

文章编号:1007-9629(2021)01-0022-09

# 高温后 HVFA-SHCC 的单轴压缩力学性能及本构关系

赵 军<sup>1</sup>, 牛森鑫<sup>2</sup>, 周甲佳<sup>1</sup>, 王 志<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 力学与安全工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 采用 40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体试件,研究了高温后大掺量粉煤灰-应变硬化水泥基复合材料(HVFA-SHCC)的单轴压缩力学性能,探讨了不同目标温度(100、200、400、600、800 ℃)和不同冷却方式(自然冷却、浸水冷却)条件下 HVFA-SHCC 试件抗压强度、弹性模量、压缩韧性、破坏模式及质量的变化.采用扫描电子显微镜(SEM)对试件的微观结构进行分析,获得了高温后 HVFA-SHCC 单轴压缩性能的劣化机理.结果表明:当温度低于 200 ℃时,温度对试件力学性能及质量损失的影响较小;400~800 ℃时,试件内部结构变得疏松,残余力学性能劣化严重,尤其是 800 ℃时,试件的抗压强度仅为常温状态的 39.9%,弹性模量为常温状态的 32.3%,压缩韧性指数为常温状态的 59.0%,质量损失率达 15.5%;浸水冷却试件的残余力学性能得到了一定程度的提高.同时,基于试验结果,建立了高温后 HVFA-SHCC 的单轴压缩本构方程.

**关键词:** 大掺量粉煤灰-应变硬化水泥基复合材料; 高温; 冷却方式; 残余力学性能; 微观结构; 本构关系

中图分类号:TB332

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.01.004

## Uniaxial Compressive Behavior and Constitutive Relationship of HVFA-SHCC after Exposure to High Temperature

ZHAO Jun<sup>1</sup>, NIU Miaoxin<sup>2</sup>, ZHOU Jiajia<sup>1</sup>, WANG Zhi<sup>1</sup>

(1. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Investigations on the residual uniaxial compressive behaviors of strain hardening cementitious composites with high-volume of fly ash (HVFA-SHCC) subjected to elevated temperatures were carried out. Specimens with dimension of 40 mm×40 mm×160 mm were exposed to different temperatures (100, 200, 400, 600, 800 ℃). Residual compressive strength, stress-strain curves, compressive toughness, elastic modulus and failure mode were determined after two cooling methods (natural cooling and water cooling). Scanning electron microscope (SEM) was used to analyze the degradation mechanism of HVFA-SHCC at mesoscale level. Experimental results indicate that the temperature has little effect on the mechanical properties and mass loss of HVFA-SHCC when temperature is lower than 200 ℃. At 400–800 ℃, the internal micro-structures of HVFA-SHCC specimen become loose and the residual mechanical properties deteriorate seriously. When the temperature is higher than 800 ℃, the average residual compressive strength, the elastic modulus and the toughness index of the samples is only 39.9%, 32.3% and 59.0% of that at room temperature, respectively. And the mass loss rate is increased to 15.5%. Mean-

收稿日期:2019-08-29; 修订日期:2019-10-03

基金项目:中原千人计划-中原科技创新领军人才项目(ZYQR201912029);国家自然科学基金资助项目(51708510);河南省科技攻关(国际合作项目)(182102410045);教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT16R67)

第一作者:赵 军(1971—),男,河南漯河人,郑州大学教授,博士生导师,博士. E-mail:zhaoj@zzu.edu.cn

通讯作者:周甲佳(1984—),女,河南南阳人,郑州大学讲师,硕士生导师,博士. E-mail:zhouaf@zzu.edu.cn

while, the effect of cooling method on residual mechanical properties is significant. The specimens cooled in water exhibit superior residual mechanical performance. Finally, based on the test results, the uniaxial compressive constitutive relationship of HVFA-SHCC after high temperature is proposed.

**Key words:** strain hardening cementitious composites with high-volume of fly ash(HVFA-SHCC); high temperature; cooling method; residual mechanical property; microstructure; constitutive relationship

应变硬化水泥基复合材料(SHCC)是 Li 等<sup>[1-2]</sup>基于微细观断裂力学,通过选择适当的材料和微观参数所获得的具有应变硬化行为和多裂缝开裂特征的纤维增强水泥基复合材料.当纤维掺量为 2%左右时,其极限拉应变为 3%~5%,裂缝宽度小于 100 μm<sup>[3]</sup>.与普通混凝土相比,SHCC 具有优异的延性性能、耐久性能和耗能能力,适用于高层建筑结构、桥梁、道路工程及修复工程中.因此,自其出现后便受到广泛关注.为减弱 SHCC 基体的刚度,调节基体的流变性能,改善纤维的分布,实现应变硬化和多裂缝开裂效果,掺加粉煤灰等矿物掺和料,部分取代水泥是较为有效的方法.已有研究表明,大掺量粉煤灰对 SHCC 的抗拉性能<sup>[4]</sup>、干缩<sup>[5]</sup>和耐久性能<sup>[6]</sup>等均具有改善作用.此外,粉煤灰作为一种工业废料,当其用于 SHCC 中,亦可满足建筑材料可持续性发展的需要.因此,大掺量粉煤灰-应变硬化水泥基复合材料(HVFA-SHCC)被认为是一种绿色的高性能水泥基复合材料.

