文章编号:1007-9629(2025)06-0491-08

温度及软水环境对铝酸盐水泥基材料的影响

张 宇, 左晓宝*, 刘婧涵

(南京理工大学安全科学与工程学院,江苏南京 210094)

摘要:研究了铝酸盐水泥(CAC)基材料在软水环境中的力学性能变化及温度对其影响的机理。监测CAC砂浆抗压强度的同时,通过X射线衍射、热重分析、乙二胺四乙酸(EDTA)滴定和扫描电镜等分析了CAC净浆的物相组成和微观结构。结果表明:在20℃软水环境中,CAC水化产物的组成并未发生明显改变,且三水铝石凝胶的形成保证了材料长期性能的稳定;在60℃软水环境中,温度升高导致CAC水化产物的物相发生转变,软水的存在进一步增强了这一效应;在温度和软水的共同影响下,水化产物的相变及部分水化产物的溶解均破坏了CAC净浆的微观结构,降低了材料的性能。

关键词:铝酸盐水泥;产物相变;高温;软水环境;微结构 中图分类号:TU528.01 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.06.001

Effect of Temperature and Soft Water Environment on Aluminate Cement Based Materials

ZHANG Yu, ZUO Xiaobao*, LIU Jinghan

(School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The mechanical property changes of aluminate cement(CAC) based materials in soft water environments and the mechanisms influenced by temperature were studied. Compressive strength of CAC mortar was monitored, the phase composition and microstructure of the paste specimens were analyzed by X-ray diffractometer, thermogravimetry analysis, ethylene diamine tetraacetic acid(EDTA) titration and scanning electronic microscope. The results show that the composition of CAC hydration products do not change significantly in 20 °C soft water environment, and the formation of a large number of amorphous phase gibbsite in the paste ensures the stability of the long-term performance of the material. In the 60 °C environment, an increase in temperature triggers phase transitions, and the presence of soft water further enhances this effect. Under the combined influence of temperature and soft water, the transformation of the crystal products and dissolution of some phases lead to disruption of the CAC paste microstructure and pore creation, resulting in degraded material properties.

Key words : aluminate cement; product phase transition; high temperature; soft water environment; microstructure

中国提出了核电供热实现"水/热同产"的技术, 它能够在淡化海水的同时为北方地区供暖,满足了 对于淡水和清洁热能^[1]的需求。其中,输送高温淡化 海水的管道需要其内衬在高温和高纯水环境中具有 良好的力学性能和耐腐蚀性^[2-3],而硅酸盐水泥^[2,4-5]、 磷酸镁水泥^[6]以及氧氯化镁水泥^[7]的水化产物在高温 软水中的溶解会导致材料结构的破坏。

常被用于防火和防腐蚀保护层、结构修补材料

收稿日期:2024-10-19;修订日期:2024-11-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378242)

第一作者:张 宇(2000—),男,安徽池州人,南京理工大学硕士生。E-mail:zhangyu001127@163.com 通讯作者:左晓宝(1968—),男,安徽合肥人,南京理工大学教授,博士生导师,博士。E-mail:xbzuo@sina.com

以及能源储存材料的铝酸盐水泥(CAC)具有耐高 温、耐腐蚀和耐磨损^[8-10]等特点。低于 30 ℃时,其水 化产物水化铝酸一钙(CAH₁₀)、水化铝酸二钙 (C₂AH₈)以及三水铝石(AH₃)凝胶的性质稳定^[11-13], 它们在CAC浆体内形成致密的晶体-凝胶体网络结 构^[14],赋予了材料优异的性能。然而,在温度^[8,14-15]和 湿度^[16-17]升高时,CAC的水化产物发生转化生成水 化铝酸三钙(C₃AH₆)和AH₃,密度大于CAH₁₀和 C₂AH₈^[12,14]。硬化浆体在固化之后的体积保持一定, 会引起浆体内孔隙的增加,导致材料性能倒退,CAC 的开发和利用受到限制。由此,需要研究温度及软 水环境对CAC水化产物稳定性的影响,以便于分析 材料的腐蚀行为及其对性能的影响机理,为CAC在 特定环境中的应用提供理论依据。

