超细尾砂料浆管道输送阻力影响因素研究及寻优分析①

王丽红[1], 姚银佩[2]
(1.长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012; 2.中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 为了合理选择超细尾砂料浆管道输送参数,通过理论分析对管道输送阻力影响因素进行分类,采用响应曲面法研究不同因素对超细尾砂料浆管道输送阻力损失的影响,得到各因素的影响显著程度,并进行了工程验证。结果表明,影响超细尾砂料浆管道输送阻力的内因敏感度为:料浆浓度>料浆温度>灰砂比,交互作用影响敏感度为:料浆浓度与料浆温度>料浆浓度与灰砂比>灰砂比与料浆温度;外因敏感度为:管径>入口流速>充填倍线,交互作用影响敏感度为:管径与入口流速>管径与充填倍线>入口流速与充填倍线。因素寻优结果显示,外因固定时,矿山适宜的料浆性质组合参数为:料浆浓度 63.5%,灰砂比 1∶6,料浆温度 51.5 ℃;内因固定时,适宜的输送设计参数组合为:管径 270 mm,入口流速 1.63 m/s,充填倍线 5。经检验,内因与外因影响下的计算偏离置信区间最大误差分别为 10.82%、3.41%。

关键词: 超细尾砂; 充填料浆; 因素分类; 响应曲面法; 管道输送; 输送阻力; 阻力损失; 工程验证
中图分类号: TD853 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.008
文章编号: 0253-6099(2025)06-0047-08

Influencing Factors and Optimization Analysis of Resistance in Pipeline Transportation of Ultra-fine Tailings Slurry

WANG Lihong[1], YAO Yinpei[2]
(1.*Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd.*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*; 2.*School of Resources and Safety Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: To rationally select parameters for pipeline transportation of ultra-fine tailings slurry, the influencing factors of pipeline resistance in transportation were classified based on theoretical analysis. Effects of different factors on resistance loss in ultra-fine tailings slurry pipeline were investigated by adopting response surface methodology (RSM), and the significance of each factor was obtained, for which engineering verification test was performed then. The results show that those three internal influencing factors, such as slurry concentration, slurry temperature and cement-sand ratio, are in descending order of sensitivity, and the interactions among them, including interaction between concentration and temperature of slurry, interaction between slurry concentration and cement-sand ratio, interaction between cement-sand ratio and slurry temperature, are also in descending order of sensitivity; while the external factors, such as pipe diameter, flow rate and stowing gradient, and their interaction, including interaction between pipe diameter and inlet flow rate, interaction between pipe diameter and stowing gradient, interaction between inlet flow rate and stowing gradient, are also in descending order of sensitivity. The factor optimization results indicate that with fixed external factors, the optimal combination of slurry properties are as follows: slurry concentration of 63.5%, cement-sand ratio of 1∶6, and slurry temperature of 51.5 ℃; while with fixed internal factors, the optimal combination of transportation parameters are as follows: pipe diameter of 270 mm, inlet flow rate of 1.63 m/s, and stowing gradient of 5. Based on verification test, it is found that the maximum calculation deviations of the confidence interval under the influences of internal and external factors are 10.82% and 3.41%, respectively.

Key words: ultra-fine tailings; filling slurry; factor classification; response surface methodology; pipeline transportation; transportation resistance; resistance loss; engineering verification

① **收稿日期**: 2025-07-04
基金项目: 2023 年度湖南省自然科学基金项目区域联合基金项目(2023JJ50356)
作者简介: 王丽红(1988—),女,四川眉山人,硕士,工程师,主要从事矿山充填理论与应用研究以及矿业期刊出版工作。E-mail:312092778@qq.com

充填采矿法能够极大程度控制地压、缓解地表塌陷及尾矿库堆存问题,在矿山得到了广泛的应用[1-3]。近年来,选矿工艺提升导致尾砂粒度极细[4]。一般将 $d_{80} \leqslant 20\ \mu m$ 的尾砂定义为超细尾砂[5]。超细尾砂粒度极细,在管道输送过程中会增大阻力损失,易诱发管道输送安全、稳定性等问题。

学者们针对超细尾砂料浆输送特性开展了试验研究,文献[6]提出了超细尾砂料浆流动时的新型流变模型。近几年,环境因素逐渐被考虑到超细尾砂料浆的流动过程中。文献[7]考虑了料浆温度变化对超细尾砂料浆流态演化的影响,提出了新的综合雷诺数模型;文献[8]分析了温度对料浆触变行为的影响;文献[9]认为在高温状态下超细尾砂膏体流变特性会发生显著变化。另外,研究人员通过添加复合激发剂[10]、纤维材料[11]、冶金渣[12]等新型材料,改善超细尾砂料浆流动性能、固化特性,并提高充填体的抗压强度,为超细尾砂材料的运用提供了更多途径。

