

# 10 °C条件下纳米 C-S-H 掺量对水泥早期水化的影响

房延凤<sup>1</sup>, 惠一心<sup>1</sup>, 尚小鹏<sup>2</sup>, 丁向群<sup>1</sup>, 佟钰<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 山东城市建设职业学院建筑工程系, 山东 济南 250103)

**摘要** 目的 探究 10 °C 条件下不同掺量纳米 C-S-H 对水泥早期水化进程及强度发展的影响, 并分析其早强剂作用机理。方法 通过溶液共沉淀法制备纳米 C-S-H 悬液, 将其掺入到普通硅酸盐水泥中, 在 10 °C 条件下进行养护, 分析其对水泥凝结时间、抗折强度、抗压强度的影响; 通过 XRD、TG 等检测手段分析水泥的水化进程及对水化产物的影响。结果 掺入 0.05% 纳米 C-S-H, 可使水泥初凝时间缩短 9.9%, 终凝时间缩短 10.4%; 24 h 时抗折强度和抗压强度分别提高了 34% 和 33.5%。纳米 C-S-H 的掺入造成水泥 3 d 抗折强度略有降低。水化产物中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  质量分数在 12 h、16 h 和 24 h 时较参比样分别提高了 17.6%、21.3% 和 29.6%。结论 在 10 °C 条件下, 纳米 C-S-H 的加入能够有效促进  $\text{C}_3\text{S}$  和  $\text{C}_2\text{S}$  的水化过程, 形成更多的水化产物, 从而缩短水泥凝结时间, 提高 24 h 内水泥砂浆强度, 28 d 强度没有显著降低。

**关键词** 纳米 C-S-H; 稳定性; 10 °C; 早期水化; 抗压强度

中图分类号 TU528.041

文献标志码 A

**引用格式:** 房延凤, 惠一心, 尚小鹏, 等. 10 °C 条件下纳米 C-S-H 掺量对水泥早期水化的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 505-512. (FANG Yanfeng, HUI Yixin, SHANG Xiaopeng, et al. Effects of nano C-S-H content on early hydration of cement at 10 °C[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(3): 505-512.)

## Effects of Nano C-S-H Content on Early Hydration of Cement at 10 °C

FANG Yanfeng<sup>1</sup>, HUI Yixin<sup>1</sup>, SHANG Xiaopeng<sup>2</sup>, DING Xiangqun<sup>1</sup>, TONG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;

2. Department of Architectural Engineering, Shandong Urban Construction Vocational College, Ji'nan, China, 250103)

**Abstract:** The influence of nano C-S-H on the hydration process and development of early strength

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808354)

作者简介: 房延凤(1988—), 女, 副教授, 博士, 主要从事工业废渣综合利用和特种水泥等方面研究。

of cement at 10 °C was explored, and the mechanism of its early strength enhancement was analyzed. In this paper, nano C-S-H suspension was prepared by solution coprecipitation method, and it was mixed with ordinary Portland cement. The effects of nano C-S-H on setting time, flexural strength and compressive strength at 10 °C were analyzed; Its effects on hydration process and hydration products were tested by XRD and TG. The initial setting time and final setting time were reduced by 9.9% and 10.4% when 0.05% of nano C-S-H was doped. Corresponding, the 24 h flexural strength and compressive strength increased by 34% and 33.5%. The addition of nano C-S-H resulted in a slight decrease in the 3 d strength. The content of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  at 12 h, 16 h and 24 h increased by 17.6%, 21.3% and 29.6%, respectively, compared to the reference specimen. The addition of nano C-S-H can effectively promote the hydration process of  $\text{C}_3\text{S}$  to form more hydration products, shorten the setting time of cement and improve the strength of cement mortar within 24 h at 10 °C. And no obvious decrease in 28 d compressive strength was observed.

**Key words:** Nano C-S-H; stability; 10 °C; early hydration; compressive strength

提高水泥混凝土在低温环境下的早期强度是许多混凝土工程追求的重要性能指标<sup>[1]</sup>。目前提高混凝土早期强度可采用蒸汽/蒸压养护的方式,然而需要消耗大量的热能,同时会排放有害气体造成污染<sup>[2]</sup>,且不适用于低温环境下的现浇混凝土。通过添加早强剂缩短凝结时间来提高早期强度也是目前常用的技术手段<sup>[3]</sup>。传统早强剂分为无机类、有机类和复合类,由于掺量问题易对混凝土产生负面影响,但传统早强剂在低温环境下早强效率偏低且成本偏高<sup>[4]</sup>。通过人为方式在水泥混凝土中加入具有促进水泥水化成核作用的纳米粒子,可以为水化产物提供更多形核位点,降低水化产物的成核势垒,加快水泥的水化进程。研究发现纳米晶种材料根据作用机理可分为两类<sup>[5-7]</sup>:第一类主要以物理的方式加速水泥水化,以纳米  $\text{TiO}_2$ 、纳米  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、纳米  $\text{ZrO}_2$  和碳纳米管为代表,可以在水泥水化过程中为 C-S-H 凝胶和其他水化产物提供额外成核位点;第二类以纳米  $\text{SiO}_2$ 、纳米  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、纳米  $\text{CaCO}_3$  等反应性纳米颗粒为代表,此类纳米颗粒除为水化产物提供成核位点外,可以在水泥水化过程中通过化学反应促进水泥水化。纳米 C-S-H 粒子促进水化作用最为明显,C-S-H 是普通硅酸盐水泥水化的主要产物,引入水

泥浆体中后不会改变孔溶液的化学组分,是理想成核基质<sup>[8-9]</sup>。余林岑<sup>[10]</sup>研究发现,将 C-S-H 作为晶种掺入到水泥浆体中,可以降低水化过程中成核势能。众多研究表明<sup>[11-13]</sup>,纳米 C-S-H 悬浮液具有良好的稳定性,纳米粒子加入后可以促进更多水化产物的生成,缩短了水泥的凝结时间。在低温条件下,纳米 C-S-H 也有优越的早强性能,而且对水泥后期强度没有影响<sup>[14-18]</sup>。

目前国内外关于晶种早强剂的研究主要集中在常温下进行,在 10 °C 下对其早强促凝效果研究还较少。基于此,笔者通过聚合物与 C-S-H 共沉淀法合成性能稳的纳米 C-S-H 悬浮液,并将其加入到水泥浆体中,在 10 °C 条件下进行养护,研究不同早强剂掺量对水泥水化的影响规律,探究纳米 C-S-H 早强剂对水泥作用机理的影响。研究表明,纳米 C-S-H 的加入缩短了水泥凝结时间,提高了水泥水化 24 h 内的砂浆强度,促进了水泥早期水化产物的生成。

## 1 实验

### 1.1 原材料

使用国药集团生产的分析纯化学试剂  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NaOH}$  合成纳米 C-S-H;采用聚羧酸聚合物(PCE,质

量分数为40%)为稳定剂和分散剂控制纳米C-S-H的粒度和稳定性。采用辽宁山水工源水泥有限公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐

水泥,化学组成见表1。试验用砂为厦门艾思欧标准砂有限公司生产的ISO标准砂。

表1 水泥化学组成

Table 1 Chemical compositions of Portland cements

%

w(SiO <sub>2</sub> )	w(CaO)	w(MgO)	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(SO <sub>3</sub> )	w(LOI)
20.6	60.35	2.93	3.95	4.68	2.45	1.58

1.2 纳米C-S-H的制备

采用PCE聚合物与硝酸钙溶液、硅酸钠溶液的共沉淀法制备纳米C-S-H的悬浮液。首先采用丙烯酸(AA)和异丁烯聚氧乙烯醚(HPEG)为单体,通过自由基共聚合成二者的共聚物。以H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>为引发剂,按照丙烯酸和异丁烯聚氧乙烯醚的摩尔比为5,制得质量分数为40%的聚合物PCE水溶液<sup>[17]</sup>。

以PCE为沉淀模板及稳定剂,按照如下程序制备纳米C-S-H的悬浮液:将一定量去离子水和质量分数为40%的PCE称入烧杯中,控制PCE的质量为溶液质量的2%,并加入NaOH调整pH值至13。纳米C-S-H悬浮液的设计按照钙硅摩尔比为1.2、无机物质量分数1.5%进行。用蠕动泵将质量分数为38%的硝酸钙溶液作为滴加料A,质量分数为25%的硅酸钠溶液作为滴加料B,滴加到烧杯中。滴加过程中使用高速剪切机对液体进行高速剪切搅拌,转速为6 000 r/min,滴加结束后继续剪切搅拌40 min即得到纳米C-S-H悬浮液。

