高浓度尾砂料浆管道输送性能优化研究*

赵江涛[1],赖伟[2,3],祝鑫[2,3],杨鑫[2,3],彭亮[2,3],石勇[2,3],周晃[2,3]

(1.平顶山工业职业技术学院, 河南 平顶山市 467001;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012)

摘要:尾砂料浆管道输送是矿山高效排尾的关键。为探究矿山尾砂料浆在管道输送过程中的流动阻力变化规律,通过正交试验分析了流速、输送管径、料浆质量浓度等多因素及其交互作用对于尾砂料浆输送流动阻力的影响,并对尾砂料浆管道输送参数进行了优化。结果表明:(1) 建立的沿程阻力回归模型 F 值为 4 660.66,P 值<0.000 1,拟合值 R^2 为 0.997,表明模型可靠性高,模型能够准确表征不同工况下料浆输送沿程阻力的变化;(2) 沿程阻力损失对料浆流速变化较为敏感,当流速较低时(1~2 m/s),沿程阻力损失变化曲线斜率较小,当流速大于 2 m/s 时,沿程阻力损失变化曲线更为陡峭,阻力急剧增加;(3) 多因素交互作用影响程度由大到小依次为尾砂料浆流速和质量浓度交互作用、尾砂料浆流速和输送管径交互作用、料浆质量浓度和输送管径交互作用;(4) 优化后的管道输送参数为:料浆输送质量浓度为 56%,料浆输送速度为 1.6 m/s,输送管径为 127 mm,预测沿程阻力为 0.242 kPa/m,而试验实测沿程阻力为 0.233 kPa/m,误差仅为 3.7%,处于可控范围内,表明预测模型的准确性较高,且该工况下沿程阻力较小,满足长距离输送的要求。试验结果可为矿山高质量浓度尾砂料浆高效管道输送设计提供参考。

关键词:尾砂料浆;管道输送;流动阻力;环管试验;交互作用

中图分类号:TD853.34 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)09-0036-07

Research on Optimization of Pipeline Transportation Performance for High Mass Concentration Tailings Slurry

ZHAO Jiangtao[1], *LAI Wei*[2,3], *ZHU Xin*[2,3], *YANG Xin*[2,3], *PENG Liang*[2,3], *SHI Yong*[2,3], *ZHOU Huang*[2,3]

(1.Pingdingshan Polytechnic College, Pingdingshan, Henan 467001, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Pipeline transportation of tailings slurry is the key to efficient tailings discharge in mines. In order to explore the variation law of flow resistance of mine tailings slurry during pipeline transportation, the influence of multiple factors such as flow velocity, transportation pipe diameter, slurry mass concentration and their interaction on the flow resistance of tailings slurry transportation was analyzed by orthogonal test, and the pipeline transportation parameters of tailings slurry were optimized. The results are as follows. Firstly, the F value of the established regression model is 4 660.66, the P value is less than 0.000 1, and the fitting value R^2 is 0.997, indicating that the model has high reliability. The model can accurately characterize the change of the resistance along the slurry transportation under different working conditions. Secondly, when the flow rate is low (1-2 m/s), the slope of the curve of the resistance loss along the way is small. When the flow rate is greater than 2 m/s, the curve of the resistance loss along the way is steeper, the resistance is greater, and it increases sharply. Thirdly, the influence degree of multi-factor interaction from large to small is the interaction of tailings slurry flow rate and mass concentration, the interaction of tailings slurry flow rate and transportation pipe diameter, and the interaction of slurry mass concentration and transportation pipe diameter. Fourthly, the optimized pipeline transportation parameters are as follows:

* **收稿日期**:2025-02-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904003,2023YFC2907203);湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目(2022GK4057);湖南省自然资源厅科技项目(2022-40)

作者简介:赵江涛(1986—),男,河南漯河人,硕士,讲师,主要从事矿山安全、电气自动化技术专业的教学工作。E-mail:99280985@qq.com

通信作者:赖伟(1985—),男,四川德阳人,博士,正高级工程师,主要从事金属矿山开采及充填系统技术研究。E-mail:915673059@qq.com

the mass concentration of slurry transportation is 56%, the slurry transportation speed is 1.6 m/s, the transportation pipe diameter is 127 mm, and the predicted resistance along the way is 0.242 kPa/m. The measured resistance along the way in the test is 0.233 kPa/m, and the error is only 3.7%, which is within the controllable range. It shows that the accuracy of the prediction model is high, and the resistance along the way is small under this working condition, which meets the requirements of long-distance transportation. The test results provide a reference for the efficient pipeline transportation design of high mass concentration tailings slurry in mines.

