

# 硅灰改性喷射混凝土回弹率控制技术

黄弈茗<sup>1,2</sup>, 薛尚铃<sup>2</sup>, 刘立平<sup>3</sup>, 桂强<sup>4</sup>

<sup>1</sup>重庆致锐远交通工程技术咨询有限公司, 重庆

<sup>2</sup>中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆

<sup>3</sup>重庆大学, 土木工程学院, 重庆

<sup>4</sup>中建八局, 上海

收稿日期: 2023年6月26日; 录用日期: 2023年7月17日; 发布日期: 2023年7月27日

## 摘要

为降低喷射混凝土回弹率, 从而达到节省成本、绿色建造的目的, 本文依托德昌至会理高速公路东山隧道段, 通过试验对比干喷法及湿喷法两种施工工艺下基础配合比、添加普通硅灰、添加复合硅灰三种配合比方案的回弹率差异, 结果表明湿喷法使回弹率降低5.6%~22.1%; 复合硅灰可以通过增加混凝土粘附力, 将回弹率降低至3.2%; 而普通硅粉由于其SiO<sub>2</sub>与水泥水化颗粒产生反应, 过量添加可能导致回弹率增加。

## 关键词

隧道施工, 喷射混凝土, 回弹率, 硅灰, 支护

# Control Method for Rebound Rate of Silica Fume Modified Shotcrete

Yiming Huang<sup>1,2</sup>, Shangling Xue<sup>2</sup>, Liping Liu<sup>3</sup>, Qiang Gui<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Chongqing Zhiruiyuan Traffic Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Chongqing

<sup>2</sup>CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing

<sup>3</sup>School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing

<sup>4</sup>China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai

Received: Jun. 26<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 17<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 27<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

The main purpose of this research is to cut costs and protect the environment by reducing the rebound rate of shotcrete. The research is based on the project of Dongshan Tunnel in DeChang-HuiLi

文章引用: 黄弈茗, 薛尚铃, 刘立平, 桂强. 硅灰改性喷射混凝土回弹率控制技术[J]. 土木工程, 2023, 12(7): 1030-1035. DOI: 10.12677/hjce.2023.127117

Expressway. By comparing the rebound rates of concrete samples in 3 different mix ratio (Basic mix ratio, Adding ordinary silica fume, Adding composite silica fume) under 2 construction techniques (Dry spray method, Wet spray method) respectively, the results show that the wet spray method reduces the rebound rate by 5.6%~22.1%; Composite silica fume can reduce the rebound rate to 3.2% by increasing the adhesion of concrete; In addition, due to the reaction between  $\text{SiO}_2$  and cement hydration particles, excessive addition of ordinary silica fume may lead to an increase in rebound rate.

## Keywords

Tunneling, Shotcrete, Rebound Rate, Silica Fume, Slope Support

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 研究背景

喷射混凝土是一种通过高压空气将混凝土从管道喷射到受喷面并压实、且能够在短时间内产生强度的建筑材料[1]。其具有凝结时间短、自捣作用、粘结强度高、协调变形、适用范围广、设备简单等特点[2] [3] [4]。作为隧道矿山法施工的重要材料之一，随着我国高速公路的建设重点也逐渐从经济发达的东南沿海转移至西南山区，隧道工程的增多带动了喷射混凝土的大规模使用。因此，有必要对喷射混凝土的作用原理、施工工艺等进行深入研究。

喷射混凝土的回弹率高，不仅增加了原材料的用量，造成经营成本增加，更造成施工场地粉尘污染，对施工人员身体健康造成隐患，更可能增加粉尘爆炸的风险，威胁现场安全。因此，降低喷射混凝土的回弹率，可以节省原材料的使用、提高施工效率，从而达到绿色施工、安全施工的目的。截至目前，国内外专家已经对喷射混凝土开展了一定研究：戴晓栋[5]、赵爽[6]等通过现场试验探讨了喷射混凝土中速凝剂参量与其回弹率之间的关系；刘长文[7]对比传统湿喷方法和先喷水泥砂浆再喷混凝土的方法得出结果认为后者能够显著降低回弹率；杨红伟[8]、曾宪桃等[9]分别从喷射混凝土配合比优化、磁化水拌制喷射混凝土等角度研究了回弹率降低的方法。刘康[10]则从配合比设计、喷射混凝土的射流特性和喷射作业方法对低回弹喷射混凝土进行了多角度的研究。然而通过采用硅灰替代水泥，并通过对比干喷和湿喷两种施工工艺来对喷射混凝土回弹率进行控制的研究鲜有报道。

