

文章编号:1000-582X(2011)01-105-05

充填料浆沉降规律研究及输送可行性分析

张钦礼,谢盛青,郑晶晶,王新民

(中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙410083)

摘要:通过分析充填料浆在管道自流输送系统中的运动形式与充填骨料固体颗粒的沉降规律,得知充填料浆能否稳定地输送到采空区跟输送速度及水平管道的长度有关。结合孙村煤矿的煤矸石似膏体充填料浆的特点,利用Fluent流体分析软件对料浆的管道输送过程进行了模拟,并从理论上分析了以煤矸石作为主要骨料的似膏体利用管道自流输送的可行性。模拟分析表明,料浆的自流压差能够克服在管道自流输送过程中的沿程阻力损失,并且在3.82 m/s的水平管道输送速度下,料浆垂直脉动速度分量38.3 cm/s大于煤矸石的干涉沉降速度0.99 cm/s,因此,似膏体能够自流输送到采空区。

关键词:充填料浆;运动形式;沉降规律;堵管;可行性

中图分类号:TD 853

文献标志码:A

Sedimentation law research and transportation feasibility study of backfilling slurry

ZHANG Qin-li, XIE Sheng-qing, ZHENG Jing-jing, WANG Xin-min

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, P. R. China)

Abstract: Through the analysis of movement forms of backfilling slurry in the pipeline self-flowing transportation system and the sedimentation law of backfilling aggregate granule, it is known that the transportation stability of backfilling slurry is related to transportation speed and the length of horizontal pipeline. Combined with the characteristics of gangue paste-like slurry in Suncun Mine, the pipeline transport process of slurry is simulated by Fluent, which is a well-known fluid analysis software, and also the self-flowing transportation feasibility of paste-like slurry with gangue as main backfilling aggregate is researched in theory. The research shows that the self-flowing pressure can overcome the resistance loss in the way of the transmission pipeline. When the horizontal pipe transmission speed is 3.82 m/s, the vertical pulsating velocity component of slurry (S_v) can reach 38.3 cm/s and the interfering sedimentation speed of gangue (V_{gg}) is just 0.99 cm/s, it can know that $S_v > V_{gg}$. Therefore, paste-like slurry can arrive at the mined-area by self-flowing transportation.

Key words: backfilling slurry; movement form; sedimentation law; pipe blocking; feasibility

充填采矿法具有提高矿物回采率,减少贫化率,减轻环境污染,能够有效地控制地压,适合“三下”开采等很多优点^[1-2]。近年来,随着充填材料、充填工艺、管道输送装备和技术的不断进步,充填成本不断

收稿日期:2010-08-19

基金项目:科技部“十一五”科技支撑计划课题(2008BAB32B03)

作者简介:张钦礼(1964-),男,中南大学教授,博士生导师,主要从事安全技术及采矿技术等方面的研究,

(E-mail)sko01@126.com。

降低,充填效率不断提高,充填法越来越受到人们的重视^[3-4]。充填法采用的充填材料范围很广,山石、河砂、棒磨砂等自然或人工砂石与粉煤灰、尾砂、磷石膏、炉渣、煤矸石等工业废料都可以作为充填骨料加以利用^[5-6]。采用充填法采矿时,由骨料、胶凝材料和水按一定配比形成的充填料浆一般采用管道自流输送方式运送到采空区。管道自流输送必须考虑充填骨料的输送特性,防止骨料离析沉降堵管^[7-9],因此,有必要对充填骨料的沉降规律进行研究,以确保料浆自流输送的可行。

