



基于 CFD 的充填管网参数优化及输送特性

张宗国, 史秀志, 吝学飞

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 为优化充填管网参数及研究充填料浆管道输送特性, 考虑将充填倍线 N 、充填管径 D 、质量浓度 c 3 个影响因素进行正交设计并进行计算流体力学(CFD)试验, 之后对试验结果进行极差、方差及回归拟合分析, 并结合数值分析方法探讨最大流速的预测计算模型。结果表明: 影响沿程阻力损失、影响最大流速的敏感性、显著性皆为 $D > c > N$, 且 3 个因素均为显著因素; 得到最佳充填倍线 N 为 3.0~4.0, 质量分数 c 为 65%~68%, 充填管径 D 为 110~120 mm, 再经筛选剩下 5 组合适参数。研究 3 个因素变化对沿程阻力损失、最大流速的影响, 并建立一个反映三因素下最大流速 $v_{\max}$ 的综合数学预测模型, 并利用这 5 组对其验证, 模型计算值与试验模拟值差率都在 15%以下, 证明预测模型有效。

关键词: 充填采矿; 计算流体力学; 充填管网; 数值分析

文章编号: 1004-0609(2019)-10-2411-10

中图分类号: TD853

文献标志码: A

充填采矿法开采效率高, 有效减少了岩爆等灾害, 提高了采矿的安全性, 因此, 日益受到深井矿山的青睐^[1]。将开采过程产生的废石尾砂等固体废弃物进行充填处理, 也有效解决了土地占用, 环境污染等问题^[2]。管道输送充填料浆是其中最关键的技术之一, 直接影响着充填系统的效率^[3], 但随着开采深度的增加, 充填管道的铺设也比以前更深、更长^[4], 实现料浆的自流输送也越来越困难, 因此, 优化充填管网参数和研究料浆管道输送特性变得尤为重要。

充填管网布置方案中参数选取往往使用经验公式估算和环管试验得到^[5-6], 但经验公式针对性不强, 环管试验又价格昂贵。随着计算机技术的不断发展, 基于流体力学和数值方法的计算流体动力学(CFD)已经开始用于研究充填管道的性能, 为该问题的研究提供了一条新思路。查阅文献发现, 利用 CFD 技术研究充填问题的成果主要集中在充填材料和充填流量方面, 如 CHEN 等^[4, 7]利用 CFD 研究了泡沫砂浆三相流以及浸出渣的管道输送特性, 张修香等^[8]研究不同流量下的高浓度粗骨料弯管处压力; 报道中对于阻力特性的分析较多, 如吴迪等^[9]研究了固液两相流不同浓度、料量对沿程阻力损失的影响; WANG 等^[10]对深井煤矿自流输送料浆阻力损失进行了研究, ZHANG 等^[11]进行了粗骨料料浆管道输送阻力的研究等, 但是利用

CFD 技术对充填管网优化中充填管径、充填倍线选取问题的研究比较少, 对于充填管道最大流速的报道也很少。

基于以上分析, 应用 CFD 技术, 分析不同充填倍线(N)、质量浓度(c)以及充填管径(D)下沿程阻力损失、最大流速以及管道输送情况, 并确定管道输送最佳充填管网参数, 以期对实际充填管路铺设具有指导意义。

1 正交试验设计及料浆参数

尾砂中的细颗粒有利于充填料浆保住水份, 在管壁四周形成泥质圈层, 对管壁进行润滑, 因此在一定程度上保护了充填管^[12-13], 但是细颗粒含量太高, 造成需水量很大, 导致充填体强度低^[14], 且易使浆料在较低的质量浓度下变成膏体, 不能满足高浓度的输送要求^[7], 因此研究细粒级尾砂的合理浓度及其输送问题变得十分重要。以凡口铅锌矿灰砂比 1:6 的超细粒级分选尾砂及浸出渣为研究对象, 保持充填量 Q_h 为 90 m³/h, 所取的正交水平参考类似矿山常用数值范围, 采用正交试验法, 每个因素(N 、 c 、 D)设置 5 个水平, 正交试验方案选择 L25(5³)正交表, 试验设计 3 个因素的 5 个水平值及料浆参数列于表 1。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(面上项目)(51874350); 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0602902); 国家自然科学基金资助项目(41807259)

收稿日期: 2018-10-15; **修订日期:** 2019-06-15

通信作者: 史秀志, 教授, 博士; 电话: 13974801752; E-mail: baopo@csu.edu.cn

表1 影响因子的水平值及料浆参数

Table 1 Parameter values of affecting factors and parameter of slurry

Backfilling times line, N	Pipeline diameter, D/mm	Slurry concentration, $c/\%$	Density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Viscosity/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$
3.0	90	65	1888	0.1259
4.0	100	68	1956	0.2526
4.5	110	72	2002	0.3675
5.0	120	75	2068	0.5283
6.0	130	78	2155	0.7494

