

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230305001

高温后珊瑚海水海砂混凝土力学性能试验研究*

胡强^{1,2}, 李佳成¹, 陈宇良^{1,2}, 陈宗平^{1,3}

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 广西高校防灾减灾与预应力技术重点实验室, 广西 柳州 545006; 3. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 为研究高温后珊瑚海水海砂混凝土(CSSC)的力学性能,设计制作了30个CSSC试件,进行常温与高温后轴心受压和静力受压弹性模量试验。通过试验观察了试件高温后的表观变化和轴心受压破坏形态,获取了轴心受压全过程应力—应变曲线、弹性模量及烧失率等参数,深入高温后CSSC微观结构变化机制,得到了受火温度对CSSC力学性能的影响规律,揭示了高温作用后CSSC的力学性能退化机理。结果表明:随着受火温度的增加,CSSC力学性能不断劣化。 $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时CSSC轴心抗压强度和弹性模量分别比常温时下降了26.52%,6.19%,混凝土具有较好的力学性能; $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时CSSC弹性模量下降迅速,弹性模量损失率为65.48%,但与 $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比混凝土轴心抗压强度上升了6.4%; $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时CSSC轴心抗压强度下降迅速,强度损失率为66.74%; $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时CSSC破坏严重,已无法测得有效的弹性模量。

关键词: 珊瑚海水海砂混凝土; 高温; 微观结构; 受压性能; 强度退化机理

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0544-07

Experimental Study on Mechanical Properties of Coral Seawater Sea Sand Concrete after High Temperature

HU Qiang^{1,2}, LI Jiacheng¹, CHEN Yuliang^{1,2}, CHEN Zongping^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;

2. Guangxi University Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation and Prestress Technology, Liuzhou 545006, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structure Safety of the Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To study the mechanical properties of Coral Seawater Sea Sand Concrete (CSSC) after exposure to high temperatures, axial compression and static compression elastic modulus tests were conducted on 30 CSSC specimens at room and high temperatures. The axial compression failure patterns and apparent changes of the specimens after exposure to high temperatures were observed, and parameters such as the complete stress-strain behavior under axial compression, elastic modulus, and

* 收稿日期:2023-03-05;修回日期:2023-05-15

基金项目:中国博士后科学基金(2021M693854)、广西自然科学基金面上项目(2020GXNSFAA159150)、广西科技大学研究生教育创新计划项目(GKYC202229)资助

作者简介:胡强(1978—),男,高工,硕导。主要从事组合结构与结构抗震加固方面的研究。E-mail:330437811@qq.com

通信作者:陈宇良(1987—),男,副教授,硕导。主要从事钢-混凝土组合结构、海洋及近海混凝土结构等方面的研究。E-mail:ylchen@gxust.edu.cn

weight loss rate were obtained. In conjunction with an in-depth analysis of the mechanisms of microstructural changes in CSSC after exposure to high temperatures, the study explored the influence of fire temperature on CSSC's mechanical properties and revealed the degradation mechanism of these properties after high-temperature exposure. The results demonstrated a progressive decline in the mechanical properties of CSSC as the fire temperature increased. At 200 °C, compared to specimens at room temperature, the axial compressive strength and elastic modulus of CSSC decreased by 26.52% and 6.19%, respectively, indicating good mechanical properties. At 400 °C, the elastic modulus of CSSC decreased rapidly, with a loss of 65.48%, but its axial compressive strength increased by 6.4% compared to specimens at 200 °C. At 600 °C, the axial compressive strength of CSSC exhibited a rapid decline, with a strength loss rate of 66.74%. The CSSC was severely damaged at 800 °C, making it impossible to measure its effective elastic modulus.

