

高浓度超细全尾砂充填料浆管道输送阻力模型

张钦礼,姜志良,王石,陈秋松,朱阳亚,万孝衡

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

摘要 为准确计算某矿山高浓度超细全尾砂充填料浆管道输送阻力损失,在固-液两相流理论的基础上,综合全尾砂充填料浆管道输送阻力影响因素,通过因次分析法构建高浓度超细全尾砂充填料浆管道输送阻力模型。运用计算流体动力学方法(CFD)研究充填料浆体积浓度、流速、管道直径、固体混合料密度等因素对管道输送阻力的影响,得到360组管道阻力损失值;采用最小二乘法回归计算管道输送阻力模型系数,并抽取4组常用工况点对计算模型进行误差分析,根据回归系数显著性检验方法,得到各因素的影响程度关系。计算模型结果与泵送环管实验的误差在5%左右,能满足本矿山充填系统设计需要。

关键词 超细全尾砂;管道输送阻力;Fluent数值模拟;因次分析法

中图分类号 TD853

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.24.007

Pipeline Resistance Model of the Filling Slurry Transportation with High Concentration and Superfine Total Tailing

ZHANG Qinli, JIANG Zhiliang, WANG Shi, CHEN Qiusong, ZHU Yangya, WAN Xiaoheng

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

Abstract In order to accurately calculate the pressure loss in a filling pipeline with superfine total tailing and high concentration slurry in a mine, on the basis of the solid-liquid two-phase flow theory, the factors that affect the backfilling pipeline resistance of the total tailing slurry are analyzed, to obtain a calculation model of the pipeline transportation resistance with a high concentration and superfine total tailing slurry through the dimensional analysis. According to the method of the computational fluid dynamics (CFD), the effects on the filling pipeline resistance of some factors, like the slurry volume concentration, the flow rate, the pipe diameter, the solid mixture density and others, are evaluated, 360 groups of the pipeline resistance loss values are obtained; Using the least squares and linear regression method, the parameters in the transportation resistance model are calculated. With four common operating points selected, an error analysis of the calculation model is made, and according to the method of the regression coefficient significance test, the degree of the influence on the pipeline resistance loss of each factor is obtained finally. The error of the calculation model results against those of the pumping experiment with loop is around 5%, so it could meet the needs of the engineering design and can be used to reduce the pipe resistance.

Keywords superfine total tailing; pipeline transportation resistance; Fluent numerical simulation; dimensional analysis method

随着充填采矿法的在矿山开采应用比例的逐步提高,充填系统的合理建造与安全操控成为矿山使用充填采矿法的关键,而在整个充填系统中,管道输送系统是主要环节之一^[1]。其中的阻力损失是重要的管道输送水力参数,它直接

影响到充填系统的设计与工程应用^[2]。中国多个矿山的充填输送管道曾经发生严重的堵塞、爆裂和磨损事故,对生产造成过极大的影响,并且导致巨大的经济损失。事故发生的主要原因是充填料浆管道输送阻力计算不够准确,充填料浆技

收稿日期:2014-04-08;修回日期:2014-06-10

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAB32B03)

作者简介:张钦礼,教授,研究方向为采矿与充填技术,电子信箱:zhangqinlicn@126.com;姜志良(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为深井充填理论与技术,电子信箱:wind289556382@163.com

引用格式:张钦礼,姜志良,王石,等.高浓度超细全尾砂充填料浆管道输送阻力模型[J].科技导报,2014,32(24):51-55.