本文对CAC浆体试件开展20、60℃的去离子 水浸泡试验,同时设立了干燥环境作为对照。通过 X射线衍射(XRD)、热重分析(TG)、乙二胺四乙酸 (EDTA)滴定和扫描电镜(SEM)分析了CAC浆体 的物相组成和微结构特点,结合浸泡液pH值和 Ca²⁺浓度的演变,揭示了CAC基材料力学性能演 变的机理。

1 试验

1.1 原材料

CAC由新兴铸管有限公司提供,其XRD图谱如 图 1 所示。由图 1 可见,CAC的矿物相主要由 CaAl₂O₄(CA)、CaAl₄O₇(CA₂)和Ca₂Al₂SiO₇(C₂AS) 组成。表1为CAC的化学组成(质量分数,文中涉及 的组成、水灰比等除特别说明外均为质量分数或质 量比)。由表1可见,CAC主要由Al₂O₃和CaO组成, 同时还包含少量的SiO₂及其他成分。试件制备及化 学分析用水均为去离子水,软水浸泡即用去离子水 浸泡。ISO标准砂的基本参数见表2。

1.2 样品制备

CAC 砂浆的配合比为水泥 450 g, ISO 标准砂 1 350 g, 去离子水 202.5 mL;净浆的配合比为水泥 50 g, 去离子水 22.5 mL。砂浆和净浆的水灰比均为 0.45。试件编号L、H和W、D分别表示 20、60 ℃和软 水浸泡、无水干燥环境。例如,LW表示在环境温度



| $\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$ | CaO | ${\rm SiO}_2$ | TiO_2 | $\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$ | MgO | $\mathrm{Na_2O}$ | $\rm K_2O$ | SO_3 | P_2O_5 |
|-----------------------------|-------|---------------|------------------|-----------------------------|------|------------------|------------|-----------------|----------|
| 43.84 | 24.10 | 5.24 | 1.75 | 1.68 | 0.49 | 0.48 | 0.32 | 0.28 | 0.13 |

为20℃条件下开展去离子水浸泡试验的试件,其余 依此类推。CAC砂浆试件制备参考GB/T17671— 2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行。

砂浆试件尺寸为40 mm×40 mm×40 mm。养 护期间,将砂浆及模具用保鲜膜密封后放置在(20± 1)℃、相对湿度98%以上的恒温恒湿养护箱内,24 h 后拆模并再次将砂浆试件密封养护至7 d。养护完成 后,一部分砂浆试件在20、60℃的去离子水中开展浸 泡试验,试件与软水的质量比为1:50;剩余试件用保 鲜膜密封并放置于20、60℃的恒温干燥箱中。同时制 备相应的净浆试件,搅拌均匀后将浆体倒入10 mm× 10 mm×10 mm的立方体硅胶模具中,进行与砂浆试 件相同的养护和试验过程。在服役0(对照组试件 control)、1、3、14、28、56 d时,分别取3个砂浆试件进 行抗压强度测试,结果取其平均值。同时,对净浆试 件进行 XRD、TG和SEM等微观测试。

1.3 试验方法

采用 YAW-50000J 型万能强度试验机,并参考 GB/T 17671—2021 对 CAC 砂浆进行抗压强度测 试。加载速率为(2.4±0.2) kN/s,取3次试验结果的 平均值作为抗压强度测定值。

净浆试件使用异丙醇浸泡48h以终止其水化, 并研磨成粉末过75μm(200目)筛。采用BrukerD8 Advance X型XRD对净浆粉末进行物相测试,工作

表 2 ISO标准砂的基本参数 Table 2 Basic parameters of ISO standard sand

| Table 2 Dask parameters of 150 standard sand | | | | | | | |
|----------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|--|--|
| Apparent density/ (kg•m ⁻³) | Fineness modulus | Bulk density/(kg \cdot m ⁻³) | Particle gradation | Water content(by mass)/ % | Soil content(by mass)/% | | |
| 2 600 | 2.44 | 1 550 | П | 3.6 | 0.6 | | |

