大屯锡矿泵送充填膏体优化研究*

苏思超，王俊，杨天雨

（昆明理工大学 国土资源工程学院， 云南 昆明 650093）

摘要：针对大屯锡矿碎石充填料浆泵送距离短、易堵管的问题，提出在碎石中添加铜渣尾砂细料，以改善骨料级配，并开展了碎石-铜渣尾砂配合比试验，得出碎石质量占比达到60%时，混合骨料的堆积密实度达到最大值。进一步通过充填体强度试验、流变试验、高浓度与高流态试验，确定了满足充填体强度要求、膏体不离析、可自流平的碎石-铜渣尾砂膏体配合比。基于大屯锡矿32#采场实际充填情况，采用数值模拟方法分析碎石-铜渣尾砂膏体管输阻力变化规律。结果表明：碎石-铜渣尾砂膏体的最优配合比为碎石∶铜渣尾砂=6∶4，水泥用量分别为270 kg/m³（质量浓度为82%～83%）、240 kg/m³（质量浓度为83%～84%）、210 kg/m³（质量浓度为83%～84%）、180 kg/m³（质量浓度为83%～85%）；碎石-铜渣尾砂膏体沿水平管道的阻力损失为6 105.76～6 525.11 Pa/m，极限泵送水平距离为2 298.81～2 456.70 m。采用碎石∶铜渣尾砂=6∶4、水泥用量为240 kg/m³、质量浓度为83%的膏体进行工业充填，相较于采用多级泵送的原充填工艺，该配合比膏体仅需在单泵条件下即可满足充填需求，且单泵输送距离（2 052 m）小于极限泵送水平距离，可在出口处留有富余动力，验证了该最优配合比的有效性。

关键词：膏体充填；碎石；铜渣尾砂；配合比；管输阻力

中图分类号：TD853.34　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)12-0073-10

Study on Optimization of Pumping Filling Paste in Datun Tin Mine

SU Sichao, *WANG Jun*, *YANG Tianyu*

(Faculty of land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: Aiming at the problems of short pumping distance and easy plugging of gravel filling slurry in Datun Tin Mine, it was proposed to add copper slag tailings fine material to the gravel to improve the aggregate gradation, and the gravel-copper slag tailings mixture ratio test was carried out. It was concluded that when the proportion of gravel mass reached 60%, the packing density of mixed aggregate reached the maximum value. Further, through the strength test of backfill, rheological test, high concentration and high flow state test, the mix ratio of gravel-copper slag tailings paste was determined, which meets the strength requirement of filling body, no segregation of paste and self-leveling. Based on the actual filling situation of 32# stope in Datun Tin Mine, the numerical simulation method was used to analyze the change law of pipeline resistance of gravel-copper slag tailings paste. The results show that the optimal mix ratio of gravel-copper slag tailings paste is gravel∶copper slag tailings = 6∶4, and the cement dosage are 270 kg/m³ (mass concentration 82%-83%), 240 kg/m³ (mass concentration 83%-84%), 210 kg/m³ (mass concentration 83%-84%), 180 kg/m³ (mass concentration 83%-85%), respectively. The resistance loss of gravel-copper slag tailings paste along the horizontal pipeline is 6 105.76-6 525.11 Pa/m, and the limit pumping horizontal distance is 2 298.81-2 456.70 m. The paste was used for industrial filling with a mix proportion of gravel∶copper slag tailings = 6∶4, a cement dosage of 240 kg/m³, and a mass concentration of 83%. Compared with the original filling process with multi-stage pumping, the paste with this mix ratio can meet the filling demand only under the condition of single pump, and the single pump conveying distance (2 052 m) is less than the limit pumping horizontal distance, allowing for surplus power at the outlet, which verifies the effectiveness of the optimal mix ratio.

Key words: Paste filling, Gravel, Copper slag tailings, Mix ratio, Pipeline resistance

---

* **收稿日期**：2024-12-05

基金项目：云南省科学技术厅基础研究专项项目(202301AU070185)

作者简介：苏思超(1999—)，男，山西晋城人，硕士研究生，研究方向为现代充填理论及工艺。E-mail：su-si-chao-99@qq.com

通信作者：王俊(1990—)，男，云南昭通人，博士，副教授，研究方向为现代充填理论及工艺。E-mail：867226048@qq.com

0 引言

近年来,随着矿产资源的大规模开采与利用,环境破坏、资源枯竭等问题愈发严重,资源环境的约束日益加剧。践行绿色发展理念,推动矿业向资源集约、环境友好、高效利用、矿区和谐的方向发展任重道远[1-2]。充填采矿法是当前矿业领域践行环境保护和可持续发展的核心开采技术,其不仅搭建起了矿产资源开发与生态环境保护之间和谐共生的桥梁,还在实践中实现了矿产资源的高效利用与固废的循环资源化利用[3-5]。大屯锡矿年产锡矿石量达 100 万 t 以上,矿权范围内矿体赋存条件复杂,形态、倾角及厚度变化大,矿石围岩松散破碎,矿体呈似层状、透镜状产出,分枝复合、尖灭再现现象明显。目前,该矿山开采深度已超过 1 000 m,面临着高井深、高应力、高水患等开采难题。基于以上开采难题,提出了"分层式、单步骤连续化、小开挖、快速充填"的技术思路[6-7],在井下进行试验,并成功应用了下向矩形进路式充填采矿法,进路宽度与高度均为 4 m,设计充填体 28 d 强度为 5 MPa。为满足充填需求,矿山在井下建设了充填制备站,利用井下掘进废石制备充填料。但在生产实践中面临以下问题:管道输送阻力大,单台混凝土泵(工作压力为 15 MPa)极限输送距离仅为 1 km,管输能力低、堵管频发;料浆流动性差,分段建设挡墙进行分段充填以及堵管事件导致充填成本高,推广应用受到严重限制。经分析可知,管输阻力过大是引发大屯锡矿充填问题的根本原因,这一问题的核心在于对充填物料的基本特性、配合比及料浆流变特性认识不足,导致骨料中细料不足、骨料配比不合理。

