doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.12.016

约束高强度 Q460 钢柱抗火性能试验

王卫永[1,2],葛 勇[1]

(1.重庆大学 土木工程学院,400045 重庆;2.山地城镇建设与新技术教育部重点试验室(重庆大学),400045 重庆)

摘 要:为获得高强度 Q460 钢柱的抗火性能,采用火灾试验炉对 4 个约束 Q460 钢柱进行抗火性能试验,试验采用恒载升温模式和 ISO-834 标准升温曲线,考虑了两个约束刚度和两个荷载比,测量了钢柱受火过程中的温度、轴向位移和跨中挠度,并得到了约束 Q460 钢柱的屈曲温度和破坏温度,采用约束钢柱的轴力放大系数方法计算了试件的破坏温度并和试验结果进行对比.研究表明:轴向约束刚度和荷载比对 Q460 钢柱的抗火性能影响较大,相同荷载比下轴向约束刚度大的钢柱破坏温度低,相同约束刚度下荷载比大的钢柱破坏温度低;轴力放大系数方法可以确定约束高强度 Q460 钢柱的临界温度.

关键词:高强度 Q460 钢;柱;轴向约束;转动约束;临界温度

中图分类号:TU392 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2015)12-0093-05

Fire tests on restrained high strength Q460 steel columns

WANG Weiyong[1,2], GE Yong[1]

(1. College of Civil Engineering, Chongqing university, 400045 Chongqing, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, 400045 Chongqing, China)

Abstract: Fire tests on four restrained columns fabricated with Q460 steel were carried out using furnace to obtain the fire resistance of high strength Q460 steel columns. The temperature of the furnace follows ISO-834 standard curve with the applied load keeping constant. Two restraint-stiffness ratios and two load ratios were considered, and the temperature distribution, axial displacement and deflection at the mid-section of steel columns were recorded in the tests. The buckling and failure temperatures of restrained Q460 steel columns were obtained. The failure temperature of specimens were calculated by employing the method of amplification factor of axial force in axially restrained steel columns and the results were compared with test results. The study shows that both the axial restraint and load ratio have great influence on fire resistance of Q460 steel columns. For certain load ratio, the failure temperature is lower for the steel column with the higher axial restraint, and for certain restraint stiffness, the failure temperature is lower with the higher load ratio. The method of amplification factor of axial force in axially restrained steel columns can be used to predict the critical temperature of restrained high strength Q460 steel columns.

Keywords: high strength Q460 steel; column; axial restraint; rotational restraint; critical temperature

高强度钢材强度高、塑性和韧性好,在建筑结构中得到广泛应用.高强钢和普通钢类似,在高温下强度和刚度明显下降,研究表明,相同温度下高强钢的强度和刚度的降低程度比普通钢稍低[1],从而高强钢结构的耐火性能与普通钢结构不尽相同.

国外开展约束钢柱抗火研究较早,主要研究了弹性约束对普通钢柱抗火性能的影响[2-4],研究发现,轴向约束降低钢柱的临界温度.近年来,国内也开展了约束钢柱的抗火研究[5-7],研究表明,如果考虑钢柱的屈曲后性能,轴向约束对临界温度的影响不明显.

目前关于高强钢结构的抗火研究还不多,文献[8]试验发现高强度钢和普通钢的弹性模量和屈服强度折减系数在 22~540 ℃非常相似,当温度超过 540 ℃后两者差别较大;文献[9]对高温下高强度箱形和 H 形钢柱的受力性能进行有限元分析,结果表明,采用美国和欧洲规范计算得出的高强度钢柱的承载力结果偏于保守;文献[10]引入了文献[9]对高强度钢(BISPLATE 80)高温下的力学性能参数,推导了高强度钢轴心受力构件在高温下的临界应力,得到了

收稿日期:2014-11-26.
基金项目:国家自然科学基金(51008320);重庆市博士后科研项目(渝 xm201103007).
作者简介:王卫永(1982—),男,博士,副教授.
通信作者:王卫永,wywang@cqu.edu.cn.

