

引用本文: 谢青海, 孙成建, 肖建庄, 等. 海水海砂拌合砂浆高温损伤分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(2): 11-18.

XIE Qinghai, SUN Chengjian, XIAO Jianzhuang, et al. Thermal damage of seawater and sea sand mortar after elevated temperatures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(2): 11-18.

DOI: 10.19815/j.jace.2021.11013

海水海砂拌合砂浆高温损伤分析

谢青海^{1,2}, 孙成建¹, 肖建庄², 宗钟凌³

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092;
3. 江苏海洋大学 江苏省海洋工程基础设施智能建造工程研究中心, 江苏 连云港 222005)

摘要: 采用天然海水海砂配制了水灰比分别为 0.40 和 0.47 的砂浆, 研究了其在不同高温作用后的力学性能退化及微观结构损伤。通过三点弯曲及单轴压缩试验, 测得了海水海砂拌合砂浆 (SSM) 抗折与抗压强度随温度变化情况。结合数字图像相关法 (DIC) 实时捕捉了三点的弯曲荷载作用下 SSM 变形发展过程。通过热重分析测得了海水拌合水泥净浆随温度失重情况; 通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察并分析了高温后净浆的微观结构损伤情况。结果表明: SSM 高温后抗折与抗压强度随温度升高出现先增长后降低的趋势, 抗折强度相比抗压强度退化更严重; 建立的抗折与抗压强度退化公式与试验吻合较好; DIC 结果显示在同等应力水平作用下, 温度越高, SSM 跨中应变发展越充分, 峰值应力时跨中变形越大; 热重分析结果显示, 随温度升高, 水灰比越大的净浆质量损失越多; 扫描电镜结果显示, 净浆内部结构随温度升高越来越疏松。

关键词: 海水海砂拌合砂浆; 高温作用; 数字图像相关法; 热重分析; 强度退化; 微观结构损伤

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)02-0011-08

Thermal damage of seawater and sea sand mortar after elevated temperatures

XIE Qinghai^{1,2}, SUN Chengjian¹, XIAO Jianzhuang², ZONG Zhongling³

(1. School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China;
2. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Jiangsu Ocean Engineering Research Center for Intelligent Infrastructure Construction, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, Jiangsu, China)

Abstract: Natural seawater and sea sand were adopted to mix mortars with water-cement ratios of 0.40 and 0.47, and the mechanical behavior degradation and microstructure damage were investigated after elevated temperatures. Three-point bending and axially compression tests were conducted to obtain the changes of flexural and compressive strength of seawater and sea sand mortar (SSM) after elevated temperature. Combined with digital image correlation (DIC) method, the deformation development process of SSM under three-point bending load was captured in real time. Thermogravimetry analysis was performed to measure the mass loss of seawater mixed cement paste under elevated temperatures. The microstructure damage of the paste after high temperature was observed and analyzed by scanning electron microscope (SEM).

收稿日期: 2021-11-02

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2020M681390); 江苏省自然科学基金项目 (BK20210925);

江苏省高等学校自然科学研究面上项目 (20KJB560020)

作者简介: 谢青海 (1990-), 男, 工学博士, 讲师, E-mail: qinghai2019@jou.edu.cn.

The results show that after high temperature, the flexural and compressive strength of SSM increase first and then decrease with the increase of temperature, and the degradation of flexural strength is larger than that of compressive strength. The established degradation formula of flexural and compressive strength is in good agreement with the test. DIC results show that under the same stress level, the higher the temperature is, the more fully the SSM mid-span strain develops, and the greater the mid-span deformation at peak stress. The thermogravimetry analysis results show that with the increase of temperature, the greater the water-cement ratio, the more the mass loss of the slurry. SEM results indicate the microstructure of paste becomes notably looser after higher temperature.

Key words: seawater and sea sand mortar; elevated temperature; digital image correction method; thermogravimetry analysis; strength degradation; microstructure damage

0 引言

为应对淡水与河砂资源日益紧缺问题,国内外学者已开展直接利用海水海砂配制混凝土可行性的研究^[1-2]。得益于新型耐腐蚀增强材料的研发与应用,海水海砂混凝土中钢筋锈蚀问题得以规避^[3],这使得海水海砂混凝土作为结构用混凝土近年来得到越来越广泛的研究^[1,4]。国内外学者展开了海水海砂混凝土早期性能^[5-6]、硬化后的力学性能^[7-9]以及构件受力性能^[10-12]的研究。

