

文章编号:1004-4574(2012)03-0230-06

一种采用可控复合技术的新型升温炉

任晓虎¹, 霍静思¹, 曾翔¹, 肖岩^{1,2}

(1. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 南加州大学 加利福尼亚 洛杉矶 CA90089)

摘要:在普通电加热炉的基础上,通过配备液化燃烧器加热装置,开发了一种可同时实施自动控制电加热和燃气加热复合升温的新型装配式试验炉。试验测试表明,该新型复合式升温方法能够很好地模拟 ISO-834 标准升(降)温曲线,同时具有电炉安全可靠、测控精度高、操作简便、无污染,以及液化气火焰升温快、容易控制并可真实模拟火灾的优点,因而具有良好的试验效果和经济效果,是一种实用的结构抗火试验设施。

关键词:抗火试验;电炉;液化燃烧器;复合升温

中图分类号:TM924.7

文献标志码:A

A new type of heating furnace adopting controllable hybrid technique

REN Xiaohu¹, HUO Jingsi¹, ZENG Xiang¹, XIAO Yan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency, MOE, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. University of Southern California, CA90089, USA)

Abstract: Based on a common electrical furnace, and equipped with liquefied gas burners, a new built-up fire furnace that can either heat through automatically electric control or through bowing liquefied gas fire into the furnace is developed. Fire test results indicate that the hybrid heating furnace can heat the test specimens closely following the ISO-834 standard fire curve, and it is of excellent convenience and cost-effectiveness because it combines the merits of electrical heating, such as safe, reliable, highly precise, convenient to control, operational and pollution-proof, with the merits of liquefied gas fire heating, such as heating rapidly, simple to control, and can simulate fire reality. It is proved to be practical fire-resistant heating equipment.

Key words: fire resistance test; electric furnace; liquefied gas burner; hybrid heating method

随着建筑火灾的日益增多,建筑结构与构件的耐火性能及火灾后性能的研究成为土木工程学科研究的热点之一。以往国内外研究者主要采用燃烧炉进行建筑结构构件耐火性能试验研究,如美国、英国、日本、比利时等国家以及我国的一些的单位,如公安部天津消防研究所、公安部四川消防研究所^[1]、中国建筑科学研究院^[2]和 华南理工大学^[3]都相继建有可进行耐火性能研究的燃烧炉。采用此类燃烧炉可以按照国际标准^[4]和《建筑构件火灾试验方法》^[5]相关规定进行标准火灾试验。随着结构耐火性能研究的深入,国内外的研究逐渐由柱、梁和板等构件耐火性能试验研究转向节点、子结构等耐火性能试验研究,标准火灾试验炉已经无法满足火灾研究的需要,国内外研究者越来越多地根据研究的对象和目的自行设计升温试验装置。

李晓东等^[6]研制了燃油火灾试验炉,该试验炉炉体结构的形状和尺寸根据试验试件类型和尺寸灵活确定。袁爱民和董毓利^[7]、陈礼刚等^[8]采用此试验炉进行了钢筋混凝土板火灾行为和无粘结预应力钢筋混凝土板火灾行为。Wang 等^[9]采用此试验炉进行了钢结构框架节点高温试验研究。

Wang 和 Davies^[10]为进行钢柱子结构无侧移加载和转动约束下的火灾试验专门设计了燃气升温炉,该

收稿日期:2010-11-08; 修回日期:2011-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(50778069,51078139);长江学者和创新团队发展计划教育部创新团队资助(IRT0619)

