水泥水化时变效应充填料浆流变演化规律及应用研究*

江科[1,2],丁茂斌[3],王东华[4],李树建[5],李文波[1,2],彭亮[1,2],凡杰[1,2],刘伟[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
3.中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051;
4.甘肃镜铁山矿业有限公司, 甘肃 张掖市 735101;
5.云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600)

摘要:针对矿山充填料浆长距离输送过程中胶凝材料水化引发的流变参数时变问题,开展25 ℃恒温条件下的充填料浆流变试验,揭示水泥基充填料浆屈服应力在关键节点的突变规律。推导了修正达西-魏思巴赫公式,创新性地提出"时变流变-分段阻力"充填管道设计方法,并依托5 km充填管道工程案例开展验证。结果表明:灰砂比越大,突变节点出现时间越早,高灰砂比充填料浆比低灰砂比充填料浆的初始屈服应力高;随着水化时间延长,生成过量的水化产物会引发颗粒团聚与微观结构密实化,导致料浆塑性黏度增大,并显著增大管道摩擦阻力,胶凝材料掺量越大,变化越明显;相较于保守方案,时变分段设计方案充填管道的安全裕度提高28.5%,充填管道成本和年能耗成本分别降低22.6%和26.1%。研究结果可为矿山充填系统建设提供理论依据。

关键词:充填料浆;长距离输送;流变演变;管道阻力;分段设计
中图分类号:TD853.34+3 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0089-09

Study on the Rheological Evolution of Backfill Slurry Under Time-Varying Effect of Cement Hydration and Its Application

Jiang Ke[1,2], *Ding Maobin*[3], *Wang Donghua*[4], *Li Shujian*[5], *Li Wenbo*[1,2], *Peng Liang*[1,2], *Fan Jie*[1,2], *Liu Wei*[1,2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Kunming Survey, Design and Research Institute Co., Ltd of China Nonferrous Metals Industry, Kunming, Yunnan 650051, China;
4.Gansu Jingtieshan Mining Co., Ltd., Zhangye, Gansu 735101, China;
5.Yunnan Phosphate Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650600, China)

Abstract: To address the time-varying problem of rheological parameters caused by cementitious material hydration during long-distance transportation of mine backfill slurry, rheological tests of backfill slurry were conducted at a constant temperature of 25 ℃, and the abrupt change law of the yield stress of cement-based backfill slurry at key nodes was revealed. A modified Darcy-Weisbach equation was derived, and an innovative design method for backfill pipelines based on time-varying rheology and sectional resistance was proposed, which was then validated through a 5 km backfill pipeline engineering case. The results are concluded as follows. Firstly, the higher the cement-sand ratio is, the earlier the abrupt change node appears, and the initial yield stress of backfill slurry with a high cement-sand ratio is higher than that with a low cement-sand ratio. Secondly, as the hydration time extends, excessive hydration products cause particle agglomeration and densification of the microstructure, leading to an increase in the plastic viscosity of the slurry and a significant increase in pipeline friction resistance. The greater the cementitious material content, the more obvious the change. Thirdly, compared with the conservative scheme, the time-varying sectional design scheme improves the safety margin of the backfill pipeline by 28.5%, and reduces the pipeline cost and annual energy consumption cost by 22.6% and 26.1%, respectively. The research results can provide a theoretical basis for the construction of mine backfill systems.

Key words: Backfill slurry, Long-distance conveying, Rheological evolution, Pipeline resistance, Sectional design

---

* **收稿日期**:2025-12-19
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC2907203)
作者简介:江科(1992—),男,湖北天门人,硕士,高级工程师,主要从事矿山绿色开采及安全相关的研究工作。E-mail:Jiangk92@163.com
通信作者:李文波(1998—),男,湖北襄阳人,硕士,主要从事金属矿山地下开采及充填技术研究。E-mail:2729382771@qq.com

0 引言

随着矿产资源开发向深部延伸,矿山充填输送距离持续增加。据国际矿业协会统计(2023),全球超过45%的金属矿山充填输送距离超过3 km,其中12%达到5 km以上。国内矿山如山东黄金三山岛金矿充填输送距离达4.3 km,湖北三宁磷矿充填输送距离达到8 km。胶凝材料作为充填体系的核心组分,其水化进程对充填料浆的流动性能、强度发展及输送稳定性具有决定性作用。水化反应过程中生成的水化产物不仅改变料浆的流变特性,还会通过颗粒堆积结构的变化直接影响料浆的输送阻力与管道压力波动,这些动态变化对长距离输送系统的能耗与设备安全构成严峻挑战。长距离输送面临的核心难题在于胶凝材料水化动力学与输送时长的矛盾。

