

文章编号: 1004-4051(2025)04-0107-09

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20240467

复合骨料膏体充填料浆管道输送阻力 及其压力监测研究

陈鑫政^{1,2}, 蒋合国³, 杨小聪^{1,2}, 许文远^{1,2}, 沐兴旺³,
唐琳³, 魏筱乐³, 徐成金³

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 102628;

2. 国家金属矿绿色开采国际联合研究中心, 北京 102628;

3. 彝良驰宏矿业股份有限公司, 云南昭通 657600)

摘要: 毛坪铅锌矿采用尾砂+机制砂复合骨料进行膏体充填, 充填输送管道垂直落差超过 600 m, 水平管线长度超过 5 000 m, 属于高垂差、长距离充填输送范畴, 确保膏体料浆的稳定输送是矿山充填的关键。为解决矿山充填中堵管、爆管频发的问题, 提高充填钻孔满管率和输送稳定性, 通过测试得到尾砂、机制砂的物理参数及尾砂+机制砂复合骨料膏体料浆的流变参数, 利用复合骨料膏体料浆的流变参数理论计算出充填料浆管道输送的比摩阻, 并基于伯努利方程推导出计算钻孔内料浆高度的解析公式。进一步地, 通过在毛坪铅锌矿河东矿区 610 m 中段水平充填管道上安装压力监测装置, 开展复合骨料膏体料浆管输压力监测研究, 实测充填料浆的管输压力分布规律。结果表明: 充填料浆处于层流/过渡流时, 基于 Buckingham 公式推导的比摩阻理论计算具有较高的准确性。当充填流量为 60 m³/h, 充填料浆配比为灰砂比 1:4, 充填浓度 76% 时, 充填料浆的比摩阻为 5 392 Pa/m, 且当充填倍线为 2 以下时, 充填过程中钻孔内料浆满管率低于 50%。充填工程实践中, 矿山通过优化管路布置提高充填倍线, 提高充填流量和料浆质量浓度, 缩小管径提高比摩阻及增加局部损失等措施提高充填满管率, 研究成果对国内类似矿山充填系统参数设计与稳定性调控具有借鉴意义。

关键词: 复合骨料; 膏体; 管道输送; 压力监测; 比摩阻

中图分类号: TD853 **文献标识码:** A

Research on flowing resistance and pressure monitoring in conveying pipeline of paste filling slurry with composite aggregate

CHEN Xinzhen^{1,2}, JIANG Heguo³, YANG Xiaocong^{1,2}, XU Wenyuan^{1,2},
MU Xingwang³, TANG Lin³, WEI Xiaole³, XU Chengjin³

(1. BGRIMM Technology Group Co., Ltd., Beijing 102628, China;

2. National Centre for International Research on Green Metal Mining, Beijing 102628, China;

3. Yiliang Chihong Mining Co., Ltd., Zhaotong 657600, China)

Abstract: Maoping Lead-Zinc Mine utilizes composite aggregates of tailings and manufactured sand for paste filling. The filling pipeline system features a vertical drop exceeding 600 m and horizontal pipelines over 5 000 m in length, belonging to the category of high vertical drop and long-distance paste

收稿日期: 2024-04-01 责任编辑: 聂虹

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(编号: 2022YFC2904103)

第一作者简介: 陈鑫政(1990—), 男, 河南商丘人, 硕士, 高级工程师, 主要从事金属矿充填理论与技术方向的研究, E-mail: czgj403@163.com。

引用格式: 陈鑫政, 蒋合国, 杨小聪, 等. 复合骨料膏体充填料浆管道输送阻力及其压力监测研究[J]. 中国矿业, 2025, 34(4): 107-115.

CHEN Xinzhen, JIANG Heguo, YANG Xiaocong, et al. Research on flowing resistance and pressure monitoring in conveying pipeline of paste filling slurry with composite aggregate[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(4): 107-115.

filling. Maintaining the stable transport of paste slurry is vital for mine backfill operation. To address frequent pipeline blockages and bursts and improve the filling borehole full-pipe ratio and transport stability, the physical parameters of tailings and manufactured sand and the rheological parameters of paste slurry using tailings and manufactured sand as composite aggregate are obtained through test. Based on the rheological parameters of composite aggregate paste slurry, the specific frictional resistance of filling slurry conveying in pipeline is calculated, and the analytical formula of slurry height in borehole is deduced by Bernoulli equation. Furthermore, pressure monitoring devices are installed in the horizontal filling pipeline in the 610 m level in Hedong Mine Area of Maoping Lead-Zinc Mine and a study on the pressure monitoring in conveying pipeline of paste filling slurry with composite aggregate is carried out. The results show that when the filling slurry is in laminar flow or transitional flow, the specific friction resistance calculation formula obtained by Buckingham formula has high accuracy. When the filling flow quantity is $60 \text{ m}^3/\text{h}$ and the filling slurry with cement-sand ratio of 1 : 4 and mass concentration of 76%, the specific friction resistance of filling slurry is $5\,392 \text{ Pa/m}$. When stowing gradient is less than 2, the full pipe rate of the borehole is less than 50%. In the backfilling engineering practice, the full pipe rate can be improved by optimizing pipeline layout to increase stowing gradient, increasing filling quantity and mass concentration of slurry, and reducing pipe diameter to increase specific frictional resistance and increasing local resistance loss. This study offers valuable references for parameter design and stability optimization of backfilling systems in similar domestic mines.

