

DOI:10.11918/202302033

PVA-ECC 高温冷却后力学特性与微观损伤机理

武芳文¹,何岚清¹,段钧淇¹,王广倩¹,刘来君¹,杨飞²

(1. 长安大学 公路学院,西安 710064;2. 长安大学 建筑工程学院,西安 710061)

摘要:为研究工程水泥基复合材料(engineered cementitious composite,ECC)高温后的力学性能和微观特征,对ECC进行了高温后材料力学性能试验和微观特征观测。对常温(25℃)、200℃、300℃、400℃及500℃自然冷却和喷水冷却后的ECC试件开展了抗压和抗折性能试验,并结合扫描电镜分析了ECC微观结构损伤特征以及探究了ECC高温后损伤机理。实验结果表明:高温后ECC表面未发生剥落,500℃以内未见爆裂现象,随着温度升高,纤维由混凝土表面逐渐向内部熔化,且失水增多,最大烧失率13.9%;力学性能方面,ECC自然冷却后抗压强度随温度升高呈现先降低后升高再降低的现象,而喷水冷却后抗压强度随温度的升高单调降低,且强度降低显著;高温后抗折强度随温度升高逐步下降,自然冷却降低幅度较喷水冷却显著;结合微观结构变化,ECC经历高温时,纤维部分熔化导致纤维与基体的黏结性能减弱;随着温度升高水化产物之间逐渐呈现独立存在的分散体,但喷水冷却后未水化颗粒二次水化现象明显,使ECC抗折强度较自然冷却提升17%。ECC具有良好的热稳定性,且冷却方式影响ECC材料的表观特性、力学性能和微观特征。

关键词:桥梁工程;力学特性;高温试验;ECC;微观结构;冷却方式

中图分类号:U444

文献标志码:A

文章编号:0367-6234(2024)09-0140-10

Mechanical properties and microscopic damage mechanism of PVA-ECC after high-temperature cooling

WU Fangwen¹, HE Lanqing¹, DUAN Junqi¹, WANG Guangqian¹, LIU Laijun¹, YANG Fei²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: To investigate the mechanical performance and microscopic characteristics of Engineered Cementitious Composite (ECC) after high temperatures, material mechanical tests and microscopic observations of ECC after high temperatures were conducted. The compressive tests and the bending tests of ECC specimens were carried out after natural cooling and spray cooling methods at room temperature (25 °C), 200 °C, 300 °C, 400 °C, and 500 °C and analyzed the failure characteristics of ECC microstructure by scanning electron microscope, and investigated the damage mechanism of ECC after high temperatures. The results show that the concrete on the surface of ECC does not peel off after high temperatures, and there is no burst phenomenon within 500 °C. As the temperature increases, the fiber gradually melts from the surface of the concrete to the inside, the water loss increases and the maximum burning loss rate is 13.9%. In terms of mechanical properties, the compressive strength of ECC after natural cooling decreases first then increases, and then decreases with the increase in temperature. After water spray cooling, the compressive strength decreases monotonously with the increase in temperature, and the strength decreases significantly. The flexural strength after high temperature decreases gradually with the increase in temperature, and the decrease of natural cooling is more significant than that of water cooling. Combined with the change of microstructure, when ECC undergoes high temperature, the partial melting of the fiber leads to the weakening of the bonding performance between the fiber and the matrix. With the increase in temperature, the hydration products gradually show independent dispersion. However, the secondary hydration of unhydrated particles after water spray cooling is evident, which makes the flexural strength of ECC increase by 17% compared with natural cooling. ECC has excellent thermal stability, and cooling methods influence the apparent characteristics, mechanical properties, and microscopic characteristics of ECC.

Keywords: bridge engineering; mechanical properties; high-temperature experiment; engineered cementitious composite; microstructure; cooling modes

收稿日期:2023-02-17;录用日期:2023-03-20;网络首发日期:2024-05-14

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240514.0858.002

基金项目:国家自然科学基金(52378121);国家重点研发计划(2021YFB2601000);陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2022JZ-32);中央高校基本科研业务费专项资金(300102212212)

作者简介:武芳文(1980—),男,副教授,博士生导师

通信作者:杨飞,f.yang@chd.edu.cn

工程水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)是一种基于微观力学和断裂力学原理设计的具有超高韧性和多缝开裂特点的高性能复合材料^[1]。其拉伸应变能力是普通混凝土的300倍以上^[2-3],常用于桥梁受拉侧外表面,可以减少铺装层厚度,降低结构自重。ECC常用粉煤灰作为矿物掺和料,粉煤灰是发电厂燃烧煤炭产生的副产物,添加粉煤灰既能提高基体流动性,改善ECC的工程性能,还能有效利用工业废料^[4]。另外,由于ECC内部结构致密,使ECC具有高耐久性^[5-6],加之其自愈合特性,能有效防止外部侵蚀介质对结构层造成破坏,减少后期维护投入,从而降低碳排放,在长期使用性能方面具有良好的经济价值。因此,ECC作为绿色材料在加强结构局部受拉区和提高结构耐久性方面有良好的应用前景。

桥梁在长期运营过程中会遇到各种极端环境,其中火灾是影响较大,程度较深的灾害之一^[7]。随着ECC材料在工程中的应用日益广泛,其在服役过程中存在的火灾风险不可忽略。由于ECC优越的受拉性能,常常被布置在桥梁结构的最外层,受到高温影响最严重。因此,ECC材料的高温力学性能受到学者们的广泛关注。文献[8]发现火灾高温会显著影响混凝土的力学性能,从而导致外层混凝土剥落和整体强度损失,尤其在400℃以上混凝土表面会出现较大裂缝,承载能力降低超过30%。对于纤维混凝土,文献[9]发现致密的水泥基材料在高温下内部压力难以释放,易产生爆裂问题,严重威胁结构安全。对于ECC,文献[10]研究发现由于高温后纤维熔化产生孔洞释放了内部水蒸气压力,ECC在600℃下也没有发生爆炸剥落,但其拉伸强度和应变能力在高温下劣化严重,温度高于200℃时,其拉伸强度降低了约40%。ECC中聚乙烯醇(PVA)纤维的熔点仅为250℃左右,高温后纤维熔化对其力学性能和外观也会产生较大影响^[11]。

桥梁发生火灾时,梁体上方通常采用喷水冷却降温,梁体下方通常为自然冷却,导致ECC材料冷却方式存在差异。相关研究表明,冷却方式对高温后水泥基材料会产生不同的影响。文献[12]研究了冷却方式对普通混凝土抗压强度的影响,发现喷水冷却后混凝土抗压强度降低幅度大于自然冷却。文献[13]研究了冷却方式(自然冷却、喷水冷却、浸水冷却)对高温后纤维混凝土的影响,结果表明不同冷却方式后纤维混凝土破坏形态和损伤机理差异显著。目前对ECC高温后的力学性能研究大部分都停留在自然冷却后的试验工况,少部分对浸水冷却后的ECC进行了试验研究^[14-17],然而实际工程