1.1 输送速度

料浆输送速度是影响管道输送的重要因素, 速度太大, 管道磨损加重^[15], 速度太慢, 料浆固体颗粒易在管道内发生沉降; 当实际流速达到或者大于临界流速的情况下, 可以保证流体在管路中的顺利流动, 可根据杜拉德公式计算充填系统所需要的临界流速^[1]:

$$v_1 = F_1 \sqrt{2gD \frac{\rho_g - \rho_l}{\rho_l}} \quad (1)$$

式中: F_1 为与充填料浆中的骨料粒径与浓度有关的系数, 这里取 1.2; g 为重力加速度, m/s ; ρ_g 为混合料的密度, t/m^3 ; ρ_l 为输送载体(水)的密度。

料浆在管道中的实际流速 v 使用下式计算:

$$v = \frac{4Q_s}{3600\pi D^2} \quad (2)$$

式中: Q_s 为充填料浆的流量, 取为 $90 \text{ m}^3/\text{h}$; D 为充填管道的实际直径, m 。

计算得管径 130mm 的组合实际流速均小于临界流速, 将这些组数据仅作为参考数据进行结果分析, 优选时剔除。

2 FLUENT 数值模型的建立

以表 1 确定的因子为基础建立相关模型, 根据现场实际观察, 深部的充填管道出现爆管的风险较大, 现以凡口铅锌矿狮岭南深部-320 m 中段至-400 m 中段的充填管道为例进行分析, 由于 3D 模型网格数目较多, 采用雷诺数保持不变的原则, 充填管路在实际长度的基础上缩短为实际的 1/5。构建 L 形管充填管道输送系统, 如图 1 所示。

2.1 几何模型参数

管道高程 16 m, 弯管处曲率半径为 0.5 m, 设置各管道参数, 设置完成后, 保存文件, 之后利用后处理软件 FLUENT 进行计算。

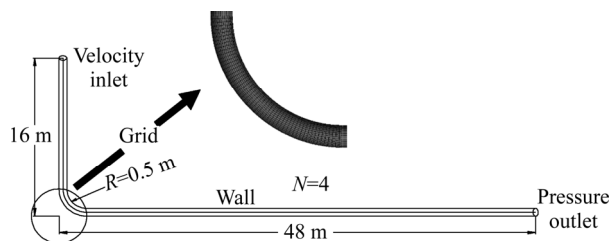


图1 充填倍线为 4 的 L 形充填管道模型

Fig. 1 L type pipeline with backfilling times line of 4

2.2 FLUENT 控制方程

料浆 CFD 计算符合连续性方程及动量平衡、能量守恒, 当自重应力大于沿程阻力时, 料浆才可从出口流出, 连续性方程、动量方程及能量方程^[9]如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho, \mathbf{v}) = 0 \quad (3)$$

式中: t 为时间; ρ 为充填料浆的密度; $\mathbf{v}$ 为充填料浆在管道中的矢量速度; 浆体是不可压缩的均质体, 密度是常数, 所以连续性方程就简化成:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中: u 、 v 、 w 为速度矢量沿 x 、 y 、 z 轴的 3 个速度的分量;

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dt} &= X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dv}{dt} &= Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \frac{dw}{dt} &= Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial F}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: x 、 y 、 z 为流体微元在 x 、 y 、 z 方向的面力; F 为流体微元受到的合力; μ 为流体的黏度。

$$y_1 + \frac{F_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = y_2 + \frac{F_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h'_1 \quad (6)$$

式中: γ 为单位体积料浆的容重; y_1 和 y_2 为单位充填料浆流体的位置; F_1 和 F_2 为料浆在位置 y_1 和 y_2 处的压力; v_1 和 v_2 为流体在位置 y_1 和 y_2 处的速度; h'_1 为流

体从 y_1 位置运动到 y_2 位置过程中克服内摩擦力做的功。

2.3 FLUENT 设置

计算模型的求解采用基于压力求解的方法 (Pressure-based), 流体的流动特性利用雷诺数来评价, 雷诺斯计算公式如下, 当 $R_e < 2300$ 时, 选择 Laminar 计算模型; $R_e > 2300$ 时, 选择计算稳定性好、精度高的 k -epsilon 计算模型^[15]。选择压力-速度耦合求解方式为 Simple。

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$$

(7)

式中: ρ 为充填料浆密度, kg/m^3 ; V 为充填料浆流速, m/s ; D 为充填管路直径, m ; μ 为充填料浆黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

3 结果及分析

将 25 组试验进口压力、出口压力、沿程阻力损失

及最大流速统计于表 2。

3.1 方差分析

根据正交试验相关理论, 运用方差分析对试验数据进行处理, 得到各因素显著程度, 用表 3 表示。其中 $F_{0.01}(4,12)=5.41$, $F_{0.05}(4,12)=3.26$, 若 $F > F_{0.01}(f_j, f_e)$, 该因素高度显著, 在表中表示以 **; 若 $F_{0.01}(f_j, f_e) > F > F_{0.05}(f_j, f_e)$, 则因素显著, 表示以 *; 若 $F < F_{0.05}(f_j, f_e)$, 表示该因素不显著。

3.2 敏感度分析

为了研究充填倍线(N)、充填管径(D)、质量浓度(c) 3 个因素对沿程阻力损失 P 、最大流速 $v_{\max}$ 影响的敏感度, 对上表中的数据进行极差分析, 分析结果见表 4。