Keywords: composite aggregate; paste; pipeline conveying; pressure monitoring; specific frictional resistance

矿产资源的开采逐步进入深井开采阶段,国内部分矿山已进入或即将进入千米深井开采,如云南会泽铅锌矿、辽宁红透山铜矿、安徽冬瓜山铜矿等,深井开采面临“三高一扰动”的复杂条件^[1-2]。随着“绿水青山就是金山银山”理论实践,以及国家对固废地表堆存、尾矿库建设等环保要求日趋严格,绿色矿山建设亦成为矿产资源开采的趋势。充填采矿法,特别是尾砂充填采矿法具有“一废治两害”的作用,可实现尾矿的原位处置,控制地压和提高资源回收率,是深井矿山绿色高效开采的主流方法^[3-6]。

充填料浆管道输送是矿山充填的关键环节之一,通常在地表制备充填料浆,然后通过管道自流或泵送至井下采空区进行充填^[7]。然而,充填料浆管道输送,尤其是深井充填管道输送,面临管道磨损、爆管、堵管等问题,已成为影响矿山充填效率的主要因素^[8]。张钦礼等^[9]、王贤来等^[10]研究了金川镍矿充填钻孔的磨损形式及机理,得出冲击磨损是钻孔管道主要磨损形式且自由下落段的高度越大,冲击磨损越严重的结论;王小林^[11]研究了掺粗骨料高浓度充填自流输送平直管道磨损规律,磨损速率随料浆层流流速增加呈幂律函数增长;王文才等^[12]对充填堵管事故及气压通管技术进行了分析,提出气压通管技术方案。借助 CFD 数值分析软件,张宗国等^[13]对充填管网参数优化及输送特性开展了研究,影响沿程阻力的因素显著性为管径>质量浓度>充填倍线;杨凯等^[14]基于 CFD-DEM 耦合方法对矸石-粉煤灰充填料浆在

垂直弯管中的磨损开展了研究,弯管的磨损率随着料浆的流速增加而提高;石宏伟等^[15]研究了深井矿山高浓度充填料浆自流输送管道磨损机理,最大磨损位置在空气-砂浆交界面。通过在充填管道上安装监测仪表, YANG 等^[16]研究了金川镍矿充填料浆管道输送阻力,论证了 Swamee-Aggarwal 模型计算沿程阻力的准确性;李振龙等^[17]通过在室内搭建环管试验平台,利用管道压力、流量参数建立管道故障识别算法并开展试验论证;王湃等^[18]基于 ERT 技术研究了矿山充填管道堵塞三维可视化检测方法;黎梦圆等^[19]、周英烈^[20]研究了尾砂沉降、搅拌等因素对充填料浆流动特性的影响。以上研究在充填管道磨损和沿程阻力损失方面取得了一定成果,表明减小垂直钻孔自由下落段高度,优化充填管径、流速等参数对降低管道磨损、提高充填稳定性具有重要意义。本文以毛坪铅锌矿为工程背景,通过监测井下水平充填管道的压力,进一步研究充填管道的沿程阻力损失,构建充填钻孔满管高度的计算公式,分析影响充填满管的因素,并提出优化改进措施,为国内类似矿山深井输送提供参考借鉴。

1 工程背景

毛坪铅锌矿位于云南省昭通市彝良县,是云南驰宏锌锗股份有限公司下属主体开采矿山之一,分为河东和河西两个大采区,采用下向进路充填开采方法。矿山采用选矿厂过滤的尾矿滤饼和井下废石破碎而成的机制砂作为充填骨料,水泥作为胶凝材

料,按照灰砂比1:4和1:8分别充填假底层和接顶层,充填浓度为74%~78%。

充填站设在河东矿区,建有一套膏体充填系统,制备能力为80 m³/h。河东矿区地表现使用4个充填钻孔(地表至610 m钻孔一用一备),钻孔底分别为760 m、670 m和610 m,分别负责760~670 m、670~610 m及-610 m矿体采场的充填,610 m中段以下分别设有610~478 m钻孔和610~430 m钻孔,均为一用一备。河西矿区充填有2条管线布置,一条为沿地表过洛泽河经十号大坑平巷及斜井,负责670 m以上矿体采场的充填,另一条为沿地表经钻孔至670 m,通过井下670 m运输巷敷设充填管道,负责670 m以下矿体采场的充填,670 m以下设有670~610 m钻孔。本文主要研究河东矿区充填管道输送,毛坪铅锌矿河东430 m以上充填管线布置如图1所示。

目前,河东矿区已开拓至+20 m中段,主要开采范围在610 m中段以下,根据河东矿区充填管线布置,计算得出河东矿区610 m中段以下采场的充填倍线均在3~4范围内,其中430 m中段I-8矿体采场充填倍线只有1.45。河东矿区610 m中段以下采场充填中,充填料浆对充填管道的磨损加剧,料浆在管道内发生离析,井下可清晰地听到机制砂对管道的冲刷声音,井下管道爆管频次提高,管道出现摆动较大等问题,430 m中段采场充填倍线计算和井下充填管道磨损发生漏浆,见图2和表1。因此,研究提高充填管道的满管率,减少充填料浆对充填管壁的冲刷磨损,对提高充填管道的使用寿命和充填稳定性具有重要工程实践意义。

