DOI:10.7631/issn.1000 - 2243.2015.01.0129 文章编号:1000 - 2243(2015)01 - 0129 - 06

泵送减水剂对尾砂 - 棒磨砂膏体料浆和易性与充填体强度影响研究

杨志强[1,2], 王永前[2], 高 谦[1], 陈得信[2], 姚维信[2]

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737100)

摘要: 针对金川镍矿尾砂 - 棒磨砂膏体在充填管道输送中存在的堵管问题, 开展了泵送减水剂对膏体的和易性与充填体强度影响试验研究. 首先分析了膏体物料的物化特性和颗粒级配; 然后采用金川镍矿尾砂 - 棒磨砂膏体充填系统工业生产中的技术参数, 开展了添加不同泵送减水剂添加量的充填体强度、膏体和易性以及流变特性参数测试研究. 研究结果显示, 当添加 1%~2% 的泵送减水剂, 3、7 和 28 d 强度均有显著提高. 膏体的和易性随泵送减水剂添加量的增加而提高, 且浓度越高, 效果越显著. 当膏体浓度(质量浓度)在 78%~80% 的范围, 膏体初始剪切应力和粘滞系数均随着泵送减水剂的增加而线性减小. 结合泵送减水剂对充填体强度、膏体和易性以及流变特性影响分析, 并考虑膏体充填成本与采矿经济效益, 确定 1% 的泵送减水剂为比较合理的添加量. 研究结果为金川镍矿膏体充填系统料浆制备提供重要依据, 已经应用于金川矿山膏体充填的工业化生产.

关键词: 膏体充填料浆; 泵送减水剂; 和易性; 流变特性; 金川; 镍矿

中图分类号: TD 8531.34 **文献标识码**: A

Research on pumping water reducing agent affecting on the strength of backfilling body and workability of paste slurry with tailing and rod grinding sand

YANG Zhiqiang[1,2], WANG Yongqian[2], GAO Qian[1], CHEN Dexin[2], YAO Weixin[2]

(1. Key Laboratory of High Efficient Mining and Safety of Metal Mine Ministry of Education, University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China; 2. Jinchuan Group Co. LTD, Jinchang, Gansu 737100, China)

Abstract: Considering the problems of plugging piping in the tailings paste filling system in Jinchuan nickel mine, the study on the workability and strength of filling body by adding the slurry pumping water reducing agent had been done. Firstly the physico - chemical properties and particle size distribution of the materials were analyzed. Then the experiments of the filling body strength, workability and rheological properties of the filling slurry by adding pumping water - reducing agent with different amount were carried out based on the industrial production technical parameters of the tailings paste backfill system of in Jinchuan Nickel Mine. The results shows, when addition quantity of pumping water - reducing agent is 1% ~ 2%, not only the filling body strength of the 3, 7, 28 d can be increased, but also the workability of filling slurry is to be improved, which the higher the concentration of slurry the more remarkable of the workabilityof filling slurry being improved. When the concentration of slurry is in the scope of 78% ~80%, the initial shear yield force and viscous coefficient of paste are decreasing with the increasing of additive amount of pumping water - reducing agent. Overall considering research results of the strength of backfill body, workability and rheological behavior of paste slurry by adding different amount of pumping water - reducing agent, the reasonable amount adding of 1% is given. The research results provide the theoretical foundation to design matching of paste filling slurry and have been applied to the industrial production in Jinchuan Mine.

Keywords: paste slurry; pumping water - reducing agent; workability; rheological behavior; Jinchuan; nickel mine

收稿日期: 2014 - 04 - 13

通讯作者: 高谦(1956 -), 博士, 教授, 博导, 主要从事充填采矿技术和资源综合利用研究, gaoqian@ces.ustb.edu.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划(SS2012AA062405)

0 引言

膏体或高浓度料浆充填能够显著提高充填体强度,降低胶凝材料用量,减少采场脱水和改善采场作业环境,是国内外充填采矿技术发展的趋势. 然而,相对于低浓度充填料浆自流输送,膏体充填存在料浆制备难度大、材料配比控制要求精度高和管道输送阻力大等问题,堵管和爆管的风险大、频率高. 改善膏体充填料浆的和易性,是实现泵送膏体充填的关键技术之一,也是泵送膏体充填技术最重要的研究课题之一.

