



尾矿膏体流变特性和管输阻力计算模型

侯永强^{1,2}, 尹升华^{1,2}, 戴超群^{1,2}, 曹 永^{1,2}

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 为探究不同浓度下的尾矿膏体流变特性和管输阻力计算模型, 在实验室开展了不同料浆浓度的尾矿膏体流变试验及坍落度试验。结果表明: 料浆的屈服应力和塑性黏度随着浓度的增加均呈不断增大的趋势; 结合模型的拟合结果可知, 屈服应力随着料浆浓度(质量分数, %)的增加遵循二次函数递增规律, 而塑性黏度随着料浆浓度的增加遵循指数函数递增规律; 当料浆浓度低于 70%时, 充填料浆具有可观的流动性, 且流变参数与坍落度具有一定的关联性。采用了四种拟合模型对坍落度与流变参数之间的关系进行拟合分析, 发现料浆的屈服应力和塑性黏度随着坍落度的增大遵循 Logistic 函数递减规律; 通过构建的料浆浓度、坍落度与流变参数值之间的数学模型, 建立了基于料浆浓度或坍落度的管道输送阻力计算模型; 以金川二矿区为工程背景验证了新管道输送阻力计算模型的准确性, 表明采用料浆浓度或坍落度去替代流变参数计算管道输送阻力值是可靠的。

关键词: 流变特性; 尾砂; 屈服应力; 管输阻力; 塑性黏度

文章编号: 1004-0609(2021)-02-0510-10

中图分类号: TD853

文献标志码: A

引文格式: 侯永强, 尹升华, 戴超群, 等. 尾矿膏体流变特性和管输阻力计算模型[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(2): 510–519. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-35800

HOU Yong-qiang, YIN Sheng-hua, DAI Chao-qun, et al. Rheological properties and pipeline resistance calculation model in tailings paste[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(2): 510–519. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-35800

尾砂充填料浆通过将尾砂、胶凝材料、水按照一定比例混合后, 通过泵送或自流输送的方式充入地下采空区, 从而达到安全生产的目的^[1–3]。浆体从充填站充入到地下采空区主要依靠管道输送系统, 为了保证充填料浆输送的可靠性和稳定性, 管道输送系统的设计参数需要明确膏体的流变参数, 即料浆的屈服应力及黏性系数^[4–5]。充填料浆应具有较好的坍落度, 使其满足管道输送的要求及提供合适的流变参数, 而浆体屈服应力和塑性黏度能够直观地反映料浆的流变特性, 是进行管道输送阻力计算的关键参数^[6–7]。目前, 国内外学者针对尾砂

充填料浆流变特性和管输阻力计算等方面开展了大量的研究工作。于跃等^[8]对高浓度充填料浆流变特性和管输阻力进行了研究, 提出了高浓度胶结充填料浆沿程阻力损失的理论公式; 王劼等^[9]针对云南会泽铅锌矿膏体充填进行了充填料浆流变特性研究, 建立了会泽铅锌矿膏体充填料浆管道输送阻力损失计算的公式; 陈秋松等^[10]利用 Bingham 流变模型分析全尾砂似膏体管道输送过程的流变特性, 并采用 MATLAB 软件回归得到流变参数与浆体质量分数的关系式, 进而推出全尾砂似膏体水力坡度计算新模型; 王少勇等^[11]等基于新型闭环

基金项目: 国家优秀青年科学基金资助项目(51722401); 国家自然科学基金重点资助项目(51734001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRT-TP-18-003C1)

收稿日期: 2019-04-28; **修订日期:** 2020-10-10

通信作者: 尹升华, 教授, 博士; 电话: 13811668481; E-mail: ustxsh@163.com

管试验测试平台, 研究了管径、料浆流速、料浆中固相含量和物料粒径对膏体料浆管道输送压力损失的影响; DEN^[12]研究得出固料组成比例的变化能对膏体的流变和力学性能产生较大的影响; 张连富等^[13-14]研究了尾矿膏体屈服应力的演化规律, 探究了泵送剂含量对高含泥膏体流变特性的影响, 得出了尾矿膏体屈服应力与料浆浓度之间的关系及泵送剂含量对膏体流变特性的影响机理; 徐文彬等^[15]为了明确研石充填料浆流变参数与颗粒级配指标的相关性, 通过开展不同级配骨料、静置时间条件下的充填料浆流态变化规律试验, 明确了料浆流变参数与颗粒级配和静置时间的关系; 赵健会等^[16]从膏体充填料浆坍落度的角度判别所制备充填膏体的流变特性, 建立了基于锥形和柱形坍落度的充填膏体参数模型, 并得出柱形坍落度试验模型更能准确测定高浓度充填膏体流变参数; 王石等^[17]探究了阴离子型聚丙烯酰胺(APAM)对全尾砂似膏体料浆流变特性的影响规律, 并推导构建了管道输送的沿程阻力计算公式; 综合上述研究成果可知, 诸多对尾矿充填料浆流变特性和管输阻力计算模型等方面做出了众多的研究, 所得的研究成果能够为尾矿充填配比参数设计及管道输送阻力计算等方面提供良好的理论指导。然而, 由于不同类型矿山的尾矿性质和颗粒级配参数等方面均具有较大差异, 因此有必要针对不同类型的尾矿料浆开展相应的流变试验。此外, 由于通过流变参数进行管输阻力计算往往需要矿山委托相应的实验机构进行试验得出相应的流变参数, 而这个过程需要耗费一定的时间和资金, 具有一定的局限性。基于此, 本文以金川二矿区为工程背景, 开展了不同料浆浓度下的尾矿膏体流变特性试验和坍落度试验, 基于 Bingham 模型得到不同料浆浓度的屈服应力及塑性黏度参数, 并进一步分析料浆浓度与屈服应力、表观黏度的函数关系, 得出料浆浓度与屈服应力、塑性黏度的数学模型; 同时探讨了料浆坍落度与流变参数的函数关系, 得出了坍落度与屈服应力、塑性黏度的数学模型, 最后基于 Bingham 模型的基本形式, 提出基于料浆浓度、坍落度的两类新型流变模型。通过新型流变模型在得到料浆浓度或坍落度的基础上计算出料浆输送阻力, 可为没有开展流变试验条件的矿山提供输送阻力计算的参考依据。

