

# 龄期对高温后高韧性水泥基复合材料力学性能的影响

商兴艳, 陆洲导

(同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

**摘要:** 研究了不同龄期超高韧性水泥基复合材料(ECC)试件高温后的残余力学性能。将 ECC 试件养护至不同龄期(1, 3, 7, 28 d), 然后加热至不同温度(200, 400, 600 和 800 °C), 冷却后测量其力学性能。一般来讲, 高温后 ECC 试件的强度和刚度会随着温度的升高而降低, 但是在 200 °C 时却有例外; 温度相同时, ECC 试件的强度和刚度随龄期的增加而增加, 且早龄期时增加得非常快。高温前后 ECC 的微观结构特征可以通过扫描电子显微镜(SEM)法和压汞(MIP)试验分析, 结果很好地解释了不同龄期的 ECC 试件高温后力学性能的变化。

**关键词:** 龄期; 残余力学性能; 超高韧性水泥基复合材料; 高温; 微观结构

**中图分类号:** TU502

**文献标志码:** A

## Residual Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites of Different Curing Ages After High Temperatures

SHANG Xingyan, LU Zhoudao

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper studies the residual mechanical properties of engineered cementitious composites (ECC) specimens of different ages after high temperatures. The ECC specimens were cured for different ages (1, 3, 7, 28 d) and heated to different temperatures (200, 400, 600 and 800 °C). After cooling, the mechanical properties of ECC were tested. Generally speaking, the strength and stiffness of ECC specimens after high temperature will decrease with the rising of temperature, but there are exceptions at 200 °C; subjected to the same temperature, the strength and stiffness of ECC specimens increases with the increase of age, and those of the early age specimens increase very fast. The microstructure characteristics of the ECC specimens before and after high temperature can be analyzed by scanning electronic

microscope (SEM) and mercury intrusion pores (MIP) test, which can well explain the residual mechanical property changes of ECC specimens of different ages after high temperature.

**Key words:** curing age; residual mechanical property; engineered cementitious composites (ECC); high temperature; microstructure

近几年来, 科研人员通过改变混凝土的脆性而发明了超高性能纤维增强水泥基复合材料(UHP-FRCC), 这种材料开裂后会发生应变硬化的现象。超高韧性水泥基复合材料(ECC)是一种基于微观力学原理设计而成的特殊的 UHP-FRCC。ECC 产生的裂缝细而密, 最大裂缝宽度小于 100  $\mu\text{m}$ , 单轴拉伸荷载下具有很高的延性和耐久性<sup>[1-2]</sup>。随着应用的增加, ECC 经历火灾或者在高温下工作的可能性也在增加。因此, 非常有必要研究高温下 ECC 的性能。

Sahmaran 等人<sup>[3]</sup>通过 50 mm 的立方体试块研究了火后 ECC 的力学特性和微观结构, 发现火后 ECC 的力学性能比传统纤维混凝土好。尽管抗压强度和刚度会有很大下降, 但是所有的 ECC 试件都没有发生高温爆裂的现象, 这可能是由于加入了 PVA (聚乙烯醇)纤维和大量粉煤灰的缘故。后来, 他们尝试研究 PVA 纤维和粉煤灰用量对高温后 ECC 微观结构和残余力学性能的影响<sup>[4]</sup>, 发现加入 PVA 纤维是抵抗高温爆裂的有效方法, 粉煤灰含量从 55% 升高到 70% 后 ECC 高温下力学性能更好。

尽管很多学者研究了高温后 ECC 的力学性能, 但仍然有一些方面需要完善。不同龄期的 ECC 高温后的力学性能, 尤其是早龄期 ECC 的力学性能还是未知的。因此, 本文主要目的就是研究不同龄期的 ECC 试件高温后的残余力学性能。

收稿日期: 2014-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(51378397, 51478362); 国家自然科学基金青年基金项目(51408436)

第一作者: 商兴艳(1989—), 女, 博士生, 主要研究方向为混凝土抗火。Email: shangxingyan19891226@126.com

通讯作者: 陆洲导(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为混凝土抗火。Email: lzd@tongji.edu.cn

# 1 试验研究

## 1.1 材料、配合比和基本力学性能

生产 ECC 的原材料有 P. I 型 525 水泥(C), I 级粉煤灰(FA), 沙, 水(W), PVA 纤维, 聚羧酸系高效减水剂(HRWR)和羟丙基甲基纤维素(HPMC), 配合情况如表 1, 水泥和粉煤灰的化学组成和物理特性