孙村煤矿是新汶矿业集团开采历史最为悠久的主力矿山之一,主体采矿方法为传统的长壁全部垮落法,开采深度已达 1 300 m,由于多年的强化开采,掘进产生了大量的煤矸石。为了保护地表建筑物、农田、汶河及三条主要井巷,孙村煤矿在城镇范围以下的地层存留了储量达 1.6×10^6 t 的优质保安煤柱。矿山为开采这部分优质煤矿,采用充填法将煤矸石作为主要的充填料填充到采空区,不仅能彻底解决煤矸石对地表环境的污染问题,恢复宝贵的土地资源,而且能回收保安煤柱积压的巨额资金^[10-11]。然而煤矸石粒度较大,管道自流输送过程中容易沉淀,管道输送困难。根据充填料浆的运动形式,充填骨料(固体颗粒)的沉降规律以及孙村煤矿煤矸石似膏体的特点,通过添加粉煤灰等细粒物料并提高浓度以改良充填料浆^[12-15]。利用流体分析软件 Fluent 对该改良料浆进行管道输送模拟分析,从理论上验证煤矸石似膏体进行管道自流输送充填的可行性,将有助于加快工业废料在矿山充填中的应用。

1 充填料浆运动形式

管道自流输送的运动能量全部来自于位能。充填浆体进入垂直管路或钻孔后,在重力作用下自由下落,直至到达空气与砂浆的交界面。在垂直管道中有两种流动:上部为自由下落区,下部为满流输送区。管道系统输送模型如图 1。实验研究表明,自由下落区(H_1 和 H_2)内的浆体,由于加速度的存在,浆体流速达到某一范围后,浆体断面发生收缩,形成脱离管壁的收缩流;当流速继续增加,流体的运动状态再次发生变化,变为散射流;水平管道(L_1 和 L_2)满管流浆体流动状态具体情况为:当浆体流速很小时,固体骨料颗粒沉在管底不动;当浆体速度逐渐增大到某一数值时,骨料颗粒开始沿管底滑动、滚动或不连续跳跃运动;当浆体流速继续增大时,骨料颗

粒处于快速跳跃或间歇性悬浮状态;当浆体流速进一步增大时,骨料颗粒就处于完全悬浮状态。

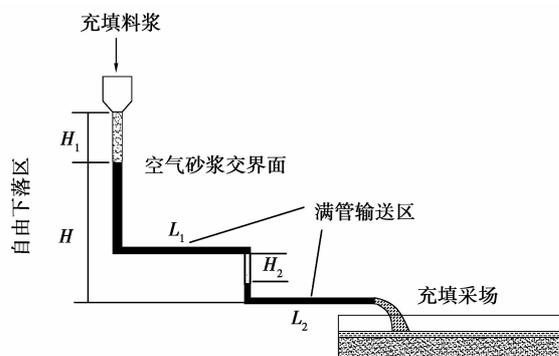


图 1 深充填管道自流输送模型图

2 充填骨料的沉降

2.1 固体颗粒的静水沉降速度

颗粒在静水中由于重力作用产生自由沉降,颗粒匀速下沉时的速度称为颗粒的沉降速度。沉降速度是固体颗粒的重要水力学特性,它表示固体在液体中相互作用时的综合特征,反映固体颗粒水力输送的难易程度。沉降速度越大,颗粒越难悬浮,也就越难水力输送,反之亦然。颗粒的密度、粒径、形状以及雷诺数等对其沉降速度有较大影响。如果忽略介质的黏度对颗粒沉降的影响,颗粒沉降速度 v_g 则可用以下简化公式计算:

当 $d_{cp} < 0.3A$ 时,用简化斯托克斯公式:

$$v_g = 5.450 d_{cp}^2 (\gamma_g - 1). \quad (1)$$

当 $0.3A \leq d_{cp} < A$ 时,用简化阿连公式:

$$v_g = 123.04 d_{cp}^{1.1} (\gamma_g - 1)^{0.7}. \quad (2)$$

当 $A \leq d_{cp} < 4.5A$ 时,用简化阿连公式:

$$v_g = 102.71 d_{cp} (\gamma_g - 1)^{0.7}. \quad (3)$$

当 $d_{cp} \geq 4.5A$ 时,用简化雷廷格公式:

$$v_g = 51.1 \sqrt{d_{cp} (\gamma_g - 1)}, \quad (4)$$

式中: A 为引入中间系数, $A = \sqrt[3]{0.0001 + (\gamma_g - 1)}$; d_{cp} 为固体颗粒直径; γ_g 为固体颗粒密度。

