

基于小型环管试验的膏体管道输送阻力特性研究*

刘伟涛, 王莹莹, 王国立

(北京金诚信矿山技术研究院有限公司, 北京 101500)

摘要:为研究膏体管道输送过程中的阻力特性,自主设计研发了一套小型闭路环管试验装置,开展膏体料浆在不同流速、质量浓度和平均粒径等工况条件下的环管试验,并利用灰色关联法分析各因素对管道输送阻力的影响强弱。结果表明,管道输送阻力对膏体质量浓度的变化最为敏感,管道输送阻力随质量浓度增加呈指数增长;膏体流速对管道输送阻力的影响仅次于质量浓度,管道输送阻力随流速增加呈线性增长;膏体平均粒径对管道输送阻力的影响有双重性,随着平均粒径增大,管道输送阻力呈先减小再增大的变化趋势。研究结果可为膏体充填输送系统的合理设计及优化布置提供理论支撑。

关键词:膏体充填;环管试验;管道输送阻力;灰色关联分析

中图分类号:TD853.34 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2023)09-0012-05

0 引言

膏体充填技术以其尾砂利用率高、采场脱水量少、地压控制效果好、充填综合成本低等优点,成为充填采矿的主要发展方向^[1]。管道输送是膏体充填的关键工艺之一,直接影响充填系统的安全和可靠运行。膏体料浆由于物料组成复杂、细颗粒含量大以及输送浓度高等特点,致使其流动特性复杂、管道输送阻力大,管道输送难度较大。因此,研究膏体管道输送的阻力特性,对管道输送参数设计具有重要指导意义^[2]。

国内外研究充填管道输送阻力特性的方法主要有经验公式^[3]、数值模拟^[4-5]和环管试验。其中,环管试验与工程实际贴合度最高,充分考虑了膏体管道输送过程中触变效应和壁面滑移效应的影响^[6],测试结果最为准确。吴爱祥等^[7]基于某铅锌矿充填膏体泵送环管试验数据,分析了物料组成及管径两因素对膏体管道输送阻力特性的影响。杨志强等^[8]

利用金川环管试验系统开展了膏体泵压输送特性研究,探究了流速、质量浓度、混合骨料配比和减阻剂等因素对管道输送阻力的影响。李俊等^[9]利用环管试验研究了流动流速、流动时间、停泵时间等触变性因素对管道输送阻力的影响。

由于环管试验系统建设成本高、调试复杂,且试验费用高、试验工作量大,在很大程度上限制了其发展与应用^[10]。为此,本文自主设计研发了一套小型闭路环管试验装置,克服了工业和半工业环管试验的缺点,具有操作方便、试验用料少和费用低等优点。基于此试验装置,研究膏体料浆的流速、质量浓度和平均粒径等因素对管道输送阻力的影响规律和主次排序,为矿山充填管输参数设计提供可靠的技术支持,确保膏体充填系统安全稳定的运行。

1 环管试验

1.1 试验材料

环管试验所用的主要材料来源于河北某磷矿的全尾砂和粉煤灰,采用激光粒度分析仪测定其粒度分布,见图1。

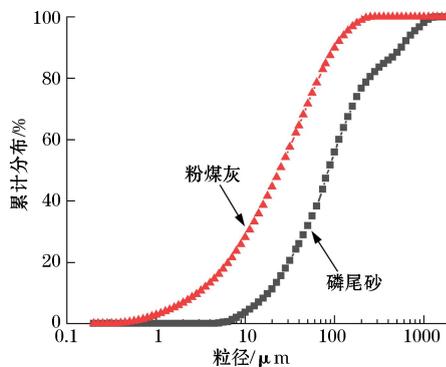


图1 环管试验材料粒度分布曲线

* 收稿日期:2022-12-26

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0602903)。

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及膏体充填工艺等方面的研究工作,E-mail:liuweitaotao@jchxmc.com。