目前充填输送流变参数的选取设计与研究还停留在静态流变假设阶段,即传统设计采用固定流变参数,全程采用管道末端终值或初始值参数进行设计,一方面可能导致充填管道系统冗余,另一方面设计能力不足易造成堵管爆管。张增贵等[1]通过流变试验和Fluent数值模拟对铁矿全尾砂充填料浆水化前期的流变参数和管道输送特性进行了研究,讨论了不同质量浓度充填料浆的屈服应力和黏性系数的变化规律;彭亮[2]通过L管试验和响应面分析法发现影响充填料浆输送性能指标的因素依次为充填管道直径、充填料浆质量浓度、充填流量;甘德清等[3-4]通过试验和数值模拟研究了温度对大流量充填料浆流变特性的影响,结果表明,随着充填料浆温度升高,其屈服应力和塑性黏度不断降低;薛振林等[5]采用正交试验分析了质量浓度、温度和灰砂比对全尾砂充填料浆流变性能的影响,试验表明,影响权重顺序为质量浓度>温度>灰砂比,同时还发现各个因素之间存在一定交互关系;梁新民等[6]通过室内流变试验和数值仿真验证,得到沿程阻力损失与充填料浆质量浓度和灰砂比均呈正相关的结论,其中质量浓度比灰砂比的影响程度大。部分学者研究了时间变化对充填料浆流变性能的影响,李帅等[7]、吴爱祥等[8]发现充填料浆内部絮网结构的动态变化是超细全尾砂似膏体充填长距离输送过程中时变特性产生的原因,研究结果表明,10 min内,充填料浆屈服应力和塑性黏度随着剪切时间的延长而减小;程海勇[9]从宏观角度系统研究了充填料浆流变参数在时间和温度共同影响下的变化规律,建立了考虑时间-温度效应的膏体流变参数预测模型。但上述对于时间因素的研究都仅在10 min以内,不能完全覆盖长距离输送实际工况。因此,本文从长距离输送实际工况出发,通过室内流变试验探索小时尺度内胶凝材料水化进程随时间演变对充填料浆输送特性的影响规律,分析其内在作用机理,并构建对应的理论模型,最后通过实际工程案例进行验证。

1 充填料浆流变时变规律试验研究

1.1 试验材料与设计

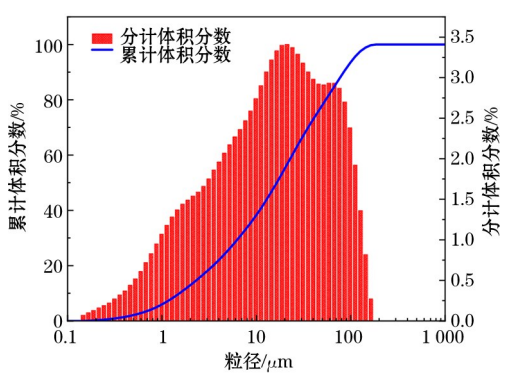
1.1.1 试验材料

本次试验尾砂样品取自云南某磷矿全尾砂,-74 μm含量>87%,-37 μm含量>70%,属于细粒级尾砂。胶凝材料选择P·O 42.5水泥。试验设计灰砂比为1∶4和1∶10,可以满足实际充填过程中对高灰砂比和平均灰砂比的需求,同时充填料浆质量浓度取68%,该质量浓度下充填料浆泌水率小于5%,可以忽略沉降离析风险。尾砂密度为2.67 g/cm³,水泥密度为3.04 g/cm³,采用马尔文3000激光粒度分析仪和X射线荧光光谱仪测量试验材料化学成分及粒度分布,测量结果见表1和图1。

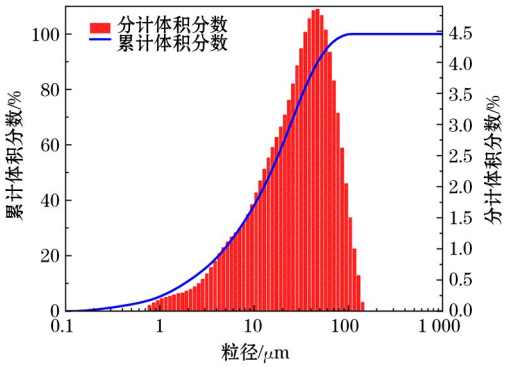
表1 试验材料主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of test materials %

试验材料	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SO_3
尾砂	47.7	14.8	1.4	0.8	6.5
水泥	49.2	27.9	3.5	5.3	2.8
试验材料	MgO	P_2O_5	F	K_2O	其他
尾砂	11.6	8.1	0.9	0.2	8.0
水泥	2.0	0.5	0.9	0.9	7.0



(a) 尾砂粒度分布



(b) 水泥粒度分布

图 1 试验材料粒度分布

Fig.1 Particle size distribution of test materials

1.1.2 试验系统

采用温控桨式流变仪联测系统,该系统由温控装置和流变仪组成,温控装置主要通过水浴加热控温,使充填料浆温度稳定在(25±0.5) ℃,模拟深井巷道实际工况;流变仪采用 Thermo Scientific HAAKE Viscotester 5501,桨式转子尺寸为 40 mm×20 mm,监测范围为 3.4~7 000 Pa。使流变仪剪切速率与现场实际充填料浆流动剪切速率保持一致,管道直径为 150 mm,充填料浆流速为 1.4 m/s,对应剪切速率为 75 s^{-1}。

1.1.3 试验过程

按试验设计方案制备好充填料浆,放置在流变仪中进行连续搅拌,每间隔 10 min 采集一次充填料浆流变参数,流变参数检测时间设计采用 0 min(以充填料浆制备完毕后第一次检测为计)、10 min、20 min、30 min、40 min、50 min 和 60 min 等 7 个梯度,记录数据。

