



膏体尾矿管内滑移流动阻力特性及其近似计算方法

刘晓辉¹, 吴爱祥², 姚建¹, 朱权洁¹

(1. 华北科技学院 安全工程学院, 廊坊 065201

2. 北京科技大学 资源与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 管道输送是尾矿膏体处置的关键工艺, 膏体尾矿具有非牛顿流体特性, 在流动中伴随有管壁滑移效应。为实现对膏体管内流动阻力的精确测算, 基于非牛顿流体力学及表观滑移假说, 通过理论分析将膏体管内流动划分为柱塞区、剪切区及滑移区, 结合宾汉流变模型, 分析不同区域流速、应力及流量的分布状态, 构建膏体管道输送的流量平衡方程, 推导出膏体管内滑移流动的阻力公式。开展环管试验, 利用实测数据对阻力公式进行适应性分析及验证。结果表明: 膏体管内流动中存在壁面滑移现象, 流量 20~40 m³/h 条件下, 样品在 DN100 管道内流动阻力为 4000~5000 Pa/m, 在 DN150 管道内流动阻力为 2400~2600 Pa/m, 滑移流动阻力公式与实测值的误差约为 10%, 满足工程应用的精度要求。

关键词: 膏体尾矿; 管道输送; 管流阻力; 管壁滑移; 滑移速度

文章编号: 1004-0609(2019)-10-2403-08

中图分类号: TD853

文献标志码: A

尾矿膏体处置技术能够有效降低溃坝风险, 提高回水利用率, 减轻对周边生态环境的影响, 同时在减少筑坝工程量, 降低系统管理运营费用等方面也有诸多优势, 因而近年来在国内外矿山得到了广泛应用^[1]。管道输送是尾矿膏体处置的关键工艺, 膏体管内流动阻力的确定对系统设备选型、管路布置等工程问题具有重要的现实意义, 但由于膏体固体质量分数高、黏度大, 流动中表现出明显的非牛顿流体特性, 管流阻力的精确测算一直是研究的难点^[2]。现有研究采用 Bingham^[3], H-B^[4]以及 YB^[5]等流变模型来描述膏体的流动行为, 并在此基础上进行水力学分析, 推导出相应的管道层流阻力公式, 如应用较为广泛的宾汉阻力模型。上述研究仅考虑了浆体的流变特性, 而在流动边界的问题上均进行了简化处理, 即认为管壁处无滑移, 由此获得的阻力计算值往往较实测数据偏大^[6-7]。大量针对水泥浆^[8]、水煤浆^[9]、污泥^[10]的研究发现, 高浓度细颗粒浆体在管内流动中存在明显的管壁滑移效应, 其与流变性质共同支配浆体的管流规律, 对流动阻力具有重要的影响作用。马修元等^[11]通过小型浆

体输送试验装置研究了水焦浆的管壁滑移效应, 发现滑移作用能够在一定程度上降低流动阻力, 且滑移减阻率随流速增大而增大。吕馥言^[12]以煤泥为测试物料, 通过管道输送模拟试验发现煤泥管流阻力损失随滑移层厚度的增加呈指数形式降低。吴爱祥等^[13]通过倾斜管道试验研究了膏体充填料浆的流变特性, 并在此基础上分析了流变与管壁滑移效应对管流阻力的影响作用。

综上所述, 作为典型的高浓度细颗粒浆体, 膏体尾矿管内流动中存在滑移效应, 但现有研究仅对其减阻作用进行了定性的探讨和分析, 尚未提出有具体的阻力计算公式。为实现膏体管流阻力的精确测算, 本文将膏体视为宾汉流体, 通过非牛顿流体力学及表观滑移假说的综合应用, 对其管内流动的应力、流速及流量分布进行了理论分析, 建立了膏体管内运移的流量平衡方程, 最终推导出考虑滑移减阻效应的膏体管流阻力公式, 并通过环管试验对其适应性进行了分析验证。本文研究结论可为类似高浓度细颗粒浆体的管流阻力测算提供借鉴意义。

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助(3142017086); 国家自然科学基金资助项目(51604115); 国家重点研发计划项目(2017YFC0602903)

收稿日期: 2018-12-11; **修订日期:** 2019-06-05

通信作者: 刘晓辉, 讲师, 博士研究生; 电话: 010-61591229; E-mail: liuxiaohui28@163.com

1 壁面滑移效应的形成机理

壁面滑移是指流动过程中流体和与之接触的固体壁面之间存在的相对运动^[14]。壁面滑移现象广泛存在于各种非牛顿流体的流动过程中，其形成机理主要包括以下3种：真实滑移，表观滑移，负滑移^[15]。研究表明：高浓度细颗粒悬浮液的壁面滑移为表观滑移，其形成主要来源于两方面，一种称作静态壁面效应，如图1(a)所示，其是指固体壁面附近的颗粒不能像在浆体内部一样有效地填充壁面附近空间，导致壁面上形成黏度较低，厚度很薄的液体层(即滑移层)，这种滑移层在浆体不流动时也会存在^[16]。另一种则与浆体流动过程中的颗粒迁移有关，称之为动态壁面效应^[17]，如图1(b)所示，即浆体在管内流动时，沿径向剪切率是变化的，壁面处最大，中心处为零，不均匀流场下固体颗粒由管壁向中心发生径向迁移，靠近壁面颗粒的布朗运动被限制，从而在管壁处形成一层黏度极低的滑移层。