作者简介:任晓虎(1986-),男,工程师,硕士,主要从事工程结构抗火和抗冲击研究。E-mail:zjprhx@163.com

通讯作者:霍静思,副教授。E-mail:jingsihuo@gmail.com

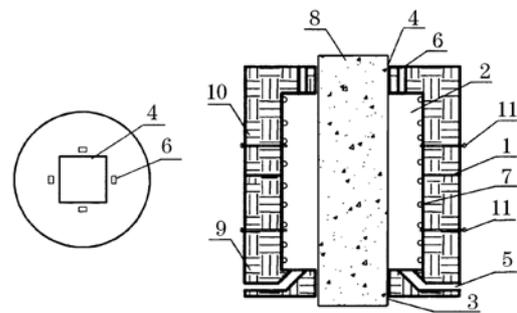
升温炉中的四块加热板上开孔以方便结构构件的安装和试验。Al - Jabri 等^[11]为进行节点高温试验专门设计了采用陶瓷纤维材料作为炉体的燃气加热升温炉。Bailey 和 Toh^[12]为进行双向筒支混凝土板高温性能试验设计了一顶部开口的砖砌电炉。Tan 等^[13]设计了可实现不同长度的构件进行不同升温制度下的三面或四面升温试验,设计了一种灵活、多变的 L 形电加热炉,该电加热炉由四段加热单元组成。Spyrou and Davison^[14]为了能够测量节点在高温下的变形开发了一种的高温试验炉,该高温炉上配备了图像接收和处理系统以测量节点高温下的变形。

从以往国内外研究者所采用的高温试验装置设计思路可见,基本都采用了组合装配式的灵活、多变的炉体结构,以满足进行不同类型结构构件高温试验研究的需要。从升温方式上看,较多的研究者采用了电炉加热方式,因为电炉升温具有安全可靠、测控精度高、操作简便、升温控制稳定和无污染等特点,且投资少;但是电炉升温速度相对较慢,升温速度与实际火灾升温速度相差很大。采用燃气、燃油耐火炉虽然具有升温速度快的特点,且可更加真实地模拟火灾,但该类设备复杂、控制难度大、能耗大和污染很大,且需要很大的投资。鉴于目前两类升温方法的优缺点与以往国内外研究者高温试验炉设计方面的经验和本课题组将要进行火灾(高温)试验的对象,开发了一种新型同时采用自动控制电加热和液化燃烧器加热的复合升温方法的高温试验炉。

1 炉体结构、电升温控制方法和升温性能

炉型和炉体尺寸的选择是结合已有的试验条件、技术条件、场地条件等确定的。为实现炉体的方便装配,将炉体设计成半圆筒形对开式的装配式结构,沿高度方向分成2节,每节的高度为630 mm,炉体外直径为900 mm,炉膛直径为590 mm。图1为高温试验炉结构示意图,图中构造5(喷火口)为复合升温时用于喷火而设计的燃气喷口。炉壁由金属壳体、保温材料、炉衬等组成。试验炉保温材料和炉衬分别采用耐火纤维和轻质砖。

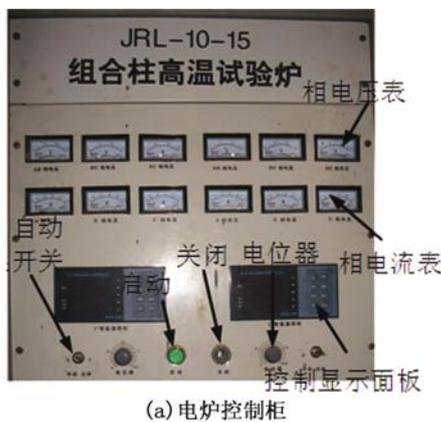
炉加热区由上、下两段共4肢电热丝组成,各配有独立的控温系统,每套控温系统主要由智能控温仪表、电压调整触发板、可控硅等组成,采用两段升温控制加热区可使炉内环境温度最大限度实现均温的目的。高温炉的电加热升温速度最大可达100℃/min,最高试验温度可达1200℃。电炉控温系统所采用的2100系列智能控制器是采用新型微电脑处理器为核心的全自动、多功能测控仪表,被广泛应用于冶金、化工等行业的自动化领域。图2为2100系列智能控制器的操作



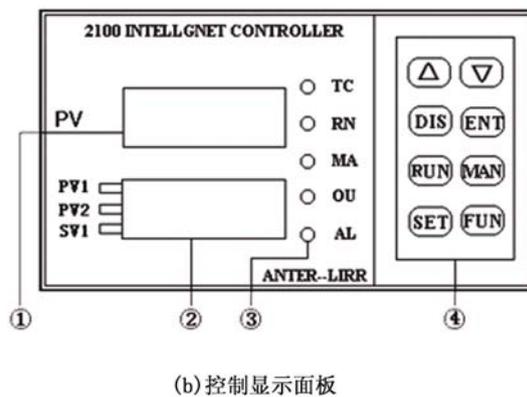
1—炉壁;2—炉膛;3—下炉口;4—上炉口;
5—燃气喷口;6—排烟孔;7—电热丝;8—构件;
9—第1段炉体;10—第2段炉体;11—热电偶