Key words: Tailings slurry, Pipeline transportation, Flow resistance, Loop test, Interaction

0 引言

矿山排尾采用管道进行输送,通常情况下,选厂直排尾砂料浆质量浓度较低,导致尾砂输送效率较低,回水流程长,增加了排尾泵送系统的投资[1-2]。为了提高排尾效率,许多矿山采用高效浓密机进行一段浓密,以提高尾砂料浆质量浓度。虽然尾砂输送效率因此提升,但料浆质量浓度的增加也使得管道输送阻力大幅提高[3-5]。因此,合理的料浆质量浓度是平衡尾砂输送效率和降低阻力的关键[6-7]。

针对尾砂料浆输送质量浓度和料浆管道输送特性的研究,已有众多学者开展了大量工作[8-9]。杨鑫等[10]基于四川某矿山尾砂料浆物化性质、沉降特性以及流变性能,通过不同输送质量浓度和管径的全尾砂料浆环管输送试验,确定了其管道输送的适宜质量浓度和输送参数,并给出了推荐管道流速和管道内径。杨晓炳等[11]以某矿山粗骨料为研究对象,通过粗骨料充填料浆管道输送性能的环管试验,建立了粗骨料充填料浆阻力方程,揭示了多因素对阻力损失的影响规律,并优化了管道输送参数。周海龙[12]采用数值模拟方法研究了输送管道磨损和冲蚀的主要因素,发现料浆入料速度、输送管道直径以及输送质量浓度对输送均匀性和管道阻力的影响规律,指出管径影响指数最大,而料浆质量浓度影响指数最小。张修香等[13]以某铜矿废石及全尾砂为研究对象,分析了质量浓度和灰砂比对充填料浆流变特性和输送特性的影响规律。钟明旭等[14]通过不同质量浓度和输送速度下的环管试验,研究了某铝土矿尾砂与赤泥的管道输送特性,提出了适宜的料浆输送质量浓度和输送流量。邵亚平等[15]针对新疆某铜矿粗骨料充填材料,开展了不同质量浓度、流量及灰砂比条件下的环管输送试验,分析了粗骨料充填料浆的输送阻力特性,最终确定了最佳输送参数。

上述研究成果丰富了矿山尾砂料浆输送及管道阻力特性的研究体系,但现有研究多集中于多因素对管道阻力的综合影响,尚未系统性分析单因素及多因素耦合交互作用对管道输送阻力特性的影响程度。由于矿山尾砂自身性质及选矿工艺差异存在显著不同,本文以某矿山尾砂为研究对象,通过开展流速、管径、料浆质量浓度等多因素工况下的正交环管试验,研究单因素及多因素交互作用对尾砂料浆输送流动阻力的影响规律,以期为矿山料浆输送质量浓度与管道系统设计提供参考。

1 试验材料

试验材料为四川某矿山选厂提供的全尾砂。通过室内试验,测定了该全尾砂的基本物理化学性质,具体测定结果见表1。

表1 全尾砂基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of full tailings

密度/(g/cm³)	松散容重/(g/cm³)	密实容重/(g/cm³)	松散孔隙率/%	密实孔隙率/%
3.09	1.77	1.94	42.7	37.2

尾砂粒度对料浆输送性能具有显著影响。采用筛分法对尾砂进行分级,结果表明:大于2.5 mm的尾砂颗粒占比为1.2%,1.25~2.5 mm的尾砂颗粒占比为9.4%,0.63~1.25 mm尾砂颗粒占比为4.1%,小于0.63 mm的尾砂颗粒占比为85.30%。针对占比最大的细粒级部分(小于0.63 mm),采用激光粒度分布仪进行粒度测定,测定结果如图1所示。

