

RPC管-混凝土组合柱高温后 轴压性能试验研究*

单波^{1,2†}, 陈超¹, 赖大德¹, 刘福财³

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 绿色先进土木工程材料及应用技术
湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 广东盖特奇新材料科技有限公司, 广东 清远 511600)

摘要:针对RPC(活性粉末混凝土)管-混凝土组合柱(CFRT)这一新型组合结构的抗火性能开展试验研究。采用高温试验炉对7个大尺寸CFRT短柱进行升温试验及高温后的轴压试验,试验参数包括控制温度、配箍率和配箍方式。结果表明,CFRT高温下未发生爆裂现象;高温后的轴压承载力和刚度随试验温度的提高而降低,但具有相对较高的残余承载力;提高配箍率和采用双层配箍方式,有利于改善CFRT高温后的抗压性能;与已有的普通钢筋混凝土约束柱抗火试验结果相比较,CFRT具有更高的残余承载力比。CFRT具有优异的抗火性能。

关键词: 活性粉末混凝土(RPC);组合柱;高温;约束;力学性能

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

Experimental Research on Mechanical Properties of Concrete-filled RPC Tube Columns after High Temperature

SHAN Bo^{1,2†}, CHEN Chao¹, LAI Dade¹, LIU Fucui³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory for Green
& Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Changsha 410082, China;
3. Guangdong Gaiteqi New Materials Technology Co Ltd, Qingyuan 511600, China)

Abstract: Fire resistance of Concrete-filled RPC tube (CFRT) columns were investigated by experimental study. Seven large-scale CFRT specimens were performed by heating test and axial compression test after elevated temperature. The test parameters included control temperature, volumetric stirrup ratio and stirrup arrangement mode. The test results showed the spalling of concrete was not observed during elevating temperatures. The compressive performance of CFRT column after high temperature decreased with the rising control temperature. Both increasing the volumetric stirrup ratio and arranging double layers of spiral hoops were effective measures for improving the mechanical properties of the CFRT columns after high temperature. Compared with the existing test results, the residual load carrying capacity ratio of the CFRT after elevated temperature was higher than that of the ordinary steel-confined column. The CFRT columns exhibited excellent fire resistance.

* 收稿日期:2017-08-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678228,51278180), National Natural Science Foundation of China(51678228,51278180)

作者简介:单波(1976-),男,湖南益阳人,湖南大学副教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: supershanb@hnu.edu.cn

Key words: reactive powder concrete (RPC); composite columns; high temperature; confinement; mechanical properties

对混凝土施加侧向约束,是提高结构柱抗压性能的有效方式.目前,基于约束效应的组合柱主要有:钢管混凝土(CFT)柱、纤维增强复合材料(FRP)约束混凝土柱和箍筋约束混凝土(SCC)柱^[1-3].这些组合柱具有各自的特点,许多研究者进行了深入研究,并在工程中得到广泛应用.但是,这些组合柱在性能上也存在一定的缺陷,如钢管的抗火性能和耐腐蚀性能差^[4-5];FRP材料的力学性能对温度比较敏感^[6-7];而对于箍筋约束混凝土,其混凝土保护层在受力过程中过早剥落,对承载力没有贡献^[8-9],且不利于装配施工.这些不足之处限制了组合柱的使用范围,特别是在高温、高腐蚀环境中(如海岸工程、远洋岛礁工程等)的应用^[10].

作者提出了一种新型组合柱——活性粉末混凝土(RPC)管-混凝土组合柱(Concrete-filled RPC tube,简称CFRT)^[11],其结构形式为:将RPC预制成配置高强螺旋箍筋的薄壁管,施工时在内部现浇混凝土,形成组合柱,如图1所示.由于RPC具有超高的抗压强度和优异的抗裂能力,在受压过程中RPC管可以直接承担相当部分的轴向荷载,而管内的高强箍筋对内部混凝土施加侧向约束,形成约束组合柱.作者对3组CFRT短柱和2组对比试件开展了轴压试验^[11],结果表明,CFRT不但具有优异的变形性能,而且其轴压承载力超过RPC空管与对应箍筋约束混凝土柱两者承载力之和.CFRT将RPC的材料性能和箍筋约束效应有效结合了起来,提供了一种基于超高性能水泥基材料的约束混凝土柱,特别是相比于CFT,具有突出的耐腐蚀性,也适于装配式施工.

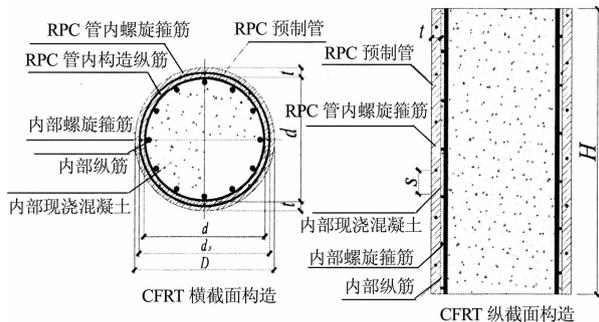


图1 CFRT典型截面构造形式
Fig. 1 Typical cross section of CFRT

CFRT的抗火性能是其安全性的重要方面,但这方面的研究还处于空白.郑文忠等^[12]、Kim等^[13]和 Mehmet^[14]的研究表明,钢纤维与有机纤维的掺入能有效改善RPC的耐火性能.因此,从材料角度来看,CFRT相对于其他约束组合柱,特别是CFT,应该具有更好的抗火性能.目前,国内外的一些研究者在钢筋混凝土柱的抗火性能方面开展了不少试验研究,如吴波、宿晓萍等^[15]对3组不同配箍率的C80级标准棱柱体试件进行高温后力学试验,发现箍筋的存在能够有效防止高强混凝土爆裂,并提高混凝土高温后的残余力学性能;Jau和Huang^[16]测量了6根轴压比为0.1的混凝土角柱在标准火灾后残余力学性能,结果表明混凝土保护层在高温下开裂脱落,增大混凝土保护层厚度会降低试件的剩余承载力;陈宗平等^[17]对32钢筋再生混凝土短柱进行了高温后的抗压试验,并探讨了残余承载力计算方法.这些研究成果对本试验的开展具有指导作用.本文在开展大尺寸CFRT短柱高温试验研究,测试其在高温后的轴压性能,为CFRT抗火性能评估和设计奠定基础.

