

全尾砂新型充填胶凝材料在月山铜矿的应用研究^{*}

覃星朗¹, 方文改², 黄刚³, 桂旺华¹, 郑攻关¹

(1. 铜陵有色金属集团控股有限公司技术中心, 安徽 铜陵 244000;

2. 铜陵有色股份安庆月山矿业有限公司, 安徽 安庆 246000;

3. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

摘要:根据月山铜矿的充填胶凝材料选择和充填料配比参数设计,开展了全尾砂新型胶凝材料胶结充填体和水泥胶结充填体的强度对比试验。通过研究全尾砂的基本物理力学特性,并在此基础上采用全面试验法测试了不同灰砂比、不同料浆浓度全尾砂充填体试块单轴抗压强度。结果表明:该铜矿全尾砂的中值粒径为 $d_{50}=0.0426\text{ mm}$,大于 0.074 mm 的尾砂占 36.8% ,全尾砂颗粒细;灰砂比 $1:6$ 、浓度 70% 、 28 d 养护龄期的水泥胶结试块抗压强度为 1.32 MPa ,而相同条件下新型胶凝材料胶结试块抗压强度是水泥胶结试块的 3.53 倍即 4.66 MPa 。因此,提出了适合矿山的胶结充填参数:推荐充填料浆浓度 $68\%\sim 70\%$,新型胶凝材料与全尾砂之比为 $1:6\sim 1:8$ 进行工业充填试验。工业试验结果表明,1[#] 和 2[#] 钻孔充填体试样强度均能够满足月山铜矿对充填技术和充填质量的要求,且强度仍有富余,建议矿山进一步优化充填料配比,减少胶凝材料用量,从而节约充填成本。

关键词:全尾砂胶结充填;新型胶凝材料;充填体强度;工业试验;充填成本

中图分类号:TD166

文献标志码:A

文章编号:1671-4172(2020)01-0106-05

Application of a new cementing material for total tailings backfill in Yueshan Copper Mine

QIN Xinglang¹, FANG Wengai², HUANG Gang³, GUI Wanghua¹, ZHENG Gongguan¹

(1. Technology Center, Tongling Nonferrous Metals Group Holdings Co., Ltd., Tongling Anhui 244000, China;

2. Anqing Yueshan Mining Co., Ltd., Tongling Nonferrous Metals Co., Ltd., Anqing Anhui 246000, China;

3. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: According to the selection of backfill cementing materials and the parameter design of backfill mixing ratio in the Yueshan copper mine, the comparison tests of backfill strength were carried out, by using cement or a new cementing material in total tailings. The basic physical and mechanical properties of total tailings were firstly studied; and based on this, using the method of comprehensive tests, the experiments of uniaxial compressive strength of total tailing backfill samples with different cement-tailing ratio and slurry concentration were analyzed. The results indicated that the median particle size of total tailings, d_{50} was 0.0426 mm , and the percentage of tailings particle size larger than 0.074 mm was only 36.8% , hence, the total tailings were fine one. By using general cement, with the cement-sand ratio of $1:6$ and the pulp density of 70% , the uniaxial compressive strength of cemented backfill was 1.32 MPa for sample curing time of 28 d ; while by using a new cementing material which was 4.66 MPa , i. e., 3.53 times as much as that of by using general cement. It was recommended to carry out industrial filling tests with slurry concentration of $68\%\sim 70\%$ and new cementing material-sand ratio of $1:6\sim 1:8$. The results of industrial tests showed that the strength of backfill samples in boreholes No. 1 and No. 2 can meet the requirements of filling techniques and the mining operation of Yueshan copper mine, meanwhile the strength was still surplus. In order to reduce the amount of new cementing materials in backfill and thus to save the filling cost, it was also suggested that the new cementing material-sand ratio should be further optimized.

