

固-液两相流充填管道输送冲蚀磨损数值研究

过江,张碧肖

中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083

摘要 为探究充填管道在输送过程中的冲蚀磨损机理,基于工程流体力学理论及颗粒输送力学模型,引入离散颗粒轨道模型、塑性冲蚀磨损模型,对某矿山复杂充填管路条件下浆体特性对管道冲蚀磨损影响进行研究。结果表明,浆体流速、黏度以及颗粒尺寸对管道冲蚀磨损影响显著,颗粒形状影响较弱。高流速下,弯管磨损最为严重,直管段磨损较轻且分布较为均匀,流速降低,主要磨损部位偏向弯管出口部位;弯管部位最大磨损值在 15° ~ 30° 以及 60° ~ 75° 之间;此外,粒径较小时,磨损严重程度随粒径增加而增大,粒径达到 $600\ \mu\text{m}$ 后,最大磨损值随粒径增加呈现下降趋势。

关键词 充填管道;冲蚀磨损;离散颗粒轨道模型;塑性冲蚀磨损模型;浆体特性

中图分类号 TD853

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.008

Numerical investigation of impact erosion in liquid-solid two-phase flow of the backfilling pipe

GUO Jiang, ZHANG Bixiao

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

Abstract Based on engineering fluid mechanics and the mechanical model of particle transportation, discrete particle model and ductile impact erosion model were applied for investigating pipe impact erosion influenced by slurry characteristics in complex backfilling pipeline in a mine, aiming to study the impact erosion mechanism of backfilling pipe during transportation. The results show that pipe impact erosion was largely influenced by slurry velocity, viscosity and particle size, while slightly influenced by particle shape. At high flow velocity, compared with straight pipe, in which the erosion zone is distributed relatively uniformly in the pipe wall, the bended pipe had the most serious impact erosion zone with the maximum erosion value in the range of 15° ~ 30° and 60° ~ 75° ; at low flow velocity, the main impact erosion zone transferred to the exit of the bended pipe. The erosion increased with increase of particle size when the particle had a small diameter, but decreased when the particle reached the diameter of $600\ \mu\text{m}$.

Keywords backfilling pipe; impact erosion; discrete particle model; ductile impact erosion model; slurry characteristics

经过几十年的发展,矿山充填管道输送方式经历多次变革,由气力输送变为水力输送,输送介质也由单一的固体物料变为固液气共存的复杂多相流,管道的失效形式复杂化,其中管道冲蚀磨损、堵塞等现象最为常见,严重影响充填管道系统可靠性^[1]。国内外针对石油、化工管道磨损做过大量研究^[2-3],但是对于充填管道磨损问题研究极少,究其原因,主

要在于充填浆体与石油、天然气等流体介质有显著区别,浆体组成复杂,流动机理特别是固-液两相间以及固体与固体间的作用机理至今未有准确的模型进行研究。

随着现代高性能计算机的发展,计算流体力学软件在研究管道内流体输送特性中逐渐展现出其优越性。对于石油、天然气管道的磨损问题,由于管道内固体颗粒浓度极低,一

收稿日期:2015-01-27;修回日期:2015-04-03

基金项目:湖南有色研究基金项目(YSN2013CX01)

作者简介:过江,副教授,研究方向为采矿与充填技术,电子信箱:guojiang@csu.edu.cn

引用格式:过江,张碧肖.固-液两相流充填管道输送冲蚀磨损数值研究[J].科技导报,2015,33(11):49-53.