1 尾矿膏体流变特性实验

1.1 实验材料

选取金川二矿区提供的尾矿浆作为试验材料, 通过实验室相关仪器对全尾砂的基本物理参数和粒径范围进行了测试, 得到了关于全尾砂的基本物理参数, 其中 D_{50} 、 D_{10} 、 D_{60} 代表全尾砂累计粒度百分数达到 50%、10%、60%时所对应的粒径(μm)。试验测得的尾砂颗粒基本物理参数见表 1, 所测得的尾砂颗粒粒径参数如表 2 和图 1 所示。

表 1 全尾砂基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of full tailings

$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{60}/\mu\text{m}$	Nonuniformity coefficient	Density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
17.07	2.09	25.18	12.05	2.769

表 2 全尾砂粒级组成

Table 2 Particle size composition of full tailings

$<5\ \mu\text{m}$	$5-10\ \mu\text{m}$	$10-20\ \mu\text{m}$
21.7%	13.8%	19.2%
$20-39\ \mu\text{m}$	$39-75\ \mu\text{m}$	$>75\ \mu\text{m}$
19.5%	17.3%	8.7%

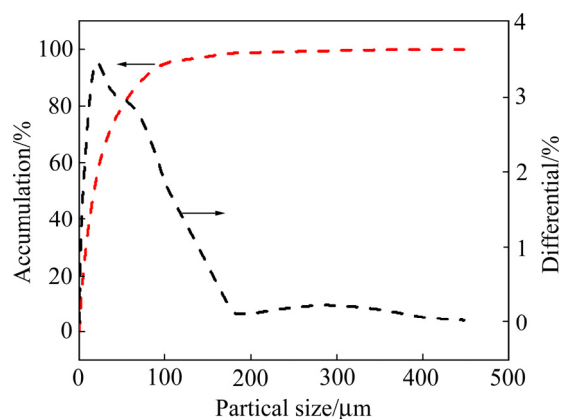


图 1 全尾砂粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of full tailings

1.2 实验仪器

为了准确地研究不同料浆浓度下的尾矿膏体流变特性, 将料浆浓度从 65%到 71%共分为 7 个梯度进行试验。使用 Brookfield R/S+型流变仪检测浆体的流变特性。该仪器广泛应用于悬浮体和刚性膏

体流变特性的测量,由于精度较高,得到众多研究者的青睐。试验仪器如图2所示。

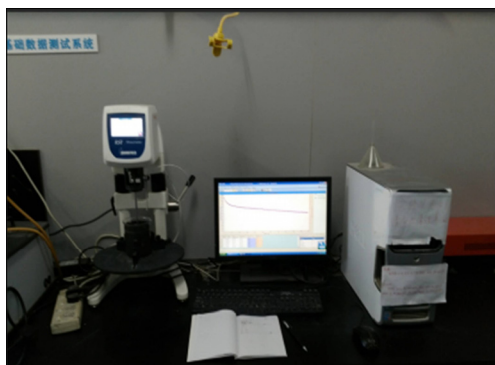


图2 Brookfield R/S 型流变仪

Fig. 2 Brookfield R/S type rheometer

1.3 试验过程

1) 在 300 mL 烧杯中配制相应浓度的料浆,每种浓度下配制的料浆质量为 400 g,搅拌约 6 min。

2) 将烧杯放置于流变仪下,料浆浸没搅拌转子(十字形转子 V40_20_3tol),记录料浆的各项流变参数;在试验中剪切应力以固定速率加载到 400 Pa,转子转动时,该时刻的剪切应力记为静态屈服应力;测定料浆在不同剪切速率下(0~200 s⁻¹)的表观黏度和剪切应力。