尽管现有研究已针对超细尾砂料浆管道输送阻力开展了多方面分析,但多数成果集中于单一或少数因素的独立影响,鲜有对影响因素进行系统性分类,并且缺乏对多因素间交互作用及其相对显著性排序,导致实际充填工程优化时难以统筹把握主次关系。响应曲面法常用于分析多因素交互作用的试验研究,广泛应用于充填料浆絮凝沉降优化[13]、最佳配比分析[14]、流变参数预测[15]以及阻力损失寻优[16]等方面。为此,本文在理论分析基础上,将超细尾砂料浆管道输送影响因素划分为料浆属性参数(内因)与管道输送设计参数(外因)两类,运用响应曲面法,构建阻力损失预测模型,重点阐述各因素及其交互作用对阻力的影响敏感度顺序,从而厘清各因素对管道输送阻力的影响程度。最后,结合矿山实际工况开展多目标参数寻优,并从经济性与可操作性角度提出工程建议,为超细尾砂料浆管道输送设计提供依据。

1 超细尾砂料浆管道输送阻力影响因素

1.1 影响因素分类

本文将超细尾砂料浆管道输送阻力的影响因素划分为内因和外因两类,如图 1 所示。

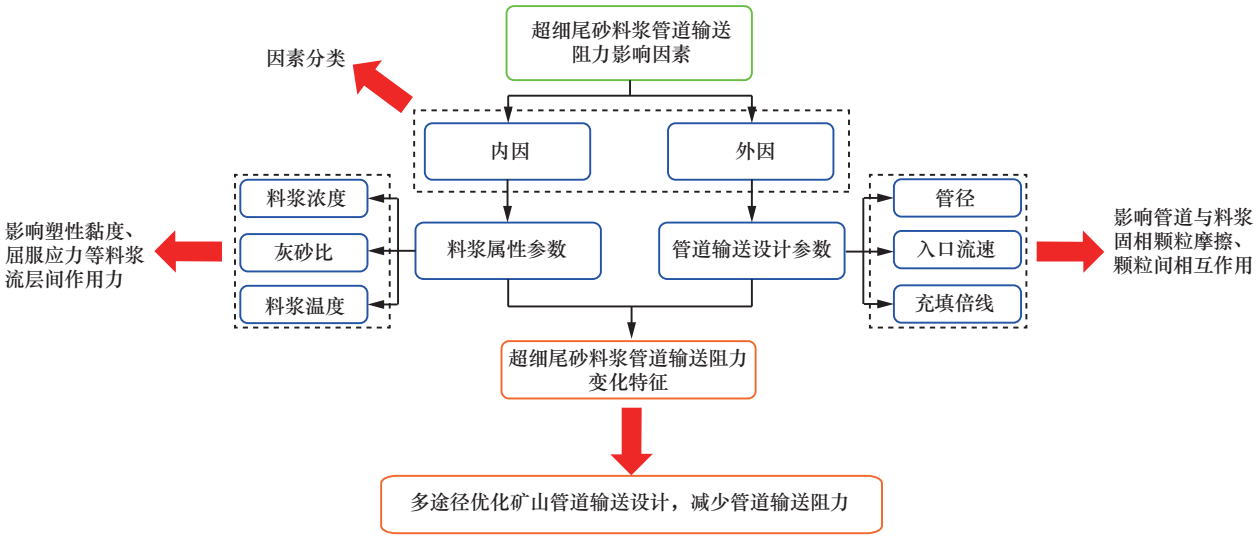


图 1 管道输送阻力影响因素分类

Fig. 1 Classification of influencing factors of pipeline resistance in transportation

1.2 响应曲面试验

1.2.1 试验变量

以不同料浆浓度(质量分数)、灰砂比与料浆温度制备超细尾砂充填料浆,利用赛默飞 HAKKES 旋转流变仪开展料浆流变性测试,通过水浴加热使料浆保持至目标温度,对获取的流变曲线进行拟合后得出塑性黏度与屈服应力,为后续数值模拟提供数据支撑。利用 Minitab 软件设计由料浆浓度、灰砂比及料浆温度组成的三因素三水平响应曲面试验,添加 6 个中心点以便分析因素间的交互作用,确定试验误差,依据矿山充填设计经验,确定试验因素的各个水平如表 1 所示,响应曲面试验结果如表 2~3 所示。

1.2.2 管道输送阻力回归模型

通过 Box-Cox 变换方法,求解变换参数 λ 的 95% 置信区间,得出响应变量的变换值,寻求响应变量管道输送阻力与试验因素间的最优关系。估计的变换参数

表 1　试验因素及因素水平

Table 1　Experimental factors and factor levels

类别	试验因素	因素水平		
		1	2	3
内因	料浆浓度/%	61	63	65
	灰砂比	1∶10	1∶8	1∶6
	料浆温度/℃	30	40	50
外因	管径/mm	180	250	320
	入口流速/(m·s^{-1})	1.4	1.8	2.2
	充填倍线	3	5	7

