

金川镍矿全尾砂-棒磨砂混合充填材料 工业充填试验研究

杨志强^{1,2}, 高 谦¹, 陈得信², 王 虎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:针对金川下向进路式胶结充填法采矿工艺,开展了全尾砂-棒磨砂混合充填料的工业试验研究。试验结果表明,添加 30% 的全尾砂充填料,不仅提高了充填体强度,而且还可降低充填体的沉缩率、改善砂浆流动性,完全满足金川矿山安全充填采矿的要求。开展全尾砂充填料的工业化生产,能够弥补棒磨砂充填料的严重不足,显著降低充填采矿成本,从而获得更好的经济效益和社会效益。

关键词:金川镍矿;全尾砂;全尾砂-棒磨砂充填料;工业充填

中图分类号:TD853.34

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)02-0040-08

Industrial Filling Experiment on Full Tailings-Rod Milled Sands as Mixed Filling Materials in Jinchuan Nickel Mine

Yang Zhiqiang^{1,2}, Gao Qian¹, Chen Dexin², Wang Hu²

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

Abstract: The full tailings and rod milled sands industrial experiments was carried out for the downward slicing drift mining with cemented backfill in Jinchuan mine. The results show that adding 30% of full tailings as filling materials not only improves the strength of filling body, but also reduces the sedimentation loss rate of filling body and increases the liquidity of slurry, meeting requirements of the Jinchuan mine safety filling mining. Development and utilization of full tailings can make up for the serious shortage of rod milled sands while significantly reducing the cost to achieve favorable economic benefit.

Key words: Jinchuan nickel mine; full tailings; full tailings-rod milled sands; industrial filling

随着矿产资源的日趋减少,面临越来越多的建筑物、铁路和水体下的“三下”以及深部难采矿床的开采问题,充填采矿法无疑是这些矿床开采的首选。充填法采矿不仅可以提高采矿回采率和降低矿石贫化率,而且能够有效控制地表沉陷,保护矿山环境。因此,充填法开采的矿山比例和应用范围逐渐扩大,以往仅限于有色和贵金属矿床,近几年已经逐渐扩展到铁矿^[1-10]和煤矿^[11-16]。充填采矿法采矿工艺复杂,采矿成本高,其充填骨料和胶凝材料是整个充填采矿成本的重要组成部分。为此,开展全尾砂、废石、煤矸石和建筑垃圾等充填料的开发利用研究以及开发与之相适应的新型充填胶凝材料,是降低充填采矿成本的必由之路^[9-10,12-13,16]。

甘肃金川镍矿是我国最大的硫化铜镍矿床,矿体厚大、埋藏深、矿岩破碎、地应力高,给矿床开采带来巨

收稿日期:2013-06-21

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(2010CB731500)

作者简介:杨志强(1957—),男,山西万荣人,教授级高工,博士,主要从事金属矿充填法采矿管理与废弃物利用等方面的研究. E-mail: YZQ@jnmcc.com

高谦(1956—),男,江苏徐州人,教授,博士,主要从事充填开采研究. 本文通信作者, E-mail: gaoqian@ces. ustb. edu. cn

大困难。通过采矿技术攻关,已经探索出与之相适应的下向分层进路充填采矿法。2012年矿山生产能力达842万t,充填量281万 m^3 ,“十二五”期末规划采矿量超过1000万t,预计充填量达340万 m^3 ,充填骨料超过260万t,而金川砂石厂棒磨砂年生产能力仅160万t,导致矿山充填料严重不足。同时,金川矿山选厂每年排放尾砂超过500万t,开发和利用全尾砂作为充填材料的补充,不仅可以缓解矿山充填料的不足,而且还可以降低充填采矿成本,减少尾砂堆放,从而保护矿山环境,实现绿色开采。针对金川采矿工艺和充填体强度要求,已经开展了全尾砂-棒磨砂混合充填料的室内配比试验,获得了两种充填料的合理配比^[17]。为了实现工业化生产,在前期研究^[18-22]基础上,在金川二矿区进行了7次全尾砂-棒磨砂混合充填料的工业化充填试验研究。根据7次工业试验结果,综合分析和全面评价全尾砂-棒磨砂混合充填料在金川矿山应用的可行性与可靠性,为全尾砂-棒磨砂混合充填料在金川矿山的应用奠定基础。