中发生火灾时很难做到整体结构完全浸没在水中降温,而是采用消防水管进行喷水降温,所以,现有研究成果与实际情况存在差异,且喷水冷却对ECC的损伤机理尚不清楚。因此,研究高温后不同冷却方式对ECC材料力学性能的影响极为重要,同时为ECC应用于工程结构提供理论支撑。

本文采用高温炉试验方法,分析ECC高温冷却后的力学性能和损伤规律,并采用扫描电镜分析ECC的微观结构变化特征,探索高温损伤机理;探讨喷水冷却和自然冷却对ECC材料力学性能的影响规律,从宏观和微观两个尺度揭示ECC高温冷却后破坏特征与损伤机理。研究成果可以为结构的防火设计、火灾后的损伤判定及加固提供理论依据。

1 试验

1.1 原材料

ECC原材料包括P.O 42.5硅酸盐水泥、I级粉煤灰、石英砂、硅灰、减水剂、PVA纤维和水。石英砂的粒径为0.1~0.2mm;减水剂采用聚羧酸系减水剂;PVA纤维采用螺旋形聚乙烯醇纤维,密度为1.30g/cm³,直径为0.02mm,长度为12mm,抗拉强度为1650MPa,弹性模量为35.15GPa,极限拉长率为7%,熔点为280℃。PVA纤维按体积比2%掺入,试验材料配合比中水泥为680kg/m³,粉煤灰为612kg/m³,石英砂为513kg/m³,水为362kg/m³,硅灰为50kg/m³,减水剂为9.6kg/m³。

1.2 制备依据

本次试验根据规范《高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法》JCT 2461—2018^[18]及《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2019^[19]进行设计。抗压强度和抗折强度试块尺寸分别是100mm×100mm×100mm和100mm×100mm×400mm。试块制作时,首先将石英砂和胶凝材料在搅拌机中搅拌2min,搅拌均匀后缓慢加入水和减水剂的混合液再次搅拌,待浆体均匀时,缓慢撒入纤维并充分搅拌使纤维分布均匀。搅拌完成后,一次性将拌合物装入模具,并在振动台振动2min后用抹刀刮除多余拌合物。待试块成型且在室温环境下养护1d后拆除模具,并在标准养护室养护28d。

1.3 试验方法

采用功率为37kW的高温箱式电阻炉进行高温试验,通过高温炉的温度控制系统对炉壁内的电阻丝进行加热升温。李俊华等^[20]的试验结果表明:试件的承载力随着恒温时间的增加而不断降低,其中持续时间从60min增加到90min时试件承载力

降低幅度最大。此外,相关学者研究^[11,15]表明 400 ℃后,ECC 中的 PVA 纤维已完全融化,并且 ECC 力学性能的退化主要与纤维造成的孔隙率增大以及纤维与基体界面性能退化有关。因此,依据已有学者研究成果,结合实验室设备参数要求,分别

选择 200、300、400、500 ℃作为升温温度,恒温时间采用 60 min,其中升温曲线、高温炉和温度控制系统如图 1 所示。实验中采用 K 型热电偶测量试块温度,热电偶可测温度为 -40 ~ 1 000 ℃,测量最大误差为 3.75 ℃,如图 2 所示。

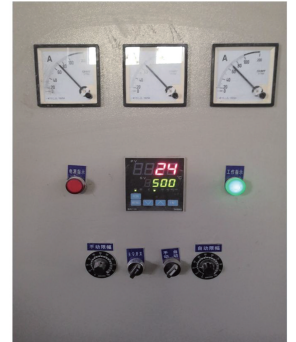
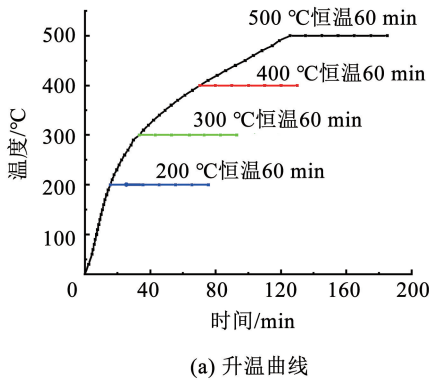


图 1 高温试验

Fig. 1 High-temperature test



Fig. 2 Temperature sensor

恒温结束后,将试块从高温炉中取出,进行降温处理:自然冷却和喷水冷却。喷水冷却时控制喷头

出水量保持在 0.4 L/s,当温度降低到 50 ℃后停止喷水,然后静置 24 h,待试块表面水分蒸发再进行力学性能试验。混凝土试块数量及冷却方式如表 1 所示,材料力学性能试验过程如图 3 所示。

采用超高分辨率场发射扫描电子显微镜 (field emission scanning electron microscope, FESEM 或 SEM)对高温冷却后 ECC 样品进行微观扫描。对混凝土试块取大小 5 mm 扁平状样品 (样品上需带 PVA 纤维),浸没在无水乙醇中,防止进一步产生水化产物。SEM 扫描前,需要对样品持续烘干 28 h,再将样品固定于扫描托盘上进行镀金处理,然后放入电子显微镜进行扫描,制样过程如图 4 所示。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Specimen design parameters

试件编号	立方体尺寸	棱柱体尺寸	冷却方式	温度/℃	试件数量
ECC-25-X	100 mm × 100 mm × 100 mm	100 mm × 100 mm × 400 mm	—	25	3
ECC-200-N	100 mm × 100 mm × 100 mm	100 mm × 100 mm × 400 mm	自然	200	3
ECC-200-W	100 mm × 100 mm × 100 mm	100 mm × 100 mm × 400 mm	喷水	200	3
ECC-300-N	100 mm × 100 mm × 100 mm	100 mm × 100 mm × 400 mm	自然	300	3
ECC-300-W	100 mm × 100 mm × 100 mm	100 mm × 100 mm × 400 mm	喷水	300	3
ECC-400-N	100 mm × 100 mm × 100 mm	100 mm × 100 mm × 400 mm	自然	400	3
ECC-400-W	100 mm × 100 mm × 100 mm	100 mm × 100 mm × 400 mm	喷水	400	3
ECC-500-N	100 mm × 100 mm × 100 mm	100 mm × 100 mm × 400 mm	自然	500	3
ECC-500-W	100 mm × 100 mm × 100 mm	100 mm × 100 mm × 400 mm	喷水	500	3

