

文章编号:1007-9629(2022)10-0999-08

硫酸复盐改善混凝土早期抗拉强度的机理分析

孙振平^{1,2,3,*}, 耿瑶^{1,2}, 杨海静^{1,2}, 冀言亮^{1,2}, 王玉吉^{1,2}

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804; 3. 上海市水务局 城市管网智能评估与修复工程技术研究中心, 上海 201900)

摘要:采用混凝土轴向拉伸试验,研究了实验室自制硫酸复盐(SN)对混凝土早期抗拉强度的影响.借助X射线衍射仪(XRD)、热重-微商热重(TG-DTG)分析和扫描电镜(SEM),对硬化浆体的物相组成和微观形貌进行表征,并结合胶凝体系的水化放热情况,对SN的作用机理进行了探索.结果表明:掺加SN能够显著提高混凝土的早期抗拉强度,当SN掺量为2.0%时,混凝土1、3、5d龄期时的抗拉强度分别提高18.7%、23.6%和16.2%,且对混凝土后期抗拉强度几乎无不利影响;SN可以加快胶凝体系早期水化反应进程,促进钙矾石(Aft)、氢氧化钙(CH)和水化硅酸钙(C-S-H)等水化产物生成,且体系中的C-S-H填充于针状Aft形成的交叉搭接结构内部空间,有利于拉应力在硬化浆体内均匀分布,从而有效提高混凝土的早期抗拉强度.

关键词:硫酸复盐;混凝土;抗拉强度;水化产物;微纤维增强

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.10.001

Mechanism Analysis of a Sulfate Complex Salt Improving Early Tensile Strength of Concrete

SUN Zhenping^{1,2,3,*}, GENG Yao^{1,2}, YANG Haijing^{1,2}, JI Yanliang^{1,2}, WANG Yuji^{1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Research Center of Intelligent Evaluation and Restoration Engineering Technology of Urban Pipe Network, Shanghai Water Bureau, Shanghai 201900, China)

Abstract: The effect of a sulfate complex salt (SN) was studied by axial tensile test of concrete in the present investigation. The phase composition and morphological structure of hardened paste were characterized by X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric-derivative thermogravimetric (TG-DTG) analysis and scanning electron microscope (SEM). Combined with the hydration heat release of cementitious system, the working mechanism of SN was discussed. The results show that the early tensile strength of concrete can be significantly improved by using SN. Specifically, compared to the control, the tensile strength at the age of 1, 3, 5 d is increased by 18.7%, 23.6% and 16.2%, respectively, while 2.0% SN is dosed into concrete, no obvious adverse effect occurs on the tensile strength at later ages. The incorporation of SN can speed up the early hydration process of cementitious system and promote the formation of hydration products such as ettringite (Aft), calcium hydroxide (CH) and calcium silicate hydrate (C-S-H) in the cementitious system. Further, the C-S-H is filled in the micro lap-structure formed by needle-shaped Aft, which is beneficial to the uniform distribution of tensile strength and effectively improve the early tensile strength of concrete.

Key words: sulfate complex salt; concrete; tensile strength; hydration product; microfiber reinforcement

收稿日期:2021-08-23; 修订日期:2021-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678441, 52108240);上海市科委项目(19DZ1202702, 19DZ1201404);上海市建委专项课题(住建管 2021-001-002);住建部项目(K20200988);重庆市科技局专项项目(cstc2020kqjcx-phxm1594);内蒙古自治区科技计划项目(2022YFDZ0063);上海市科委外专项项目(22WZ2502400)

第一作者(通讯作者):孙振平(1969—),男,新疆奇台人,同济大学教授,博士生导师,博士. E-mail:grtshzp@163.com

混凝土结构内部孔缝缺陷多、界面多、界面区薄弱,且硬化浆体的各组成在微观层次主要通过范德华力结合,是导致混凝土结构抗拉强度较低的主要原因.虽然早龄期混凝土浆体水化程度和抗拉强度较低,但早期干燥收缩和温度梯度引起的拉应力不容小觑,由拉应力所引起的早期开裂现象非常普遍.众多研究表明^[1-4],混凝土的极限拉伸应变和抗拉强度是衡量混凝土抗裂性的重要指标,混凝土的极限拉伸应变越大、抗拉强度越高,混凝土的受拉变形能力和抗裂性能就越好.加快混凝土早期抗拉强度的发展速率,是减小混凝土早期开裂风险非常重要的措施.

