

# 某铜矿充填料浆 L 型管道自流输送研究\*

刘勋<sup>1</sup>, 欧任泽<sup>2, 3</sup>, 邹山康<sup>1</sup>, 曹港<sup>2, 3</sup>, 刘帅冬<sup>1</sup>, 葛建平<sup>1</sup>

(1. 九龙县雅砻江矿业有限责任公司, 四川 甘孜藏族自治州 626201;

2. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;

3. 国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

**摘要:**为了研究分析四川某铜矿充填料浆的输送性能,为矿山充填管网系统设计选型提供理论计算依据,试验选取尾矿库尾砂和普通硅酸盐水泥作胶结充填材料,对不同配比、不同浓度的充填料浆进行 L 型管道输送模拟试验。通过试验研究得到了管道各组段料浆流动性的技术参数,包括屈服剪切应力值和黏滞系数等。通过理论计算确定了不同料浆流量、输送管径情况下产生的管道单位长度流动阻力和允许的充填倍线,最后综合分析研究了流变参数、黏性系数、充填料浆输送流速及输送管道直径对流动阻力和充填倍线的影响。

**关键词:**充填料浆;管道输送;输送阻力;充填倍线;管网参数

## 0 引言

影响充填料浆管道输送的因素一般包括充填料浆组成要素的合理性、充填料浆的浓度、充填料浆的输送量、管道直径、管道材质、充填倍线及管网系统布置参数等<sup>[1]</sup>。国内外科研工作者在管道输送方面做了大量的研究。杨天雨等<sup>[2]</sup>系统地分析研究了废石-风砂高浓度充填料浆的自流输送管道输送特性,应用 Fluent 软件对该系统进行了流动及输送特性的模拟研究,结果与试验分析表明,随着充填料浆流速值的逐步增大,料浆流体输送压力及管道沿程阻力损失也呈线性增大。刘杰等<sup>[3]</sup>采用 L 型管道,研究分析了采用多种不同混合配比、质量浓度的料浆,充填倍线及输送阻力间存在的复杂关系,建立了一个具有多种配比情况下充填倍线与输送阻力间转化的回归模型。康志强等<sup>[4]</sup>以唐山某铁矿全尾砂料浆 L 型管道输送压力损失最小为研究原则,分析比较了影响管道压力损失的几个因素,并据此进行了结构优化分析研究。甘德清等<sup>[5-6]</sup>利用 Fluent 软件,对不同条件下 L 型弯管的阻力损失进行了数值分析,得到了管道直径长度和料浆质量浓度的最优取值。

为了确定充填料浆试样的输送性能,为充填管网系统设计选型提供理论计算依据,本次试验方案

系统进行了四川某铜矿模拟试样充填料浆的 L 型管道自流输送试验,并对影响其输送阻力的主要因素进行了综合分析研究,确定了最佳充填倍线及合理流速。

## 1 L 型管道自流输送测试

### 1.1 试验原理

依靠浆体自身在垂直管道输送中的势能克服输送阻力,从而最终实现浆体输送的方式称之为料浆管道自流输送<sup>[7]</sup>。宾汉流体模型可用来描述浆体流变性能,由于流体自身具有一定的初始抗剪切变形的能力,使得管内流体为低流速流体乃至停滞状流体状态下,充填料浆中的粗颗粒一般也不会产生沉降、离析等其他不利现象,具有较低的堵管风险,且稳定性较好<sup>[8]</sup>。

### 1.2 实验过程

试验取该铜矿尾矿库尾砂和普通硅酸盐水泥作胶结充填试验材料,分别按 1:4、1:8、1:12、1:20 四组灰砂比,70%、68%、66% 三组料浆质量浓度,进行 L 型管道输送模拟试验,试验装置结构如图 1 所示。

将上述各种充填料浆试样充分搅拌后倒入装置上部的漏斗中,料浆借助自重通过 L 型管道,并从管

\* 收稿日期: 2023-02-02

作者简介: 刘勋(1973—),男,工程师,主要从事采矿工程技术管理研究,E-mail:919591139@qq.com。

道的下端流出。相关参数可以通过料浆流量、静止的料柱高度等具体数值来确定。灰砂比为 1:4、料浆质量浓度为 68% 时的室内 L 型管道输送模拟试验照片见图 2。



图 1 L 管试验装置



图 2 灰砂比 1:4、料浆质量浓度 68% 时的流态

## 2 实验结果分析

### 2.1 流变参数试验结果

根据料浆的参数测定可计算出不同配比及质量浓度的料浆的屈服剪切应力  $\tau_0$  与黏滞系数  $\eta$ , 表 1 列出了实验室内针对该铜矿未选硫尾砂试样的几组充填料浆流动性试验参数结果。