通信作者:王莹莹(1982—),男,河北衡水人,博士,高级工程师,主要从事金属矿山充填技术研究,E-mail:1520330306@qq.com。

两种材料的基本物理参数测试结果见表1。管道输送中以平均粒径(d)来反映固体颗粒的粗细,磷尾砂的加权平均粒径是粉煤灰的6.6倍,颗粒材料的不均匀系数大于5且曲率系数在1~3之间时可认

定为级配良好,由此可见,磷尾砂的粗颗粒含量较高,级配不良;粉煤灰的粒度偏细,级配良好。在粉煤灰中掺入一定量磷尾砂可以调节物料中粗、细颗粒的比例,且磷尾砂和粉煤灰的比重相近,有利于混合均匀。

表1 环管试验材料的基本物理参数

试验材料	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	堆积密度/($t \cdot m^{-3}$)		不均匀 系数	曲率 系数	-20 μm 颗粒含量/%	-74 μm 颗粒含量/%	平均粒径/ μm
		密实	松散					
磷尾砂	2.767	1.392	1.136	7.43	0.64	11.2	43.8	192
粉煤灰	2.713	1.235	0.954	18.81	1.30	44.6	92.2	29

1.2 试验装置

在实验室搭建一套小型闭路环管试验装置(见图2),主要设备包括:0.8 m^3 搅拌桶、60 m^3/h 变频渣浆泵、压力表、电磁流量计、气动闸阀、PLC控制柜和内径为100 mm的钢制管道。该环管试验装置能够使膏体料浆在管道中循环流动,管道总长约为26 m,其中垂直管段高度为7 m,可以保证试验过程中水平测试管段为满管流输送,且为其提供一定静压,与矿山实际充填输送的管网布置形式相似,能够有效地模拟膏体管道输送阻力变化的过程。



1—搅拌桶
2—渣浆泵
3—PLC控制柜
4—1号压力表
5—2号压力表
6—气动闸阀
7—电磁流量计
8—3号压力表
9—4号压力表
10—5号压力表

图2 小型闭路环管试验装置

1.3 试验设计

膏体料浆一般由尾砂、胶凝材料和水搅拌制备,胶凝材料以硅酸盐水泥为主。为研究膏体在不同平均粒径条件下管道输送阻力损失的规律,采用粉煤灰代替水泥制备膏体,从而减少水泥水化反应对充填骨料平均粒径的影响。通过调节粉煤灰和磷尾砂

的质量比可以改变膏体料浆中粗、细颗粒的比例,获得不同平均粒径的充填骨料。

环管试验设计粉煤灰和磷尾砂的质量比为6:4,7:3,8:2和9:1,对应平均粒径为94 μm 、78 μm 、62 μm 和45 μm ,质量浓度为69%~75%(梯度为2%),流速为1.35~2.40 m/s(梯度为0.35 m/s),共计开展20组不同工况条件下的环管试验。其中,改变粉煤灰和磷尾砂的质量比、质量浓度会获得不同充填性能的膏体,其输送性能测试结果见表2,满足膏体性能参数要求,且膏体的坍塌度在21~25 cm之间,流动性满足充填料浆的管道输送要求^[11]。

表2 环管试验膏体料浆流变性能测试结果

质量 浓度/%	粉煤灰和磷 尾砂质量比	平均 粒径/ μm	屈服 应力/Pa	黏度系数/ ($Pa \cdot s$)	坍塌度/ cm
73	6:4	94	97.68	0.22	23.9
73	7:3	78	105.68	0.28	23.0
73	8:2	62	112.70	0.33	22.6
73	9:1	45	124.65	0.39	22.1
69	8:2	62	78.42	0.19	24.7
71	8:2	62	91.95	0.25	23.5
75	8:2	62	138.59	0.47	21.8

1.4 试验步骤

1.4.1 装置调试

小型闭路环管试验装置使用前先用清水进行试验,检测试验装置的密封性、渣浆泵对流量的调节能力,并对压力表、流量计进行校核,确保数据记录仪工作正常。

1.4.2 数据采集

根据设计配比将膏体料浆所需的磷尾砂、粉煤灰和水加入搅拌桶内混合均匀,然后泵送入环管系统,依次通过1号和2号压力表、气动闸阀、电磁流量计、3号和4号压力表、磨损测试管段、5号压力表,最终流入搅拌桶形成闭路循环。电磁流量计可以监测管道中的流量,压力表可以监测不同管道位置的静压,采集频率为每秒记录1次,每组工况的有