整体稳定系数与临界温度;文献[11]采用试验测量了高强度 Q460 钢的高温力学性能并分析了高强度 Q460 钢柱高温下的受力性能,研究发现普通钢柱的稳定系数和临界温度与高强度 Q460 钢柱差异很大.以上研究都是基于高强钢独立构件开展的研究,尚未发现约束高强度钢柱抗火性能的研究.

采用火灾试验炉对 4 个轴向和转动约束高强度 Q460 钢柱进行受火性能试验研究,测量了钢柱在不同约束刚度和不同荷载比下的受火反应,得到了钢柱的临界温度和耐火极限,并采用试验数据对约束钢柱临界温度计算的放大荷载系数法进行验证,研究成果可为分析高强度 Q460 钢柱的抗火性能提供参考,并可为有限元及理论模型的验证提供基础数据.

1　试验概况

试验在大型火灾试验炉上完成,空气温度采用 ISO-834 标准升温曲线,考虑了 2 个荷载比和 2 个轴向和转动约束刚度,共测试了 4 个轴向和转动约束高强度 Q460 钢柱的耐火性能.

1.1　试件设计

试件钢材为 8 mm 厚 Q460C 钢板,试验得到常温下屈服强度 585 MPa,抗拉强度660 MPa,弹性模量 2.12×10^5 MPa.焊丝采用高强度 SJ-60 焊丝,熔敷金属屈服强度 560 MPa,抗拉强度 650 MPa,伸长率 26%.采用二氧化碳气体保护焊,焊脚尺寸 8 mm.试件为焊接 H 形截面,尺寸 H200×195×8×8,单位 mm,长度4.48 m,端部与钢梁的连接为外伸端板节点,可近似认为刚接,见图 1(a).试件未采用防火保护,约束钢梁为 Q235 热轧 H 型钢,试验得到常温下屈服强度 285 MPa,弹性模量 2.10×105 MPa,截面尺寸 H200×150×6×9 或 H300×150×6.5×9,单位 mm,长度 3.2 m.钢梁翼缘与加载框架上的牛腿采用 2 个 10.9 级高强度螺栓连接,见图 1(b).为保证约束刚度的恒定,钢梁包裹两层 10mm 厚硅酸铝防火材料,见图 1(c).试件采用轴心加载,考虑 2 个荷载比,试件编号和荷载信息见表 1.

(a) 端板节点　　(b) 牛腿节点　　(c) 防火保护

图 1　试件及连接照片

1.2　试验装置和加载方式

加载装置为 7.7 m×4 m 的平面框架,见图 2.试件位于框架内部,试件和加载端(左端)约束钢梁位于炉子内部,其他部件位于炉子外部.施加轴向荷载的千斤顶位于约束钢梁和框架之间.约束钢梁和框架通过 4 个牛腿相连.右端约束钢梁除了两端和框架相连外,在中部还通过一个短柱和框架相连.试验炉具有 8 个燃烧器,均匀布置在炉壁周围,每个燃烧器附近布置一个热电偶,控制燃烧器的工作状态.

表 1　试件信息

编号	约束钢梁截面/mm	施加荷载/kN	荷载比
S-1	H300×150×6.5×9	390	0.20
S-2	H200×150×6×9	390	0.20
S-3	H300×150×6.5×9	700	0.36
S-4	H200×150×6×9	740	0.38

试验为恒载升温模式,即先施加荷载到预定值,然后保持恒定不变,点火升温,并在整个升温过程中荷载保持恒定,直至试件破坏.施加荷载前把约束钢梁两端的螺栓松开,避免荷载由约束钢梁承担,当荷载加载至预定值时,保持恒定,固定约束钢梁两端高强度螺栓,然后点火升温.这样可以保证施加的荷载由钢柱承担,当试件受火升温膨胀时,约束钢梁开始发挥约束作用.当试件的挠度达到 100 mm 时停止升温,因为试件挠度较大时,很快就进入破坏状态,为了试验仪器的安全,停止加热时停止加载.