目前,关于改善混凝土抗裂性能的研究侧重于减小混凝土结构在温度和湿度等条件影响下的体积变化,以增强混凝土的体积稳定性^[5-7].此外,也有研究人员借助外加剂及纤维等提高混凝土自身的抗拉强度,以改善其抗裂性能.如黎霞等^[8]通过向混凝土中掺入2.5%的抗折剂,有效提高了混凝土的抗折强度及抗裂性能;Piroti等^[9]研究发现,一定掺量的聚丙烯纤维和纳米SiO₂可使混凝土的28d劈裂抗拉强度和抗折强度分别提高22.0%和40.0%;吴浪等^[10]利用自行组装的轴拉试验装置进行测试,发现掺入早强减水剂可将混凝土的3、7d抗拉强度分别提高14.8%和22.5%;刘春英等^[11]采用0.5%甲基丙烯酸+1.0%晶胚复合早强剂,将水泥砂浆的1、3d抗折强度分别提高24.3%和24.5%.然而该方面的研究相对较少,且所涉及的养护龄期集中于7d及其后期.另外,长期以

来,混凝土早期轴向拉伸(直接拉伸)试验较难进行,且试验结果离散性较大,研究者多以劈裂抗拉和弯折试验等间接测试结果评价混凝土的抗拉性能^[12-13],其准确性和有效性远不如轴向拉伸试验^[10,14-15].随着拉伸设备轴向位移控制水平和数据记载精确度的提高,混凝土早龄期轴向拉伸试验已成为可能.

本文基于甘肃省在建桥梁工程的混凝土原材料和配合比开展研究工作,测定了自行研制的一种硫酸复盐对混凝土早期抗拉强度的影响,同时借助X射线衍射仪(XRD)、热重-微商热重(TG-DTG)分析和扫描电镜(SEM),对硬化浆体的物相组成和微观形貌进行表征,并结合胶凝体系的水化放热情况,对其作用机理进行了探索.该研究结果对提升混凝土的早期抗裂性能具有一定的参考价值.

1 试验

1.1 原材料

水泥为海螺牌P·O 52.5,其主要物理性能参数如表1所示.粉煤灰为大唐彬长Ⅱ级粉煤灰,中值粒径(d_{50})为12.33 μm.粗集料为碎石,5~25 mm连续粒径.细集料为河砂,细度模数为2.62,属Ⅱ区中砂.减水剂(PC)为山西黄腾化工HT-HPC聚羧酸系减水剂,减水率(质量分数,文中涉及的减水率、水胶比等均为质量分数或质量比)为27.3%,固含量为40%.另一种外加剂采用实验室自行研制的硫酸复盐(SN),呈砖红色粉状,其XRD图谱如图1所示,氧化物组成如表2所示.拌和水为饮用自来水.

表1 水泥的主要物理性能参数

Table 1 Main physical property parameters of cement

Density/ (g·cm ⁻³)	Specific surface area/ (m ² ·kg ⁻¹)	Water requirement (by mass)/%	Stability	Setting time/min		Compressive strength/MPa		Flexural strength/MPa	
				Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
3.10	347	25.4	Qualified	176	226	37.9	57.8	8.0	11.3

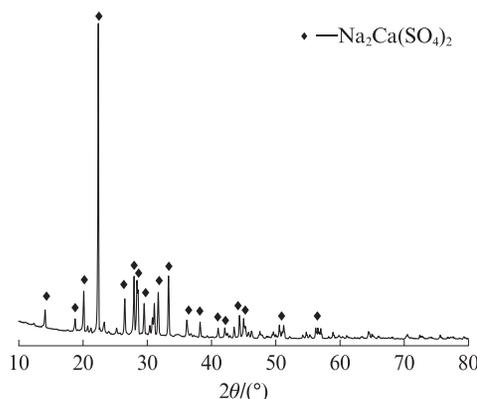


图1 SN的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of SN

表2 SN的氧化物组成

Table 2 Oxide composition of SN

w/%									
SO ₃	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	SrO	TiO ₂
46.52	17.35	18.79	8.14	2.82	2.71	1.91	0.85	0.48	0.19

1.2 混凝土的抗压强度和抗拉强度测试

工程用基准混凝土的配合比如表3所示,其水胶比为0.31,砂率为40%,减水剂掺量为0.18%.基于基准混凝土配合比,通过调整SN掺量(0%、1.0%和2.0%),本研究共设计3组试验.为保证各组混凝土坍落度基本一致,对减水

剂掺量也进行适当调整.各组混凝土的外加剂掺量及坍落度如表4所示.混凝土抗压强度试件的制备参照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》.混凝土抗拉强度试件的制备参照SIA

2052—2016《Ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (UHPFRC)》.试件养护环境的温度为(20±2)℃,相对湿度不小于95%,测试龄期为1、3、5、7、10、28 d.

