



考虑管壁滑移效应膏体管道的输送阻力特性

吴爱祥, 程海勇, 王贻明, 王洪江, 刘晓辉, 李公成

(北京科技大学 土木与环境工程学院 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为研究膏体管道输送阻力特性, 针对膏体管道输送的结构流特点, 将管道内膏体流区划分为柱塞流动区、剪切流动区和滑移流动区。根据流体力学理论建立考虑管壁滑移效应的膏体管道输送阻力模型, 推导基于倾斜管试验的膏体流变参数计算方式, 通过测定倾斜管不同倾斜角度 α 下的管道流速 v 计算管道屈服应力 τ_0 和塑性粘度 η , 并在此基础上自制试验装置。针对谦比希铜矿充填物料基本特性, 通过正交试验研究浓度、灰砂比和尾废比对管道摩擦阻力的影响, 并根据响应面分析多因素之间的交互作用, 得到各因素对管道摩擦阻力的影响顺序由大到小依次为灰砂比、尾废比、浓度。研究结果是膏体管道输送阻力特性理论与实践研究的有力补充。

关键词: 膏体充填; 阻力特性; 管壁滑移; 倾斜管; 响应面

中图分类号: X753

文献标志码: A

充填采矿法能够有效改善采场应力分布情况, 抑制地表沉降, 为采矿作业提供技术保障, 是实现矿山绿色开采的支撑技术^[1]。膏体充填能够有效利用全尾砂等矿山废料, 减小了地表堆存和渗流等原因造成的污染。同时膏体充填料浆浓度高, 脱水量少^[2], 对采场的服务质量高, 是近年来充填技术的研究热点^[3]。膏体在输送过程中以结构流的运动形式存在^[4], 有别于传统的固液两相流^[5], 因而不能直接采用两相流理论进行膏体管道输送阻力的计算。针对结构流的管道阻力特性研究是国内外研究的热点。

目前膏体料浆流变参数测定较为普遍的方法是采用流变仪测定^[6]。通过控制剪切速率法(CSR)或控制剪切应力法(CSS)进行模式选择, 根据与料浆特性相匹配的流变模型回归出剪切应力和黏度参数^[7-8]。但物料性质和试验方法对试验结果影响较大, 尤其在加入废石等粗骨料时, 试验结果往往表现出较大的离散性^[9]。SAAK 等^[10]通过实验发现, 即使是同一台流变仪, 不同的转速下检测出来的应力结果也不同, 转子转速越快, 检测屈服应力越大。CLAYTON 等^[11]运用坍塌度的方法推导了膏体屈服应力的计算公式; SCHOWALTER 等^[12]利用坍塌度对料浆初始屈服应力和最终屈服应力进行了研究。但采用坍塌度计算流变参数难以克服管壁效应, 对高浓度的膏体料浆适用性

较差。在工业上为得到准确的流变参数, 往往通过环管试验测量管输阻力, 再根据 Krieger-Maroon 公式计算流变参数^[13]。但环管试验工作量大, 试验装置的购置、调试复杂, 室内试验中可操作性较差。目前, 管道阻力计算模型主要基于扩散理论、重力理论和能量理论。丁宏达等^[14]对 Wasp 模型进行修正, 并将其应用于矿浆长距离管道输送设计中。但根据传统管输理论发展起来的管阻计算公式没有考虑壁面滑移造成的减阻效应, 在实际应用中往往造成计算值大于实际测定值。KALYON^[15]借助扫描电镜和荧光分析法获得的微观图像证明了静态壁面损耗效应的存在, 在其作用下产生了厚度为 2~30 μm 的滑移层。结果表明, 壁面滑移效应是否显著, 取决于壁面粗糙度和滑移层厚度的相对大小, 当滑移层不能完全覆盖粗糙表面时, 壁面滑移就无法形成。赵国彦等^[16]利用响应面法建立了多因素料浆满意度模型, 为多因素分析提供了新的思路。

本文作者拟通过水力学推导对膏体流态进行分析, 建立考虑管壁滑移效应的膏体管道输送阻力模型。采用自制的倾斜管试验模型进行流变参数的测定, 结合谦比希铜矿膏体充填系统应用情况, 对多因素与输送阻力的关系开展研究, 为膏体管道输送理论的完善提供基础依据。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374034, 51374035); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAB08B02)

收稿日期: 2015-05-26; **修订日期:** 2015-10-08

通信作者: 吴爱祥, 教授, 博士; 电话: 13501268918; E-mail: wuaixiang@126.com

1 阻力特征分析

根据非牛顿流体理论,流体在管内流动过程中,径向剪切应力 τ 按线性分布,即壁面处最大,中心处为0。在管道内取半径为 r 的浆体柱,假设当 $r=r_0$ 时,剪切应力 τ 等于屈服应力 τ_y 。当 $0<r<r_0$ 时, $\tau<\tau_y$,此时膏体内部无剪切变形,各点流速相同,认为是柱塞流动区;当 $r_0<r<r_1$ 时, $\tau>\tau_y$,其发生变形流动,认为是剪切流动区;当 $r_1<r\leq R$ 时,为颗粒迁移形成的滑移层,称其为滑移流动区。膏体内流动部分即由上述3部分构成,如图1所示。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浆体主流区之间,其黏度远低于浆体主流区的黏度。当膏体受到剪切作用时,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,膏体流动过程中的速度分布在壁面上表现出跃迁,形成所谓的表观滑移流动。