电压为40 kV,工作电流为40 mA,靶材为Cu靶,扫描 范围为5°~55°,步长为0.015°,每步停留时间为0.2 s。

称量 9~13 mg 净浆粉末样品,采用 TGA/ SDTA851E型 TG,在充满 N₂的环境下以 10 ℃/min 的加热速率进行测试。采用 PHS-3C型 pH测试仪测 定浸泡试验中 CAC 净浆浸泡液的 pH值,并通过 EDTA 滴定法测定 Ca²⁺的溶出情况。具体方法如 下:(1)使用定性滤纸过滤浸泡液以去除悬浮颗粒。 (2)吸取 10 mL 滤液移至锥形瓶中,并用去离子水稀 释至 V_{w} =100 mL(稀释倍数 a=10),混合均匀。(3) 先后加入 2 mL稀盐酸以及 5 mL NaOH溶液,调节 溶液 pH值至 12~13,并滴入 7~8滴铬黑 T指示剂摇 匀。(4)用 EDTA 标准溶液(c(EDTA)=0.01 mol/L) 滴定至溶液由酒红色转变为蓝色,即到滴定终点,停 止滴定并记录 EDTA 标准溶液用量(V_{EDTA})。每个 样品进行 3 次滴定,并取其平均值作为 Ca²⁺浓度 ($c(Ca^{2+})$)的测定结果,其计算式为:

 $c(\operatorname{Ca}^{2+}) = V_{\operatorname{EDTA}} \cdot c(\operatorname{EDTA}) \cdot a / V_{w}$ (1)

选取破碎净浆试样的表面及内部断面部分进行 喷金处理以增强其导电性,随后采用FEIQuanta 250F型SEM观察其微观形貌,加速电压为15kV。

2 结果与讨论

2.1 砂浆试件的抗压强度

图 2 为不同温度下软水环境对 CAC 砂浆抗压强 度的影响。由图 2 可见:

(1)在20℃条件下,试件LW在浸泡1d后抗压 强度降低了3.5 MPa,但在3d时回升至81.7 MPa,较 浸泡前增加了3.6 MPa。此后,随着浸泡时间的延 长,试件LW的抗压强度持续上升,至56d时总增幅 为23.5 MPa,其增长速率呈现初期较快、后期减缓的 趋势。对于试件LD,其抗压强度在56d内稳定增 长,最终较服役前增加了29.2 MPa。在软水的影响 下,试件LW在1、3、14、28d时的抗压强度较试件LD 分别下降了10.0%、9.4%、3.5%和1.6%,二者抗压强 度的差距随着时间的推移逐渐缩小。在服役56d时, 试件LW抗压强度的发展已趋于稳定,而试件LD的 抗压强度仍在提升,两者之间的差距扩大至7.1%。 尽管如此,试件LW在此时已经展现出了良好的力学 性能。由此可见,在20℃的软水环境中,CAC基材 料的力学性能在早期虽略有下降,但其早期阶段具 有较好的强度增长,材料仍能达到较高的力学性能 水平。

(2)当温度升至 60 ℃时,试件 HW 和 HD 在服役1 d 后,其抗压强度均降至服役前的一半。尽管此后二者的抗压强度均有所增长,但试件 HW 抗压强度的增长速率明显较慢。在服役 56 d 后,试件 HW 的抗压强度为 51.7 MPa,远低于 HD,仅为后者抗压强度的 70.5%。这一结果表明,高温环境会削弱 CAC 基材料的力学性能。在此基础上,软水的存在进一步对材料长期的力学性能产生了不利的影响。





2.2 净浆试样的物相分析

图 3 为不同服役环境下 CAC 净浆的 XRD 图谱。 由图 3 可见:

(1) 服役前CAC净浆内的水化产物相为 CAH₁₀。在20℃条件下,试件LW和LD的主要水化 产物仍为CAH₁₀,并且随着服役时间的延长,其衍射 峰的强度逐渐增强。同时,未水化的CA、CA₂衍射 峰的强度逐渐减弱,表明试件的水化程度不断提高。 然而,在服役56d后,试件LW中可以检测到微弱的 C₂AH₂衍射峰。这说明在20℃条件下,亚稳态的 CAH₁₀是CAC水化的唯一晶态产物,为材料早期提 供了高强度。且在恒定温度下,56d内亚稳态产物 CAH₁₀几乎不发生相变;在软水环境中,软水的存在 可能会促使CAH₁₀转变为C₂AH₈,从而限制材料性 能的发展。结合抗压强度变化规律来看,试件LW 仍有着较高的抗压强度,材料的力学性能没有发生 明显倒退。

(2)对于高温服役环境下的试件 HW 和 HD,其 净浆内的水化产物全部转变为 C₃AH₆和 AH₃。在1~ 14 d内,2种环境下的 C₃AH₆和 AH₃衍射峰逐渐增 强。随着服役时间的延长,试件 HD 中 C₃AH₆和 AH₃ 衍射峰仍保持增长趋势,而在试件 HW 中,其衍射峰 略有下降,且低于试件 HD。结合抗压强度的变化规 律,高温条件下水泥基材料中的亚稳态产物在1d内 迅速转变,此快速的相变过程导致浆体结构劣化,从 而引起材料强度的显著降低。但是,在服役期间物 相组成的相对稳定以及继续水化所形成的C₃AH₆和 AH₃^[18-19]为材料提供了一定的强度支持,使得水泥基 材料仍然具备较高的力学性能。在软水环境下,由 于水化产物相对含量的减少,可能会对CAC基材料 的力学性能产生一定的影响,但其具体影响机理尚 不明确。



Fig. 3 XRD patterns of CAC pastes in different service environments

2.3 TG-DTG分析

图 4 为 20 ℃ 服役环境中 CAC 净浆的 TG-DTG 曲线。图 5 为 60 ℃ 服役 环境中 CAC 净浆的 TG-DTG 曲线。由图 4、5 可见,加热过程中共发生 了 4 个热效应:50~105、105~200、200~275、275~ 400 ℃,分别对应于 AH₃凝胶、CAH₁₀和 C₂AH₈、AH₃ 晶体及 C₃AH₆的质量损失^[11,13-14]。

通过分析试样的TG曲线,进一步确定水化相组 成及水化相相对含量的变化。试样在不同服役环境 下水化产物的相对质量损失百分比如表3所示。在 20℃条件下,根据XRD测试结果,服役前试件中的 晶态水化产物仅有CAH₁₀,其对应于120℃的失重 峰。此外,TG-DTA曲线中约70、250℃处显示出另 外2个失重峰,分别对应于AH₃凝胶和AH₃晶体^[19]。 由图4(a)和表3可知:试件LW的失重进程相对 活跃;在50~105℃范围内,AH₃凝胶的失重峰随着服 役时间的延长明显增强,同时250℃处AH₃晶体的失 重峰也略有增加;在105~200℃亚稳相失重范围内, CAH₁₀的失重峰轻微左移并在175℃处出现较弱的失 重峰,表明CAH₁₀的含量发生变化,生成产物C₂AH₈。

由图 4(b)可见,试件 LD 表现出更为稳定的特性,除 AH₃凝胶外,试件 LD 中亚稳态产物 CAH₁₀和 AH₃晶体的失重峰及其相对含量在 56 d 内并无明显 的改变。结合先前分析,在 20 ℃的服役环境下,除了 CAH₁₀外,AH₃凝胶和 AH₃晶体的存在对 CAC 基材 料的长期强度也起到了积极作用,尤其是凝胶含量 的增加,使得即使软水环境下,CAC 基材料仍能保持 良好的力学性能。



Fig. 4 TG-DTG curves of CAC paste in 20 °C service environment

由图 5(a)可见:当服役温度升高至 60 ℃时,试件 HW和HD失重峰的强度及位置发生了明显的改变, 在此温度下,AH₃晶体和C₃AH₆因其相近的失重温度 范围而在 DTG 曲线中形成了较大的双峰,主要的质 量损失发生在 200~400 ℃;试件 HW 中的 AH₃凝胶 和亚稳态产物发生了相变,在 285 ℃处出现了明显的 C₃AH₆失重峰,该峰随着服役时间的延长逐渐增强, 即稳态产物的含量增加;在 200~275 ℃范围内,AH₃ 晶体的失重峰在最初的 1~14 d内随着服役时间的延 长逐渐增强,但在服役56d后,失重峰的峰值减弱并 发生偏移,表明AH₃逐渐由微晶转变为晶体^[19],发生 晶型转变且含量相对减少。

由图 5(b)可见,对于试件 HD,C₃AH₆的失重峰同 样随着服役时间的延长而增加,但其 AH₃晶体的失重 峰偏移不显著且峰值强度相对稳定,晶型转变并不明 显。因此,高温环境下的亚稳态产物和凝胶不稳定发 生相变,微晶逐渐向晶体转变,且在软水环境下 AH₃ 凝胶的晶型转变更为显著,相对含量更低。





2.4 浸泡液 pH 值和 Ca²⁺浓度

图 6 为软水环境下 CAC 净浆试件浸泡液的 pH 值及 Ca²⁺浓度。由图 6 可见:

(1)随着浸泡时间的延长,2种环境下浸泡液的 pH值均呈现上升的态势。在浸泡初始阶段,试件 LW和HW浸泡液的pH值迅速增加,其中试件HW 的pH值高于试件LW。经过7d的浸泡后,二者的 pH值上升至约12.6,此后增长速率逐渐减缓并最终 趋于稳定。同时,2种环境下的差异也随之减少。结 合前文试验结果,CAC基材料中的AH₃凝胶在浸泡 过程中有所减少,这表明在软水环境下,CAC硬化浆 体的水化产物AH₃凝胶会发生一定程度的溶解。尤 其是在高温环境下,浆体中的AH₃凝胶迅速溶出并 转变为AH₃晶体。然而,在长期服役期间,由于浆体 的持续水化和离子的迁移,温度对材料内物相溶出 的影响较为有限。

(2)在28d内,2种浸泡液中的Ca²⁺浓度也有所 提升,且试件HW浸泡液中的Ca²⁺浓度始终高于试 件LW,这与pH值的变化趋势一致。在28~56d,试 件HW中的Ca²⁺浓度没有明显变化,而试件LW中 的Ca²⁺浓度仍在持续增加,但其增长速率较为缓慢。 这表明即使在高温环境下,物相的溶出也相对有限。 表3 试件在不同服役环境下的相对质量损失

第28卷

| Table 5 Relative mass loss of specimens in different service environments | | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------|------------|------------------|-------------------------|-----------|----------------|---------------------|
| Specimen | Time of exposure/d | | | | | | |
| | | AH_3 gel | Metastable phase | AH_3 crystal | C_3AH_6 | Residual phase | 1 otal mass loss/ ½ |
| Control | 0 | 21.38 | 26.90 | 34.49 | 13.15 | 4.08 | 21.86 |
| | 1 | 21.25 | 28.16 | 33.55 | 12.73 | 4.31 | 23.04 |
| LW | 14 | 25.69 | 26.71 | 30.43 | 13.40 | 3.77 | 24.11 |
| | 56 | 25.15 | 26.71 | 31.77 | 12.50 | 3.87 | 25.83 |
| LD | 1 | 23.47 | 26.75 | 32.67 | 13.19 | 3.92 | 22.39 |
| | 14 | 25.16 | 25.27 | 31.07 | 14.68 | 3.82 | 22.70 |
| | 56 | 24.14 | 24.20 | 32.31 | 15.01 | 4.34 | 23.10 |
| HW | 1 | 4.32 | 9.50 | 48.85 | 31.75 | 5.58 | 20.62 |
| | 14 | 3.89 | 10.10 | 48.46 | 32.36 | 5.19 | 21.05 |
| | 56 | 2.75 | 11.38 | 54.00 | 25.62 | 6.25 | 21.97 |
| HD | 1 | 4.65 | 9.10 | 47.13 | 33.97 | 5.15 | 20.33 |
| | 14 | 2.72 | 6.39 | 48.24 | 37.56 | 5.09 | 20.40 |
| | 56 | 2.88 | 7.42 | 54.08 | 30.51 | 5.11 | 20.84 |