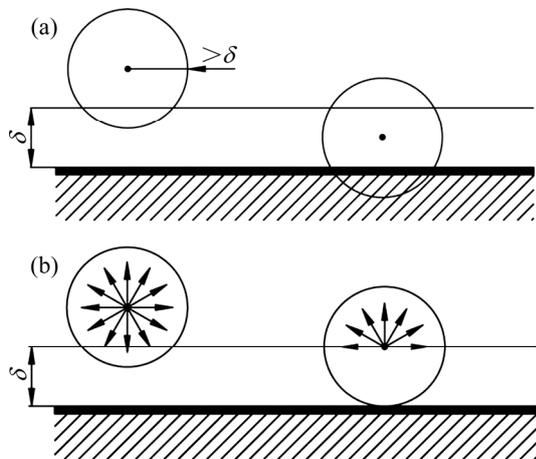


图1 悬浮液表观滑移的形成机理^[18]

Fig.1 Formation mechanism of apparent wall slip for high concentration suspension^[18]: (a) Particle microscopic image of static wall effect; (b) Particle microscopic image of dynamic wall effect

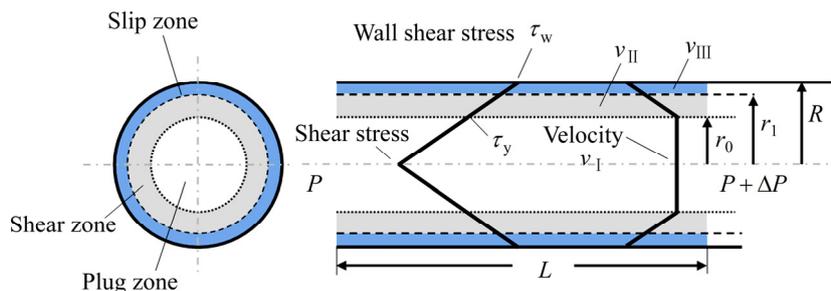


图2 膏体内流动结构

Fig.2 Flow structure of paste tailings in pipe

SOLTANI等^[19]研究发现：滑移层厚度随固相粒度的增大而成比例增大，但不随温度变化，且其在较低的 ϕ/ϕ_m 值下为零，在 ϕ/ϕ_m 达到某临界值后突然增加，其中 ϕ 和 ϕ_m 分别为浆体的体积分数和极限体积分数(Maximum packing fraction)， ϕ/ϕ_m 表示浆体中固体颗粒的最大填充率。KALYON等^[20]采用扫描电镜和荧光分析法观察到浆体与壁面之间滑移层的存在，其厚度在2~30 μm 之间，且滑移层厚度取决于浓度和颗粒直径，与流速、流动通道几何特性无关。KALYON^[21]针对滑移层厚度的影响因素，综合了EROL、ARAL及YILMAZER等对铅粉、炭化硅、玻璃粉、硫酸铵等多种典型高浓度悬浮液滑移特征的研究结果，获得了如下经验关系：

$$\frac{\delta}{d_p} = 1 - \frac{\phi}{\phi_m} \quad (1)$$

式中： δ 为滑移层厚度； d_p 为颗粒的调和平均粒径，则对于同一样品，滑移层厚度与其体积分数呈线性相关。式(1)经验关系的构建参考了大量样本数据，最大填充率 ϕ/ϕ_m 的取值范围为0.17~0.94，具有较好的参考价值。

2 膏体内滑移流动分析

2.1 管内滑移流动结构

由于膏体屈服应力大、黏度高，管道输送中一般为层流运动^[22]。根据表观滑移理论^[23]对膏体内层流进行如下假设：1) 滑移层内流体在管道壁面上满足无滑移条件；2) 滑移层厚度极小，不影响浆体主体部分的黏度特性；3) 滑移层厚度在壁面上处处相同，且不受管径大小影响；4) 层流条件下，管道中心到壁面的剪切应力沿径向成线性变化。综上所述，膏体在圆管内层流条件下的流动结构如图2所示，浆体径向剪切应力 τ 按线性分布，壁面处最大，中心处为零。对于

屈服应力为 τ_y 的流体, 假设当 $r = r_0$ 时, 有 $\tau = \tau_y$, 即 $r_0 = \tau_y \cdot R / \tau_w$, τ_w 为管壁切应力; 设滑移层厚度为 δ , 则 $r_1 = R - \delta$. 在 $0 < r < r_0$ 范围内, 有 $\tau < \tau_y$, 此时膏体内部无剪切变形, 各点流速相同, 即为柱塞流动区; 在 $r_0 < r < r_1$ 范围内, 有 $\tau > \tau_y$, 膏体发生剪切流动, 即为剪切流动区; 在 $r_1 < r < R$ 范围即为颗粒迁移形成的滑移层, 称其为滑移流动区。

