第 48 卷第 5 期
2020 年 5 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 5
May，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190716

速凝剂种类对钢纤维喷射混凝土力学及界面性能影响

曾鲁平[1]，乔 敏[1]，王 伟[1]，赵 爽[1]，张小磊[1]，冉千平[2]，洪锦祥[1]

(1. 高性能土木工程材料国家重点实验室，江苏苏博特新材料股份有限公司，南京 211103；
2. 东南大学材料科学与工程学院，南京 211189)

摘 要：采用三分点加载法系统地评价了液体速凝剂种类对喷射大板成型钢纤维混凝土的力学强度与弯曲韧性行为的影响，设计同配比钢纤维砂浆体系，从早期力学强度发展与钢纤维-水泥基体微观界面方面探究了液体速凝剂种类对钢纤维增韧作用的影响机理，结果表明：相对于有碱速凝剂，无碱速凝剂的掺入对混凝土基体后期强度影响较小，有利于发挥钢纤维的增韧抗弯作用，体系荷载-挠度曲线更为饱满；从早期力学强度发展角度，无碱速凝剂通过促进短柱状钙矾石与纤维针状 C-S-H 凝胶的早期水化环境形成，有效地改善了水泥基体与钢纤维的界面粘结效果，有利于提高钢纤维喷射混凝土的早期初期支护能力。

关键词：钢纤维喷射混凝土；液体速凝剂；荷载−挠度；粘结界面区
中图分类号：TU528.53　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)05–0659–06
网络出版时间：2020–03–06



Mechanical and Interface Properties of Steel Fiber Reinforced Shotcrete Containing Different Setting Accelerators

ZENG Luping[1], *QIAO Min*[1], *WANG Wei*[1], *ZHAO Shuang*[1], *ZHANG Xiaolei*[1], *RAN Qianping*[2], *HONG Jinxiang*[1]

(1. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Jiangsu Sobute New Materials Co., Ltd., Nanjing 211103, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The mechanical properties and flexural toughness behaviors of steel fiber reinforced shotcrete containing different liquid setting accerlerators were evaluated by a three-pointing loading method. To clarify the working mechanism of liquid setting accelerators on the toughness properties of steel fiber, the early-age strength development and steel fiber-cement matrix interface area micromorphology of steel fiber reinforced mortar with the similar material composition were investigated. The results show that the long-term mechanical strength of steel fiber reinforced shotcrete with alkali-free accelerator is greater than that with alkaline setting accelerator, thus leading to a full loading-deflection curve and better toughness enhancement effect of steel fiber. For the early-age strength development, short prismatic ettringite and needle-like C-S-H gel appear after introducing alkali-free setting accelerator, thus inducing the better bonding strength between steel fiber and cement matrix and improving the initial support capacity of steel fiber reinforced shotcrete.

Keywords: steel reinforced shotcrete; liquid setting accelerator; load-deflection; bonding interface area

与素喷射混凝土相比，钢纤维喷射混凝土(SFRS)通过掺入均匀乱向分布的钢纤维明显改善了混凝土的脆性材料本质，使得初支结构的抗冲击剪切、耐磨性及抗侵蚀耐久性能有明显改善[1]，在一定围岩条件及地下水系良好的情况下，钢纤维喷射混凝土可用于取消防水板设计的单层初期衬砌结构

收稿日期：2019–10–30。　修订日期：2019–11–26。
基金项目：国家重点研发计划(2017YFB0310100)；中国铁路总公司科技研究开发计划课题(AF1018G030)；江苏省第十五批六大人才高峰项目(JZ-058)；江苏省 333 高层次人才培养工程科研项目(BRA2018202)资助。
第一作者：曾鲁平(1993—)，男，硕士，助理工程师。
通信作者：乔 敏(1984—)，男，博士，高级工程师。

Received date: 2019–10–30.　**Revised date:** 2019–11–26.
First author: ZENG Luping (1993–), male, Master, Assistant Engineer.
E-mail: zengluping@cnjsjk.cn
Correspondent author: QIAO Min (1984–), male, Ph.D., Senior Engineer.
E-mail: qiaomin@cnjsjk.cn