显著性表明, 充填管径(D)、充填倍线(N)、质量浓度(c)对沿程阻力损失、最大流速影响的影响高度显著; 敏感性表明, 对沿程阻力损失和最大流速皆为充填管径(D)>质量浓度(c)>充填倍线(N)。

表 2 Fluent 模拟结果表

Table.2 Fluent simulation results

Studied case No.	Factors			Inlet pressure/ MPa	Outlet pressure/ kPa	Resistance/ MPa	Maximum flow velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
	Backfilling times line, N	Pipeline diameter, D/mm	Slurry concentration, $c/\%$				
1	1(3.0)	1(90)	1(65)	0.324	2.263	0.322	4.56
2	1	2(100)	2(68)	0.331	0.978	0.330	4.32
3	1	3(110)	3(72)	0.148	0.161	0.147	5.15
4	1	4(120)	4(75)	0.143	0.124	0.143	4.34
5	1	5(130)	5(78)	0.142	0.098	0.142	3.71
6	2(4.0)	1	2	0.613	1.560	0.612	5.28
7	2	2	3	0.276	0.164	0.276	6.30
8	2	3	4	0.261	0.119	0.261	5.19
9	2	4	5	0.196	0.140	0.196	4.33
10	2	5	1	0.095	0.297	0.095	2.50
11	3(4.5)	1	3	0.469	0.416	0.469	7.77
12	3	2	4	0.430	0.372	0.429	6.31
13	3	3	5	0.405	0.483	0.404	5.17
14	3	4	1	0.156	0.888	0.155	2.88
15	3	5	2	0.078	0.088	0.077	3.74
16	4(5.0)	1	4	0.716	0.446	0.716	7.81
17	4	2	5	0.658	0.332	0.658	6.32
18	4	3	1	0.247	1.260	0.245	3.43
19	4	4	2	0.419	0.160	0.419	4.37
20	4	5	3	0.118	0.095	0.118	3.72
21	5(6.0)	1	5	1.187	0.503	1.187	7.77
22	5	2	1	0.454	1.990	0.452	4.12
23	5	3	2	0.194	0.100	0.194	5.19
24	5	4	3	0.191	0.111	0.191	4.36
25	5	5	4	0.196	0.061	0.196	3.71

表 3 沿程阻力损失 P 、最大流速 $v_{\max}$ 的方差分析

Table 3 Variance analysis of resistance loss P , maximum flow velocity $v_{\max}$									
Source of variance	DEVSQ		Degree of freedom	Square sum of mean deviation		F		F_{α}	Significance
Factors	P	$v_{\max}$	$P/v_{\max}$	P	$v_{\max}$	P	$v_{\max}$	$P/v_{\max}$	$P/v_{\max}$
N	0.190	2.06	4	0.048	0.514	11.27	9.61	$F_{0.01}(4,12)$	**
D	0.895	30.48	4	0.224	7.619	53.02	142.41	$F_{0.01}(4,12)$	**
c	0.245	15.11	4	0.061	3.778	14.52	70.61	$F_{0.01}(4,12)$	**
Error e	0.051	0.64	12	0.004	0.054				
Sum	1.382	48.29	24						

表 4 极差分析表

Table 4 Range analysis						
Parameter	Backfilling times line, N		Pipeline diameter, D		Slurry concentration, c	
	P	$v_{\max}$	P	$v_{\max}$	P	$v_{\max}$
k_1	0.217	4.416	0.661	6.638	0.254	3.498
k_2	0.288	4.720	0.429	5.474	0.326	4.580
k_3	0.307	5.174	0.250	4.826	0.240	5.460
k_4	0.431	5.130	0.221	4.056	0.349	5.472
k_5	0.444	5.030	0.126	3.476	0.517	5.460
Range R	0.227	0.758	0.535	3.162	0.277	0.880
Sensitivity	P		$D > c > N$			
	$v_{\max}$		$D > c > N$			

3.3 单因素分析

为分析各影响因素对充填管道输送特征的单独作用,结合表 4 各水平值对应的各因子的沿程阻力损失、最大流速的平均值 k_1 – k_5 反映的数据,绘制各影响因素和最大流速、阻力损失间的关系如图 2 所示。

无量纲拟合不同影响因素与沿程阻力损失、弯管最大流速的关系如表 5 所列。

可以看出,各变量与 P 的拟合相关系数 R^2 分别达到 0.948、0.976、0.943;与 $v_{\max}$ 的拟合相相关系数 R^2 分别为 0.926、0.996、0.993,拟合效果很好。

综合图 2 中的曲线关系图及表 5 中函数关系,可以得到:

1) 充填倍线与沿程阻力损失、最大流速的关系

充填倍线 N 与沿程阻力损失 P 之间为非线性正相关,最佳充填倍线为 3.0~4.0;充填倍线 N 与最大流速 $v_{\max}$ 之间的关系为非线性相关函数,充填倍线为 4.5 时,最大流速 $v_{\max}$ 达到最大,充填倍线大于 4.5 时,最大流速减小,但深井开采倍线过大,动力不足,充填难度增大,因此充填倍线 N 为 3.0~4.0 最佳。

2) 充填管径与沿程阻力损失、最大流速的关系

充填管径 D 与管道沿程阻力损失 P 之间为指数型

减函数,增大管径能有效减小沿程阻力损失, $D < 110$ mm 时,变化速率较大,当 $110\text{ mm} < D < 130\text{ mm}$ 时,变化速率较小,即管径增大到 110mm 后继续增大对降低沿程阻力损失效果不明显, $D \geq 130\text{ mm}$,发生沉降,充填管径的最优取值为 110~120 mm;最大流速 $v_{\max}$ 随充填管径 D 与增大而减小,呈非线性减函数,充填管径的最优取值为 110~120 mm。

3) 质量浓度与沿程阻力损失、最大流速的关系

管道沿程阻力损失 P 基本满足质量浓度 c 的增大而增大,当 $c > 72\%$ 时,变化速率明显变大,阻力增加明显,因此最优质量浓度应小于 72%;质量分数 c 与最大流速 $v_{\max}$ 之间的关系为非线性正相关, $c > 72\%$ 时,变化速率明显变小,即当质量浓度小于 72% 时,减小质量浓度对降低最大流速效果显著,质量分数 c 的最佳取值范围为 65%~68%。

对上述结论进行整理分析,结果如表 6 所列。

根据南非矿山充填标准:弯管处流速在满足充填要求时,最大不应超过 4.0 m/s ^[15],将这 8 个组合分别进行模拟试验,最大流速结果如表 7 所列。

将最大流速大于 4 m/s 的第 3、6、8 组淘汰,剩下的 5 组为最佳参数的组合。

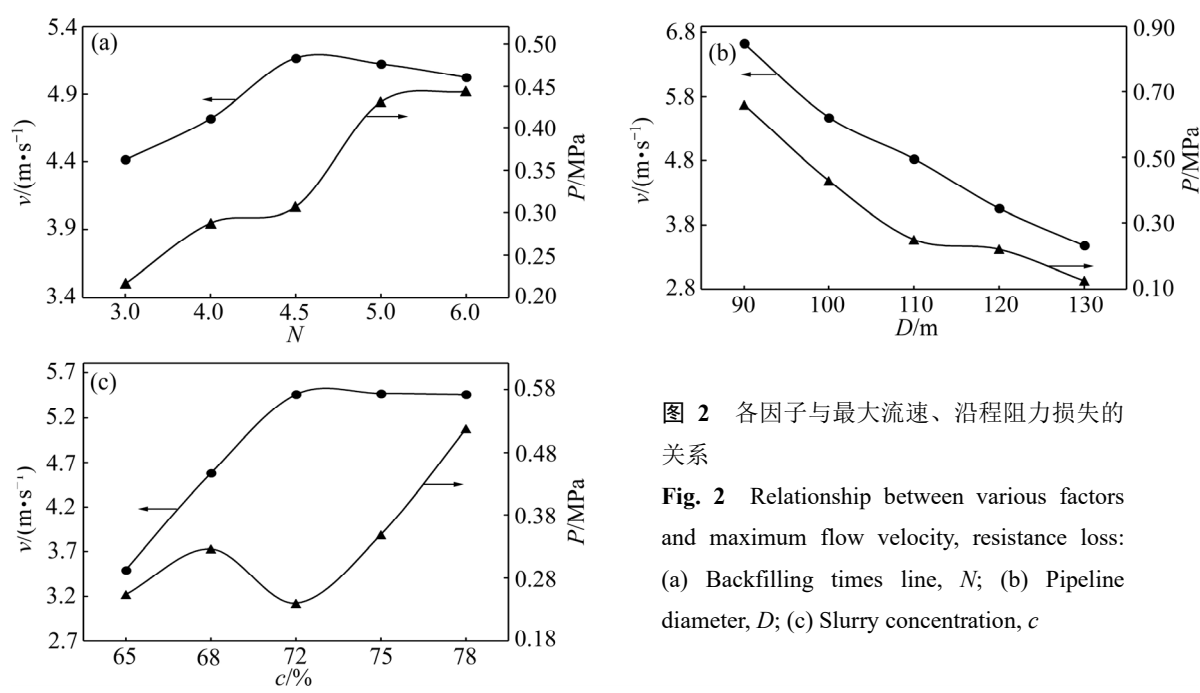


图 2 各因子与最大流速、沿程阻力损失的关系

Fig. 2 Relationship between various factors and maximum flow velocity, resistance loss: (a) Backfilling times line, N ; (b) Pipeline diameter, D ; (c) Slurry concentration, c

表 5 拟合关系表

Table 5 Equation of fitting relational

Variable relation	Fitting formula of P	Correlation coefficient of P	Fitting formula of $v_{\max}$	Correlation coefficient of $v_{\max}$
$N-P, v$	$P=-0.005N^3+0.0437N^2-0.052N+0.2352$	0.948	$v_{\max}=-0.1027N^3+1.2424N^2-4.5088N+9.5243$	0.926
$D-P, v$	$P=0.9507e^{-0.399D}$	0.976	$v_{\max}=0.0007D^2-0.2418D+22.301$	0.996
$c-P, v$	$P=0.0006c^3-0.1273c^2+8.9049c-207.1$	0.943	$v_{\max}=-0.0203c^2+3.0495c-108.91$	0.993