2.2 膏体内流速分布

在滑移流动区内, 流体黏度较低, 可将其视为牛顿流体, 则有 $f(\tau) = \tau / \mu$, 其中 μ 为滑移流体(可视为清水)的黏度。由于流体在径向上的切应力 τ 呈线性分布, 有 $\tau = \tau_w r / R$, r 为滑移区内任意点半径, 则滑移区内的流速分布为

$$v_{III}(r) = \int_r^R f(\tau) dr = \frac{\tau_w}{2R\mu} \cdot (R^2 - r^2) \quad (r_1 < r < R) \quad (2)$$

表观滑移理论中对滑移速度 v_{slip} 的定义为: 剪切流动区和滑移层连接处的速度与管道内壁的速度差^[23], 则有

$$v_{slip} = \frac{\tau_w}{2R\mu} (R^2 - r_1^2) \quad (3)$$

如图 2 所示, 取长为 L , 压差为 ΔP 的浆体柱, 由受力平衡分析可得 $\Delta P \cdot \pi R^2 = \tau_w \cdot 2\pi R \cdot L$, 即 $\tau_w = \frac{R\Delta P}{2L}$, 滑移层厚度为 δ , $r_1 = R - \delta$, 代入式(3)中, 由于 δ 值较小, 相比管径 R 趋近于 0, 忽略高次项后滑移速度表达式为

$$v_{slip} = \frac{R \cdot \tau_w}{2\mu} \left[2 \left(\frac{\delta}{R} \right) - \left(\frac{\delta}{R} \right)^2 \right] \approx \frac{\delta \tau_w}{\mu} \quad (4)$$

在剪切流动区内, 将膏体视为 Bingham 流体, 即有 $f(\tau) = \frac{\tau - \tau_y}{\mu_p}$, 其中 μ_p 为膏体的塑性黏度, 则剪切区内流速分布为

$$v_{II}(r) = v_{slip} + \int_r^{r_1} f(\tau) dr = v_{slip} + \frac{\tau_w}{2R\mu_p} \cdot (r_1 - r)^2 \quad (r_0 < r < r_1) \quad (5)$$

式(5)中, 当 $r = r_0$ 时即为柱塞流区的流速, 则有

$$v_I(r) = v_{slip} + \frac{\tau_w}{2R\mu_p} \cdot (r_1 - r_0)^2 \quad (0 < r < r_0) \quad (6)$$

2.3 膏体内流量分布

根据前述分析, 膏体内流动的流量 Q 分别由滑移区流量 Q_{III} 、剪切区流量 Q_{II} 以及柱塞区流量 Q_I 3 部分叠加而成。对于柱塞区有:

$$Q_I = \pi r_0^2 \cdot v_I = v_{slip} \cdot \pi r_0^2 + \frac{\pi \Delta P}{4L\mu_p} (R^2 r_0^2 - 2Rr_0^3 + r_0^4) \quad (7)$$

在剪切区和滑移区, 由于流速及剪应力在径向上的分布保持连续, 则 Bingham 流体在管道内层流流量为

$$Q_{II} + Q_{III} = \int_{r_0}^R v_{II} \cdot 2\pi r dr = v_{slip} \cdot \pi (R^2 - r_0^2) + \frac{\pi \Delta P}{4L\mu_p} \left(\frac{R^4}{2} - \frac{2R^3 r_0}{3} - R^2 r_0^2 + 2Rr_0^3 - \frac{5r_0^4}{6} \right) \quad (8)$$

综上所述, 膏体内滑移流动的实际流量为

$$Q = v_{slip} \cdot \pi R^2 + \frac{\pi \Delta P R^4}{8L\mu_p} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{r_0}{R} + \frac{1}{3} \frac{r_0^4}{R^4} \right) \quad (9)$$

2.4 管流阻力计算模型推导

式(9)中 $r_0 / R < 1$, 略去高次项, 变换为

$$Q = v_{slip} \cdot \pi R^2 + \frac{\pi \Delta P R^4}{8L\mu_p} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{r_0}{R} \right) \quad (10)$$

式(10)中 $\frac{r_0}{R} = \frac{\tau}{\tau_w}$, $\frac{\Delta P}{L} = \frac{2\tau_w}{R}$, 则变换为

$$\frac{4v}{R} = \frac{4v_{slip}}{R} + \frac{\tau_w}{\mu_p} - \frac{4}{3} \frac{\tau_y}{\mu_p} \quad (11)$$

