



全尾砂废石膏体流变特性及阻力演化

尹升华 闫泽鹏 严荣富 李德贤 赵国亮 张鹏强

Rheological properties and resistance evolution of cemented unclassified tailings-waste rock paste backfill

YIN Sheng-hua, YAN Ze-peng, YAN Rong-fu, LI De-xian, ZHAO Guo-liang, ZHANG Peng-qiang

引用本文:

尹升华, 闫泽鹏, 严荣富, 李德贤, 赵国亮, 张鹏强. 全尾砂废石膏体流变特性及阻力演化[J]. 工程科学学报, 2023, 45(1): 9–18. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2021.07.31.002

YIN Sheng-hua, YAN Ze-peng, YAN Rong-fu, LI De-xian, ZHAO Guo-liang, ZHANG Peng-qiang. Rheological properties and resistance evolution of cemented unclassified tailings–waste rock paste backfill[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(1): 9–18. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2021.07.31.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.07.31.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同粗骨料对膏体凝结性能的影响及配比优化

Optimization of the effect and formulation of different coarse aggregates on performance of the paste backfill condensation
工程科学学报. 2020, 42(7): 829 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.14.005>

铜尾矿流变特性与管道输送阻力计算

Study of the rheological characteristics of copper tailings and calculation of resistance in pipeline transportation
工程科学学报. 2017, 39(5): 663 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.05.003>

基于扩散度的尾砂膏体流变特性

Rheological properties of tailings paste based on a spread test
工程科学学报. 2020, 42(10): 1299 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.02.18.003>

全尾砂膏体流变学研究现状与展望（上）：概念、特性与模型

Status and prospects of researches on rheology of paste backfill using unclassified–tailings (Part 1): concepts, characteristics and models
工程科学学报. 2020, 42(7): 803 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.10.29.001>

全尾砂膏体流变学研究现状与展望（下）：流变测量与展望

Status and prospects of research on the rheology of paste backfill using unclassified tailings (Part 2): rheological measurement and prospects
工程科学学报. 2021, 43(4): 451 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.10.29.002>

泵送剂对高含泥膏体流变特性影响及机理

Effects and mechanism of pumping agent on rheological properties of highly muddy paste
工程科学学报. 2018, 40(8): 918 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.08.004>

全尾砂–废石膏体流变特性及阻力演化

尹升华^{1,2)}, 闫泽鹏^{1,2)}✉, 严荣富^{1,2)}, 李德贤³⁾, 赵国亮³⁾, 张鹏强³⁾

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083

3) 金川集团股份有限公司镍钴资源综合利用国家重点实验室, 金昌 737100

✉通信作者, E-mail: yan_zepeng@163.com

摘 要 为了研究全尾砂–废石膏体的管道输送特性, 采用流变仪测试了不同尾砂–废石质量比(尾废比)及固体质量分数条件下膏体的流变特性, 构建了综合考虑密实度、灰砂比及体积分数的输送阻力方程. 将该方程代入 Comsol 软件中进行模拟计算并与环管实测结果进行对比验证, 数值模型所测误差均在 7% 以内, 说明该模型用于计算全尾砂–废石膏体的阻力特性是合理的, 还模拟了不同浓度、尾废比及初始速度条件下管道输送阻力的变化特征. 实验结果表明: 塑性黏度和屈服应力随着粗骨料膏体固体质量分数和尾废比的增加而增大; 由于颗粒间的摩擦效应导致阻力损失随尾废比的增加呈先增大后减小的趋势, 阻力损失在尾废比 5 : 5 处取得最小值; 固体质量分数增大导致水含量的降低, 使粗骨料浆体难以流动, 从而导致阻力损失快速增长; 初始流速增加, 颗粒运动变得不稳定, 摩擦加剧, 并于“拐点”—— $2.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 处阻力损失的增长率大大提高. 研究成果对于粗骨料膏体管输系统的设计具有一定借鉴意义.

关键词 粗骨料; 尾废比; 流变特性; 阻力模型; 数值模拟

分类号 TG862.2

Rheological properties and resistance evolution of cemented unclassified tailings-waste rock paste backfill

YIN Sheng-hua^{1,2)}, YAN Ze-peng^{1,2)}✉, YAN Rong-fu^{1,2)}, LI De-xian³⁾, ZHAO Guo-liang³⁾, ZHANG Peng-qiang³⁾

1) School of Civil and Resources 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), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

3) National Key Laboratory of Nickel and Cobalt Resources Comprehensive Utilization, Jinchuan Group Co Ltd, Jinchang 737100, China

✉ Corresponding author, E-mail: yan_zepeng@163.com

ABSTRACT Coarse aggregate paste filling is the core direction of today's mine development. The coarse aggregate filling can effectively reduce the discharge of the solid mine waste, which is conducive to the realization of safe, clean, and efficient mining of the deposit and can also reduce the production costs of infill mining and promote the coordinated development of green mining. To study the pipeline conveying characteristics of the tailing–waste rock paste, the rheological properties were tested by a rheometer under different tailing–waste rock ratios and solid content conditions. A resistance equation integrating the compactness, water–cement ratio, and volume concentration was constructed. This was then brought into the Comsol software for simulations and compared with the actual measurement results of the ring pipe. Errors measured by the numerical model are verified to be all within 7%, indicating that the model reasonably calculated the resistance characteristics of the tailing-waste rock paste. Variation characteristics of the pipeline conveying resistance under different solid contents, tailing–waste rock ratios, and initial velocity conditions were also simulated. Experimental

收稿日期: 2021–07–31

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(52034001, 51734001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-18-003C1); 山东省重大科技创新工程资助项目(2019SDZY05)

results show that the plastic viscosity and yield stress increase with the solid content and tailing-waste rock ratio. Due to the friction effect between the particles, the resistance loss tends to increase and then decrease with the tailing-waste rock ratio. The increase in the solid content leads to a decrease in the water content of the paste, which consequently results in difficulty in the flow of coarse aggregate slurry and a rapid increase in the resistance loss. The initial flow rate increases, the particle motion becomes unstable, the friction increases, and the growth rate of the drag loss increases greatly after the “inflection point” of $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. It is recommended that the mine should be filled with a tailing-waste rock ratio of 5 : 5 and an initial flow rate of $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The results have certain reference significance for the design of a coarse aggregate paste pipeline conveying system, which helps the development of coarse aggregate paste conveying technology and also has a positive effect on reducing the pipeline conveying resistance and extending the conveying distance.

