

# 超深井长距离充填管道冲洗水用量计算模型<sup>\*</sup>

白龙剑<sup>1,2</sup>, 王胜开<sup>3</sup>, 王勇兵<sup>3</sup>, 王洪江<sup>1,2</sup>, 严庆文<sup>3</sup>, 茶强华<sup>3</sup>

- 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;
- 3.云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖市 654212)

**摘要:**清洁的充填管道不仅可以降低膏体输送的沿程阻力,还能够避免管道堵塞事故的发生。为了研究管道长度、充填倍线、洗管水流量和料浆质量分数对洗管水用量的影响规律,采用自制的充填管道清洗试验装置开展了管道清洗试验。结果表明:洗管水用量与被冲洗管道体积之间存在比例系数 $I$ , $I$ 为0.87~1.60。洗管水用量随管道长度的增加呈线性增长,随充填倍线的增加呈幂函数增长,随流量的增加呈幂函数降低,随料浆质量分数的增加呈线性减小。洗管水流速存在一临界值,此时洗管水对管内残余膏体的剪应力等于其屈服应力,洗管水由层流转换为湍流。基于比例系数 $I$ 将模型试验构建的洗管水用量计算模型扩展到工业原型,并利用实测数据验证了该模型的可靠性,洗管水预测误差小于10%。

**关键词:**洗管水用量;充填管道;管道清洗;计算模型;临界流速

**中图分类号:**TD853.34;TD218 **文献标识码:**A

**文章编号:**1005-2763(2024)06-0181-08

## 0 引言

管道输送是膏体充填的关键技术之一<sup>[1-2]</sup>。清洁的管道不仅可以降低管道输送的沿程阻力,而且能够避免管道堵塞与爆管事故的发生<sup>[3]</sup>。为了保证管道通畅以及避免膏体在管道内沉积,开展管道清洗以保持管道清洁是管道输送作业的必要环节<sup>[4]</sup>。料浆输送结束后,需要立即清洗管道,以排出管内残余膏体。洗管水用量是指管道清洗时长和水流量的乘积。管道清洗时长是指开始放水至井下沉淀池观察洗管水变清澈后通知地面DCS控制室停水的时间。由于充填管道长达4~10 km,停水后管道内仍有几十立方米洗管水排至沉淀

池,导致洗管水用量过高、井下沉淀池构筑量增加和加重井下排水负担等问题。因此,有必要分析洗管水的临界用量,为提高管道清洁度和降低洗管水用量提供依据。

国内外关于管道清洗方面的研究主要集中在自来水管<sup>[5]</sup>和油气管道领域<sup>[6]</sup>。赵欣等<sup>[7]</sup>研究了不同管道清洁技术对自来水管清洗的影响,结果表明清水清洗工艺简单,消除管内生长环耗水量为待清洗管道体积的3倍。YANG等<sup>[8]</sup>利用含有硫酸盐的水清洗天然气输送管路,结果表明硫酸盐的加入可以提高污染物的清洗效果。ZHANG等<sup>[9]</sup>研究了清洗倾斜管道时,触发管道内砂流动的临界流速,结果表明临界起砂速度随倾斜角和砂中值粒径的增大而增大。然而,关于充填领域管道清洗的研究较少。王玮、吉学文等<sup>[10-11]</sup>利用砂浆临界流动速度公式<sup>[12]</sup>,研究了含粗骨料膏体管道清洗时物料形成跳跃式流动的临界流速,研究结果表明临界流速均大于 $4.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在充填管道清洗过程中洗管水流速约为 $1.5\sim 2.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ <sup>[13]</sup>,未达到砂浆临界流速。许多学者从新装备-管道清洗机器人<sup>[14]</sup>、新工艺-冰浆清洗管道<sup>[15]</sup>等方面开展了管道清洗研究以提升管道清洗效率,但现有研究成果难以科学设计洗管水用量。

本文基于相似模拟理论,并考虑矿山实际,自主研发了充填管道清洗试验装置。利用管道清洗试验系统研究了管道长度、充填倍线、流量和料浆质量分数对洗管水用量的影响规律。根据试验结果构建了多因素洗管水用量计算模型,并将其应用于工业充填管道洗管水用量设计。基于现场实测数据验证模