1.1 主流区流态

在主流区取厚度为 dr ,流速为 v 的环形流动微元,其相应的流量 dQ_c 为

$$dQ_c = v(2\pi r)dr \quad (1)$$

对式(1)进行积分,进行积分变换后得到主流区的流量(Q_c)为

$$Q_c = 2\pi \int_0^{r_1^2} r^2 dv \quad (2)$$

由于剪切应力在径向上按线性分布,则有 $r=r_1\tau/\tau_w$,其中 τ 为轴心处切应力, τ_w 为 $r=r_1$ 处切应力,该位置与管壁相距 $R-r_1$,把非牛顿流体层流条件下的流速梯度关系带入式(2)可得

$$Q_c = \pi \int_0^{\tau_w} [(r_1/\tau_w)\tau]^2 f(\tau)(r_1/\tau_w)d\tau \quad (3)$$

式中: $r_1=R-\delta$; δ 为滑移层厚度,由于 $\delta\rightarrow 0$,代入式

(3)可以得到

$$Q_c = \frac{\pi R^3}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} f(\tau)\tau^2 d\tau \quad (4)$$

若 v_c 为半径 $0\rightarrow r_1$ 内主流区的平均流速,则有

$$Q_c = \pi r_1^2 v_c \quad (5)$$

联合式(4)和(5),得到主流区的平均流速为

$$v_c = \frac{R}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (6)$$

1.2 滑移区流态

在滑移流动区,即 $r_1<r\leq R$ 时,由于滑移层内为黏度极低的牛顿流体,设其黏度为 μ_s ,由于剪切力呈线性分布,有 $\tau=r\Delta p/(2L)$ (式中: L 为管段长度; Δp 为管段压差)。牛顿流体的流速梯度有

$$\frac{dv_s}{dr} = -\frac{\tau}{\mu_s} = -\frac{r}{2} \cdot \frac{\Delta p}{L} \cdot \frac{1}{\mu_s} \quad (r_1<r\leq R) \quad (7)$$

对式(7)进行积分,同时带入边界条件,可以得到滑移区流速:

$$v_s = \frac{\Delta p}{4L} \left(\frac{R^2 - r^2}{\mu_s} \right) \quad (r_1<r\leq R) \quad (8)$$

由式(8)可知,由管壁滑移引起的附加流量(Q_s)为

$$Q_s = \int_{R-\delta}^R 2\pi r v_s dr = \pi v_s (R^2 - R\delta + \frac{\delta^2}{3}) \quad (9)$$

由于滑移层厚度极薄, $\delta\rightarrow 0$,式(9)可以简化为

$$Q_s = \pi R^2 v_s \quad (10)$$

1.3 总阻力计算

根据在膏体管道流动过程中,流动结构由柱塞流动区、剪切流动区以及滑移流动区3部分组成,系统流量等于上述三流区的总流量,流速等于滑移速度和主流区平均流速,根据管流中剪切速率的定义 $\gamma=4v/R$,联合式(6)和(10)得到在管径为 R 的管中考虑膏体产生



图1 管道内膏体流态分布

Fig. 1 Distribution of paste flow in pipe

管壁滑移时的基本流动方程为

$$\frac{4v}{R} = \frac{4v_s}{R} + \frac{4}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (11)$$

对式(11)进行积分变换,同时省略高次项得

$$\frac{4v}{R} = \frac{4v_s}{R} + \frac{\tau_w}{\mu_c} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right)^3 \right] \quad (12)$$

考虑滑移层厚度 δ 、壁面滑移速度 v_s 、滑移层黏度 μ_s 与壁面剪切应力之间的关系^[17],进行变换可以得出

$$\left(\frac{8\delta}{Dv_s} + \frac{1}{\mu_c} \right) \cdot \tau_w = \frac{8V}{D} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\tau_y}{\mu_c} \quad (13)$$

根据管内流动的受力平衡分析,有 $\Delta P/L = 4\tau_w/D$,即可得到考虑管壁滑移作用的管道摩擦阻力计算公式:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{4}{D} \cdot \left(\frac{8V}{D} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\tau_y}{\mu_p} \right) \left/ \left(\frac{8\delta}{D\mu_{slip}} + \frac{1}{\mu_p} \right) \right. \quad (14)$$