膏体和易性反映料浆的工作性能,通常采用流动性、粘聚性和保水性三个指标来评价[1]. 影响膏体和易性的主要因素包括充填骨料的级配与物化特性、胶凝材料种类与特性、胶砂比、料浆浓度以及外加剂等[2]. 王洪江等[3]针对全尾砂 - 水淬渣膏状物料,提出了采用流动度和分层度来评判全尾砂细石膏状物料可泵性指标,开展了充填骨料级配、胶砂比、水胶比、外加剂以及料浆搅拌活化等对膏体和易性影响研究. 薛丽皎等[4]研究认为,料浆塌落度小、混凝土含砂率低和料浆离析等是造成管道堵塞的主要因素,提高泵送设备和改善料浆和易性可以减少管道堵塞事故. 目前,针对混凝土拌合物进行了减水剂和粉煤灰对料浆的和易性研究[5 - 8]. 姚志全等针对似膏体开展了减水剂合理添加量的试验研究[9]. 马静和魏微等分别针对全尾砂充填料开展了料浆和易性的试验研究,揭示了充填料粒级级配以及胶凝材料的和易性与外加剂的关系与最佳掺量[10 - 11]. 无论是混凝土拌合物还是尾砂膏体,引气剂所形成的加气混凝土或泡沫砂浆能够显著提高料浆和易性. 阎坤等开展了含气量对普通预拌砂浆性能的影响研究[12]. 翟淑花和陈忠平等在金川矿山开展了泡沫砂浆的工业试验研究,已经取得了较好成果[13 - 14]. 李茂辉等针对新型充填胶凝材料,开展了泡沫剂对充填体强度和流变特性的试验研究[15]. 由此可见,充填骨料的组成以及粒级级配的不同,充填料浆的和易性存在较大差异. 目前我国采用膏体充填技术的矿山仅限于会泽铅锌矿和金川二矿. 前者采用尾砂 - 水淬渣混合充填料,而后者采用尾砂 - 棒磨砂充填料. 因此,对尾砂 - 棒磨砂充填料的膏体和易性研究在国内外研究并不多见.

金川二矿区膏体充填输送管路有 ϕ159 mm、ϕ133 mm 和 ϕ108 mm 三种管径. 管道长度 1 700 ~ 2 700 m,管道阻力损失达到 5 ~ 8 MPa. 膏体充填系统由地表一台 KSP140 - HDR 液压泵实施泵压输送. 由于充填管路距离不同和膏体浓度在 76% ~ 80% 范围内波动,导致泵压波动较大. 当浓度较高时泵压随之增高. 由于管路接头是中压接头,承压能力仅为 3 ~ 4 MPa,当管路阻力损失大于 5 MPa,容易造成输送管路接头部位泄漏和采场塑料管爆管. 为此,金川二矿首先进行充填管路系统优化调整,统一了 1 350 m 中段的输送管径,扩大了管道钻孔处上、下弯管的角度,从而大幅度降低了管路系统的输送阻力. 在此基础上,根据膏体充填系统的实际运行参数,采用 78% ~ 80% 的膏体浓度、1∶1 的分级尾砂与棒磨砂配比的充填料,分别添加 300 和 100 kg · m^{-3}的水泥和粉煤灰,按水泥质量的 1% ~ 3% 添加泵送减水剂,进行了尾砂膏体料浆的和易性和充填体强度试验,由此揭示了泵送减水剂对充填体强度、膏体和易性以及流变特性的影响,确定了满足金川矿山充填技术指标的泵送减水剂合理添加量.

1 试验材料的物化特性分析

试验采用的分级尾砂、棒磨砂、水泥和粉煤灰等材料从金川二矿区的充填工区现场选取,采用 JKJ - NF 高效泵送减水剂进行试验. 充填材料的物化特性见表 1. 棒磨砂和分级尾砂的粒径分布曲线见图 1 和图 2.

表 1 金川矿山充填材料物化特性参数

Tab. 1 The physical and chemical characteristic parameters of filling materials in Jinchuan mine

充填材料	w_{SiO_2}/%	$w_{Al_2O_3}$/%	w_{MgO}/%	w_{CaO}/%	$w_{Fe_2O_3}$/%	w_S/%	w_{Fe}/%	w_{Ni}/%	$\rho_{实体}$/g · cm^{-3}	$\rho_{松散}$/g · cm^{-3}	散体孔隙率/%
分级尾砂	36.3	3.39	28.2	3.9	0	0.67	9.51	0.198	2.67	1.530	42.7
棒磨砂	74.9	5.96	3.0	4.0	0	0.00	0.13	<0.010	2.87	1.225	57.3
粉煤灰	32.8	12.20	2.9	1.7	0	1.41	0.44	<0.005	2.20	0.800	63.6
水泥	21 ~ 24	4 ~ 7	<4	64 ~ 67	2 ~ 4	<3	0.00	0.00	3.10	1.130	63.6

