

泵送剂改善膏体输送性能及配比优化

艾纯明¹, 吴爱祥¹, 王洪江¹, 杨锡祥², 周发陆²

1. 北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点试验室, 北京 100083

2. 招金矿业伽师县铜辉矿业有限责任公司, 喀什 844300

摘要 某铜矿在进行膏体充填试验时遇到了流动性差的问题, 为改善膏体的流动性能, 进行了泵送剂的试验研究。通过测量膏体的坍落度和扩展度, 考查了5种不同的外加剂对膏体流动性能的影响。流动性测试结果表明, 加入泵送剂C后膏体的工作性能良好, 最佳添加量为水泥质量的2.0%~2.5%。开展均匀设计试验, 拟合结果表明, 质量分数、尾废比与流动性呈现负相关, 砂灰比与流动性呈现正相关。依据拟合方程得出膏体的推荐配比: 质量分数为77.5%~78.5%, 尾废比为4.5~5.5, 泵送剂添加量为水泥质量的2.0%, 砂灰比为8。优化配比的验证试验结果满足实际要求。

关键词 铜矿; 泵送剂; 膏体输送

中图分类号 TD853.34⁺3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.22.009

Improving transport performance of paste with pumping agent and optimization of mixing proportion

AI Chunming¹, WU Aixiang¹, WANG Hongjiang¹, YANG Xixiang², ZHOU Falu²

1. The Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Zhaojin Mining Jiashi County Copper Hui Mining Limited Liability Company, Kashgar 844300, China

Abstract Pumping agents are added in the laboratory experiments to improve the poor fluidity of the paste. The influences of five different kinds of pumping agents on the flow properties are investigated by comparing the slumps and the slump flow. The result of test shows that the pumping agent C has the greatest effect with the best adding range of 2.0%~2.5%. The fitting result of the uniform design shows that the concentration and the aggregate ratio tail are negatively correlated with the liquidity and the sand-cement ratio is positive. Based on the fitting equation, the recommended mixing proportion of the paste is derived: The concentration of 77.5%~78.5%, the aggregate ratio of 4.5~5.5, the amount of the pumping agent of 2.0% (quality of the cement), the sand-cement ratio of 8. The results of the confirmatory experiment show that the actual requirements are met.

Keywords copper mining; pumping agent; paste transport

膏体充填技术具有不分层、不离析、不沉淀的特点^[1,2], 并具有水泥耗量低、充填体接顶率高和整体性能良好等优点^[3]。膏体充填使矿山产生的尾砂有可能实现完全回收利用^[4], 不仅大幅降低了充填采空区的费用, 还解决了环境污染问题^[5], 保证了矿山可持续发展。综上所述, 膏体充填越来越受到人们的青睐^[6-8]。

新疆某铜矿为保证井下安全生产、控制地表岩移, 计划采用下向进路式充填采矿法。矿体围岩为细粉砂泥岩, 具有遇水泥化现象, 因此采用膏体充填作为空区的处理方式。该矿山的尾砂颗粒较细, 颗粒直径小于10 μm的比例达20%, 且尾矿中黏土类矿物含量高。在前期的探索性试验中发现, 使用“全尾砂+废石+水泥”制成膏体最大质量分数(矿山称为

收稿日期: 2015-04-10; 修回日期: 2015-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51374034); 国家科技支撑计划项目(2012BAB08B02)

作者简介: 艾纯明, 博士研究生, 研究方向为膏体充填采矿技术, 电子信箱: a3aizi@163.com; 王洪江(通信作者), 教授, 研究方向为金属矿山高效开采技术, 电子信箱: wanghj1988@126.com

引用格式: 艾纯明, 吴爱祥, 王洪江, 等. 泵送剂改善膏体输送性能及配比优化[J]. 科技导报, 2015, 33(22): 60-64.

质量浓度)为75%,质量分数继续升高则流动性变差,难以实现泵送。因此,为保证较高的充填浓度,并改善膏体的流动性,提出了在膏体制备过程中加入添加剂的技术方案。

近年来,品种繁多的外加剂在建筑混凝土中应用十分广泛,其中用于改善流动性的主要有减水剂、泵送剂等^[9,10]。但是混凝土外加剂用于膏体充填生产实践方面还未见报道。开展泵送剂在膏体充填中的应用研究,将实现在较高质量分数时保证流动性的要求,可进一步推动膏体充填技术进步。

1 膏体流动性试验

1.1 试验材料

1) 全尾砂,取自该矿山选矿厂,烘干后备用。使用激光粒度仪(LMS-30型)对尾砂的粒级组成进行分析,结果表明该尾砂细粒级含量大。尾砂中74 μm以下的颗粒占64.32%,45 μm以下占43.1%。

2) 胶结材料为普通硅酸盐水泥,强度等级为42.5。

3) 粗骨料为废石,破碎至10 mm以下,平均粒径为3.92 mm。

4) 5种混凝土泵送剂,分别编号为A~E。泵送剂的主要成分为减水剂与缓凝组分、保塑组分、引气组分等复合而成,其中A、D、E主要成分为聚羧酸减水剂,B、C主要成份为萘系减水剂。

1.2 试验原理

坍落度是流态化混凝土生产应用中简单、直观的参考指标。借鉴这一指标,可以反映膏体的和易性,包括流动性、黏聚性和保水性。根据国内外矿山的经验,本次试验中坍落度选用20~26 cm为标准^[11,12]。

高性能混凝土的稳定性可以用坍落度(L)和扩展度(F)进行评估,一般认为当L/F接近0.4时,表明混凝土的工作性良好^[13]。若L/F过大,说明物料黏稠,L/F过小,易发生离析现象。

1.3 试验方案

在质量分数、砂灰比、尾废比相同的条件下,添加不同种类的膏体添加剂进行试验,添加量为各自厂家推荐值。以坍落度为主要指标进行筛选,试验方案如表1所示。

表1 膏体添加剂筛选试验方案
Table 1 Scheme of screening of paste additive

编号	泵送剂类型	泵送剂掺量 ¹ /%	质量分数 ² /%	砂灰比 ²	尾废比 ³
1	A	2.0	78	7	5
2	B	1.5	78	7	5
3	C	2.0	78	7	5
4	D	2.5	78	7	5
5	E	1.5	78	7	5
6	无	0	78	7	5

注:1为泵送剂掺量占水泥质量分数;2为砂灰比=(尾砂+废石):水泥;3为尾废比=尾砂:废石。

1.4 试验结果

试验根据表1中的方案进行,分别测量了6组膏体的坍落度和扩展度,结果如图1所示。

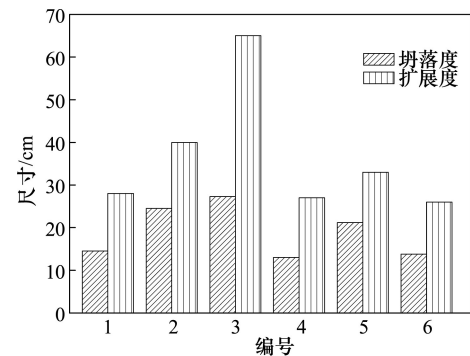


图1 6组膏体坍落度和扩展度对比

Fig. 1 Slump and slump flow of 6 pastes

由图1可看出,第2、3组的坍落度较大,第2组和第5组的试验结果均可以满足输送对膏体流动性的要求,即坍落度为20~26 cm。适当减少第3组的添加量可以满足试验要求。第1、4组坍落度较小,说明第1、4组的泵送剂没有起到改善膏体流动性的效果。对6组膏体进行稳定性分析,如图2所示。

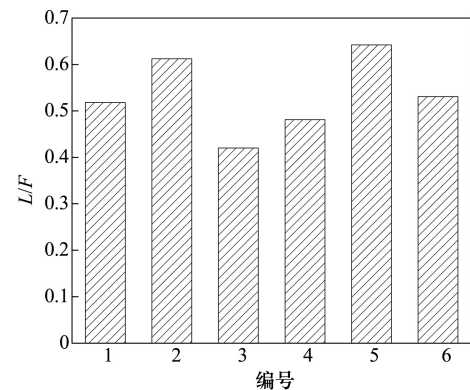


图2 6组膏体稳定性对比

Fig. 2 Stability of 6 pastes

由图2可看出,6组膏体的稳定性有很大差别。第2、3和5组的坍落度较大,但是通过稳定性对比分析可以看出,只有第3组的L/F值接近0.4,说明其整体流动性最好。第2组和第5组虽然坍落度较大,但扩展度小,导致L/F值偏大,说明这两组膏体较为黏稠,流动性差。

