

分级尾砂充填料浆 L 管实验及阻力特性研究

汪统科¹, 王林奇², 杨鹏¹, 于少峰³, 刘伟¹, 李健², 曹晨², 王勇²

- 巴彦淖尔西部矿业有限公司, 内蒙古 巴彦淖尔 015500;
- 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
- 西部矿业集团公司, 青海 西宁 810001

中图分类号: TD853.34 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)02-0032-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.02.004

摘要 管道输送阻力是充填料浆管道输送的一个重要参数, 目前普遍采用基于宾汉流变模型推导的白金汉公式进行计算, 而管壁滑移效应的影响在该公式中被忽略, 导致管道输送阻力的计算产生一定的偏差。因此本文基于 L 管输送实验, 提出了考虑管壁滑移效应影响的充填料浆输送阻力计算方法, 采用全面实验设计方案, 研究了料浆质量分数、灰砂比和管壁滑移效应对于充填料浆管输阻力的影响。结果表明: 管输阻力与质量分数、灰砂比呈正相关, 与管壁滑移效应呈负相关。管壁滑移效应通过滑移贡献率来量化, 该系数受质量分数的影响较明显, 随着质量分数增大逐渐减弱, 在质量分数较小时, 受灰砂比的影响不明显。通过回归分析, 构建了基于管径、流速、质量分数、灰砂比四变量, 考虑管壁滑移效应的充填料浆管输阻力数学模型, 并进行了工程实践验证。

关键词 充填料浆; L 管实验; 管输阻力; 壁面滑移; 阻力模型

充填采矿法通过将地面固体废弃物回填至井下空区, 既能改善采空区塌陷的问题, 又能充分利用废弃尾砂, 减少地表尾矿的堆存, 在国内外矿山得到了广泛运用^[1-3]。充填料浆主要通过管道输送至井下采空区, 其中料浆在管道内输送的阻力损失是管道输送的重要参数, 直接影响到充填输送系统的设计与优化^[4-5]。目前管道输送阻力(管输阻力)的计算普遍采用基于宾汉(Bingham)流变模型推导的白金汉公式^[6-7], 其缺点是未考虑管壁滑移效应的影响, 而高浓度料浆在管道输送过程中, 必然存在壁面滑移现象^[8-9]。管壁滑移是指尾砂颗粒自发地向管道中心迁移, 而水分向管壁处迁移, 在管壁处形成了黏度极低的薄滑移层, 对管道产生“润滑作用”, 实现一定的减阻效果^[10]。忽略管壁滑移的减阻效果计算阻力值与实际的管道输送阻力会产生一定的偏差。大量文献采用 L 管实验对充填料浆的管输阻力进行了研究, 齐兆军等^[11]、杜加法等^[12]均通过 L 管实验, 采用白金汉公式计算了不同浓度、灰砂比条件下的全尾砂料浆的流变参数及管输阻力。同时, 国内外学者在管壁滑移效应方面进行了一些研究, 刘晓辉^[13]基于非牛顿流体力学及表观滑移

假说, 研究了基于管壁滑移效应下的充填管输阻力计算方法, 吴爱祥等^[14]通过倾斜管道实验研究分析了流变与管壁滑移效应对管输阻力的影响作用。甘德清等^[15]通过 Comsol 软件建立了考虑管壁滑移效应的管道输送阻力模型, 并分析了料浆浓度、管径及灰砂比对管道阻力损失的影响。

综上所述, 通过 L 管输送实验, 考虑管壁滑移效应来计算管输阻力的研究还相对较少。而现场管道输送实验是获得管输阻力等参数比较直接的方法, 环管实验结果最符合实际工况, 但其缺点是实验规模较大, 且费用较高^[16-17], 而 L 管实验较为简单, 有利于指导矿山生产实际。因此, 本文尝试通过 L 管输送实验, 提出考虑管壁滑移效应的管输阻力计算方法, 研究质量分数、灰砂比等因素对于管壁滑移效应及充填料浆管输阻力的影响规律, 通过回归分析, 构建充填料浆管道输送阻力的计算模型, 以用于指导工程实践。

1 实验原理

大量实验和文献表明^[18-20], 充填料浆在管道中呈均质柱塞流动, 可用宾汉流变模型进行研究, 管壁滑

收稿日期: 2024-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52130404)

作者简介: 汪统科(1992—), 男, 青海海东人, 本科, 主要从事矿山地质勘查及资源综合利用等方面研究、管理工作, E-mail: 251002358@qq.com。

