大冶铁矿全尾砂充填料浆流变参数与输送特性研究*

张增贵[1],李锦想[2],谭玉叶[2,3],张勇[1],陈迪云[1],宋卫东[2,3]

(1.武钢资源集团大冶铁矿有限公司, 湖北 黄石市 435006;
2.北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
3.北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:管道输送是矿山充填系统的关键组成部分,充填料浆流变参数是管道输送设计的依据。以大冶铁矿全尾砂充填料浆为研究对象,通过流变试验及Fluent数值模拟对其流变参数及管道输送特性进行了研究。结果表明:料浆质量浓度在60%~70%时,剪切应力与剪切速率的拟合关系曲线符合H-B模型变化规律;随着料浆质量浓度的增大,其屈服应力和黏度系数均呈指数上升规律,黏度系数在料浆质量浓度达到70%时显著增大;当质量浓度为60%~65%时,料浆流动不稳定,管内压力分布不均匀;当质量浓度为68%~70%之间时,料浆流动状态相对稳定,压力沿管径呈对称分布;管道阻力损失与料浆质量浓度和料浆流量成正相关,当料浆质量浓度达到68%时,阻力损失开始大幅增加;建议将大冶铁矿充填料浆的质量浓度控制在65%~68%之间,考虑到料浆的最大流速均出现在垂直弯管底部(拐点D处),此处应采用耐磨材料。研究结果可为矿山充填系统管道输送参数设计提供理论依据。

关键词:全尾砂;充填料浆;管道输送;流变特性

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)07-0118-09

Study on Rheological Parameters and Transportation Characteristics of Unclassified Tailings Slurry in Daye Iron Mine

ZHANG Zenggui[1], *LI Jinxiang*[2], *TAN Yuye*[2,3], *ZHANG Yong*[1], *CHEN Diyun*[1], *SONG Weidong*[2,3]

(1.Daye Iron Mine of Wuhan Iron and Steel Group Mining Co., Ltd., Huangshi, Hubei 435006, China;
2.School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
3.State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines of Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Pipeline transportation is a crucial component of mine filling systems, and the rheological parameters of the filling slurry are essential for pipeline transport design. Taking the unclassified tailings filling slurry of Daye Iron Mine as the research object, the rheological parameters and pipeline transportation characteristics were studied by rheological test and Fluent numerical simulation. The results indicate that when the slurry mass concentration is between 60% and 70%, the fitted relationship curve between shear stress and shear rate conforms to the change rule of Herschel-Bulkley (H-B) model. With the increase of slurry mass concentration, the yield stress and viscosity coefficient increase exponentially, and the viscosity coefficient increases significantly when the slurry mass concentration reaches 70%. When the mass concentration is 60%-65%, the slurry flow is unstable and the pressure distribution in the pipeline is uneven. When the mass concentration is between 68% and 70%, the slurry flow state is relatively stable, and the pressure is symmetrically distributed along the pipe diameter. The resistance loss of the pipeline is positively correlated with the slurry mass concentration and the slurry flow rate. When the slurry mass concentration reaches 68%, the resistance loss begins to increase significantly. It is suggested that the mass concentration of filling slurry in Daye Iron Mine should be controlled between 65% and 68%. Considering that the maximum flow velocity of slurry appears at the bottom of vertical elbow (inflection point D), where wear-resistant materials should be used. The research results can provide a theoretical basis for the design of pipeline transportation parameters of mine filling system.

Key words: Unclassified tailings, Filling slurry, Pipeline transportation, Rheological property

---

* **收稿日期**:2024-05-10
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2905003);国家自然科学基金面上项目(52274110)
作者简介:张增贵(1988—),男,江西南昌人,工程师,主要从事采矿方面的研究。E-mail:184422135@qq.com
通信作者:谭玉叶(1983—),女,湖南邵阳人,博士,教授,主要从事地下采矿工艺与岩石力学方面的研究。E-mail:tanyuye@ustb.edu.cn

0 引言

采用全尾砂充填采空区可以对矿山废弃物进行有效处理,避免地面坍塌,提高资源的综合利用率。在深部矿产资源开发中,充填体在控制地压和防治冲击地压等方面具有显著作用,这使得充填采矿法成为未来发展的必然趋势[1-4]。

充填料浆输送技术是充填采矿法的核心技术之一,料浆的输送特性关系到充填系统的设计与应用[5-6]。充填料浆管输属于固-液两相流动过程,料浆质量浓度与流量对管内的流动特性起着关键作用。室内试验是研究料浆输送特性的主要手段之一,通过开展料浆的流变特性试验,可以得出料浆的屈服应力和黏度系数等流动特性参数。杨超等[7]对尾砂浆体进行流变试验,分析了固相质量浓度和剪切速率对浆体屈服应力的影响。蔡嗣经等[8]通过试验研究与理论分析,引入 Papanastasiou 黏塑性流体模型来表征尾砂充填料浆的黏度和切应力变化过程。随着计算机技术的发展,流体动力学模拟软件开始广泛应用到流体的流变特性研究中。其中,以 Fluent 软件应用最为广泛,其通过模拟充填料浆在管道内的流动,得到管道内的料浆压力和流速分布规律。陈建宏等[9]采用 Fluent 软件模拟了充填料浆管道输送过程,得到了料浆流速与沿程阻力的关系方程。张修香等[10]对粗骨料高质量浓度充填料浆的管道输送问题进行了数值模拟,研究表明,在满足强度和高浓度的前提下,最佳料浆质量浓度为78%~79%,最佳流速为 90 m^3/h。