2.2 非球形颗粒的干涉沉降

工程应用中的固体颗粒,其外形是不规则的,表面粗糙、外形不对称,因此在静水中沉降时,由于受力不均而产生颗粒的转动,同时在颗粒周围产生绕流现象,导致不规则形状固体颗粒受到的流体阻力比球状颗粒的大,沉降速度比球体的小,因此非球形颗粒的沉降速度,要以修正系数 C_s 进行修正。对不同形状的固体颗粒,其修正系数见表 1。

表 1 非球形颗粒的沉降速度修正系数

固体颗粒形状	修正系数 C_s	
	一般	平均
椭圆形颗粒	0.8~0.9	0.85
多角形颗粒	0.7~0.8	0.75
长方形颗粒	0.6~0.7	0.65
扁平形颗粒	0.4~0.6	0.50

实际输送中, 固体颗粒是成群运动的, 固体颗粒之间、固体颗粒与管壁之间难免会发生机械碰撞与摩擦。可以推想, 机械碰撞的附加阻力, 与沉降环境(空间大小)、颗粒多少(浓度)等有关。固体颗粒之间的机械碰撞与摩擦产生的机会越多, 固体颗粒下沉的阻力越大, 干涉沉降速度越小, 反之亦然。因此, 浆体浓度越大, 固粒的粒度越细、形状越不规则、表面越粗糙, 流体对颗粒产生的阻力越大, 沉降速度就越小, 反之越大。故干涉沉降是十分复杂的, 难于用确定的数学方法描述。实践证明, 干涉沉降速度比自由沉降速度小的多。

非球形颗粒的干涉沉降速度(v_{gg})与自由沉降速度的关系式为:

$$v_{gg} = v_g(1 - C_v)^n, \quad (5)$$

式中: C_v 为料浆体积浓度; n 为干涉指数, 取值如表 2 所示。

表 2 多角形固体颗粒的干涉指数

固体颗粒直径/mm	干涉指数 n	固体颗粒直径/mm	干涉指数 n
2.00	2.7	0.3	5.4
1.40	3.2	0.20	6.0
0.90	3.8	0.15	6.6
0.50	4.6	0.08	7.5

2.3 浆体骨料的沉降堵管

固体物料在水力输送中, 当砂浆处于某一流速时, 固体物料能否悬浮, 对于其顺利输送和系统的正常运行具有积极意义。在两相流中, 紊流的脉动速度是使固体颗粒悬浮的决定因素。至于涡流的冲刷、流体的饶流、速度的不均匀分布只是加强脉动的因素。使固体颗粒悬浮的主要原因是脉动速度中的垂直脉动速度分量, 即垂直脉动速度分量(S_v)大于固体颗粒的沉降速度(V_{gg}), 也就是说, 若垂直脉动速度分量小于固体颗粒的沉降速度就可能发生堵管事故。垂直脉动速度分量 S_v 用下式计算:

$$S_v = 0.13v \left(\frac{\lambda_j}{kC_{u,v}} \right)^{1/2} \left[1 + 1.72 \left(\frac{y}{r} \right)^{1.8} \right]. \quad (6)$$

式中: v 为料浆的输送速度; k 为试验常数, 取值为 1.5~2; $C_{u,v}$ 为水平速度分量与垂直速度分量之间的关系, 取值为 0.18; y 为固体颗粒距管道中心的距离; r 为输送管道的半径; 近似地取 $y=r$; λ_j 为摩擦阻力系数, 可由下式计算

$$\lambda_j = \frac{2gDi}{v^2}, \quad (7)$$

式中 i 为浆体水力坡度。水力坡度利用金川公式计算

$$i = i_0 \left\{ 1 + 108C_v^{3.96} \left[\frac{gD(\gamma_j - 1)}{v^2 \sqrt{C_x}} \right]^{1.12} \right\}, \quad (8)$$

