

# 降弹剂改善湿喷混凝土回弹率试验研究\*

Experimental Study on ReboundRatio of Wet Shotcrete with Elastomer Lowering Agent

海维深<sup>1</sup>, 李正虎<sup>2</sup>, 和振海<sup>3,4</sup>, 刘云<sup>2</sup>, 杨新志<sup>2</sup>, 梁滔<sup>2</sup>, 郝倩倩<sup>2</sup>

(1. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650000; 2. 云南勐绿高速公路投资开发有限公司, 云南 普洱 665000;  
3. 中铁开发投资集团有限公司, 云南 昆明 650000; 4. 中铁开投勐绿高速工程指挥部, 云南 普洱 665000)

**摘要:** 针对隧道喷射混凝土回弹率较高的问题, 选用一种微纳米粉体降弹剂改良喷射混凝土的性能。对降弹剂掺加 3%、6%、9%、12% 和 15% 的胶砂流动度和抗折、抗压强度进行试验; 开展单掺粉煤灰、复掺粉煤灰与降弹剂不同配合比 C25 湿喷混凝土的回弹率研究。结果表明: 随降弹剂掺量增加, 胶砂流动度减小, 胶砂 1 和 3 d 的抗折、抗压强度逐渐降低, 28 d 的抗折、抗压强度均先增大后降低, 掺量为 6% 时强度最大, 28 d 抗折、抗压强度比分别为 1.049 和 1.014; 复掺粉煤灰与降弹剂湿喷混凝土的回弹率显著低于粉煤灰湿喷混凝土的回弹率, 胶凝材料总量为 430 kg/m<sup>3</sup>、复掺 14% 粉煤灰与 6% 降弹剂的综合回弹率最低, 为 8.09%。掺加 6% 降弹剂能够促进喷射混凝土抗压强度增长, 减小胶凝材料用量。研究成果可供类似工程参考和借鉴。

**关键词:** 隧道工程; 喷射混凝土; 回弹率; 配合比; 降弹剂

中图分类号: TU528.041 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 06-0019-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.004

HAI Weishen<sup>1</sup>, LI Zhenghu<sup>2</sup>, HE Zhenhai<sup>3,4</sup>, LIU Yun<sup>2</sup>, YANG Xinzhi<sup>2</sup>, LIANG Tao<sup>2</sup>, HAO Qianqian<sup>2</sup>

(1. Yunnan Science & Technology Research Institute of Highway, Kunming 650000, China;

2. Yunnan Menglv Expressway Investment Development Co., Ltd., Pu'er 665000, China;

3. China Railway Development & Investment Group Co., Ltd., Kunming 650000, China;

4. Menglv Expressway Engineering Headquarters of China Railway

Development & Investment Group Co., Ltd., Pu'er 665000, China)

**Abstract:** In response to the challenge of high rebound rates in tunnel shotcrete applications, a micro-nano powder additive has been selected to enhance the performance of shotcrete. The fluidity, flexural and compressive strength of mortar samples containing 3%, 6%, 9%, 12% and 15% of the additive by mass were tested. Additionally, an investigation into the rebound rate of C25 wet-mixed shotcrete was conducted, comparing formulations with single additions of fly ash and composite mixtures incorporating both fly ash and the additive at various proportions. The results showed that the fluidity of mortars decreases with the increase of the dosage of additive, the flexural and compressive strengths in 1 day and 3 days decrease gradually, and the flexural and compressive strengths of mortars in 28 days increase first and then decrease. The flexural and compressive strengths

\* 基金项目: 云南省交通运输厅科技创新及示范项目 (2021-102); 中铁开发投资集团有限公司科技研究开发计划项目 (2022-B 类-05)。

作者简介: 海维深 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 喷射混凝土和岩土工程。

收稿日期: 2024-01-28

## 材料科学

of mortar specimens in 28 days is the highest when adding 6% micro-nano additive, and the flexural and compressive strength ratio in 28 days are 1.049 and 1.014. The rebound rate of wet sprayed concrete mixed with fly ash and additive is significantly lower than that of wet sprayed concrete with fly ash, the total amount of cementitious material is  $430 \text{ kg/m}^3$ , and the comprehensive rebound rate is the lowest when mixed with 14% fly ash and 6% additive, which is 8.09%. Adding 6% additive can promote the increase of compressive strength of shotcrete and reduce the amount of cementitious material. The research results can provide reference and inspiration for similar engineering projects.