火灾发生频率高,是建筑结构服役期间最可能遭遇的灾害之一,严重时会引起结构倒塌^[13]。研究火灾后建筑材料性能对结构抗火设计与灾后结构修复有重要意义^[14]。为保证海水海砂混凝土安全应用,其高温力学性能需得到充分认识,而目前相关研究较少^[1,4]。Li 等^[15]通过试验研究发现掺入海水海砂略微降低了矿渣混凝土高温后的残余抗压强度;Qu 等^[16]通过对比研究发现经历相同高温后海水海砂浆体抗折与抗压强度退化程度均比淡水河砂浆体小。张凯等^[17]研究了海水海砂对钢纤维粉末混凝土高温后力学性能的影响,发现采用海水海砂可大幅度提高混凝土高温后的强度,并延缓了抗压强度随高温的退化。基于以上研究结果可发现,海水及海砂的加入对混凝土高温力学性能的影响尚无定论。

由于海水海砂富含溶解盐,采用海水海砂配制混凝土时将带入氯离子与硫酸根离子,影响水泥水化进程与产物生成^[18],造成混凝土微观结构的改变,进而影响混凝土早期与硬化性能。黄一杰等^[19]通过试验研究发现,海砂中氯离子浓度越高,混凝土的强度与弹性模量也越高。火灾高温作用同样会改变混凝土微观结构,影响其力学性能。对微观结构

的观察与分析有助于理解海水海砂混凝土高温力学性能的变化。

数字图像相关法(DIC)在土木工程试验中应用越来越广泛,并应用于混凝土高温性能的研究。Liu 等^[20]将基于 DIC 技术得到的混凝土高温后的受压应力-应变曲线与基于引伸计的曲线进行对比,发现吻合较好,认为 DIC 能有效地给出混凝土受压时的全场应变。时金娜等^[21]基于 DIC 分析得到的应变数据,建立了玄武岩纤维混凝土高温后的应力-应变曲线。赵燕茹等^[22]基于 DIC 技术分析了高温后混凝土抗折损伤。以上研究表明,DIC 技术能可靠给出混凝土高温后变形数据。

本文采用天然海水海砂配制水泥砂浆,采用三点弯曲试验结合 DIC 技术,研究高温后海水海砂拌合砂浆强度与变形发展情况。基于热重分析,研究海水拌合水泥净浆的质量随温度变化情况。借助扫描电子显微镜,观察分析海水拌合水泥净浆高温后的内部微观结构。通过以上宏观与微观层次的研究手段,揭示海水海砂拌合砂浆高温损伤情况,为进一步分析海水海砂混凝土高温性能提供参考。

1 试验材料

试验采用黄海海域海州湾的天然海水海砂。通过离子色谱法,测得海水中氯离子浓度为 $14.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,硫酸根离子浓度为 $1.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。用 5 mm 网孔筛去掉海砂中较大尺寸贝壳后,测得海砂细度模数为 2.33,属于中砂。同样采用离子色谱法测得海砂附着氯离子含量为 0.13%,硫酸根离子含量为 0.03%。通过盐酸清洗法测得海砂中的贝壳含量为 1.53%。水泥采用市售 P. O42.5 普通硅酸盐水泥,减水剂采用固态粉末状聚羧酸减水剂。

试验共配制两批海水海砂拌合砂浆(SSM)试

块,其中 SSM47 砂浆水灰比为 0.47,海水、海砂、水泥、减水剂配合比为 0.47 : 2.60 : 1.00 : 0.003; SSM40 砂浆水灰比为 0.40,海水、海砂、水泥、减水剂配合比为 0.40 : 2.00 : 1.00 : 0.003。根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—1999)浇筑 40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体,在标准条件下养护 28 d 后,取出养护室以备进一步试验。另外,将海水海砂浆体中的海砂去除后,配制相应的海水拌合水泥净浆 SP47 和 SP40,与砂浆同条件养护,用于热重分析和高温后微观结构观察。

2 试验方法

2.1 高温试验

为避免可能出现的高温爆裂,首先将砂浆及水泥净浆试块放入烘箱,在 105 ℃±5 ℃下烘干 24 h。等待试块完全冷却后,放入电阻炉中,按 10 ℃·min⁻¹速率升温,分别加热至 200、400、600、800 ℃,达到预定温度后恒温 1 h,以便试块内外达到均匀温度^[23]。然后随炉冷却至室温,升温曲线如图 1 所示。每个温度砂浆试块数量为 6 个,水泥净浆试块数量为 1 个。