本文以大冶铁矿充填料浆为研究对象,通过开展流变特性试验得出料浆的流变参数与质量浓度的关系,并基于现场实际情况建立管道输送模型,采用 Fluent 有限元程序,对充填料浆在管道输送过程中的流动速度分布、压力分布、质量浓度对料浆输送状态的影响进行研究,确定充填料浆输送的要求与条件,从而为大冶铁矿全尾砂胶结充填系统设计提供理论依据。

1 大冶铁矿全尾砂基本特性

1.1 全尾砂物理化学特性

通过开展 XRF 试验以及密度、颗粒分析等基本性质试验,得到大冶铁矿全尾砂的主要化学成分和物理参数,见表 1 和表 2。

表 1 全尾砂主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of unclassified tailings %

CaO	Na_2O	Co_2O_3	SiO_2	TiO_2	ZnO	Fe_2O_3
30.22	1.037	0.040	29.98	0.525	0.028	13.91
P_2O_5	Cr_2O_3	MgO	SrO	Rb_2O	Al_2O_3	MnO
0.432	0.014	10.35	0.189	0.013	8.54	0.142
NiO	SO_3	Cl	K_2O	CuO		
0.008	2.25	0.095	2.15	0.077		

表 2 全尾砂物理性质

Table 2 Physical properties of unclassified tailings

中值粒径/μm	平均粒径/μm	不均匀系数	密度/(g/cm^3)	容重/(t/m^3)	孔隙率/%	比表面积/(cm^2/cm^3)
46.09	45.13	14.53	3.2	1.47	57	6 400

1.2 全尾砂粒级分析

采用激光粒度分析仪测得大冶铁矿全尾砂的粒级组成见表 3,全尾砂料级分布曲线如图 1 所示。

表 3 全尾砂粒级组成

Table 3 Particle size composition of unclassified tailings

粒径/μm	分计含量/%	累计含量/%
<25	34.48	34.48
25~45	14.92	49.40
45~75	13.96	63.36
75~100	8.96	72.32
100~150	11.99	84.31
150~200	7.85	92.16
>200	7.84	100.00

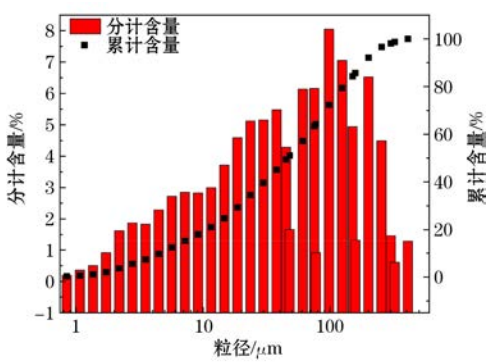


图 1 全尾砂粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of unclassified tailings

通过对全尾砂粒径分布进行统计,可以得到全尾砂主要粒径参数:$d_{10}=4.61$ μm,$d_{30}=19.16$ μm,

$d_{50}=46.09\ \mu m$,$d_{60}=67.00\ \mu m$,$d_{90}=184.89\ \mu m$。其中 d_{10}、d_{30}、d_{50}、d_{60}、d_{90} 分别代表尾砂样品的累计含量达到 10%、30%、50%、60%和 90%时所对应的粒径。

颗粒匀系数 $C_u=14.53$,曲率系数 $C_c=1.19$。根据土力学理论,大冶铁矿全尾砂同时满足了 $C_u\geqslant 5$ 和 $1<C_c<3$ 的要求,级配良好,适合作为充填原材料[11]。

2 全尾砂充填料浆流变特性试验

2.1 试验方案

料浆流变特性试验中的影响因素主要有料浆质量浓度和灰砂比。研究表明,充填料浆质量浓度是影响料浆屈服应力与黏度系数的主要因素,影响显著性分别高达 90%与 70%;而灰砂比对这两个参数值的影响显著性尚不到 10%[12]。可见,料浆质量浓度对料浆流变特性的影响占主要地位。因此,试验主要围绕料浆质量浓度这一关键因素展开。

设计单因素五水平试验方案,控制剪切速率在 120 s 内从 0 上升到 120 s^{-1},测定灰砂比为 1∶4,质量浓度分别为 60%、63%、65%、68%和 70%的料浆在不同剪切速率下剪切应力随时间的变化数据。试验采用 R/S 型四叶桨式旋转流变仪,通过与计算机中的 Rheo3000 软件相连,实现对流变参数的实时监控和输出。