术参数不匹配,导致充填系统的设计不够合理,造成管道料浆流速过快或过慢。

充填料浆的管道输送是一种典型的固-液两相流动,料浆在管道中的流动规律与料浆浓度和流速等因素紧密相关^[3]。目前对于水力输送的阻力计算,还只限于根据一定的实验资料整理出半理论半经验计算公式,由于实验条件与使用的输送物料不同,导致公式在结构形式上有很大的差别,工程适用性较差。比如金川公式和陕西省水利科学研究所公式^[4],主要针对较小充填管径及粒径较粗的水砂充填料的情况,而对粒径细、比重大或浓度高的砂浆误差较大。同时,传统的两相流流体力学研究方法主要依赖经验分析和实验研究^[5],其研究方法受到了设备和成本等方面的限制,但是随着计算机技术的发展,在经典流体力学与数值计算方法的基础上,形成了计算流体力学(CFD)。CFD通过计算机数值计算和图像显示方法,在时间和空间上定量地描述流场的数值解,以获得理想的研究结果,这种方法解决了传统两相流研究在设备和成本等方面条件的限制。

某矿山拟采用高浓度超细全尾砂充填料浆进行充填开采,本文采用因次分析法建立高浓度超细全尾砂管道输送阻力模型,利用数值模拟代替实物模型试验,将数值模拟的结果数据代替实物试验的测量数据,通过对CFD模拟数据的拟合确定阻力公式的系数或者指数。

1 模型构建

1.1 基本技术参数

为了给数值模拟的基本参数选取提供依据,测定全尾砂的粒径、级配等数据,并对料浆坍塌度、坍塌扩散度和稠度等指标进行试验。全尾砂颗粒组成及分析见表1,表明全尾砂粒度较细,0.075~0.005 mm范围内颗粒占比达57%,中值粒径仅为0.062 mm,远小于一般矿山所用充填尾砂粒度,属于超细全尾砂,综合考虑技术和经济因素,本矿山充填系统配比参数见表2。

表1 全尾砂不同粒径(mm)组成

Table 1 Different particle size (mm) of the total tailing

各粒径组含量百分数/%							
5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.005	d_{50}/mm	比重
	0.5	0.25	0.075	0.05	0.005		<0.005
0.3	9.1	6.8	10.2	19.2	22.2	34.8	0.062 2.83

表2 矿山充填系统推荐配比

Table 2 Recommended ratio of mine filling system

充填目的	灰砂比	质量浓度/%	体积浓度/%
打底,胶面	1:6	70~72	49.2
第一步人工矿柱	1:6	70~72	49.2
第二步矿房充填	1:12~1:15	70~72	42.8

经测定,推荐配比充填料浆表观比浓度达到90%左右,料浆属高浓度浆体;坍塌度、坍塌扩散度和稠度等指标表明

推荐配比参数充填料浆是典型的似膏体^[6],具有膏体一样的结构流输送特性,这种特性有利于减少充填体泄水水量,提高充填体强度和接顶充填率,此外又具有比膏体优越的、适中的采场流动性,这有利于提高采场充满率。

1.2 模型建立与推导

高浓度超细全尾砂管道输送阻力影响因素包括:管道直径 D^7 、管壁粗糙度 ε 、全尾砂颗粒直径 $d_s^{[8]}$ 、清水密度 ρ 、流速 $v^{[9]}$ 、全尾砂密度 ρ_s 、全尾砂颗粒形状系数 ϕ 、全尾砂颗粒级配系数 φ 、全尾砂浆体体积浓度 $C_v^{[10]}$ 、浆体黏度 $\mu^{[11]}$ 、重力加速度 g 。

以水力坡度 i 作为管道阻力损失的衡量标准,根据阻力系数 λ_m 与上述管道输送阻力影响因素之间的关系,构造阻力系数 λ_m 和影响因素的无量纲乘积 $\pi^{[12]}$ 。

各物理量之间关系的函数形式为

$$f(\lambda_m, D, \varepsilon, v, \mu, \rho, \rho_s, g, d_s, C_v, \phi, \varphi) = 0 \quad (1)$$

根据本矿山全尾砂特性,本次计算模型作简化:

1) C_v 与 μ 密切相关,可以写成多项式形式

$$\mu = 1 + k_1 C_v + k_2 C_v^2 + k_3 C_v^3 + \dots \quad (2)$$

体积浓度越大,所取的项数越多,因此, μ 对阻力损失的影响可用 C_v 替换。

2) 由于 ε 对阻力损失的影响很小,在雷诺系数 Re 不是很大的情况下,可近似认为 i 与 ε 无关,按水力光滑管计算。

3) 本矿山全尾砂颗粒多在5~100 μm ,因此 d_s 的影响可以忽略。

4) 由于忽略 d_s 的影响,可暂不考虑 ϕ 和 φ 的影响。

5) g 体现重力的作用,不能忽略。

因此,式(1)可简化为

$$f(\lambda_m, D, v, C_v, \rho, \rho_s, g) = 0 \quad (3)$$

在式(3)中选取 ρ 、 g 、 D 作为基本变量,采用 π -定理求解 λ_m ,得到函数关系式

$$f\left(\lambda_m, \frac{v}{\sqrt{gD}}, S, C_v\right) = 0 \quad (4)$$

其中 $S = \rho_s / \rho$ 。

根据因次分析法的运算法则,将两相流中常用的准则数—— Fr 数,即 $Fr = v^2 / gD$,代入式(4)得

$$f(\lambda_m, Fr, S, C_v) = 0 \quad (5)$$

式(5)可表示为

$$\lambda_m = k_1 Fr^{k_2} S^{k_3} C_v^{k_4} \quad (6)$$

式中 $k_1 \sim k_4$ 为待定系数,由实验数据确定。

由此建立高浓度超细全尾砂充填料浆管道输送阻力(水力坡度 i)的计算模型:

$$\begin{cases} i = \lambda_m \frac{v^2}{2gD} \\ \lambda_m = k_1 Fr^{k_2} S^{k_3} C_v^{k_4} \end{cases} \quad (7)$$

式中, i 为水力坡度, $\text{mH}_2\text{O}/\text{m}$ 。 $1 \text{ mH}_2\text{O}/\text{m} = 9.8 \times 10^3 \text{ Pa}/\text{m}$ 。

2 数值模拟分析

计算机模拟技术的发展为管道输送充填工艺及其流体

动力学等复杂问题提供了有效的分析方法和更加直观的结果。本文利用流体分析软件Fluent(图1)模拟充填管道自流输送各有关参数,如流速、压力等,为高浓度超细全尾砂管道输送阻力计算提供技术支持。

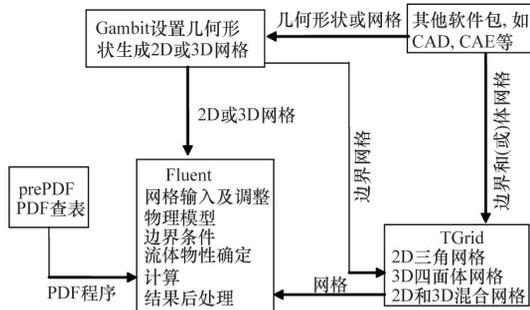


图1 基本程序结构示意图

Fig. 1 Diagram of basic program structure

2.1 模拟因素水平选取

矿山充填需要浆体有一定的流动性,纯粹意义上的结构流并不适合矿山充填,最理想的充填浆体是既有一定的流动性,又不易离析的似膏体^[13]。因此根据临界流速选取合适的工作流速,使模拟因素水平满足管道输送系统的可靠性要求。利用杜拉德公式^[14]估算充填料浆临界流速 v_c 为0.97 m/s。

根据全尾砂充填料浆基本技术参数及临界流速,确定料浆流速、管道直径、混合料密度和料浆体积浓度的因素水平(表3)。

表3 影响因素水平

Table 3 Influencing factors

水平	影响因素			
	流速 v /($m \cdot s^{-1}$)	管径 D /mm	混合料密度 S /($t \cdot m^{-3}$)	料浆体积浓度 C_v /%
1	1.5	100	2.6	41
2	2.0	110	2.8	44
3	2.5	120	3.0	47
4	3.0	130	—	50
5	3.5	140	—	—
6	—	150	—	—