1.2 流变参数演化规律

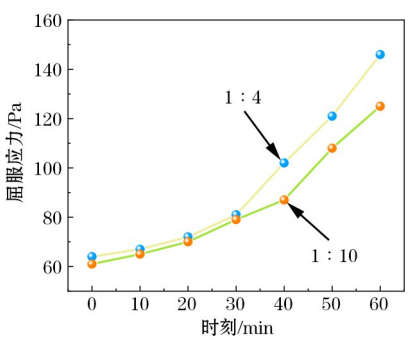
1.2.1 屈服应力突变特征

不同时刻充填料浆屈服应力演化规律见表 2 和图 2。由试验结果可知,灰砂比 1∶4 水泥基充填料浆的屈服应力 τ 在 30 min 时出现拐点,其增长速率从 0.56 Pa/min 增至 2.16 Pa/min;在 60 min 时,屈服应力 τ 的累计增幅达到了 128.1%。灰砂比 1∶10 水泥基充填料浆的屈服应力 τ 在 40 min 时出现拐点,其增长速率从 0.60 Pa/min 增至 1.53 Pa/min;在 60 min 时,屈服应力 τ 的累计增幅达到了 104.9%。高灰砂比充填料浆流变突变拐点出现时间比低灰砂比充填料浆早,同时初始屈服应力比低灰砂比充填料浆高,这可能是由于本次试验尾砂属于细粒级尾砂,水泥颗粒偏细,水泥的加入改变了充填料浆的级配,起到增稠作用,在一定程度上降低了充填料浆流动度,随着水泥持续水化,水化产物增多,高灰砂比充填料浆微观结构更快密实化。

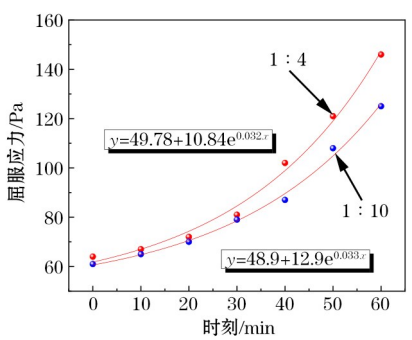
表 2 不同时刻充填料浆屈服应力

Table 2 Yield stress of filling slurry at different times

灰砂比	时刻/min	屈服应力 τ/Pa	单位时间增长率/%	流变状态
1∶4	0	64	—	流动性良好
	10	67	4.69	流动性良好
	20	72	7.46	流动性良好
	30	81	12.50	突变拐点
	40	102	25.93	显著增稠
	50	121	18.63	显著增稠
	60	146	20.67	显著增稠
1∶10	0	61	—	流动性良好
	10	65	6.55	流动性良好
	20	70	7.69	流动性良好
	30	79	12.86	轻微增稠
	40	87	10.13	突变拐点
	50	110	26.44	显著增稠
	60	125	13.64	显著增稠



(a) 不同灰砂比充填料浆屈服应力随时间变化曲线



(b) 不同灰砂比充填料浆屈服应力-时间关系拟合曲线

图 2 不同时刻充填料浆屈服应力演化规律曲线

Fig.2 Evolution curves of yield stress of filling slurry at different times

1.2.2 水泥水化动力学解释

水泥基胶凝材料的水化进程是指胶凝材料中的活性成分与水发生化学反应而生成水化产物的过程。这个过程的关键在于水泥熟料中含有的 C_3S

(硅酸三钙)、C_2S(硅酸二钙)、C_3A(铝酸三钙)和 C_4AF(铁铝酸四钙)等主要矿物成分与水相互作用。水化反应初始阶段,C_3A 迅速与水发生反应生成 AFt(钙矾石)等水化产物,同时释放大量热量[10];随后,C_3S 与 C_2S 开始逐步水化生成 C-S-H(水化硅酸钙凝胶)和 $Ca(OH)_2$(氢氧化钙)[11-12]。

C-S-H 凝胶和水化硫铝酸钙等水化产物在充填料浆体系中形成分散的触变性结构,在充填骨料颗粒表面形成吸附层,进而有效降低了颗粒之间的静电力和范德华力,同时作为分散介质填充于骨料间隙,使得颗粒在悬浮状态下保持均匀分布。这种微观结构显著提升了充填料浆的触变性,使得料浆在静置状态下具备较高的屈服应力,维持体系稳定,在剪切作用下又能快速流动,满足管道输送需求。水化产物中的 AFt 等纤维状晶体在运动中沿着剪切作用方向排列,一定程度上降低了充填料浆流动时的内部摩擦力,优化了充填料浆的流动性。

随着水化时间延长,水化产物数量持续增加,纤维状逐步形成三维网状结构[13-15](见图 3),将充填骨料颗粒包裹起来,相互黏连,以保证充填料浆处于悬浮状态,避免充填料浆离析分层。当充填料浆体系中未水化的颗粒数量降低到临界值时,水化产物的凝聚作用开始占据主导地位。此时,C-S-H 凝胶不断累积增厚导致骨料颗粒表面电荷密度降低,颗粒之间双电层排斥作用减弱,从而引发絮凝现象[16]。同时,水化产物持续析出使体系的固含量显著增加,导致自由水和凝胶物质的体积比降低,充填料浆的塑性黏度呈非线性增长。数据表明,当水化时间超过 30 min 时,料浆的塑性黏度可增大 2～3 倍,直接导致管道输送所需剪切应力显著上升,进而降低了充填料浆长距离输送的经济性和可行性。此外,水化产物结晶形态的转变也会加剧这个趋势,例如铝酸盐水化产物由单硫型向钙矾石的转化过程中[17-18],晶体尺寸的增大强化了充填料浆体系的结构阻力。