式中: γ_j 为充填料浆的体重, t/m^3 ; i_0 为清水水力坡度; C_v 为浆体体积浓度; D 为管道内径, m ; C_x 为沉降阻力系数。

清水水力坡度 i_0 按下式计算

$$i_0 = \lambda \frac{v^2}{2gD}, \quad (9)$$

式中 λ 为清水摩擦阻力系数, 可由下式计算:

$$\lambda = \frac{K_1 \cdot K_2}{\left(21g \frac{D}{0.00024} + 1.74 \right)^2}, \quad (10)$$

式中: K_1 为管道敷设系数, 取 1.1; K_2 为管道连接质量系数, 取 1.1。

沉降阻力系数 C_x 的计算式如下

$$C_x = \frac{1308(\gamma_j - 1)d_{cp}}{\omega^2}, \quad (11)$$

式中: d_{cp} 为充填料平均粒径, cm ; ω 为颗粒平均沉降速度, cm/s 。颗粒平均沉降速度可以结合引入中间参数 A , 相应的选择简化式(1)-(4)计算。

3 料浆输送可行性实例分析

充填的目的是将一定配比的料浆从地表制备站顺利地输送到采空区。通过料浆的运动形式和充填骨料的沉降规律分析, 可知料浆输送是否可行主要跟浆体输送速度和输送距离有关。孙村煤矿充填采用的煤矸石似膏体的配比为水泥: 粉煤灰: 煤矸石(新矸)=1:4:15, 混合料的密度为 $2.62 g/cm^3$, 混合料的加权平均粒径为 $0.083 cm$ (计算根据表 3)。制成浆体的密度为 $1.77 g/cm^3$, 质量浓度为 72%, 体积浓度为 42.2%。输送管道选用的是陶瓷复合钢管, 外径 121 mm, 钢管壁厚 7 mm, 陶瓷复合层厚度 3 mm, 实际管道有效内径 $D=101 mm$ 。充填料浆的流量为 $110.18 m^3/h$ (料浆进口端初速度约为 $1.70 m/s$), 料浆粘度为 0.3。

表 3 孙村煤矿充填骨料粒径组成 %

充填料名称	粒径/mm						
	5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.05	0.05~0.005	<0.005
陶矸	12.0	33.0	15.0	20.0	5.0	13.5	1.5
新矸	16.0	31.5	13.5	16.5	5.5	16.5	0.5
粉煤灰	—	—	—	—	11.0	87.0	2.0

注:陶矸指经过矿山小型破碎厂破碎后的陶化煤矸石;新矸指经过细碎后的新鲜煤矸石。

3.1 料浆自流输送可行性模拟分析

孙村煤矿目前开采垂直高差约为 385 m,水平充填管道长度是 1 100 m,充填管道输送系统如图 2 所示。利用流体分析软件 Fluent 对矿山充填料浆的管道输送进行模拟,残差曲线见图 3,从曲线的走向趋势可以看出,模拟的收敛性良好,这表明模拟结果比较合理。料浆在管道输送系统弯管处及水平管出口端的流速分布情况可见图 4、5。导出计算结果,得到料浆在水平段的最小流速约为 2.52 m/s,最大流速 5.12 m/s,输送系统进出口压差 2.76 MPa,即料浆在输送过程中的沿程阻力损失为 2.76 MPa,而料浆在 385 m 的高差下可产生的压差为 6.81 MPa,这表明料浆通过自流输送完全可以克服沿程阻力损失到达采空区。