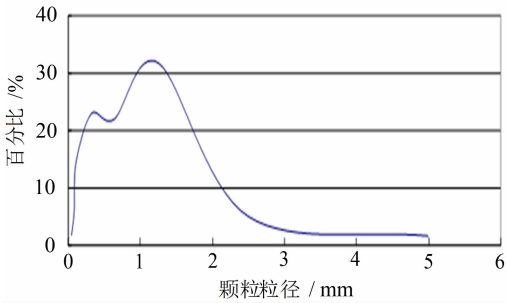


图 1　金川矿山棒磨砂充填料粒径分布曲线

Fig. 1　Distribution curve of particle diameter for rod mill sand

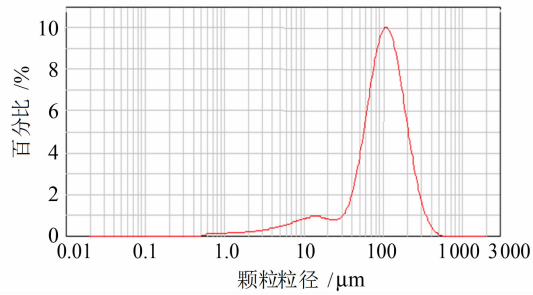


图 2　金川矿山分级尾砂充填料粒径分布曲线

Fig. 2　Distribution curve of particle diameter for classification tailling

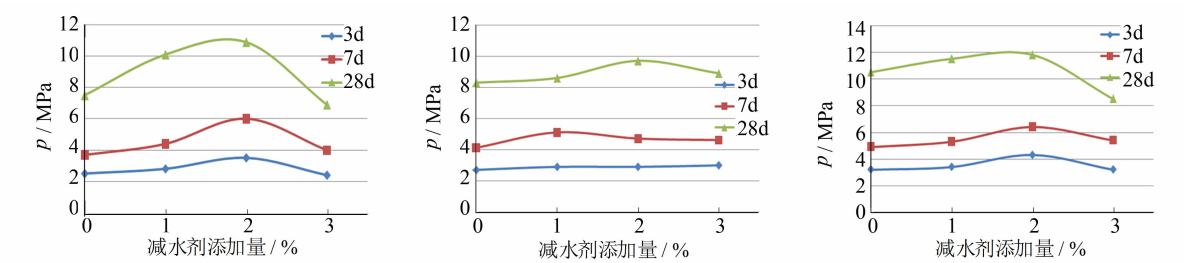
2　泵送减水剂对膏体料浆的充填体强度影响研究

表 2 给出了膏体添加不同泵送减水剂对其充填体强度影响的试验结果，图 3 显示了膏体充填形成的充填体抗压强度(p)与泵送减水剂添加量的关系曲线. 由此可见，当泵送减水剂添加量达到水泥质量的 1% 和 2% 时，3、7 和 28 d 充填体强度分别提高了 6.25% ~40%、8.1% ~62% 和 3.6% ~45%. 当泵送减水剂添加量增加到 3% 时，28 d 充填体强度反而降低了 8% ~19%. 显然，泵送减水剂的合理添加量为水泥质量的 1% ~2%，相应充填体 3d、7 和 28 d 强度满足金川矿山充填技术标准，即 $R_3 \geqslant 1.5$ MPa，$R_7 \geqslant 2.5$ MPa，$R_{28} \geqslant 5.0$ MPa.

表 2　添加泵送减水剂对其充填体强度试验结果

Tab. 2　The test results of the filling body strength adding water reducing agent in slurry

编号	减水剂添加量/%	w/%	p/MPa			充填体强度增减比例/%		
			3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
1 - 1	0	78	2.5	3.7	7.5	0.0	0.0	0.0
1 - 2	0	79	2.7	4.1	8.3	0.0	0.0	0.0
1 - 3	0	80	3.2	4.9	10.5	0.0	0.0	0.0
2 - 1	1	78	2.8	4.4	10.1	12.0	19.0	35.0
2 - 2	1	79	2.9	5.1	8.6	7.4	24.0	3.6
2 - 3	1	80	3.4	5.3	11.5	6.3	8.1	9.2
3 - 1	2	78	3.5	6.0	10.9	40.0	62.0	45.0
3 - 2	2	79	2.9	4.7	9.7	7.4	15.0	17.0
3 - 3	2	80	4.3	6.4	11.8	34.4	30.6	12.4
4 - 1	3	78	2.4	4.0	6.9	-4.0	8.0	-8.0
4 - 2	3	79	3.0	4.6	8.9	11.0	12.8	6.0
4 - 3	3	80	3.2	5.4	8.5	0.0	10.2	-19.0



(a) 膏体浓度为 78%　　(b) 膏体浓度为 79%　　(c) 膏体浓度为 80%

图 3　膏体充填体强度与泵送减水剂添加量的关系曲线

Fig. 3　The relation curves between the strength of filling body and the adding amount of water reducing agent for different Paste concentration

3　泵送减水剂对尾砂膏体和易性影响

表 3 给出了不同减水剂添加量的膏体和易性的试验结果. 图 4 显示了膏体的流动度、坍落度和扩散度

与泵送减水剂添加量之间的关系曲线，由此获得以下几点结果：

1)膏体流动度随泵送减水剂添加量的增加而提高，膏体浓度越高，膏体流动度提高的幅度越大. 当膏体浓度为78%~80%时，膏体流动度与泵送减水剂添加量呈线性增加关系；当浓度提高到81%时，膏体流动度在泵送减水剂添加量小于2%时呈线性增加；在大于2%时趋近于渐近线. 当膏体浓度提高到82%时，泵送减水剂添加量大于2%时流动度趋于定值. 浓度为78%~82%时，添加1%的泵送减水剂提高膏体的流动度达到1.65%~14.45%；添加2%的泵送减水剂提高4.96%~36.4%，添加3%的泵送减水剂提高8.26%~38.55%.