1.3　测量内容和仪器布置

试验布置了多个仪器测量温度、位移和轴力.其中温度包含试验炉温度、试件温度和约束钢梁的温度,位移包含试件的轴向变形、挠曲变形.温度的测量使用热电偶,在试验炉内部布置了 10 个热电偶,编号为 FT1~FT10,在试件三分点 3 个截面上布置 9 个热电偶,编号为 CT1~CT9,在约束钢梁跨中和单侧中点截面布置 4 个热电偶,编号为 BT1~BT4.轴向位移和挠曲变形采用位移计测量.加载端短柱直接连接在约束钢梁上,约束钢梁直接连接于试验钢柱上,试验过程中,加载短柱和约束钢梁压缩变形很小,因此轴向位移通过测量加载端短柱位移间接得到.挠曲变形使用热膨胀系数很小的镍铬合金丝引出炉外测量,试件轴力采用布置在试件右侧短柱上的应变片间接测量,测量仪器布置见图 2.

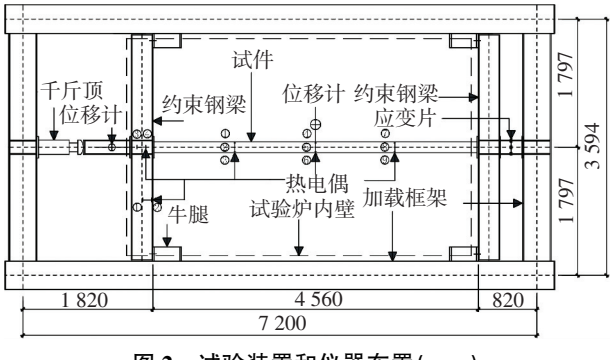


图 2　试验装置和仪器布置(mm)

2　试验结果

试验结果包含温度-时间曲线、位移-时间曲线、内力-时间曲线和试件破坏模式.为便于确定试件破坏温度，根据温度和时间关系，可以将位移-时间曲线和内力-时间曲线换算成位移-温度曲线和内力-温度曲线.

2.1　试验炉温度

试验炉按照 ISO834 标准升温曲线进行升温，4 个试件的平均炉温 FT 见图 3.

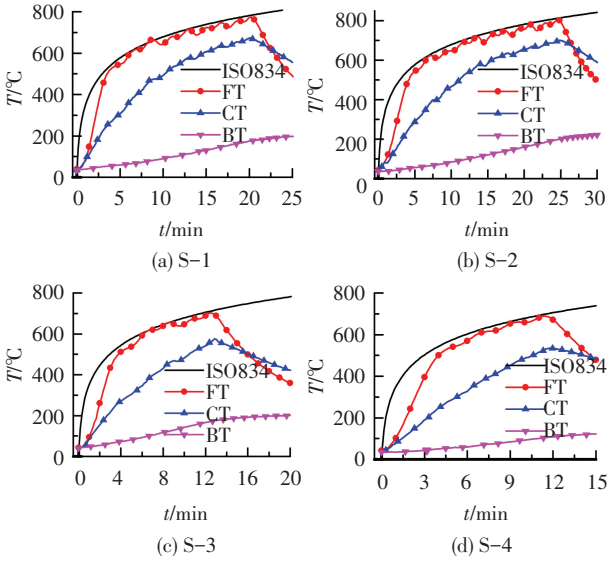


图 3　温度测量结果

试验炉点火后的 4 min 内炉温-时间曲线低于标准升温-时间曲线.但是，满足标准火灾的炉温控制允许偏差，0~10 min内为 15%.该偏差定义为：两个升温曲线下方的面积差与炉内实际平均温度-时间曲线下方的面积之比.4 min 后炉温和标准升温曲线比较接近，并且呈现跳跃式，因为试验炉燃烧器的工作状态采用电子元件自动控制，通过炉内的热电偶测量炉温，当炉温达到设定值时，燃烧器停止工作，当炉温低于设定值一定范围时，又激活燃烧器，造成炉温升温具有一定的跳跃式.当试件达到预定的破坏标准时，停止所有燃烧器.停止燃烧器后，炉内通风系统还在工作，炉温迅速下降，逐渐冷却至常温.此外，10 个热电偶测量的结果具有一定的差异，最高为 100 ℃左右.该差异满足标准升温试验规定的炉内温差均匀性控制条件：在试验开始升温 10 min后，由任何一个热电偶测得的炉温与标准升温曲线所对应的该时刻的温度相差不能超过±100 ℃.

2.2　试件温度

试件的平均温度 CT 见图 3.试件温度上升过程中也呈现跳跃式，这是由于前面提到的炉子温度产生的跳跃引起.试件由于没有任何的防火保护，且试件截面形状系数较大，所以升温较快，10 min 就达到了 500 ℃左右.

2.3　约束钢梁温度

4 个试件约束钢梁的平均温度 BT 见图 3.由于约束钢梁采用了双层 10 mm 厚硅酸铝防火毯进行保护，温度上升较慢，且相对稳定，没有呈现跳跃式，最高温度达 260 ℃.根据钢材的力学性能随温度的变化关系可知，300 ℃下钢材的强度和弹性模量与常温下相比变化不大，因此可认为，约束钢梁的刚度随着试件温度的升高基本保持恒定.

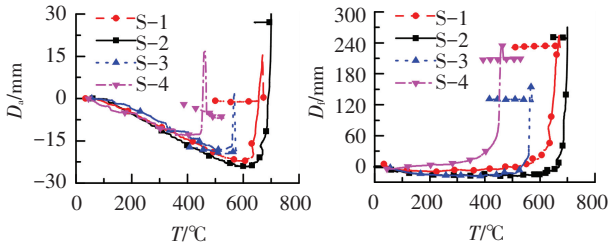
2.4　轴向位移和跨中挠度

约束钢柱有两种临界状态：屈曲临界状态和破坏临界状态[12].屈曲临界状态为约束钢柱轴力达到最大值时的状态，对应的温度为约束钢柱的屈曲温度；约束钢柱的破坏临界状态为其轴力重新恢复至初始轴力的状态，对应温度为钢柱的破坏温度.

试件的轴向位移 D_a 见图 4(a).随着温度升高，轴向位移逐渐增大，这是试件受热膨胀引起的.试件受到钢梁的约束作用而产生附加轴力，钢柱内力逐渐增大，而其承载力随着温度升高逐渐下降，当温度达到钢柱的屈曲温度时，轴向位移达到最大值.

通过试件 S-1 和 S-2 的对比可看出，荷载比相同时，轴向约束刚度大的试件轴向位移小.从试件 S-1和 S-3 的对比可看出，相同约束刚度下，荷载比大的试件破坏较早，试件 S-1~S-4 的屈曲温度分别为 607、617、512 和 412 ℃.此后，试件挠度急剧增大，从而轴向位移急剧降低并恢复至初始状态.当轴向位移为零时，约束钢梁引起的附加内力也近似降低至零，此时试件上仅有千斤顶施加的初始荷载，约束钢柱达到破坏临界状态，相应地，试件 S-1~S-4 的破坏温度分别为 655、688、564 和 454 ℃.试验中，钢柱屈曲后轴力迅速下降，约束钢柱的破坏温度和屈曲温度相差不大，仅 42~71 ℃，主要原因是试件的轴向约束刚度较小.随着约束刚度增大，约束钢柱破坏温度和屈曲温度之间的差别将增大，此时利用屈曲后性能，可显著提高约束钢柱破坏温度.