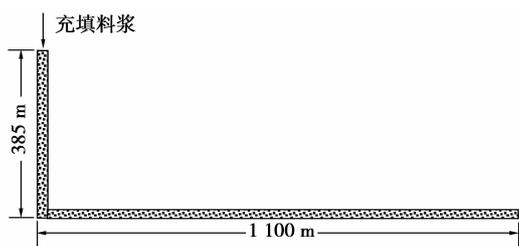


图 2 充填管道输送系统模型

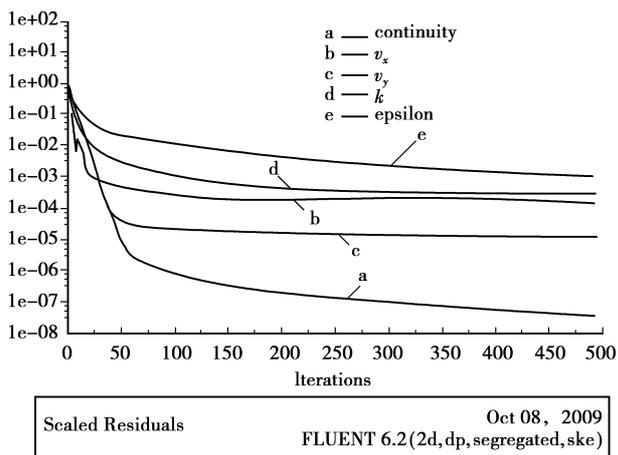


图 3 残差监测曲线

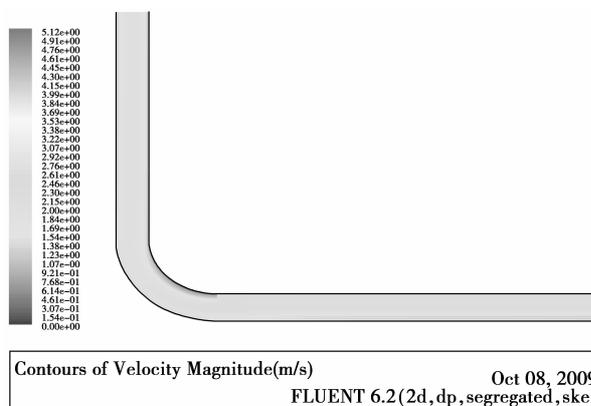


图 4 垂直管和水平管衔接处料浆流速变化图

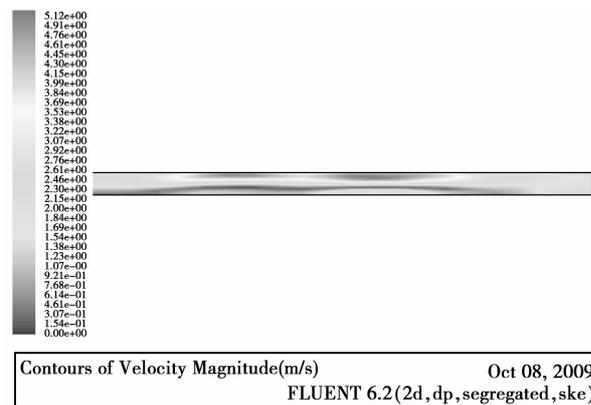


图 5 水平管出口端料浆流速变化图

3.2 充填骨料沉降性分析

煤矸石石膏体混合料的密度 $\gamma_g = 2.62 \text{ g/cm}^3$, 则参数 $A = \sqrt[3]{0.0001 + (2.62 - 1)} = 1.174$, 而混合料的加权平均粒径 $d_{cp} = 0.083 \text{ cm}$, 满足条件 $0.3A \leq d_{cp} < A$, 故根据式(2), 可得颗粒平均沉降速度 $\omega = 11.2 \text{ cm/s}$ 。煤矸石是一种多角形颗粒, 取修正系数 0.75 (根据表 1), 修正后的沉降速度为 8.4 cm/s 。根据表 2, 取干涉指数 $n = 3.9$, 将有关参数代入式(5), 得到骨料颗粒的干涉沉降速度 $V_{gg} = 0.99 \text{ cm/s}$ 。将 $\omega = 11.2 \text{ cm/s}$, $\gamma_j = 1.77 \text{ g/cm}^3$, $d_{cp} = 0.083 \text{ cm}$ 代入式(11), 求得 $C_x = 7.46$ 。由式(9)和