中，进一步降低衬砌结构的荷载受力及提高施工效率[2–3]，此外，还减少了素喷射混凝土与钢筋锚杆、钢筋网接触面的密实度不足，降低了结构的渗水风险[4]。

与聚乙烯醇或聚丙烯有机合成纤维材料相比，掺钢纤维喷射混凝土的弯曲应力吸收能力更高，能显著提高早龄期混凝土的抗冲击能力并抑制胶凝材料内部微裂缝生长[5–6]。另一方面，与钢纤维相比，液体速凝剂作为喷射混凝土的重要组成材料，同样具有显著降低喷射施工过程的喷射层滑落、提高一次喷射层厚度等优点。此外，还能显著加快喷射砼早期凝结硬化速率[7]。但市面上液体速凝剂种类繁多，而目前液体速凝剂对钢纤维作用效果影响尚未明晰，且少有钢纤维与掺速凝剂水泥基体界面行为的研究成果。本工作拟从液体速凝剂种类角度，探究液体速凝剂对钢纤维喷射混凝土力学强度与韧性行为的影响，采用扫描电镜及设计同配比钢纤维砂浆，探明液体速凝剂作用下的钢纤维喷射混凝土早期力学强度以及钢纤维-水泥基体早期界面行为的差异性，以期推进钢纤维喷射混凝土在地下支护工程及抢修工程中的应用。

1 实验

1.1 原料

钢纤维为端钩形钢纤维，长径比 50，抗拉强度 1 126 MPa。水泥为海螺牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，粗集料为 5~10 mm 单粒级配石灰岩质碎石，细集料为 2 区中型河砂，细度模数 2.7，含泥量 0.5%。减水剂为 PCA®-Ⅰ系列聚羧酸高性能减水剂，固体含量 26.54%，减水率 27%。液体速凝剂分为液体有碱型与液体无碱型，主要成分分别为 $NaAl(OH)_4$ 与 $Al_2(SO_4)_3$，记做 N1 与 N2，参照标准 GB/T 35159—2017[8]测试其基本物理性能见表 1。

1.2 试件制备

钢纤维喷射混凝土试件：根据液体速凝剂种类不同，所设计钢纤维喷射混凝土配合比见表 2。成型方法采用喷射大板切割成型，具体参照 GB/T 50086—2015 附录 L 方法执行[9]。

表 1 液体速凝剂的基本物理性能

Table 1 Basic physical properties of liquid setting accerlerators

Type	pH value	Solid content/%	Setting time		Compressive strength/MPa			28-d compressive strength ratio/%	90-d strength retention ratio/%
			Initial	Final	1 d	28 d	90 d		
0			219 min 00 s	267 min 00 s	8.3	44.5	48.9	100.0	109.9
N1	13.5	49.8	1 min 50 s	4 min 20 s	11.7	37.8	39.0	84.9	87.6
N2	2.7	50.5	1 min 35 s	3 min 15 s	13.2	45.2	49.5	101.6	111.2

Note: Dosage of N1 (alkaline) and N2 (alkaline free) are 6% and 8% according to the mass of cement.

表 2 钢纤维喷射混凝土配合比

Table 2 Mix Proportion of Steel Fiber Reinforced Shotcrete

Sample No.	Volume dosage of steel fiber/%	Liquid setting accelerator		Mix proportion/(kg·m^{-3})				
		Type	Dosage/%	Cement	Water	Coarse aggregate	Fine aggregate	Superplasticizer
GN0	0.8	0	0	480	192	809	809	4.8
GN1	0.8	N1	6	480	192	809	809	4.8
GN2	0.8	N2	8	480	192	809	809	4.8

钢纤维砂浆试件：取同表 2 的无碎石配比制备尺寸 40 mm×40 mm×160 mm 的钢纤维砂浆，测试硬化 72 h 内试件的抗折与抗压强度，以探究在液体速凝剂作用下，钢纤维掺入对水泥基体早期力学强度的提升效果。

扫描电镜样品：取硬化 24 h 后表面平整的钢纤维砂浆试件并用无水乙醇终止水化 3 d 后在 45 ℃真空干燥 3~5 d，在扫描电子显微镜下观察钢纤维与水泥基体的界面粘结区。

1.3 方法

混凝土力学性能按照标准 GB/T 50081—2002 方法执行，测试硬化 1，7，14，28，90 d 龄期下的劈裂抗拉强度、抗压强度以及抗折强度[10]。采用三分点加载法测试钢纤维喷射混凝土荷载-挠度曲线以表征其弯曲韧性及初裂强度，具体方法参照标准 JGJ/T 221—2010 附录 C[11]执行，所用设备为 WAW-600C 型微机控制电液伺服万能试验机，位移加载速率为 0.10 mm/min。

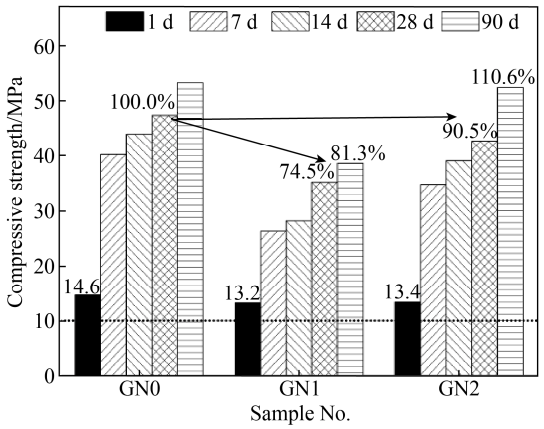
2 结果与讨论

2.1 力学性能

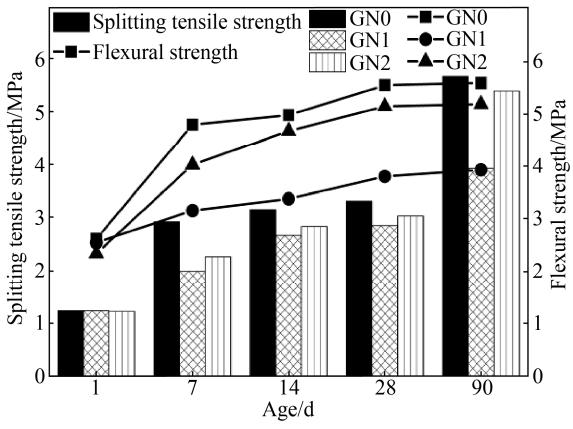
纤维的增韧及其对微裂缝的约束作用使得脆性

混凝土材料转变为延展性较好的复合材料，而液体速凝剂的早期速凝作用及其对后期强度影响程度不同会对混凝土基体强度产生影响[12]，从而造成钢纤维喷射混凝土整体力学性能存在差异性。

图 1 给出了液体速凝剂种类作用下钢纤维喷射混凝土抗压强度、劈裂抗拉及抗折强度结果。掺入 0.8%体积掺量钢纤维后喷射混凝土 1 d 抗压强度在 10.0 MPa 以上，28 d 劈裂抗拉强度及抗折分别达到 3.0 MPa 与 4.5 MPa 以上，抗弯曲性能有明显提高[1]。混凝土后期抗压强度受液体速凝剂种类影响明显，其中无碱速凝剂与钢纤维的适应性较好，对比空白组，混凝土 28 d 抗压强度比＞90%，90 d 强度保留率＞110%。而掺入有碱速凝剂后钢纤维喷射混凝土的劈裂抗拉及抗折强度同样下降明显，这可能与有碱速凝剂在水化后期形成的疏松大孔硬化体结构有关[13]，造成混凝土基体后期强度明显下降，进一步削弱了钢纤维喷射混凝土的整体力学性能。



(a)



(b)

图 1　掺液体速凝剂的钢纤维喷射混凝土力学性能

Fig. 1　Mechanical properties of steel fiber reinforced shotcrete containing liquid setting accelerators