表 6 不同判别因素下最优结果

Table 6 Optimal results under different discriminating factors

Factors	Pipeline diameter, D/mm	Backfilling times line, N	Slurry concentration, $c/\%$	Order of influence
P	110–120	3.0–4.0	<72	$D>c>N$
$v_{\max}$	110–120	3.0–4.0	65–68	$D>c>N$
Optimal value	110–120	3.0–4.0	65–68	

表 7 最大流速统计表

Table 7 Statistics of maximum flow velocity

Studied case No.	Backfilling times line, N	Pipeline diameter, D/mm	Slurry concentration, $c/\%$	Maximum flow velocity/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Reach requirement
1	3	110	0.65	3.45	Yes
2	3	120	0.65	2.92	Yes
3	3	110	0.68	5.15	No
4	3	120	0.68	3.29	Yes
5	4	110	0.65	3.44	Yes
6	4	120	0.65	4.87	No
7	4	110	0.68	3.66	Yes
8	4	120	0.68	5.13	No

4 结果验证

凡口矿实际充填为保证较好流动性,扩散度要求不小于 200 mm,文献[14]扩散度试验表明:灰砂比 1:6 的分级尾砂及浸出渣充填砂浆质量浓度增大,扩散度减小,当质量分数超过 71%时,扩散度小于 200 mm;证明模拟结论最佳质量分数 65%~68%是合理的。同时,文献[1]和[8]表明在同等流量下浓度越大、充填倍线越大,阻力损失越大;且阻力损失随管径增大减小与本次模拟试验结果一致,这也验证了模拟试验的正确性。

5 最大流速 $v_{\max}$ 的数值分析和模型验证

文献[10]和[12]指出管道最大流速往往出现于弯管处,管道最大流速是造成管道磨损重要的原因之一,流速越大对管道磨损也越严重^[15],但前人在这方面的研究成果较少,基于 CFD 技术,综合分析 3 个影响因素与最大流速 $v_{\max}$ 的关系。

在表 8 的基础上建立预测模型:

$$v_{\max} = a_0 + a_1 N^3 + a_2 N^2 + a_3 N + a_4 D^2 + a_5 D + a_6 c^2 + a_7 c \quad (8)$$

式中: a_0 、 a_1 、 a_2 、 $\cdots$ 、 a_7 分别为待求系数。

依据表 3 的试验数据,采用 Minitab 软件对最大流速 v 与充填倍线 N 、充填管直径 D 、质量浓度 c 的预测模型进行数值分析,可得它们的关系表述为

$$v_{\max} = -86.9 - 0.103N^3 + 1.24N^2 - 4.51N + 0.000747D^2 - 0.242D - 203c^2 + 305c \quad (9)$$

为分析所建模型的符合程度,将最大流速的方差列于表 8,表中平方表示为 S_S ; 均方差表示为 S_M ; 拟合过程的确定系数表示为 P ; S 、 $R-S_q$ 、 $R-S_q(\text{调整})$ 是和拟合程度有关的数据^[16]。计算得: $S=0.480362$,

表 9 最大流速预测表

Table 9 Predict maximum flow velocity

Studied case No.	Backfilling times line, N	Pipeline diameter, D/mm	Slurry concentration, $c/\%$	Maximum flow velocity		
				Theoretical calculation/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Actual analog value/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Differential analysis/ $\%$
1	3	110	0.65	3.21	3.45	6.97
2	3	120	0.65	2.51	2.92	14.13
3	3	120	0.68	3.56	3.29	7.6
4	4	110	0.68	4.26	3.66	14.07
5	4	110	0.65	3.21	3.44	6.71%

表 8 方差分析

Table 8 Analysis of variance

Source of variance	degree of freedom	S_S	M_S	F	P
regression	7	47.2737	6.7534	29.27	0
Residual error	17	3.9227	0.2307		
Sum	24	51.1964			

$R-S_q=92.3\%$, $R-S_q(\text{调整})=89.2\%$ 。

从最大流速 $v_{\max}$ 与充填倍线 N 、充填管直径 D 、质量浓度 c 的试验结果可以发现:

1) 相关性系数 R^2 为 92.3%, 且调整的 R^2 为 89.2%, 这两个值都表明最大流速 $v_{\max}$ 模型(1)与试验数据拟合效果很好; 方差分析表中的 P 值(0)小于 0.05 与残差分析的 P 值(0.524) 大于 0.05 显示此回归过程拟合模型在 α 水平为 0.05 时具有显著统计意义; 因此, 数据回归最大流速模型成立, 可用来较好地预测最大流速 $v_{\max}$ 。

2) 最大流速 $v_{\max}$ 与充填倍线 N 、充填管直径 D 、质量浓度 c 的数值拟合残差正态概率图可以看出残差服从正态分布如图 3 所示(图中 A 、 P 为 Anderson-darling 正态检验的平方值和确定系数)。