式中: μ_p 为料浆塑形黏度; δ 为滑移层厚度; 有 $\delta = \left(1 - \frac{f_v}{f_{vm}} \right) \cdot D_c$, 其中 f_v 为膏体体积浓度; f_{vm} 为浆体固体极限体积浓度; D_c 为加权平均粒径; μ_s 为滑移层黏度,由于其黏度极低,可将其直接视为清水,取常温状态下的清水黏度值,即有 $\mu_s = 1.05 \text{ mPa/s}$ 。通过室内试验测得膏体的屈服应力及塑性粘度值等参数,根据式(14)即可求得考虑壁面滑移效应的膏体管道输送阻力。

2 实验

2.1 试验材料

试验所用的基础物料来自非洲谦比希铜矿。全尾砂由深锥浓密机底流取样孔取样,经过晾晒烘干后备用。经测定,全尾砂平均密度为 2.67 t/m^3 ,密实密度为 1.392 t/m^3 ,密实孔隙率平均为 47.87% (见表1)。经激光粒度仪测定,全尾砂中粒径 $< 74 \mu\text{m}$ 的颗粒占 70.845% ,粒径 $< 37 \mu\text{m}$ 的颗粒占 46.975% ,粒径 $< 20 \mu\text{m}$ 的颗粒占 35% 左右,细粒级含量较多。测得全尾砂颗粒的不均匀系数为 $18.3(d_{60}/d_{10})$,曲率系数为 $1.36(d_{30}^2/(d_{10} \times d_{60}))$,表明尾砂颗粒分布较广,密实程度较好(见图2)。废石为井下掘进破碎废石,粒级在 10 mm 。废石密度平均为 2.54 t/m^3 ,密实密度为 2.015 t/m^3 ,粒径 $< 74 \mu\text{m}$ 的颗粒含量占 5.53% ,粒径 $< 1 \text{ mm}$ 的颗粒含量占 44.3% ,粒径 $< 5.6 \text{ mm}$ 的颗粒含量占

82.47% ,废石整体粗颗粒含量较高,掺入一定量废石可以调节物料中粗细颗粒比例。水泥采用的是恩多拉拉法基水泥厂生产的 32.5 号普通硅酸盐水泥,密度为 3.05 t/m^3 ,水采用了生活用的自来水。

表1 全尾砂、废石的基本参数

Table 1 Basic parameters of total tailings and waste

Material	Density/ ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	Compacted volume mass/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	Compacted porosity/%
Total tailing	2.671	1.392	47.87
Waste	2.540	2.015	27.14

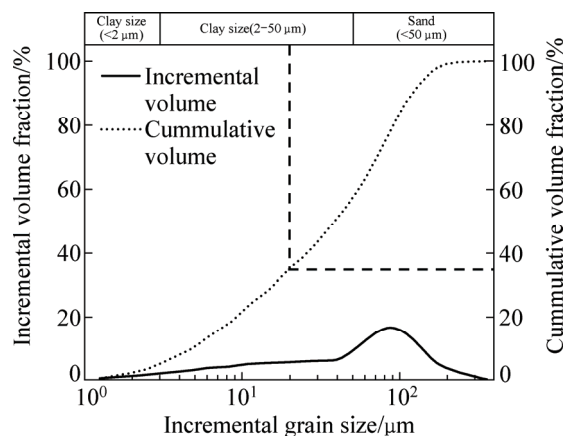


图2 全尾砂粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of total tailings

2.2 试验原理

采用传统流变仪等手段很难准确测量流变参数,甚至同一批次的料浆在不同时刻测量都表现出较大的波动性,整组流变参数的离散性导致数据可靠性降低。为准确获取膏体料浆的流变参数,设计了倾斜管试验^[18]。根据水力学原理推导流变参数的计算方式。取管道内一段膏体微元进行受力分析,如图3所示。

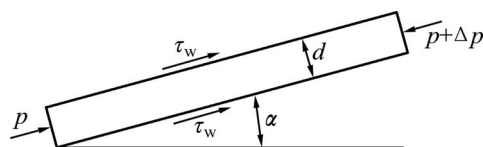


图3 倾斜管内膏体受力分析

Fig. 3 Stress analysis of paste in inclined pipe

当膏体在倾斜管道中运动时,膏体微元的运动平衡方程为

$$\tau_w \pi dl - \Delta p \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 l \rho g \sin \alpha \quad (15)$$

式中: τ_w 为浆体切应力, Pa; d 为微元直径, m; l 为料浆微元体长, m; α 为管道倾角, ($^\circ$); p 为浆体自然状态下的压力, Pa; Δp 为浆体两端面压差, Pa; ρ 为料浆密度, kg/m^3 。

式(15)经过积分简化后得到

$$\tau_w = \frac{D\Delta p}{4L} + \rho \frac{Dg}{4} \sin \alpha \quad (16)$$

式中: τ_w 为浆体管壁切应力, Pa; D 为管道直径, m; L 为管道长度, m; α 为管道倾角, ($^\circ$); ρ 为料浆密度, kg/m^3 。