SHCC 材料作为一种新型建筑材料,当其用于实际工程中,尤其是承受高温环境(如火电厂、冶金工业厂房、核电站等)时,其耐高温性能势必要引起足够重视.2010 年,Sahmaran 等<sup>[7]</sup>开创性地进行了高温后 SHCC 残余力学性能和微观结构的研究.随

后,大量学者从冷却方式<sup>[8]</sup>、加热方式<sup>[9]</sup>、养护龄期<sup>[10]</sup>、骨料类型<sup>[11]</sup>、PVA 纤维掺量<sup>[12]</sup>、尺寸效应<sup>[13]</sup>、高温后的渗透性能<sup>[14]</sup>,以及纳米粒子对高温性能的改善作用<sup>[15]</sup>等方面对 SHCC 高温损伤进行了研究.然而,这些研究主要集中于高温下粉煤灰与水泥质量比为 1.0~2.5 的 SHCC 残余力学性能方面,针对粉煤灰与水泥质量比大于 4.0 的 HVFA-SHCC 高温后力学性能的研究甚少.目前,仅 Yu 等<sup>[16]</sup>对粉煤灰与水泥质量比为 4.4 的 HVFA-SHCC 高温后残余拉伸性能和抗压强度进行了研究.

为此,本文在已有研究基础上,研究了温度及冷却方式对粉煤灰与水泥质量比为 4.0 的 HVFA-SHCC 试件残余力学性能(抗压强度  $f_c$ 、弹性模量  $E$ 、压缩韧性)及其微观结构的影响,并在此基础上建立相应的本构方程,以期 HVFA-SHCC 的抗火设计等提供参考依据.

1 试验方案

1.1 原材料、配合比和基本力学性能

原材料包括 42.5 普通硅酸盐水泥(C)、精制石英砂(SS)、I 级粉煤灰(FA)、聚羧酸高效减水剂、水(W)和 PVA 纤维等.PVA 纤维的性能参数及 HVFA-SHCC 配合比如表 1、2 所示.

表 1 PVA 纤维的性能参数  
Table 1 Mechanical parameters of PVA fiber

| Length/mm | Diameter/μm | Tensile strength/MPa | Elongation/% | Elastic modulus/GPa | Density/(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|-----------|-------------|----------------------|--------------|---------------------|-------------------------------|
| 12        | 39          | 1 620                | 7            | 42.8                | 1.3                           |

表 2 HVFA-SHCC 的配合比  
Table 2 Mix proportion of HVFA-SHCC

| $m(C):m(FA):$<br>$m(SS):m(W)$ | $\varphi(\text{fiber})/\%$ | $w(\text{superplasticizer})/\%$ |
|-------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| 0.20:0.80:0.20:0.28           | 2.0                        | 0.6                             |

采用狗骨形试件研究了 HVFA-SHCC 材料的单轴拉伸行为,其中加载方式为位移控制,加载速率为 0.3 mm/min. HVFA-SHCC 试件的拉伸应力-应变( $\sigma$ - $\epsilon$ )曲线及多裂缝开展现象如图 1、2 所示.

1.2 试验方法

以目标温度和冷却方式为变量,制备尺寸均为

40 mm×40 mm×160 mm 的 8 组试件.试件浇筑 24 h 后拆模,置于标准养护室内养护至 28 d,待其干燥后进行高温处理.试验采用箱式电阻高温炉进行加热,加热温度分别为 100、200、400、600、800 ℃,另取室温(20 ℃)下的试件进行对照试验.升温速率为 10 ℃/min,当温度达到设定温度后恒温 1 h,再进行冷却.其中 100、400、800 ℃的试件只采用室温条件下的自然冷却,200、600 ℃的试件分别采用室温条件下的自然冷却和浸水冷却(浸水 1 h).待试件冷却后,在室温条件下静置 90 d,开展单轴压缩试验研究. HVFA-SHCC 试件信息见表 3.

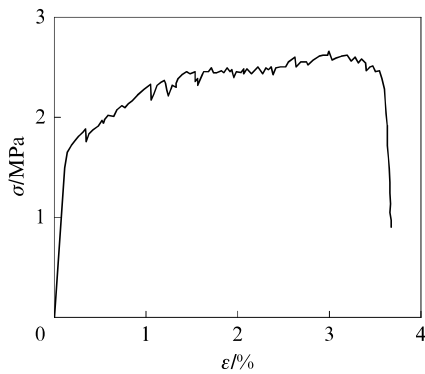


图1 HVFA-SHCC试件的拉伸应力-应变曲线

Fig. 1 Tensile stress-strain curve of HVFA-SHCC specimen



图2 HVFA-SHCC试件多裂缝开展现象

Fig. 2 Development of multiple fractures of HVFA-SHCC specimens

表3 HVFA-SHCC试件信息

Table 3 Information of tested HVFA-SHCC specimens

| Specimen Number | Specimen size/(mm×mm×mm) | Number of specimen | Design temperature/℃ | Cooling method     |
|-----------------|--------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| C-20            | 40×40×160                | 4                  | 20                   | —                  |
| A-100           | 40×40×160                | 4                  | 100                  | Natural cooling    |
| A-200           | 40×40×160                | 4                  | 200                  | Natural cooling    |
| A-400           | 40×40×160                | 4                  | 400                  | Natural cooling    |
| A-600           | 40×40×160                | 4                  | 600                  | Natural cooling    |
| A-800           | 40×40×160                | 4                  | 800                  | Natural cooling    |
| W-200           | 40×40×160                | 4                  | 200                  | Water cooling(1 h) |
| W-600           | 40×40×160                | 4                  | 600                  | Water cooling(1 h) |

采用万能试验机对高温处理后的 HVFA-SHCC 试件进行单轴压缩试验,加载方式为位移控制,加载速率为 0.3 mm/min,采用位移计测量加载过程中试件的变形.为防止试件端部发生局部破坏,在试块端部采用钢套管进行加固处理.试验装置示意图如图 3 所示.

