

自流充填管道局部变径满管输送的环管试验^①

刘伟涛, 王莹莹, 杨莹, 王国立, 董立波

(北京金诚信矿山技术研究院有限公司, 北京 101500)

摘要: 为研究变径管管径、长度和安装位置对料浆自流输送满管率的影响规律, 自主设计研发了一套小型变径环管试验装置, 测试不同变径管条件下料浆自流输送的水力坡度及满管率, 并利用皮尔森相关分析法探究各因素对满管率的影响程度。结果表明, 满管率与变径管管径存在极显著负相关关系, 随着管径减小呈指数型增长, 管径小于 50 mm 时满管率急剧增长; 满管率与变径管长度存在显著正相关关系, 随着长度增加呈线性增长; 变径管在水平管段安装位置的变化对满管率影响很小, 可忽略。

关键词: 管道输送; 充填管道; 自流输送; 满管率; 变径管; 环管试验

中图分类号: TD853

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.005

文章编号: 0253-6099(2023)06-0020-04

Loop Pipe Test on Transportation with Full Pipe Flow in a Tapered Pipeline with Gravity-Fed Backfill

LIU Weitao, WANG Yingying, YANG Ying, WANG Guoli, DONG Libo

(Beijing JCHX Mine Technology Research Institute Co Ltd, Beijing 101500, China)

Abstract: In order to study the influences of diameter, length and installation position of tapered pipeline on the ratio of full pipe flow in gravity-fed pipeline transport of backfill slurry, a small-scale loop pipe test was carried out by using independently developed tapered pipeline. The hydraulic slope and ratio of full pipe flow were tested for gravity-fed transport of slurry via tapered pipeline, and Pearson correlation analysis was also conducted to explore the influence of various factors on the ratio of full pipe flow. The results show that the ratio of full pipe flow significantly presents a negative correlation to the diameter of tapered pipeline, which increases exponentially with the reduction in the diameter of tapered pipeline. The ratio of full pipe flow increases sharply for a pipe with diameter less than 50 mm. Furthermore, the ratio of full pipe flow presents a positive correlation to the length of tapered pipeline, which increases linearly with the increased length of tapered pipeline. However, the installation position of tapered pipeline in horizontal section of pipe has little effect on the ratio of full pipe flow, which can be negligible.

Key words: pipeline transportation; backfill pipe; gravity-fed transport; ratio of full pipe flow; tapered pipeline; loop pipe test

管道自流输送具有工艺简单、输送成本低的优势, 是矿山充填的首选方式^[1]。工程应用表明, 自流非满管输送时充填料浆自由下落会导致垂直管道中上部易被磨穿而破漏, 而满管流输送可以大大降低料浆对管道的冲击磨损^[2-3]。采用变径管输送是获得满管流的有效方式之一^[4-6], 目前在实验室研究变径满管流的报道很少。本文自主设计研发了一套小型变径环管试验装置, 研究变径管管径、长度、安装位置等因素对充填

竖管满管率的影响, 研究结果可为充填料浆自流输送管网设计及优化提供理论支撑。

1 满管流输送理论

充填输送系统实现自流的条件是系统高差提供的势能可以克服管道输送阻力^[7]。当料浆重力势能过剩时, 剩余势能会转化为动能, 料浆加速流动, 在垂直管道上部形成自由下落区域, 系统处于非满管流动状

① 收稿日期: 2023-06-25

基金项目: 中国博士后科学基金(2021M701516)

作者简介: 刘伟涛(1992—), 男, 河南濮阳人, 硕士, 工程师, 主要从事矿山充填试验研究工作。

通信作者: 王莹莹(1982—), 男, 河北衡水人, 博士, 高级工程师, 从事金属矿山充填技术研究。

态,如图1所示。在自由降落段内,料浆在重力作用下加速下落,高速流动的砂浆对管壁冲刷形成沟壑式磨损,特别是在空气与料浆交界面处发生碰撞产生巨大的冲击力,可导致管道破裂。进入满管流段后料浆保持匀速稳定流动,管道磨损率较低^[8-9]。因此,提高系统满管率是降低管道磨损的有效途径。