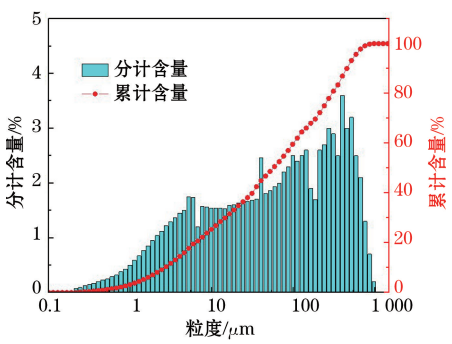


图1 粒度分布

Fig.1 Particle size distribution

根据尾砂粒度分级结果,计算得到特征粒径 $d_{10}=3.13\ \mu m$,$d_{50}=110.47\ \mu m$,$d_{90}=1\ 270\ \mu m$,曲率系数 $C_c=0.85$,不均匀系数 $C_u=59$。较大的不均匀系数表明该尾砂粒径分布较广,而较小的曲率系数则反映出其在某些粒径区间存在组成缺失。总体来说,该尾砂整体粒径较粗,但粒径级配较好。同时,$-20\ \mu m$ 细颗粒占比约 30%,满足结构流输送所必需的细颗粒含量要求,有助于实现料浆的稳定输送。

采用光谱分析法对尾砂的化学成分进行了分析,结果见表 2。由化学成分组成可以看出,尾砂主要成分为 Si、Mg、Fe、Al、Ti、Na、K 等元素,不含有毒有害成分,适宜用于井下采空区充填。

表 2 全尾砂主要化学成分测定结果

Table 2 Determination results of main chemical components of whole tailings %

SiO_2	MgO	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	TiO_2	Na_2O	K_2O	P_2O_5	SO_3
42.2	15.1	12.9	11.8	8.8	4.4	0.8	0.5	0.5	0.3

2 试验方法及设计

2.1 试验装置

环管试验在专用环管试验系统上完成[10],该系统主要由料浆制备系统、泵送系统、数据监测系统、排水系统等部分组成。

(1) 料浆制备系统。该系统主要包括 1 600 mm×1 500 mm 搅拌槽、上料平台、物料提升机、出料阀门、供料板车及数台不同量程电子秤等。搅拌槽作为制浆系统的核心,其性能直接决定着充填料浆的质量。为保证搅拌质量并制备高质量浓度的结构流料浆,搅拌槽配备功率为 18.5 kW 的电机,驱动搅拌叶片以 250 r/min 的转速运行。

(2) 泵送系统。该系统设备包括混凝土渣浆泵,其进出口管径分别为 100 mm 和 150 mm;系统采用内径为 100 mm、140 mm、180 mm 的普通无缝钢管,总长 66 m。管道配置包括水平 90°弯管 8 个、竖直向上 90°弯管 2 个、水平直管 52.35 m、45°向下斜管 0.11 m、竖直向上直管 3 m 以及竖直向下 90°弯管 1 个。混凝土渣浆泵的理论最大泵送压力为 0.5 MPa,流量可调范围为 30～300 m^3/h。

(3) 数据监测系统。该系统包括压力变送器、数据采集卡、流量计等。压力变送器共配置 4 台(量程 0.8 MPa,精度 0.5%),用于测定管道内预设位置的压力值。数据采集卡采用 USB3202 型号,接收来自压力变送器及电磁流量计的输入信号,这些信号以 0～5 V 电压形式传输至数据采集卡,经打包后发送至后端处理软件,用于绘制相应的信号曲线。

2.2 试验方法

全尾砂料浆试验按不同水砂比对应的质量浓度分批进行。首先开展最高质量浓度的环管试验,待数据采集完后,添加定量的水量,即可调整不同料浆质量浓度。

试验开始时,先开展清水试验,用于检测管道及阀门的密封性及流量调节的可靠性。清水试验完成后,按比例称取尾砂和水倒入搅拌槽内,浸泡一定时间后,启动搅拌槽,充分搅拌 30 min。搅拌均匀后启动渣浆泵,通过调节频率控制泵送流量,使料浆在管道内连续循环运转。通过系统调节质量浓度与流量,并在不同管径管道中进行试验,同步记录各项试验数据。