**Keywords:** tunneling; wet-mix shotcrete; shotcrete-rebound; mix proportion; tackifier

## 0 引言

喷射混凝土被广泛用于隧道(洞)的初期支护,对围岩起到临时支护作用。混凝土喷射施工过程中存在混凝土回弹率过大的问题。调查研究结果显示,我国铁路隧道喷射混凝土的回弹率约为30%,在围岩和地质条件不良的情况下可达50%以上<sup>[1-2]</sup>,矿山巷道混凝土的回弹率在控制措施不到位的情况下可达35%~40%<sup>[3]</sup>。喷射混凝土的回弹率大既造成了材料浪费,增加了喷射施工时长和隧道建设的总成本,在一定程度上也改变了混凝土的施工配合比,给喷射混凝土带来开裂风险<sup>[4]</sup>。因此,研究降低喷射混凝土回弹率对节约隧道建设成本和工程质量具有积极意义。

喷射混凝土的材料组分及配合比是控制喷射混凝土回弹率的内因,对喷射混凝土的可泵性、可喷性起重要作用。张鹏<sup>[5]</sup>、杨永民<sup>[6]</sup>和张建<sup>[7]</sup>通过正交试验优化、调整喷射混凝土的配合比来降低了喷射回弹率,结果均表明砂率是影响喷射混凝土回弹率的最主要因素;张戈等<sup>[8]</sup>对喷射混凝土配合比优化试验结果显示,水胶比是影响喷射混凝土回弹率的最重要因素。由于试验所用材料及考虑因素梯度等的差异性,文献[5-7]与文献[8]所得到的影响喷射混凝土回弹率的最主要因素不相一致,但均认为在适量的砂率范围内,喷射混凝土回弹率随砂率增加而降低。为降低喷射回弹率,众多研究人员还在喷射混凝土内添加无机材料来增强喷射混凝土的黏聚性。黄天勇等<sup>[9]</sup>研究了粉煤灰掺量及复掺粉煤灰与硅灰对喷射混凝土回弹率的影响,结果表明喷射混凝土的回弹率随粉煤灰掺量的增加而降低,复掺粉煤灰与硅灰可以进一步降低回弹率;陈超等<sup>[10]</sup>研究了硅灰掺量对喷射混凝土性能及回弹率的影响,结果表明在喷射混凝土中掺入适量硅灰,喷

射混凝土的坍塌度和回弹率均随硅灰掺量的增加而减小;Armengaud等<sup>[11]</sup>分别以偏高岭土、磨细高炉矿渣和硅灰等量替代水泥配置不同稠度的干喷混凝土,研究三种掺合料对干喷混凝土回弹率的影响及混凝土性能与回弹率的关系,结果表明偏高岭土、磨细高炉矿渣和硅灰均能不同程度地降低干喷混凝土回弹率;丁建彤等<sup>[12]</sup>、陈荣等<sup>[13]</sup>、聂荣辉等<sup>[14]</sup>通过在喷射混凝土中掺入无机纳米材料,成功将喷射混凝土回弹率降至10%以内;魏子程等<sup>[15]</sup>通过掺入高强超微外加剂改善喷射混凝土性能,既提高了喷射混凝土的抗压、抗折强度,也降低了喷射混凝土回弹率;宁逢伟等<sup>[16]</sup>开展了单掺不同细度纳米掺合料与硅灰的湿喷混凝土的喷射回弹率对比试验研究,试验结果显示,相比于同掺量下的硅灰喷射混凝土,纳米级掺合料湿喷混凝土回弹率降低了17%~25%,且回弹率随纳米级掺合料掺量和细度的增加而降低。

综上所述,在喷射混凝土内掺入无机材料能够降低喷射混凝土回弹率,且粒径越小对降低喷射回弹率的效果越好,但过细的材料又会带来诸如需水量过高、成本提升和增加混凝土开裂风险等问题。为保障喷射混凝土质量、降低喷射混凝土回弹率,选用一种粒径介于微米与纳米间的降回弹粉体材料(降弹剂),开展不同掺量下的胶砂流动度、抗折强度、抗压强度测试;在某隧道的粉煤灰湿喷混凝土内加入该降弹剂,通过现场喷射回弹率对比试验验证其有效性。研究成果可供类似工程借鉴及参考。