式(11)中 v 为管内流动的平均流速, $4v/R$ 为平均剪切速率, 结合式(4), 变换为

$$\left(\frac{8\delta\mu_p}{D\mu} + 1 \right) \cdot \frac{D}{8v} \cdot \tau_w = \left(1 + \frac{\tau_y D}{6v\mu_p} \right) \cdot \mu_p \quad (12)$$

令: $\mu_e = \left(1 + \frac{\tau_y D}{6v\mu_p} \right) \cdot \mu_p$, $\beta_c = \frac{\delta}{\mu}$, μ_e 称之为有效黏度; β_c 为滑移系数, 则式(12)变换为

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{64}{\left(\frac{8\beta_c\mu_p + D}{D} \right) \cdot \left(\frac{D\rho_m v}{\mu_e} \right)} \cdot \frac{\rho_m v^2}{2D} \quad (13)$$

令: $Re_c = \frac{Dv\rho_m}{\mu_e}$, $X = \frac{8\beta_c\mu_p + D}{D}$, $Re_s = X \cdot Re_c$,

$$f_{slip} = \frac{64}{Re_s}$$

则将式(13)变换为范宁阻力公式的形式:

$$j_m = \frac{\Delta P}{L} = f_{slip} \cdot \frac{\rho_m v^2}{2D} \quad (14)$$

式(14)即为膏体内滑移流动的阻力公式。

3 实验

3.1 试验材料

试验材料为某钒铁矿选厂全粒级尾砂，尾砂干密度为 2.97 t/m^3 ，颗粒粒径分布较广，粒度总体偏细，其中粒径 $< 20 \mu\text{m}$ 颗粒含量达 54%，粒径 $< 74 \mu\text{m}$ 颗粒含量达 87%，中值粒径 d_{50} 为 $23 \mu\text{m}$ ，不均匀系数 C_u 为 8.9。尾砂主要化学成分为 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO ，其中 SiO_2 、 Fe_2O_3 总量约占 76%， CaO 、 MgO 总量约占 14.7%，胶凝活性较差。试验膏体由尾砂、水混合制备，设计质量分数为 73%，体积分数 ϕ 为 47.6%，同时采用沉降法^[24]测得尾砂的极限体积分数 ϕ_m 为 54%。样品流变性质及流动性指标测试结果显示：膏体塌落度 27.6 cm，稠度 116 mm，流动度 29.2 mm，屈服应力 75 Pa，塑性黏度 $0.51 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

3.2 试验系统

图 3 所示为环管试验系统的示意图，包括有 DN100 mm 及 DN150 mm 两种规格的试验管道，材质均为 16 Mn 无缝钢管，水平压力测试管段长度均为 17 m，两端布设有隔膜式压力传感器，其中 DN150 管道为 P1、P2，DN100 管道为 P3、P4，电磁流量计设置在柱塞泵出口主管道处。试验过程中的压力、流量数

据传输至上位机进行实时采集，采集频率为每秒 1 次。柱塞泵最大工作压力为 6 MPa，额定流量 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ，可通过上位机远程控制。试验主要流程如下：试验尾砂、清水经过称重计量装置进入搅拌机中，制备为设计质量分数的膏体样品。首先开展 DN100 管道的输送试验，样品经柱塞泵、换向阀、试验管道及搅拌机，在系统内循环流动，直至取得稳定的试验数据。增大柱塞泵泵速，提高输送流量，进行下一个循环的测试。当 DN100 管道的所有测试完成后，通过换向阀切换至 DN150 管道，按上述流程进行输送试验。

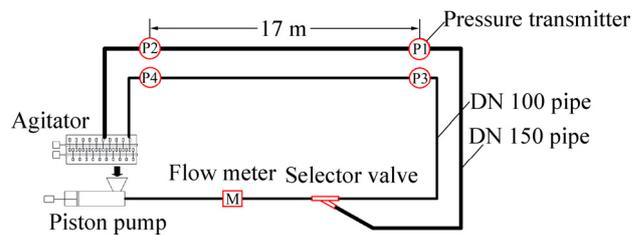


图 3 环管试验系统

Fig. 3 Loop pipeline test system

3.3 试验结果

试验流量为 $25\sim 40 \text{ m}^3/\text{h}$ ，共测试了 4 种流量下的压力数据，每种工况下的测试时间不少于 5 min，保证压力数据稳定，测试结果如图 4 所示。由图 4 可知，由于柱塞泵的脉冲作用，流量及压力值也呈现周期性