试件跨中挠度 D_f 见图 4(b).温度低时，跨中挠度很小，随着温度升高，挠度变化不明显，试件温度临近破坏温度时，挠度急剧增加，几秒之内达到 200 mm，表现出明显的整体失稳特性.温度较低时，试件挠度出现负值，主要是因为测量挠度选取翼缘的边缘作为测点，截面弯曲破坏时是绕弱轴失稳的，试件达到较大挠曲变形之前发生了一定程度的扭转，当试件扭转时导致跨中挠度的测量结果出现负值.



(a) 轴向位移　　(b) 跨中位移

图 4　轴向位移和跨中位移

2.5　轴向内力

根据应变片计算得到试件的内力 P,除以试件开始受火时的内力 P_0 得到轴力比与温度的关系曲线,见图 5.试件 S-1 和 S-2 具有相同荷载比,不同的轴向和转动约束刚度,试件 S-1 和 S-3 具有相同的轴向和转动约束刚度,不同的荷载比.从图 5 可看出,随着温度升高,轴力逐渐增大,轴向约束刚度大且荷载比小的试件,内力增大比例大;而荷载比大的试件,内力增大较小,主要是较大荷载比下,温度内力占初始荷载的比例较小;当试件产生较大挠曲变形时,轴力急剧降低,因为试件的弯曲变形带来轴向位移的减少,从而减少约束产生的附加内力.

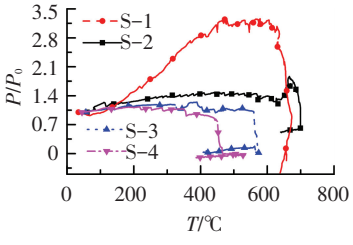


图 5　试件的轴力

根据破坏温度定义,依据测得的轴力可得破坏温度,分别为 669、700、559 和 355 ℃,与破坏温度结果稍有差异,尤其是试件 S-4 差异较大,主要原因是应变片计算得到的轴向内力误差较大,试件右侧连接的钢梁也会承担一小部分由试件传递的轴力.

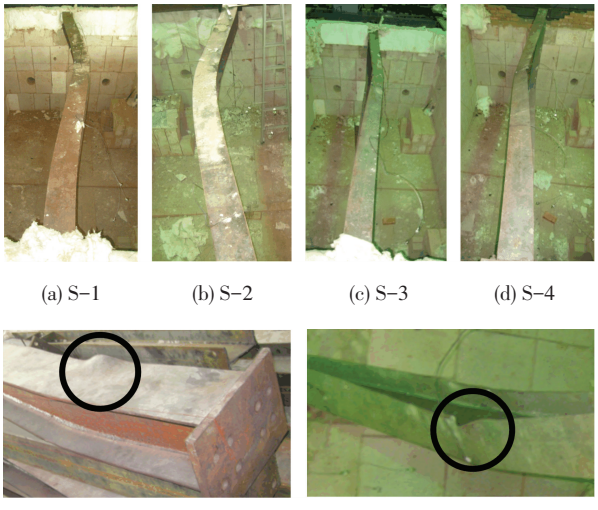
2.6　试件破坏模式

试验后试件的破坏形态见图 6.对于 S-1 和 S-2,破坏模式主要是绕弱轴的弯曲失稳,保留了较大残余变形.但对 S-3 和 S-4,有明显扭转现象,其中 S-4 的扭转更明显,后 2 个试件与前 2 个试件的主要区别就是荷载比不同,后者接近前者的 2 倍.试件的最大挠曲基本都发生在试件的跨中位置(图 6(a)~(d)),且试件跨中翼缘处和反弯点位置也出现明显局部屈曲(图 6(e)~(f)).