式(10)分别可以计算出清水水力坡度 $i_0 = 0.184$ 与清水摩擦阻力系数 $\lambda = 0.025$ 。将 $C_x = 7.46$, $i_0 = 0.184$, $\lambda = 0.025$, $C_v = 0.422$ 等参数代入式(8), 求得料浆水力坡度 $i = 0.192$ 。由式(7)可以求得摩擦阻力系数 $\lambda_j = 0.026$ 。

将 $\lambda_j = 0.026$, $C_{u,v} = 0.18$, $k = 1.8$, $v = 3.82$ m/s (模拟得到的最大流速与最小流速的平均值)等相关参数代入式(6), 得到垂直脉动速度分量 $S_v = 38.3$ cm/s $\gg V_{gg} = 0.99$ cm/s, 因此对于矿山采用的煤矸石似膏体料浆, 在管道自流输送过程中, 可以完全保证煤矸石颗粒处于悬浮状态, 即在水平管道 3.82 m/s 的输送速度下, 充填料浆不会发生沉降堵管。

4 结 语

1) 充填料浆在垂直管道中有自由下落和满管输送两种流动方式, 在水平管道则是以满管流输送。充填浆体固体颗粒在水平管道的运动形式跟输送速度有关, 速度越大, 颗粒越容易悬浮。

2) 充填料浆的脉动速度是使固体颗粒悬浮的决定因素。固体颗粒悬浮的主要原因是脉动速度中的垂直脉动速度分量, 颗粒悬浮的条件是垂直脉动速度分量大于固粒的沉降速度, 如果垂直脉动速度分量小于固粒的沉降速度就可能发生堵管事故。

3) 利用 Fluent 流体分析软件模拟分析表明, 孙村煤矿利用煤矸石似膏体进行管道自流输送时, 料浆的自流压差能够克服在管道自流输送过程中的沿程阻力损失。并且理论计算表明, 如果料浆在水平管道以 3.82 m/s 的速度输送, 料浆的垂直脉动速度分量 $S_v = 38.3$ cm/s 大于主骨料煤矸石的干涉沉降速度 $V_{gg} = 0.99$ cm/s, 为此, 煤矸石似膏体能够满足该矿山的管道自流输送要求。

参考文献:

[1] 王新民, 肖卫国, 张钦礼. 深井矿山充填理论与技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.

[2] 周爱民, 古德生. 基于工业生态学的矿山充填模式[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(3): 468-472.

ZHOU AI-MIN, GU DE-SHENG. Mine-filling model based on industrial ecology [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2004, 35(3): 468-472.

[3] 王湘桂, 唐开元. 矿山充填采矿法综述[J]. 矿业快报, 2008, 28(12): 1-5.

WANG GUI-XIANG, TANG KAI-YUAN. Overview of cut and fill method for mines [J]. Express Information of Mining Industry, 2008, 28(12): 1-5.

[4] 陈龙乾, 胡召玲, 王辉, 等. 矿区煤矸石充填复垦的材料确定与标高设计[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 21-24.

CHEN LONG-QIAN, HU ZHAO-LING, WANG HUI, et al. Material decision and elevation design of coal waste filling reclamation in mining areas [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 35(1): 21-24.

[5] 王新民, 曹刚, 龚正国. 煤矸石作充填骨料的似膏体料浆流动性性能试验研究[J]. 矿业快报, 2008, 28(1): 20-23.

WANG XIN-MIN, CAO GANG, GONG ZHENG-GUO. Experimental research on flow performance of paste-like slurry with gangue as filling aggregate [J]. Express Information of Mining Industry, 2008, 28(1): 20-23.

[6] 王新民, 赵彬, 张钦礼. 全废料胶结充填的可行性研究[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2008, 23(2): 111-114.