分析表 1 的模拟试验结果可知, 当水泥: 尾砂试样配比为 1:4、水泥: 尾砂试样配比为 1:8、水泥: 尾砂试样配比为 1:12、水泥: 尾砂试样配比为 1:20, 料浆质量浓度为 66%~70% 时, 无论料浆在管道内还是在料浆箱中均很稳定, 流动性亦比较好, 未出现明显的浆液离析和分层现象, 也未发生管道堵塞现象。

### 2.2 输送阻力及充填倍线计算

#### 2.2.1 输送阻力计算

不同料浆流量、管道内径时的料浆流速计算结果见表 2。

表 1 各组料浆流动性试验参数结果

质量浓度/%	灰砂比	静止高度/cm	容重/(kN/m <sup>3</sup> )	流速/(m/s)	流变参数	
					屈服剪切应力 $\tau_0$ /Pa	黏滞系数 $\eta$ /(Pa·s)
70	1:4	5.0	19 913.6	2.338	2.140	0.330
68	1:4	4.0	19 061.0	2.445	2.064	0.320
66	1:4	3.5	18 620.0	2.647	2.018	0.289
70	1:8	4.5	19 845.0	2.108	2.090	0.387
68	1:8	3.5	19 021.8	2.129	1.943	0.387
66	1:8	3.2	18 541.6	2.466	1.946	0.323
70	1:12	5.0	19 805.8	2.230	2.130	0.352
68	1:12	4.5	18 992.4	2.259	2.161	0.362
66	1:12	3.0	18 522.0	2.405	1.922	0.341
70	1:20	4.5	19 747.0	2.174	2.112	0.374
68	1:20	3.8	18 914.0	2.893	2.024	0.240
66	1:20	3.0	18 492.6	3.112	1.907	0.215

管道单位长度流动阻力  $i$  可根据下式计算:

$$i = \frac{16\tau_0}{3D} + \frac{32\eta V}{D^2} \quad (1)$$

式中,  $V$  为充填料浆输送流速, m/s;  $D$  为输送管道内径, mm。

鉴于篇幅, 本文仅展示灰砂比为 1:4、质量浓度为 70% 的充填料浆和灰砂比为 1:8、质量浓度为 68% 的充填料浆的流动阻力计算结果, 分别见表 3、表 4。

根据表 3、表 4 中的数据, 绘制不同料浆流量下的管径与流动阻力的关系曲线, 如图 3 所示。

#### 2.2.2 充填倍线计算

考虑充填管网在铺设工程时产生的不平整以及一些不可预见性因素, 取局部阻力及出口损失之和为管道沿程阻力的 1.15 倍, 充填倍线  $N$  可由公式(2)计算:

$$N = \frac{H+L}{H} = \frac{\gamma}{1.15i} \quad (2)$$

表 2 不同料浆流量、管道内径时的料浆流速

管道内径 $D/mm$	料浆流速/(m/s)						
	40 m <sup>3</sup> /h	50 m <sup>3</sup> /h	60 m <sup>3</sup> /h	70 m <sup>3</sup> /h	80 m <sup>3</sup> /h	90 m <sup>3</sup> /h	100 m <sup>3</sup> /h
80	2.212	2.765	3.317	3.870	4.423	4.976	5.529
90	1.747	2.184	2.621	3.058	3.495	3.932	4.369
100	1.415	1.769	2.123	2.477	2.831	3.185	3.539
110	1.170	1.462	1.755	2.047	2.340	2.632	2.924
120	0.983	1.229	1.474	1.720	1.966	2.212	2.457
125	0.906	1.132	1.359	1.585	1.812	2.0385	2.265
140	0.722	0.903	1.083	1.264	1.444	1.625	1.805
150	0.629	0.786	0.944	1.101	1.258	1.415	1.573