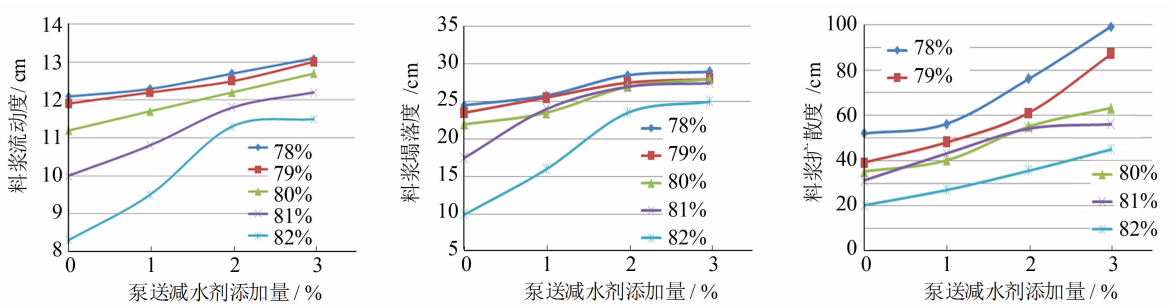
2)添加泵送减水剂显著提高膏体的坍落度. 泵送减水剂对膏体塌落度的影响规律类似于膏体流动度. 当膏体添加1%、2%和3%的泵送减水剂，膏体塌落度分别提高5.3%~40%、16.3%~135%和18.4%~150%.

3)添加1%的泵送减水剂相当于降低1°后膏体浓度的流动度和坍落度. 可见，添加1%~3%的泵送减水剂可将膏体浓度提高1°~3°. 由于增加泵送减水剂添加量提高了充填采矿成本，因此在满足膏体流动度要求的前提下，确定泵送减水剂的添加量应不小于1%.

表 3　不同泵送减水剂添加量的充填料浆和易性试验结果

Tab. 3　The test results of slurry workability adding pumping water – reducing agent

w/%	减水剂添加量/%	膏体和易性参数测试结果			减水剂对膏体和易性参数增减比例		
		流动度/cm	坍落度/cm	扩散度/cm	流动度/%	坍落度/%	扩散度/%
78	0	12.1	24.5	52	0.0	0.0	0.0
	1	12.3	25.8	56	1.7	5.3	7.7
	2	12.7	28.5	76	5.0	16.3	46.2
	3	13.1	29.0	99	8.3	18.4	90.4
79	0	11.9	23.5	39	0.0	0.0	0.0
	1	12.2	25.5	48	2.5	8.5	23.1
	2	12.5	27.5	61	5.0	17.0	56.4
	3	13.0	28.0	87	9.25	19.2	123.0
80	0	11.2	22.0	35	0.0	0.0	0.0
	1	11.7	23.5	40	4.5	6.8	14.3
	2	12.2	27.0	55	8.9	22.7	57.1
	3	12.7	28.0	63	13.4	27.3	80.0
81	0	10.0	17.5	31	0.0	0.0	0.0
	1	10.8	24.0	43	8.0	37.1	38.7
	2	11.8	27.0	54	18.0	54.3	74.2
	3	12.2	27.5	56	22.0	57.1	80.6
82	0	8.3	10.0	20	0.0	0.0	0.0
	1	9.5	16.0	27	14.5	40.0	35.0
	2	11.3	23.5	36	36.4	135.0	77.5
	3	11.5	25.0	45	38.5	150.0	125.0



(a) 流动度　(b) 塌落度　(c) 扩散度

图 4　膏体的流动度、塌落度和扩散度与泵送减水剂添加量的关系曲线

Fig. 4　The relation curves between the fluidity, slump and diffusance vs the adding amount of water reducing agent in slurry respectively

4　泵送减水剂对膏体料浆流变特性影响研究

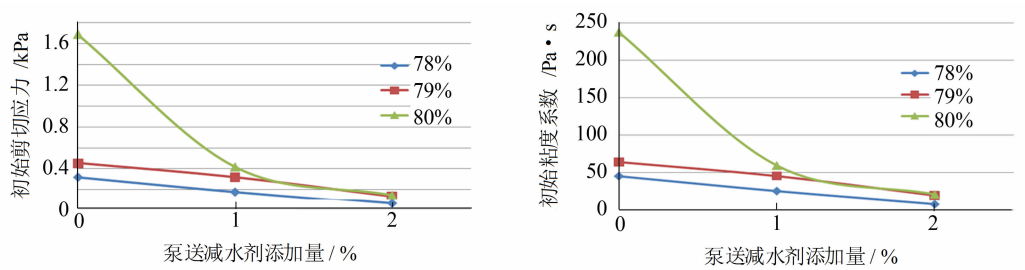
采用美国 BROOKFIELD 公司生产的 R/S plus 流变仪进行试验，转子型号选择 V30－15，转子的转速选择 30～60 r·min^{-1}的变化范围，在 28 ℃的室内温度条件下，按照 3 s 步长测试膏体的流变参数，获得的试验结果见表 4. 图 5 分别显示了膏体初始剪切应力和初始黏度系数与泵送减水剂添加量的关系曲线.