综合考虑各组膏体的坍落度和扩展度,选择第3组中的泵送剂C作为膏体的外加剂,进行后续试验。

1.5 泵送剂添加范围

矿山充填使用的膏体在物料组成上与流态化混凝土存在差别,膏体中含有相当比例的全尾砂,因此需要通过试验对泵送剂C在膏体中的最佳添加范围进行确定。

泵送剂C的添加量按照0.5%递增,其他试验条件与表1一致。试验结果如图3所示,部分试验照片如图4所示。

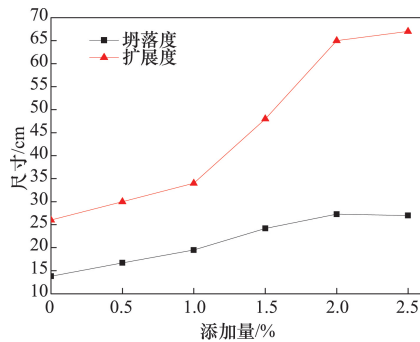


图3 泵送剂添加量试验结果

Fig. 3 Results of additive dosage

从图3可看出,各组充填材料的坍落度随着泵送剂C添加量的增加而呈现增大的趋势。当添加量由1.0%增至1.5%时,坍落度增加幅度较大,泵送剂对膏体的流动性能改善效果明显。当添加量大于1.5%时,坍落度满足输送要求。

当泵送剂添加量达到2.0%时,图3中坍落度曲线增速变缓,说明坍落度增加的幅度变小。当添加量由2.0%增至2.5%时,坍落度没有增加,只是扩展度略有增大,但是增加幅度有限,对流动性改善效果不明显。同时,继续增加添加量会造成膏体成本增加,因此试验停止。

膏体的 L/F 值随泵送剂添加量变化曲线如图5所示,可以看出在泵送剂添加量小于等于1.0%时,膏体的 L/F 值在0.55左右波动,说明膏体黏度较大,流动性差。当泵送剂添加量大于1.0%时, L/F 值呈现下降趋势,说明随着泵送剂添加量的增加,膏体的流动性不断变好。当泵送剂添加量为1.5%~2.0%时,泵送剂改善膏体流动性的效果最为明显,和图3的结果一致。当添加量为2.0%~2.5%时, L/F 值接近0.4,此时膏体的流动性最佳。

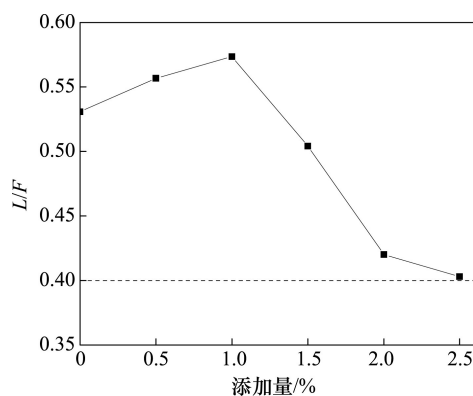


图5 膏体稳定性随泵送剂添加量变化曲线

Fig. 5 Change in stability of paste with the increase of dosage

综上所述,泵送剂C的最佳添加量为水泥质量的2.0%~2.5%。



(a) 添加量0.5%

(b) 添加量1.0%

(c) 添加量1.5%

图4 坍落度试验

Fig. 4 Slump test

2 膏体最佳配比确定

2.1 试验方案

在确定了膏体添加剂种类和添加量范围的基础上,确定膏体的最佳配比。膏体的流动性能受质量分数、砂灰比、尾废比、泵送剂添加量等4个因素的影响,泵送剂添加量根据前面的试验确定为2.0%。在研究物料配比与流动性之间关系时需要做多次试验,因此采用均匀设计作为试验方案,充分发挥其因素水平多、试验次数少的优点。