许宏图等[8]研究了煤矸石膏体的性能,发现细矸石含量是影响膏体性能的关键性因素,细矸率的提高优化了颗粒配级,在细矸率为 40%时膏体综合指标最佳。张佳等[9]采用水泥-矿渣-赤泥复合胶凝材料对充填膏体进行改良,并进行了强度、流动性和工业试验,结果表明,采场内流动性良好,后续开采期间未出现破碎断裂情况。张涛等[10]研究镍渣与全尾砂的性质,利用骨料堆积密实度理论确定了料浆的配比优化范围,并基于料浆的流动性及充填体强度,确定了最佳配合比。陈亮[11]研究了尾砂粉磨时间对充填料浆流变及充填体强度的影响,发现粉磨时间直接影响尾砂的细度,当粉磨时间一定时,粗细颗粒比例适中,细颗粒可填充于粗颗粒缝隙中,从而提高密实度,充填体强度增大;当粉磨时间过长时,细颗粒过多不利于料浆的流动性,同时起骨架支撑作用的粗颗粒减少,导致颗粒松散,影响充填体强度。杨柳华等[12]研究了粗骨料对膏体硬化性能的影响,发现加入适量粗骨料后,粗骨料间相互接触形成支撑骨料,有助于提高充填体强度和料浆流动性,降低充填成本。但过多的粗颗粒会导致大量颗粒聚集,造成管道底部淤积,引发堵管事故[13]。毕颖等[14]在充填材料中添加磷石膏,制备出的新型膏体其流动性显著提升,实现了自流充填,有效降低了开采成本。

综上可知,骨料级配是影响料浆流变、管输阻力、流动性与充填体强度的关键因素[15]。基于此,本文研究通过在碎石中加入适量细料以改善物料级配的可行性。首先,开展两种骨料配合比试验,以最大堆积密实度为目标确定最佳配比;其次,测试不同水泥用量下的充填体抗压强度,从而筛选出符合采场强度要求的配合比;再次,以高流态为目标开展流变试验与流态试验,确定满足充填体强度设计要求、高浓度和高流态条件的膏体配合比;最后,选择符合所有技术要求的配比进行管道输送阻力的数值模拟分析,并进一步进行工业试验进行验证。

1 试验材料基本物理参数

根据大屯锡矿充填存在的问题,结合对矿山周边的物料调查,初步确定了选用铜渣尾砂(冶炼铜渣再磨再选的尾砂)作为细料。通过化学元素分析可知,铜渣尾砂的主要成分为硅铁,其含量达 39.21%,属于惰性材料,可作为充填骨料。依据《固体废物浸出毒性浸出方法——水平振荡法》(HJ 557—2010)[17]和《固体废物浸出毒性浸出方法——硫酸硝酸法》(HJ/T 299—2007)[18]对铜渣尾砂进行毒物浸出试验,按《危险废物鉴别标准——浸出毒性鉴别》(GB 5085.3—2007)[19]进行鉴别,最终确定其符合井下充填的环保与安全标准。浸出毒性试验结果如图 1 所示。

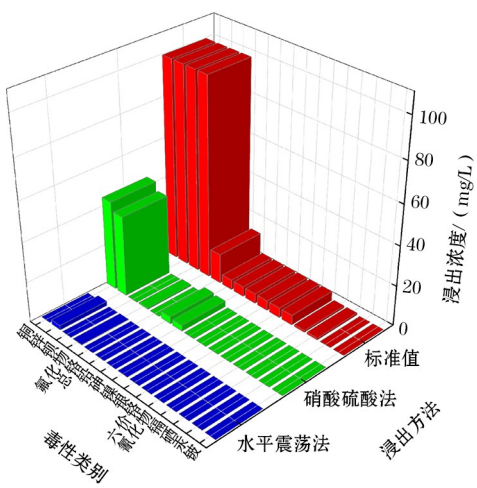


图 1 铜渣尾砂浸出毒性试验结果

Fig.1 Results of leaching toxicity test of copper slag tailings

碎石、铜渣尾砂经烘干后，按照《土工试验规程》(YS/T 5225—2016)测定了其基本物理参数，见表1。

表1　碎石与铜渣尾砂基本物理参数

Table 1　Basic physical parameters of crushed stone and copper slag tailings

试验材料	密度/(kg·m^{-3})	松散密度/(kg·m^{-3})	孔隙率	堆积密实度
碎石	2 754	1 652	0.398	0.602
铜渣尾砂	3 745	1 849	0.506	0.494

物料级配测定结果如图2所示。

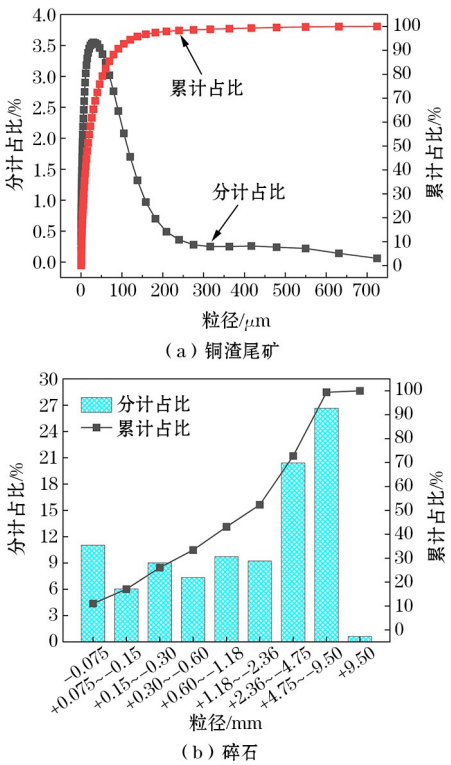


图2　物料粒径分布

Fig.2　Particle size distribution of materials

由图2可知，碎石总体级配较好，但孔隙率较大，密实度较小。若单独使用碎石进行充填，虽可获得满意的强度，但管输阻力大，且料浆在采场内的流动性能差。铜渣尾砂过于细小，级配不尽合理。若单独用铜渣尾砂进行充填，将面临脱水和胶结困难，导致充填体脆性大，容易开裂。因此，将两种骨料混合使用，可有效解决各自单独使用时面临的问题。

2　碎石-铜渣尾砂最大堆积密实度

文献[20]在充分考虑粗骨料堆集效应与细骨料填隙效应的条件下，构建了粗骨料形成骨架结构条件下的混合骨料最大堆积密实度模型。两种骨料混合的理想状态为：粗骨料颗粒形成骨架，细骨料可以充填到粗骨料的孔隙中，增加混合骨料的堆积密实度，以便于提高充填体的强度[8,21]。依据混合骨料堆集密实度模型，测定不同混合比例条件下骨料的堆积密实度，最终确定两种骨料的最优混合比例。

$$\Phi=\begin{cases}\dfrac{1}{\rho}\left(\dfrac{1}{\rho_1}+\dfrac{1-x}{\rho_2\Phi_2}\right)^{-1} & x\leqslant\dfrac{\rho_1\Phi_1}{\rho}\\[2ex] \dfrac{1}{\rho}\left[\dfrac{x}{\rho_1(\Phi_1+1-x\rho_1/\rho)}+\dfrac{1-x}{\rho_2\Phi_2}\right]^{-1} & x>\dfrac{\rho_1\Phi_1}{\rho}\end{cases}\tag{1}$$

$$\rho=x\rho_1+(1-x)\rho_2\quad 0\leqslant x\leqslant 1\tag{2}$$

式中：ρ 为混合骨料密度，kg/m^3；ρ_1 为碎石密度，kg/m^3；ρ_2 为铜渣尾砂密度，kg/m^3；Φ 为混合骨料堆积密实度；Φ_1 为碎石堆积密实度；Φ_2 为铜渣尾砂堆积密实度；x 为碎石在混合骨料中的质量占比，%。

两种骨料不同混合比例条件下堆积密实度计算与试验结果如图3所示。由图3可知，单位体积内混合骨料堆积密实度随碎石质量占比的增大呈现先增大后减小的变化趋势。碎石质量占比从0增大至60%时，混合骨料堆积密实度逐渐增大，该范围内碎石占比较小，碎石颗粒相互脱离并被尾砂颗粒包裹。碎石质量占比从60%增大至100%时，混合骨料堆积密实度逐渐减小，该范围内碎石占比较大，碎石颗粒虽然形成了骨架结构，但铜渣尾砂无法完全填满碎石间隙。因此，最优碎石质量占比为60%，此时碎石颗粒形成骨架结构，铜渣尾砂充分填充于碎石孔隙中，堆积密实度达到最大值。

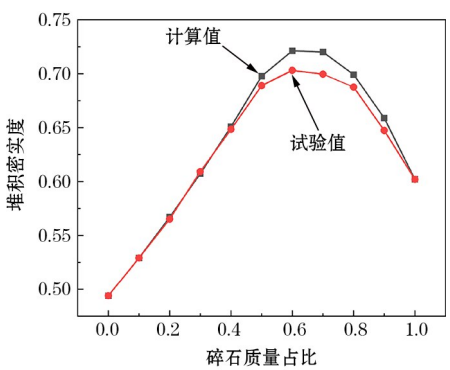


图3　碎石质量占比与密实度的关系

Fig.3　Relationship between mass proportion of crushed stone and compactness

3 碎石-铜渣尾砂配合比试验结果分析

3.1 充填体强度试验结果分析

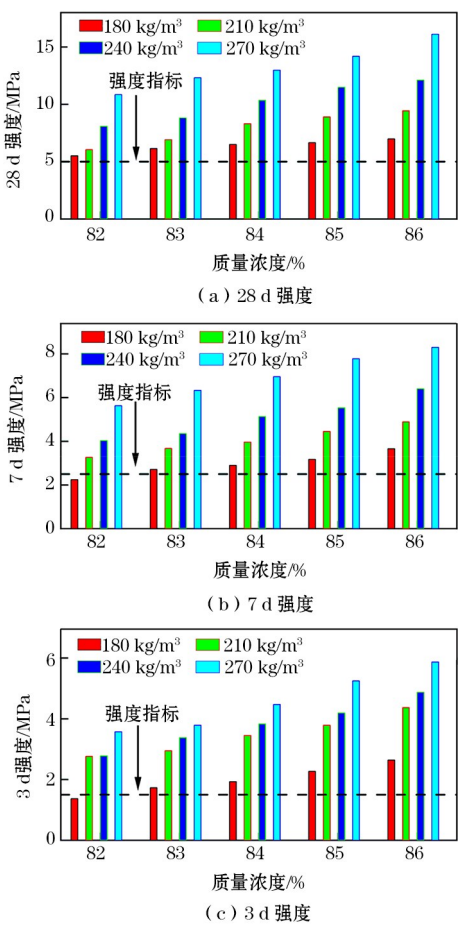
基于混合骨料最大堆积密实度分析结果,开展碎石∶铜渣尾砂=6∶4、水泥用量为 150～270 kg/m^3、质量浓度为 81%～86%的充填体强度测试试验,以确定满足大屯锡矿下向进路充填体强度需求的配合比。试验方案见表 2。

表 2 强度试验方案

Table 2 Strength test schemes

石渣比	水泥用量/(kg·m^{-3})	质量浓度/%	强度指标/MPa
6∶4	150,180,210,240,270	81,82,83,84,85,86	R_3,R_7,R_{28}

充填体抗压强度试验严格按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)[22]相关规定。测定结果如图 4 所示。