表3 基准混凝土的配合比
Table 3 Mixing proportion of reference concrete

Cement	Fly ash	Water	Coarse aggregate	Fine aggregate	Superplasticizer
435.000 0	71.000 0	157.000 0	1 072.000 0	715.000 0	0.910 8

表4 各组混凝土的外加剂掺量及坍落度
Table 4 Admixture dosage and slump in each group of concrete

Concrete No.	w(SN)/%	w(PC)/%	Slump/mm
C-SN-0	0	0.18	190
C-SN-1.0	1.00	0.19	185
C-SN-2.0	2.00	0.21	181

表5 各组水泥净浆的配合比及流动度
Table 5 Mix proportion and fluidity in each group of paste

Paste No.	w(SN)/%	w(PC)/%	Fluidity/mm
P-SN-0	0	0.18	230
P-SN-1.0	1.00	0.19	223
P-SN-2.0	2.00	0.21	219

采用DY-2008DFX全自动压力试验机测试混凝土的抗压强度,立方体试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,加载速率为7.0 kN/s.采用WDW-300C混凝土轴拉试验机测试混凝土的抗拉强度,轴拉试件为“骨头型”,其尺寸如图2所示,加载速率为0.2 mm/s.

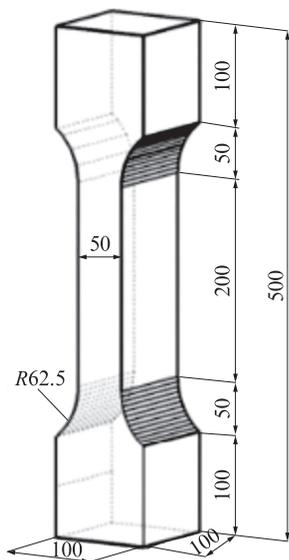


图2 混凝土抗拉强度试件尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of concrete tensile strength specimen (size:mm)

1.3 水泥净浆的早期水化性能测试

为探究SN对胶凝材料水化进程和浆体微观结构的影响,单独制备水泥净浆并对其进行相关测试.各组净浆的组成、水胶比、SN掺量和PC掺量均与混凝土保持相同,其配合比和流动度如表5所示.

XRD、TG-DTG和SEM的测试龄期为1、3 d.到

测试龄期时,立即将硬化浆体破碎成小块并在无水乙醇中浸泡,以终止胶凝材料的水化反应.XRD测试采用日本理学Rigaku ultima IV型X射线衍射分析仪,扫描范围为5°~90°,扫描速率为10(°)/min.TG测试采用耐弛STA 449F5型同步热分析仪,温度范围为30~900℃,升温速率为10℃/min.SEM分析采用QUANTA FEG 450场发射环境扫描电镜,用于观测硬化浆体的微观形貌和结构.胶凝材料的水化热测试采用TAM Air C08八通道微量热仪.

2 结果与讨论

2.1 混凝土的抗压强度、抗拉强度和拉压比

SN对混凝土抗压强度和抗拉强度的影响如图3所示.由图3可见:(1)SN的掺加使混凝土的1 d抗压强度略有增加,但3 d抗压强度较混凝土对照组(C-SN-0)有所降低;随着养护龄期的延长,SN对混凝土抗压强度的负面影响逐渐减小.(2)掺加SN可以有效提高混凝土的早期抗拉强度,随着SN掺量的增加,其对混凝土早期抗拉强度的增强效果更加显著,与C-SN-0相比,养护龄期为1、3、5 d时,掺加1.0% SN的混凝土(C-SN-1.0)抗拉强度分别提高11.8%、20.2%和12.4%;掺加2.0% SN的混凝土(C-SN-2.0)抗拉强度分别提高18.7%、23.6%和16.2%.(3)5~7 d龄期内C-SN-0的抗拉强度发展较快;7 d后3组混凝土的抗拉强度相当.