1 工业试验内容与方案

1.1 研究目的与内容

工业试验目的是考察工业化充填过程中各系统运行的协调性,是否能够准确控制给定的充填料浆的配合比;监测给定配合砂浆的流动性以及充填体强度,是否达到金川矿山对充填体强度的要求;观测两种混合充填料的胶结充填体是否存在分层离析,整体稳定性是否满足矿山安全生产要求;获得全尾砂-棒磨砂混合充填料充填工业运行的技术参数和过程控制手段。

工业试验内容包括:根据室内试验结果,确定工业试验砂浆的合理配合参数,选择相应的参数计量及控制手段。进行水泥质量、棒磨砂质量、尾砂质量的同步质量检测和充填砂浆流动性能测试;分别从地表、井下充填管出口和进路充填体内取样进行充填体强度检测,评价混合充填料的胶结充填体是否达到设计强度;最后进行砂浆泌水率和沉降损失试验,评价充填砂浆分层度与沉缩率是否达到要求。

1.2 工业试验设计

选择金川龙首矿西部充填系统进行工业试验,按照充填系统现有的工艺流程和过程控制方式进行。根据室内试验结果,结合充填系统的工艺条件,采用普通硅酸盐32.5#水泥为胶结材料,按照全尾砂-棒磨砂配比分别为2:8,3:7和4:6进行循序渐进试验。水泥添加量确定为310 kg/m^3 ,充填砂浆流量控制在90~120 m^3/h ,按100 m^3/h 流量计算工业试验料浆配合比参数。

2 工业试验结果

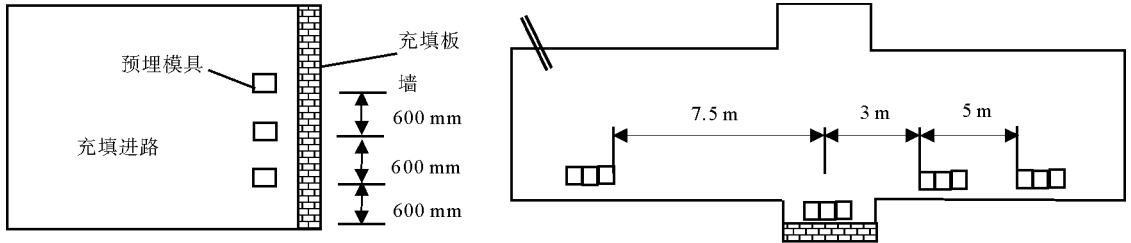
在金川龙首矿先后进行了7次工业充填试验。表1给出了7次工业试验地点、配比参数和充填量。图1给出了井下进路模具埋设位置。

表1 全尾砂-棒磨砂混合料工业试验地点与参数设计表

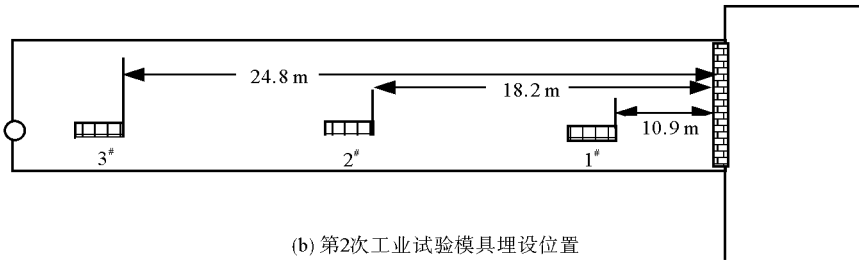
Tab. 1 Industrial experimental site and parameters of full tailings-rod milled sands

编号	试验地点	充填试验参数			充填量/ m^3	
		全尾砂:棒磨砂	浓度/%	流量/ $(m^3 \cdot h^{-1})$	设计	实际
1	728 采场 12 分层,东西 2# 进路和分层道	2:8	78	100	1 176	1 100
2	722 采场 13 分层,西 4 号进路	2.5:7.5	78	100	500	390
3	725 采场 12 分层,EW3 号进路、EW5 号进路	3:7	78	100	2 980	2 850
4	722 采场 14 分层,EW5 号进路	4:6	78	100	2 000	1 800
5	722 采场 15 分层,W12,EW10,EW8 号进路	3:7	78	110	2 850	2 650
6	722 采场 14 分层,E06,W05,EW03 号进路	3.5:6.5	78	110	2 000	1 800
7	727 采场 14 分层,EW01,EW03 号进路	3:7	78	100	1 600	1 500

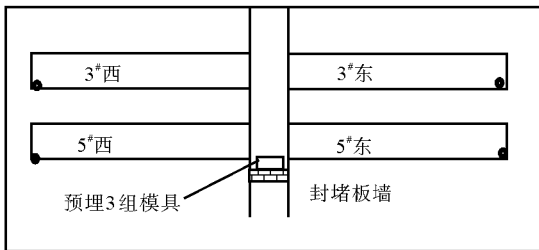
根据表 1 的设计参数和图 1 所示的模具埋设位置,进行全尾砂-棒磨砂混合充填料工业试验。每次试验结束 48 h 后,采用爆破拆除取出模具送到实验室进行养护和检测。表 2~4 分别为取自地表、井下充填管出口和采场进路中的充填试块抗压强度的测试结果。表 5 给出了工业充填料浆特性的检测结果。根据全尾砂-棒磨砂混合料的平均粒径和均匀系数,计算出不同配比的全尾砂和棒磨砂充填料的平均粒度和均匀系数。



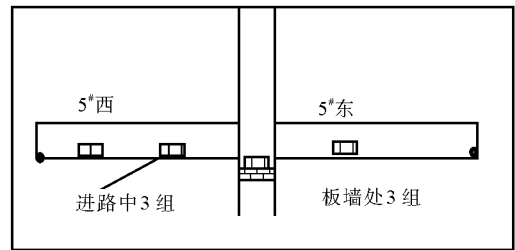
(a) 第1次工业试验模具埋设位置
(a) Mould embedding location of the first industrial test



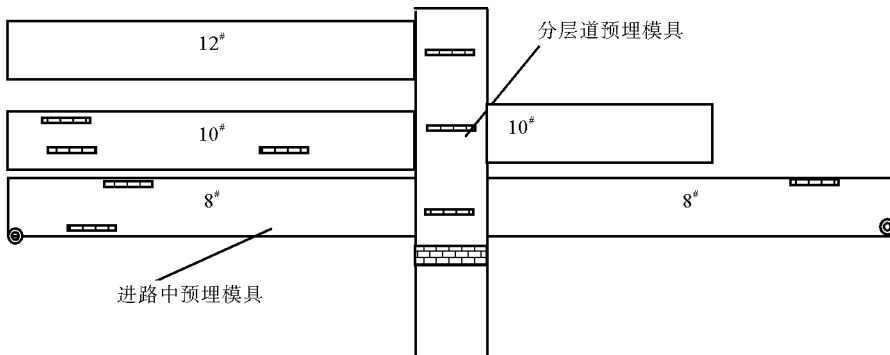
(b) 第2次工业试验模具埋设位置
(b) Mould embedding location of the second industrial test