注:试件编号中 X、N 和 W 符号分别代表试件常温不需要冷却、自然冷却和喷水冷却。

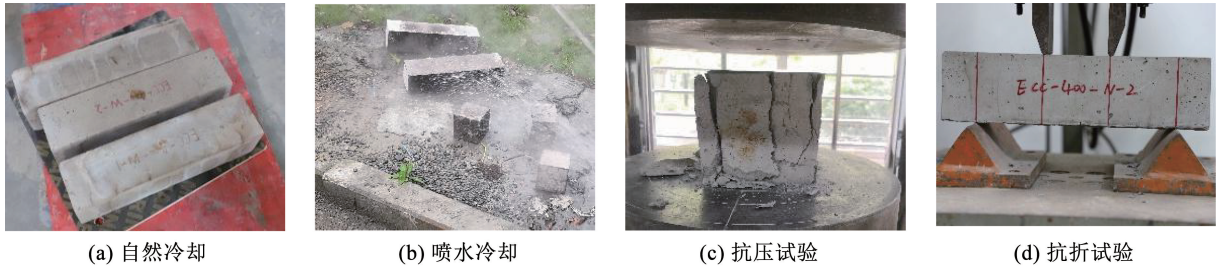


图3 力学特性试验

Fig. 3 Experiments of mechanical properties

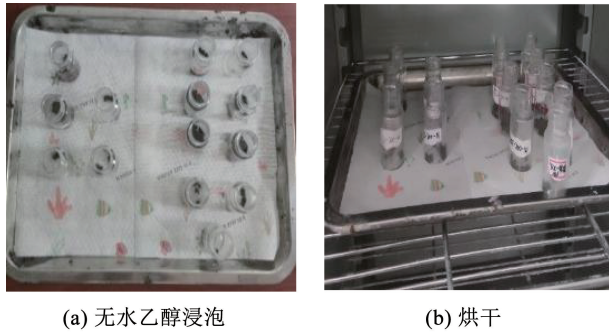


图4 SEM 试样制备

Fig. 4 SEM sample preparation

2 结果与分析

2.1 宏观结构特征

常温下 ECC 表面呈暗灰色, PVA 纤维与水泥基体黏结性能较好, 纤维与水泥基体颜色较为接近, 混凝土内部的纤维和水泥基与表观现象一致。

由于试块各部分的温度存在差异, 外表面和内部状态会有明显不同, 此外, 为了避免人工切割造成

内部形貌破坏, 因此, 选用高温后抗折试块的破坏面来观察内部形貌变化。宏观结构采用佳能相机拍摄, 型号为 EOS 6D Mark II。200 °C 自然冷却和喷水冷却后 ECC 的表观和内部状态如图 5 所示。ECC 高温后表面颜色变浅, 并附着白色粉末, 内部颜色和常温一致。ECC 试块边缘处纤维部分泛黄, 但内部纤维无明显变化。喷水冷却后 ECC 表面纤维颜色及内部状态均无明显变化。

300 °C 自然冷却和喷水冷却后 ECC 的表观和内部状态如图 6 所示。自然冷却后 ECC 内部呈现两种颜色: 外侧混凝土失水严重, 呈白灰色, 纤维已基本熔化; 中心混凝土失水较少, 呈暗灰色, 纤维变短变细。喷水冷却后 ECC 外侧得到水分补充, 因此试块内外颜色均匀, 呈暗灰色, 纤维变短变细呈黄色。试块表面边缘处纤维明显变细, 纤维从淡黄色变为浅褐色, 其他表层纤维已基本熔化。300 °C 时, 两种冷却方法后混凝土表观无明显差异, 但由于含水量不同, ECC 试块内部区别较大。

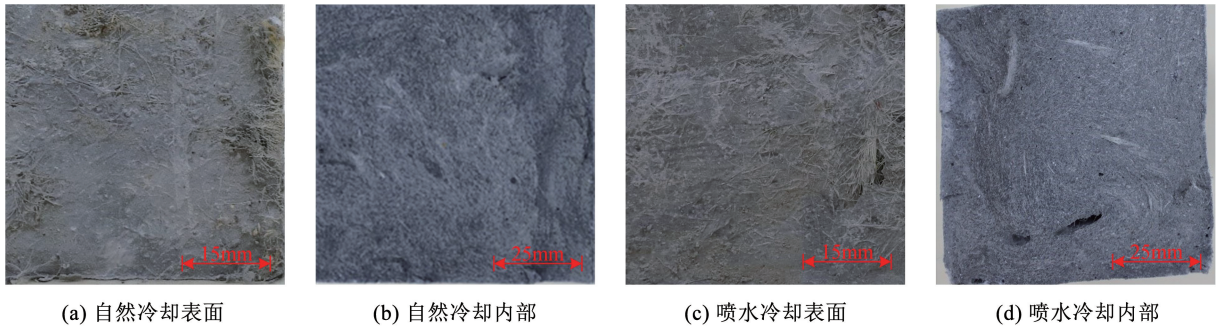


图5 200 °C ECC

Fig. 5 ECC at 200 °C

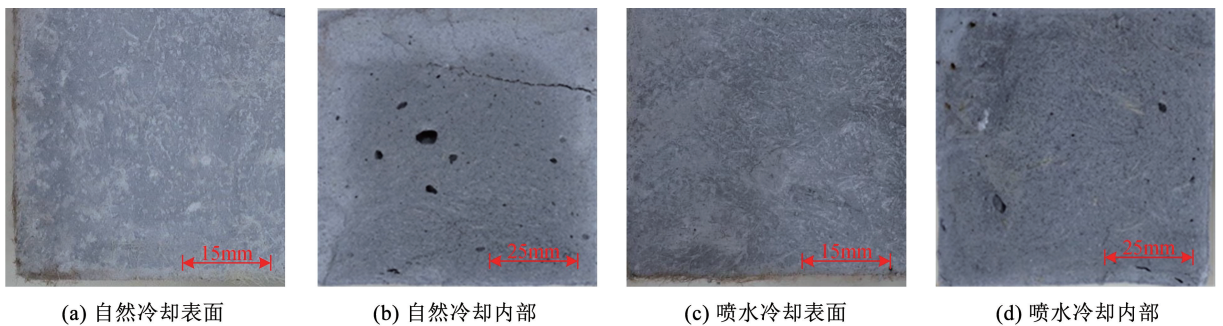


图6 300 °C ECC

Fig. 6 ECC at 300 °C

400 °C 时 ECC 失水严重,混凝土表面纤维已完全熔化,纤维在水泥基体上留下明显痕迹。喷水冷却后表面纤维在水泥基体上留下痕迹较自然冷却更为显著,且形成突起。喷水冷却后,由于温度骤降,

