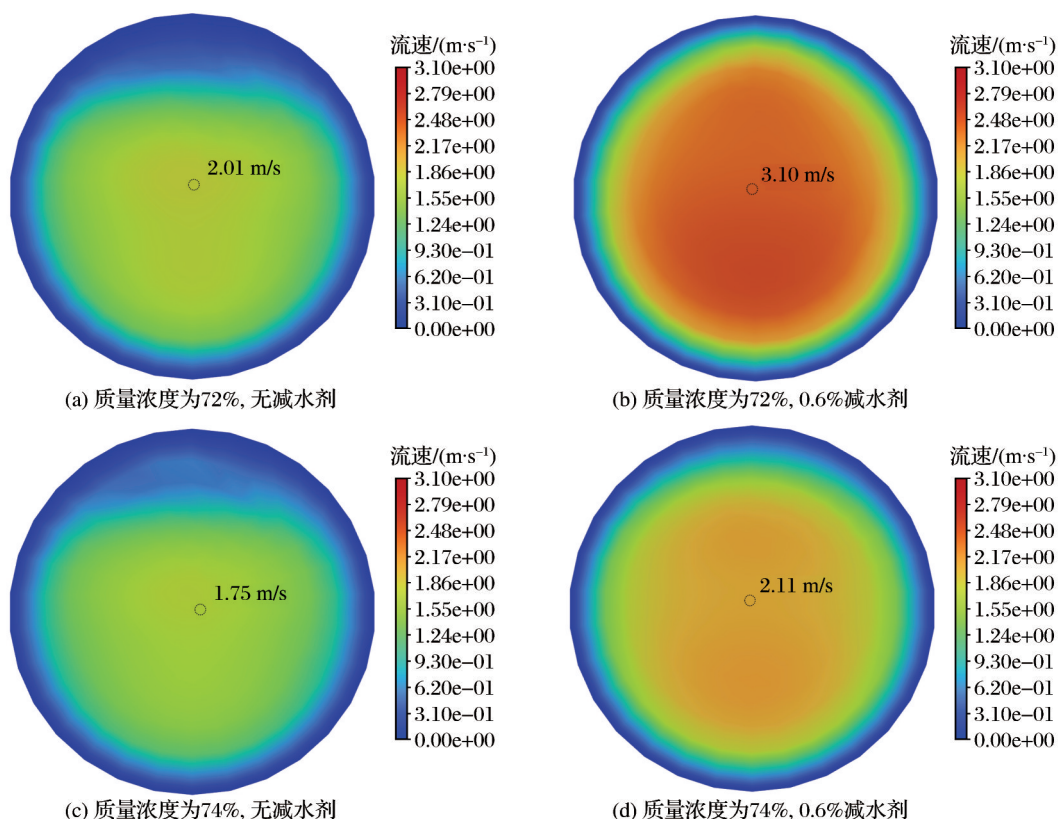


图8 不同参数条件下出口流速分布云图

Fig. 8 Cloud diagrams of outlet flow velocity distribution under different parameter conditions

在4种参数条件下各弯管的压力分布如图9所示,入口和出口段均与空气相连接,存在虹吸效应导致压力为负值,随着垂直高度的下降,压力逐渐增大,水平管道输送段压力随管道阻力逐渐减小。

图中沿管道流动方向标注3处弯管的压力值,图中弯管处压力分布一致,未出现冲击压力导致压力增大的区域,分析其原因是垂直管道下降压力较大,达到百万级,冲击压力较小,仅为万级,二者在量级