2.2　弯曲韧性行为

参照 JGJ/T 221—2010 及 ASTM C-1018[11, 14]标准试验方法探究液体速凝剂种类对钢纤维喷射混凝土弯曲韧性行为的影响。

由图 2 可知，在初期加载过程中，钢纤维喷射混凝土弯曲变形位移随荷载力增加呈现线性增加，当垂直于荷载力方向的裂缝开始出现后，受钢纤维增韧作用影响，在相对恒定荷载力下试件弯曲变形位移稳定增加，此时混凝土裂缝断面未完全分离，说明钢纤维的掺入促使喷射混凝土由脆性断裂破坏转变为韧性弯曲破坏，乱向分布的钢纤维在荷载作用形成的微裂缝之间形成良好桥联作用，通过钝化裂缝尖端的集中应力而实现对裂缝的约束作用，混凝土宏观表征为“裂而不断”[15]。钢纤维喷射混凝土的韧性行为受液体速凝剂种类影响明显，其中初裂强度可用于表征混凝土在线性受载阶段的混凝土弯曲屈服能力，而无碱速凝剂的掺入使得混凝土断裂荷载峰值为 17.98 kN，更高于空白组的 16.01 kN，说明无碱速凝剂对钢纤维的增韧作用影响较小，两者适应性要优于有碱速凝剂体系(荷载峰值 13.96 kN)。

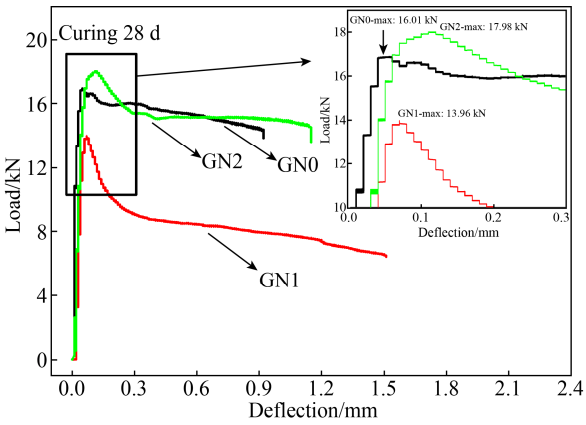


图 2　掺液体速凝剂的钢纤维喷射混凝土荷载-挠度曲线

Fig. 2　Load-deflection curves of steel fiber reinforced shotcrete containing liquid setting accelerators

根据理想弹塑性材料的残余强度因子 σ 为 1.0[16]，表 3 中试件的弯曲韧性指数结果更说明，相对于有碱速凝剂，无碱速凝剂体系的荷载-挠度曲线更为饱满，更有利于钢纤维的增韧效果发挥。

2.3　早期力学强度发展

作为隧道初期衬砌的核心材料，喷射混凝土早期力学强度较低时，在软弱围岩应力作用下极易造成回弹量增大，进而延缓施工进度与增大材料成本，

而纤维的掺入因其具有较高的延展性和阻裂能力，纤维喷射混凝土在发生较大变形后仍能保持承载能力，可有效改善喷射混凝土早期强度偏低时对软弱围岩的支护作用与粘结效果[17]。另一方面，喷射混凝土的早期硬化行为与液体速凝剂种类联系紧密，受其早期速凝作用影响明显。

表 3 掺液体速凝剂的钢纤维喷射混凝土的弯曲韧性

Table 3 Flexural toughness of steel fiber reinforced concrete containing liquid setting accelerator

Group	First-crack strength/MPa	Toughness index					
		I_5	σ_5	I_{10}	σ_{10}	I_{20}	σ_{20}
GN0	8.5	4.60	0.80	9.13	0.81	20.35	1.04
GN1	7.6	5.59	1.30	9.04	0.79	17.25	0.71
GN2	9.7	5.07	1.04	9.24	0.83	19.34	0.93

Note: Toughness index I_i represent the post-cracking strength of energy absorption; residual strength factors $\sigma_i=I_i/i$, for example, $\sigma_5= I_5/5.0$.