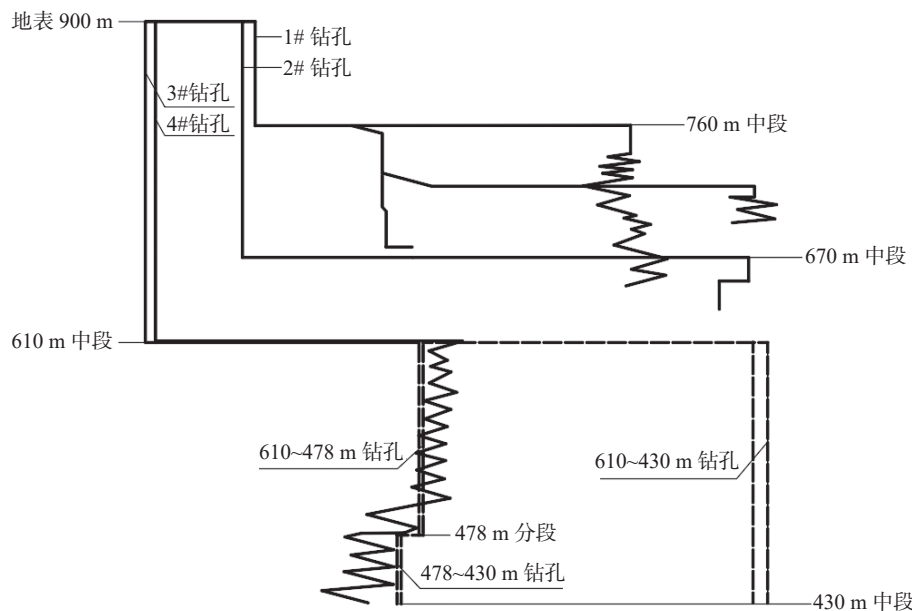


图1 河东矿区充填管线布置

Fig. 1 Backfilling pipeline layout of Hedong Mining Area

2 试验与模型

充填料浆管道输送与充填材料的物理性质、充填料浆的流变参数及充填管道设计相关。为提高毛坪铅锌矿充填管道输送的满管率,减少充填管道的震动,本文首先对充填材料的基础物化参数和充填料浆的流变参数进行测试,其次确定充填管道输送的阻力计算模型,并结合伯努利方程推导充填钻孔料浆高度的解析公式,最后通过在水平管道安装压力监测装置对充填管道阻力及钻孔料浆高度进行实践分析。

2.1 试验材料

试验材料为毛坪铅锌矿尾矿滤饼和机制砂,按照《金属非金属矿山充填工程技术标准》(GB/T 51450—2022)和《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)测得全尾砂和机制砂的相对密度分别为2.67 g/cm³和2.74 g/cm³,胶凝材料为矿山现用P.O 42.5普通水泥。采用Master 2000激光粒度分析仪测得全尾砂的粒径分布曲线,如图3所示。全尾砂中-74 μm颗粒含量占56.71%, -37 μm颗粒含量占45.33%, -20 μm颗粒含量占36.05%,不均匀系数Cu=30,曲率系数Cc=0.83,表明全尾砂级配不佳,且细颗粒含量过多,需要增加机制砂粗骨料优化级配。

采用筛析法测试机制砂的粒径分布,结果见表2。

2.2 流变参数测试

充填料浆的流变特性对料浆的管道输送设计具有较大影响,通常采用屈服应力和黏度系数指标表征料浆的流变特性。本文采用Brookfield R/S-SST流变仪对毛坪铅锌矿尾砂+机制砂复合骨料充填料浆

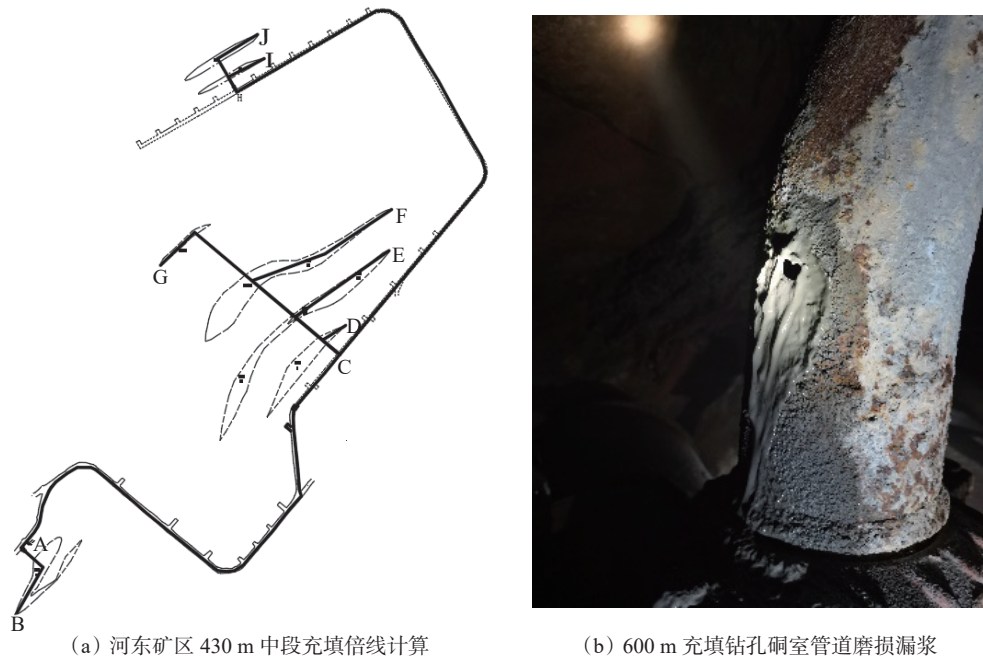


图2 充填倍线计算和管道磨损

Fig. 2 Stowing gradient calculation and worn pipe

表1 河东矿区430 m中段充填倍线计算

Table 1 Calculation of filling doubling line in the 430 m middle section of Hedong Mining Area

点位	高差 H/m	水平距离 L/m	充填倍线 N
A	470	213	1.45
B	470	299	1.64
C	470	712	2.51
D	470	757	2.61
E	470	869	3.85
F	470	959	3.04
G	470	927	2.97

的流变特性进行测试。测试采用 CSR 模式(控制剪切速率),在常温下使浆叶式转子在 $0 \sim 120 \text{ s}^{-1}$ 的剪切速率下对试样进行剪切。按照充填骨料中机制砂占比 20%,灰砂比 1:4,分别配置质量浓度为 74%、76% 和 78% 的充填料浆,开展流变参数测试。将膏体充填料浆视为宾汉姆体,采用 Buckingham 塑性体模型对试验数据进行拟合计算得到充填料浆的屈服应力和黏度系数,结果见表 3。

2.3 充填料浆管输比摩阻计算

管输比摩阻是指充填料浆在管道内输送单位长度的摩擦阻力,是分析管道输送的核心问题。通常

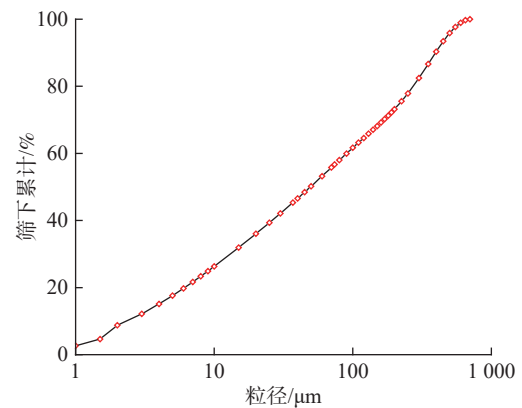


图3 全尾砂的颗粒粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of unclassified tailings

采用理论计算、试验测试(环管试验、L管试验等)和数值模拟分析等确定。本文采用理论计算确定膏体充填料浆管输比摩阻,通过计算充填料浆在管道内输送的雷诺数,判定其流态,然后根据充填料浆的流态选择阻力计算模型。通常将膏体充填料浆在管道内流动视为层流运动,由 Buckingham 公式推算,可得到膏体料浆的比摩阻计算公式^[21-23]。充填料浆管道输送雷诺数及比摩阻计算见式(1)和式(2)。

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta} \quad (1)$$

表2 机制砂的粒径分布

Table 2 Particle size distribution of manufactured sand

粒径/mm	>10	4~10	2~4	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.125~0.25	0.074~0.125	<0.074
占比/%	0.4	30.8	15.0	14.8	9.2	9.1	5.4	9.5	5.7

表 3 不同质量浓度充填料浆的流变参数

Table 3 Rheological parameters of filling slurry with different mass concentrations

序号	质量浓度 /%	密度 / (kg/m ³)	初始屈服应力 τ_0 / Pa	黏度系数 η / (Pa·s)
1	74	1 889	49.25	0.160 0
2	76	1 936	115.65	0.124 8
3	78	1 984	196.24	0.243 7

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

式中: Re 为雷诺数, 无量纲; ρ 为充填料浆的密度, kg/m³; v 为浆体的流速, m/s; D 为管道内径, m; η 为黏度系数, Pa·s; i 为充填料浆比摩阻, Pa/m; τ_0 为料浆的初始屈服应力, Pa。

根据式(1)和式(2), 结合表 3 流变参数, 计算不同充填流量和充填管径下, 充填料浆管道输送雷诺数和比摩阻, 计算结果见表 4。

表 4 不同充填流量和管径下雷诺数及比摩阻计算结果
Table 4 Results of Reynolds number and specific frictional resistance under different filling quantity and pipe diameter

序号	质量浓度 /%	流量 / (m ³ /h)	管径 / m	雷诺数	流态	比摩阻 / (Pa/s)
1	74	50	0.13	1 606.00	层流	2 337.40
2		60		1 927.20	层流	2 400.80
3		80	2 569.60	过渡流	2 527.61	
4		50	1 391.87	层流	1 929.85	
5		60	1 670.24	层流	1 965.62	
6		80	2 226.99	过渡流	2 037.16	
7	76	50	0.15	2 110.21	过渡流	4 991.88
8		60		2 532.25	过渡流	5 041.34
9		80	3 376.33	过渡流	5 140.24	
10		50	1 828.85	层流	4 251.50	
11		60	2 194.62	过渡流	4 279.40	
12		80	2 926.15	过渡流	4 335.20	
13	78	50	0.13	1 107.44	层流	8 533.72
14		60		1 328.93	层流	8 630.29
15		80	1 771.90	层流	8 823.43	
16		50	959.78	层流	7 249.83	
17		60	1 151.74	层流	7 304.31	
18		80	1 535.65	层流	7 413.27	