混凝土抗拉强度与抗压强度之比(拉压比)是衡量混凝土脆性的指标之一.拉压比越大,表明混凝土脆性越低.SN对混凝土拉压比的影响如图4所示.由

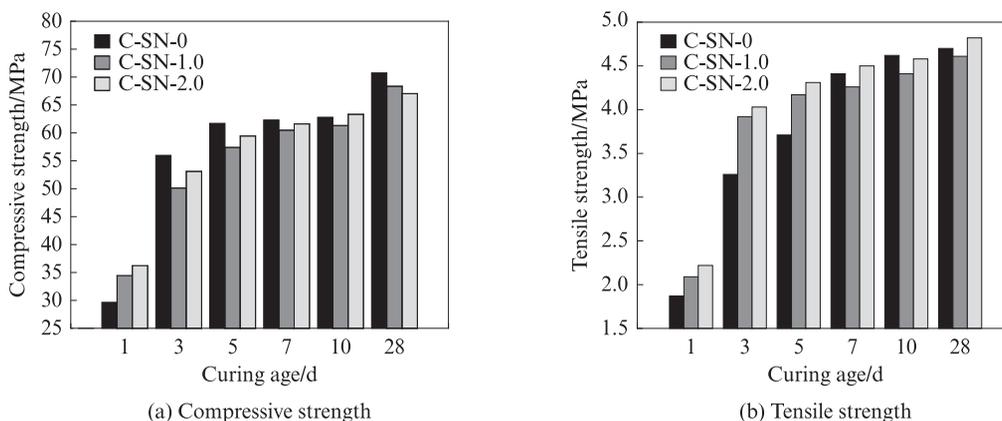


图3 SN对混凝土抗压强度和抗拉强度的影响

Fig. 3 Effect of SN on the compressive strength and tensile strength of concrete

图4可见:3、5、7 d龄期时,掺有SN的混凝土拉压比显著高于C-SN-0,当养护龄期为3、5 d时,掺加2.0% SN的混凝土(C-SN-2.0)拉压比较C-SN-0分别提高30.3%和20.6%;随着养护龄期的延长,C-SN-2.0的拉压比几乎不再变化,而C-SN-0的拉压比再次下降.这表明,SN的掺加有效提高了混凝土的拉压比,降低了其脆性,有利于提高混凝土的抗裂性能.

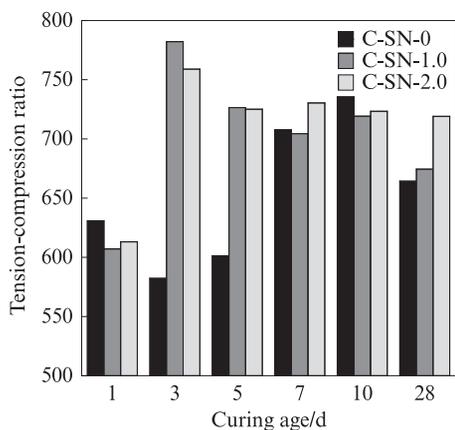


图4 SN对混凝土拉压比的影响

Fig. 4 Effect of SN on tension-compression ratio of concrete

综上所述,掺加SN可以提高混凝土7 d龄期前的抗拉强度和拉压比,对混凝土7 d龄期后的抗压强度和抗拉强度无明显影响.就普通混凝土早强剂而言,对混凝土早期抗压强度大多起促进作用,对混凝土抗拉强度的促进作用则较小,应用该类早强剂的目的在于缩短混凝土的脱模时间,减少低温对混凝土工程质量的过分影响;而且,以往研究鲜有涉及混凝土的早期抗拉强度及早期拉压比.相较而言,本研究采用的SN对混凝土早期抗拉强度的改善效果十分显著,能够大幅提高混凝土3、5 d时的拉压比.

2.2 水泥净浆的水化热分析

SN对水泥净浆水化反应放热速率和累积放热量的影响如图5所示.由图5可见:(1)与净浆对照组(P-SN-0)相比,掺有SN的净浆第1个水化放热峰明显提高,水化反应的诱导期缩短;第2个放热峰即水化放热主峰出现时间提前且峰值亦高于对照组.(2)水化反应48 h内,掺有SN的净浆水化放热总量明显高于P-SN-0.这表明SN对净浆的水化反应具有促进作用,加快了水泥早期水化进程,且SN掺量为2.0%时的促进效果比SN掺量为1.0%时更加显著,这一结果与2.1中掺加SN可提高混凝土1 d抗压强度和抗拉强度的规律相一致.为探明其中原因,本研究进一步对硬化浆体的物相组成和结构进行分析.

2.3 硬化浆体的物相组成及微观形貌

选取1、3 d龄期时的P-SN-0、P-SN-1.0和P-SN-2.0硬化浆体进行微观试验研究.

2.3.1 XRD图谱分析

P-SN-0、P-SN-1.0和P-SN-2.0硬化浆体在1、3 d龄期时的XRD图谱如图6所示.由图6可见:与P-SN-0相比,养护龄期为1、3 d时,掺加SN的浆体中水泥熟料矿物相(硅酸三钙/硅酸二钙(C_3S/C_2S)和铝酸三钙(C_3A))的衍射峰强度有所降低,同时,水化产物钙矾石(Aft)及氢氧化钙(CH)等的衍射峰强度大幅提升;随着SN掺量的增加,相同龄期的浆体中水化产物衍射峰的强度相应提高.水化产物衍射峰强度的变化定性表明了掺加SN能够促进水泥的水化反应,生成更多的Aft、水化硅酸钙(C-S-H)和CH,且在一定范围内,SN掺量越大,对水泥水化的促进作用越显著.由图6还可见,当养护龄期由1 d延长至3 d时,与P-SN-0相比,掺加SN的浆体中CH的衍射峰强度显著提高,说明该养护龄期内,SN对于水化产物的形成依然存在有力的促进作用.以上作用规律与2.1中混