通信作者: 王勇(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事膏体充填绿色开采方面的研究工作, E-mail: wangyong8551@126.com。

移效应是流体在流动过程中与接触的固体边界之间产生的相对运动^[21-22], 根据非牛顿流体理论, 料浆在管道内流动区域分为柱塞流动区、剪切流动区及滑移流动区, 其中剪切流动区和柱塞流动区又统称为主流区。滑移层位于管道壁面和主流区之间, 其流体黏度远低于料浆主流区的黏度。当料浆受到剪切作用开始流动时, 在滑移层内产生极高的速度梯度, 滑移层厚度相对于管道直径极小, 料浆流动过程中的速度分布在管道壁上表现出跃迁, 形成所谓的滑移流动^[23]。结合水力学对料浆流态进行分析, 建立基于宾汉流变模型并考虑管壁滑移效应的管道阻力计算公式(1)为^[24-25]:

$$i_m = \left(\frac{16}{3D} \tau_y + \frac{32v}{D^2} \mu_p \right) \cdot \left(1 + \frac{8\delta\mu_p}{D\mu_{slip}} \right)^{-1} \quad (1)$$

式(1)中: τ_y 为料浆的屈服应力, Pa; μ_p 为塑性黏度, Pa·s; v 为料浆的流速, m/s; D 为管道直径, m; δ 为滑移层厚度, m; 有 $\delta = \left(1 - \frac{f_v}{f_{vm}} \right) \cdot D_c$, 其中 f_v 为料浆体积浓度, %, 可根据质量分数和尾砂比重换算; f_{vm} 为料浆的极限体积浓度, 可通过沉降法^[26] 或流变测试^[27] 等方法进行确定; D_c 为尾砂颗粒的加权平均粒径, m; μ_{slip} 为滑移层黏度, 由于其黏度极低, 一般将其看作常温状态下的水, 取 1.05 mPa·s。

L 管实验装置主要由盛料漏斗、垂直管道、水平管道和弯管组成, 装置如图 1 所示。

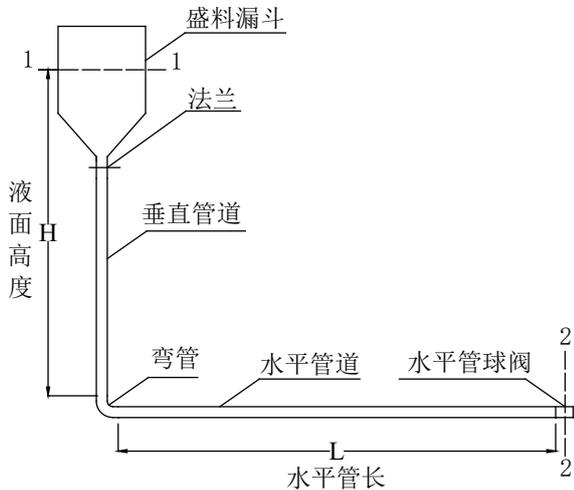


图 1 L 管实验装置
Fig. 1 Plots of load and loading step of muddy siltstone under a single cutter

取漏斗内料浆液面 1-1 和管道出口处流通断面 2-2 分析, 根据伯努利方程可得式(2):

$$\frac{H}{\alpha} = h_w + \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式(2)中: H 为 L 管中液面高度, m; α 为局部阻力损失系数, 取 1.15; h_w 为沿程阻力损失, m; g 为重力加速度, 取 9.8 m/s²。

沿程阻力损失与料浆管输阻力的关系如式(3)

所示:

$$i_m = \frac{h_w \rho_m g}{H + L} \quad (3)$$

式(3)中: i_m 为管输阻力损失, Pa/m; L 为水平管道长度, m; ρ_m 为料浆密度, kg/m³。联立式(1)~(3), 解得式(4):

$$\frac{16}{3D} \tau_y + \left[\frac{32v}{D^2} + \frac{\rho_m g}{H + L} \left(\frac{H}{\alpha} - \frac{v^2}{2g} \right) \frac{8\delta}{D\mu_{slip}} \right] \mu_p = \frac{\rho_m g}{H + L} \left(\frac{H}{\alpha} - \frac{v^2}{2g} \right) \quad (4)$$