2.2 Fluent数值模拟分析

基于Fluent软件的局限性和矿山充填管道输送的复杂条件^[15],管道采用2D平面模型建模,使用直角弯管连接,管道总长500 m,充填倍线为5(图2)。

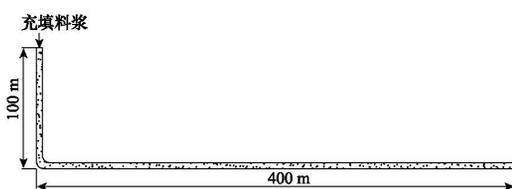


图2 充填管道几何模型示意

Fig. 2 Geometry model of the filling pipe geometry

根据模拟因素水平,定义材料属性、设置初始条件,经过迭代计算后,结果如图3和图4所示。在进口处管道压力分布比较均匀,只在接近管壁处有压力梯度,而在出口处料浆受到重力作用影响,其压力梯度向重力方向的管壁偏移。

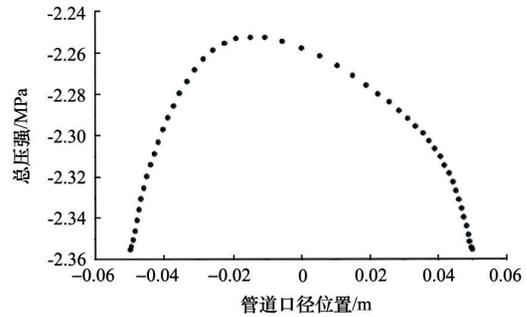


图3 管道出口断面总压分布

Fig. 3 Total pressure distribution of the pipe outflow

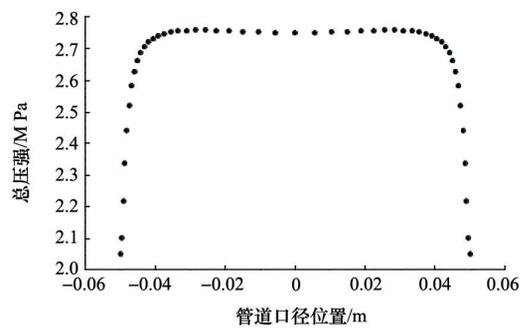


图4 管道进口断面总压分布

Fig. 4 Total pressure distribution of the pipe inlet

在操作条件中设定弯管处的压力为零,忽略重力势能影响,出口压力的绝对值即为整个水平管道输送的沿程阻力损失值。管道总压最大值为627588 Pa,最小值为-2357509 Pa(图5),水平管道的沿程阻力损失为2357509 Pa。

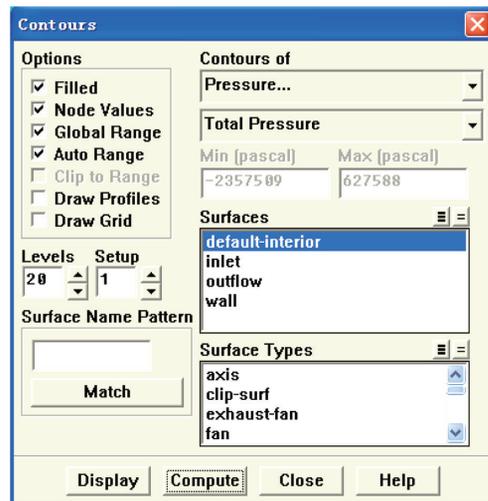


图5 管道压力显示图

Fig. 5 Interface of the pipe pressure

采用全面实验法,对影响因素的各个水平进行数值模拟,得到360组阻力损失实验数据,其部分结果表4。

表4 部分阻力损失模拟结果

Table 4 Partial simulation results of the resistance losses

工作流 速 v /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	管道 直 D /mm	两相流 准则数 Fr	混合料 密度 S /($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	料浆体积 浓度 C /%	阻力损 失值 /MPa
1.5	100	2.296	3.0	41	0.148
1.5	100	2.296	3.0	44	0.292
1.5	100	2.296	3.0	47	0.436
1.5	100	2.296	3.0	50	0.145
2.0	100	4.082	2.6	41	0.049
2.0	100	4.082	2.6	44	0.388
2.0	100	4.082	2.6	47	0.580
2.0	100	4.082	2.6	50	0.776
2.0	100	4.082	2.8	41	0.196
2.0	100	4.082	2.8	44	0.388
2.0	100	4.082	2.8	47	0.584
2.0	100	4.082	2.8	50	0.776