(a) 28 d 强度

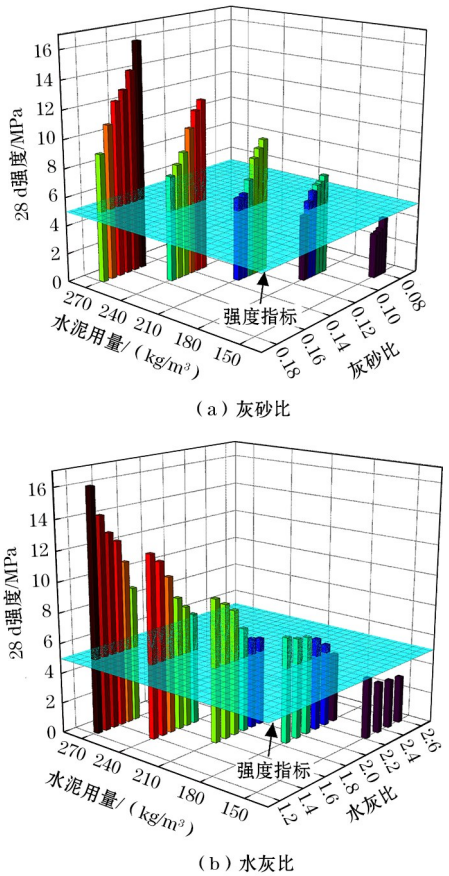
(b) 7 d 强度

(c) 3 d 强度

图 4 充填体强度测试结果

Fig.4 Test results of strength of backfill

图 5 展示了碎石-铜渣尾砂充填体强度的多因素影响关系。



(a) 灰砂比

(b) 水灰比

图 5 充填体强度多因素影响关系

Fig.5 Multi-factor influence relationship of backfill strength

影响充填体强度的因素较多,其中骨料、水泥和水三者密不可分,且其交互作用极为复杂。由图 5 可知,在相同水泥用量的条件下,充填体强度随着水灰比和灰砂比的减小而增大,均呈负相关关系。水灰比减小意味着用水量减少,为保持单位体积不变,骨料用量相应增加,灰砂比随之减小。从水化反应的需水量及排水量来看,在水泥用量不变的条件下,水泥水化反应所需的用水量不变,膏体内部的排水量随水灰比的降低而减少,排水过程中形成的微观孔隙通道也随之减少,充填体强度提升。

根据《有色金属采矿设计规范》(GB 50771—2012),分层巷道和回采进路的充填要连续进行,严格按设计施工并接顶;充填体设计强度不得低于 5 MPa。结合设计规范与矿山要求,充填体 3 d 强度 $R_3 \geqslant 1.5$ MPa,7 d 强度 $R_7 \geqslant 2.5$ MPa,28 d 强度 $R_{28} \geqslant 5.0$ MPa,均符合筛选要求,即质量浓度 83%、

水泥用量 180 kg/m³ 以上可满足工程设计需求。

3.2　流变试验结果分析

采用流变仪测定充填料浆剪切应力与剪切速率之间的响应关系，是研究流变力学特性的基础[14,23-24]。针对表 2 中的试验方案，采用 Brookfield (DV-Ⅱ+Pro)型流变仪进行流变试验，并绘制剪切应力和剪切速率之间的流变曲线。以废石：铜渣尾砂=6：4、水泥用量为 240 kg/m³、质量浓度为 81%～86%的膏体为例，流变曲线如图 6 所示。

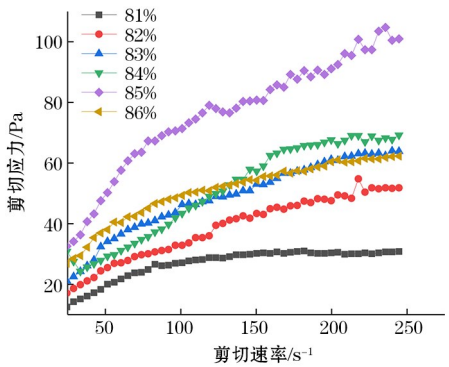


图 6　碎石-铜渣尾砂膏体流变曲线

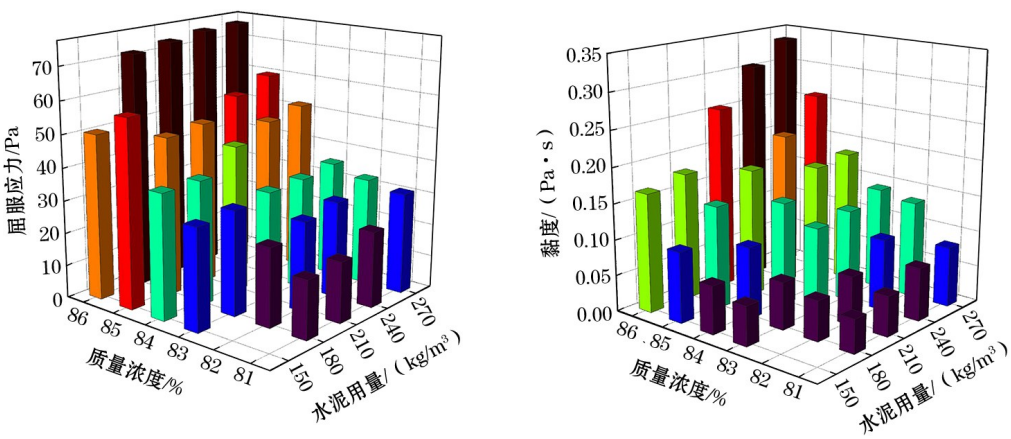
Fig.6　Rheological curves of gravel-copper slag tailing paste

根据流变曲线变化规律，对比参照非牛顿流体的流变模型，确定选用 Bingham 流变模型对流变曲线进行拟合分析，并确定流变参数。

$$\tau=\tau_0+\eta\left(\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}y}\right) \tag{3}$$

式中：τ 为剪切应力，Pa；τ_0 为初始屈服应力，Pa；η 为黏度，Pa·s；$\mathrm{d}u/\mathrm{d}y$ 为剪切速率，s^{-1}。

不同配合比膏体屈服应力及黏度分析结果如图 7 所示。由图 7 可知，在相同水泥用量条件下，膏体屈服应力和黏度随着质量浓度的提高而增大；在相同质量浓度条件下，膏体屈服应力和黏度随着水泥用量的增大而增大。质量浓度提高意味着骨料颗粒数量增加，膏体中水量减少，形成的絮凝结构增多，膏体内部摩擦力增大，黏度也随之增加。质量浓度从 81%提高到 86%时，屈服应力与黏度的平均增长率分别为 27%和 35.24%；水泥用量由 150 kg/m³ 增加到 270 kg/m³ 时，膏体屈服应力与黏度的平均增长率分别为 8.96%和 27.32%，可以看出质量浓度对膏体流变性质的影响更为显著，这与粗骨料膏体的相关研究结果一致[25]。