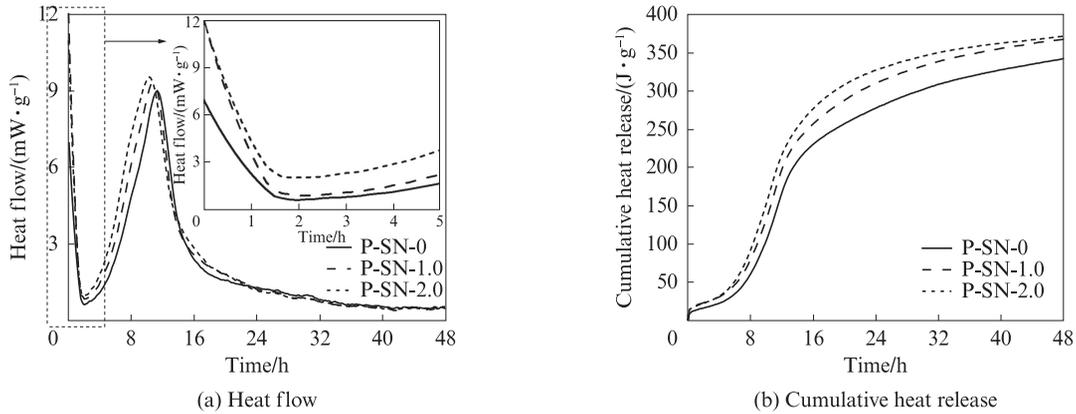


图5 SN对净浆水化反应放热速率及累积放热量的影响
Fig. 5 Effect of SN on heat flow and cumulative heat release of hydration reaction of paste

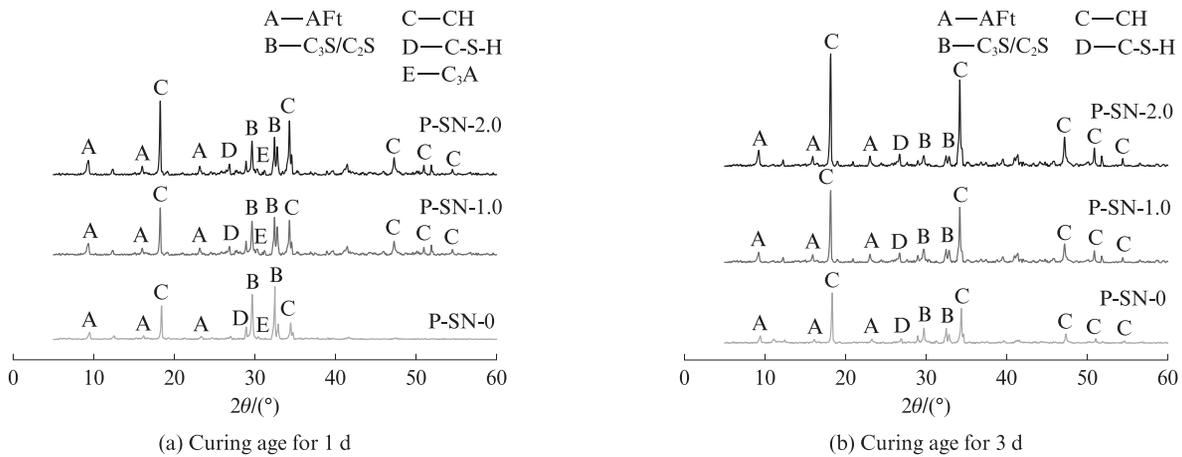


图6 硬化浆体在1,3d龄期时的XRD图谱
Fig. 6 XRD patterns of hardened paste at curing age for 1, 3 d