表 1 ECC 的配合情况

Tab.1 Mixture properties of ECC

原材料	水泥(C)/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粉煤灰(FA)/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水(W)/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	PVA 纤维/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	砂子/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	HRWR/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	HPMC ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	W/ (C+FA)	FA/C
ECC	678	291	380	26	484	14	1.91	0.39	0.43

表 2 水泥和粉煤灰的化学组成和物理特性

Tab.2 Chemical composition and physical properties of cement and fly ash

	化学组成/%								物理特性			
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	烧失量	比重	45 $\mu\text{m}$ 筛余量/%	需水量比/%
水泥	66.30	22.00	5.40	3.40	1.90	2.35	0.47		1.7	3.15	12.9	
粉煤灰	8.0	50.7	20.9	8.7	3.7	2.2	2.1	2.7		2.18	9.6	93.4

使用狗骨试件研究 ECC 材料的直接拉伸行为, 见图 1. 直接拉伸试验<sup>[6]</sup>由位移控制, 加载速率  $0.005 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . 表 1 中 28 d 龄期的 ECC 的极限拉应变是 4%, 极限抗拉强度是 3.8 MPa.

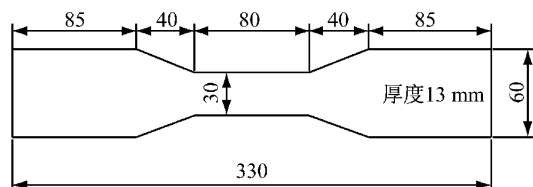


图 1 狗骨试件尺寸/mm

Fig.1 Dimensions of dog-bone specimen

## 1.2 试件准备和试验

试件尺寸  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ <sup>[7]</sup>, 养护 1 d 之后从模具中取出, 分别放在水箱中养护至 3, 7, 28 d. 还有部分试件取出后不养护, 直接加热. 每个龄期的常温对比试件有 5 个, 养护到规定时间后立刻受压.

采用电炉加热, 炉膛尺寸  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ , 炉温由计算机控制, 分别加热到 200, 400, 600, 800  $^{\circ}\text{C}$ , 升温速率  $13.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ . 当炉温达到目标温度之后, 恒温 1 h, 使试件达到热平衡状态. 由于试件的尺寸很小, 恒温 1 h 之后, 试件中心的温度也达到了目标温度. 升温曲线如图 2 所示. 高温后试件自然冷却. 高温作用后, 试件先密封 7 d 然后受压. 加载由荷载控制, 加载速率  $0.6 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[7-8]</sup>. 受压试验中, 由计算机数据采集系统记录荷载和变形值. 每

见表 2. 与一般的纤维混凝土不同, ECC 的组成成分和配合比是根据微观力学原理设计的, 可以达到期望的应变硬化特性<sup>[5]</sup>. 部分水泥被粉煤灰取代, 可以提高受拉应变硬化, 同时使 ECC 成为生态友好型材料. PVA 纤维直径为  $39 \mu\text{m}$ , 长度为 8 mm, 抗拉强度为 1620 MPa, 弹性模量为 42.8 GPa, 最大延伸率为 6.0%.

一组温度和龄期有 4 个试件. 龄期 1, 3, 7, 28 d 的常温对比试件的抗压强度分别是 8.92, 20.28, 24.20, 30.14 MPa.

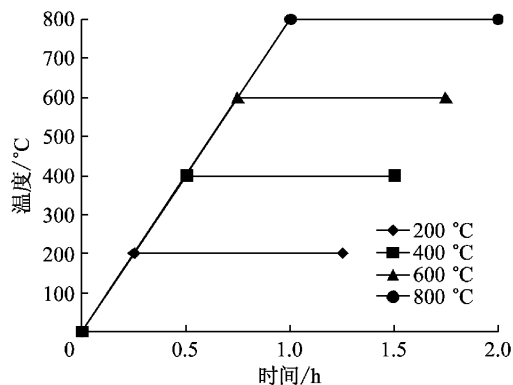


图 2 升温曲线

Fig.2 Heating curves

试件命名方式如下: Xd-最高温度. 例如: 28 d-400 表示龄期 28 d 的试件加热到 400  $^{\circ}\text{C}$ . 测量高温前后每一个试件的质量来计算烧失量.