注: 毛坪铅锌矿充填流量为 60 m³/h, 充填管道内径为 0.13 m。

由表 4 可知, 比摩阻与充填流量、料浆质量浓度呈正相关, 与管径呈负相关。

2.4 垂直钻孔料浆高度计算模型

充填料浆从地表钻孔输送至井下充填采场可简化为“L”型管道输送, 如图 4 所示。

假设钻孔底的相对标高为 0 m, 地表至钻孔的高差为 H_0 , 钻孔内料浆液面为截面 A , 高度为 H , 截面 B

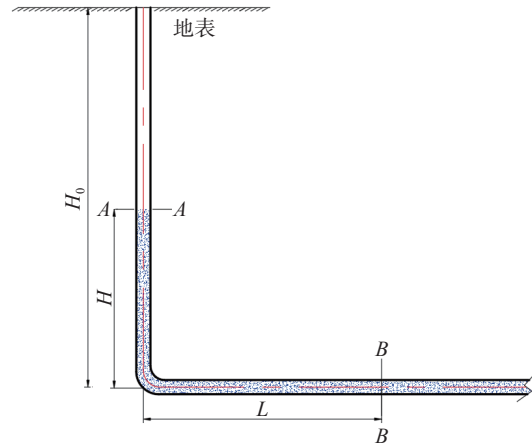


图 4 充填料浆管道输送

Fig. 4 Filling slurry pipeline conveying

距离钻孔的水平长度为 L , 则伯努利方程见式(3)。

$$\rho g H + P_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 = P_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 + \Delta P \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度, m/s²; H 为钻孔内料浆高度, m; P_A 为截面 A 静态压力, Pa; v_A 为截面 A 料浆速度, m/s; P_B 为截面 B 静态压力, Pa; v_B 为截面 B 料浆速度, m/s; ΔP 为截面 A 和截面 B 间的压力损失, Pa。其他同上。

截面 A 和截面 B 间的压力损失包括沿程压力损失和局部压力损失, 计算见式(4)。

$$\Delta P = h_m + h_f = i(H + L) + \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中: h_m 为沿程压力损失, Pa; h_f 为局部压力损失, Pa; L 为截面 B 距离钻孔的水平距离, m; ζ 为局部压力损失系数, 无量纲。其他同上。

若在截面 B 安装压力变送器监测该处压力, 测得值记为 P 。充填过程中, 充填料浆在管道内处于一个动态平衡的状态, 则充填料浆在截面 A 处可视为静止状态, 即压力可视为 0。管道输送局部阻力损失与充填管道的布置形式和弯头数量有关, 弯头越多其值越大。假设局部阻力损失为沿程阻力损失的 0.1 倍, 则由式(3)可推导出垂直钻孔内料浆高度的计算公式(忽略动压的影响), 见式(5)

$$H = \frac{P + 1.1iL}{\rho g - 1.1i} \quad (5)$$

以垂直钻孔内料浆高度 H 为因变量, 比摩阻 i 为自变量, 假设 P 、 L 、 ρ 不变, 对式(5)求导可知, H 与比摩阻 i 成正比, 即比摩阻 i 越大, 垂直钻孔内料浆高度 H 越大, 满管率越高。

3 结果分析

3.1 监测装置安装

通过分析毛坪铅锌矿河东矿区充填管网, 选择在 610 m 中段充填联巷内管道安装压力监测装置, 安

装2台压力计,第一台压力计P1距离钻孔100 m,第二台压力计P2与第一台压力计P1的间距为50 m,

数据采集仪安装在两台压力变送器的中间位置。压力监测装置布设如图5所示。

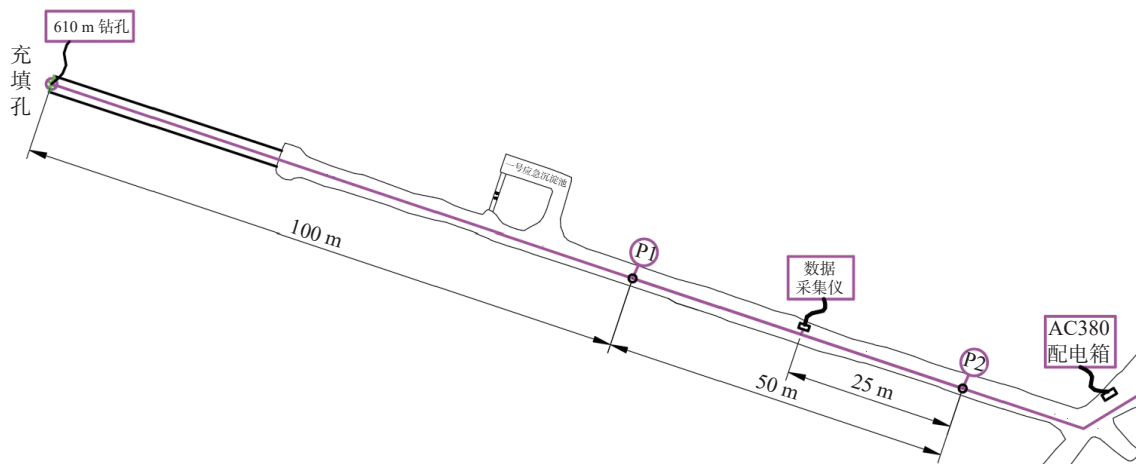


图5 压力监测装置布设

Fig. 5 Layout of pressure monitoring devices

3.2 监测结果分析

图6(a)~图6(c)为8月12日至8月27日不同采场充填时,第二台压力计P2的监测数据记录。通过进行1 s/次数据采集,8月12日430 m中段I-8矿体1分层3[#]进路采场充填时压力监测点P2最大值为359.9 kPa;8月15日430 m中段I-8矿体17分层4[#]进路采场充填时压力监测点P2最大值为228.9 kPa;8月27日442 m分段I-8矿体17分层6[#]进路采场充填时压力监测点P2最大值为379.3 kPa。图6(d)显示9月4日490 m中段I-6矿体6分层1[#]进路采场充填时的压力监测点P2最大值为894.6 kPa,P1最大值为1 164.2 kPa。