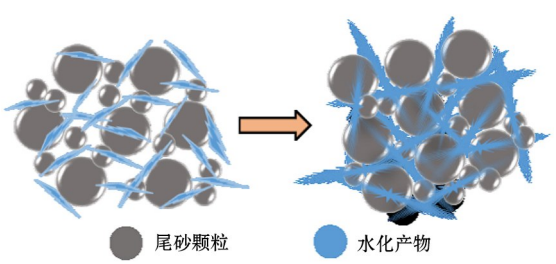


图 3 水泥水化产物随水化进程增长示意

Fig.3 Schematic of the growth of cement hydration products with hydration process

水泥水化进程中产生的水化产物对充填料浆长距离输送性能的影响主要通过改变充填料浆流变特性和管壁状态实现。水化反应初期形成的 AFt、$Ca(OH)_2$ 等晶体以及 C-S-H 凝胶等非晶体物质,在充填料浆输送过程中逐渐沉积于管道内壁,这种固相沉积物主要通过两种方式加剧摩擦阻力损失。第一,随着水化产物的持续析出,沉积层厚度逐渐增加,导致充填管道有效流通截面积减小,同时表面粗糙度也会显著提高。研究表明,当水化产物的管道内壁形成连续沉积层时,其表观粗糙度可以达到初始管壁粗糙度的 3～5 倍,雷诺数和沿程阻力系数的关系将偏离光滑管公式,摩擦因数呈非线性增长趋势。第二,沉积层表面的微观凸起结构会诱导充填料浆流程产生附加的剪切应力,尤其在弯管和变径等复杂管段,沉积层引发的局部湍流强度涨幅可达 20%～35%,进一步加剧了能量损耗。未沉积的水化产物以纳米颗粒形式悬浮于充填料浆中,其絮凝行为直接影响流体黏度。C-S-H 凝胶等胶凝性水化产物通过表面电荷作用形成三维网状结构,导致充填料浆屈服应力和塑性黏度同步提升。

2 管道分段设计理论模型

目前充填输送管道选型设计主要采用传统固定流变参数的方式,全程采用终值或初始值参数进行设计,该设计理念一方面可能导致充填管道系统冗余,另一方面可能因设计能力不足造成堵管爆管。由于胶凝材料水化时变效应会影响充填料浆流变参数,理论上充填料浆输送过程中的沿程阻力一直处于动态变化中,如果管道全程采用固定值,显然不合理,尤其对于长距离管道输送工况下引发的胶凝材料宽域时变效应,更应避免采用该设计方法。

同时,高浓度充填料浆作为宾汉塑性流体,在不同阶段由不同影响因素主导,料浆流动初期主要受屈服应力影响,经济流速下受摩擦阻力影响。研究分析不同工况下充填料浆不同主导影响因素对优化管道设计具有实际意义,本次研究对宾汉塑性流体的达西-魏思巴赫公式进行修正推导,同时建立管道分段设计的位置-时间映射关系,并构建管道分段设计理论模型,为进一步优化充填管道应用设计提供了理论支撑。

2.1 管道阻力计算公式推导

2.1.1 基本方程建立

以下是针对宾汉塑性流体的达西-魏斯巴赫修

正公式的详细推导过程,该公式可用于计算含屈服应力的非牛顿流体在圆管中的压降。

推导基于流体力学基本方程和宾汉模型本构关系[19-20],具体步骤如下。

(1) 本构方程(宾汉模型)。

宾汉流体的剪切应力满足:

$$\begin{cases}\tau=\tau_y+\eta_p\gamma(\tau<\tau_y)\\ \gamma=0(\tau<\tau_y)\end{cases} \tag{1}$$

式中:τ 为剪切应力,Pa;τ_y 为屈服应力(流体开始流动的最小剪切应力),Pa;η_p 为塑性黏度(屈服后流动阻力系数),Pa·s;γ 为剪切速率(速度梯度),s^{-1}。

该模型精确描述了充填料浆的核心流变特征,即存在屈服应力阈值 τ_y。只有当外部作用力超过 τ_y,浆体内部结构被破坏后,才会像牛顿流体一样流动起来。

(2) 圆管流动控制方程适用于水平直管内的稳态轴对称流动,受力平衡方程为:

$$\Delta P\cdot\pi r^2=\tau\cdot 2\pi rL \tag{2}$$

化简可得剪切应力分布:

$$\tau(r)=\frac{\Delta P\cdot r}{2L}(0\leqslant r\leqslant R) \tag{3}$$

式中:ΔP 为管道两段总压力降,Pa;L 为管道长度,m;R 为管道内径,m;r 为径向坐标(距离管道轴向距离),m。

2.1.2 剪切分区与速度分布推导

(1) 屈服半径r_y 的定义。

当 $\tau(r)=\tau_y$ 时,流体开始流动,对应临界位置:

$$\tau_y=\frac{\Delta P\cdot r_y}{2L}\Rightarrow r_y=\frac{2L\tau_y}{\Delta P} \tag{4}$$