ECC 试块内部 PVA 纤维熔化生成的黄色丁烯醛小分子均附着在基体上,形成黄色斑块。400 °C 自然冷却和喷水冷却后 ECC 的表观和内部状态如图 7 所示。

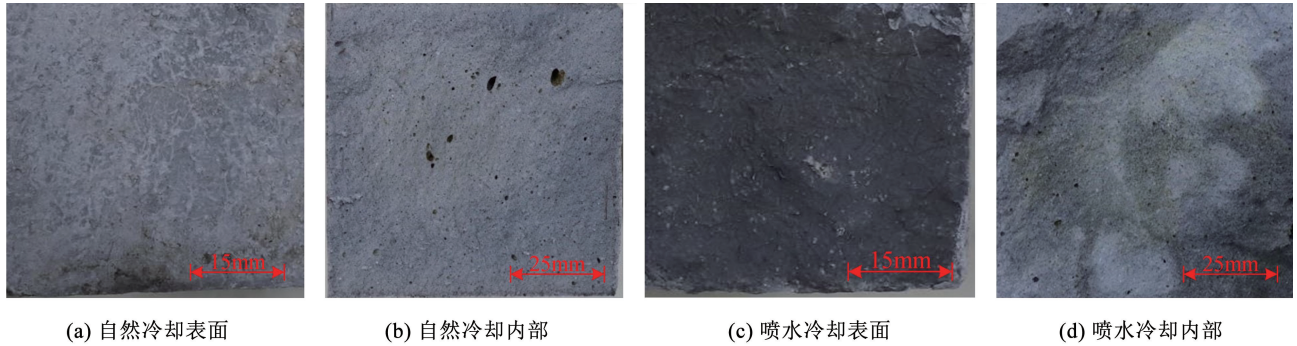


图 7 400 °C ECC

Fig.7 ECC at 400 °C

500 °C 后 ECC 试块表面纤维熔化形成密集的黑色条状突起,如图 8 所示。喷水冷却后 ECC 颜色较自然冷却颜色更深。自然冷却后 ECC 试块内部

失水严重,整体颜色变浅,纤维全部熔化碳化,混凝土孔洞中留下碳黑色残留物。喷水冷却较自然冷却纤维碳化更为严重。

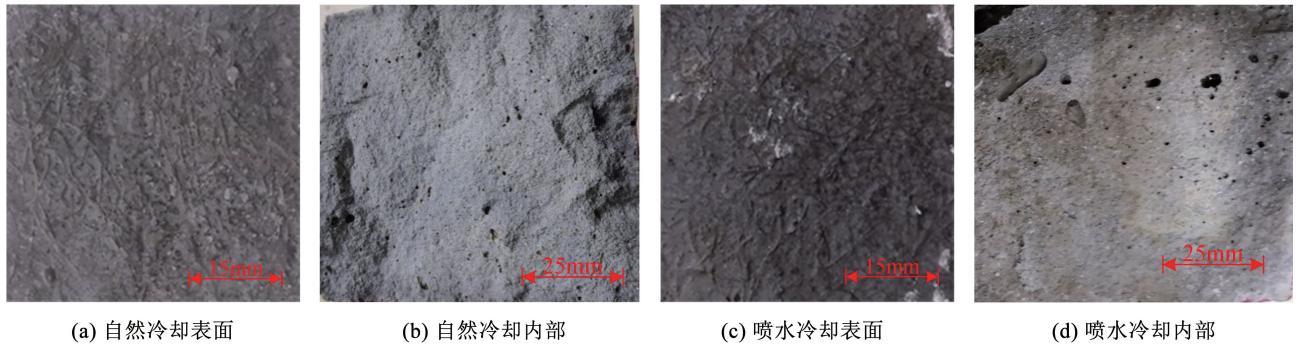


图 8 500 °C ECC

Fig.8 ECC at 500 °C

对高温前后的 ECC 试块进行称重,可以得到如图 9 所示的高温后 ECC 烧失率与温度之间的关系。低于 200 °C 时 ECC 烧失率较小,仅为 0.8%,高温后混凝土失去部分自由水。300 °C 时,混凝土外层 10 mm 内的结合水损失严重,内部水损失较少,导致混凝土内外颜色相差较大,同时外侧纤维熔化。400 °C 时,结合水损失与纤维熔化更为严重,但混凝土内部仍有部分结合水。500 °C 时,部分氢氧化钙开始分解为氧化钙和水,此时最大烧失率为 13.9%。可见,随着温度升高,ECC 的烧失率呈逐渐增大趋势。

强度的 76%。ECC 抗压强度在 200 ~ 400 °C 之间上升,主要原因是高温使 ECC 中的剩余的水化物进一步水化。同时,高温脱水及纤维部分熔化使混凝土材料之间更加紧密;尽管自然冷却后骨料膨胀程

2.2 抗压力学性能

通过采用液压万能试验机对试块进行抗压试验,得到 ECC 试块的抗压强度及应力应变曲线,材料抗压强度随温度变化规律如图 10 所示。

ECC 在 200 °C 自然冷却后,抗压强度降低为常温强度的 65%;但 300、400 °C 的抗压强度较 200 °C 时有所提升;500 °C 时抗压强度再次下降,降低到了常温

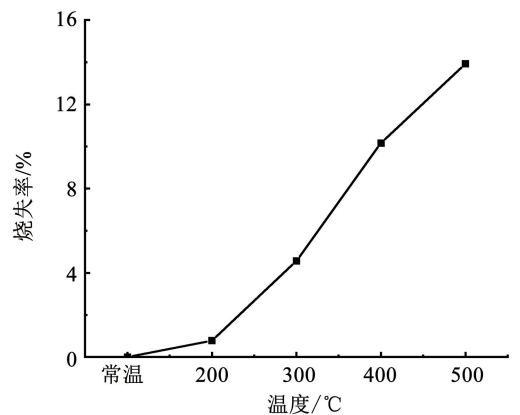


图 9 高温后 ECC 烧失率

Fig.9 The loss rate of ECC after high temperatures

度部分恢复,但仍比常温试块更加密实,更为紧密的水化凝胶层之间产生了更强的范德华力^[21-23]。更高温度下,基体和骨料膨胀程度加大,相互挤压形成了更多裂缝,同时 PVA 纤维熔化形成孔洞,水化物高温脱水分解,导致 ECC 抗压强度急剧下降。

喷水冷却的 ECC, 200 °C 后抗压强度降低了 23.7%, 削弱程度小于自然冷却。随着温度的升高, 强度降低幅度趋于平缓, 500 °C 后, ECC 抗压强度与常温相比最高降低了 46.5%。喷水冷却后, 由于温度的骤降, ECC 内部快速收缩, 导致表面出现较多裂纹, 因此, 喷水冷却后的 ECC 抗压强度普遍低于自然冷却后的抗压强度。此时, 裂缝中虽可见部分新生成的水化物, 但二次水化物的强度低于混凝土损失的强度, 从而整体表现为混凝土强度削弱。