1.3 胶砂试块的制备

按照纳米C-S-H的有效掺量分别为0.01%、0.03%、0.05%制备砂浆试块,分析其早强作用。参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T17671—2021)制备砂浆,水灰质量比为0.32,胶砂质量比为1:3。将新拌水泥砂浆浇注40 mm×40 mm×160 mm的模具中,在10℃的实验室中分别养护至8 h、12 h、16 h、24 h后脱模,并进行抗折强度和抗压强度的测试。对于龄期3 d

和28 d的试块,养护24 h后脱模并将试块放入10℃的养护室养护,至相应龄期后测试其抗压强度和抗折强度。抗折试块每组为6个试样,抗压试块每组为3个试样,分别测试强度,取每组试样平均值作为其强度代表值。同时控制同样的水灰比和纳米C-S-H掺量,制备水泥净浆,并养护至相应龄期,取样对其水化产物进行分析。参比样为未添加纳米C-S-H的水泥试样;0.01% C-S-H、0.03% C-S-H、0.05% C-S-H分别表示纳米C-S-H有效掺量0.01%、0.03%、0.05%的水泥试样。

1.4 检测方法

(1)粒径测试。将制备的纳米C-S-H悬浮液静置两周后用百特纳米zeta电位测试系统测定纳米C-S-H的粒径分布。

(2)纳米C-S-H物相分析。用高速离心机洗涤纳米C-S-H 3~5次后,将得到的C-S-H置于真空干燥箱中,在60℃的条件下烘干、研磨,用Bruker D8 X射线衍射仪测定其矿相组成。

(3)凝结时间。制备不同掺量C-S-H的水泥净浆试样,参照《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011),在10℃下进行养护,测定初凝和终凝时间。

(4)砂浆强度。使用无锡建仪仪器机械有限公司生产的YAW-300型抗压抗折一体机,测定抗折、抗压强度,载荷速度1.2 MPa/s。

(5)XRD、TG、SEM分析。取养护至相应龄期的水泥净浆试块,破碎、研磨后用无水

乙醇浸泡 20 ~ 30 min 以终止水化,取出后置于真空干燥箱中,在 60 ℃ 条件下烘干。用 Bruker D8 X 射线衍射仪、METTLER TOLEDO TG/DSCS1 和日立 S-4800 扫描电镜进行 XRD、TG 和 SEM 分析。

2 结果与分析

2.1 纳米 C-S-H 的表征

制备的纳米 C-S-H 悬浮液静置两周后并未出现明显的沉淀,纳米 C-S-H 的粒度分布曲线如图 1 所示。从图中可以得出,纳米 C-S-H 平均粒径为 117.3 nm, $D(90)$  为试样累计粒度分布数达到 90% 时所对应的粒径,为 181.3 nm。研究表明,合成的纳米 C-S-H 悬浮液具有良好的稳定性。

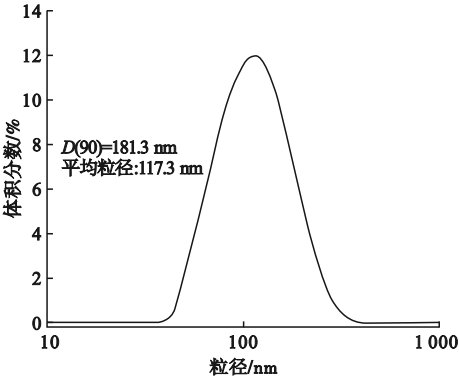


图 1 纳米 C-S-H 粒度分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of nano C-S-H

图 2 为纳米 C-S-H 的 XRD 图谱。从图中可以看出,合成的纳米 C-S-H 在衍射仪扫描角度  $2\theta$  为  $29^\circ$ 、 $32^\circ$  和  $50^\circ$  附近存在明显的

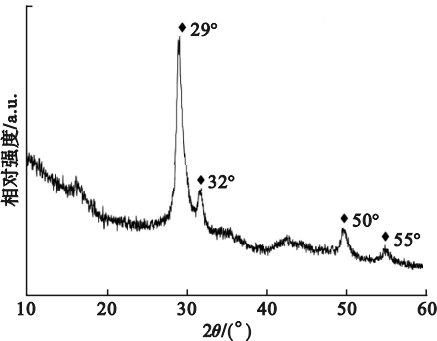


图 2 纳米 C-S-H 的 XRD

Fig. 2 XRD patterns of nano C-S-H

特征峰,  $55^\circ$  附近存在弥散峰。这与 Tobermorite<sup>[2]</sup> 的特征峰分布相似,纳米 C-S-H 存在类似于 Tobermorite 的结构。图中没有反应物的明显衍射峰,表明纳米 C-S-H 杂质较少,纯度较高。