2.2 试验结果分析

2.2.1 剪切应力-剪切速率分析

当料浆悬液质量浓度较高时,尤其是细颗粒物料含量很大的情况下,如全尾砂料浆,其剪切应力随剪切应变率变化呈现非牛顿体的非线性特征[13]。非牛顿体常用 Bingham 模型和 H-B 模型表示,计算公式分别见式(1)和式(2)。

$$\tau=\tau_0+\eta\gamma \tag{1}$$

$$\tau=\tau_0+\eta\gamma^n \tag{2}$$

式中,τ 为剪切应力,Pa;τ_0 为屈服应力,Pa;γ 为剪切速率,s^{-1};η 为黏度系数,Pa·s;n 为流动指数,与流体类型有关。

不同质量浓度下料浆的剪切应力随剪切速率变化的试验结果见表 4 和图 2,将各质量浓度数据采用 Bingham 模型和 H-B 模型进行回归,得到适合的流变模型,并得出不同质量浓度料浆的拟合度曲线和拟合结果,见图 3 和表 5。

表 4 不同剪切速率下的剪切应力

Table 4 Shear stress at different shear rates Pa

剪切速率/s^{-1}	料浆质量浓度				
	60%	63%	65%	68%	70%
10	1.31	3.07	5.20	23.75	64.38
20	1.39	3.14	6.02	25.61	67.61
30	1.61	3.48	7.12	27.38	70.91
40	2.05	3.74	8.61	28.72	73.79
50	2.77	4.80	9.10	30.26	76.16
60	3.86	5.53	10.55	32.08	79.08
70	5.32	7.61	10.46	32.76	81.63
80	7.40	9.12	12.16	35.45	83.77
90	10.17	12.63	14.71	37.49	87.98
100	13.20	15.02	18.13	39.03	89.12
110	17.12	19.66	23.74	41.17	92.10
120	21.60	24.10	26.92	43.24	97.26

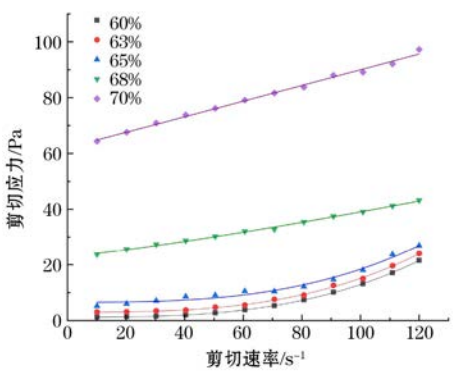


图 2 不同质量浓度料浆的剪切应力-剪切速率关系曲线

Fig.2 Relationship curves between shear stress and shear rate of slurry with different mass concentration

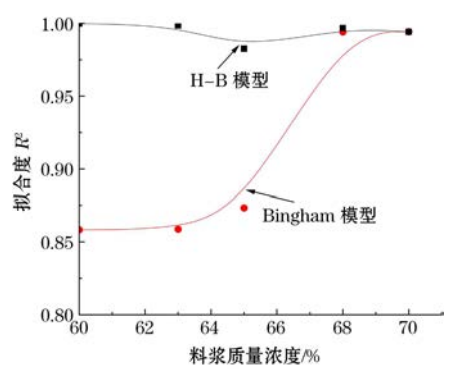


图 3 不同质量浓度料浆的拟合度曲线

Fig.3 Fitting curves of slurry with different mass concentrations

表 5 不同质量浓度料浆的拟合结果

Table 5 Fitting results of slurry with different mass concentrations

质量浓度/%	拟合模型	屈服应力 τ_0/ Pa	黏度系数 η/(Pa·s)	流动指数 n	拟合度 R^2
60	Bingham	−4.10	0.17	—	0.858 4
	H-B	1.30	1.07×10^{-5}	3.02	0.999 8
63	Bingham	−2.51	0.18	—	0.858 8
	H-B	3.08	1.17×10^{-5}	3.01	0.998 6
65	Bingham	1.01	0.18	—	0.873 3
	H-B	6.59	1.39×10^{-5}	2.97	0.982 6
68	Bingham	21.78	0.17	—	0.994 1
	H-B	23.15	0.06	1.20	0.996 7
70	Bingham	61.96	0.28	—	0.993 6
	H-B	62.10	0.27	1.01	0.994 2

从图 2 可以观察到,料浆的剪切应力-剪切速率曲线随着料浆质量浓度的增加逐渐呈现出非线性向线性的变化趋势,当质量浓度接近 70%时,拟合曲线基本上呈现出线性趋势。

通过图 3 和表 5 可以看出,料浆质量浓度在 60%～70%时,H-B 模型拟合度 R^2 值均大于 0.95,且均高于 Bingham 模型。因此,使用 H-B 模型对料浆剪切应力曲线进行拟合最为合理。

2.2.2 屈服应力分析

由上面分析结果可作出屈服应力与料浆质量浓度的拟合曲线,如图 4 所示,其回归方程为:

$$\tau_0 = 2.43\times10^{-13}\times1.61c_w \quad (3)$$

式中,c_w为料浆质量浓度,%。

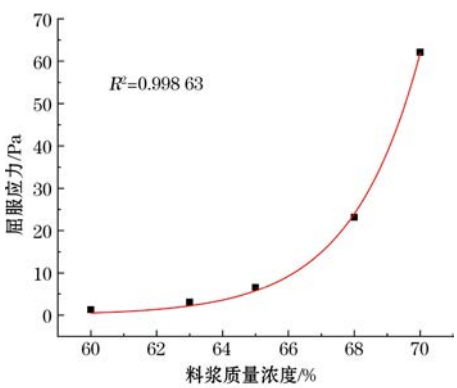


图 4 屈服应力与料浆质量浓度拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of yield stress and slurry mass concentration