2.3 试验设计

基于响应面分析方法,开展不同料浆流速(1 m/s、2 m/s、3 m/s)、管道内径(125 mm、140 mm、180 mm)以及质量浓度(48%、54%、60%)条件下的尾砂料浆输送试验,测定各工况下尾砂料浆的沿程阻力变化,具体试验方案见表 3。

表 3 试验方案

Table 3 Test schemes

序号	流速/(m/s)	质量浓度/%	管径/mm
1	1	54	180
2	2	54	140
3	3	48	140
4	1	60	140
5	3	60	140
6	3	54	125
7	2	48	125
8	1	48	140
9	2	60	180
10	3	54	180
11	2	54	140
12	1	54	125
13	2	48	180
14	2	54	140
15	2	60	125
16	2	54	140
17	2	54	140

3 结果与分析

根据表 3 的响应面试验设计,开展了对应的室内环管试验,试验结果见表 4。

表 4　试验结果

Table 4　Test results

序号	流速/(m/s)	质量浓度/%	管径/mm	沿程阻力/(kPa/m)
1	1	54	180	0.153
2	2	54	140	0.349
3	3	48	140	0.799
4	1	60	140	0.194
5	3	60	140	0.901
6	3	54	125	0.897
7	2	48	125	0.340
8	1	48	140	0.163
9	2	60	180	0.347
10	3	54	180	0.802
11	2	54	140	0.349
12	1	54	125	0.188
13	2	48	180	0.301
14	2	54	140	0.349
15	2	60	125	0.409
16	2	54	140	0.349
17	2	54	140	0.349

3.1　试验模型及方差

建立了不同质量浓度、料浆流速及管径条件下料浆输送沿程阻力 G 的回归方程，其中 X、Y、Z 分别代表流速、质量浓度、管径：

$$G=0.349+0.338X+0.031Y-0.029Z+0.018XY-0.015XZ-0.006YZ+0.163X^2+0.002Y^2-0.002Z^2$$

根据响应面分析方法，沿程阻力的方差分析结果见表 5。

表 5　模型方差分析结果

Table 5　Results of model analysis of variance

来源	平方和	均方	F 值	P 值	备注
模型	1.040 0	0.115 7	4 660.66	＜0.000 1	显著
X	0.911 9	0.911 9	36 739.43	＜0.000 1	
Y	0.007 7	0.007 7	309.73	＜0.000 1	
Z	0.006 7	0.006 7	268.72	＜0.000 1	
XY	0.001 3	0.001 3	50.77	0.000 2	
XZ	0.000 9	0.000 9	36.26	0.000 5	
YZ	0.000 1	0.000 1	5.33	0.054 3	
X^2	0.111 9	0.111 9	4 506.97	＜0.000 1	
Y^2	0.000 0	0.000 0	0.858 8	0.384 9	
Z^2	0.000 0	0.000 0	0.678 5	0.437 3	
残差	0.000 0	0.000 0	—	—	

由表 5 可知，沿程阻力回归模型的 F 值为 4 660.66，P 值小于 0.000 1，表明该模型显著度高，同时，模型的拟合值 R^2 为 0.997，表明该模型可靠性高。因此，所建立的沿程阻力回归模型能够准确表征不同流量、料浆流速及管径条件下料浆输送沿程阻力的变化规律。