由此可见，膏体初始剪切应力和初始粘度系数均随泵送减水剂添加量的增加而逐渐减小. 当膏体浓度为 78% 和 79% 时，随着泵送减水剂添加量的增加，膏体的流变参数呈线性减小；当膏体浓度提高到 80% 时，膏体的流变参数呈指数下降趋势. 由此可见，膏体浓度越高，添加泵送减水剂对膏体管道输送的减阻效果越显著. 当膏体浓度为 80% 时，添加 1% 的泵送减水剂对膏体的减阻效果可以满足管道输送要求.

表 4　添加泵送减水剂的膏体流变参数试验结果

Tab. 4　Test results the rheological parameters of slurry to add water reducer

质量浓度/%	减水剂添加量/%	剪切应力		平均剪切应力		黏度系数		平均黏度系数	
		试验值/Pa	减水剂降低比例/%	试验值/Pa	减水剂降低比例/%	试验值/Pa·s	减水剂降低比例/%	试验值/Pa·s	减水剂降低比例/%
78	0	317.7	0.0	83.5	0.0	44.9	0.0	9.5	0.0
	1	177.2	44.2	71.1	14.8	25.1	44.2	7.9	16.8
	2	55.3	85.6	29.2	65.0	7.8	82.6	3.2	66.8
79	0	454.6	0.0	95.5	0.0	63.9	0.0	10.1	0.0
	1	319.6	29.7	87.8	8.1	45.2	29.3	8.9	12.7
	2	135.3	70.3	65.8	31.2	19.1	70.1	7.2	28.6
80	0	1687.2	0.0	140.6	0.0	237.3	0.0	17.4	0.0
	1	419.2	75.2	118.5	15.7	59.2	75.1	13.5	22.1
	2	145.6	91.4	67.3	52.1	20.6	91.3	7.4	57.2



（a）初始剪切应力　　（b）粘度系数

图 5　膏体初始剪切应力和黏度系数与泵送减水剂添加量的关系曲线

Fig. 5　The relation curves between the initial shear stress and viscosity coefficient vs adding amount of water reducer respectively

5　结论

金川矿山膏体充填系统是我国第一座膏体充填采矿矿山. 针对尾砂膏体充填技术存在的堵管和爆管事故等问题，开展了膏体添加泵送减水剂试验. 通过对充填体强度、工作特性以及流变特性试验数据的综合分析，获得以下结论：

1）当泵送减水剂添加量为水泥质量的 1%～2%，3、7 和 28 d 充填体强度分别提高了 6.25%～40.0%、8.1%～62.0% 和 3.6%～45.0%. 当泵送减水增加到 3%，充填体强度均随之降低. 可见，1%～2% 的添加量是影响充填体强度的合理添加量；

2）膏体和易性随泵送减水剂添加量的增加而提高，且膏体浓度越高，提高幅度越大. 当膏体浓度在 78%～80% 的范围，膏体和易性与泵送减水剂添加量呈线性增长关系. 综合考虑充填采矿成本以及膏体流动度，确定膏体泵送减水剂的添加量不小于 1%；

3)膏体的初始剪切应力和粘度系数均随泵送减水剂添加量的增加而逐渐减小. 当膏体浓度在 78% ~ 80% 的范围, 添加 1% 的泵送减水剂的减阻效果能够满足膏体料浆的输送要求;

4)综合泵送减水剂对充填体强度、膏体和易性以及流变特性的影响分析, 并考虑膏体充填采矿成本和经济效益, 确定 1% 的膏体泵送减水剂的添加量对金川矿山膏体充填较为合理.