# 2 试验结果分析

## 2.1 试件表面特征

当 ECC 构件受到高温作用时, 会发生一些颜色上的变化. 试验中, 不同龄期的试件颜色变化是相同的. 由于失水和化学分解, 试件在 20  $^{\circ}\text{C}$  时是灰色, 800  $^{\circ}\text{C}$  时变为浅黄色. 试件在 400  $^{\circ}\text{C}$  时开始出现比

较明显的细丝般的裂缝,到 800 °C 时,微裂缝的尺寸变大. 高温中的试件都没有发生爆裂或表层剥落的现象,这是因为 PVA 纤维的掺入有利于增强 ECC 试件抵抗爆裂和剥落的能力,当温度达到 230 °C 时<sup>[3]</sup>,纤维开始熔化,试件中形成很多连通的孔洞,有利于水的蒸发,这样随温度的升高,试件内部的气压不会很大,所以试件不会发生爆裂或表层剥落现象.

## 2.2 烧失量

高温后试件的损伤可以通过烧失量来评估. 试件的质量通过精度为 0.1 g 的秤测量. 图 3 是 ECC 试件烧失量  $(M_0 - M_1)/M_0$  和温度的关系,其中  $M_1$  是试件高温后的质量,  $M_0$  是初始质量. 从图中可以看出,烧失量随温度的升高而增加,不同龄期的试件变化情况基本上是一致的. 当温度在 20~200 °C 时,烧失量增加很快,这主要是由于试块中自由水的蒸发. 200~400 °C 时,水化产物中结合水脱出,烧失量缓慢增加,而且部分纤维熔化也会损失一部分质量. 当温度变得比较高,达到 600~800 °C 时,水化产物 (CSH 凝胶) 分解,而且,此时 3, 7, 28 d 龄期的试件比 1 d 龄期的试件烧失量更多,这与水化率密切相关,1 d 龄期的试件水化非常不充分,水化产物少,质量损失基本上在 400 °C 之前已由自由水和结合水的蒸发完成.

## 2.3 微观结构特征

### 2.3.1 SEM 观察

为了研究高温后纤维和基体的微观结构,用

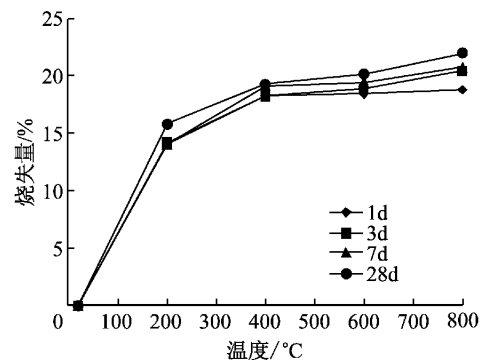
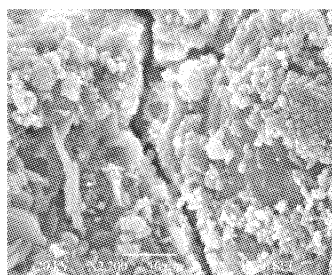


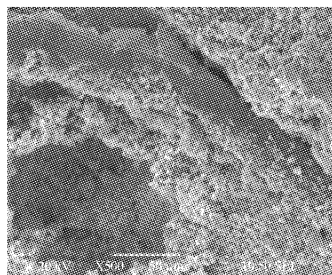
图3 不同龄期试件的烧失量

Fig.3 Mass loss of specimens of all curing ages

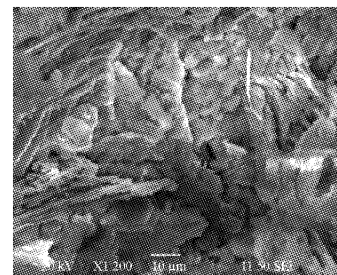
SEM 法观察火后的 ECC 试件. SEM 的型号是 JSM-6380LV. 受火温度为 200, 400, 600, 800 °C, 恒温 1 h. 试件在空气中自然冷却, 将试件凿开, 取中间颗粒, 放在 SEM 下观察. 试件 1 d-200, 3 d-200, 7 d-200 的 SEM 微观图像如图 4 所示. 发现不同龄期的试件经历相同的最高温度 200 °C 后微观结构没有太大的变化, 没有看到明显的裂缝, 试件中的 PVA 纤维沿着纤维和基体的界面有轻微撕裂, 见图 4b. 在试件 1 d-200 中由于火山灰效应产生了一些晶体, 见图 4a, 这会增加试件的强度. 这种现象在其他龄期的试件中不会发现, 因为龄期较长的试件水化反应比较充分, 火山灰效应不显著, 产生的晶体很少, 见图 4c. 然而, SEM 法很难定量地判断不同龄期的试件微观结构的不同. 所以, 高温后试件微观结构的不同将通过 MIP 试验进一步判断.