2.2 C-S-H 对凝结时间的影响

不同掺量纳米 C-S-H 的水泥净浆与参比样在 10 ℃ 条件下的初凝时间和终凝时间曲线如图 3 所示。从图中可以看出,纳米 C-S-H 的加入显著缩短了水泥的初凝时间和终凝时间,且掺量越高水泥凝结时间缩短效果越明显。当掺量为 0.01% 时,初凝时间和终凝时间较参比样分别缩短 30.8% 和 0.9%;当掺量为 0.03% 时,初凝时间和终凝时间较参比样分别缩短 34.6% 和 2.7%;当掺量为 0.05% 时,初凝时间和终凝时间较参比样分别缩短了 9.9% 和 10.4%。已有研究结果表明<sup>[5]</sup>,纳米 C-S-H 为水泥水化提供了更多的成核位点,并降低了水泥水化产物 C-S-H 成核壁垒,缩短了水泥诱导期,加速了水泥水化产物生成。研究表明,纳米 C-S-H 在低温下也能提供成核位点,促进水化产物生成。

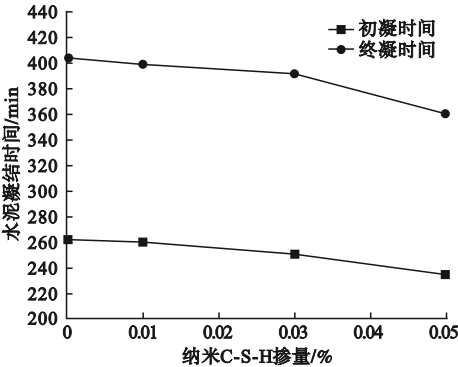


图 3 10 ℃ 下纳米 C-S-H 水泥凝结时间

Fig. 3 Setting times of cement paste with nano C-S-H under 10 ℃

2.3 纳米 C-S-H 对强度的影响

2.3.1 抗折强度

纳米 C-S-H 对水泥抗折强度的影响如图 4 所示。从图中可以看出,参比样和掺有纳米 C-S-H 的水泥砂浆在 8 h 和 12 h 时抗折强度较低,均未能测到可信的抗折强度值。



16 h 时,纳米 C-S-H 的加入促进了抗折强度的产生,且随着纳米 C-S-H 掺量的增加,抗折强度逐渐增加;24 h 时掺有纳米 C-S-H 的水泥抗折强度分别为 1.53 MPa、1.72 MPa、1.93 MPa,较参比样分别提升了 6.25%、19.4%、34%。由此可见,低温对砂浆强度发展有抑制作用,10℃养护下纳米 C-S-H 对砂浆的抗折强度发展表现出明显的加速作用。纳米 C-S-H 掺量为 0.05% 时,龄期 3 d 和 28 d 时水泥抗折强度有不同程度的降低,相对于参比样分别降低了 4.7% 和 3.2%。

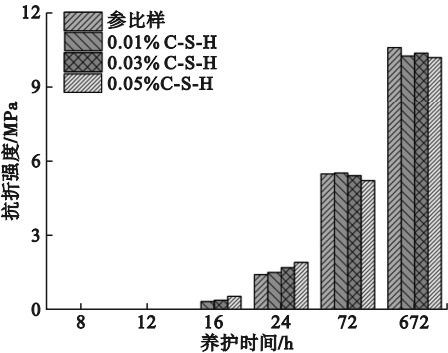


图4 抗折强度随养护时间变化

Fig. 4 Flexural strength versus hydration age

2.3.2 抗压强度

不同掺量纳米 C-S-H 对水泥抗压强度的影响如图 5 所示。从图中可以看出,所有试样的抗压强度均随着养护龄期而增加,但由于温度过低,强度的发展较为缓慢,空白样 24 h 的抗压强度仅为 5.62 MPa。纳米 C-S-H 对早期强度的发展有显著的促进作用,尤其是在 24 h 以内,而且随着掺量的增加,增强效果越明显,具体表现为,纳米 C-S-H 掺量为 0.01%、0.03%、0.05% 时,16 h 抗压强度分别较参比样提高了 12.2%、40.8% 和 112.2%;24 h 抗压强度分别较参比样提高了 6.2%、16.1%、33.5%。表明纳米 C-S-H 可在 10℃下产生更多的水化产物,从而提高胶隙比,进而提高水泥浆体强度。10℃下养护 3 d 后,仅有掺量为 0.03% 时水泥强度较参比样略有提升,其余掺量下均较参比样降低。这可能是由于水泥初期水化过程中,外掺的