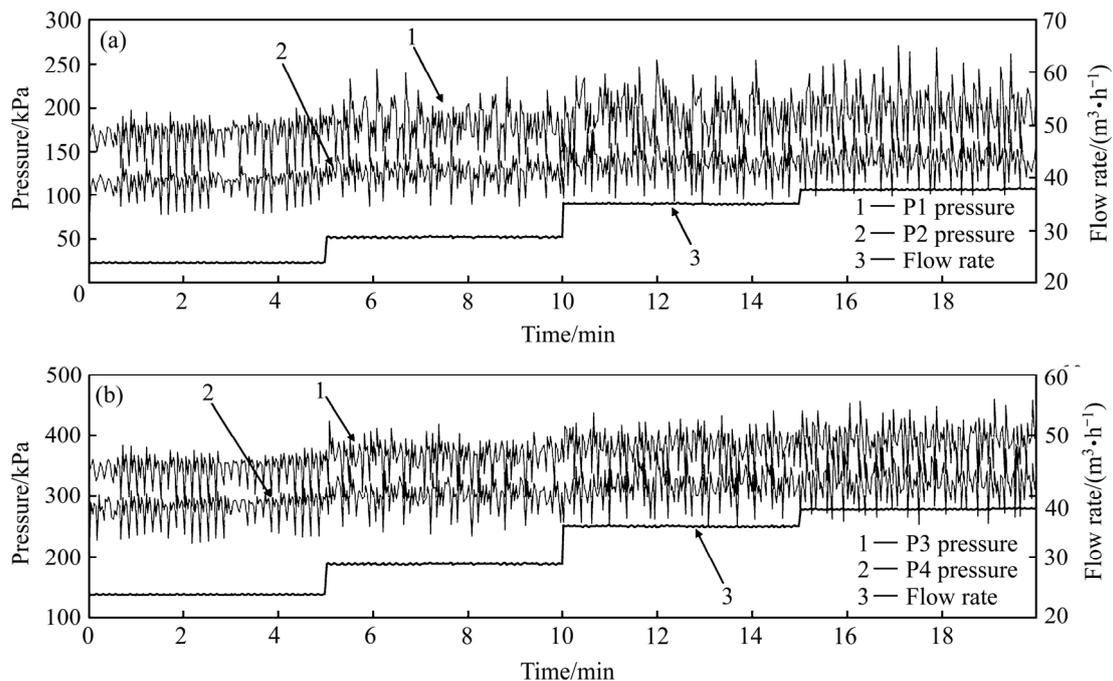


图 4 压力及流量数据变化

Fig. 4 Changes of pressure and flow rate in pipeline: (a) DN150 mm; (b) DN100 mm pipe

的波动, 在测试时间内, 随着系统流量的增大, 管内压力逐渐升高。根据压力变送器在管道上安装的先后位置, 其检测值呈逐渐降低的变化趋势, 表明膏体在管内流动过程中产生一定的阻力损失。

4 分析与讨论

4.1 管流阻力分析

根据图 4 中的压力、流量数据计算样品在不同管径、流速条件下的管流阻力, 结果如图 5 所示。系统流量 20~40 m³/h, 在 DN100 管道内, 对应流速为 0.8~1.35 m/s 时, 样品管流阻力范围为 4000~5000 Pa/m; 在 DN150 管道内, 对应流速为 0.3~0.6 m/s 时, 其管流阻力范围为 2400~2600 Pa/m。结果显示: 相同管径下, 管流阻力随流速呈线性增加, 相同流量下, 管径越小样品流动阻力越大, 管径减小 1/3, 其流动阻力增大 1.2 倍。

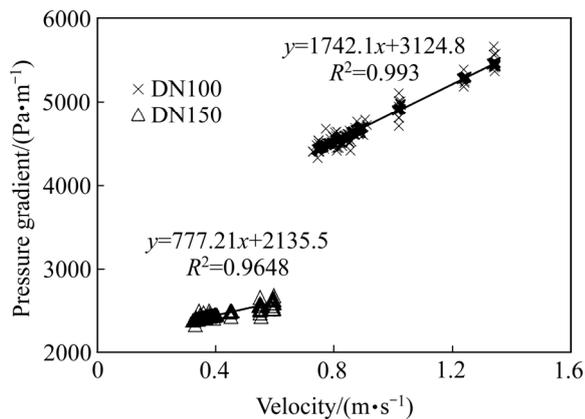


图 5 管流阻力随流速变化规律

Fig. 5 Laws of pressure gradient varying with flow velocity

4.2 滑移特性分析

图 6 所示为样品在不同管道内流动的表观流变曲线, 其横坐标为剪切速率, 即 $4v/R$, 纵坐标为管壁切应力 τ_w , 即 $R\Delta P/2L$ 。根据环管试验测得的流速 v 及压降 ΔP 数据, 绘制 $4v/R \sim R\Delta P/2L$ 坐标图, 通过线性拟合获得相应的表观流变曲线。观察显示: 表观流变曲线呈现出一定的屈服特性, 只有超过某一壁面切应力 τ_w 后样品才产生流动。其次, 同一样品在不同管道内的表观流变特性曲线并不重合, 随管径减小, 相同壁面切应力下的剪切速率略有增加, 即管径越小剪切速率越大。这是因为膏体管内滑移流动中的总剪切速率由滑移区和主流区两部分的剪切速率叠加构成 (如式(11)所示), 由于不同管径下样品的滑移速度存在