a 龄期 1 d



b 龄期 3 d



c 龄期 7 d

图4 200 °C 高温后 ECC 试件的显微图像

Fig.4 SEM micrograph of ECC specimens subjected to 200 °C

图 5 是龄期 7 d 的高温后 ECC 试件的 SEM 显微图像. 图 5a 是 ECC 试件 7 d-400 的 SEM 显微图像. 经历 400 °C 的高温之后, 曾经连接成网的 PVA 纤维完全熔化, 基体中产生了许多连通孔隙和小管道. 因此, 掺入 PVA 纤维严重影响高温后试件的孔隙率. 通过 SEM 观察, 与 200 °C 的试件相比, 400 °C 的试件中微裂缝的数量和宽度明显增加. 图 5b 是

ECC 试件 7 d-800 的显微图像. 试件受到 800 °C 的高温后, 在显微图像中可以看到很多微裂缝和水化产物 (尤其是 CSH 凝胶); 几乎所有的水化产物都是非晶态结构, 失去了晶体结构特征.

### 2.3.2 MIP 试验

材料的力学性能与它的微观结构紧密相连, 可以说孔结构的变化决定了高温后混凝土性能的退

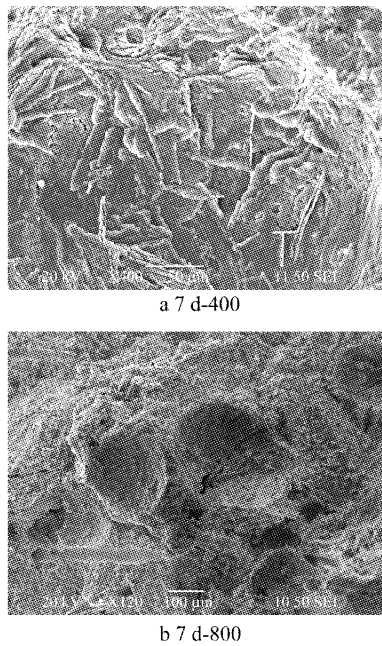


图 5 ECC 试件的 SEM 显微图像

Fig.5 SEM micrograph of ECC specimens

化<sup>[9]</sup>,因此,研究高温后水泥基复合材料的孔结构有助于理解高温后材料的退化机理<sup>[10]</sup>. MIP 试验可以提供关于孔结构的很多信息,包括 ECC 的孔隙率、平均孔径和孔径分布. 测试仪器为 Pascal 240 孔径分析仪,最大压力是 225 MPa,孔径分析时假定接触角为 130°. 人工凿开试件,取中心颗粒,放入玻璃瓶中,倒入丙酮,放置 7 d 后,6 试件在 50℃ 下烘干至恒重,然后进行测试.

总孔隙率的增加表明高温后 ECC 结构整体性的破坏. 如表 3 所示,当温度升高时,ECC 试件的总孔隙率增加(200℃ 除外);经历相同最高温度的试件,孔隙率随龄期的增加而减少. 但是 1 d 龄期的试件的平均孔径比 7 d 和 28 d 龄期的试件大很多.

表 3 ECC 试件总孔隙率的变化

Tab. 3 Total intruded porosity variation of ECC specimens

试件类型	孔隙率/%	平均孔径/nm
常温对比试件	30.0	16.2
28d-200	29.6	15.6
28d-400	34.3	21.9
28d-600	37.7	64.0
28d-800	39.1	195.8
7d-800	40.3	194.3
1d-800	40.6	577.1

高温 400, 600, 800℃, 龄期 28 d 的 ECC 试件的总孔隙率比常温试件分别增加 14.3%, 25.7% 和 30.3%. 但是高温 200℃ 的试件的总孔隙率降低

1.3%, 这导致其强度和刚度的增加. 温度超过 600℃ 后, 总孔隙率变化更快, 这是因为材料中晶体结构的快速脱水分解所致.

图 6 是孔径分布的积分曲线, 表示的是累积压入汞的体积  $V$  与孔径  $\log D$  的关系, 其中累积压入汞体积等于混凝土内部孔隙总体积. 不同龄期的 ECC 试件孔径分布的积分曲线的形状都相似. 孔径大于 0.1  $\mu\text{m}$  的孔隙体积的含量通常会影响混凝土的强度<sup>[10]</sup>. 从图中可以看出, 随着龄期的增加, 孔径大于 0.1  $\mu\text{m}$  的孔隙总体积减小, 这是 ECC 试件强度提高的主要原因.