KEY WORDS coarse aggregate; tailing-waste rock ratio; rheological characteristics; resistance model; numerical simulation

全尾砂-废石膏体充填是矿山发展的核心方向^[1-2]. 它能够有效地降低矿山固体废物的排放, 有利于矿床安全清洁高效开采的实现, 也能够降低充填采矿的生产成本, 促进矿山绿色开采与矿山经济的协调发展^[3-6]. 膏体通常是在充填站进行制备, 然后通过管道系统输送到地下采空区^[7-8]. 为了保证矿山生产效率与管道输送稳定性, 膏体通常应满足一定的流动性要求, 常见的流动性评价指标为流变特性参数^[9](屈服应力和塑性黏度). 目前, 国内外专家学者针对膏体的流变特性进行了大量的实验研究. 如, 蔡嗣经等^[10]引入 Papanastasiou 模型对充填料浆的黏度和切应力变化过程进行表征, 并证明该模型对于流体性质预测的可行性. Boylu^[11]等研究了颗粒的粒度分布对水煤浆流变学的影响. Petit^[12]等对两种不同种类砂浆的屈服应力值随时间和温度变化的耦合影响进行了评估. 可以看出, 前述研究的对象均为细粒级浆体, 所得结果并不适用于全尾砂-废石膏体.

阻力特性也是评价膏体管道输送可行性的重要依据^[13]. 传统的膏体管道输送阻力的研究一般分为 2 种方式. 一种方法是阻力损失经验公式, 如金川公式、鞍山矿院公式^[14]等. 但是, 其仅适用于特定条件下的充填输送, 不具有广泛性. 另一种方法是相似实验, 采用小管径装置进行实验, 然后将计算结果折算到大管径管道中^[15]. 虽然这种方法为管道输送的研究提供了思路, 但是由于现场条件的多变性, 导致结果与实际输送情况相差较大. 近年来, 计算流体力学(CFD)模拟成为研究膏体阻力特性的一种有效的方法^[16]. 如杨天雨等^[17]应用 Fluent 软件按照矿山的实际充填管路进行等比建模, 研究了不同影响因素对阻力损失的影响规律. 张钦礼等^[18]建立了长距离的二维管道模型, 发现料浆自流输送需要满足重力产生的压力值大于阻力损失值. 吴迪等^[19]采用模拟手段分析了某矿充填管道输送过程中弯管的受力情况, 为充填

系统的顺利运行提供了理论支撑. 王新民等^[20]基于 FLOW-3D 综合多种影响因素研究发现西部某膏体充填站的最佳输送倍线为 3.0. 然而, 还没有一种可以有效预测全尾砂-废石膏体流动特征的模型.

本实验的主要目的是考察全尾砂-废石膏体的流变特性及阻力演化行为. 研究了粗骨料膏体的流变参数变化特性, 构建了考虑体积分数、堆积密度及灰砂比的输送阻力数值模型. 并基于 Comsol 软件分析了不同尾废比、入口速度、及浓度对输送阻力的影响规律. 本文的研究成果对于粗骨料膏体输送技术的发展及减小管输阻力、延长输送距离具有积极意义.

1 实验材料

本实验所用实验材料均取自金川公司二矿区, 全尾砂和废石的物理化学性质如下:

(1)全尾砂取自二矿区选厂, 晾晒并烘干后测其密度为 $2.785 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 松散堆积密度和堆积密度分别为 $1.21 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.527 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. 采用 LMS-30 型激光粒度分析仪测试全尾砂的粒度组成, 粒度分布见图 1(a). 可以看出, 粒度小于 $80 \mu\text{m}$ 的尾矿占 91.31%. 尾矿砂的主要化学成分采用 X 射线荧光(XRF)光谱分析, 结果见表 1. 全尾砂的活性根据国家标准 GB/T20491—2006、GB203—2008、GB/T18046—2008 采用用碱度、活度、质量指数等指标进行评价, 如表 2 所示. 表 2 数据标明二矿区全尾砂是一种低活性的填充材料.

(2)废石取自二矿区充填站料仓. 测其密度为 $2.876 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. 松散堆积密度和致密堆积密度分别为 $1.675 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.968 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. 用筛分法测试废石的粒度分布, 粒度曲线如图 1(b)所示, 可见 $0 \sim 12 \text{ mm}$ 的废石占 87%, 小于 15 mm 的废石占 99.9%, 废石骨料粗颗粒含量较多, 会对管道输送产生不利影响. 废石的活性指标在表 2 中给出, 可以看出废石

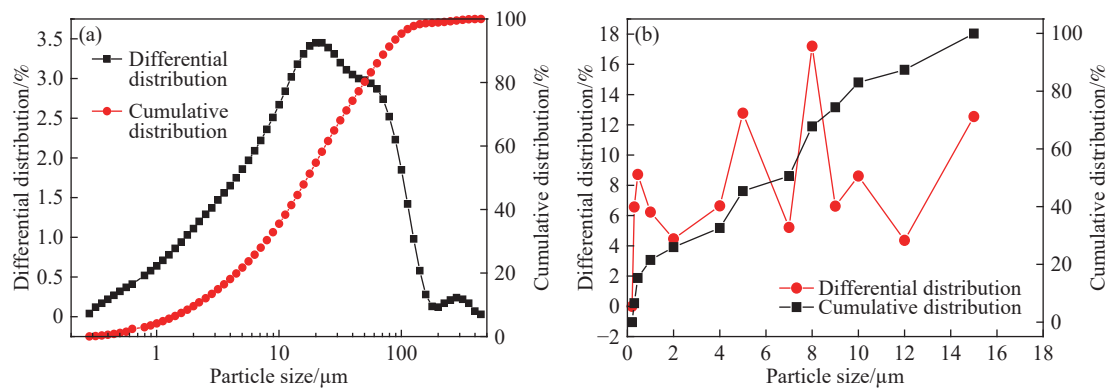


图 1 粒度分析结果.(a) 全尾砂; (b) 废石

Fig.1 Particle size analysis results: (a) unclassified tailing; (b) waste rock

表 1 充填材料化学成分

Table 1 Chemical composition of the filling material

Materials	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	Other
Unclassified tailing	42.20	3.73	32.71	4.04	12.14	3.37	0.39	0.33	0	0.85
Waste rock	47.71	16.39	15.22	7.81	7.17	2.58	1.95	0.54	0.12	0.39

表 2 充填材料活性指标

Table 2 Activity index of the filling material

Materials	Alkalinity rate	Activity rate	Mass index	Activity
Unclassified tailing	0.79	0.1	0.24	Low activity
Waste rock	0.57	0.163	0.54	Low activity