\* 收稿日期:2023-09-06

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51834001)。

作者简介:白龙剑(1996—),男,山西吕梁人,博士研究生,主要从事充填采矿方面的研究,E-mail:bailongjian321@163.com。

通信作者:王胜开(1982—),男,云南曲靖人,硕士,高级工程师,主要从事采矿研究工作,E-mail:wangshengkai1971@163.com。

型的可靠性。研究结果可为类似矿山洗管水用量设计提供理论依据。

## 1 试验概况

本研究基于相似模拟理论,制作了管道清洗试验模型。以全尾砂膏体和洗管水为试验对象,开展不同工况下的管道清洗试验,得到洗管水的用量。本试验可为洗管水用量计算模型的构建提供基础数据。

### 1.1 试验材料

试验所用全尾砂来自云南某铅锌矿的浓密机底流,密度为  $2750 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。充填所用全尾砂的粒径分布曲线如图 1 所示,胶凝材料采用 P·C 32.5R 水泥。

由图 1 可知,全尾砂中  $-20 \mu\text{m}$  所占比例为 37.37%,  $-74 \mu\text{m}$  所占比例为 65.06%,  $-200 \mu\text{m}$  所占比例为 86.72%, 加权平均粒径为  $78.25 \mu\text{m}$ , 属于尾中砂<sup>[16]</sup>。计算得到不均匀系数为 22.47, 曲率系数为 1.16, 同时满足不均匀系数大于 5 且曲率系数为 1~3, 该矿山全尾砂级配良好<sup>[17]</sup>。

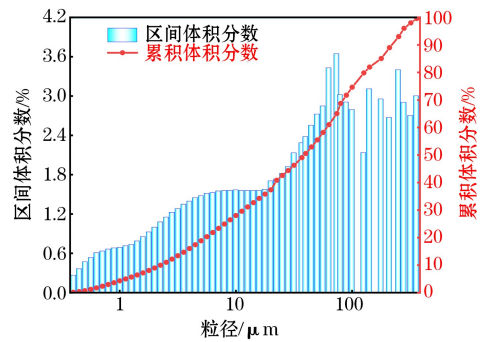


图 1 全尾砂粒径分布曲线

Fig.1 Grain size distribution curve of unclassified tailings

### 1.2 相似比设计

管道清洗模型试验旨在模拟工业原型中的洗管水和膏体流动形式,其相似准则需要同时表征流体运动学和动力学。基于管道清洗不同流动状态和相似准则参数的应用范围,根据弗劳德准则进行计算<sup>[18]</sup>。

基于 Buckingham- $\pi$  定理<sup>[19]</sup>, 根据相似准则和量纲分析法,取长度、密度、流量(流速)为模型与实际充填参数相似比的基本物理量,推导的模型-工业原型充填参数相似比见表 1。

表 1 试验模型与工业原型相似比设计

Table 1 Similarity ratio design of test model and industrial prototype

项目	管道直径	时间	水流速	水流量	充填倍线	料浆质量分数
相似比	$C_L = 10$	$C_t = C_t^{0.5} = 3.3$	$C_v = C_v^{0.5} = 3.3$	$C_Q = C_Q^{2.5} = 316.2$	1	1
原型	150 mm	—	$1.69 \sim 2.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$100 \sim 150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	3~8	68%~78%
模型	15 mm	—	$0.51 \sim 0.77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0.32 \sim 0.47 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	3~8	68%~78%

管道清洗工业原型中,洗管水的流量为  $100 \sim 150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 流速为  $1.69 \sim 2.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 管道长度可达 11 km, 直径为 0.15 m。

在模型试验中,考虑到管道直径的重要性大于长度,取几何相似比为 1:10,管道直径为 0.015 m, 长度为 2~5 m。考虑到洗管水在管道内流型为湍流和试验装置性能,速度相似比为 1:3.3, 试验中流量为  $0.32 \sim 0.47 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 流速为  $0.51 \sim 0.77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。充填倍线、料浆质量分数和工业原型一致。

### 1.3 试验装置和流程

#### 1.3.1 试验装置

充填管道清洗试验装置主要由供水供料系统和模拟管道两部分组成,如图 2 所示。供水供料系统主要由水泵(水压为  $0 \sim 0.15 \text{ MPa}$ )、膏体蠕动泵、压力表 1(量程为  $0 \sim 0.16 \text{ MPa}$ )、清水流量计(量程为  $0 \sim 10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ )、Y 型三通、透明 PVC 管组成。模拟管道主要由压力表 2(量程为  $0 \sim 0.16 \text{ MPa}$ )、污

水浮子流量计(量程为  $0 \sim 10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ )、透明 PVC 管(内径为 15 mm)和球阀组成。