纳米 C-S-H 晶核提供了额外的成核位点,水化产物 C-S-H 优先生长在在外掺的纳米 C-S-H 晶核上,极大降低了 C-S-H 的成核势能以及 C-S-H 的生长表面积,导致水泥初期抗压强度提高。然而,大量在纳米 C-S-H 粒子表面生长的 C-S-H 交织生长到一起时,则会产生更多的 C-S-H 相界面,即凝胶间孔,凝胶间孔增多导致基体强度降低,进而使水泥 3 d 时抗压强度降低<sup>[19]</sup>。

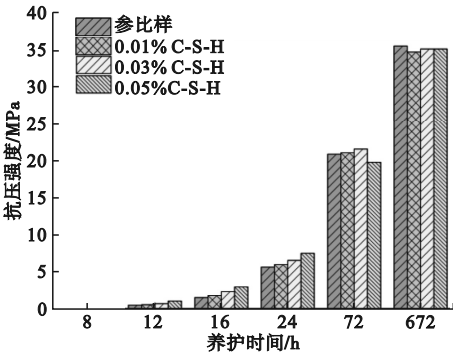


图5 抗压强度随养护时间变化

Fig. 5 Compressive strength versus hydration age

2.4 纳米 C-S-H 对水泥水化过程的影响

通过分析抗折强度和抗压强度可知,掺入 0.03% 纳米 C-S-H 时,对水泥 3 d 前的强度提升最为明显,故选用掺量为 0.03% 的试样进行后续分析。利用 XRD 分析掺加 0.03% 纳米 C-S-H 水泥和参比样在不同龄期的水化产物,结果如图 6 所示。从图中可以看出,掺入纳米 C-S-H 后水化产物的晶相变化不大,仍以  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  和未水化的  $\text{C}_3\text{S}$  和  $\text{C}_2\text{S}$  为主。水化产物中观察到了  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{SiO}_2$  的衍射峰,这可能是由熟料中的矿物掺合料引起的。未观察到 C-S-H 的衍射峰,这是由于水化反应生成的 C-S-H 为非晶态<sup>[9]</sup>。水化 16 h 后空白组中才出现微弱的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  衍射峰,加入纳米 C-S-H 后,水化 8 h 后就出现了明显的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  衍射峰,衍射峰强度随养护时间而增大。因此纳米 C-S-H 的掺入提高了水泥熟料在 10℃下的水化反应进程。此外,相同

养护龄期下,水化产物中  $C_3S$  和  $C_2S$  的衍射峰也明显低于参比样,因此早期水化是通过加速  $C_3S$  和  $C_2S$  水化而实现的。水泥水化 72 h 时,掺有纳米 C-S-H 的浆体中各矿物含量与参比样相似。纳米 C-S-H 在水泥水化早期对水泥水化产物的生成有明显促进效果,72 h 后促进效果减弱,纳米 C-S-H 对水泥后期水化影响小。

分解<sup>[7]</sup>。随养护龄期的延长, $Ca(OH)_2$  的质量分数逐渐增加,且掺有纳米 C-S-H 的水泥净浆  $Ca(OH)_2$  质量分数均高于参比样。12 h、16 h 和 24 h 的  $Ca(OH)_2$  质量分数较参比样提高了 17.6%、21.3%、29.6%。水化 3 d 时,掺入纳米 C-S-H 和参比样的  $Ca(OH)_2$  含量几乎相同。因此,3 d 时纳米 C-S-H 对水泥水化进程影响较小,这与先前的 XRD 结果一致。