同样为低活性的充填材料。

(3)堆积密实度是表征粗骨料混合性能的一个重要指标,其主要反映的是细骨料填隙效应的优劣。经实验得到的不同全尾砂-废石膏配比的密实度如表 3 所示。预实验中发现全尾砂-废石膏质量比(尾废比)达到 3 : 7 后料浆稳定性降低,会严重影

表 3 混合骨料的堆积密实度

Table 3 Stacking compactness of the mixed aggregate

Tailing-waste rock ratio	Density of mixed aggregate/(g·cm ⁻³)	Compactness, Φ
0 : 1	2.826	0.476
1 : 9	2.815	0.489
2 : 8	2.801	0.508
3 : 7	2.788	0.521
4 : 6	2.774	0.542
5 : 5	2.761	0.593
6 : 4	2.752	0.614
7 : 3	2.743	0.529
8 : 2	2.732	0.501
9 : 1	2.724	0.496
1 : 0	2.715	0.464

响料浆的阻力特性。因此,本文选取中间三组连续的配比(尾废比 4 : 6、5 : 5 和 6 : 4)进行实验。

2 全尾砂-废石膏体的流变特性

2.1 流变测试

采用 Brookfield R/S+型流变仪对全尾砂-废石膏体的流变特性进行测试。该流变仪配备规格为 v40-20 的桨式转子,即桨叶直径为 20 mm,高度为 40 mm。为了避免干尾砂颗粒与水之间不充分混合所造成的测量误差,使用搅拌机以 200 r·min⁻¹ 的转速搅拌 2 min 后再进行流变测试。采用控制剪切速率法对废石膏体的流变特性进行测试(流变实验方案如表 4 所示)。流变测试共包括两部分内容: 1)固体质量分数(选择 67% ~ 77% 质量分数进行测试)对流变特性的影响; 2)尾砂和废石膏的质量比,即尾废比,选择 4 : 6/5 : 5/6 : 4 3 组进行测试。流变测试流程如下: 首先使转子保持恒定剪切速率(220 s⁻¹)对膏体进行 2 min 的恒定剪切;待膏体达到应力松弛阶段后,设置剪切速率以 0.1 s⁻¹ 逐渐递减,在变剪切速率下测试膏体的流变特性,该阶段持续时间共 220 s,流变测试剪切过程如图 2 所示。最终得到全尾砂-废石膏体的流变特性曲线,如图 3 所示。

图 3 为不同固体质量分数条件下膏体的流变特性曲线。可以看出,流变曲线的“第二阶段”基本呈线性增加,其规律符合“宾汉姆塑性体”的特征^[21]。因此,使用宾汉姆公式,如式(1)拟合流变结

表 4 流变测试方案

Table 4 Rheological test summary

Scheme	Solid mass fraction/%	Volume fraction/%	Cement-sand mass ratio	Water-cement mass ratio	Tailing-waste rock ratio	Bulk density
1-3	67	55.20%	1 : 4	1.41	4 : 6/5 : 5/6 : 4	0.542/0.593/0.614
4-6	69	52.39%	1 : 4	1.57	4 : 6/5 : 5/6 : 4	0.542/0.593/0.614
7-9	71	49.72%	1 : 4	1.75	4 : 6/5 : 5/6 : 4	0.542/0.593/0.614
10-12	73	47.19%	1 : 4	1.94	4 : 6/5 : 5/6 : 4	0.542/0.593/0.614
13-15	75	44.77%	1 : 4	2.14	4 : 6/5 : 5/6 : 4	0.542/0.593/0.614
16-18	77	42.47%	1 : 4	2.35	4 : 6/5 : 5/6 : 4	0.542/0.593/0.614

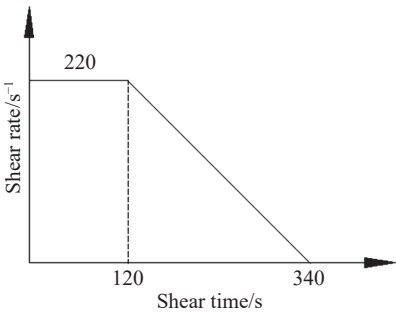


图 2 流变剪切过程示意图

Fig.2 Schematic of the rheological shearing process

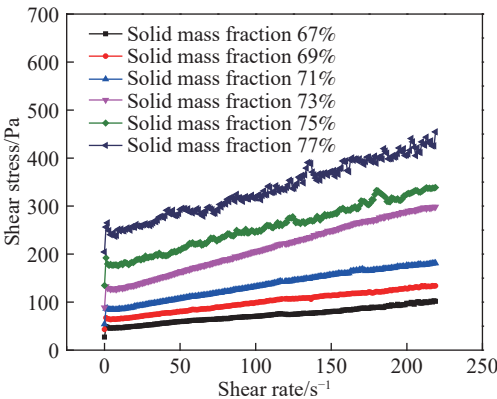


图 3 流变特性曲线(尾废比 6 : 4)

Fig.3 Rheological characteristic curve (tailing-waste ratio is 6 : 4)

果,得到不同工况下膏体的流变参数值。拟合结果见表 5。

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}} \quad (1)$$

式中: τ 为料浆的实时剪切应力, Pa; τ_0 为料浆的屈服应力, Pa; η 为料浆的塑性黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.2 拟合结果分析

根据表 5 中数据做固体质量分数和尾废比对流变参数影响的曲线图,如图 4~5 所示。图 4 表明,随着料浆中固体含量的增加,填充物料的屈服应力在不断地增大,且增长的幅度越来越大,而塑性黏度也呈增长的趋势但是增长幅度在逐渐减

表 5 流变参数拟合结果

Table 5 Fitting results of rheological parameters

Tailing-waste rock ratio	Solid mass fraction /%	Yield stress/Pa	Plastic viscosity/($\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)	R^2
4 : 6	77%	184.3155	0.7424	0.9971
	75%	85.8522	0.6476	0.9977
	73%	61.3761	0.4344	0.9924
	71%	43.5327	0.2677	0.9889
	69%	26.9710	0.1815	0.9844
	67%	18.0002	0.1422	0.9631
5 : 5	77%	206.5693	0.8278	0.9743
	75%	138.0741	0.7509	0.9993
	73%	91.1335	0.6465	0.9992
	71%	69.4989	0.4144	0.9927
	69%	53.8325	0.2737	0.9876
	67%	39.4085	0.1673	0.9798
6 : 4	77%	236.9843	0.9017	0.9612
	75%	172.7104	0.8651	0.9849
	73%	118.8447	0.7526	0.9996
	71%	81.1709	0.5074	0.9986
	69%	63.0234	0.3453	0.9941
	67%	46.6048	0.2311	0.9861