3.2　单因素影响分析

根据室内试验结果，绘制了不同料浆流速、质量浓度及管径条件下尾砂料浆输送沿程阻力的变化情况，如图 2 所示。

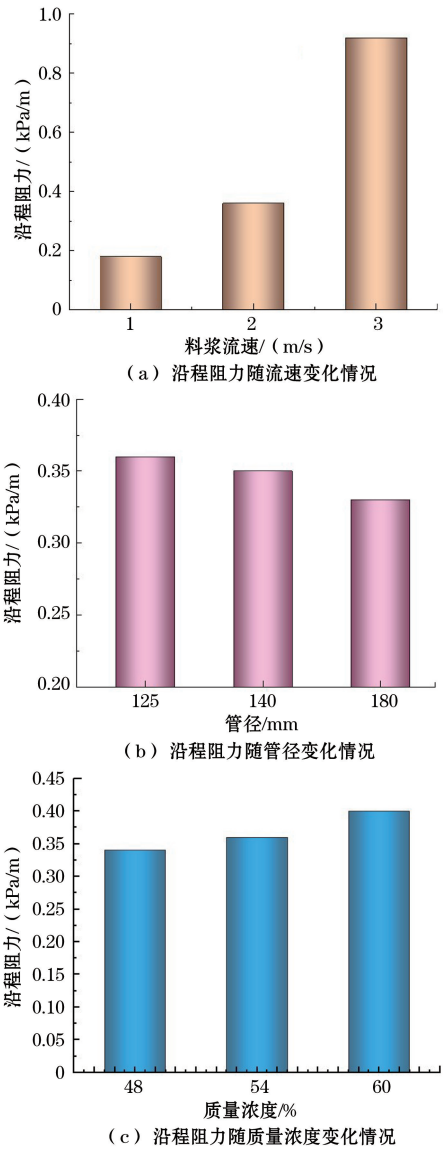


图 2　单因素作用下沿程阻力变化情况

Fig.2　Change of resistance along the way under single factor

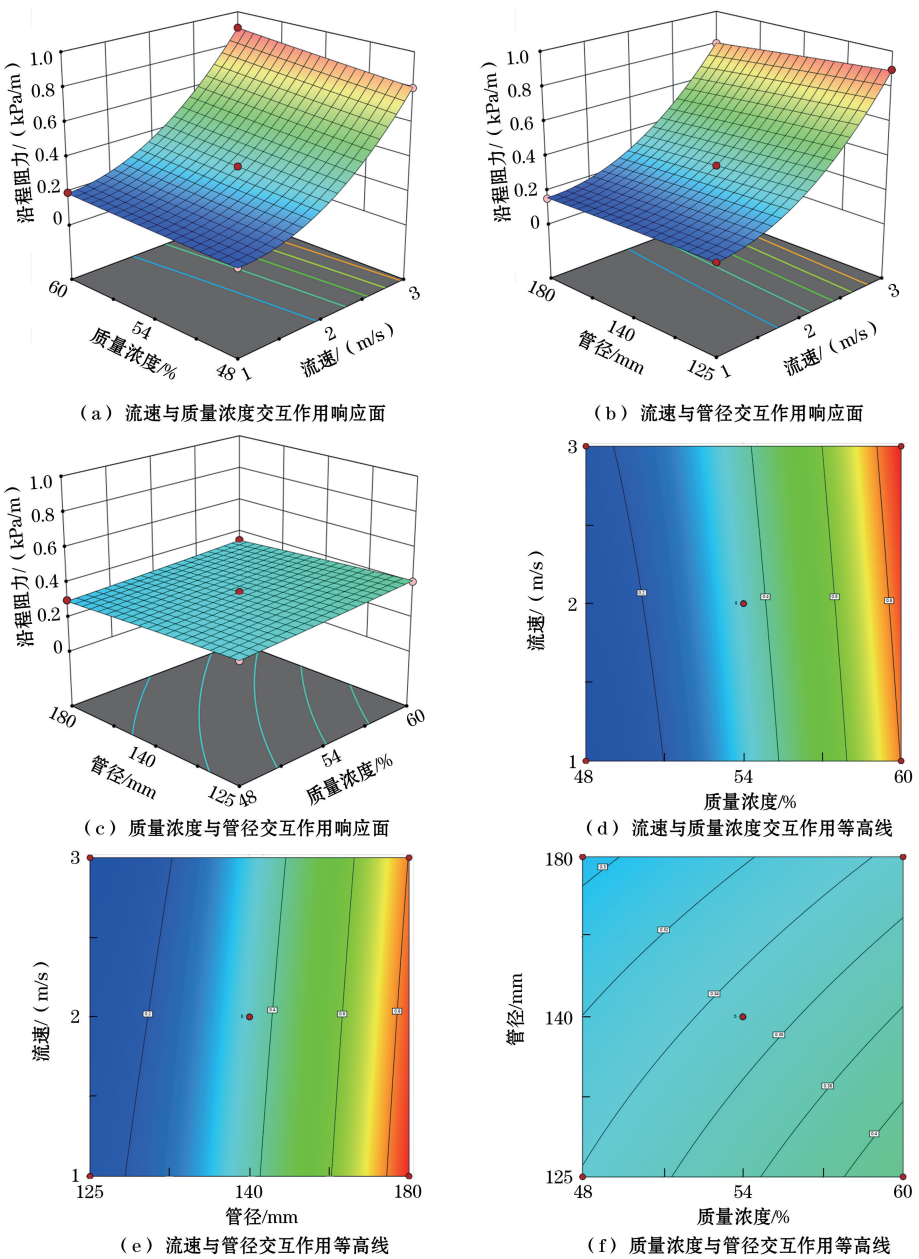
由图 2 可以看出，随着流速和质量浓度的提高，尾砂料浆沿程阻力不断增加，其中质量浓度的影响相对较小，增加幅度较为平缓；而料浆流速影响较大，增加幅度较大。相反，随着管径增大，料浆沿程阻力逐渐下降，但降幅较小。这一变化规律与各因素对应的模型 F 值（流速：36 739.43，质量浓度：309.73，管径：268.72）所反映的影响程度一致。出现这种现象的原因主要包括两方面：一方面，可能是