图1 高温炉结构示意图

Fig.1 Schematic structure of heating furnace



(a) 电炉控制柜



(b) 控制显示面板

(①用于显示被控温度(PV);②用于显示输出百分比,监控温度或剩余时间(PV1)、负载电流值(PV2)、程序设定值(SV1);③状态指示灯;④键盘区)

图2 2100系列智能控制器

Fig.2 Intelligent controller of Series 2100

箱。电炉的升温控制是一个闭环反馈的过程,实时比较实际炉温和设定炉温之间的偏差,通过对偏差的处理获得控制信号,从而调节电炉的输出功率,从而实现按设定升(降)温制度对炉温的控制。

为了了解电加热最大升温能力,以电炉的最大功率进行升温。图 3 为测试的升温曲线与标准升温曲线。从图 3 中可以看出:电炉采用最大加热功率进行升温时,升温的初始阶段,炉膛温度与 ISO - 834 标准升温曲线相比差距很大,当升温持续一段时间后炉膛温度可超过标准温度,此时炉膛的升温速度明显快于标准升温的速度。因此,在升温开始时若采用复合升温提高升温速度,当温度达到标准温度后,使用电炉程序自动控制的电加热升温方式能够使炉膛升温曲线接近标准升温曲线的要求。

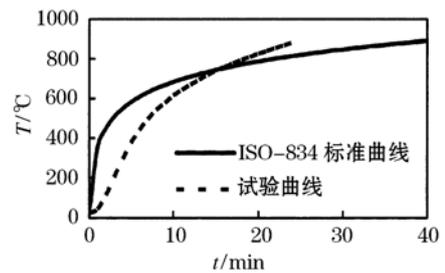


图 3 最大电升温能力与标准升温曲线的比较
Fig. 3 Comparison between maximum electrical heating capacity and standard heating curve

2 液化燃烧器结构、燃气升温控制方法和升降温性能

液化燃烧器由温控箱、比例阀、喷枪、液化气管组成,液化气燃烧器结构如图 4 所示。液化燃烧器配有 4 个空气出口和 4 个液化气出口,即有 4 个燃烧喷嘴,可以根据试验要求选择所需要的喷嘴数量。

液化燃烧器温控系统采用 900 系列微电脑程序/温度控制器,该温度控制器是采用专门微处理器的多功能调节仪表,它采用开关电源和表面贴装技术 (STM),仪表精致小巧、性能可靠、特有自诊断功能、自整定功能和模糊控制功能。图 5 为 900 系列微电脑程序/温度控制器,试验时热电偶所测得温度、某时刻炉膛所应达到设定温度、鼓风机风量是否达到最大均在图 5 所示的控制器面板加以显示。液化燃烧器通过比例阀控制混合气体中空气比例的大小来达到调节升温炉内的温度高低的目的,当升温炉内的温度比试验设定的温度低时,比例阀就会增大混合气体中空气的比例使得温度升高,当升温炉内温度比试验设定的温度高时,比例阀就会减小混合气中空气的比例使得温度降低。

为了获得液化燃烧器的升温性能和最大升温能力,液化燃烧器采用最大的输出功率进行升温试验测试,来考察液化燃烧器最大升温能力与标准升温的差距。由于电炉构造的原因,测试液化燃烧器的升温试验只采用两个燃烧喷嘴。图 6 为测试的升温曲线与标准升温曲线比较图,从图 6 可以看出,升温初始阶段试验曲线跟 ISO - 834 标准温度相差比较大,但是升温比较均匀。随着时间的增长,升温到某一时刻时炉膛温度能达到 ISO - 834 标准温度。液化燃烧器升温的初始阶段明显快于电炉极限升温的初始阶段,这就为获得 ISO - 834 标准升温曲线提供了一个途径,即在升温初始阶段采用液化燃烧器和电复合升温的方式来逼近 ISO - 834 标准升温曲线。