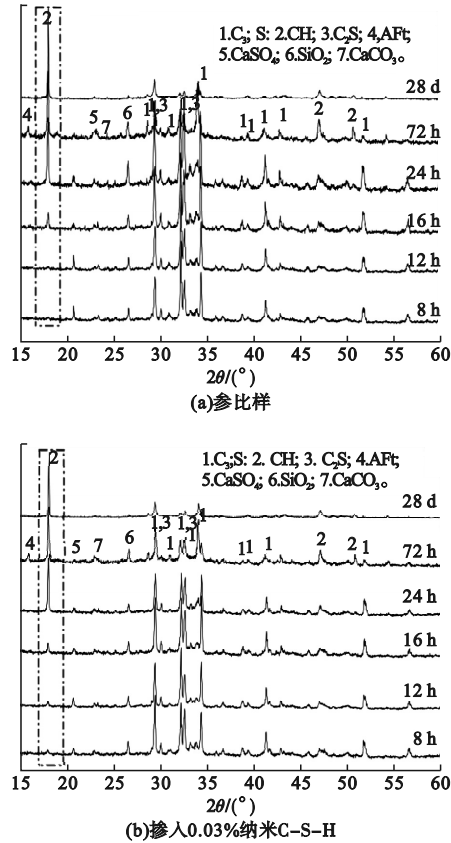


图6 10 °C下水化产物的XRD

Fig. 6 XRD patterns of hydration products at 10 °C

为了定量验证上述实验结果,对样品进行 TG 测试,结果如图 7 所示。热重量(TG)曲线表示样品在程序温度过程中随温度/时间的质量变化,热重微分(DTG)曲线表示质量变化速度随温度/时间的变化。从图中可以看出,DTG 曲线中有 3 个主峰:温度在 110 °C 左右时达到第一个峰值,这是 AFt 和 C-S-H 的脱水;温度在 460 °C 左右时达到第二个峰值,为  $Ca(OH)_2$  的分解;温度在约 700 °C 左右时达到第三个峰值,为  $CaCO_3$  的

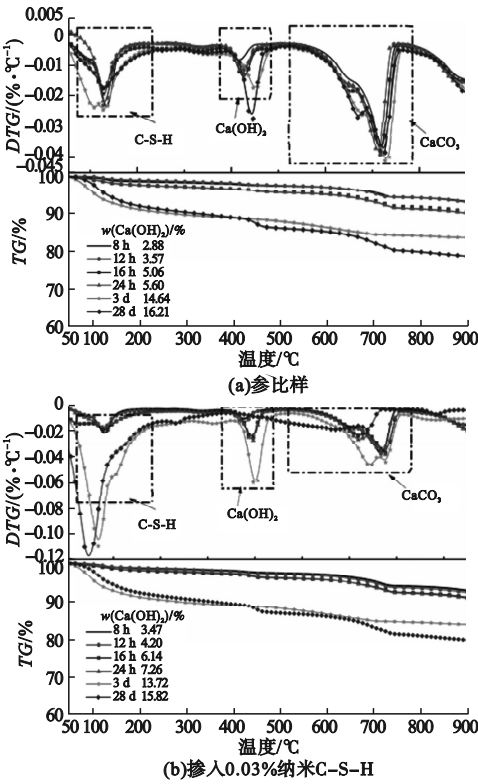
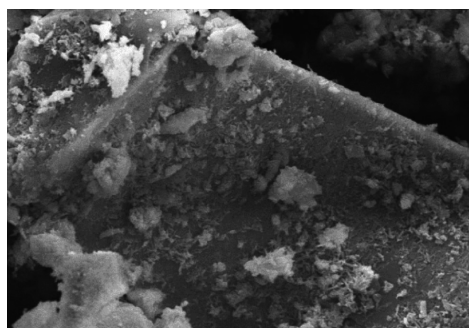


图7 10 °C下水化产物的TG图

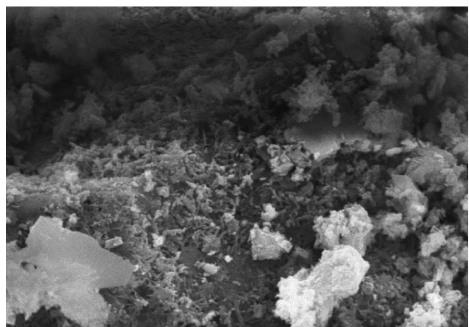
Fig. 7 TG patterns of hydration products under 10 °C

为了分析纳米 C-S-H 对水泥水化产物的影响,取掺有 0.03% 纳米 C-S-H 水泥净浆和空白水泥净浆进行 SEM 分析,结果如图 8 所示。从图中可以看出,参比样水化 16 h 时水化程度还较低,水泥颗粒表面有少量的水化产物,可以看到独立的水泥颗粒。而掺入 0.03% 纳米 C-S-H 可显著提高水泥的水化速度,水化 16 h 后水化产物的数量明显增多,并且水泥颗粒表面覆盖了细小的水化产物晶核。16 h 时对于未掺入纳米 C-S-H