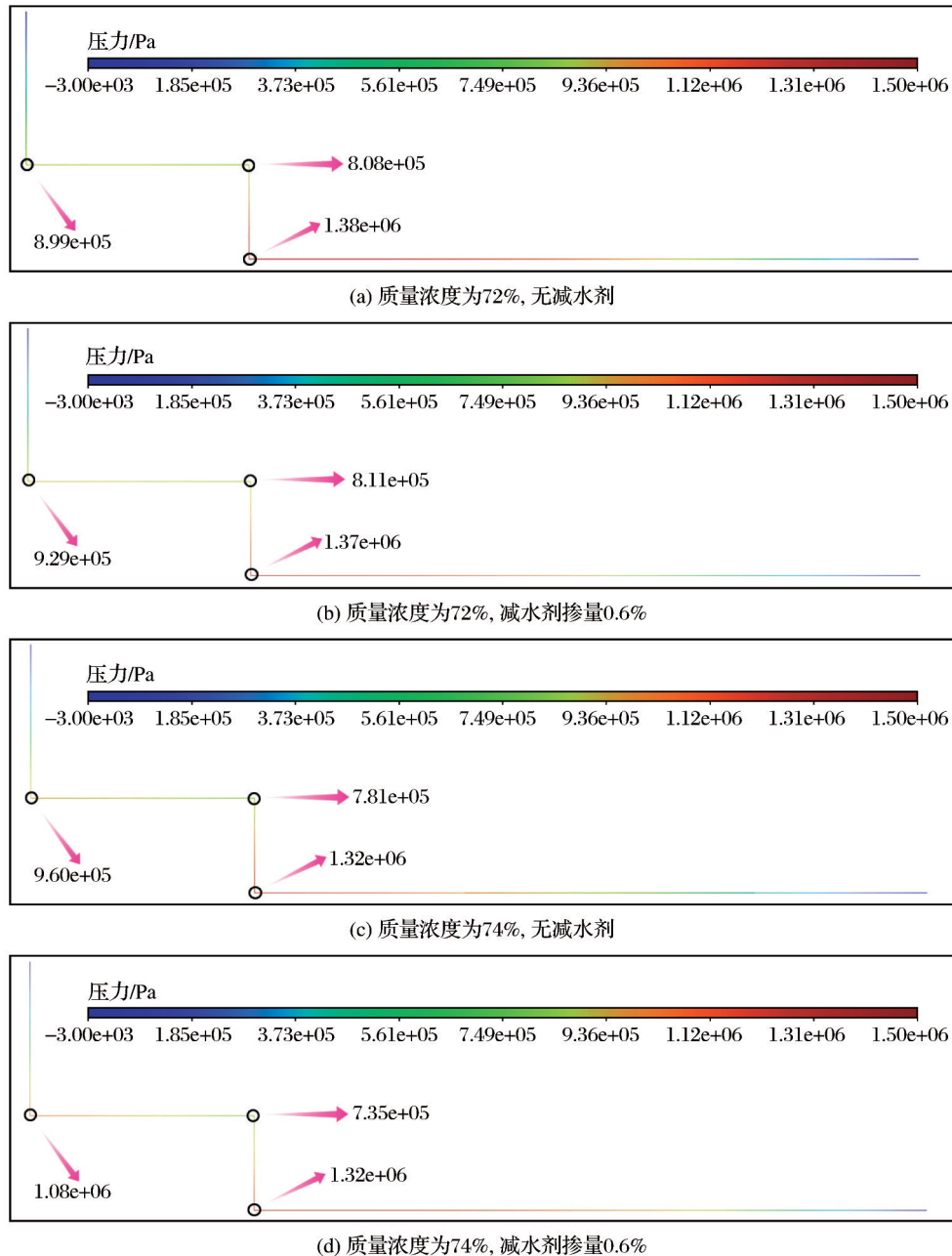


图9 不同参数条件下弯管压力分布云图

Fig. 9 Contour diagrams of pressure distribution in bent pipes under different parameter conditions

上相差2个数量级,因此在云图中无法直观看到由于冲击压力导致的不均匀现象。

添加减水剂后第一处弯管的压力增大,高差为57 m,重力势能约为1 MPa,重力势能较大,黏度减小从而管道沿程阻力降低,更多的重力势能转换为动能,弯管处的压力随即增大。第一处弯管和第二处弯管的压力差由计算得出,添加减水剂后水平段