图 4 液化燃烧器的整体示意图
Fig. 4 Overall sketch of liquefied burner

3 复合升温控制技术原理及升、降温控制效果

3.1 复合升温控制技术原理

从图 3、图 6 可以看出,电炉和液化燃烧器初始阶段升温能力有限,采用电炉加热时同时向炉膛喷火,即在升温的初始阶段采用复合升温方法进行升温,以达到提高升温速度的目的。可控复合升温方法可分别采用以电升温为主和以燃气升温为主的升温方法。以电升温为主的方法为:在升温初始阶段先采用复合升温方法进行升温,升温过程中采用自动化程序对高温炉内温度进行实时监控,并同时与 ISO - 834 国际标准升温曲线(或所设定的其它升温曲线)进行比较,当在复合升温时升温温度到达标准升温温度(或所设定的

其它升温曲线),且电加热的升温速度能够满足标准升温要求(或所设定的其它升温曲线)的升温速度时,液化燃烧器可以自动切断燃气,停止向炉内喷火,单独采用电炉进行升温自动控制。对于以燃气升温为主的升温方法为:当在复合升温时升温温度到达标准升温温度(或所设定的其它升温曲线),且液化燃烧器加热的升温速度能够满足标准升温要求(或所设定的其它升温曲线)的升温速度时,可以切断电炉电源,单独采用液化燃烧器进行升温自动控制。



图5 液化燃烧器温度控制器控制面板

Fig.5 Panel of temperature controller of liquefied burner

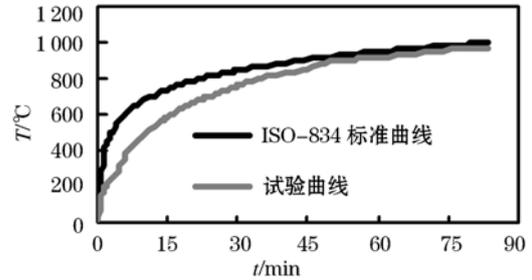


图6 液化燃烧器最大升温能力与标准升温曲线比较

Fig.6 Comparison between maximum heating capacity of liquefied burner and standard heating curve

3.2 复合升、降温控制效果

图7给出了使用本新型升温炉分别采用复合升温与单独采用电炉升温 and 液化燃烧器升温方法得到的炉内温度-时间关系曲线与ISO-834国际标准升温曲线的比较情况。可见,只采用电炉升温或者燃气升温得到的升温曲线明显和国际标准升温曲线相差较大,而采用复合升温方法获得的试验升温曲线和国际标准非常接近。图8给出的是以ISO-834国际标准升(降)温曲线为参考试验曲线情况下升温后再降温得到的炉膛升(降)温曲线。同时通过试验知道电炉和液化燃烧器同时采用最大输出功率对本新型升温炉加热3min左右,上下半截炉膛的温度已经超过ISO-834标准升温曲线的温度。

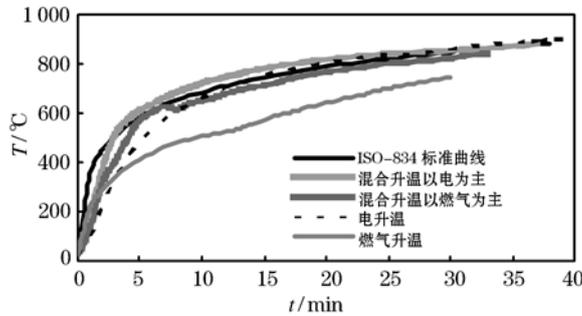


图7 复合升温、电升温、燃气升温与ISO-834标准升温曲线比较

Fig.7 Comparison between hybrid/electrical/gas heating and ISO-834 standard heating curve