为了进一步揭示喷射混凝土的回弹机理，以便更好地对回弹率进行控制，达到节约经济成本、绿色施工的目标，本文依托德会高速公路东山隧道施工段，分别对干喷和湿喷两种不同的施工工艺进行了多种配合比方案的喷射混凝土回弹试验，结果表明干喷法的回弹率较高，而湿喷法、复合硅灰改性均能有效降低回弹率，但过量采用普通硅灰则反而会造成回弹率上升。

## 2. 试验设计

本试验依托工程为德昌至会理高速公路某隧道段，隧道全长 2815 m，主洞净高 5 m，净宽 10.25 m，二衬混凝土防渗等级不小于 P8。隧道试验段围岩等级为 V 级。

试验采用干喷和湿喷两种施工工艺进行对比，每种工艺按配合比的不同分为三种方案：方案 1 为未采用硅灰的原基础配合比方案，方案 2 采用普通硅灰替代部分水泥(6.6%)，方案 3 采用复合硅灰替代部分水泥(10.0%)。通过前期试验证明，三种方案的混凝土强度均满足设计要求。具体的配合比方案见表 1、表 2。

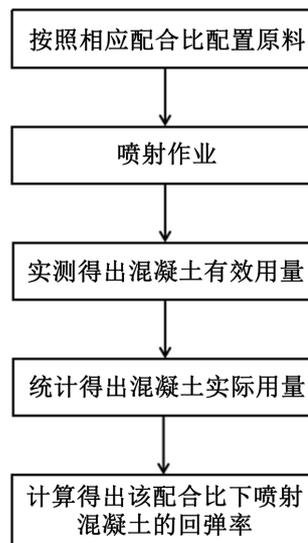
**Table 1.** Concrete mix ratio design of dry spray method  
**表 1.** 干喷法选用配合比方案

编号	用水量(kg)	水泥用量(kg)	水灰比	砂率	普通硅灰(kg)	复合硅灰(kg)	速凝剂
DS-1	172	400	0.43	0.50	0	0	7%
DS-2	172	374	0.46	0.50	26	0	7%
DS-3	172	360	0.48	0.50	0	40	7%

**Table 2.** Concrete mix ratio design of wet spray method  
**表 2.** 湿喷法选用配合比方案

编号	用水量(kg)	水泥用量(kg)	水灰比	砂率	普通硅灰(kg)	复合硅灰(kg)	速凝剂
WS-1	172	400	0.43	0.50	0	0	7%
WS-2	172	374	0.46	0.50	26	0	7%
WS-3	172	360	0.48	0.50	0	40	7%

试验通过对隧道初支喷射混凝土的有效用量和实际用量进行计算来确认不同配合比方案下喷射混凝土的回弹率。通过对喷射作业完成之后对初支进行实测计算得出有效用量，通过对运料车混凝土使用量进行统计得出实际用量，隧道的拱顶和边墙部位的有效用量分开进行统计，其试验流程见图 1。在喷射作业开始前应当对围岩表面易脱落的碎石、淤泥等物质进行清理，喷嘴与围岩面之间的距离应保持在 0.8~1.5 m 的范围内，喷射角度应控制在 75°~105° 的范围内。



**Figure 1.** Flow chart of shotcrete rebound rate test  
**图 1.** 喷射混凝土回弹率试验流程图

### 3. 试验结果

通过上述方法，统计得出干喷法和湿喷法各方案的喷射混凝土有效用量和实际用量分别见表 3、表 4。

根据查阅文献及现场工程师施工经验，本文将喷射混凝土的拱顶回弹率与边墙回弹率的比值设定为 2:1，计算得出方案 DS-1 的拱顶回弹率为 36.6%，边墙回弹率为 18.3%，平均回弹率为 34.5%。方案 DS-2

的拱顶回弹率为 23.6%，边墙回弹率为 11.8%，平均回弹率为 21.2%。方案 DS-3 的拱顶回弹率为 25.6%，边墙回弹率为 12.8%，平均回弹率为 22.4%。

**Table 3.** Amounts of shotcrete using dry spray method  
**表 3.** 干喷法各方案喷射混凝土用量统计

编号	拱顶有效用量(m <sup>3</sup> )	边墙有效用量(m <sup>3</sup> )	实际用量(m <sup>3</sup> )
DS-1	12.50	2.11	22.29
DS-2	11.42	3.49	18.92
DS-3	11.70	4.54	20.94

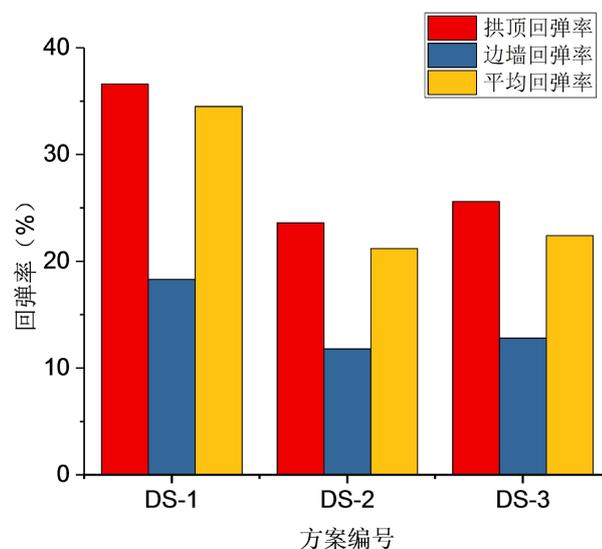
**Table 4.** Amounts of shotcrete using wet spray method  
**表 4.** 湿喷法各方案喷射混凝土用量统计

编号	拱顶有效用量(m <sup>3</sup> )	边墙有效用量(m <sup>3</sup> )	实际用量(m <sup>3</sup> )
WS-1	54.54	8.97	72.50
WS-2	51.90	9.31	72.50
WS-3	61.65	3.99	67.80

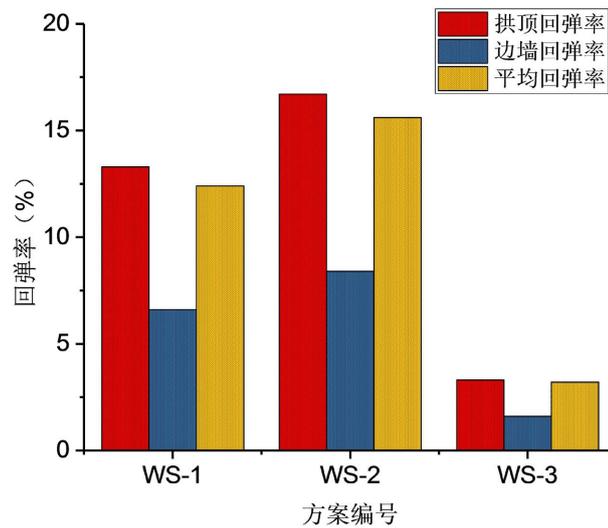
同理可计算得出方案 WS-1 的拱顶回弹率为 13.3%，边墙回弹率为 6.6%，平均回弹率为 12.4%。方案 WS-2 的拱顶回弹率为 16.7%，边墙回弹率为 8.4%，平均回弹率为 15.6%。方案 WS-3 的拱顶回弹率为 3.3%，边墙回弹率为 1.6%，平均回弹率为 3.2%。

#### 4. 回弹率分析

为便于进行比较分析，本文将干喷和湿喷两种施工工艺下的无硅灰添加、添加普通硅灰以及添加复合硅灰 3 种配合比方案各自的拱顶回弹率、边墙回弹率以及平均回弹率描绘成柱状图(图 2、图 3)。



**Figure 2.** Bar chart of rebound rates of shotcrete using dry spray method  
**图 2.** 干喷法各配合比方案回弹率柱状图



**Figure 3.** Bar chart of rebound rates of shotcrete using wet spray method  
**图 3.** 湿喷法各配合比方案回弹率柱状图

对比图 2 和图 3 可以发现, 相较于干喷法, 采用湿喷法时 3 种混凝土配合比方案的平均回弹率均出现了明显的下降, 其下降幅度分别为 22.1%、5.6% 以及 19.2%。造成这一结果的主要原因是干喷法所用的水是在喷口处加入喷料的, 两者没有足够的时间均匀拌合, 混凝土的粘附力不足, 因此干喷法产生的粉尘较多, 其回弹率也明显高于湿喷法。

分别对比干喷法和湿喷法 3 种配合比方案的回弹率可以发现: 相较于基础配合比, 干喷法采用普通硅灰替代 6.6% 的水泥(DS-2), 其回弹率下降了 15.4%, 与之相对应的湿喷法 WS-2 方案回弹率反而上升了 3.2%。同样与基础配合比相比较, 干喷法采用复合硅灰替代 10% 的水泥(DS-3)后, 其回弹率下降了 12.1%, 与之相对应的湿喷法 WS-3 方案回弹率下降了 9.2%。

为了对以上试验结果进行解释, 本文需对普通硅灰和复合硅灰的组分进行分析。通过 GGX-900 原子吸收分光光度仪的测定, 两种硅灰的组分及含量分别见表 5、表 6。

**Table 5.** Component of ordinary silica fume  
**表 5.** 普通硅灰组分

检测项目	质量分数(%)
SiO <sub>2</sub>	93.66
Cl <sup>-</sup>	0.10
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	2.98
Na <sub>2</sub> O	0.31
K <sub>2</sub> O	0.35
SO <sub>3</sub>	0.45
LOI	2.50

**Table 6.** Component of composite silica fume  
**表 6.** 复合硅灰组分

检测项目	质量分数(%)
SiO <sub>2</sub>	60.40

## Continued

CaO	17.81
TiO <sub>2</sub>	9.43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.61
MgO	4.03
Na <sub>2</sub> O	0.36
K <sub>2</sub> O	0.33

从表 5、表 6 可以看出,普通硅灰的主要成分为 SiO<sub>2</sub>,占比 93.66%,而复合硅灰中除 SiO<sub>2</sub> (占比 60.40%) 之外,还有 CaO (占比 17.81%), TiO<sub>2</sub> (占比 9.43%)以及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (占比 5.61%)等化合物。查阅相关文献可知, SiO<sub>2</sub> 能使水泥浆体更粘稠,从而增加水泥的粘附力,从而减小回弹率。但是 SiO<sub>2</sub> 微粉可以吸附在水泥水化颗粒表面形成一层致密的 C-S-H 化合物, 这层化合物一方面阻止了水泥的进一步水化,起到了相当于缓凝剂的作用,使得已喷射到围岩的混凝土不能快速成型。另一方面, C-S-H 化合物由于质地坚硬,当进行喷射混凝土施工时,可能与喷料中的骨料发生碰撞使得回弹率增加。

通过上述组分分析可知,当采用干喷法时,无论普通硅灰还是复合硅灰均没有与水充分反应,因此两者的回弹率差别不大。而采用湿喷法时,普通硅灰与水在罐车中拌合充分,因此有足够的条件产生 C-S-H 化合物,从而对回弹率造成不利的影响。

## 5. 结论

本文依托德昌至会理高速公路东山隧道段建设,通过对不同施工工艺、不同配合比方案的喷射混凝土回弹率试验结果以及成本分析结果进行比较,得出了如下结论:

1) 由于湿喷法所使用的喷料中,水和其他材料拌合充分,使得混凝土粘附力明显提升,因此能够显著降低喷射混凝土的回弹率,其降低幅度最大可达 22.1%,在有效节省混凝土等原材料用量的同时,提升了工效,避免了重复工作,并且降低了隧道内粉尘含量,保护了施工人员的身体健康。

2) SiO<sub>2</sub> 虽然能够增加混凝土的粘附力,但同样可以在水泥水化颗粒表面形成一层致密的 C-S-H 化合物,阻碍喷射混凝土的成型和附着,因此过量使用主要成分为 SiO<sub>2</sub> 的普通硅灰会导致回弹率增加。

3) 复合硅灰不仅可以替代部分水泥,从而节省成本。也可以显著增加喷射混凝土的粘附力,试验结果表明,当使用复合硅灰替代 10%的水泥时,干喷法施工的喷射混凝土回弹率可降低至 22.4%,湿喷法施工的回弹率则可降低至 3.2%。

## 参考文献

- [1] 赵爽,洪锦祥,乔敏,王伟,曾鲁平,赵斌. 早强型喷射混凝土在郑万高铁巫山隧道中的施工试验[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 377-381.
- [2] 程良奎. 岩土锚固·喷射混凝土: 原理、设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [3] 关宝树. 隧道及地下工程喷混凝土支护技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [4] 程高峰. 喷射混凝土支护降尘技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- [5] 戴晓栋,袁定辉,刘向阳,等. 降低机制砂湿喷混凝土回弹率技术研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊 2): 236.
- [6] 赵爽,王伟,乔敏,等. 高速隧道喷射混凝土高回弹率原因分析及解决措施[J]. 混凝土, 2019, 359(9): 145-147.
- [7] 刘长文. 公路隧道机制砂湿喷混凝土回弹率控制技术[J]. 市政技术, 2020, 38(6): 57-60.
- [8] 杨红伟. 高寒地区喷射混凝土配合比设计与应用[J]. 隧道建设, 2010(S1): 421-424.
- [9] 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.
- [10] 刘康. 低回弹喷射混凝土技术研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2015.