Keywords: coral seawater sea sand concrete; high temperature; microstructure; mechanical properties; strength degradation mechanism

0 引言

目前我国天然砂石资源已出现供不应求现象^[1]。在海洋工程建设中,若用珊瑚与海砂代替天然集料,用海水代替淡水作为拌合用水,配制珊瑚海水海砂混凝土(CSSC),可有效降低建设成本与周期,节约不可再生的砂石资源^[2]。

近年来,随着涉海工程的不断增加,珊瑚混凝土逐渐成为国内外学者的研究热点。B.Da等^[3]研究了珊瑚骨料海水混凝土的配制工艺、力学性能,结果表明珊瑚骨料混凝土单轴压缩试样呈脆性破坏,且在相同强度等级下,珊瑚骨料混凝土的脆性比普通骨料混凝土和轻骨料混凝土更明显。陈宗平等^[4]发现以珊瑚为粗骨料拌制的混凝土出现损伤时应变更大,并推导出珊瑚粗骨料海水混凝土的轴压本构方程。Q.K.Wang等^[5]研究了珊瑚礁砂混凝土的力学性能和微观结构,将珊瑚礁砂混凝土与天然河砂混凝土对比,发现珊瑚礁砂粗糙多孔的表面提高了珊瑚礁砂混凝土界面过渡区的力学性能。刁益彤等^[6]发现掺入珊瑚微粉能够提高珊瑚混凝土的微观力学性能,当珊瑚微粉掺量为10%时,其力学性能最好。陈宇良等^[7]研究了高温下珊瑚海水海砂混凝土的直剪力学性能,发现随着经历最高温度及恒温时长的增加,珊瑚海水海砂混凝土剪切承载力逐渐降低,体积膨胀率和质量损失率逐渐增大。周春恒等^[8]研究了高温作用后GFRP筋与珊瑚混

土的粘结性能,发现珊瑚骨料中的碳酸钙会在高温作用下发生分解,造成珊瑚混凝土的质量损失和结构破坏。D.Vafaei等^[9]通过对高温作用下纤维增强海水海砂混凝土力学性能性能的研究,发现纤维会在高温下融化产生额外的孔隙,缓解混凝土内部的孔隙压力,减少混凝土内部裂缝和孔隙的增加,提高混凝土高温后的抗压性能。J.B.Guo等^[10]研究碱性硫酸镁珊瑚骨料混凝土高温后的劣化特性,建立了珊瑚混凝土高温损伤与残余抗压强度之间的关系。

火灾作为结构难以避免的频发灾害,持续的高温会使混凝土材料的力学性能严重劣化,导致结构因承载力降低而破坏^[11]。因此,本研究拟通过对CSSC高温后的轴心抗压和弹性模量试验,分析不同温度对CSSC的轴心抗压强度、弹性模量的影响规律;研究高温后CSSC劣化机理,以期为海洋工程结构的防火设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试验材料和配合比

将南海某岛礁珊瑚,经颚式破碎机破碎,筛分成5~20 mm的珊瑚颗粒作为粗骨料,根据《轻集料及其试验方法》^[12],实测珊瑚粗骨料的物理性能见表1。细骨料采用海砂,细度模数为2.7,水泥采用P.O 42.5普通硅酸盐水泥,采用聚羧酸高效减水剂,海水为拌合用水。参照《轻骨料混凝土应用

技术标准》^[13]和《珊瑚骨料混凝土应用技术规程》^[14],配置强度等级为LC30的CSSC,配合比详见表2。

表1 珊瑚骨料物理性能

Table 1 Physical properties of coral aggregates

物理量	吸水率/%	含水率/%	堆积密度/(kg·m ⁻³)	表观密度/(kg·m ⁻³)
取值	12.79	0.67	879.90	1 667.00

表2 混凝土配合比

Table 2 Concrete mix ratio

单位:kg/m ³							
强度等级	水胶比	珊瑚骨料	海砂	水泥	水	附加水	减水剂
LC30	0.40	655.75	760.08	535.00	214.00	75.08	1.40