取不同料浆液面高度 H_1 、 H_2 以及对应的出口断面流速 v_1 、 v_2 , 代入式(4)中得到方程组(5), 解方程组即可得料浆的屈服应力和塑性黏度。

$$\begin{cases} \frac{16}{3D} \tau_y + \left[\frac{32v_1}{D^2} - \frac{\rho_m g}{H_1 + L} \left(\frac{H_1}{\alpha} - \frac{v_1^2}{2g} \right) \frac{8\delta}{D\mu_{slip}} \right] \mu_p = \frac{\rho_m g}{H_1 + L} \left(\frac{H_1}{\alpha} - \frac{v_1^2}{2g} \right) \\ \frac{16}{3D} \tau_y + \left[\frac{32v_2}{D^2} - \frac{\rho_m g}{H_2 + L} \left(\frac{H_2}{\alpha} - \frac{v_2^2}{2g} \right) \frac{8\delta}{D\mu_{slip}} \right] \mu_p = \frac{\rho_m g}{H_2 + L} \left(\frac{H_2}{\alpha} - \frac{v_2^2}{2g} \right) \end{cases} \quad (5)$$

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

本次实验所用尾砂样品为内蒙古某铜矿山的分级尾砂, 尾砂粒级组成如图 2 所示, 尾砂中粒径 <74 μm 的颗粒占 59.90%, 粒径 <37 μm 的颗粒占 38.84%, 粒径 <20 μm 的颗粒占 22.58%。尾砂密度为 2.765 t/m³, 自然堆积密度为 1.319 t/m³。胶凝材料选用矿山现用的普通硅酸盐水泥, 水取用室内自来水。

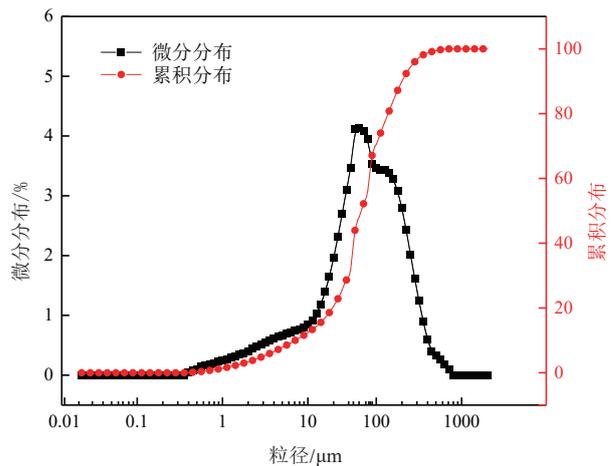


图 2 分级尾砂粒级组成分布
Fig. 2 Plots of load and loading step of muddy siltstone under a single cutter

2.2 实验方案

本次实验主要设计不同质量分数、灰砂比条件下充填料浆管道输送的实验方案, 采用全面实验法, 采

用 L 管实验装置, L 管采用透明塑料管, 管道内径为 45 mm, 设置垂直管段高 1 m, 水平管段长 2.15 m。实验测试的质量分数分别为 68%、70%、72%, 灰砂比分别为 1:4、1:8、1:12。

实验前, 先制备好充填料浆, 关闭水平管末端球阀, 将料浆倒入盛料漏斗内, 待管道内充满料浆后, 测量并记录此时的液面高度。开启球阀, 料浆在重力作用下开始流出, 记录一定时间内的流出料浆质量, 改变料浆液面高度, 进行重复实验。

3 实验结果与分析

3.1 实验结果

按照实验方案, 得到 L 管实验的测试结果, 并通过沉降法得到尾砂的极限体积浓度为 50.5%。根据实验结果, 将流出料浆质量、时间和料浆液面高度等数据代入公式(5)中, 计算充填料浆的流变参数, 再根据公式(1)求得充填料浆的管输阻力如表 1 所示。