3　理论分析与对比

3.1　理论分析方法

轴向约束刚度会降低钢柱的破坏温度,因为高温下轴向约束引起附加内力;转动约束会提高钢柱的破坏温度,因为可以降低试件的计算长度;同时,荷载比对钢柱的破坏温度影响也很大.文献[13]根据具有转动约束钢柱临界温度和铰接柱临界温度相等,提出高温下具有转动约束钢柱的计算长度系数.此外,根据约束钢柱临界温度(亦称"破坏温度")和非约束钢柱临界温度相等原则(见图 7),提出约束钢柱临界温度简化计算方法,即轴力放大系数法.考虑轴向约束刚度和荷载比 2 个主要参数,得到约束钢柱轴力放大系数.采用该方法计算了试验构件轴力放大系数和计算长度系数,并考虑钢材类型对长细比的修正,根据 CECS200:2006《建筑钢结构防火技术规范》[14] 中轴心受力构件的临界温度,得到试验构件的破坏温度.



(a) S-1　(b) S-2　(c) S-3　(d) S-4

(e) 跨中的局部屈曲　　(f) 反弯点处的局部屈曲

图 6　试件破坏后照片

3.2　结果对比分析

根据试验装置,简化得到试件的力学模型见图 8.假定试件受火过程中钢梁的约束刚度保持不变且为小变形.试件的轴向约束刚度比定义为约束钢梁的抗挠曲刚度(跨中产生单位位移需要施加的力)与试件抗拉刚度的比值.试件转动约束刚度系数定义为与试件一端相连梁的线刚度(考虑远端支座影响)和梁柱线刚度和的比值,荷载比定义为施加荷载与常温下试件屈曲承载力之比.

根据试件材料参数和尺寸,计算得到轴向约束刚度比 β_a、荷载比 R_0,进而采用轴力放大系数方法计算得到各个试件的轴力放大系数 η 和破坏温度 T_c,见表 2,其中,破坏温度试验值 T_s 是根据试件的轴向位移恢复至零时的温度值.从对比可看出,对于前 3 个试件,结果差异 e 不大,吻合较好,差异在 6% 以内,而对于 S-4,结果差异较大,主要原因可能是该试件在试验过程中发生了扭转,导致试件提前破坏,从图 6(d)可清楚看出.从图 6(c)可看出,S-3 也发生了轻度的扭转,但没有 S-4 严重,因为 S-4 的

荷载比稍大于 S-3.文献[15]也发现，荷载比较大的钢柱发生的破坏形式为弯扭失稳，而荷载比较小的试件则发生了弯曲失稳.试件发生扭转的原因主要有两个：第一个是试件翼缘发生了局部屈曲，由于荷载比较大，截面应力水平较高，在升温过程中，随着钢材弹性模量和强度的降低，截面的应力水平接近翼缘板件的局部屈曲临界应力，从而在几何初始缺陷和焊接残余应力的影响下，试件翼缘产生轻微的局部屈曲，从而部分翼缘退出工作，试件截面形式从双轴对称截面变成了单轴对称，从而产生扭转现象；第二是试件本身也产生一定程度的扭转，由于试件截面为双轴对称截面，通过计算得知，常温下该试件的扭转屈曲临界应力和弯曲屈曲临界应力相差不大，随着温度升高造成钢材强度和刚度的降低，试件的扭转屈曲临界应力也急剧下降，而试件本身的应力水平较高，从而使工作应力接近高温下扭转屈曲临界应力，造成扭转的产生.总体而言，约束钢柱临界温度简化计算方法可计算轴向和转动约束高强度 Q460 钢柱的破坏温度.