最佳配比试验采用三因素五水平均匀设计方案开展,试验方案如表2所示。膏体质量分数范围为76%~80%,砂灰比范围为4~12,尾废比范围为3~7。

2.2 试验结果及分析

按照表2中的配比开展膏体的流动性能测试,结果如表2所示。通过试验结果可以看出,坍落度、扩展度和强度与质量分数、砂灰比、尾废比等因素之间均为非线性关系。常用的非线性回归方法有幂函数回归、指数回归、对数回归以及多形式回归等,通过DPS数据处理软件分别采用这几种方法回归,二次多项式逐步回归的相关性最高,因此采用二次多项式逐步回归进行回归。

表2 膏体最佳配比试验方案

Table 2 Experimental program of best mixing proportion

序号	质量分数/%	尾废比	砂灰比	泵送剂添加量/%	坍落度平均值/cm	扩展度平均值/cm
1	76	4	10	2.0	28.2	92
2	77	6	8	2.0	21.3	53
3	78	3	6	2.0	26.1	71
4	79	5	4	2.0	17.8	30
5	80	7	12	2.0	18.7	34

在DPS软件建立的回归方程中,相关系数 R 越大(最大为1)说明回归方程越显著,同时方差分析的显著水平 P 应小于等于0.05。

通过 DPS 数据处理软件分别建立坍落度、扩展度与质量分数、砂灰比、尾废比和添加剂剂量之间关系的二次多项式回归公式:

$$L = 140.1797 - 1.3631x_1 - 3.4857x_2 + 0.1427x_2x_3 \quad (1)$$

$$F = 754.3257 - 8.6498x_1 - 11.6020x_2 + 0.05508x_1x_3 \quad (2)$$

式中, L 为坍落度, cm; F 为扩展度, cm; x_1 为质量分数, %; x_2 为尾废比; x_3 为砂灰比。

拟合方程(1)的相关系数 $R=0.9996$, 显著水平 $P=0.0381 < 0.05$; 拟合方程(2)的相关系数 $R=0.9999$, 显著水平 $P=0.0191 < 0.05$ 。由此可以看出两个方程的拟合精度较高。

由式(1)、(2)可知, 膏体的流动性与质量分数、尾废比呈现负相关, 与砂灰比成正相关, 其原因如下:

1) 质量分数。质量分数增加, 说明膏体内的水分含量减少, 固体颗粒间的自由水比例下降, 因此膏体的流动性差。

2) 尾废比。尾废比是指尾砂与废石之间的质量比, 其值越大, 说明固体物料组成中的尾矿含量越大。废石的平均粒径为 3.92 mm, 尾砂的平均颗粒直径为 58 μm , 故尾砂颗粒的

比表面积更大, 因此尾矿表面吸附了更多的水, 导致膏体内的自由水减少, 流动性差。

3) 砂灰比。砂灰比表示尾砂和废石的总质量与水泥之间的比值, 其值越大, 说明水泥含量越低。水泥颗粒的平均直径为 15 μm , 且在搅拌过程中发生水化反应。因此, 水泥含量越低, 膏体的流动性越好。但水泥含量的大小决定了膏体充填体的强度高低, 为保证采矿的作业安全, 根据前期探索性试验结果, 砂灰比不宜大于 8。

2.3 配比优化

以膏体的流动性能为评价指标进行物料配比优化, 将砂灰比取值为 8, 依据式(1)可得出坍落度与质量分数、尾废比之间的关系, 如图 6 所示。

由图 6(a)可以看出, 膏体坍落度与质量分数、尾废比均呈现负相关关系, 与前文分析一致。坍落度的评判标准为 20~26 cm, 根据图 6(b)中“坍落度为 20~26”两条直线间的坐标区间, 可以得出适宜的膏体配比范围: 质量分数 77%~79%, 尾废比 4~6。