3.2 管输阻力影响因素分析

3.2.1 质量分数和灰砂比与管输阻力的关系

图 3 为充填料浆的管输阻力随质量分数、灰砂比

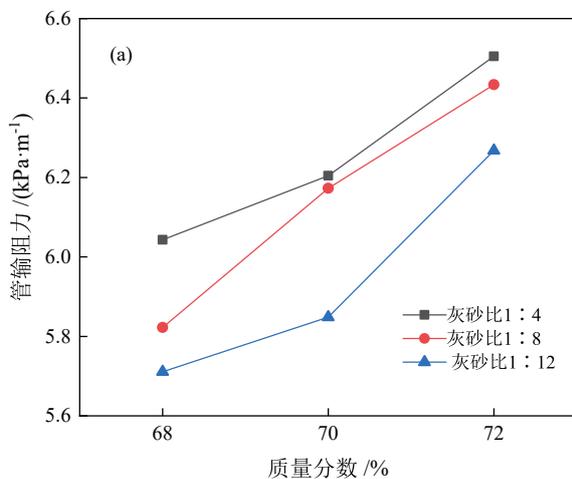


表 1 充填料浆的管输阻力

Table 1 Parameters for different rocks tested

流速/(m·s ⁻¹)	质量分数/%	灰砂比	屈服应力/ Pa	塑性黏度 / (Pa·s)	管输阻力 / (kPa·m ⁻¹)
1.809	68	1:4	6.339	0.248	6.043
1.950	68	1:8	5.966	0.218	5.822
2.044	68	1:12	5.323	0.207	5.711
1.540	70	1:4	12.027	0.251	6.205
1.623	70	1:8	12.905	0.235	6.173
1.816	70	1:12	12.505	0.192	5.848
1.561	72	1:4	25.056	0.215	6.525
1.365	72	1:8	24.761	0.199	6.434
1.491	72	1:12	23.851	0.180	6.268

的分布规律。由图 3(a)可知, 质量分数与管输阻力基本呈正相关。随着质量分数的增大, 管输阻力不断增大, 在相同质量分数的条件下, 灰砂比越大, 管输阻力越大。由图 3(b)可知, 灰砂比与管输阻力基本呈正相关。当质量分数增大时, 充填料浆中固体颗粒占比增大, 自由水占比减少, 导致料浆的流动性变差, 管输阻力随之增大; 灰砂比越大, 即代表胶凝材料用量越多, 水化反应消耗的自由水变多, 导致料浆的稠度增加, 管输阻力也随之增大。

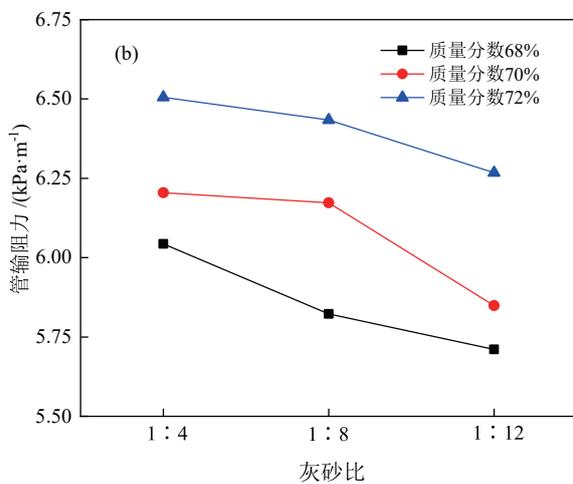


图 3 充填料浆管输阻力随不同配比的变化规律(a—管输阻力随不同质量分数的变化; b—管输阻力随不同灰砂比的变化)
Fig. 3 Variation of pipe transmission resistance with different proportions of filling slurry (a—the change of pipe transmission resistance with different mass fractions (b) the change of pipe transmission resistance with different filling and cement ratios)

3.2.2 管壁滑移效应对管输阻力的影响

目前广泛采用的白金汉公式对于管壁处进行了简化假设, 即认为管壁处无滑移, 因此计算得到的阻力值往往大于实际值, 而基于宾汉流变模型并考虑壁面滑移效应的管道阻力计算公式(1), 是对目前广泛使用的白金汉公式的修正, 将其应用于透明 L 管实验中, 可以根据公式(1)计算得到充填料浆的质量分数为 68%、70% 和 72%, 灰砂比为 1:8 对应的修正系数

分别为 0.783、0.82 和 0.873, 表明考虑壁面滑移效应的管道阻力计算值分别比白金汉公式计算值小 21.7%、17% 和 12.7%, 其结果更加接近实际值。该修正系数与管径和滑移层黏度正相关, 与滑移层厚度和充填料浆塑性黏度负相关。

为了描述管壁滑移效应对管输阻力的影响, 引入滑移贡献率的概念^[13], 其数学表达式如(6):

$$D_R = \frac{v_{slip}}{v} \quad (6)$$

式(6)中: D_R 为滑移贡献率, v_{slip} 为滑移速度, 可根据式(7)计算得到^[27], v 为管内平均流速, m/s。

$$v_{slip} = i_m \frac{R\delta}{2\mu_{slip}} \quad (7)$$

式(7)中: i_m 为管道沿程阻力损失, Pa/m; μ_{slip} 为滑移层黏度, 一般取 1.05 mPa·s; R 为管道半径, m; δ 为滑移层厚度, m。 D_R 实质反映了滑移速度在平均流速中所占份额, 其值越大则表明滑移效应对充填料浆的减阻效果越显著。