1 试验设计

1.1 试件设计

本试验包括1个常温试件和6个高温试件,试件所采用的RPC管均由佛冈龙清电力器材有限公司车间采用离心法生产.管的外径 D 为300 mm,高度 H 为600 mm,壁厚 t 为25 mm,如图1所示.在RPC管壁中心位置配置直径为6 mm的螺旋箍筋,材质为高强光面65锰弹簧钢,实测屈服强度为995 MPa.为满足离心法的工艺要求,沿RPC管轴向设置8根直径为4 mm的构造纵筋并施加一定的预张力,以维持钢筋笼在离心过程中的形状^[18].

RPC的主要原材料为:42.5的普通硅酸盐水泥;最大粒径为3 mm的石英砂;直径为0.12 mm、长度为8 mm的钢纤维;直径为45 μm 、长度为18 mm的PVA纤维.配合比(体积比)为:水泥:砂:硅灰:高效减水剂:钢纤维:PVA=1:2.10:0.25:0.03:1.91:0.2, $W/B=0.22$.热水养护48 h后的立方体抗压强度(100 mm \times 100 mm \times 100

mm)为123.2 MPa。

内部现浇混凝土配置螺旋箍筋和纵向钢筋,其中,螺旋箍筋的规格与RPC管相同.各试件的纵向配筋相同,均为12根直径为12 mm的HRB400级钢筋,实测屈服强度为456 MPa.内部混凝土的设计强度等级为C60,主要材料为42.5的普通硅酸盐水泥,粗骨料为最大粒径为25 mm的碎石,细骨料为河砂.混凝土的配合比(体积比)为:水泥:硅:灰砂:石:高效减水剂=1:0.1:1.69:2.75:0.005, $W/B=0.35$. 28 d立方体抗压强度为69.2 MPa.

试件基本参数及试验结果如表1所示.按照试验条件分为3组:第1组为温度的影响,包括C40-GZ-20、C40-GZ-200、C40-GZ-400、C40-GZ-600和C40-GZ-800;第2组为配箍率的影响,包括C20-GZ-

800和C40-GZ-800;第3组为配箍方式的影响,也就是在保持总的配箍率不变的条件下,将一部分约束箍筋配置在内部混凝土中,包括C20-GZ-800和C40-35-800.

1.2 试件加工

所有试件均在实验室采用人工制作.首先,将RPC管固定,放入钢筋笼,如图2(a)所示;然后分3层在管内浇筑混凝土并在振捣密实;待混凝土硬化后,对组合柱的顶面进行修补,主要方法是采用单独配置的RPC进行铺浆,铺浆厚度为3~5 mm,再用一块机械抛光的厚钢板压顶,并使钢板在铺浆硬化过程中与试件底面保持平行,待修补层硬化后即可得到平整的受压面,如图2(b)所示.

表1 试件设计参数及部分试验结果

Tab.1 Parameters of specimens and parts of test results

试件编号	s/mm		ρ_s /%	$f'_{\text{rpc,co}}$ /MPa	f'_{co} /MPa	T /°C	EA^T /(10 ⁶ kN)	N_u /kN
	RPC管	内部						
C40-GZ-20	40	—	1.03	105.8	54.9	20	2.97	6 993
C40-GZ-200	40	—	1.03	104.2	54.7	200	2.49	6 982
C40-GZ-400	40	—	1.03	106.7	54.9	400	1.50	6 208
C40-GZ-600	40	—	1.03	103.1	55.4	600	0.82	5 460
C40-GZ-800	40	—	1.03	105.4	55.2	800	0.58	4 357
C20-GZ-800	20	—	2.06	106.7	56.9	800	0.63	4 957
C40-35-800	40	35	2.06	103.1	56.5	800	0.84	5 380

注:1)试件编号中,“C”代表试件;第一个数字表示RPC管中箍筋间距;第二个数字表示内部混凝土的箍筋间距,其中“GZ”表示为构造配箍,间距为150 mm;最后一个数字代表高温试验控制温度.2) s 为螺旋箍筋间距; ρ_s 为总配箍率; $f'_{\text{rpc,co}}$ 和 f'_{co} 分别表示RPC管和管内混凝土的轴心抗压强度; T 为试验控制温度; N_u 表示高温后轴压承载力; EA^T 为高温后的轴向刚度.

每个试件预留一组直径为150 mm高度为300 mm的混凝土圆柱体小试件,与大试件同条件养护.抗压试验前,测得小试件的抗压强度代表RPC内部混凝土的轴心抗压强度 f'_{co} .所有试件在实验室放置60 d左右后进行抗火试验.

1.3 试验方法与设备

试验分为两个步骤进行,即CFRT柱的高温试验以及高温后的轴向受压试验.高温试验使用工程结构与损伤湖南省重点实验室与洛阳耐火材料研究院共同开发的高温电炉完成.该设备由高温电炉以及配套温控设备组成,电炉采用两半对开式结构,炉膛高630 mm,内直径为550 mm,炉膛内部设有热电偶,可对炉膛温升进行控制,如图3所示.为了测量CFRT试件在不同温度下的温度场,在试件中部高度截面处埋设3个热电偶,具体位置如图4所示.所有温度测点采用XMT-J型温度巡检仪实时测量温度,数据记录时间间隔为5 min.