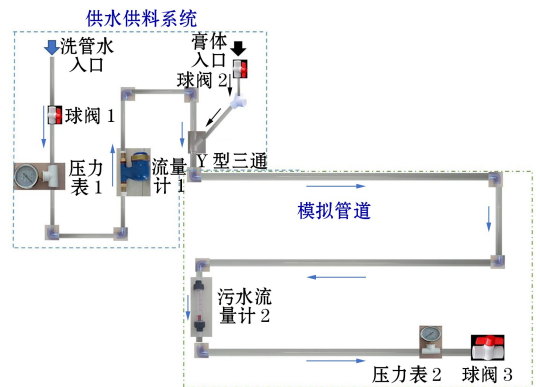


图 2 管道清洗试验装置

Fig.2 Piping cleaning test device

#### 1.3.2 试验流程

(1) 试验前预先配置特定浓度的料浆, 关闭球

阀1,打开球阀2和3,利用蠕动泵,从球阀2处加注膏体。膏体通过Y型三通流入并充满透明PVC管。待管道内充满膏体时关闭球阀3。

(2) 打开球阀1,关闭球阀2。清水从洗管水入口处进入,顺着图2中蓝色箭头方向流动(颜色标识见电子版),从球阀3处流出。在试验过程中接取洗管水,计算洗管水用量,并记录流量和压力数据。

#### 1.4 试验方案

充填管道清洗试验中,试验因素为管道长度、充填倍线、洗管水流量和料浆质量分数,开展4因素4水平正交试验<sup>[20]</sup>和单因素4水平试验。

依据相似比,设计管道长度为2~5 m(梯度为1 m),洗管水流量为2~8 L·min<sup>-1</sup>(梯度为2 L·min<sup>-1</sup>)<sup>[21]</sup>。待充填采场分布在矿井各处,对应不同充填倍线。邻近充填钻孔的采场充填倍线小于4,而充填管道长度为10 173 m处对应的埋深为1387 m,充填倍线为7.3。因此,本试验中充填倍线设计为4~7(梯度为1)。料浆质量分数为72%~78%(梯度为2%)。

#### 1.5 数据处理方法

工程实际中,常用洗管水固含量质量分数( $\omega_s$ )表征管道的清洗效果。充填管道清洗过程中,当 $\omega_s$ 降低至3%时,表明管道清洁度达标。洗管水用量是指管道出口处 $\omega_s$ 从初始值降低到3%时所消耗的洗管水体积。

充填管道清洗试验中,采用3~7个300 mL的塑料瓶在管道末端接取洗管水,分别测定每瓶洗管水的 $\omega_s$ 。 $\omega_s$ 为该瓶洗管水的固含量均值,则洗管水用量也取该瓶水的中间值,即第*i*瓶洗管水用量为 $W_p(W_p=300 \times (i-0.5))$ 。管道出口固含量与洗管水用量的关系曲线如图3所示。

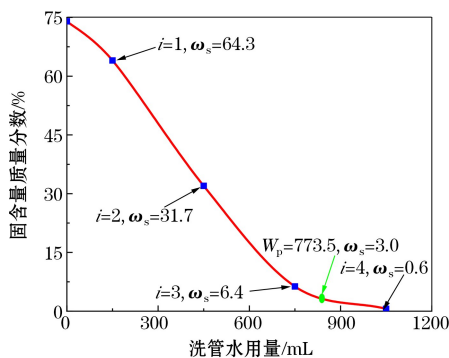


图3 管道出口固含量与洗管水用量的关系曲线

Fig.3 The relationship curve between the solid content and the amount of washing water at pipeline outlet

由图3可见, $W_p$ 为0~150 mL和750~1150

mL时, $\omega_s$ 下降速率较低,原因在于初始阶段主要排出高浓度料浆,而当 $\omega_s < 5\%$ 后,少量残余尾砂难以被排出。 $W_p$ 为150~750 mL时, $\omega_s$ 随洗管水的加入迅速下降,为经济性较好的清洗阶段。 $W_p$ 为773.5 mL时, $\omega_s$ 降低至3%,将773.5 mL确定为该组试验的洗管水用量。

## 2 洗管水用量影响因素分析

依据管道清洗得到的不同工况下的洗管水用量,在此基础上分析管道长度、充填倍线、洗管水流量和料浆质量分数对洗管水用量的影响。

### 2.1 管道长度对洗管水用量的影响

管道清洗试验结果表明,管道长度对洗管水用量的影响具有一定的规律,以充填倍线为5、料浆质量分数为74%为例,不同流量下洗管水用量与管道长度的关系曲线如图4所示。

由图4可知,随着管道长度增加,洗管水用量呈线性增长。由回归公式可知,管道长度每增加1 m,则洗管水用量增加约180 mL,洗管水单耗为0.18 L·m<sup>-1</sup>,约等于被清洗管道的体积。由此可见,当其他条件相同时,洗管水单耗与管道长度无关。洗管水用量与被清洗管道体积之间存在一个比例系数*I*,该比例系数是关于充填倍线、流量和料浆质量分数的函数。比例系数*I*是构建洗管水用量计算模型的关键。