表 3 灰砂比为 1 : 4、质量浓度为 70% 的充填料浆流动阻力

管道内径/mm	料浆流动阻力/(kPa/m)						
	40 m <sup>3</sup> /h	50 m <sup>3</sup> /h	60 m <sup>3</sup> /h	70 m <sup>3</sup> /h	80 m <sup>3</sup> /h	90 m <sup>3</sup> /h	100 m <sup>3</sup> /h
80	3.79	4.71	5.62	6.53	7.44	8.36	9.27
90	2.41	2.98	3.55	4.12	4.68	5.25	5.82
100	1.61	1.98	2.36	2.73	3.10	3.48	3.85
110	1.13	1.38	1.64	1.89	2.15	2.40	2.66
120	0.82	1.00	1.18	1.36	1.54	1.72	1.90
125	0.70	0.86	1.01	1.16	1.32	1.47	1.62
140	0.47	0.57	0.67	0.76	0.86	0.96	1.05
150	0.37	0.45	0.52	0.59	0.67	0.74	0.81

表 4 灰砂比为 1 : 8、质量浓度为 68% 的充填料浆流动阻力

管道内径/mm	料浆流动阻力/(kPa/m)						
	40 m <sup>3</sup> /h	50 m <sup>3</sup> /h	60 m <sup>3</sup> /h	70 m <sup>3</sup> /h	80 m <sup>3</sup> /h	90 m <sup>3</sup> /h	100 m <sup>3</sup> /h
80	4.41	5.48	6.55	7.62	8.69	9.76	10.83
90	2.79	3.46	4.12	4.79	5.46	6.13	6.80
100	1.86	2.30	2.73	3.17	3.61	4.05	4.49
110	1.29	1.59	1.89	2.19	2.49	2.79	3.09
120	0.93	1.14	1.35	1.57	1.78	1.99	2.20
125	0.80	0.98	1.16	1.34	1.52	1.70	1.88
140	0.53	0.64	0.76	0.87	0.99	1.10	1.22
150	0.42	0.50	0.59	0.68	0.76	0.85	0.94

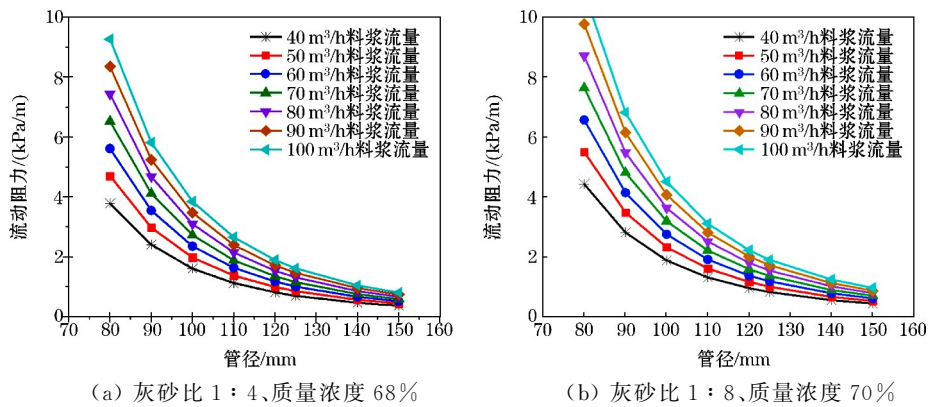


图 3 管径与流动阻力关系

式中, $\gamma$ 为料浆容重, $N/m^3$ ;  $i$ 为管道单位长度流动阻力, $kPa/m$ ;  $H$ 为垂直管道高度, $m$ ;  $L$ 为水平管道长度, $m$ 。

根据公式(1)计算得到允许充填倍线部分结果分别见表5、表6。

由表5、表6中的数据绘制不同料浆流量下管径与充填倍线的关系,如图4所示。

### 3 料浆输送性能影响因素分析

综合分析充填料浆自身的流变参数 $\tau_0$ 、黏滞系数 $\eta$ 、充填料浆输送流速 $V$ 及输送管道内径 $D^{[9-10]}$ ,对充填料浆输送性能的影响如下。

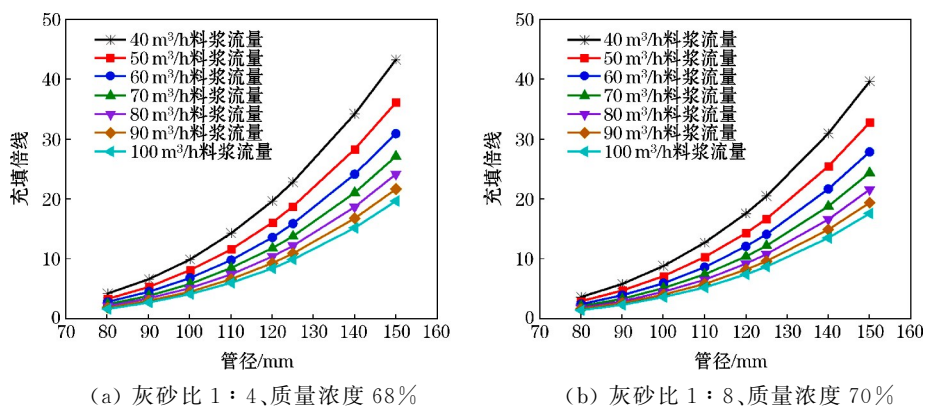
(1) 屈服剪切应力 $\tau_0$ 和黏滞系数 $\eta$ 。从计算结果可知,水泥十未选硫尾砂充填料浆黏滞系数 $\eta$ 数

表5 灰砂比为1:4、质量浓度70%的充填料浆可实现的自流输送倍线

管道内径/mm	自流倍线						
	40 m <sup>3</sup> /h	50 m <sup>3</sup> /h	60 m <sup>3</sup> /h	70 m <sup>3</sup> /h	80 m <sup>3</sup> /h	90 m <sup>3</sup> /h	100 m <sup>3</sup> /h
80	4.3	3.4	2.9	2.5	2.2	1.9	1.7
90	6.7	5.4	4.6	3.9	3.5	3.1	2.8
100	10.0	8.2	6.9	5.9	5.2	4.6	4.2
110	14.4	11.7	9.9	8.6	7.5	6.7	6.1
120	19.8	16.2	13.7	11.9	10.5	9.4	8.5
125	23.0	18.9	16.0	13.9	12.3	11.0	10.0
140	34.4	28.5	24.3	21.2	18.8	16.9	15.3
150	43.5	36.3	31.1	27.3	24.3	21.8	19.8

表6 灰砂比为1:8、质量浓度为68%的充填料浆可实现的自流输送倍线

管道内径/mm	自流倍线						
	40 m <sup>3</sup> /h	50 m <sup>3</sup> /h	60 m <sup>3</sup> /h	70 m <sup>3</sup> /h	80 m <sup>3</sup> /h	90 m <sup>3</sup> /h	100 m <sup>3</sup> /h
80	3.7	3.0	2.5	2.2	1.9	1.7	1.5
90	5.9	4.8	4.0	3.4	3.0	2.7	2.4
100	8.9	7.2	6.0	5.2	4.6	4.1	3.7
110	12.8	10.4	8.7	7.5	6.6	5.9	5.3
120	17.7	14.4	12.2	10.5	9.3	8.3	7.5
125	20.6	16.8	14.2	12.3	10.9	9.7	8.8
140	31.1	25.6	21.8	18.9	16.7	15.0	13.6
150	39.8	32.9	28.0	24.5	21.7	19.5	17.7



(a) 灰砂比1:4、质量浓度68%

(b) 灰砂比1:8、质量浓度70%

图4 管径与充填倍线关系

值较小,灰砂比为 1:4 时,充填料浆黏滞系数  $\eta$  最大为 0.330 Pa·s,质量浓度自 70% 降到 66% 时,  $\tau_0$  从 2.140 Pa 降至 2.018 Pa;灰砂比为 1:8 时,充填料浆黏滞系数  $\eta$  最大为 0.387 Pa·s,质量浓度自 70% 降到 66% 时,  $\tau_0$  从 2.090 Pa 降至 1.946 Pa;灰砂比为 1:12 时,充填料浆黏滞系数  $\eta$  最大为 0.352 Pa·s,质量浓度自 70% 降到 66% 时,  $\tau_0$  从 2.130 Pa 降至 1.922 Pa;灰砂比为 1:20 时,充填料浆黏滞系数  $\eta$  最大为 0.374 Pa·s,质量浓度自 70% 降到 66% 时,  $\tau_0$  从 2.112 Pa 降至 1.907 Pa。分析结果表明,当  $\tau_0$  值过大时,管道输送静摩擦力增大,输送阻力增大,可通过在充填料浆中增加细骨料含量等方法来降低  $\tau_0$  [11]。

(2) 管内流速  $V$ 。从计算结果可知,如水泥:尾砂试样配比为 1:4 的充填料浆,质量浓度为 70%、管径为  $\Phi 100$  mm 时,当料浆流量从 40 m<sup>3</sup>/h 提高至 80 m<sup>3</sup>/h 时,流速从 1.415 m/s 提高到 2.831 m/s,输送阻力从 1.61 kPa/m 增大至 3.1 kPa/m,可顺利实现自流输送的充填倍线从 10 降至 5.2。

(3) 输送管道内径  $D$ 。由输送阻力计算公式可知,可通过逐渐加大管径来有效降低管道内的输送阻力,如水泥:尾砂试样配比为 1:8 的充填料浆,当质量浓度为 68%,流量为 70 m<sup>3</sup>/h,管道内径从 80 mm 增大至 150 mm 时,输送阻力可从 7.62 kPa/m 降至 0.68 kPa/m,对应的充填倍线可从 2.2 增大至 18.9。

#### 4 结论

(1) 充填料浆 L 型管道自流输送试验表明:当水泥:尾砂试样配比分别为 1:4、1:8、1:12、1:20,料浆质量浓度为 66%~70% 时,无论料浆在管道内还是在料浆箱中均很稳定且流动性亦比较好,未出现明显的浆液离析和分层现象,也未发

生管道堵塞现象。

(2) 当  $\tau_0$  值增大时,管道输送阻力增大,实际生产过程中应尽量降低  $\tau_0$ ;另一方面,提高流速理论上会增大管道输送阻力、降低充填倍线。由于水泥+全尾砂结构流可实现低理论流速管道输送,所以为了进一步降低管道输送阻力,要控制好充填料浆流量,以控制流速。适当加大输送管道内径也可以降低输送阻力,并显著增大充填倍线。但由于管径大、流速大会产生与矿山生产能力不符的现象,因此,确定管径的同时要和矿山的生产能力、充填能力、料浆流动速度相匹配,以保证满管流。

(3) 该铜矿灰砂比为 1:4~1:20、质量浓度为 66%~70% 的充填料浆能够顺利实现自流输送,最佳充填倍线为 3~6,其合理流速为 1.5~2.2 m/s。

#### 参考文献:

- [1] 芦世俊.全尾砂高浓度充填料浆自流输送系统特性分析及设计[J].有色金属(矿山部分),2010,62(2):75-78.
- [2] 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.
- [3] 刘杰,赵奎,许杨东,等.基于 L 型管道料浆输送性能试验研究[J].矿业研究与开发,2016,36(2):100-104.
- [4] 康志强,辛东夫,邵陆航,等.L 型充填管道料浆输送压力损失及优化研究[J].金属矿山,2020(9):33-40.
- [5] 甘德清,薛娜,刘志义,等.全尾砂充填料浆管道阻力损失探究及优化[J].金属矿山,2019(7):32-40.
- [6] 甘德清,高锋,陈超,等.高浓度全尾砂充填料浆临界输送流速研究[J].金属矿山,2015(11):22-26.
- [7] 沈家华.深井长距离膏体自流输送技术研究与应[J].采矿技术,2014,14(1):72-76.
- [8] 王增加,齐兆军,寇云鹏,等.某金矿高浓度料浆输送状态分析[J].中国矿业,2021,30(增刊1):419-422.
- [9] 杨鑫,郑伯坤,邓高岭,等.基于环管试验的尾矿水力输送性能研究[J].矿业研究与开发,2023,43(1):26-31.
- [10] 陈得信.特大型镍矿充填法开采理论与关键技术[M].北京:科学出版社,2014.
- [11] 胡文静,刘音,刘国明,等.混合骨料级配不同浓度充填膏体流变性能影响试验研究[J].矿业研究与开发,2021,41(5):34-38.