小。分析认为,固体质量分数变大时会促进尾砂颗粒间的“絮网”结构^[22]的形成过程,“絮网”结构会对转子的转动产生较大的阻力,所以随着固体质量分数的增大料浆的屈服应力随之增大。而粗骨料膏体孔隙较多且具有一定“保水性”,当受到剪切作用时“被包裹”的水被释放,导致塑性黏度的增长率降低。图 5 表明,随着尾砂所占比例的增加粗骨料膏体的屈服应力及塑性黏度均呈增长的趋势。这主要是由于尾砂颗粒粒径小于废石,其可以填充在废石颗粒之间形成一种相对稳定的骨架结构。随着尾砂含量的增加这种结构越来越稳定,进而促进了屈服应力和塑性黏度的增长。

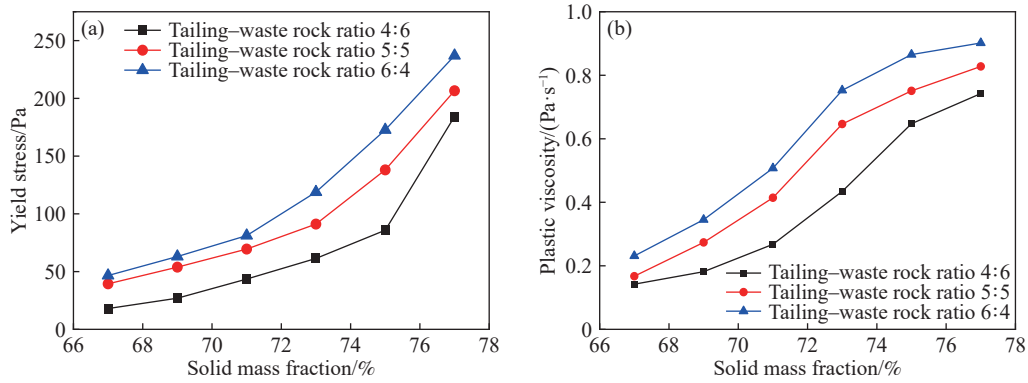


图4 固体质量分数对流变特性的影响

Fig.4 Effect of the solid mass fraction on the rheological properties

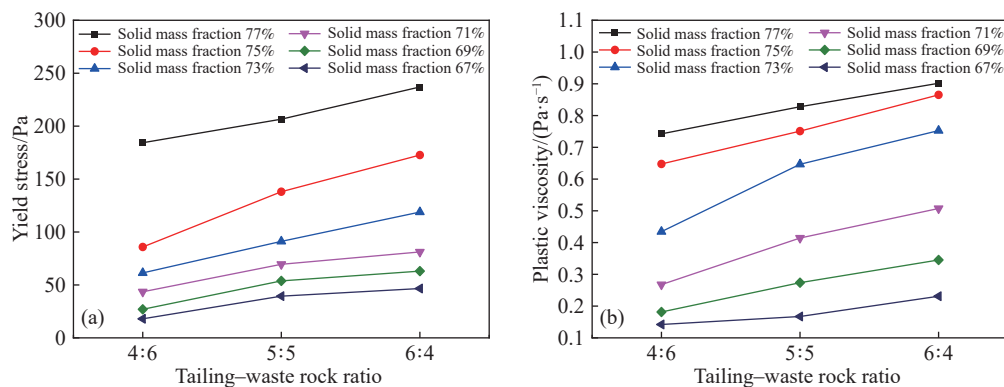


图5 全尾砂-废石比对流变特性的影响

Fig.5 Effect of the tailing-waste rock ratio on the rheological properties

2.3 全尾砂-废石膏体阻力模型

2.3.1 流变参数方程

屈服应力与料浆中水的含量、水泥量、骨料的级配都存在着密切的关系^[23]。研究表明,屈服应力与骨料体积分,以及水泥与骨料的质量比(灰砂

比)之间存在定性的关系。对全尾砂-废石膏体的屈服应力进行“屈服应力-体积分”和“屈服应力-灰砂比”的拟合,拟合结果如表6所示。可以看出,废石膏体的料浆屈服应力与体积分、屈服应力与灰砂比呈负幂指数关系。

表6 屈服应力拟合结果

Table 6 Yield stress fitting result

Tailing-waste rock mass ratio	Fitting equation of the yield stress and slurry volume fraction	R^2	Fitting equation of the yield stress and slurry water-cement ratio	R^2
4 : 6	$\tau_0 = 0.0029e^{20.49C_v}$	0.97	$\tau_0 = 1384.01(w/c)^{-5.10}$	0.97
5 : 5	$\tau_0 = 0.113e^{13.91C_v}$	0.99	$\tau_0 = 820.24(w/c)^{-3.46}$	0.99
6 : 4	$\tau_0 = 0.196e^{13.18C_v}$	0.99	$\tau_0 = 894.21(w/c)^{-3.28}$	0.99

由表3~4数据可以看出,体积分的增加(固体质量分数的增加)和灰砂比的减少(固体质量分数的增加)均会导致屈服应力的增加,所以灰砂比与骨料体积对屈服应力的影响是同步的。同时,屈服应力与料浆的配比也存在着紧密的关系,为了使方程达到最简,并且能够清晰的表达出影响因素与屈服应力的关系,提出了如下屈服应力预测模型:

$$\tau_0 = a \cdot \Phi \cdot e^{C_v} \left(\frac{w}{c} \right)^b \quad (2)$$

式中: w/c 为灰砂比; Φ 为骨料堆积集密实度; C_v 为体积分; a 为常数, Pa; b 为实验常数。

膏体料浆中絮网结构的固体物质比重以及细粒级含量是导致黏度变化的根本原因,这为黏度计算模型的构建提供了思路。通过对塑性黏度影响因素的分析,发现影响塑性黏度的主要因素为膏体浓度和膏体稳定系数,黏度特性虽然受级配

特征的影响,但细颗粒含量参数不能直接描述塑性黏度增长特征。

塑性黏度随膏体料浆浓度基本呈幂函数形式增长,同时在体积分数一定的情况下,堆积密实度的减小意味着提高了料浆的有效浓度,进一步促使黏度的增长。为表现不同因素与塑性黏度的关系,同时实现塑性黏度的简明预测,提出了全尾砂膏体塑性黏度预测模型:

$$\eta = a_1 C_v^{b_1} \left(\frac{C_v}{\Phi} \right)^k \quad (3)$$

式中: η 为塑性黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; a_1, b_1, k 为实验常数。在 origin 中采用式(2)和式(3)对实验数据进行拟合得到不同尾废比条件下公式中未知常数的确定值。如表 7 所示。结果显示相关系数 R^2 均在 0.95 以上,说明流变参数模型的自适应性良好。