1.4 试验方案

流体在受到外部剪切力作用时发生流动变形,内部相应产生对变形的抵抗,并以内摩擦的形式表现出来。这是流体的一种固有物理属性,称之为黏滞性或黏性。根据不同的流变性能,可将流体分为牛顿流体和非牛顿流体。牛顿流体的剪切应力与速度梯度呈线性关系,如式(1)所示:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力, Pa; μ 为黏性系数, Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s⁻¹。

研究发现,对于固相含量较多的流体,如尾矿浆体,细颗粒会相互吸引形成絮团;随着固相含量的提高,絮团之间发生连接,形成松散的网状结构,称为絮网结构。絮网结构具有一定的抗剪强度,使得浆体具有一定的起始强度,称为屈服应力;此时可采用 Bingham 模型来描述其流变特性^[18],如式(2)所示:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

式中: τ_0 为屈服应力, Pa。

2 试验结果与分析

2.1 基于 Bingham 模型确定料浆流变参数

试验测得不同料浆浓度下的剪切速率与剪切应力之间的关系曲线如图3所示。基于 Bingham 模型,对剪切速率和剪切应力进行拟合,得到不同料浆浓度下的流变方程和流变参数,回归得出的流变方程。屈服应力和塑性黏度如表3所示。由表3可知,料浆的屈服应力和塑性黏度与料浆浓度均有紧密的联系;随着料浆浓度的增加,浆体的屈服应力和塑性黏度均呈明显增大趋势。其原因在于料浆浓度的增大意味着含水量不断减小,而料浆的流动性、黏聚性主要依靠尾砂颗粒表面吸附的一层水膜及水的表面张力作用;当含水量逐渐减少时,则尾砂颗粒表面所吸附的水膜将逐渐变薄,使得颗粒间的润滑效果变差,且导致水的表面张力变大以及尾砂颗粒间的黏聚性逐渐增强,从而增大了料浆的屈服应力和塑性黏度^[19]。

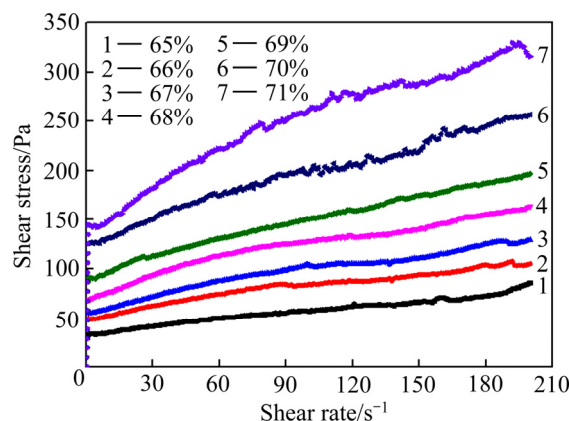


图3 不同料浆浓度下剪切速率和剪切应力的关系

Fig. 3 Relationship between shear rate and shear stress of slurry with various slurry concentrations

2.2 料浆浓度与流变参数之间的关系

由表3中的数据可知,屈服应力和塑性黏度随着料浆浓度的增加呈不断增大的趋势。为定量分析料浆浓度与流变参数之间的关系,采用四种拟合模型(Linear fitting、Exponential fitting、Logistic fitting、Polynomial fitting)对两者间的关系进行拟合分析。拟合结果见表4和5,拟合关系曲线见图4。通过

表 3 尾砂料浆流变参数

Table 3 Rheological parameters of tailings slurry

Slurry concentration/%	Rheological equation	Yield stress/Pa	Plastic viscosity/(Pa·s)	Adj. <i>R</i> ²
65	0.22γ+35.14	35.14	0.22	0.97
66	0.27γ+54.89	54.86	0.27	0.96
67	0.34γ+62.35	62.35	0.34	0.96
68	0.42γ+81.89	81.89	0.42	0.95
69	0.51γ+97.31	97.31	0.51	0.98
70	0.63γ+132.88	132.88	0.63	0.98
71	0.88γ+160.33	160.33	0.88	0.95

表 4 屈服应力与料浆浓度的拟合结果

Table 4 Fitting results of yield stress(*σ_y*) and slurry concentration(*C_s*)

Type	Fitting result	Adj. <i>R</i> ²
Linear	$\sigma_y = 20.23464C_s - 1286.70429$	0.9552
Exponential	$\sigma_y = 1.30626 \times 10^{-5} \cdot \exp\left(\frac{C_s}{4.34321}\right) - 2.10138$	0.9877
Logistic	$\sigma_y = 13740.4458 + \frac{-4.01418 + 13740.44458}{1 + \left(\frac{C_s}{94.28886}\right)^{15.542}}$	0.9859
Polynomial	$\sigma_y = 2.03345C_s^2 - 256.31488C_s + 8107.84571$	0.9891

表 5 塑性黏度与料浆浓度的拟合结果

Table 5 Fitting results of plastic viscosity(*v_p*) and slurry concentration(*C_s*)