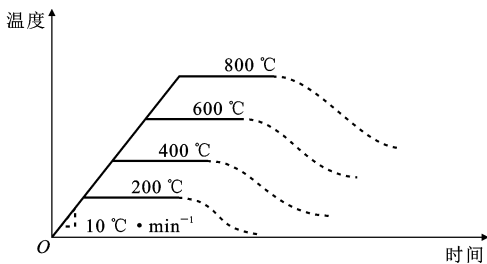


图 1 升温曲线
Fig. 1 Heating curve

2.2 残余力学性能试验

根据《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—1999),采用三点弯曲试验,测得海水海砂拌合砂浆试块经历不同高温后的抗折强度与抗压强度。每个温度的抗折强度数据基于 6 个试块,抗压强度则为 12 个试块。

为捕捉不同高温后试件在三点弯曲作用下的变形发展情况,同步采用 DIC 技术进行图像捕捉与变形分析。每种水灰比的 SSM,每个温度选取 1 个试块,所有试块事先喷涂白色底漆,然后喷涂黑色随机斑点。采用 12×9 圆点标定板(圆点间距为 6 mm)进行图像采集标定。标定完成后进行三点弯曲试验,同步进行图像采集。然后取跨中约 50 mm×40 mm 区域进行应变场演化分析。DIC 采集设备与加

载设备如图 2 所示。

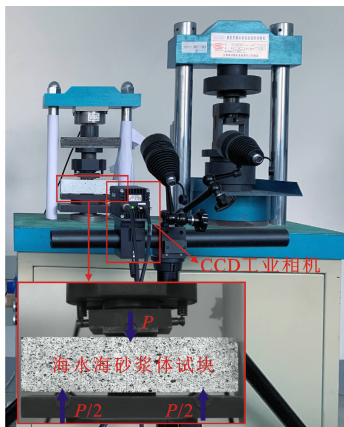


图 2 DIC 采集设备与加载设备
Fig. 2 DIC acquisition and loading equipment

2.3 热重分析

将未经高温作用的海水拌合水泥净浆试块压碎、研磨,并通过 75 μm 直径网孔筛,进行筛分取样,如图 3 所示。每种水灰比净浆试样取 10 mg 左右粉末,放入 STA 449 F3 同步热分析仪,在氮气氛围中进行热重分析,实时记录净浆质量随温度变化情况。分析温度从常温到 1 000 ℃,升温速率为 10 ℃·min⁻¹。

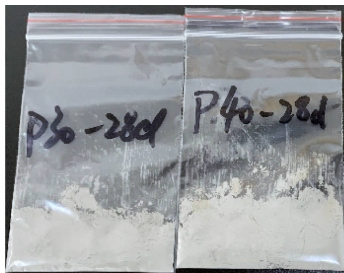


图 3 热重分析用净浆粉末
Fig. 3 Paste powder for thermogravimetry analysis

2.4 扫描电子显微镜分析

将经历不同温度作用后的海水拌合水泥净浆试块破碎,每个水灰比的净浆在每个温度后选取较为平整的一个碎片,如图 4 所示。在喷金仪器中完成表面镀金后,送入 JSM-6390LA 扫描电子显微镜中进行微观结构观察。

3 试验结果与分析

3.1 荷载-位移曲线

基于 DIC 分析得到的荷载-位移曲线如图 5 所示。可以发现,随着温度升高,曲线变得越来越平缓,说明高温降低了海水海砂拌合砂浆试件的抗弯刚度。由图 5 可以看出,200 ℃时刚度略微下降,而



图 4 SEM 用净浆样品

Fig. 4 Paste samples for SEM

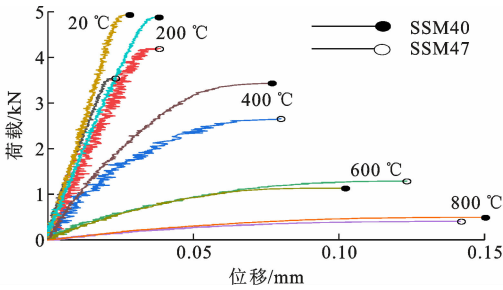


图 5 SSM 荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-deformation curves of SSM

400 °C 及之后的温度时试件抗弯刚度急剧下降。通过对比可以发现,在大多数情况下,SSM40 的承载力高于 SSM47,说明在不同温度后,水灰比小的试块承载力更高。这种差异随着温度升高而减小,在 600、800 °C 时,承载力差别变小。

基于荷载-位移曲线,得到不同温度后峰值荷载对应的跨中挠度,如图 6 所示。可以看出,大多数情况下,SSM40 与 SSM47 经历不同高温后的峰值挠度差别不大。常温到 200 °C 时,峰值挠度平缓增加,而从 200~400 °C 时,峰值挠度成倍增加,之后挠度随温度呈比例增加。这说明,400 °C 以上高温对海水海砂拌合砂浆试件抗弯刚度影响更大。