流速提高加剧了尾砂颗粒之间及颗粒与管壁之间的摩擦,导致阻力损失加大;另一方面,环管系统中弯头较多,转弯半径小,高速流动的料浆在转弯处对管壁冲击较大,损失较多的能量。因此沿程阻力损失对料浆流速变化较为敏感。具体表现为:当流速较低时(1～2 m/s),沿程阻力损失增长较为缓慢;当流速大于 2 m/s 后,沿程阻力损失急剧增加,曲线斜率显著增大。

在相同管径条件下,随着料浆质量浓度的增加,沿程阻力损失总体呈递增趋势。然而,低质量浓度料浆在低流速状态下流动阻力并非最小。其原因在于低质量浓度尾砂料浆在充填管道中呈现显著的两相流特征,料浆易发生分层离析,致使在低速转态下离析出的水层滑动更快,从而引起较大的阻力损失。相比之下,高质量浓度料浆在流速低于临界流速时能够紧贴管壁流动,因未克服料浆的屈服应力而做功较少,因此,阻力损失相对较小。

3.3 多因素耦合作用影响分析

根据响应面分析方法及室内试验结果,绘制了不同尾砂料浆流速、料浆质量浓度及输送管径交互耦合作用下对尾砂料浆输送阻力的响应面曲线,如图 3 所示。



(a) 流速与质量浓度交互作用响应面

(b) 流速与管径交互作用响应面

(c) 质量浓度与管径交互作用响应面

(d) 流速与质量浓度交互作用等高线

(e) 流速与管径交互作用等高线

(f) 质量浓度与管径交互作用等高线

图 3 不同因素交互作用下沿程阻力变化

Fig.3 The change of resistance along the way under the interaction of different factors

判断不同因素间耦合交互作用的影响程度,可综合考虑响应面的曲率、等高线的密度与形状,以及方差分析中各因素的 F 值、P 值大小。

由图 3 可以看出,尾砂料浆流速与质量浓度耦合交互作用的响应面曲率最大,坡度最陡,且对应的等高线最为密集,表明该交互作用对尾砂料浆沿程阻力影响最大。这一结论可与表 5 中方差分析结果相互印证:流速与质量浓度交互相的 F 值为 50.77(最大),P 值为 0.000 2(最小)。以上结果表明,在尾砂料浆输送管径一定时,调节尾砂料浆流速和质量浓度会显著影响尾砂料浆输送阻力。随着充填料浆质量浓度和尾砂料浆流速的提高,阻力整体呈上升趋势。由尾砂料浆流速和质量浓度交互作用响应面可以看出,响应面最高点位于边界,即说明尾砂料浆流速和质量浓度达到最大值时,尾砂料浆沿程阻力亦达到最大。

料浆质量浓度和输送管径耦合交互作用响应面曲线最为平整,近似平面状,其对应的等高线也最为稀疏,表明该交互作用对于尾砂料浆输送阻力影响最小。该结论可与表 5 方差分析结果相互验证:质量浓度与管径交互项的 F 值为 5.33(最小),P 值为 0.054 3(最大)。从该曲面的分布特征可以看出,最高点位于响应面边界,即当质量浓度最大且输送管径最小时,尾砂料浆沿程阻力最大。