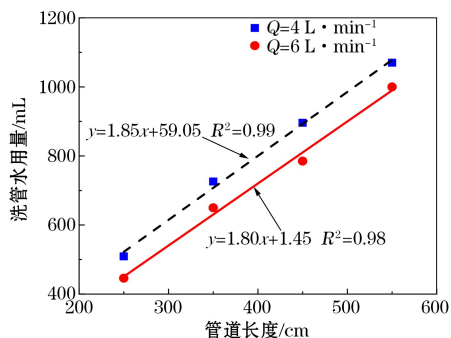


图4 不同流量下洗管水用量与管道长度的关系曲线

Fig.4 The relationship curves between the amount of washing water and the pipe length under different flow quantities

### 2.2 充填倍线对洗管水用量的影响

管道清洗试验结果表明,充填倍线对洗管水用量的影响具有一定的规律,以管道长度为500 cm、料浆质量分数为74%为例,不同流量下洗管水用量和充填倍线的关系曲线如图5所示。

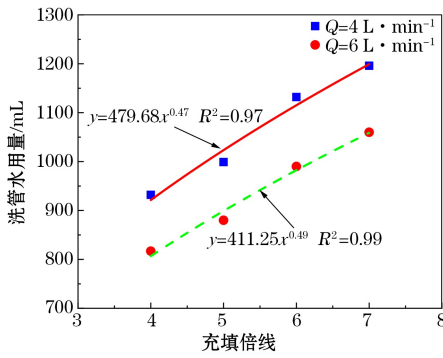


图5 不同流量下洗管水用量与充填倍线的关系曲线

Fig.5 The relationship curves between the amount of pipe washing water and the filling gradient under different flow quantities

由图5可知,随着充填倍线的增加,洗管水用量呈幂函数增长。在其他条件相同时,充填倍线每增加1,洗管水单耗增加约 $15\sim 20\text{ mL}\cdot\text{m}^{-1}$ 。原因在于垂直管道中的膏体受重力作用自流即可实现管道自洁。然而,水平管道中存在部分残留膏体,需要依靠洗管水的剪切作用,将残余膏体与洗管水混合排出管内。由此可知,水平管道清洗对洗管水的消耗远大于垂直管道。充填倍线增加即水平管道占比增加,因此洗管水的单耗随充填倍线增加而增加。此外,洗管水单耗的增加量随充填倍线的增加而减小。原因在于水平管道占比与洗管水单耗正相关。充填倍线( $N$ )增加1,水平管道占比提高 $1\cdot(N^2-N)^{-1}$ ,该函数单调递减,则水平管道占比增长率降低,洗管水单耗增加量也随之降低。

### 2.3 流量(流速)对洗管水用量的影响

试验数据表明,流量对洗管水用量的影响具有一定的规律,以管道长度为 $500\text{ cm}$ 、料浆质量分数为 $74\%$ 为例,不同充填倍线下洗管水用量与流量(流速)的关系曲线如图6所示。

由图6可知,随着洗管水流量(流速)的增加,洗管水用量呈幂函数减少。流量从 $2\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加到 $4\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,洗管水单耗降低 $40\text{ mL}\cdot\text{m}^{-1}$ ;流量从 $6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 增加到 $8\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,洗管水单耗降低 $13\text{ mL}\cdot\text{m}^{-1}$ 。洗管水单耗的降低随着流量的增加而减缓。原因在于流量与流速相关,流速较低时,洗管水对管内残余膏体的剪应力小于其屈服应力,难以有效破坏残余膏体,并与其均匀混合排出管内。当洗管水流速大于层流到湍流的临界值后,才能避免水和膏体形成分层流,提高管道清洗效率。流速大于 $0.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,洗管水单耗基本稳定,可

将其视为流型转换的临界流速。因此,当流速相似比为 $1:3.3$ 时,在实际管道清洗时应保证洗管水流速不低于 $1.82\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,以降低管道清洗洗管水单耗。

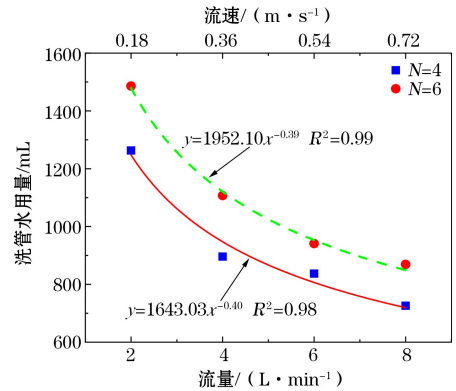


图6 不同充填倍线下洗管水用量与流量(流速)的关系曲线

Fig.6 The relationship curves between amount of pipe washing water and the flow quantity (flowrate) under different filling gradients

### 2.4 料浆质量分数对洗管水用量的影响

试验结果表明,料浆质量分数对洗管水用量的影响具有一定的规律,以管道长度为 $500\text{ cm}$ 、充填倍线为 $5$ 为例,不同流量下洗管水用量与料浆质量分数的关系曲线如图7所示。

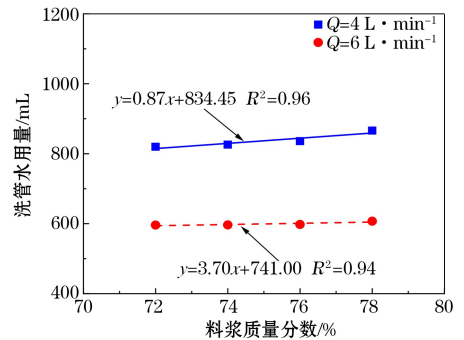


图7 不同流量下洗管水用量与料浆质量分数的关系曲线

Fig.7 The relationship curves between the amount of pipe washing water and slurry mass fraction under different flow quantities

由图7可知,洗管水用量随着料浆质量分数的增加而增加。洗管水排出管道内残余膏体,必须克服膏体的屈服应力。膏体的屈服应力主要受料浆质量分数影响。膏体料浆质量分数的增加会降低尾砂颗粒间隙,增加颗粒间相互作用力,减小颗粒间水的润滑作用,屈服应力随之上升。当洗管水的剪应力大于膏体屈服应力后,残余膏体会在洗管水剪切作



用下与水混合排出管内。本研究中料浆质量分数为72%~78%，屈服应力为30~50 Pa，料浆质量分数未到屈服应力的突增点。因此，料浆质量分数对洗管水用量影响较小。料浆质量分数增加2%，洗管水单耗增加0.35~1.48 mL·m<sup>-1</sup>。

### 2.5 多因素敏感性分析

灰关联分析能确定多因素之间关联性的强弱。因此，引入灰关联分析法研究充填倍线、流量和料浆质量分数对洗管水单耗的影响大小。

根据灰关联分析法的步骤，首先计算管道清洗中各因素的关联度 $\zeta(k)$ ，然后将各影响因素归一化处理后，分别计算影响因素与参考数列关联度的平均值。

充填倍线、流量和料浆质量分数的平均关联度分别为0.710, 0.822和0.595。由此可知，流量对洗管水单耗影响最大，其次是充填倍线，料浆质量分数影响最小。

## 3 洗管水用量数学模型的构建

本节基于管道清洗试验结果(见表2)，构建基于管道长度 $L$ 、充填倍线 $N$ 、流量 $Q$ 和料浆质量分数 $M_f$ 的多因素洗管水用量计算模型。利用洗管水用量和被清洗管道体积间的比例系数，将模型试验得出的计算模型应用到工业实际中，并利用实测数据验证了模型的可靠性。

表2 管道清洗试验结果

Table 2 Pipeline cleaning test results

管道长度/cm	流量/(L·min <sup>-1</sup> )	充填倍线	质量分数/%	洗管水用量实测值/mL	洗管水用量预测值/mL	误差/%
200	2	4	72	446.72	432.13	3.27
	4	5	74	413.61	406.23	1.78
	6	6	76	376.43	405.76	-7.79
	8	7	78	393.21	413.07	-5.05
300	2	5	76	753.61	759.86	-0.83
	4	4	78	532.14	578.34	-8.68
	6	7	72	622.78	619.93	0.46
	8	6	74	536.72	546.75	-1.87
400	2	6	78	1071.22	1132.84	-5.75
	4	7	76	923.91	977.39	-5.79
	6	4	74	663.52	653.06	1.58
	8	5	72	662.07	651.05	1.66
500	2	7	74	1432.06	1444.38	-0.86
	4	6	72	1098.48	1076.54	2.00
	6	5	78	897.69	955.59	-6.45
	8	4	76	746.39	773.50	-3.63

### 3.1 模型试验洗管水用量计算模型

洗管水用量与被清洗管道体积之间存在比例系数 $I=f(Q, N, M_f)$ 。 $I$ 是一个关于充填倍线、流量和料浆质量分数的函数。由前文分析可知，充填倍线、流量与洗管水用量为幂函数关系，设经验模型为式(1)。

$$I = kQ^a \times N^b \times M_f^c \quad (1)$$

式中， $Q$ 为流量，L/min； $N$ 为充填倍线； $M_f$ 为料浆质量分数，%； $k, a, b, c$ 均为拟合系数。

根据充填管道清洗试验结果，利用SPSS分析软件对洗管水用量进行回归分析。构建洗管水用量 $W_p$ 与管道长度 $L$ 、充填倍线 $N$ 、流量 $Q$ 和料浆质量分数 $M_f$ 的函数关系，结果见式(2)，拟合优度 $R^2 = 0.997$ 。

$$W_p = 1.073 \times \frac{\pi D^2}{4} \times L \times Q^{-0.282} \times N^{0.471} \times M_f \quad (2)$$

式中， $D$ 为管道直径，m； $L$ 为管道长度，m。

式(2)中第2项与第3项的乘积为管道体积，其余项为比例系数 $I$ ，由表2可知， $I$ 为0.87~1.60。与管道清洗试验相比，式(2)的洗管水用量预测误差小于5%的样本占样本总数81.25%。因此，式(2)能用于管道清洗试验的洗管水用量预测，系统误差在可接受范围内。

### 3.2 工业原型洗管水用量计算模型

#### 3.2.1 构建洗管水用量模型

洗管水用量是膏体充填管道输送的一个重要参数，它关系着管道的畅通和充填成本。以往洗管水用量主要靠经验判断，容易导致管道清洗效果差或用水过多的问题。为此，利用模型试验得到了洗管水用量与被清洗管道体积间的比例系数 $I=f(N, Q, M_f)$ ，并将洗管水用量计算模型从试验扩展到工业原型。

依据相似比可知，工业原型和模型试验中充填倍线和料浆质量分数是相同的，流量相似比为1:316.2。试验模型中1 L·min<sup>-1</sup>对应工业原型中的18.972 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。因此，将工业原型中的流量除以18.972即可与模型试验得到的比例系数 $I$ 相对应，得到式(3)。

$$V_w = 1.073 \times \frac{\pi D^2}{4} \times L \times \left( \frac{Q}{18.972} \right)^{-0.282} \times N^{0.471} \times M_f \quad (3)$$

式中， $V_w$ 为工程实际洗管水用量，m<sup>3</sup>。

### 3.2.2 验证洗管水用量模型

为了验证洗管水用量计算模型的可靠性,依据某铅锌矿洗管水用量实测数据,分析模型的预测误差。某铅锌矿洗管水的流量为  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,管道直径为  $0.15 \text{ m}$ ,料浆质量分数为  $76\%$ 。被清洗管道长度和充填倍线随矿房位置而变化。管道长度为  $3000 \sim 11\,000 \text{ m}$ ,井深为  $500 \sim 1500 \text{ m}$ ,充填倍线为  $4.5 \sim 7.5$ 。利用式(3)计算洗管水用量,并与实测值对比,结果见表3。

由表3可知,洗管水用量约为管道体积的  $0.8 \sim 1.1$  倍。洗管水用量预测误差小于  $10\%$  的占样本总数的  $87.5\%$ 。因此,洗管水用量计算模型可用于采用充填法的矿山设计洗管水用量,系统误差能满足工程需要。

表3 某铅锌矿洗管水用量预测值和实测值对比

Table 3 Comparison of predicted and measured value of pipe washing water in a lead-zinc mine

矿房编号	管道长度/m	充填倍线	洗管水实测值/ $\text{m}^3$	洗管水预测值/ $\text{m}^3$	比例系数 $I$
1	3007	4.77	48.31	47.16	0.89
2	5908	6.52	97.43	105.99	1.01
3	6668	5.90	111.47	114.60	0.97
4	7286	6.43	136.84	129.94	1.01
5	7586	6.55	121.39	136.37	1.02
6	9416	7.59	176.77	180.34	1.08
7	10159	7.32	186.49	186.75	1.04
8	10173	7.33	189.62	191.94	1.07

### 3.2.3 洗管水用量计算模型的工程应用

根据该铅锌矿实际情况,料浆质量分数为  $76\%$ ,洗管水的流量为  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。利用洗管水用量计算模型,得到不同管道长度和充填倍线条件下的洗管水用量,如图8所示。