3 实例验证

3.1 管道输送阻力模型求解

根据数值模拟实验获得的数据,由线性回归的方法,求得管道输送阻力模型的待定系数。假设因变量 Y ,受到自变量 X_1, X_2, \dots, X_m 的共同影响,共做 n 次实验。 X_{ik} 表示自变量 X_i 在第 k 次实验时的取值, Y_k 表示因变量 Y 在第 k 次实验时的结果。根据最小二乘法原理^[6],可以得到

令

$$\begin{cases} L_{ij} = \sum_{k=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_i)(X_{jk} - \bar{X}_j) \\ L_{i0} = \sum_{k=1}^n (X_{ik} - \bar{X}_i)(Y_k - \bar{Y}) \quad i, j = 1, 2, \dots, m \\ L_{00} = \sum_{k=1}^n (Y_k - \bar{Y}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n X_{ik} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_k \quad (10)$$

如果 Y 与 X_i 之间有线性关系,回归方程为

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_m X_m \quad (11)$$

回归系数 b_1, b_2, \dots, b_m 由下列方程组求出:

$$\begin{cases} L_{11}b_1 + L_{12}b_2 + \dots + L_{1m}b_m = L_{10} \\ L_{21}b_1 + L_{22}b_2 + \dots + L_{2m}b_m = L_{20} \\ \vdots \\ L_{m1}b_1 + L_{m2}b_2 + \dots + L_{mm}b_m = L_{m0} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1m} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{m1} & L_{m2} & \dots & L_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{10} \\ L_{20} \\ \vdots \\ L_{m0} \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

常数项 a 为

$$a = \bar{Y} - \sum_{i=1}^m b_i \bar{X}_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

式(6)为非线性的静态模型,对其取对数进行线性化处理,可以得到

$$\ln \lambda_m = \ln k_1 + k_2 \ln Fr + k_3 \ln S + k_4 \ln C_v \quad (15)$$

利用已取得的360组实验模拟数据,由式(8)~式(14),得到系数 k_2, k_3, k_4 的矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} 135.8969924 & -1.249 \times 10^{-16} & 0 \\ -1.249 \times 10^{-16} & 0.666204189 & 2.08167 \times 10^{-16} \\ 0 & 2.08167 \times 10^{-16} & 97.57867439 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -50.083 \\ 0.006474 \\ 96.59917 \end{bmatrix} \quad (16)$$

由式(14)可得

$$\ln k_1 = \bar{\lambda}_m - k_2 \bar{\ln Fr} - k_3 \bar{\ln S} - k_4 \bar{\ln C}_v \quad (17)$$

由式(16)~式(17)得各系数值分别为

$$k_1 = 0.2425958, k_2 = -0.506723, k_3 = -0.968241, k_4 = 0.887347$$

则高浓度超细全尾砂充填料浆管道输送阻力模型可表示为

$$\begin{cases} i = \lambda_m \frac{v^2}{2gD} \\ \lambda_m = 0.2425958 Fr^{-0.506723} S^{-0.968241} C_v^{0.887347} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中各个未知数 Fr, S, C_v 对回归方程的贡献可以用偏回归平方和 P_1, P_2, P_3 表示^[7],根据式(16)可得 $P_1 = 34.89, P_2 = 0.63, P_3 = 76.83$,有 $P_3 > P_1 > P_2$ 。由此可知,料浆体积浓度对沉降速度影响最大,福祿数次之,混合料密度影响最小。

3.2 误差分析

为验证高浓度超细全尾砂管道输送阻力损失模型是否符合实际情况,本文取4个满足单系统充填能力的常用工况点,分别代入陕西省水力科学研究所公式、金川公式和本阻力模型计算水力坡度,并与泵送环管实验^[8]的结果进行比较,结果如表5所示。

表5 水力坡度计算结果比较

Table 5 Comparison of the calculation results

灰砂比	质量浓度/ $\%$	料浆体重/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积浓度/ $\%$	流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	陕西省水力科学研究所公式	金川公式	阻力损失模型	泵送环管实验
1:6	72	1.91	49.2	2.62	0.82	0.139	0.174	0.168
1:6	70	1.86	46.5	2.62	0.73	0.136	0.159	0.154
1:6	68	1.83	44.9	2.47	0.65	0.134	0.145	0.146
1:12	68	1.79	42.9	2.47	0.60	0.132	0.136	0.133

金川公式是以水砂、充填棒磨砂为实验材料,颗粒直径较粗,而本矿山全尾砂粒径相对较细,阻力模型计算结果与泵送环管实验值相比,在不同质量浓度条件下,误差均能控制在5%左右,适用性强;金川公式计算结果在低浓度时与泵送环管实验值基本一致,但在高浓度时存在较大误差,甚至达20%左右,适用性较差,存在一定局限性;而陕西省水力科学研究所公式计算结果误差较大,不适用于本矿山,因此确定该管道输送阻力模型的在不同输送条件下具有良好的适用性,同时证明了通过数值模拟获得的实验数据的可靠性。

4 结论

1) 分析全尾砂充填料浆管道输送阻力影响因素,运用因次分析法,提出高浓度超细全尾砂充填料浆管道输送阻力损失计算模型,该模型具有量纲和谐性。

2) 运用 Fluent 数值模拟软件探究阻力系数与其影响因素(料浆流速、管道直径、混合料密度、料浆体积浓度)之间的关系,得到各因素水平下的阻力损失值,然后采用最小二乘法及线性回归的方法求解管道阻力损失模型参数。

3) 抽取4组常用的工况点,经分析表明阻力损失模型计算结果与环管实验的误差均在5%左右,确定阻力损失模型能满足高浓度超细全尾砂充填料浆管道输送工程设计需要,证明使用 Fluent 流体动力学数值模拟软件对充填料浆管道固-液两相流输送进行模拟研究是可行的。

4) 应用回归系数显著性检验的方法,对料浆体积浓度 C 、费劳德数 Fr 、混合料密度 S 三项因素进行敏感性分析,得出其对于高浓度超细全尾砂充填料浆管道输送阻力影响程度的大小关系为: $C > Fr > S$,从而为今后充填管道输送系统的设计提供参考。

参考文献(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: 1-6.
Wang Xinmin, Gu Desheng, Zhang Qinli. Theory of backfilling activity and pipeline transportation technology of backfill in deep mines[M]. Changsha: Central South University Press, 2010: 1-6.
- [2] 吴迪, 蔡嗣经, 杨威, 等. 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): 40-44.
Wu Di, Cai Sijing, Yang Wei, et al. Simulation and experiment of backfilling pipeline transportation of solid-liquid two-phase flow based on CFD[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7): 40-44.
- [3] 王新民, 丁德强, 吴亚斌, 等. 膏体充填管道输送模拟与分析[J]. 中国矿业, 2006, 15(7): 91-96.
Wang Xinmin, Ding Deqiang, Wu Yabin, et al. Numerical simulation and analysis of paste backfilling with piping transport[J]. China Mining Magazine, 2006, 15(7): 91-96.
- [4] 赵建文. 充填系统技术研究与工艺流程设计书[R]. 长沙: 湖南中大设计院有限公司, 2011.
Zhao Jianwen. Technology research and process design of the filling system[R]. Changsha: Hunan Zhongda Design Institute Co. Ltd, 2011.
- [5] 张钦礼, 谢盛青, 郑晶晶, 等. 充填料浆沉降规律研究及输送可行性分析[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(1): 68-73.
Zhang Qinli, Xie Shengqing, Zheng Jingjing, et al. Sedimentation law research and transportation feasibility study of backfilling slurry[J]. 2011, 34(1): 68-73.
- [6] 王晓宇. 金川矿山废石-全尾砂高浓度充填料浆阻力模型研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
Wang Xiaoyu. Pulp resistance model research of waste rock-whole tailings and high concentration materials filling in Jinchuan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.
- [7] 耿俊俊. 龙首矿深部充填系统可靠性及扩能技术方案研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
Geng Junjun. Study of Longshou mine deep piping reliability and expansion technique project[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [8] 赵立娟. 不同粒径泥沙管道水力输送阻力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
Zhao Lijuan. A study on resistance characteristic of hydraulically transporting sands with different size in pipelines[D]. Nanjing: Hohai University, 2002.
- [9] 王新民, 张德明, 张钦礼, 等. 基于FLOW-3D软件的深井膏体管道自流输送性能[J]. 中南大学学报, 2011, 42(7): 2101-2107.
Wang Xinmin, Zhang Deming, Zhang Qinli, et al. Pipeline self-flowing transportation property of paste based on FLOW-3D software in deep mine[J]. Journal of Central South University, 2011, 42(7): 2101-2107.
- [10] 周知进, 刘爱军, 夏毅敏, 等. 颗粒组分特性对杨矿硬管输送速度的影响[J]. 中南大学学报, 2011, 42(9): 2692-2697.
Zhou Zhijin, Liu Aijun, Xia Yimin, et al. Influence of particles component properties on transporting speed in lifting pipeline[J]. Journal of Central South University, 2011, 42(9): 2692-2697.
- [11] 王洪武. 多相复合膏体充填料配比与输送参数优化[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
Wang Hongwu. Optimum material proportion and transportation parameter of multiphase complex paste backfill[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [12] 黄贯虹, 方刚. 系统工程方法与应用[M]. 广州: 暨南大学出版社, 2005.
Huang Guanhong, Fang Gang. System engineering method and application[M]. Guangzhou: Jinan University Press, 2005.
- [13] 王天刚, 黄玉诚, 李飞跃. 在稳定流状态下似膏体料浆流变特性研究[J]. 有色矿山, 2003, 32(6): 257-262.
Wang Tiangang, Huang Yucheng, Li Feiyue. Study on rheological characteristic of paste-like slurry under the condition of steady flow[J]. Nonferrous Mines, 2003, 32(6): 257-262.
- [14] 陶平凯. 黄沙坪矿深部开采充填管道输送参数计算与仿真[J]. 金属矿山, 2012, 435(9): 25-30.
Tao Pingkai. Pipe-conveying parameter calculation and simulation validation of deep mining filling system of hongshaping mine[J]. Metal Mine, 2012, 435(9): 25-30.
- [15] Bai H, Theuerkauf J, Gillis P A, et al. A coupled DEM and CFD simulation of flow field and pressure drop in fixed bed reactor with randomly packed catalyst particles[D]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(8): 4060-4074.
- [16] 廖异, 曾祥国. Hoek-Brown岩体非线性强度的线性化方法[J]. 中南大学学报, 2012, 43(12): 205-210.
Liao Yi, Zeng Guoxiang. Linearization method of non-linear strength of Hoek-Brown rocks mass[J]. Journal of Central South University 2012, 43(12): 205-210.
- [17] 解海卫. 粉煤灰浓浆管道流动特性与阻力特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
Xie Haiwei. Investigation on flow properties and resistance properties of condensed wet fly ash in pipeline[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [18] 李国政. 充填料浆环管试验计算机仿真应用的研究[J]. 黄金, 2008, 29(4): 52-58.
Li Guozheng. Computer simulation application research of circular canal filling pulp test[J]. Gold, 2008, 29(4): 52-58.

(编辑 季超)