

文章编号:1673-2049(2006)04-0064-06

# 轴向约束对钢结构柱抗火性能的影响

计琳, 赵均海, 翟越, 李新忠

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:**采用大型商用有限元软件 MSC MARC Mentat 研究了钢结构柱所受轴向约束的刚度对抗火性能的影响,对无保护层钢结构柱的抗火性能进行有限元分析,分析结果与试验结果吻合较好。结果表明:在室温情况下,轴向约束有利于提高钢结构柱的极限承载力,但在高温情况下,约束刚度的增大对钢结构柱的抗火承载力却具有负面影响,轴向约束的提高降低了高温下钢结构柱的极限承载力,并降低了钢结构柱的极限温度承载力;在温度达到 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之前,由于钢材的弹性模量改变与构件的热膨胀,导致构件的承载力降低,温度超过 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后,弹性模量与屈服强度的折减及构件的热膨胀所导致的约束反力共同作用,使得构件更早失效。

**关键词:**钢结构;抗火性能;轴向约束;有限元方法

**中图分类号:**TU392.1 **文献标志码:**A

## Effect of Axial Restraint on Fire Resistance Performance of Steel Column

JI Lin, ZHAO Jun-hai, ZHAI Yue, LI Xin-zhong

(School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** Authors investigated the axial restraint on fire resistance of unprotected steel column with commercial finite element method (FEM) software MSC MARC Mentat. The effect of axial restraint stiffness on fire resistance of steel column was analyzed. The FEM analysis results were fairly close to test results. The results show that although raising axial restraint stiffness can benefit bearing capacity of steel column in ambient temperature condition; in fire condition, fire resistance of steel column decreases as restraint stiffness increases. Under the fire condition, the reduction of elastic modulus and thermal expansion of column result in the decrease of bearing capacity before the temperature arrives at  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; after temperature exceeds  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the yield strength of steel begins to decrease and the high temperature leads to high reaction of axial restraint, finally, it leads to the column collapse in fire.

**Key words:** steel structure; fire resistance performance; axial restraint; finite element method

## 0 引言

钢结构由于具有强度高、自重轻、延性好等优

点,被广泛应用于工业与民用建筑中;然而,钢材却有比其他建筑材料高的热传导性,该缺点导致当其受火灾或高温时,力学性能(如强度、刚度)会减弱,

收稿日期:2006-11-14

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20040710001);陕西省自然科学基金研究计划项目(2003E<sub>2</sub>15)

作者简介:计琳(1979-),女,陕西三原人,工学博士研究生,E-mail:jlin823@163.com。

并导致大的变形直至在工作荷载下结构构件失效<sup>[1-6]</sup>。现有的防火涂料等虽能起到一定效果,但其造价高,所以从钢结构抗火计算方法(公式计算或数值计算)着手,控制火的蔓延,从而保护结构是非常重要的。钢结构抗火设计主要有基于试验和基于计算两种方法,前者存在种种问题,如试验条件难以模拟真实构件边界条件,试验具有随机性等。中国抗火设计主要采用基于计算的方法,该方法避免了基于试验方法所存在的问题,考虑了温度内力的影响,以高温下构件的承载力极限状态作为耐火极限判据<sup>[7-8]</sup>。

20世纪70年代以来,各国学者做了大量的试验,研究钢结构在高温下的力学特性和热力学特性,其最重要的力学特性为弹性模量、屈服强度和应力-应变关系。热力学特性分为热应变、热梯度。钢材在温度达到200℃时,其刚度开始降低;当温度达到450℃时,其强度开始锐减;温度高于450℃时,钢材开始呈现蠕变现象。1988年,Anderberg<sup>[9]</sup>提出了钢结构在高温情况下的变形由以下三部分组成

$$\epsilon = \epsilon_{th}(T) + \epsilon_{\sigma}(\sigma, T) + \epsilon_{cr}(\sigma, T, t) \quad (1)$$

式中: $\epsilon_{th}$ 为热应变; $\epsilon_{\sigma}$ 为与应力 $\sigma$ 相关的应变; $\epsilon_{cr}$ 为与时间相关的高温蠕变; $T$ 为温度; $t$ 为时间。

式(1)中明确了高温蠕变效应,它是基于稳态试验的结果,与应力、温度、时间、蠕变活化能及气体常量相关。虽然式(1)得到了普遍认同,但应用起来有些困难。1988年,Twilt<sup>[10]</sup>提出在标准火灾环境下,应用高温蠕变公式计算蠕变对于抗火的影响不是非常必要的,并且在其所做的钢构件抗火试验中,采用5~50℃·min<sup>-1</sup>的升温速率得到了具有实际意义的标准火灾条件,这两种极端状况下钢构件的抗火时间仅有几分钟之差,由此可见,蠕变效应对于钢结构在抗火时间上的影响非常微弱。换言之,将应变精确到考虑蠕变效应意义不大,因此,在本文的研究中,不考虑蠕变效应。