高温后轴压性能试验在10 000 kN电液伺服压力机上进行.试验时,在试件的中部安装一个轴向变形测试架,试验架通过对拉弹簧固定在试件上,并在对称位置设有两个高精度的位移传感器(LVDT),以测量试件在整个试验过程中轴向变形,如图4所示.在试件中部高度截面处粘贴4个纵向应变片,便于试件对中.轴压荷载由压力机内置传感器测量.所

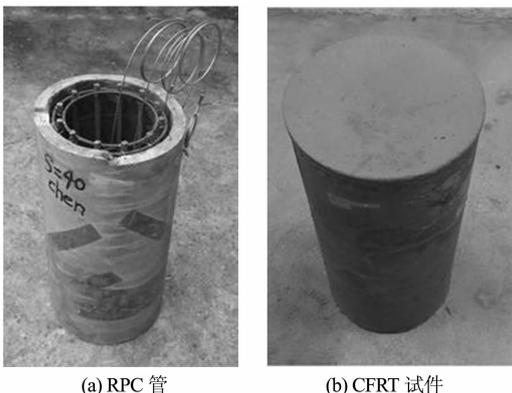


图2 试件加工

Fig.2 CFRT specimens

有数据均采用 DH3821 数据采集系统采集记录,采样间隔为 0.5 s.



图3 高温试验设备

Fig. 3 Test equipment of high temperature

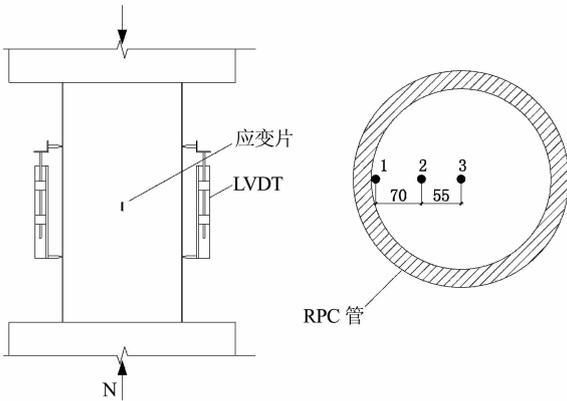


图4 测点布置图

Fig. 4 Arrangement of measuring points

1.4 加载制度

高温试验过程包括“升温”-“恒温”-“降温”3个阶段.升温速率设置为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,达到目标温度后立即转为恒温模式,恒温时间为 180 min,当恒温时间结束后立即打开炉盖,让试件在空气中冷却.

高温后的轴压试验,采用单调加载,正式加载前,对试件预加载以进行对中,如果 4 个轴向应变片的读数差值不超过 10%,认为试件处于理想的轴心受压状态,随即卸载并开始正式加载.加载制度为:在试验的开始阶段,采用力控制,加载速度为 $5\text{ kN}/\text{s}$;当达到预估峰值荷载的 90%时,改为位移控制,加载速度为 $0.5\text{ mm}/\text{min}$,直至试件破坏.

2 试验过程及试验现象

2.1 高温试验过程与现象

CFRT 试件的高温试验现象基本相同,以 C40-GZ-800 试件为例,在升温的初始阶段,从炉内开始逸出少量水蒸气;随着炉内温度的升高,水蒸气逸出

现象越来越剧烈;随后,水蒸气逸出逐渐减少,一般试件进入恒温阶段内 2 h 后,最终消失.在整个高温过程中,试件未发出爆裂的声音.对于温度超过 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试件,在冷却的前期,试件发出噼啪声音,试件表面出现 1~2 条环状裂缝.冷却以后观察试件表面,总体形态十分完整,RPC 管无可见的爆裂破坏现象.由此看来,本试验制备的 RPC 管具有良好的抗爆裂性能,这与 RPC 中掺入 PVA 纤维有密切关系.PVA 纤维的熔点约为 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[19],高温下溶化后形成大量泄压孔道,有利于 RPC 内部水蒸气的逸出,有效降低了管壁内的蒸汽压,从而避免了爆裂的发生.

高温试验后,试件表面颜色出现显著差异,如图 5 所示.试件经历 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温后,表面颜色与常温下接近,呈灰色;试件经历 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温后,表面颜色变深;经历 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的试件表面稍白;而经历 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,试件表面呈灰白.采用铁锤敲击试件中部,随着试验温度的升高,试件所发出的声音由坚实清脆逐渐变得浑浊空泛.

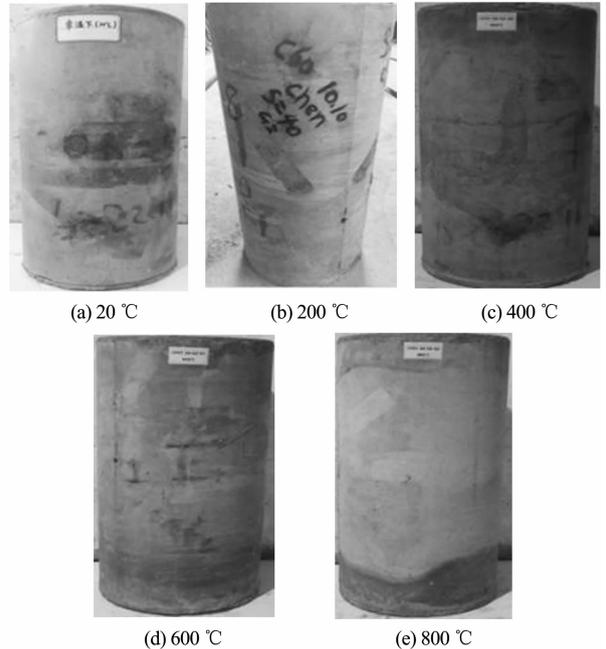


图5 C40-GZ 系列试件高温后试件表面形态

Fig. 5 Appearance of C40-GZ series after high temperature test

2.2 轴压试验过程与破坏形态

高温后的试件,破坏过程基本类似.加载初期都处于弹性状态,除已有的温度裂缝外,试件表面无受力裂缝产生;当荷载增加到极限荷载的 85%左右,试件中部出现一些细微的纵向和新的环向裂缝,并随着荷载持续增加而缓慢发展;当荷载超过峰值后,

试件表面裂缝发展速度加快并逐渐贯通,中部明显外鼓;最后,随着箍筋陆续断裂,承载力显著降低,试件到达破坏状态.整个过程中,RPC 管没有明显的剥离破坏,与常温下抗压破坏模式类似^[11].