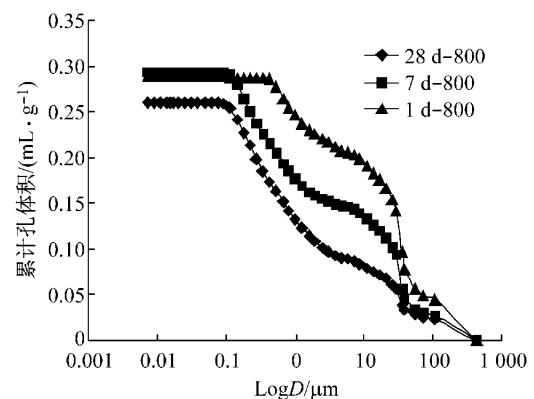
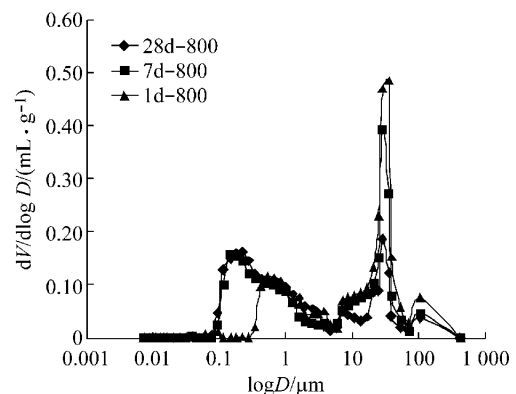
图 6 累计孔体积与  $\log D$  的关系曲线Fig. 6 Relationship of cumulative pore volume versus  $\log D$ 

图 7 中的微分曲线  $dV/d\log D$  可以更清楚地反映不同龄期的 ECC 试件的孔径分布. 曲线中的峰值点所在的半波部分表示试块中主要孔径的分布范围. 可以看出, 1 d 龄期时, 孔径较大的孔隙比较多, 3 d 和 7 d 龄期时, 孔径大的孔隙数量比较少. 这可能是由于龄期增加, 可用于分解的水化产物增加, 水化产物(尤其是 CSH 凝胶)的分解将部分大的孔洞填充, 使大孔减少, 小孔增多, 孔径变小.

图 7  $dV/d\log D$  与  $\log D$  的关系曲线Fig.7 Relationship of  $dV/d\log D$  versus  $\log D$

高温后水泥基复合材料的力学性能降低, MIP 试验结果表明高温后孔隙率增加是材料强度刚度降低的主要原因。

## 2.4 残余抗压强度

### 2.4.1 温度的影响

图8以7 d龄期的试件为例解释温度对火后 ECC 试件受压强度和刚度的影响。受压强度是受压峰值荷载与试件横截面面积的比值,位移是与峰值荷载对应的位移,受压刚度是荷载-位移曲线弹性段的斜率。图8中的值都是根据常温值归一化的结果,且每一个点至少是4个试件的平均值。受压强度的变异系数(COV)值从0.84%到11.12%。COV变化不大表明火后损伤试件抗压强度试验方法的可重复性。

如图8所示,高温严重影响 ECC 试件的残余抗压强度。然而,相对抗压强度的变化可以分为4个明显不同的阶段,23~200, 200~400, 400~600, 600~800 °C。温度不超过200 °C时,高温有助于强度的增加,这与相同温度下的MIP试验相吻合。龄期7 d的ECC试件经历200 °C的高温后,平均抗压强度增加了2%。400 °C之前,高温对ECC残余抗压强度的影响并不显著,ECC试件的平均抗压强度仅降低了28%。这可能是由于抗压强度对细小的微裂缝并不敏感造成的。如上文所述,400 °C之前,产生的裂缝数量相对较少,轻微开裂的混凝土仍然可以作为一个高度超静定结构工作,不会导致抗压承载力的突然降低<sup>[11]</sup>。温度超过400 °C之后,试件的抗压强度快速下降,600 °C时下降了56%,800 °C时下降了74%。根据残余抗压强度的变化,600 °C及以上温度可以认为是ECC试件强度损失的关键温度。试验结果与前人的研究<sup>[3-4]</sup>相吻合。残余抗压强度的变化与孔结构的变化是一致的。400 °C时,试件孔隙率的增