表 2　内因影响下响应曲面结果

Table 2　RSM under influences of internal factors

试验组别	料浆浓度/%	灰砂比	料浆温度/℃	阻力损失/kPa
1	61	1∶10	30	60.046
2	65	1∶10	30	60.068
3	61	1∶6	30	52.357
4	65	1∶6	30	82.832
5	61	1∶10	50	73.182
6	65	1∶10	50	46.154
7	61	1∶6	50	58.073
8	65	1∶6	50	56.643
9	61	1∶8	40	69.012
10	65	1∶8	40	55.222
11	63	1∶10	40	52.087
12	63	1∶6	40	40.782
13	63	1∶8	30	47.868
14	63	1∶8	50	52.905
15	63	1∶8	40	47.379
16	63	1∶8	40	41.596
17	63	1∶8	40	45.578
18	63	1∶8	40	47.486
19	63	1∶8	40	48.776
20	63	1∶8	40	47.689

λ 分别为 0.486 62,−0.074 115,取绝对值后四舍五入为 0.5,0,对响应变量进行变化,得出各因素与管道输送阻力回归模型:

$$i' = 918 - 2\,897c - 365C + 1.37T + 2\,299c^2 - 122C^2 + 0.001\,55T^2 + 655cC - 2.304cT - 0.378CT \quad (R^2 = 0.987\,8) \quad (1)$$

$$\ln i = 6.041 - 0.008\,51D - 0.914v - 0.041\,5N + 0.000\,015D^2 + 0.38v^2 + 0.003\,25N^2 - 0.001\,089Dv + 0.000\,184DN - 0.001\,6vN \quad (R^2 = 0.975\,3) \quad (2)$$

式中:i' 为变换后的料浆流动阻力损失,kPa;c 为料浆浓度,%;C 为料浆灰砂比;T 为料浆温度,℃;v 为料浆管道输送入口流速,m/s;N 为料浆管道输送充填倍线;i 为料浆流动阻力损失,Pa;D 为料浆输送管径,mm。

表 3　外因影响下响应曲面结果

Table 3　RSM under influences of external factors

试验组别	管径/mm	入口流速/(m·s^{-1})	充填倍线	阻力损失/kPa
1	180	1.4	3	60.517
2	320	1.4	3	52.731
3	180	2.2	3	80.441
4	320	2.2	3	56.715
5	180	1.4	7	70.701
6	320	1.4	7	59.758
7	180	2.2	7	54.092
8	320	2.2	7	49.498
9	180	1.8	5	58.608
10	320	1.8	5	69.320
11	250	1.4	5	52.176
12	250	2.2	5	57.061
13	250	1.8	3	86.940
14	250	1.8	7	58.629
15	250	1.8	5	54.293
16	250	1.8	5	53.448
17	250	1.8	5	56.541
18	250	1.8	5	65.761
19	250	1.8	5	64.260
20	250	1.8	5	62.030

2　试验结果与分析

采用方差分析中 F 值及 P 值(概率值)进行因素相关性研究。在方差分析中,P 值与 F 值共同构成结果相关性判别的核心依据。F 值量化了组间差异与组内随机波动的比值,其大小直接反映了与因变量之间的关联强度,P 值则提供了该 F 值在“各组均值无差异”这一原假设成立前提下的极端概率。具体判别标准为:当 P 值低于预先设定的显著性水平(通常为 0.05)时,说明所取得的结果数据或更极端结果在原假设(即因素间无相关性)成立的条件下发生概率较低,因此有足够的证据拒绝原假设,认为因素间存在关联。同样,当 F 值大于 1 时,说明组间变异显著大于组内变异,有充分理由拒绝零假设,认为至少有 2 组均值存在显著差异,即因素呈高显著性。

2.1　内因方差分析

结合 F 值及 P 值分析方法,得出影响超细尾砂料浆管道输送阻力损失变化特征的内因方差,见表 4。由表 4 可知,回归模型 P=0.002,P< 0.05,表明显著程度高。各单因素的 F 值均远大于 1 且 P 值均小于 0.05,表明料浆浓度、灰砂比、料浆温度对阻力损失显著性强,且具有统计学意义。在因子平方项中,灰砂比平方项、料浆温度平方项 F 值小于 1 且 P 值大于0.05,说明不具备显著性和统计学意义,而料浆浓度平方项 F 值远大于 1 且 P 值小于 0.05,说明具有显著性和统计学意义。在交互项中,仅有灰砂比和料浆温度交互

作用不显著且不具备统计学意义。依据单因素 F 值，可得到内因对超细尾砂料浆阻力损失的影响顺序为：料浆浓度>料浆温度>灰砂比。

表 4 响应曲面试验内因方差

Table 4 Variance analysis of internal factors in test with RSM

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
回归模型	9	7.951 82	0.883 54	7.95	0.002	强
料浆浓度(A)	1	2.319 09	2.319 09	20.88	0.001	强
灰砂比(B)	1	0.993 67	0.993 67	8.94	0.014	强
料浆温度(C)	1	1.255 76	1.255 76	11.30	0.007	强
A^2	1	2.326 48	2.326 48	20.94	0.001	强
B^2	1	0.050 87	0.050 87	0.46	0.514	—
C^2	1	0.065 79	0.065 79	0.59	0.459	—
AB	1	1.528 52	1.528 52	13.76	0.004	强
AC	1	1.698 85	1.698 85	15.29	0.003	强
BC	1	0.133 48	0.133 48	1.20	0.299	—