高温后,试件的受压破坏形态有所差别.如图 6 所示,对于配筋相同的 C40-GZ 系列试件,随着试验

温度的升高,破坏时 RPC 管的破裂程度增大.相对于 C40-GZ-800, C20-GZ-800 试件破坏时, RPC 管的裂缝数量更多,且裂缝宽度较小,可见增加配箍量可以降低破坏程度. C40-35-800 的配箍率与 C20-GZ-800 相同,但前者 RPC 管中的配箍量较少,其 RPC 管的损伤程度相对更严重(如图 6(f)所示).

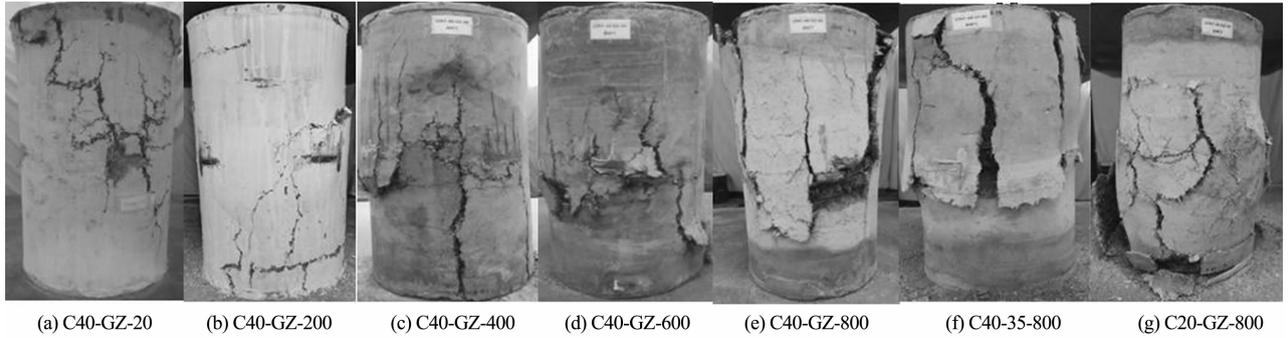


图 6 CFRT 试件高温后的轴压破坏模式
Fig. 6 Failure patterns of specimens after compression test

图 7 给出了 C40-GZ 系列试件高温下,炉膛及试件中部截面上各测点的实测升温曲线.从图 7 中

可以看到,炉膛的升温段基本为线性,恒温段的波动也很小,表明高温炉的控温效果好.各控制温度下,

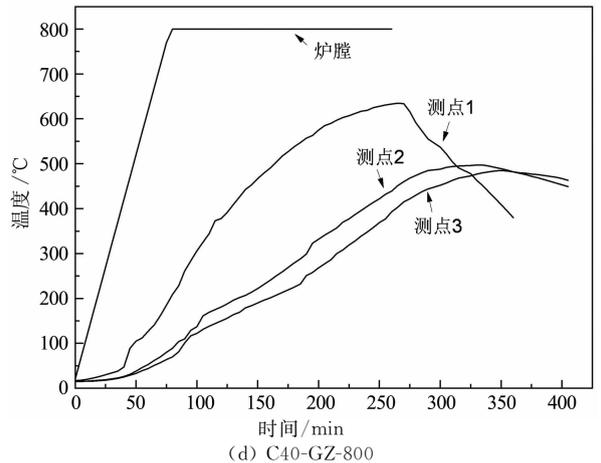
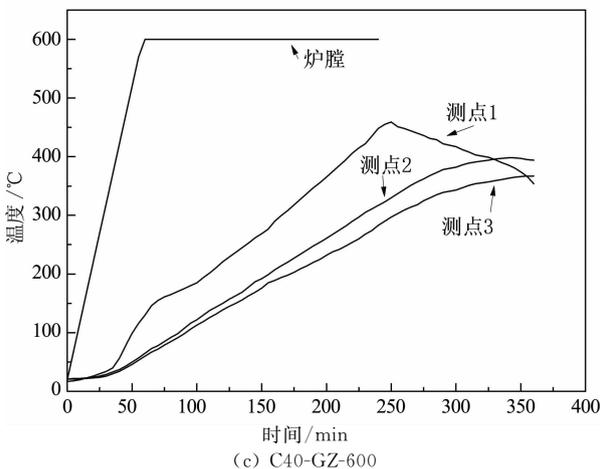
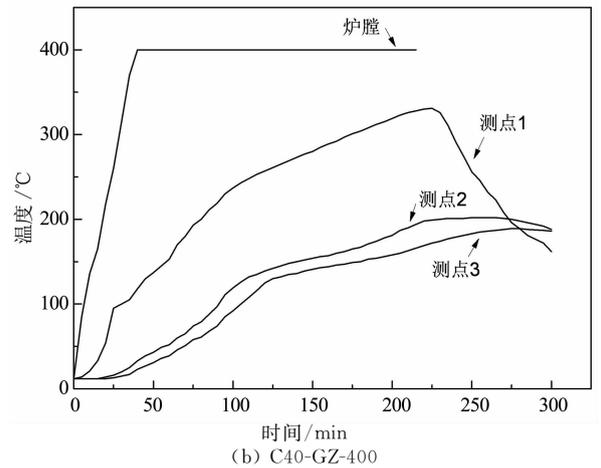
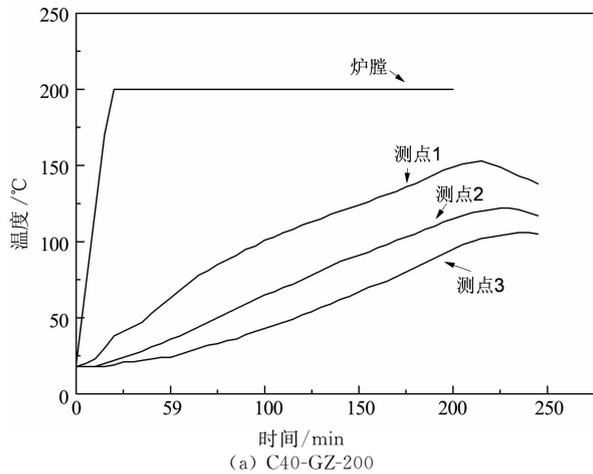