应力(σ_c) - 应变(ϵ_c) 曲线如图 10(b)、10(c) 所示。由图可知, ECC 常温下与高温后的应力 - 应变曲线均可分为上升段和下降段。应力 - 应变曲线的斜率代表试块的刚度, 纤维熔融使基体产生孔隙以及高温使试块产生更多裂纹均会造成高温下 ECC 的刚度降低。自然冷却的 ECC 试块在 25 °C ~ 300 °C 之间刚度随温度升高而降低, 而在 300 °C ~ 500 °C 之间抗压刚度变化不明显。喷水冷却的 ECC 试块在 200 °C ~ 500 °C 之间刚度持续下降, 说明 300 °C 以上, 喷水冷却仍然会削弱 ECC 刚度。另外, 300 °C 之后自然冷却的 ECC 抗压刚度明显高于喷水冷却的刚度, 这主要是因为相同温度下, 喷水冷却的试块经历了温度的骤降而产生较多的裂纹, 进而导致刚度的下降幅度明显高于自然冷却的试块。

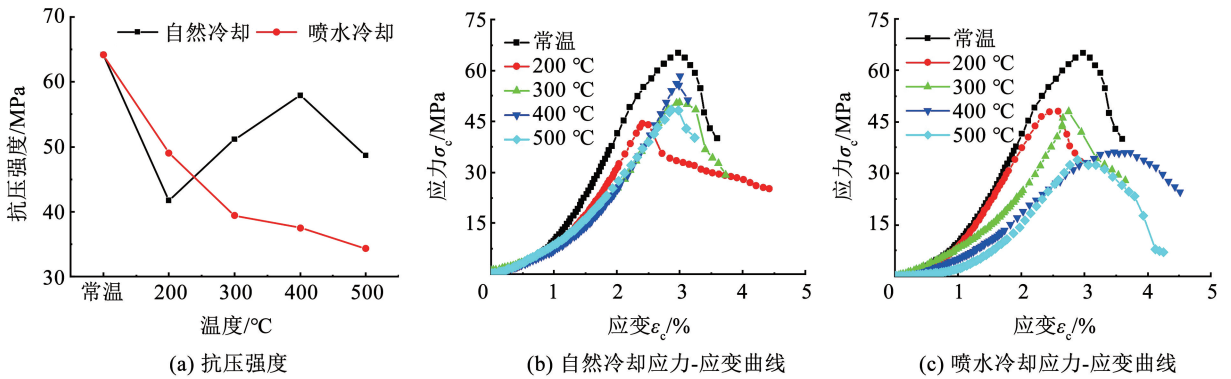


图 10 ECC 抗压力学性能变化规律

Fig. 10 Law of compression mechanical properties of ECC

学者们^[23-28]进行了大量的试验,研究了不同冷却方式下普通混凝土抗压强度的劣化规律,得到了高温后普通混凝土抗压强度折减系数曲线。图 11 为各文献与本次试验的抗压强度折减系数对比。

由图 11 可知, 300 °C 及以下本试验喷水冷却折减系数曲线位于其他普通混凝土曲线下方, 自然冷却折减系数曲线则与其他曲线有显著差异。可见, 文献中普通混凝土高温后抗压强度折减系数曲线并不适用于 ECC 高温后抗压强度的折减规律。

高温后 ECC 的应力 - 应变关系与所经历的温度、骨料类型、配合比、养护条件及冷却方式有关, 而与升温方式关系不大。为保证 ECC 高温后抗压强度具有代表性及可靠性, 本文以 ECC 经历的温度为变量, 考虑了冷却方式等因素, 分别提出了自然冷却和喷水冷却的 ECC 抗压强度折减公式(1)、(2)。对于自然冷却, 本文统计相关学者试验结果, 结合本次试验数据, 拟合得到了 ECC 自然冷却后抗压强度折减系数与温度的关系公式。而喷水冷却暂无其他相关数据, 因此, 采用本次试验均值进行拟合, 拟合曲线见图 12。由于自然冷却的数据较为离散, 拟合度 R^2 只达到了 0.53, 喷水冷却的抗压强度拟合公式的拟合度 R^2 为 0.98, 所提出的拟合公式可以为计算高温后的 PVA-ECC 抗压强度提供依据。

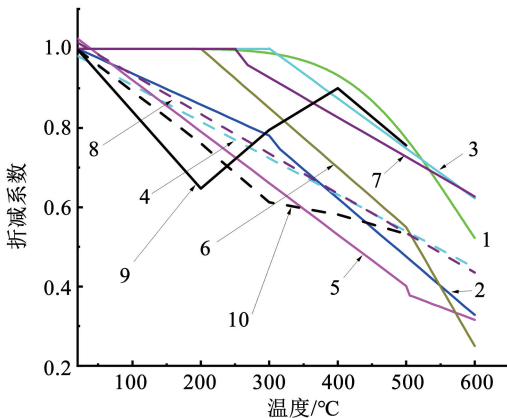


图 11 高温后抗压强度折减系数曲线

Fig. 11 Reduction coefficient curves of compressive strength after high temperature

自然冷却时,有

$$\frac{f_c^T}{f_c} = -1.16 \times 10^{-8} T^3 + 1.02 \times 10^{-5} T^2 - 2.83 \times 10^{-3} T + 1.07, 20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 500 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

喷水冷却时,有

$$\frac{f_c^T}{f_c} = 1.67 \times 10^{-6} T^2 - 1.86 \times 10^{-3} T + 1.05, 20 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 500 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中: T 为温度, f_c^T 为温度 T 时 ECC 的抗压强度, f_c 为常温时 ECC 的抗压强度。

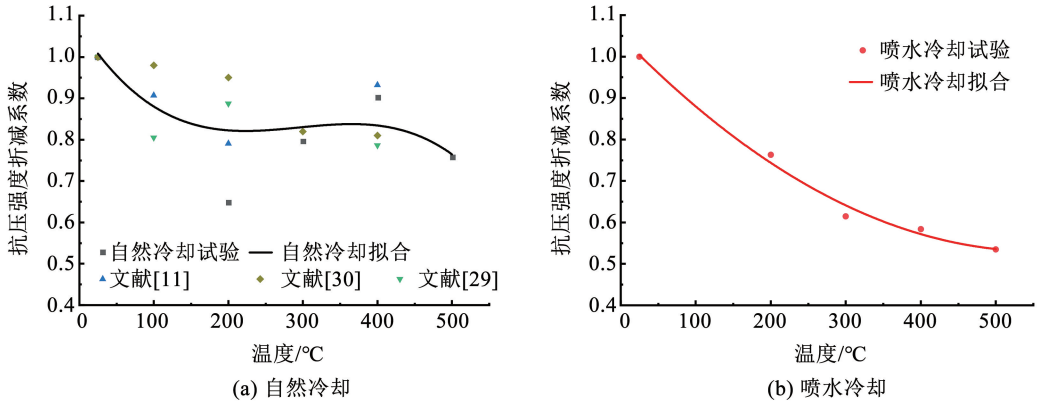


图 12 高温后抗压强度折减系数拟合曲线

Fig. 12 Fitting curves of compressive strength reduction coefficient after high temperature

2.3 抗折力学性能

经过不同冷却方式后 ECC 抗折性能变化规律如图 13 所示。200 °C 前抗折强度降低幅度较小,自然冷却和喷水冷却的抗折强度分别为常温强度时的 90% 与 92%。200 °C 后抗折强度随温度升高降低幅度增大,300 °C 和 400 °C 后自然冷却的抗折强度分别为常温强度时的 53%、22%,300 °C 和 400 °C 后喷水冷却的抗折强度分别为常温强度的 61%、39%。该现象与 ECC 高温后纤维的状态及其与基体的黏结性能有关。经历 200 °C 高温后 ECC 内部纤维仍旧完整,纤维与基体的黏结性能削弱较少,此时抗

折强度降低幅度较小;300 °C 后部分纤维熔化,400 °C 后纤维几乎完全熔化,导致抗折强度大幅度降低。

相同温度下喷水冷却后的抗折强度比自然冷却后略微偏大。该现象与混凝土冷却后二次水化有关,ECC 喷水冷却较自然冷却吸收更多的水分,二次水化反应充分,产生的二次水化物 C-S-H 凝胶较多,各组分之间黏结性能有所增强。由图 13(b)、13(c)中可知,200 °C 冷却后 ECC 的荷载(F) - 挠度(ω)曲线初始斜率最大,其他温度斜率相近,该现象与 ECC 内部纤维状态密切相关。

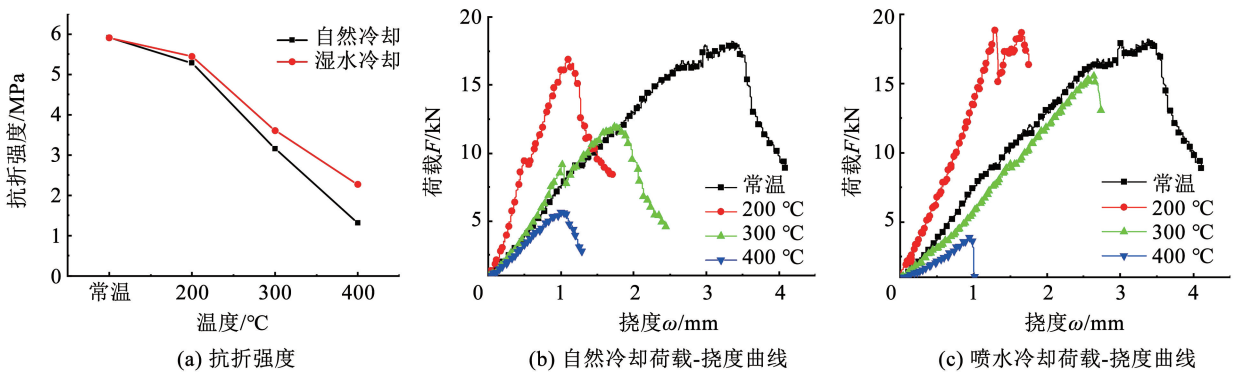


图 13 抗折力学性能变化规律

Fig. 13 Variation law of flexural mechanical properties

2.4 微观结构特征

ECC 高温冷却后 PVA 纤维 SEM 观测结果如图 14 所示。常温下,纤维与基体黏结性能良好,纤维表面附着絮状的 C-S-H (水化硅酸钙) 凝胶。

200 °C 后,纤维与基体界面处出现明显缝隙,两者间的黏结性能减弱,且纤维表面更加光滑,附着的絮状物质减少。300 °C 后,熔化的纤维在基体中留下条状孔洞,未熔化的纤维短小纤细,与基体的黏结性能

较差。400 °C 时,纤维完全熔化。由于纤维熔融产生孔洞,释放了 ECC 内部压力,在高温及冷却试验过程中,ECC 未发生爆裂剥落现象。另外冷却方式对纤维状态的影响甚微,故未放置对照组。

ECC 高温冷却后水化物微观结构如图 15 所示。常温时,基体结构密实,清晰可见大片的絮状 C-S-H 凝胶、针状的钙矾石和呈现圆球状的未水化物质,如图 15(a) 所示。随着温度升高,水分蒸发,水化产物之间的黏结性能逐渐减弱,呈现为独立存在的分散体,导致结构整体松散,从而形成大量的细小裂缝,因此,高温后 ECC 抗压强度降低。高温冷却后 ECC 内未水化物质进一步水化,未水化物质明显减少,一定程度上提高了 ECC 强度,这是 ECC 在

200 ~ 400 °C 之间出现抗压强度增强的原因之一。钙矾石是水泥水化产物之一,一般呈针状,高温下不稳定,在 70 °C 时会分解,95 °C 时已不存在^[31]。因此,自然冷却后的 SEM 中未见针状的钙矾石,而喷水冷却后的 SEM 图中能看到较多的钙矾石,表明喷水后 ECC 内又重新生成了部分钙矾石。而钙矾石会对混凝土产生破坏性膨胀,因此,相比自然冷却,喷水冷却后的 ECC 裂缝增多,宽度变大。400 °C 时,可见内部物质更加松散,出现较多细小孔洞,此时,ECC 抗压强度已大量丧失。喷水冷却的 ECC 中仍可见少量零散分布的针簇状水化产物,可见经过 400 °C 高温后,水泥中的未水化物质大部分已高温分解。