混凝土的强度试验结果相一致。

2.3.2 热重分析

在升温过程中,因水分蒸发或气体逸出所形成

的失重峰可定量表征相关物相的含量。P-SN-0和P-SN-2.0硬化浆体在1,3d龄期时的TG-DTG曲线如图7,8所示。

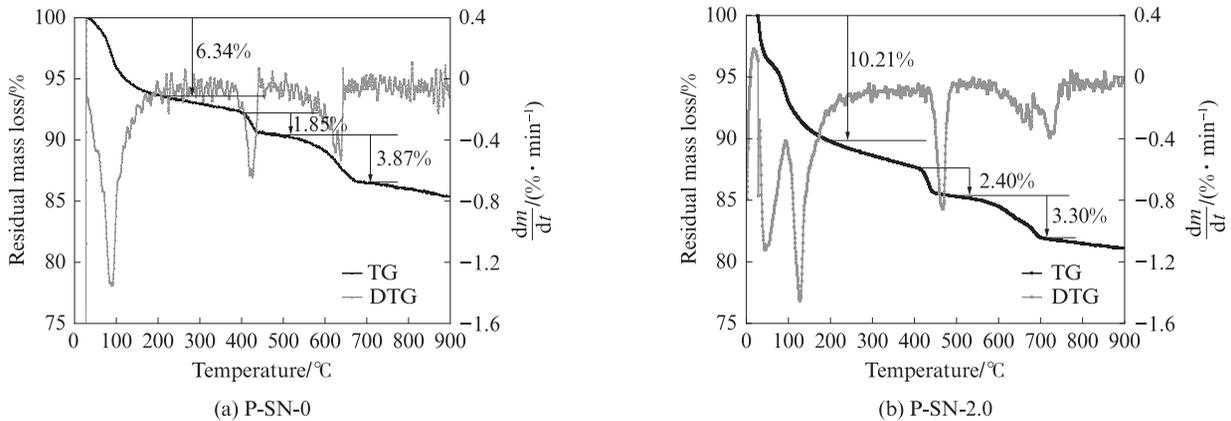


图7 硬化浆体在1d龄期时的TG-DTG曲线
Fig. 7 TG-DTG curves of hardened paste at 1 d

由图7,8可见:在室温升至900 °C的过程中,DTG曲线显示出3个主要吸热失重峰^[16]——200 °C前的吸热峰,代表硬化浆体中自由水的蒸发,以及

AFt、低硫型硫铝酸钙(AFm)和C-S-H的脱水分解;400~500 °C的吸热峰,为CH的分解峰;500~700 °C的吸热峰,为CaCO₃的分解峰。

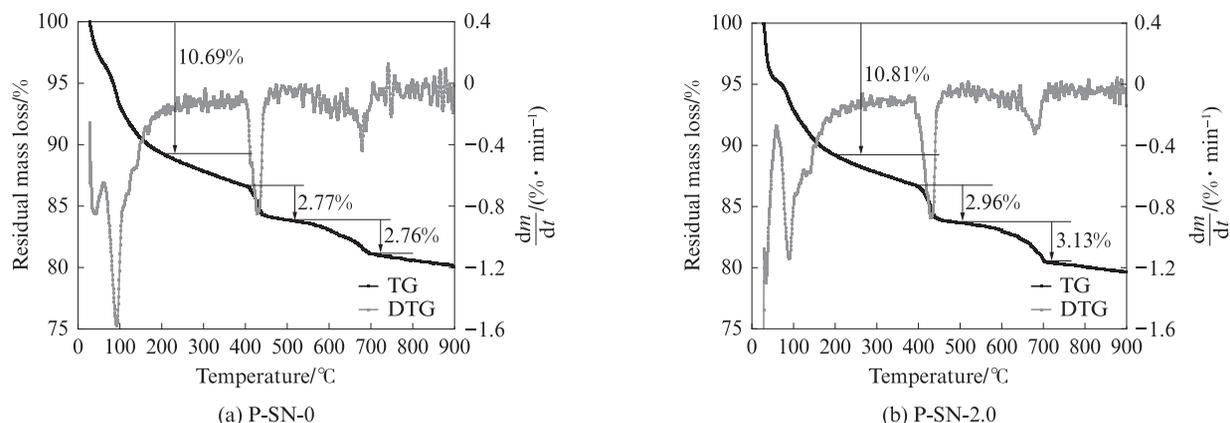


图8 硬化浆体在3d龄期时的TG-DTG曲线
Fig. 8 TG-DTG curves of hardened paste at 3 d

因此,硬化浆体中CH的含量可由下式计算得出:

$$w(\text{CH}) = \frac{74}{18} M(\text{H}_2\text{O}) + \frac{74}{44} M(\text{CO}_2) \quad (1)$$

式中: $w(\text{CH})$ 为CH的含量,%; $M(\text{H}_2\text{O})$ 为400~500℃范围内,由CH分解产生 H_2O 所引起的质量损失率,%; $M(\text{CO}_2)$ 为500~700℃范围内,由 CaCO_3 分解产生 CO_2 所引起的质量损失率,%.

TG-DTG测试中与CH相关的质量损失率及硬化浆体中CH含量的计算结果如表6所示.

表6 TG-DTG测试中与CH相关的质量损失率及硬化浆体中CH的含量

Table 6 Mass loss rate of related to CH in TG-DTG test and CH content in hardened paste

Item	1 d		3 d	
	P-SN-0	P-SN-2.0	P-SN-0	P-SN-2.0
$M(\text{H}_2\text{O})/\%$	1.85	2.40	2.77	2.96
$M(\text{CO}_2)/\%$	3.87	3.30	2.76	3.13
$w(\text{CH})/\%$	14.11	15.42	16.03	17.43

由图7、8还可见,1d龄期时,P-SN-2.0在30~200℃下热失重率为10.21%,显著高于P-SN-0,意味着体系中有更多的C-S-H凝胶生成,同样的现象也发生在3d龄期.此外,由表6可知:在1d龄期时,与P-SN-0相比,P-SN-2.0中的CH含量增加了1.31%;在3d龄期时,P-SN-2.0中的CH含量增加了1.40%.这进一步表明,掺加SN能够促进胶凝体系早期水化产物的生成,随着养护龄期的延长,SN对水泥的水化反应依然有明显的促进作用,该规律与强度试验、XRD的分析结果相一致.