般研究者都假设其为稀疏相,忽略其对连续相的影响以及颗粒间的相互作用。一些学者对较高浓度料浆输送时,将颗粒相也作为连续相在欧拉框架下求解^[4]。然而,颗粒相即使浓度再高,与连续介质也有本质区别。因此,考虑到矿山胶结充填中全尾砂特性,本文将细颗粒(-200 μm)与清水混合的均质体作为连续相,中、粗颗粒(+200 μm)作为离散相,利用颗粒轨道模型(DPM)模拟复杂条件下充填料浆流动机理以及其对管道磨损特性,以期为矿山充填管道的维护和冲蚀破坏监测提供理论基础。

1 离散相受力分析

高浓度充填料浆输送与传统固料水力输送有着本质差别。当浆体中细颗粒含量很高时,连续相的黏度远比清水黏度大,作为离散相的颗粒在连续相中受力情况也会变得复杂化。管道输送过程中离散相颗粒在运载流体中主要受到重力、浮力、连续相的拖曳力和屈服应力、压力梯度力、升力等^[5],确定颗粒所有受力情况,就能知道其运动轨迹。然而在实际研究中,要想确定所有受力的大小不现实,而且受力越复杂计算量也会大大增加,因此,在数值模拟时需简化其受力情况,剔除数量级很小的量,简化后离散相受力模型见图1。其中, F_G 为有效重力; F_D 为流体拖曳力; F_N 为载流体的屈服应力,该力的存在是由于大量的细微颗粒与水结合形成絮网状的空间结构,而该空间结构具有承受一定力的能力^[5],因此粗颗粒在均质浆体中要运动,需克服这个力。

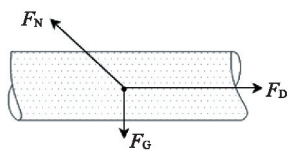


图1 离散相受力模型

Fig. 1 Mechanical model of discrete phase

2 计算模型

2.1 离散相控制方程

浆体管道流动特性及其对管道冲蚀磨损影响因素众多,单靠实验去研究这些因素的作用要花费大量时间和物力,而流体动力学软件(CFD)中大量模型为研究这些复杂问题提供了方便。本文采用离散颗粒模型(DPM),对连续相在欧拉框架下求解 $N-S$ 方程,对离散相在拉格朗日框架下求解颗粒轨迹方程,获取相关信息进行研究,其控制方程为

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = F_D + F_G + F_N + F_x \quad (1)$$

式中, $F_D = \frac{18\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2 24} (u_t - u_p)$, C_D 是颗粒在黏性流体中阻力系数^[5], μ 为流体动力黏度, d_p 为颗粒直径, Re_p 为颗粒相对雷诺数, u_t 为连续相速度, u_p 为离散相速度。 $F_G = \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} g$, g

为重力加速度, ρ_p 为离散相密度, ρ_f 为连续相密度, $F_N = -1/6d_p(\rho_p - \rho_f)g$, F_x 为其他作用力,本文为 Saffman 升力。

2.2 颗粒壁面碰撞方程

离散相颗粒与壁面碰撞及反弹作用对颗粒轨迹影响极大,作用效果可以通过反弹恢复系数方程表达,本文采用文献[6]提出的针对沙砾与碳钢管材作用在计算模型中引入的法向和切向系数方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} e_n = \frac{u_{p2}}{u_{p1}} = 0.993 - 1.76\theta + 1.56\theta^2 - 0.49\theta^3 \\ e_t = \frac{v_{p2}}{v_{p1}} = 0.988 - 1.66\theta + 2.11\theta^2 - 0.67\theta^3 \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_{p1} , u_{p2} 分别为颗粒壁面碰撞前后法向速度, v_{p1} , v_{p2} 分别为颗粒壁面碰撞前后切向速度, θ 为冲击角度。

2.3 冲蚀磨损模型

参照文献[7]、[8],本文选取磨损模型考虑了颗粒碰撞速度、尺寸及形状、质量流率及碰撞角度等参数,具体表达式为

$$ER = \sum_{p=1}^N \frac{\dot{m}_p C(d_p) F_s^n f(\theta) u_p^{2.41}}{A_{face}} \quad (3)$$