Type	Fitting result	Adj. <i>R</i> ²
Linear	$v_p = 0.1025C_s - 6.50286$	0.9131
Exponential	$v_p = 3.98897 \times 10^{-11} \cdot \exp\left(\frac{C_s}{3.00933}\right) + 0.13283$	0.9923
Logistic	$v_p = 615.31959 + \frac{0.14464 - 615.31959}{1 + \left(\frac{C_s}{94.25377}\right)^{23.81424}}$	0.9885
Logistic	$v_p = 0.01512C_s^2 - 1.95369C_s + 63.34714$	0.9892

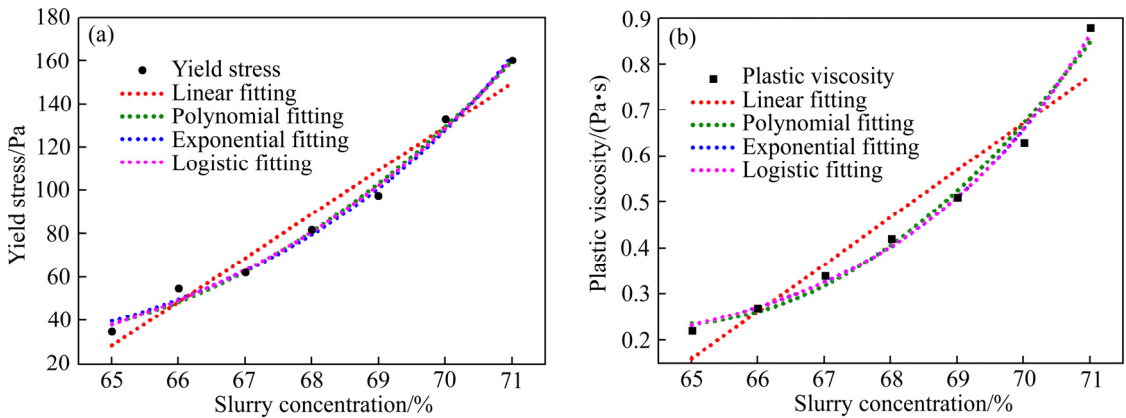


图 4 料浆浓度与流变参数的拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of slurry concentration and rheological parameters: (a) Slurry concentration and yield stress; (b) Slurry concentration and plastic viscosity

四类模型的拟合结果,可以得出料浆浓度与屈服应力之间的关系符合二次多项式模型,而料浆浓度与塑性黏度之间的关系符合指数函数模型。因此,料浆浓度与屈服应力之间的方程如式(3)所示,料浆浓度与塑性黏度之间的方程如式(4)所示:

$$\sigma_y = 2.03345C_s^2 - 256.31488C_s + 8107.84571 \quad (3)$$

$$v_p = 3.98897 \times 10^{-11} \exp\left(\frac{C_s}{3.00933}\right) + 0.13283 \quad (4)$$

2.3 料浆坍落度试验

坍落度指标能够很好地反映料浆的流动性,流动性指标也是作为判别料浆能否达到膏体充填的一个重要指标。对金川二矿区提供的全尾砂开展不同浓度下的料浆坍落度试验,结合试验所测的数据,得出料浆坍落度指标与料浆浓度的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知,料浆坍落度随着料浆浓度的增加呈逐渐减小的趋势,即坍落度指标随着料浆浓度的增大遵循指数函数递减规律;其原因在于随着料浆固相质量的逐渐提高,料浆水含量逐渐减

少,使得尾砂颗粒表面吸附的水膜厚度逐渐变薄,导致颗粒间的润滑效果变差和表面张力增强,从而导致料浆的流动性变差,宏观上体现为坍落度指标呈逐渐降低的趋势。由 2.2 和 2.3 节的分析结果可知,料浆的流变参数和坍落度指标均与料浆浓度具有十分密切的联系,同时料浆的流变参数和坍落度指标均可反映料浆流动性,因此有必要对料浆坍落度指标与流变参数之间的关系进行探讨。采用四种拟合模型(Linear fitting、Exponential fitting、Logistic fitting、Polynomial fitting)对料浆坍落度与流变参数之间的关系进行拟合分析,拟合结果如表 6 和 7 所示,拟合关系曲线见图 6 所示。

料浆的坍落度与流变参数之间呈反比例关系,即随着坍落度的增大,屈服应力和塑性黏度均呈不断减小的趋势。通过四类模型的拟合结果可以得出,坍落度与屈服应力和塑性黏度的关系符合 Logistic 模型。因此,料浆的坍落度与屈服应力之间的函数关系如式(5)所示,与塑性黏度之间的函数关系如式(6)所示:

表 6 屈服应力与坍落度的拟合结果

Table 6 Fitting results between yield stress(σ_y)and slump(S_p)

Type	Fitting result	Adj. R^2
Linear	$\sigma_y=333.12097-9.9019S_p$	0.8521
Exponential	$\sigma_y = -3.18895 \cdot \exp\left(\frac{S_p}{7.30973}\right) + 192.96566$	0.9361
Logistic	$\sigma_y = 15.44343 + \frac{160.00393 - 15.44343}{1 + \left(\frac{S_p}{25.44348}\right)^{15.08359}}$	0.9913
Polynomial	$\sigma_y = 27.81994S_p - 0.85484S_p^2 - 64.39269$	0.9539