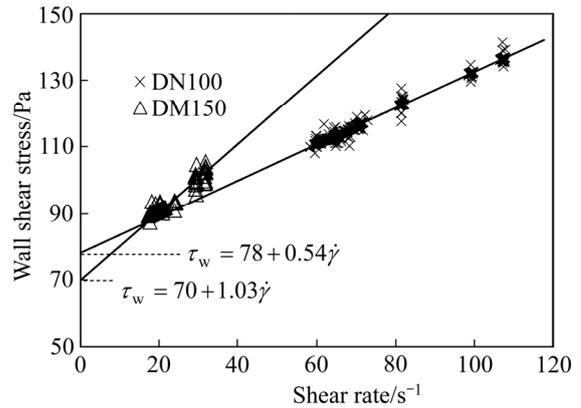


图 6 不同管道中样品的表观流变曲线

Fig. 6 Apparent rheological curve in different pipe

差异, 由此导致相同壁面剪切应力下对应的剪切速率不同, 其间接证实了膏体流动过程中管壁滑移效应的存在。

根据式(1)可计算样品管道流动的滑移层厚度为 2.8 μm , 同时由式(4)计算不同壁面切应力 τ_w 下的滑移速度 v_{slip} , 结果如图 7 所示。观察可知: 相同流量下, 管径越小其滑移速度越大; 同时为描述壁面滑移对管内流动特性的影响, 引入滑移贡献率的概念^[23], 即 $D_R = v_{\text{slip}}/v$, 其 v_{slip} 是根据式(4)的计算值, v 为实测流量的换算值, D_R 实质反映了滑移速度在平均流速中所占的份额, 其值越大则说明滑移效应的“减阻”作用越明显。观察可知: 两种管径条件下, D_R 呈现出相同的变化趋势, 即随着管壁切应力的增大, 逐渐减小并趋于平衡。这是由于管径变化并未引起样品在管道内流动形态的变化, 因此 D_R 的变化趋势一致, 同时由于膏体具有剪切变稀特性, 随着壁面切应力的增大, 浆体黏度降低, 流动性得到改善, 滑移效应对整个管流的作用逐渐弱化。

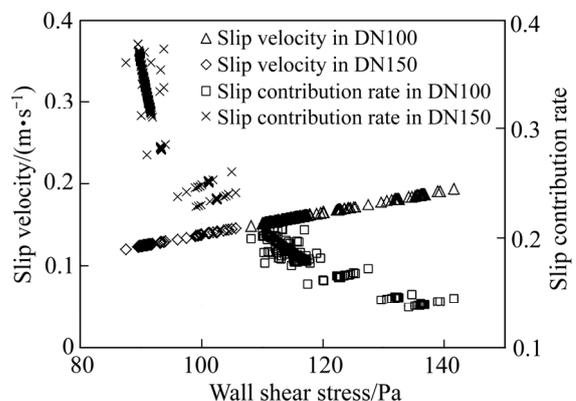


图 7 滑移速度及滑移贡献率随管壁切应力变化

Fig. 7 Relationship between slip velocity and slip contribution rate versus wall shear stress

4.3 滑移阻力公式适应性分析

根据前述对试验膏体理化性质及流变学的测试结果,采用滑移流动阻力公式(见式(14))及宾汉阻力公式(见式(15)),对试验流速下样品的管流阻力进行理论计算。以样品在 DN100 管道内流动为例,相关参数取值如表 1 所列,由式(1)计算得样品管道流动的滑移层厚度为 2.8 μm ,滑移系数 β_c 为 1.4×10^{-3} ,其他参数随流速 v 变化。

$$j_m = \frac{16}{3D} \cdot \tau_y + \frac{32v}{D^2} \cdot \mu_B \quad (15)$$

表 1 滑移阻力公式计算相关参数取值

Table 1 Values of related parameters about resistance formula

Velocity/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	μ_c / ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	Re_c	X	Re_s	f_{slip}	j_m / ($\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$)
0.8	2.07	81.60	1.06	77.2	0.20	5019
1.05	1.70	130.54	1.06	123.5	0.12	5405
1.24	1.52	172.68	1.06	163.4	0.09	5699
1.32	1.46	191.53	1.06	181.2	0.08	5822

Note: $\tau_y=75$ Pa; $\mu_B=0.51$ Pa·s; $\rho_m=2000$ kg/m^3 ; $\phi=47.6\%$; $\phi_m=54\%$

图 8 所示为理论计算值与实测值的对比图,观察可知,理论计算值较实测值均偏大,由于宾汉阻力公式未考虑管内流动中的滑移减阻作用,其阻力计算值较滑移阻力公式更大。误差分析显示:宾汉阻力公式与实测值的误差约为 18%,而滑移流动阻力公式的误差约为 10%,相比之下,滑移阻力公式更能满足工程应用的精度要求。