(a) 屈服应力　　(b) 黏度

图 7　料浆流变参数变化特性

Fig.7　Variation characteristics of rheological parameters of slurry

3.3　高浓度与高流态试验结果分析

为确保充填体质量，对表 2 中的所有配合比料浆进行泌水观察，根据高浓度条件对达到不离析、不分层的料浆进行筛选。高浓度料浆中的颗粒没有自由沉降只有压缩过程，具有间隙减小和体积收缩的特点，膏体表面无水泥浆层，泌水量极少[26]。同时，膏体在长距离进路内要实现流平与接顶，则必须满足高流态条件。高流态条件表明膏体应具有满意的流动行为，在无约束面的斜坡上应能自发转向水平，结合文献[27]与试验结果(见表 3)可知，当平均坍落度≥260 mm，扩展度≥600 mm 时，可实现充填膏体自流平。结合碎石-铜渣尾砂充填膏体流变试验，高流态条件与膏体流变参数是对应的，即最大屈服应力≤50 Pa，黏度≤1 Pa·s。

表 3 碎石-铜渣尾砂流态试验结果

Table 3 Test results of flow pattern of gravel-copper slag tailings

质量浓度/%	水泥用量/(kg·m^{-3})	坍落度/mm	扩展度/mm
81	180		
81	210		
81	240		
81	270	轻度离析,少量泌水,	
82	180	表面泌水高度小于 3 mm	
82	210		
82	240		
82	270	275	760
83	150	283	830
83	180	279	820
83	210	276	760
83	240	276	660
83	270	270	630
84	150	276	670
84	180	273	670
84	210	270	650
84	240	270	620
84	270	250	500
85	150	270	610
85	180	265	600
85	210	260	540
85	240	260	500
85	270	240	360
86	150	255	480
86	180	250	440
86	210	245	380
86	240	245	360
86	270	220	300

根据大屯锡矿下向进路充填体强度设计要求、高浓度和高流态条件,结合充填体强度及流态测试结果,同时满足上述条件的膏体配合比见表 4。

表 4 碎石-铜渣尾砂高浓度、高流态配合比

Table 4 Mixture ratio of gravel-copper slag tailings with high concentration and high flow state

石渣比	水泥用量/(kg·m^{-3})	质量浓度/%
6∶4	270	82～83
	240	83～84
	210	83～84
	180	83～85

4 碎石-铜渣尾砂膏体管输阻力数值模拟分析

目前,针对管输阻力的分析方法主要有理论分析、室内试验(包括环管试验与 L 管试验)和数值模拟 3 种[28-31]。然而,理论分析方法与室内试验方法因无法真实反映矿山管道的实际情况,如弯管、上坡、下坡及变径等因素,导致其分析结果难以直接应用于矿山生产实践。因此,以大屯锡矿 32# 矿体的实际情况为基础,采用 Fluent 数值模拟软件,对表 4 中的碎石-铜渣尾砂高浓度、高流态膏体管道输送阻力进行模拟分析,旨在为优化大屯锡矿膏体泵送充填技术提供研究基础。

4.1 模型建立

大屯锡矿 32# 矿体设计采用下向水平分层进路式充填采矿法回采,充填站至采场充填管线的总长为 2 052 m,共有 25 个弯管。原设计采用碎石充填工艺,需要两台混凝土泵(工作压力为 15 MPa,管径为 100 mm)接力输送。管线几何模型如图 8 所示,为了观察管道各处的压力,共设置 8 个监测面。并对管线进行网格划分,得到管道边界层网络和管道面网格,如图 9 和图 10 所示。

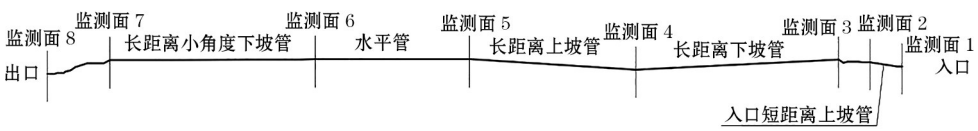


图 8 管线几何模型

Fig.8 Geometry model of pipeline

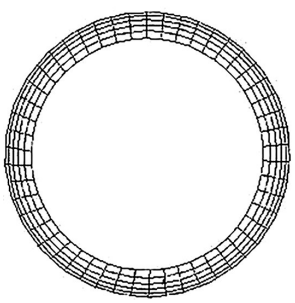


图 9 管道边界层网格

Fig.9 Boundary layer grid of pipeline

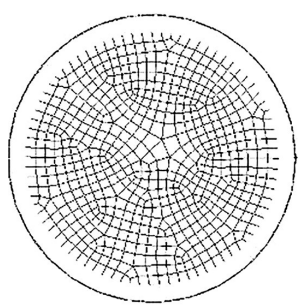


图 10 管道面网格

Fig.10 Pipeline surface grid

4.2　模拟方案

在管道模型中设置入口边界条件为速度入口，管道壁定义为管壁边界，为使料浆流出时具有一定的动能，出口边界条件设置为压力出口，在竖直方向附加重力加速度（−9.8 m/s²）。模拟方案见表 5。