根据矿山充填台账,以上充填均为进路采场假底层充填。按照充填流量60 m³/h,充填料浆配比为灰砂比1:4,充填浓度76%,由表4可知,比摩阻*i*为5 041.34 Pa。同时根据9月4日490 m中段I-6矿体6分层1[#]进路采场充填时的压力监测点P1和压力监测点P2监测数据,计算得到比摩阻为5 392 Pa/m,表明采用式(2)计算膏体充填料浆比摩阻比较合理。

按照压力监测实测比摩阻为5 392 Pa/m,依据压力计P2监测数据,采用式(5)计算得到8月12日至9月4日期间充填不同采场假底层钻孔料浆高度,结果见表5,满管率为钻孔内料浆计算料位与钻孔垂深之比。

由表5可知,充填料浆钻孔内料浆的料位不仅受比摩阻*i*的影响,也与充填倍线相关,充填倍线越大钻孔内料浆料位越高。

由此可知,为提高充填过程中的满管率,可从以

下三方面进行改进:①通过改变管线布置,提高充填倍线;②通过提高充填流量和充填料浆的质量浓度及缩小管径提高比摩阻;③提高充填输送的局部阻力损失,如增加弯头和变径。

充填管道输送的理想状态为满管输送,假设局部阻力损失为沿程阻力损失的*K*倍,则根据式(3)和式(4)可得出充填管道输送最大比摩阻*i*_{max}(忽略动压的影响),其计算公式见式(6)。

$$i_{\max} = \frac{\rho g H_0}{(1+K) \cdot (H_0 + L)} = \frac{\rho g}{(1+K) \cdot N_0} \quad (6)$$

由式(6)可知,充填管道输送最大比摩阻*i*_{max}与充填料浆的密度成正比,与系数*K*和满管时充填倍线*N*₀呈反比。因此,在提高充填满管率时,充填料浆的比摩阻不应超过最大比摩阻*i*_{max},否则将引起堵管故障。

充填管道输送最大比摩阻*i*_{max}随充填采场管线的变化而变化,以430 m中段I-8号矿体1分层3[#]进路为例,充填料浆配比为灰砂比1:4,充填浓度76%,系数*K*取值0.1,则计算得到该采场充填管道输送最大比摩阻*i*_{max}为9 852.59 Pa/m。根据表4计算结果,比摩阻若要达到9 852.59 Pa/m,在充填流量、管径不变条件下其充填浓度需大于78%,基本失去流动性。因此,为提高充填满管率,在保证充填料浆流动性的条件下可适当提高比摩阻,应主要通过提高系数*K*,如设置增阻装置等来提高满管率。