当钢构件受到高温加热时,若无热膨胀约束,它将按以下方程沿主轴方向伸长

$$L_T = L_0 [1 + \alpha \Delta T + \alpha_1 (\Delta T)^2 + \alpha_2 (\Delta T)^3] \quad (2)$$

式中: $L_T$ 为升温 $\Delta T$ 后构件的长度; $L_0$ 为初始构件的长度; $\Delta T$ 为升高的温度(一般构件初始温度设为20℃); $\alpha$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 分别为材料的一阶、二阶及三阶热膨胀系数,其阶数分别为 $10^{-5}$ 、 $10^{-10}$ 和 $10^{-14}$ 。对于钢材,二阶和三阶热膨胀系数相对一阶热膨胀系数可以忽略不计, $\epsilon_{th} = \alpha \Delta T$ , $\alpha = 14 \times 10^{-6}$ 。

## 1 抗火分析

当建筑物发生火灾时,有部分构件(考虑火灾发生在局部)受到火灾高温的强烈影响,而其周围构件受到的影响很小甚至保持原有的室温(20℃);因此这些未受高温却与受火构件相连的构件必对后者起到约束作用,限制其自由伸缩<sup>[11-12]</sup>。

1997年,Simms进行了两组试验,共有18个试件,长细比均为152,试验研究了荷载水平及轴向约束对钢结构柱抗火能力的影响,两组试件的轴向约束率分别为0.04和0.27。试验发现,即便是相当小的约束率,也会大大地降低钢结构柱的失效温度<sup>[13]</sup>。2000年,Rodrigues等对168个具有轴向约束的小尺寸受压钢杆进行了抗火试验,其长细比为80~319,研究的参数包括长细比、偏心率及不同的约束刚度<sup>[14]</sup>。2004年,Tan对3组不同约束率 $K$ ( $K = k_b/k_c = 0.00, 0.07, 0.11$ , $k_b$ 为约束梁的刚度, $k_c$ 为柱的刚度)的试件进行了试验,其长细比为55,研究结果表明,高温下钢结构柱轴向荷载的提高与轴向约束水平成比例<sup>[15]</sup>。值得注意的是:由于客观条件的限制,如试验条件不易满足、边界条件难以模拟、试验本身的费用较高,并非所有的理论研究都能得到试验的支持;另外,因结构或构件边界条件的复杂性,要想由理论推导的方式得到解析解也比较困难,因此必须寻求一种方法,能够较好地模拟真实情况,并具有可靠、易行的特点。采用有限元法进行数值模拟具有上述优点,且具有通用性,并能够节省高昂的试验费用。

笔者采用大型商用有限元分析软件MSC/MARC Mentat对3组具有不同约束刚度的钢结构柱的抗火性能进行有限元分析。

研究中考虑单根钢结构柱受火时的高温,而与其相连的主梁保持室温(20℃),并且只考虑该主梁对受火作用时的钢结构柱的竖向约束,图1为火灾时,型钢柱受到竖向荷载 $N$ 的作用,并受轴向弹簧约束时其热膨胀的力学模型,该弹簧刚度由与柱端 $B$ 相连的钢梁提供。

## 2 抗火试验

本文中所以采用的时间-温度关系(升温速率为10℃·min<sup>-1</sup>,如图2所示)是基于两个真实的燃烧试验:英国贝德福德卡丁顿建筑研究实验室(Building Research Establishment Laboratory in Cardington, Bedford)和英国钢结构协会的燃烧试验(Bai

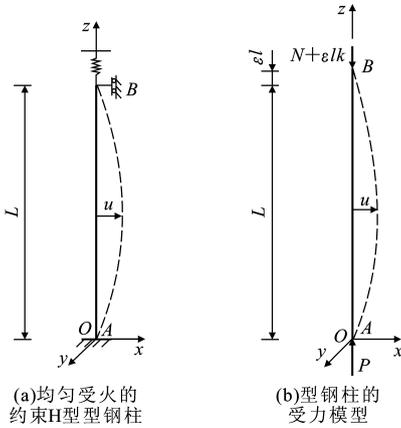


图1 具有轴向约束的型钢柱抗火分析力学模型

Fig. 1 Mechanical Model of Fire Resistance Analysis for I-Section Column with Axial Restraint