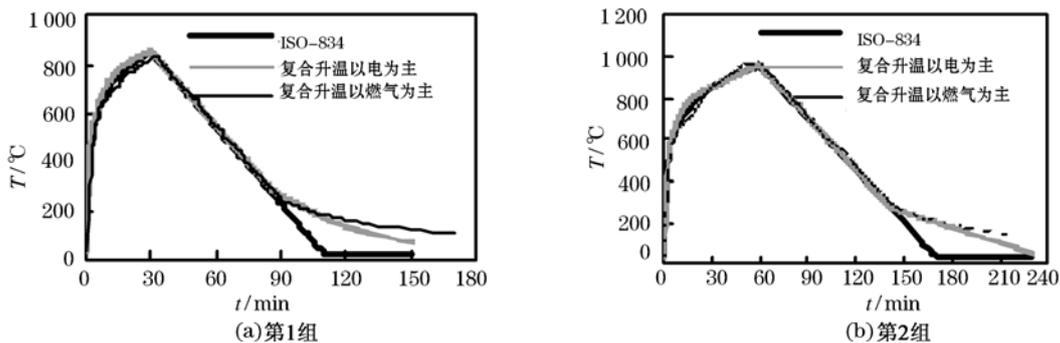


图8 复合升温与ISO-834标准升(降)温曲线比较

Fig.8 Comparison between hybrid heating and ISO-834 standard heating curve

参考《建筑构件耐火试验方法》(GBT9978 - 1999)^[5]对复合升温高温试验炉的性能评定,采用升(降)温曲线的上升段偏差值 $d(d = (A - A_s)/A_s \times 100\%$,其中 A 为实际平均炉温曲线下的面积, A_s 为标准温度曲线下的面积)以及试验开始 10 min 钟以后炉温与标准温度曲线的温差 ΔT 不能超过 100℃ 的指标。表 1 给出了图 8 中 2 组复合升温试验结果的偏差值 d ,从表 1 计算结果可以看出,随着升温时间的增长,偏差值 d 平均值逐渐变小。复合升温以电为主比以燃气为主偏差值更小些,FD 和 FG(FD 表示复合升温以电为主,FG 表示复合升温以燃气为主)的温差值都满足规范的要求,可以预测随着时间的增长,温度曲线会更加逼近 ISO - 834 标准温度曲线。从图 8 可以看出在试验开始 10 min 后的任何时间里,FD 和 FG 的 ΔT 不超过 $\pm 100^\circ\text{C}$,满足规范要求。

表 1 升温 $t(\text{min})$ 时对应的偏差值 d 计算
Table 1 Deviation d corresponding to heating time t

试验组	升温时间 $t(\text{min})$		
	10	25	35
FD1 和 FG1	5.2(11)	0.1(6.2)	0.06(4.7)
FD2 和 FG2	0.3(8.7)	1.18(6.2)	0.73(4.2)
平均值	2.75(9.85)	0.64(6.2)	0.395(4.7)

文献[15]采用该试验炉进行了一系列的结构柱火灾全过程试验研究,图 9 给出了不同升温时间下部分构件试验升降温曲线,图中的 t 表示升温时间,从图中可以看出,测试的炉膛升降温曲线与标准曲线吻合很好,能够满足试验的要求。

因此,采用本实用新型复合升温方法可以在同时具有电炉加热和燃气加热优点的情况下,避免二者的缺点,大大提高升温速度,使升温控制接近国际标准升温曲线,也更加接近真实火灾。复合升温的方法一定程度上解决了试验电炉升温慢,炉内温度在开始升温后很长时间内温度不均匀和燃气燃油炉造价高的矛盾,且本文电炉采用最大功率升温 1 h 只需要 50 度电左右,液化燃烧器使用两个喷嘴并采用最大输出功率升温时,每小时需要液化气 2.5 kg。同时炉体结构为分段装配式结构试验时方便、灵活安装使用,在较低的设备投资情况下,可以取得比较满意的试验效果和经济效果。

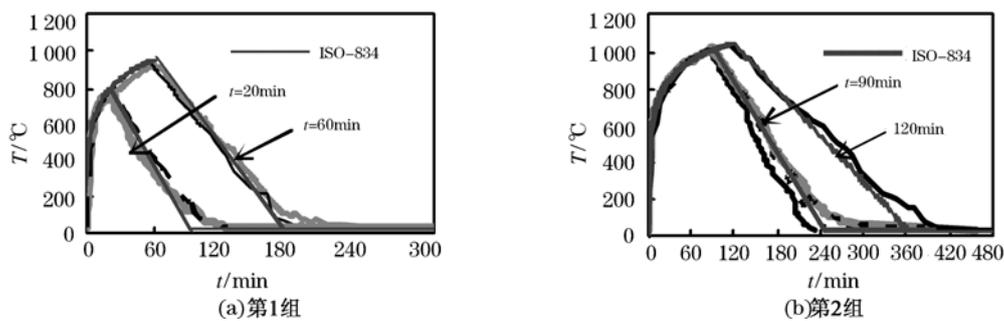


图 9 实测的炉膛温度 - 时间曲线与 ISO - 834(1975) 标准曲线比较

Fig. 9 Comparison between measured temperature-time curve of furnace tank and ISO-834(1975) standard curve