4 结论

1)比摩阻与充填流量和料浆质量浓度(屈服应力)呈正相关,与管径呈负相关。通过对管道压力监

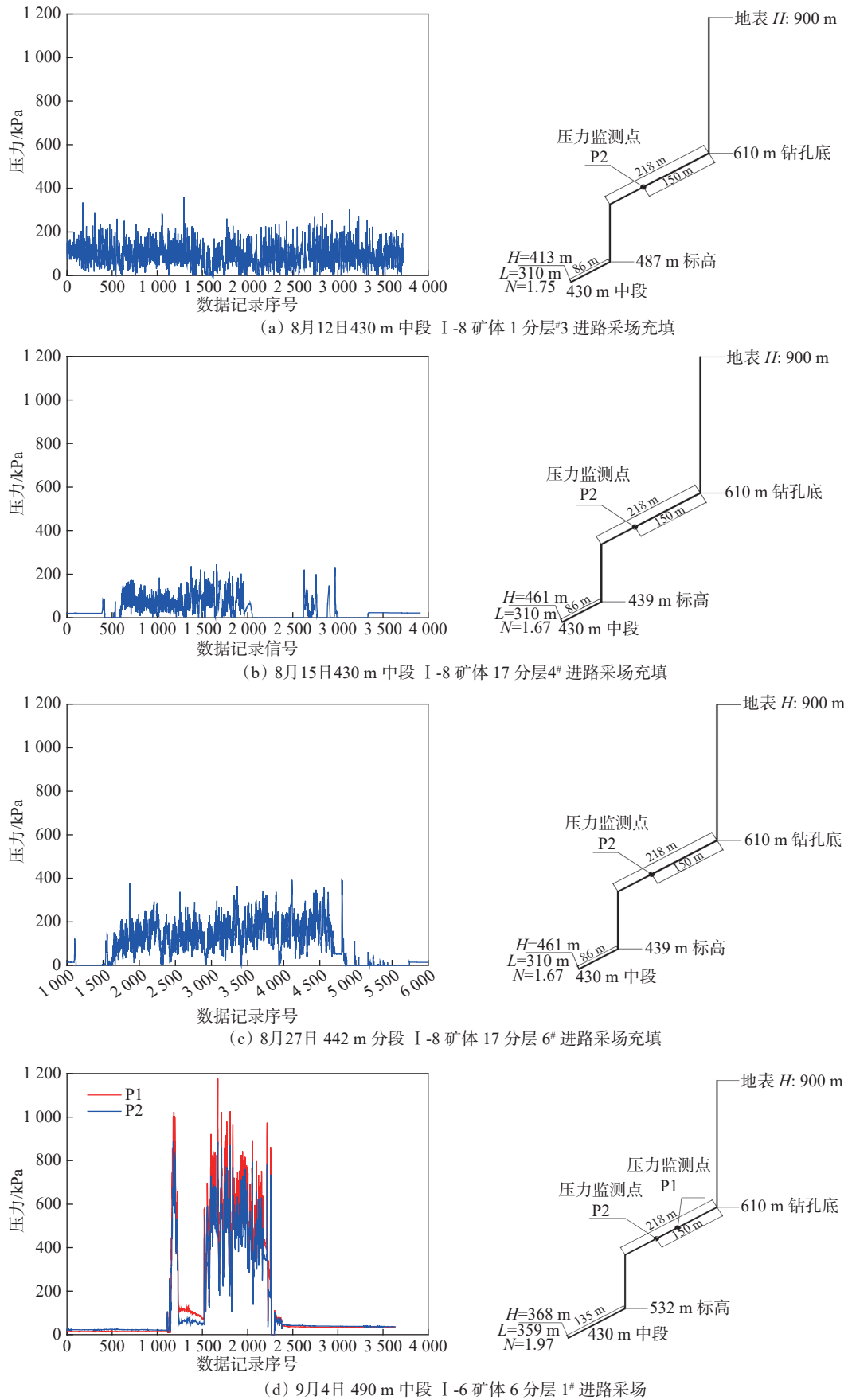


图 6 管道压力监测数据记录

Fig. 6 Data records of pipeline pressure monitoring devices

表 5 垂直钻孔料位及满管率计算结果

Table 5 Results of material level inside drilling hole and full pipe rate

序号	充填空区	地表至 610 m 钻孔垂深/m	充填倍线	计算料位/m	满管率/%
1	430 m 中段 I -8 号矿体 1 分层 3'进路	290	1.75	93.09	32.10
2	430 m 中段 I -8 号矿体 17 分段 4'进路	290	1.67	83.04	28.63
3	442 m 中段 I -8 号矿体 17 分段 6'进路	290	1.67	94.57	32.61
4	490 m 中段 I -6 号矿体 6 分层 1'进路	290	1.97	134.09	46.24

测数据分析,结果表明利用 Buckingham 公式得到的比摩阻计算公式具有较高的准确性。

2)利用伯努利能量守恒方程,推导出垂直钻孔内充填料浆高度的计算公式,表明钻孔满管率与比摩阻成正比,同时受充填倍线的影响,充填倍线越大,满管率越高。

3)压力监测结果表明,当充填流量为 60 m³/h,充填料浆配比为灰砂比 1:4,充填浓度 76%时,充填料浆的比摩阻为 5 392 Pa/m。当充填倍线为 2 以下时,充填中钻孔内料浆满管率低于 50%。

4)为提高充填满管率,可通过优化管路布置提高充填倍线、提高充填流量和料浆质量浓度及缩小管径提高比摩阻,以及增加局部损失等措施。

参考文献(References):