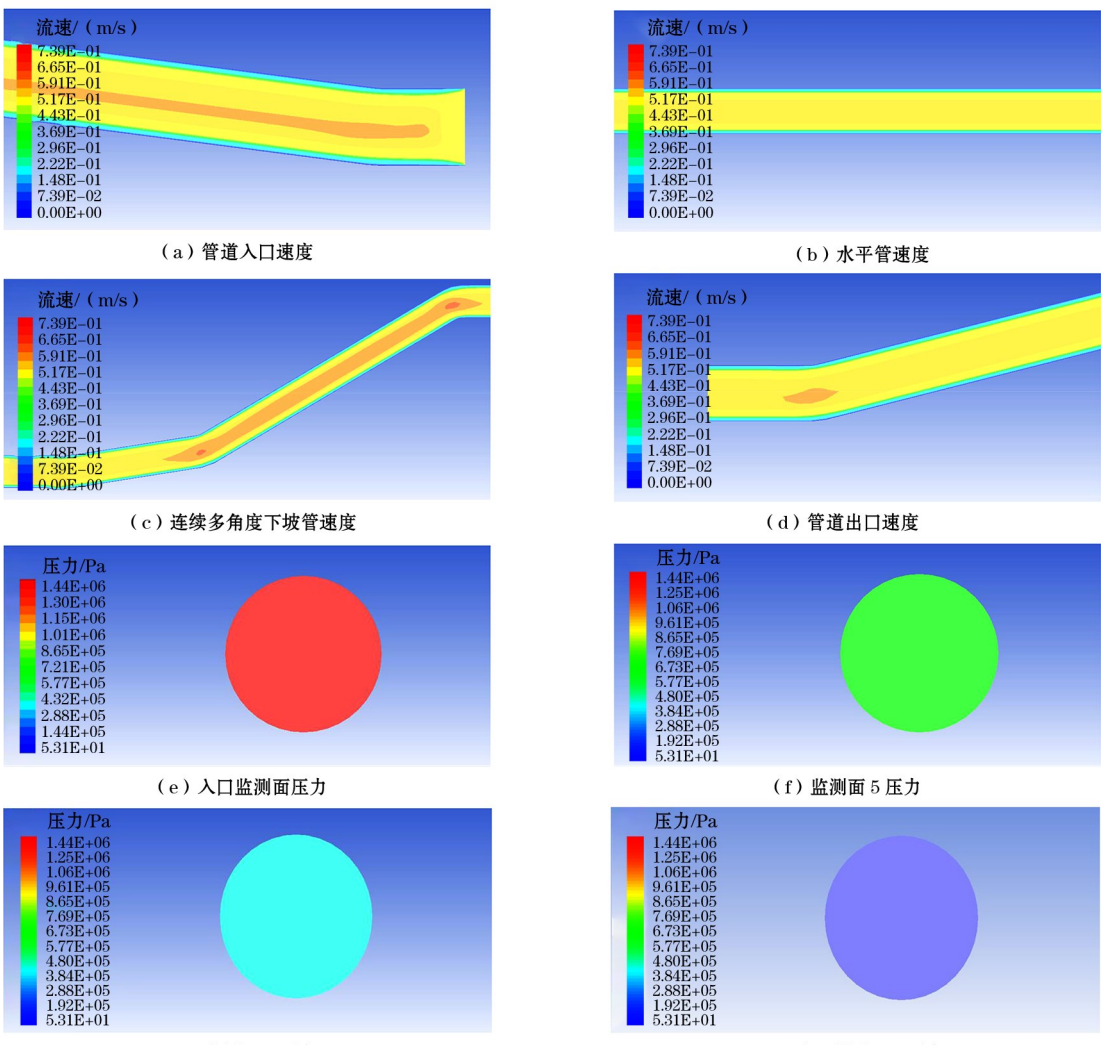
4.3　模拟结果与分析

对各模拟方案的计算结果进行对比分析，发现各方案的变化规律基本一致，仅在数值上有所差别。因此，以 A4 方案为例进行分析，该方案下管道各处速度及压力云图如图 11 所示。

表 5　管输模拟方案

Table 5　Simulation schemes of pipeline transportation

编号	质量浓度/%	水泥用量/(kg/m³)	管径/mm	流速/(m/s)	屈服应力/Pa	黏度/(Pa·s)
A1	82	270	100	0.71	32.96	0.135
A2	83	270	100	0.71	35.66	0.143
A3	83	240	100	0.71	34.15	0.128
A4	84	240	100	0.71	49.85	0.179
A5	83	210	100	0.71	33.63	0.121
A6	84	210	100	0.71	45.12	0.144
A7	83	180	100	0.71	32.00	0.066
A8	84	180	100	0.71	38.15	0.100
A9	85	180	100	0.71	48.70	0.144



(a) 管道入口速度　(b) 水平管速度

(c) 连续多角度下坡管速度　(d) 管道出口速度

(e) 入口监测面压力　(f) 监测面 5 压力

(g) 监测面 6 压力　(h) 出口监测面 8 压力

图 11　管道各处速度及压力云图

Fig.11　Velocity and pressure cloud diagrams at each part of pipeline

由图 11 可知,料浆在管道输送过程中的总压力随着管输距离的增大而逐步减小,但变化并不剧烈,这是因为充填料浆管输速度相对较低,导致动压较小,使静压在总压中占据主导地位。因此,料浆管输的总压呈现出稳定且逐步减小的趋势。结合速度云图可知,料浆进入弯管后流动状态变化显著,流出弯管后,料浆并非立即恢复稳定流动,而是经过一段距离后,其速度与压力才逐渐趋于稳定,表现出明显的速度梯度。在水平管道中,料浆与管壁接触处的速度趋近于零,越往管道中心,速度越大,呈现出了明显的速度梯度。

对管道入口、出口及各监测面的压力值进行统计分析,得到碎石-铜渣尾砂膏体沿水平管道的阻力损失,并计算得出单台混凝土泵(工作压力 15 MPa)的极限输送距离,结果见表 6。

表 6 碎石-铜渣尾砂膏体沿水平管道的阻力损失及极限泵送距离

Table 6 Resistance loss and limit pumping distance of gravel-copper slag tailings paste along horizontal pipeline

编号	质量浓度/%	水泥用量/(kg/m³)	流速/(m/s)	屈服应力/Pa	黏度/(Pa·s)	沿程阻损失/(Pa/m)	极限泵送水平距离/m
A1	82	270	0.71	32.96	0.135	6 237.62	2 404.76
A2	83	270	0.71	35.66	0.143	6 263.26	2 394.92
A3	83	240	0.71	34.15	0.128	6 255.72	2 397.81
A4	84	240	0.71	49.85	0.179	6 525.11	2 298.81
A5	83	210	0.71	33.63	0.121	6 230.54	2 407.49
A6	84	210	0.71	45.12	0.144	6 443.93	2 327.77
A7	83	180	0.71	32.00	0.066	6 105.76	2 456.70
A8	84	180	0.71	38.15	0.100	6 324.05	2 371.90
A9	85	180	0.71	48.70	0.144	6 510.08	2 304.12

由表 6 可知,碎石-铜渣尾砂膏体管输阻力损失在 6 105.76～6 525.11 Pa/m 之间,整体上随着屈服应力及黏度的增加而增大。根据能量守恒定律,以泵压 15 MPa 计算出了不同配比碎石-铜渣尾砂膏体极限泵送水平距离为 2 298.81～2 456.70 m,即极限泵送水平距离随着沿程阻力损失的增加而减小。