2.3.3 SEM分析

图9、10为P-SN-0和P-SN-2.0硬化浆体在1、3d龄期时的SEM照片.由图9、10可见:(1)与P-SN-0

相比,在1d龄期时,P-SN-2.0中针状AFt及层片状CH的含量显著增加,且分布范围较广,大量AFt呈无定向分布,且长度更长,彼此相互交叉搭接,C-S-H凝胶填充在AFt无定向交叉搭接后形成的空间内,并包裹住AFt针状晶体,在很大程度上改善了非均质水泥基材料内部的受力状态,使外加应力能够均匀地分布在较大体积范围内,极大地促进了浆体的早期强度尤其是抗拉强度的建立.(2)随着水化反应的进行,在3d龄期时,P-SN-2.0硬化浆体中可观察到AFt周围有II型团聚网络状C-S-H凝胶,该凝胶的填充和胶结作用使水化产物的嵌挤连接更加紧密牢固,进一步促进了硬化浆体的强度发展.

3 SN提高混凝土早期抗拉强度的机理分析

根据胶凝体系的水化热分析及硬化浆体的物相组成、微观结构可知,SN可以促进胶凝材料的早期水化反应,增加硬化浆体中AFt、CH和C-S-H等水化产物的含量,从而对混凝土的早期力学性能尤其是抗拉强度产生有效的改善作用.

本研究自制SN的主要成分包括 $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ 和 SiO_2 .掺加SN后,浆体孔溶液中的 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和 SiO_3^{2-} 等可溶性离子浓度增大.一方面,与对照组中AFt在水泥颗粒表面生成的情况不同,液相离子浓度的增加使AFt得以通过液相沉淀反应,从孔溶液中析出生长,长度更长、分布更广,并呈无定向分布状相互交叉搭接,起到良好的微纤维增强作用,从而在很大程度上改善了硬化浆体抵抗拉应力的能力;另一方面,碱金属离子浓度的提高加速了水泥矿物的结构解体,促进了CH和C-S-H的生成,两者填充在AFt交互搭接产生的空隙中并发挥胶结作用,使硬化浆体结构趋于致密.

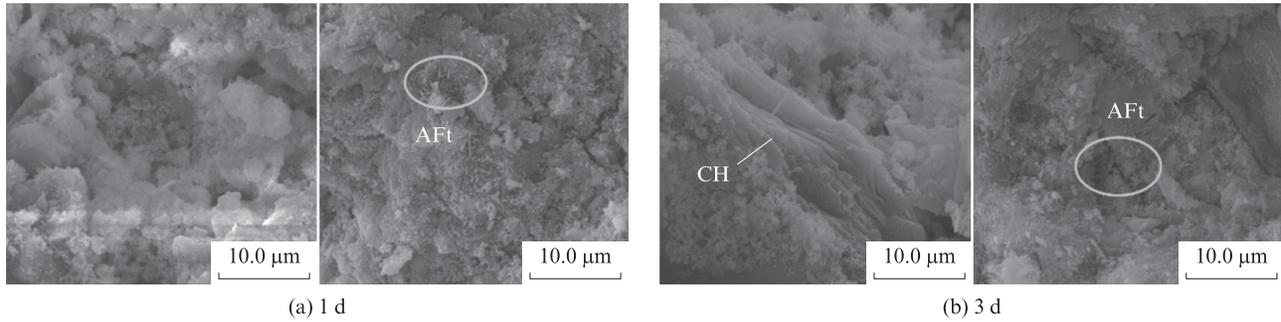


图9 P-SN-0硬化浆体在1、3 d龄期时的SEM照片
Fig. 9 SEM images of P-SN-0 hardened paste at 1, 3 d

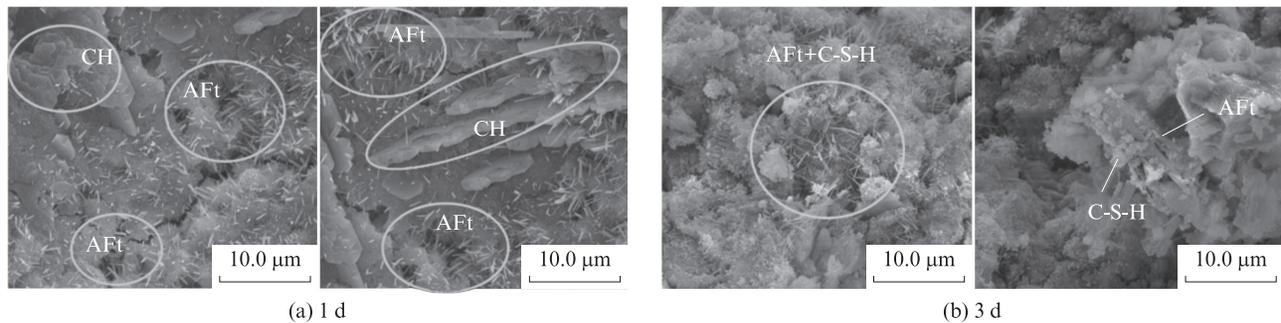


图10 P-SN-2.0硬化浆体在1、3 d龄期时的SEM照片
Fig. 10 SEM images of P-SN-2.0 hardened paste at 1, 3 d

值得注意的是,硬化浆体抵抗压应力与拉应力的方式有显著区别.SN能够促进针状AFt的生成并形成交叉搭接结构,有利于拉应力的均匀分布,从而有效提高硬化浆体乃至砂浆和混凝土的抗拉强度.