图 3 为同配比模拟钢纤维砂浆水化前 72 h 在液体速凝剂作用下，钢纤维对喷射混凝土的早期力学强度的提升效果。

由图 3 可见，钢纤维的掺入显著改善了试件的早期抗压强度与抗折强度发展速率，使得水化 12 h 后钢纤维砂浆的抗折强度迅速达到 3.3 MPa，明显高于无纤维体系(0.05 MPa)；另一方面，当水化继续进行至 18 h 时，钢纤维单掺(GN0)体系抗压强度从 1.7 MPa 增长至 12.1 MPa，而无纤维空白组水化 18 h 抗压强度仅为 2.64 MPa。

对比空白组，液体速凝剂的掺入明显促进了钢纤维砂浆的早期硬化过程，从而提高了水化前 24 h 的抗压与抗折强度，对钢纤维喷射混凝土而言能更快地提供早期围岩支护能力。与无碱速凝剂相比，有碱速凝剂的掺入虽然促使钢纤维砂浆水化 6~24 h 内力学抗压强度增长明显，但在水化 24~72 h 内试件抗折强度增长明显减缓，说明此时钢纤维的增韧效果明显削弱，可能因为在水化前 24 h，有碱速凝剂通过促进石膏相迅速消耗与硅酸三钙 C_3S 矿物的溶解水化加快了水化硬化体的形成，但在水化 48 h 后单硫型水化硫铝酸钙 AFm 与水化铝酸钙凝胶 C-A-H 产物的形成抑制了硅酸三钙 C_3S 的进一步水化[18]，基体强度发展缓慢明显影响了钢纤维的增韧效果。

2.4 水化微观形貌

钢纤维喷射混凝土的早期力学强度发展行为制约了其对隧道围岩的初期支护能力与回弹率控制效果。2.3 节结果表明水化 24 h 前钢纤维喷射混凝土的早期力学强度受液体速凝剂的掺入而有所提高，但对于有碱速凝剂体系，水化 24 h 后纤维的增韧作用明显削弱，这与其对水泥基体强度的影响有关。故本节通过分析水化 24 h 后掺速凝剂的钢纤维砂浆水化微观形貌及钢纤维与水泥基体粘结界面区，进一步揭示液体速凝剂对钢纤维喷射混凝土早期力学性能影响。