Key words: total tailings cemented backfill; new cementing material; backfill strength; industrial test; filling cost

还要对深部资源开采优选安全、高效的采矿方法^[1-2]。充填采矿法相比于其他采矿方法,具有回采率高、贫化率低、安全性高等优点,既能很好地控制矿山地压活动、防止地面塌陷、保障采矿安全,又能够消耗大量的尾矿、废石等矿山固体废弃物。因此,充填采矿法在国内外矿山中得到了日益广泛的应用^[3-5]。

月山铜矿充填法采矿采用尾砂作为充填骨料,水泥作为充填胶结剂。水泥在传统的充填采矿法中使用最普遍。由于水泥材料的粒级较粗,采用全尾砂胶结充填时尾砂细颗粒含量高、黏度大、管道沿程阻力大,因此极易导致充填料浆浓度低,产生充填料浆离析泌水和固结性能差^[6-7]。为了保障安全充填采矿,矿山只能提高充填灰砂比,增强充填体强度,从而加大了充填采矿成本。因此寻求强度高和成本低的矿山充填专用胶凝材料作为水泥替代品,以减少水泥用量是降低充填采矿法成本的重要途径^[8-9]。

本文以月山铜矿尾砂充填专用胶凝材料应用研究为工程背景,针对该矿所采用的采矿方法对充填体强度的指标要求,在分析了全尾砂充填料物化特性的基础上,开展新型充填胶凝材料全尾砂胶结充填强度试验检测分析,从而确定经济合理的全尾砂胶结充填料浆的物料配比、浓度等关键技术参数,以降低胶结充填采矿成本,并完成工业试验推广应用。

1 全尾砂物料基本特性测试与分析

1.1 全尾砂基本物理特性

在室内利用容量瓶法测定尾砂的密度,利用定容称重法测定松散密度和密实密度^[10],测定结果见表 1。采用激光粒度仪对全尾砂进行粒级分析,以获得其粒级组成,测定结果见表 2。

表 1 全尾砂物理性能测定值

Table 1 Measured physical properties of total tailings

密度/ (g·cm ⁻³)	松散密度/ (g·cm ⁻³)	压实密度/ (g·cm ⁻³)	孔隙率/%
3.04	1.14	1.57	48.35

表 2 全尾砂粒级组成

Table 2 Graded composition of total tailings

粒级范围/mm	产率/%	累计产率/%
+0.2	13.2	13.2
−0.2+0.1	15.4	28.6
−0.1+0.074	8.2	36.8
−0.074+0.045	10.0	46.8
−0.045+0.038	4.4	51.2
−0.038+0.025	7.5	58.7
−0.025+0.018	5.3	64.0
−0.018	36.0	100.0

全尾砂中值粒径 $d_{50}=0.0426\text{ mm}$, $d_{10}=0.003\text{ mm}$, $d_{60}=0.0684\text{ mm}$,不均匀系数 $C_u=22.8$ 。大于 0.074 mm 的尾砂占 36.8%,小于 0.018 mm 的尾砂占 36.0%,全尾砂细粒级含量过高。

月山铜矿采用全尾砂胶结充填,其尾矿细度比一般矿山所用的充填尾砂细,且与国内许多矿山采用分级尾砂充填相比,其粒度更是远远偏细,因此该矿对充填胶凝材料要求较高。

1.2 全尾砂化学成分分析

全尾砂主要化学成分分析结果见表 3。

表 3 全尾砂主要化学成分分析结果

Table 3 Chemical composition analysis of total tailings

成分	CaO	MgO	SiO ₂	Fe ₃ O ₄	FeO	Al ₂ O ₃	S	Cu	其它
含量/%	12.43	4.99	43.82	0.98	3.42	6.87	0.83	0.084	26.576

从表 3 中可以看出:尾砂中 SiO₂ 的含量 43.82%,S 的含量较低,对充填体后期强度影响很小;另外,含有一定的 CaO、MgO、Al₂O₃ 等氧化物,这些物质均有利于胶结充填。依据物料基础特性,该尾砂是较理想的充填骨料,其力学性能还需要通过充填体强度试验加以确定。