图 7 CFRT 试件温升曲线
Fig. 7 Temperature cures of CFRT

试件截面上存在显著的温度梯度,由表面到中心,温度逐渐下降,距试件表面距离越大,温度上升速率越小,变化也更为平缓;恒温 3 h 后,试件的中心温度约为炉膛控制温度的 50%~60%。

3 试验结果分析

3.1 温度分布

在试验柱的高温损伤分析中,需要考虑截面温度梯度的影响。根据过镇海等提出的截面不均匀温度场计算方法^[20],结合本试验的实测温度场,计算得到各控制温度下试件的截面等效温度,作为高温损伤分析的依据,结果如表 2 所示,可看到 RPC 管的等效温度显著高于内部混凝土柱的等效温度。

表 2 截面等效温度

Tab. 2 Equivalent temperature on cross-section °C		
炉膛温度	RPC 预制管	内部混凝土
200	140	113
400	296	232
600	479	374
800	684	545

3.2 荷载-轴向应变曲线

CFRT 试件的轴压试验结果如表 1 所示,图 8 也给出了各试件高温后的荷载-轴向应变曲线,其中,轴向应变由两个 LVDT 测试数据平均值除以其标距计算得到。

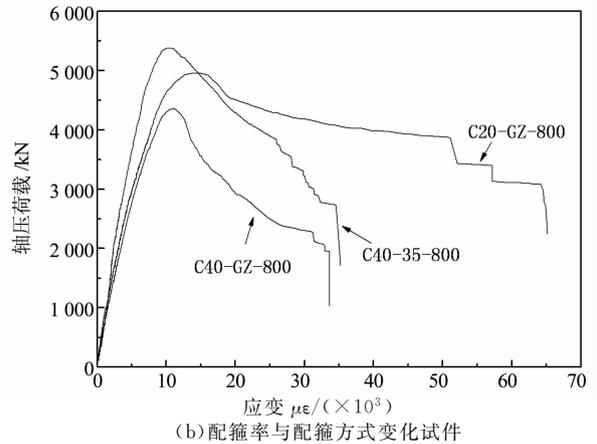
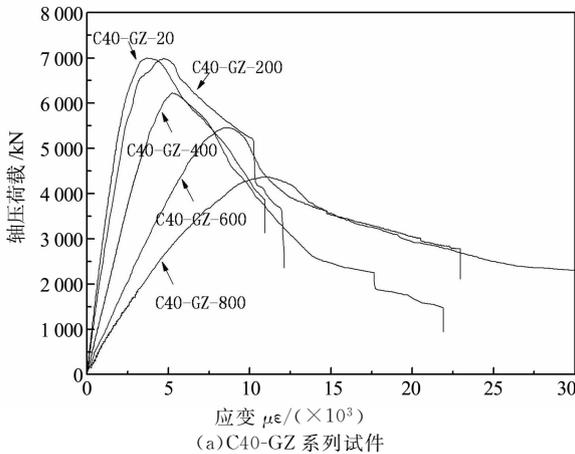


图 8 高温后的荷载-轴向应变曲线

Fig. 8 Load-axial strain curves of CFRT after high temperature

从图 8(a) 可以看到,在 C40-GZ 系列试件中,经历 200 °C 高温作用后,与常温试件的荷载-轴向应变曲线的上升段很接近,峰值荷载基本一致,下降段差别不大,表明 CFRT 经历 200 °C 作用后,抗压性能比较稳定。主要原因是截面的等效温度并不高,已有试验表明,在此温度范围内,混凝土的高温损伤比较小,而 RPC 实际上经历了一次高温养护,强度还有所提高^[21],因而,组合柱的抗压性能没有出现明显退化。而当控制温度超过 400 °C 后,CFRT 试件的荷载-轴向应变曲线出现明显变化。随着控制温度的升高,试件的峰值荷载不断降低,对应的应变不断增大,曲线的形状趋于扁平,组合柱的抗压性能退化明显。

C20-GZ-800 的配箍率是 C40-GZ-800 的 2 倍,从图 8(b) 可以看到,前者的荷载峰值显著提高,且下降段更为平缓,曲线更为饱满。这表明增加配箍率可以有效提高 CFRT 柱高温后的抗压性能。C40-35-800 为双层配箍试件,总的配箍率与 C20-GZ-800 相同,但两者高温后的荷载-轴向应变曲线有较为明显的差别:

前者荷载峰值相对较高,但下降段性能退化较为严重,变形能力降低。

3.3 承载力和刚度

表 1 给出了试件高温作用后的承载力 N_u 和轴压刚度 EA^T , 试件承载力取其峰值荷载,轴压刚度取荷载-轴向应变全曲线上 0.4 N_u 点的割线刚度^[21]。

C40-GZ 系列高温后力学性能变化情况如图 9 (a) 所示。CFRT 试件经历 200 °C 高温作用后,其承载力几乎不变。但这以后,承载力随试验温度的升高几乎成线性降低。经过 800 °C 高温作用后,CFRT 的残余轴向承载力约为常温下承载力的 62%。在试验范围内,CFRT 试件的轴压刚度随试验温度的升高显著降低,相对于承载力,刚度的降低幅度更大,经过 800 °C 高温后,CFRT 的轴压刚度下降幅度超过 80%。从图 9(a) 的整体变化趋势来看,CFRT 高温后的轴压性能随温度提高而显著降低,主要原因是 RPC、内部混凝土以及钢筋等组成材料,经历高温后的力学性能均会出现不同程度的降低,从而导致组

合柱抗压性能产生显著退化^[21-23]。即便如此,与已有试验数据相比较,CFRP高温后的残余性能仍然显著优于普通箍筋约束混凝土柱高温后的残余性能^[15]。因此,CFRT柱的抗火性能突出,在经历800℃高温作用后仍然拥有较高的残余承载力,但也应该注意到其轴向变形有显著增加,可能会导致相邻的构件产生较为显著的内力重分布。

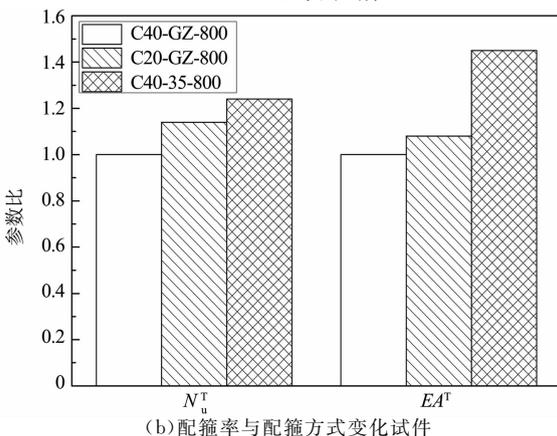
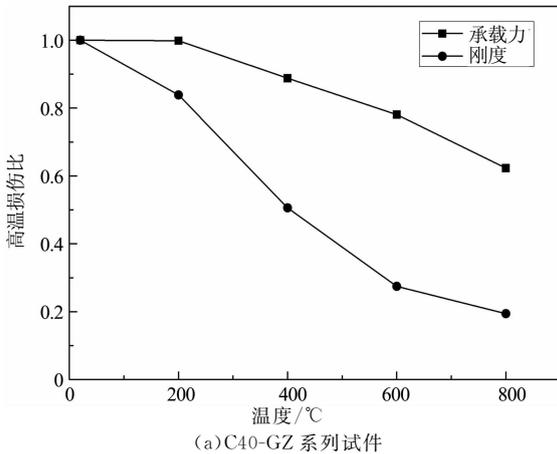


图9 高温对CFRT力学性能的影响

Fig.9 Effect of high temperature on mechanical properties

图9(b)给出了C40-GZ-800、C20-GZ-800和C40-35-800试件的高温后力学性能对比,图中,数据为各试件结果与C20-GZ-800结果的比。G20-GZ-800与G40-GZ-800相比较,高温后的承载力超出13.8%,刚度也有所提高,其主要原因是:一方面,提高配箍率有利于限制核心混凝土在高温下的侧向膨胀和裂缝的开展,从而降低了CFRT试件的高温损伤程度^[15];另一方面,在高温后的轴压受力过程中,更高的配箍率为内部混凝土提供了更强的侧向约束,从而提高了CFRT高温后的抗压性能。文献^[24]进行了相同配箍率下CFRT的常温抗压试验,相应试件的承载力提高幅度约为28.3%,由此可见,高温对箍筋的约束效应有显著的降低作用。

C40-35-800的承载力与刚度较之C20-GZ-800分别提高了8.5%和33.6%。这一结果表明,在总配

箍率相同的情况下,双层配箍方式可以有效改善CFRT试件高温后的抗压性能。其原因应该是将一部分约束箍筋设置在内部混凝土中,温升会有所降低,减轻了这部分材料本身的高温损伤以及箍筋与混凝土的粘结损伤,因而对高温后的抗压性能有利。但从前述破坏形态和延性来看,双层配箍方式降低了试件的变形能力。这表明配箍方式对CFRT高温后的抗压性能有显著而复杂的影响。在配箍率不变的情况下,内部混凝土中配置适量的螺旋箍筋可以改善CFRT高温后的抗压性能。

4 残余承载力分析

钢筋混凝土柱在高温后残余承载力对结构安全具有重要影响,一般采用残余承载力比衡量,即结构柱经历高温后的承载力与常温下承载力之比^[25]。为研究CFRT这一新型组合柱高温后的承载力退化情况,作者采用近年来国内外对钢筋混凝土短柱高温后的轴压试验结果与之对比^[26-29],试件参数及残余承载力比如表3所示。

高温后残余承载力比与控制温度的相关曲线如图10所示。大量试验表明,钢筋混凝土柱高温后的承载力随控制温度的升高而逐步降低,并与受火时间、升温制度、截面尺寸、截面形式、净保护层厚度等因素相关^[25]。从图10可以看到,CFRT符合这一规律。同时,可以看到文献^[26]的试验结果在超过400℃后,与此规律不相符,具体原因其作者没有特别说明。除此以外,与普通钢筋混凝土短柱的轴压结果相比较,尽管CFRT试件的混凝土净保护层厚度最小,但控制温度超过400℃后,其残余承载力比相对更高。一个重要原因是掺入的PVA纤维和钢纤维