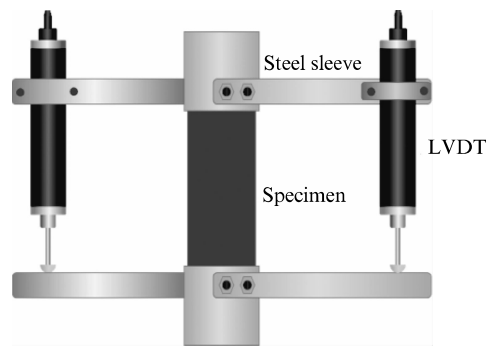


图3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of testing machine

## 2 高温后 HVFA-SHCC 试件的物理特征及微观结构

### 2.1 质量损失率

高温后 HVFA-SHCC 试件的质量损失可采用质量损失率进行评估.图 4 为 HVFA-SHCC 试件的质量损失率与温度的关系曲线.由图 4 可知:HVFA-SHCC 试件的质量损失率随着温度的升高而逐渐增大;200℃时,试件的平均质量损失率为 2.1%,此时自由水的蒸发是引起其质量损失的主要原因;400℃时,由于水化产物的结合水脱出、PVA 纤维的熔融, HVFA-SHCC 试件的质量损失率迅速增加,此时试件的平均质量损失率为 11.9%;当温度继续上升至 600℃时,试件内部水化产物部分分解, HVFA-SHCC 试件的平均质量损失率增长相对缓慢;800℃时,试件的平均质量损失率可达 15.5%.

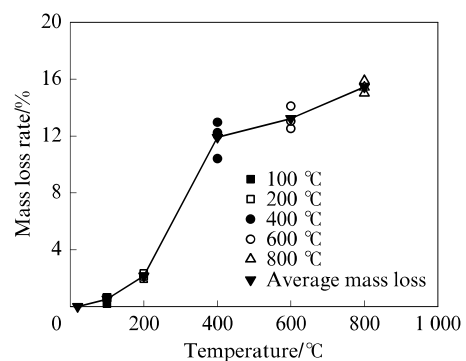


图4 HVFA-SHCC试件的质量损失率与温度的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve of mass loss rate vs. temperature

### 2.2 微观结构特征

采用扫描电子显微镜 (SEM) 观察 HVFA-SHCC 试件在不同温度 and 不同冷却方式下的内部结构,如图 5、6 所示.由图 5 可知:室温 (20℃) 下 SHCC 微观组成物质主要由 C-S-H 凝胶、Ca(OH)<sub>2</sub>、

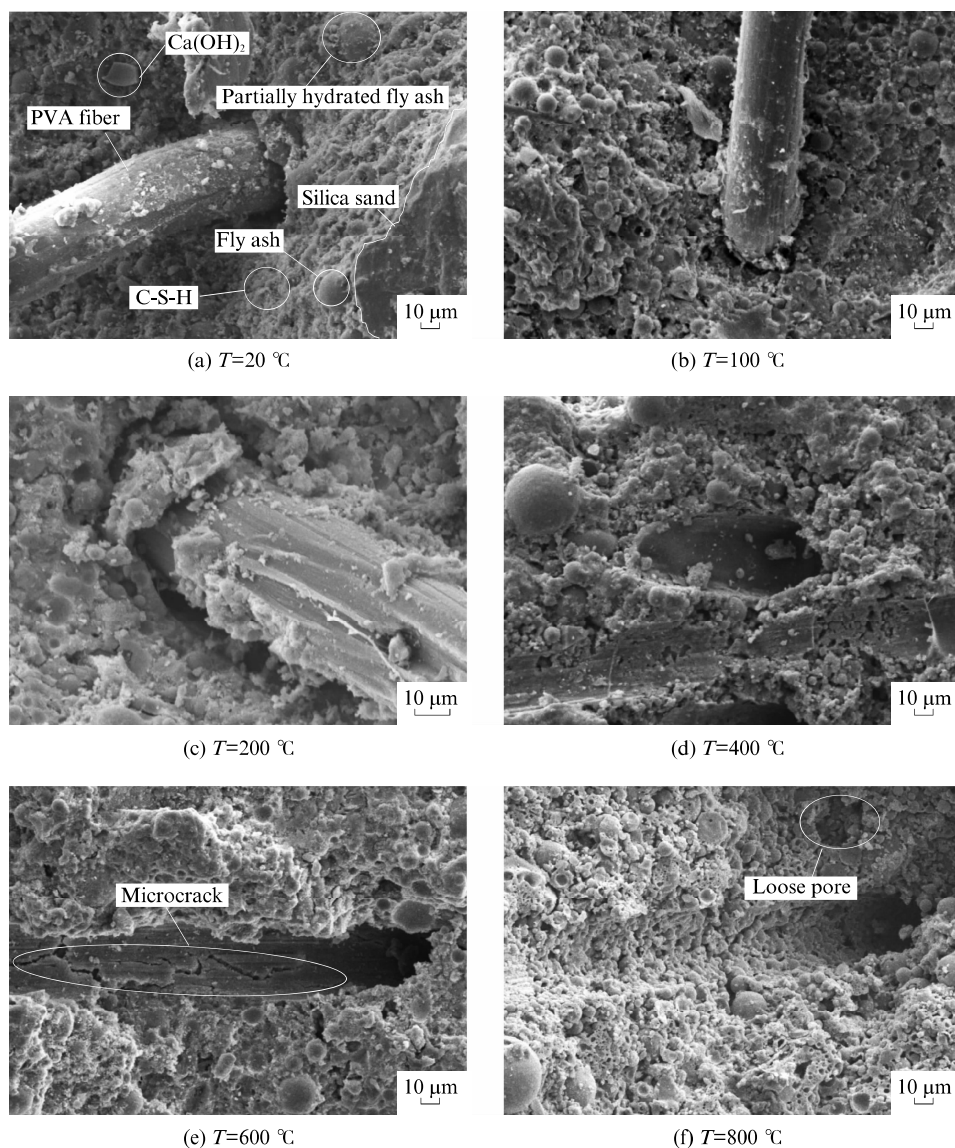


图 5 自然冷却条件下 HVFA-SHCC 试件的 SEM 显微照片

Fig. 5 SEM micrographs of HVFA-SHCC specimens under natural cooling method

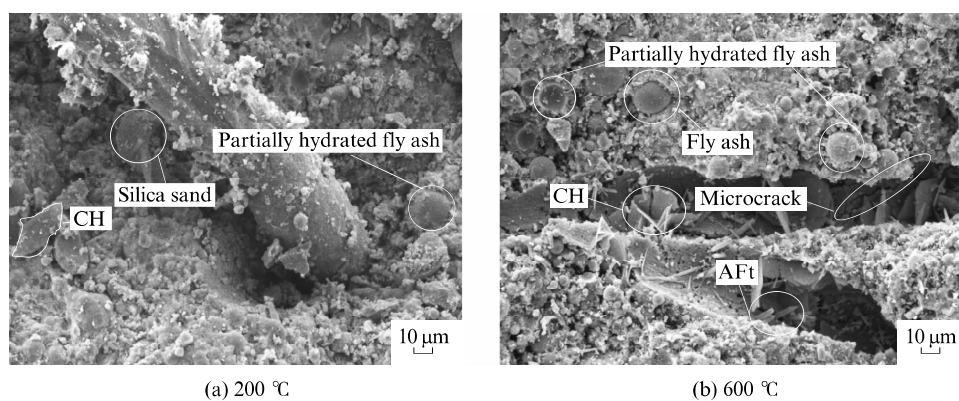


图 6 浸水冷却条件下 HVFA-SHCC 试件的 SEM 显微照片

Fig. 6 SEM micrographs of HVFA-SHCC specimens under water cooling method

大量未水化的粉煤灰和水泥颗粒组成;当温度低于 200 ℃ 时, HVFA-SHCC 试件内部结构没有发生明显的变化; 400 ℃ 时, PVA 纤维全部熔化, 在纤维熔融位置出现微孔洞, 内部结构的密实度有所降低; 600 ℃ 时, SHCC 内部结构较为疏松, 在 PVA 纤维熔融的位置出现了微裂纹; 800 ℃ 时, HVFA-SHCC 试件进一步劣化, 水化产物和部分未水化粉煤灰失去其原有的晶体结构特征, SHCC 出现大量微裂缝和微孔洞, 内部结构更为疏松。

由图 6(a) 可知, 200 ℃ 时, 浸水冷却 HVFA-SHCC 试件的水化产物与自然冷却条件下基本相同。由图 6(b) 可知, 与 600 ℃ 自然冷却相比, 浸水冷却条件下, HVFA-SHCC 试件中部分未水化粉煤灰和水泥进一步水化, 生成新的 C-S-H 凝胶、氢氧化钙和水化硫铝酸钙等, 填充了结构内部的微孔洞和

微裂缝, 使内部微结构得到一定的改善。

### 3 高温后 HVFA-SHCC 试件的单轴压缩力学响应

#### 3.1 破坏模式

图 7 为高温后 HVFA-SHCC 试件的单轴压缩破坏模式。由图 7(a) 可知: 温度对试件的破坏模式影响较大; 当温度低于 200 ℃ 时, 试件的破坏模式均为剪切破坏, 主裂缝与加载面成一定夹角, 此时由于纤维的桥连作用, 试件破坏时仍为一个整体; 当温度高于 400 ℃ 时, 试件内部纤维完全熔融, 桥连作用消失, 试件发生劈裂破坏, 出现贯穿裂缝。对比图 7(a)、(b) 可知, 不同冷却方式下, 相同温度试件的破坏模式大致相同, 这说明冷却方式对试件破坏模式没有显著影响。