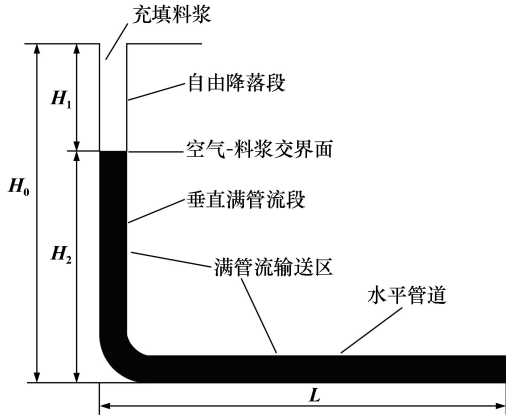


图1 充填料浆自流输送系统

图1中垂直管道高度为 H_0 ,自由降落段高度为 H_1 ,垂直满管流段高度为 H_2 ,水平管道长度为 L ,设料浆密度为 ρ ,料浆水力坡度为 i_m ,重力加速度为 g ,由能量守恒定律可知:

$$\rho g H_2 = i_m (H_2 + L) \quad (1)$$

采用满管率 φ 对系统满管状态进行定量描述:

$$\varphi = \frac{H_2}{H_0} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)中,可得自流输送系统的满管率计算公式为:

$$\varphi = \frac{i_m L}{\rho g - i_m H_0} \quad (3)$$

由式(3)可知,满管率大小取决于料浆密度、水力坡度以及垂直和水平管道长度。对于矿山充填系统,垂直管道长度由开采深度决定,水平管道长度由采场位置决定,两者均不易改变,料浆密度受充填配比参数限制,变化程度有限,因此,增加料浆水力坡度是提高满管率的实用手段^[10]。研究表明,料浆水力坡度随着管径减小而显著增加^[11],考虑到水平管道更换相对容易,在系统水平管段采取局部变径措施来消耗垂直管段过剩势能是提高系统满管率的有效途径。

2 变径环管试验

2.1 试验材料

变径环管试验材料由某铅锌矿全尾砂和42.5普通硅酸盐水泥组成,全尾砂粒度分布曲线见图2。

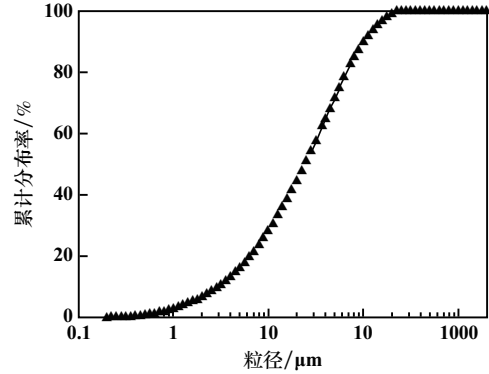


图2 全尾砂粒度分布曲线

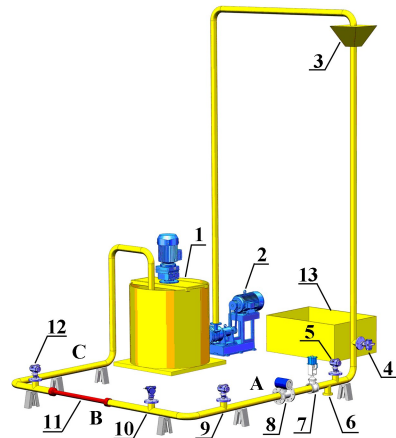
全尾砂基本物理参数测试结果见表1。级配参数满足“不均匀系数大于5且曲率系数在1~3之间”的条件,全尾砂级配良好。 $-74 \mu\text{m}$ 颗粒累计占比低于80%,属于细级级尾砂^[12], $-20 \mu\text{m}$ 超细颗粒占比较大,有利于保持充填料浆的稳定性,适宜作为环管试验材料。

表1 全尾砂基本物理参数

密度/ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)		不均匀 系数	曲率 系数	级配含量/%	
	密实	松散			$-20 \mu\text{m}$	$-74 \mu\text{m}$
2.879	1.597	1.345	11.04	1.14	45.5	78.6