## 1 工程概况

某隧道位于重庆市武隆区凤来镇涪陵区同乐乡,左洞长4 550 m,右洞长4 559 m,隧道建筑限界10.75 m,隧道净高5.0 m,隧道路面按双向四车道设置,设计行车速度为100 km/h。隧址区主要为砂岩、泥岩、页岩,地下水主要为碎屑岩类孔隙裂隙

水。隧道进出口段围岩属V级围岩, IV级围岩主要分布在洞身段。衬砌类型均为S4b, 采用两台阶开挖法, 上、下台阶均为光面爆破, 隧道全断面开挖面积为101.1 m<sup>2</sup>, 上台阶开挖面积为70.0 m<sup>2</sup>, 下台阶及仰拱开挖面积31.1 m<sup>2</sup>, 下台阶左、右两侧交错开挖。支护结构为复合式衬砌, 喷锚支护为22 cm厚C25喷射混凝土+锚杆+钢筋网+I16型工字钢拱架, 拱架间距为1 m, 二次衬砌采用40 cm厚C25混凝土。

## 2 试验方案

### 2.1 原材料

水泥为P·O 42.5级水泥, 比表面积为328 m<sup>2</sup>/kg, 标准稠度用水量为27%, 3、28 d胶砂抗压强度分别为28.2、47.1 MPa。基准水泥比表面积为358 m<sup>2</sup>/kg, 密度为3.16 g/cm<sup>3</sup>, 标准稠度用水量为26.6%。标准砂为中国ISO标准砂。粉煤灰为F类II级粉煤灰, 45 μm方孔筛细度为21%, 需水比为98%, 烧失量为6.38%。降弹剂为RG-B型超细改性硅微粉, 该产品是以硅灰为主要原材料, 复合磨细高钛矿渣等制得的微纳米粉体材料, 比表面积为13 700 m<sup>2</sup>/kg, 需水量比99%, 烧失量3.0%。粗集料为粒径5~10 mm碎石。机制砂细度模数2.96。减水剂采用减水率为28%高性能减水剂(缓凝型)。速凝剂为YTF-1型无碱液体速凝剂, 密度1.366 g/cm<sup>3</sup>, pH值为2.36, 固含量51.37%, 净浆初凝时间为164 s, 终凝时间为428 s。

### 2.2 试验方法

(1) 胶砂流动度: 参考文献[17]的测试方法

对胶砂流动度变化历程进行测试。在跳动的前21次, 每间隔3次关停跳桌并快速量测胶砂流动度, 最后测量跳动25次时的胶砂流动度。

(2) 胶砂抗折、抗压强度: 按照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》<sup>[18]</sup>对胶砂试件进行成型、养护和测试, 测试1、3、28 d龄期的抗折、抗压强度。

(3) 混凝土抗压强度: 采用钻芯法测试喷射混凝土强度。

(4) 喷射混凝土回弹率: 采用质量比法测试喷射混凝土回弹率*k*(%)。

### 2.3 胶砂配合比

胶砂配合比按照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》<sup>[18]</sup>执行, 以纯基准水泥胶砂试件作为基准组, 降弹剂对基准水泥的替代率分别为3%、6%、9%、12%和15%。

### 2.4 喷射混凝土配合比

现场原使用喷射混凝土的配合比为F1, 内掺13%粉煤灰替代水泥。由于粉煤灰具有明显的价格优势, 可考虑增大粉煤灰的掺量。针对普通硅酸盐水泥, 粉煤灰的最大单掺量宜为20%<sup>[19]</sup>, 故按照粉煤灰的最大单掺量20%设置了试验F2。为研究降弹剂对喷射混凝土回弹率的影响, 采用复掺20%粉煤灰与降弹剂。根据生产厂家推荐, 降弹剂的掺量为6%, 从而得到粉煤灰的掺量为14%。

混凝土拌合物坍落度目标值为200 mm, 经过试拌试验筛选出的试验配合比见表1。速凝剂设计掺量为胶凝材料总量的8%。

表1 回弹率测试方案  
Table1 Rebound rate test scheme

编号	水灰比	砂率/%	水/ (kg/m <sup>3</sup> )	胶凝材料/(kg/m <sup>3</sup> )			细集料/ (kg/m <sup>3</sup> )	粗集料/ (kg/m <sup>3</sup> )	减水剂/ (kg/m <sup>3</sup> )	胶集比	
				水泥	粉煤灰	降弹剂					
F1	0.40	55	174	379	57	0	436	930	760	4.36	1:3.88
F2	0.40	53	180	360	90	0	450	885	785	4.05	1:3.71
F3	0.40	52	164	327	58	25	410	898	828	4.51	1:4.19
F4	0.39	55	185	343	61	26	430	934	764	3.87	1:4.03

## 3 试验结果及分析

### 3.1 降弹剂对胶砂流动度的影响

图1显示了基准组及以3%、6%、9%、12%、15%降弹剂替代基准水泥的胶砂流动度变化历程。参照文献[17], 采用二次函数对胶砂流动度变化历

程进行最小二乘曲线拟合, 整体的拟合度均较好。

从图1中可看出, 各组胶砂流动度的增长速率均随跳动次数的增加呈现减小趋势。在跳桌开始跳动前, 胶砂堆积呈近似圆台体形状, 如图2(a)所示。随着跳动次数的增加, 胶砂受剪切力作用下坍并向四周扩展, 如图2(b)所示, 此过程中胶砂

## 材料科学

的流动度、胶砂与跳桌面的接触面积均逐渐增大,胶砂层厚度变薄。驱动流动度增大的剪切力随胶砂层厚度的变薄而减小,而拌合物与跳桌面间的附着力则随着接触面积的增加而增大,附着力抑制胶砂流动度的增加,故图 1 中流动度的增长速率随跳动次数的增加呈减小趋势。在跳动次数少于 9 次时,胶砂拌合物与跳桌面的接触面积并不大,胶砂层还较厚,此时流动度的增加主要来自于较厚的砂浆层下坍扩展,因此各组的流动度较接近;在跳动次数超过 9 次后,随着跳动次数的增加,胶砂层厚度变化越来越小,拌合物与跳桌面间的附着力逐渐发挥其主导作用,相同跳动次数下各组间流动度的差距逐渐增大,且降弹剂的替代率越高,流动度则越小。这也表征了降弹剂对砂浆与跳桌面间的黏附力的增强作用,降弹剂的替代率越高,对黏附力的增强效果越明显。砂浆黏附力增强既有利于减少喷射混凝土从受喷面结块掉落,还能增加集料表面的裹浆厚度,减少集料回弹。

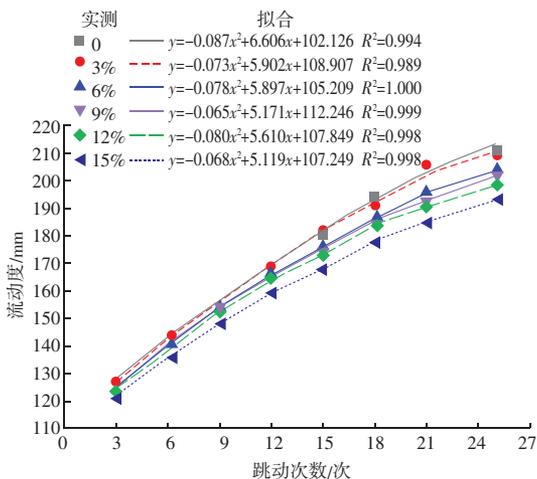


图 1 不同跳动次数下的流动度

Fig. 1 Liquidity under different beat times



(a) 跳动前

(b) 跳动后

图 2 胶砂的堆积形态

Fig. 2 Accumulation pattern of mortars

## 3.2 降弹剂对胶砂力学性能的影响

图 3 显示了基准组及以 3%、6%、9%、12%、15% 降弹剂替代基准水泥的胶砂抗折、抗压强度。由于降弹剂内的高钛矿渣颗粒在早期未参与水化反应,故随着降弹剂掺量的增加,胶砂 1 和 3 d 的抗折、抗压强度总体呈现逐渐减小的变化趋势。28 d 时高钛矿渣颗粒发生了二次水化反应,同时发挥了微集料填充和晶核作用,胶砂 28 d 的抗折、抗压强度随掺量的增加呈现先增大后减少趋势,掺量为 6% 时强度达到最大,28 d 的抗折、抗压强度比分别为 1.049 和 1.014。

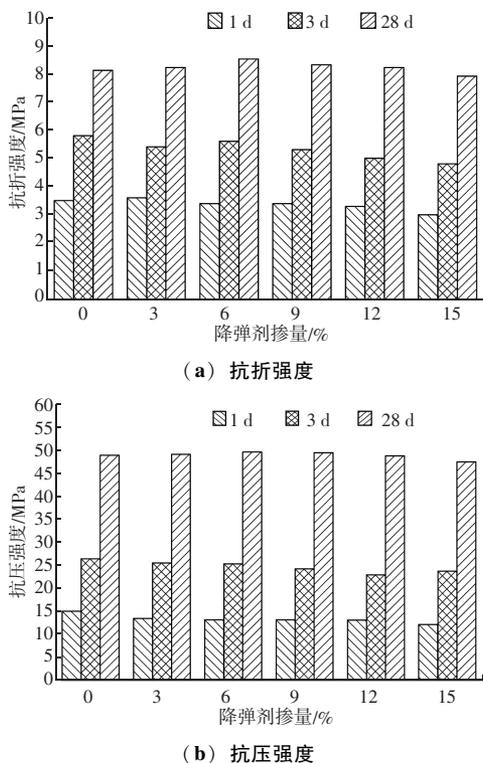


图 3 降弹剂掺量对胶砂力学性能影响

Fig. 3 Effect of the dosage of bomb reducer on the mechanical properties of mortars

## 3.3 喷射混凝土抗压强度

图 4 为 4 组不同配合比喷射混凝土的抗压强度。4 组喷射混凝土的 28 d 抗压强度均满足设计要求。对比试验 F1 和 F4, 两组试验的胶凝材料总量和粉煤灰用量较接近, F4 试验内掺 6% 降弹剂替代水泥, 7 和 28 d 抗压强度较试验 F1 的分别增加约 31.4% 和 33.8%, 其主要原因为: ① F4 试验的水灰比较 F1 试验的降低了 0.1; ② 降弹剂内的硅灰的火山灰效应和微集料填充作用; ③ 降弹剂内的高钛矿渣在后期发

生二次水化, 以及微集料填充和晶核作用; ④F1 试验组回弹率大, 粗集料损失多, 一定程度上提高了 F1 的砂率。

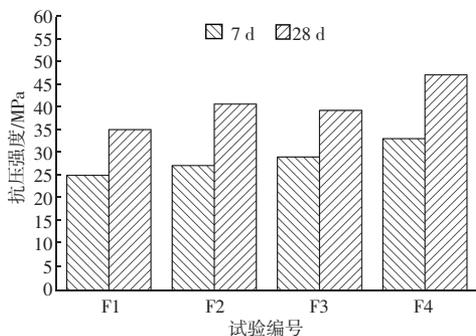


图 4 混凝土抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of shotcrete

### 3.4 喷射混凝土回弹率

表 2 为 4 组喷射混凝土回弹率的测试结果, 表中所述测试部位如图 5 所示。4 种配合比喷射混凝土回弹率均明显低于规范要求的限值 (水平喷射 15%、竖直喷射 25%), 其中复掺粉煤灰和降弹剂喷射混凝土回弹率显著低于单掺粉煤灰喷射混凝土回弹率, 单掺 13% 粉煤灰喷射混凝土的平均综合回弹率最大。为了保证喷射混凝土的早期强度, 粉煤灰掺量由 13% 增加至 20%, 胶凝材料总量也由  $436 \text{ kg/m}^3$  增加至  $450 \text{ kg/m}^3$ , 由于集料表面可附着浆体量增加, 上台阶全环的平均综合回弹率由 15.05% 降至 12.31%, 降低率为 18.21%。此处回弹率的降低不仅得益于胶凝材料总量增加, 也包含了粉煤灰掺量增加对回弹率的影响。对比试验 F1 和 F4, 两组配合比的胶凝材料总量与粉煤灰用量都较接近, 试验 F4 内掺了 6% 降弹剂来替代水泥, 在上台阶全环的平均综合回弹率低至 8.09%, 相较试验 F1 的回弹率 15.05% 降低率为 46.25%。在不改变粉煤灰与降弹剂掺加比例的情况下, 胶凝材料总量由  $430 \text{ kg/m}^3$  降至  $410 \text{ kg/m}^3$  时, 喷射混凝土回弹率由 8.09% 增加至 11.12%, 这主要是由于集料表面浆体量不足导致。

降弹剂较水泥和粉煤灰具有更大的比表面积, 其表面吸附了大量水分子, 促使混凝土拌合物黏聚性增加。另外, 在胶凝材料总量较接近的情况下, 内掺 6% 降弹剂替代水泥, 混凝土拌合物内的细颗粒更多, 颗粒间的接触点数量也会更多。以上两者的

表 2 回弹率测试结果

Table 2 Rebound rate test results

编号	测试部位	综合回弹率/%	平均综合回弹率/%	
F1	ZK13 + 354.7 ~ 357.7 拱顶	19.30	15.05	
	YK13 + 444.5 ~ 448.5 上台阶拱腰	10.80		
F2	ZK13 + 748.7 ~ 751.7 上台阶全环	12.50	12.31	
	ZK13 + 751.7 ~ 755.7 上台阶全环	11.85		
	ZK13 + 755.7 ~ 758.7 上台阶全环	12.58		
	ZK13 + 532.7 ~ 534.7 上台阶全环	12.50		
F3	ZK13 + 544.7 ~ 546.7 上台阶全环	10.50	11.12	
	YK13 + 650.5 ~ 652.5 上台阶全环	11.18		
	ZK13 + 548.7 ~ 550.7 上台阶全环	10.29		
F4	ZK13 + 472.7 ~ 475.7 下台阶边墙	3.10	3.10	
	YK13 + 751.5 ~ 754.5 上台阶全环	8.35	8.09	
	YK13 + 757 ~ 759 上台阶全环	8.04		
	YK13 + 766 ~ 769 上台阶全环	8.10		
	ZK13 + 680.7 ~ 683.7 上台阶全环	8.62		
	ZK13 + 683.7 ~ 686.7 上台阶全环	7.35		
	YK13 + 707.5 ~ 710.5 下台阶边墙	1.10		1.10

综合作用一方面增强了混凝土对受喷面的黏附性以及混凝土自身的屈服应力, 减少混凝土结块掉落; 另一方面增强混凝土内浆体对集料的包裹性, 集料裹浆厚度增加能够起到缓冲作用, 减小集料与受喷面的冲击力, 同时集料能够射流进入已黏附在受喷面的浆体内, 减少集料掉落。



(a) 拱顶测试范围

(b) 上台阶全环

(c) 下台阶边墙

图 5 回弹率测试部位现场图

Fig. 5 Rebound rate test site

## 4 结论

依托某道喷射混凝土工程, 开展了单掺粉煤灰、复掺粉煤灰与降弹剂 C25 湿喷混凝土配合比设计, 测试了不同配合比湿喷混凝土的回弹率和抗压强度, 得到以下结论:

(1) 随降弹剂掺量的增加, 胶 (下转第 30 页)

## 材料科学

- [14] 钱如胜, 叶志波, 张云升, 等. 固碳强化再生粗骨料对其混凝土力学强度及体积稳定性的影响 [EB/OL]. 材料导报, [2024 - 07 - 16]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/20240716.html>.
- [15] 肖前慧, 郭欣怡, 邱继生, 等. 再生骨料掺量对混凝土碳化性能的影响 [J]. 西安科技大学学报, 2023, 43 (5): 972-979.
- [16] 吴波, 黄婷婷. 再生块体/骨料混凝土中不同界面的碳化性能及孔隙特征 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (7): 52-60.
- [17] 王玮, 高宝虎, 赵权, 等. 深圳地区模块化学校建筑的全生命周期碳排放研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (2): 132-136.
- [18] 赵怀轩, 张启志. 湿热-碳化下环氧树脂混凝土的抗碳化性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 28-31.
- [19] 王佃超, 肖建庄, 夏冰, 等. 再生骨料碳化改性及其减碳贡献分析 [J]. 同济大学学报 (自然科学版) 2022 (11): 1610-1619.

(上接第 23 页)

砂流动度减小, 胶砂 1 和 3 d 的抗折、抗压强度逐渐降低, 28 d 的抗折、抗压强度均先增大后降低, 掺量为 6% 时强度最大, 28 d 抗折、抗压强度比分别为 1.049 和 1.014。

(2) 掺加 6% 降弹剂能够显著降低喷射混凝土的回弹率。胶凝材料总量为  $430 \text{ kg/m}^3$ 、胶集比约为 4.0、复掺 14% 粉煤灰和 6% 降弹剂试验组的综合回弹率最低, 仅为 8.09%。

(3) 掺加 6% 降弹剂能够促进喷射混凝土抗压强度的增长, 减小胶凝材料用量。

## 参 考 文 献

- [1] 王家赫, 谢永江, 冯仲伟, 等. 低回弹高早强喷射混凝土技术与工程应用 [J]. 混凝土与水泥制品, 2023 (2): 5-9.
- [2] 马召林. 铁路隧道喷射混凝土回弹率测试及优化 [J]. 低温建筑技术, 2019, 41 (1): 114-117.
- [3] 曾宪桃, 任振华, 王兴国. 磁化水降低喷射混凝土粉尘浓度与减少回弹的试验研究 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (4): 705-712.
- [4] LEUNG C K Y, LAI R, LEE A Y F. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition. Cement and Concrete Research, 2005, 35 (4): 788-795.
- [5] 张鹏. 基于正交试验混凝土湿喷回弹率的控制研究 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2014, 10 (9): 281-284.
- [6] 杨永民. 配合比参数对喷射混凝土回弹率的影响研究 [J]. 人民珠江, 2021, 42 (2): 57-60.
- [7] 张建. 公路隧道高性能湿喷混凝土配合比研究与应用 [J]. 公路交通技术, 2023, 39 (2): 152-158.
- [8] 张戈, 安明喆, 王月, 等. 隧道湿喷高性能喷射混凝土配合比试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2021 (12): 12-15, 28.
- [9] 黄天勇, 王栋民, 刘泽, 等. 湿式喷浆材料的选择及性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (3): 470-475.
- [10] 陈超, 孙振平. 灰灰对掺有无碱速凝剂水泥浆体性能的影响 [J]. 材料导报, 2019, 33 (14): 2348-2353.
- [11] ARMENGAUD J, CASAUX - GINESTET G, CYR M, et al. Characterization of fresh dry-mix shotcrete and correlation to rebound [J]. Construction and Building Materials, 2017, 135 (Mar. 15): 225-232.
- [12] 丁建彤, 吴勇, 雷英强. 纳米材料改善普通干湿喷射混凝土回弹率和强度现场工艺试验 [J]. 水力发电, 2017, 43 (9): 49-52.
- [13] 陈荣, 白远江, 郭雪微, 等. 无机纳米材料在地下厂房喷射混凝土中的应用 [J]. 人民长江, 2018, 49 (增刊 1): 269-272.
- [14] 聂荣辉, 李祖权, 田海龙. 纳米材料在隧道初支喷射混凝土中的试验研究 [J]. 广东土木与建筑, 2020, 27 (9): 84-86.
- [15] 魏子程, 王林, 贺鑫鑫, 等. 高强超微外加剂对喷射混凝土力学性能及回弹率的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (5): 82-86, 139.
- [16] 宁逢伟, 丁建彤, 白银, 等. 纳米级掺合料和粗合成纤维对湿喷混凝土回弹率的影响 [J]. 水利水运工程学报, 2019 (1): 42-49.
- [17] 李树繁, 李佳佳, 蒋鹤, 等. 矿物掺合料流变性能表征方法的适用性研究 [J]. 混凝土, 2021 (11): 104-107, 116.
- [18] 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法): GB/T 17671—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [19] 喷射混凝土应用技术规程: JGJ/T 372—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.