4 结论

(1)SN对混凝土的早期抗拉强度具有显著改善作用.掺加2.0% SN可使混凝土的1、3、5 d抗拉强度分别提高18.7%、23.6%和16.2%.

(2)掺加SN可以增加孔溶液中的 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 SO_4^{2-} 和 SiO_3^{2-} 等可溶性离子浓度,促进 C_3A 和 $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ 的水化反应,增加早龄期硬化浆体中AFt、CH和C-S-H等水化产物的含量,有利于提高混凝土的早期抗拉强度.

(3)SN促使针状AFt的长度更长、分布更广,形成相互交叉搭接结构,起到良好的微纤维增强作用,有利于拉应力的分布;同时,C-S-H填充于该交叉搭接结构内部,两者协同提高混凝土的早期抗拉强度.

参考文献:

[1] 黄士元. 高性能混凝土发展的回顾与思考[J]. 混凝土, 2003(7): 3-9.
HUANG Shiyuan. The reflection of high performance concrete development[J]. Concrete, 2003 (7):3-9. (in Chinese)

[2] SWADDIWUDHIPONG S, LU H R, WEE T H. Direct tension test and tensile strain capacity of concrete at early age[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(12):2077-2084.
[3] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997:1-10.
WANG Tiemeng. Control of engineering structural cracks[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997:1-10. (in Chinese)
[4] NGUYEN D H, DAO V T N, LURA P. Tensile properties of concrete at very early ages [J]. Construction and Building Materials, 2017, 134:563-573.
[5] LURA P, BREUGEL K V, MARUYAMA I. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(12):1867-1872.
[6] TAZAWA E, MIYAZAWA S. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(2):281-287.
[7] KAYALI O, HAQUE M N, ZHU B. Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(11):1835-1840.
[8] 黎霞, 唐治中, 曾彪, 等. 抗折剂对水泥混凝土抗裂性能影响研究[J]. 中外公路, 2018, 38(1):293-295.
LI Xia, TANG Zhizhong, ZENG Biao, et al. Influence of anti-breaker admixtures on crack resistance of cement concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(1):293-295. (in Chinese)
[9] PIROTI S, NAJARCHI M, HEZAVEHI E, et al. The experimental assessment of the effect of polypropylene fibers on

- the improvement of nano-silica concrete behavior[J]. *Scientia Iranica*, 2020, 27(2):682-692.
- [10] 吴浪, 方水平, 万妮. 混凝土早期抗拉强度试验研究[J]. *江西科学*, 2007, 25(2):175-178.
WU Lang, FANG Shuiping, WAN Ni. Experimental research on tensile strength of concrete at early ages[J]. *Jiangxi Science*, 2007, 25(2):175-178. (in Chinese)
- [11] 刘春英, 任国盛, 高小建. 新型复合早强剂对水泥砂浆力学性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(12):3806-3811.
LIU Chunying, REN Guosheng, GAO Xiaojian. Effect of new composite early strength agent on mechanical performance of cement mortar[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 39(12):3806-3811. (in Chinese)
- [12] 葛晓丽, 褚洪岩. 再生砂超高性能混凝土力学性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(4):810-815.
GE Xiaoli, CHU Hongyan. Mechanical properties of ultra-high performance concrete with recycled sand[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(4):810-815. (in Chinese)
- [13] 刘清, 韩风霞, 于广明, 等. 再生粗骨料自密实混凝土基本力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(5):1053-1060. (in Chinese)
- LIU Qing, HAN Fengxia, YU Guangming, et al. Basic mechanical properties of recycled coarse aggregate self-compacting concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(5):1053-1060. (in Chinese)
- [14] 杨杨, 江晨晖, 许四法. 高性能混凝土早龄期抗拉性能试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2008, 11(1):94-99.
YANG Yang, JIANG Chenhui, XU Sifa. Experimental study on tensile properties of high performance concrete at early ages [J]. *Journal of Building Materials*, 2008, 11(1):94-99. (in Chinese)
- [15] MIZOBUCHI T. Study on characteristics of tensile strength of concrete considering temperature dependence in mass concrete structures[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 199(1):11012.
- [16] 杨南如, 岳文海. 无机非金属材料图谱手册[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000:256-260.
YANG Nannu, YUE Wenhai. Atlas of inorganic nonmetallic materials[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2000:256-260. (in Chinese)