效测试时间不少于 300 s, 确保采集到足够的流量和压力数据。

1.4.3 数据分析

(1) 流速可根据管道内径和膏体流量的关系式计算得出:

$$v = \frac{Q}{900\pi D^2} \quad (1)$$

式中, v 为流速, m/s ; Q 为膏体流量, m^3/h ; D 为管道内径, m 。

(2) 管道输送阻力由相邻压力表数据的差值除以压力表距离得到, 调取水平直管段上相邻的 2 号和 3 号压力表数据求取差值, 根据下式计算得出:

$$i_m = \frac{\Delta P}{l} \quad (2)$$

式中, i_m 为单位长度的管道输送阻力, Pa/m ; ΔP 为 2 号和 3 号压力表数据的差值, Pa ; l 为 2 号和 3 号压力表间的管道长度, 测量为 2 m。

(3) 绘制不同流速、质量浓度和平均粒径与管道输送阻力的关系曲线。

2 管道输送阻力的影响因素分析

2.1 流速对管道输送阻力的影响

膏体质量浓度为 73% 时, 不同平均粒径的膏体管道输送阻力与流速的关系拟合曲线为近似的直线, 如图 3 所示, 线性拟合的相关系数均大于 0.97, 表明拟合结果可靠, 且管道输送阻力与流速之间存在显著的线性关系, 该规律符合膏体管输层流状态下描述流变关系常用的白金汉方程^[12], 说明环管试验中的膏体属于宾汉流体, 且在试验流速范围内膏体处于层流输送状态。

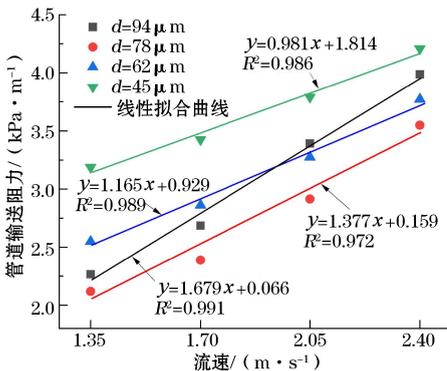


图 3 不同平均粒径下流速对管道输送阻力的影响

由图 3 可知, 膏体管道输送阻力随流速的增加

呈线性增长, 且膏体平均粒径越大, 线性拟合方程的回归系数越大, 代表直线的斜率越大, 管道输送阻力损失速率越大。

2.2 质量浓度对管道输送阻力的影响

膏体平均粒径为 62 μm 、流速为 1.70 m/s 时, 膏体管道输送阻力与质量浓度的关系拟合曲线如图 4 所示。拟合结果表明, 膏体质量浓度对管道输送阻力的影响极为显著, 管道输送阻力随着质量浓度的增加呈指数增长趋势, 在较低质量浓度下管道输送阻力增长缓慢, 当超过一定质量浓度时管道输送阻力急剧增长。这是由于膏体料浆中小于 40 μm 的细颗粒会相互作用形成絮网结构, 随着膏体质量浓度的提高, 不仅降低了颗粒间距离、提高了絮网结构强度, 还降低了自由水的润滑作用, 导致料浆的黏性系数增加、流动性变差, 料浆流动过程中的黏滞阻力增大, 管道输送的阻力损失大幅度增加^[13]。