表 7 参数拟合结果

Table 7 Parameter fitting result

Tailing-waste rock ratio	Yield stress		R^2	Plastic viscosity			R^2
	a	b		a_1	b_1	k	
4 : 6	1232.80	-4.85	0.97	1.98	0.64	5.58	0.97
5 : 5	799.77	-3.21	0.99	3.84	2.39	2.72	0.99
6 : 4	924.96	-3.03	0.99	1.28	0.77	3.76	0.99

2.3.2 全尾砂-废石膏体阻力计算方程

膏体的输送阻力通常通过典型的宾汉流体阻力方程进行计算^[24],如式(4)所示。在管径和流速已知的情况下采用该方程进行阻力计算时,管道阻力主要受到屈服应力和塑性黏度的制约。将前述得到的屈服应力和塑性黏度公式带入到式(4)就得到了考虑物料综合配比的输送阻力 i 计算公式,如式(5)所示。

$$i = \frac{32v\eta}{D^2} + \frac{16\tau_0}{3D} \quad (4)$$

$$i = \frac{32va_1 \cdot C_v^{b_1} \cdot \left(\frac{C_v}{\Phi} \right)^c}{D^2} + \frac{16a \cdot \Phi \cdot e^{C_v} \cdot \left(\frac{w}{c} \right)^b}{3D} \quad (5)$$

式中: v 为料浆的平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; D 为管道直径, mm。

式(5)通过对传统的宾汉流体阻力方程中的流变参数进行替换,将体积分数、密实度和灰砂比代入到阻力方程中,可从多个角度综合骨料配比对输送阻力的影响。观察可知,在流速条件确定时,料浆自身的配比参数是影响阻力损失的关键因素,该公式的提出对于粗骨料膏体输送理论的进一步发展具有积极的意义。

3 数值模型建立

COMSOL 是一款应用于模拟仿真的有限元软件,它传统的有限元模拟软件的复杂操作不同,我们进行多物理场耦合分析时仅需要相应选择所需的微分方程就可实现,非常方便快捷,该软件在声学、流体动力学、多孔介质等多个方向得到广泛的关注。

3.1 模型基本控制方程

COMSOL 内嵌描述流体的流动方程为纳维-斯托克(N-S)方程^[25],其基本表达式为:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \nabla \cdot \left[-p\mathbf{I} + \eta(\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T) - \frac{2}{3}\eta(\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{I} \right] + \mathbf{F} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\mathbf{v} \cdot \rho) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: ρ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\mathbf{v}$ 为料浆流速向量; p 为流体压力, Pa; t 为流体流动时间, s; $\mathbf{F}$ 为所有作用在流体上的外力(体积力), Pa; l 代表流体运动的距离, m; ∇ 为梯度算符。通过修改式中的体积力 $\mathbf{F}$,将上文推导的阻力计算公式带入到 N-S 方程中对方程的弱解形式进行离散,建立综合考虑体积分数、堆积密度及灰砂比的数值模型。

3.2 几何模型构建及参数设置

模拟实验根据金川二矿地表充填钻孔至-1350 m 水平的充填管路系统(现用充填管径 150 mm)进行几何模型的构建。根据雷诺数相似理论,将其简化为一个长 10 m、高 2.5 m 的“L 型”模型,如图 6 所示。模型设置入口为“速度入口”。由于添加重力为体积力,设置管道出口边界条件为 0 或层流流出会导致模拟计算不收敛,需要设置出口为开放边界且无黏滞应力并加入压力积分为 0 的约束。

COMSOL 软件自带的网格剖分工具具有很强的编辑能力,用户可根据自己的需求调整网格的形状、大小等。选择细化自由三角形网格对几何进行划分,设置模型的边界层数为 6、边界拉伸系数为 1.2,以使网格更密集,最终单元数目为 228700,网格细节如图 6 所示。

3.3 数值模拟方案

本次数值模拟考虑影响因素共有 3 个,分别为:尾砂与废石的质量比 4 : 6、5 : 5 和 6 : 4;固体质量分数 73%、75% 和 77%;模型初始流速 2.0、2.2 和 2.4 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过 Comsol 后处理提取不同尾废比、固体质量分数及初始流速条件下的压降演化

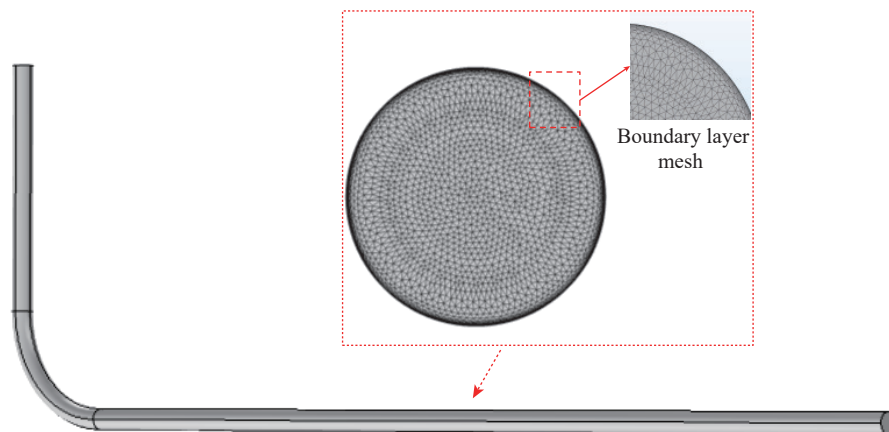


图6 管道几何结构及截面网格剖分图

Fig.6 Diagram of the pipeline geometry and section meshing

规律进行分析。充填物料的流动形态通过雷诺数进行确定,其中 $Re < 2300$ 属于层流、 $Re > 4000$ 属于紊流。雷诺数计算公式如下:

$$Re = \frac{\rho U D}{\eta} \quad (7)$$

式中: U 为特征速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。根据前述设置条件计算得到尾砂-废石膏体的雷诺数均小于 2300,认为其在管道输送过程中处于层流状态。