表 7 塑性黏度与坍落度的拟合结果

Table 7 Fitting results between plastic viscosity(v_p) and slump(S_p)

Types	Fitting result	Adj. R^2
Linear	$v_p=1.77089-0.05294S_p$	0.9292
Exponential	$v_p = -0.09715 \cdot \exp\left(\frac{S_p}{12.0034}\right) + 1.25854$	0.9548
Logistic	$v_p = 0.0414 + \frac{0.88427 - 0.0414}{1 + \left(\frac{S_p}{25.18414}\right)^{10.46565}}$	0.9709
Polynomial	$v_p = 0.061S_p - 0.00258S_p^2 - 0.57019$	0.9590

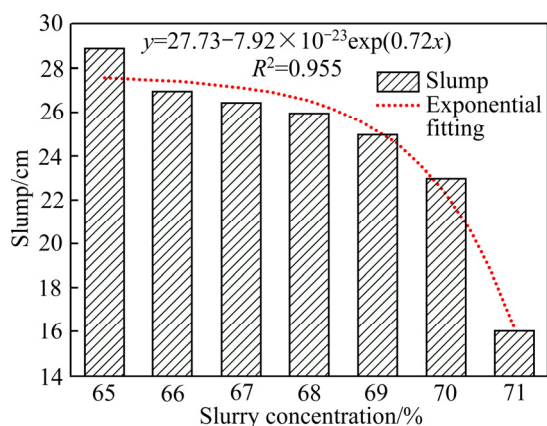


图5 坍落度与料浆浓度的关系

Fig. 5 Relationship between slump and slurry concentration

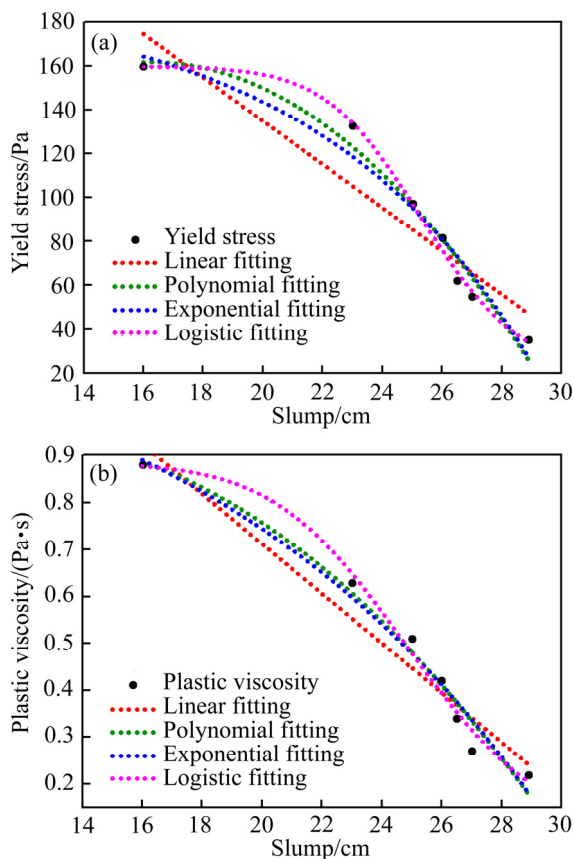


图6 坍落度与流变参数的拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of slump and rheological parameters: (a) Slump and yield stress; (b) Slump and plastic viscosity

$$\sigma_y = 15.44343 + \frac{144.5604}{1 + \left(\frac{S_p}{25.44348} \right)^{15.08359}} \quad (5)$$

$$\nu_p = 0.0414 + \frac{0.84287}{1 + \left(\frac{S_p}{25.18414} \right)^{10.46565}} \quad (6)$$

3 管道输送阻力计算模型

料浆的流变参数直接决定着管道输送阻力的大小, 通过室内试验测出料浆浓度为 65%~71% 的尾矿膏体的屈服应力和塑性黏度, 可采用考虑流变参数的沿程阻力计算公式进行计算^[20-21]:

$$i = \frac{16\tau_0}{3D} + \frac{32\nu}{D^2} \cdot \mu \quad (7)$$

式中: i 为沿程阻失, Pa/m; D 为管道内径, m; ν 为管道流速, m/s。

通过式(7)能明显看出, 在矿山输送管径确定的情况下, 料浆进行管道输送时屈服应力和塑性黏度是计算阻力的关键影响因素。通过测出料浆流变参数后, 结合管径、流速和距离便可计算出相应的输送阻力。然而, 基于该公式计算输送阻力只能依靠流变试验获取流变参数, 而大多数的矿山并没有相应的试验条件, 必须委托相应的实验机构进行试验, 需要耗费一定的时间和资金。因此, 本文基于此前构建的料浆浓度、坍落度与流变参数之间的关系, 提出建立基于料浆坍落度或浓度的新沿程阻力计算模型。