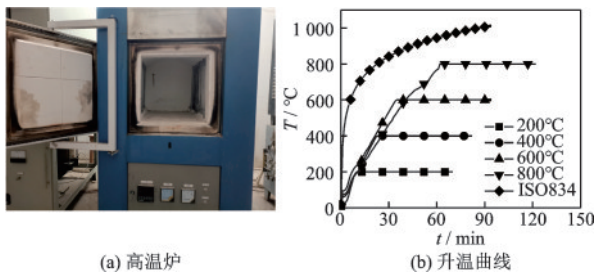
1.2 试件设计

以受火温度(常温(约为25℃)、200、400、600℃和800℃)为变化参数,设计并制作了5组共计30个尺寸为 $\phi 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的圆柱体试件,每组6个试件,3个用于轴心抗压试验,3个用于静力受压弹性模量试验。试件室内养护28 d后进行高温试验。

1.3 试验设备和加载制度

1.3.1 高温试验

将养护完成的试件放入型号为SX2-10-24的高温炉中(如图1(a)所示),以10℃/min的升温速率将试件从室温加热至目标温度(200、400、600和800℃),并恒温1 h,然后关闭高温炉,使试件自然冷却至室温。为防止过快的加热速率使珊瑚混凝土表面发生剥落现象,故实际加热速率低于ISO834标准加热速率,实际升温曲线与标准升温曲线如图1(b)^[7]所示。



(a) 高温炉

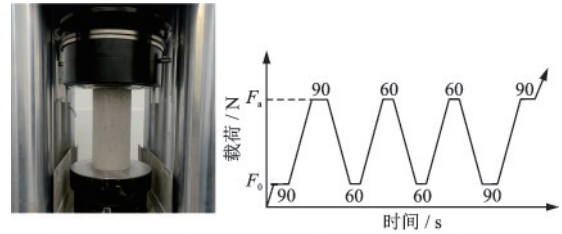
(b) 升温曲线

图1 升温装置与升温曲线

Fig. 1 Heating device and heating curves

1.3.2 轴心抗压和静力受压弹性模量试验

轴心抗压试验和静力受压弹性模量试验均参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》^[15],采用Matest力学试验机进行加载,如图2(a)所示。Matest力学试验机自带高精度传感器可连续实时采集应变数据,轴心抗压试验采用位移控制,加载速率为1.2 mm/min。弹性模量试验加载制度如图2(b)所示。



(a) 意大利Matest试验机

(b) 静力受压弹性模量加载制度

图2 加载设备与加载制度

Fig. 2 Loading equipment and loading system

注: F_a 为应力为1/3轴心抗压强度时的荷载; F_0 为应力为0.5 MPa时的初始荷载

2 试验结果及其分析

2.1 高温后试验现象

图3为CSSC在经历不同高温后的表观变化。CSSC在常温下为青灰色, T 为受火温度,即试件在高温炉中所经历的最高温度(℃)。 $T=200\text{ }^\circ\text{C}$,表面颜色变浅,为浅灰色; $T=400\text{ }^\circ\text{C}$,表面颜色有所加深,整体呈黄灰色,同200℃一样表面无可见裂纹; $T=600\text{ }^\circ\text{C}$,表面颜色为浅褐色并出现裂纹,部分裂纹附近颜色为深褐色; $T=800\text{ }^\circ\text{C}$,表面颜色呈现为灰白色,局部出现浅棕色,表面裂纹增多且互连通呈现龟裂状。