核心塞流区($0\leqslant r\leqslant r_y$):该区域内剪切应力 $\tau<\tau_y$,流体以塞流形式整体运动,速度恒为 u_c。

剪切流动区($r_y<r\leqslant R$):该区域内剪切应力 $\tau>\tau_y$,速度梯度 $\beta=-\mathrm{d}u/\mathrm{d}r$,流体结构被剪切破坏,发生剪切形变,速度从$r_y$ 处的u_c 逐渐减小至管壁处为 0。

(2) 剪切流动区速度分布。

本构方程和剪切应力表达式为:

$$\tau_y+\eta_p\left(-\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r}\right)=\frac{\Delta P\cdot r}{2L} \tag{5}$$

整理得:

$$\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}r}=-\frac{1}{\eta_p}\left(\frac{\Delta P\cdot r}{2L}-\tau_y\right) \tag{6}$$

积分求速度分布(边界条件 $u(R)=0$):

$$u(r)=\int_r^R\frac{1}{\eta_p}\left(\frac{\Delta P\cdot r'}{2L}-\tau_y\right)\mathrm{d}r' \tag{7}$$

$$u(r)=\frac{1}{\eta_p}\left[\frac{\Delta P}{4L}(R^2-r^2)-\tau_y(R-r)\right](r_y\leqslant r\leqslant R) \tag{8}$$

(3) 核心塞流区速度。

在 $r=r_y$ 处速度连续,得到核心塞流区恒定速度:

$$u(r)=u(r_y)=\frac{1}{\eta_p}\left[\frac{\Delta P}{4L}(R^2-r^2)-\tau_y(R-r)\right](r_y\leqslant r\leqslant R) \tag{9}$$

核心塞流区速度恒定:

$$u(r)=u_c(0\leqslant r\leqslant r_y) \tag{10}$$

2.1.3 流量计算与压降关系

(1) 总流量 Q 的积分。

$$Q=\int_0^R 2\pi ru(r)\mathrm{d}r=2\pi\int_0^{r_y}ru_c\mathrm{d}r+2\pi\int_{r_y}^R ru(r)\mathrm{d}r \tag{11}$$

(2) 分段积分结果。

核心塞流区流量 Q_1:

$$Q_1=\pi r_y^2u_c \tag{12}$$

剪切流动区流量 Q_2(代入 $u(r)$ 表达式):

$$Q_2=\frac{\pi\Delta P}{8\eta_pL}(R^4-r_y^4)-\frac{\pi\tau_y}{3\eta_p}(R^3-r_y^3) \tag{13}$$

令屈服半径比 $\xi=r_y/R$,合并得到经典的宾汉流体圆管流量-压降关系:

$$Q=\frac{\pi R^4\Delta P}{8\eta_pL}\left(1-\frac{4}{3}\xi+\frac{1}{3}\xi^4\right) \tag{14}$$

2.1.4 达西公式修正项的导出

(1) 高压降极限简化($\xi\leqslant 1$)。

当 ΔP 足够大时,$\xi\to 0$,流量近似为:

$$Q\approx\frac{\pi R^4\Delta P}{8\eta_pL}-\frac{\pi R^3\tau_y}{6\eta_p} \tag{15}$$

整理可得压降表达式:

$$\Delta P\approx\frac{8\eta_pLQ}{\pi R^4}+\frac{4\tau_yL}{3R} \tag{16}$$

(2) 与达西公式关联。

平均流速 $v=Q/(\pi R^2)$,摩擦因数定义为 $f=64/Re_m$(修正雷诺数 $Re_m=\rho vD/\eta_p$,$D=2R$),则达西项为:

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = \frac{8\eta_p LQ}{\pi R^4} \tag{17}$$

屈服应力项为：

$$\Delta P_y = \frac{4\tau_y L}{3R} = \frac{8\tau_y L}{3D} \tag{18}$$

修正达西-魏思巴赫公式为：

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} + \frac{8\tau_y L}{3D} \tag{19}$$

式中：f 为沿程阻力摩擦因数(达西摩擦系数)，无量纲；D 为管道内径，m；ρ 为充填料浆密度，kg/m^3；v 为料浆管道平均流速，m/s。

式(19)中第一项为摩擦损失项(达西项)，表示流体黏性耗散损失，与流速平方相关；第二项为屈服应力项，表示克服流体内部结构强度损失，与流速无关。因此，当充填料浆低速流动时，需要额外能量破坏流体网状结构，此时屈服应力项占主导；当充填料浆高速流动时，其行为趋近于牛顿流体，此时摩擦损失项占主导。

修正达西-魏思巴赫公式直观地反映出，对于长距离、低流速输送的矿山充填料浆，屈服应力项贡献显著，是泵送压力的主要构成部分，这也解释了为何控制充填料浆的屈服应力是降低泵压的关键。