WANG XIN-MIN, ZHAO BIN, ZHANG QIN-LI. Feasibility study of cementation backfilling with the whole flotsam [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2008, 23(2): 111-114.

[7] 汤丽, 肖卫国. 采场中充填料浆流动规律的研究[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(2): 7-9.

TANG LI, XIAO WEI-GUO. Study on flowing law of fill slurry in stope [J]. Mining Research and Development, 2005, 25(2): 7-9.

[8] NI F, ZHAO L, MATOUSEK V. Two-phase flow of highly concentrated slurry in a pipeline [J]. Journal of Hydraulics, Series B, 2004, 16(3): 325-331.

[9] 郑邦民, 夏军强. 固体颗粒的群体沉降速度分析[J]. 泥沙研究, 2004, 49(6): 40-45.

ZHENG BANG-MIN, XIA JUN-QIANG. Analysis of group settling velocity for solid particles [J]. Journal of Sediment Research, 2004, 49(6): 40-45.

[10] ZHANG QIN-LI, WANG XIN-MIN. Performance study of cemented coal gangue backfill [J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(2): 216-219.

- [9] GRACIE R, OSWALD J, BELYTSCHKO T. A new extended finite element method for dislocations; core enrichment and nonlinear formulation[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2008, 56(1): 200-214.
- [10] CORDES L W, MORAN B. Treatment of material discontinuity in the Element-free Galerkin method[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 1996, 139: 75-89.
- [11] KRONGAUZ Y, BELYTSCHKO T. EFG approximation with discontinuous derivatives [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 1998, 41: 1215-1233.
- [12] CAI Y C, ZHU H H. Direct imposition essential boundary conditions and treatment of material discontinuities in the EFG method[J]. *Computational Mechanics*, 2004, 34(4): 330-338.
- [13] BELYTSCHKO T, LU Y Y, GU L. Element-free Galerkin methods[J]. *International Numerical Methods in Engineering*, 1994, 37: 229-256.
- [14] ORGAN D, FLEMING M, TERRY T, et al. Continuous meshless approximation for nonconvex bodies by diffraction and transparency[J]. *Computational Mechanics*, 1996, 18: 75-89.
- [15] XIAO Q Z, DHANASEKAR M. Coupling of FE and EFG using collocation approach [J]. *Advances in Engineering Software*, 2002, 33(7/10): 507-515.
- [16] RABCZUK T, BELYTSCHKO T. A three-dimensional large deformation meshfree method for arbitrary evolving cracks[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2007, 196(29/30): 2777-2799.

(编辑 郑洁)

(上接第 109 页)

- [11] 王新民, 卢央泽, 张钦礼. 煤矸石似膏体胶结充填采场数值模拟优化研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2008, 4(2): 346-350.
- WANG XIN-MIN, LU YANG-ZE, ZHANG QING-LI. Simulating and optimizing the configuration parameter of stope in plaster-like filling [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2008, 4(2): 346-350.
- [12] ZHANG QIN-LI, HU GUAN-YU, WANG XIN-MIN. Hydraulic calculation of gravity transportation pipeline system for backfill slurry [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(5): 645-649.
- [13] 王新民, 肖卫国, 王小卫, 等. 金川全尾砂膏体充填料浆流变特性研究[J]. *矿冶工程*, 2002, 22(3): 13-16.
- WANG XIN-MIN, XIAO WEI-GUO, WANG XIAO-WEI, et al. Study on rheological properties of full tailing paste filling slurry of Jinchuan mine[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2002, 22(3): 13-16.
- [14] WANG XIN-MIN, LI JIAN-XIONG. Rheological properties of tailing paste slurry[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2004, 11(1): 75-80.
- [15] ZHANG QIN-LI, HU GUAN-YU, WANG XIN-MIN. Hydraulic calculation of gravity transportation pipeline system for backfill slurry[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2008, 15(5): 645-649.

(编辑 郑洁)