参考文献:

[1] 杨春常, 张训. 对新拌混凝土工作性能表征方法的探讨[J]. 广东建材, 2013(6): 18 - 21.
[2] 王洪江, 吴爱祥, 陈进, 等. 全尾砂 - 水淬渣膏状物料可泵性指标优化[J]. 采矿技术, 2007, 7(3): 15 - 17.
[3] 许青海. 对影响新拌混凝土和易性因素及改善措施的几点看法[J]. 河南建材, 2008(1): 26 - 27.
[4] 薛丽皎, 程志恒, 陈丽红. 泵送混凝土泵管堵塞原因分析及预防对策[J]. 陕西工学院学报, 2004, 24(2): 46 - 47.
[5] 张旭贤, 牛新平, 王成, 等. 高效减水剂和粉煤灰对混凝土性能的影响[J]. 塔里木大学学报, 2011, 23(4): 61 - 66.
[6] 吕智英. 高效减水剂与粉煤灰对再生混凝土的和易性影响研究[J]. 商品混凝土, 2011(7): 44 - 46.
[7] 张旭贤, 牛新平, 庞林. 早强减水剂和粉煤灰对混凝土性能的影响[J]. 中国农村水利水电, 2012(4): 147 - 149.
[8] 张玥, 王兰英, 董浩, 等. 聚羧酸系减水剂应用技术研究[J]. 商品混凝土, 2009(5): 18 - 21.
[9] 姚志全, 张钦礼, 王新民. 减水剂在似膏体胶结充填中的应用[J]. 煤矿安全, 2009(1): 43 - 45.
[10] 马静, 王振波. 不同取代率再生粗骨料混凝土的和易性[J]. 山西建筑, 2009, 35(24): 170 - 172.
[11] 魏微, 高谦, 杨志强. 新型胶凝材料的流动性试验研究[J]. 金属矿山, 2013(9): 30 - 33.
[12] 阎坤, 毛永琳, 刘加平, 等. 含气量对普通预拌砂浆性能的影响[J]. 江苏建筑, 2007(S): 55 - 56.
[13] 翟淑花, 高谦, 张梅花, 等. 高强轻质泡沫砂浆充填体在矿山的应用研究[J]. 化工矿物与加工, 2010(12): 30 - 33.
[14] 陈忠平, 翟淑花, 高谦, 等. 泡沫砂浆充填体力学特性及其应用研究[J]. 金属矿山, 2010(8): 7 - 10.
[15] 李茂辉, 高谦, 南世卿. 泡沫剂对充填胶结材料强度和流变特性的影响[J]. 金属矿山, 2012(9): 43 - 46.

(编辑: 蒋培玉)

(接第 110 页)

参考文献:

[1] Ghodsian M, Vaghefi M. Experimental study on scour and flow field in a scour hole around a T - shape spur dike in a 90° bend[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(2): 145 - 158.
[2] Masjedi A, Dehkordi V. Experimental study on scour depth in around a T - shape spur dike in a 180 degree bend[J]. Journal of American Science, 2010, 6(10): 886 - 892.
[3] Masjedi A, Nadri A. Control of local scour at single L - shape spur dike with wing shape in flume bend[J]. Journal of American Science, 2010, 6(10): 893 - 897.
[4] Masjedi A, Bejestan M S. Experimental study on the time development of local scour on around single T - Shape spur dike in a 180 degree flume band[J]. Research Journal of Environmental Sciences, 2010, 4(6): 530 - 539.
[5] Safarzadeh A, Salehi S A A. Experimental study of head shape effects on shear stress distribution around a single groyne[J]. River Flow, 2010(7): 651 - 657.
[6] 檀会春, 张华庆. 弯道横向环流试验及分析[J]. 水道港口, 2010(1): 30 - 35.

(责任编辑: 杨青)