式中, ER 为冲蚀磨损速率^[7]; N 为颗粒总个数, \dot{m}_p 为颗粒质量流率, F_s 为颗粒形状系数, n 为指数, $C(d_p)$ 为颗粒直径函数, $f(\theta)$ 为冲击角度函数, θ 为颗粒对壁面侵入角度, A_{face} 为撞击壁面单元表面积,具体相关函数表达式见文献[8]。

3 模型建立与结果分析

3.1 工程实际与建模

某铅锌矿采用全尾砂高浓度胶结充填,充填管管径为 150 mm,浆体质量浓度约为 77%。浆体中连续相(细微颗粒与水结合成的均质体)密度 ρ_f 为 1.85 t/m³,离散相(粗颗粒)密度 ρ_p 为 2.7 t/m³^[9]。充填管道连接地表和地下采空区,因此会受到地形起伏以及地下空间结构的影响,管道敷设状态也很复杂,一般来说浆体在管道中流动会经历垂直下降过程、水平过程、倾斜过程以及垂直上升过程等,因此本文建立物理模型考虑上述 4 类情况,具体模型及网格划分情况见图 2。

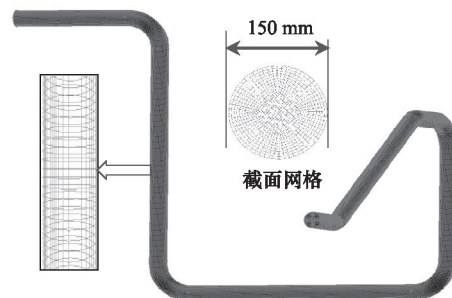


图2 实体模型及网格划分

Fig. 2 Entity model and meshing

模拟之前作如下假设:1) 不考虑温度、震动等对浆体流动的影响;2) 由于离散相体积分数很低,忽略颗粒间的碰撞作用,考虑粗颗粒与连续相间耦合。

3.2 计算结果与分析

充填浆体属于复杂多相流,其在管道中流动状态及形态受多种因素影响,浆体的特性改变对管道的影响机理也是复杂多变,因此,本文重点研究浆体管道内流动状态及自身微观属性(包括黏度、颗粒尺寸和形状)对管道冲蚀磨损破坏的影响机制。

3.2.1 流速的影响机制

如图3所示,流速较大时,管道磨损部位主要集中在弯管段及其附近,随着流速降低,主要磨损部位逐渐分布在管道中,弯管反而磨损并不严重。从图3也可以发现,在流速较大时,不同管段状态(垂直下降,上升段,水平段,倾斜段),

管道磨损主要出现在各段初始阶段,究其原因,流速较高时,固体颗粒悬浮在连续相中,但连续相湍流作用增强,颗粒自身湍动能增加,固体颗粒由于自身惯性对管壁局部冲击作用加大。各段管道初始阶段由于弯管的存在使得流体波动和旋流作用较强,因此颗粒与该区域碰撞作用增强;而流速较低时,连续相流动状态接近层流,颗粒由于沉降沿着管壁滚动或推移滑动,颗粒与管壁作用受连续相流速影响很大,固体颗粒与管壁的碰撞机率增加。对比图4及图3(d)可知,浆体流速较大地方磨损一般较为严重,这也解释了垂直下降管主要磨损部位出现在管段末端,而在流速低时倾斜管中颗粒主要受重力作用,因此磨损均匀分布在管道底部。