的沿程阻力大于无减水剂,与原先设想添加减水剂后黏度系数减小、摩擦系数减小及沿程阻力减低的现象不符。沿程阻力的核心公式为达西公式,其中压力差与摩擦系数和速度平方呈正比,此处矛盾的原因是流速平方效应超过摩擦系数变化导致的,应在流速一致情况下分析摩擦系数引起的沿程阻力变化。

4 作用机理研究及分析

4.1 减水剂对料浆游离的影响

由前文分析可知,减水剂在改善充填料浆流动性和提高尾砂利用率方面作用显著,试验与模拟结果均已验证这一结论。减水剂对充填料浆宏观性能的改善源于微观层面的作用机理,如图10所示。减水剂添加至料浆后,迅速吸附在水泥和尾砂等颗

粒表面,这一过程主要引发2种协同作用的分散机制。

静电排斥力是指颗粒表面吸附的减水剂分子链上富含的负电基团使颗粒表面带有相同的负电荷,电荷同性相斥,有效破坏并抑制了颗粒间絮凝网状结构的形成,从而将絮凝网中包裹的束缚水释放出来,转化为颗粒自由流动的液相,显著增强了料浆的流动性。

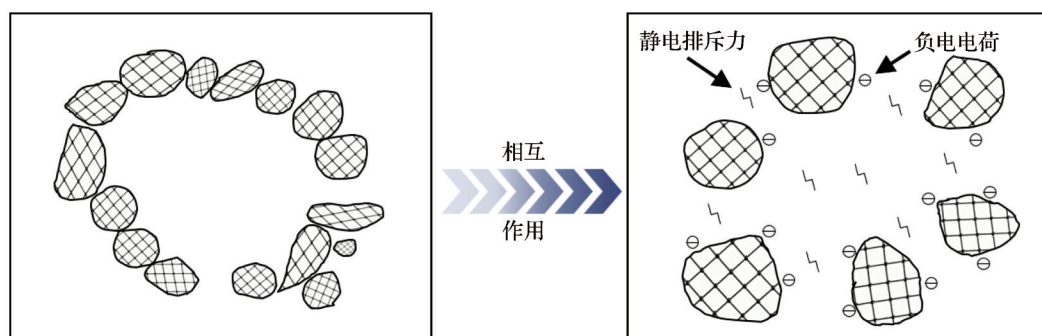


图10 料浆颗粒作用

Fig. 10 Slurry particle effect

同时静电排斥力使得颗粒悬浮,进一步促进流动性。空间位阻效应是颗粒表面吸附的减水剂分子中聚醚侧链形成的聚合物保护层产生的,当2个颗粒相互靠近时,这些伸展的侧链需要被压缩,其构型熵和运动自由度降低,从而产生强大的空间位阻斥力,阻止颗粒进一步靠近和聚集。2种机制协同分散,使得料浆在高浓度下仍有极佳的流动性和稳定性。

4.2 Zeta 电位分析

Zeta 电位值是颗粒表面电位的一个度量,反映了颗粒在溶液中的电荷特性,常用于评估表面改性剂的效果。由于该膏体充填料浆泌水率低,电荷在其中迁移能力较差,难以直接进行电泳测量。因此,采用高速离心法得到澄清的上清液和紧密的沉淀固体,小心地分离出大部分上清液以备测量使用(Haruna et al, 2022; 诸利一, 2023)。

对上清液进行Zeta 电位测试,结果如图11所示,当不添加减水剂时电位为3.63 mV,水化作用会释放钙离子(Ca^{2+}),此时电位为正值,当添加减水剂后,其分子链上带有大量负电的羧基($-\text{COO}^-$)使溶液整体电性转为负值。如图11所示,Zeta 电位随减