2.2 试验装置

自主设计研发并搭建了一套小型变径环管试验装置,如图3所示,它主要由搅拌桶、变频渣浆泵(流量 $60 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程15 m)、压力表、电磁流量计、气动闸阀、计量槽和内径100 mm的钢制管道组成,其中垂直管段高度7 m,A、B、C水平管段长度均为3 m,水平管道末端有1 m 竖直管,供充填料浆回流入搅拌桶实现循



1—搅拌桶; 2—渣浆泵; 3—自流料斗; 4—1号压力表; 5—2号压力表; 6—卸料口; 7—气动闸阀; 8—电磁流量计; 9—3号压力表; 10—4号压力表; 11—变径管; 12—5号压力表; 13—计量槽

图3 小型变径环管试验装置

环流动。试验装置模拟自流输送的充填倍线为3,满足矿山自流输送对充填倍线的要求^[13]。

该试验装置中,在垂直管道的顶端布置有正四棱锥状料斗,与渣浆泵出口管段形成开路连接,符合矿山充填系统中搅拌设备下料口与钻孔口之间常见的断开式连接^[14],能有效模拟自流输送的供料环节。在气动闸阀前方10 cm处的水平管道底部开有卸料口,闸阀关闭后,可通过该卸料口将自流垂直管道中的料浆放出到计量槽中,测量料浆体积。

2.3 试验设计

分别在试验装置的A、B、C水平管段的中间部位安装变径管,记录不同位置压力表数据,测量卸料口流出的料浆体积,研究变径管的安装位置对满管率的影响;通过在B水平管段中间部位安装不同管径及长度的变径管,研究变径管管径和长度对满管率的影响。变径管尺寸和安装位置见表2。

表2 变径管的尺寸和安装位置

安装位置	变径管管径/mm	变径管长度/m
A	30	1.5
B	30,40,50	1.0,1.5,2.0
C	30	1.5

试验中用到的变径管如图4所示。变径管两端通过快速沟槽卡箍与水平管道连接。

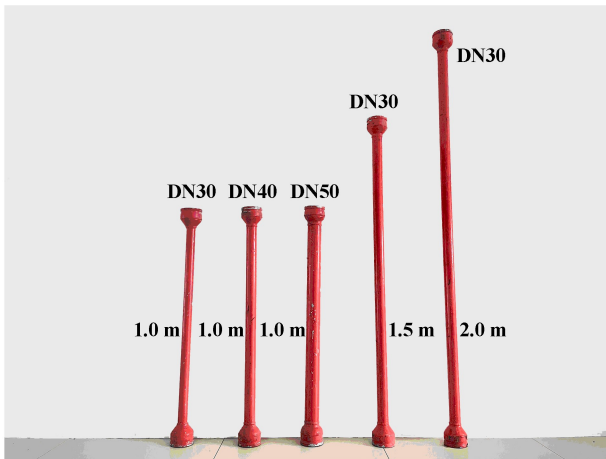


图4 不同尺寸变径管

2.4 试验步骤

2.4.1 料浆制备

高浓度胶结充填料浆以其不离析、采场脱水量少、充填质量好等诸多优点,被矿山自流充填广泛采用^[15]。本次试验采用全尾砂、水泥和水搅拌制备质量浓度70%的高浓度料浆,灰砂比1:8,测得料浆屈服应力为

73 Pa、塌落度为26.4 cm,流动性满足管道输送要求。

2.4.2 数据采集

料浆搅拌均匀后开启渣浆泵,调整系统流量稳定在48 m³/h左右(料浆流速1.7 m/s),待系统运行平稳后,快速关闭气动阀门,打开卸料口,将料浆放入计量槽中,体积测量结束后将料浆倒入搅拌桶内开展下一组测试。压力表可以监测管道不同位置的压强,由相邻压力表数据的差值除以其间隔距离可得到料浆管输水力坡度*i_m*。共计开展8组试验,测试结果见表3。

表3 变径环管试验测试结果

试验序号	变径管位置	变径管管径/mm	变径管长度/m	料浆体积/L	压力/Pa	
					变径管前端	变径管后端
1	B	30	1.0	32.8	47 143	35 114
2	B	40	1.0	28.5	42 992	34 363
3	B	50	1.0	21.3	41 542	34 813
4	B	100	1.0	15.5	36 703	34 174
5	B	30	1.5	35.7	53 407	36 008
6	B	30	2.0	39.5	58 151	33 452
7	A	30	1.5	33.9	64 193	45 461
8	C	30	1.5	33.5	46 724	28 926

