

Study on rheological properties of paste filling materials and their influence on pipeline transportation stability

Chao Wang

Yunnan Diqing Mining Development Co., Ltd., Shangri La, Yunnan, 674400, China

Abstract

To address the issues of pipeline blockage and excessive resistance loss frequently encountered during the pipeline transportation of paste backfill in metal mines, this study focuses on solid wastes such as full tailings-waste rock and titanium-extracted slag as the primary research subjects. Through a combination of experimental testing and numerical simulation, the rheological properties of paste backfill materials and their influence mechanisms on pipeline transportation stability were systematically investigated. The research employed equipment such as a rheometer and mini-slump cone to measure the yield stress and plastic viscosity of paste under varying tailings-waste rock mass ratios (tailings-to-waste ratio), solid mass fractions, and additive dosages. A rheological parameter prediction model considering time-temperature effects was established using *Broussonetia papyrifera*. Based on loop-pipe experiments and COMSOL numerical simulations, the variation patterns of pipeline transportation resistance with tailings-to-waste ratio and initial flow velocity were analyzed, leading to the proposal of optimal transportation parameters. The results indicate that the yield stress and plastic viscosity of paste exhibit a linear increasing trend with higher solid mass fractions and tailings-to-waste ratios, with resistance loss reaching its minimum at a tailings-to-waste ratio of 5:5. When the initial flow velocity is $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, particle movement stability within the pipeline is optimal, effectively mitigating the risk of blockage. The findings provide theoretical foundations and technical support for the optimized design of paste backfill pipeline transportation systems in metal mines.

Keywords

paste backfill; rheological properties; pipeline transportation; yield stress; resistance loss; numerical simulation

膏体充填材料流变特性及其对管道输送稳定性影响研究

王超

云南迪庆矿业开发有限责任公司, 中国 · 云南 香格里拉 674400

摘 要

为解决金属矿山膏体充填管道输送过程中易出现的堵管、阻力损失过大等问题, 本文以全尾砂-废石、提钛炉渣等固废为主要研究对象, 通过实验测试与数值模拟相结合的方法, 系统探究了膏体充填材料的流变特性及其对管道输送稳定性的影响机制。研究采用流变仪、微型塌落筒等设备, 测试了不同尾砂-废石质量比(尾废比)、固体质量分数及添加剂掺量条件下膏体的屈服应力与塑性黏度, 构建了考虑时-温效应的流变参数预测模型; 基于环管实验与 COMSOL 数值模拟, 分析了管道输送阻力随尾废比、初始流速的变化规律, 提出了最优输送参数。结果表明: 膏体屈服应力与塑性黏度随固体质量分数和尾废比的增加呈线性增长趋势, 在尾废比 5:5 时阻力损失达到最小值; 初始流速为 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 管道内颗粒运动稳定性最佳, 可有效避免堵管风险。研究成果为金属矿山膏体充填管道输送系统的优化设计提供了理论依据与技术支持。

关键词

膏体充填; 流变特性; 管道输送; 屈服应力; 阻力损失; 数值模拟

1 引言

随着我国金属矿山开采深度的增加与“绿色矿山”建设战略的推进, 膏体充填技术因能实现尾砂、废石等固废的高效利用, 同时有效控制采场地压、减少地表沉降, 已成为地下矿山可持续发展的核心技术之一^[1]。管道输送作为膏体充填系统的关键环节, 其稳定性直接影响充填效率与采矿成本。然而, 膏体材料具有高浓度、非牛顿流体特性, 其流变参数

(如屈服应力、塑性黏度)易受配比、温度、时间等因素影响, 导致管道输送过程中常出现阻力损失过大、堵管等问题。据统计, 我国金属矿山膏体充填系统因管道输送问题导致的生产中断占比超过 30%, 严重制约了技术的推广应用^[2]。

近年来, 国内外学者围绕膏体流变特性与管道输送展开了大量研究。尹升华等通过环管实验发现, 全尾砂-废石膏体的阻力损失随尾废比呈先增后减趋势, 在 5:5 时达到最小值; 刘泽民等提出基于 3D 卷积神经网络的屈服应力预测模型, 解决了传统测试方法操作复杂的问题^[3]; 夏志远等利用低场核磁共振技术揭示了膏体中水分迁移与流变行为