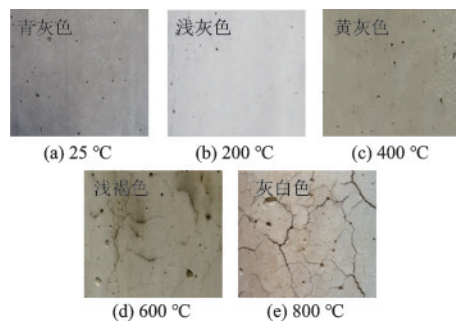


图3 高温后试件表观变化

Fig. 3 Apparent changes in specimens after high temperature

使用电子天平对高温前后的试件进行称重,并按式(1)计算高温前后试件的质量变化:

$$I = \frac{m - m_t}{m} \quad (1)$$

式中, m 为高温前试件的质量(kg); m_t 为高温后试件的质量(kg)。

图4给出了经历不同受火温度后试件的质量烧失率。由图可知,随着温度的升高,试件的质量烧失率逐步增大。CSSC经历不同高温作用后,其质量损失率分别为2.5%、7.1%、10.1%、11.5%。

对于受火温度为200℃的试件,其质量损失主要来源于物理吸附水和C-S-H凝胶的脱水蒸发,以及钙矾石(AFt)、AFm、Friedel盐的分解脱水; $T=400$ ℃时试件质量损失来自凝胶孔中水分的蒸发, Friedel盐的分解和C-S-H凝胶的持续脱水,虽然C-S-H凝胶会在比较宽泛的范围内持续脱水,但C-S-H凝胶中结合水的析出主要在270℃,所以与 $T=200$ ℃相比 $T=400$ ℃时质量损失增加了4.6%; $T=600$ ℃时质量损失来源于C-S-H凝胶和CH的受热分解; $T=800$ ℃时质量损失是由于碳酸钙受热分解,二氧化碳逸出所造成。

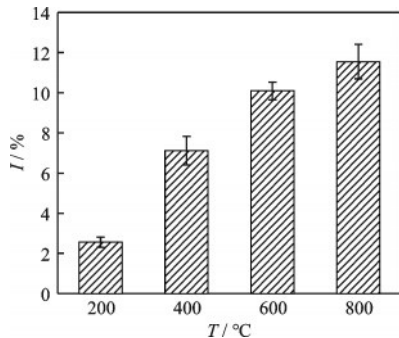


图4 质量烧失率

Fig. 4 Weight loss rate

2.2 高温后轴心抗压破坏过程及形态

CSSC经历不同的高温作用后,轴心抗压破坏形态随受火温度的增加而有所不同。在 $T \leq 400$ ℃时,试件的破坏过程与常温试件相似。在加载初期,试件上出现少量的纵向裂缝,随着荷载的增大,裂缝逐渐发展贯通,形成一至两条明显的主裂缝,表面有部分混凝土剥落,如图5(a~c)。 $T \geq 600$ ℃时,试件表面在加载前就存在裂缝,在加载过程中,试件表面原有的裂缝不断发展,周边也出现大量的新生裂缝,与原有的裂缝相互贯通并出现混凝土剥

落现象,在试件破坏时表面没有出现明显的主裂缝,如图5(d,e)。

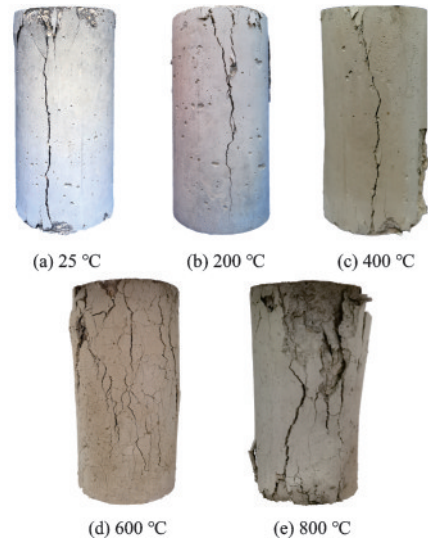


图5 试件轴心抗压破坏形态

Fig.5 Damage patterns of specimens under axial compression

2.3 应力—应变曲线

根据试验实测的荷载—变形数据,利用式(2)进行数据换算,可得试件受力过程中的应力—应变全过程曲线。

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2)$$

式中, N 为试件轴向力(N); A 为试件的全截面面积(mm^2)。

图6为不同受火温度后珊瑚海水海沙混凝土试件的应力—应变曲线。分析高温对CSSC微观变化可知,高温作用对混凝土的削弱是逐步加深的,这使得经历不同受火温度后CSSC的破坏过程有所不同。本文基于试验结果,将高温后CSSC轴心受压应力—应变曲线划分为4个阶段,其特点如下:

(1)压缩段(OA)的斜率由小变大, A点为OB上曲率最大的点。压缩段是CSSC在受压初期,混凝土内部因高温所产生的不稳定微裂缝在荷载作用下逐渐“合拢”的过程,故常温下CSSC轴心受压应力—应变曲线中没有压缩段。此外,随着受火温度的增加,特征点A的应变也不断增加,这是由于高温加剧了混凝土的内部损伤,从而增加了压缩段的长度。

(2)微裂缝扩展段(AB), A点过后,应力—应变曲线的斜率继续增大直至稳定,混凝土内部微裂缝

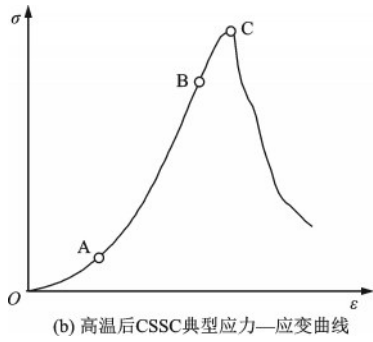
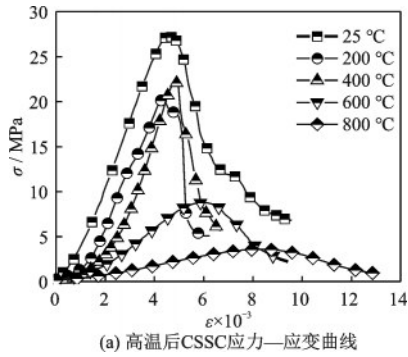


图6 轴心受压应力—应变曲线
Fig. 6 Axial compressive stress-strain curves

开始扩展,并在薄弱处生成新的微裂缝,微裂缝间会相互连通,但不会形成断裂面。在此阶段,珊瑚骨料与水泥基体形成机械啮合状结构共同抵抗外力,混凝土应力增长较快而应变增长缓慢,混凝土进入弹塑性变形阶段。当受火温度超过600 °C时,水泥基体的削弱使机械啮合状结构失效,混凝土进入塑性变形阶段,该阶段斜率减小与压缩段斜率相近。

(3) 裂缝稳定发展段(BC),随着应力的增加,CSSC 塑性变形显著增大,内部微裂缝不断延伸扩展,形成贯通裂缝,应力应变曲线斜率迅速减小,直至曲线应力峰值点C。受火温度的增加会使该阶段应力—应变曲线斜率变化减缓。

(4) 下降段(C点后),此阶段贯通裂缝继续发展连通形成断裂面,应力—应变曲线进入下降段。当受火温度小于400 °C时,应力迅速下降,曲线下降段坡度较陡,当受火温度大于600 °C时,应力下降速度缓慢,曲线较稳平缓。

2.4 高温后 CSSC 力学性能

见表3中为试件在不同温度作用后混凝土的峰值应力 $\sigma_{u,T}$ 、峰值应变 $\epsilon_{u,T}$ 和弹性模量 E_T ,表中数据取各组3个试件的平均值。弹性模量数据由静力受压弹性模量试验得到,因800 °C的试件承载力过低,

无法测得有效的弹性模量,故表中无800 °C的弹性模量。

表3 特征点参数
Table 3 Feature point parameters

参数	25 °C	200 °C	400 °C	600 °C	800 °C
$\sigma_{u,T}/\text{MPa}$	27.65	20.32	21.71	9.09	3.65
$\epsilon_{u,T}/10^{-3}$	5.88	3.22	5.88	7.13	8.74
E_T/GPa	15.19	14.25	4.95	2.24	—