将式(3)和式(4)代入到式(7)便可得到考虑料浆浓度的输送阻力计算模型如式(8)所示。同理, 将式(5)和式(6)代入到式(7)便可得到考虑料浆坍落度的输送阻力计算模型如式(9)所示。

$$i = \frac{16}{3D} \cdot \left[(2.03345C_s^2 - 256.31488C_s + 8107.84571) + \frac{32\nu}{D^2} \cdot \left[3.98897 \times 10^{-11} \exp\left(\frac{C_s}{3.00933}\right) + 0.13283 \right] \right] \quad (8)$$

$$i = \frac{16}{3D} \cdot \left[15.44343 + \frac{144.5604}{1 + S_p / 25.44348} + \frac{32\nu}{D^2} \cdot \left[0.0414 + \frac{0.84287}{1 + (S_p / 25.18414)^{10.46565}} \right] \right] \quad (9)$$

本次试验料浆管道阻力计算以金川二矿区深部开采料浆管道输送系统为工程背景。该矿山充填

管道内径为 0.150 m，地表与井下的高差为 800 m，与采场的水平距离为 2000 m，通过建立的三类输送阻力计算公式分别计算料浆流速在 0.5、1 和 1.5 m/s 的管道输送阻力。

设定基于考虑流变参数的传统阻力计算公式为模型 A，考虑料浆浓度的阻力计算公式为模型 B，考虑料浆坍塌度的输送阻力计算公式为模型 C。基于上述三类输送阻力计算模型，计算金川二矿区料浆输送阻力，计算结果如表 8~10 所示，数据曲线如图 7 所示。

通过试验结果可知，不同的料浆浓度下，三类模型的料浆管道输送阻力值的计算结果具有很高的吻合度，其输送阻力计算值的最大误差不超过 1 MPa。由此可见，采用料浆的浓度或坍塌度去替代流变参数计算管道输送阻力值是可靠的。矿山可依靠开展料浆的坍塌度试验或设计的浓度进行料浆的管道输送阻力计算。

表 8 模型 A 计算的管道输送阻力值

Table 8 Pipeline resistance values calculated by Model A

Flow rate/ (m·s ⁻¹)	Pipe diameter/ mm	Pipeline resistance/MPa						
		65%	66%	67%	68%	69%	70%	71%
0.5	150	2.78	4.25	4.86	6.36	7.57	10.25	12.53
1.0	150	3.06	4.59	5.30	6.89	8.22	11.06	13.65
1.5	150	3.34	4.64	5.73	7.43	8.78	11.86	14.78

表 9 模型 B 计算的管道输送阻力值

Table 9 Pipeline resistance values calculated by Model B

Flow rate/ (m·s ⁻¹)	Pipe diameter/ mm	Pipeline resistance/MPa						
		65%	66%	67%	68%	69%	70%	71%
0.5	150	3.04	3.80	4.88	6.26	7.98	10.03	12.45
1.0	150	3.34	4.15	5.29	6.77	8.61	10.58	13.59
1.5	150	3.63	4.50	5.70	7.28	9.25	11.67	14.60

表 10 模型 C 计算的管道输送阻力值

Table 10 Pipeline resistance values calculated by Model C

Flow rate/ (m·s ⁻¹)	Pipe diameter/ mm	Pipeline resistance/MPa						
		65%	66%	67%	68%	69%	70%	71%
0.5	150	2.67	4.45	5.16	5.95	7.53	10.36	12.50
1.0	150	2.93	4.88	5.61	6.41	8.14	11.19	13.61
1.5	150	3.20	5.28	6.06	6.91	8.75	12.03	14.74

4 结论

1) 对不同料浆浓度的尾矿浆体开展了流变试验，得出随着料浆浓度的增大，屈服应力和塑性黏度均呈增大的趋势；采用了四种拟合模型(Linear fitting、Exponential fitting、Logistic fitting、Polynomial fitting)对料浆坍塌度与流变参数之间的关系进行拟合分析，得出料浆浓度与屈服应力之间的关系符合二次多项式模型，料浆浓度与塑性黏度之间的关系符合指数函数模型。

2) 开展了不同料浆浓度的坍塌度试验，结果表明，料浆浓度低于 70%时，充填料浆具有可观的流动性。随着坍塌度的增大，料浆的屈服应力和塑性黏度均呈减小的趋势，料浆的坍塌度与屈服应力及塑性黏度之间的关系均符合 Logistic 模型。