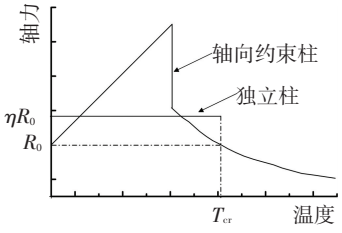


图 7　临界温度等效示意

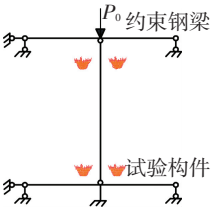


图 8　试验构件力学模型

表 2　试件计算破坏温度值与试验破坏温度值对比

试件	β_a	R_0	η	T_c/℃	T_s/℃	e/%
S-1	0.098	0.20	1.945	636	655	2.9
S-2	0.098	0.20	1.790	651	688	5.4
S-3	0.039	0.36	1.593	573	564	1.6
S-4	0.039	0.38	1.371	593	454	30.6

4　结　论

1）在相同转动约束刚度和荷载比下，轴向约束刚度大小对 Q460 钢柱的火灾反应具有显著影响，具体表现为轴向约束刚度大的试件，轴向变形较小，但产生的附加温度内力较大，破坏温度较低.

2）荷载比对约束 Q460 钢柱的抗火性能产生较大影响，相同轴向和转动约束刚度的 Q460 钢柱，荷载比大的破坏温度低.

3）荷载比较小时，轴向和转动约束 Q460 钢柱在火灾下破坏模式为绕弱轴的弯曲失稳，当荷载比较大时，火灾下容易出现扭转失稳，同时试件中部翼缘和反弯点处出现明显的局部屈曲.

4）采用约束钢柱临界温度计算的简化方法计算了试件的破坏温度，和试验结果吻合较好，验证了该方法对约束高强度 Q460 钢柱的适用性.

参考文献

[1] WANG W Y, LIU B, KODUR V K R. Effect of temperature on strength and elastic modulus of high strength steel [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013,25 (2):174-182.

[2] VALENTE J C, NEVES I C. Fire resistance of steel columns with elastically restrained axial elongation and bending [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1999, 52(3):319-331.

[3] RODRIGUES J P C, NEVES I C, VALENTE J C. Experimental research on the critical temperature of compressed steel elements with restrained thermal elongation [J] .Fire Safety Journal, 2000, 35(2):77-98.

[4] TAN K H, TOH W S, HUANG Z F, et al. Structural responses of restrained steel columns at elevated temperatures: Part1: Experiments [J]. Engineering Structures, 2007, 29(8):1641-1652.

[5] 李国强，王培军，王永昌. 约束钢柱抗火性能试验研究[J]. 建筑结构学报，2009, 30 (5): 184-190.

[6] 李国强，王培军，王永昌. 火灾下约束钢柱受力性能实用分析方法(1)—轴力作用下的约束钢柱[J]. 土木工程学报，2010，43(4)：16-22.

[7] 王培军，李国强，王永昌. 火灾下轴心受压 H 型截面约束钢柱整体稳定设计[J]. 土木建筑与环境工程，2009，31(4)：31-36.

[8] CHEN J, YOUNG B, UY B. Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(12):1948-54.

[9] CHEN J, YOUNG B. Design of high strength steel columns at elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(6): 689-703.

[10] 王卫永，李国强，戴国欣. 轴心受压高强度 H 型钢柱抗火性能[J]. 重庆大学学报，2010, 33(10): 76-82.

[11] 刘兵，王卫永，李国强，等. 高强度 Q460 钢柱抗火性能研究[J]. 土木工程学报，2012，45(9)：19-26.

[12] WANG Y C. Post buckling behavior of axially restrained and axially loaded steel columns under fire conditions [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130 (3): 371- 380.

[13] 李国强，陈琛. 火灾下约束钢柱临界温度的简化计算方法[J]. 防灾减灾工程学报，2012，32(1)：105-110.

[14] 中国工程建设标准化协会标准. CECS20—2006 建筑钢结构防火技术规范[S]. 北京：中国计划出版社，2006.

[15] 李晓东，董毓利，田砾，等. H 型截面钢柱抗火性能的试验研究[J]. 工业建筑，2006，36(7)：75-78.

（编辑　赵丽莹）