2.4.3 数据分析

根据计量槽测出的料浆体积计算满管率,然后绘制变径管的不同管径、长度和安装位置与料浆自流输送满管率及变径管段水力坡度的关系曲线。

$$\varphi = \frac{V_m}{V_h} \quad (4)$$

式中 V_m 为计量槽测得的料浆体积,L; V_h 为试验装置的自流垂直管段体积,取45 L。

3 满管率的影响因素分析

3.1 变径管管径对满管率的影响

变径管安装在B水平管段中间部位、长度为1 m时,料浆自流输送满管率及水力坡度与变径管管径的关系曲线如图5所示,满管率和水力坡度受管径的影响极为显著,均随着管径减小呈指数型增长趋势,在较粗管径下满管率和水力坡度增长缓慢,当管径小于一定尺寸时急剧增长。采用管径50 mm的局部变径管时,满管率由34.4%增长至47.3%;管径由50 mm缩小至30 mm时,满管率快速增长至72.9%。这是因为在流量相同的情况下,流速与管径的平方成反比,小管径管道内的料浆流速高于大管径,且料浆与小管径内壁的接触面积大于大管径,变径管段的水力坡度随着管径减小而急剧增大,迫使充填竖管中料浆液位升高来补充势能,满管率随之增加。

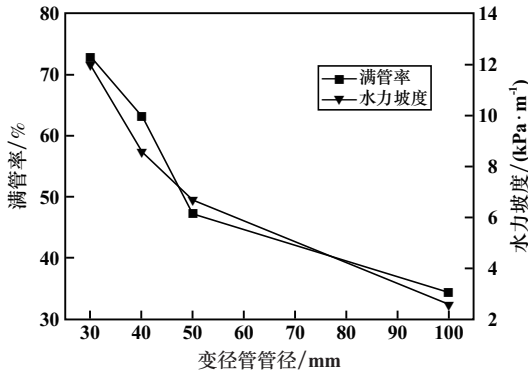


图 5 变径管管径对满管率及水力坡度的影响

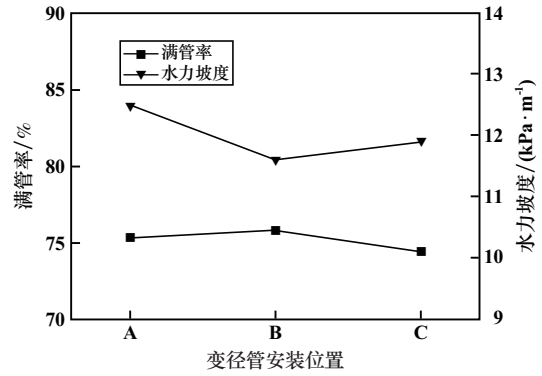


图 7 变径管安装位置对满管率及水力坡度的影响

3.2 变径管长度对满管率的影响

变径管安装在 B 水平管段中间部位、管径为 30 mm 时,料浆自流输送满管率及水力坡度与变径管长度的关系曲线见图 6。随着变径管长度增加,满管率呈线性增长,而水力坡度在 12 kPa/m 附近小范围波动,考虑到测量误差,可以认为水力坡度保持不变。变径管长度由 1.0 m 增长至 2.0 m 时,其占装置水平管道的长度比例由 11% 上升至 22%,满管率达到了 87.8%。由此可见,在矿山实际应用中,可以通过改变局部变径管长度方便地调节满管率。

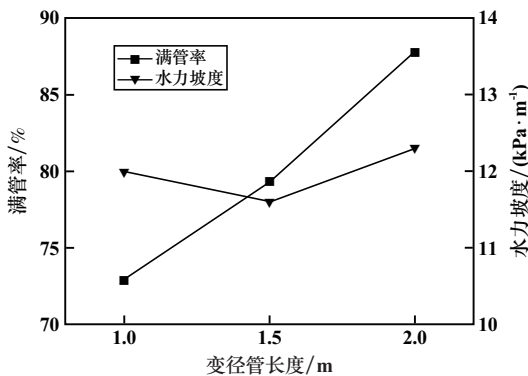


图 6 变径管长度对满管率及水力坡度的影响

3.3 变径管安装位置对满管率的影响

变径管管径为 30 mm、长度为 1.5 m 时,料浆自流输送满管率及水力坡度与变径管安装位置的关系曲线如图 7 所示。以安装位置 A 为基准,变径管安装位置更换到 B 处和 C 处时,满管率变化值分别为 0.4% 和 -0.9%,水力坡度在 12 kPa/m 附近小范围波动,表明变径管在水平管道的安装位置变化对满管率及水力坡度影响很小,可忽略。建议矿山充填管网中的变径管安置于容易更换的地方。