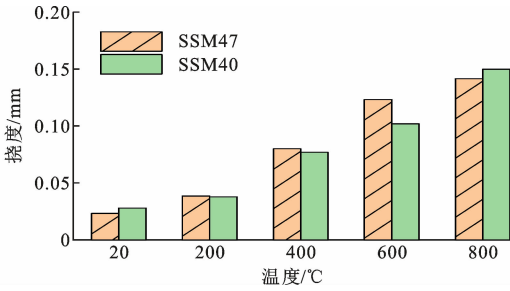


图 6 SSM 不同高温后的峰值挠度

Fig. 6 Peak deflection of SSM after different elevated temperature

3.2 高温后强度退化

海水海砂拌合砂浆试块高温后抗折及抗压强度

退化情况如图 7 所示,图 7 中高温后的强度值已用常温强度进行了均一化处理,并给出了相对强度的均值与标准差。由图 7 可知,两种水灰比的海水海砂拌合砂浆试块高温后强度退化规律基本相同,然而抗压强度随高温退化规律与抗折强度不同。高温后,海水海砂拌合砂浆试块抗压强度先增加,在经历 400 °C 高温后,抗压强度仍能维持常温水平。抗折强度在经历 200 °C 后尚能维持常温值且略有增加,但在经历 400 °C 高温后迅速下降,下降幅度超过 30%。随后,在经历更高温度作用后,抗压强度与抗折强度均表现出较大损失,其中抗折强度比抗压强度损失更多。

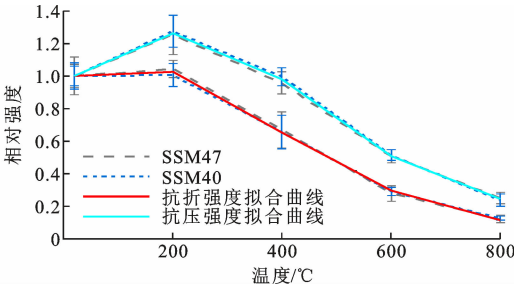


图 7 SSM 高温后强度退化情况

Fig. 7 Strength reduction of SSM after elevated temperature

进一步通过数据回归分析,得到了海水海砂拌合砂浆试块抗折强度与抗压强度随温度变化的曲线,分别如式(1)、(2)所示,并计算了相应的判定系数 R^2 。结果表明两个公式均具有较高的判定系数。公式计算结果与试验结果对比如图 7 所示,可以看出,拟合曲线与试验结果吻合较好,说明拟合公式可较为准确给出海水海砂拌合砂浆经历不同高温作用后强度退化的程度。

$$\frac{f_{i,T}}{f_{i0}} = (-1.69 \frac{T-20}{100} + 18.99) / [(\frac{T-20}{100})^2 - 3.74 \frac{T-20}{100} + 19.02] \quad R^2 = 0.9659 \quad (1)$$

$$\frac{f_{c,T}}{f_{c0}} = (-1.03 \frac{T-20}{100} + 18.44) / [(\frac{T-20}{100})^2 - 4.74 \frac{T-20}{100} + 18.44] \quad R^2 = 0.9684 \quad (2)$$

式中: T 为温度; f_{i0} 为常温时的抗折强度; $f_{i,T}$ 为经历高温 T 后的抗折强度; f_{c0} 为常温时的抗压强度; $f_{c,T}$ 为经历高温 T 后的抗压强度。

不同水灰比的水泥砂浆高温后抗压强度退化情况对比如图 8 所示,其中 FRM 表示淡水河砂配制的砂浆。SSM14 与 FRM14 数据来自张凯等^[17]试验结果;FRM30~FRM55 数据来自李清海等^[24]试

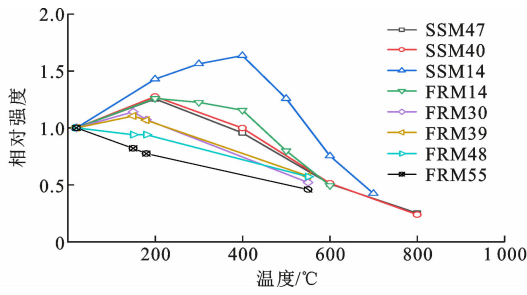


图 8 高温后水泥砂浆抗压强度对比

Fig. 8 Comparison of compressive strength of cement mortar after elevated temperature

验结果。

张凯等^[17]对比了水灰比为 0.14 的海水海砂拌合砂浆与淡水河砂拌合砂浆高温后的强度,发现两者强度均随温度升高呈现先增加后降低的趋势;在经历相同温度后海水海砂拌合砂浆强度损失比淡水河砂拌合砂浆少,在 500 °C 时仍能维持常温强度,而淡水河砂拌合砂浆在 450 °C 之后强度比常温低。李清海等^[24]研究了不同水灰比对水泥砂浆高温后强度退化的影响,发现水灰比越大,强度退化越多。本文海水海砂浆体强度退化情况也大致符合这种规律,如图 8 中 200、400 °C 时,SSM47 强度损失比 SSM40 更多,其他温度时则区分不明显。同时,李清海等^[24]研究结果表明:淡水河砂配制砂浆其水灰比为 0.30 和 0.39 时,抗压强度随温度升高呈现先增加后降低的趋势;水灰比为 0.48 和 0.55 时则没有这种规律,这说明水灰比较小时,砂浆抗压强度退化较慢。本文水灰比为 0.40 和 0.47 时,海水海砂浆体抗压强度均呈现了先增加后降低的规律。综上分析,相同水灰比时,海水海砂的掺入可延缓砂浆高温后抗压强度的退化。

3.3 高温后应变发展

通过 DIC 分析获得了海水海砂拌合砂浆试块在荷载作用下变形的发展情况。图 9 给出了经历不同高温作用后,海水海砂拌合砂浆试块在三点弯曲作用下峰值荷载时的水平向正应变分布。

图 9 中红色区域表示受拉应变较大,对应于破坏时的裂缝位置。未经历高温作用的试块在峰值荷载时应变集中不明显。随着经历的温度升高,应变发展集中于跨中,对应图 9 中红色区域越来越明显,温度越高,该区域越宽且越高。说明温度越高,破坏前应变发展越充分,即变形越大,这规律与跨中挠度随温度升高而变大一致。

经 DIC 分析得到了高温后不同应力水平时海

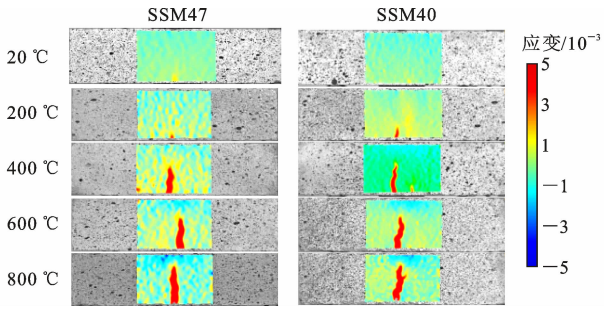


图 9 高温后峰值荷载时 SSM 应变场

Fig. 9 Strain field of SSM at peak load after elevated temperature

水海砂拌合砂浆试块的应变场。以 SSM40 为例,经历 400 °C 和 800 °C 后的应变发展过程分别如图 10、11 所示。

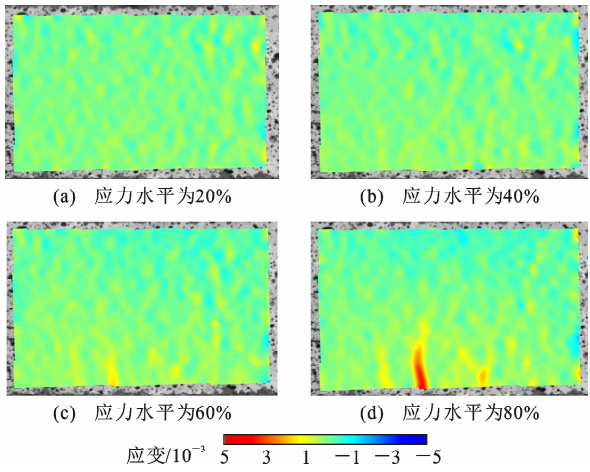


图 10 400 °C 后不同应力水平时的 SSM40 应变场

Fig. 10 Strain field of SSM40 under different stress levels after 400 °C

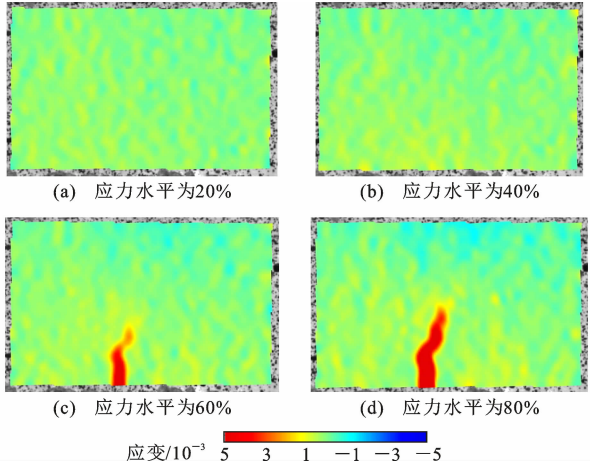


图 11 800 °C 后不同应力水平时的 SSM40 应变场

Fig. 11 Strain field of SSM40 under different stress levels after 800 °C

由图 10、11 可以看出,应力水平为 40% 时,试

块均未出现明显应变集中情况。在应力水平为 60% 时,SSM40 在经历 400 ℃ 后跨中出现了颜色偏红区域,即应变较大区域,而在经历 800 ℃ 后,出现了十分明显的红色区域。这说明,经历温度越高,在同样的应力水平时,应变集中发展越充分,变形越大。

3.4 热重分析结果

根据热重分析结果,海水拌合水泥净浆的质量随温度变化情况如图 12 所示。对热重分析(TG)曲线求一阶微分,得到微商热重分析(DTG)曲线,同样表示在图 12 中。根据 Qu 等^[16]的研究成果,基于 DTG 曲线,标记了钙矾石、Friedel 盐、Ca(OH)₂ 和 CaCO₃ 晶体脱水温度。Friedel 盐为海水海砂中氯离子参与水泥水化过程而形成的水化产物。在 100~200 ℃ 之间,DTG 曲线出现两个较小的峰值,主要为 C-S-H 凝胶、钙矾石、Friedel 盐脱水。DTG 曲线 400 ℃ 左右的峰值主要是由于 Ca(OH)₂ 脱水,700 ℃ 左右的峰值则主要是由于 CaCO₃ 脱水。由图 12 中 TG 曲线可以看出,在 400 ℃ 之前,两种水灰比的海水拌合水泥净浆失重区别不明显,400 ℃ 之后,水灰比大的浆体失重更多,700 ℃ 之后这种差别更明显。最终经历 1 000 ℃ 高温后,SP47 质量减少 29%,SP40 质量减少 24%。

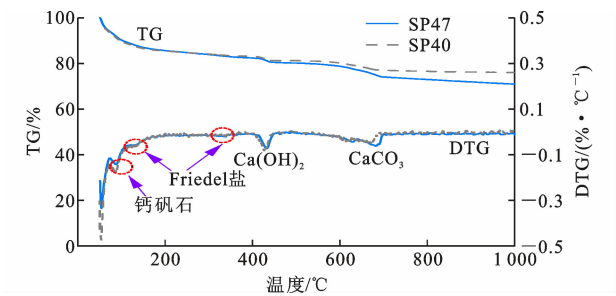


图 12 海水拌合水泥净浆随温度变化的质量损失
Fig. 12 Mass loss of seawater mixed paste with temperature

3.5 高温后微观结构

不同温度作用后,海水拌合水泥净浆 SP47 和 SP40 内部微观结构分别如图 13 和图 14 所示,选取的放大倍数为 5 000 倍。在常温时,两种水灰比的海水拌合水泥净浆均可观察到针状钙矾石附着在 C-S-H 凝胶上。随着温度升高,SP47 微观结构中较难观察到清晰的水泥水化产物,可明显看到水化产物脱水后形成蜂窝状[图 13(c)]、层状[图 13(d)]以及更松散的絮状形貌[图 13(e)]。图 14 中 SP40 的微观结构也呈现类似趋势。这种随高温而变得松散的微观结构与砂浆试块高温后抗折强度与抗压强