2.2 分段设计原则

根据不同胶凝材料基充填料浆时变拐点，建立位置-时间映射关系：

$$t_x = \frac{x}{v} + t_0 \tag{20}$$

式中：t_x 为胶凝材料水化时间，min；t_0 为充填料浆搅拌时间，min；x 为充填料浆流动距离，m。

充填管道分段设计原则通过位置-时间映射关系确定管道分段节点，各分段管道选型设计采用该分段内流变终值参数，可以减少设计冗余，同时保证每段管道的安全稳定性。

3 工程应用设计

3.1 管道分段设计流程

本研究本质上是通过精准测量时变的屈服应力 τ_y 和塑性黏度 η_p，找到流变突变拐点，并基于修正达西-魏思巴赫公式进行管道分段设计，从而优化泵压分配，避免传统牛顿流体或固定参数设计方法带来的安全裕度过大问题。充填管道分段设计流程如图 4 所示。

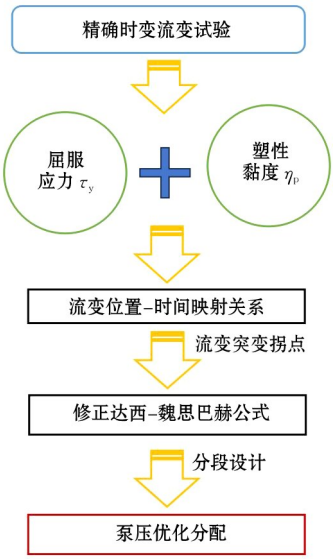


图 4 充填管道分段设计流程

Fig.4 Flowchart of sectional design for backfill pipes

3.2 工程案例应用

以云南某磷矿尾矿综合利用项目为例，将磷尾砂用于矿山充填，其充填管道总长度约为 5 km，自流充填倍线大于 10，因此需采用泵压输送方式输送充填料浆。管道设计选型采用 3 种不同设计方案，即流变参数的选取理念不同，包括传统静态设计的标准方案、末端参数设计的保守方案和时变分段设计的优化方案。标准方案主要选取充填料浆初始流变值作为全段充填管道设计指导数据；保守方案主要选取充填料浆末端流变值作为全段充填管道设计指导数据；优化方案则根据本研究成果，分析充填料浆流变突变拐点，分段取值-分段设计。室内试验数据显示，该磷矿灰砂比为 1∶10，质量浓度为 68%，充填料浆流变演化突变拐点大概出现在 40 min 左右。根据水泥基充填料浆时变拐点位置-时间映射关系公式，充填料浆搅拌时间 t_0 取 3 min，计算得出在充填管道长度约 3.1 km 处，充填料浆流变参数出现拐点。因此，0～3.1 km 管道设计参数采用 40 min 时刻料浆流变值，3.1～5 km 管道设计参数采用 60 min 时刻料浆流变值，具体设计方案见表 3、图 5、图 6 和图 7。

表 3 3 种输送设计方案

Table 3 Three conveying design schemes

方案	设计原理	管道分段	屈服应力/Pa	塑性黏度/(Pa·s)
标准方案	传统静态设计	全段统一	14	1.02
保守方案	末端参数设计	全段统一	70	0.10
优化方案	时变分段设计	0～3.1 km	46	0.49
		3.1～5 km	70	0.10

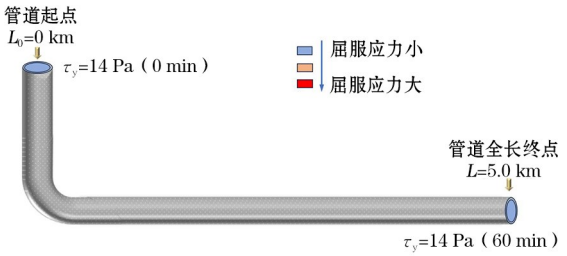


图 5 充填管道初始流变参数设计示意

Fig.5 Schematic of initial rheological parameters design for backfill pipe

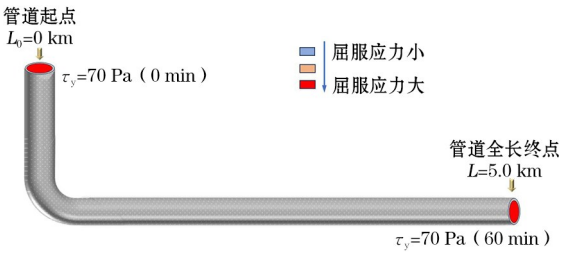


图 6 充填管道末端终值流变参数设计示意

Fig.6 Schematic of final rheological parameters design for backfill pipe

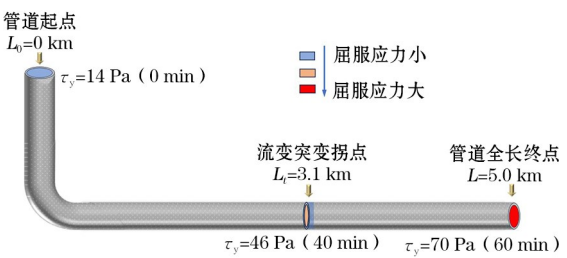


图 7 充填管道流变参数分段设计示意

Fig.7 Schematic of sectional design for rheological parameters of backfill pipe

不同时刻充填料浆流变参数通过流变仪测得,将流变参数代入修正达西-魏思巴赫公式,计算 5 km 充填管道的管道阻力,同时计算最大泵送压力、管道成本、年能耗成本及安全裕度等参数,综合对比不同方案的优缺点,比选最优方案。3 种设计方案技术经济指标和优缺点对比见表 4 和表 5。通过时变分段设计,充填管道安全裕度较保守方案提高 28.5%,充填管道成本和年能耗成本较保守方案分别降低 22.6%和 26.1%,而标准方案设计思路可能导致所选设备能力不足,进而影响矿山企业正常生产工作,同时也不符合工程安全设计规范要求,故一般不采用,仅用于理论对比分析。

另外,从本次案例分析中看出,相较于保守方案,优化方案的泵送压力差值较小,这主要归结于不同管道长度和不同浓度充填料浆的拐点屈服应力,充填管路越长,优化方案优势越明显。本研究更倾向于为工程设计人员提供一种设计思路和参考。

表 4 不同设计方案技术经济指标对比

Table 4 Comparison of technical and economic indicators among different design schemes

方案	最大泵送压力/MPa	充填管道阻力/(kPa/m)	充填管道成本/万元	年能耗成本/万元	安全裕度(设计泵压 15 MPa)/MPa
标准方案	11.60	2.32	86.3	38.6	3.40
保守方案	13.35	2.67	127.5	59.4	1.65
优化方案	12.88	2.52/2.67	98.7	43.9	2.12

表 5 不同设计方案优缺点对比

Table 5 Comparison ofadvantages and disadvantages among different design schemes

方案	核心逻辑	优点	缺点	适用场景
标准方案	经验化静态设计:使用初始(3 min)屈服应力(14 Pa)作为全程设计依据。	设计简单,计算量小,管道投资最低。	极度不安全,完全忽略水化导致的阻力激增,极易发生堵管事故。	已淘汰,仅用于理论对比。
保守方案	“过设计”静态设计:使用最不利的末端(60 min)屈服应力(70 Pa)作为全程设计依据。	绝对安全,为最坏情况预留了充足安全余量。	极端不经济,全程按最大阻力设计,导致泵压需求、管壁厚度、设备功率和投资成本均虚高。	适用于对安全要求极端苛刻、成本不敏感的特殊工程。
优化方案	精细化动态设计:基于时变流变特性分段设计,前 3.1 km 用拐点参数(46 Pa),后 1.9 km 用末端参数(70 Pa)。	安全与经济的最优解。在保障后段安全的同时,大幅降低前段的设计压力和管材成本。	设计复杂,需要精准的时变流变试验数据和分段计算模型支持。	长距离、高质量浓度料浆输送的最佳实践,实现本质安全与降本增效。

4 结论

本研究通过试验与理论分析相结合的方法,系统研究了胶凝材料水化时变效应对充填料浆长距离输送性能的影响机制,主要得出以下结论。

(1) 胶凝材料水化进程中形成的水化产物(如 C-S-H 凝胶、水化铝酸钙等)能够通过颗粒表面改性和微观结构调控作用改善物料的流变特性。

(2) 水化初期生成的絮状结构可有效降低颗粒间的摩擦因数,使中细粒级充填料浆流动度提升,但

随着水化时间延长,生成过量的水化产物会引发颗粒团聚与微观结构密实化,导致单位时间内料浆屈服应力增大 4.69%～26.44%,并显著增大了管道摩擦阻力,胶凝材料掺量越大,变化越明显。

(3) 推导了针对宾汉塑性流体的达西-魏斯巴赫修正公式,该公式可用于计算含屈服应力的非牛顿流体在圆管中的压降。

(4) 通过 5 km 工程案例设计对比可知,采用时变分段设计的充填管道方案最优,安全裕度较保守方案提高 28.5%,充填管道成本和年能耗成本较保守方案分别降低 22.6%和 26.1%,可为矿山长距离充填输送的管道设计提供参考。

参考文献(References):

[1] 张增贵,李锦想,谭玉叶,等.大冶铁矿全尾砂充填料浆流变参数与输送特性研究[J].矿业研究与开发,2025, 45(7):118-126.
Zhang Zenggui, Li Jinxiang, Tan Yuye, et al. Study on rheological parameters and transportation characteristics of unclassified tailings slurry in Daye Iron Mine[J]. Mining Research and Development,2025,45(7):118-126.

[2] 彭亮.全尾砂充填料浆输送特性及输送参数优化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(12):65-69.
Peng Liang. Study on conveying characteristics and conveying parameter optimization of full tailings filling slurry[J]. Mining Research and Development,2023,43(12):65-69.

[3] 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[J].中国矿业大学学报,2023,50(2):248-255.
Gan Deqing, Sun Haikuan, Xue Zhenlin, et al. Transport state evolution of the packed slurry with the influence of temperature[J]. Journal of China University of Mining & Technology,2023,50(2):248-255.

[4] 甘德清,孙海宽,薛振林,等.高温环境下料浆大流量输送管流特性研究[J].金属矿山,2021(5):43-49.
Gan Deqing, Sun Haikuan, Xue Zhenlin, et al. Flow characteristics of slurry conveying pipe with large flow under high temperature environment[J]. Metal Mine,2021(5):43-49.