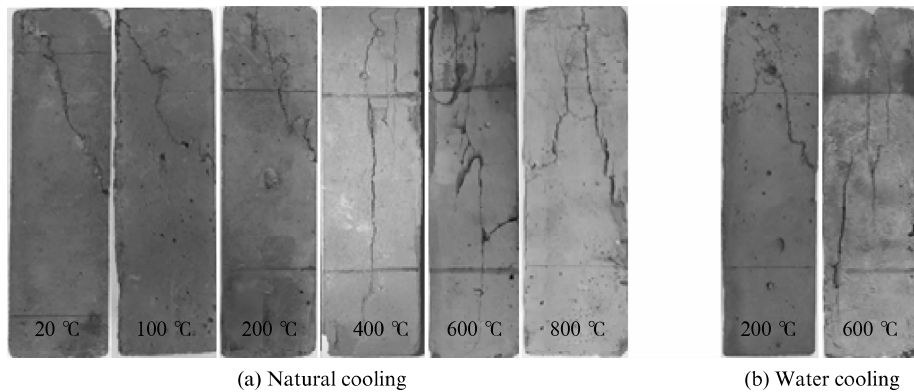


图 7 高温后试件破坏模式

Fig. 7 Failure mode of specimens after exposure to different temperatures

此外, 在高温作用下 HVFA-SHCC 试件并未出现爆裂行为。这是因为: 当温度低于 200 ℃ 时, PVA 纤维的桥连作用会增强基体的抗爆裂及抗剥落能力; 当温度超过 200 ℃ 时, PVA 纤维熔融而形成的通道促进了

试件内部水蒸气的排出, 减小了试件的内部压力<sup>[17]</sup>。

#### 3.2 应力-应变关系曲线

图 8 为高温后 HVFA-SHCC 试件的应力-应变曲线。

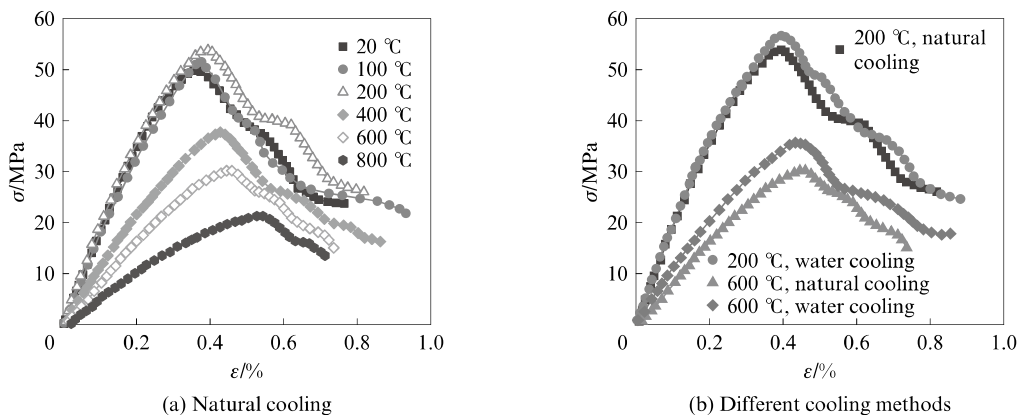


图 8 高温后 HVFA-SHCC 试件受压应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of HVFA-SHCC specimens after subject to high temperatures

由图 8(a)可知:HVFA-SHCC 试件的应力-应变曲线(600、800 °C 除外)大致可分为线性上升段、非线性上升段、下降段和残余软化段;当温度低于 200 °C 时,HVFA-SHCC 试件的峰值应力、峰值应变及曲线斜率等宏观力学性能均未发生明显变化,这是因为当温度低于 200 °C 时,HVFA-SHCC 内部结构无明显变化;当温度高于 400 °C 时,随着温度的升高,HVFA-SHCC 试件内部微结构逐渐劣化,试件的峰值应力和曲线斜率均有明显降低。

由图 8(b)可知:当温度为 200 °C 时,与自然冷却相比,浸水冷却试件的强度和曲线斜率略有提升;当温度为 600 °C 时,浸水冷却试件的强度和曲线斜率均较自然冷却时有明显提高。这与商兴艳等<sup>[17]</sup>、Yu 等<sup>[8]</sup>的研究结果及本文微观试验结果相吻合,浸水冷却有助于试件进一步水化,使结构更加密实,改善了试件的残余力学性能。

### 3.3 抗压强度和弹性模量

图 9 为 HVFA-SHCC 试件的压缩力学参数与温度的关系。由图 9(a)可知:(1)试件的抗压强度随着温度的升高呈现出先略微增加后显著降低的趋势;(2)当温度升高至 200 °C 时,较高的温度加速了大量未水化粉煤灰颗粒与 CH 的反应,所生成的 C-S-H 凝胶利于试件抗压强度的提升。在基体力学性能的提高和界面黏结性能退化的共同作用下,试件的抗压强度较常温提高了 6.8%;(3)200~400 °C 时,纤维的熔融使材料内部的微孔洞增加,内部结构出现一定程度劣化,试件抗压强度明显降低;(4)400~600 °C 时,试件抗压强度下降了 26.4%~39.3%;(5)600~800 °C 时,由于水化产物分解加速,试件抗

压强度继续降低,降低速率相对较快,800 °C 时,试件抗压强度降低了 60.1%。

通过数据拟合得到 HVFA-SHCC 试件抗压强度随温度的变化,其表达式如下:

$$f_{c,T}/f_{c,20} = -0.4315 (\lg T)^3 + 2.177 (\lg T)^2 - 3.5404 \lg T + 2.87 \quad (1)$$

式中: $f_{c,T}$ 为高温后试件的残余抗压强度,MPa; $f_{c,20}$ 为 20 °C 时的抗压强度,MPa; $T$ 为温度,°C。

参照美国 ASTM C469/C469M-14《Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression》,试件弹性模量  $E$ (GPa)可通过下式计算得到:

$$E = \frac{\sigma_{0.4} - \sigma_1}{\epsilon_{0.4} - \epsilon_1} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{0.4}$ 为应力-应变曲线中 40% 峰值应力处的应力值,MPa; $\epsilon_{0.4}$ 为  $\sigma_{0.4}$  所对应的应变值; $\sigma_1$  和  $\epsilon_1$  分别为 1 kN 荷载所对应的应力值和应变值。

由图 9(b)可以看出,曲线大致可分为 2 个阶段:第 1 阶段(20~200 °C),试件的弹性模量略微提升,200 °C 时,弹性模量相比常温下增加了 2.5%;第 2 阶段(200 °C 后),试件的弹性模量出现明显下降,400、600、800 °C 时,试件的弹性模量较常温下分别下降了 8.5%、56.4%、67.7%。

HVFA-SHCC 试件弹性模量随温度的变化表达式如下:

$$E_T/E_{20} = -0.9409 (\lg T)^3 + 5.3071 (\lg T)^2 - 9.6917 \lg T + 6.6969 \quad (3)$$

式中: $E_T$ 为高温后试件的残余弹性模量,GPa; $E_{20}$ 为 20 °C 时试件的弹性模量,GPa。

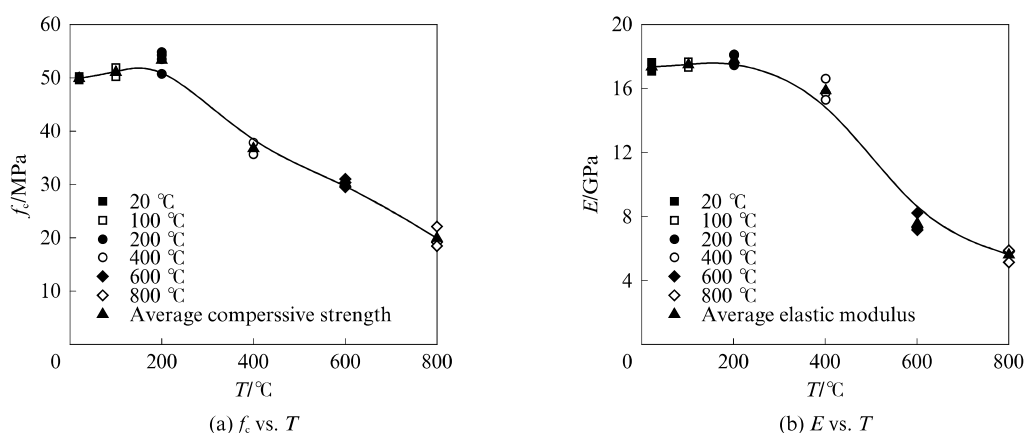


图 9 HVFA-SHCC 试件的压缩力学参数与温度的关系

Fig. 9 Relationship between compressive mechanical parameter and temperature of HVFA-SHCC specimen

### 3.4 压缩韧性

材料的压缩韧性是材料受压变形性能的重要指

标之一。为获得高温对 HVFA-SHCC 材料压缩韧性的影响,参考 SHCC 压缩韧性指数的定义方法<sup>[19]</sup>,

本研究采用曲线下降段(从应力峰值至 50%应力峰值)面积与曲线上升段面积的比值来计算高温后 HVFA-SHCC 试件的压缩韧性指数,如图 10 所示.需要说明的是,对于温度超过 400 ℃的试件,由于其破坏模式为脆性破坏,应力-应变曲线的下降段下降程度较小,并未达到 50%峰值点,因此采用曲线下降段面积与上升段面积之比来计算其压缩韧性指数,计算结果见图 11.由图 11 可知:(1)自然冷却条件下,20~200 ℃时,随着温度的升高,HVFA-SHCC 试件的压缩韧性指数略微增加;而在 200~800 ℃时,随着温度的升高,PVA 纤维的熔融使 HVFA-SHCC 试件的内部微结构进一步劣化,其在受压时逐渐表现出脆性特征,压缩韧性指数从 1.25 降至 0.69;(2)与自然冷却相比,相同温度下,浸水冷却 1 h 可以改善 HVFA-SHCC 试件的压缩韧性.

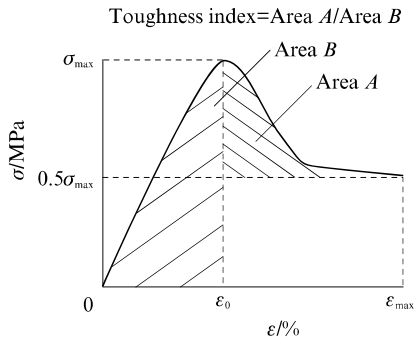


图 10 HVFA-SHCC 试件压缩韧性指数计算示意图  
Fig. 10 Definition of compressive toughness index of HVFA-SHCC specimen

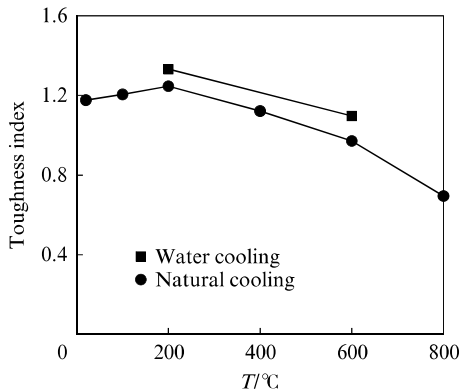


图 11 温度和冷却方式对 HVFA-SHCC 试件压缩韧性指数的影响  
Fig. 11 Effects of high temperature and cooling methods on toughness index of HVFA-SHCC specimen

### 4 高温后 HVFA-SHCC 单轴压缩本构关系

由试验获得的高温后 HVFA-SHCC 试件单轴

压应缩力-应变曲线可知,该曲线上升段和下降段的曲线形状差异性较大.若采用单一公式进行拟合,很难获得理想效果,因此本文拟采用文献[20]中的模型(式(4))定义其本构方程.该模型符合 SHCC 应力-应变曲线的基本几何特征,且形式简单,便于工程应用.

$$y = \begin{cases} \frac{Ax+Bx^2}{1+Cx+Dx^2}, \epsilon \leq \epsilon_0 \\ \frac{x}{x+b(x-1)^2}, \epsilon > \epsilon_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $y=\sigma/f_c$ , $x=\epsilon/\epsilon_0$ , $f_c$  为峰值荷载, $\epsilon_0$  为峰值荷载对应的应变值; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $b$  为与温度有关的材料参数,可通过对试验结果进行回归分析获得,如表 4 所示.

表 4 本构模型参数  
Table 4 Parameters of constitutive model

| $T/^\circ\text{C}$ | $A$     | $B$      | $C$      | $D$      | $b$     |
|--------------------|---------|----------|----------|----------|---------|
| 20                 | 1.308 0 | -0.596 1 | -0.592 7 | 0.303 6  | 1.667 2 |
| 100                | 1.338 8 | -1.088 5 | -0.588 1 | -0.161 8 | 2.001 2 |
| 200                | 1.504 2 | -0.942 2 | -0.388 6 | -0.050 9 | 1.557 8 |
| 400                | 1.315 6 | -0.943 8 | -0.552 9 | -0.074 6 | 2.060 3 |
| 600                | 1.035 4 | 0.150 9  | -0.448 0 | 0.633 6  | 0.561 5 |
| 800                | 1.029 6 | 1.122 0  | -0.041 1 | 1.191 4  | 1.744 8 |

试验结果与理论结果对比如图 12 所示,其中,曲线上升段的线性相关系数在 0.95~0.99 之间,曲线下降段的线性相关系数在 0.80~0.90 之间,说明本文所提出的本构模型能够较好地预测高温下 HVFA-SHCC 试件的单轴压缩应力应变响应.

### 5 结论

(1)HVFA-SHCC 试件的质量损失率随着温度的升高而增加.

(2)400 ℃时,PVA 纤维熔融,导致试件承载力明显下降;600~800 ℃时,水化产物分解加速,内部结构进一步劣化,出现更多的微裂纹和微孔洞,密度降低;浸水冷却在一定程度上改善了材料的内部微结构.

(3)随着温度的增加,HVFA-SHCC 试件的破坏形态由常温以及亚高温(100、200 ℃)下的剪切破坏转变为高温下的劈裂破坏.冷却方式对试件的破坏模式影响较小.

(4)20~200 ℃时,温度对 HVFA-SHCC 试件力学性能的影响较小;400~800 ℃时,HVFA-SHCC 试件抗压强度、弹性模量和压缩韧性明显下降,微观结构受损严重;浸水冷却后 HVFA-SHCC

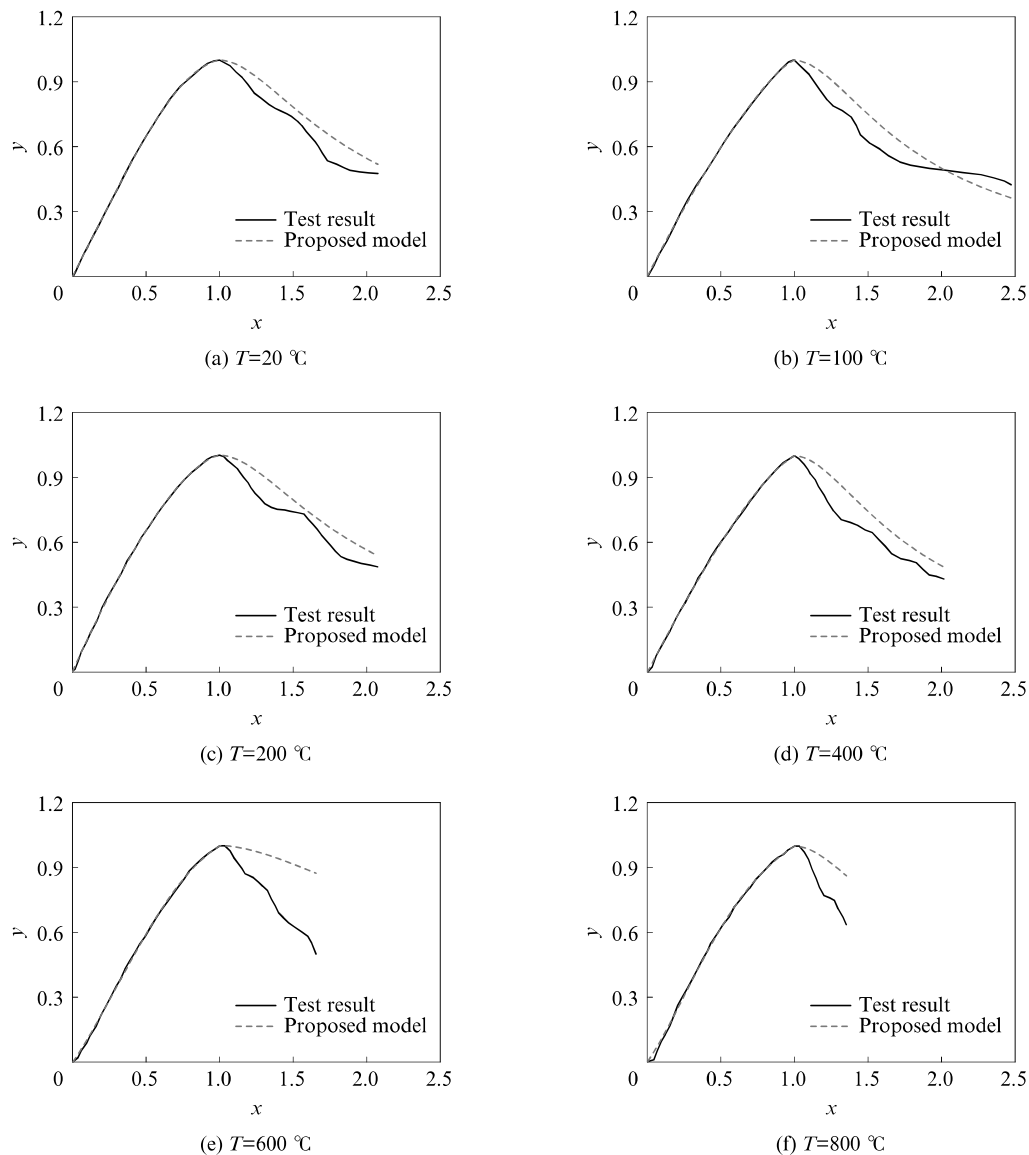


图 12 HVFA-SHCC 试件单轴压缩应力-应变曲线与理论模型的对比

Fig. 12 Comparison between uniaxial compressive stress-strain curve and theoretical model of HVFA-SHCC specimens

试件残余力学性能得到一定程度的恢复。

(5) 基于试验结果,提出了高温后 HVFA-SHCC 单轴压缩本构模型。

#### 参考文献:

- [1] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [2] LI V C. From micromechanics to structural engineering-the design of cementitious composites for civil engineering applications[J]. Japan Society of Civil Engineering (Structural Engineering/Earthquake Engineering), 1993, 10(2): 37-48.
- [3] LI V C, WANG S, WU C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC) [J]. ACI Materials Journal-American Concrete Institute, 2001, 98(6): 483-492.
- [4] YU J, LEUNG C K Y. Strength improvement of strain-hardening cementitious composites with ultrahigh-volume fly ash [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9): 1-8.
- [5] YANG E H, YANG Y, LI V C. Use of high volumes of fly ash to improve ECC mechanical properties and material greenness[J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(6): 620.
- [6] ŞAHMARAN M, LI V C. Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(11): 1033-1043.
- [7] ŞAHMARAN M, LACHEMI M, LI V C. Assessing mechanical properties and microstructure of fire-damaged engineered cementitious composites[J]. ACI Materials Journal, 2010, 107(3): 297.

- [8] YU J, WENG W, YU K. Effect of different cooling regimes on the mechanical properties of cementitious composites subjected to high temperatures[J]. The Scientific World Journal, 2014:289213.
- [9] 张丽辉, 郭丽萍, 孙伟, 等. 生态型高延性水泥基复合材料的高温损伤[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(8):1018-1024.  
ZHANG Lihui, GUO Liping, SUN Wei, et al. Damage of ecological high ductility cementitious composites after exposed to high temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(8):1018-1024. (in Chinese)
- [10] YU K Q, LU Z D, YU J T. Residual compressive properties of strain-hardening cementitious composite with different curing ages exposed to high temperature[J]. Construction and Building Materials, 2015, 98:146-155.
- [11] 李丹, 何锐, 王帅, 等. PVA 纤维增强水泥基复合材料高温性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(6):1604-1610.  
LI Dan, HE Rui, WANG Shuai, et al. Damage of ecological high ductility cementitious composites after exposed to high temperature[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(6):1604-1610. (in Chinese)
- [12] ERDEM T K. Specimen size effect on the residual properties of engineered cementitious composites subjected to high temperatures[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 45:1-8.
- [13] ŞAHMARAN M, ÖZBAY E, YUCEL H E, et al. Effect of fly ash and PVA fiber on microstructural damage and residual properties of engineered cementitious composites exposed to high temperatures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(12):1735-1745.
- [14] LIU J C, TAN K H. Mechanism of PVA fibers in mitigating explosive spalling of engineered cementitious composite at elevated temperature[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 93:235-245.
- [15] LI Q, GAO X, XU S, et al. Microstructure and mechanical properties of high-toughness fiber-reinforced cementitious composites after exposure to elevated temperatures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(11):04016132.
- [16] YU J, LIN J, ZHANG Z, et al. Mechanical performance of ECC with high-volume fly ash after sub-elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2015, 99:82-89.
- [17] 商兴艳, 陆洲导. 冷却方式对高温后 ECC 力学性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(7):81-86.  
SHANG Xingyan, LU Zhoudao. Influence of cooling regimes on the mechanical properties of ECC after high temperatures[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2015, 42(7):81-86. (in Chinese)
- [18] ZHOU J, PAN J, LEUNG C K Y. Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 27(1):04014111.
- [19] XU S L, CAI X R. Experimental study and theoretical models on compressive properties of ultrahigh toughness cementitious composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(10):1067-1077.