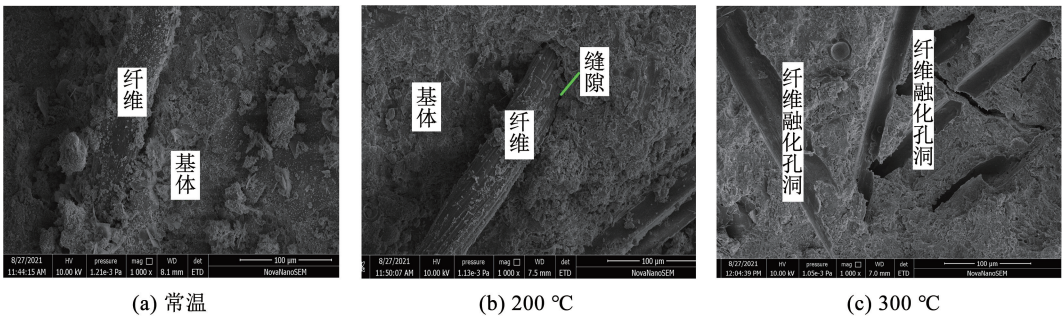


图 14 PVA 纤维 SEM 扫描

Fig. 14 SEM scan of PVA fiber

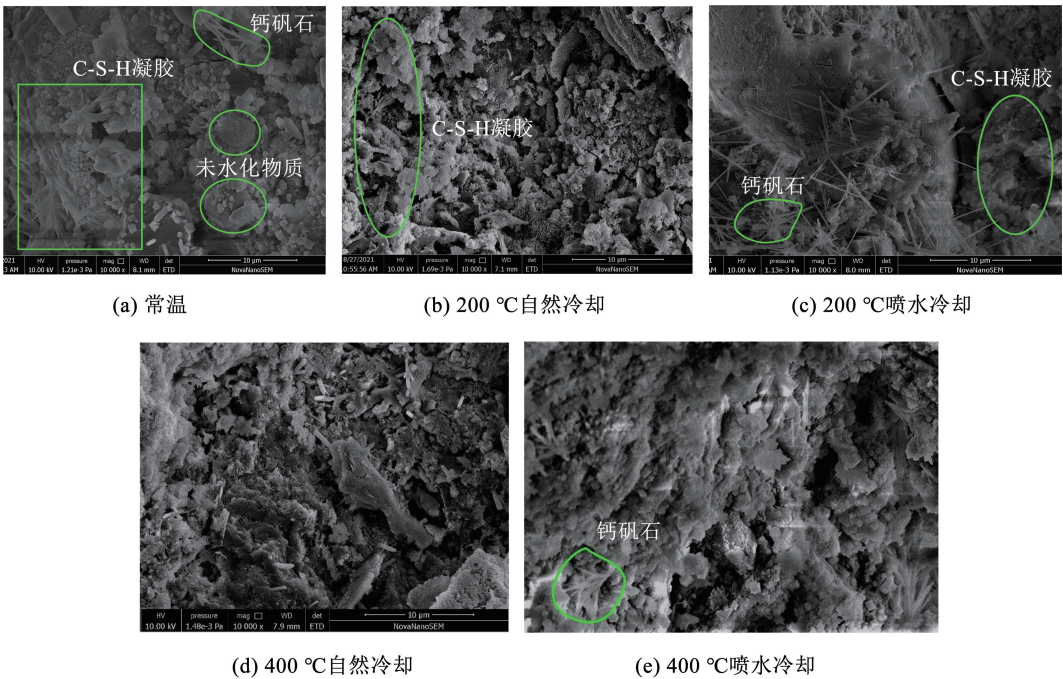


图 15 水化物 SEM 扫描

Fig. 15 SEM scan of hydration products

3 结 论

ECC 经过高温后力学性能损失严重,且冷却方式对其力学性能影响显著。本文通过高温后 ECC

力学性能试验及扫描电镜观察,研究了其宏观和微观特征,分析 ECC 高温冷却后的破坏形态与损伤机理,主要研究结论如下:

1) 高温使 PVA 纤维熔化产生大量孔洞释放了

ECC 内部压力,500 ℃ 以下 ECC 混凝土未出现爆裂剥落,因此 ECC 具有良好的热稳定性。高温后 ECC 质量损失从自由水转向结合水,经 500 ℃ 后最大烧失率 13.9%。

2) 冷却方式对 ECC 高温后抗压强度的影响显著,而 ECC 抗折强度经两种冷却方式后随温度升高均逐步下降。由于高温使混凝土内部骨料膨胀,同时部分水损失及纤维熔化使混凝土更为密实,因此自然冷却时,ECC 在 200 ~ 400 ℃ 之间抗压强度增强。而喷水冷却后,抗压强度随温度升高单调降低。由于喷水冷却的 ECC 较自然冷却吸入的水分占比高,产生的二次水化产物多,从而提高了 ECC 的抗折强度,因此 400 ℃ 时喷水冷却比自然冷却抗折强度提升 17%。

3) 普通混凝土高温后抗压强度折减系数曲线不适用于 ECC 高温后抗压强度的折减规律。本文拟合了高温后 ECC 抗压强度的折减公式,适用于不同冷却方式后 ECC 抗压强度计算。

4) 高温后 ECC 内纤维与基体的黏结性能变差,温度上升到 300 ℃ 时纤维逐步熔化。PVA 纤维熔化导致 ECC 的力学性能降低,因此,可利用更高熔点的纤维或对纤维涂抹阻燃剂等方法提高 ECC 高温力学性能。随着温度的升高水化物之间逐渐呈现独立存在的分散体,导致混凝土内部结构整体松散,产生细小的裂缝,从而降低 ECC 力学性能。