根据 Buckingham 方程可知:

$$\frac{8v}{D} = \frac{\tau_w}{\eta} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_0}{\tau_w} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4 \right] \quad (17)$$

式中: τ_0 为屈服应力, Pa; η 为塑性黏度, Pa·s; v 为流速, m/s。

在柱塞流区, 膏体切变率与切应力呈线性关系, 联合式(16)和(17), 经过简化略去高次项可以得到

$$\tau_w = \frac{4}{3} \tau_0 + \frac{8v}{D} \eta \quad (18)$$

根据伯努利方程, 考虑管道内膏体高度和膏体流速和压差的关系可以得到

$$\Delta p = \rho \left(Lg \sin \alpha - giL - \frac{v^2}{2} \right) \quad (19)$$

式中: i 为水力坡度。根据以往研究^[4], 结构流中膏体水力坡度可由式(20)计算:

$$i = \frac{16}{3D} \tau_0 + \frac{32v}{D^2} \eta \quad (20)$$

联合式(16)~(20)可以得到

$$\frac{4}{3} \tau_0 + \eta \frac{8v}{D} = \frac{\rho D}{4L} \cdot \left(gL \sin \alpha - g \frac{16gL}{3D} \tau_0 - \frac{32gLv}{D^2} \eta - \frac{v^2}{2} \right) + \frac{\rho Dg \sin \alpha}{4} \quad (21)$$

通过改变角度 α 控制倾斜管的充填倍线, 得到不同倾斜角度下的管道流速 v , 管道直径 D 、管道长度 L 和料浆密度 ρ 在试验前可以测定。方程可认为是关于屈服应力 τ_0 和塑性黏度 η 的方程。通过对不同倾斜角度下速度的测量, 拟合出流变参数。根据计算原理, 作者自制了倾斜管试验装置, 如图4所示。根据实验方案进行流变参数的求解, 进而研究不同物料配比下膏体管道阻力变化规律^[19]。

2.3 试验方案

在膏体配料中考虑了浓度、水泥掺量对摩擦阻力

损失的影响。试验中浓度范围在 68%~72%(质量分数), 水泥按固体颗粒总含量的 0~11% 进行添加, 尾废比按照 8:2~6:4 的配比进行添加, 具体试验方案见表2。管道为不锈钢管, 内径为 25 mm, 弯管处为橡胶软管连接。试验采用 $L_9(3^3)$ 正交设计, 考虑三水平三因素共计 9 组试验。试验中首先在盛料筒中注入一定液位的料浆, 在统计时间内持续进料, 保证盛料筒内液位保持不变。通过测定一定时间内放出的物料量计算在不同角度下料浆的流速。

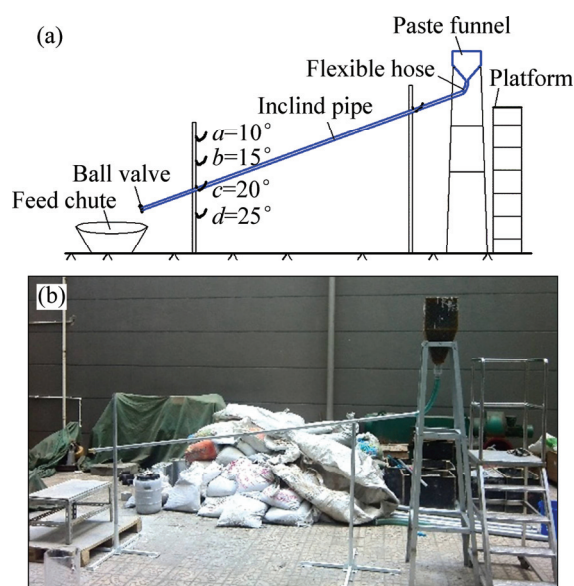


图4 倾斜管试验装置

Fig. 4 Experimental facility of inclined pipe test: (a) Design model; (b) Dimensional scaled model

表2 $L_9(3^3)$ 试验设计方案

Table 2 Scheme of experiment $L_9(3^3)$

Sample No.	Mass concentration/%	Binder-(tailing+ Waste) ratio	Tailing-waste ratio
1	68	1:4	8:2
2	70	1:8	7:3
3	72	1:12	6:4

3 结果与讨论

根据测定的试验流速, 通过式(21)计算出流变参数, 从而计算出考虑管壁滑移效应的膏体管道输送摩擦阻力的损失, 其结果见表3。

根据正交试验结果对不同因素下的摩擦阻力的损失进行了回归分析, 回归方程如式(22)所示:

表3 管道摩擦阻力试验结果

Table 3 Experimental result of pipe resistance

Sample No.	Mass concentration/%	Binder-(tailing+waste) ratio	Tailing-waste ratio	Resistance
1	68	1:4	8:2	3.78
2	68	1:8	7:3	2.24
3	68	1:12	6:4	1.51
4	70	1:4	7:3	3.53
5	70	1:8	6:4	2.42
6	70	1:12	8:2	1.77
7	72	1:4	6:4	3.22
8	72	1:8	8:2	2.87
9	72	1:12	7:3	1.96

$$y = -167.0014589 + 4.454118085x_1 + 28.177363121x_3 - 0.029692958431x_1x_1 + 0.005649227621x_2x_2 + 0.0027693302380x_1x_2 - 0.29267518561x_1x_3 - 0.7105258338x_2x_3 \quad (22)$$

式中： x_1 为料浆固体质量浓度，%； x_2 为(全尾+废石)与水泥的比； x_3 为全尾砂和(全尾砂+废石)的比。方程相关系数 $R=0.9998$ ，调整后的相关系数为 $R_a=0.9986$ ，方程可靠性较高。

3.1 浓度与摩擦阻力的关系

图5所示为膏体浓度与管道摩擦阻力的关系。从图5中可以看出，膏体管道摩擦阻力的损失与膏体浓度基本呈正相关增长。图5(a)表明尾废比在7:3时膏体摩擦阻力损失随着浓度增加而逐渐增大，同时说明灰砂比对摩擦阻力损失有较大影响。灰砂比越大，水泥含量越高，摩擦阻力损失越大。图5(b)所示是不同尾废比下摩擦阻力损失随浓度的变化规律。当浓度较小时，尾废比对摩擦阻力损失影响不大，但随着浓度的提高，尾废比因素导致的差异越来越明显，即尾废比越小，摩擦阻力损失越大。在低浓度条件下，膏体屈服应力及表观黏度增加缓慢，浆体管壁滑移流动主要来源于静态壁面损耗效应，即浆体在很小的剪切应力条件下即产生滑移流动，滑移流动的减阻作用与黏度增加导致的增阻作用相互抵消，最终导致浆体的摩擦阻力损失增长较为平缓。随着浓度的逐渐增大，在滑移层由于颗粒迁移效应使滑移切应力逐渐增大，膏体摩擦阻力损失也随之提高。

3.2 灰砂比与摩擦阻力的关系

图6所示为灰砂比与摩擦阻力的关系。由图6可

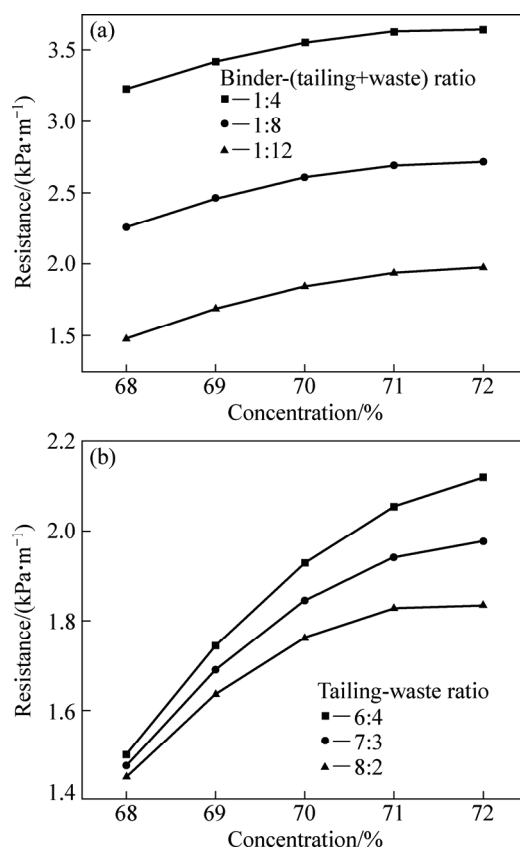


图5 膏体浓度与管道摩擦阻力的关系

Fig. 5 Relationship between concentration and resistance: (a) Tailing-waste ratio of 7:3; (b) Binder-(tailing+waste) ratio of 1:12

以看出，随着砂灰比的增大，膏体摩擦阻力损失逐渐减小，水泥添加量与摩擦阻力损失正相关。由图6(a)可看出，在尾废比一定时，摩擦阻力损失与灰砂比基本上呈线性变化。图6(b)反应了当浓度一定时，不同尾废比下管道摩擦阻力与灰砂比的关系。当砂灰比较小时，尾废比越大，摩擦阻力损失最大。在砂灰比逐渐增大的过程中，砂灰比导致的差异性越来越不明显，基本稳定在1.5~1.8 kPa/m。当水泥含量逐渐增加时，水泥水化所需的自由水越多，导致膏体稠度增加、和易性变差，屈服应力逐渐变大，摩擦阻力损失也随之增大。当水泥含量较少时，水泥水化的需水量也对应减少。自由水的增加增强料浆流动的和易性，弱化其他因素对管阻的影响，使摩擦阻力损失基本稳定在较低区间。

