

早高强喷射混凝土制备技术研究

郑朝保¹, 李治庆², 姚 龙², 魏 潇², 龚子涵¹

(1. 中铁西南科学研究院有限公司, 成都 611731; 2. 中铁岩峰成都科技有限公司, 成都 611731)

摘 要: 从速凝剂种类、水胶比、环境温度及 n-C-S-H 掺量等多因素出发, 系统研究了不同因素对喷射混凝土早龄期 (8、24 h) 强度的影响, 通过微观分析, 提出了一套纳米水化硅酸钙早高强喷射混凝土的制备技术。结果表明: n-C-S-H 的掺入显著提高了喷射混凝土的早期强度, 2%~5% 掺量时 8 h 抗压强度快速增长, 而 24 h 抗压强度的增长随 n-C-S-H 掺量的增加表现出较为缓慢的趋势; 在 10 ℃ 以上环境时, 使用纳米水化硅酸钙早高强喷射混凝土技术, 能够明显提高水泥早期水化速率, 喷射混凝土 8 h 抗压强度能够达到 10 MPa 以上, 24 h 抗压强度能够达到 24 MPa 以上, 28 d 抗压强度、电通量和抗硫酸盐侵蚀耐久性性能指标略微提升。通过工程实例证明, 提出的纳米 C-S-H 早高强喷射混凝土制备技术, 可以满足隧道早高强喷射混凝土的施工要求, 显著缩短施工周期, 提高施工效率。研究成果可为相关工程提供参考。

关键词: 纳米水化硅酸钙; 喷射混凝土; 早高强; 抗压强度; 耐久性

中图分类号: TU528.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 03-0071-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.012

Research on the Preparation Technology of Early High Strength Shotcrete

ZHENG Chaobao¹, LI Zhiqing², YAO Long², WEI Xiao², GONG Zihan¹

(1. China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu 611731, China;

2. China Railway Yanfeng Chengdu Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: Starting from multiple factors such as the type of quick setting agent, water cement ratio, ambient temperature, and n-C-S-H dosage, the influence of different factors on the early age (8、24 h) strength of shotcrete was systematically studied. Through microscopic analysis, a set of preparation techniques for nano hydrated calcium silicate early high strength shotcrete was proposed. Research has shown that the addition of n-C-S-H significantly improves the early strength of shotcrete, with a rapid increase in 8-hour compressive strength at a dosage of 2%~5%, while the increase in 24 h compressive strength shows a slower trend with the increase of n-C-S-H dosage; When the temperature is above 10 ℃, the use of nano hydrated calcium silicate early high-strength shotcrete technology can significantly improve the early hydration rate of cement. The compressive strength of shotcrete can reach over 10 MPa after 8 h and over 24 MPa after 24 h, slightly improving the 28 d compressive strength, electrical flux and resistance to sulfate erosion durability performance indicators. Through engineering examples, it has been

项目来源: 成都市科技计划项目 (2022-XT00-00002-GX)。

作者简介: 郑朝保 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 喷射混凝土技术及材料研发。

通信作者: 李治庆 (1985—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 喷射混凝土技术。

收稿日期: 2025-04-16

材料科学

proven that the proposed nano C-S-H early high-strength shotcrete preparation technology can meet the construction requirements of tunnel early high-strength shotcrete, significantly shorten the construction period, and improve construction efficiency. The study can offer valuable references for relevant engineering applications.

Key words: nano-calcium silicate hydrate; shotcrete; early high strength; compressive strength; durability

0 引言

隧道软岩体强度低、岩体破碎,施工过程中稍有不慎则容易出现大变形问题,隧道支护措施应考虑地应力释放与支护平衡,使其既有足够阻力限制围岩塑性区发展,又有一定的可让性以适应围岩变形^[1]。这些地质问题对隧道的初期支护体系,特别是对喷射混凝土的早期强度性能需求更高。