综合来看,各耦合交互作用对尾砂料浆沿程阻力的影响程度由大到小依次为尾砂料浆流速与质量浓度的交互作用、尾砂料浆流速与输送管径的交互作用、料浆质量浓度与输送管径的交互作用。

4 管道输送参数优化

四川某铁矿尾砂输送量大,输送管道距离长约 15 km。根据浆体长距离输送工程设计标准的要求,为保障输送管道内不产生颗粒淤积,实现安全、经济、高效运行,需结合基础试验与半工业环管试验结果确定管道输送的关键设计参数。因此,基于环管试验结果,本文对该矿管道输送的关键参数进行了优化设计。

长距离管道输送的核心参数主要包括尾砂料浆输送质量浓度、输送流量、输送管径以及料浆的沿程阻力等。过大的沿程阻力会导致尾砂输送泵选型要求高、造价上升,同时增加输送能耗与运营维护成本。管道输送参数优化的目标是在提高尾砂料浆输送质量浓度与输送效率的同时,控制沿程阻力处于较低水平,以减少管道冲击磨损并降低运行维护需求。针对该铁矿的具体输送要求,需满足以下条件:尾砂料浆输送质量浓度≥50%,输送速度≥1.5 m/s,输送管径≥120 mm,且尾砂料浆输送的沿程阻力须控制在 0.4 kPa/m 以内。基于上述约束,建立了如下的数学模型。

$$G=0.349+0.338X+0.031Y-0.029Z+0.018XY-0.015XZ-0.006YZ+0.163X^2+0.002Y^2-0.002Z^2$$

$$X\geqslant 1.5,Y\geqslant 50\%,Z\geqslant 120,G\leqslant 0.4$$

将该模型导入 Design-Expert 软件中 Optimization 模块中,利用 Numerical 进行优化求解,得到最优管道输送参数:料浆输送质量浓度为 56%,输送速度为 1.6 m/s,输送管径为 127 mm,此时预测管道输送沿程阻力为 0.242 kPa/m。根据优化结果开展试验验证,实测管道输送沿程阻力为 0.233 kPa/m,试验值与预测值误差为 3.7%,处于可控范围内。该结果验证了预测模型的准确性,同时表明输送料浆的沿程阻力较小,满足长距离输送的要求。

5 结论

通过开展四川某铁矿环管试验,得到以下主要结论。

(1) 建立的沿程阻力回归模型 F 值为 4 660.66,P 值<0.000 1,拟合值 R^2 为 0.997,表明模型可靠性高,能够准确表征不同流量、不同料浆流速及不同管径条件下料浆输送沿程阻力的变化规律。

(2) 沿程阻力损失对料浆流速变化较为敏感:当流速较低时(1~2 m/s),沿程阻力损失变化曲线斜率较小,当流速大于 2 m/s 时,沿程阻力损失变化曲线趋于陡峭,阻力急剧增加。

(3) 多因素交互作用的影响程度由大到小依次为:尾砂料浆流速与质量浓度交互作用、尾砂料浆流速与输送管径交互作用、料浆质量浓度与输送管径交互作用。

(4) 研究得到最优管道输送参数:料浆输送质量浓度为 56%,料浆输送速度为 1.6 m/s,输送管径为 127 mm,此时管道输送沿程阻力预测值为 0.242 kPa/m。经试验验证,实测管道输送沿程阻力为 0.233 kPa/m,试验值与预测值误差为 3.7%,处于可控范围内,验证了预测模型的准确性,且该工况下输送料浆的沿程阻力较小,满足长距离输送的要求。

试验结果可为矿山高质量浓度尾砂料浆高效管

道输送设计提供参考。

参考文献(References):

[1] 廉柏栋,乔登攀,杨天雨,等.基于颗粒级配的尾砂料浆管输模式判据与输砂效率计算模型研究[J].有色金属(矿山部分),2024,76(5):47-57+67.
LIAN Baidong, QIAO Dengpan, YANG Tianyu, et al. Study on the criterion of tailing slurry pipeline transportation mode and the calculation model of sand transportation efficiency based on particle grading[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(5):47-57+67.