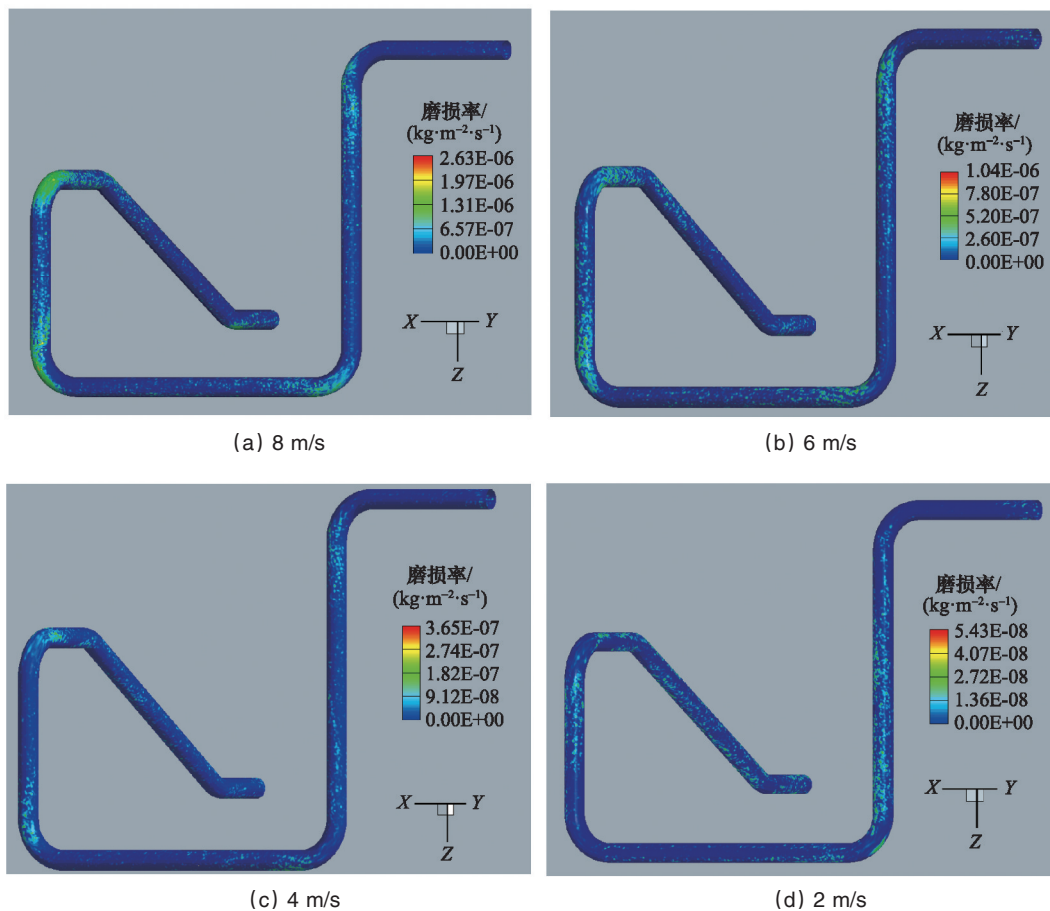


图3 不同流速下管道冲蚀磨损情况

Fig. 3 Impact erosion distribution in the pipe at different flow velocity

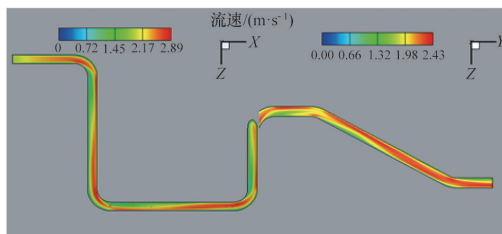


图4 各段管道流速分布

Fig. 4 Velocity profile in the pipeline

对弯管而言,本文模型涵盖了4种不同状态的弯管(图5),由于来流的不同,其磨损情况会在不同截面有着显著差异。研究发现,弯管在15°~30°间以及60°~75°之间冲蚀磨损最为严重,这与文献[8]研究结果基本吻合,弯管磨损曲线如图6所示。