2.2 外因方差分析

基于响应曲面结果，获取外因影响下的超细尾砂料浆阻力损失响应曲面试验方差，见表 5。由表 5 可知，回归模型、单因素项的 P 值均小于 10^{-4}，F 值远大于 1，表明显著性极强。在因子平方项中，管径、入口流速平方项的P值均小于0.05，表明其具有显著性及

表 5 响应曲面试验外因方差

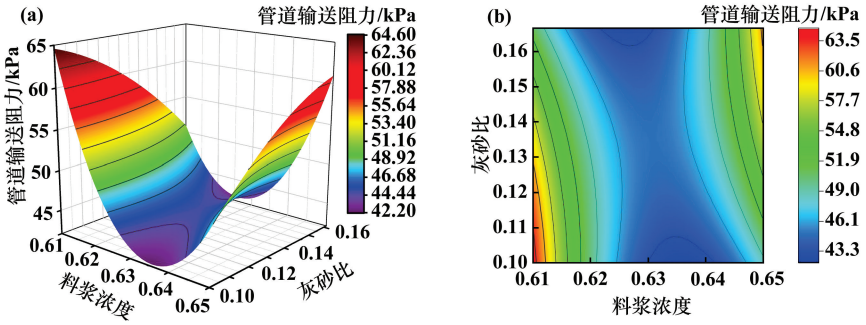
Table 5 Variance analysis of external factors in test with RSM

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
回归模型	9	0.378 403	0.042 045	45.23	$<10^{-4}$	极强
管径(D)	1	0.186 257	0.186 257	200.36	$<10^{-4}$	极强
入口流速(E)	1	0.048 095	0.048 095	51.74	$<10^{-4}$	极强
充填倍线(F)	1	0.046 464	0.046 464	49.98	$<10^{-4}$	极强
D^2	1	0.015 281	0.015 281	16.44	0.002	强
E^2	1	0.010 162	0.010 162	10.93	0.008	强
F^2	1	0.000 465	0.000 465	0.50	0.495	—
DE	1	0.007 441	0.007 441	8.00	0.018	强
DF	1	0.005 281	0.005 281	5.68	0.038	强
EF	1	0.000 013	0.000 013	0.01	0.909	—

统计学意义；而充填倍线平方项的 P 值为 0.495，F 值小于 1，说明该项不具备显著性和统计学意义。交互项中仅有入口流速与充填倍线交互项 P 值为 0.909，且 F 值较低，不具备显著性和统计学意义。基于单因素 F 值可知，影响超细尾砂料浆管道输送阻力的外因排序为：管径>入口流速>充填倍线。

2.3 内因交互作用分析

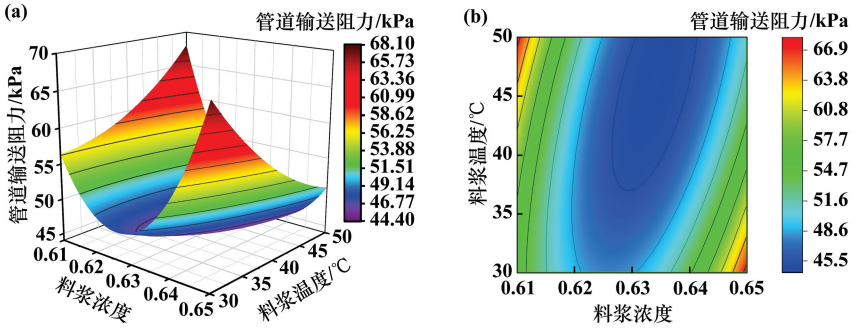
基于响应曲面试验结果，绘制引起管道输送阻力改变的内因交互作用 3D 曲面图及等值线图，如图 2~4 所示。



(a) 3D 曲面图；(b) 等值线图

图 2 料浆浓度和灰砂比对阻力损失的交互作用

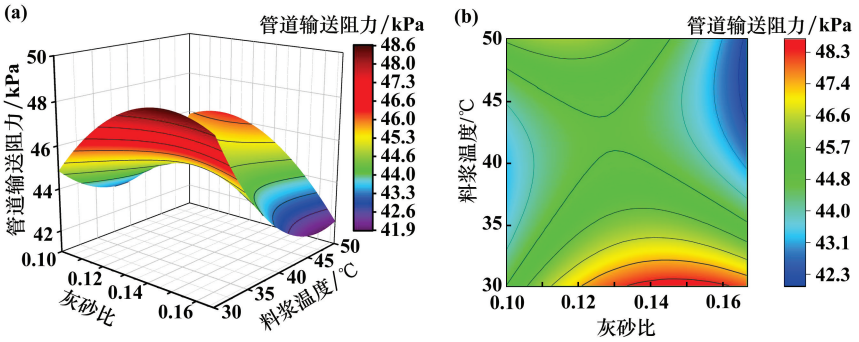
Fig. 2 Interaction of slurry concentration and cement-sand ratio on resistance loss