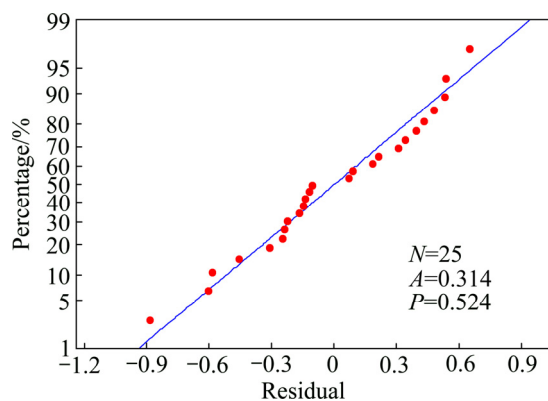


图 3 预测模型残差图

Fig. 3 Residual of predictive model

使用得到的模型式(8), 对得到的最终 5 组合理参数的试验结果进行验证:

从表9中可以看出,最大流速的预测计算模型与试验模拟值相差不大,其差率都在15%以下,表明建立的预测计算模型可以用来预测最大流速。

6 实例分析

取充填倍线 N 为 4.0, 充填管径 D 为 110 mm, 质

量分数 c 为 68% 的组合进行分析, 通过速度云图可以发现, 最大流速线由管道中心线向管道内下方向偏移, 且最大流速出现在转弯处偏下位置, 为 3.66 m/s, 按照速度超过 3 m/s 统计, 在弯管截面内超过了的一半面积; 由全压云图发现, 进口处全压最大, 出口处全压最小; 动压变化趋势与速度基本一致, 最大动压线由管道中心线向管道内下方向偏移, 且最大动压同样出现在转弯处偏下位置。

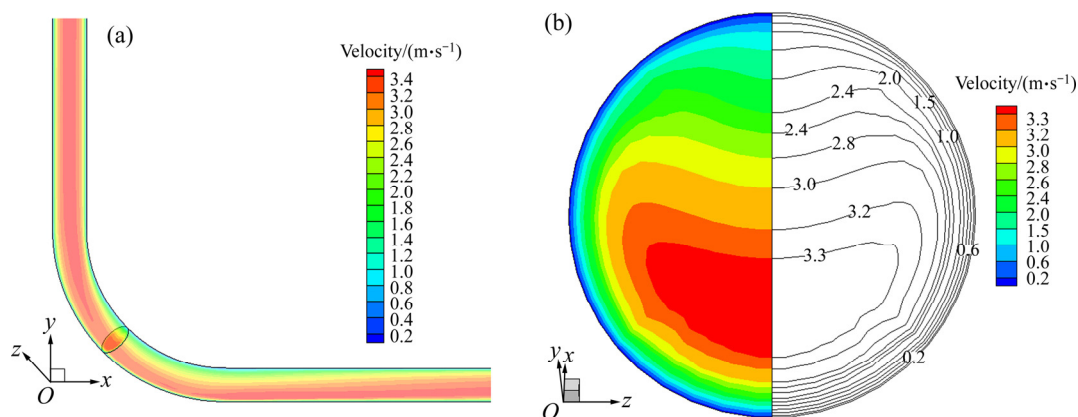


图4 全管和弯管截面速度云图

Fig. 4 Velocity cloud picture of whole pipeline(a) and cross section of elbow(b) ($y=x$)

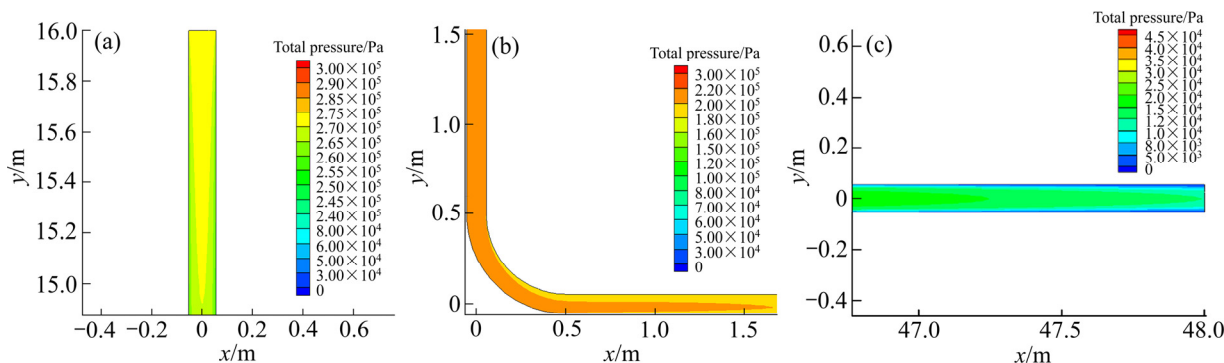


图5 入口、弯管和出口的全压云图

Fig. 5 Total pressure cloud picture of inlet(a), elbow(b) and outlet(c)