考虑强度、高浓度、高流态、管输及成本条件,推荐采用碎石∶铜渣尾砂=6∶4、水泥用量为 240 kg/m³、质量浓度为 83%的膏体进行充填。相较于矿山原有的多级泵送充填工艺,推荐的配合比膏体仅需在单泵条件下即可满足充填需求,现场应用结果表明,单泵输送距离(2 052 m)小于极限泵送水平距离,管道出口的膏体仍具备富余动能,进一步验证了充填料配比参数的可行性。

5 结论

(1) 针对大屯锡矿碎石集料泵送充填工艺因骨料级配不合理而导致的管输阻力过大的问题,提出在碎石中添加适量的细料来改善骨料级配。通过对矿山周边物料进行详细调查,并开展化学元素及浸出毒性试验,确定了选用铜渣尾砂的可行性。

(2) 根据骨料堆积密实度分析结果,结合充填体强度、流态及流变试验结果,确定了既满足充填体强度设计要求,又确保充填膏体不离析且在采场内能实现自流平的碎石-铜渣尾砂配合比。具体配比为:碎石∶铜渣尾砂=6∶4,水泥用量为 270 kg/m³,质量浓度为 82%～83%;水泥用量为 240 kg/m³,质量浓度为 83%～84%;水泥用量为 210 kg/m³,质量浓度为 83%～84%;水泥用量为 180 kg/m³,质量浓度为 83%～85%。

(3) 管输数值模拟结果表明,在碎石中添加适量的铜渣尾砂可有效降低膏体管输阻力,提高膏体极限输送距离,碎石-铜渣尾砂膏体在单泵条件下的极限输送距离为 2 298.81～2 456.7 m。在工业试验中,充填站至采场的充填管线总长为 2 052 m,远小于膏体的极限输送距离,料浆在出口处仍有富余动能,验证了本文提出的充填料配合比的有效性。

参考文献(References):

[1] 吴爱祥,张晋军,王贻明,等.膏体充填:金属矿绿色开采的变革性技术[J].中国有色金属学报,2024,34(5):1652-1666.
WU Aixiang, ZHANG Jinjun, WANG Yiming, et al. Cemented paste backfill:transformative technology for green mining in metal mines [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2024,34(5):1652-1666.

[2] 郭玉杰.金属矿山充填采矿技术要点及应用分析[J].世界有色金属,2023(22):78-80.
GUO Yujie. Key points and application analysis of filling mining technology in metal mines[J]. World Nonferrous Metals,2023(22):78-80.

[3] 吴爱祥，杨莹，程海勇，等.中国膏体技术发展现状与趋势[J].工程科学学报，2018，40(5)：517-525.
WU Aixiang，YANG Ying，CHENG Haiyong，et al. Status and prospects of paste technology in China[J]. Chinese Journal of Engineering，2018，40(5)：517-525.

[4] 唐岳松，张令非，吕华永.煤基固废制备充填材料配比优化试验研究[J].矿业科学学报，2019，4(4)：327-336.
TANG Yuesong，ZHANG Lingfei，LYU Huayong. Study on proportion optimization of coal-based solid wastes filling materials[J]. Journal of Mining Science and Technology，2019，4(4)：327-336.

[5] 阮竹恩，吴爱祥，王贻明，等.全固废膏体关键性能指标的多目标优化[J].工程科学学报，2022，44(4)：496-503.
RUAN Zhuen，WU Aixiang，WANG Yiming，et al. Multiple response optimization of key performance indicators of cemented pastebackfill of total solid waste[J]. Chinese Journal of Engineering，2022，44(4)：496-503.

[6] 黄松.大屯锡矿下向水平分层进路式充填采矿工艺技术研究[D].昆明：昆明理工大学，2023.
HUANG Song. Research on the mining technology of downward-horizontal slicing approach filling in Datun Tin Mine[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2023.

[7] 王俊，乔登攀，李广涛，等.基于厚板理论下向进路充填假顶强度模型及应用[J].煤炭学报，2023，48(增刊1)：28-36.
WANG Jun，QIAO Dengpan，LI Guangtao，et al. Strength model and its application of downward drift fillingroof based on thick plate theory[J]. Journal of China Coal Society，2023，48(Suppl.1)：28-36.

[8] 许宏图，刘树龙，石大庆，等.煤矸石-脱硫石膏-粉煤灰膏体料浆制备及性能研究[J].矿业研究与开发，2024，44(6)：156-164.
XU Hongtu，LIU Shulong，SHI Daqing，et al. Preparation of coal gangue-desulfurization gypsum-fly ash paste slurry and its properties[J]. Mining Research and Development，2024，44(6)：156-164.

[9] 张佳，吴文，李磊凯.复合胶凝剂在贵州云峰铝土矿充填膏体中的应用研究[J].矿业研究与开发，2024，44(6)：128-134.
ZHANG Jia，WU Wen，LI Leikai. Application of composite gelling agent in filling paste of Yunfeng Bauxite in Guizhou Province[J]. Mining Research and Development，2024，44(6)：128-134.

[10] 张涛，李德贤，张鹏强，等.镍渣-全尾砂混合骨料配比试验研究[J].黄金科学技术，2024，32(3)：437-444.
ZHANG Tao，LI Dexian，ZHANG Pengqiang，et al. Experimental study on the ratio proportioning of nickel slag-full tailings mixed aggregate[J]. Gold Science and Technology，2024，32(3)：437-444.

[11] 陈亮.尾砂颗粒级配对水泥-钢渣基复合充填料浆流变特性及力学强度的影响[J].矿业研究与开发，2022，42(8)：113-118.
CHEN Liang. Effect of tailings particle size on rheological properties and mechanical strength of cement-steel slag-based composite filling slurry[J]. Mining Research and Development，2022，42(8)：113-118.

