

## 粗骨料与细骨料胶结充填体强度对比分析\*

邓代强<sup>1</sup>, 肖利平<sup>1</sup>, 段瑜<sup>1</sup>, 江飞飞<sup>2,3</sup>

(1. 贵州理工学院 矿业工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012; 3. 国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

**摘要:** 为了改善极细颗粒尾砂单独作为充填集料的胶结充填体固结硬化速度慢、强度偏低等问题, 通过添加碎石的方法改变充填骨料的级配组成, 由实验室对比试验可知, 添加一定量碎石的胶结充填体强度可显著提高, 这一点也由形式为指数函数拟合曲线的增长规律得以验证, 从而确定了添加碎石可为井下开采作业提供可靠的安全保障, 从减少胶凝材料用量的角度来看, 节省的成本足以抵消加工碎石而增加的费用。因此, 采用改性后的碎石-全尾砂充填材料在技术经济方面是合理的。

**关键词:** 碎石; 极细颗粒尾砂; 颗粒级配; 胶结充填

中图分类号: TD853.34<sup>+</sup>3 文献标识码: B 文章编号: 1001-0076(2017)04-0016-04

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2017.04.004

## Strength Comparative Analysis of Cemented Backfill of Coarse Aggregate and Fine Aggregate

DENG Daiqiang<sup>1</sup>, XIAO Liping<sup>1</sup>, DUAN Yu<sup>1</sup>, JIANG Feifei<sup>2,3</sup>

(1. Institute of Mining Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, China; 2. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha 410012, China; 3. National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha 410012, China)

**Abstract:** In order to facilitate the issues of slow consolidation and low strength using extremely fine particle tailings as filling aggregate, the compositions of aggregate were optimized by adding appropriate gravel. The laboratory tests showed that the addition of gravel could significantly improve the filling body strength, which was also verified from the growth law of exponential function of the fitting curve. Moreover, the addition of gravel could provide reliable security for underground mining operations, and the reduction of cementitious materials could make up for the additional cost of preparing gravel. Therefore, using modified gravel - full tailings filling material is reasonable in both technical and economic aspects.

**Key words:** gravel; fine tailings; grain composition; cemented filling

在混凝土类材料研究中, 由于工程界对于其物理力学性质的要求标准不同, 往往会通过改善颗粒

\* 收稿日期: 2017-04-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAB02B04)

作者简介: 邓代强(1974-), 男, 汉族, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土与安全工程的教学与科研工作, E-mail: deng-daiqiang@126.com。

通讯作者: 段瑜(1968-), 湖北人, 汉族, 博士, 副教授, 主要从事矿山安全教学与科研工作, E-mail: duanyuhn@163.com。

组成的方式,来满足试验及现场要求,此方面的研究内容较为广泛且方法也各有不同。如在道路建筑材料方面,文献<sup>[1-3]</sup>的研究中,经过优化级配使得道路基层材料等具有所要求的物理力学性能,而且也节省了成本;在水利工程方面,文献<sup>[4-6]</sup>研究了大骨料混凝土的力学强度,揭示了复杂情况下混凝土试件的变形和破坏特征,为工程应用提供了参考;在建筑工程方面,文献<sup>[7-8]</sup>研究了大坍落度的轻骨料组合混凝土,详细分析了砂率和掺合料等对混凝土性质的影响,确定了强度与抗冻性等均表现良好的材料组合。类似于混凝土研究,对于作为贫混凝土的矿山充填材料,极细颗粒尾砂作为单一骨料的胶结充填体,其力学性能往往会受到颗粒级配的较大影响,造成充填体的强度偏低,为了保证充填体的力学性能能够较好的满足矿床开采要求,常常需要通过添加粗骨料的方式,改善充填材料的颗粒组成,从而可适当提高充填体强度,为井下开采作业的安全提供保障<sup>[9-11]</sup>,同时也为矿山排出的固体废弃物处理提供途径<sup>[12-14]</sup>。

对于采用选矿厂排出的尾砂作为充填集料的金属矿山,有时会存在全尾砂-水泥胶结充填体强度偏低,不能满足矿床开采技术要求的问题,因此,相关研究常常需围绕着如何改善颗粒级配来提高充填体的强度,同时兼顾充填成本,以使改性后的充填材料具有较优的物理力学性能及合理的成本指标。本研究针对极细颗粒尾砂单独用作骨料的胶结充填体强度偏低问题,通过添加作为粗骨料的碎石,改善了充填体的强度性能,在技术经济方面均得到了较好的效果。