3.2.2 离散相尺寸及形状影响机制

充填浆体中粗颗粒的含量及大小不仅影响充填体的脱水性,而且在输送过程中影响浆体流动以及对管壁的冲蚀磨

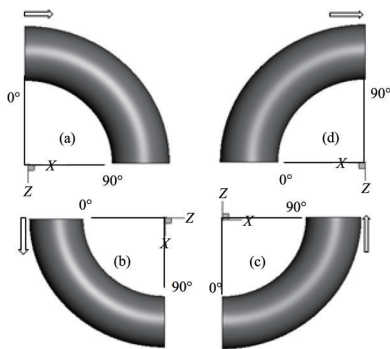


图5 4种弯管形态

Fig. 5 Four kinds of bended pipes

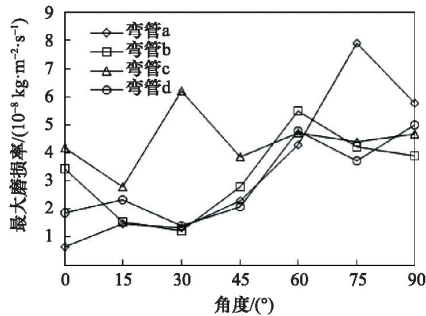


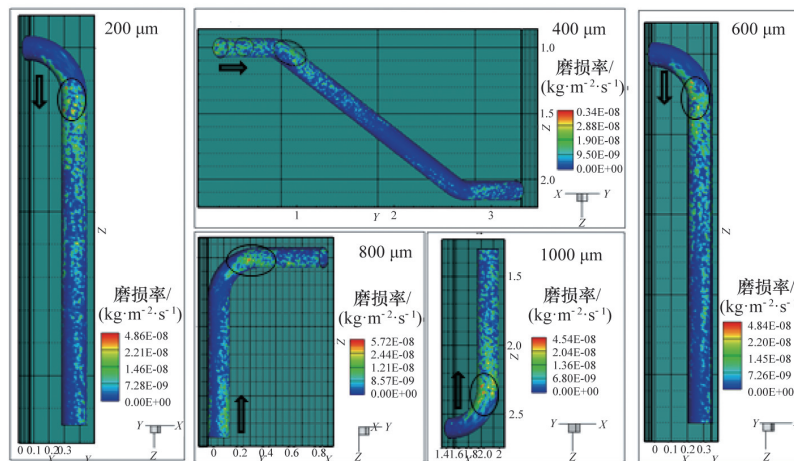
图6 弯管冲蚀磨损曲线

Fig. 6 Curves showing impact erosion in the bended pipe

损作用,颗粒形状影响颗粒与管壁碰撞作用机理,从而改变管道磨损形式和严重程度。文献[7]给出了管道磨损与离散颗粒尺寸关系曲线,但是该曲线只针对粒径小于200 μm的颗粒。因此,本文选取颗粒形状系数分别为0.7、0.5和0.3,粒径分别为200、400、600、800和1000 μm的颗粒进行研究。

从图7、图8可以发现,不同粒径情况下管道最大磨损部位也不相同,但大都在弯管出口区域,弯管背部冲蚀程度较轻;随着颗粒尺寸增大,管道最大磨损严重程度并非与粒径保持正相关,当粒径增加到一定程度时,管道最大冲蚀磨损值呈现降低趋势。究其原因,颗粒尺寸越大,其表面积增加,当与管壁碰撞作用时,单位面积上作用力和冲蚀磨损值会相对下降,而且大颗粒在冲击管壁时,其速度受连续相影响较大,削弱颗粒的冲击速度,因而管壁受损程度反而降低。

颗粒形状系数对管道冲蚀破坏影响程度较小,总体趋势表现为当颗粒尺寸较小时,系数越小管道冲蚀破坏程度越轻。颗粒尺寸较大时,结果正好相反(图8)。从颗粒壁面作用机理探究其原因,管壁冲蚀磨损一般包括两个部分,一部分来自法向颗粒撞击而变形;另一部分是颗粒切向切削^[6]。系数越小,颗粒形状越不规则,表面积增大,颗粒法向撞击速度受连续相影响降低^[10],管壁冲蚀破坏主要受颗粒切削作用引起,破坏总体效果相对减弱。