- [1] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华.金属矿深部开采现状与发展战略[J].工程科学学报,2019,41(4):417-426.
CAI Meifeng, XUE Dinglong, REN Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.
- [2] 李夕兵,周健,王少锋,等.深部固体资源开采评述与探索[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1236-1262.
LI Xibing, ZHOU Jian, WANG Shaofeng, et al. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(6): 1236-1262.
- [3] 杨小聪,郭利杰.尾矿和废石综合利用技术[M].北京:化学工业出版社,2018.
- [4] 彭啸鹏,郭利杰,杨小聪,等.尾砂胶结充填体孔隙水特征探索试验研究[J].中国矿业,2022,31(3):106-110.
PENG Xiaopeng, GUO Lijie, YANG Xiaocong, et al. Experimental study on pore water characteristics of tailings cemented backfill[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(3): 106-110.
- [5] 陈鑫政,杨小聪,郭利杰,等.基于扩散度的尾砂膏体流变特性[J].工程科学学报,2020,42(10):1299-1307.
CHEN Xinzheng, YANG Xiaocong, GUO Lijie, et al. Rheological properties of tailings paste based on a spread test[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(10): 1299-1307.
- [6] 方林,翟会超,孙长坤,等.基于扩散度试验的减水剂对超细全尾砂充填料浆流动性影响研究[J].中国矿业,2023,32(6):146-151.
FANG Lin, ZHAI Huichao, SUN Changkun, et al. Study on the effect of plasticizer agent on the fluidity of super fine full tailings filling slurry based on diffusivity test[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(6): 146-151.
- [7] 刘浪,方治余,张波,等.矿山充填技术的演进历程与基本类别[J].金属矿山,2021(3):1-10.
LIU Lang, FANG Zhiyu, ZHANG Bo, et al. Development history and basic categories of mine backfill technology[J]. Metal Mine, 2021(3): 1-10.
- [8] 于润沧.金属矿山胶结充填理论与工程实践[M].北京:冶金工业出版社,2020.
- [9] 张钦礼,郑晶晶,王新民,等.充填管道磨损形式及机理分析研究[J].金属矿山,2009(5):115-118.
ZHANG Qinli, ZHENG Jingjing, WANG Xinmin, et al. A study of the abrasion form and mechanism of backfilling pipelines[J]. Metal Mine, 2009(5): 115-118.
- [10] 王贤来,郑晶晶,张钦礼,等.充填钻孔内管道磨损的影响因素及保护措施[J].矿冶工程,2009,29(5):9-12.
WANG Xianlai, ZHENG Jingjing, ZHANG Qinli, et al. Influencing factors on the abrasion of pipelines in backfill drilling and protective measures[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2009, 29(5): 9-12.
- [11] 王小林.掺粗骨料高浓度充填自流输送平直管道磨损规律[D].北京:北京科技大学,2023.
- [12] 王文才,吴周康,高小雷,等.充填堵管事故及气压通管技术分析与应用[J].矿冶,2023,32(1):1-5.
WANG Wencai, WU Zhoukang, GAO Xiaolei, et al. Analysis and application of filling and plugging accident and pneumatic pipe technology[J]. Mining and Metallurgy, 2023, 32(1): 1-5.
- [13] 张宗国,史秀志,吝学飞.基于CFD的充填管网参数优化及输送特性[J].中国有色金属学报,2019,29(10):2411-2420.
ZHANG Zongguo, SHI Xiuzhi, LIN Xuefei, et al. Parameter optimization and transportation characteristics of backfilling pipe network based on CFD[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(10): 2411-2420.
- [14] 杨凯,黎梦圆.基于CFD-DEM耦合方法的矽石-粉煤灰充填料浆在垂直弯管中的磨损研究[J].煤矿安全,2023,54(12):116-122.
YANG Kai, LI Mengyuan. Research on wear of gangue-fly ash filling slurry in vertical bending pipe based on CFD-DEM coupling method[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(12): 116-122.
- [15] 石宏伟,黄吉荣,乔登攀,等.深井矿山高浓度充填料浆自流输送管道磨损研究[J].有色金属(矿山部分),2020,72(4):13-18.
SHI Hongwei, HUANG Jirong, QIAO Dengpan, et al. Study on the abrasion of high concentration filling slurry self-flowing pipeline in

- deep mine[J]. *Nonferrous Metals(Mining Section)*, 2020, 72(4): 13-18.
- [16] 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[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 255: 119371.
- [17] 李振龙, 张钦礼, 马先鋒, 等. 基于 SCADA 的充填管道远程监控技术及其应用[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(11): 183-187.
LI Zhenlong, ZHANG Qinli, MA Xianfeng, et al. Remote monitoring technology of filling pipeline based on SCADA system and its application[J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(11): 183-187.
- [18] 王湃, 刘卓, 加波, 等. 基于 ERT 技术的矿山充填管道堵塞三维可视化检测方法[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(6): 2465-2474.
WANG Pai, LIU Zhuo, JIA Bo, et al. 3D visual detection method of mine filling pipeline blockage based on ERT technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(6): 2465-2474.
- [19] 黎梦圆, 李航空, 郭利杰, 等. 基于超细磷尾砂的絮凝沉降特性及其胶结膏体充填材料性能研究[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2024, 76(5): 28-39.
LI Mengyuan, LI Hangkong, GUO Lijie, et al. Study on flocculation sedimentation characteristics and cemented paste backfill materials properties based on ultrafine phosphorus tailings[J]. *Nonferrous Metals(Mining Section)*, 2024, 76(5): 28-39.
- [20] 周英烈. 混合尾砂膏体充填料浆搅拌特性工业试验[J]. *有色金属(矿山部分)*, 2024, 76(1): 68-76.
ZHOU Yinglie. Industrial experimental on the mixing characteristics of mixed tailings paste filling slurry[J]. *Nonferrous Metals(Mining Section)*, 2024, 76(1): 68-76.
- [21] 万串串, 许文远, 史采星, 等. 高浓度全尾砂浆大垂高长距离管道输送阻力计算与工程实践[J]. *中国矿业*, 2023, 32(10): 153-158.
WAN Chuanchuan, XU Wenyuan, SHI Caixing, et al. Resistance calculation and engineering practice of high concentration unclassified tailings slurry transportation in long distance pipeline with large vertical height[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(10): 153-158.
- [22] 王旭, 苏秀珠, 沈青峰. 武里蒂卡金矿高浓度充填料输送性能试验研究[J]. *中国矿业*, 2022, 31(7): 143-146.
WANG Xu, SU Xiuzhu, SHEN Qingfeng. Experimental study on transportation performance of high-concentration filling materials in Buritica Gold Mine[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(7): 143-146.
- [23] 陈寅, 郭利杰, 邵亚平, 等. 粗骨料膏体充填料浆流变特性与管道输送阻力计算[J]. *中国矿业*, 2018, 27(12): 178-182.
CHEN Yin, GUO Lijie, SHAO Yaping, et al. Rheological properties of coarse aggregate paste slurry and calculation of resistance in pipeline transportation[J]. *China Mining Magazine*, 2018, 27(12): 178-182.