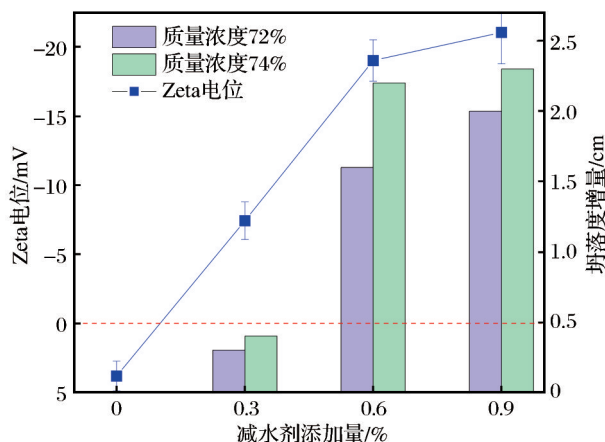


图11 不同减水剂添加量时充填料浆悬浮液上清液中的Zeta 电位

Fig. 11 Zeta potential in the supernatant of filling slurry with different amount of water-reducing agent added

水剂添加量的增加而逐渐降低,Zeta 电位绝对值较低时,体系内的颗粒倾向于凝结或凝聚,但Zeta 电位绝对值较高时,颗粒间的静电斥力占主导,可有效抑制颗粒聚集行为,从而增加料浆颗粒的流动性。当减水剂添加量为0.6%时,Zeta 电位区域稳定(-19.54 mV),表明此时减水剂分子已基本覆盖

颗粒表面所有吸附点,形成单分子饱和吸附层,进一步增加减水剂用量对颗粒表面电荷密度的影响不显著。该变化趋势与坍落度增量结果一致,说明减水剂最佳掺量为0.6%,该掺量既能保证良好的工作性能,又能避免材料的浪费。

5 经济比较及工程应用

5.1 充填料浆单耗计算

根据全矿综合灰砂比为1:8、尾砂比重为2.694和质量浓度为70%~74%进行理论计算,得到每立方米充填料浆中各成分含量,结果如表3所示。当质量浓度升高时,体系中水分含量呈现出递减趋势,固体含量呈现递增趋势,当质量浓度从70%提升至74%时,尾砂消耗量提升10.7%,该矿山年充填量约为70万方,年充填消耗126万t尾砂,当质量浓度提升4%后,年消耗尾砂可增加13.5万t。这一举措为矿山规模扩大和产能提升提供坚实的充填后盾,并减少了充填站扩建和额外维护成本,进一步推动绿色矿山建设。

5.2 方案经济对比

随着矿山规模扩大和产能提升,高浓度料浆无法泵送至南部较远空区,对隔膜泵的压力过高,而减水剂对充填管道输送调控作用显著,在不改变充填泵的情况下,能够输送同等浓度料浆到更远的空区。减水剂能够提高充填料浆浓度,且有助于提高充填体强度,当质量浓度为70%、灰砂比为1:10时,28 d充填体强度为1.35 MPa;当质量浓度为72%、灰砂比为1:12、减水剂掺量为0.6%时,28 d充填体强度为1.42 MPa,胶结剂用量减少约2元/m³,

即提高质量浓度时,减少胶结剂用量,大幅降低充填成本。针对该情况,矿山提出了2种方案,方案一为减水剂工艺优化,方案二为新增隔膜泵,2种方案在技术上均可实现,但各有优缺点,且经济效益有一定差别,具体方案如表4所示。方案一无需技改,通过添加减水剂改变料浆状态,从而降低泵送压力,不仅提高了质量浓度,还降低胶结剂用量,且仍可达到原来强度,从经济角度考虑,方案一的成本仅增0.5元/m³,方案二的摊销成本约为3.9元/m³,由此可知方案一节约运营成本3.5元/m³,年节约成本245万元。

表3 充填料浆单耗计算结果
Table 3 Calculation results of unit consumption of filling slurry

质量浓度/%	料浆容重/(kg·m ⁻³)	水泥/kg	尾砂/kg	水/kg
70	1.796	139.7	1 117.3	538.7
72	1.837	147.0	1 176.0	514.5
74	1.881	154.7	1 237.4	489.1

5.3 工程应用

为解决高浓度充填料浆长距离输送的难题,该矿山针对充填距离超过4 km的南部井下空区需设接力泵站的情况,在充填站搅拌桶上方增设减水剂添加装置。通过添加减水剂,有效降低了充填料浆的流动阻力,减小了充填泵压力,从而在不使用接力泵的条件下,实现了从北部充填站至南部4 km井下空区的直接输送。该方案有效解决了增设接力泵站所带来的建设成本、运营成本及设备故障等问题。具体工业试验数据见表5。添加减水剂后,在相同泵送条件下,可延长料浆的泵送距离。