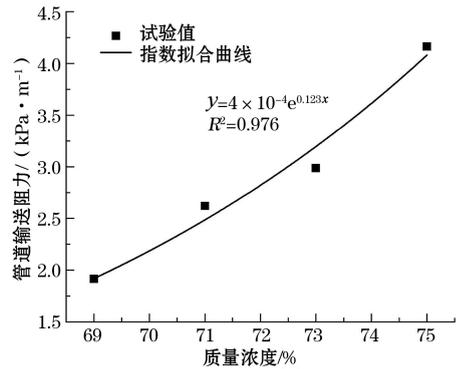


图 4 质量浓度对管道输送阻力的影响

2.3 平均粒径对管道输送阻力的影响

膏体质量浓度为 73% 时, 不同流速的膏体管道输送阻力与平均粒径的关系拟合曲线如图 5 所示。拟合结果表明, 平均粒径的变化对膏体管道输送阻力的影响较为复杂, 呈两次多项式的变化趋势, 管道输送阻力先随平均粒径的增加而减小, 当平均粒径超过 78 μm 后, 管道输送阻力随平均粒径的增加而增大。这是由于细颗粒的加入对膏体管道输送阻力有两重不同的作用: 一是细颗粒填充于粗颗粒之间, 起到润滑作用, 并使更多的粗颗粒保持悬移运动, 减小运动的摩擦阻力损失^[14]; 二是细颗粒使料浆黏性增大, 阻力损失随之增大。由于这两重作用的相互制约, 使膏体管道输送阻力的变化较为复杂^[15]。由此可见, 对于不同粒径的充填骨料, 存在一个最佳级配, 可使膏体在该级配下管道输送阻力损失最小。

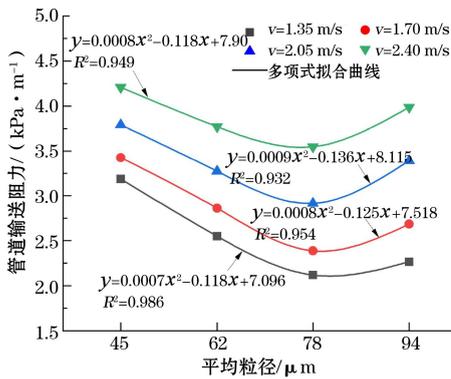


图5 不同流速下平均粒径对管道输送阻力的影响

3 管道输送阻力的多因素关联分析

环管试验结果表明,流速、质量浓度和平均粒径等3个因素均与膏体管道输送阻力存在一定的影响关系,为区分各影响因素的重要性,基于管道输送阻力试验数据,采用灰色关联分析法研究膏体料浆的流速、质量浓度和平均粒径对管道输送阻力的影响程度并进行主次排序^[16]。灰色关联分析法能精确地计算出研究对象与各影响因素之间的关联度,通过比较关联度的大小来判断各影响因素对研究对象的影响程度,克服了传统单因素分析无法同时考虑所有因素影响的局限性^[17]。

根据灰色关联分析原理,将20组环管试验数据代入MATLAB软件进行求解,得出流速、质量浓度和平均粒径与管道输送阻力的关联度分别为:0.6498, 0.7773, 0.5770。由此可见,质量浓度对膏体管道输送阻力的影响最大,其次分别为流速和平均粒径。该结论可作为矿山实际充填生产中调节相关参数的依据,保证充填料浆的安全稳定输送。

4 结论

(1) 膏体管道输送阻力随流速的增加呈线性增长,且膏体平均粒径越大,管道输送阻力损失速率越快。在实际充填输送过程中应将膏体的流速控制在合理范围,以防止管道输送阻力损失过大。

(2) 膏体质量浓度对管道输送阻力的影响极为显著,管道输送阻力随着质量浓度的增加呈指数增长趋势,当超过一定质量浓度时管道输送阻力急剧增长。

(3) 由于膏体平均粒径对管道输送阻力的影响有双重性,致使平均粒径的变化对管道输送阻力的影响较为复杂,呈两次多项式的变化趋势,随着平均粒径的增大,管道输送阻力先减小再增大。

(4) 通过灰色关联分析法得出了膏体管道输送阻力影响因素的主次关系依次为质量浓度、流速、平均粒径。

(5) 本次小型环管试验测试结果符合工程实际,可为矿山充填管网设计和设备选型提供可靠的技术支持,降低管道输送的安全风险。试验采用的小型闭路环管试验装置适用于不同矿山尾矿的充填管道输送阻力测试,试验用料少且操作方便,为矿山节约成本,试验思路和方法可为类似矿山提供参考借鉴。

参考文献(References):

- [1] 王洪江,李辉,吴爱祥,等.基于全尾砂级配的膏体新定义[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(2):557-562.
- [2] 刘晓辉,王国立,赵占斌,等.结构流充填料浆环管试验及其阻力特性研究[J].中国钨业,2016,40(5):20-23.
- [3] 杨超,郭利杰,张林,等.铜尾矿流变特性与管道输送阻力计算[J].工程科学学报,2017,39(5):663-668.
- [4] 熊有为,刘福春,刘恩彦,等.大流量膏体管道输送阻力特性研究[J].矿业研究与开发,2019,39(9):100-104.
- [5] 杨天雨,乔登攀,王俊,等.废石-风砂高浓度料浆管道输送数值模拟及管输阻力新模型[J].中国有色金属学报,2021,31(1):234-244.
- [6] 吴优,曹斌,夏建新.基于滑移效应的水煤浆膏体管道输送阻力计算[J].水利水运工程学报,2018(6):70-76.
- [7] 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.
- [8] 杨志强,王永前,高谦,等.金川膏体管道输送特性环管试验与减阻技术[J].矿冶工程,2016,36(5):22-26.
- [9] 李俊,肖崇春,姜奇,等.泵送膏体触变特性对管道阻力的影响[J].中国矿业,2017,26(增刊2):283-287.
- [10] 王少勇,吴爱祥,阮竹恩,等.基于环管实验的膏体流变特性及影响因素[J].中南大学学报(自然科学版),2018,49(10):2519-2525.
- [11] 吴爱祥,王勇,王洪江.膏体充填技术现状及趋势[J].金属矿山,2016(7):1-9.
- [12] 陈秋松,张钦礼,王新民,等.全尾砂似膏体管输水力坡度计算模型研究[J].中国矿业大学学报,2016,45(5):901-906.
- [13] 程海勇,吴顺川,吴爱祥,等.基于膏体稳定系数的级配表征及屈服应力预测[J].工程科学学报,2018,40(10):1168-1176.
- [14] 刘晓辉,苏先锋,黄明清,等.基于Fuller级配理论的膏体管道输送减阻技术研究[J].金属矿山,2016(10):40-44.
- [15] 石宏伟,黄吉荣,滕高礼,等.高浓度分级尾砂充填料浆管输阻力影响因素研究与分析[J].有色金属(矿山部分),2019,71(6):89-94.
- [16] 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.
- [17] 甘德清,赵海鑫,刘志义,等.全尾砂料浆管道输送阻力损失影响因素敏感性分析[J].矿业研究与开发,2018,38(3):136-139.

Study on Resistance Characteristics of Paste Pipeline Transportation Based on Small-Scale Loop Pipe Test

LIU Weitao, WANG Yingying, WANG Guoli

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

Abstract: In order to study the resistance characteristics of paste pipeline transportation, a small-scale closed-circuit loop pipe test device was designed and developed. The loop test of paste slurry under different flow rates, mass concentrations and average particle sizes were carried out, and the influences of various factors on pipeline transportation resistance were analyzed by grey correlation method. The results are concluded as follows. Firstly, the pipeline transportation resistance is most sensitive to the change of paste mass concentration, and the pipeline transportation resistance increases exponentially with the increase of mass concentration. Secondly, the influence of paste flow rate on pipeline transportation resistance is second only to mass concentration, and the pipeline transportation resistance increases linearly with the increase of flow rate. Thirdly, the influence of the average particle size of the paste on the pipeline transportation resistance is dual. As the average particle size increases, the pipeline transportation resistance decreases first and then increases. The research results can provide a theoretical support for the rational design and optimal arrangement of paste filling conveying system.

Key words: Paste filling, Loop pipe test, Pipeline transportation resistance, Grey correlation analysis