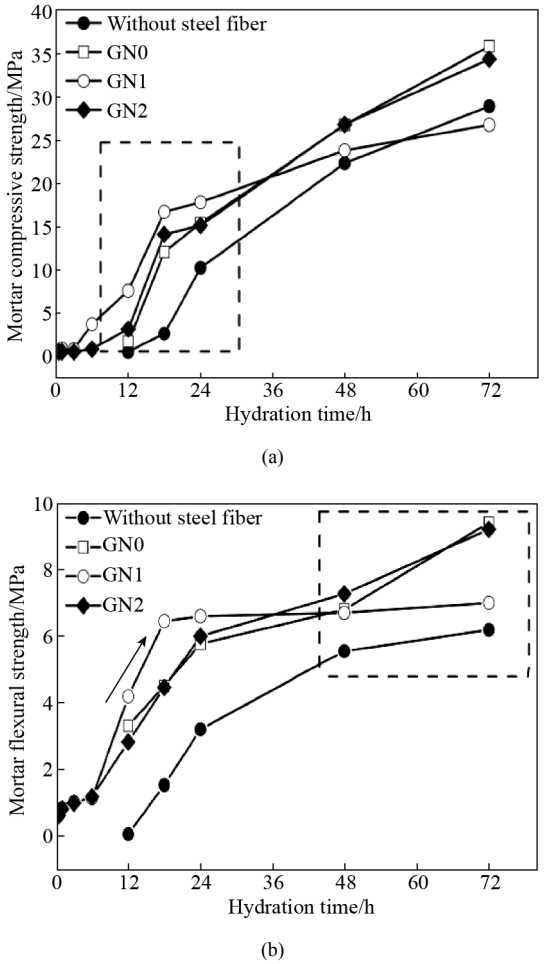


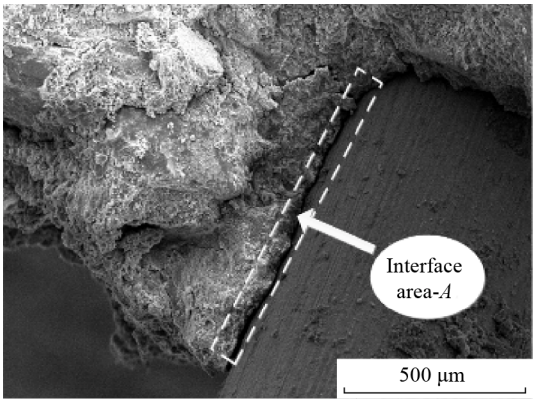
图 3 液体速凝剂与钢纤维作用下的钢纤维砂浆早期力学强度发展

Fig. 3 Early mechanical strength development of steel fiber reinforced mortars containing different liquid setting accelerators

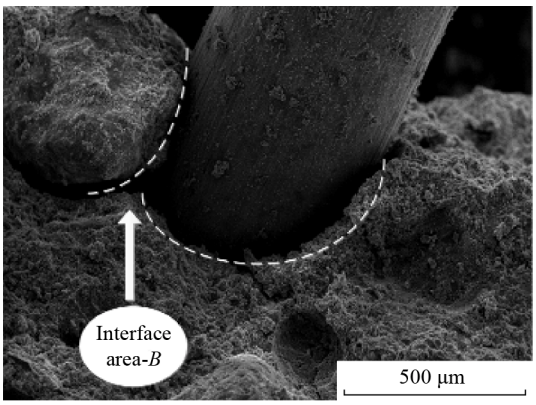
2.4.1 钢纤维与水泥基体粘结界面区 钢纤维与水泥基材料粘结效果的优劣对钢纤维喷射混凝土的抗弯韧性与抗冲击性能影响明显，当粘结效果较差时，在纤维-水泥基体界面容易产生孔洞，如喷射混凝土无法对钢筋网面背部空隙进行有效填充也会产生结构孔洞[6]，孔洞的存在使得内部钢纤维的荷载传递作用无法发挥，促使应力集中区与裂缝缺陷的形成。

从图 4 可以看出，钢纤维与水泥基体的早期粘结效果受液体速凝剂种类差异性较为明显，对比有

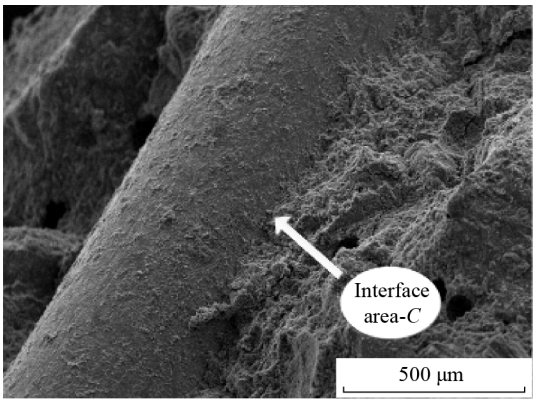
碱速凝剂体系，无碱速凝剂掺入后钢纤维与水泥基体的粘结更为紧密，界面区空隙更小，进而解释了模拟钢纤维砂浆的早期抗折强度结果的差异性。