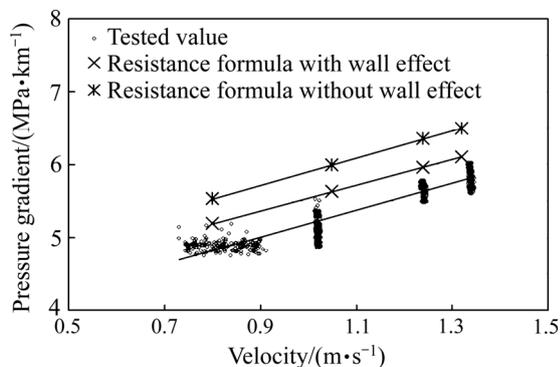


图 8 管流阻力理论计算值与实测值对比

Fig. 8 Comparison of theoretical calculation and tested values of pressure gradient

5 结论

1) 膏体尾矿在管道内呈表观滑移流动,滑移层的厚度与颗粒调和平均粒径、浆体体积分数及极限体积分数相关,其关系可由 Kalyon 经验公式进行描述。对于相同尾砂,膏体体积分数越高,则其管内流动的滑移层厚度越大,浆体体积分数一定时,通过优化物料粒径组成,提高极限体积分数,进而增大滑移层厚度。

2) 膏体尾矿在管道内的流动可划分为柱塞区、剪切区及滑移区,管壁滑移速度与滑移层厚度及管壁切应力呈正比,实际管道输送流量为 3 个区域流量的叠加。建立了考虑管壁滑移效应的阻力计算模型,当样品流变性质一定时,滑移层厚度越大,滑移系数越大,阻力系数随之降低,管流阻力减小。优化物料粒径组成,增大滑移层厚度是降低管流阻力的有效手段。

3) 开展膏体管道输送环管试验,试验流量 20~40 m^3/h ,样品在 DN100 管道内管流阻力为 4000~5000 Pa/m,在 DN150 管道内为 2400~2600 Pa/m。样品流动中存在明显的管壁滑移效应,滑移速度随壁面切应力呈线性增加,且管径越小滑移速度越大。滑移贡献率随管壁切应力的增大,逐渐减小并趋于平衡。

4) 滑移阻力公式及宾汉阻力公式计算值较实测值偏大,宾汉阻力公式的误差约为 18%,滑移阻力公式的误差约为 10%,相比之下,滑移阻力公式更能满足工程应用的精度要求。

REFERENCES

- [1] 吴爱祥,杨莹,程海勇,陈顺满,韩悦. 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 Ai-xiang, YANG Yin, CHENG Hai-yong, CHEN Shun-man, HAN Yue. Status and prospects of paste technology in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(5): 517-525.
- [2] 吴爱祥,王勇,王洪江. 膏体充填技术现状及趋势[J]. 金属矿山, 2016, 45(7): 1-9.
WU Ai-xiang, WANG Yong, WANG Hong-jiang. Status and prospects of the paste backfill technology[J]. Met Mine, 2016, 45(7): 1-9.
- [3] 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)

- 学版), 2014, 45(12): 4325-4330.
- WU Ai-xiang, LIU Xiao-hui, WANG Hong-jiang, WANG Yi-ming, JIAO Hua-ze, 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.
- [4] 王 劫, 杨 超, 张 军, 王洪武. 膏体充填管道输送阻力损失计算方法[J]. 金属矿山, 2010(12): 33-36.
- WANG Jie, YANG Chao, ZHANG Jun, WANG Hong-wu. Calculation method of the resistance loss in pipeline transportation of paste filling slurry[J]. Metal Mine, 2010(12): 33-36.
- [5] DONALD J H, BERN K. Laminar pipe flow of a yield plastic fluid[C]// Proceedings of Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC) International Student Conference. Brisbane: 2006: 141-165.
- [6] 吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 焦华喆, 李 辉, 刘斯忠. 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 Ai-xiang, LIU Xiao-hui, WANG Hong-jiang, JIAO Hua-ze, LI Hui, LIU Si-zhong. 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.
- [7] 李 帅, 王新民, 张钦礼, 王 石. 超细全尾砂似膏体长距离自流输送的时变特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(7): 1045-1049.
- LI Shuai, WANG Xing-ming, ZHANG Qin-li, WANG Shi. Time-varying characteristic of paste-like super-fine unclassified tailings in long self-flowing transportation[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2016, 37(7): 1045-1049.
- [8] CHOI M, ROUSSEL N, KIM Y J, KIM J K. Lubrication layer properties during concrete pumping[J]. Cement & Concrete Research, 2013, 45(1): 69-78.
- [9] MEDHI B J, KUMAR A A, SINGH A. Apparent wall slip velocity measurements in free surface flow of concentrated suspensions[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(6): 609-619.
- [10] 冯民权, 谭未. 污泥屈服特性与壁面滑移临界条件[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(3): 71-76.
- FENG Ming-quan, TAN Wei. Yield characteristics and critical condition of wall slip for sludge[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(3): 71-76.
- [11] 马修元, 段钰锋, 刘 猛. 污泥水焦浆管道输送的壁面滑移和减阻特性[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(2): 46-51.
- MA Xiu-yuan, DUAN Yu-feng, LIU Meng. Wall slip behaviors and drag-reduction properties of sludge coke slurry in pipe flow[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical, 2013, 33(2): 46-51.
- [12] 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]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- LÜ Fu-yan. Drag-reduction of pipeline transport of dense paste based on wall slip phenomenon[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing), 2017.
- [13] 吴爱祥, 程海勇, 王贻明, 王洪江, 刘晓辉, 李公成. 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 Ai-xiang, CHENG Hai-yong, WANG Yi-ming, WANG Hong-jiang, LIU Xiao-hui, LI Gong-cheng. Transport resistance characteristic of paste pipeline considering effect of wall slip[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(1): 180-187.
- [14] YILMAZER U, KALYON D M. Slip effects in capillary and parallel disk torsional flows of highly filled suspensions[J]. Journal of Rheology, 1989, 33(8): 1197-1212.
- [15] 冯民权, 张 丽, 张晓斌. 复杂流体壁面滑移特性研究及其测量[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(2): 208-214.
- FENG Ming-quan, ZHANG Li, ZHANG Xiao-bin. Wall slip of complex fluids and its measurement[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2011, 43(2): 208-214.
- [16] KALYON D M. Apparent slip and viscoplasticity of concentrated suspensions[J]. Journal of Rheology, 2005, 49(3): 621-640.
- [17] LEIGHTON D, ACRIVOS A. The shear-induced migration of particles in concentrated suspensions[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 181: 415-439.
- [18] 张 磊, 王洪江, 李公成, 吴爱祥, 刘晓辉. 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 Lei, WANG Hong-jiang, LI Gong-cheng, WU Ai-xiang, LIU Xiao-hui. Research progress and trend of characteristics about wall slip in paste pipeline[J]. Metal Mine, 2015(10): 1-5.
- [19] SOLTANI F, ÜLKÜ Y. Slip velocity and slip layer thickness in flow of concentrated suspensions[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1998, 70(3): 515-522.
- [20] KALYON D M, YARAS P, ARAL B, YILMAZER U. Rheological behavior of a concentrated suspension: A solid