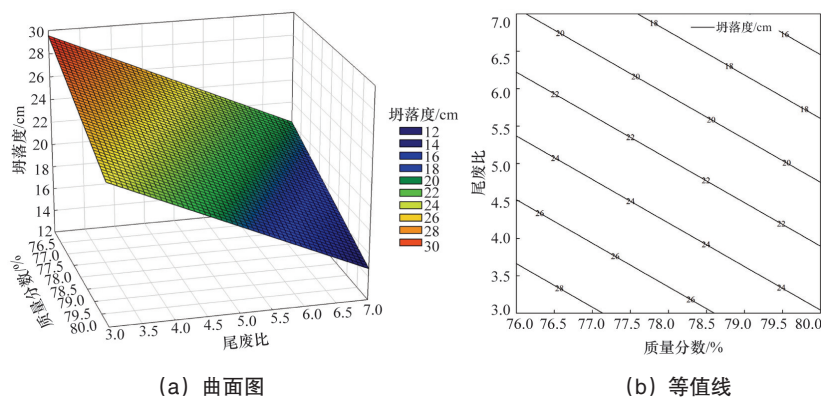


图 6 膏体坍落度的曲面图与等值线图

Fig. 6 Surface and contours of slump of paste

在确定坍落度取值范围的同时, 结合膏体的稳定性 (L/F) 指标对物料配比进行优化。根据式(1)、(2)及砂灰比等于 8, 可以得出膏体稳定性与质量分数、尾废比间的关系(图 7)。

由图 7(a)可知, 膏体稳定性与质量分数、尾废比均呈现正相关。稳定性取值为 0.4 时说明膏体性能良好, 根据图 7

(b)中“ $L/F=0.4$ ”所对应的坐标值, 可以看出当质量分数逐渐增加时, 尾废比的取值应减小。

综合考虑膏体坍落度和稳定性, 结合图 6(b)和图 7(b)给出的取值区间, 得出膏体的推荐配比: 质量分数 77.5%~78.5%; 尾废比 4.5~5.5; 泵送剂 2.0% (水泥质量); 砂灰比 8。

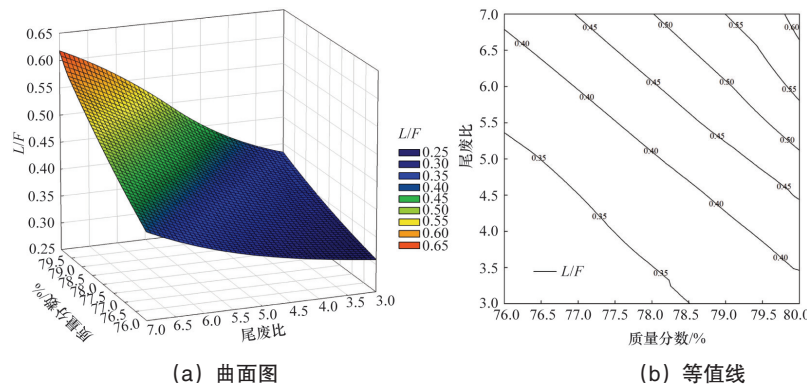


图 7 膏体稳定性的曲面图与等值线图

Fig. 7 Surface and contours of stability of paste

2.4 优化配比较证

根据推荐配比测试了两组膏体的强度,验证试验方案如表3所示。

表3 膏体配比较证试验方案

Table 3 Program of confirmatory experiment

序号	质量 分数/%	尾废比	砂灰比	泵送剂 添加量/%	坍落度/ cm	扩展度/ cm
1	77.5	5.5	8	2	22.5	58
2	78.5	4.5	8	2	23.1	60

由表3所示的坍落度和扩展度结果可以看出,两种配比的膏体流动性均满足要求。

每组膏体考察了7、14、28 d 3个养护时间,每个龄期做3块7.07 cm×7.07 cm×7.07 cm的立方体试块。试块放在标准恒温恒湿养护箱中养护,养护条件为:温度20℃,湿度>90%。测量了两组膏体3个龄期的单轴抗压强度,每个龄期测试3个试块的强度,取平均值,结果如图8所示。