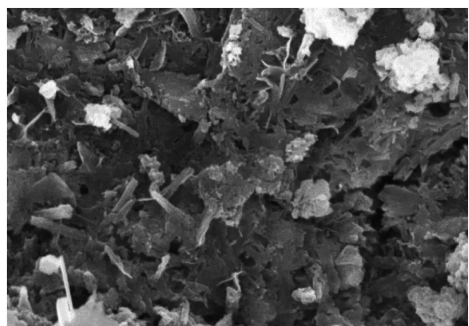
水泥浆体而言,仅靠自身水化产物较小,且产物结晶程度不高,大多是絮状且短小的凝胶产物,而掺入纳米C-S-H则有较大变化。纳米C-S-H的掺入对水泥3 d的水化产物形貌则没有明显影响。



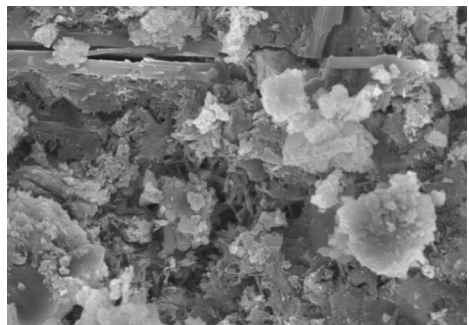
(a)参比样水化16 h



(b)掺入0.03%纳米C-S-H水化16 h



(c)参比样水化3 d



(d)掺入0.03%纳米C-S-H水化3 d

图8 10℃下水化产物SEM照片

Fig. 8 Morphology of hydration products under 10℃

### 3 结论

(1)纳米C-S-H悬浮液粒径尺寸较小,平均粒径为117.3 nm,分散稳定性好,且杂质较少。

(2)在10℃条件下,随着纳米C-S-H掺量的增加,水泥凝结时间逐渐缩短。掺量为0.05%效果最为明显,初凝时间和终凝时间较参比样分别缩短9.9%和10.4%;24 h时抗折强度和抗压强度较参比样分别提高了34%和33.5%。3 d龄期以后,纳米C-S-H对抗压强度没有明显的提升作用,且0.01%、0.05%掺量下水泥砂浆强度反而较参比样有所降低。合成的纳米C-S-H悬浮液可以作为水泥早强剂在低温下使用,但其长期性能还有待进一步研究。

(3)水化产物中出现了明显的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰, $\text{C}_3\text{S}$ 和 $\text{C}_2\text{S}$ 的衍射峰逐渐削弱。水化产物中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 质量分数在12 h、16 h和24 h时较参比样分别提高了17.6%、21.3%和29.6%。10℃条件下纳米C-S-H使用加速了水泥中 $\text{C}_3\text{S}$ 和 $\text{C}_2\text{S}$ 水化过程,促进生成水化产物。

### 参考文献

- [1] 刘华东,韩跃伟,吴鑫. C-S-H晶种早强剂的制备及低温性能研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(1): 68-71.  
(LIU Huadong, HAN Yuewei, WU Xin. Preparation of C-S-H seed early strengthening agent and research on low temperature performance [J]. New building materials, 2022, 49(1): 68-71.)
- [2] PLANK J, SAKAI E, MIAO C W, et al. Chemical admixtures—chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability [J]. Cement and concrete research, 2015, 78: 81-99.
- [3] 张奔,蔡茂涛,胡中平,等. 纳米C-S-H早强剂对混凝土性能的影响[J]. 混凝土世界, 2023(7): 49-52.  
(ZHANG Ben, CAI Maotao, HU Zhongping, et al. Effect of Nano-C-S-H early strength agent on the properties of concrete [J]. China concrete, 2023(7): 49-52.)
- [4] 张丰,白银,蔡跃波,等. 混凝土低温早强剂研究现状[J]. 材料导报, 2017, 31(21): 106-113.