2.4.1 高温后 CSSC 轴心抗压强度

CSSC 经不同受火温度后的轴心抗压强度如图7所示。结果显示随着受火温度从25 °C~800 °C的增加,试件的轴心抗压强度有不同程度的降低。受火温度为200 °C、400 °C、600 °C和800 °C的轴心抗压强度比常温分别下降了26.52%、20.57%、66.74%和86.65%。

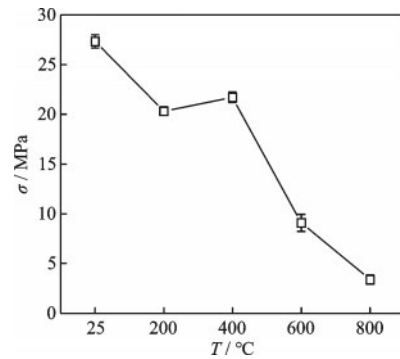


图7 不同受火温度后的轴心抗压强度
Fig. 7 Axial compressive strength after different fire temperatures

在 $T=200$ °C和 $T=400$ °C时,CSSC 的轴心抗压强度为常温状态下的73.75%和79.43%。这是由于在 $T \leq 400$ °C时,水化产物受热分解以及自由水的蒸发会使内部结构产生孔隙和裂纹,从而导致CSSC 轴心抗压强度的降低。 $T=400$ °C时混凝土轴心抗压强度比 $T=200$ °C时混凝土轴心抗压强度增加了6.4%。这是由于高温作用下,混凝土内部会持续进行水化反应,新生成的水化产物会填充水泥基体的裂缝与孔隙,减少混凝土内部有害孔的数量,增加水泥基体的致密度。在 $T=600$ °C时,基体内的CH与C-S-H凝胶分解,水泥基体孔结构粗化严重,水蒸气大量逸出使混凝土内部形成大量裂缝,混凝土轴心抗压强度迅速下降。在 $T=800$ °C时,碳酸钙高温分解使珊瑚骨料高温损伤加剧,混凝土轴心抗压强度进一步下降,仅有常温下的

13.35%。

2.4.2 高温后 CSSC 弹性模量

CSSC 经不同受火温度后的弹性模量变化如图 8 所示。如图所示, CSSC 弹性模量随着受火温度的升高而逐渐降低。 $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 试件破坏严重, 已无法测得有效的弹性模量。受火温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的弹性模量比常温时分别下降了 6.19%、65.48% 和 84.89%。

相比于轴心抗压强度, 高温后弹性模量在 $T=$

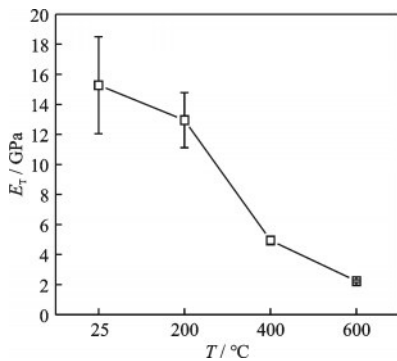


图 8 不同受火温度后的弹性模量

Fig. 8 Modulus of elasticity after different fire temperatures

$400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时下降显著, 这是由于弹性模量对混凝土内部孔隙率的变化更为敏感。在 $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 混凝土内部水化产物分解较少且混凝土内部的二次水化持续进行, 混凝土内部孔隙率变化较小。在 $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 水泥基体与骨料的热膨胀不一致产生的变形差和内应力, 使骨料与水泥基体产生界面裂缝, 弹性模量迅速下降。在 $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 孔结构粗化严重, 混凝土松散加剧, CSSC 弹性模量降低 84.89%, 基本完全损失。