目前主要研究材料有纳米 SiO_2 、纳米 TiO_2 、纳米 CaCO_3 、纳米 ZnO 、纳米 Al_2O_3 、稻壳灰等^[2-4]。刘健等^[5]研究纳米氮化硅对粉煤灰水泥早期强度的影响以及废弃粉煤灰的有效利用,结果表明单独添加纳米氮化硅能适当提高水泥试样的早期抗压强度,将纳米氮化硅与粉煤灰复配使用能表现出较好的协同作用;陈璐鑫等^[6]、卢海川等^[7]通过加入纳米材料,对传统油井水泥综合性能及作用机理进行了研究探讨,发现纳米材料在改善水泥浆流变的同时可显著缩短中低温下水泥浆的稠化时间,明显加快水泥石强度发展;学者 Kanchanason 等^[8]、Plank 等^[9]通过加入一系列纳米材料,发现其在混凝土中能够发挥微填充作用以及晶种作用,可使凝结时间大为缩短、早期强度大幅提高,还能提高耐久性、抗渗性和抗裂性,从而延长结构的使用寿命;唐芮枫等^[10]探究了不同用量 PCE 制备的纳米 C-S-H/PCE 晶核对水泥水化放热速率、流动性及早期强度的影响发现,纳米 C-S-H/PCE 晶核平均粒径随着 PCE 用量的增加逐渐降低,当 PCE 用量增加到 10.0% 时,纳米 C-S-H/PCE 晶核粒径和形貌变化不大;胡建伟^[11]通过在混凝土中外掺质量分数 1.0% 的纳米水化硅酸钙,研究 CRTS III 型轨道板混凝土的力学性能、耐久性能和微观形貌,结果表明混凝土 56 d 电通量、氯离子扩散系数分别降低 15.6%、15.8%,且水化产物更加致密,微裂缝明显减少;崔佳等^[12]采用标准养护、蒸汽养护和掺加纳米水化硅酸钙晶核早强剂 (n-C-S-H) 3 种方式制备 C60 混凝土,研

究了 n-C-S-H 对混凝土性能的影响,发现 10、20、30 °C 养护条件下掺 n-C-S-H 制备的混凝土 12 h 抗压强度较对比样分别提高了 185%、113%、34%,并且其收缩性能与抗渗性能较蒸养混凝土得到明显提高;朱云升等^[13]研究了采用纳米二氧化硅与纳米水化硅酸钙制备的复合调节剂对混凝土早期性能的影响,发现采用复合调节剂可提高水泥混凝土的工作性能、早期抗压强度与耐久性,降低干燥收缩率;张朝阳等^[14]、陈稳等^[15]研究了合成的纳米水化硅酸钙 (n-C-S-H) 对水泥水化过程、硬化水泥浆孔结构及混凝土强度的影响发现 n-C-S-H 显著加速了水泥早期水化,提升了水泥在 12~24 h 的水化程度,从而显著提高混凝土 12~24 h 的抗压强度,24 h 以后对强度提升效果逐渐减小。

综上,多数研究仅仅集中在传统模筑混凝土的性能,针对喷射混凝土中的应用研究却很少。研究在确定使用纳米 C-S-H 作为早强剂的条件下,通过不同的影响因素,测试喷射混凝土 8、24 h 早期强度的变化,明确不同因素影响规律及不同工况环境下纳米 C-S-H 早强剂用法用量,从而形成纳米 C-S-H 早高强喷射混凝土制备方法,并开展喷射验证试验和耐久性能检测,可为后续隧道喷射混凝土支护施工和配合比设计提供参考依据。

1 试验

1.1 原材料

水泥: P·O 42.5R 水泥,其化学成分见表 1,主要性能指标见表 2。细骨料:成都本地机制砂,细度模数 2.9,石粉含量 5%。粗骨料:成都本地 5~10 mm 碎石。减水剂:聚羧酸高效减水剂,主要性能指标见表 3。早强剂:纳米 C-S-H 早强剂,主要性能参数见表 4。速凝剂 1:氟硅酸无碱速凝剂;速凝剂 2:冰晶石无碱速凝剂;速凝剂 3:铁标无碱速凝剂;速凝剂 4:氢氟酸无碱速凝剂;速凝剂 5:无氟国标无碱速凝剂。速凝剂主要性能参数见表 5。

表 1 水泥化学成分

Table 1 Chemical composition of cement /%

SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O
23.6	7.5	64.6	2.5	1.8	0.1

表 2 水泥性能指标

Table 2 Property index of cement

凝结时间/min		抗压强度/MPa		标准稠度	安定性	比表面积
初凝	终凝	3 d	28 d	/%		/ (m ² /kg)
170	259	26.1	46.8	26.9	合格	320

表 3 减水剂性能指标

Table 3 Property index of water reducing agen

减水率/%	固含量/%	密度/ (g/cm ³)	pH	抗压强度比/%		坍落度 1 小时 变化量/mm	氯离子含量 /%	总碱量 /%
				7 d	28 d			
32%	19.6	1.063	6.20	153	145	25	0.02	0.77