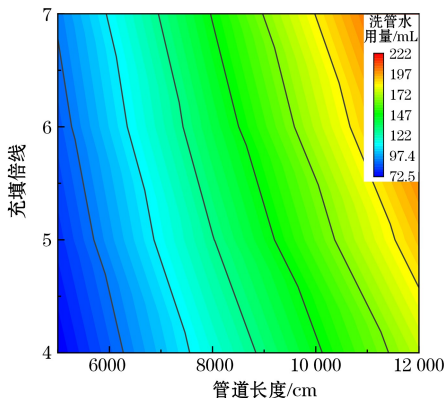


图8 不同管道长度和充填倍线条件下的洗管水用量

Fig.8 The amount of the pipe washing water under different pipe lengths and filling gradients

在管道清洗参数不变的情况下,以图8中的洗管水用量为理论依据。针对井下不同位置的采空区,调整洗管水用量,以保证管道清洗效果,节约清洗成本。

## 4 结论

基于相似模拟原理,采用自制的充填管道清洗试验装置测定洗管水用量,该装置结构简单,与工程实际切合。采用矿山实测数据验证试验结果和预测模型的可靠性,提出洗管水用量计算模型。得出以下主要结论。

(1) 洗管水用量与被冲洗管道体积之间存在比例系数  $I = f(N, Q, M_f)$ ,  $I$  为  $0.87 \sim 1.60$ , 该系数随充填倍线和料浆质量分数增加而增加,随洗管水的流量增加而降低。

(2) 洗管水流速对洗管水单耗的影响最为显著。试验中流速小于  $0.55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,工程实际中流速小于  $1.82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,洗管水剪应力小于沉积膏体屈服应力,层流占主导,反之湍流占主导,管道清洗效果较好。

(3) 通过理论推导和回归分析,构建了洗管水用量计算模型,为类似膏体充填矿山洗管水用量设计提供理论基础。针对云南某铅锌矿实际情况,得出当洗管水的流量为  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  时,管道清洗时间为  $0.5 \sim 1.5 \text{ h}$ ,洗管水用量为  $80 \sim 220 \text{ m}^3$ 。

### 参考文献(References):

- [1] 余健,李辉,李浩,等.谦比希铜矿主西矿体膏体充填系统技术改造[J].矿业研究与开发,2023,43(4):18-22.  
YU Jian, LI Hui, LI Hao, et al. Technical transformation of paste filling system of main-western ore body in Chambishi Copper Mine [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(4): 18-22.
- [2] 白龙剑,严国超,杨涛.氟石膏改性高水粉煤灰复合充填材料性能研究[J].矿业安全与环保,2020,47(6):32-36.  
BAI Longjian, YAN Guochao, YANG Tao. Study on properties of composite filling material of fluorogypsum modified high water fly ash [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2020, 47(6): 32-36.
- [3] 李向阳,张新国,曹忠,等.满管自流膏体充填管路清洗技术研究及应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2011,30(5):22-25.  
LI Xiangyang, ZHANG Xinguo, CAO Zhong, et al. Study and application of washing technology for filling pipelines with full pipe and self-flow pastes [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2011, 30(5): 22-25.
- [4] YIN Shenghua, SHAO Yajian, WU Aixiang, et al. A systematic review of paste technology in metal mines for cleaner production in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 247(2): 119590.