3.4 相关性分析

通过皮尔森相关分析法探究变径管管径、长度和安装位置与料浆自流输送满管率之间的相关性,将

8 组试验数据导入 SPSS 分析软件,计算结果见表 4,其中 ** 表示 $\text{Sig} < 0.01$,为极显著相关性; * 表示 $0.01 < \text{Sig} < 0.05$,为显著相关性。相关系数的绝对值越接近 1,相关性越强,相关系数越接近于 0,相关性越弱^[16]。

表 4 相关性分析结果

相关性分析	变径管安装位置	变径管管径	变径管长度
皮尔森相关系数	-0.014	-0.892 **	0.761 *
显著性检验 Sig	0.974	0.003	0.028

由表 4 可以得出,变径管管径与满管率呈极显著负相关关系,变径管长度与满管率呈显著正相关关系,变径管安装位置与满管率缺乏相关性。可见,变径管管径和长度是影响满管率的主要因素,该结论可为充填管网设计提供依据。

4 结 论

1) 变径管管径和长度是影响充填系统满管率的主要因素。其中,满管率与变径管管径存在极显著负相关关系,随着管径减小呈指数型增长趋势,管径小于 50 mm 时满管率急剧增长;满管率与变径管长度存在显著正相关关系,随着长度增加呈线性增长,变径管管径为 30 mm、长度为 2 m 时,满管率可达 87.8%。在充填料浆自流输送管网设计中,可通过改变局部变径管管径和长度达到调节满管率的目的。

2) 变径管在水平管道的安装位置变化对满管率影响很小,可忽略,建议变径管安装在充填管网中容易更换的位置。

3) 本次小型变径环管试验测试结果符合工程实际,可为矿山充填管网设计以及工程应用提供可靠的技术支持,对降低自流输送管道磨损具有非常重要的工程意义。

打垂直上向平行孔,切割槽区域钻孔直径 64~89 mm。中央掏槽区九孔区域孔网参数 0.3 m×0.3 m。外面炮孔环形布置,第一圈半径 0.45 m,炮孔分为直径 89 mm 和 76 mm 间隔布置。结果表明,爆后槽区断面与高度均满足设计要求,证实炮孔布置方式及参数设置合理。

5 结 论

从实际工程爆破出发,针对掏槽爆破,建立了 4 种首圈炮孔布置方式模型,进行爆破仿真计算,选用 RHT 本构模型分析爆破载荷下掏槽爆破效果,得到以下结论:

1) 在高分层中深孔凿岩爆破参数优化中,利用 LS-DYNA 软件对首圈炮孔布置方式进行了爆破仿真模拟,得到最佳方案为方案 1(标号 3、5、7、9 为炮孔,标号 1、2、4、6、8 为空孔)的首圈掏槽炮孔布置方式,该方案形成的槽腔断面最大,掏槽爆破效果最好。

2) 对比分析了各方案的爆破空腔体积、空孔数量、空孔与炮孔位置及大块体积,发现了两个规律:空孔数量越多(即补偿空间越大),掏槽区爆破效果越好;空孔位置的均匀程度(即补偿空间的均匀程度)会影响爆破效果,空孔位置较为均匀有利于在空孔周围形成大范围的拉应力集中区域,从而获得良好的首圈掏槽爆破效果。

参考文献:

[1] 单仁亮,周纪军,黄宝龙,等.巷道掏槽爆破影响因素分析[J].煤炭科学技术,2010,38(2):25-27.

[2] 王智峰.地下开采深孔拉槽爆破掏槽方式优化研究[D].武汉:武汉工程大学,2014.