表 4 早强剂性能指标

Table 4 Property index of early strength agent

固含量/%	密度/ (g/cm ³)	pH 值	氯离子含量/%	Na ₂ SO ₄ 含量/%
21.57	1.152	11.54	0.015	2.8

表 5 不同速凝剂性能指标

Table 5 Property index of concrete accelerator

类型	固含量/%	密度/ (g/cm ³)	掺量/%	凝结时间/s		1 d 胶砂强度 /MPa	氟含量 /%	氯离子含量 /%	碱含量 /%
				初凝	终凝				
速凝剂 1	49.6	1.485	7	80	285	7.1	4.75	0.017	0.47
速凝剂 2	50.4	1.491	7	65	210	8.9	6.52	0.012	2.26
速凝剂 3	58.4	1.498	8	205	260	13.2	0.00	0.008	0.08
速凝剂 4	48.9	1.456	7	55	160	5.5	5.72	0.018	0.34
速凝剂 5	51.4	1.492	7	160	200	10.8	0.00	0.011	0.16

1.2 试验方案

通过对比试验设计，评估不同影响因素对 8、24 h 抗压强度的影响。选取多种速凝剂、水胶比、隧道环境温度及纳米水化硅酸钙（n-C-S-H）的掺量作为主要变量对喷射混凝土性能进行测试。具体试验方案见表 6。

表 6 具体试验方案

Table 6 Specific experimental plan

影响因素	试验方案
速凝剂因素	选取氢氟酸系列、氟硅酸系列、冰晶石系列、无氟无碱国标、无氟无碱铁五种速凝剂分别加入固定水胶比在喷射混凝土中，进行 8 h、24 h、28 d 抗压强度检测。
水胶比和掺量因素	选取 6 种水胶比（0.34、0.36、0.38、0.40、0.42、0.44）、9 种 n-C-S-H 掺量（不掺和、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%）条件下，加入同掺量的速凝剂成型试件，进行 8h、24 h 抗压强度检测。
温度因素	选取相同配合比、不同 n-C-S-H 掺量，加入速凝剂放在 4 种不同温度条件下（10、15、20、25℃）进行试件养护，到龄期后取出进行 8、24 h 抗压强度检测。

1.3 试验方法

将水泥、砂、石、水、减水剂和早强剂一次性倒入搅拌机中搅拌 2 min，坍落度控制 180~220 mm，再将速凝剂倒入搅拌机中搅拌 15~20 s 后，成型尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的试件，按规定试验条

件养护至规定龄期，最后按照 GB/T50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行试件抗压强度测试。

2 结果与分析

2.1 速凝剂对纳米 C-S-H 喷射混凝土早期抗压强度的影响

采用 0.38 水胶比，52% 砂率、474 kg/m³ 水泥用量、5% 纳米 C-S-H 掺量、0.6% 减水剂掺量的配合比喷射混凝土，然后分别加入 8% 掺量的铁标、国标、氢氟酸、氟硅酸、冰晶石五种速凝剂成型，检测其 8 h、24 h、28 d 抗压强度。

由图 1 可知，在 8 h 时，采用铁标速凝剂和无氟无碱国标速凝剂的喷射混凝土，其抗压强度均超过 10 MPa，满足工程对超早龄期性能的高要求。而在 24 h，二者的抗压强度均达到 20 MPa 以上，其中铁标速凝剂稍高于无氟无碱国标速凝剂，但两者强度差异较小，基本接近。相比之下，氢氟酸、氟硅酸和冰晶石三种无碱速凝剂由于含有氟离子（F⁻），对水泥的水化反应产生了不利影响。氟离子的存在会抑制水泥中的硅酸三钙（C₃S）和硅酸二钙（C₂S）

材料科学

的水化速率，延缓水泥胶体的生成，导致喷射混凝土的硬化过程显著减缓。但从长期性能来看，28 d 抗压强度的测试结果显示，除了冰晶石速凝剂的混凝土强度略低外，其他速凝剂的强度基本接近。

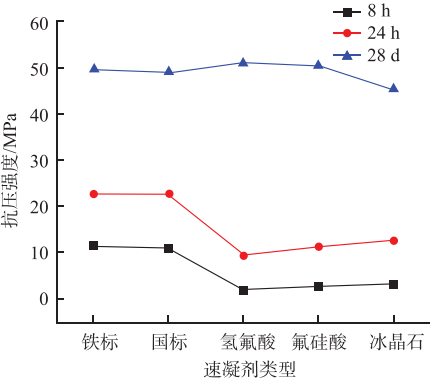


图1 不同类型速凝剂的纳米 C-S-H 喷射混凝土抗压强度
Fig.1 Compressive strength of nano C-S-H sprayed concrete with different types of accelerators

2.2 水胶比及纳米 C-S-H 早强剂掺量对喷射混凝土早期抗压强度的影响

试验设计了六种不同水胶比 (0.34、0.36、0.38、0.40、0.42、0.44)，并结合不同的纳米 C-S-H 掺量 (不掺和、1%、2%、3%、4%、5%、6%、7%、8%) 进行对比研究，揭示水胶比与纳米水化硅酸钙 (n-C-S-H) 掺量对混凝土强度的综合影响规律。试验配合比及抗压强度结果分别汇总于表 7 和图 2、图 3 中。

由图 2 可知，随着纳米 C-S-H 掺量的提高、水胶比的降低，喷射混凝土 8 h 抗压强度快速增加。其中掺量由不掺和提升至 2% 时，8 h 强度开始显著增长，但所有水胶比均未达到 10 MPa。掺量在 2% ~ 5% 时，8 h 强度的增速达到峰值，这是因为纳米 C-S-H 在该范围内不仅显著促进了 C-S-H 凝胶的生成，还增强了基体的早期硬化能力，水泥水化反应速率被显著加快。3% 掺量时，水灰比 0.34 达到 10 MPa 以上；4% 掺量时，水灰比 0.34、0.36 达到 10 MPa 以上；5% 掺量时，水灰比 0.34、0.36、0.38、0.40 达到 10 MPa 以上。掺量超过 5% 后，虽然 8 h 强度仍有小幅增长，但增速明显减缓。可能是过高的掺量导致纳米颗粒在基体中出现团聚现象，影响其分散性和活性。

由图 3 可知，随着掺量的提高、水胶比的降低，喷射混凝土 24 h 抗压强度增加。水灰比 0.40、0.38、

表 7 不同水胶比及掺量的纳米 C-S-H 喷射混凝土配合比
Table 7 Mix proportions of nano C-S-H sprayed concrete with different water cement ratios and dosages

编号	水胶比	纳米 C-S-H 掺量/%	铁标速凝剂量/%	编号	水胶比	纳米 C-S-H 掺量/%	铁标速凝剂量/%
A1	0.34		8	A28	0.40		8
A2	0.34	1	8	A29	0.40	1	8
A3	0.34	2	8	A30	0.40	2	8
A4	0.34	3	8	A31	0.40	3	8
A5	0.34	4	8	A32	0.40	4	8
A6	0.34	5	8	A33	0.40	5	8
A7	0.34	6	8	A34	0.40	6	8
A8	0.34	7	8	A35	0.40	7	8
A9	0.34	8	8	A36	0.40	8	8
A10	0.36		8	A37	0.42		8
A11	0.36	1	8	A38	0.42	1	8
A12	0.36	2	8	A39	0.42	2	8
A13	0.36	3	8	A40	0.42	3	8
A14	0.36	4	8	A41	0.42	4	8
A15	0.36	5	8	A42	0.42	5	8
A16	0.36	6	8	A43	0.42	6	8
A17	0.36	7	8	A44	0.42	7	8
A18	0.36	8	8	A45	0.42	8	8
A19	0.38		8	A46	0.44		8
A20	0.38	1	8	A47	0.44	1	8
A21	0.38	2	8	A48	0.44	2	8
A22	0.38	3	8	A49	0.44	3	8
A23	0.38	4	8	A50	0.44	4	8
A24	0.38	5	8	A51	0.44	5	8
A25	0.38	6	8	A52	0.44	6	8
A26	0.38	7	8	A53	0.44	7	8
A27	0.38	8	8	A54	0.44	8	8

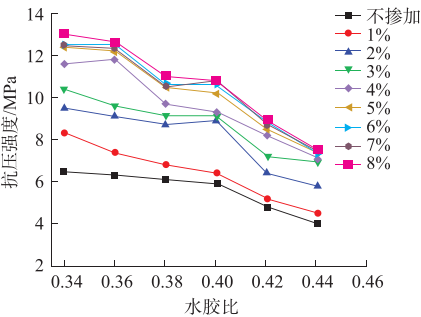


图 2 不同水胶比及掺量的纳米 C-S-H 喷射混凝土 8 h 抗压强度
Fig.2 8 h compressive strength of nano-C-S-H shotcrete with different water-glue ratios and dosages

0.36、0.34 在各个纳米 C-S-H 掺量条件下均达到 20 MPa 以上，水灰比 0.42、0.44 在 4% ~ 8% 纳米 C-S-H 掺量条件下均达到 20 MPa 以上。低水胶比条件下 (不大于 0.40)，24 h 抗压强度随纳米 C-S-H 掺量增加而增长缓慢，主要因为在低水胶比条件下，

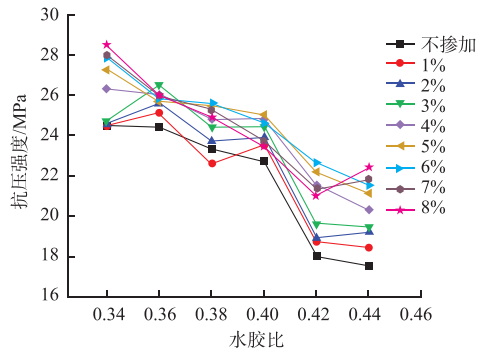


图3 不同水胶比及掺量的纳米 C-S-H 喷射混凝土 24 h 抗压强度
Fig. 3 24 h compressive strength of nano C-S-H shotcrete with different water-glue ratios and dosage

24 h 时喷射混凝土自身水化产物 (C-S-H) 已经足够多, 新外掺加入纳米 C-S-H 增强作用减弱。随着水胶比增大, 会显著削弱骨料与胶凝材料之间的界面黏结力, 增加喷射混凝土内部孔隙并降低水化产物数量和质量, 从而导致喷射混凝土整体强度的下降。

为进一步研究纳米水化硅酸钙 (n-C-S-H) 掺量对水泥浆体强度的影响, 按 GB/T 35159 《喷射混凝土用速凝剂》胶砂强度试验方法, 外掺不同纳米水化硅酸钙 (n-C-S-H) 掺量, 检测胶砂 8、24 h 抗压强度比, 结果如图 4 所示。

随着纳米 C-S-H 掺量增加, 速凝剂胶砂试件 8 h 抗压强度快速增长, 特别是 2%~5% 期间增长最迅速, 5% 掺量抗压强度比达到 200% 以上, 超过 5% 掺量后强度增长速度明显放缓。而 24 h 抗压强度增长缓慢, 8% 时达到最高值, 抗压强度比达到 117%。

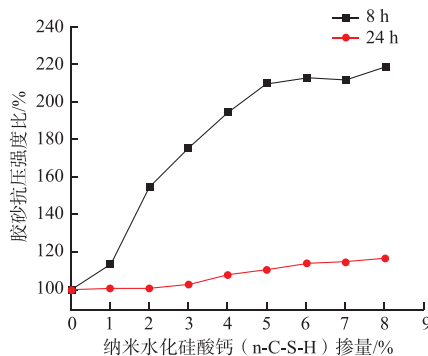


图4 不同掺量的纳米 C-S-H 速凝剂胶砂 8、24 h 抗压强度比
Fig. 4 Ratio of compressive strength of nano C-S-H accelerator sand with different dosages at 8 h and 24 h

2.3 温度对纳米 C-S-H 喷射混凝土早期抗压强度影响
试验分别在 10.0、15.0、20.0、25.0 °C 四种温

度条件下进行试件养护, 试验配合比见表 8。

表 8 不同温度的纳米 C-S-H 喷射混凝土配合比
Table 8 Mix proportions of nano C-S-H sprayed concrete at different temperatures

编号	水胶比	砂率 /%	试验温度 / °C	水泥 / (kg/m ³)	纳米水化硅酸钙掺量 / %	减水剂掺量 / %	速凝剂掺量 / %
T1	0.36	52	10.0	500	5	0.8	8
T2	0.36	52	15.0	500	5	0.8	8
T3	0.36	52	20.0	500	5	0.8	8
T4	0.36	52	25.0	500	5	0.8	8
T5	0.38	52	10.0	474	5	0.6	8
T6	0.38	52	15.0	474	5	0.6	8
T7	0.38	52	20.0	474	5	0.6	8
T8	0.38	52	25.0	474	5	0.6	8
T9	0.40	52	10.0	474	5	0.4	8
T10	0.40	52	15.0	474	5	0.4	8
T11	0.40	52	20.0	474	5	0.4	8
T12	0.40	52	25.0	474	5	0.4	8

由图 5 中可知, 在 5% 掺量、0.36、0.38、0.4 三种水胶比条件下, 10 °C 时, 喷射混凝土 8 h 抗压强度均达不到 10 MPa, 24 h 抗压强度最高为水胶比是 0.36 时的 19.8 MPa, 略低于 20 MPa。在 15 °C 时, 喷射混凝土 8 h 抗压强度只有在水胶比是 0.36 时达到 10 MPa 以上, 24 h 抗压强度均达到 20 MPa 以上。在 20 °C 和 25 °C 时, 三种水胶比的喷射混凝土 8 h 抗压强度均达到 10 MPa 以上, 24 h 抗压强度均满足 20 MPa 以上。由此可知, 喷射混凝土的早龄期强度 (8、24 h) 受环境温度的影响变化显著, 温度对水泥水化速率和水化产物形成过程的重要作用, 温度

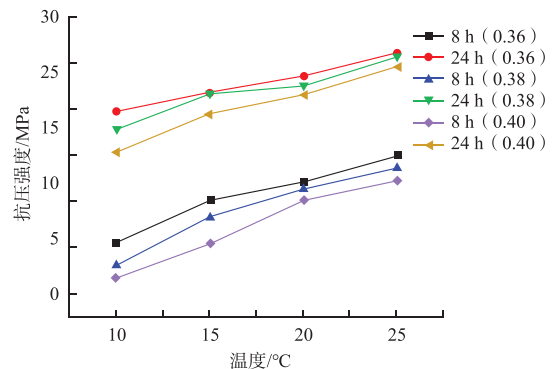


图5 不同温度的纳米 C-S-H 喷射混凝土抗压强度
Fig. 5 Compressive strength of nano C-S-H sprayed concrete at different temperatures

材料科学

越高,水泥的水化反应较为充分,纳米 C-S-H 的早期活性也得到最大程度发挥。随着温度降低,水泥水化反应受到抑制,早期强度几乎无法提高。从水胶比和掺量分析,喷射混凝土抗压强度要达到 8 h 不低于 10 MPa, 24 h 不低于 20 MPa, 10~15 ℃ 条件下,水胶比应不大于 0.36, n-C-S-H 掺量应不低于 5%; 15~20 ℃ 条件下,水胶比应不大于 0.38, n-C-S-H 掺量 5% 左右; 大于 20 ℃ 时,水胶比应不大于 0.40, n-C-S-H 掺量应低于 5%。

2.4 纳米水化硅酸钙喷射混凝土早期孔隙结构

由图 6 可知,在加入纳米水化硅酸钙后,8 h 的喷射混凝土内部已经生成了大量水化产物,这些水化产物在微观尺度上有效填充了混凝土内部的孔隙结构,显著提升了材料的密实性。纳米水化硅酸钙的成核效应尤为显著,它不仅加速了水泥颗粒的水化反应,还为 C-S-H 凝胶的生成提供了更多的成核位置,使得新形成的 C-S-H 凝胶呈现出更加均匀和致密的分布特点,同时 C-S-H 凝胶进一步包裹并固定了 Aft 晶体(针状硫铝酸钙),进而增强了喷射混凝土的早期强度。

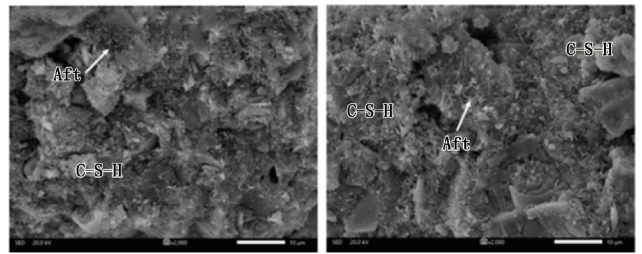


图 6 纳米水化硅酸钙喷射混凝土 8 h SEM 图
Fig. 6 SEM microstructure of nano hydrated calcium silicate sprayed concrete at 8-hour age

2.5 纳米水化硅酸钙早高强喷射混凝土制备技术

通过试验研究与综合分析,可以优化各因素的组合,形成最佳制备技术方案,确保喷射混凝土在施工中的性能稳定性和高效性,速凝剂采用无氟无碱速凝剂,具体见表 9。

表 9 早高强喷射混凝土制备技术方案
Table 9 Technical scheme for preparation of early high strength shocked concrete

温度环境/℃	水胶比	纳米 C-S-H 掺量/%
10~15	≤0.36	5~8
15~20	≤0.38	4~6
>20	≤0.40	2~4

3 验证与应用

3.1 验证方法

使用湿喷机进行纳米 C-S-H 早高强喷射混凝土试验观测喷射性能,喷射大板切割检测喷射混凝土力学(8、24 h 及 7、28 d 抗压强度)和耐久性能(体积稳定性、电通量、抗硫酸盐)指标。混凝土使用无碱无氟国标速凝剂,坍落度控制为 180~220 mm,具体试验配合比见表 10。

表 10 试验配合比
Table 10 Experimental mix proportion

编号	水胶比	胶材用量 / (kg/m ³)	纳米 C-S-H 掺量/%
P0	0.35	528	
P1	0.35	528	5
P2	0.38	487	5
P3	0.41	452	5

3.2 验证过程

按照表 11 配合比称取水泥、砂、石、早强剂、减水剂、水,一次性倒入搅拌机中搅拌,喷射混凝土坍落度控制 180~220 mm。将混凝土用湿喷机喷射,进行喷射大板取样,通过大板切割试件,检测喷射混凝土抗压强度、体积稳定性、电通量、抗硫酸盐侵蚀能力,试验环境温度为 28 ℃。

3.3 验证结果与分析

由表 11 可知,在 28 ℃ 环境温度下,掺入 5% 纳米 C-S-H 的喷射混凝土表现出优异的早龄期强度增长特性。在 0.35、0.38、0.41 三种水胶比(W/C)条件下,喷射混凝土的 8、24 h 的抗压强度均显著提高,并完全满足工程对 8、24 h 龄期强度的要求。同时,与未掺纳米 C-S-H 的空白组相比,掺加纳米 C-S-H 不仅提升了早龄期强度,而且对后期强度没有任何不良影响。耐久性方面,同配比条件下掺纳米 C-S-H 的 P1 与未使用纳米 C-S-H 的 P0 相比,P1 在体积稳定性、电通量、抗硫酸盐侵蚀能力均略有提升,其中 56 d 电通量小于 1 500 C,与 P0 比较,降低了 5%。

3.4 工程应用

为验证提出的早高强喷射混凝土制备方法在实际工程中的应用效果,分别选取两段铁路隧道进行早高强喷射混凝土现场试验,测试早高强喷射混凝土喷射性能及力学性能。

表 11 喷射试验数据
Table 11 Spray test data

配合比	可喷性能	不同龄期抗压强度/MPa					体积收缩率/%				56 d 电通量/C
		8 h	24 h	3 d	7 d	28 d	24 h	3 d	7 d	28 d	
P0	良好	4.5	25.8	31.5	43.1	62.2	0.014	0.012	0.013	0.013	155 5
P1	良好	17.5	32.5	31	42.6	62.6	0.011	0.012	0.012	0.012	142 6
P2	良好	15.4	26.5	33.3	42	60.1	0.012	0.011	0.012	0.012	149 8
P3	良好	11.2	20.2	24.2	38.4	50.8	0.010	0.011	0.012	0.013	164 1

续表 11 喷射试验数据
Continued Table 11 Spray test data

配合比	侵蚀组			对比组			抗压强度耐蚀系数/(K1%)			结论
	30 次循环	60 次循环	90 次循环	60 d	90 d	120 d	30 次循环	60 次循环	90 次循环	
P0	61.8	57.9	54.2	62.1	61.8	60.6	100%	94%	89%	达到 KS90
P1	61.5	58.1	54.5	61.4	65.1	61.2	100%	92%	89%	达到 KS90
P2	62.4	56.9	52.5	59.4	60.7	50.1	105%	94%	90%	达到 KS90
P3	50.8	49.8	45.5	50.7	50.7	49.9	100%	97%	91%	达到 KS90

3.4.1 案例 1

2023 年 12 月，在某高原隧道开展早高强喷射混凝土现场试验，验证高原高寒地区早高强喷射混凝土性能。试验环境温度为 2℃，拌合物出机温度为 9℃，隧道内温度为 15~18℃。现场喷射大板，隧道同条件养护至 6 h 时取出切割加工成 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件检测 8、24 h 及 7、28 d 抗压强度，试验数据见表 12。

在高原低温环境下，早高强喷射混凝土方法可以实现喷射混凝土 8 h 抗压强度≥10 MPa，24 h 抗压强度≥20 MPa 满足隧道早高强喷射混凝土设计需要。

表 12 早高强喷射混凝土配合比及抗压强度数据
Table 12 Mix proportion and compressive strength data of early high-strength shotcrete

水胶比	胶材用量/(kg/m ³)	纳米 C-S-H 掺量/%	速凝剂	不同龄期抗压强度/MPa			
				8 h	24 h	7 d	28 d
0.36	514	5	无氟无碱国标	11.3	20.4	35.1	44.2

备注：1 d 强度试件为 7 h 一起加工试件。

3.4.2 案例 2

2023 年 6 月，在四川某高铁隧道开展早高强喷射混凝土现场试验。在喷射施工过程中，环境温度为 32℃，拌合物出机温度 30℃，喷射混凝土出机坍落度控制 230 mm。现场喷射大板、隧道同条件养护至 6 h 时取出切割加工成 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件检测 8、24 h 及 28 d 抗压强度，试验数据见表 13。在 30℃左右环境下，早高强喷射混凝土方

法，3%纳米 C-S-H 掺量可以实现喷射混凝土 8 h 抗压强度≥10 MPa，24 h 抗压强度≥20 MPa，满足隧道早高强喷射混凝土设计要求。

表 13 早高强喷射混凝土配合比及抗压强度数据
Table 13 Mix proportion and compressive strength data of early high-strength shotcrete

水胶比	胶材用量/(kg/m ³)	纳米 C-S-H 掺量/%	速凝剂	不同龄期抗压强度/MPa		
				8 h	24 h	28 d
0.34	500	3	无氟无碱国标	11.5	26.7	39.1

4 结论

通过加入纳米 C-S-H 对早高强喷射混凝土的制备技术及性能指标的研究分析，得出如下结论：

(1) 研究了速凝剂、水胶比、温度及 n-C-S-H 掺量对喷射混凝土早期强度的影响。结果表明，纳米 C-S-H 掺量为 2%~5% 时，8 h 抗压强度增长明显；不同温度条件下，通过优化水胶比与 n-C-S-H 掺量，可实现喷射混凝土 8 h 抗压强度≥10 MPa、24 h 抗压强度≥20 MPa，并形成了适用于不同工况的 n-C-S-H 早高强喷射混凝土制备技术。

(2) 与未掺加组比较，n-C-S-H 的掺入可在一定程度上提高喷射混凝土 28 d 抗压强度、体积稳定性及耐久性能，电通量和抗硫酸盐侵蚀能力。

(3) 工程应用结果表明，该技术能够满足隧道施工对早高强喷射混凝土的性能要求，可有效缩短

材料科学

施工周期,提高施工效率,具有良好的工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 王小林,黄彦波. 中外高地应力软岩隧道大变形工程技术措施对比分析——以兰渝铁路木寨岭隧道与瑞士圣哥达基线隧道为例[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(10): 1621-1629.
- [2] 王冲,刘俊超,张超,等. 纳米 CaCO_3 对水泥基材料性能与结构的影响及机理[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(6): 22-28.
- [3] LIU J, JIN H, GU C, et al. Effects of zinc oxide nanoparticles on early-age hydration and the mechanical properties of cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2019, 217(30): 352-362.
- [4] 欧阳东. 纳米 SiO_2 低温稻壳灰用于混凝土的研究[J]. 新型建筑材料, 2003(8): 7-9.
- [5] 刘健,唐田甜,卢婷,等. 纳米氮化硅激活粉煤灰对矿用水泥封孔材料早强性能的影响[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(5): 1752-1757.
- [6] 陈璐鑫,卓绿燕,Alain Pierre Tchameni,等. 温敏聚合物/纳米 SiO_2 复合材料的制备与性能评价[J]. 油田化学, 2023, 40(1): 12-18.
- [7] 卢海川,朱海金,王健栋,等. 新型油井水泥用纳米基促凝早强剂[J]. 钻井液与完井液, 2024, 41(1): 119-124.
- [8] KANCHANASON V, PLANK J. Role of pH on the structure, composite and morphology of CSH - PCE nanocomposites and their effect on early strength development of Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 102(12): 90-98.
- [9] PLANK J, ECHT T. C-S-H-PCE nanofoils: A new generation of accelerators for oil well cement[C] //International Conference on Oilfield Chemistry. Texas, USA, 2019.
- [10] 唐芮枫,崔素萍,杨飞华,等. 合成过程中聚羧酸共聚物用量对纳米 C-S-H 晶核成核及其早强作用的影响[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(9): 3128-3136, 3202.
- [11] 胡建伟. 基于外掺纳米水化硅酸钙的免蒸养 CRTS III 型轨道板混凝土性能研究[J]. 铁道建筑, 2024, 64(3): 141-144.
- [12] 崔佳,倪陈新,张旭生,等. 纳米水化硅酸钙对 C60 盾构管片混凝土性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(10): 22-26, 48.
- [13] 朱云升,肖钰臻,刁锡刚,等. 纳米 SiO_2 -CSH 复合调节剂对水泥混凝土性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(11): 57-62.
- [14] 张朝阳,蔡熠,孔祥明,等. 纳米 C-S-H 对水泥水化、硬化浆体孔结构及混凝土强度的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(5): 585-593.
- [15] 陈稳,张心源,倪陈新,等. 纳米水化硅酸钙对水泥早期水化及强度的影响[J]. 混凝土, 2024(12): 103-107, 114.

网址: www.fmhzhly.com