1.3 全尾砂自然沉降试验

根据尾砂粒级组成可知,全尾砂细粒级含量高,再结合矿山选矿厂输送尾矿浓度,配制一定量的不同砂浆浓度的料浆样品,将尾砂浆体放置在实验台上,用虹吸方式吸走澄清液面上面的清水,测定其砂浆浓度,能直观表现出立式砂仓内尾砂沉降效果,试验结果见表 4。

表 4 全尾砂自然沉降终了浓度试验结果

Table 4 The final concentration test results of total tailings in natural settlement

序号	砂浆浓度/%	沉降速度/(cm·min ⁻¹)	终了浓度/%
1	15	0.696	69.63
2	20	0.620	70.05
3	25	0.354	71.33
4	30	0.244	72.13

由表 4 可知,砂浆浓度越低沉降速度越快,当达到一定的沉降高度后,沉降速度逐步放慢,直至稳定。尾砂自然沉降终了浓度随着砂浆初始浓度的增加而增加,当砂浆浓度由 15%增加到 30%时,其对应的终了浓度由 69.63%增加到 72.13%,增幅约为 2.5%。

2 全尾砂胶结充填体强度试验

为了充分体现出新型充填胶凝材料 and 水泥的固结效果,采用全面试验法。采用 32.5# 普通硅酸盐

水泥制作的充填体试块的灰砂比为 1 : 4、1 : 6、1 : 8、1 : 10,采用新型充填胶凝材料制作的充填体试块的灰砂比为 1 : 6、1 : 8、1 : 10,两种材料充填体质量浓度均为 68%、70%、72%,养护龄期为 28 d,每组 3 个试块。对达到养护龄期的试块测试其单轴抗压强度,取 3 个试块强度的平均值作为抗压强度结果,对强度试验结果进行处理分析,对比得出较优的胶凝材料,进而推荐较优的配合比参数。

2.1 试验材料与方法

试验所用全尾砂来源于矿山选矿厂,胶凝材料选用海螺水泥厂生产的 32.5[#] 普通硅酸盐水泥和新型充填胶凝材料。

试块制作采用 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 标准三联试模,试块养护采用 HY-60B 恒温恒湿混凝土标准养护箱(设定温度 20±2℃),相对湿度大于 90%,试块间距大于 10 mm,单轴抗压强度测试采用微机控制电液伺服压力试验机。

试验步骤:模具涂油—物料计量—制浆、搅拌—浇筑试块—试块刮平与脱模—试块整理与养护—测定单轴抗压强度。

2.2 试验结果

充填体试块养护龄期选择 3、7、28 d,在压力试验机上测试单轴抗压强度,表 5 为水泥材料单轴抗压强度测定结果,表 6 为新型胶凝材料单轴抗压强度测定结果。

表 5 水泥材料充填体试样单轴抗压强度测定结果

Table 5 Uniaxial compressive strength test results of cement backfill samples

质量浓度 /%	灰砂比	不同龄期的试块单轴抗压强度/MPa		
		3 d	7 d	28 d
68	1 : 4	0.60	1.23	2.64
	1 : 6	0.41	0.82	1.30
	1 : 8	0.32	0.51	0.82
	1 : 10	0.19	0.30	0.39
70	1 : 4	0.68	0.73	2.75
	1 : 6	0.43	0.64	1.32
	1 : 8	0.34	0.45	0.87
	1 : 10	0.22	0.33	0.45
72	1 : 4	0.88	1.30	2.88
	1 : 6	0.57	0.72	1.48
	1 : 8	0.43	0.49	1.07
	1 : 10	0.32	0.39	0.56

2.3 结果对比分析

1)水泥、新型胶凝材料充填体试块强度都是随灰砂比的增大而增加。在质量浓度一定条件下,随着灰砂比的增大,胶凝材料的含量就越多,充填试块水化反应后固结效果就越好,因此充填体试块强度

就越高。

表 6 新型胶凝材料充填体试样单轴抗压强度测定结果

Table 6 Uniaxial compressive strength results of new cementing material backfill samples