(a) GN0



(b) GN1

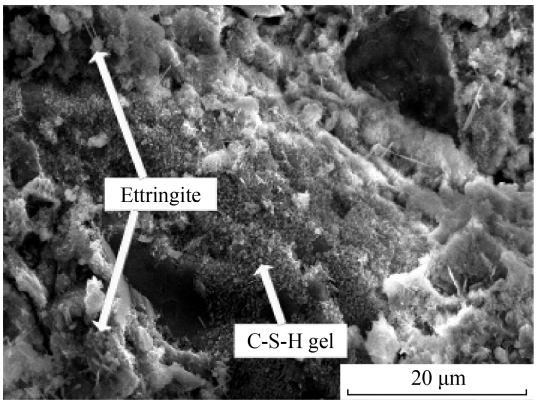


(c) GN2

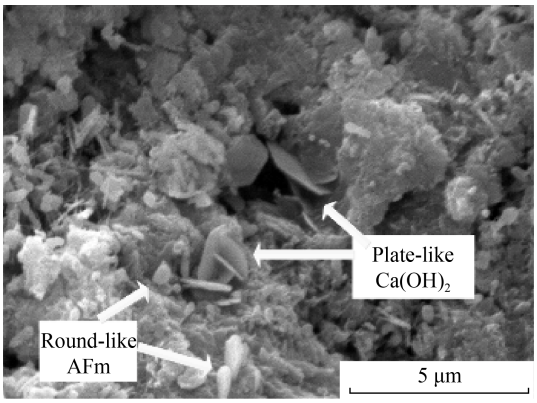
图 4　水化 24 h，钢纤维与掺速凝剂砂浆基体粘结界面区电镜照片

Fig. 4　SEM images of bonding interface area between steel fiber and mortar matrix containing setting accelerators at curing 24 h

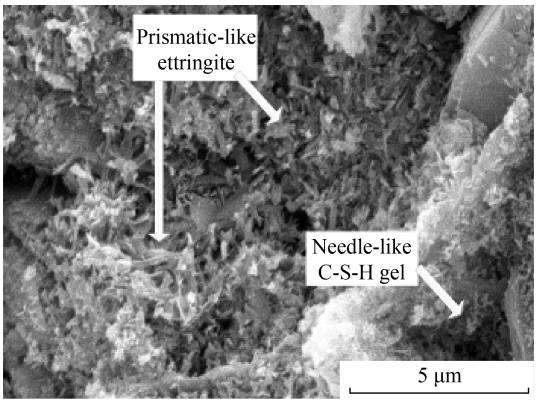
2.4.2　钢纤维与基体粘结界面区的早期水化产物　在相同钢纤维体积掺量下，钢纤维与水泥基体粘结效果的差异性与液体速凝剂种类有关，而进一步对图 4 中钢纤维与基体粘结界面区的水化产物进行放大观察(见图 5)，发现钢纤维-水泥基体的早期界面行为与液体速凝剂速凝作用下的早期水化产物组成联系紧密。



(a) GN0



(b) GN1



(c) GN2

图 5　水化 24 h，钢纤维与掺速凝剂砂浆基体粘结界面区水化产物电镜照片

Fig. 5　SEM images of hydration products in bonding interface area between steel fiber and mortar matrix containing different setting accelerators at curing 24 h

无速凝剂掺入时 24 h 水化产物以网络状 C-S-H 凝胶为主，而掺入有碱速凝剂水化 24 h 后 C-S-H 凝

胶以层状形态为主，且片状 $Ca(OH)_2$ 与类圆片状单硫型水化硫酸铝钙 AFm[18]穿插嵌入在水化硬化体结构中，造成水泥基体对钢纤维的包裹能力明显下降，进而削弱了钢纤维的增韧效果。另一方面，掺入无碱速凝剂后，水化产物以大量短柱状钙矾石、针柱状 C-S-H 凝胶为主，均表征为纤维体形态，明显改善了水泥基体与钢纤维的粘结效果，更有利于钢纤维喷射混凝土的早期支护能力提高。

3 结论

1) 液体速凝剂种类通过影响喷射混凝土基体后期强度，造成了钢纤维喷射混凝土的力学强度及韧性行为存在差异性，对比有碱速凝剂，无碱速凝剂的掺入对混凝土基体后期强度影响更小，荷载-挠度曲线更为饱满，有利于钢纤维增韧效果的发挥。

2) 水化前 24 h，钢纤维对喷射混凝土的早期力学强度提升效果受液体速凝剂的速凝硬化作用而明显改善，但有碱速凝剂体系在水化 24~72 h 内抗折强度增长缓慢，抗压强度更明显低于无碱速凝剂体系。

3) 水化前 24 h，无碱速凝剂通过促进短柱状钙矾石与纤维针状 C-S-H 凝胶的水化环境形成，有效改善了粘结界面区水泥基体对钢纤维的包裹效果，从而有利于钢纤维喷射混凝土的早期初期支护能力提高。

参考文献:

[1] 欧阳幼玲, 陈迅捷, 陆采荣, 等. 钢纤维和仿钢纤维喷射混凝土性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(S2): 44–48.
OUYANG Youlin, CHEN Xunjie, LU Cairong, et al. J Southeast Univ (Nat Sci Ed) (in Chinese), 2010, 40(S2): 44–48.