3.3 尾废比与摩擦阻力的关系

图7所示为尾砂比与摩擦阻力的关系。由图7可以看出，尾废比与管道摩擦阻力损失之间基本呈现

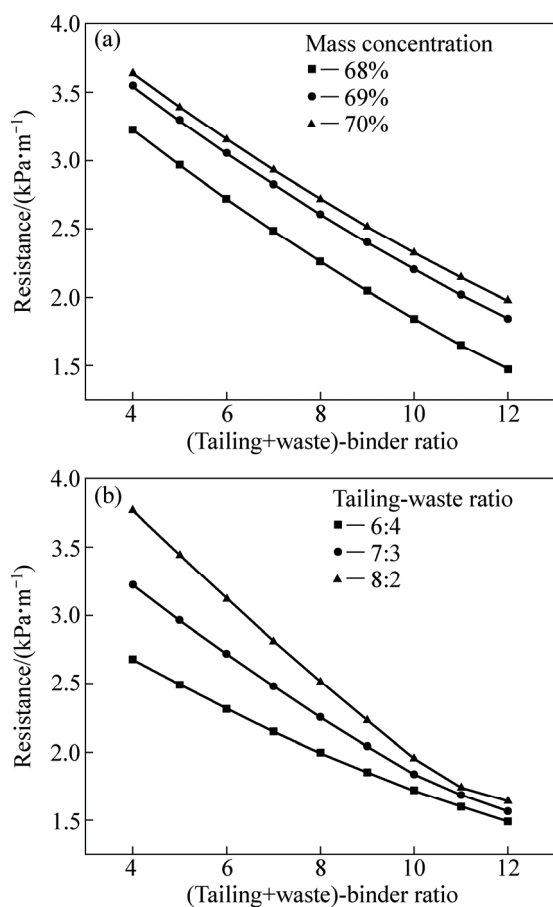


图6 灰砂比与阻力关系

Fig. 6 Relationship between resistance and binder-(tailing+waste) ratio: (a) Tailing-waste ratio of 7:3; (b) Mass concentration of 68%

正相关关系。由图 7(a)可看出,在水泥含量一定时,尾废比越大,即全尾砂含量越高,管道摩擦阻力损失就越大。由图 7(b)可看出,在质量浓度一定时,尾废比越大,管道摩擦阻力也逐渐增大,同时,不同水泥含量时也有较大差别。当灰砂比较低为 1:12 时,管道摩擦阻力随尾废比的变化基本不明显,而当灰砂比为 1:4 时,摩擦阻力损失随尾废比的增长率最高达到 40% 左右。可见两种物料的不同配比对膏体阻力特性有较大影响。

3.4 响应面分析

响应面法能够分析因变量与多个自变量之间的关系,同时可以反映试验中不同因素之间的交互作用。应用 Design expert 对试验数据进行了分析,得到了关于膏体管道输送摩擦阻力的响应面函数。从图 8(a)中可以看出,在质量浓度和水泥添加量的交互作用中,摩擦阻力损失与水泥含量表现出明显的梯度变化。当

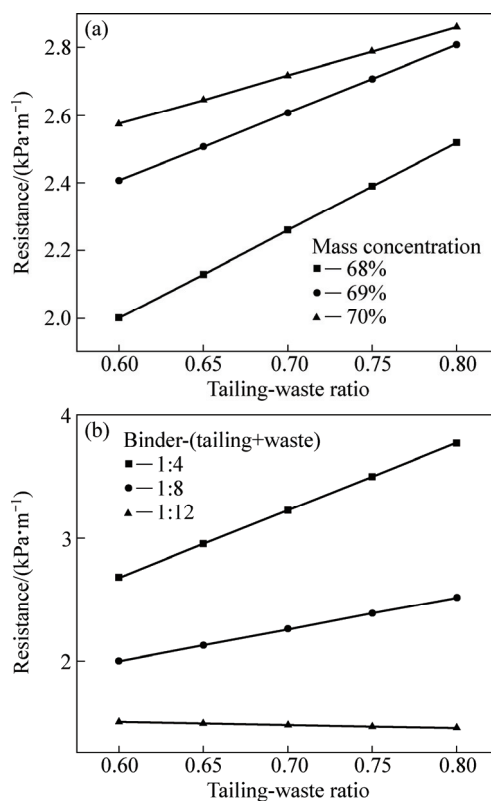


图7 尾废比与摩擦阻力关系

Fig. 7 Relationship between resistance and tailing-waste ratio: (a) Binder-(tailing+waste) ratio of 1:8; (b) Mass concentration of 68%