[3] 刘 恺,李夕兵,李启月,等.直孔掏槽一次成井的改进 TOPSIS-CV 掏槽方式评价模型[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(9):2484-2490.

[4] 霍晓锋,苟永刚,成 涌,等.铜绿山矿中深孔掏槽爆破参数优化研究[J].矿冶工程,2019,39(5):17-21.

[5] 刘优平,黎剑华,林大能,等.掏槽爆破中空孔效应的理论与试验研究[J].矿业研究与开发,2007(5):75-77.

[6] 王忠康,顾晓薇,姚 东,等.超大断面硬岩巷道光面爆破技术研究[J].金属矿山,2017(8):53-57.

[7] 哈努卡耶夫 A H.矿岩爆破物理过程[M].刘殿中译.北京:冶金工业出版社,1980.

[8] YANG Xin, ZENG Xiangguo, PU Chuanjin, et al. Effect of the Pre-existing Fissure with Different Fillings in PMMA on Blast-Induced Crack Propagation[J]. Advances in Materials Science & Engineering, 2018(2):1-17.

[9] Comi C, Perego U. Fracture energy based bi-dissipative damage model for concrete[J]. International Journal of Solids & Structures, 2001,38(36):6427-6454.

[10] 谷亚州,史秀志,霍晓锋,等.地下矿山上向中深孔爆破回采眉线保护技术研究[J].爆破,2022,39(4):62-70.

[11] 陈 震.铜绿山矿井下采场深孔爆破参数优化与安全控制技术数值模拟研究[D].长沙:中南大学,2013.

[12] 王远来,史秀志,王发民,等.地下矿山直眼掏槽爆破参数优化研究[J].矿冶工程,2021,41(5):36-40.

[13] 何 琪,严 鹏,卢文波,等.微差段间重复扰动导致深埋隧洞围岩损伤机制[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1386-1396.

引用本文:谷亚州,史秀志,刘文华,等.上向中深孔掏槽爆破炮孔布置方式优化研究[J].矿冶工程,2023,43(6):24-28.

(上接第 23 页)

参考文献:

[1] 陈小星.膏体充填管道自流输送系统分析[J].有色金属,2002,54(1):88-91.

[2] 丁文智,史秀志,石 勇.基于改进未确知测度的充填管道磨损风险性评价模型[J].矿冶工程,2022,42(1):10-14.

[3] 郭沫川,谭玉叶,楚立申,等.某铁矿管道自流输送分析及管道磨损研究[J].矿冶工程,2022,42(5):39-43.

[4] 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.

[5] 刘晓辉,吴爱祥,王洪江,等.深井矿山充填管输送理论及应用[J].北京科技大学学报,2013,35(9):1113-1118.

[6] 王新民,贺 严,陈秋松.基于 Fluent 的分级尾砂料浆满管输送技术[J].科技导报,2014,32(1):53-58.

[7] 肖云涛,吴爱祥,翟永刚,等.会泽铅锌矿膏体充填钻孔优化研究[J].金属矿山,2011(4):32-35.

[8] 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.

[9] 王新民,潘长甲,徐东升.变径满管流系统垂直管道最大安全高度

的确定[J].矿业研究与开发,2006,26(增刊2):71-74.

[10] 戴兴国,李 岩,张碧肖.深井膏体降压满管输送数值模拟研究[J].黄金科学技术,2016,24(3):70-75.

[11] 王少勇,吴爱祥,尹升华,等.膏体料浆管道输送压力损失的影响因素[J].北京科技大学学报,2015(1):7-12.

[12] 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.

[13] 周 旭,王佩勋.大倍线管道自流输送胶结充填技术[J].金属矿山,2011(8):25-28.

[14] 王洪江,吴爱祥,姚振凯,等.深井充填低压满管输送技术研究[J].矿业研究与开发,2004,24(增刊1):229-233.

[15] 毛明发,王炳文,朱家锐,等.充填料浆自流输送管道磨损机理研究[J].金属矿山,2018(4):178-184.

[16] 米 红,张文章.实用现代统计分析方法与 SPSS 应用[M].北京:当代中国出版社,2000.

引用本文:刘伟涛,王莹莹,杨 莹,等.自流充填管道局部变径满管输送的环管试验[J].矿冶工程,2023,43(6):20-23.