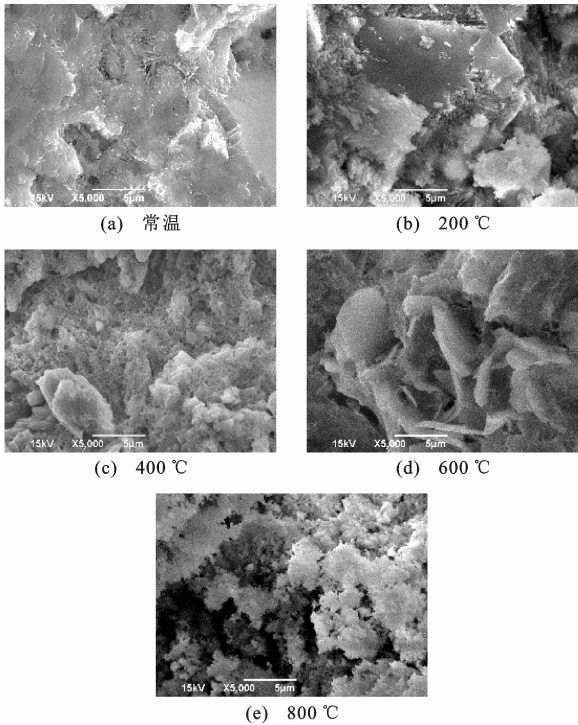


图 13 不同温度后 SP47 微观结构
Fig. 13 Microstructure of SP47 after different temperature

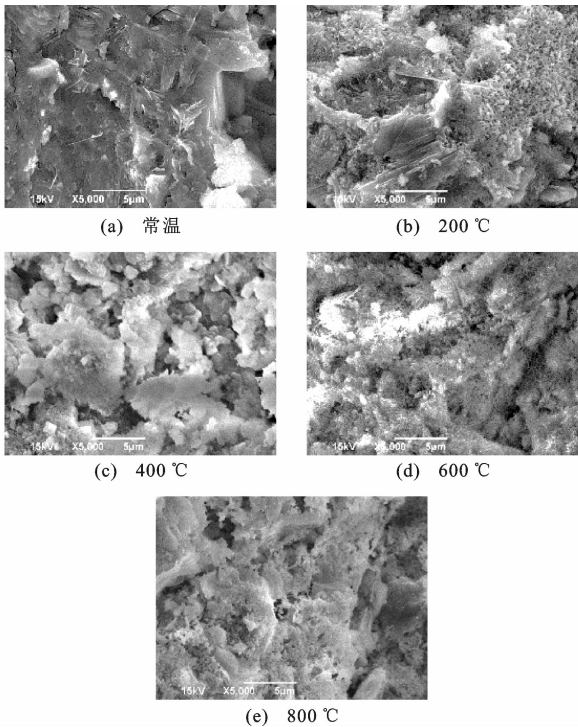


图 14 不同温度后 SP40 微观结构
Fig. 14 Microstructure of SP40 after different temperature
度退化相一致。

4 结 语

(1)海水海砂的掺入延缓了砂浆高温后抗压强

度的退化。海水海砂拌合砂浆抗折强度与抗压强度随温度升高均呈现先增长后降低的规律,且抗折强度比抗压强度退化更快。高温降低了海水海砂拌合砂浆试件的抗弯刚度,400℃及以上高温的影响更显著。本文提出的高温后海水海砂拌合砂浆抗折强度与抗压强度计算公式精度高,与试验结果吻合较好。

(2)数字图像相关法应变分析结果表明,温度越高,海水海砂拌合砂浆应变发展越充分,相同应力水平时,跨中应变越集中,挠度越大。

(3)通过热重分析,识别出了 Friedel 盐。同时热重分析结果表明,水灰比越大,相同温度时质量损失越大。

(4)扫描电子显微镜结果揭示了海水拌合水泥净浆微观结构随高温变化的过程,当温度越高时,微观结构越疏松。600℃与800℃时,微观结构明显呈现多孔特征,这与强度退化严重相吻合。

参考文献:

References:

- [1] XIAO J Z, QIANG C, NANNI A, et al. Use of sea-sand and seawater in concrete construction: current status and future opportunities[J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 1101-1111.
- [2] 肖建庄, 张鹏, 张青天, 等. 海水海砂再生混凝土的基本力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 16-22.
XIAO Jianzhuang, ZHANG Peng, ZHANG Qingtian, et al. Basic mechanical properties of seawater sea-sand recycled concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2): 16-22.
- [3] 滕锦光. 新材料组合结构[J]. 土木工程学报, 2018, 51(12): 1-11.
TENG Jinguang. New-material hybrid structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(12): 1-11.
- [4] ZHAO Y F, HU X, SHI C J, et al. A review on seawater sea-sand concrete: mixture proportion, hydration, microstructure and properties[J]. Construction and Building Materials, 2021, 295: 123602.
- [5] ETXEBERRIA M, GONZALEZ-COROMINAS A, PARDO P, et al. Influence of seawater and blast furnace cement employment on recycled aggregate concretes' properties[J]. Construction and Building Materials, 2016, 115: 496-505.
- [6] LI H, FARZADNIA N, SHI C, et al. The role of seawater in interaction of slag and silica fume with cement in low water-to-binder ratio pastes at the early