图中黑色线圈区域表示管道磨损最严重部位

图7 管道局部最大冲蚀磨损

Fig. 7 Local maximum impact erosion in the pipeline

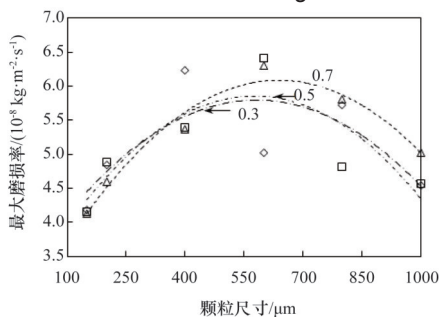


图8 颗粒形状、尺寸对管道冲蚀磨损影响

Fig. 8 Curves showing impact erosion in the pipe influenced by particle size and shape

3.2.3 连续相黏度影响机制

由离散相受力分析可知,黏度对固体颗粒运动,以及整个管道内流体运动状态和形态起着关键性作用。大多学者研究冲蚀磨损问题时,主要针对高速、低黏度连续相^[11,12],这明显与全尾砂高浓度输送情况不符。因此,本文选取不同黏度的连续相载流体,研究较低流速下颗粒运动特性及管道冲蚀磨损机理。

载流体黏度对管道冲蚀磨损影响显著,而且层流状态下管道最大冲蚀磨损较湍流状态要严重得多。黏度增加,管道冲蚀磨损减弱,黏度较低时,磨损程度随黏度的增加降低较

为缓慢,而黏度增加一定程度,流体进入层流阶段时,磨损程度随载流体黏度增加而急剧下降,见图9。分析原因,颗粒在高黏度下,对流体追随性好,黏度增加,颗粒所承载流体黏滞阻力增加,阻止了颗粒频繁撞击管壁。湍流状态下,惯性力大于流体拖曳力,颗粒撞击具有随机性,因此管道整体磨损分布广泛,但局部磨损较轻,见图3(a)和(b)。层流状态下,粗颗粒与载流体组合形成伪均质浆体,颗粒与管壁作用呈现一定规律,即管道局部会频繁受到颗粒碰撞,而其他部位受损程度很低,如图10所示。弯管部位压力不均匀,浆体在管段流速偏向内壁,颗粒追随流体频繁作用在内壁上,因此冲蚀磨损严重。

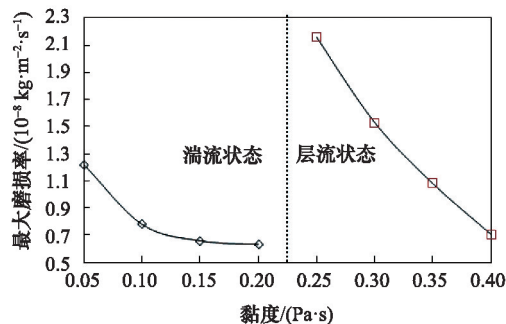


图9 不同黏度下管道最大冲蚀磨损

Fig. 9 Maximum impact erosion at different viscosity

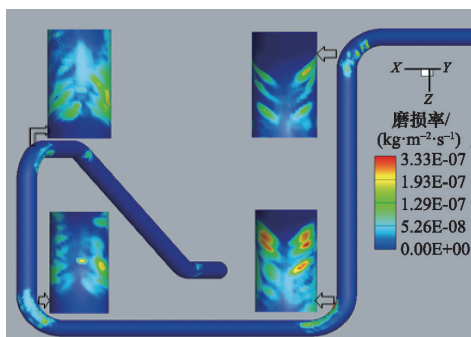


图10 层流状态下管道冲蚀磨损

Fig. 10 Impact erosion profile in the pipe under laminar flow

4 结论

基于工程流体力学理论以及颗粒输送力学模型,借助流体动力学软件针对固-液两相流管道输送特性给予分析,得到如下结论:

1) 全尾砂高浓度浆体在管道输送中,将细颗粒与水组合而成的均质浆体作为连续相,粗颗粒作为离散相,利用颗粒轨道模型对颗粒管壁碰撞机理进行研究,为充填管道冲蚀磨损机理研究提供新视角。