2.5 高温后 CSSC 力学性能劣化机理

图 9 为常温和高温后 CSSC 的微观形貌图, 常温下 CSSC 的水泥基体结构较为致密, 孔隙率较小, 存在部分小孔与微裂纹。在 $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 水泥基体的致密度较常温时逐步提高。这是由于高温作用下, 混凝土内部的自由水或化学结合水析出蒸发, 水蒸气在混凝土内部不易逸出, 促使水泥水化反应的继续进行, 同时较高的孔隙压力会在混凝土内部形成“蒸压养护”作用, 使水泥基体更为致密, 这种持续水化会随着受火温度的提高而持续进行。

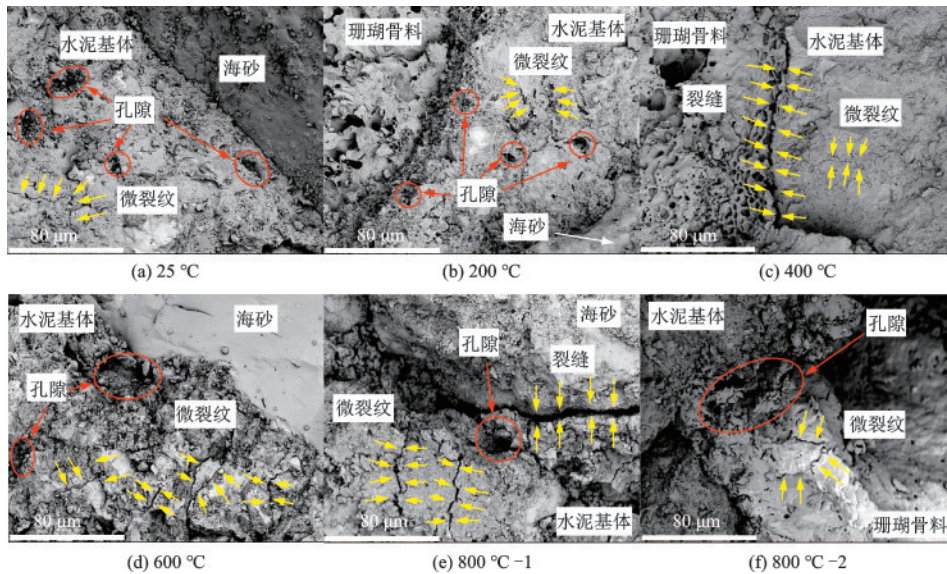


图 9 不同受火温度下 CSSC 微观形貌

Fig. 9 Microscopic morphology of CSSC at different fire temperatures

在 $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 水化产物脱水分解, 珊瑚骨料与水泥基体界面处出现孔洞, 界面粘结力削弱, 如图 9(b) 所示。当 $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 珊瑚骨料与水泥基体由于热膨胀不一致产生变形差和内应力, 骨料与水泥基体间产生界面裂缝, 界面粘结力丧失, 如图 9(c) 所示。

当 $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, CH 和 C-S-H 凝胶的受热分解, 使水泥基体产生了大量的裂纹与孔隙, 水泥基体孔结构严重粗化。此外, $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作用后珊瑚骨料表面出现了微裂缝与分解现象, 这是由于高温作用下珊瑚骨料内部晶体结构的软化及颗粒间变形不协调以及碳酸钙在 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时分解所导致

的^[11],如图9(f)所示。

图10为常温和高温后CSSC界面过渡区的微观形貌图。珊瑚骨料作为天然多孔结构材料,水泥浆体侵入珊瑚骨料内部与珊瑚骨料相互嵌固,形成机械啮合状结构,如图10(a)所示;随着受火温度的提高,水泥基体持续脱水收缩,珊瑚骨料与水泥基体间产生了界面裂缝,但界面过渡区的机械啮合状结构未被破坏,如图10(b)所示;当 $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,水泥基体开始分解,基体结构松散,裂纹与孔隙相互

贯通,最终导致水泥基体断裂,机械啮合状结构失效,如图10(c)所示。

“蒸压养护”作用提升了水泥基体的致密度,减小了混凝土的孔隙率,但骨料与水泥基体间界面裂缝的出现造成混凝土弹性模量大幅下降, $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,CSSC弹性模量损失65.48%。水泥基体热损伤的加剧使机械啮合状结构失效,混凝土轴心抗压强度迅速下降, $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,CSSC轴心抗压强度损失66.74%。

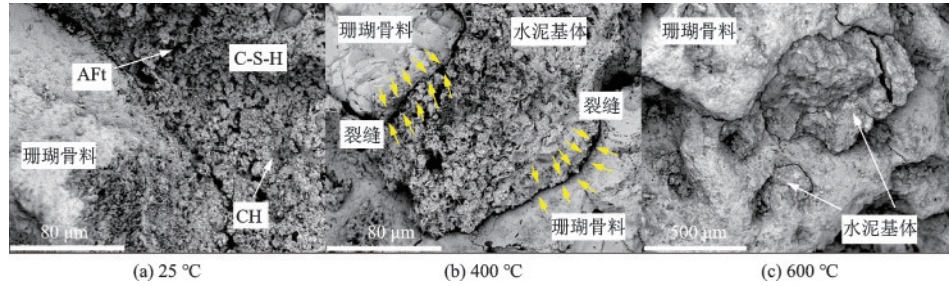


图10 不同受火温度下CSSC界面过渡区微观形貌

Fig. 10 Microscopic morphology of the interfacial transition zone of CSSC at different fire temperatures

3 结论

通过30个高温后珊瑚海水海沙混凝土(CSSC)试件的轴心抗压试验和静力受压弹性模量试验,对试验结果的分析与讨论,得到如下结论:

(1)随着受火温度的增加,CSSC表面颜色由浅变深再变浅。在 $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后试件表面出现裂纹,且裂纹周围出现颜色加深现象。

(2)CSSC的轴心抗压强度在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时下降速率最大,相较于 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时降低了58.13%,在 $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时CSSC的轴心抗压强度仅为常温的13.35%。CSSC的弹性模量在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时下降速率最大,相较于 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时降低了65.26%。

(3)在 $T=400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时珊瑚骨料与水泥基体间产生界面裂缝,界面粘结力基本丧失;在 $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水泥基体孔结构粗化严重,机械啮合状结构失效。

参考文献:

[1] 李小伟,曹旗.FRP配筋海水珊瑚骨料混凝土材料及构件力学性能研究进展[J].复合材料学报,2022,39(3):926-941.
Li X W, Cao Q. Progress of research on mechanical properties of FRP reinforced seawater coral aggregate

concrete materials and members[J]. Journal of Composite Materials, 2022, 39(3): 926-941. (in Chinese)

[2] 岳承军,余红发,麻海燕,等.全珊瑚海水混凝土动态冲击性能试验研究[J].材料导报,2019,33(16):2697-2703.

Yue C J, Yu H F, Ma H Y, et al. Experimental study on dynamic impact performance of all-coral seawater concrete [J]. Materials Guide, 2019, 33 (16) : 2697-2703. (in Chinese)

[3] Da B, Yu H, Ma H, et al. Experimental investigation of whole stress-strain curves of coral concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 81-89.

[4] 陈宗平,周济,陈宇良,等.珊瑚粗骨料海水混凝土力学性能试验研究[J].应用力学学报,2022,37(5):1999-2006.

Chen Z P, Zhou J, Chen Y L, et al. Experimental study on mechanical properties of seawater concrete with coral coarse aggregate[J]. Journal of Applied Mechanics, 2022, 37(5): 1999-2006.(in Chinese)

[5] Wang Q, Li P, Tian Y, et al. Mechanical properties and microstructure of Portland cement concrete prepared with coral reef sand[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2016, 31(5): 996-1001.

[6] 刁益彤,麻海燕,余红发,等.珊瑚混凝土骨料-净浆界面区强度[J].建筑材料学报,2021,24(3):516-524.

(本文编辑:周小潭)

(下转第567页)