根据公式(6)~(7)计算得到滑移贡献率 D_R 如图 4 所示。由图 4(a)可知, D_R 与质量分数呈负相关, 随着质量分数增大, D_R 不断减小; 由图 4(b)可知, 在质量分数较高时, 滑移贡献率与灰砂比基本呈负相关, 随着质量分数减小, 与灰砂比的相关性逐渐减弱。分析可知, 在质量分数较低时, 管壁滑移主要为静态壁面效应, 充填料浆在很小的剪切力作用下就会引发滑移

流动, 对管道形成“润滑”作用, 与料浆所受到的部分摩擦阻力相互抵消, 此时滑移效应对充填料浆的减阻效果比较显著。在质量分数逐渐增大时, 充填料浆的管壁滑移转为动态壁面效应, 充填料浆需要较大的剪切应力作用才能发生颗粒之间的跃迁, 同时充填料浆的流动性能变差, 管道摩擦阻力增长加快, 此时滑移效应的减阻作用降低。在质量分数较高时, 灰砂比大则料浆中水泥含量高, 水化反应消耗的自由水量大, 自由水形成有效滑移层的厚度降低, 同时进一步降低了料浆的流动性, 增大了料浆的摩擦阻力, 使得管壁滑移的减阻效果减弱。随着质量分数降低, 料浆中的自由水含量增加, 大量的自由水增强了料浆流动性, 弱化其他因素对管输阻力的影响, 不同胶凝材料添加量水化反应消耗的自由水量也相对减少, 此时管壁滑移主要为静态壁面效应, 滑移效应的减阻作用相对稳定, 滑移贡献率变化较小。

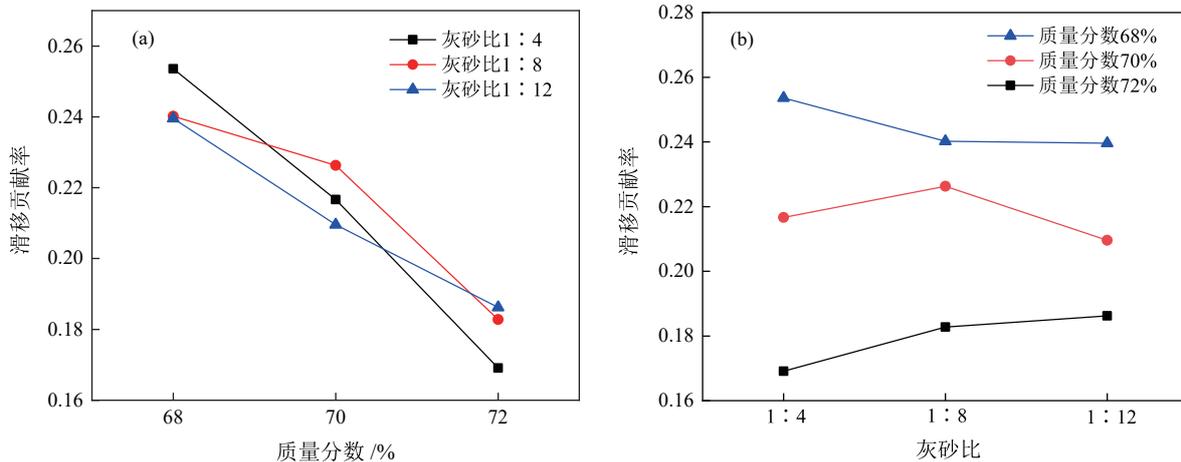


图 4 不同配比对滑移贡献率的影响(a—滑移贡献率随不同质量分数的变化; b—滑移贡献率随不同灰砂比的变化)

Fig. 4 Effect of different ratios on slip contribution rate(a—the change of slip contribution rate with different mass fractions; b—the change of slip contribution rate with different gray-sand ratios)

3.3 管输阻力数学模型

通过对 L 管实验计算得到的管输阻力数据进行回归分析, 得到基于管壁滑移效应修正的管输阻力数学模型如式(8)所示:

$$i_m = \left[\frac{16}{3D} (-316.24 + 4.714x_1 + 2.97x_2) + \frac{32v}{D^2} (0.669 - 0.007x_1 + 0.246x_2) \right] \left(1 + \frac{73.325 - 0.989x_1 + 1.196x_2}{D\mu_{slip}} \right)^{-1} \quad (8)$$

式(8)中: i_m 为管道的输送阻力, Pa/m; x_1 为充填料浆的质量分数, %; x_2 为充填料浆的灰砂比。 v 为料浆的流速, m/s; D 为管道直径, m; δ 为滑移层厚度, m; μ_{slip} 为滑移层黏度, mPa·s。公式中各模型的相关系数 R^2 为 0.963、0.913 和 0.977, 计算模型的可靠性均较高。该数学模型基于管径、流速、质量分数和灰砂比四个

变量, 相较于传统的白金汉公式拟合的数学模型, 考虑了充填料浆管壁滑移效应的影响, 其结果更加接近实际值。由式(8)可知, 当管径与流速一定时, 管输阻力与料浆质量分数、灰砂比成正比, 随着质量分数、灰砂比增大, 充填料浆的流动性能变差, 导致输送阻力增大。

3.4 工程应用

内蒙古某铜矿采用分级尾砂进行井下充填, 充填浓度为 68%~70%、灰砂比为 1:4~1:12, 充填钻孔内径为 142 mm, 充填料浆流量为 80~120 m³/h, 选取充填站工作时的流量、质量分数数据, 代入公式(8)中, 可以计算充填料浆的管输阻力, 如下图 5(a)所示, 得到矿山不同配比管道输送阻力在 886~1363 Pa/m 之间, 输送阻力波动较小, 能够满足矿山自流输送要求。采用不同配比顺利完成了井下充填工业试验, 如下图 5(b)

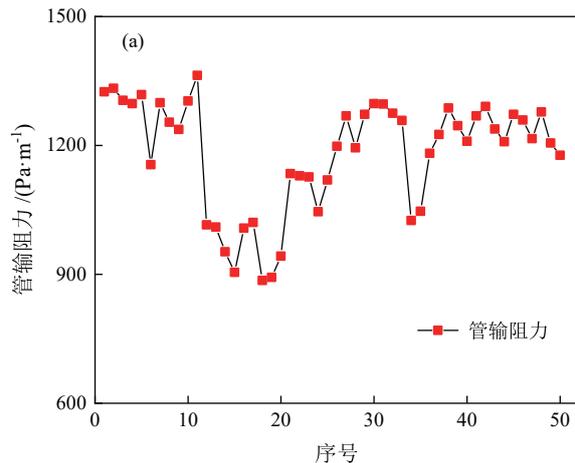


图 5 (a) 不同配比的充填料浆管输阻力波动; (b) 充填料浆进入井下采场

Fig. 5 (a) Transport resistance fluctuation of filling slurry pipe with different proportions; (b) Filling slurry into underground stope

所示, 试验过程中充填料浆稳定自流, 料浆在管道内流速平缓, 未发生堵管事故。

4 结论

(1) 基于 L 管输送实验, 根据非牛顿流体理论考虑管壁滑移效应, 提出了考虑管壁滑移效应的充填料浆流变参数和管输阻力的计算方法, 根据计算结果表明, 考虑管壁滑移效应能够更准确地计算管道输送阻力。

(2) 基于全面实验设计方案, 研究了充填料浆质量分数、灰砂比和管壁滑移等因素对于管输阻力的影响规律。充填料浆的质量分数和灰砂比与管输阻力呈正相关, 随着质量分数与灰砂比的增大, 管输阻力不断增大。通过滑移贡献率研究管壁滑移效应对于管输阻力的影响, 管壁滑移效应的减阻作用随着质量分数增大逐渐减弱, 同时在质量分数较高时, 与灰砂比呈正相关, 随着质量分数减小, 与灰砂比的相关性减弱。

(3) 通过回归分析, 建立考虑管壁滑移效应的充填料浆管输阻力与质量分数、灰砂比的数学模型。该模型基于管径、流速、质量分数、灰砂比四变量, 相较于传统的白金汉公式拟合的计算模型, 考虑了充填料浆管壁滑移效应的影响, 结果更加接近实际值, 并在矿山进行了工程应用, 顺利进行了充填工业试验。

参考文献:

- [1] 吴爱祥, 王勇, 张敏哲, 等. 金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J]. 金属矿山, 2021(1): 1-13.
WU A X, WANG Y, ZHANG M Z et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines[J]. Metal Mine, 2021(1): 1-13.
- [2] CHOUDHARY BHANWAR SINGH, KUMAR SANTOSH. Underground void filling by cemented mill tailings[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(6): 893-900.
- [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 A X, YANG Y, CHENG H Y, et al. Status and prospects of paste technology in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5): 517-525.