- (ZHANG Feng, BAI Yin, CAI Yuebo, et al. Research status of low temperature early strength agents for concrete [J]. Materials reports, 2017, 31 (21): 106 – 113. )
- [5] WANG Fang, KONG Xiangming, JIANG Lingfei, et al. The acceleration mechanism of nano-C-S-H particles on OPC hydration [J]. Construction and building materials, 2020, 249 (20): 118734.
  - [6] 唐芮枫, 张佳乐, 王子明, 等. C-S-H 纳米晶种及其对水泥水化硬化的促进作用综述[J]. 材料导报, 2023, 37(9): 105 – 120.  
(TANG Ruifeng, ZHANG Jiale, WANG Ziming, et al. C-S-H nano-seed and its promoting effect on cement hydration and hardening: a review [J]. Materials reports, 2023, 37 (9): 105 – 120. )
  - [7] WANG Y, LU H, WANG J, et al. Effects of highly crystalized nano C-S-H particles on performances of portland cement paste and its mechanism [J]. Crystals, 2020, 10(9): 816.
  - [8] WEI He, GANG Liao. Effects of nano-C-S-H seed crystal on early-age hydration process of portland cement [J]. Fullerenes nanotubes and carbon nanostructures, 2022, 30 (1/6): 365 – 372.
  - [9] WEI He, GANG Liao. Investigation of the early-age performance and microstructure of nano-C-S-H blended cement-based materials [J]. Nanotechnology reviews, 2021, 10 (1): 1374 – 1382.
  - [10] 余林岑. 水化硅酸钙的制备及其对水泥水化过程的影响[D]. 上海: 华东理工大学, 2018.  
(YU Linchen. Preparation of calcium silicate (C-S-H) and the effect on the cement hydration process [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2018. )
  - [11] PLANK J, SCHOENLEIN M, KANCHANASON V. Study on the early crystallization of calcium silicate hydrate (C-S-H) in the presence of polycarboxylate superplasticizers [J]. Journal of organometallic chemistry, 2018, 869, 227 – 232.
  - [12] 徐智东, 梅军鹏, 王智鑫, 等. 纳米 C-S-H 对矿粉-水泥体系水化的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(1): 13 – 19.  
(XU Zhidong, MEI Junpeng, WANG Zhixin, et al. Effect of nano C-S-H on hydration of slag powder-cement system [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2022, 41 (1): 13 – 19. )
  - [13] 陈娇, 于诚, 慕儒, 等. 纳米水化硅酸钙的制备及其对水泥水化影响的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(5): 1429 – 1440.  
(CHEN Jiao, YU Cheng, MU Ru, et al. Research progress on preparation of nano calcium silicate hydrate and its influence on cement hydration [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2021, 40(5): 1429 – 1440. )
  - [14] FENG Qian, MAO Yuhang, PENG Zhigang, et al. Preparation and properties of low-temperature early strength material for nano-C-S-H gel seed [J]. Arabian journal for science and engineering, 2021, 47(5): 1 – 9.
  - [15] 张丰, 白银, 蔡跃波. 新型低温早强剂的制备与性能研究[J]. 水利水运工程学报, 2020 (2): 36 – 45.  
(ZHANG Feng, BAI Yin, CAI Yuebo. Preparation and properties of new type low-temperature early strength accelerator [J]. Hydro-science and engineering, 2020(2): 36 – 45. )
  - [16] 付华, 王鹏刚, 田砾, 等. 纳米 C-S-H-PCE 对免蒸养高强混凝土性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(1): 333 – 347.  
(FU Hua, WANG Penggang, TIAN Li, et al. Effect of nano C-S-H-PCE on the properties of high-strength non-steam-cured concrete [J]. Acta material composita sinica, 2024, 41(1): 333 – 347. )
  - [17] 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.  
(ZHANG Zhaoyang, CAI Yi, KONG Xiangming, et al. Influence of Nano C-S-H on cement hydration, pore structure of hardened cement pastes and strength of concrete [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2019, 47 (5): 585 – 593. )
  - [18] FUBING Z, MAI Z, CHUANLIN H, et al. Novel C-A-S-H/PCE nanocomposites: design, characterization and the effect on cement hydration [J]. Chemical engineering journal, 2021, 412(1): 128569.
  - [19] WANG Fang, KONG Xiangming, WANG Dongmin, et al. The effects of nano-C-S-H with different polymer stabilizers on early cement hydration [J]. Journal of the American ceramic society, 2019, 102(9): 5103 – 5116.
  - [20] 孟双, 宋建建, 许明标, 等. 新型低温固井早强剂性能研究 [J]. 钻井液与完井液, 2023, 40 (1): 96 – 102.  
(MENG Shuang, SONG Jianjian, XU Mingbiao, et al. Study on the performance of a new low temperature early strength agent for well cement slurries [J]. Drilling fluid & completion fluid, 2023, 40(1): 96 – 102. )
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)