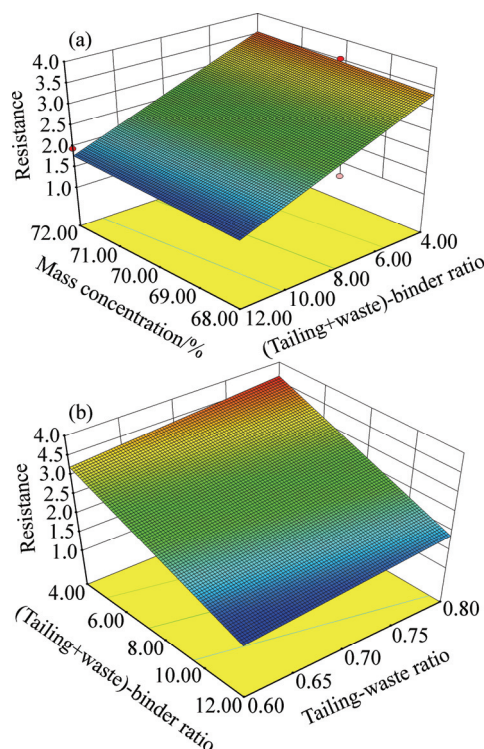


图8 多因素响应面分析

Fig. 8 Multivariate analysis of response surface: (a) Tailing-waste ratio of 7:3; (b) Mass concentration of 70%

水泥含量较高时, 摩擦阻力损失较大; 当水泥含量较低时, 摩擦阻力损失在试验浓度区间保持低位。从图8(b)水泥含量和尾废比的交互影响中可以看出, 在水泥含量最大, 尾废比值最大时管道摩擦阻力达到最大值; 在水泥含量较小, 尾废比值低时出现最低摩擦阻力损失。摩擦阻力损失整体上沿灰砂比呈梯度分布。通过对3种影响因素的分析得到了各因素对管道摩擦阻力损失的影响顺序由大到小依次为灰砂比、尾废比、浓度。

4 结论

1) 建立考虑管壁滑移效应的膏体管道输送阻力模型。将管道内膏体流区划分为主流区和滑移流动区, 其中主流区又分为剪切流动区和柱塞流动区。根据流体力学理论建立主流区和滑移流动区的流动方程, 推导出考虑管壁滑移效应的摩擦阻力计算公式。

2) 针对传统流变仪对全尾砂、废石膏体适应性差, 流变参数离散性大的问题, 设计倾斜管试验模型并推导流变参数计算方式: 通过测定倾斜管不同倾斜角度 α 下的管道流速 v 计算管道屈服应力 τ_0 和塑性黏度 η 。根据理论模型自制倾斜管试验装置, 并进行不同物料配比下的试验, 得到膏体流变学参数, 根据推导的摩擦阻力计算公式求得不同配比下膏体管道摩擦阻力数据。

3) 利用谦比希铜矿充填物料进行了考虑物料质量浓度、灰砂比和尾废比的三水平三因素 $L_9(3^3)$ 正交试验。分别对质量浓度、灰砂比和尾废比与膏体管道摩擦阻力损失的关系进行了分析, 并应用 Design expert 软件进行了响应面分析, 研究多因素之间的交互作用。得到了各因素对管道摩擦阻力损失的影响程度的顺序由大到小依次为灰砂比、尾废比、浓度。

REFERENCES

- [1] 古德生, 周科平. 现代金属矿业的发展主题[J]. 金属矿山, 2012(7): 1-8.
GU De-sheng, ZHOU Ke-ping. Development theme of the modern metal mining[J]. Metal Mine, 2012(7): 1-8.
- [2] LIU Zhi-xiang, LAN Ming, XIAO Si-you, GUO Hu-qiang. Damage failure of cemented backfill and its reasonable match with rock mass[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(3): 954-959.
- [3] BELEM T, BENZAAZOUA M. Design and application of underground mine paste backfill technology[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(2): 147-174.
- [4] 吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 王贻明, 焦华喆, 刘斯忠. 结构流充填料浆管道输送阻力特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(12): 4325-4330.
WU Ai-xiang, LIU Xiao-hui, WANG Hong-jiang, WANG Yi-ming, JIAO Hua-zhe, LIU Si-zhong. Resistance characteristics of structure fluid backfilling slurry in pipeline transport[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(12): 4325-4330.
- [5] 张修香, 乔登攀. 粗骨料高浓度充填料浆的管道输送模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 258-266.
ZHANG Xiu-xiang, QIAO Deng-pan. Transportation of high density filling slurry with coarse aggregates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 258-266.
- [6] NAZARI B, MOGHADDAM R H, BOUSFIELD D. A three dimensional model of a vane rheometer[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2013, 42: 289-295.
- [7] 王少勇, 吴爱祥, 尹升华, 韩斌, 王洪江. 膏体料浆管道输送压力损失的影响因素[J]. 工程科学学报, 2015, 37(1): 7-12.
WANG Shao-yong, WU Ai-xiang, YIN Sheng-hua, HAN Bin, WANG Hong-jiang. Simulation and experiment of pipeline Influence factors of pressure loss in pipeline transportation of paste slurry[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(1): 7-12.
- [8] 吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 焦华喆, 王少勇, 刘斯忠. 恒定剪切作用下全尾膏体微观结构演化特征[J]. 工程科学学报, 2015, 37(2): 145-149.
WU Ai-xiang, LIU Xiao-hui, WANG Hong-jiang, JIAO Hua-zhe, WANG Shao-yong, LIU Si-zhong. Microstructural evolution characteristics of an unclassified tailing paste in constant shearing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(2): 145-149.
- [9] 张修香. 高浓度充填料浆流变模型研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013: 34-35.
ZHANG Xiu-xiang. Research on rheological of high density filling slurry[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013: 34-35.
- [10] SAAK A W, JENNINGS H M, SHAH S P. The influence of wall slip on yield stress and viscoelastic measurements of cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(2): 205-212.
- [11] CLAYTON S, GRICE T G, BOGER D V. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 70(1/4): 3-21.
- [12] SCHOWALTER W R, CHRISTENSEN G. Toward a rationalization of the slump test for fresh concrete: Comparisons of calculations and experiments[J]. Journal of Rheology, 1998, 42(4): 865-870.
- [13] 刘超. 基于环管输送试验的全尾砂膏体充填料浆流变特性研