图 6 软水环境下 CAC 净浆试件浸泡液的 pH 值及 Ca²⁺浓度

Fig. 6 pH values and Ca²⁺ concentration of soaking solution of CAC paste specimens in soft water environment

这种现象主要有以下2个因素引起:(1)在浸泡初期, 浆体与浸泡液之间存在较大的pH值和离子浓度梯 度,从而导致水化产物迅速溶解,pH值及Ca²⁺浓度变 化较为明显。随着溶解过程的进行,浸泡液逐步接 近饱和状态,溶解速率减缓,因此2种温度下的pH值 和Ca²⁺浓度差异随着浸泡时间的延长而减少。(2)由 于物相的转变对浆体结构造成了一定的破坏,导致 浆体内的水化产物更快溶出,故60℃下的浆体浸泡 液初期pH值与Ca²⁺浓度均高于20℃下。随着温度 的升高和浸泡时间的延长,亚稳态水化产物向稳态 产物的转变以及无定形的AH₃向晶态AH₃的转换, 其溶解度也随之降低,溶解速率变缓^[13],pH值与Ca²⁺ 的变化逐渐趋于稳定。此外,结合抗压强度、XRD和 TG测试的结果,在低温环境下,由于软水对CAC基 材料水化的促进作用使得AH₃凝胶生成,因此亚稳 相的溶解对材料性能的影响并不大。

2.5 微观结构

为验证前述分析结果,并进一步研究温度和软 水环境对CAC基材料微观结构的影响,此部分对不 同温度的软水环境下净浆试件的表面和断面进行了 显微观察。试件LW、HW服役56d后表面及断面的 微观形貌分别如图7、8所示。

由图7可见:

(1)试件LW表面生成了大量的板片状晶体。结合XRD测试结果,这些晶体为C₂AH₈,生长发育良好,尺寸可以达到约25μm。C₂AH₈晶体之间层层堆叠并相互交织,且晶体周围可以观察到较多非晶态的AH₃凝胶,这些非晶相产物填充于晶体的缝隙间。

(2)试件LW断面处并没有观察到明显的板片状 晶体生成,而是由截断的棱柱状CAH₁₀晶体组成完 整密实的浆体结构,其浆体间显示出较高的搭接强 度和较为集中的晶体分布。此外,还可以观察到某 些浆体部分有板片状晶体形成的迹象,但并未完全 发育成熟,这可能是C₂AH₈在CAH₁₀位点上的转换 过程^[12,14]。这一现象表明,在软水环境下,CAH₁₀更 容易转变为C₂AH₈且有较多的AH₃凝胶生成,这与 先前XRD和TG测试结果相吻合。尽管如此,由于 C₂AH₈晶体之间的层层堆叠以及非晶相的填充,加之 C₂AH₈的大量生成仅发生于试件的表面,内部并没有 发生明显转变。因此,这并不会对材料造成过多的 影响,CAC基材料依然保持了良好的力学性能。

由图8可见:

(1)当服役环境温度升高至60℃时,试件HW表



图 7 试件 LW 服役 56 d 后的微观形貌 Fig. 7 Microscopic morphology of specimen LW after 56 d of service





