

高温后轻质多孔混凝土力学性能试验

孙 静¹, 张 敬²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 广州杰赛科技股份有限公司, 广东 广州 510310)

摘要: 通过高温后轻质加气混凝土的力学性能试验, 测得了抗压强度、弹性模量和峰值应变与温度的关系。试验表明: 高温后轻质加气混凝土的抗压强度在 100 °C 时略微提高, 到 300 °C 时逐渐下降, 超过 300 °C 时, 强度变化不明显; 在 100 °C 以内, 弹性模量基本保持不变, 超过 100 °C 后, 弹性模量不断减小, 与温度成线性关系; 随着温度的升高, 峰值应变逐渐增大, 呈直线上升趋势。最后分析了不同温度下的应力-应变曲线, 提出了高温后轻质加气混凝土的本构模型。

关键词: 轻质加气混凝土; 高温后; 力学性能; 受压应力-应变曲线; 本构模型

中图分类号: TU375

文献标志码: A

Experimental Study on Mechanical Properties of Lightweight Aerated Concrete After High Temperature

SUN Jing¹, ZHANG Jing²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Guangzhou GCI Science Technology Co., Ltd., Guangzhou 510310, China)

Abstract: In this paper, through the axial compression test of lightweight aerated concrete after high temperature, the relationships between temperature and mechanical properties, such as compressive strength, elastic modulus and peak strain, are obtained. The results show that the compressive strength of lightweight aerated concrete increases slightly at 100 °C, and decreases gradually at 300 °C. When the temperature exceeds 300 °C, the strength change indistinctively. At 100 °C, the elastic modulus remained basically unchanged; across 100 °C, the elastic modulus decreases continuously, and comes into being linear relationship with temperature. With the increase of temperature, the peak strain gradually increases in a linear upward trend. Finally, by analyzing the stress-strain curves at different temperatures, a constitutive model of lightweight aerated concrete after high temperature is proposed.

Key words: lightweight aerated concrete; after high temperature; mechanical properties; compression stress-strain curve; constitutive model

轻质多孔混凝土(如蒸压加气混凝土和泡沫混凝土等)是一种具有良好的保温、隔热等性能且用途广泛的节能建筑材料。在很多建筑结构中, 轻质多孔混凝土都起填充作用, 作为隔墙或者外围墙自承重, 但是在本文研究的新型密肋复合墙体结构体系中, 轻质多孔混凝土不仅起到了保温、围护和分离空间的作用, 而且与隐形框架一起作为受力构件参与工作, 共同承担结构的竖向及水平荷载, 同时提供抗侧移刚度^[1]。在该结构体系以往的研究中^[2-4], 主要分析了常温下框格的受力机理, 研究了框格构件截面性能、砌块材料强度、加载历程等因素对框格单元力学性能的影响, 对于高温后的研究则很少。对于普通混凝土在高温后力学性能的研究相对较多。以往研究^[5]表明, 普通混凝土在高温后其强度、变形等跟常温时相比都发生了较大的变化, 由于轻质多孔混凝土与普通混凝土的材料组成及内部结构均有很大不同, 两者高温后的基本力学性能必然存在较大的差异。由于普通混凝土高温后的力学性能无法直接应用到轻质多孔混凝土上, 因此本文对轻质多孔混凝土高温后的基本力学性能进行了研究, 得出了抗压强度、弹性模量、峰值应变、受压应力-应变曲线与温度的关系, 提出了受压本构关系模型, 从而为密肋复合墙体结构抗火设计、密肋复合墙体结构火灾后安全检测与鉴定等方面提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

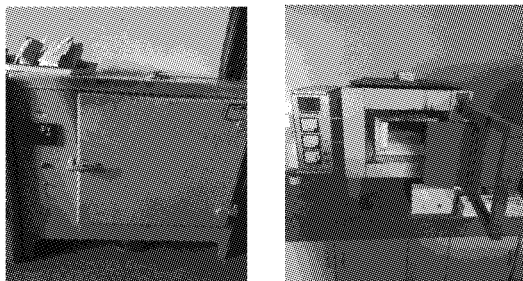
试验选用强度等级为 A5.0 的轻质加气混凝土,

其密度为 $600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。试验共有 8 个工况,分别对砌块加热 20(常温)、100、200、300、400、500、600、700 $^{\circ}\text{C}$,每个工况有四个棱柱体试件(最后采用三个试件进行试验),其尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。