表4 2种方案技术经济对比
Table 4 Technical and economic comparison of two schemes

对比项目	方案一:减水剂工艺优化	方案二:新增隔膜泵
技术优点	①无需技改,充填工艺简单 ②可以充分利用原设备完成 ③提高输送浓度,降低胶结剂用量	①对料浆性质变化不敏感 ②效率高,维护成本低
技术缺点	①管道内会有部分化学残留 ②搅拌混合可能不充分	①需新增投资、占用空间 ②新增备品备件等费用 ③大功率泵在低负载下运行会造成额外电能浪费
成本	①减水剂新增成本约为2.52元/m ³ ②胶结剂用量减少约2元/m ³	①新增泵房、隔膜泵等设备400万元,固定资产及易损件摊销约为3.5元/m ³ ②大功率泵的能耗差距约为0.4元/m ³

表5 工业试验数据
Table 5 Industrial test data

工况	试验输送距离/km	管道出口流速/(m·s ⁻¹)
不使用减水剂	3.8	1.5
使用减水剂	6.2	1.3

6 结论

(1)通过对比添加减水剂后坍落度的变化,可直观了解流变特性的改善效果,进而确定减水剂掺量为0.6%时效果较好。

(2)通过L管试验得出不同条件下充填料浆的流变参数,对比黏度系数和屈服应力可知,当质量浓度提高2%且添加减水剂后,流变参数有所下降,减水剂介入使同浓度料浆的沿程阻力降低21%~43%,可改变料浆的临界输送浓度值。

(3)利用数值模拟进行建模分析,得出质量浓度为74%且添加减水剂后,流速从2.0 m/s提升至3.1 m/s,增长约54%,充填效果显著;降低了黏壁和沉积堵管概率,能够保障管道长期稳定的输送。

(4)减水剂通过电荷排斥作用和空间位阻效应,分散颗粒并破坏絮凝网状结构,从而降低充填料浆屈服应力。其应用不仅能提高尾砂利用率,还可降低充填运营成本。

参考文献(References):

Deng B W, Jiang H, Liu Y, et al, 2024. Exploring macroscopic and microscopic impacts of alcohol amine modified with water-reducing agent on cementitious material and its application [J]. Construction and Building Materials, 412: 134816.

Haruna S, Fall M, 2020. Time- and temperature-dependent rheological properties of cemented paste backfill that contains superplasticizer[J]. Powder Technology, 360: 731-740.

Li D X, Bai Y, Liu L, et al, 2026. High-temperature and high-salt water-based drilling fluid loss reducing agent: synthesis, performance evaluation and mechanism [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 730: 139025.

陈怀成, 钱春香, 赵飞, 等, 2015. 聚羧酸系减水剂对水泥水化产物的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 45(4): 745-749. Chen Huaicheng, Qian Chunxiang, Zhao Fei, et

al, 2015. Effect of polycarboxylate-type superplasticizer on hydration products of cement [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 45(4): 745-749.

陈九艳, 2021. 磷尾矿基充填材料流变性及其输送减阻剂机理 [D]. 贵阳: 贵州大学. Chen Jiuyan, 2021. Rheological property of phosphate tailings based filling material and mechanism of conveying drag reducing agent [D]. Guiyang: Guizhou University.

陈秋松, 张钦礼, 王新民, 等, 2016. 全尾砂似膏体管输水力坡度计算模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 45(5): 901-906. Chen Qiusong, Zhang Qinli, Wang Xinmin, et al, 2016. Pipeline hydraulic gradient model of paste-like unclassified tailings backfill slurry [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 45(5): 901-906.

方林, 翟会超, 孙长坤, 等, 2023. 基于扩散度试验的减水剂对超细全尾砂充填料浆流动性影响研究[J]. 中国矿业, 32(6): 146-151. Fang Lin, Zhai Huichao, Sun Changkun, et al, 2023. Study on the effect of plasticizer agent on the fluidity of superfine full tailings filling slurry based on diffusivity test [J]. China Mining Magazine, 32(6): 146-151.

胡才富, 李翠平, 颜丙恒, 等, 2022. 减水剂对细粒级尾砂膏体流变性的影响[J]. 中国有色金属学报, 32(8): 2458-2468. Hu Caifu, Li Cuiping, Yan Bingheng, et al, 2022. Effect of water reducing agent on rheological property of fine-grained tailings paste [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 32(8): 2458-2468.

黄仁东, 李哲, 2021. 基于正交试验的细尾砂—分级尾砂充填体强度研究 [J]. 黄金科学技术, 29(2): 256-265. Huang Rendong, Li Zhe, 2021. Study on the strength of fine tailings-graded tailings packing body based on orthogonal test [J]. Gold Science and Technology, 29(2): 256-265.

江科, 董军庭, 蒋谋芳, 等, 2025. 充填倍线变化条件下的料浆管道输送工艺参数优化研究[J]. 矿业研究与开发, 45(4): 63-69. Jiang Ke, Dong Juntao, Jiang Moufang, et al, 2025. Optimization of slurry pipeline transportation process parameters under variable filling gradients [J]. Mining Research and Development, 45(4): 63-69.

康志强, 辛东夫, 邵陆航, 等, 2020. L型充填管道料浆输送压力损失及优化研究[J]. 金属矿山, 49(9): 33-40. Kang Zhiqiang, Xin Dongfu, Shao Luhang, et al, 2020. Study on pressure loss and optimization of L-shaped filling pipe slurry [J]. Metal Mine, 49(9): 33-40.

孔翔生, 王朝隆, 刘毓, 等, 2024. 高浓度超细尾砂泵送充填智能调压控制系统[J]. 有色金属工程, 14(9): 130-137. Kong Xiangsheng, Wang Zhaolong, Liu Yu, et al, 2024. In-

- telligent pressure regulating control system for pumping and filling high concentration ultrafine tailing[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 14(9): 130-137.
- 李广波, 盛宇航, 刘杰, 等, 2024. 不同流变剂对某矿全尾砂膏体充填性能的影响[J]. *矿业研究与开发*, 44(6): 135-141. Li Guangbo, Sheng Yuhang, Liu Jie, et al, 2024. Influence of different rheological agents on the filling performance of full tailings paste in a mine[J]. *Mining Research and Development*, 44(6): 135-141.
- 李金鑫, 孙伟, 张盛友, 等, 2021. 不同减水剂对某矿高浓度充填料浆输送性能影响研究[J]. *中国矿业*, 30(11): 81-86. Li Jinxin, Sun Wei, Zhang Shengyou, et al, 2021. Study on the influence of different water reducing agents on the transportation performance of high concentration filling slurry in a mine [J]. *China Mining Magazine*, 30(11): 81-86.
- 刘伟涛, 王莹莹, 王国立, 2023. 基于小型环管试验的膏体管道输送阻力特性研究[J]. *矿业研究与开发*, 43(9): 12-16. Liu Weitao, Wang Yingying, Wang Guoli, 2023. Study on resistance characteristics of paste pipeline transportation based on small-scale loop pipe test [J]. *Mining Research and Development*, 43(9): 12-16.
- 彭亮, 2023. 全尾砂充填料浆输送特性及输送参数优化研究[J]. *矿业研究与开发*, 43(12): 65-69. Peng Liang, 2023. Study on conveying characteristics and conveying parameter optimization of full tailings filling slurry[J]. *Mining Research and Development*, 43(12): 65-69.
- 任建平, 焦华喆, 2020. 全尾砂半工业环管输送试验与数值模拟研究[J]. *矿业研究与开发*, 40(12): 23-27. Ren Jianping, Jiao Huazhe, 2020. Experiment and numerical simulation of semi-industrial loop pipe transportation for full tailings filling[J]. *Mining Research and Development*, 40(12): 23-27.
- 王平, 权锡柱, 刘艳, 等, 2024. 煤矸石粉煤灰料浆管道输送数值模拟研究[J]. *中国煤炭*, 50(6): 144-152. Wang Ping, Quan Xizhu, Liu Yan, et al, 2024. Numerical simulation study on pipeline transportation of coal gangue-fly ash filling slurry[J]. *China Coal*, 50(6): 144-152.
- 王少勇, 吴爱祥, 阮竹恩, 等, 2018. 基于环管实验的膏体流变特性及影响因素[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 49(10): 2519-2525. Wang Shaoyong, Wu Aixiang, Ruan Zhuen, et al, 2018. Rheological properties of paste slurry and influence factors based on pipe loop test[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 49(10): 2519-2525.
- 王贤来, 姚维信, 王虎, 等, 2011. 矿山废石全尾砂充填研究现状与发展趋势[J]. *中国矿业*, 20(9): 76-79. Wang Xianlai, Yao Weixin, Wang Hu, et al, 2011. The directions of R & D on backfill with waste rock and total tailings in underground mine [J]. *China Mining Magazine*, 20(9): 76-79.
- 魏微, 高谦, 2013. 减水剂对全尾砂新型胶凝材料强度的影响[J]. *混凝土*, (5): 80-82. Wei Wei, Gao Qian, 2013. Effects of water-reducers on strength of neotype whole-tailings cementing materials[J]. *Concrete*, (5): 80-82.
- 吴爱祥, 王勇, 王洪江, 2016. 膏体充填技术现状及趋势[J]. *金属矿山*, 45(7): 1-9. Wu Aixiang, Wang Yong, Wang Hongjiang, 2016. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. *Metal Mine*, 45(7): 1-9.
- 吴爱祥, 王勇, 张敏哲, 等, 2021. 金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J]. *金属矿山*, 50(1): 1-13. Wu Aixiang, Wang Yong, Zhang Minzhe, et al, 2021. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines[J]. *Metal Mine*, 50(1): 1-13.
- 吴爱祥, 杨莹, 程海勇, 等, 2018. 中国膏体技术发展现状与趋势[J]. *工程科学学报*, 40(5): 517-525. Wu Aixiang, Yang Ying, Cheng Haiyong, et al, 2018. Status and prospects of paste technology in China [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 40(5): 517-525.
- 吴再海, 李成江, 齐兆军, 等, 2020. 减水剂在膏体充填管道输送的研究分析[J]. *矿业研究与开发*, 40(3): 145-149. Wu Zhaihai, Li Chengjiang, Qi Zhaojun, et al, 2020. Research and analysis of water reducing agent in pipeline transportation of paste filling[J]. *Mining Research and Development*, 40(3): 145-149.
- 郑伯坤, 李强, 李向东, 2013. 图拉尔根铜镍矿充填工艺研究[J]. *矿业研究与开发*, 33(1): 1-4, 37. Zheng Bokun, Li Qiang, Li Xiangdong, 2013. Research on backfilling technology for tulaergen copper-nickel mine [J]. *Mining Research and Development*, 33(1): 1-4, 37.
- 郑伯坤, 吕伟鹏, 段单峰, 等, 2025. 超细尾砂均质化搅拌技术研究[J]. *黄金科学技术*, 33(6): 1197-1208. Zheng Bokun, Lü Weipeng, Duan Shanfeng, et al, 2025. Research on homogenization and mixing technology of ultra-fine tailings [J]. *Gold Science and Technology*, 33(6): 1197-1208.
- 翟永刚, 吴爱祥, 王洪江, 等, 2010. 全尾砂膏体料浆的流变特性研究[J]. *金属矿山*, 39(12): 30-32, 57. Zhai Yonggang, Wu Aixiang, Wang Hongjiang, et al, 2010. Study on rheological properties of the unclassified-tailings paste [J]. *Metal Mine*, 39(12): 30-32, 57.

诸利一, 2023. 聚羧酸减水剂对超细絮凝尾矿的流变特性影响及其表界面研究[D]. 北京: 北京科技大学. Zhu Liyi, 2023. Effect of polycarboxylic water reducer on rheological characteristics of ultrafine flocculated tailings and study on its surface interface[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing.