质量浓度/%	凝砂比	不同龄期的试块单轴抗压强度/MPa		
		3 d	7 d	28 d
68	1 : 6	0.65	1.79	3.41
	1 : 8	0.45	1.18	1.87
	1 : 10	0.31	0.95	1.52
70	1 : 6	0.82	2.59	4.66
	1 : 8	0.74	1.45	2.10
	1 : 10	0.49	1.22	1.73
72	1 : 6	0.80	3.06	5.48
	1 : 8	0.74	1.67	2.44
	1 : 10	0.50	1.32	1.87

2)在充填灰砂比一定的条件下,随着充填体试块强度充填料浆浓度的增加而增加,由此可知,为了提高充填体强度,获得较好的充填效果可以通过提高充填料浆浓度和灰砂比两个途径,但是提高灰砂比直接增加矿山充填成本,因此,在充填中尽量提高充填料浆浓度是获得较好充填效果的最佳途径。

3)新型充填胶凝材料充填料浆浓度 70%,灰砂比 1 : 6~1 : 8,28 d 龄期试块所对应的抗压强度是水泥材料的抗压强度的 2.4~3.53 倍。由于该矿控制围岩地压应力,防止地表塌陷,以及局部矿柱回采,对充填体单轴抗压强度要求较高,虽然安全规程和有关规范并未明确提出强度要求,但为保证满足矿山安全生产的需要,其 28 d 终凝强度一般不宜低于 2.0 MPa,部分区域要求强度大于 3.5 MPa。因此,采用水泥材料作胶结剂时,灰砂比不低于 1 : 4,从而加大了材料用量和充填采矿成本;而采用新型胶凝材料作为胶结剂,凝砂比 1 : 6~1 : 8 即可满足矿山安全生产需求,且充填体固结效果好,强度高,能确保采空区的安全稳定。

4)根据上述分析,推荐采用新型充填胶凝材料作为胶结剂,全尾砂胶结充填体物料凝砂比 1 : 6~1 : 8,料浆浓度 68%~70%。

3 工业应用

3.1 采空区概况

月山铜矿 E1-E2-E3 南大采空区总体积近 58 000 m³,空区下部堆有少量残矿和部分废石,本次工业充填试验场地选择 E1-E2-E3 南大采空区。

3.2 采空区原位充填体强度评价

通过对井下充填体原位取样进行强度测试是分析评价充填体质量好坏的最有效手段。本文对井下

原位充填体开展现场充填体取样、进行力学分析,并与实验室充填体强度进行对比分析,综合评价采场充填体充填效果。在胶结充填工业试验过程中,现场制备充填料浆浓度在 68%~70.5%,充填凝砂比 1:5.2~8.1,存在较大波动,平均充填凝砂比 1:6.7。所充采场内充填体固结时间范围 30~60 d。在-530 m 中段 E2 采场的出矿巷道设计两个取样钻孔,钻机钻头直径 75 mm,取芯直径为 55 mm。将钻取的试样加工成标准试样后,测试其单轴抗压强度,测试结果见表 7 和表 8。

表 7 1# 钻孔充填体试样单轴抗压强度结果
Table 7 Results of uniaxial compressive strength of backfill samples in borehole No. 1

样芯编号	直径/mm	长度/mm	单轴抗压强度/MPa	取芯深度/m
1-1	55	110	7.08	3.0
1-2	55	110	4.07	8.0
1-3	55	110	3.57	9.0
1-3	55	110	3.44	10.0
1-5	55	110	7.48	12.0
1-6	55	110	6.37	16.0
1-7	55	110	5.41	17.0
1-8	55	110	5.32	18.0
1-9	55	110	2.52	19.0
1-10	55	110	6.29	21.0
1-11	55	110	6.21	23.0

表 8 2# 钻孔充填体试样单轴抗压强度结果
Table 8 Results of uniaxial compressive strength of backfill samples in borehole No. 2

样芯编号	直径/mm	长度/mm	单轴抗压强度/MPa	取芯深度/m
2-1	55	110	6.18	4.0
2-2	55	110	7.77	5.0
2-3	55	110	5.19	6.0
2-3	55	110	3.21	7.0
2-5	55	110	6.21	8.0
2-6	55	110	8.50	9.0
2-7	55	110	11.23	10.0
2-8	55	110	6.76	11.0
2-9	55	110	6.45	13.0
2-10	55	110	6.17	15.0
2-11	55	110	3.09	17.0
2-12	55	110	6.49	19.0
2-13	55	110	8.70	22.0
2-14	55	110	7.00	24.0
2-15	55	110	6.58	27.0
2-16	55	110	2.87	32.0
2-17	55	110	2.48	35.0

从表 7 和表 8 可以看出,1# 钻孔和 2# 钻孔充填体强度都能达到设计要求的不低于 2.0 MPa,其中 1# 钻孔充填体试样取芯率为 86%,充填体强度大于 3.5 MPa 的试样占比大于 80%;2# 钻孔充填体试样

取芯率为 92%,充填体强度大于 3.5 MPa 的试样占比大于 75%。总体来看,充填体强度指标较好。

通过现场工业试验结果表明,采用新型充填胶凝材料作为胶结剂进行全尾砂胶结充填,能够满足月山铜矿对充填技术和充填质量的要求。另外,充填体强度仍有富余,建议矿山根据现场充填需要可适当降低充填灰砂比,减少胶凝材料用量,从而节约充填成本。

4 结论

1)新型充填胶凝材料具有胶结强度高、成本较低等优点。在相同条件下,新型胶凝材料试块强度是水泥试块强度的 2.4~3.53 倍,且新型胶凝材料价格低廉,用量少,能够满足矿山安全生产的充填体强度要求,可以降低矿山充填成本。

2)根据试验结果,结合矿山生产现状,确定全尾砂胶结充填料浆浓度为 68%~70%,充填凝砂比为 1:6~1:8。采用合理的充填参数充填采空区,改善矿山井下采场的安全生产环境,回采部分损失的矿柱,从而提高回采率。

3)采用新型胶凝材料进行工业试验,对空区原位充填体取样,并测试其单轴抗压强度,与设计强度对比分析,1# 钻孔和 2# 钻孔充填体强度都能达到设计要求,且充填体强度仍有富余,建议矿山根据现场实际充填效果,可进一步优化充填灰砂比,减少胶凝材料用量,从而节约充填成本。

参 考 文 献

[1] 蔡嗣经,王洪江. 现代充填理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2012.
CAI Sijing, WANG Hongjiang. Theory and technology of modern filling[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.

[2] 王运敏. 现代采矿手册[M]. 北京:冶金工业出版社, 2012.
WANG Yunmin. Modern mining manual [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012.

[3] 梁冰,董擎,姜利国,等. 铅锌尾砂胶结充填材料优化配比正交试验[J]. 中国安全科学学报, 2015,25(12):81-86.
LIANG Bing, DONG Qing, JIANG Liguang, et al. Orthogonal experiments for lead-zinc tailings cemented paste backfill material optimal matching scheme[J]. China Safety Science Journal, 2015,25(12):81-86.

[4] 赵传卿,胡乃联. 充填胶凝材料的发展与应用[J]. 黄金,2008(1): 25-29.
ZHAO Chuanqing, HU Nailian. Development and application of cementing filling material[J]. Gold, 2008(1):25-29.

[5] 王安福,杨志强,高谦,等. 某铁矿胶固粉与水泥胶结充填体强度对比试验[J]. 金属矿山, 2016(7):109-112.

WANG Anfu, YANG Zhiqiang, GAO Qian, et al. Comparison test of backfilling strength between cement and glue-powder[J]. Metal Mine, 2016(7):109-112.

[6] 薛改利,杨志强,高 谦,等. 全尾砂新型充填胶凝材料在南洛河铁矿的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2014,66(6):66-69.

XUE Gaili, YANG Zhiqiang, GAO Qian, et al. Application of new filling cementing material based on tailings in Nanminghe Iron Mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2014, 66(6): 66-69.

[7] 马 宾,杨志强,高 谦. 全尾砂新型充填胶凝材料在高官营铁矿的应用[J]. 采矿技术, 2015,15(2):31-33.

MA Bin, YANG Zhiqiang, GAO Qian. Application of new filling cementing material based on tailings in Gaoguanying Iron Mine[J]. Mining Technology, 2015,15(2):31-33.

[8] 吴爱祥,姜关照,王貽明. 矿山新型充填胶凝材料概述与发展趋势[J]. 金属矿山, 2018(3):1-6.

WU Aixiang, JIANG Guanzhao, WANG Yiming. Review and development trend of new type filling cementing materials in mines[J]. Metal Mine, 2018(3):1-6.

[9] 曾照凯,张义平,吴 刚. 基于正交优化的胶结充填体强度试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2010,62(3):6-8.

ZENG Zhaokai, ZHANG Yiping, WU Gang. Experimental study of cemented filling body strength based on orthogonal optimization[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2010, 62(3):6-8.

[10] 孙德民,任建平,焦华喆,等. 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.

(上接第 87 页)

参 考 文 献

[1] 国家环境保护矿山固体废物处理与处置工程技术中心. 矿山固体废物处理与处置技术发展报告[R]. 2012.

National Environmental Protection Mine Solid Waste Treatment and Disposal Engineering and Technology Center. Development report on treatment and disposal technology of mine solid waste[R]. 2012.

[2] CALABRESE E J, BALDWIN L A. Performing ecological risk assessment[M]. Boca Raton: Lewis Publish, 1993.

[3] CHAPMAN P M, MAHER B. The need for truly integrated environmental assessments [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2014,10:151.

[4] 陈天虎,冯军会,徐晓春. 尾矿中硫化物风化氧化模拟实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(3):298-302.

CHEN Tianhu, FENG Junhui, XU Xiaochun, et al. Simulation experiments on weathering and oxidation of sulfide minerals in mine tailings [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2002, 21(3):298-302.

[5] BAY S M, WEISBERG S B. Framework for interpreting sediment quality triad data [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2012, 8:589-596.

[6] ZAMANI A A, SHOKRI R, YAFTIA M R, et al. Adsorption of lead, zinc and cadmium ions from contaminated water onto Peganum harmalaseeds as biosorbent[J]. Int. J. Environ. Sci. Technol, 2013, 10:93-102.

[7] 余剑东,倪吾钟,杨肖娥,等. 土壤重金属污染评价指标的研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2002,9(5):11-16.

YU Jiandong, NI Wuzhong, YAGN Xiaoe, et al. Current progress in evaluation indexes for heavy metals pollution in soils[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2002,9(5):11-16.

[8] 韦冠俊. 矿山环境工程[M]. 北京:冶金工业出版社, 2001.

WEI Guanjun. Mine environmental engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.

[9] 董长勋,熊建军,李 园. 土壤微团聚体基本性质及其对重金属吸附的研究进展[J]. 土壤通报, 2009,40(4):972-976.

DONG Changxun, XIONG Jianjun, LI Yuan. Study progress of basic properties and heavy metal adsorption in micro-aggregates of soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(4):972-976.

[10] WANG Y, WANG R, FAN L, et al. Assessment of multiple exposure to chemical elements and health risks among residents near Huodehong lead-zinc mining area in Yunnan, Southwest China[J]. Chemosphere, 2017,174:613-627.

[11] 吴劲楠,龙 健,刘灵飞,等. 典型铅锌矿化区不同土地利用类型土壤重金属污染特征与评价[J]. 地球与环境, 2018,46(6): 561-570.

WU Jinnan, LONG Jian, LIU Lingfei, et al. Characterization and assessment of the heavy metal pollution in soils of different land use patterns around a typical lead-zinc mineralization area[J]. Earth and Environment, 2018, 46(6): 561-570.

[12] 徐芹磊,陈炎辉,谢团辉,等. 铅锌矿区农田土壤重金属污染现状与评价[J]. 环境科学与技术, 2018,41(2):176-182.

XU Qinlei, CHEN Yanhui, XIE Tuanhui, et al. Current situation and assessment of heavy metals pollution in farmland soils around a Pb-Zn mine [J]. Environmental Science & Technology, 2018,41(2):176-182.