- [4] 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): 3162-3164+3166-3169.
LI G C, WANG H J, WU A X, et al. Flow transport of paste based on inclined tube experiment[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(12): 3162-3164+3166-3169.
- [5] 李守强, 郭利杰, 郑旭, 等. 膏体充填料浆管道自流输送分析及管线布置[J]. 中国矿业, 2021, 30(8): 149-153.
LI S Q, GUO L J, ZHENG X, et al. Analysis and pipeline layout of free flow transportation of paste filling slurry pipeline[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(8): 149-153.
- [6] 吴爱祥, 王洪江. 金属矿膏体充填理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
WU A X, WANG H J. Theory and technology of metal paste backfill [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [7] 王建栋, 吴爱祥, 王贻明, 等. 粗骨料膏体抗离析性能评价模型与实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 866-872.
WANG J D, WU A X, WANG Y M, et al. Evaluation model and experimental study on anti-segregation performance of coarse aggregate paste[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(5): 866-872.
- [8] CHEN D D, JIANG X G, LV S, et al. Rheological properties and stability of lignite washery tailing suspensions[J]. Fuel, 2015: 214-221.
- [9] KALYON DM. Apparent slip and viscoplasticity of concentrated suspensions[J]. Journal of Rheology, 2005, 49(3): 621-640.
- [10] 吕馥言. 基于壁面滑移效应的浓密膏体管道输送减阻增程研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2018.
LV F Y. Drag-reduction of pipeline transport of dense paste based on wall slip phenomenon[D]. China University of Mining and Technology (Beijing), 2018.
- [11] 齐兆军, 宋泽普, 寇云鹏, 等. 某矿山全尾砂似膏体料浆 L 管试验研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(10): 161-164.
QI Z J, SONG Z P, GUAN Y P, et al. Experimental study on crude tailings paste-like slurry by L-pipe in a mine[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(10): 161-164.
- [12] 杜加法, 刘晓光, 王京生, 等. 基于 L 管实验的全尾砂膏体流变特性研究[J]. 金属矿山, 2020(8): 20-24.
DU J F, LIU X G, WANG J S, et al. Rheological properties of unclassified tailings paste slurry based on L-tube pipeline Test[J].