(a) 3D 曲面图；(b) 等值线图

图 3 料浆浓度和料浆温度对阻力损失的交互作用

Fig. 3 Interaction of mass concentration and slurry temperature with resistance loss



（a）3D 曲面图；（b）等值线图

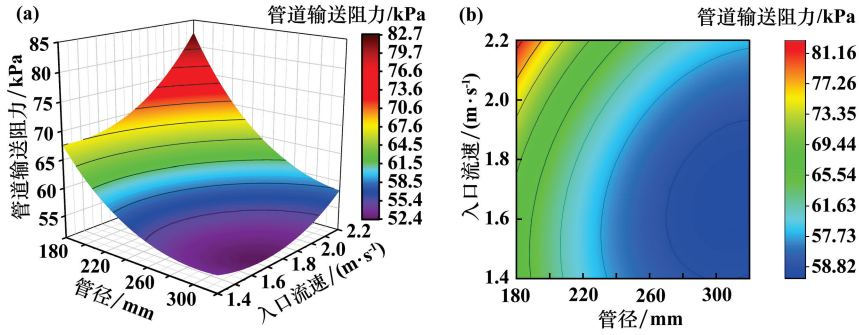
图 4　灰砂比和料浆温度对阻力损失的交互作用

Fig. 4　Interaction of cement-sand ratio and slurry temperature on resistance loss

由图 2~4 可知，料浆浓度与灰砂比、料浆浓度与料浆温度的等值线坡度明显高于灰砂比与料浆温度的等值线坡度，结合表 4 可知，前两者显著性远大于后者。由图 2~3 可知，当灰砂比和料浆温度为固定值时，超细尾砂料浆管道输送阻力随料浆浓度增加呈现先减小后增大的趋势，这与常规粒径尾砂料浆表现出差异性。由图 4 可知，灰砂比固定时，阻力损失随料浆温度升高呈现先减小后增大的趋势，表明在 40~60 ℃间存在使管道输送阻力达到最小的料浆温度。料浆温度固定时，管道输送阻力随灰砂比增加呈现先增大后减小的趋势，说明在某一灰砂比下，管道输送阻力将达到最大。以上结果表明，影响超细尾砂料浆管道输送阻力的内因交互项显著性顺序为：料浆浓度与料浆温度>料浆浓度与灰砂比>灰砂比与料浆温度。

2.4　外因交互作用分析

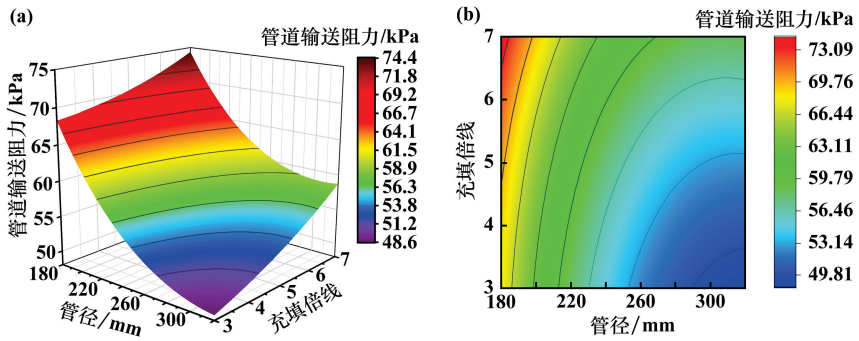
基于响应曲面试验结果，管径、入口流速及充填倍线交互作用下的 3D 曲面图和等值线图如图 5~7 所示。



（a）3D 曲面图；（b）等值线图

图 5　管径和入口流速对阻力损失的交互作用

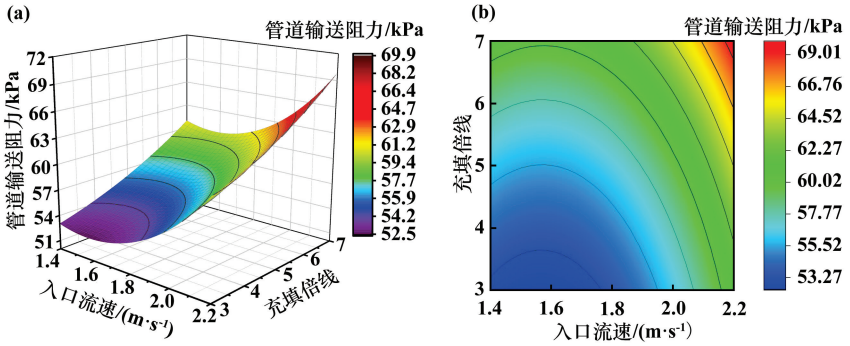
Fig. 5　Interaction of pipe diameter and inlet flow rate on resistance loss



（a）3D 曲面图；（b）等值线图

图 6　管径和充填倍线对阻力损失的交互作用

Fig. 6　Interaction of pipe diameter and stowing gradient on resistance loss



(a) 3D 曲面图; (b) 等值线图

图 7 入口流速和充填倍线对阻力损失的交互作用

Fig. 7 Interaction of inlet flow velocity and stowing gradient on resistance loss

由图 5 可知,管径 320 mm 时,随着入口流速增加,超细尾砂料浆管道输送阻力缓慢增大;管径180 mm时,管道输送阻力显著增大。入口流速由 1.4 m/s 增加至 2.2 m/s 时,随着管径增大,超细尾砂料浆管道输送阻力减小幅度逐渐增大。图 6 表明,充填倍线一定时,超细尾砂料浆管道输送阻力随着管径增大而减小,减小幅度随着充填倍线增大呈先增大后减小的趋势。由图 7 可知,充填倍线一定时,超细尾砂料浆管道输送阻力随入口流速增大而增大,但不同充填倍线间增加趋势近似平行,表明入口流速与充填倍线交互作用弱。综上,外因间交互作用显著性顺序为:管径与入口流速>管径与充填倍线>入口流速与充填倍线。

3 工程验证

3.1 管道输送阻力影响参数分类寻优

河北某铁矿经选矿后的尾砂粒度极细且分布集中,尾砂内含有大量的 SiO_2,占比 60%以上,是充填体强度形成的重要组分,其次为 MgO、Al_2O_3、CaO 等能够起到胶结作用的成分。尾砂最大粒径 49.62 μm,最小粒径 0.863 μm,d_{10} 为 1.31 μm,d_{30} 为3.58 μm,d_{50} 为 9.77 μm,d_{60}为 12.74 μm,尾砂密度为 2.45 g/cm^3,曲率系数为 0.77,不均匀系数为9.73,是典型的超细尾砂。矿山充填设计参数见表 6。

寻优计算结果表明,当管道输送设计参数不变时,适宜的料浆属性参数(内因)为:料浆浓度 63.5%,灰砂比1∶6,料浆温度 51.5 ℃。在实际充填作业中,管道输送过程摩擦生热、碰撞生热以及外界环境均会影响料浆温度。虽然摩擦生热可在一定程度上提升料浆温度,但实际工程中升温幅度受管道长度、流速、围岩环境温度等多种因素影响,且主动控温成本较高,因此工程中通常将温度视为次要变量或不予独立调控的因素。本文在寻优中设定 51.5 ℃为参考料浆温度,若实际温度因摩擦生热略有升高,一般对料浆流变特性及输送阻力影响较小,不会显著改变寻优方案的有效性;若温度变化较大,则建议结合具体工况进行复核与校验。当料浆属性参数不变时,适宜的管道输送设计参数(外因)为:管径 270 mm,入口流速 1.63 m/s,充填倍线 5。矿山可依据改变参数的经济性、实用性及便利性对相关参数进行调整,以减少输送阻力损失。

表 6 矿山充填设计参数

Table 6 Design parameters of mine backfill

参数类型	参数名称	参数值
料浆属性	料浆浓度/%	66
	灰砂比	1∶8
	料浆温度/℃	20
管道输送设计	管径/mm	180
	入口流速/(m·s^{-1})	1.5
	充填倍线	5

3.2 寻优结果验证

利用仿真软件建立管道输送阻力模型,耦合流体流动模块、固相颗粒模块,进行 5 次重复试验。为充分考虑超细尾砂料浆颗粒级配的影响,赋予超细尾砂颗粒质量力、颗粒间摩擦力与曳力等边界条件,最终计算得到超细尾砂料浆管道输送阻力损失,若该值处于 95%置信区间水平内,则证明预测参数可靠。其中,95%置信区间计算公式为:

$$i_{up} = \tilde{y} + t_{1-\alpha/2}(n-p)\cdot\sqrt{(SE_{Fit})^2 + \frac{MSE}{m}} \quad (3)$$

$$i_{lo} = \tilde{y} - t_{1-\alpha/2}(n-p)\cdot\sqrt{(SE_{Fit})^2 + \frac{MSE}{m}} \quad (4)$$

式中:i_{up} 为置信区间的阻力损失上限值;i_{lo}为置信区间的阻力损失下限值;$\tilde{y}$ 为寻优参数下的超细尾砂料浆管道输送阻力损失;n 为求解模型时的响应曲面试

验次数; p 为回归模型项数; SE_{Fit} 为拟合标准误差; MSE 为均方误差; m 为验证试验次数; $t_{1-\alpha/2}$ 为 t 统计量。验证试验仿真结果见表 7。

表 7　验证试验结果

Table 7　Verification test results

试验类别	内因	外因	试验编号	阻力损失/kPa
内因寻优	料浆浓度 63.5% 灰砂比 1∶6 料浆温度 51.5 ℃	管径 180 mm 入口流速 1.5 m/s 充填倍线 5	1	46.49
			2	42.66
			3	44.38
			4	41.03
			5	42.42
外因寻优	料浆浓度 66% 灰砂比 1∶8 料浆温度 20 ℃	管径 270 mm 入口流速 1.63 m/s 充填倍线 5	1	48.66
			2	48.50
			3	49.44
			4	48.37
			5	50.01