(c) 第3次工业试验模具埋设位置
(c) Mould embedding location of the 3rd industrial test



(d) 第4次工业试验模具埋设位置
(d) Mould embedding location of the 4th industrial test



(e) 第5次工业试验模具埋设位置
(e) Mould embedding location of the 5th industrial test

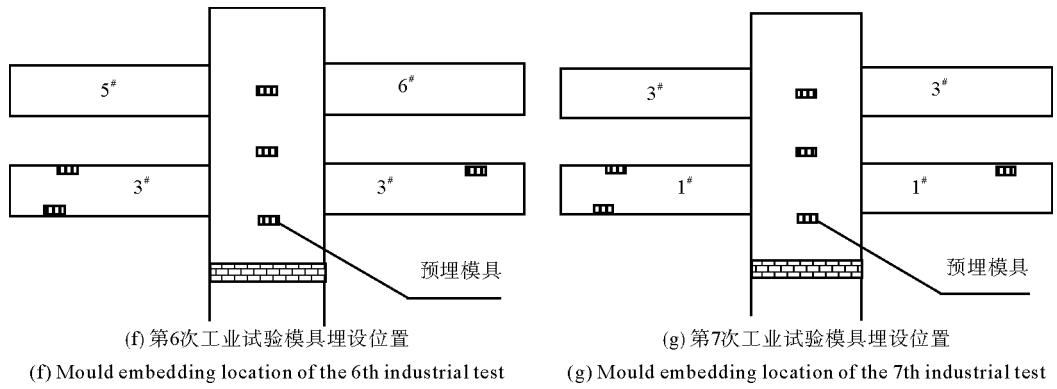


图 1 工业试验进路试块模具布置示意图

Fig. 1 Block mould layout diagram in industrial experimental access

表 2 工业试验充填体 3 d 强度试验结果

Tab. 2 3 d strength of industrial experimental

试块取样地点	全尾砂-棒磨砂混合配比						
	2:8	2.5:7.5	3:7	4:6	3:7	3.5:6.5	3:7
地表搅拌桶	2.23	1.82	2.30	1.40	1.55	1.03	1.50
井下充填管路出口	2.21	2.28	2.95	1.44	1.75	1.58	1.59
充填进路中	2.60	2.20	3.10	1.45	1.60	1.60	1.60

表 3 工业试验充填体 7 d 强度试验结果

Tab. 3 7 d strength of industrial experimental

试块取样地点	全尾砂-棒磨砂混合配比						
	2:8	2.5:7.5	3:7	4:6	3:7	3.5:6.5	3:7
地表搅拌桶	3.58	2.59	3.38	2.45	2.51	1.83	2.54
井下充填管路出口	3.30	2.90	3.97	2.45	2.69	2.65	2.5
充填进路中	3.33	2.87	3.10	2.87	2.70	2.70	2.51

表 4 工业试验充填体 28 d 强度试验结果

Tab. 4 28 d strength of industrial experimental filling body

试块取样地点	全尾砂-棒磨砂混合配比						
	2:8	2.5:7.5	3:7	4:6	3:7	3.5:6.5	3:7
地表搅拌桶	5.10	5.90	6.12	4.81	4.46	4.47	5.83
井下充填管路出口	7.20	6.10	7.58	5.43	5.35	5.00	7.07
充填进路中	6.00	6.80	8.10	5.53	5.84	6.55	5.67

表 5 混合充填料工业试验检测的砂浆特征参数表

Tab. 5 The characteristic parameters of industrial experimental filling slurry

编号	平均含水率/%		尾砂:磨砂	混合料粒度特征		平均浓度/%	平均稠度/(mPa·s)	沉降损失率/%
	尾砂	磨砂		平均粒径/ μm	不均匀系数			
1	14.3	10.9	2:8	769.7	9.5	76.2	13.5	9.0
2	6.2	10.0	2.5:7.5	723.9	10.3	77.2	13.5	10.0
3	6.0	11.0	3:7	678.1	11.1	77.9	13.2	9.5
4	5.5	9.9	4:6	586.4	12.8	78.6	12.0	7.0
5	9.6	9.8	3:7	678.1	11.1	76.2	13.6	7.1
6	9.4	11.4	3.5:6.5	632.3	10.9	76.5	12.1	9.0
7	9.5	10.9	3:7	678.1	11.1	79.7	12.5	8.8

3 工业试验结果分析

3.1 混合料充填体强度分析

图 2~4 给出了分别取自地表、井下和进路试块的 3,7 和 28 d 三种龄期的抗压强度与混合料配比的关系曲线。发现在相同试验中,采场进路中的试块强度最高,井下充填管出口取样的试块强度次之,地表搅拌桶取样的试块强度最低。表明进路中的养护条件有利于胶结充填体的水化反应和强度的提高。

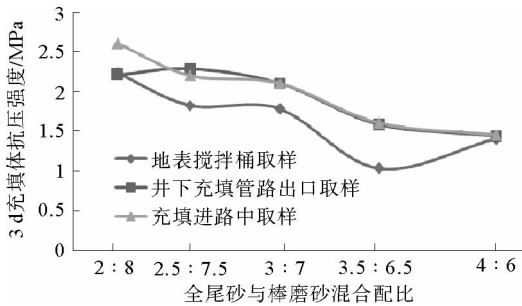


图 2 地表、井下和进路中试块 3 d 强度与混合料配比的关系曲线

Fig. 2 The relation curve between surface, underground and access samples intensity of 3 d and mixture proportion

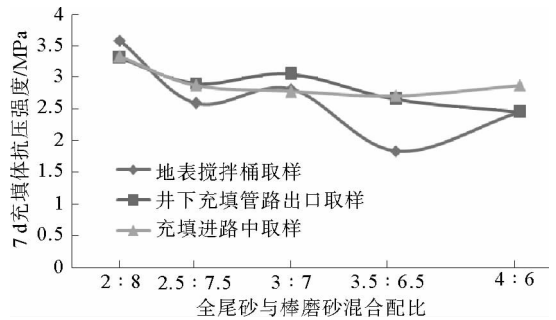


图 3 地表、井下和进路中试块 7 d 强度与混合料配比的关系曲线

Fig. 3 The relation curve between surface, underground and access samples intensity of 7 d and mixture proportion

将第 3,5,7 三次混合料配比均为 3:7 的试验结果取平均值,然后再对地表、井下和进路中取样试块强度计算均值,由此给出 7 次全尾砂-棒磨砂混合充填料试验数据(表 6)。图 5 给出了地表、井下和进路三个位置取样试块平均强度与配比的关系曲线。同时采用回归分析,由此获得 3,7 和 28 d 的平均强度与配合比的回归函数为:

$$R_{3d} = 2.915 - 2.390m,$$

$$R_{7d} = 3.622 - 1.829m,$$

$$R_{28d} = 6.975 - 2.556m.$$

其中: R_{3d} , R_{7d} , R_{28d} 分别为三个取样位置试块的 3,7 和 28 d 的平均强度; m 为全尾砂与棒磨砂配比。

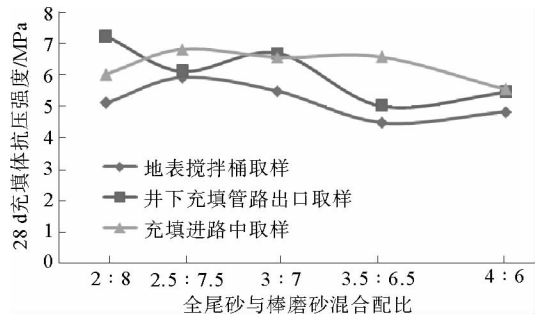


图 4 地表、井下和进路中试块 28 d 强度与混合料配比的关系曲线

Fig. 4 The relation curve between surface, underground and access samples intensity of 28 d and mixture proportion

表 6 全尾砂-棒磨砂混合料特征参数与充填体强度表

Tab. 6 The characteristic parameters of full tailings-rod milled sands mixture and filling body strength

编号	尾砂:磨砂	混合料粒度特征		地表、井下和进路试块强度均值/MPa		
		平均粒径/ μm	不均匀系数	3 d	7 d	28 d
1	2:8	769.7	9.5	2.35	3.40	6.10
2	2.5:7.5	723.9	10.3	2.10	2.79	6.27
3,5,7	3:7	678.1	11.1	1.99	2.88	6.23
6	3.5:6.5	632.3	12.1	1.40	2.39	5.34
4	4:6	586.4	12.8	1.43	2.59	5.26

由图 2~5 和表 6 可见,充填体强度随两种充填料配比的增大线性降低,但早期强度降低较为明显;而 28 d 强度开始随着配比的增大而增大,但当配比增大到 3 : 7 后才随之降低。由此表明,添加适当全尾砂混合充填料,有利于充填体的后期强度。图 6 和图 7 分别给出井下进路充填体中取样的试块强度与混合料平均粒径和不均匀系数的关系曲线。可见,充填体强度随混合料平均粒径的增大而提高,随混合料不均匀系数的增大而降低。同样,这种变化规律在充填体早期强度的表现较显著,但对 28 d 强度影响不明显。

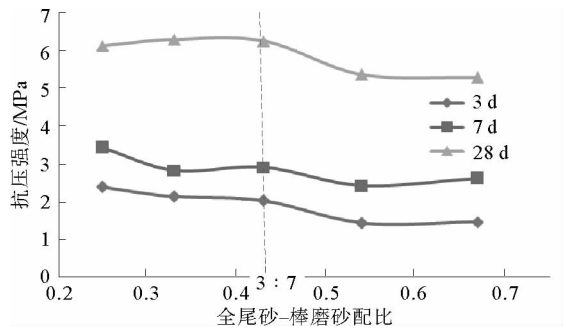


图 5 地表、井下和进路试块强度均值与混合料配比的关系曲线

Fig. 5 The relation curve between surface, underground and access samples average intensity and mixture proportion