[5] 薛振林,张友志,鲍亚豪,等.考虑温度影响的全尾砂料浆流变性能研究[J].金属矿山,2016(10):35-39.
Xue Zhenlin, Zhang Youzhi, Bao Yahao, et al. Study on rheological property of unclassified-tailing slurry considering the temperature effect[J]. Metal Mine,2016(10):35-39.

[6] 梁新民,王怀勇,江国建,等.高浓度全尾砂充填料浆流变特性及管路输送沿程阻力损失研究[J].中国矿山工程,2022,51(3):47-53.
Liang Xinmin, Wang Huaiyong, Jiang Guojian, et al. Study on rheological properties of high concentration unclassified tailings filling slurry and resistance loss along pipeline transportation[J]. China Mine Engineering, 2022, 51(3): 47-53.

[7] 李帅,王新民,张钦礼,等.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+1060.
Li Shuai, Wang Xinmin, Zhang Qinli, et al. 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+1060.

[8] 吴爱祥,刘晓辉,王洪江,等.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 Aixiang, Liu Xiaohui, Wang Hongjiang, et al. 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.

[9] 程海勇.时-温效应下膏体流变参数及管阻特性[D].北京:北京科技大学,2018.
Cheng Haiyong. Characteristics of rheological parameters and pipe resistance under the time-temperature effect[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.

[10] 陈永霞.混凝土中水泥的水化过程及主要水化产物特性[J].青海交通科技,2013(3):5-6+11.
Cheng Yongxia. Hydration process of cement in concrete and characteristics of main hydration products [J]. Qinghai Transportation Science and Technology, 2013(3): 5-6+11.

[11] 赵凯月,张鹏,孔祥明,等.硅酸盐水泥水化动力学模型与试验方法研究进展[J].硅酸盐学报,2022,50(6):1728-1761.
Zhao Kaiyue, Zhang Peng, Kong Xiangming, et al. Recent progress on portland cement hydration kinetic models and experimental methods[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(6): 1728-1761.

[12] 杨进波,赵钲洋,尹航.基于分子动力学的 C-S-H 凝胶性能研究进展[J].材料导报,2021,35(5):5095-5101+5121.
Yang Jinbo, Zhao Zhengyang, Yin Hang. Research development on molecular dynamics of C-S-H gels[J]. Materials Reports, 2021, 35(5): 5095-5101+5121.

[13] 张金龙,唐孟雄,衷从浩,等.纳米 C-S-H 晶核早强剂对水泥早期水化的影响[J]. 硅酸盐通报,2025,44(1):21-30.
Zhang Jinlong, Tang Mengxiong, Zhong Conghao, et al. Effect of nano-C-S-H seeds early-strength agent on early hydration of cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(1): 21-30.

[14] 毕颖,赵文斌.磷石膏-水泥基复合充填材料的综合性能和细观水化机理[J].矿业研究与开发,2024,44(6):89-94.
Bi Ying, Zhao Wenbin. Comprehensive performance and microscopic hydration mechanism of phosphogypsum-cement based composite filling material[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(6): 89-94.

[15] 赵丕琪,孙乾,杨新月,等.水化硅酸钙凝胶的研究进展[J].硅酸盐学报,2024,52(5):1710-1721.

Zhao Peiqi, Sun Qian, Yang Xinyue, et al. Calcium silicate hydrate gels: a short review[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2024,52(5):1710-1721.

[16] 成高立,李晓光,王攀奇,等.石灰石粉-粉煤灰细度变化对水泥基胶凝材料体系水化动力学的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(7):2337-2343.
Cheng Gaoli, Li Xiaoguang, Wang Panqi, et al. Influence of fineness change of limestone powder-fly ash on hydration kinetics of cement-based cmentitious material system[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(7): 2337-2343.

[17] 孔祥明,卢子臣,张朝阳.水泥水化机理及聚合物外加剂对水泥水化影响的研究进展[J].硅酸盐学报,2017,45(2):274-281.
Kong Xiangming, Lu Zichen, Zhang Chaoyang. Recent development on understanding cement hydration mechanism and effects of chemical admixtures on cement hydration[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(2): 274-281.

[18] 王子明,王杰,甘杰忠,等."水泥-速凝剂-水"系统的水化反应特征及凝结硬化机理研究现状[J]. 硅酸盐通报,2020, 39(10):3045-3054.
Wang Ziming, Wang Jie, Gan Jiezhong, et al. Current state of hydration reaction characteristics and setting/hardening mechanism of cement-accelerator-water system[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2020,39 (10):3045-3054.

[19] 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[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(12):4325-4330.
Wu Aixiang, Liu Xiaohui, Wang Hongjiang, et al. Resistance characteristic of structure fluid backfilling slurry in pipeline transport[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2014,45(12):4325-4330.

[20] 甘德清,孙海宽,刘志义,等.金属矿山充填料浆管道输送理论研究20a进展与展望[J].金属矿山,2025(1):9-26.
Gan Deqing, Sun Haikuan, Liu Zhiyi, et al. Research progress and prospects of cemented tailings backfill slurry pipeline transport theory in metal mine for 20 years[J]. Metal Mine,2025(1):9-26.