由图 4 分析可知,随着料浆质量浓度的增加,充填料浆的屈服应力呈指数上升规律,相邻质量浓度之间屈服应力的差值逐渐增大。这主要是因为随着料浆固相含量的增加,固体颗粒相互吸引形成的絮团开始相互连接,形成松散的絮网结构,从而增强了其抵抗剪切变形的能力,但同时也加剧了絮网结构的剪切破坏程度[14-17]。

2.2.3 黏度系数分析

黏度系数与料浆质量浓度的拟合曲线如图 5 所示,其回归方程为:

$$\eta = 1.61\times10^{-23}\times2.08c_w \quad (4)$$

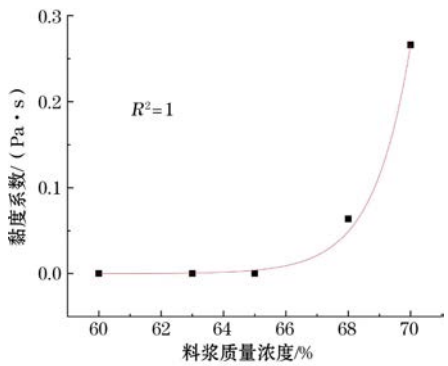


图 5 黏度系数与料浆质量浓度拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of viscosity coefficient and slurry mass concentration

由表 5 可知,料浆质量浓度在 60%～70%时,流动指数 n 均大于 1,为剪切增稠型流体,其黏度系数随剪切速率增大而增大。由图 5 可以看出,随着料浆质量浓度的增加,黏度系数呈指数上升规律。结合表 5 中的数据,当料浆质量浓度为 60%～65%时,黏度系数值均非常小,差异不明显,当质量浓度增大至 68%,黏度系数明显增大,当质量浓度达到 70%时,黏度系数可达到 0.27 Pa·s,料浆黏性显著增大。当料浆黏度系数较大时,输送难度增加。

3 管道输送系统数值模拟研究

3.1 几何模型建立和假设

大冶铁矿充填站标高+169 m,采场标高−180 m,充填倍线为 4.3,管道内径为 121 mm,充填管道线路简图如图 6 所示。使用 Fluent 中前处理软件 Gambit 进行几何模型构建与网格划分,建模时所使用的参数与实际尺寸及布置方式保持一致。模型建好后,壁面弯曲部位采取局部加密的方法划分网格,即拐点处网格间距为 0.02 m,其他部分网格间距则为 0.1 m。制定的边界条件分别为速度入口和自由出流,重力加速度为 9.81 m/s^2。

为方便建模和分析,在进行模拟之前,做出如下假设:充填料浆的黏性不受时间、温度的影响,表现为恒黏性;视料浆为不可压缩的;模拟过程不考虑热交换;不考虑震动、地压波等对管道输送的影响。

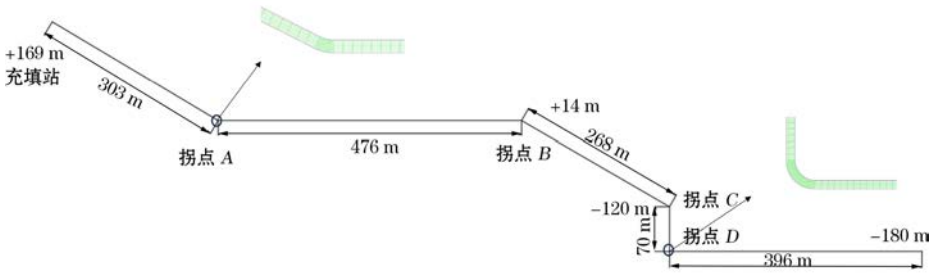


图 6 充填管道线路简图

Fig.6 Route diagram of the filling pipeline

3.2 模拟参数设置

求解过程中不同质量浓度料浆的参数设置见表 6。

表 6 不同质量浓度料浆参数设置

Table 6 Parameters setting of slurry with different mass concentrations

质量浓度/%	密度/(kg/m³)	黏度/(Pa·s)	流量/(m³/h)	入口流速/(m/s)
60	1 693	1.07×10^{-5}	50	1.21
			65	1.57
			80	1.93
63	1 754	1.17×10^{-5}	50	1.21
			65	1.57
			80	1.93
65	1 797	1.39×10^{-5}	50	1.21
			65	1.57
			80	1.93
68	1 865	0.06	50	1.21
			65	1.57
			80	1.93
70	1 914	0.27	50	1.21
			65	1.57
			80	1.93

3.3 料浆质量浓度对管道输送的影响分析

以流量为 50 m³/h 的充填料浆为例,分别对质量浓度为 60%、63%、65%、68%和 70%的情况进行数值模拟,对其在管道输送过程中的速度分布和出入口压力进行分析,分析结果见表 7。

表 7 不同质量浓度料浆在管道中的速度分布

Table 7 Velocity distribution of slurry with different mass concentrations in the pipeline

质量浓度/%	入口速度/(m/s)	最大流速/(m/s)	最大流速位置
60	1.21	1.496 7	拐点 *D*
63	1.21	1.496 4	拐点 *D*
65	1.21	1.495 8	拐点 *D*
68	1.21	1.581 1	拐点 *D*
70	1.21	1.705 9	拐点 *D*

由表 7 可知,在模拟的质量浓度范围内,充填料浆的最大流速均出现在垂直弯管底部(拐点 *D* 位置)。在充填管网的斜管和弯管处,料浆会因为流动方向的突然改变而产生速度激增。料浆流速越大,其对管壁的冲击力越大,从而造成的管壁磨损越严重。当料浆质量浓度在 63%~68%之间时,拐点 *D* 处的最大流速相对较小,此时弯管的磨损也最小。

图 7 至图 11 为 5 种不同质量浓度料浆在管道出口横截面上的动压力和静压力分布。

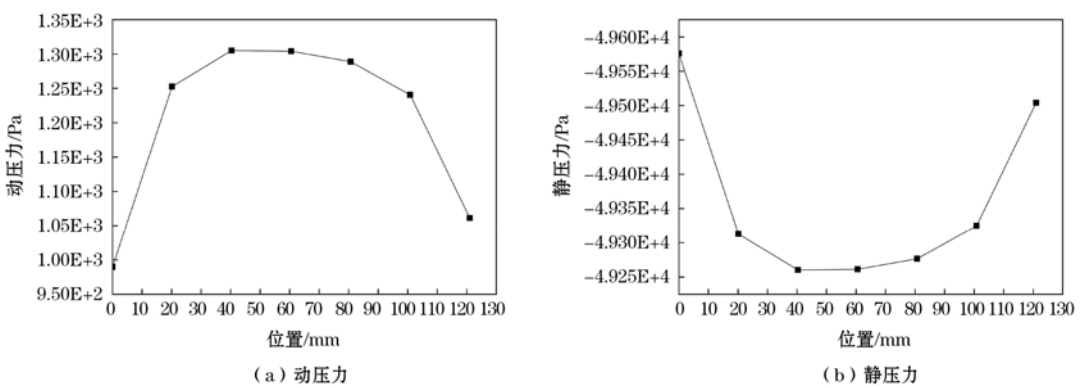


图 7 60%质量浓度料浆的出口动压力和静压力分布

Fig.7 Distribution of dynamic pressure and static pressure of slurry with 60% mass concentration in the outlet

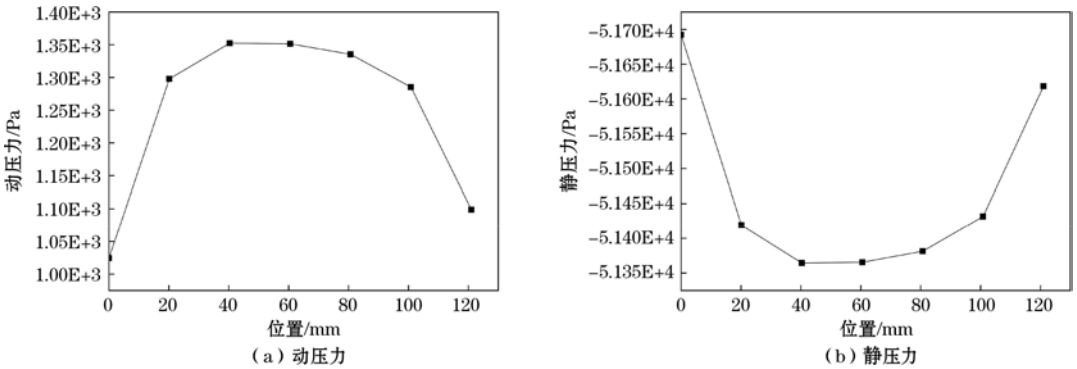


图 8 63%质量浓度料浆的出口动压力和静压力分布

Fig.8 Distribution of dynamic pressure and static pressure of slurry with 63% mass concentration in the outlet

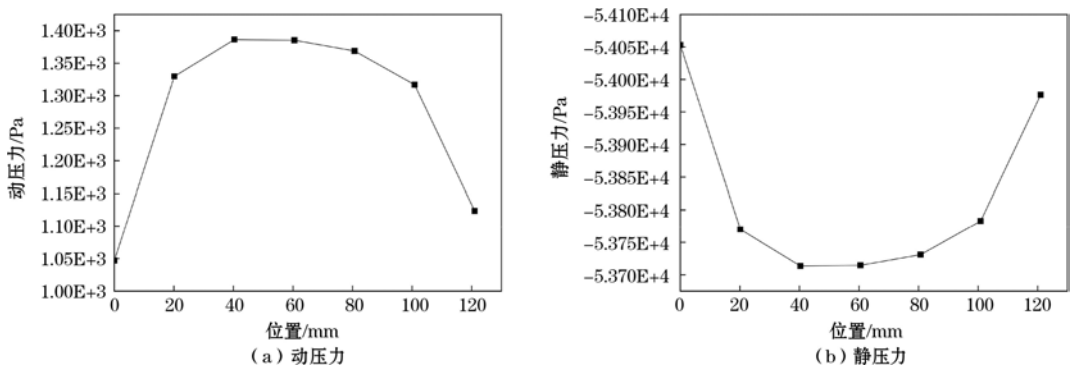


图 9 65%质量浓度料浆的出口动压力和静压力分布

Fig.9 Distribution of dynamic pressure and static pressure of slurry with 65% mass concentration in the outlet

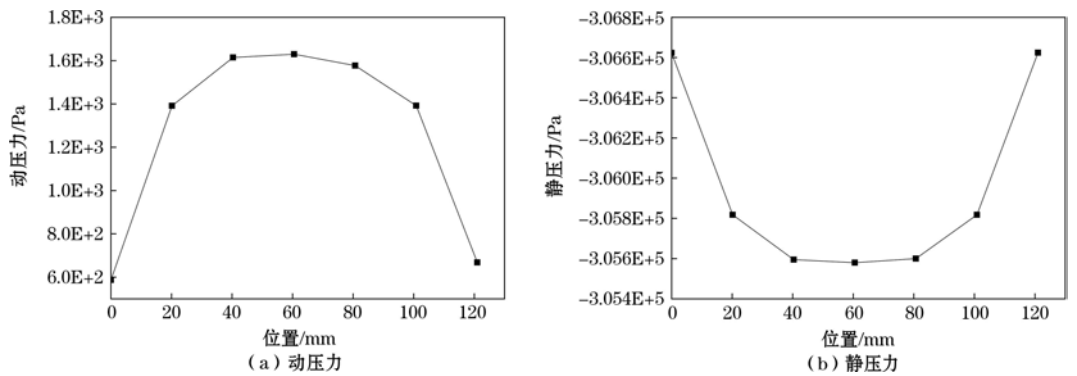


图 10 68%质量浓度料浆的出口动压力和静压力分布

Fig.10 Distribution of dynamic pressure and static pressure of slurry with 68% mass concentration in the outlet

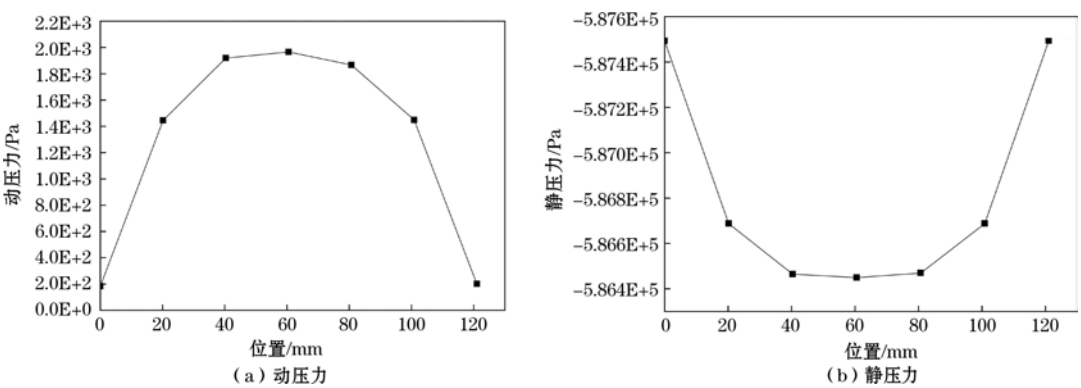


图 11 70%质量浓度料浆的出口动压力和静压力分布

Fig.11 Distribution of dynamic pressure and static pressure of slurry with 70% mass concentration in the outlet

从图中可以看出,在管道输送过程中,管道出口横截面最大动压出现在管道中心处,动压力从管中心向管壁逐渐减小,而静压力则表现出相反的趋势,从中心线向管壁方向逐渐增大。管道内静压力远高于动压力,因此管壁主要承受静压力的作用。从5种不同质量浓度料浆的出口静压力分布图还可以看出,当料浆质量浓度为60%～65%时,管道横截面上的静压力呈不对称分布,这表明料浆在管道中的流动状态并不稳定;当料浆质量浓度为68%时,静压力开始呈对称分布,料浆流动状态相对稳定。

将图中数据输出,得到不同质量浓度料浆的入口和出口压力,见表8和图12。

表8 不同质量浓度料浆入口和出口压力

Table 8 Inlet and outlet pressure of slurry with different mass concentrations

质量浓度/%	静压力/kPa		静压力差/kPa	动压力/kPa		动压力差/kPa
	入口	出口		入口	出口	
60	2.799	−50.565	53.364	1.239	1.241	−0.002
63	2.918	−52.716	55.634	1.284	1.286	−0.002
65	3.050	−55.099	58.149	1.315	1.317	−0.002
68	17.214	−307.208	324.422	1.364	1.388	−0.024
70	34.018	−587.493	621.511	1.397	1.486	−0.089

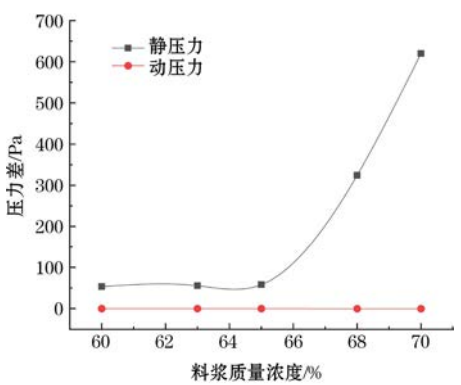


图12 不同质量浓度料浆入口和出口压力差

Fig.12 Pressure difference between inlet and outlet of slurry with different mass concentrations

由表8和图12可知,随着料浆质量浓度的增加,充填管道入口和出口的压力差逐渐增大,其中静压力差变化最为显著,动压力差变化很小,且静压力差涨幅远大于动压力差。因此,在计算全压差时可忽略动压力差,只参考静压力差的变化情况。

由伯努利方程可知,当管道入口和出口之间的压力差增加时,管道内部的阻力损失也会随之增加[17]。当料浆质量浓度达到68%时,入口和出口压力差值开始大幅增加,管道沿程阻力损失也相应大幅增加。据此,现场充填时应将料浆质量浓度控制在68%以下。

综合上述流速和压力分析结果,建议大冶铁矿充填料浆质量浓度控制在65%～68%之间较为合理。

3.4 料浆流量对管道输送的影响分析

以料浆质量浓度为68%的全尾砂充填胶结料浆为例,对不同流量(即不同入口速度)条件下管道自流输送的速度和压力进行分析。分别选取50 m^3/h、65 m^3/h和80 m^3/h等3个料浆流量值进行模拟,得到的模拟结果见表9。

表9 不同流量充填料浆在管道中的速度分布

Table 9 Velocity distribution of slurry with different flow rates in pipeline

流量/(m^3/h)	入口速度/(m/s)	最大流速/(m/s)	最大流速位置
50	1.21	1.581	拐点 D
65	1.57	2.028	拐点 D
80	1.93	2.470	拐点 D

由表9可知,随着充填料浆流量的增加,入口速度相应增大,管道中的最大流速也随之增加,最大流速的位置依然是拐点 D。不同流量料浆的入口和出口压力见表10。

表10 不同流量料浆的入口和出口压力

Table 10 Inlet and outlet pressures of slurry with different flow rates

流量/(m^3/h)	静压力/kPa		静压力差/kPa	静压力/kPa		动压力差/kPa
	入口	出口		入口	出口	
50	17.214	−307.208	324.422	1.364	1.388	−0.024
65	26.634	−475.640	502.274	2.297	2.330	−0.033
80	37.789	−674.910	712.699	3.471	3.515	−0.044

由表10可知,随着管道内充填料浆流量的增加,管道入口和出口的压力差逐渐增大,阻力损失也逐渐增加,充填料浆流量越大,阻力损失越大。

4 工程应用

大冶铁矿从西至东分为6个矿段,其中铁门坎、龙洞和尖林山为地下开采,象鼻山、狮子山和尖山最初为露天开采。现今,狮子山和尖山在−168 m标高以上东露天采场区域的矿体已改为地下开采。大冶铁矿入选首批“国家矿山公园”,其中深凹露天矿的高陡边坡作为公园的重要组成部分,需防止大面

积滑坡和破坏。东露天矿段转为地下开采后,－96 m 水平以上至露天坑底(标高－48 m)的矿体采用崩落法回采。崩落法将产生的废石运至坑底进行回填,既有效回收资源,又保护边坡。但随着开采深度的增加,继续使用崩落法会显著增大上下盘的移动范围,增加陡坡破坏的风险。为保护矿区公园的露天边坡,防治滑坡等地质灾害,－108～－180 m 的矿体采用阶段嗣后充填采矿法。

基于上述研究结果,对大冶铁矿尖林山矿段－180 m 水平阶段内的 302 号矿房进行了阶段嗣后充填采矿法的工业试验。为了防止料浆质量浓度过高而发生堵管,保证现场输送效果,试验时料浆质量浓度选择在 65%～68%之间,流量为 50 m^3/h。矿山采用阶段嗣后充填采矿法进行回采,1 a 内－108 m 分段累积充填量为 7 000 m^3,采出矿石量约21.72 万 t。

5 结论

(1) 通过料浆流变特性试验得出,料浆质量浓度在 60%～70%时,料浆流变特性拟合曲线变化规律符合 H-B 模型,试验得到的流变参数可用于管道输送阻力的模拟计算。

(2) 随着料浆质量浓度的增加,料浆的屈服应力和黏度系数均呈指数上升规律,其中,黏度系数在料浆质量浓度达到 70%时显著增大。

(3) 通过对不同质量浓度料浆入口、出口压力差的分析可知,当质量浓度为 60%～65%时,料浆流动不稳定,管内压力分布不均匀;当质量浓度为 68%～70%时,料浆流动状态相对稳定,压力沿管径呈对称分布;当浓度达到 68%时,压力差开始大幅增长,管道内的阻力损失大幅增加。

(4) 综上所述,建议将大冶铁矿充填料浆的质量浓度控制在 65%～68%之间,考虑到料浆的最大流速均出现在垂直弯管底部(拐点 D 处),此处应采用耐磨材料制作。

参考文献(References):

[1] 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 tailings filling slurry[J].Mining Research and Development,2023,43(12):65-69.

[2] 周爱民.矿山废料胶结充填[M].北京:冶金工业出版社,2010.
ZHOU Aimin. Mine waste cementation and filling[M]. Beijing:Metallurgical Industry Press,2010.

[3] AUBERTIN M, BUSSIERE B. Meeting environmental challenges for mine waste management[J]. Geotechnical News,2001,19(3):21-26.

[4] 翟永刚,吴爱祥,王洪江,等.全尾砂膏体充填临界质量分数[J].北京科技大学学报,2011,33(7):795-799.
ZHAI Yonggang, WU Aixiang, WANG Hongjiang, et al. Threshold mass fraction of unclassified-tailings paste for backfill mining[J]. Chinese Journal of Engineering,2014,37(7):795-799.

[5] 杨晓炳,吴凡,杨志强,等.粗骨料高质量分数充填料浆管输水力坡度模型及其应用[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(11):2851-2858.
YANG Xiaobing, WU Fan, YANG Zhiqiang, et al. Pipeline hydraulic gradient model and its application for coarse aggregate filling with high mass fraction of slurry[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2019,50(11):2851-2858.

[6] 李公成,王洪江,吴爱祥,等.基于倾斜管实验的膏体自流输送规律[J].中国有色金属学报,2014,24(12):3162-3169.
LI Gongcheng, WANG Hongjiang, WU Aixiang, et al. Gravity transport law of paste based on inclined pipe experiment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2014,24(12):3162-3169.

[7] 杨超,郭利杰,张林,等.铜尾矿流变特性与管道输送阻力计算[J].工程科学学报,2017,39(5):663-668.
YANG Chao, GUO Lijie, ZHANG Lin, et al. Study of the rheological characteristics of copper tailings and calculation of resistance in pipeline transportation[J]. Chinese Journal of Engineering,2017,39(5):663-668.

[8] 蔡嗣经,黄刚,吴迪,等.尾砂充填料浆流变性能模型与实验研究.[J].东北大学学报(自然科学版),2015,36(6):882-886.
CAI Sijing, HUANG Gang, WU Di, et al. Experimental and modeling study on rheological properties of tailings backfill[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2015,36(6):882-886.

[9] 陈建宏,陈峤曦,张钦礼,等.基于 Fluent 的充填料浆管道输送阻力模拟.[J].科技导报,2014,32(1):53-58.
CHEN Jianhong, CHEN Qiaoxi, ZHANG Qinli, et al. Computer simulation of filling slurry pipeline transportation using fluent[J]. Science & Technology Review,2014,32(1):53-58.

[10] 张修香,乔登攀.粗骨料高浓度充填料浆的管道输送模拟及实验[J].中国有色金属学报,2015,25(1):258-266.
ZHANG Xiuxiang, QIAO Dengpan. Simulation and experiment of pipeline transportation of high density filling slurry with coarse aggregates[J] The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2015,25(1):258-266.

[11] 张磊,乔登攀,程纬华,等.金川粗骨料级配与强度分析[J].矿冶,2012,21(3):12-20.

ZHANG Lei, QIAO Dengpan, CHENG Weihua, et al. Analysis on gradation and intensity of coarse aggregate on JNMC[J]. Mining And Metallurgical Engineering,2012,21(3):12-20.

[12] 龚正国.充填料管道水力输送特性的数值分析与研究[D].长沙:中南大学,2008.
GONG Zhengguo. Numerical analysis and research on hydraulic transport characteristics of filling pipe [D]. Changsha:Central South University,2008.

[13] DAVID A M, ALASTAIR D S. The effects of a highly viscous liquid phase on vertically upward two-phase flow in a pipe[J]. International Journal of Multiphase Flow,2003,29:1523-1538.

[14] 张力冉,王栋民,潘佳,等.新拌水泥浆体絮凝结构与流变行为及有效体积分数的关系[J].硅酸盐学报,2014,42(9):1209-1218.
ZHANG Liran, WANG Dongmin, PAN Jia, et al. Relationship between flocculent structure and rheological behavior/effective volume fraction of fresh cement paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(9): 1209-1218.

[15] 黄玉诚,孙恒虎.尾砂作骨料的似膏体料浆流变特性实验研究[J].金属矿山,2003(6):8-10.
HUANG Yucheng, SUN Henghu. Experimental study on the rheological characteristic of paste-like slurry with tailings as aggregate[J]. Metal Mine,2003(6):8-10.

[16] 吴爱祥,刘晓辉,王洪江,等.考虑时变性的全尾膏体管输阻力计算[J].中国矿业大学学报,2013,42(5):736-740.
WU Aixiang, LIU Xiaohui, WANG Hongjiang, et al. Calculation of resistance in total tailings paste piping transportation based on time-varying behavior[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(5): 736-740.

[17] 吴迪,蔡嗣经,杨威,等.基于CFD的充填管道固-液两相流输送模拟及实验[J].中国有色金属学报,2012,22(7):2134-2140.
WU Di, CAI Sijing, YANG Wei, et al. Simulation and experiment of backfilling pipeline transportation of solid-liquid two-phase flow based on CFD [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2012,22(7):2134-2140.