- rocket fuel simulant[J]. *Journal of Rheology*, 1993, 37(1): 35–53.
- [21] KALYON D M. Apparent slip and viscoplasticity of concentrated suspensions[J]. *Journal of Rheology*, 2005, 49(3): 621–640.
- [22] PULLUM L, BOGER D V, SOFRA F. Hydraulic mineral waste transport and storage[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2018(50): 157–185.
- [23] 陈良勇, 段钰锋, 刘 猛, 赵长遂. 壁面滑移条件下水煤浆的流动阻力和减阻特性[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(5): 41–48.
- CHEN Liang-yong, DUAN Yu-feng, LIU Meng, ZHAO Chang-sui. Flow resistance and drag-reduction properties of coal water slurries in pipe flow with the presence of wall slip[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical*, 2010, 30(5): 41–48.
- [24] 刘晓辉, 吴爱祥, 王洪江, 王贻明. 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 Xiao-hui, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, WANG Yi-ming. Influence mechanism and calculation model of CPB rheological parameters[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(2): 190–195.

Resistance characteristic and approximate calculation of paste tailings slip flow inside pipe

LIU Xiao-hui¹, WU Ai-xiang², YAO Jian¹, ZHU Quan-jie¹

(1. School of Safety Engineering, North China Institute of Science & Technology, Langfang 065201, China;

2. School of Civil and Resources Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Pipeline transportation is the key process of tailings paste disposal, paste tailing is a kind of typical non-Newtonian fluids, and has obvious wall slip effect in pipe flow. For accurately calculating the pipe flow resistance of paste tailings, the pipe flow of paste was divided into plug zone, shear zone and slip zone through theoretical analysis, based on non-Newtonian fluid mechanics and apparent wall slip hypothesis. Paste tailings were regarded as Bingham fluid, and the distributions of stress, velocity and flow rate in different flow zones were analyzed, a flow equilibrium equation of paste pipeline transportation was put forward. Finally, a resistance formula with wall slip effect in pipe was established. A loop test was conducted to prove and verify the formula. The results show that the wall slip phenomenon exists in paste tailings pipe flow, and the pipe flow resistance is 4000–5000 Pa/m in DN100 pipe and 2400–2600 Pa/m in DN150 pipe, when the flow rate is 20–40 m³/h. The error of the calculated value by flow resistance formula considering effect of wall slip is about 10%, which meets the precision requirements of engineering application.

Key words: paste tailings; pipeline transportation; pipe flow resistance; wall slip; slip velocity

Foundation item: Project(3142017086) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China; Project(51604115) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2017YFC0602903) supported by the National Key R&D Program of China

Received date: 2018-12-11; **Accepted date:** 2019-06-05

Corresponding author: LIU Xiao-hui; Tel: +86-10-61591229; E-mail: liuxiaohui28@163.com

(编辑 王 超)