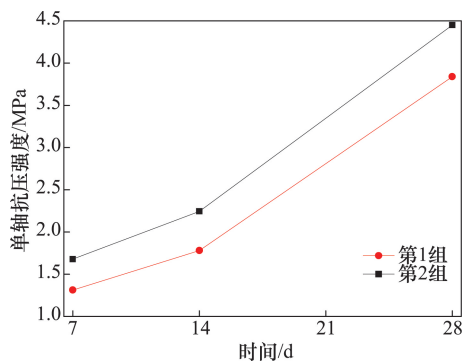


图8 膏体强度随时间的变化

Fig. 8 Changes of compressive strength of paste

膏体的强度测试结果表明,两组膏体的28 d抗压强度达到了3.8~4.5 MPa,满足了矿山采用下向进路充填采矿法的要求,因此说明该配比范围取值合理。

3 结论

1) 开展了坍落度试验,通过对比膏体坍落度以及稳定性,筛选出了泵送剂C作为外加剂改善膏体的流动性能,最佳添加量为水泥质量的2.0%~2.5%。

2) 对均匀设计试验结果进行了回归分析,得出了各试验因素与流动性之间的关系。质量分数、尾废比与流动性呈现负相关,砂灰比与流动性呈现正相关。

3) 根据拟合方程得出了膏体的推荐配比:质量分数为77.5%~78.5%,尾废比为4.5~5.5,泵送剂添加量为水泥质量的2.0%,砂灰比为8。并由此开展了验证试验,膏体的28 d强度大于3.8 MPa,膏体的流动性和强度均满足实际要求。

参考文献 (References)

- [1] 王洪江, 王勇, 吴爱祥. 从饱和率和泌水率角度探讨膏体新定义[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(6): 85-89.
Wang Hongjiang, Wang Yong, Wu Aixiang, et al. Research of paste new definition from the viewpoint of saturation ratio and bleeding rate [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(6): 85-89.
- [2] Henriquez J, Simms P. Dynamic imaging and modelling of multilayer deposition of gold paste tailings[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(2): 128-139.
- [3] 常庆粮, 周华强, 柏建彪. 膏体充填开采覆岩稳定性研究与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 279-282.
Chang Qingliang, Zhou Huaqiang, Bai Jianbiao, et al. Stability study and practice of overlying strata with paste backfilling[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 279-282.
- [4] 翟永刚, 吴爱祥, 王洪江. 全尾砂膏体充填临界质量分数[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(7): 795-799.
Zhai Yonggang, Wu Aixiang, Wang Hongjiang, et al. Threshold mass fraction of unclassified-tailings paste for backfill mining [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(7): 795-799.
- [5] Fall M, Célestin J, Sen H. Potential use of densified polymer-pastefill mixture as waste containment barrier materials[J]. Waste Management, 2010, 30(12): 2570-2578.
- [6] Yin S, Wu A, Hu K, et al. The effect of solid components on the rheological and mechanical properties of cemented paste backfill[J]. Minerals Engineering, 2012, 35: 61-66.
- [7] Nasir O, Fall M. Coupling binder hydration, temperature and compressive strength development of underground cemented paste backfill at early ages[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25(1): 9-20.
- [8] Reid C, Bécaert V, Aubertin M. Life cycle assessment of mine tailings management in Canada[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(4): 471-479.
- [9] Junlong L, Haiyan M, Qiang L, et al. Study on optimization of high performance concrete admixtures[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2011, 28(2): 206-210.
- [10] 缪昌文, 刘加平, 刘建忠. 外加剂对混凝土耐久性的影响[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36(2): 253-258.
Miao Changwen, Liu Jiaping, Liu Jianzhong. Effect of chemical admixtures on concrete durability[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2006, 36(2): 253-258.
- [11] 孙德民, 任建平, 焦华喆. 某矿全尾砂胶结充填物料性能研究[J]. 金属矿山, 2012(3): 6-9.
Sun Demin, Ren Jianping, Jiao Huazhe, et al. Study on the properties of the unclassified tailings cemented backfill materials in a mine [J]. Metal Mine, 2012(3): 6-9.
- [12] 宋卫东, 李豪风, 雷远坤. 程潮铁矿全尾砂胶结性能试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2012, 32(1): 8-11.
Song Weidong, Li Haofeng, Lei Yuankun, et al. Experimental research on the performance of cemented whole-tailings filling material in Chengchao iron mine[J]. Mining Research and Development, 2012, 32(1): 8-11.
- [13] 袁峡. 高性能混凝土泵送施工在波斯腾湖东泵站工程中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(2): 40-43.
Yuan Xia. Application of high performance concrete pumping construction in east pumping station project in bostan lake [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(2): 40-43.

(编辑 田恬)