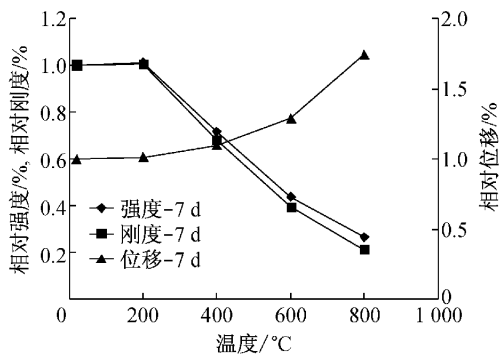


图8 峰值荷载对应的强度、刚度和位移随温度的变化(7 d)  
Fig.8 Compressive strength, stiffness and displacement corresponding to peak load with temperatures (7 d)

加很有可能是由于PVA纤维的熔化(图5),产生了小的管道。然而,600 °C之后,抗压强度的降低主要是由于基体的物理变化和水化产物的化学反应。当温度在600 °C以上,一些主要水化物(如CSH凝胶)的分解是不可避免的<sup>[12]</sup>,产生更多分散相颗粒,粘接性能也降低<sup>[3-4]</sup>,ECC试件的整体结构已变酥。

从图8可以看出,火后试件的刚度随温度的变化规律与强度随温度的变化规律类似,甚至对温度更加敏感,可以分成4个阶段。200 °C时,7 d龄期的ECC试件平均抗压刚度增加了0.5%,400,600,800 °C时分别降低了32%,60%和79%。

### 2.4.2 龄期的影响

为了观察龄期对残余抗压强度的影响,确定了不同温度下抗压强度与龄期的关系。从图9可以看出火后试件的抗压强度随龄期的增加而增加。当温度不超过400 °C时,增加趋势更加明显。高温作用后,龄期1~7 d的试件抗压强度增加非常快,3 d龄期的试件强度已经达到28 d龄期的70%~90%,这主要是由于水化率的快速增加使得试件强度快速增长;而龄期7~28 d时,抗压强度增加很慢,这主要是因为水化速率变慢,当温度超过400 °C时,抗压强度甚至不再随龄期增长而增加,这是因为水化反应基本完成,过高的温度完全破坏了ECC试件的结构。200 °C时,1 d和3 d龄期的试件,由于相对较高的温度有助于水化反应,试件强度明显比常温试件高;而7~28 d龄期时,水化反应基本完成,温度的影响很小,强度和常温较接近。这个现象说明了相对较高的温度有助于ECC试件早期抗压强度的增加。200, 400, 600, 800 °C的强度-龄期曲线有很大的间距,这意味着温度导致ECC试件损伤严重,强度降低很多,这也被SEM分析和MIP试验的结果所证实。

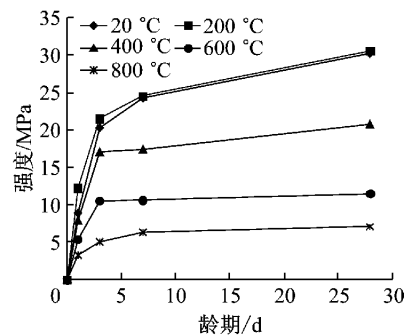


图9 龄期对ECC试件强度的影响

Fig.9 Effect of curing ages on the strength development of ECC specimens

图10是不同龄期的ECC试件相对抗压强度与

温度的关系曲线, 相对抗压强度指高温后的平均强度与对比试件(常温试件)的比值. 如图所示, 相对抗压强度的变化可以分成 4 个典型的阶段,  $20 \sim 200$ ,  $200 \sim 400$ ,  $400 \sim 600$ ,  $600 \sim 800$  °C. 对于早龄期的试件, 在  $20 \sim 200$  °C 时, 抗压强度随温度的增加而增加, 尤其是对 1 d 龄期的试件. 抗压强度的增加, 主要是由于自由水蒸发, 水泥浆硬化, 水泥凝胶层更加接近, 产生了更大的范德华力<sup>[13-14]</sup>. 由于混凝土中湿气的传递是非常慢的, 在加热的初期阶段混凝土中残余的湿气使混凝土加快水化. 可见, 水泥基复合材料进一步的水化是水泥浆硬化的另一个重要原因. 尤其对于粉煤灰复合材料, 未水化的粉煤灰颗粒与氢氧化钙反应, 产生 CSH 凝胶体<sup>[14-15]</sup>. 抗压强度的增加与 MIP 试验结果吻合. 与常温试件相比,  $200 \sim 400$  °C 时, 龄期 1, 3, 7, 28 d 的试件抗压强度分别降低了 12%, 16%, 28%, 31%;  $400 \sim 600$  °C 时, 抗压强度损失平均值比  $20 \sim 400$  °C 时高很多, 降低到常温试件的 41%~62%; 在最后阶段, 当温度超过 600 °C 时, 强度退化更加严重, 平均残余抗压强度降到常温试件的 37%, 这主要是因为水化产物的分解<sup>[12,16]</sup>. 龄期增加, 水化反应较充分, 有更多的水化产物分解, 导致高龄期的试件抗压强度降低得更多.