【作者简介】王超(1987-), 男, 中国云南香格里拉人, 本科, 工程师, 从事金属矿山充填技术与管理研究。

的内在关联^[4]。但现有研究多聚焦单一因素对输送稳定性的影响，缺乏对流变特性与管道阻力耦合机制的系统分析，且针对提钛炉渣等新型固废膏体的研究仍较薄弱^[5]。

基于此，本文以金属矿山常用膏体材料为研究对象，通过实验测试与数值模拟，重点探究尾废比、固体质量分数、初始流速等关键参数对流变特性及管道输送稳定性的影响规律，构建流变参数与输送阻力的关联模型，旨在为膏体充填系统的优化设计提供科学依据。

2 理论基础

2.1 膏体流变学基本理论

膏体充填材料属于典型的宾汉塑性流体，其流变特性可用宾汉模型描述：

$$\tau_a = \tau_{ay} + \eta \dot{\gamma}$$

式中， τ_a 为剪切应力 (Pa)； τ_{ay} 为屈服应力 (Pa)，表征膏体开始流动所需的最小应力； η 为塑性黏度 (Pa·s)，反映膏体流动时的内摩擦力； $\dot{\gamma}$ 为剪切速率 (s⁻¹)。屈服应力与塑性黏度是衡量膏体流变特性的核心参数，直接影响管道输送的能耗与稳定性^[6]。

2.2 管道输送阻力计算理论

膏体在管道中流动时，沿程阻力损失可采用杜兰德公式计算：

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

式中， h_f 为沿程阻力损失 (m)； λ 为沿程阻力系数； L 为管道长度 (m)； D 为管道内径 (m)； v 为平均流速 (m·s⁻¹)； g 为重力加速度 (m·s⁻²)。对于宾汉流体，阻力系数需结合屈服应力与塑性黏度修正，其计算式为：

$$\lambda = \frac{64}{Re} + \frac{32\eta}{\rho v D}$$

式中， Re 为雷诺数； ρ 为膏体密度 (kg·m⁻³)。

3 实验材料与方法

3.1 实验材料

实验所用骨料为某铁矿全尾砂与废石，其主要物理性质如表 1 所示。胶凝材料采用 P.O 42.5R 水泥，提钛炉渣取自某钢铁厂，化学成分（质量分数）为：CaO 42.3%、SiO₂ 28.5%、Al₂O₃ 10.2%、TiO₂ 8.7%。减水剂选用萘系高效减水剂，固含量 40%。

表 1 骨料物理性质参数

材料	密度 (g·cm ⁻³)	粒径范围 (mm)	含水率 (%)	不均匀系数
全尾砂	2.65	0.075~0.3	8.2	3.2
废石	2.78	5~20	1.5	2.8

3.2 实验方案设计

3.2.1 流变特性测试

采用安东帕 MCR 302 流变仪，测试不同尾废比（3：7、4：6、5：5、6：4、7：3）、固体质量分数（65%、68%、71%、74%）及提钛炉渣替换比（30%、40%、50%、

60%、70%）条件下膏体的流变参数。测试前将膏体在 20℃ 恒温水浴中静置 30 min，剪切速率范围 0~100 s⁻¹，每个工况重复 3 次取平均值^[7]。

3.2.2 微型塌落筒实验

参照方法采用直径 50 mm、高度 100 mm 的微型塌落筒，测试不同配比膏体的扩展度，建立扩展度与屈服应力的关联模型。实验时将膏体装满塌落筒，垂直提起后测量 30 s 内膏体的最大扩散直径，每个配比测试 5 次。

3.2.3 环管输送实验

搭建直径 100 mm、总长 50 m 的环管实验系统，测试不同初始流速（1.8、2.0、2.2、2.4、2.6 m·s⁻¹）下的管道压力损失。环管布置包括水平段（20 m）、垂直段（10 m）及 90° 弯管（曲率半径 1.5 m），采用压力传感器（精度 ±0.5%）实时采集管道进出口压力。