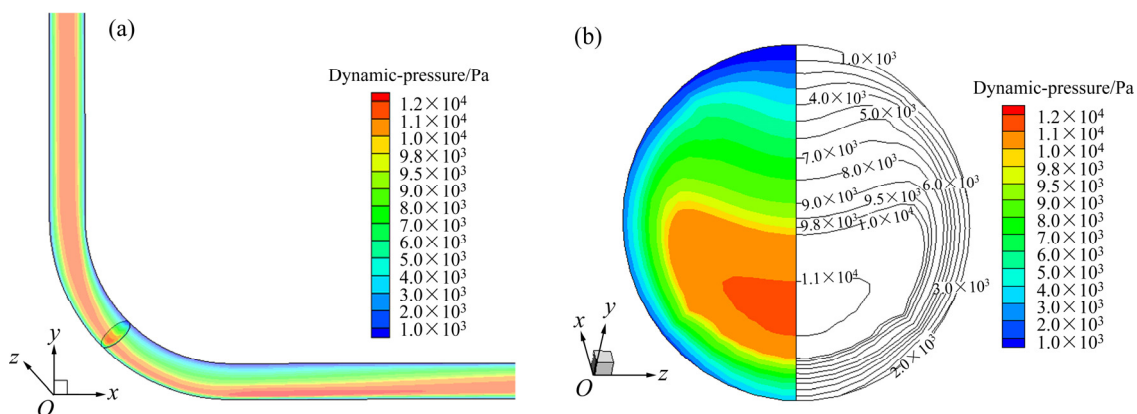


图6 全管和弯管截面动压云图

Fig. 6 Dynamic pressure cloud picture of whole pipeline(a) and cross section of elbow(b) ($y=x$)

7 工业实现场图

凡口铅锌矿狮岭南深部充填管道系统实际充填倍线为 4, 使用管径为 110 mm 的管道输送质量浓度为 68% 的充填砂浆, 保证了年产 150 万 t 左右的矿量, 充填管网的稳定性为矿山的高效开采提供了保障。



图 7 深部充填管道弯管图

Fig.7 Elbow of deep backfilling pipeline

8 结论

1) 通过正交设计进行了 25 组试验, 并对充填管径 D 、充填倍线 N 、质量浓度 c 这 3 个因素进行敏感性分析, 结合极差分析结果得到当以沿程阻力损失 P 或者弯管处最大速度 $v_{\max}$ 为判别因素时, 敏感性均为 $D > c > N$, 通过方差分析得影响因子的显著程度, 结合置信区间 $f_{0.05}$ 、 $f_{0.01}$ 与 F 值对比, 可知以沿程阻力损失 P 、最大流速 $v_{\max}$ 为判别因素时, 三因素显著性排序皆为 $D > c > N$, 3 个因素的影响皆高度显著。

2) 以凡口铅锌矿深部充填管道系统为基础, 以灰砂比 1:6 的充填砂浆为研究对象, 当保持充填量 Q_h 为 $90 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 研究了 3 个因素变化对于沿程阻力损失、最大流速的影响; 得到最佳的充填倍线 N 为 3.0~4.0, 质量分数 c 取值 65%~68%, 最佳充填管径 D 为 110~120 mm, 通过计算最大速度, 最后筛选剩下 5 组最佳组合。

3) 以 CFD 模拟试验为基础, 并结合数值分析方法, 探讨了最大流速的预测计算模型, 设计试验验证了该模型, 差率都在 15% 以下, 预测结果较好, 可以用来预测最大流速, 对于判断最大流速是否满足充填要求, 对于充填管网参数的选取有指导意义。

4) 研究成果不仅可以对于充填管网参数优化时的最佳充填倍线、充填管径、质量浓度的选择提供理论支持, 还可以对预测最大流速, 预防爆管、减弱管道磨损等提供技术支持。

REFERENCES

- [1] 王新民, 古德生, 张钦礼. 深井矿山充填理论与管道输送技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2010: 1-3.
WANG Xin-min, GU De-sheng, ZHANG Qin-li. Theory of backfilling and pipeline transportation technology in deep mines[M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 1-3.
- [2] LU Zeng-xiang, CAI Mei-feng. Disposal methods on solid wastes from mines in transition from open-pit to underground mining[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 16: 715-721.
- [3] 刘晓辉, 王国立, 赵占斌, 王少勇. 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.
LIU Xiao-hui, WANG Guo-li, ZHAO Zhan-bin, WANG Shao-yong. Study on the flow resistance characteristics of structure fluid backfilling slurry based on loop pipe testing[J]. China Molybdenum Industry, 2016, 40(5): 20-23.
- [4] CHEN Xin, ZHOU Jian, CHEN Qiu-song, SHI Xiu-zhi, GOU Yong-gang. CFD Simulation of pipeline transport properties of mine tailings three-phase foam slurry backfill[J]. Minerals, 2017, 7: 149.
- [5] 羊羽翔, 付建新, 宋卫东. 充填管道布置方案优化中的数值模拟分析[J]. 黄金, 2014, 35(8): 37-40.
YANG Yu-xiang, FU Jian-xin, SONG Wei-dong. Numerical simulation in analysis of the optimization of filling pipe arrangements[J]. Gold, 2014, 35(8): 37-40.
- [6] 李鹏程, 韩文亮, 田 龙. 高浓度管道输送参数计算模型