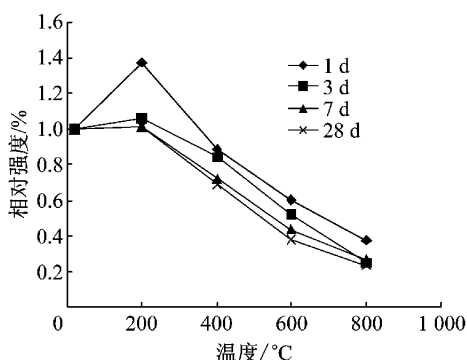


图 10 温度对 ECC 试件强度的影响

Fig.10 Influence of exposure temperature on the relative strength of ECC specimens

从图 10 可以看出, 龄期 7 d 和 28 d 的试件强度随温度的变化基本上是相同的, 龄期 1 d 和 3 d 的则略微有些不同. 因此, 受压强度随温度的变化根据龄期的不同可以分成以下 3 类. 龄期 1 d

$$f_{c,T}/f_c = 0.0021T_m + 0.9586, 20^\circ\text{C} \leq T_m \leq 200^\circ\text{C}, R^2 = 1.00$$

$$f_{c,T}/f_c = -0.0016T_m + 1.6290, 200^\circ\text{C} \leq T_m \leq 800^\circ\text{C}, R^2 = 0.97$$

龄期 3 d

$$f_{c,T}/f_c = 0.0003T_m + 0.9936, 20^\circ\text{C} \leq T_m \leq$$

$$200^\circ\text{C}, R^2 = 1.00$$

$$f_{c,T}/f_c = -0.0014T_m + 1.3547, 200^\circ\text{C} \leq T_m \leq 800^\circ\text{C}, R^2 = 0.99$$

龄期 7 d 和 28 d

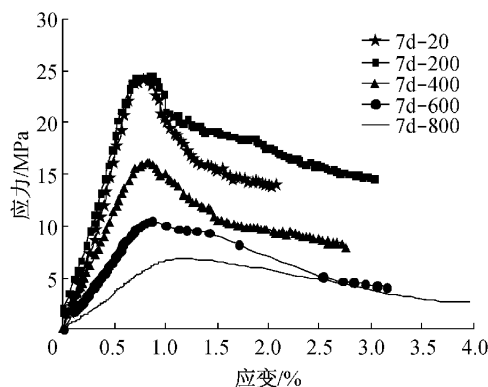
$$f_{c,T}/f_c = 1, 20^\circ\text{C} \leq T_m \leq 200^\circ\text{C}, R^2 = 1.00$$

$$f_{c,T}/f_c = -0.0013T_m + 1.2394, 200^\circ\text{C} \leq T_m \leq 800^\circ\text{C}, R^2 = 0.98$$

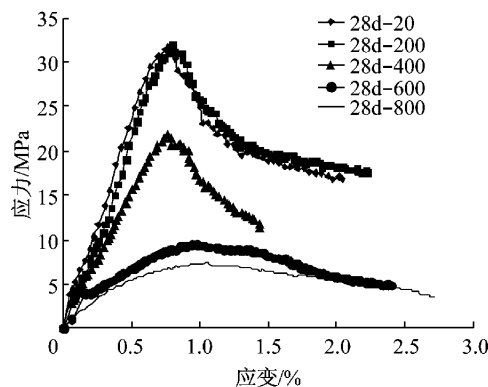
式中,  $f_{c,T}$  指的是火后试件的残余抗压强度;  $f_c$  指的是常温试件的抗压强度;  $T_m$  指的是目标温度,  $R^2$  是确定性系数.