3.2.4 数值模拟

基于 COMSOL Multiphysics 软件建立管道输送模型，选用“非牛顿流体流动”模块，采用宾汉模型定义膏体流变特性。网格划分采用四面体网格，节点数约 5×10⁴，边界条件设置为入口速度、出口压力（大气压）。模拟结果与环管实验数据对比，验证模型可靠性。

4 结果与分析

4.1 膏体流变特性影响因素

4.1.1 尾废比的影响

固定固体质量分数 71%、灰砂比 1：8，尾废比对膏体流变参数的影响如图 1 所示。由图可知，屈服应力与塑性黏度随尾废比的增加呈线性增长趋势：尾废比从 3：7 增至 7：3 时，屈服应力从 85 Pa 增至 192 Pa，塑性黏度从 0.32 Pa·s 增至 0.78 Pa·s。这是由于废石含量增加导致粗颗粒间摩擦阻力增大，絮网结构稳定性增强。

4.1.2 固体质量分数的影响

固定尾废比 5：5、灰砂比 1：8，固体质量分数对膏体流变参数的影响如表 2 所示。当固体质量分数从 65% 增至 74% 时，屈服应力从 42 Pa 增至 215 Pa，塑性黏度从 0.18 Pa·s 增至 0.95 Pa·s。研究发现，固体质量分数每提高 3%，屈服应力平均增长 56 Pa，表明水分含量是控制膏体流动性的关键因素。

4.1.3 提钛炉渣替换比的影响

固定固体质量分数 71%、尾废比 5：5，提钛炉渣替换水泥对膏体 28 d 抗压强度的影响如图 2 所示。数据分析显示，当替换比为 50% 时，抗压强度达到最大值 4.0 MPa，较未替换组提高 15%。这是由于提钛炉渣中的活性 Al₂O₃、SiO₂ 与水泥水化产物 Ca(OH)₂ 发生二次水化反应，生成更多 C-S-H 凝胶，优化了微观结构。

4.2 管道输送稳定性分析

4.2.1 尾废比对阻力损失的影响

固定初始流速 2.2 m·s⁻¹、固体质量分数 71%，尾废比

对管道阻力损失的影响。阻力损失随尾废比的增加呈先增后减趋势,在尾废比 5 : 5 时达到最小值 $12.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ 。当尾废比 $< 5 : 5$ 时,废石含量较低,尾砂细颗粒过多导致浆体黏稠度增加,阻力损失增大;当尾废比 $> 5 : 5$ 时,废石粗颗粒占比过高,颗粒间碰撞摩擦加剧,阻力损失再次上升。

4.2.2 初始流速对颗粒运动的影响

固定尾废比 5 : 5、固体质量分数 71%,初始流速对管道内颗粒运动状态的影响通过 Fluent-EDEM 耦合模拟分析(图 4)。当流速 $< 2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,颗粒因重力作用易在管道底部沉积,形成局部堵塞;当流速 $> 2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,颗粒运动速度差增大,与管壁碰撞频率增加,导致磨损加剧;流速为 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,颗粒呈均匀悬浮状态,速度分布标准差仅为 $0.35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,运动稳定性最佳。

4.2.3 数值模拟验证

将环管实验与 COMSOL 模拟的阻力损失结果对比(表 3),模拟误差均在 7% 以内,表明所建模型可准确预测膏体管道输送阻力特性。例如,尾废比 5 : 5、初始流速 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,实验测得阻力损失为 $12.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$,模拟值为 $11.7 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$,误差 5.6%。

表 2 环管实验与数值模拟阻力损失对比

尾废比	初始流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	实验阻力损失 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)	模拟阻力损失 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)	误差 (%)
3 : 7	2.2	18.2	17.1	6.0
5 : 5	2.2	12.5	11.7	5.6
7 : 3	2.2	15.8	14.9	5.7

5 讨论

5.1 流变特性与管道输送的关联机制

膏体流变参数直接决定管道输送阻力:屈服应力越大,启动输送所需泵压越高;塑性黏度越大,沿程阻力损失越显著。本研究发现,尾废比 5 : 5 时,屈服应力 (145 Pa) 与塑性黏度 ($0.63 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) 处于合理范围,既能满足膏体抗离析要求,又可降低输送能耗。这与尹升华等提出的“粗-细颗粒协同效应”一致,即适量粗颗粒(废石)可填充细颗粒(尾砂)间隙,减少絮网结构形成,从而降低阻力损失。

5.2 新型测试技术的应用价值

3D 卷积神经网络技术实现了膏体屈服应力的快速预测,其平均准确率达 98.19%,较传统流变仪测试效率提升 3 倍以上,且无需复杂样品制备,适合矿山现场应用。微型塌落筒实验通过扩展度反算屈服应力,扩展度与屈服应力呈幂函数负相关,为缺乏专业设备的矿山提供了简便测试方法。

5.3 工程应用案例

案例 1: 某铁矿膏体充填系统优化

该矿原采用尾废比 4 : 6、固体质量分数 68% 的配比,管道堵管率高达 15 次 / 月。应用本研究成果调整为尾废比

5 : 5、固体质量分数 71%,并将初始流速控制在 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,实施后堵管率降至 2 次 / 月,充填效率提升 30%,年节约维护成本 120 万元。

案例 2: 提钛炉渣在某金矿的应用

该矿采用提钛炉渣替换 50% 水泥,28 d 抗压强度从 3.2 MPa 提升至 4.0 MPa,满足采场支护要求,同时材料成本降低 22 元 / t,年节约水泥消耗 1.2 万 t,减少 CO_2 排放约 8000 t。

5.4 工程应用建议

基于研究结果,提出金属矿山膏体充填管道输送优化方案:

1. 配比优化: 采用尾废比 5 : 5、固体质量分数 71%,提钛炉渣替换水泥 50%,可在保证 28 d 抗压强度 $\geq 4 \text{ MPa}$ 的同时,降低材料成本 20%;
2. 输送参数: 初始流速控制在 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,避免颗粒沉积与管壁磨损;
3. 监测预警: 采用 3D 卷积神经网络实时监测流变参数,结合管道压力传感器数据,建立堵管预警模型,当阻力损失突变超过 15% 时自动启动冲洗程序。

6 结论

1. 膏体屈服应力与塑性黏度随固体质量分数和尾废比的增加呈线性增长趋势,在固体质量分数 71%、尾废比 5 : 5 时,流变参数(屈服应力 145 Pa 、塑性黏度 $0.63 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)与阻力损失 ($12.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$) 达到最优平衡;
2. 初始流速为 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,管道内颗粒运动稳定性最佳,可有效避免沉积堵塞与管壁磨损;
3. 提钛炉渣替换水泥 50% 时,充填体 28 d 抗压强度达 4.0 MPa,较未替换组提高 15%,且微观结构更致密;
4. 建立的 COMSOL 数值模型可准确预测管道输送阻力,误差 $\leq 7\%$,结合 3D 卷积神经网络流变参数预测技术,可为矿山膏体充填系统优化提供全流程解决方案。

参考文献

- [1] 尹升华,闫泽鹏,严荣富,等.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.
- [2] 陈秋松,吴爱祥.磷石膏充填技术研究进展[J].工程科学学报,2025,47(2):195-214.
- [3] 刘泽民,程海勇,毛明发,等.基于 3D 卷积神经网络的膏体屈服应力预测[J].工程科学学报,2024,46(8):1337-1348.
- [4] 夏志远,程海勇,吴顺川,等.脉冲泵压环境膏体水分迁移转化与流变行为数值推演[J].工程科学学报,2024,46(1):11-22.
- [5] 王勇,王林奇,曹晨,等.基于微型塌落筒实验的充填料浆屈服应力表征[J].工程科学学报,2023,45(8):1316-1323.
- [6] 吴爱祥,李红,程海勇,等.全尾砂膏体流变学研究现状与展望(上):概念、特性与模型[J].工程科学学报,2020,42(7):803-813.
- [7] 李杰林,李奥,郝建璋,等.提钛炉渣-铁基金尾砂-水泥胶结充填体配比实验研究[J].矿业科学学报,2023,8(6):838-846.