- 究[D]. 衡阳: 南华大学, 2011: 9–10.
- LIU Chao. Research on rheological properties of paste filling based on loop transmission test[D]. Hengyang: University of South China, 2011: 9–10.
- [14] KAUSHAL D R, SATO K, TOYOTA T, FUNATSU K, TOMITA Y. Effect of particle size distribution on pressure drop and concentration profile in pipeline flow of highly concentrated slurry[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2005, 31(7): 809–823.
- [15] KALYON D M. Apparent slip and viscoplasticity of concentrated suspensions[J]. *Journal of Rheology*, 2005, 49(3): 621–640.
- [16] 赵国彦, 马 举, 彭 康, 杨 清, 周 礼. 基于响应面法的高寒矿山充填配比优化[J]. *北京科技大学学报*, 2013, 35(5): 559–565.
- ZHAO Guo-yan, MA Ju, PENG Kang, YANG Qing, ZHOU Li. Mix ratio optimization of alpine mine backfill based on the response surface method[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35(5): 559–565.
- [17] 杨小生, 张荣曾, 陈 苾. 宾汉流管壁滑移速度预测模型[J]. *矿冶工程*, 1993, 13(4): 24–27.
- YANG Xiao-sheng, ZHANG Rong-zeng, CHEN Jin. Prediction model for the wall slip velocity of a bingham flow pipe[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1993, 13(4): 24–27.
- [18] 张 兵, 刘晓辉, 王贻明. 基于倾斜管道实验的矿山充填膏体流变特性研究[J]. *金属矿山*, 2014(10): 22–26.
- ZHANG Bing, LIU Xiao-hui, WANG Yi-ming. Study on rheological properties of the paste filling slurry based on inclined pipeline experiment[J]. *Metal Mine*, 2014(10): 22–26.
- [19] 杨 建, 王新民, 张钦礼, 柯愈贤. 含硫高黏性三相流态充填浆体管道输送性能[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(4): 1049–1055.
- YANG Jian, WANG Xin-min, ZHANG Qin-li, KE Yu-xian. Pipeline transportation properties of high viscosity sulfur-content filling slurry in three-phase flow[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(4): 1049–1055.

Transport resistance characteristic of paste pipeline considering effect of wall slip

WU Ai-xiang, CHENG Hai-yong, WANG Yi-ming, WANG Hong-jiang, LIU Xiao-hui, LI Gong-cheng

(Key Laboratory for High Efficient Mining and Safety in Mental Mine, Ministry of Education, School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to research the resistance behavior of paste backfill pipeline, the paste was divided into three parts: plug flow, shear flow and wall slip flow based on the structure-flow. And a pipeline resistance model was built considering the effect of wall slip. The calculating methods of rheological parameters were inferred from inclined-tube experiments through calculating the yield stress and plastic viscosity by measuring inclined angles in different tubes, and a pilot apparatus was fabricated. Focusing on the basic characters of backfill material in Chambishi copper mine, a orthogonal test was conducted to investigate the effect of solid concentration, cement-sand ratio and tailing-waste ratio for pipeline resistance. After analyzing interaction effect of different factors by response surface methodology, the order of effect from big to small are cement-sand ratio, tailing-waste ratio, concentration. The result is the powerful complement for paste pipeline resistance and research.

Key words: paste backfilling; resistance characteristics; wall slip; inclined pipe; response surface

Foundation item: Project (51374034, 51374035) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2012BAB08B02) supported by the National Key Technologies R&D Program for the 12th Five-year Plan of China

Corresponding author: WU Ai-xiang; Tel: 13501268918; E-mail: wuaixiang@126.com

(编辑 李艳红)