祝鑫, 彭亮, 仵锋锋, 等, 2022. 贵州某金矿超细尾砂充填工艺优选与应用[J]. 矿业研究与开发, 42(9): 34-38. Zhu Xin, Peng Liang, Wu Fengfeng, et al, 2022. Preferential selection and application of ultra-fine tailings filling process in a gold mine of Guizhou[J]. Mining Research and Development, 42(9): 34-38.

Study on the Influence of Water-reducing Agents on the Rheological Properties of Paste and the Regulation of Pipeline Transportation

LV Weipeng¹, ZHENG Bokun^{1, 2, 3, 4}, JIANG Ke^{1, 3, 4}, DAI Kewei^{5, 6}, LI Jin⁵, ZOU Yongwei⁶, YU Jinzhu¹

1. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China;

2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha 410012, Hunan, China;

3. National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha 410012, Hunan, China;

4. National Technological Innovation Center for Efficient Development of Strategic Rare Metal Mineral Resources, Changsha 410012, Hunan, China;

5. Jiangxi Ganfeng Lithium Group Co., Ltd., Xinyu 338000, Jiangxi, China;

6. Xianghuangqi Mengjin Mining Development Co., Ltd., Xilingol League 026000, Inner Mongolia, China

Abstract: In order to enhance mineral recovery rates, the grinding fineness within the concentrator is progressively reduced, resulting in an increased production of ultrafine tailings, a phenomenon that has become prevalent. Nevertheless, high-concentration slurries of ultrafine tailings encounter challenges such as elevated viscosity, inadequate fluidity, and low critical concentration. The application of water-reducing agents can ameliorate slurry flow conditions, effectively diminishing the flow resistance of backfill slurry and facilitating pipeline transportation. This study, through particle size analysis of backfill materials and slump testing, confirmed that the tailings are classified as ultrafine. The optimal transportation concentration for backfill slurry was identified to be between 72% and 74%. When a water-reducing agent is incorporated at an ash-to-sand ratio of 1:8, with an optimal dosage of 0.6%, it substantially improves the fluidity of the backfill slurry under economically favorable conditions. Experimental investigations into pipeline transportation using L-shaped pipelines demonstrated that the incorporation of a 0.6% water-reducing agent significantly decreased the yield stress and viscosity coefficient of a slurry with a 74% concentration, compared to the untreated control group. This reduction led to a decrease in transportation resistance by approximately 34.9%, thereby achieving the objective of increasing slurry concentration while maintaining its transportability. Numerical simulations corroborated these findings, indicating that, under gravity-driven self-flow conditions, the absence of water-reducing agents results in reduced and uneven flow velocities within the pipeline. Conversely, the addition of the agent enhanced the flow velocity of the 74% concentration slurry by approximately 54%, effectively mitigating stratification and diminishing the risk of pipeline blockage. Zeta potential analysis further elucidated the mechanisms of electrostatic repulsion and steric hindrance imparted by the water-reducing agent, which aligns with the previously established optimal dosage of 0.6%. The findings indicate that the incorporation of the agent results in a synergistic effect, enhancing the concentration of backfill slurry while simultaneously reducing

transportation resistance. Overall, this method facilitates the annual utilization of approximately 135 000 tons of tailings, thereby significantly mitigating the pressure on tailings ponds. The optimized process involving the water-reducing agent leads to an annual cost reduction of approximately 2.45 million yuan when compared to the alternative of installing new diaphragm pumps. Engineering applications demonstrate that this optimized process enables the pumping of backfill slurry over a distance of 6.2 km in underground voids under identical pumping conditions, maintaining an outlet slurry flow velocity of 1.3 m/s, and minimizing the risks of stratification and blockage. These findings offer valuable insights into enhancing tailings utilization and regulating the transportation of high-concentration ultrafine tailings slurry.

Key words: paste filling; water-reducing; rheological properties; pipeline transportation; ultra-fine tailings; filling slurry