- 的研究[J]. 金属矿山, 2005(4): 60–62.
- LI Peng-cheng, HAN Wen-liang, TIAN Long. Study of model for calculating transportation parameters of pipelines with hyper concentration flow[J]. Metal Mine, 2005(4): 60–62.
- [7] CHEN Xin, SHI Xiu-zhi, ZHOU Jian, CHEN Qing-song, YANG Chao. Feasibility of recycling ultrafine leaching residue by backfill: Experimental and CFD approaches[J]. Minerals, 2017, 7(4): 54.
- [8] 张修香, 乔登攀. 粗骨料高浓度充填料浆的管道输送模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(1): 258–266.
- ZHANG Xiu-xiang, QIAO Deng-pan. Simulation and experiment of pipeline transportation of high density filling slurry with coarse aggregates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(1): 258–266.
- [9] 吴迪, 蔡嗣经, 杨威, 王文潇, 王章. 基于CFD的充填管道固液两相流输送模拟及试验[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(7): 2133–2140.
- WU Di, CAI Si-jing, YANG Wei, WANG Wen-xiao, WANG Zhang. Simulation and experiment of backfilling pipeline transportation of solid-liquid two-phase flow based on CFD[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7): 2133–2140.
- [10] WANG Xin-min, ZHAO Jian-wen, XUE Jun-hua, YU Guo-feng. Features of pipe transportation of paste-like backfilling in deep mine[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(5): 1413–1417.
- [11] ZHANG Qin-li, CUI Ji-qiang, ZHENG Jing-jing, WANG Xin-min, WANG Xian-lai. Wear mechanism and serious wear position of casing pipe in vertical backfill drill-hole[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(11): 2503–2507.
- [12] WU Ai-xiang, RUAN Zhu-en, WANG Yi-ming, YIN Sheng-hua, WANG Shao-yong, WANG Yong, WANG Jian-dong. Simulation of long-distance pipeline transportation properties of whole-tailings paste with high sliming[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(1): 141–150.
- [13] 邓代强, 高永涛, 杨耀亮, 吴顺川. 基于流体力学理论的全尾砂浆管道输送流变性能[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(11): 1380–1384.
- DENG Dai-qiang, GAO Yong-tao, YANG Yao-liang, WU Shun-chuan. Rheological properties of full tailings slurry in pipeline transportation based on the hydromechanics theory[J]. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2009, 31(11): 1380–1384.
- [14] 杨超, 史秀志, 周健, 卢二伟. 超细粒级浸出渣充填配比试验研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(5): 1942–1947.
- YANG Chao, SHI Xiu-zhi, ZHOU Jian, LU Er-wei. Experimental study over the backfilling matching ratio of the super fine particles' leaching residue[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(5): 1942–1947.
- [15] 张钦礼, 刘奇, 赵建文, 刘贱刚. 深井似膏体充填管道的输送特性[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(11): 3190–3195.
- ZHANG Qin-li, LIU Qi, ZHAO Jian-wen, LIU Jian-gang. Pipeline transportation characteristics of filling paste-like slurry pipeline in deep mine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(11): 3190–3195.
- [16] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 周宗红, 梁维, 郭延辉, 程涌, 杨八九. 砾石土层中注浆扩散参数的研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): s397–s402.
- YANG Zhi-quan, NIU Xiang-dong, HOU Ke-peng, ZHOU Zong-hong, LIANG Wei, GUO Yan-hui, CHEN Yong, YANG Ba-jiu. Study of grouting diffusion parameters in gravel soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): s397–s402.

Parameter optimization and transportation characteristics of backfilling pipe network based on CFD

ZHANG Zong-guo, SHI Xiu-zhi, LIN Xue-fei

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The orthogonal experiment and the computational fluid dynamics technology(CFD) based on three influence factors including backfilling times line(N), pipeline diameter(D), slurry concentration(c) were estimated, which was used to study the parameter optimization of backfilling pipe network and the transportation characteristics of backfilling slurry. And then, the test results of 25 groups were analyzed by the means of range, variance and regression analysis, and based on numerical analysis, the formulation was established for predicting the maximum flow velocity. The results show that the sensitivity, the significance degree ranking of the resistance loss and the maximum flow velocity all meet the relationship of $D > c > N$, all of these three factors are significant. The best proportioning scheme is the backfilling times line N of 3.0–4.0, the pipeline diameter D of 65%–68%, the slurry concentration c of 110–120 mm, after screening, the five combinations left in the end. The effects of three factors on resistance loss and maximum flow velocity were studied, and the formulation was established for predicting the maximum flow velocity. The prediction model is valid by verifying with the five groups, and the difference between the calculated values of the model and the experimental simulation values is below 15%.

Key words: filling method; computational fluid dynamics; backfilling pipe network; numerical analysis

Foundation item: Project(51874350) supported by the General Project of National Natural Science Foundation of China;
Project(2017YFC0602902) supported by the National Basic Research Development Program of China;
Project(41807259) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2018-10-15; **Accepted date:** 2019-06-15

Corresponding author: SHI Xiu-zhi; Tel: +86-13974801752; E-mail: baopo@csu.edu.cn

(编辑 李艳红)