4 结论

本新型可控复合升温高温试验炉,同时具有电炉安全可靠、测控精度高、操作简便和无污染等优点及液化气火焰加热快、容易控制的优点。经过一系列高温试验表明,该高温炉采用本新型复合升温方法能够很好的模拟 ISO - 834 标准升(降)温曲线,达到了我国的《建筑构件耐火试验方法》(GB/T9978 - 1999)标准要求,适合于进行高温试验研究,达到了研制目的,是一种实用的结构抗火试验方法。

参考文献:

[1] 董毓利. 混凝土结构的火安全设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
DONG Yuli. The Fire Safty Design of Concrete Structures [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

- [2] 王广军,边庆策,史毅,等. 建筑构件耐火性能试验炉的研制与应用[J]. 建筑科学, 1996(2): 29-35.
WANG Guangjun, BIAN Qingce, SHI Yi, et al. The research and application of fire test furnace for building elements[J]. Building Science, 1996(2): 29-35. (in Chinese)
- [3] 王帆,吴波,张正先,林洁梅. 建筑构件耐火试验炉的研制和应用[J]. 试验技术与管理, 2007, 24(3): 55-58.
WANG Fan, WU Bo, ZHANG Zhengxian. Research and application of fire test furnace for building elements[J]. Experimental Technology and Management, 2007, 24(3): 55-58. (in Chinese)
- [4] ISO-834. Fire resistance tests - elements of building construction[S]. Geneva International Organization for Standardization, 1975.
- [5] GB/T9978-1999 建筑构件耐火试验方法[S]. 北京: 国家技术监督局, 1999.
GB/T9978-1999 Fire-resistance Tests - elements of Building Construction[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, 1999. (in Chinese)
- [6] 李晓东,董毓利,刘杰. 燃油火灾试验炉的研制[J]. 青岛建筑工程学院学报, 2004, 25(2): 12-14.
LI Xiaodong, DONG Yuli, LIU Jie. Development of oil furnace for fire experiment[J]. Journal of Qingdao Institute of Architecture and Engineering. 2004, 25(2): 12-14. (in Chinese)
- [7] 袁爱民,董毓利. 无粘结预应力混凝土三跨连续板火灾试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(6): 60-66.
YUAN Aimin, DONG Yuli. Experimental investigation of unbonded prestressed concrete continuous slab subjected to fire[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(6): 60-66. (in Chinese)
- [8] 陈礼刚,李晓东,董毓利. 钢筋混凝土三跨连续板边跨受火性能试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(1): 66-68.
CHEN Ligang, LI Xiaodong, DONG Yuli. Test study on performance of the reinforced concrete three-span continuous slabs under fire - fire in side span[J]. Industrial Construction, 2004, 34(1): 66-68 (in Chinese)
- [9] WANG Weiyong, LI Guoqiang, DONG Yuli. Experimental study and spring-component modeling of extended end-plate joints in fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(8): 1127-1137.
- [10] WANG Y C, Davies J M. Fire tests of non-sway loaded and rotationally restrained steel column assemblies[J]. Journal of Constructional Steel Research [J], 2003, 59(3): 359-383.
- [11] Al-Jabri K S, Burgess I W, Lennon T, et al. Moment-rotation-temperature curves for semi-rigid joints [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61: 281-303.
- [12] Bailey C G, Toh W S. Small-scale concrete slab tests at ambient and elevated temperatures [J]. Engineering Structures, 2007.
- [13] Tan K H, Toh W S, Huang Z F, et al. Structural responses of restrained steel columns at elevated temperatures[J]. Part I: Experiments. Engineering Structures, 2007, 29(8): 1641-1652.
- [14] Spyrou S, Davison J B. Displacement measurement in studies of steel T-stub connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(6): 649-661.
- [15] 曾翔. 火灾全过程后钢管混凝土柱滞回性能试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
ZENG Xiang. Experimental Research on Cyclic Behavior Concrete-filled Steel Tubular Columns with Sustained Axial Load after Exposure to Fire [D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese)