

文章编号: 1000-4750(2013)11-0214-07

高温后碳纤维布约束混凝土轴压力学性能试验

徐 明¹, 陈忠范¹, 肖德后²

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096; 2. 中国电子工程设计院, 北京 100840)

摘 要: 通过对 20 个经历四种不同高温后的素混凝土和无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土圆柱体的轴压力学性能试验, 研究了无机胶粘贴碳纤维布约束混凝土在经历不同高温后抗压强度、极限压应变和应力-应变关系的变化, 得出所经历高温过程对其轴压力学性能的影响。结果表明: 无机胶粘贴碳纤维布约束混凝土经历高温后的破坏形态与常温下基本相似; 其抗压强度在经历 100℃ 高温后, 下降仅 5% 左右, 在经历 200℃、300℃ 和 400℃ 高温后, 约为常温试件的 85%~90%; 无机胶粘贴碳纤维布约束混凝土的极限压应变在 100℃ 高温后略有减小, 在 200℃~400℃ 高温后则比常温下增大 20% 左右; 碳纤维约束对核心混凝土抗压强度的提高作用, 会随试件所经历温度的升高而逐渐增大; 无机胶粘贴碳纤维布约束混凝土的应力-应变曲线在经历高温后会明显趋于扁平, 并且多了一个呈上凹状的压密阶段。

关键词: 混凝土; 高温后; 轴压; 无机胶; 碳纤维**中图分类号:** TU375.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.08.0564

EXPERIMENTAL STUDY ON RC CYLINDERS CONFINED BY CFRP SHEETS UNDER UNIAXIAL COMPRESSION AFTER ELEVATED TEMPERATURE

XU Ming¹, CHEN Zhong-fan¹, XIAO De-hou²

(1. Key Laboratory of RC & PC Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. China Electronics Engineering Design Institute, Beijing 100840, China)

Abstract: 20 short concrete cylinders confined by CFRP sheets with inorganic adhesive after different elevated temperatures have been loaded under uniaxial compression. The failure mechanism and characteristics of the confined cylinders after elevated temperature have been studied. Based on the test results, the effect of the elevated temperature on the ultimate strength and strain, stress-strain relationship of the strengthened members has also been evaluated. The results show the concrete cylinders confined by CFRP sheets with inorganic adhesive after elevated temperature showed the same failure mechanism with the concrete cylinders at normal temperature. The ultimate compressive strength only decreased by 5% after temperature about 100℃ and were about 85%~90% of the specimens at normal temperature after temperature about 200℃~400℃. After elevated temperature about 100℃, the ultimate compressive strain decreased little and after elevated temperature about 200℃~400℃, the ultimate compressive strain increased by 20%. With the increasing of temperatures, the confining effect of CFRP sheets on the concrete increases. After elevated temperature, the stress-strain curves of concrete cylinders confined by CFRP sheets with inorganic adhesive tended to be flat and there was a compact phase in the stress-strain curves.

Key words: concrete; after elevated temperature; uniaxial compression; inorganic adhesive; CFRP

收稿日期: 2012-08-02; 修改日期: 2012-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578039)

通讯作者: 徐 明(1972—), 男, 黑龙江大庆人, 高工, 博士, 从事工程结构防灾减灾研究(E-mail: xuming@seu.edu.cn).

作者简介: 陈忠范(1961—), 男, 江苏南通人, 教授, 博士, 从事工程结构防灾减灾研究(E-mail: zhf-chen@tom.com);

肖德后(1984—), 男, 江西南昌人, 工程师, 硕士, 从事工程结构防灾减灾研究(E-mail: xiaoying-219@163.com).

碳纤维增强复合材料(Carbon Fibre Reinforced Polymer, CFRP)在汽车工业和航空工业中的应用已超过 50 年。在过去的十几年间,随着其价格大幅度下降,同时也由于土木工程修复和加固的需求不断增长,CFRP 被广泛应用于土木工程加固和改造领域。相比于传统的外贴钢板加固法,外贴 CFRP 加固法具有轻质高强、耐腐蚀、安装快速简易、维护费用少、抗疲劳性能好等优点。

在混凝土柱侧面包裹碳纤维布可以约束混凝土柱的横向膨胀,产生相应的被动约束力,进而提高柱子的承载力和延性,形成碳纤维约束混凝土。目前,国内外学者对碳纤维约束混凝土受力性能的研究,所采用的研究参数主要集中在纤维种类、纤维铺设方向、外包纤维量、截面形状和尺寸、混凝土的强度等级以及试件的长细比等^[1-6],对于高温后碳纤维约束混凝土受力性能的研究则较少^[7-8]。

用于粘贴碳纤维的胶粘剂,大多属于环氧类有机物,其玻璃态转化温度 T_g (the glass transition temperature)一般都比较低($65^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$)^[7]。在高温下,当温度超过 T_g 后,碳纤维与混凝土之间的粘结强度会迅速降低^[7],从而影响两者之间的共同工作性能。

为此,本文作者所在课题组对采用自行研制的耐高温、无毒的无机胶-氯氧镁水泥(Magnesium Oxychloride Cement, MOC)粘贴碳纤维加固混凝土开展了系统的研究^[9-10],本文是系列研究的一部分,主要研究高温后无机胶粘贴碳纤维约束混凝土轴压力学性能,为该类型无机胶在碳纤维加固中的应用提供试验及理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验共设计制作了 20 个直径为 150mm、高 300mm 的混凝土圆柱体试件。根据所经历的温度的不同和是否进行碳纤维加固,将试件分成两组共 10 类试件,每种类型的试件个数为 2 个,见表 1,一共设计了五种温度,分别为常温、 100°C 、 200°C 、 300°C 、 400°C 。为了研究碳纤维布约束在高温后对加固试件承载力的影响,因此设计了经历过相同高温的未加固试件来进行对比。对于所有的加固试件,碳纤维布的粘贴层数都为两层,碳纤维布连续环向粘贴于试件侧面,纤维方向与柱轴向垂直,搭接长度为 150mm。

表 1 试件编号和分组

Table 1 Number and group information of the specimens

试验温度	试件编号			
	未加固		无机胶加固	
常温	R-1	R-2	RI-1	RI-2
100°C	H1-1	H1-2	HI1-1	HI1-2
200°C	H2-1	H2-2	HI2-1	HI2-2
300°C	H3-1	H3-2	HI3-1	HI3-2
400°C	H4-1	H4-2	HI4-1	HI4-2

注: H(high temperature)代表高温, I(inorganic)代表无机胶,“-”前面的数字代表试验温度,如“1”代表 100°C ;“-”后面的数字说明每种类型的试件个数为 2。

1.2 材料性能

混凝土设计强度等级为 C25, 试验时混凝土立方体抗压强度为 28.3MPa 。采用厚 0.111mm 的碳纤维布,重量为 $200\text{g}/\text{m}^2$,碳纤维布材料性能见表 2。试验中所使用的无机胶为课题组研发的氯氧镁水泥(MOC)粘结剂,采用掺 10%高铝水泥的 MOC 作为底胶层和找平层,采用纯 MOC 作为碳纤维布粘结剂。MOC 的制备原材料为工业用轻烧 MgO 、 $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、普通工业用高铝水泥,配合比为 $\text{MgO}:\text{MgCl}_2=10.75:1$ (摩尔比),水:($\text{MgO}+\text{MgCl}_2$)= $0.45:1$ (质量比)。MOC 的抗压强度为 113.4MPa ,抗折强度为 23.7MPa ;掺 10%高铝水泥 MOC 的抗压强度为 102.0MPa ,抗折强度为 18.9MPa ;无机胶粘贴碳纤维抗拉强度为 1930MPa ^[10]。

表 2 碳纤维布的主要性能指标

Table 2 Properties of CFRP sheets

厚度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/(%)	比重/(g/m^2)
0.111	3787	241	1.71	200

1.3 加热设备和升温方案

加热设备采用节能箱式电阻炉,并通过电炉控制柜对其进行控制。炉膛工作室尺寸为 $1200\text{mm}\times 600\text{mm}\times 400\text{mm}$ (长 \times 宽 \times 高),额定功率为 65kW ,最高工作温度为 1200°C 。文献[11]的研究成果表明,炉膛温度达到预定温度后恒温 2h~3h,冷却后混凝土的残余强度会比较稳定。为了使试件受热均匀、充分,本次试验采取如下升温方案:先以电炉的自然升温曲线($20^{\circ}\text{C}/\text{min}$)升至预定的温度,然后恒温 2h,接着关闭电源,打开炉门,待其自然冷却至室温再取出试件。

1.4 测点布置和加载装置

试验采用 200t 压力试验机进行分级单调加载,所有试件均为轴向受压,每级荷载约为预计破坏荷载的 $1/15$,持荷五分钟后再加下一级荷载,在试验

过程中注意观测试件的开裂变形情况，当试件接近破坏时，将荷载级差缩小。

碳纤维布横向拉应变和圆柱的纵向压应变由电阻应变片量测，试件的轴向变形用电子百分表量测，如图 1 所示。

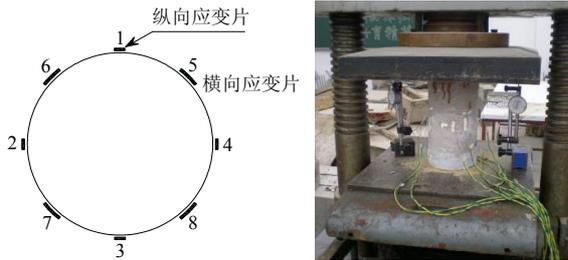


图 1 试验装置图
Fig.1 Test facility

1.5 高温试验后现象

高温试验后试件外观如图 2 所示。

对未加固的素混凝土，经历最高温度为 100℃ 的试件，柱身基本完好，很难发现有裂纹，颜色灰白，与高温前没有明显变化；经历最高温度为 200℃ 的试件，柱身稍微显黄，同时可以观察到非常少量的不规则网状细微裂纹；经历最高温度为 300℃ 的试件，柱身较 200℃ 高温试件更显黄，柱身

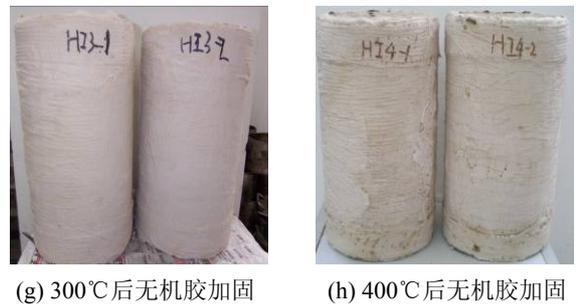
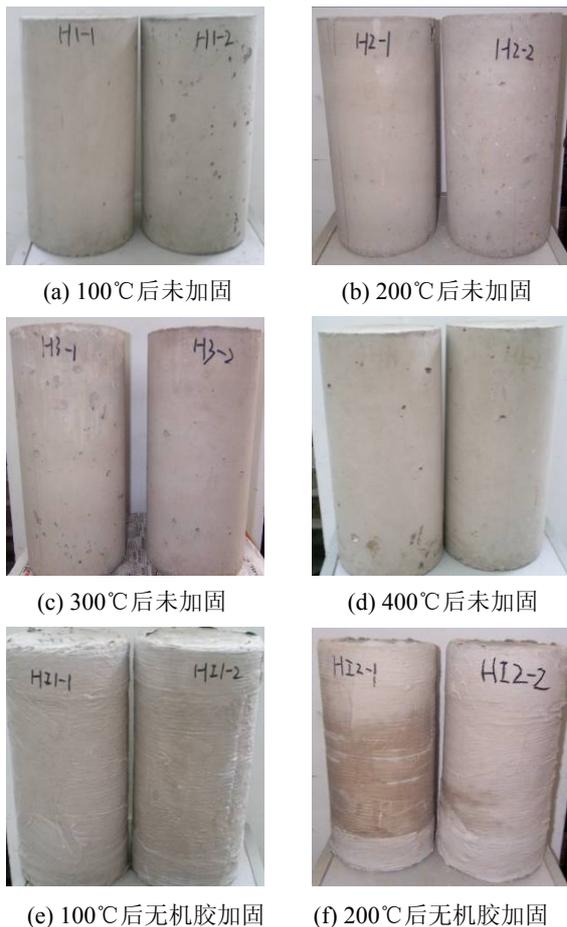


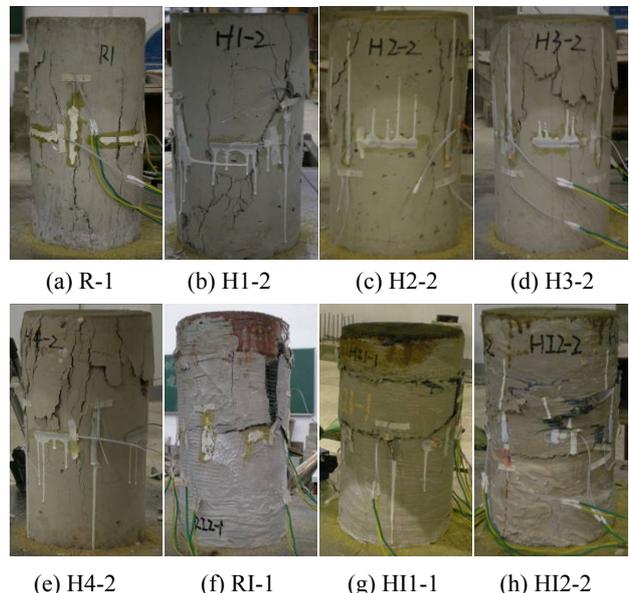
图 2 高温试验后试件图
Fig.2 Specimens after elevated temperature

的裂纹也较之更多，裂纹呈网状且短小，约 2cm~3cm；经历最高温度为 400℃ 的试件，颜色明显发黄，柱身有不少的网状细微裂缝，其长度和宽度都较 300℃ 高温试件要大。

对无机胶粘贴碳纤维布加固的混凝土，经历最高温度为 100℃ 的试件，柱身颜色与高温前变化不大，也观察不到裂纹；经历最高温度为 200℃ 的试件，颜色发黄，在冷却过程中，可以听到脆裂声，但是柱身仅观察到非常少量的细小裂纹；经历最高温度为 300℃ 的试件，略显黄色，柱身有不少裂纹，以沿纤维方向的环向裂纹居多，裂纹的长度约为 4cm~5cm，较之经历过同样温度的未加固试件，要稍显开裂严重；经历最高温度为 400℃ 的试件，颜色明显发黄，甚至有不少麻花状的烧结点，柱身有很多的裂缝，以环向裂缝为主，也有不少短小的竖向裂缝，裂缝的宽度较之 300℃ 高温试件要大；所有试件的碳纤维仍然紧贴内部混凝土，无松脱迹象。

1.6 轴压试验现象

轴压试验试件最终破坏形态如图 3 所示。



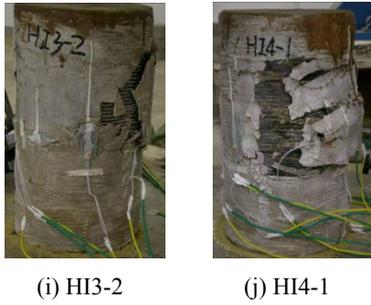


图3 试件破坏特征

Fig.3 Failure characteristics of the specimens

对未加固的素混凝土，经历各高温后的试件除了承载力不同外，试件的破坏形式和过程都类似。当加载到试件极限荷载的 75%左右时，柱身开始出现明显的竖向裂缝，随着荷载的加大，众多竖向裂缝慢慢扩展，不断往上下延伸，同时伴随有噼里啪啦的混凝土开裂声，很快试件就因承载力不足而失效，破坏过程比较突然，表现出明显的脆性。

对无机胶粘贴碳纤维布加固的混凝土，经历最高温度 200℃、300℃、400℃试件的破坏过程与常温试件类似，只是面胶的起鼓开裂稍显严重，当加载到极限荷载的 70%~80%时，柱身就会出现一条慢慢开展的主裂缝，随着荷载的增大，裂缝不断延长加宽，并伴随有纤维丝束“嘶嘶”的拉断声，最后试件由于碳纤维约束的失效导致承载力不足而发生破坏。所有试件都没有发生碳纤维布被彻底拉断的现象，从表面上看，只是部分纤维丝束断裂，其他丝束变形很大。透过断裂面可以发现，内部混凝土已严重开裂，从柱身剥离的纤维箍，除了 100℃高温试件同常温试件一样粘有较多混凝土小碎粒以外，其他高温试件的剥离面相对比较光滑，只是粘有些许表层水泥砂浆，这说明经历过 200℃、

300℃和 400℃的高温后，无机胶与混凝土之间的粘结力不及常温下高，甚至低于混凝土的抗拉强度。但是从试验结果来看，这对试件的承载力影响却不是很大。这主要是由于无机胶粘贴碳纤维与混凝土之间的粘结强度对碳纤维对内部混凝土的约束作用影响不大。

2 试验结果与分析

未加固试件与无机胶加固试件的轴压试验结果分别列于表 3 和表 4，其中， f'_{co} 为常温下未加固素混凝土的抗压强度； P_{co}^T 、 f_{co}^T 、 ϵ_{co}^T 分别表示经历温度 T 作用后未加固素混凝土的极限荷载、抗压强度和极限压应变(极限荷载是指轴压试验中所达到的峰值荷载、极限压应变是极限荷载所对应的压应变)； f'_{cc} 、 ϵ_{cc} 分别为常温下碳纤维布约束混凝土的抗压强度和极限压应变； P_{cc}^T 、 f_{cc}^T 、 ϵ_{cc}^T 分别为经历温度 T 作用后碳纤维布约束混凝土的极限荷载、抗压强度和极限压应变； ϵ_{ef} 、 ϵ_{ef}^T 分别为常温和经历温度 T 作用后碳纤维布的有效拉应变。

表 3 未加固试件试验结果

Table 3 Test results of unstrengthened specimens

试件编号	P_{co}^T /kN	f_{co}^T /MPa	ϵ_{co}^T / $\mu\epsilon$	f_{co}^T/f'_{co}
R-1	399	22.6	2267	/
R-2	389	22.0	2153	/
H1-1	365	20.6	1815	0.926
H1-2	426	24.1	1841	1.081
H2-1	329	18.6	1904	0.835
H2-2	270	15.3	1674	0.685
H3-1	290	16.4	1938	0.736
H3-2	271	15.3	2158	0.688
H4-1	195	11.0	2403	0.495
H4-2	193	10.9	2567	0.490

表 4 加固试件试验结果

Table 4 Test results of strengthened specimens

试件编号	P_{cc}^T /MPa	f_{cc}^T /MPa	ϵ_{cc}^T / $\mu\epsilon$	ϵ_{ef}^T / $\mu\epsilon$	f_{cc}^T / f'_{co}	$\epsilon_{cc}^T / \epsilon_{co}^T$	f_{cc}^T / f_{cc}	$\epsilon_{cc}^T / \epsilon_{cc}$	$\epsilon_{ef}^T / \epsilon_{ef}$
RI-1	989	56.0	8274	4600	2.510	3.744	/	/	/
RI-2	920	52.1	5790	2915	2.335	2.620	/	/	/
HI1-1	931	52.7	6307	4235	2.354	3.450	0.975	0.897	1.184
HI1-2	898	50.8	5530	3508	2.271	3.025	0.941	0.786	0.980
HI2-1	794	44.9	8279	5221	2.651	4.628	0.832	1.177	1.459
HI2-2	843	47.7	8635	5462	2.814	4.827	0.883	1.228	1.527
HI3-1	878	49.7	8050	4253	3.129	3.931	0.920	1.145	1.189
HI3-2	840	47.5	—	—	2.994	—	0.880	—	—
HI4-1	830	47.0	8245	4678	4.280	3.318	0.870	1.172	1.307
HI4-2	870	49.2	9953	4723	4.486	4.005	0.911	1.415	1.320

注：“—”表示由于测点失效而无法测得数据。

2.1 高温后碳纤维约束混凝土抗压强度

从表 4 可以看出，高温后无机胶粘贴碳纤维布

约束混凝土的抗压强度比常温下要低，其中，经历最高温度为 100℃的试件，其抗压强度与常温试件

相差无几, 下降仅 5% 左右; 经历最高温度为 200℃、300℃和 400℃的试件, 抗压强度相互之间差别不大, 都约为常温试件抗压强度的 85%~90%, 下降幅度也不大。但是, 从表 2 可知, 未约束素混凝土除了在经历 100℃高温后, 其抗压强度几乎不变以外, 在经历 200℃、300℃和 400℃高温后其抗压强度都会有所降低, 且经历的温度越高, 降低的幅度越大, 到 400℃时, 其抗压强度仅剩 49%。由此可以发现, 在 200℃~400℃时, 碳纤维布约束混凝土圆柱体中核芯混凝土的抗压强度会随着温度的升高而逐渐降低, 但是碳纤维布约束圆柱体本身的承载力却不会随着温度的升高而发生大的变化。将经历相同高温后的碳纤维约束混凝土试件的抗压强度与素混凝土试件的抗压强度进行对比, 发现两者的比值随着温度的升高而逐渐增大, 见图 4, 之所以出现这种现象, 分析主要归结为以下原因:

1) 由于碳纤维布与核芯混凝土的热膨胀变形不协调而导致碳纤维布产生了预应力, 提高了碳纤维约束混凝土的抗压强度。据文献[7], 碳纤维布是可以耐高温的, 其热膨胀系数为 0°C^{-1} , 在高温下碳纤维布几乎不会发生膨胀变形, 而混凝土的热膨胀系数为 $(0.008T+6)\times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$, 在高温下会产生膨胀变形, 但是这种变形会受到外部碳纤维布的约束, 从而对核芯混凝土施加了一定的预压应力。经历的温度越高, 施加的预压应力也就越大, 对约束混凝土抗压强度的提高幅度也就越大。

2) 现有研究表明^[12], 对于碳纤维约束混凝土, 碳纤维布的加固效率会随着混凝土抗压强度的降低而升高, 这就使得抗压强度相差较大的核芯混凝土在经过碳纤维布加固后, 其抗压强度的差别会变小。从表 3 最后一列可以看出, 高温后的碳纤维布有效拉应变比常温下要大, 也就是说高温后碳纤维布提供的有效约束力加大。

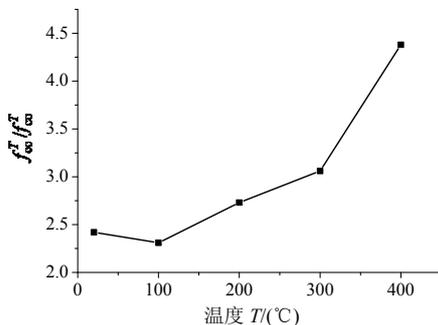


图 4 试件 $f_{cc}^T / f_{cc}^{T_0}$ 与所经历温度关系曲线

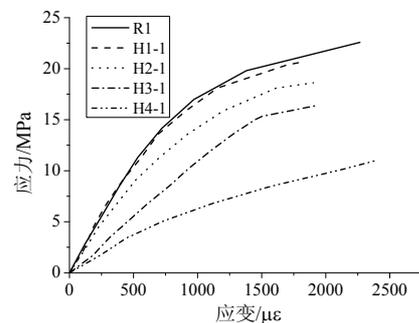
Fig.4 Relationship between $f_{cc}^T / f_{cc}^{T_0}$ and temperature

2.2 高温后碳纤维约束混凝土的极限压应变

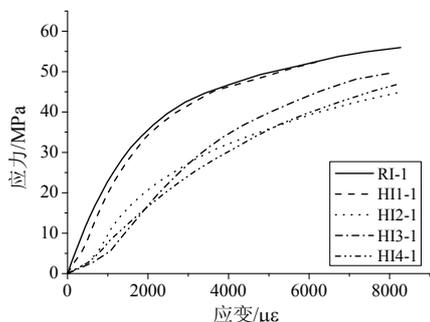
由表 4 可以看出, 碳纤维布约束混凝土的极限压应变, 除了在经历 100℃高温后其值比常温下略小外, 在经历 200℃、300℃和 400℃高温后其值都要比常温下大 20% 左右, 且相互间差别不大。将经历相同高温后的加固试件的极限压应变与未加固试件的极限压应变进行对比, 可以发现比值都要大于 3, 变形能力提高幅度较大, 且与常温下的比值相比, 除了 100℃高温后的比值变化不大以外, 其他高温后试件的比值明显增大。

2.3 高温后碳纤维布约束混凝土的应力-应变关系

高温后碳纤维布约束混凝土圆柱体的轴向应力-应变关系曲线见图 5, 试件的轴向应力与横向应变之间的关系曲线则见图 6。由图 5 可以看出, 对于未加固的素混凝土, 其轴向应力-应变曲线除了在 100℃高温后同常温非常接近外, 其它高温后试件的曲线会随着温度的升高而渐趋扁平, 峰值点明显下降, 试件的刚度不断下降, 峰值应变不断增加, 抗压强度也会不断降低。对于无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土的轴向应力-应变曲线, 在经历 100℃高温后几乎没有多大变化, 在经历 200℃~400℃高温后, 曲线会明显趋于扁平, 且经历 200℃、300℃和 400℃高温后试件的曲线相互比较接近。其中, 高温后曲线最为明显的一个变化特征就是在加载初期曲线呈上凹状, 即应变增长的幅度会随应力的增大而逐渐放缓。这是由于加固试件在经历高温后, 一方面, 内部核芯混凝土会出现一些细小裂缝, 另一方面柱身表面的无机胶也会出现细微的裂缝, 且以环向裂缝为主, 粘贴的纵向应变片较长会跨过裂缝, 在轴压试验过程中, 混凝土和无机胶中的细微裂缝会在荷载的作用下发生闭合, 因此所测得的应变一开始会比较大, 而随着裂缝的闭合, 应变的增长幅度会慢慢减小, 从而使测得的应力-应变曲线呈上凹状, 这一阶段可称之为压密阶段。仔细观察可



(a) 高温后未加固试件



(b) 高温后加固试件

图 5 试件轴向应力-应变曲线

Fig.5 Uniaxial compressive stress-strain curves of specimens 以发现 100℃ 高温后曲线无明显的压密阶段，这是因为混凝土及无机胶在经历 100℃ 高温后基本不会开裂。

对无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土的轴向应力-横向应变曲线，由图 6 可以看出，随着温度的升高，曲线渐趋扁平，弹性阶段与弹塑性阶段之间的拐点越来越下降和右移。相比轴向应力-应变曲线，该曲线弹性阶段与弹塑性阶段之间的拐点更为清晰，且强化阶段更偏向于直线型。

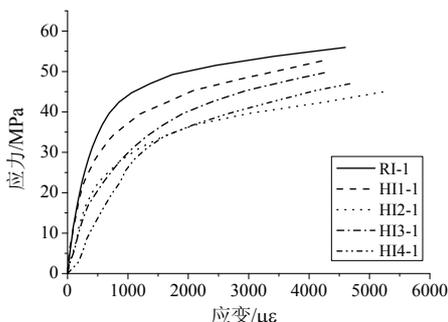
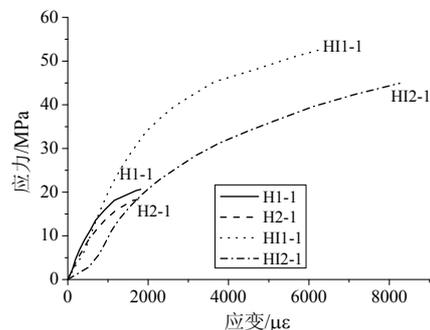


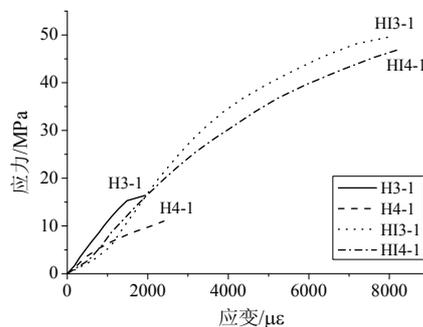
图 6 经历高温后加固试件的轴向应力-横向应变曲线

Fig.6 Relationship between compressive stress and transverse strain of specimens

将经历相同高温的加固试件与未加固试件的轴向应力-应变曲线进行对比，如图 7，发现在应力较小时，加固试件曲线的斜率不及未加固试件高，这主要是由于加固试件有一压密阶段。压密阶段之



(a) 100℃ 及 200℃ 高温后



(b) 300℃ 及 400℃ 高温后

图 7 加固试件与未加固试件应力-应变曲线对比

Fig.7 Comparison of the stress-strain curves from strengthened and unstrengthened specimens

后，就可以发现加固试件的曲线“恢复正常”，斜率要比未加固试件大，应变随着应力的增大而呈曲线增长，极限压应变和极限压应力比未加固试件大很多，加固效果明显。

3 结论

本文通过对最高经历 400℃ 高温后无机胶粘贴二层碳纤维布加固混凝土圆柱体的轴压力学性能试验及分析，得出以下主要结论：

(1) 无机胶粘贴碳纤维布约束混凝土在经历高温后，会在圆柱体表面出现一些裂纹，随着温度的升高，柱身的开裂会更严重，但是碳纤维仍然紧贴核芯混凝土，无松脱迹象。

(2) 高温后无机胶粘贴碳纤维布约束混凝土圆柱体的轴压破坏形态类似常温试件，也是由于部分碳纤维丝束的拉断致使碳纤维约束不足以给内部核芯混凝土提供有效的约束力来继续承担荷载，从而使得试件失效。

(3) 无机胶粘贴碳纤维布约束混凝土的抗压强度在经历 100℃ 高温后，变化不大，下降仅 5% 左右，在经历 200℃、300℃ 和 400℃ 高温后，试件的抗压强度相互之间差别不大，都约为常温试件抗压强度的 85%~90%。

(4) 无机胶粘贴碳纤维布约束混凝土的极限压应变在 100℃ 高温后略有减小，在 200℃~400℃ 高温后则比常温下增大 20% 左右。

(5) 碳纤维约束对核心混凝土抗压强度的提高作用，会随试件所经历温度的升高而逐渐增大。

(6) 无机胶粘贴碳纤维布约束混凝土的轴向应力-应变曲线在 100℃ 高温后几乎不变，在经历更高温后，曲线会明显趋于扁平，并且多了一个呈上凹状的压密阶段，压密阶段之后曲线的走势与常温

下相似。

参考文献:

- [1] Antonio D L, Fabio N, Fabio M. Structural evaluation of full-scale FRP confined reinforced concrete columns [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2011, 15(1): 112–123.
- [2] Cui C, Sheikh S A. Experimental study of normal-and high-strength concrete confined with fiber-reinforced polymers [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2010, 14(5): 553–561.
- [3] Eid R, Roy N, Paultre P. Normal and high-strength concrete circular elements wrapped with FRP composites [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2009, 13(2): 113–124.
- [4] Nicolas S, Chris P P. Strain-based confinement model for FRP-confined concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2007, 13(6): 825–834.
- [5] Samaan M, Mirmiran A, Shahawy M. Model of concrete confined by fiber composites [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(9): 1025–1031.
- [6] Lam L, Teng J G. Strength models for fiber reinforced plastic confined concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(5): 612–623.
- [7] Bisby L A. Fire behaviour of FRP reinforced or confined concrete [D]. Ontario: Queen's University, 2003.
- [8] Joao P C, Rodrigues, L L, António M C. Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire [J]. *Composite Structures*, 2010, 92(5): 1263–1268.
- [9] 徐明, 陈忠范, 姜岩宁. 碳纤维加固混凝土构件防火保护措施的试验研究[J]. *工业建筑*, 2009, 30(5): 128–132.
Xu Ming, Chen Zhongfan, Jiang Yanning. Experimental research on fireproofing measures for CFRP strengthened concrete members [J]. *Industrial Construction*, 2009, 30(5): 128–132. (in Chinese)
- [10] 徐明, 韩春雷, 陈忠范. 氯氧镁胶凝材料粘结碳纤维板高温后拉伸性能试验研[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2013, 223(3): 18–21.
Xu Ming, Han Chunlei, Chen Zhongfan. Experimental study on tensile strength of CFRP plate bonded with MOC after high temperature [J]. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2013, 223(3): 18 – 21. (in Chinese)
- [11] Mohamedbhat G T G. Mice M, Effect of exposure time and rates of heating and cooling on the residual strength of heated concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1986, 38(136): 151–158.
- [12] 李玉鹏. 碳纤维布约束混凝土柱受压性能试验研究及理论分析[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Li Yupeng. Experimental study on concrete columns confined by CFRP sheets under compression [D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [13] 肖德后. 高温下碳纤维加固混凝土柱受力性能的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
Xiao Dehou. Fire behavior of concrete columns strengthened with CFRP sheets [D]. Nanjing: Southeast University, 2009. (in Chinese)

(上接第 184 页)

- [9] 赵熙元. 开口薄壁构件约束扭转的近似计算[J]. *钢结构*, 1997, 12(2): 7–14.
Zhao Xiyuan. The approximate calculation of thin-walled member under constrain torsion [J]. *Steel Constraction*, 1997, 12(2): 7–14. (in Chinese)
- [10] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2005: 151–204.
Chen Shaofan. Principles of steel structures design [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2005: 151 – 204. (in Chinese)
- [11] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 360–363.
Sun Xunfang, Fang Xiaoshu, Guan Laitai. Mechanics of materials [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2004: 360–363. (in Chinese)