1.2 高温试验

1.2.1 试验装置

试验装置分为高温试验装置和力学性能加载装置。高温试验装置为鼓风干燥箱和箱式 SiC 电炉。鼓风干燥箱的型号为 GD65-1,功率为 3.6 kW,炉膛尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$,灵敏度为 $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最高温度为 300 $^{\circ}\text{C}$ 。箱式 SiC 电炉的型号为 ZW-2006-6,功率为 12 kW,炉膛尺寸为 $400 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,最高温度为 1 350 $^{\circ}\text{C}$,如图 1 所示。



a 鼓风干燥机

b 箱式 SiC 电炉

图 1 高温试验炉

Fig.1 High temperature test furnace

1.2.2 试验现象

(1) 高温过程中的现象观察

在试件升温加热的过程中,当温度升高到 100~110 $^{\circ}\text{C}$ 时可以观察到,高温箱内的轻质加气混凝土试件在高温下蒸发出少量的水蒸气,保持 20 min 左右后则有大量的水蒸气明显地溢出。随着温度的持续上升,当温度达到 300 $^{\circ}\text{C}$ 左右的时候,可以在高温炉的预留孔处观察到明显的水雾。但之后随着温度的持续上升和高温时间的增长,水雾逐渐减小。当温度升高到 500 $^{\circ}\text{C}$ 以上时,预留孔处的水雾消失,高温炉内的水蒸气也消失。发生这一现象的主要原因可以解释为:轻质加气混凝土中水分在高温作用下逐渐脱去。这些水分大致可以分为两种:一种是自由水,另一种是水化物中的结晶水或化合水(水泥与水产生水化反应,产生的水化物主要是 C—S—H 凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 两种,其他成分含量很少)。在温度较低时,110 $^{\circ}\text{C}$ 以下的混凝土水分开始蒸发,大量自由水溢出,混凝土处于脱水阶段。混凝土内部的 C—S—H 凝胶没有确定的脱水温度,其水分在很大的氛围内(100~1 000 $^{\circ}\text{C}$)逐渐脱出,其中 85% 质量分数的结晶水在 300~700 $^{\circ}\text{C}$ 范围内溢出。因此,随着温度

的不断升高,达到 300 $^{\circ}\text{C}$ 左右的时候,C—S—H 凝胶中的结晶水脱水,高温炉内开始出现大量的水雾。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的脱水范围比较小,一般情况下 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的脱水温度为 450 $^{\circ}\text{C}$ 左右。在加热过程中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 脱水生成大量的氧化物,从而导致化合水在高温下蒸发形成水蒸气。

(2) 轻质加气混凝土不同高温后的表面特征

在试验中可以观察到,从室温加热到 700 $^{\circ}\text{C}$ 高温,混凝土的物理状态逐渐发生了改变。在不同的温度下,轻质加气混凝土的颜色和表面损伤状况如表 1 所示。

表 1 轻质加气混凝土经不同高温处理后的外观特征
Tab.1 Physical appearance of lightweight aerated concrete after different temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	颜色	裂纹发展	是否疏松
100	青灰色	无裂纹	否
200	淡灰色	无裂纹	否
300	淡灰白色	无裂纹	否
400	米黄色	无裂纹	否
500	土黄略带白色	极少细微裂纹	轻度
600	土黄略带白色	极少裂纹	轻度,有缺角
700	土黄色	少量裂纹	轻度,有缺角

随着温度的升高,轻质加气混凝土内部会产生一定的损伤,其中一个外观表现就是表面出现裂纹。这一结果表明,温度因素可以使轻质混凝土内部形成损伤,其损伤的大小与轻质加气混凝土的含水率、升温速率、骨料、孔隙率等很多因素有关。

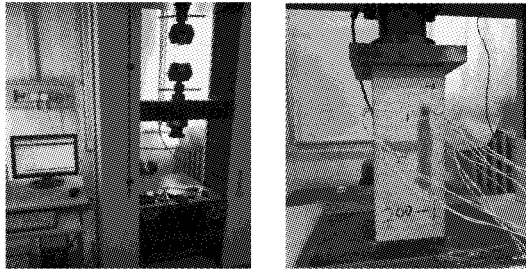
1.3 力学性能试验

1.3.1 试验装置和测点布置

力学性能试验加载装置为微机控制电子万能试验机,该试验机配有相应的测控系统,能够精确地进行位移控制加载,量程为 100 kN。为使试件受到的压力比较均匀,故在加载头与试件之间放置 2 cm 厚的钢板作为加载板,如图 2 所示。正式加载前对试件进行反复预压三次(预压荷载约为极限荷载值的 30%),以确定各个测量仪值正常。同时,预压使加载板与试件之间的空间压实,减少由于试件和加载板之间的空隙引起的试验误差。

试验中荷载采集由万能试验机自动采集系统完成,应变的采集由静态应变采集仪采集。由于受采集仪通道数量的限制,在轻质混凝土棱柱体试件四个侧面上各纵向布置一个应变片(采用纸基电阻丝应变片,电阻为 $(120 \pm 0.2) \Omega$,灵敏度系数为 $2.08 \pm 1\%$,尺寸为 100 mm (栅长) $\times 3 \text{ mm}$ (栅宽)),在其中两个侧面中部横向布置一个应变片(尺寸为 30 mm (栅长) $\times 3 \text{ mm}$ (栅宽),其余参数同上)。电阻应变片

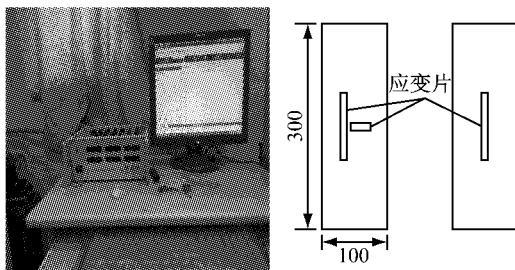
与静态应变采集仪采用半桥连接,所有通道共用一个温度补偿片.数据采集系统和测点布置如图 3 所示.



a 加载试验机 b 加载示意图

图 2 加载试验机和加载示意图

Fig.2 Loading test devices and the specimen



a 数据采集系统 b 测点布置图

图 3 数据采集系统和测点布置图(单位:mm)

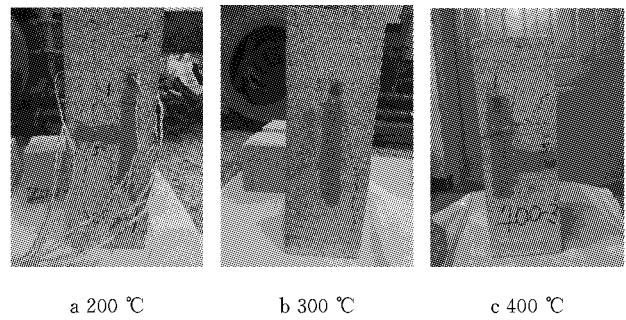
Fig.3 Data acquisition system and arrangement of measuring points(unit:mm)

1.3.2 试验现象

轻质加气混凝土试件经历不同高温后表面及内部会出现不同的损伤,因此在加载过程中其现象也是不同的.

(1) 在温度升高到 400 °C 时,轻质加气混凝土试件表面都没有出现裂纹.在加载初期,荷载-位移曲线基本为直线,说明试件基本处于弹性阶段,表面无可见裂纹出现.当荷载加至预压荷载时,荷载-位移曲线出现凸出的形状,这是因为试件经过预压后加载板与试件之间的空间被压实,弹性模量比较大,超过预压荷载后弹性模量会略微降低.荷载加至峰值荷载的 0.7 倍时,试件从外表看来还是完好的.试件的非弹性性质开始出现,横向变形开始变大.当荷载加至峰值荷载的 0.9 倍时,试件中部或底部开始出现竖向或斜向短裂纹.随着荷载的增加,裂缝逐渐增多.当荷载加至峰值荷载时,短裂纹迅速上下延伸、扩展,形成主裂缝,最后试件斜向剪切破坏,并伴随竖向劈裂破坏.经历 100~400 °C 高温后试件破坏形态如图 4 所示.

(2) 当温度增加到 500 °C 时,轻质加气混凝土

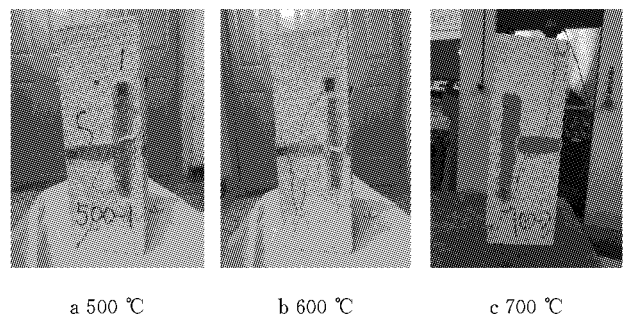


a 200 °C b 300 °C c 400 °C

图 4 经历 100~400 °C 高温后试件破坏形态

Fig.4 Failure patterns of typical specimens after high temperatures between 100 °C and 400 °C

试件表面出现不规则短裂纹.在加载初期,试件上由于高温引起的短裂纹先被压实,荷载-位移曲线的斜率比较小,荷载增加缓慢.短裂纹被压实后荷载-位移曲线的斜率逐渐变大,之后呈直线发展.当荷载加至预压荷载时,荷载-位移曲线同样出现凸出的形状.荷载加至峰值荷载的 0.7 倍时,试件从外表看来裂纹极细,但试件横向变形开始变大.当荷载加至峰值荷载的 0.9 倍时,试件原有的裂纹开始慢慢扩展,同时开始出现新的竖向或斜向短裂纹.随着荷载的增加,裂缝逐渐增多.当荷载加至峰值荷载时,短裂纹迅速上下贯通,形成主裂缝,最后试件同样斜向剪切破坏和劈裂破坏.经历 500~700 °C 高温后试件破坏形态如图 5 所示,各温度段实测的荷载-位移曲线如图 6 所示.



a 500 °C b 600 °C c 700 °C

图 5 经历 500~700 °C 高温后试件破坏形态

Fig.5 Failure patterns of typical specimens after high temperatures between 500 °C and 700 °C

2 试验结果及分析

2.1 棱柱体抗压强度

参照 GB/T 11969—2008《蒸压加气混凝土性能试验方法》^[6]中棱柱体抗压强度的测量方法,本文通过高温后轻质加气混凝土的基本力学试验得到了各温度工况下的抗压强度,其实测值如表 2 所示.将抗

压强度实测值与常温下抗压强度的平均值作比值,得到相对抗压强度与温度的关系,如图 7 所示.

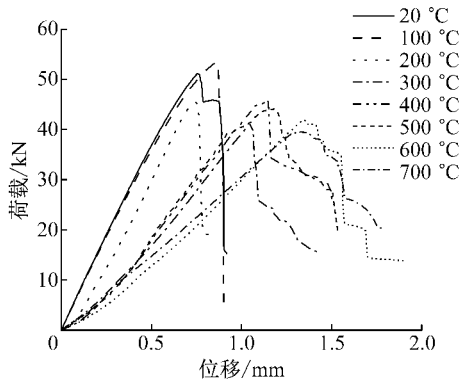


图 6 实测荷载-位移曲线

Fig.6 Measured load-displacement curve

表 2 高温后抗压强度数据汇总

Tab.2 Summary of compressive strength before and after high temperatures MPa

试件 编号	各温度下抗压强度							
	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C
1	4.75	4.66	4.18	3.64	4.18	3.94	4.19	4.53
2	5.12	5.32	4.55	4.11	4.07	4.36	4.27	3.93
3	4.38	5.34	4.39	3.86	4.45	4.07	3.98	3.95

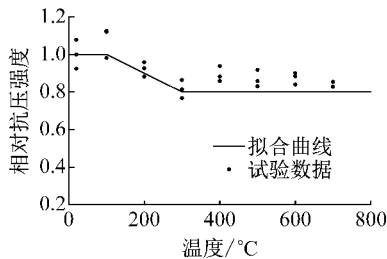


图 7 相对抗压强度-温度关系

Fig.7 Relationship between relatively compressive strength and temperature

从图 7 中可以看出,当温度上升到 100 °C 时,抗

压强度较常温下有略微的提高. 出现这一现象的原因是:温度达到 100 °C 时,轻质加气混凝土试件中自由水大量地蒸发溢出,试件体积缩小,其内部结构变得密实. 因此,当荷载加载到试件上,试件就会呈现更高的抗压强度. 当温度达到 300 °C 时,试件内自由水全部溢出,试件内部形成毛细裂缝和孔隙. 加载后缝隙尖端应力集中,促使裂缝扩展,抗压强度出现明显降低. 当温度超过 300 °C 时,试件内结晶水开始溢出,胶合作用缓和了缝隙尖端的应力集中,有利于强度的提高;细骨料和水泥胶体的温度膨胀系数数值不等,应变差的增大使试件内部形成裂纹,削弱了强度. 这些矛盾因素同时作用,使得抗压强度变化复杂,下降趋势不明显.

采用数值分析方法,归纳出一条与实测较为吻合的抗压强度随温度变化的曲线,同时推导出一个经验公式,参数由最小二乘法原则确定. 按各实测值,鉴于具体情况,采取三折线进行线性拟合. 最后推导、整理得轻质加气混凝土抗压强度的变化规律表达式,如下所示:

$$\frac{f_{cT}}{f_c} = \begin{cases} 1.0, & T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C} \\ -1.37 \times 10^{-3} T + 1.211, & 100 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 300 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0.8, & 300 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 700 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$$

式中: f_c 表示常温下轻质加气混凝土的抗压强度; f_{cT} 表示不同温度后轻质加气混凝土的抗压强度; T 表示温度.

2.2 弹性模量

根据 GB/T 11969—2008《蒸压加气混凝土性能试验方法》中弹性模量的测量方法,本文从棱柱体试件实测的应力-应变曲线上取 $\sigma=0.4f_{cT}$ 时的割线模量作为初始弹性模量 $E_{\sigma T}$,以此反映弹性模量的变化规律. 各工况温度后弹性模量的实测值如表 3 所示.

表 3 高温后弹性模量数据汇总

Tab.3 Summary of elasticity modulus before and after high temperatures MPa

试件编号	各温度下弹性模量							
	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C
1	2 298.85	2 222.22	1 595.12	1 134.21	1 131.44	1 160.40	993.00	897.80
2	2 267.42	2 181.58	1 895.73	1 149.42	1 165.78	1 271.02	873.27	912.43
3	2 211.38	2 293.42	1 625.63	1 140.25	1 228.76	1 069.51	940.97	935.22

对常温下轻质加气混凝土试件的弹性模量取平均值,即 E_0 . 为了得到各工况温度下弹性模量与温度的关系,将上述表格中的数据与 E_0 作比值,绘制相对弹性模量与温度的关系,如图 8 所示.

由图 8 可知,当温度达到 100 °C 时,弹性模量基

本保持不变,试件的刚度不变. 当温度超过 100 °C 时,弹性模量不断降低,且降低速率比相应抗压强度的降低速率更快,这就说明轻质加气混凝土结构受火后产生的应变更大.

根据弹性模量的实测值,按第 2.1 节的方法,同

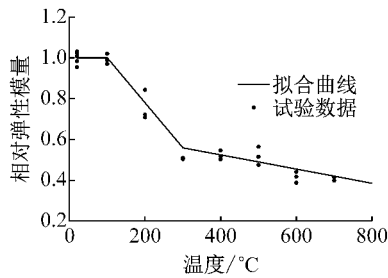


图 8 相对弹性模量-温度关系

Fig.8 Relationship between relatively elasticity modulus and temperature

理归纳出一条与实测较为吻合的弹性模量随温度变化的曲线. 同样采取三折线进行线性拟合, 最后推导、整理得轻质加气混凝土弹性模量的变化规律表达式, 如下所示:

$$\frac{E_{0T}}{E_0} = \begin{cases} 1, & T \leq 100 \text{ }^\circ\text{C} \\ -2.2 \times 10^{-3} T + 1.22, & 100 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 300 \text{ }^\circ\text{C} \\ -3.484 \times 10^{-4} T + 0.6645, & 300 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 700 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$$

式中: E_0 表示常温下轻质加气混凝土的弹性模量; E_{0T} 表示不同温度后轻质加气混凝土的弹性模量.

2.3 峰值应变

从试验中可以观察到, 轻质加气混凝土的峰值应变随着温度的升高而上升, 在相同的荷载作用下产生比常温下更大的应变, 且随温度的不断升高更加明显. 各工况温度后峰值应变的实测值如表 4 所示.

表 4 高温后峰值应变数据汇总

Tab.4 Summary of compressive peak strain before and after high temperatures 10^{-3}

试件 编号	各温度下峰值应变							
	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C
1	2.257	2.867	2.786	3.078	3.341	4.062	4.365	5.054
2	2.347	2.390	3.192	3.747	4.308	4.226	5.323	4.113
3	2.337	2.628	2.873	3.521	3.791	3.675	4.489	4.394

将峰值应变实测值与常温下峰值应变的平均值作比值, 得到相对峰值应变与温度的关系, 如图 9 所示.

从表 4 中数据可以看出, 经历 600 °C 的高温后, 峰值应变 ϵ_{cT} 提高至常温时的 2 倍多. 经过曲线拟合, 可以看出峰值应变随温度成线性增长, 计算公式可以表示为:

$$\frac{\epsilon_{cT}}{\epsilon_c} = 1.75 \times 10^{-3} T + 0.965$$

式中: ϵ_c 表示常温下轻质加气混凝土的峰值应变; ϵ_{cT}

表示不同温度后轻质加气混凝土的峰值应变.

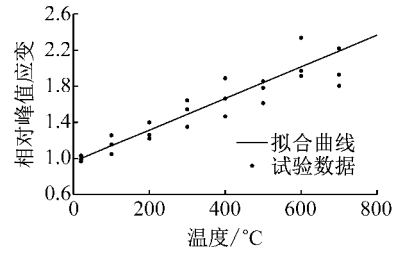


图 9 相对峰值应变-温度关系

Fig.9 Relationship between relatively compressive peak strain and temperature

3 受压应力-应变本构关系

由于受压本构曲线的需要, 曲线的下降段并没有停止数据测量. 每个工况三个试件的应力-应变曲线如图 10 所示.

从图 10 中受压本构关系全曲线可以看出: 高温后的轻质加气混凝土的本构曲线与常温下相似, 上升段开始仍处于弹性变形, 曲线接近直线; 随着应力的增长, 塑性应变开始出现, 曲线微凸, 但曲线的斜率变化很小; 当应力快达到极限时, 塑性应变较快增长. 超过极限应力后, 曲线迅速下落, 之后应力随应变缓慢减小, 材料的弹脆性比较明显. 不同的是: 随着温度的升高, 上升段和下降段的斜率是逐渐降低的. 跟常温下的本构曲线相比, 高温后的单轴受压本构曲线变化比较缓和. 因此本文同样采用三段曲线拟合单轴受压本构曲线^[7], 上升段采用二次多项式, 下降段采用有理式, 表达式如下:

$$y = \begin{cases} 1.1726x - 0.1726x^2, & 0 \leq x \leq 1.00 \\ 38 - 24.8x - 12.2/x^2, & 1.00 < x \leq 1.05 \\ (1 - 1.2x)/(3.5 - 3.7x), & x > 1.05 \end{cases}$$

式中: $x = \epsilon_T / \epsilon_{cT}$, $y = \sigma_T / f_{cT}$, 其中 σ_T 表示各工况试件的应力. 拟合的应力-应变曲线如图 11 所示.

4 结论

(1) 随着温度的增加, 轻质加气混凝土试件的颜色变化为: 青灰色—淡灰色—米黄色—土黄色. 由于轻质混凝土的多孔结构, 相对于普通混凝土来说其在经历高温后表面的裂纹比较少.

(2) 由于轻质加气混凝土经历不同高温后的损伤不同, 因此轻质加气混凝土在高温后的荷载-位移曲线略有不同, 但其破坏形态均是脆性破坏.

