

基于 Fluent 的充填料浆管道输送阻力模拟

陈建宏, 陈峤曦, 张钦礼, 李浩

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为了解高浓度浆体的流动特性, 结合流体动力学的理论和充填浆体的特点, 对充填浆体在不离析的条件下做流体质点、均质性和连续性的假设, 建立充填浆体管道输送的数学模型。结合某矿山工业试验的结果, 运用 Fluent 软件对浆体管道输送进行了阻力数值模拟, 通过模拟与实测结果的对比可看出, 两者误差在 5% 左右, 得出了浆体流速与沿程阻力损失之间的关系方程, 进而运用此模型计算得到该浆体管输自流的速度区间 1.82 ~ 2.23 m/s。利用数值模拟结果可以为充填系统管路的设计提供依据, 也可用来指导矿山的实际生产, 具有很好的实用价值和推广意义。

关键词 管道输送; 沿程阻力损失; 充填浆体; Fluent 软件; 临界流速

中图分类号 TD853

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.09.011

Computer simulation of filling slurry pipeline transportation using Fluent

CHEN Jianhong, CHEN Qiaoxi, ZHANG Qinli, LI Hao

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

Abstract In order to understand the flow characteristics of high concentration slurry, a mathematical model of filling slurry pipeline transportation is established by combining the fluid dynamics theory and the characteristics of the filling slurry under the assumption including fluid particle, uniformity and continuity in the case of no segregation. According to the result of a certain mine industrial test, a numerical simulation on the resistance of slurry pipeline transportation was made by the Fluent software. Through the comparison of simulation and measured results, the error was found to be around 5%. At the same time, the relationship between the slurry flow rate and loss of resistance along the way was obtained. The drift velocity range of slurry pipeline was calculated to be around 1.82~2.23 m/s by the above relationship and mathematical model. The numerical simulation results could provide a basis for the filling system piping design. Besides, they could be used to guide the actual mine production.

Keywords pipeline transportation; loss of resistance along the way; filling slurry; Fluent; critical flow velocity

充填系统^[1]包含地表充填站系统、管输系统、井下采区系统。一个合格的充填系统要求充填站和管输相匹配, 并且能满足矿山的生产能力, 充填体强度达标, 浆体能顺利通过管输系统流到采空区。然而, 由于充填浆体是材料来源复杂, 黏度较大的多相流, 使得充填浆体管道输送遇到了以下难题: 1) 浆体为不透明的混合物, 无法通过透明管形象地观察其在管道内的流动状态; 2) 浆体黏度, 屈服应力的测定需要

大量的实验, 用于测定水、油等黏度的黏度计对浆体不适用; 3) 对浆体在管道中的流速, 沿程阻力, 压力测量比较困难。

长时间以来, 人们对于高浓度浆体^[2]的流动特性认识不足, 管道输送的阻力损失多采用模拟实验方法确定, 即在实验室由管径较小的循环管道测定一定浓度及流速下管道的水力坡度。临界流速是通过在环形管道上观测到的不淤流速, 放大后应用于实际管道。目前, 对浆体管输的研究主要

收稿日期: 2015-01-06; 修回日期: 2015-03-23

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC09B02)

作者简介: 陈建宏, 教授, 研究方向为矿业经济、采矿、充填及矿山安全, 电子信箱: cjh@263.net

引用格式: 陈建宏, 陈峤曦, 张钦礼, 等. 基于 Fluent 的充填料浆管道输送阻力模拟[J]. 科技导报, 2015, 33(9): 64-68.

是先采用L管实验测浆体的基本参数,再运用环管实验测浆体的沿程阻力损失^[1],但是,环管实验需要耗费大量人力、物力和时间,并且测得的数据误差大,也不能观察管道内部浆体的压力分布和速度分布状况。由于环管实验误差大,会造成能用自流输送的系统设计成了泵压输送,造成资源和能源的浪费,或者需要泵送的系统设计成了自流输送,无法正常生产等问题。

随着计算机的发展及软件的完善,运用数值模拟对充填浆体的管道输送分析计算成为一种全新的研究手段。邓代强等^[4]运用Fluent软件对充填料浆的长距离输送问题进行了细致分析;张钦礼等^[5]结合因次分析法和数值模拟软件对高浓度超细全尾砂充填料浆的管道输送阻力问题进行了分析;李石林等^[6]运用固液两相流的数值模拟方法,研究了黏土胶结充填浆体管道输送特性。数值模拟方法具有成本低,耗时少,计算可靠的优点,针对浆体管道输送问题,运用数值模拟,不但可以得出沿程阻力损失的规律,而且还可以观察管道内部的浆体的流动状态,得到管道内浆体压力和流速分布。本文结合理论分析和Fluent等数学软件解决如下问题:1) 浆体在管道中沿程阻力的损失规律;2) 回答是否需要泵送;3) 找出浆体管道输送的流速区间。

1 充填浆体的基本假设

研究流体时要对流体物理实体加以模型化,使其有利于理论研究,更有利于找出流体运动或者平衡的规律。结合流体模拟软件的特点,进行充填浆体数值模拟时对浆体引入流体动力学的两个最基本的假设,即流体质点和连续介质^[7]的假设。

浆体流体质点假设是指组成浆体的各种组分宏观尺寸足够小,小到仪器无法测量,微观尺寸足够大,大于分子大小的数量级,从而不影响分子构成。连续介质假设,假定充填浆体是由无穷多个无穷小的形状任意的、紧密毗邻的、连绵不断的浆体质点组成的一种无间隙的连续介质。也就是说,所研究的流体都是均匀并且各向同性的。1753年,欧拉^[7]采用连续介质研究宏观流体的物理模型,把宏观流体看做是由无穷多流体质点组成的稠密而且无间隙的连续介质。

充填浆体是由废石、河砂、棒磨砂、尾砂、水泥、水等混合而成的,在对浆体进行研究时,如果将其各种成分分开来研究,过于复杂,并且目前没有一个合适的数学模型描述,因此在研究充填浆体时,借助已有的流体动力学理论,应该把浆体看成是由多种混合物组成的一种均质的、有其特有力学性质的物质。对于不同配比的充填浆体,由于所加的物料的数量以及物料本身的不同,在配制好的充填浆体上就表现在其密度、流动指数、黏度、初始屈服应力、稠度等力学参数的不同。从某种意义上讲,充填浆体可以看成是单一物质。在实际工业应用及实验中,都将充填浆体作为单一物质来考虑,经过大量的现场观察及实验证明,把充填浆体看成是单一均质体是可行的。在数值模拟方面,也只能把浆体看成是一种

均质的物质。

2 管道输送数值模拟

2.1 理论模型的建立

在做了以上假设后,充填浆体满足流体动力学的理论,因此其理论模型就是三大守恒定律,即质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。在流体力学里对应着连续性方程,运动方程(N-S)方程,伯努利方程,计算浆体的流动归根结底就是解算这3个方程组。由于这3个方程组比较复杂,极少量能求得精确解,因此,只能借助计算机求得其近似数值解。

充填浆体在管道中流动符合这3组方程,在工业应用中,浆体的管道输送分为自流输送和泵压输送,其原理是泵和浆体自重产生的压力要克服管道的阻力才能使浆体开始流动。从能量的角度说就是浆体在入口处的位能、压能、动能之和,应大于在出口处的位能、压能、动能和损失的机械能之和。如果取出口处所在的高为参考标高,则出口处的位能为零,可列出伯努利方程:

$$h + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h' \quad (1)$$

因为浆体的流动是定常,不可压,稳定的流动,管道密闭且管径不变,只有一个入口和一个出口,因此,流入的浆体等于流出的浆体,因此在式(1)中就有 $u_1 = u_2$,即入口平均速度等于出口平均速度,则伯努利方程化简为

$$h + \frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} + h' \quad (2)$$

式(1)、(2)中, h 为竖直段的长度, p_1, p_2 分别为入口和出口处总压, u_1, u_2 分别为入口和出口平均速度, γ 为浆体容重。

式(2)两边同时乘以 ρg 得到

$$\rho gh + p_1 = p_2 + \rho gh' \quad (3)$$

其中, ρ 为浆体密度。在工业应用中,管道入口和出口处都是一个大气压,则式(3)可变形为

$$P_E + \rho gh = f_i L_i \quad (4)$$

其中, P_E 为外力给浆体加的压力,泵送时则为泵压; f_i 为浆体管道输送的沿程阻力损失; L_i 为在 f_i 下对应的管道长度,式(4)则表示浆体恰好克服沿程阻力开始流动时的状态,实际应用中要求有

$$P_E + \rho gh \geq f_i L_i \quad (5)$$

才能使浆体顺利输送,即当浆体自重产生的压力和泵给浆体的压力之和大于浆体沿着管道的阻力损失时浆体能顺利输送。在应用中,泵压 P_E 由泵参数求得,垂直段和水平段长度易测得,而沿程阻力损失 f_i 成为浆体管道输送中的关键因素,需要结合工业试验和数值模拟求得 f_i 。

2.2 几何模型的建立

充填浆体管道输送的数值模拟采用建模软件Gambit^[8]进行三维建模和划分网格,采用计算流体力学软件Fluent计算。在工业试验中,质量分数78%的充填浆体不离析,其流

变曲线符合H-B模型^[9,10]。整个模型由垂直段、弯管、水平段组成,通过改变水平段与垂直段的长度改变充填倍线,从而模拟不同充填倍线下的浆体管道输送,模型如图1所示。

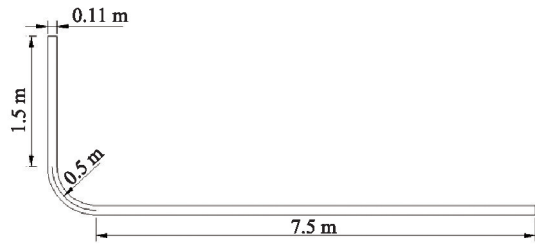


图1 管道输送数值模拟模型示意

Fig. 1 Diagram of pipeline transportation

2.3 浆体参数与模拟方案

在此次模拟中,选用某矿山工业试验的结果,充填浆体采用废石与尾砂质量比为6:4,水泥用量为260 kg/m³,质量分数为78%,在工业试验中,此浆体能顺利地管输到采场,浆体不离析,不分层。浆体的流动指数、稠度指数、屈服应力、黏度通过L管实验利用数学方法回归得到。浆体参数如下:充填倍线为5,质量分数为78%,密度2007.44 kg/m³,流动指数为1.004,屈服应力为48.105 Pa,黏度为1.056 Pa·s。

本次模拟实验充填管道的内直径为110 mm,管道的其他参数如图1所示,根据浆体初始流速的不同设计6组实验方案,方案1~方案6的初始流速分别为2.18、2.3、2.38、2.5、2.6、2.72 m/s。

2.4 边界条件

在L管实验中,已知浆体在管道入口处的平均流速,入口处压力,出口处压力,在选择边界条件时结合软件的特点,选

择浆体管道入口圆面速度和出口压力为一组边界条件,其余面定义为壁面。在竖直方向,考虑重力加速度。

2.5 结果分析

2.5.1 观测面的布置

在计算结果中,速度和压力沿着管道都存在着梯度,在描述压力损失和流速时,只能用加权平均压力和流速表示,因此就需要在管道内设置一些观测面,来统计观测面上的压力和流速。在模拟方案中,垂直段管道每0.5 m设置一个观测面,水平管道每1 m设置一个观测面。在模型中,以弯管的圆心所在处为原点坐标,竖直段以y坐标命名观测面,水平段以x坐标命名观测面,观测面的布置和命名如图2所示。

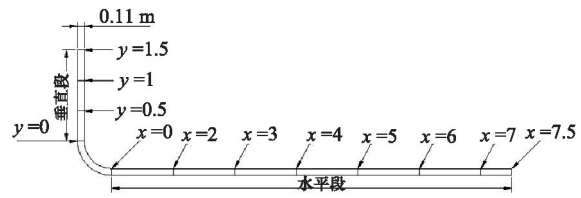


图2 观测面布置

Fig. 2 Layout of observation plane

2.5.2 速度分析

在入口段,速度沿着管道竖直方向增大,然后逐渐达到稳定。在弯管处,速度变化比较明显,靠近弯管圆心方向管壁处速度较小。在水平段,速度逐渐趋于稳定。在管道内,存在着明显的速度梯度,并且越接近管壁,由于管壁和浆体的摩擦存在,速度梯度越大,在管道中心的区域流速达到最大。入口处、弯管处、管道出口处速度及出口处速度分布如图3所示。

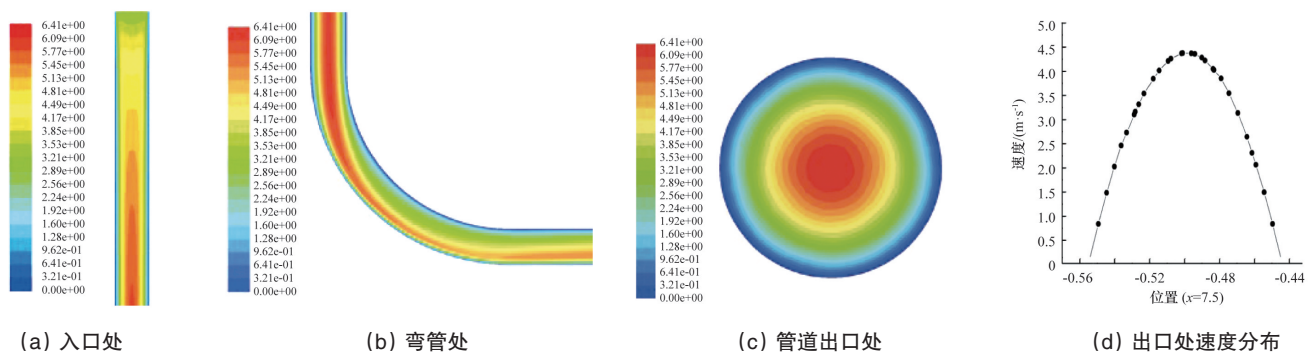


图3 入口处、弯管处、管道出口处速度分布

Fig. 3 Velocity distributions of inlet, elbows, outlet

2.5.3 沿程阻力分析

在管道垂直段,有重力加速度的存在,压力较大,由于浆体黏度较大,在流动过程中,压力逐渐减小。在弯管处,靠近弯管圆心方向一侧压力较小,在刚进入水平段(即弯管的发展段),压力波动较大,然后流动趋于稳定,压力逐渐呈现有规律变化,靠近管壁处压力小,管道中心压力大,这样的规律

与速度变化是一致的,这也与伯努利方程所描述一致,由于管道中的压力由动压(速度所产生的压力)和静压组成,而在管道中心处速度较大,因此动压较大。弯管处、出口处的总压云图总压云图如图4所示。

经过统计,将各观测面的加权平均压力绘制成直线图如图5所示。

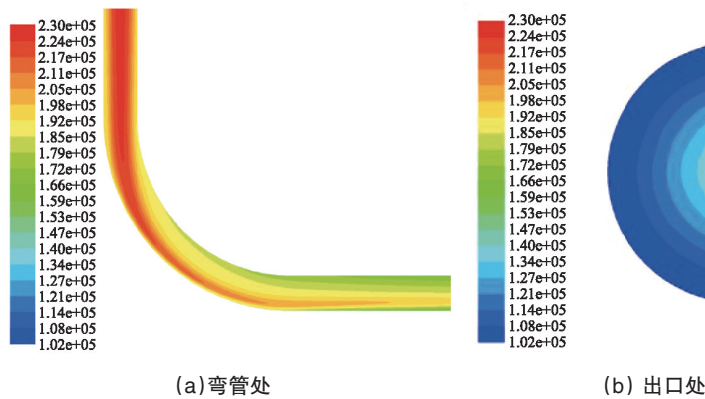


图4 弯管处及出口处总压云图

Fig. 4 Cloud of total pressures at the elbows and outlet

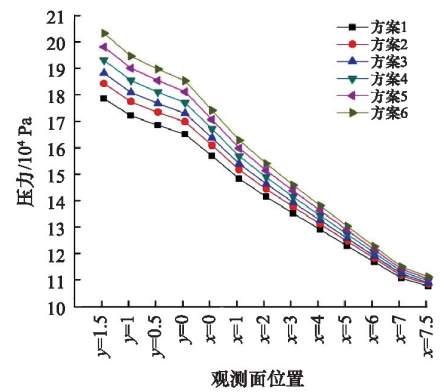


图5 观测面的压力变化

Fig. 5 Pressure changes of the layout

从图5可以看出,方案1~方案6各观测面上的压力都在增大,其原因是方案1~方案6的浆体的流速在增大。在 $y=1.5$ 到 $y=0$ 之间,对应的是模型中的垂直段管道,压力变化较小,在 $x=0$ 到 $x=7.5$ 之间对应的是水平段管道,压力变化较大,在 $y=0.5$ 到 $x=1$ 之间曲线有明显的变化,也就是对应的模型中的弯管段,说明在弯管段,压力变化有明显的突变。

经过统计分析,消除竖直段重力的影响,得到整个管道的沿程阻力损失如表1所示。

表1 沿程阻力损失
Table 1 Loss due to frictional resistance

方案	流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	阻力损失/ ($Pa \cdot m^{-1}$)	实测阻力损失/ ($Pa \cdot m^{-1}$)	误差/%
1	2.18	7780.23	8035.45	3.17
2	2.3	8090.25	8485.12	4.65
3	2.38	8308.25	8703.25	4.53
4	2.5	8584.45	8975.23	4.35
5	2.6	8860.01	9425.42	5.99
6	2.72	9135.55	10260.67	10.90

注:实测阻力损失通过环管试验获得。

由表1中数据可知,模拟与实测结果的误差在5%左右,其中方案6误差较大,为10.9%。对比数据还可得到实测结果都比模拟值偏大,这是因为在实际管道中,管壁的粗糙度、接头处的不光滑等因素都会造成沿程阻力的增大,而数值模拟无法考虑这些因素。对于方案6,其初始流速较大,管道输送产生的压差就比较大,造成测量误差较大。

为了得到流速与沿程阻力损失的关系^[8],利用分析软件Origin对表中数据进行回归,得到回归方程:

$$f = 3345.75 + 1750.65v^{1.198} \quad (6)$$

2.6 自流最大流速与最小流速计算

从阻力损失规律看出,在某一倍线下,阻力损失随速度的增大而增大,当速度增大到一定值时,垂直管内浆体自重产生的压力不足以克服管道沿程阻力^[11-14],此种情况下料浆

流速就是管道输送的最大自流速。当浆体在竖直管,或者在搅拌仓内的液面降低到某一高度时,浆体产生的压力不足以使浆体流动,浆体从流动到不流动时的液面对应的流速就是浆体可以管输的最小自流速^[15]。管输自流最大流速与最小流速计算方法如下。

1) 通过实测或者数值模拟找出沿程阻力损失与流速之间的关系如式(6): $f = 3345.75 + 1750.65v^{1.198}$ 。

2) 结合充填系统的特点,主要考虑搅拌槽稳定时的液面高度 h_1 和垂直管段高度 h_2 ,计算系统所能提供的压力 P , $P = \rho g(h_1 + h_2)$ 。这里 $h_1 = 2.5$ m, $h_2 = 2$ m,故 $P = 88528.104$ Pa。

3) 利用式(5), $P_e + \rho gh \geq f_i L_i$ (系统提供的压力大于或者等于浆体流到采场损失的压力)计算出临界(系统所允许的最大)压力损失 $f_i = 9047.33$ Pa/m。

4) 浆体能流动就需要最大压力损失要不大于压力损失 f_i ,然后通过解此方程就能得到管输的最大流速。将 f_i 带入到式(6),得到理论计算自流最大流速为2.68 m/s。

5) 当液面下降到1.1 m时发生滞流现象(即堵管现象),此时 $h_1 = 1.1$ m,重复上述方法1)~4),计算得到最小自流速度为1.517 m/s。

综上所述,当自流输送此浆体时,输送流速区间为1.517~2.68 m/s(在管径为110 mm的条件下)。工业应用中考虑到系统稳定因素,取保险系数1.2,在管径为110 mm的条件下,当输送流速超过2.23 m/s时应考虑泵送,流速低于1.82 m/s时自流输送就难以保证系统稳定,易发生堵管。

3 结论

结合某矿山工业试验的结果,通过对废石与尾砂比6:4,水泥用量260 kg/m³、质量分数78%的浆体管道输送的数值模拟计算,得出以下结论:

1) 得到了速度、阻力的云图,在管道内存在明显的速度梯度和压力梯度,在管道中心处,速度和压力均达到最大,且在弯管处,压力有明显的突变,并且浆体不是一过弯管就流动稳定,还要经过弯管的发展段,流动才能稳定。沿程阻力

模拟与实测结果的对比显示两者误差大都在5%左右,最大为11%。

2) 通过对不同流速下浆体的阻力损失的非线性回归,得出该浆体的沿程阻力损失与速度符合非线性关系: $f=3345.75+1750.65v^{1.198}$,运用这个关系可以预测该浆体在某个设计速度下的阻力损失。在管径为110 mm的条件下,得到此浆体自流输送的流速区间为1.82~2.23 m/s。

3) 通过室内实验测得浆体的黏度、屈服应力、流动指数等基本参数,然后利用数值模拟计算管输沿程阻力损失、管内流速、压力分布,把误差控制在一定范围内,用数值模拟来替代环管实验及大量耗时耗力的工业试验,既节省资金,又能直观地看到管道内部浆体速度、压力的变化情况。由于模拟与实测的误差存在,为了使系统更为安全的运行,可以给模拟结果乘以一个安全因子 λ_i 减小这种误差。利用数值模拟结果,可以为充填系统管路的设计提供依据,同时也可以用来指导矿山的实际生产。

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] 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.
- [3] Wang Xinmin, Li Jianxiong, et al. Rheological properties of tailing paste slurry[J]. Journal of Central South University of Technology, 2004, 11(1): 75-79.
- [4] 邓代强, 朱永建, 王发芝, 等. 充填料浆长距离管道输送数值模拟[J]. 安徽大学学报: 自然科学版, 2012, 36(6): 36-43.
Deng Daiqiang, Zhu Yongjian, Wang Fazhi, et al. Filling long distance slurry pipeline numerical simulation[J]. Journal of Anhui University: Natural Science, 2012, 36(6): 36-43.
- [5] 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.
Zhang Qinli, Jiang Zhiliang, Wang Shi, et al. Pipeline resistance model of the filling slurry transportation with high concentration and superfine total tailing[J]. Science and Technology Review, 2014, 32(24): 51-55.
- [6] 李石林, 冯涛, 王鹏飞, 等. 粘土胶结充填浆体管道输送特性试验与数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(6): 73-76.
Li Shilin, Feng Tao, Wang Pengfei, et al. Experimental and numerical simulation for pipeline transportation characteristics of clay paste in consolidation filling[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(6): 73-76.
- [7] 谢振华, 宋存义. 工程流体力学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 112-134.
Xie Zhenhua, Song Cunyi. Engineering fluid mechanics[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 112-134.
- [8] 李进良, 李承曦, 胡仁喜, 等. 精通 FLUENT6.3 流场分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009 1-68.
Li Jinliang, Li Chengxi, Hu Renxi, et al. Proficient in FLUENT6.3 flow field analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 1-68.
- [9] 王晓宇. 金川矿山废石全尾砂高浓度充填料浆管输阻力模型研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
Wang Xiaoyu. The studau of waste rock-total tailing high density slurry pipeline resistance model[D]. Kunming: Kunming University of the Science and Technology, 2010.
- [10] 张宗生. 金川矿山废石膏体配制与流变特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
Zhang Zongsheng. The study of waste fock fluid preparation and rheological in Jinchuan mine[D]. Kunming: Kunming University of the Science and Technology, 2008.
- [11] Boylu F, Dincer H, Atesok G. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal-water slurries[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(4): 241-250.
- [12] Heywood N, Alderman N J. Developments in slurry pipeline technologies [J]. Chemical Engineering Progress, 2003, 12(4): 36-43.
- [13] Kesimal A, Yillmaz E, Ercikdi B. Evaluation of paste backfill mixtures consisting of sulphide-rich mill tailings and varying cement contents[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(10): 1817-1822.
- [14] David H, Sebastian A, Radziszewski P. Pipe lining abrasion testing for Paste backfill operations[J]. Minerals Engineering. 2009, 22(12): 1088-1090.
- [15] 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]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(1): 68-73.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。