面基体出现明显的溶蚀痕迹,可以观察到浆体表面 处有较多因溶解后浆体流失形成的坑洼,导致表面 变得凹凸不平。在某些破坏较严重的区域出现了孔 洞,其周围可以观察到形似正方体的晶态产物 C₃AH₆,这可能是亚稳态晶体产物转换所形成的。

(2)试件 HW 断面处则更为平整,晶态产物形状 清晰可见。除了可以观察到明显的正方体 C₃AH₆晶 体之外,还可以发现较多的针片状 AH₃。整体来看, 由于高温和软水的共同作用,CAC 基材料的遭受了 更为严重的破坏。在这种环境下,仅有 C₃AH₆晶体 相对稳定,其他水化产物发生转换或溶解,导致 CAC 基材料浆体流失、产生孔隙并且缺乏足够的非晶相 来填充这些孔隙,从而影响了 CAC 基材料的力学 性能。

3 结论

(1)在20℃服役环境中,软水对铝酸盐水泥 (CAC)浆体的影响相对有限,除了少量水化铝酸二 钙(C₂AH₈)随着时间的推移逐步形成外,其他水化产 物的组成未发生显著变化。此外,CAC浆体中水化 铝酸一钙(CAH₁₀)与非晶/微晶相三水铝石(AH₃)的 溶出程度并不明显,且由于AH₃凝胶的形成,有效地 维持了材料性能的稳定。因此,在此温度下,软水环 境并不会过于限制CAC基材料性能的发展,CAC基 材料仍能保持良好的力学性能。 (2)当温度升高至60℃时,高温显著加快了水化 产物的相变过程,同时软水的存在也进一步增强了 这一效应。在温度和软水的共同影响下,晶态水化 产物的转变以及部分水化产物的溶解均导致CAC 浆体的微结构受到破坏,形成孔隙,并且缺乏足够的 非晶相来填充这些孔隙,进而加剧了CAC基材料的 劣化,影响了其力学性能。

参考文献:

- [1] 新华社.中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做 好碳达峰碳中和工作的意见[N].人民日报,2021-10-25(001). Xinhua News Agency. Opinions of the State Council of the Central Committee of the Communist Party of China on the complete and accurate implementation of the new development concept and doing a good job of peak carbon achievement and carbon neutrality[N]. People's Daily, 2021-10-25(001). (in Chinese)
- [2] 汤玉娟, 左晓宝, 殷光吉, 等. 加速溶蚀条件下铸铁管内衬水泥 砂浆的孔结构演变规律[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 239-244, 250.

TANG Yujuan, ZUO Xiaobao, YIN Guangji, et al. Evolution of pore structure of cement mortar lined in ductile iron pipe under accelerated leaching[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20 (2):239-244, 250. (in Chinese)

[3] ZHANG H Y, LIU D B, ZHAO L T, et al. Corrosion mechanisms of ductile iron pipes in water distribution system: Impacts of ionic strength and cement mortar lining coverage[J]. Desalination and Water Treatment, 2020, 197:237-248.

[4] 郭春伶.钙溶蚀条件下混凝土性能劣化规律研究[D].杭州:浙 江大学,2012.

GUO Chunling. Study on the deterioration law of concrete properties under calcium dissolution conditions[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)

- [5] 余健,左晓宝,汤玉娟.软水环境下砂浆钙溶蚀过程及孔隙率 变化分析[J].南京理工大学学报,2016,40(3):366-373.
 YU Jian, ZUO Xiaobao, TANG Yujuan. Analysis of calcium leaching process and porosity change of mortar under environment of soft water[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2016, 40(3):366-373. (in Chinese)
- [6] 李东旭,李鹏晓,冯春花.磷酸镁水泥耐水性的研究[J].建筑 材料学报,2009,12(5):505-510.
 LI Dongxu, LI Pengxiao, FENG Chunhua. Research on water resistance of magnesium phosphate cement[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(5):505-510. (in Chinese)
- [7] 李晓晴, 卞立波, 丁林娜, 等. 丙烯酸乳液改性氯氧镁水泥的 性能及其机理研究[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(6):479-486.
 LI Xiaoqing, BIAN Libo, DING Linna, et al. Properties of acrylic emulsion modified magnesium oxychloride cement and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(6): 479-486. (in Chinese)
- [8] KLAUS S R, NEUBAUER J, GOETZ-NEUNHOEFFER F. Hydration kinetics of CA₂ and CA—Investigations performed on a synthetic calcium aluminate cement[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 43:62-69.
- [9] 李磊,王茹,武雪杉,等.HPMC对铝酸盐水泥-石膏二元胶凝体系砂浆性能的影响[J].建筑材料学报,2022,25(4):415-423.
 LI Lei, WANG Ru, WU Xueshan, et al. Effect of hydroxypropyl

methyl cellulose on aluminate cement-gypsum mortar[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):415-423. (in Chinese)

- [10] 张尚枫,宋茂林,张朝阳,等.磷酸盐改性铝酸盐水泥的研究 与应用进展[J].建筑材料学报,2024,27(9):824-831,845.
 ZHANG Shangfeng, SONG Maolin, ZHANG Chaoyang, et al. Progress of research and applications in phosphate modified calcium aluminate cement[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(9):824-831,845. (in Chinese)
- [11] GOSSELIN C, GALLUCCI E, SCRIVENER K. Influence of self heating and Li₂SO₄ addition on the microstructural development of calcium aluminate cement [J]. Cement and

Concrete Research, 2010, 40(10):1555-1570.

- [12] 夏忠锋,王周福,刘浩,等.铝酸钙水泥水化产物转化过程及 调控研究进展[J].硅酸盐学报,2022,50(12):3323-3336.
 XIA Zhongfeng, WANG Zhoufu, LIU Hao, et al. Research progress on conversion process and regulation of hydrates of calcium aluminate cement[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(12):3323-3336. (in Chinese)
- [13] LOTHENBACH B, PELLETIER-CHAIGNAT L, WINNEFELD F. Stability in the system CaO-Al₂O₃-H₂O[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42:1621-1634.
- [14] 夏忠锋. 铝酸钙水泥水化过程调控及微结构演变机理研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2022.
 XIA Zhongfeng. Research on the regulation of hydration process and microstructure evolution mechanism of calcium aluminate cement [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [15] 王思纯,廖宜顺,万世辉.不同温度下矿渣对铝酸盐水泥早期 水化行为的影响[J].硅酸盐通报,2022,41(4):1343-1351,1368.
 WANG Sichun, LIAO Yishun, WAN Shihui. Effect of GGBFS on early hydration behavior of calcium aluminate cement at different temperature[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022,41(4):1343-1351,1368. (in Chinese)
- [16] HUELLER F, NEUBAUER J, KAESSNER S. Hydration of calcium aluminates at 60 °C—Development paths of C₂AH*x* in dependence on the content of free water[J]. Journal of American Ceramic Society, 2019, 102(7):4376-4387.
- [17] 张阳,李东红,王毅,等.自由水对铝酸钙水泥水化产物之间 转化的影响[J].耐火材料,2021,55(5):435-438.
 ZHANG Yang, LI Donghong, WANG Yi, et al. Effect of free water on transformation of hydrates of calcium aluminate cement [J]. Refractories, 2021, 55(5):435-438. (in Chinese)
- [18] 常钧,张洋洋,尚小朋,等.AH₃及水化程度对硫铝酸盐水泥强度的影响[J].建筑材料学报,2016,19(6):1028-1032.
 CHANG Jun, ZHANG Yangyang, SHANG Xiaopeng, et al. Effects of AH₃ phase content and hydration degree on the strength of calcium sulfoaluminate cement [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6):1028-1032. (in Chinese)
- [19] ZHANG Y Y, ZHAO Q X, GAO Z M, et at. Nanostructural evolution of Al(OH)₃ gel formed by the cubic and orthorhombic ye' elimite clinkers of calcium sulfoaluminate cements in an ultra-wide hydration temperature range[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 150:106607.