[2] 杜国平, 刘新荣, 祝云华, 等. 隧道钢纤维喷射混凝土性能试验及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(7): 1448–1454.
DU Guoping, LIU Xinrong, ZHU Xunhua, et al. Chin J Roc Mech Eng (in Chinese), 2008(7): 1448–1454.

[3] YANG J M, KIM J K, YOO D Y. Performance of shotcrete containing amorphous fibers for tunnel applications[J]. Tun Und Spa Tech, 2017, 64(1): 85–94.

[4] 祝云华. 钢纤维喷射混凝土抗渗及抗冻性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(3): 55–58.
ZHU Yunhua. New Build Mater (in Chinese), 2011, 38(3): 55–58.

[5] 李冬, 丁一宁. 钢纤维对喷射混凝土方板早龄期弯曲性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1): 78–82.
LI Dong, DING Yining. J Build Mater (in Chinese), 2017, 20(1): 78–82.

[6] LEUNG C K Y, LAI R, LEE A Y F. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(4): 788–795.

[7] 曾鲁平, 王伟, 张小磊, 等. 液体无碱速凝剂的研究现状及适应性机理研究[J]. 建材发展导向, 2019, 17(16): 11–14.
ZENG Luping, WANG Wei, ZHANG Xiaolei, et al. Dev Gui Build Mater (in Chinese), 2019, 17(16): 11–14.

[8] GB/T 35159-2017. 喷射混凝土用速凝剂[S].
GB/T 35159-2017. Flash setting admixtures for shotcrete[S].

[9] GB/T 50086-2015. 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S].
GB/T 50086-2015. Technical code for engineering of ground anchorages and shotcrete support[S].

[10] GB/T 50081-2002. 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081-2002. Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete[S].

[11] JGJ/T 221-2010. 纤维混凝土应用技术规程[S].
JGJ/T 221-2010. Technical specification for application of fiber reinforced concrete[S].

[12] BELIE N D, GROSSE C U, KURZ J, et al. Ultrasound monitoring of the influence of different accelerating admixtures and cement types for shotcrete on setting and hardening behavior[J]. Cem Concr Res, 2005, 35: 2087–2094.

[13] 张建纲, 刘加平. 液体速凝剂对喷混凝土耐久性的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(5): 169–174.
ZHANG Jiangang, LIU Jiaping. Mod Tun Tech (in Chinese), 2012, 49(5): 169–174.

[14] ASTM, 1984. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (using simple beam with third-point loading). C 78–84. American Society of Testing Methods.

[15] 赵晓晶, 马芹永. 钢纤维和膨胀剂复合效应对喷射混凝土弯曲韧性的影响分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(2): 45–48.
ZHAO Xiaojing, MA Qinyong. Chin Concr Cem Prod (in Chinese), 2012(2): 45–48.

[16] JENG F S, LIN M L, YUAN S Ch. Performance of toughness indices for steel fiber reinforced shotcrete[J]. Tun Und Spa Tech, 2002, 17(1): 69–82.

[17] JOVICIC V, ŠUŠTERŠICˇ J, VUKELIC Z. The application of fibre reinforced shotcrete as primary support for a tunnel in flysch[J]. Tun Und Spa Tech, 2009, 24(6): 723–730.

[18] SALVADOR R P, CAVALARO S H P, SEGURA I, et al. Early age hydration of cement pastes with alkaline and alkali-free accelerators for sprayed concrete[J]. Constr Build Mater, 2016, 111: 389–398.