基于内外因素响应曲面试验设计及 t 统计量表格,可得到式(3)、(4)中的计算参数及计算结果,见表 8。

表 8　验证试验参数及置信区间计算结果

Table 8　Parameters of verification test and calculation for confidence interval

类别	n	p	SE_{Fit}	MSE	m	$t_{0.975}(10)$	预测值/kPa	95%置信区间
内因	20	10	0	0.333 305	5	2.228	41.95	(41.37,42.52)
外因	20	10	0	0.030 489	5	2.228	48.36	(48.18,48.53)

对比表 7 及表 8 可知,验证试验中内因寻优获得的阻力损失有 1 个值落在 95%置信区间,其他阻力损失值超出置信区间的最大误差为 10.82%;外因寻优获得的阻力损失有 2 个值落在 95%置信区间,其他阻力损失值超出置信区间的最大误差为 3.41%,表明所得最优组合参数得到的阻力损失误差较小,比较可靠。

4　结论

1) 将超细尾砂料浆管道输送阻力的影响因素分为内因作用及外因作用。内因包括料浆浓度、灰砂比、料浆温度,通过改变料浆塑性黏度、屈服应力,从而改变管道输送阻力;外因包括管径、入口流速、充填倍线,通过因素间权衡关系及影响料浆的流动环境,改变管道输送阻力。

2) 内因对超细尾砂料浆管道输送阻力影响敏感度为:料浆浓度>料浆温度>灰砂比,交互作用影响敏感度为:料浆浓度与料浆温度>料浆浓度与灰砂比>灰砂比与料浆温度。外因对超细尾砂料浆管道输送阻力影响敏感度为:管径>入口流速>充填倍线,交互作用影响敏感度为:管径与入口流速>管径与充填倍线>入口流速与充填倍线。

3) 基于矿山充填方案,多响应预测了最优组合参数。外因固定时,最优料浆性质组合参数为:料浆浓度 63.5%,灰砂比 1∶6,料浆温度 51.5 ℃;内因固定时,最优输送设计参数组合参数为:管径 270 mm,入口流速 1.63 m/s,充填倍线 5。

4) 本文基于理论模型与室内试验开展参数寻优,对实际工程中料浆温度的动态变化及复杂环境耦合效应作了适度简化。未来可进一步开展现场试验验证,并考虑温度时变规律、管道磨损、非均质流动等实际工程因素,以提升模型的实际指导能力。

参考文献(References):

[1] CAO H, GAO Q, ZHANG X Z, et al. Research progress and development direction of filling cementing materials for filling mining in iron mines of China[J]. Gels, 2022,8(3):192.

[2] 王永军,胡东祥,郑辉,等. 充填料浆对变径弯管的冲蚀磨损特性分析[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):14-21.
WANG Yongjun, HU Dongxiang, ZHENG Hui, et al. Analysis of erosive wear characteristics of backfill slurry on reducing bends[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):14-21.

[3] 吴琼,郭进平,王小林,等. 温度效应下胶结充填体动态强度及能量演化特征[J]. 矿冶工程, 2025,45(1):27-34.
WU Qiong, GUO Jinping, WANG Xiaolin,et al. Effect of temperature on strength and energy evolution characteristics of cemented backfill mass under dynamic loading[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(1):27-34.

[4] PANDA L, BISWAL S K, VENUGOPAL R, et al. Recovery of ultrafine iron ore from iron ore tailings[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018,71(2):463-468.

[5] 余剑,熊有为,刘福春,等. 超细全尾砂大流量充填系统在张庄铁矿的应用[J]. 金属矿山, 2020(1):89-94.
YU Jian, XIONG Youwei, LIU Fuchun, et al. Application of large flow filling system with ultra-fine tailings in Zhangzhuang Mine[J]. Metal Mine, 2020(1):89-94.

[6] 付自国,李化,邓建辉,等. 基于结构参数的超细尾砂充填料浆双变量流变模型及应用[J]. 中国有色金属学报, 2021,31(6):1672-1685.
FU Ziguo, LI Hua, DENG Jianhui, et al. Bivariate rheological model of ultrafine tailings backfill slurry based on structural parameter and its applications[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(6):1672-1685.

[7] 甘德清,孙海宽,薛振林,等. 温度影响下的充填料浆大流量管道输送流态演化[J]. 中国矿业大学学报, 2021,50(2):248-255.
GAN Deqing, SUN Haikuan, XUE Zhenlin, et al. Transport state evolution of the packed slurry with the influence of temperature[J].

Journal of China University of Mining & Technology, 2021,50(2):248-255.

[8] 张友志,甘德清,薛振林,等. 考虑温度的超细尾砂触变行为研究[J]. 中国矿业, 2019,28(11):113-117.
ZHANG Youzhi, GAN Deqing, XUE Zhenlin, et al. Thixotropic behavior of superfine tailings considering temperature[J]. China Mining Magazine, 2019,28(11):113-117.

[9] XUE Z L, GAN D Q, ZHANG Y Z, et al. Rheological behavior of ultrafine-tailings cemented paste backfill in high-temperature mining conditions[J]. Construction and Building Materials, 2020,253:119212.

[10] 刘树龙,李公成,孙业庚,等. 超细尾砂新型胶凝材料开发及配比优化[J]. 矿业研究与开发, 2020,40(7):86-90.
LIU Shulong, LI Gongcheng, SUN Yegeng, et al. Development and ratio optimization of ultrafine tailings new cementitious materials[J]. Mining Research and Development, 2020,40(7):86-90.

[11] 赵康,何志伟,严雅静,等. 纤维增强超细尾砂充填体微观破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2022,41(增刊1):3010-3020.
ZHAO Kang, HE Zhiwei, YAN Yajing, et al. Microscopic failure mechanism of fiber reinforced ultra-fine tailings backfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022,41(S1):3010-3020.

[12] 肖柏林,苗胜军,高谦,等. 冶金渣胶结材料对超细全尾砂固化特性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022,32(4):1152-1163.
XIAO Bolin, MIAO Shengjun, GAO Qian, et al. Effect of metallurgical slag cementitious material on solidification characteristics of ultra-fine tailings backfill[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022,32(4):1152-1163.

[13] WU A X, RUAN Z E, BÜRGER R, et al. Optimization of flocculation and settling parameters of tailings slurry by response surface methodology[J]. Minerals Engineering, 2020,156:106488.

[14] 刘树龙,王发刚,李公成,等. 基于响应面法的复合充填料浆配比优化及微观结构影响机制[J]. 复合材料学报, 2021,38(8):2724-2736.
LIU Shulong, WANG Fagang, LI Gongcheng, et al. Optimization of mixture ratio and microstructure influence mechanism of composite filling slurry based on response surface method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021,38(8):2724-2736.

[15] ZHU L L, JIN Z H, ZHAO Y, et al. Rheological properties of cemented coal gangue backfill based on response surface methodology[J]. Construction and Building Materials, 2021,306:124836.

[16] 尹升华,郝硕,邹龙,等. 基于RSM的胶结充填体强度回归及料浆寻优研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020,51(6):1595-1605.
YIN Shenghua, HAO Shuo, ZOU Long, et al. Research on strength regression and slurry optimization of cemented backfill based on response surface method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020,51(6):1595-1605.

引用本文:王丽红,姚银佩. 超细尾砂料浆管道输送阻力影响因素研究及寻优分析[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):47-54.
WANG Lihong, YAO Yinpei. Optimization analysis and study of factors influencing the resistance of ultra-fine tailings slurry pipeline transport[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):47-54.

(上接第46页)

[16] 宋战平,王博文,范胜元,等. 考虑时效损伤的硬岩非线性蠕变本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024,43(10):2368-2380.
SONG Zhanping, WANG Bowen, FAN Shengyuan, et al. Nonlinear creep intrinsic modeling of hard rock considering aging damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024,43(10):2368-2380.

[17] 刘春,田纪辉,孙海涛,等. 动载荷冲击后页岩蠕变试验及分数阶蠕变本构模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2024,53(4):726-736.
LIU Chun, TIAN Jihui, SUN Haitao, et al. Study on shale creep experiment and fractional creep constitutive model after dynamic load impact[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024,53(4): 726-736.

[18] SINGH D, NILANKAR K, SINGH H K, et al. Impact of water saturation on physico-mechanical properties of fragile chandpur phyllite at varying foliation angles[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2024,43(1):2.

[19] LI T B, PENG F, CHEN C, et al. Investigating the creep damage and permeability evolution mechanism of phyllite considering non-Darcy's flow[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2024, 57(10):8483-8498.

[20] 李福林,王猛,张敏,等. 破损/饱水状态对千枚岩力学性质影响的试验研究[J/OL]. 工程力学, 2025:1-12.[2025-03-04].https://Link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250303.1727.032.
LI Fulin, WANG Meng, ZHANG Min, et al. The influence of damaged and saturated state on the mechanical properties of phyllite by experiments[J/OL]. Engineering Mechanics, 2025:1-12.[2025-03-04].https://Link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250303.1727.032.

[21] 孙传迪,宋飞,倪勃文,等. 饱和风化千枚岩及泥岩抗剪强度与剪切变形本构模型研究[J/OL]. 土木工程学报, 2025:1-12.[2025-05-15]. https://link.cnki.net/doi/10.15951/j.tmgcxb.24110922.
SUN Chuandi, SONG Fei, NI Bowen, et al. Study on constitutive models of shear strength and shear deformation of saturated weathered phyllite and mudstone[J/OL]. China Civil Engineering Journal, 2025:1-12.[2025-05-15]. https://link.cnki.net/doi/10.15951/j.tmgcxb.24110922.

[22] 杨圣奇,徐鹏. 一种新的岩石非线性流变损伤模型研究[J]. 岩土工程学报, 2014,36(10):1846-1854.
YANG Shengqi, XU Peng. A new nonlinear rheological damage model for rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10):1846-1854.

引用本文:李胜前,李启航. 非线性分级荷载下饱和千枚岩的蠕变损伤本构模型研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):39-46.
LI Shengqian, LI Qihang. Investigation on damage constitutive model of phyllite under nonlinear step loading[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):39-46.