4 全尾砂-废石膏体输送阻力演化特征

4.1 模拟验证

为了评估本文建立数值模型的可靠性与适用性,采用金川二矿所得充填物料进行了充填环管试验,通过在模拟环路上安装压力变送器对膏体阻力损失进行测量。环管参数为:管径 150 mm;固体质量分数 73% ~ 77%;尾废比 4 : 6;流量 $120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (换算后流速约为 $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),压力监测管路长度 17.13 m。根据环管实验参数,在 Comsol 中建立一个长为 17.13 m、管径 150 mm 的水平直管模型,其中网格剖分和边界条件的设置(速度入口固定为 $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)均和上文相同。环管实测数据与数值模拟数据如图 7 所示。

由图 7 可以看出,在不同固体质量分数的情况下环管实测数据和数值模拟数据的相对误差在 8% 以内,模型的自适应性良好说明前述构建的数值模型用于全尾砂-废石膏体管输阻力的计算是可靠的。

4.2 全尾砂-废石膏体阻力演化特征分析

4.2.1 尾废比对阻力损失的影响

骨料粒度组成的差异对充填料浆的输送行为具有重要的影响,为了降低矿山生产成本同时在充填过程中进行多固废的协同利用,进行了不同

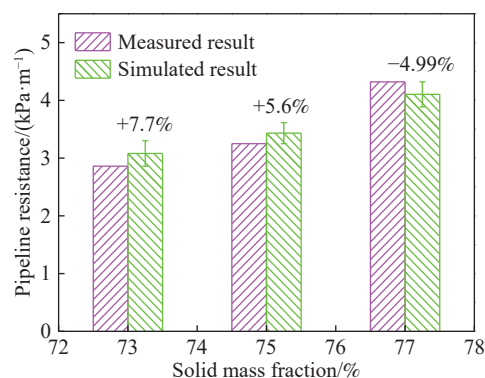


图7 模型验证

Fig.7 Model validation

配比条件下全尾砂-废石膏体的管道输送阻力损失模拟,结果如图 8 所示。

图 8 表明,随着尾废比的增加阻力损失呈先减小后增大的趋势,不同条件下的阻力损失均在尾废比 5 : 5 时达到最小值,说明此尾废比条件有利于实际应用。分析认为此现象的产生可归因于膏体物料颗粒级配的影响,当尾废比为 4 : 6,膏体中粗颗粒(废石)的含量较多,此条件下膏体的稳定性较差,从而导致阻力损失的增大;而尾废比为 6 : 4 时,物料中的细颗粒成分较多,浆体密实度最高,表明骨料结构较致密。此时,浆体的黏性较强这使得颗粒与管壁的摩擦增强,从而导致较大的阻力损失。可以看出,尾废比为 5 : 5 时膏体物料具有较稳定的结构,同时输送阻力最低,更有利于管道输送。配合比是影响粗骨料膏体输送的一个关键条件,其在物料制备过程中相对容易去进行控制,基于本实验结果建议全尾砂-废石的最佳配比为 5 : 5。

4.2.2 固体含量对阻力损失的影响

由全尾砂、水泥和废石组成的固相含量是影

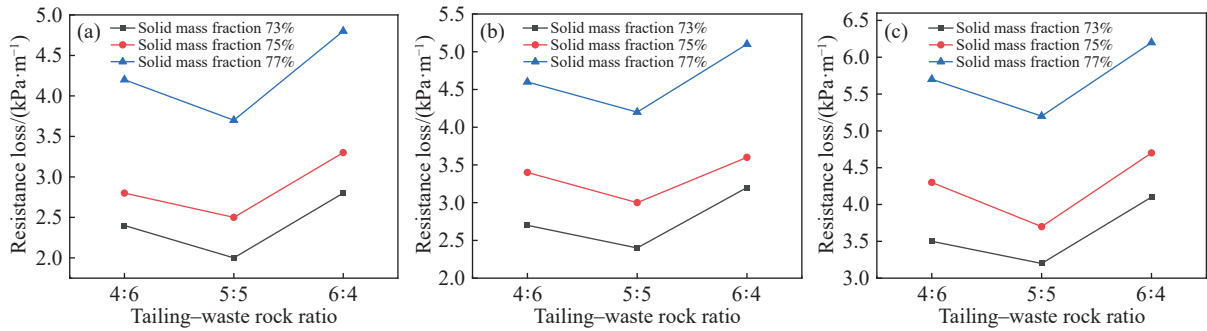


图 8 不同初始速度下尾废比对阻力损失的影响。(a) $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig.8 Effect of the tailing-waste rock ratio on the drag loss with different initial velocities: (a) $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

响浆体管道输送性能的重要因素。固体质量分数过高会导致堵管、爆管现象导致充填料不能够顺

利的输送至地下采场。图 9 显示了不同固体质量分数条件下的膏体输送阻力损失的变化情况。

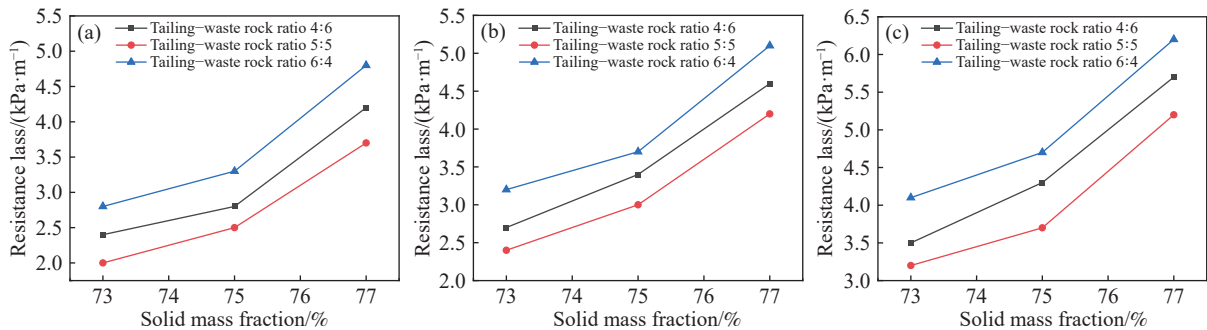


图 9 不同初始速度下固体质量分数对阻力损失的影响。(a) $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig.9 Effect of the solid mass fraction on the drag loss with different initial velocities: (a) $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (b) $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; (c) $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

与预期的一样,粗骨料膏体的阻力损失随着固体质量分数的增加而增大且增长速率在逐渐提升。此行为产生的主因是由于固体含量的增加导致浆体水分含量减少所引起的。当粗骨料膏体流经管道时,水起到润滑剂的作用。因此,水含量的降低(固体质量分数增大)使粗骨料浆体难以流动,从而提高了膏体输送的阻力损失。在矿山实际充填过程中,粗骨料膏体应选择适当的固体含量,以达到良好的输送性能。此外,膏体的阻力损失还应该满足矿山实际的充填情况(如浆液搅拌机的处理能力、泵的输送能力等),在保证料浆流动性

和可输送性的同时应当最大限度的去提高膏体的浓度,以确保能够最大限度的去提高矿山充填开采能力及固废消耗能力。

4.2.3 初始流速对阻力损失的影响

料浆的初始流速的不同会影响膏体输送的稳定性,进而影响管道阻力损失。初始流速对浆体的影响主要体现在促进颗粒碰撞及摩擦等方面。为了确定全尾砂-废石膏体最佳的输送速度,采用模拟手段进行了 $2.0 \sim 2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下的阻力损失模拟,模拟结果如图 10 所示。

通过图 10 可以看出,随着初始流速的增大,阻

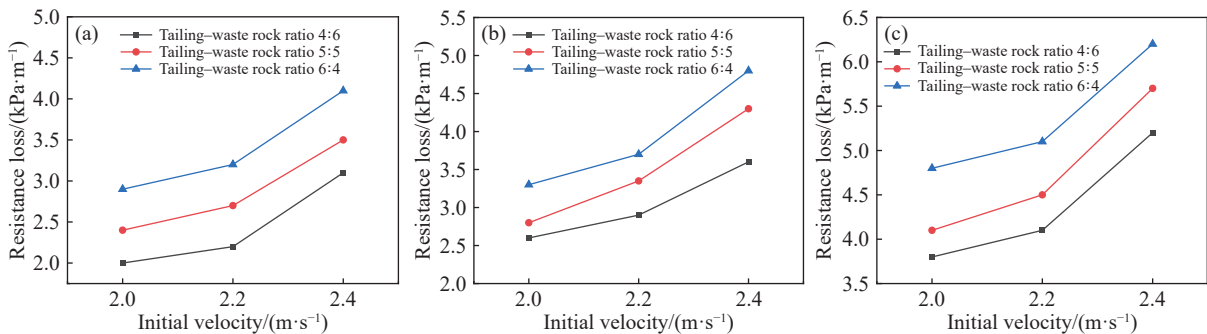


图 10 不同固体质量分数下初始速度对阻力损失的影响。(a) 73%; (b) 75%; (c) 77%

Fig.10 Effect of the initial velocity on the resistance loss with different solid mass fractions: (a) 73%; (b) 75%; (c) 77%

力损失呈增大的趋势,且增长速率提高。以固体质量分数 77%、尾废比 5:5 条件下的阻力损失为例,当初始速度由 2.0 增大至 2.2 m·s⁻¹,阻力损失增长 0.39 kPa·m⁻¹,增长率为 10.2%;由 2.2 增大至 2.4 m·s⁻¹时,阻力损失增长 1.05 kPa·m⁻¹,增长率为 24.94%,初始速度 2.2 m·s⁻¹处为阻力损失的“拐点”。分析认为粗骨料膏体内部颗粒在输送过程中,会产生一定的紊动能量,形成紊动强度^[26]。物料颗粒所受紊动作用力公式如下:

$$F_p = \frac{1}{6} \pi d_f^3 (\rho_f - \rho_w) \frac{u_0^2}{j} \quad (8)$$

式中: F_p 为颗粒在紊动水体中所受的力, N; d_f 为尾砂颗粒粒径, mm; ρ_f 和 ρ_w 分别为尾砂颗粒和水的密度, kg·m⁻³; u_0 为管内平均输送速度, m·s⁻¹; j 为尾砂颗粒的移动距离, mm。由式(8)可以看出,当初始速度增大时导致管内尾砂颗粒所承受的紊动作用力发生变化,从而提高颗粒的碰撞几率与摩擦效应,这使得膏体物料管输过程中的能量利用率降低,相应的阻力损失增大。同时,由于流体的“分层效应”^[27],不同流层间的剪切作用随着初始流速的增加而增大,导致阻力损失的增长率出现随流速的增加而增大的现象。适当的初始流速(流量)是保证矿山生产效率的重要因素,但是流速过大时会导致阻力损失的过度增长。因此,结合数值模拟结果建议全尾砂-废石膏体的最佳初始速度应控制在 2.2 m·s⁻¹。

5 结论

(1) 对全尾砂-废石膏体的流变特性进行了测试,并回归得到流变参数的变化规律。塑性黏度和屈服应力随着粗骨料膏体固体质量分数和尾废比的增加均呈增大的趋势。

(2) 建立了综合考虑膏体物料密实度、体积分数及灰砂比的输送阻力数值模型。将数值模拟结果与环管实测结果进行对比,相对误差均在 7% 以内,证明该模型对粗骨料膏体的输送阻力进行计算是可靠的。

(3) 通过模拟手段得到尾废比、固体质量分数、初始流速对阻力损失的影响规律。颗粒间的摩擦效应导致阻力损失随尾废比的增加呈先增大后减小的趋势;固体质量分数增大导致浆体流动性变差,阻力损失快速增长;初始流速增加,颗粒运动变得不稳定,摩擦加剧,阻力损失增加。