[12] 杨柳华，李一凡，李一良，等.粗骨料对膏体料浆新鲜及硬化性能影响研究[J/OL].有色金属工程：1-18[2025-01-23]. https://link.cnki.net/doi/10.20242/j.issn.2097-5384.2025.02.016.
YANG Liuhua，LI Yifan，LI Liliang，et al. Effect of coarse aggregate on fresh and hardened properties of paste slurry[J/OL]. Nonferrous Metals Engineering：1-18[2025-01-23]. https://link.cnki.net/doi/10.20242/j.issn.2097-5384.2025.02.016.

[13] 程磊，肖刚，王丹影，等.含粗颗粒矸石浆液流变性能分析及管道输送特性模拟[J].洁净煤技术，2024，30(增刊2)：634-640.
CHENG Lei，XIAO Gang，WANG Danying，et al. Rheological performance analysis and pipe transport characteristics simulation of gangue slurry containing coarse particles[J]. Clean Coal Technology，2024，30(Suppl.2)：634-640.

[14] 毕颖，赵文斌.磷石膏-水泥基复合充填材料的综合性能和细观水化机理[J].矿业研究与开发，2024，44(6)：89-94.
BI Ying，ZHAO Wenbin. Comprehensive performance and microscopic hydration mechanism of phosphogypsum-cement based composite filling material[J]. Mining Research and Development，2024，44(6)：89-94.

[15] 尹升华，闫泽鹏，严荣富，等.全尾砂-废石膏体流变特性及阻力演化[J].工程科学学报，2023，45(1)：9-18.
YIN Shenghua，YAN Zepeng，YAN Rongfu，et al. Rheological properties and resistance evolution of cemented unclassified tailing-waste rock paste backfill[J]. Chinese Journal of Engineering，2023，45(1)：9-18.

[16] 彭亮.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，2023，43(12)：65-69.
PENG Liang. Study on conveying characteristics and conveying parameter optimization of full tailing filling slurry[J]. Mining Research and Development，2023，43(12)：65-69.

[17] 中华人民共和国环境保护部.固体废物浸出毒性浸出方法——水平振荡法：HJ 557—2010[S].2010-02-02.

[18] 国家环境保护总局.固体废物.浸出毒性浸出方法-硫酸硝酸法：HJ/T 299—2007[S].2007-04-13.

[19] 国家环境保护总局，中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.危险废物鉴别标准——浸出毒性鉴别：GB 5085.3—2007[S].2007-04-25.

[20] 姚维信.矿山粗骨料高浓度充填理论研究与应用[D].昆明：昆明理工大学，2011.
YAO Weixin. Study and application of high concentration filling theory of coare aggregate in mine[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2011.

[21] 林琳，王淑萍，李静静，等.基于紧密堆积原理的超高强混凝土配合比设计研究[J].混凝土，2023(3)：120-125.

LIN Lin, WANG Shuping, LI Jingjing, et al. Study on the mixture proportion design method based on particle closely packing theoryfor ultra-high strength concrete theory and its curing regime[J].Concrete,2023(3):120-125.

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].2003-01-10.

[23] 吴爱祥,李红,程海勇.屈服型非牛顿流体流型演化的几何判别[J].中国矿业大学学报,2023,52(1):1-9.
WU Aixiang, LI Hong, CHENG Haiyong. A geometric method for flow pattern identification of yield stress fluids [J]. Journal of China University of Mining &Technology, 2023,52(1):1-9.

[24] 李翠平,黄振华,阮竹恩,等.金属矿膏体流变行为的颗粒细观力学作用机理进展分析[J].工程科学学报,2022,44(8):1293-1305.
LI Cuiping, HUANG Zhenhua, RUAN Zhuen, et al. Analysis of the research progress in the mechanism of particle mechanics action on therheological behavior of paste in metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering,2022,44(8):1293-1305.

[25] 王小林,严庆文,王洪江,等.含粗骨料尾砂膏体长距离管输流变特性及阻力预测[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(3):535-542.
WANG Xiaolin, YAN Qingwen, WANG Hongjiang, et al. Rheological properties and pipe resistance prediction of tailing paste containing coarse aggregate in long-distance transportation [J]. Journal of Harbin Engineering University,2024,45(3):535-542.

[26] 张修香,乔登攀,孙宏生,等.大红山铜矿粗骨料充填料浆的高浓度判定[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2014,39(6):32-39.
ZHANG Xiuxiang, QIAO Dengpan, SUN Hongsheng, et al. High density criterion of filling slurry with coarse aggregates for Dahongshan copper[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2014,39(6):32-39.

[27] 张修香.矿山废石-尾砂高浓度充填料浆的流变特性及多因素影响规律研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.
ZHANG Xiuxiang. Study on rheological characteristics and multi-factor influence of high concentration filling slurry of waste rock and tailings[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2016.

[28] 杨天雨,乔登攀,王俊,等.废石-风砂高浓度料浆管道输送数值模拟及管输阻力新模型[J].中国有色金属学报,2021,31(1):234-244.
YANG Tianyu, QIAO Dengpan, WANG Jun, et al. Numerical simulation and new model of pipeline transportation resistance of waste rock-aeolian sand high concentration slurry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(1):234-244.

[29] 杨晓炳,闫泽鹏,尹升华,等.基于环管试验的粗骨料膏体管输阻力模型及优化[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(5):181-191.
YANG Xiaobing, YAN Zepeng, YIN Shenghua, et al. Transportation pressure model and optimization of coarse aggregate paste backfill based on pipe loop test[J].Journal of Hunan University (Natural Sciences),2022,49(5):181-191.

[30] 汪统科,王林奇,杨鹏,等.分级尾砂充填料浆L管实验及阻力特性研究[J].矿产保护与利用,2024,44(2):32-38.
WANG Tongke, WANG Linke, YANG Peng, et al. Experimental and resistance characterization study of yransparent L-tube for graded tailing backfill slurry[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2024,44(2):32-38.

[31] 廉柏栋,乔登攀,杨天雨,等.基于ANSYS-FLUENT的云南某锡矿尾砂料浆管道输送设计研究[J].有色金属科学与工程,2024,15(3):407-421.
LIAN Baidong, QIAO Dengpan, YANG Tianyu, et al. Research on pipeline transportation design of tailings slurry from a tin minein Yunnan province based on ANSYS-FLUENT[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2024,15(3):407-421.