## 1 试验材料及试验方案

### 1.1 试验材料

在矿山选矿厂正常工作时,进行全尾砂取样,经过晾晒烘干后碾压至原始粒径,以备试验使用。全尾砂平均粒径为 37.53  $\mu\text{m}$ ,含量为 50% 的粒径为 23.03  $\mu\text{m}$ , -20  $\mu\text{m}$  的含量占 47.58%,属于极细颗粒尾砂,通过一系列的实验室物理力学参数试验,得到全尾砂的物料性能指标,见表 1。碎石来源与井下掘进废石及部分地表堆存废石,将其破碎为 -25 mm 的颗粒,取筛下部分进行本次试验,将测得的碎石物料性能指标列于表 1。

表 1 试验材料物理性能指标测定结果

材料名称	密度 / ( $\text{t m}^{-3}$ )	松散容重 / ( $\text{t m}^{-3}$ )	密实容重 / ( $\text{t m}^{-3}$ )	最大孔隙率 / %	最小孔隙率 / %	安息角 / °
全尾砂	2.67	0.93	1.25	65	53	41
碎石	2.60	1.51	1.71	42	34	40

### 1.2 试验方案

利用备好料的全尾砂、碎石、PC32.5 级复合硅酸盐水泥和普通生活用自来水,根据常规影响充填体强度因素及坍落度试验中的料浆流动情况,因为碎石的颗粒尺寸远远大于全尾砂颗粒尺寸,加入碎石后的充填料浆中的固体颗粒的比表面积大大减小,其达到较好流动状态所需的水也大大减少,粗骨料的涵水性降低,根据坍落度试验可知,第 I 组试验的浓度为 58% 时,其坍落度与第 II 组浓度为 72% 时试验的坍落度均为 26 cm,由于采用管道输送工艺流程,充填料浆的流动性对于充填工艺是首先要考虑的技术参数,而坍落度参数常常作为表征充填料浆流动性能的重要指标,因此对于充填工艺来说,只有在相同坍落度的条件下,相关的物理性能参数才具有可比性,根据相近坍落度参数原则,第 I 组料浆浓度设为 58%,第 II 组料浆浓度设为 72% (见表 2)。根据诸多矿山以往相关研究的常规经验<sup>[9]</sup>,当尾砂与粗骨料质量之比为 3:7 是可以获得良好的流动及力学性能,故将尾砂与碎石之比确定为 3:7。每组进行 3 d、7 d、28 d 三个龄期的强度测试,试验方案设计见表 2 所示。

表 2 试验方案设计

试验组号	材料	水泥:全尾砂/(全尾砂+碎石)				料浆浓度
I	水泥	1	1	1	1	58%
	全尾砂	4	6	8	12	
	水泥	1	1	1	1	
II	全尾砂	4×0.3	6×0.3	8×0.3	12×0.3	72%
	碎石	4×0.7	6×0.7	8×0.7	12×0.7	

## 2 试验结果分析

将制作好的充填体试件进行保湿恒温养护,到达相应的养护龄期后测试其单轴抗压强度,测试结果见表 3 所示。从表中能够直观地看出不添加碎石的充填体试件强度远低于添加碎石的试件强度,随着水泥添加量的增加试件的强度增大,随着碎石的

掺入充填体试件强度大幅度增加,当水泥添加量较少时,碎石的掺入对试件的强度具有显著影响。

表3 充填材料配比结果汇总表

试验组号	配制浓度	灰砂比	试块各龄期强度/MPa		
			3 d	7 d	28 d
I	58%	1 : 04	0.21	0.55	1.01
		1 : 06	0.18	0.29	0.62
		1 : 08	0.15	0.27	0.43
		1 : 12	0.12	0.19	0.20
II	72%	1 : 04	0.47	1.44	3.01
		1 : 06	0.28	0.75	2.26
		1 : 08	0.18	0.47	1.36
		1 : 12	0.11	0.22	0.52

将测试数据进行分析研究,得到不同灰砂比及养护龄期时全尾砂-水泥、全尾砂-水泥-碎石充填体试件强度的变化规律见图1、图2所示。从图1

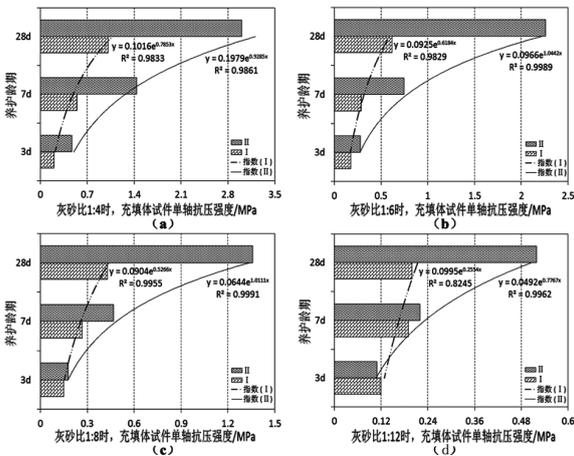


图1 不同灰砂比充填体试件各龄期单轴抗压强度

中的各图中的拟合曲线可以看出,当采用  $Y = ae^{bx}$  形式的指数函数拟合试验组号为 I 的水泥-全尾砂试验材料与试验组号为 II 的水泥-全尾砂-碎石试验材料强度 Y 随养护龄期 X 的变化规律时,相关系数均大于 0.9, 满足精度要求,从表 4 可以看出,同时其系数  $a_{II}$  较  $a_I$ 、 $b_{II}$  较  $b_I$  取值范围更大,从曲线图 1(a)、(b)、(c)、(d) 上来看,表征试验组号为 II 的解析式  $Y_{II} = a_{II}e^{b_{II}x}$  比表征试验组号为 I 的解析式  $Y_I = a_Ie^{b_Ix}$  的曲线增长更快,因此,可以很直观的看出添加碎石后,充填体强度始终遵循着较高的增长规律,因此说明碎石改善了充填材料的力学性能,大大提高了充填体的强度。同样的,从曲线图 2

(a)、(b)、(c) 上来看,添加碎石后充填体强度亦遵循着类似的增长规律,从而也验证了碎石改善并提高了充填体强度的作用。

从图 1(a) ~ (d) 可以看出,灰砂比同为 1 : 4 时,添加了碎石的试件 3、7、28 d 强度比未添加碎石试件的强度分别提高 0.26、0.89、2.00 MPa,增幅为 123.8%、161.8%、198.0%;灰砂比同为 1 : 6 时,添加了碎石的试件 3、7、28 d 强度比未添加碎石试件的强度分别提高 0.10、0.46、1.64 MPa,增幅为 55.6%、158.5%、264.5%。灰砂比同为 1 : 6、1 : 8 时,试件强度也呈现出类似的增长规律。

表4 充填材料配比结果汇总表

试验组号	拟合公式	系数范围
I	$Y_I = a_I e^{b_I x}$	$a_I$ 0.090 4 ~ 0.101 6 $b_I$ 0.255 4 ~ 0.785 3
II	$Y_{II} = a_{II} e^{b_{II} x}$	$a_{II}$ 0.049 2 ~ 0.197 9 $b_{II}$ 0.776 7 ~ 1.044 2

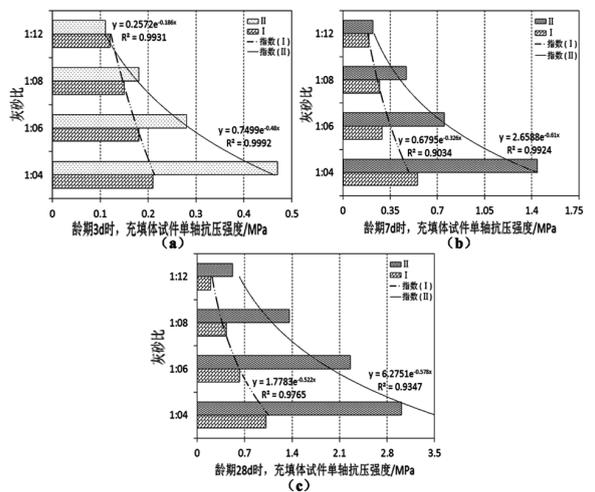


图2 不同龄期的各灰砂比充填体试件单轴抗压强度

从图 2(a) ~ (c) 可以看出,养护龄期同为 3 d 时,添加了碎石的灰砂比为 1 : 04、1 : 06、1 : 08、1 : 12 试件强度与未添加碎石试件的强度差值分别为 0.26、0.10、0.03、-0.01 MPa;养护龄期同为 7 d 时,添加了碎石的灰砂比为 1 : 04、1 : 06、1 : 08、1 : 12 试件强度比未添加碎石试件的强度分别提高 0.89、0.46、0.20、0.03 MPa,增幅为 161.8%、158.6%、74.1%、15.8%;养护龄期同为 28 d 时,添加了碎石的灰砂比为 1 : 04、1 : 06、1 : 08、1 : 12 试件强度比未添加碎石试件的强度分别提高 2.00、1.64、0.93、0.32 MPa,增幅为 198.0%、264.5%、

216.3%、160.0%。

### 3 结语

(1)结合充填工艺流程,根据等塌落度原则,从强度配比试验可以看出,添加碎石的充填体试件强度显著高于未添加碎石的试件强度,由此可以说明,在等塌落度条件下,添加碎石有利于提高充填体强度,这一点由充填体强度的拟合公式也得以验证。若需得到相同的充填体强度,可通过减少水泥用量、添加碎石的方式来达到,这样既可以达到所需的力学强度,也可以减少充填成本。

(2)当两种配方的充填料浆的坍落度参数均为26 cm左右时,水泥-全尾砂充填料浆的浓度为58%,水泥-全尾砂-碎石充填料浆的浓度为72%,添加作为粗骨料的碎石后的充填体试件强度增幅较大,采用水泥-全尾砂-碎石进行充填可使充填料浆浓度大幅提高,不但可保障充填体的强度,而且泌水量也大幅减少,因此还可大大减少井下排水设施,从而可节省成本,由于浓度高,充填料浆固结快,这对加快采场循环作业也极为有利。

(3)与平均粒径 $37.53\ \mu\text{m}$ 的极细颗粒尾砂相比,-25 mm的碎石颗粒尺寸要比全尾砂颗粒大几个数量级,较细的碎石粉末和尾砂可有效填充于大颗粒碎石孔隙之中,受外力作用时大颗粒群相互接触点上的着力点就落在了坚硬的碎石颗粒之间,填塞于其中的较细碎石和尾砂因水泥的胶结作用,可抑制粗骨料相互错动而对试件造成的损伤,这种抑制作用可在一定程度上有效保护充填体试件免受破坏。

#### 参考文献:

[1] 王春明,徐世法,李平.水泥稳定碎石级配优化设计及试

件成型方法对试验结果的影响[J].北京建筑工程学院学报,2007,23(3):15-17.

- [2] 孙强,于志前.集料的级配对道路水泥混凝土抗折强度的影响[J].青岛建筑工程学院学报,2003,24(3):108-112,117.
- [3] 范瑛.级配碎石性能分析及在农村公路中的应用研究[J].路基工程,2008(3):21-22.
- [4] 王怀亮,宋玉普.不同骨料级配混凝土的双轴压强度试验和破坏准则[J].水利学报,2008,39(12):1353-1359.
- [5] 宋玉普,陈渊.大骨料混凝土三轴受压动态强度试验研究[J].水利与建筑工程学,2013,11(5):84-88.
- [6] 宋玉普,王丽伟,王浩.大骨料混凝土率型内时损伤本构模型[J].大连理工大学学报,2015,55(1):47-53.
- [7] 巴恒静,黄智山,潘雨.大坍落度高性能轻集料混凝土新拌混合料性能的研究[J].混凝土,2000,130(8):25-27.
- [8] 黄智山,巴恒静.大坍落度高性能轻骨料混凝土的研究[J].新型建筑材料,2002(2):26-29.
- [9] 邓代强.尾砂-戈壁料胶结充填技术研究[J].矿业研究与开发,2014,34(1):16-17,21.
- [10] 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.
- [11] 严庆文,陈进,吉学文,等.膏体-废石联合充填技术及应用[J].现代矿业,2011,27(6):90-92.
- [12] 周宏清,曹艳妮.排山楼金矿采空区地质环境治理的实践[J].矿产保护与利用,2015(2):63-66.
- [13] 张磊,吕力行.某矿井下采空区充填体脱水的研究[J].矿产保护与利用,2013(5):9-12.
- [14] 许长新,路燕泽,甘泽等.基于细观尺度的胶结充填体破坏模拟试验研究[J].矿产保护与利用,2016(4):18-22.

引用格式:邓代强,肖利平,段瑜,等.粗骨料与细骨料胶结充填体强度对比分析[J].矿产保护与利用,2017(4):16-19.

DENG D Q, XIAO L P, DUAN Y, et al. Strength comparative analysis of cemented backfill of coarse aggregate and fine aggregate[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(4): 16-19.