参考文献

- [1] LI V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4): 531
LI V C. Progress and application of engineered cementitious composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4): 531. DOI: 10.14062/j. issn. 0454 - 5648. 2007. 04. 026
- [2] MA Hongqiang, YI Cheng, WU Chao. Review and outlook on durability of engineered cementitious composite (ECC) [J]. Construction and Building Materials, 2021, 287(2): 122719. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2021. 122719
- [3] YU Kequan, WANG Yichao, YU Jiangtao, et al. A strain-hardening cementitious composites with the tensile capacity up to 8% [J]. Construction and Building Materials, 2017, 137: 410. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2017. 01. 060
- [4] 乔思皓, 薛婉文, 吴绍奇, 等. 粉煤灰掺量对 ECC 力学性能及纤维破坏形态的影响[J]. 混凝土, 2022(8): 82
QIAO Sihao, XUE Wanwen, WU Shaoqi, et al. Effect of fly ash content mechanical properties and fiber failure pattern of engineered cementitious composite [J]. Concrete, 2022(8): 82. DOI: 10.3969/j. issn. 1002 - 3550. 2022. 08. 018
- [5] KEOLEIAN G A, KENDALL A, CHANDLER R, et al. Life-cycle cost model for evaluating the sustainability of bridge decks [C]// NOWAK A S, FRANGOPOL D M. Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems. Gainesville; American Society of Civil Engineers, 2005
- [6] KEOLEIAN G A, KENDALL A, DETTLING J E, et al. Life cycle modeling of concrete bridge design: comparison of ECC link slabs and conventional steel expansion joints [J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005, 11(1): 51. DOI: http://dx. doi. org/10. 1061/(ASCE)1076 - 0342(2005)11:1(51)
- [7] SARVARANTA L, MIKKOLA E. Fibre mortar composites under fire conditions: effects of ageing and moisture content of specimens [J]. Materials and Structures, 1994, 27(9): 532. DOI: 10.1007/bf02473214
- [8] 元成方, 赵军. 聚丙烯纤维混凝土的高温损伤机理 [J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(1): 37
YUAN Chengfang, ZHAO Jun. Damage mechanism of polypropylene fiber reinforced concrete exposed to high Temperature [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2017, 35(1): 37. DOI: 10.14136/j. enki. issn1673 - 2812. 2017. 01. 008
- [9] KRISHNA D A, PRIYADARSINI R S, NARAYANAN S. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete [J]. Procedia Structural Integrity, 2019, 14: 384. DOI: 10.1016/j. prostr. 2019. 05. 047
- [10] BHAT P S, CHANG V, LI M. Effect of elevated temperature on strain-hardening engineered cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2014, 69: 370. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2014. 07. 052
- [11] 王振波, 韩硕, 孙鹏, 等. 混杂纤维 ECC 高温后力学特性与微观结构变化 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 74
WANG Zhenbo, HAN Shuo, SUN Peng, et al. Mechanical characteristics and microstructure change of hybrid fiber ECC after exposure to elevated temperature [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 74. DOI: 10.13245/j. hust. 210513
- [12] 陈海彬, 周建超, 王棒棒. 高温后混凝土抗压强度试验研究 [J]. 混凝土, 2021(10): 23
CHEN Haibin, ZHOU Jianchao, WANG Bangbang. Experimental study on compressive strength of concrete after high temperature [J]. Concrete, 2021(10): 23. DOI: 10.3969/j. issn. 1002 - 3550. 2021. 10. 006
- [13] FUA S. Effect of cooling on the residual mechanical properties and cracking of plain and fibrous geopolymer concretes at elevated temperatures [J]. Structural Concrete, 2019, 20(5): 1583. DOI: 10.1002/suco.201800267
- [14] YU Kequan, DAI Jianguo, LU Zhoudao, et al. Mechanical properties of engineered cementitious composites subjected to elevated temperatures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(10): 04014268. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943 - 5533. 0001241
- [15] 商兴艳, 陆洲导. 高温后水泥基复合材料的力学性能 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36(5): 24
SHANG Xingyan, LU Zhoudao. Mechanical properties of engineered cementitious composites exposed to elevated temperatures [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(5): 24. DOI: 10.13289/j. issn. 1009 - 6264. 2015. 05. 005
- [16] YU Jiangtao, WENG Wenfang, YU Kequan. Effect of different cooling regimes on the mechanical properties of cementitious composites subjected to high temperatures [J]. The Scientific World

- Journal, 2014; 298213. DOI: 10.1155/2014/289213
- [17] YU Kequan, LU Zhoudao, YU Jiangtao. Residual compressive properties of strain-hardening cementitious composite with different curing ages exposed to high temperature [J]. Construction and Building Materials, 2015, 98: 146. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.041
- [18] 高延性纤维增强水泥基复合材料力学性能试验方法: JC/T 2461—2018[S]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2018
Standard test method for the mechanical properties of ductile fiber reinforced cementitious composites: JC/T 2461—2018 [S]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2018
- [19] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019
Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019
- [20] 李俊华, 邱栋梁, 俞凯, 等. 高温后型钢混凝土粘结滑移性能研究[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 190
LI Junhua, QIU Dongliang, YU Kai, et al. Study on bond-slip behavior between spayed steel and concrete in src structures after exposed to high temperature [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 190. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.12.1184
- [21] KHOURY G A. Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment [J]. Magazine of concrete Research, 1992, 44(161): 291. DOI:10.1680/mac.1992.44.161.291
- [22] DIAS W P S, KHOURY G A, SULLIVAN P J E. Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °C (1292 F) [J]. Materials Journal, 1990, 87(2): 160
- [23] 李卫, 过镇海. 高温下砼的强度和变形性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 1993, 14(1): 8
LI Wei, GUO Zhenhai. Experimental study on strength and deformation performance of concrete at high temperature [J]. Journal of Building Structures, 1993, 14(1): 8. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.1993.01.002
- [24] 杨彦克, 李国华. 火灾砼结构损伤评估现状与发展 [J]. 四川建筑科学研究, 1993(2): 6
YANG Yanke, LI Guhua. Present situation and development of damage assessment of concrete structures in fire [J]. Sichuan Building Science, 1993(2): 6
- [25] 徐彧, 徐志胜. 高温作用后混凝土强度试验研究 [J]. 混凝土, 2000(2): 44
XU Yu, XU Zhisheng. Experiment investigation of strength of concrete after high temperature [J]. Concrete, 2000(2): 44
- [26] 潘家鼎, 王春华, 李小红, 等. 高温冷却后预应力混凝土受弯构件强度损伤的试验研究 [C]//第三届全国结构工程学术会议论文集(上). 北京: 清华大学出版社, 1994: 828
PAN Jiading, WANG Chunhua, LI Xiaogong, et al. Experimental study on strength damage of prestressed concrete flexural members after high temperature cooling [C]//Proceedings of the Third National Conference on Structural Engineering (I). Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 828
- [27] 陆洲导, 朱伯龙, 谭玮. 钢筋混凝土梁在火灾后加固修复研究 [C]//土木工程防灾国家重点实验室论文集. 上海: 同济大学出版社, 1993: 152
LU Zhoudao, ZHU Bolong, TAN Wei. Study on the retrofit of reinforced concrete beam after fire [C]//Proceedings of State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering. Shanghai: Tongji University Press, 1993: 152
- [28] 朱玛, 徐志胜, 徐彧. 高温后混凝土强度实验研究 [J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2000, 15(2): 70
ZHU Ma, XU Zhisheng, XU Yu. Experimental investigation of strength of concrete at elevated temperature [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2000, 15(2): 70
- [29] 杨珊, 李祚, 彭林欣, 等. 高温后 PVA 纤维增强水泥基复合材料力学性能试验研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2021(4): 49
YANG Shan, LI Zuo, PENG Linxin, et al. Study on mechanical properties of PVA-ECC composites after elevated temperature [J]. China Concrete and Cement Products, 2021(4): 49. DOI:10.19761/j.1000-4637.2021.04.049.06
- [30] DU Qiang, WEI Jing, LV Jing. Effects of high temperature on mechanical properties of polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC) [J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(8): 965
- [31] 钱觉时, 余金城, 孙化强, 等. 钙矾石的形成与作用 [J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(11): 1569
QIAN Jueshi, YU Jincheng, SUN Huaqiang, et al. Formation and function of ettringite in cement hydrates [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(11): 1569. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2017.11.04