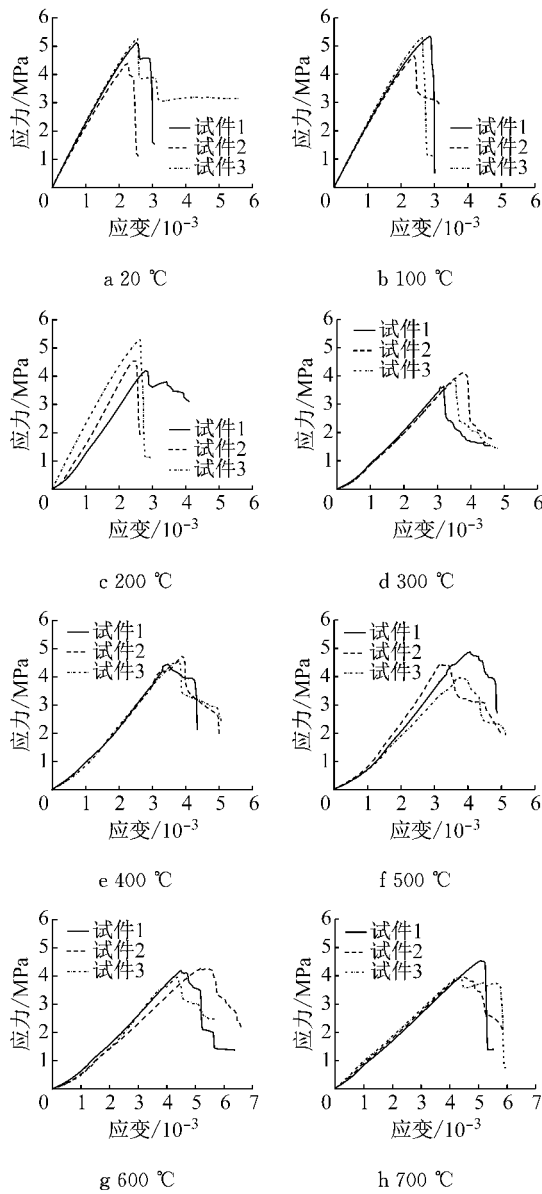


图 10 各温度工况实测应力-应变关系曲线

Fig. 10 Measured stress-strain curves under different temperature conditions

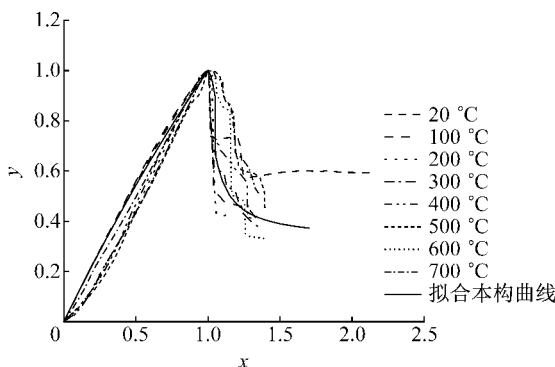


图 11 拟合应力-应变曲线

Fig. 11 Nondimensional stress-strain curve

(3) 高温后轻质加气混凝土的抗压强度在 100 °C 时略微提高,到 300 °C 时逐渐下降;超过 300 °C

时,强度变化不明显,因此 300~700 °C 以后的强度值取为常数. 在 100 °C 以内,弹性模量基本保持不变;超过 100 °C 后,弹性模量不断减小,与温度成线性关系. 随着温度的升高,峰值应变逐渐增大,呈直线上升趋势.

(4) 高温后轻质加气混凝土的受压本构曲线轮廓与常温下的受压本构曲线比较相似. 曲线在达到峰值应力之前塑性应变很小,曲线基本为直线;超过峰值应力后,曲线迅速下降,呈现出弹脆性的受压破坏状态,之后曲线出现缓慢下降的趋势.

参考文献:

[1] 姚谦峰,陈平,张荫,等. 密肋壁板轻框结构节能住宅体系研究[J]. 工业建筑,2003,33(1):1.
YAO Qianfeng, CHEN Ping, ZHANG Yin, et al. Study on energy-saving residential system of multi-ribbed wall slab with light-weight outer frame [J]. Industrial Construction, 2003, 33 (1):1.

[2] 熊耀清,姚谦峰. 轻质多孔混凝土受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2010,36(2):228.
XIONG Yaoqing, YAO Qianfeng. Experimental study on the total stress-strain curve of porous lightweight concrete [J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(2):228.

[3] 喻磊,张荫,岳亚峰,等. 钢筋混凝土框格单元结构力学性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2007,39(3):314.
YU Lei, ZHANG Yin, YUE Yafeng, et al. Experiment on the mechanical behavior of the fundamental reinforced concrete frame structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2007, 39(3):314.

[4] 喻磊,姚谦峰,岳亚峰. 密肋复合墙体框格单元结构刚度与承载力分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2006,38(1):23.
YU Lei, YAO Qianfeng, YUE Yafeng. Analysis of stiffness and load-resisting capacity of fundamental frame structures in high-performance concrete multi-rib walls [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2006, 38(1):23.

[5] 陆杰峰,倪建华,陆人裘. 高温作用后混凝土本构关系试验研究[J]. 南昌水专学报,2003,22(2):53.
LU Jiefeng, NI Jianhua, LU Renqiu. The experiment of stress-strain relation of fire exposed concrete [J]. Journal of Nanchang College of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2003, 22(2):53.

[6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 蒸压加气混凝土性能试验方法:GB/T 11969—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods of autoclaved aerated concrete: GB/T 11969—2008 [S]. Beijing, China Standard Press, 2008.

[7] 熊耀清. 密肋复合墙体损伤演化规律及损伤模型研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.
XIONG Yaoqing. Study on damage evolution rule and damage model of multi-ribbed composite wall [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.