## 2.5 应力-应变曲线

常温和高温下经历不同龄期的 ECC 试件的应力-应变曲线如图 11 所示. 从图中可以看出受压强度-应变曲线有相似的变化趋势. 龄期相同时, 最大应力随最高温度的增加而降低, 尤其是 400 °C 的时候, 而与最大应力对应的应变却随最高温度的升高而增加. 随着最高温度的增加, 应力-应变曲线的坡度变缓, 表明 ECC 试件刚度的降低. 在 400 °C 之前, 刚度下降相对较缓, 然而超过 400 °C 之后, ECC 试件刚度迅速下降. 随着最高温度的增加, ECC 试件的最



a 龄期 7 d



b 龄期 28 d

图 11 不同龄期试件的应力-应变曲线

Fig. 11 Stress-strain curves of ECC specimens of different curing ages

大应力下降很快,导致曲线下峰值应力后的面积变小,这在 800 °C 时表现得更加显著:达到峰值强度后 ECC 试件很快破坏.这意味着温度的升高使得 ECC 试件的破坏由延性变为脆性.

### 3 结论

(1) ECC 试件的颜色由 20 °C 的灰色变为 800 °C 的浅黄色;400 °C 时,出现细丝状的微裂缝;800 °C 时,微裂缝的尺寸变大.烧失量随温度的升高而增加.

(2) 通过 SEM 观察可以看出,200 °C 时试件没有明显裂缝;400 °C 时微裂缝的数量和宽度明显增加;到 800 °C 时几乎所有的水化产物都失去了晶体结构特征. MIP 试验结果表明当温度升高时, ECC 试件的总孔隙率增加(200 °C 除外);经历相同最高温度的试件,孔隙率随龄期的增加而减少.

(3) 火后 ECC 试件的抗压强度随龄期的增加而增加,且早龄期时抗压强度增加非常快.相对较高的温度有助于 ECC 试件早期抗压强度的增加.

(4) 不同龄期的 ECC 试件,受压应力-应变曲线随温度升高有相似的变化趋势.峰值应力随着温度的升高而降低,而与峰值应力对应的应变随温度的升高而增加.

### 参考文献:

- [1] Li V C. ECC—tailored composites through micromechanical modeling[C]// Proceeding Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future Conference. Montreal: CSCE Press, 1998: 64 - 97.
- [2] Li V C. On engineered cementitious composites (ECC)—a review of the material and its applications[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2003, 1(3): 215.
- [3] Sahmaran M, Lachemi M, Li V C. Assessing mechanical properties and microstructure of fire-damaged engineered cementitious composites[J]. ACI Material Journal, 2010, 107 (3): 297.
- [4] Sahmaran M, Ozbay 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 Material in Civil Engineering, 2011, 23(12): 1735.
- [5] Li V C, Wu C, Wang S, *et al.* Interface tailoring for strain-hardening PVA-ECC[J]. Material Journal, 2002, 99(5): 463.
- [6] Architectural Institute of Japan. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composite with multiple fine cracks[R]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 1997.
- [7] American Society for Testing Materials ASTM C109/C109M-12 Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens) [S]. Philadelphia: American Society for Testing Materials, 2012.
- [8] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料直接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 32.  
XU Shilang, LI Hedong. Uniaxial tensile experiments of ultra-high toughness cementitious composite [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 32.
- [9] Chan Y N, Luo X, Sun W. Compressive strength and pore structure of high performance concrete after exposure to high temperature up to 800 °C[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30: 247.
- [10] Rostasy S F, Weiß R, Wiedemann G. Changes of pore structure of cement mortars due to temperature[J]. Cement and Concrete Research, 1980, 10(2): 157.
- [11] Hsu T T C, Slate F O, Sturman G M, *et al.* Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve[J]. Material Journal, 1963, 60(2): 209.
- [12] Khoury G A, Grainger B N, Sullivan P J E. Transient thermal strain of concrete: literature review, conditions within specimen and behavior of individual constituents[J]. Magazine of Concrete Research, 1985, 37(132): 131.
- [13] Dias W P S, Khoury G A, Sullivan P J E. Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700C (1292F)[J]. Material Journal, 1990, 87 (2): 160.
- [14] Khoury G A. Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment [J]. Magazine of Concrete Research, 1992, 44 (161): 291.
- [15] Taylor H F W. The chemistry of cements [M]. London: Academic Press, 1964.
- [16] Lin W M, Lin T D, Powers-Couche L J. Microstructures of fire-damaged concrete[J]. Material Journal, 1996, 93 (3): 199.