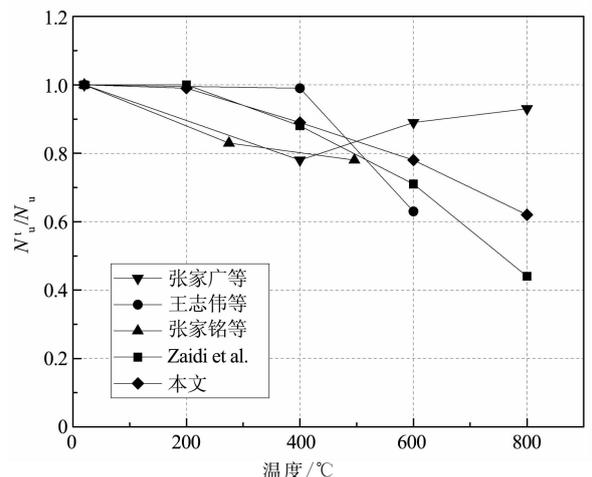


图10 高温后钢筋混凝土柱与CFRT轴压力学性能对比
Fig.10 Comparison of mechanical properties of RC columns and CFRT after high temperature

有效防止了RPC高温下的爆裂,保护层在整个受火过程中保持完整,为内部钢筋提供了良好的保护作用。

从这个角度来看,CFRT柱具有比普通钢筋混凝土柱更好的抗火性能。

表3 高温后钢筋混凝土柱与CFRT轴压力学性能对比
Tab.3 Comparison of mechanical properties of RC columns and CFRT after high temperature

试件编号	研究者	截面尺寸 (mm×mm)	净保护层 厚度/mm	ρ_{cc} /%	ρ_s /%	f_{co} /MPa	控制温度 /°C	高温时间 /min	N_u^0/N_u
SF140	张家广等	150×300	20	1.40	0.73	34.4	400	120	0.78
SF160	张家广等	150×300	20	1.40	0.73	34.4	600	120	0.89
SF280	张家广等	150×300	20	1.40	0.73	34.4	800	120	0.93
R40LL	王志伟等	150×300	15	1.40	0.75	41.0	400	180	0.99
R60LL	王志伟等	150×300	15	1.40	0.75	41.0	600	180	0.63
CR2	张家铭等	300×900	20	1.13	0.70	56.0	275	100	0.83
CA2	张家铭等	300×900	20	1.13	0.70	56.0	496	100	0.78
CB2H	Zaidi et al	150×450	12.5	1.70	2.26	71.3	200	200	1.00
CB4H	Zaidi et al	150×450	12.5	1.70	2.26	71.3	400	200	0.88
CB6H	Zaidi et al	150×450	12.5	1.70	2.26	71.3	600	200	0.71
CB8H	Zaidi et al	150×450	12.5	1.70	2.26	71.3	800	200	0.44
C40-GZ-200	本文	300×600	9	1.92	1.03	69.2	200	180	0.99
C40-GZ-400	本文	300×600	9	1.92	1.03	69.2	400	180	0.89
C40-GZ-600	本文	300×600	9	1.92	1.03	69.2	600	180	0.78
C40-GZ-800	本文	300×600	9	1.92	1.03	69.2	800	180	0.62

注:截面尺寸方形为直径×高(边长×高); N_u 表示常温下承载力; ρ_{cc} 为纵筋配筋率。

5 结论

本文对大尺寸CFRT试件进行高温试验和高温后的轴压试验,并对其高温后的力学性能进行初步探讨,得到如下结论:

1)CFRT试件高温作用下未发生爆裂,高温后RPC管外观完整,CFRT组合柱具有优异的抗爆裂性能。

2)CFRT试件高温后的轴压承载力和刚度随试验温度的提高而降低,且刚度的降低幅度更为显著。经历800℃高温作用后,CFRT试件的轴压承载力约为常温下的62%,残余承载力相对较高,抗火性能良好。

3)高温作用后,CFRT试件的抗压性能随配箍率的增大而提高,提高配箍率有利于提高CFRT柱的抗火性能。在总配箍率相同的情况下,采用双层配箍方式,可以改善CFRT柱高温后的抗压性能。

4)与普通箍筋混凝土柱相比较,CFRT柱高温后的残余承载力比更高,抗火性能更为优异。

参考文献

[1] 徐培福,王翠坤,肖从真.中国高层建筑结构发展与展望[J].建筑结构,2009,39(9):28-32.

XU P F, WANG C K, XIAO C Z. Development and prospect of

high-rise building structures in China[J]. Building Structure, 2009,39(9):28-32. (In Chinese)

[2] 钟善桐.钢管混凝土结构[M].北京:清华大学出版社,2003:1-33,420-464.

ZHONG S T. Concrete-filled steel tubular structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2003:1-33,420-464. (In Chinese)

[3] 冯鹏.复合材料在土木工程中的发展与应用[J].玻璃钢/复合材料,2014(9):99-103.

FENG P. Development and application of composite materials in civil engineering[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(9):99-103. (In Chinese)

[4] HUO J, HUANG G, XIAO Y. Effects of sustained axial load and cooling phase on post-fire behavior of concrete-filled steel tubular stub columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009,65(8):1664-1676.

[5] HAN L H, HOU C C, WANG Q L. Behavior of circular CFST stub columns under sustained load and chloride corrosion[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014,103:23-36.

[6] HAWILEH R A, ABU-OBEIDAH A, ABDALLA J A, et al. Temperature effect on the mechanical properties of carbon, glass and carbon-glass FRP laminates[J]. Construction & Building Materials, 2015,75:342-348.

[7] FIRMO J P, CORREIA J R, BISBY L A. Fire behaviour of FRP-strengthened reinforced concrete structural elements: A state-of-the-art review[J]. Composites Part B Engineering, 2015,80:198-216.

[8] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Observed stress-strain behavior of confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988,114(8):1827-1849.