[2] 丁维波,王丹影,程磊,等.含残留 APAM 全尾砂料浆管输过程粗颗粒尾砂垂向分布特征[J].洁净煤技术,2024,30(增刊1):650-658.
DING Weibo, WANG Danying, CHENG Lei, et al. Vertical distribution characteristics of coarse tailings in pipeline transportation of unclassified tailings mortar with residual APAM[J]. Clean Coal Technology,2024,30(Suppl. 1):650-658.

[3] 刘勋,欧任泽,邹山康,等.某铜矿充填料浆 L 型管道自流输送研究[J].采矿技术,2024,24(1):194-198.
LIU Xun, OU Renze, ZOU Shankang, et al. Study on L-type pipeline gravity transportation of filling slurry in a copper mine[J]. Mining Technology,2024,24(1):194-198.

[4] 陈剑,李聪,王俊,等.大屯锡矿尾砂膏体环管管输数值模拟研究[J].有色金属(矿山部分),2024,76(2):26-34+44.
CHEN Jian, LI Cong, WANG Jun, et al. Numerical simulation study on the pipeline transportation of tailings paste in Datun tin mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2024,76(2):26-34+44.

[5] 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 mine in Yunnan Province based on ANSYS-FLUENT[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2024,15(3):407-421.

[6] 万串串,许文远,史采星,等.高浓度全尾砂浆大垂高长距离管道输送阻力计算与工程实践[J].中国矿业,2023,32(10):153-158.
WAN Chuanchuan, XU Wenyuan, SHI Caixing, et al. Resistance calculation and engineering practice of high concentration unclassified tailings slurry transportation in long distance pipeline with large vertical height[J]. China Mining Magazine,2023,32(10):153-158.

[7] 刘伟涛,王莹莹,王国立.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,2023,43(9):12-16.
LIU Weitao, WANG Yingying, WANG Guoli. Study on resistance characteristics of paste pipeline transportation based on small-scale loop pipe test[J]. Mining Research and Development,2023,43(9):12-16.

[8] 陈琴瑞,朱学胜.某矿山尾矿浆体输送经济浓度分析[J].中国矿山工程,2020,49(6):71-73+82.
CHEN Qinrui, ZHU Xuesheng. Economic concentration analysis of tailings slurry transportation of a mine[J]. China Mine Engineering,2020,49(6):71-73+82.

[9] 黄保平.高压浓密机在梅山尾矿浓缩中的应用[J].矿冶工程,2013,33(2):48-51.
HUANG Baoping. Application of high pressure thickener in Meishan mineral processing plant for tailings thickening[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2013,33(2):48-51.

[10] 杨鑫,郑伯坤,邓高岭,等.基于环管试验的尾矿水力输送性能研究[J].矿业研究与开发,2023,43(1):26-31.
YANG Xin, ZHENG Bokun, DENG Gaoling, et al. Study on hydraulic transportation properties of tailings based on loop pipe test[J]. Mining Research and Development,2023,43(1):26-31.

[11] 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.

[12] 周海龙.多因素综合作用的充填料浆管输阻力与冲蚀磨损规律研究[D].长沙:中南大学,2023.
ZHOU Hailong. Study on the pattern of resistance loss and erosionwear in slurry pipeline transport caused by the combined effects of multiple factors[D]. Changsha: Central South University,2023.

[13] 张修香,乔登攀,李广涛,等.基于 RSM 和 CFD 的废石-尾砂充填料浆流变及输送特性研究[J].东华理工大学学报(自然科学版),2023,46(1):30-39.
ZHANG Xiuxiang, QIAO Dengpan, LI Guangtao, et al. Study on rheological and transport properties of filling slurry with waste rock-tailing based on RSM and CFD[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2023,46(1):30-39.

[14] 钟明旭,方臣,曾建红.某铝土矿尾矿管道输送试验研究[J].矿冶工程,2021,41(4):38-40+43.
ZHONG Mingxu, FANG Chen, ZENG Jianhong. Experimental study on pipeline transportation of bauxite tailings[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2021,41(4):38-40+43.

[15] 邵亚平,郭利杰,陈寅,等.基于环管试验确定粗骨料膏体充填料浆管道输送参数[J].有色金属(矿山部分),2018,70(4):20-23.
SHAO Yaping, GUO Lijie, CHEN Yin, et al. Determination of conveying parameters of coarse aggregate paste filling slurry pipeline based on annular tube test[J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2018,70(4):20-23.