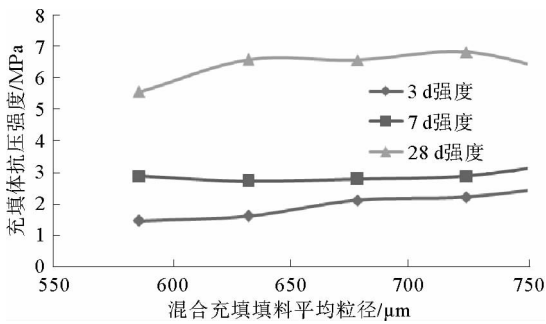


图 6 进路中取样试块强度与混合充填料平均粒径的关系曲线

Fig. 6 The relation curve between the access samples intensity and mixture average particle diameter

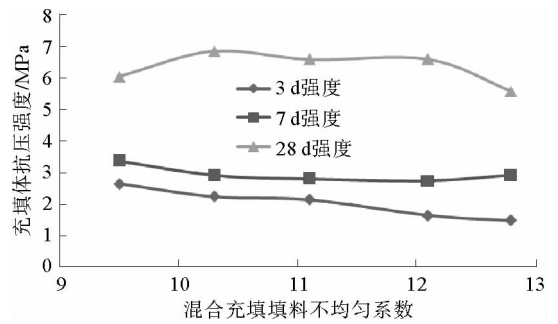


图 7 进路中取样试块强度与混合充填料不均匀系数的关系曲线

Fig. 7 The relation curve between the access samples intensity and mixture unevenness coefficient

3.2 混合充填料浆流变特性分析

图 8 和图 9 分别给出了充填体沉缩损失率和充填砂浆平均稠度与混合料配比的关系曲线。可知,随着混合充填料配比增大,充填体沉缩损失率和料浆平均稠度均呈现减小趋势。由此可见,添加全尾砂的混合充填料的充填体沉缩率减小,有利于充填体接顶。但充填料浆稠度减小,流动性变差,不利于充填料浆的管道输送。图 10 和图 11 还给出了充填体沉缩损失率和充填砂浆平均稠度与混合料不均匀系数的关系曲线。可见,充填体沉缩损失率和料浆平均稠度与混合充填料特征的变化规律和两种充填料配比相似。

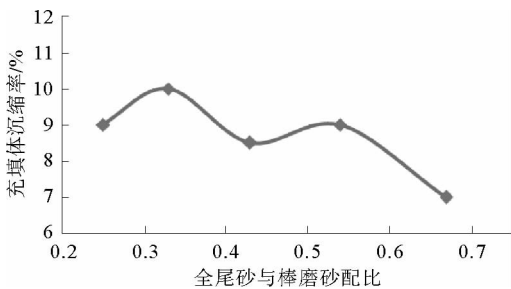


图 8 混合料充填体沉降损失率与配比的关系曲线

Fig. 8 The relation curve between sedimentation loss rate and mixture proportion

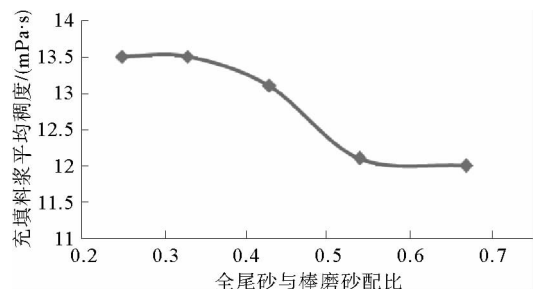


图 9 混合充填料浆平均稠度与配比的关系曲线

Fig. 9 The relation curve between slurry average consistency and mixture proportion

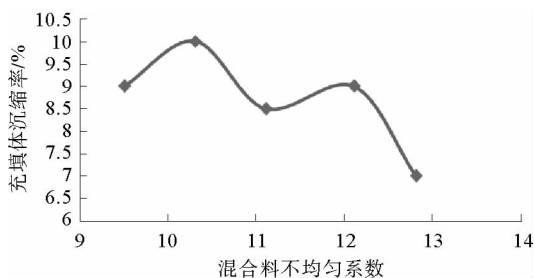


图 10 充填体沉降损失率与混合料不均匀系数的关系曲线
Fig. 10 The relation curve between sedimentation loss rate and mixture