- age of hydration[J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 508-518.
- [7] KHATIBMASJEDI M, RAMANATHAN S, SURANE NI P, et al. Compressive strength development of seawater-mixed concrete subject to different curing regimes[J]. ACI Materials Journal, 2020, 117(5): 1-10.
- [8] ZHANG K J, XIAO J Z, ZHANG Q T. Experimental study on stress-strain curves of seawater sea-sand concrete under uniaxial compression with different strain rates[J]. Advances in Structural Engineering, 2021, 24(6): 1124-1137.
- [9] XIAO J Z, ZHANG Q T, ZHANG P, et al. Mechanical behavior of concrete using seawater and sea-sand with recycled coarse aggregates[J]. Structural Concrete, 2019, 20(5): 1631-1643.
- [10] ZHANG Q T, XIAO J Z, LIAO Q X, et al. Structural behavior of seawater sea-sand concrete shear wall reinforced with GFRP bars[J]. Engineering Structures, 2019, 189: 458-470.
- [11] ZHANG Q T, XIAO J Z, ZHANG P, et al. Mechanical behaviour of seawater sea-sand recycled coarse aggregate concrete columns under axial compressive loading[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 117050.
- [12] DONG Z Q, SUN Y, WU G, et al. Flexural behavior of seawater sea-sand concrete beams reinforced with BFRP bars/grids and BFRP-wrapped steel tubes[J]. Composite Structures, 2021, 268: 113956.
- [13] AHMADI M T, AGHAKOUCHAK A A, MIRGHADERI R, et al. Collapse of the 16-story plasco building in Tehran due to fire[J]. Fire Technology, 2020, 56(2): 769-799.
- [14] 肖建庄. 高性能混凝土结构抗火设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
XIAO Jianzhuang. Fire safety design principle of high-performance concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [15] LI Y L, ZHAO X L, RAMAN R, et al. Thermal and mechanical properties of alkali-activated slag paste, mortar and concrete utilising seawater and sea sand[J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 704-724.
- [16] QU F L, LI W G, TANG Z, et al. Property degradation of seawater sea sand cementitious mortar with GGBFS and glass fiber subjected to elevated temperatures[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 366-384.
- [17] 张凯, 李田雨, 刘小艳, 等. 海水海砂高性能混凝土

- 耐高温性能研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34(4): 64-70.
- ZHANG Kai, LI Tianyu, LIU Xiaoyan, et al. Research on high temperature resistance of seawater sand high performance concrete [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2020, 34(4): 64-70.
- [18] 曹园章, 郭丽萍, 薛晓丽. NaCl 和 Na₂SO₄ 对水泥水化机理的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(4): 712-719.
- CAO Yuanzhang, GUO Liping, XUE Xiaoli. Effects of sodium chloride and sodium sulfate on hydration process[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2019, 49(4): 712-719.
- [19] 黄一杰, 何绪家, 颜雪雪, 等. 海砂再生混凝土受压力学性能试验研究与分析[J]. 混凝土, 2019(4): 19-23.
- HUANG Yijie, HE Xujia, YAN Xuexue, et al. Experimental study and analysis on sea sand recycled concrete under axial compression[J]. Concrete, 2019(4): 19-23.
- [20] LIU Y H, ZENG L, XIANG S, et al. Compressive performance evaluation of concrete confined by stirrups at elevated temperature using DIC technology [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 119883.
- [21] 时金娜, 赵燕茹, 郝 松, 等. 基于 DIC 技术的高温后混凝土变形性能[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(4): 584-591.
- SHI Jinna, ZHAO Yanru, HAO Song, et al. Deformation behavior of concrete under uniaxial compression after high temperature by DIC technology[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 584-591.
- [22] 赵燕茹, 刘道宽, 王 磊. 基于 DIC 玄武岩纤维混凝土高温后抗折损伤分析[J]. 混凝土, 2021(2): 42-46, 62.
- ZHAO Yanru, LIU Daokuan, WANG Lei. Flexural damage analysis of basalt fiber reinforced concrete after high temperature based on DIC method[J]. Concrete, 2021(2): 42-46, 62.
- [23] 许小燕, 袁广林, 成林燕, 等. 高温对高强度水泥砂浆强度影响的试验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2009, 28(5): 35-38, 48.
- XU Xiaoyan, YUAN Guanglin, CHENG Linyan, et al. Experimental study on the effect of high temperature on the strength of high-strength cement mortar[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2009, 28(5): 35-38, 48.
- [24] 李清海, 姚 燕, 孙 蓓, 等. 高温对水泥砂浆强度的影响及机理分析[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(6): 699-703.
- LI Qinghai, YAO Yan, SUN Bei, et al. Mechanism of effect of elevated temperature on compressive strength of cement mortar [J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(6): 699-703.