- [5] YANG Kun, WU Chenguang, YUAN Yixing, et al. Application of virtual instrument technique in data acquisition of gas-water pulse pipe cleaning experiment[J]. Adv Intell Soft Comput, 2012, 144(1): 465-470.
- [6] HE Nana, LI Taofei. Study of an environmentally friendly oil pipeline cleaning technology based on self-propelled intelligent robot[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1651(1): 012098.
- [7] 赵欣, 严棋, 陈卫星, 等. 供水管道清洁技术的研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(增刊2): 78-82.  
ZHAO Xin, YAN Qi, CHEN Weixing, et al. Research progress on clean technology of water supply pipeline[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(S2): 78-82.
- [8] YANG Jingdong, JI Shouhong. Study on cooperative treatment of natural gas pipeline cleaning wastewater and membrane module[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1011(1): 012025.
- [9] ZHANG Ruiyao, LI Jun, YANG Hongwei, et al. Experimental study of the critical sand starting velocity of gas-water sand flow in an inclined pipe[J]. Petroleum Science, 2022, 19(6): 2981-2994.
- [10] 王玮, 张礼威, 赵忠辉. 充填管路高效清洗技术的研究与应用[J]. 山东煤炭科技, 2012(2): 152-153.  
WANG Wei, ZHANG Liwei, ZHAO Zhonghui. Research and application of efficient cleaning technology for filling pipeline[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2012(2): 152-153.
- [11] 吉学文. 膏体充填管道冲洗技术研究及应用[J]. 云南冶金, 2008(4): 7-9.  
JI Xuewen. Research and application of paste filling pipeline flushing technology[J]. Yunnan Metallurgy, 2008(4): 7-9.
- [12] JIANG Lichun, LAI Xiwen, JIAO Huazhe. Concrete relative velocity prediction to prevent mortar segregation for safe gravity transportation [J]. Alexandria Engineering Journal, 2020, 59(6): 5155-5164.
- [13] WANG Hongjiang, WANG Xiaolin, WU Aixiang, et al. A wall slip pressure gradient model of unclassified tailings paste in pipe flow: theoretical and loop test study [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2021, 298(11): 104691.
- [14] JALAL Taheri, MEHRDAD Moallem. A comprehensive review of in-pipe robots[J]. Ocean Engineering, 2023, 277(6): 114260.
- [15] MICHAEL Kauffeld, SEBASTIAN Gund. Ice slurry-history, current technologies and future developments[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 99(3): 264-271.
- [16] 吴爱祥, 阮竹恩, 王建栋, 等. 基于超级絮凝的超细尾砂絮凝行为优化[J]. 工程科学学报, 2019, 41(8): 981-986.  
WU Aixiang, RUAN Zhuen, WANG Jiandong, et al. Optimizing the flocculation behavior of ultrafine tailings by ultra-flocculation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(8): 981-986.
- [17] 吴爱祥, 艾纯明, 王贻明, 等. 泵送剂改善膏体流变性能试验及机理分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2752-2758.  
WU Aixiang, AI Chunming, WANG Yiming, et al. Test and mechanism analysis on improving rheological property of paste with pumping agent [J]. Journal of Central South University ( Science and Technology ), 2016, 47 ( 8 ): 2752-2758.
- [18] YU Ming, CECI Alessandro, PIROZZOLI Sergio. Reynolds number effects and outer similarity of pressure fluctuations in turbulent pipe flow[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2022, 96(8): 108998.
- [19] HAO Yuyu, LI Shugang, ZHANG Tianjun. A gas migration law study of a large-scale 3D physical similarity simulation with an adaptive Kalman filter algorithm [J]. Assembly Automation, 2022, 42(1): 126-133.
- [20] ZHA Yunfei, MENG Xianfeng, QIN Shuaishuai, et al. Performance evaluation with orthogonal experiment method of drop contact heat dissipation effects on electric vehicle lithium-ion battery[J]. Energy, 2023, 271(5): 127049.
- [21] 王洪江, 王小林, 寇云鹏, 等. 全尾砂高浓度胶结充填的环管试验[J]. 工程科学学报, 2021, 43(2): 215-222  
WANG Hongjiang, WANG Xiaolin, KOU Yunpeng, et al. Loop test study on the high-concentration cemented filling of full tailings [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(2): 215-222.

### Washing Water Calculation Model of Long-Distance of Ultra-Deep Shaft Filling Pipe

BAI Longjian<sup>1,2</sup>, WANG Shengkai<sup>3</sup>, WANG Yongbing<sup>3</sup>, WANG Hongjiang<sup>1,2</sup>, YAN Qingwen<sup>3</sup>, CHA Qianghua<sup>3</sup>  
(1.School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;  
2.Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Beijing 100083, China;  
3.Yunan Chihong Zn & Ge Co., Ltd., Qujing, Yunnan 654212, China)

**Abstract:** Clean filling pipe can not only reduce the resistance along the paste transportation, but also avoid the occurrence of pipe blockage accident. In order to study the influence of pipe length, filling gradient, flow quantity and slurry mass fraction on the amount of pipe washing water, a self-made filling pipe cleaning test device was used to carry out pipe cleaning test. The results show that there is a proportional coefficient  $I$  between the amount of pipe washing water and the volume of the washed pipe, which is 0.87-1.60. The amount of pipe washing water increases linearly with the increase of pipe length, increases in

power function with the increase of filling gradient, decreases in power function with the increase of flow quantity, and decreases linearly with the increase of slurry mass fraction. There is a critical value for the flow rate of pipe washing water. When the shear stress of pipe washing water on the residual paste in the pipe is equal to its yield stress, the washing water is converted from laminar flow to turbulent flow. Based on the proportional coefficient  $I$ , the pipe washing water consumption calculation model constructed by the model test was extended to the industrial prototype, and the reliability of the model was verified by the measured data. The prediction error of pipe washing water is less than 10%.

**Key words:** The amount of pipe washing water, Filling pipe, Pipe cleaning, Calculation model, Critical velocity