- Metal Mine, 2020(8): 20–24.
- [13] 刘晓辉, 吴爱祥, 姚建, 等. 膏体尾矿管内滑移流动阻力特性及其近似计算方法[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(10): 2403–2410.
LIU X H, WU A X, YAO J, et al. Paste tailings tube slip flow resistance characteristics and its approximate calculation method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(10): 2403–2410.
- [14] 吴爱祥, 程海勇, 王贻明, 等. 考虑管壁滑移效应膏体管道的输送阻力特性[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(1): 180–187.
WU A X, CHENG H Y, WANG Y M, et al. Transport resistance characteristics of paste pipelines considering wall slip effect[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(1): 180–187.
- [15] 甘德清, 闫泽鹏, 薛振林, 等. 考虑壁面滑移效应的充填料浆管道输送阻力研究[J]. 金属矿山, 2020(9): 26–32.
GAN D Q, YAN Z P, XUE Z L, et al. Research on conveying resistance of filling slurry pipeline considering wall slip effect[J]. Metal Mine, 2020(9): 26–32.
- [16] 王少勇, 吴爱祥, 阮竹恩, 等. 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), 2018, 49(10): 2519–2525.
WANG S Y, WU A X, RUAN Z E, et al. Rheological properties and influencing factors of paste based on loop tube experiment[J]. Journal of Central South University (Natural Science), 2018, 49(10): 2519–2525.
- [17] 郑伯坤, 姚维, 黄腾龙, 等. 基于环管试验的改性全尾砂充填料浆输送性能[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 520–529.
ZHANG B K, YAO W, HUANG T L, et al. Conveying performance of modified full tailing filler slurry based on loop test[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 520–529.
- [18] 陈琴瑞, 王洪江, 吴爱祥, 等. 用 L 管测定膏体料浆水力坡度试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(1): 108–112.
CHEN Q R, WANG H J, WU A X, et al. Experimental study on hydraulic slope determination of paste with L-tube[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(1): 108–112.
- [19] 王洪江, 李公成, 吴爱祥, 等. 不同粗骨料的膏体流变性能研究[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(7): 59–62.
WANG H J, LI G C, WU A X, et al. Research on rheological properties of paste with different coarse aggregates[J]. Mining Research and Development, 2014, 34(7): 59–62.
- [20] 董培鑫, 杨志强, 高谦, 等. 混合充填集料粒径与级配对料浆流动性影响[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(3): 53–59.
DONG P X, YANG Z Q, GAO Q, et al. Effect of particle size and grade of mixed filling aggregate on slurry fluidity[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(3): 53–59.
- [21] 卞继伟, 张钦礼, 王浩. 基于 L 管试验的似膏体管流水力坡度模型[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 23–28.
BIAN J W, ZHANG Q L, WANG H. Pipeline hydraulic gradient model of paste-like based on L-pipe experiments[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 23–28.
- [22] ULKU YILMAZER, DILHAN M KALYON. Slip effects in capillary and parallel disk torsional flows of highly filled suspensions[J]. Journal of Rheology, 1998, 33(8): 1197–1212.
- [23] 甘德清, 薛振林, 闫泽鹏, 等. 多场耦合条件下充填料浆管壁面滑移特性[J]. 金属矿山, 2023(02): 30–37.
GAN D Q, XUE Z L, YAN Z P, et al. Wall Slip Characteristics of High Concentration Filling Slurry under Multi-field Coupling[J]. Metal Mine, 2023(02): 30–37.
- [24] 王小林, 王洪江, 吴爱祥, 等. 全尾砂膏体管道输送壁面滑移减阻模型[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(9): 2201–2205.
WANG X L, WANG H J, WU A X, et al. Wall slip reduction model of all-tailing paste pipeline[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(9): 2201–2205.
- [25] 张磊, 王洪江, 李公成, 等. 膏体管道壁面滑移特性研究进展及趋势[J]. 金属矿山, 2015(10): 1–5.
ZHANG L, WANG H J, LI G C, et al. Research progress and trend of wall slip characteristics of paste pipeline[J]. Metal Mine, 2015(10): 1–5.
- [26] 陈立. 高含沙水流流变参数的试验研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1992(4): 384–392.
CHEN L. Experimental study on rheological parameters of water flow with high sediment content[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic Engineering and Electric Power, 1992(4): 384–392.
- [27] 刘晓辉, 吴爱祥, 王洪江, 等. 膏体流变参数影响机制及计算模型[J]. 工程科学学报, 2017, 39(2): 190–195.
LIU X H, WU A X, WANG H J, et al. Mechanism and calculation model of rheological parameters of paste[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2017, 39(2): 190–195.

Experimental and Resistance Characterization Study of Yransparent L-tube for Graded Tailing Backfill Slurry

WANG Tongke¹, WANG Linqi², YANG Peng¹, YU Shaofeng³, LIU Wei¹, LI Jian², CAO Chen², WANG Yong²

1. Bayan Nur West Copper Co., Ltd., Bayan Nur 015500, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. West Mining Group Company, Xining 810001, China

Abstract: Pipe transport resistance is an important parameter of backfill slurry for pipeline transport, and the Buckingham formula based on Bingham's rheological model is commonly used for calculation, and the influence of pipe wall slip effect is ignored in the formula, leads to produce certain deviation pipeline resistance calculation. So this paper proposes a method for calculating the rheological parameters of filling slurry and transport resistance considering the influence of pipe wall slip effect based on the transparent L-pipe conveying experiments, and adopts a comprehensive experimental design scheme to study the effect of slurry mass fraction, cement-tailing ratio on pipe wall slip effect and backfill slurry pipe transport resistance. Using a comprehensive experimental design scheme, the influence of slurry mass fraction and gray-to-sand ratio on the wall slip effect and filling slurry conveying resistance was investigated. The results show that pipe transport resistance is positively correlated with mass fraction and lime sand ratio, and negatively correlated with pipe wall slip effect. The slippage effect is quantified by the slippage contribution degree, which is significantly affected by the mass fraction and gradually decreases with the increase of the mass fraction. When the mass fraction is small, the influence of the lime sand ratio is not obvious. Through regression analysis, a mathematical model of backfill slurry pipe transport resistance was constructed based on the four variables of pipe diameter, flow rate, mass fraction, and cement-tailing ratio, taking into account the wall-slip effect, which is convenient for guiding the engineering practice.

Keywords: backfill slurry; l tube experiment; pipeline resistance; wall slip; resistance model

引用格式:汪统科, 王林奇, 杨鹏, 于少峰, 刘伟, 李健, 曹晨, 王勇. 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 Linqi, YANG Peng, YU Shaofeng, LIU Wei, LI Jian, CAO Chen, WANG Yong. 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.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn