

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.01.010

固结粉胶凝材料开发与胶结充填体强度试验

杨志强^{1,2},高 谦¹,陈得信²,王永定²,何建元²

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院,北京 100083;
2. 金川集团股份有限公司镍钴资源综合利用国家重点实验室,甘肃 金昌 737100)

摘要: 针对金川矿山开采面临的采矿经济与环保压力,利用酒钢低活性酸性矿渣,开展新型充填胶凝材料开发,获得称为固结粉的早强型新型充填胶凝材料。为了实现固结粉在金川矿山工业化应用,针对金川矿山废石、棒磨砂、戈壁砂和河沙等骨料,开展了4种充填骨料的固结粉胶结充填体抗压强度试验。结果表明,除了戈壁粗砂骨料胶结充填体3d抗压强度小于设计抗压强度外,其他3种充填骨料的固结粉胶结充填体抗压强度均满足金川矿山安全采矿要求,说明早强型固结粉胶凝材料应用于金川矿山充填法采矿中能够替代水泥。

关键词: 固结粉胶凝材料;低活性酸性矿渣;胶结充填体抗压强度试验;固体废弃物利用;矿山充填采矿法;金川镍矿

中图分类号:TD863 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2017)01-0069-08

Development of consolidation powder cementing material and strength test of cemented filling body

YANG Zhiqiang^{1,2}, GAO Qian¹, CHEN Dexin², WANG Yongding², HE Jianyuan²

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. National Key Laboratory of Nickel and Cobalt Resources Comprehensive Utilization, Jinchuan Group Co. Ltd., Jinchang 737100, China)

Abstract: Considering economic and environmental pressure in mining in Jinchuan City, development of a new filling cementing material was carried out using acid slag with low activity at the Jiugang Company, and an early-strength filling cementing material, called consolidation powder, was obtained. In order to use the consolidation powder in Jinchuan Mine, compressive strength tests on consolidation powder were carried out for four kinds of filling aggregates, including waste rock, rod milling sand, Gobi Desert sand, and river sand. The results show that the compressive strength of the cemented filling body of Gobi Desert sand for a curing period of three days is lower than the design compressive strength, and the compressive strength of the cemented filling bodies of the three other kinds of filling aggregates meet the strength requirements of a filling body for safe mining in Jinchuan Mine, indicating that the early-strength consolidation powder filling cementing material can replace cement for filling mining in Jinchuan Mine.

Key words: consolidation powder cementing material; low-activity acid slag; compressive strength test on cemented filling body; utilization of solid waste; filling mining method; Jinchuan nickel mine

收稿日期: 2016-02-24
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(SS2012AA062405); 镍钴资源综合利用国家重点实验室资助项目(金科矿2015-01)
作者简介: 杨志强(1957—),男,山西万荣人,研究员,博士,主要从事金属矿充填采矿技术与废弃物综合利用研究与推广。E-mail: Yang-ZQ@jnmcc.com
通信作者: 高谦,教授。E-mail: gaoqian@ces.ustb.edu.cn

金川镍矿是世界第三大硫化铜镍矿床,已探明资源储量 5.64 亿 t,镍金属储量 550 万 t。矿床以埋藏深、地应力高、矿体厚大和围岩破碎等不利采矿技术条件著称于采矿界。通过采矿技术攻关研究与工程实践,选择下向分层进路胶结充填采矿法,并以水泥和棒磨砂作为充填材料,材料成本高达 165 元/m³,这在国内外不多见。随着开采深度增加以及矿石品位下降,采矿成本逐年增加,经济效益逐步下降。同时镍金属国际市场近年来处于低迷状态,由此给金川企业带来巨大的经济压力。另一方面,金川资源采选冶排放大量废石、废渣,并伴随粉煤灰、脱硫灰渣、电石渣等工业副产品排放,不仅占用大量土地,而且还污染环境。

金川企业历来重视环境保护,在 21 世纪初开展了废弃物充填采矿技术研究^[1-2]。倪文等^[3]开展了镍渣提铁技术的二次资源回收综合利用研究。王正辉^[4]提出利用废弃物的胶结充填技术与工艺。郭慧高等^[5]探索废石在金川二矿区充填采矿技术的应用与前景预测,明确了利用井下废石粗骨料能够提高充填体抗压强度和降低充填采矿成本。乔登攀等^[6]在金川二矿区开展废石-全尾砂混合粗骨料的高质量分数充填工艺试验,已经实现部分废石在充填采矿中的工业化应用。王佳佳等^[7]利用水淬镍渣开展充填胶凝材料研发,其 7 d 和 28 d 抗压强度满足金川矿山充填胶凝材料要求,但 3 d 抗压强度较低,难以在金川矿山中应用。

近年来,利用酒钢公司低活性酸性矿渣开展早强型充填胶凝材料研究取得了进展^[8-13],开发的固结粉早强充填胶凝材料已经实现工业化生产,并在龙首矿进行工业充填试验。为了利用固结粉胶凝材料扩大废石、尾砂等废弃物在金川充填采矿中的应用,还开展高质量分数料浆流变特性研究以及膏体充填系统改造^[14-17]。虽然废弃物在金川矿山充填采矿中应用已经取得进展,但由于废石、尾砂等充填骨料所固有的不确定性,给充填采矿带来诸多问题,为此进一步开展不同混合充填集料的胶结充填体抗压强度试验,为固体废弃物在金川矿山中推广应用和充填料浆的优化控制奠定基础。

下向分层胶结充填法采矿是生产人员在充填假顶(充填体)下作业,因此胶结充填体抗压强度和整体稳定性直接关系到采矿安全。根据金川矿山充填采矿技术规范,确定金川矿山胶结充填体 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度不小于 1.5 MPa、2.5 MPa 和 5.0 MPa。

酒钢公司矿渣活性、碱性和质量系数分别为 0.295、0.935 和 1.411,属于低活性酸性矿渣,因此给开发早强胶凝材料带来困难。针对酒钢公司低活性酸性矿渣,本研究采用机械和化学复合激发两种方式来开发金川矿山早强新型充填胶凝材料。此外,确定矿渣微粉的细度不大于 4.0。针对酒钢低活性酸性矿渣微粉的特性,选择以 10 水硫酸钠为主的复合外加剂来加速矿渣微粉的水化速度,从而提高充填胶凝材料的早期抗压强度。通过大量室内外试验和优化决策,获得了称为“固结粉”的金川早强型充填胶凝材料,并由金昌熙金节能建材有限公司实现了工业化生产。

1 不同充填骨料胶结充填体强度试验

1.1 试验方案设计与方法

试验采用 4 种充填骨料、3 种胶凝材料和 5 种质量分数的充填料浆,分别进行不同配比的胶结充填体抗压强度试验,由此获得不同试验条件下的胶结充填体 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度。

a. 充填骨料。(a) 金川公司三矿区砂石厂生产-5 mm 棒磨砂;(b) -20 mm 戈壁粗砂;(c) -12 mm 废石与-5 mm 棒磨砂按照 4:6 配比的混合料;(d) -12 mm 废石、-5 mm 棒磨砂、-20 mm 戈壁粗砂和-5 mm 风砂按照 55:22:16:7 配比的 4 种骨料混合充填料。

b. 胶凝材料。(a) 固结粉与水泥按照 7:3 混合的胶凝材料;(b) 固结粉胶凝材料;(c) 矿用水泥。

c. 料浆配比与质量分数。根据目前金川矿山工业生产参数,棒磨砂骨料充填料浆灰砂比为 1:4、质量分数为 78%,分别进行质量分数 77%、78%、79%、80%、81% 共 5 种充填体的抗压强度试验。戈壁粗砂、废石+棒磨砂和废石+棒磨砂+戈壁砂+风砂混合料 3 种充填骨料的灰砂比均为 1:5,分别进行 79%、80%、81%、82%、83% 共 5 种质量分数的胶结充填体抗压强度试验。

胶结充填体抗压强度试验在金川龙首矿充填实验室进行,采用 10 cm×10 cm×10 cm 三联模具,人工搅拌和制模,一次性倒模,24 h 后拆模,制作 3 种养护龄期(3 d、7 d、28 d)的试块。在自然条件下(室内)养护,采用压力机进行试块的单轴抗压强度测试。

1.2 棒磨砂骨料胶结充填体强度试验

图 1 给出 3 种胶凝材料棒磨砂骨料胶结充填体 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度与料浆质量分数的关系曲线。图 2 给出了 5 种料浆质量分数的胶结充填体平均抗压强度与养护龄期的关系曲线。由此得到以下结论:(a) 对于质量分数 78% 的料浆,3 种胶凝材料的胶结充填体 3 d、7 d、28 d 抗压强度均大于 1.5 MPa、2.5 MPa、

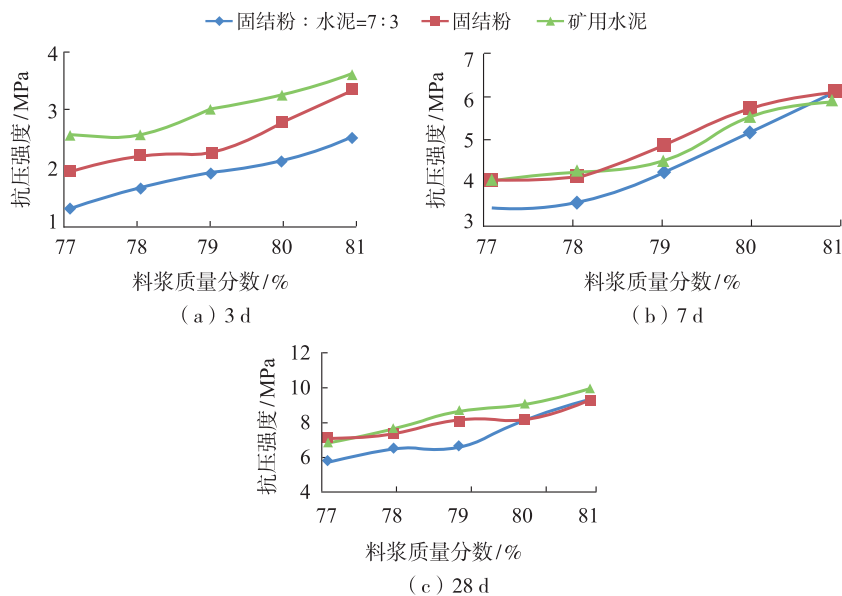


图 1 3 种胶凝材料的棒磨砂骨料胶结充填体抗压强度与料浆质量分数关系曲线

Fig. 1 Relationships between compressive strength of filling body of rod milling sand with three kinds of cementing materials and mass fraction of slurry

5.0 MPa, 满足金川矿山对胶结充填体抗压强度要求。(b) 对比 3 种胶凝材料的胶结充填体 3 d 抗压强度, 以水泥最高, 固结粉次之, 固结粉与水泥混合胶凝材料最低。固结粉充填体的 3 d 抗压强度略低于水泥, 但随着料浆质量分数增高, 固结粉抗压强度逐渐接近于水泥抗压强度, 即从质量分数 77% 时固结粉抗压强度低于水泥抗压强度的 0.61 MPa 到质量分数 81% 时抗压强度减小到 0.25 MPa。由此可见, 提高固结粉料浆质量分数, 不仅可以提高固结粉胶结充填体的 3 d 抗压强度, 而且还能够缩小与水泥充填体抗压强度之间的差距。(c) 当料浆质量分数小于 78% 时, 固结粉与矿用水泥的胶结充填体 7 d 抗压强度基本相等。但当料浆质量分数大于 78% 时, 固结粉胶结充填体 7 d 抗压强度大于水泥胶结体的抗压强度。(d) 当料浆质量分数小于 78% 时, 固结粉和矿用水泥胶结充填体的 28 d 抗压强度相当。当料浆质量分数大于 78% 时, 固结粉胶结充填体 28 d 的抗压强度略小于水泥胶结充填体的抗压强度。(e) 对于固结粉: 水泥 = 7:3 的混合胶凝材料, 其胶结充填体的 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度, 均低于固结粉和水泥的胶结充填体抗压强度。由此可见, 固结粉和水泥 2 种胶凝材料不能掺合应用。(f) 充填料浆在 77% ~ 81% 的范围内, 固结粉胶结充填体的 3 d、7 d 和 28 d 平均抗压强度分别达到 2.53 MPa、5.04 MPa 和 8.04 MPa, 均大于金川矿山对胶结充填体抗压强度的要求。固结粉胶结充填体 3 d 和 28 d 的抗压强度略低于水泥胶结充填体的抗压强度, 而 7 d 的抗压强度与水泥相当。

1.3 戈壁粗砂骨料胶结充填体强度试验

图 3 给出了 3 种胶凝材料的戈壁粗砂骨料胶结充填体 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度与充填料浆质量分数的关系曲线。图 4 给出了戈壁粗砂骨料胶结充填体平均抗压强度与养护龄期的关系曲线。由此获得以下结论:(a) 3 种胶凝材料戈壁粗砂的胶结充填体 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度随充填料浆质量分数的提高而增加。相比较, 固结粉胶结充填体抗压强度增长速率大于水泥胶结充填体抗压强度的增长速率。(b) 料浆质量分数为 81% 和灰砂比为 1:5 的戈壁粗砂骨料 3 种胶凝材料胶结充填体 3 d 抗压强度均小于 1.5 MPa。但固结粉和水泥两种胶凝材料的胶结充填体 7 d 和 28 d 抗压强度均大于 2.5 MPa 和 5.0 MPa。(c) 当料浆质量分数小

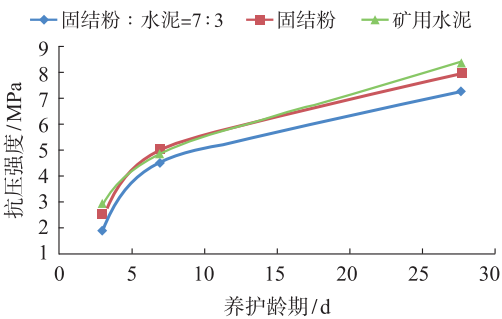


图 2 5 种料浆质量分数棒磨砂胶结充填体平均抗压强度与养护龄期的关系

Fig. 2 Relationship between average compressive strength of filling body of rod milling sand with five mass fractions of slurry and curing time

于 81% 时,固结粉胶结充填体的 7 d 和 28 d 抗压强度略小于水泥胶结充填体抗压强度;但当料浆质量分数大于 81% ,固结粉胶结充填体的抗压强度大于水泥胶结充填体的抗压强度。(d) 料浆质量分数在 79% ~ 83% 范围内,固结粉胶结充填体的 3 d、7 d 和 28 d 平均抗压强度分别为 1.14 MPa、2.65 MPa 和 4.81 MPa。由此可见,3 d 和 28 d 抗压强度低于矿山充填体设计抗压强度,而 7 d 抗压强度达到矿山设计抗压强度。

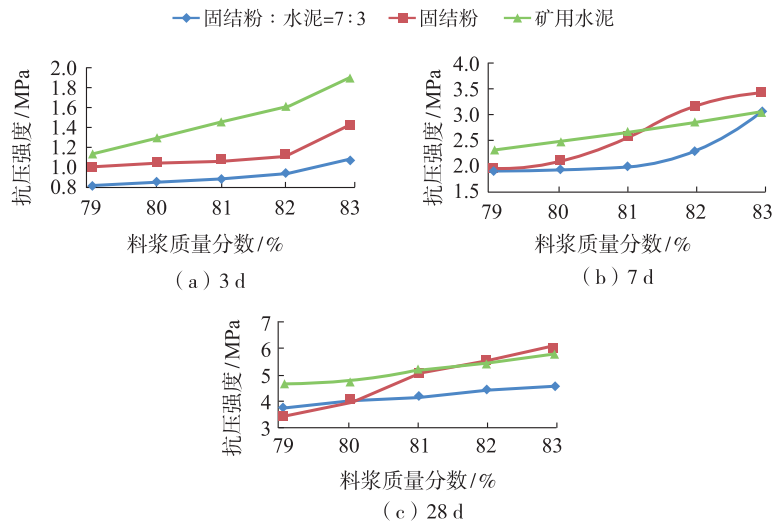


图 3 3 种胶凝材料的戈壁粗砂胶结充填体抗压强度与料浆质量分数关系曲线

Fig. 3 Relationship between compressive strength of filling body of Gobi coarse sand with three kinds of cementing materials and mass fraction of slurry

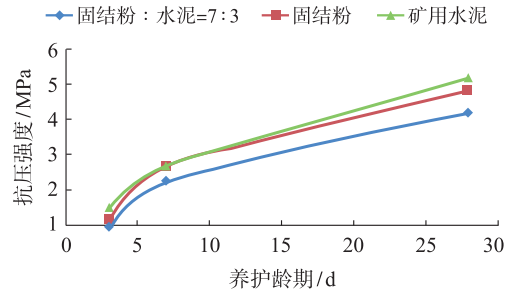


图 4 5 种料浆质量分数的戈壁粗砂骨料胶结充填体平均抗压强度与养护龄期的关系

Fig. 4 Relationship between average compressive strength of filling body of Gobi coarse sand with five mass fractions of slurry and curing time

1.4 废石-棒磨砂混合骨料胶结充填体强度试验

图 5 给出了 3 种胶凝材料废石-棒磨砂混合骨料胶结充填体的 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度与充填料浆质量分数的关系曲线。图 6 给出了 5 种料浆质量分数的混合骨料胶结充填体的平均抗压强度与养护龄期的关系曲线。由此获得以下结论:(a) 3 种胶凝材料的混合骨料胶结充填体的 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度均大于 1.5 MPa、2.5 MPa 和 5.0 MPa。(b) 水泥胶结充填体 3 d 抗压强度高于固结粉和固结粉与水泥混合胶凝材料的胶结充填体抗压强度。(c) 当料浆质量分数小于 80.5% ,固结粉胶结充填体的 7 d 抗压强度小于水泥胶结充填体抗压强度;但当料浆质量分数大于 80.5% 时,固结粉胶结充填体 7 d 抗压强度大于水泥胶结充填体抗压强度。(d) 固结粉混合骨料胶结充填体 28 d 的抗压强度略小于水泥胶结充填体的抗压强度,但 2 种胶凝材料的胶结充填体的抗压强度之差随着充填料浆质量分数的提高而逐渐缩小。(e) 固结粉与水泥混合的胶凝材料的胶结充填体的 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度为 3 种胶凝材料中最低。(f) 充填料浆质量分数在 79% ~ 83% 范围内时,固结粉胶结充填体的 3 d、7 d 和 28 d 平均抗压强度分别达到 1.77 MPa、5.13 MPa 和 7.28 MPa,满足金川矿山设计的抗压强度。但固结粉胶结充填体 3 d 和 28 d 的抗压强度略低于水泥胶结充填体的抗压强度,而 7 d 的抗压强度略高于水泥胶结充填体的抗压强度。

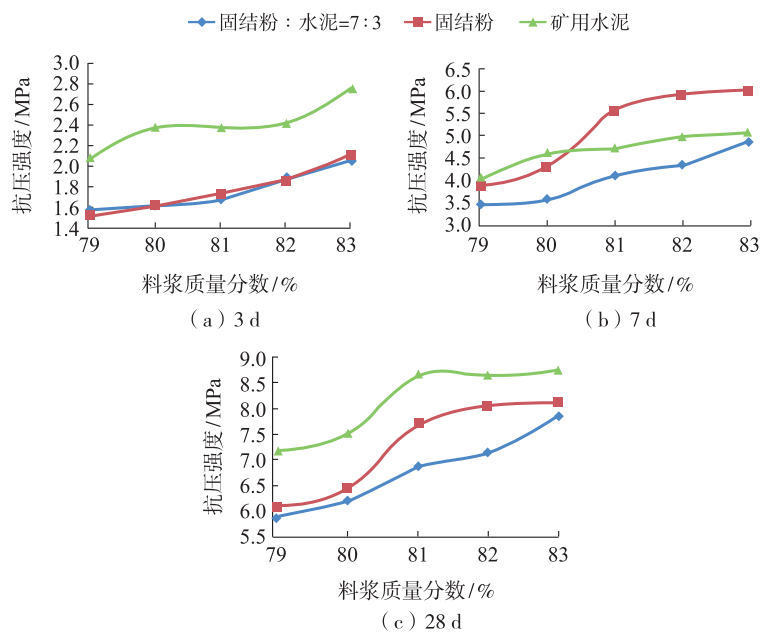


图 5 3 种胶凝材料废石棒磨砂混合骨料胶结充填体抗压强度与充填料浆质量分数关系曲线

Fig. 5 Relationship between compressive strength of filling body of mixed aggregate with three kinds of cementing materials and mass fraction of slurry

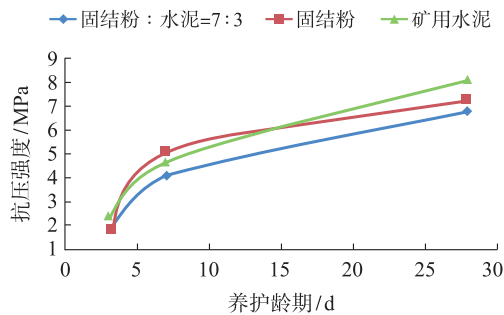


图 6 5 种料浆质量分数废石棒磨砂混合骨料胶结充填体平均抗压强度与养护龄期关系曲线

Fig. 6 Relationship between average compressive strength of filling body of mixed aggregate with five mass fractions of slurry and curing time

1.5 废石-棒磨砂-戈壁粗砂-风砂混合骨料胶结充填体强度试验

图 7 给出了 3 种胶凝材料 4 种集料的混合骨料胶结充填体 3 d、7 d 和 28 d 抗压强度与料浆质量分数的关系曲线。图 8 给出了 5 种料浆质量分数的混合骨料胶结充填体平均抗压强度与养护龄期的关系。由此获得以下结论:(a)质量分数 81% 时,3 种胶凝材料混合骨料充填体 3 d、7 d 和 28 d 的抗压强度大于金川矿山设计的抗压强度;(b)水泥胶结充填体 3 d 的抗压强度大于固结粉胶结充填体 3 d 的抗压强度;(c)水泥和固结粉 2 种胶凝材料的胶结充填体 7 d 抗压强度基本相当;(d)料浆质量分数小于 81.5% 的固结粉胶结充填体 28 d 抗压强度与水泥基本相当;但料浆质量分数大于 81.5% 时,28 d 的抗压强度大于水泥胶结充填体的抗压强度,并且抗压强度随着充填料浆质量分数的提高而增加。(e)料浆质量分数在 79%~83% 的范围内,3 d、7 d 和 28 d 固结粉胶结充填体平均抗压强度分别达到 2.26 MPa、4.76 MPa 和 7.31 MPa,均满足设计抗压强度。其中 3 d 抗压强度略低于水泥,7 d 和 28 d 充填体抗压强度与水泥相当。

2 固结粉胶凝材料胶结充填体强度综合分析

图 9 和图 10 分别给出了 4 种充填骨料的 5 种料浆质量分数固结粉胶结充填体平均抗压强度的柱状图和平均抗压强度与设计抗压强度之比的柱状图,由此获得以下结论:(a)料浆质量质量分数在 77%~79% 的范围内,棒磨砂固结粉胶结充填体 3 d、7 d 和 28 d 平均抗压强度分别达到 2.16 MPa、4.40 MPa 和 7.54 MPa,分

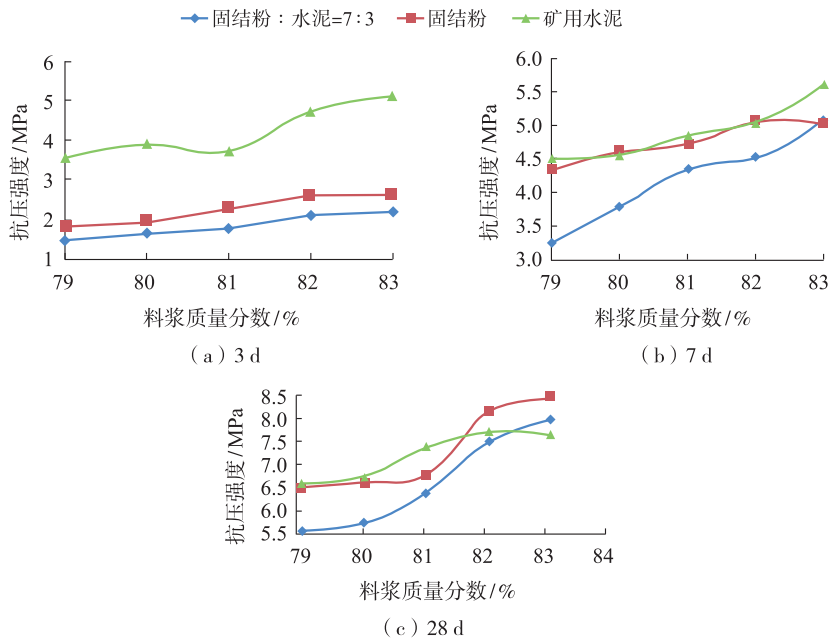


图 7 3 种胶凝材料 4 种混合骨料胶结充填体抗压强度与料浆质量分数关系曲线

Fig. 7 Relationship between compressive strength of filling body for four kinds of mixed aggregate with three kinds of cementing materials and concentration slurry

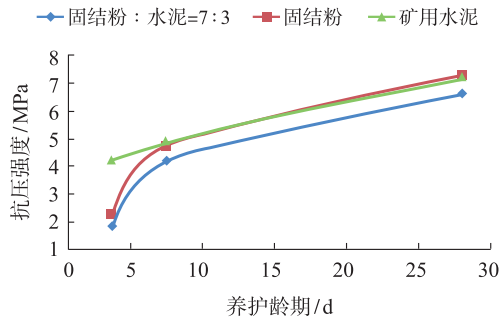


图 8 5 种料浆质量分数 4 种混合骨料的胶结充填体平均抗压强度与养护龄期的关系曲线

Fig. 8 Relationship between average compressive strength of filling body for four kinds of mixed aggregate with five mass fractions of slurry and curing time

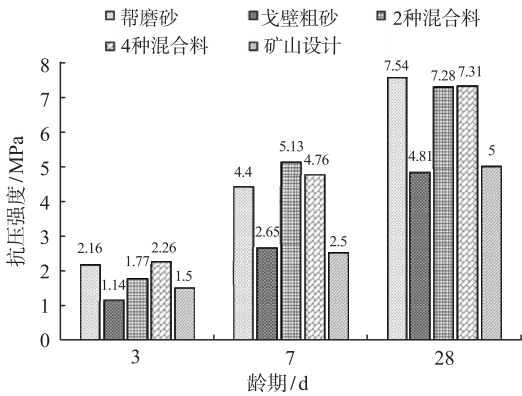


图 9 5 种料浆质量分数固结粉胶结充填体平均抗压强度柱状图

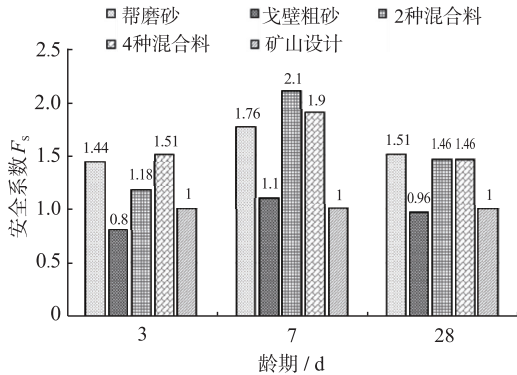


图 10 固结粉胶结充填体平均抗压强度与设计抗压强度比值柱状图

Fig. 10 Histogram of ratio of average compressive strength and design compressive strength of cementing filling body of consolidation powder

Fig. 9 Histogram of average compressive strength of cementing filling body of consolidation powder with five mass fractions of slurry

别是设计抗压强度的1.44、1.76和1.51倍,满足金川矿山充填体要求。(b)料浆质量质量分数在79%~83%的范围内,戈壁粗砂固结粉胶结充填体3 d、7 d和28 d平均抗压强度分别达到1.14 MPa、2.65 MPa和4.81 MPa。3 d和28 d的抗压强度小于金川矿山充填体设计的抗压强度,但7 d的抗压强度大于金川矿山充填体设计的抗压强度。(c)料浆质量分数在79%~83%的范围内,废石棒磨砂混合料固结粉胶结充填体3 d、7 d、28 d的平均抗压强度分别为1.77 MPa、5.13 MPa和7.28 MPa,分别是金川矿山设计抗压强度的1.18、1.76和1.46倍,满足金川矿山充填体设计的抗压强度。(d)质量分数在79%~83%范围内,4种混合骨料固结粉胶结充填体的平均抗压强度分别达到2.26 MPa、4.76 MPa和7.31 MPa,分别是设计抗压强度的1.5、2.1和1.46倍,满足金川矿山胶结充填体设计抗压强度。(e)在相同条件下,废石-棒磨砂-戈壁粗砂-风砂混合骨料固结粉胶结充填体的抗压强度最高,废石-棒磨砂混合骨料充填体的抗压强度次之,戈壁粗砂胶结充填体的抗压强度最低。由此可见,由于混合骨料的粒径级配优良,所以在相同条件下胶结充填体的抗压强度最高。

3 结 论

a. 棒磨砂骨料的胶结充填体3 d、7 d、28 d抗压强度均满足金川矿山对胶结充填体抗压强度要求。由此表明,作为人工生产的碎石骨料粒径级配较好,因此胶结充填体的抗压强度较高,但材料成本高。固结粉胶结充填体3 d的抗压强度略低于水泥,但7 d和28 d的抗压强度与水泥相当。

b. 料浆质量分数在77%~81%的范围内,固结粉胶结充填体3 d、7 d和28 d的平均抗压强度分别达到2.53 MPa、5.04 MPa和8.04 MPa,均大于金川矿山对胶结充填体的抗压强度要求。

c. 料浆质量分数为81%和灰砂比为1:5的戈壁粗砂胶结充填体3 d的抗压强度均小于1.5 MPa,但7 d和28 d的抗压强度均大于2.5 MPa和5.0 MPa。料浆质量分数在79%~83%的范围内,戈壁粗砂胶结充填体3 d、7 d和28 d的平均抗压强度分别为1.14 MPa、2.65 MPa和4.81 MPa。因此3 d和28 d抗压强度低于矿山设计抗压强度,仅7 d抗压强度达到金川矿山的设计要求。由此可见,戈壁粗砂较粗,粒径级配不良,导致胶结充填体的抗压强度较低。

d. 废石与棒磨砂混合骨料胶结充填体3 d、7 d和28 d的抗压强度均大于1.5 MPa、2.5 MPa和5.0 MPa的设计抗压强度。水泥和固结粉胶结充填体的抗压强度基本相当。充填料浆在质量分数79%~83%的范围内,固结粉胶结充填体的平均抗压强度分别达到1.77 MPa、5.13 MPa和7.28 MPa,满足金川矿山充填体的设计抗压强度。

e. 4种集料混合充填骨料的胶结充填体3 d、7 d和28 d抗压强度均大于金川矿山设计的抗压强度。料浆质量分数在79%~83%的范围内,3 d、7 d和28 d固结粉胶结充填体的平均抗压强度分别达到2.26 MPa、4.76 MPa和7.31 MPa,满足金川矿山胶结充填体设计的抗压强度。

f. 对于固结粉:水泥=7:3混合胶凝材料,其胶结充填体3 d、7 d和28 d的抗压强度均低于固结粉和水泥的胶结充填体的抗压强度。由此可见,固结粉和水泥2种胶凝材料不能混合应用。

g. 根据固结粉胶结充填体的抗压强度试验结果,已将固结粉在龙首矿进行了工业化充填应用试验。根据现场充填体实测结果显示,采用固结粉代替水泥的胶结充填体抗压强度较高,实现了金川矿山安全采矿生产。

参考文献:

- [1] 梁永顺,索文德. 金川铜镍矿资源综合利用和矿山生态环境建设[J]. 有色金属(矿山部分),2002,54(2):111-113. (LIANG Yongshun, SUO Wende. Mineral resources comprehensive utilization and ecosystem establishment in Jinchuan Copper-Nickel Mine[J]. Nonferrous Metals(Mining Section),2002,54(2):111-113. (in Chinese))
- [2] 王武名,鲁安怀,陶维东. 金川铜镍矿山尾矿砂循环经济研究[J]. 金属矿山,2006(4):81-84. (WANG Wuming, LU Anhui, TAO Weidong. Study on recycle economy of tailings in Jinchuan Copper Nickel Mine[J]. Metal Mine,2006(4):81-84. (in Chinese))
- [3] 倪文,贾岩,郑斐,等. 金川镍弃渣铁资源回收综合利用[J]. 北京科技大学学报,2010,32(8):975-980. (NI Wen, JIA Yan, ZHENG Fei, et al. Comprehensive utilization of iron recovery from Jinchuan Nickel Residue[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2010,32(8):975-980. (in Chinese))
- [4] 王正辉. 金川矿山废料胶结充填工艺技术研究[J]. 采矿技术,2011,11(4):32-36. (WANG Zhenghui. Study on the technolo-

- gy of cemented filling technology of mine waste in Jinchuan Mine [J]. Mining Technology, 2011, 11(4): 32-36. (in Chinese))
- [5] 郭慧高, 辜大志, 邹龙, 等. 浅析废石胶结充填技术在金川二矿区的应用前景[J]. 采矿技术, 2011, 11(4): 39-41. (GUO Huigao, GU Dazhi, ZUO Long, et al. Application prospect on waste rock cemented filling mining technology in Jinchuan Mining No. 2 Area [J]. Mining Technology, 2011, 11(4): 39-41. (in Chinese))
- [6] 乔登攀, 姚维信. 金川矿山废石-全尾砂高浓度充填工艺试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(6): 57-61. (QIAO Dengpan, YAO Weixin. High concentrated filling process for waste rock and total tailings [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2011, 2(6): 56-61. (in Chinese))
- [7] 王佳佳, 刘广宇, 倪文. 激发剂对金川水淬二次镍渣胶结料强度的影响[J]. 金属矿山, 2013(4): 159-162. (WANG Jiajia, LIU Guangyu, NI Wen. Analysis of the influences of activator on performances of jinchuan water-granulated secondary ni slag cemented backfilling materials [J]. Metal Mine, 2013(4): 159-162. (in Chinese))
- [8] 杨志强, 肖柏林, 高谦. 基于金川棒磨砂充填料开发新型充填胶凝材料试验研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2014, 66(5): 65-68. (YANG Zhiqiang, XIAO Baolin, GAO Qian. Experimental study on development of a new cementing material based on rod grinding in Jinchuan Nickel Mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2014, 66(5): 65-68. (in Chinese))
- [9] 王有团, 杨志强, 王永前, 等. 金川棒磨砂新型充填胶凝材料的正交试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(4): 27-30. (WANG Youtuan, YANG Zhiqiang, WANG Yongqian, et al. Orthogonal experimental studies of new cementing material with rod milling sand of Jinchuan Mien [J]. Mining Research and Development, 2014, 34(4): 27-30. (in Chinese))
- [10] 杨志强, 王永前, 高谦. 金川矿山充填采矿固体废弃物综合利用关键技术[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(5): 706-711. (YANG Zhiqiang, WANG Yongqian, GAO Qian. Key technology on comprehensive utilization of solid waste in filling mining in Jinchuan Mine [J]. Resources Environment and Engineering, 2014, 28(5): 706-711. (in Chinese))
- [11] 田立鹏, 杨志强, 高谦. 金川全尾砂新型充填胶凝材料激发剂配比与力学特性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2014, 66(5): 74-78. (TIAN Lipeng, YANG Zhiqiang, GAO Qian. Experimental study on activator proportion and mechanical characteristics for a new filling cementing material of whole tailings in Jinchuan Nickel Mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2014, 66(5): 74-78. (in Chinese))
- [12] 肖柏林, 杨志强, 高谦. 金川矿山磷石膏基新型充填胶凝材料的研制[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(1): 21-24. (XIAO Baolin, YANG Zhiqiang, GAO Qian. Development of new filling cementing material of phosphogypsum in Jinchuan Mine [J]. Mining Research and Development, 2015, 35(1): 21-24. (in Chinese))
- [13] 杨志强, 高谦, 王永前, 等. 利用金川水淬镍渣尾砂开发新型充填胶凝剂试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1498-1506. (YANG Zhiqiang, GAO Qian, WANG Yongqian, et al. Experimental study on new filling cementing material using water-hardening nickel slag tailings of Jinchuan Mine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1498-1506. (in Chinese))
- [14] 张宗生. 金川矿山废石膏体配制与流变特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [15] 杨志强, 高谦, 王永前, 等. 金川镍矿尾砂膏体充填采矿技术进步与展望[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2014, 29(3): 1-8. (YANG Zhiqiang, GAO Qian, WANG Yongqian, et al. On the technology progress and prospects of paste backfilling in Jinchuan Nickel Mine [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Science Edition), 2014, 29(3): 1-8. (in Chinese))
- [16] 杨志强, 王永前, 高谦, 等. 金川镍矿尾砂膏体充填系统工艺技术改造与应用研究[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(2): 1-9. (YANG Zhiqiang, WANG Yongqian, GAO Qian, et al. Technology reconstruction and application of the paste filling system to tailings in Jinchuan Nickel Mine [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(2): 1-9. (in Chinese))
- [17] 杨志强, 高谦, 王永前. 金川全尾砂-棒磨砂混合充填料胶砂强度与料浆流变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊2): 3985-3991. (YANG Zhiqiang, GAO Qian, WANG Yongqian. Research on filling body strength and rheological properties of mixed filling mortar with unclassified tailings and rod milling sand in Jinchuan Mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup2): 3985-3991. (in Chinese))