[9] SAATCIOGLU M, RAZVI S R. Strength and ductility of con-

- fined concrete[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(6): 1590—1607.
- [10] 王建平, 刘锦红, 侯晓峰. 关于远洋岛礁工程腐蚀防护问题的思考[C]//2015年全国海洋工程腐蚀与防护技术研讨会论文集. 海口: 中国腐蚀与防护学会, 2015: 1—5.
WANG J P, LIU J H, HOU X F. Thoughts on corrosion protection of offshore islands and reefs[C]//Proceedings of the National Symposium on Corrosion and Protection of Marine Engineering in 2015. Haikou: Chinese Cankerous and Protection Society, 2015: 1—5. (In Chinese)
- [11] 单波, 刘志, 肖岩, 等. RPC预制管混凝土组合柱组合效应试验研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(3): 88—96.
SHAN B, LIU Z, XIAO Y, *et al.* Experimental research on composite action of concrete-filled rpc tube under axial load [J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2017, 44(3): 88—96. (In Chinese)
- [12] 郑文忠, 罗百福, 王英. 高温下复掺纤维RPC立方体抗压性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(11): 13—19.
ZHENG W Z, LUO B F, WANG Y. Compressive properties of cubes reactive powder concrete with hybrid fibers at elevated temperatures[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2012, 39(11): 13—19. (In Chinese)
- [13] KIM Y S, LEE T G, KIM G Y. An experimental study on the residual mechanical properties of fiber reinforced concrete with high temperature and load[J]. *Materials and Structures*, 2013, 46(4): 607—620.
- [14] MEHMET C. The effect of high temperature on reactive powder concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 70(70): 508—513.
- [15] 吴波, 宿晓萍, 李惠, 等. 高温后约束高强混凝土力学性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2002, 35(2): 26—32.
WU B, SU X P, LI H, *et al.* Experimental study on mechanical properties of confined high-strength concrete after high temperature[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2002, 35(2): 26—32. (In Chinese)
- [16] JAU W C, HUANG K L. A study of reinforced concrete corner columns after fire[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2008, 30(7): 622—638.
- [17] 陈宗平, 叶培欢, 徐金俊, 等. 高温后钢筋再生混凝土轴压短柱受力性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(6): 118—127.
CHEN Z P, YE P H, XU J J, *et al.* Mechanical behavior of reinforced recycled aggregate concrete short columns under axial compression after high temperature [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(6): 118—127. (In Chinese)
- [18] 罗校炳. RPC预制管混凝土组合短柱轴压性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2017: 61—66.
LUO X B. Experimental research on concrete-filled RPC tube under axial compressive[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2017: 61—66. (In Chinese)
- [19] 赖建中, 徐升, 杨春梅, 等. 聚乙烯醇纤维对超高性能混凝土高温性能的影响[J]. *南京理工大学学报*, 2013, 37(4): 633—639.
LAI J Z, XU S, YANG C M, *et al.* Influence of polyvinyl alcohol fibers on the properties of ultra high performance concrete at high temperature[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2013, 37(4): 633—639. (In Chinese)
- [20] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土高温性能及其计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 33—36.
GUO Z H, SHI X D. Behaviour of reinforced concrete at elevated temperature and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 33—36. (In Chinese)
- [21] ZHENG W Z, LUO B, WANG Y. Compressive and tensile properties of reactive powder concrete with steel fibers at elevated temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 41(2): 844—851.
- [22] Euro code No 2, Design of concrete structures[S]. Brussels (Belgium): Commission of the European Communities, 1990: 965—973.
- [23] 吴红翠, 王全凤, 徐玉野, 等. HRB500级高强钢筋高温后的力学性能试验[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(4): 432—435.
WU H C, WANG Q F, XU Y Y, *et al.* Experimental research on mechanics performance of hrb500 grade steel bars after high temperature[J]. *Journal of Huaqiao University(Natural Sciences)*, 2009, 30(4): 432—435. (In Chinese)
- [24] 刘志. RPC预制管混凝土组合柱抗震性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2016: 25—43.
LIU Z. Experimental research on seismic behavior of concrete-filled RPC tube[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2016: 25—43. (In Chinese)
- [25] 张幸, 肖岩, KUNNATH S K. 钢筋混凝土柱抗火性能的研究现状与展望[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(3): 120—131.
ZHANG X, XIAO Y, KUNNATH S K. State of the art and prospect of research on fire resistance behavior of reinforced concrete columns[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(3): 120—131. (In Chinese)
- [26] 张家广, 霍静思, 肖岩. 高温作用后钢筋混凝土短柱轴压力学性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2011, 32(4): 117—124.
ZHANG J G, HUO J S, XIAO Y. Experimental study on axial mechanical behavior of reinforced concrete stub columns with pre-load after exposure to high temperatures[J]. *Journal of Building Structures*, 2011, 32(4): 117—124. (In Chinese)
- [27] 王志伟, 霍静思, 郭玉荣. 降温方式对高温后钢筋混凝土短柱轴压力学性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(3): 402—409.
WANG Z W, HUO J S, GUO Y R. Effect of cooling method on mechanical behaviors of RC stub columns with sustained pre-load after exposure to high temperature[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(3): 402—409. (In Chinese)
- [28] 张家铭, 陈俊, 霍静思, 等. 火灾升降温模式对高温后钢筋混凝土轴压力学性能影响的试验研究[J]. *实验力学*, 2017, 32(1): 70—78.
ZHANG J M, CHEN J, HUO J S, *et al.* Experimental study of the effect of fire mode on axial compression mechanical properties of rc after exposure to entire fire process[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2017, 32(1): 70—78. (In Chinese)
- [29] ZAIDI K A, SHARMA U K, BHANDARI N M. Effect of temperature on uni-axial compressive behavior of confined concrete [J]. *Fire Safety Journal*, 2012, 48: 58—68.