(4) 根据模拟结果得到本实验条件下粗骨料膏体管道输送的最佳参数分别为:尾废比 5:5、初始

流速 2.2 m·s⁻¹。该结论对粗骨料膏体的管输设计具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Yang Z Q, Wang Y Q, Gao Q, et al. Research on pressure loss in pipe by conveying mix slurry with waste rock and full tailings based on round pipe test. *J Hefei Univ Technol (Nat Sci)*, 2017, 40(8): 1092
(杨志强, 王永前, 高谦, 等. 废石尾砂混合料浆管道输送压力损失环管试验. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(8): 1092)
- [2] Yin S H, Liu J M, Chen W, et al. Optimization of the effect and formulation of different coarse aggregates on performance of the paste backfill condensation. *Chin J Eng*, 2020, 42(7): 829
(尹升华, 刘家明, 陈威, 等. 不同粗骨料对膏体凝结性能的影响及配比优化. 工程科学学报, 2020, 42(7): 829)
- [3] Feng G R, Jia X Q, Guo Y X, et al. Influence of the wasted concrete coarse aggregate on the performance of cemented paste backfill. *J China Coal Soc*, 2015, 40(6): 1320
(冯国瑞, 贾学强, 郭育霞, 等. 废弃混凝土粗骨料对充填膏体性能的影响. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1320)
- [4] Yang X B, Xiao B L, Gao Q, et al. Determining the pressure drop of cemented Gobi sand and tailings paste backfill in a pipe flow. *Constr Build Mater*, 2020, 255: 119371
- [5] Benzaazoua M, Bussière B, Demers I, et al. Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Miner Eng*, 2008, 21(4): 330
- [6] Cheng W H. *Study on High Concentration Gravity Filling Technology of Coarse Aggregate* [Dissertation]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012
(程伟华. 粗骨料高浓度自流充填技术研究[学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2012)
- [7] Wu D, Yang B G, Liu Y C. Transportability and pressure drop of fresh cemented coal gangue-fly ash backfill (CGFB) slurry in pipe loop. *Powder Technol*, 2015, 284: 218
- [8] Liu L, Fang Z Y, Wu Y P, et al. Experimental investigation of solid-liquid two-phase flow in cemented rock-tailings backfill using Electrical Resistance Tomography. *Constr Build Mater*, 2018, 175: 267
- [9] Zhang L F, Wu A X, Wang H J. Effects and mechanism of pumping agent on rheological properties of highly muddy paste. *Chin J Eng*, 2018, 40(8): 918
(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. 工程科学学报, 2018, 40(8): 918)
- [10] Cai S J, Huang G, Wu D, et al. Experimental and modeling study on the rheological properties of tailings backfill. *J Northeast Univ (Nat Sci)*, 2015, 36(6): 882
(蔡嗣经, 黄刚, 吴迪, 等. 尾砂充填料浆流变性能模型与试验研究. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 882)

- [11] Boylu F, Dinçer H, Ateşok G. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal-water slurries. *Fuel Process Technol*, 2004, 85(4): 241
- [12] Petit J Y, Khayat K H, Wirquin E. Coupled effect of time and temperature on variations of yield value of highly flowable mortar. *Cem Concr Res*, 2006, 36(5): 832
- [13] Wu A X, Cheng H Y, Wang Y M, et al. Transport resistance characteristic of paste pipeline considering effect of wall slip. *Chin J Nonferrous Met*, 2016, 26(1): 180
(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. *中国有色金属学报*, 2016, 26(1): 180)
- [14] Liu X H. *Study on Rheological Behavior and Pipe Flow Resistance of Paste Backfill* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015
(刘晓辉. 膏体流变行为及其管流阻力特性研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2015)
- [15] Ye J, Xia J X, Beata M. Study on the resistance loss of hydraulic transport for coarse particles in horizontal pipeline. *Met Mine*, 2011(7): 12
(叶坚, 夏建新, Malczewska Beata. 水平管道水力输送粗粒物料的阻力损失研究. *金属矿山*, 2011(7): 12)
- [16] Wu D, Yang B G, Liu Y C. Pressure drop in loop pipe flow of fresh cemented coal gangue-fly ash slurry: Experiment and simulation. *Adv Powder Technol*, 2015, 26(3): 920
- [17] Yang T Y, Qiao D P, Wang J, et al. Numerical simulation and new model of pipeline transportation resistance of waste rock-aeolian sand high concentration slurry. *Chin J Nonferrous Met*, 2021, 31(1): 234
(杨天雨, 乔登攀, 王俊, 等. 废石-风砂高浓度料浆管道输送数值模拟及管输阻力新模型. *中国有色金属学报*, 2021, 31(1): 234)
- [18] Zhang Q L, Liu Q, Zhao J W, et al. Pipeline transportation characteristics of filling paste-like slurry pipeline in deep mine. *Chin J Nonferrous Met*, 2015, 25(11): 3190
(张钦礼, 刘奇, 赵建文, 等. 深井似膏体充填管道的输送特性. *中国有色金属学报*, 2015, 25(11): 3190)
- [19] Wu D, Cai S J, Yang W, et al. Simulation and experiment of backfilling pipeline transportation of solid-liquid two-phase flow based on CFD. *Chin J Nonferrous Met*, 2012, 22(7): 2133
(吴迪, 蔡嗣经, 杨威, 等. 基于CFD的充填管道固液两相流输送模拟及试验. *中国有色金属学报*, 2012, 22(7): 2133)
- [20] Wang X M, Zhang D M, Zhang Q L, et al. Pipeline self-flowing transportation property of paste based on FLOW-3D software in deep mine. *J Central South Univ (Sci Technol)*, 2011, 42(7): 2102
(王新民, 张德明, 张钦礼, 等. 基于FLOW-3D软件的深井膏体管道自流输送性能. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(7): 2102)
- [21] Xue Z L, Gan D Q, Zhang Y Z, et al. Rheological behavior of ultrafine-tailings cemented paste backfill in high-temperature mining conditions. *Constr Build Mater*, 2020, 253: 119212
- [22] Wu A X, Liu X H, Wang H J, et al. Resistance characteristics of structure fluid backfilling slurry in pipeline transport. *J Central South Univ (Sci Technol)*, 2014, 45(12): 4325
(吴爱祥, 刘晓辉, 王洪江, 等. 结构流充填料浆管道输送阻力特性. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(12): 4325)
- [23] Zhang X X, Qiao D P. Rheological property and yield stress forecasting model of high-density slurry with waste rock-tailings. *J Saf Environ*, 2015, 15(4): 278
(张修香, 乔登攀. 废石-尾砂高浓度料浆的流变特性及屈服应力预测模型. *安全与环境学报*, 2015, 15(4): 278)
- [24] Hou Y Q, Yin S H, Dai C Q, et al. Rheological properties and pipeline resistance calculation model in tailings paste. *Chin J Nonferrous Met*, 2021, 31(2): 510
(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. *中国有色金属学报*, 2021, 31(2): 510)
- [25] Cheng H Y, Wu S C, Li H, et al. Influence of time and temperature on rheology and flow performance of cemented paste backfill. *Constr Build Mater*, 2020, 231: 117117
- [26] Xue Z L, Yan Z P, Jiao H Z, et al. Dynamic settlement law of flocs during unclassified tailings in deep cone thickening process. *Chin J Nonferrous Met*, 2020, 30(9): 2206
(薛振林, 闫泽鹏, 焦华喆, 等. 全尾砂深锥浓密过程中絮团的动态沉降规律. *中国有色金属学报*, 2020, 30(9): 2206)
- [27] Gan D Q, Sun H K, Xue Z L, et al. Transport state evolution of the packed slurry with the influence of temperature. *J China Univ Min Technol*, 2021, 50(2): 248
(甘德清, 孙海宽, 薛振林, 等. 温度影响下的充填料浆大流量管输流态演化. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(2): 248)