2) 流速对管道冲蚀磨损影响很大,高速低黏度流体,弯管部位磨损严重,随着流速降低,磨损严重部位向弯管出口偏移,弯管部位主要冲蚀磨损部位出现在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 以及 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 之间,各直管段主要磨损部分由初始端向末端移动。

3) 粒径大小对管道冲蚀磨损影响关系呈现抛物线形式,

在一定尺寸范围内,管道磨损严重程度随粒径增加而增大,当尺寸大于 $600 \mu\text{m}$ 后,管道磨损严重程度随粒径增加呈下降趋势。颗粒形状对管道磨损的影响较弱。

4) 浆体在湍流状态时,管道磨损分布范围广泛,但最大磨损严重程度不高;层流状态下,管道冲蚀磨损主要集中在弯管部位,但磨损严重程度高。

参考文献 (References)

- [1] 张德明. 深井充填管道磨损机理及可靠性评价体系研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 59-79.
Zhang Deming. A study on wear mechanism and the reliability evaluation system for backfilling pipelines in deep mine[D]. Changsha: Central South University, 2012: 59-79.
- [2] 梁颖, 袁宗明, 陈学敏, 等. 基于CFD的液固两相流冲刷腐蚀预测研究[J]. 石油化工应用, 2014, 33(2): 103-106.
Liang Ying, Yuan Zongming, Chen Xuemin, et al. Liquid solid two phase erosion corrosion prediction based on CFD[J]. Petrochemical Industry Application, 2014, 33(2): 103-106.
- [3] 杨建胜, 罗坤, 王则力. 煤粉颗粒对管道壁面磨损的数值模拟研究[J]. 能源工程, 2010(4): 1-4.
Yang Jiansheng, Luo Kun, Wang Zeli. Numerical study of solid particle erosion on sidewall[J]. Energy Source Engineering, 2010(4): 1-4.
- [4] 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): 2133-2140.
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]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7): 2133-2140.
- [5] 吴磊. 粗颗粒固液两相的数值模拟[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2010: 29-41.
Wu Lei. Simulation of liquid-solid two phase of coarse particles in pipes [J]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2010: 29-41.
- [6] Pereira G C, de Souza F J, de Moro Martins D A. Numerical prediction of the erosion due to particles in elbows[J]. Powder Technology, 2014, 261: 105-117.
- [7] Parsi M, Najmi K, Najafifard F, et al. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 850-873.
- [8] Njobuenwu D O, Fairweather M. Modeling of pipe bend erosion by dilute particle suspensions[J]. Computers and Chemical Engineering, 2012, 42: 235-247.
- [9] 刘晓辉, 吴爱祥, 王洪江, 等. 深井矿山充填管输送理论及应用[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(9): 1113-1118.
Liu Xiaohui, Wu Aixiang, Wang Hongjiang, et al. Full-flow transport theory and its application in deep mine backfilling[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(9): 1113-1118.
- [10] Walker C I, Hambe M. Influence of particle shape on slurry wear of white iron[J]. Wear, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.029>.
- [11] 王凯, 李秀峰, 王跃社, 等. 液固两相流中固体颗粒对弯管冲蚀破坏的位置预测[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(4): 91-94.
Wang Kai, Li Xiufeng, Wang Yueshe, et al. Numerical prediction of the maximum erosion location in liquid-solid two-phase flow of the elbow [J]. Journal of Engineering Thermo physics, 2014, 35(4): 691-694.
- [12] 汪家琼, 叶群, 闫科委, 等. 颗粒直径对渣浆泵冲蚀磨损性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(10): 840-844.
Wang Jiaqiong, Ye Qun, Yan Kewei, et al. Effects of particle diameter on erosion wear performance of slurry pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(10): 840-844.

(责任编辑 吴晓丽)