3) 通过构建的料浆浓度、坍塌度与流变参数之

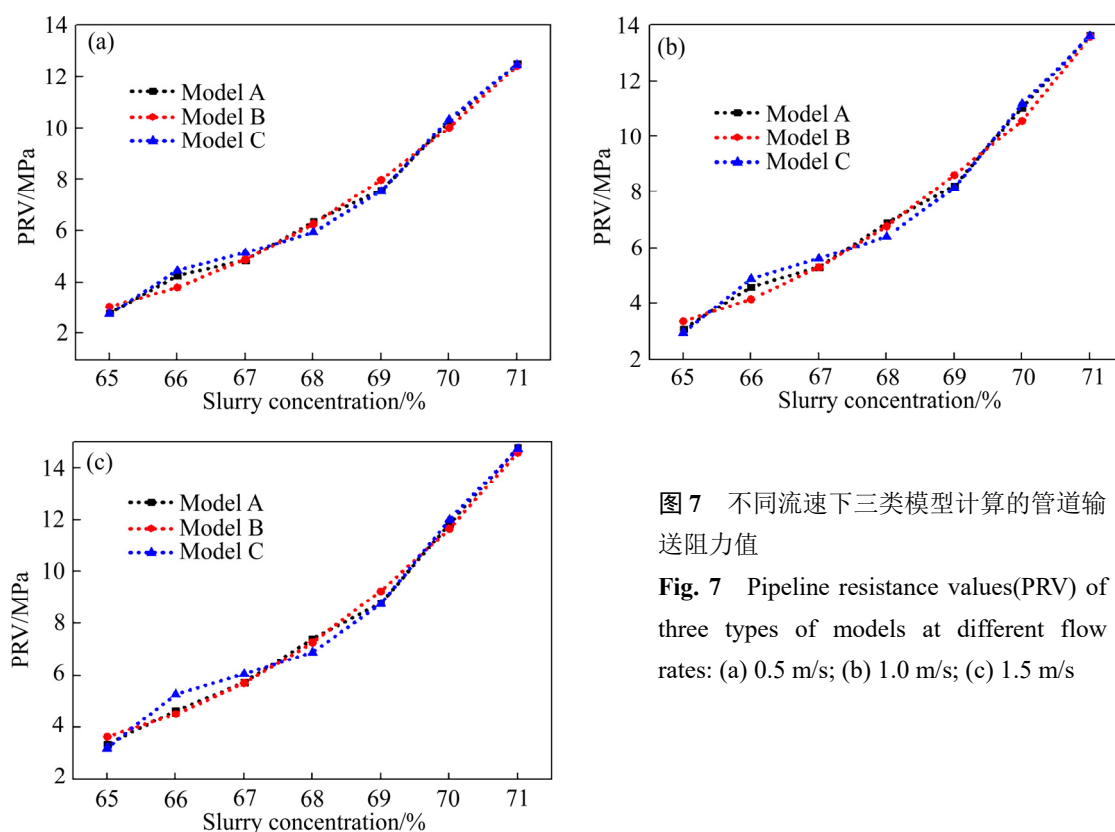


图7 不同流速下三类模型计算的管道输送阻力值

Fig. 7 Pipeline resistance values (PRV) of three types of models at different flow rates: (a) 0.5 m/s; (b) 1.0 m/s; (c) 1.5 m/s

间的关系,建立了考虑料浆浓度或坍落度的管道输送阻力计算模型,并以金川二矿区为工程背景验证了采用料浆浓度或坍落度的管道输送阻力计算模型的准确性,结果表明,采用料浆的浓度或坍落度去替代流变参数计算管道输送阻力值是可靠的。这一结果为矿山计算管道输送阻力提供了新的途径。

REFERENCES

- [1] 翟永刚, 吴爱祥, 王洪江. 全尾砂膏体充填临界质量分数[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(7): 795-799.
ZHAI Yong-gang, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang. Threshold mass fraction of unclassified-tailings paste for backfill mining[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(7): 795-799.
- [2] 韩斌, 吴爱祥, 邓建. 基于可靠度理论的下向进路胶结充填技术分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(3): 583-587.
HAN Bin, WU Ai-xiang, DENG Jian. Backfill technical analysis based on reliability theory in the underhand drift cut-and-filling stoping[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, 37(3): 583-587.
- [3] 崔刚, 陈文楷, 段鸿杰. 胶结充填料浆合理配比的确定[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(3): 311-313.
CUI Gang, CHEN Wen-kai, DUAN Hong-jie. Choice of component ratio of cemented backfill pulp[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(3): 311-313.
- [4] 于润仓. 采矿工程师手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
YU Run-cang. Mining engineer's handbook[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [5] BOGER D V. Rheology and minerals industry[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2000, 20(1): 1-25.
- [6] 刘同有. 充填采矿技术与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
LIU Tong-you. Filling mining technology and application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.
- [7] 邓代强, 高永涛, 杨耀亮. 基于流体力学理论的全尾砂浆管道输送流变性能[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(11): 1380-1384.
DENG Dai-qiang, GAO Yong-tao, YANG Yao-liang. Rheological properties of full tailings slurry in pipeline