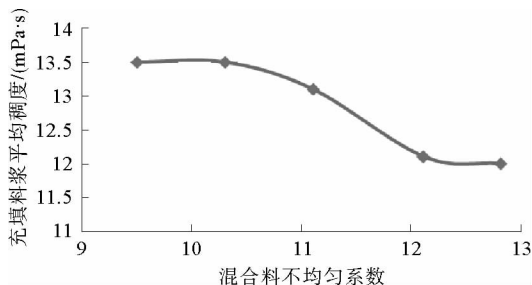


图 11 充填料浆平均稠度与混合料不均匀系数的关系曲线
Fig. 11 The relation curve between slurry average consistency and mixture

4 结论

根据全尾砂与棒磨砂混合充填料的工业试验,获得以下结论:

1) 当全尾砂与棒磨砂的比例为 2 : 8, 2.5 : 7.5, 3 : 7, 水泥耗量为 310 kg/m^3 , 砂浆浓度为 77%~79% 时, 配制出的充填砂浆满足金川矿山自流充填的流动性条件, 充填体质量满足金川矿山安全生产和充填技术标准的具体要求。同时, 在棒磨砂中添加适量全尾砂, 有利于充填体后期强度的提高和充填体接顶, 但增大了充填料浆管道输送阻力。

2) 根据地表、井下和进路取样的充填体强度测试结果发现, 采场进路的充填体强度最高, 井下次之, 地表最小。主要是进路充填体的养护条件相对较优。

3) 在试验进路的侧帮和顶板揭露出后, 没有发现充填体分层离析现象或充填体顶板脱层现象, 充填体的整体性和整体强度满足金川矿山安全生产的要求。

4) 当全尾砂含水量超过 10% 时容易结块, 影响圆盘给料机下面的振动筛下料, 因此, 工业生产以干尾砂方式添加, 全尾砂含水量应控制在 10% 以内。同时, 全尾砂与棒磨砂不能事先混合后给料, 只能单独给料。

参考文献:

- [1] 江宁, 邓代强, 姚中亮. 草楼铁矿充填接顶新工艺[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(3): 18-19, 84.
Jiang Ning, Deng Daiqiang, Yao Zhongliang. New roof-contacted filling techniques in Caolou iron mine[J]. Mining Research and Development, 2010, 30(3): 18-19, 84.
- [2] 宋卫东, 李豪风, 雷远坤, 等. 程潮铁矿全尾砂胶结性能实验研究[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.
- [3] 张兴才, 谭远洪. 大冶铁矿充填技术改造[J]. 现代矿业, 2013(1): 129-130, 139.
Zhang Xingcai, Tan Yuanhong. Filling technology reform in Daye iron mine[J]. Modern Mining, 2013(1): 129-130, 139.
- [4] 陈丽, 宋卫东, 鲁炳强, 等. 金山店铁矿全尾砂胶结充填体性能试验研究[J]. 黄金, 2011, 32(12): 31-35.
Chen Li, Song Weidong, Lu Bingqiang, et al. Experimental research on total tailings cemented filling function in Jinshandian iron mine[J]. Gold, 2011, 32(12): 31-35.
- [5] 李欣, 李俊华. 司家营常峪铁矿充填法采矿地表岩移预测与控制[J]. 金属矿山, 2011(11): 69-70, 162.
Li Xin, Li Junhua. Prediction and control of surface strata movement by backfilling mining method up Sijiaying Changyu iron ore[J]. Metal Mine, 2011(11): 69-70, 162.
- [6] 邱景平, 张国联, 邢军, 等. 小官庄铁矿试验矿块胶结充填试验研究[J]. 有色金属: 矿山部分, 2011, 63(5): 11-14.
Qiu Jingping, Zhang Guolian, Xing Jun, et al. Cemented filling experiment on test blocks in Xiaoguanzhuang iron mine[J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2011, 63(5): 11-14.
- [7] 李家明, 张兆仁, 牛文杰, 等. 特大型铁矿全尾砂胶结充填试验[J]. 有色金属: 矿山部分, 2013, 65(3): 4-7.
Li Jiaming, Zhang Zhaoren, Niu Wenjie, et al. Study on unclassified tailings cementing filling test for super large iron mine [J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2013, 65(3): 4-7.
- [8] 李茂辉, 高谦, 王有团, 等. 司家营铁矿充填用新型胶凝材料制备中间试验[J]. 金属矿山, 2013(8): 153-156.

- Li Maohui, Gao Qian, Wang Youtuan, et al. Pilot tests on the new cementing materials preparation for filling in Sijiaying iron mine[J]. Metal Mine, 2013(8):153-156.
- [9] 付毅, 王劼. 铁矿充填采矿中的关键技术研究[J]. 有色金属: 矿山部分, 2009, 61(4):1-4.
Fu Yi, Wang Jie. Research on the key technology of iron backfill mining[J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2009, 61(4):1-4.
- [10] 杜聚强, 高谦, 南世卿, 等. 一种全尾砂充填新型胶凝材料的研制[J]. 金属矿山, 2012(5):152-155.
Du Juqiang, Gao Qian, Nan Shiqing, et al. Develop on a new cementing material of full tailings backfilling[J]. Metal Mine, 2012(5):152-155.
- [11] 郭惟嘉, 张新国, 史俊伟, 等. 煤矿充填法开采技术研究现状及应用前景[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2010, 29(4):24-29.
Guo Weijia, Zhang Xinguo, Shi Junwei, et al. Present situation of research on backfilling mining technology in mines and its application prospect[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2010, 29(4):24-29.
- [12] 冯光明, 王成真. 超高水材料采空区充填工艺系统与应用研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2011, 30(2):1-8.
Feng Guangming, Wang Chengzhen. Process system of goaf filling with ultra-high-water materials and application[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 30(2):1-8.
- [13] 贾凯军, 冯光明, 李凤凯. 矿用超高水充填材料制浆系统研究与应用[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2011, 30(6):8-14.
Jia Kaijun, Feng Guangming, Li Fengkai. Research on slurring system of mine ultrahigh-water packing materials and its application[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2011, 30(6):8-14.
- [14] 张若江, 张新国, 白继文, 等. 膏体充填材料配比试验与水化反应机理研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2012, 31(6):62-68.
Zhang Ruojiang, Zhang Xinguo, Bai Jiwen, et al. Research on proportion test and hydration mechanism of paste filling material[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(6):62-68.
- [15] 张新国, 王华玲, 李杨杨, 等. 膏体充填材料性能影响因素试验研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2012, 31(3):53-58.
Zhang Xinguo, Wang Hualing, Li Yangyang, et al. Experimental research for influencing factors on properties of paste filling material[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(3):53-58.
- [16] 刘音, 陈军涛, 刘进晓, 等. 建筑垃圾再生骨料膏体充填开采研究进展[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2012, 31(6):52-56.
Liu Yin, Chen Juntao, Liu Jinxiao, et al. Advance of filling paste into mine goaf with building waste[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2012, 31(6):52-56.
- [17] 金川镍矿研究设计院. “全尾砂+棒磨砂”胶结充填试验研究[R]. 金昌: 金川集团有限公司龙首矿, 2007.
- [18] 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):15-21.
Wang Hongjiang, Wu Aixiang, Chen Jin, et al. Paste material pump ability index optimization of total tailings-water quenching slag[J]. Mining Technology, 2007, 7(3):15-21.
- [19] 王贤来, 姚维信, 王虎, 等. 矿山废石全尾砂充填研究现状与发展趋势[J]. 中国矿业, 2011, 20(9):76-79.
Wang Xianlai, Yao Weixin, Wang Hu, et al. The directions of R & D on backfill with waste rock and total tailings in underground mine[J]. China Mining Magazine, 2011, 20(9):76-79.
- [20] 赵传卿, 胡乃联. 焦家金矿充填物料的颗粒级配优选研究[J]. 矿冶, 2008, 17(2):17-19.
Zhao Chuanqing, Hu Nailian. Study on granular grade ration optimize in the fill material for Jiaojia gold mine[J]. Mining & Metallurgy, 2008, 17(2):17-19.
- [21] 兰凤, 郝志红, 邢志红, 等. 砂的颗粒组成对砂浆性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2012(12):87-89.
Lan Feng, Qie Zhihong, Xing Zhihong, et al. Experimental study on the influences of grain composition of sand on mortar performance[J]. Concrete, 2012(12):87-89.
- [22] 孙恒虎, 段鸿杰, 刘华生. 应用 $\sum \Delta p_i/d_i$ 确定有效细粒群的最佳配比[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(6):504-506.
Sun Henghu, Duan Hongjie, Liu Huasheng. Application of $\sum \Delta p_i/d_i$ to optimum ratio determination of effective silt particles[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(6):504-506.