- transportation based on the hydromel-chances theory[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(11): 1380-1384.
- [8] 于跃, 郑伟钰, 程坤. 煤矿高浓度胶结充填料浆管道沿程阻力研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(2): 72-75.
- YU Yue, ZHENG Wei-ze, CHENG Kun. Research on pipe flow resistance loss of high concentration filling materials in coal mine[J]. Coal Mine Safety, 2017, 48(2): 72-75.
- [9] 王劫, 杨超, 张军. 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 Ji, YANG Cao, ZHANG Jun. Calculation method for resistance loss of paste filling pipeline[J]. Metal Mine, 2010(12): 33-36.
- [10] 陈秋松, 张钦礼, 王新民. 全尾砂似膏体管输水力坡度计算模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 901-906.
- CHEN Qiu-song, ZHANG Qin-li, WANG Xin-min. Pipeline hydraulic gradient model of paste-like unclassified tailings backfill slurry[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(5): 901-906.
- [11] 王少勇, 吴爱祥, 尹升华. 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 Shen-hua. Influence factors of pressure loss in pipeline transportation of paste slurry[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(1): 7-12.
- [12] DENG X J, ZHANG J X, BERN K. Experimental characterization of the influence of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill[J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, (168): 116-125.
- [13] 张连富, 吴爱祥, 王洪江. 泵送剂对高含泥膏体流变特性影响及机理[J]. 工程科学学报, 2018, 40(8): 918-924.
- ZHANG Lian-fu, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang. Effects and mechanism of pumping agent on rheological properties of highly muddy paste[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(8): 918-924.
- [14] 张连富, 吴爱祥, 王洪江, 等. 尾矿膏体屈服应力演化规律[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(8): 1631-1636.
- ZHANG Lian-fu, WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang, et al. Evolution law of yield stress in paste tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(8): 1631-1636.
- [15] 徐文彬, 杨宝贵, 杨胜利, 等. 研石充填料浆流变特性与颗粒级配相关性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(4): 1282-1289.
- XU Wen-bin, YANG Bao-gui, YANG Sheng-li, et al. Experimental study on correlativity between rheological parameters and grain grading of coal gauge backfill slurry[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2016, 47(4): 1282-1289.
- [16] 赵建会, 刘浪. 基于坍落度的充填膏体流变特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(2): 192-198.
- ZHAO Jian-hui, LIU Lang. Research into rheological properties of backfill paste based on the slump test[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2015, 47(2): 192-198.
- [17] 王石, 张钦礼, 王新民, 等. APAM对全尾似膏体及其管道输送流变特性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3271-3277.
- WANG Shi, ZHANG Qin-li, WANG Xin-min, et al. Influence of APAM on rheological properties of unclassified tailings paste-like and its pipeline transportation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12): 3271-3277.
- [18] 吴爱祥, 王洪江. 金属矿膏体充填理论与技术[M]. 北京: 科学技术出版社, 2015.
- WU Ai-xiang, WANG Hong-jiang. Theory and technology of metal ore paste filling[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2015.
- [19] 赖伟, 刘婉莹. 全尾砂充填料浆坍落度试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2014, 66(3): 26-28.
- LAI Wei, LIU Wan-ying. Experimental study on slump of whole backfilling slurry[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2014, 66(3): 26-28.
- [20] 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 mine filling paste based on inclined pipeline experiment[J]. Metal Mine, 2014(10): 22-26.
- [21] 吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江. 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. 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.

Rheological properties and pipeline resistance calculation model in tailings paste

HOU Yong-qiang^{1,2}, YIN Sheng-hua^{1,2}, DAI Chao-qun^{1,2}, CAO Yong^{1,2}

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

2. Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the rheological properties and the pipeline resistance calculation model of the tailings paste at different concentrations, the rheological tests and slump tests of different slurry concentrations were carried out in the laboratory. The results show that the yield stress and plastic viscosity of the slurry increase with increasing slurry concentration. According to the fitting results of the model, it can be known that the yield stress follows an increasing function of the quadratic function as the slurry concentration(mass fraction,%) increases, and the plastic viscosity follows an exponential function as the slurry concentration increases. When the slurry concentration is lower than 70%, the filler slurry has considerable fluidity, and there is a certain correlation between the rheological parameters and the slump. Four fitting models are used to fit and analyze the relationship between slump and rheological parameters, and it is obtained that the yield stress and plastic viscosity of the slurry follow the law of decreasing logistic function as the slump increases. Based on the mathematical model of slurry concentration, slump and rheological parameters, a pipeline resistance calculation model based on slurry concentration or slump is established. Taking Jinchuan No.2 mining area as the engineering background, the accuracy of the new pipeline resistance calculation model is verified, showing that it is reliable to use the slurry concentration or slump to replace the rheological parameters for calculating the pipeline resistance.

Key words: rheological property; tailings; yield stress; pipe resistance; plastic viscosity

Foundation item: Project(51722401) supported by the National Science Foundation for Excellent Young Scholars of China; Project(51734001) supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China; Project(FRF-TP-18-003C1) supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China

Received date: 2019-04-28; **Accepted date:** 2020-10-10

Corresponding author: YIN Sheng-hua; Tel: +86-13811668481; E-mail: ustxsh@163.com

(编辑 何学锋)