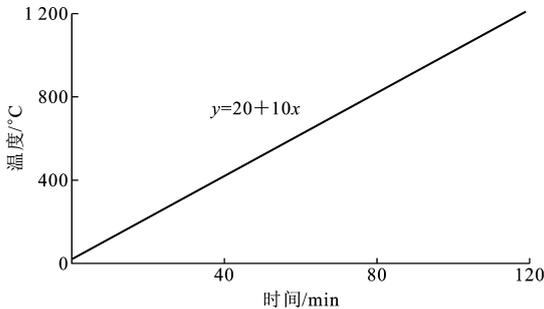


图2 试验采用的时间-温度关系

Fig. 2 Relation of Time and Temperature of Test

ley, 2000), 得到空气中的升温速率分别为 9、10 °C · min<sup>-1</sup>[16]。

### 3 有限元分析

本文中的试件尺寸见表1。

进行有限元建模时,由于真实情况中钢结构柱会有初始缺陷,如初始挠度、初始偏心,本文中采用 0.01sin(πz/L)的初始挠度和5 mm的初始偏心距来模拟真实构件的受力情况。根据欧洲规范(Euro-code 3 Part 1.2)[17],钢材的力学特性受高温影响而降低,图3为不同温度下钢材力学特性的折减率。

表1 试件参数

Tab. 1 Specimen Parameters

试件	轴向约束率	翼缘宽度/mm	腹板宽度/mm	翼缘厚度/mm	腹板厚度/mm	实测弹性模量/GPa	长细比
RS06	0.00	203.2	133.2	7.8	5.7	326	55
RS07	0.07						
RS11	0.11						

注:所有试件均发生绕弱轴的弯曲;试件为英国钢结构规范(British Standard)采用的型钢。

笔者采用 MSC MARC Mentat 软件进行有限

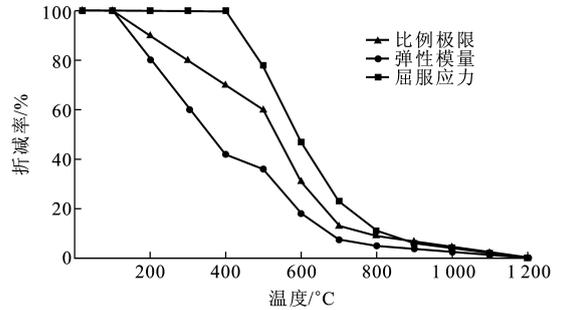


图3 不同温度下热轧钢力学特性的折减率

Fig. 3 Reduction Ratio of Mechanical Behavior of Hot Rolled Steel with Different Temperature

元分析,分析中选用目前非线性分析中常用的 Von Mises 等向强化准则。研究中采用了 MSC MARC Mentat 里的四节点矩形厚壳单元(Element75)模拟钢结构柱,共划分 746 个单元(腹板 318 个,翼缘 428 个),810 个节点,单元尺寸近似正方形(约 32 mm×32 mm)。壳厚度定义了两种,分别为钢结构柱腹板和翼缘的厚度,其相对单元尺寸为  $d/D > 1/10$ ,采用厚壳,并采用双线性厚壳单元(Bilinear Thick-Shell Element75),该单元以整体位移及扭转为其自由度。对比高阶的壳单元,采用单元 Element75 计算节省资源,并具有非常适于大变形、大应变的非线性分析的优点;弹簧模拟轴向约束,其变形方向控制在 z 轴方向,弹簧的虚拟端节点受 x、y、z 方向位移约束,弹簧属性定义其刚度大小,模型网格划分及单元选取如图 4 所示。钢结构柱两端为简支,其底端形心节点被约束 x、y、z 方向位移及 z 方向的转角位移,钢结构柱顶端形心节点被约束 x、y 方向位移及 z 方向的转角位移。轴向荷载及由于初始偏心产生的初始弯矩作用在柱端形心处,且大小相等,方向相反。温度荷载以节点温度边界条件施加在钢结构柱单元的每个节点上。图 5 为 RS07 在 500 °C 下受力的变形。



图4 RS07 有限元模型网格划分

Fig. 4 Mesh Division of Finite Element Model of RS07

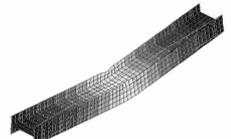


图5 RS07 在 500 °C 时的破坏形式

Fig. 5 Failure Pattern of RS07 at 500 °C

钢结构柱在高温状况下,由于钢材刚度降低,弯曲临界荷载会随温度升高而降低,且高温导致钢材屈服强度低于室温下的屈服强度,所以最终导致钢

结构柱极限抗压承载力的损失。对于 20 °C 室温条件下,轴向约束的存在提高了钢结构柱的承载能力。不同的轴向约束(RS06、RS07、RS11)的轴向约束率分别为 0.00、0.07、0.11 下的轴向荷载与侧向位移关系,如图 6 所示,但是,轴向约束刚度的提高对钢结构柱抗火是不利的。由图 6 可以看出,当温度高于 200 °C 时,受高强度轴向约束的钢结构柱较低约束强度的钢结构柱提前达到承载力极限状态。

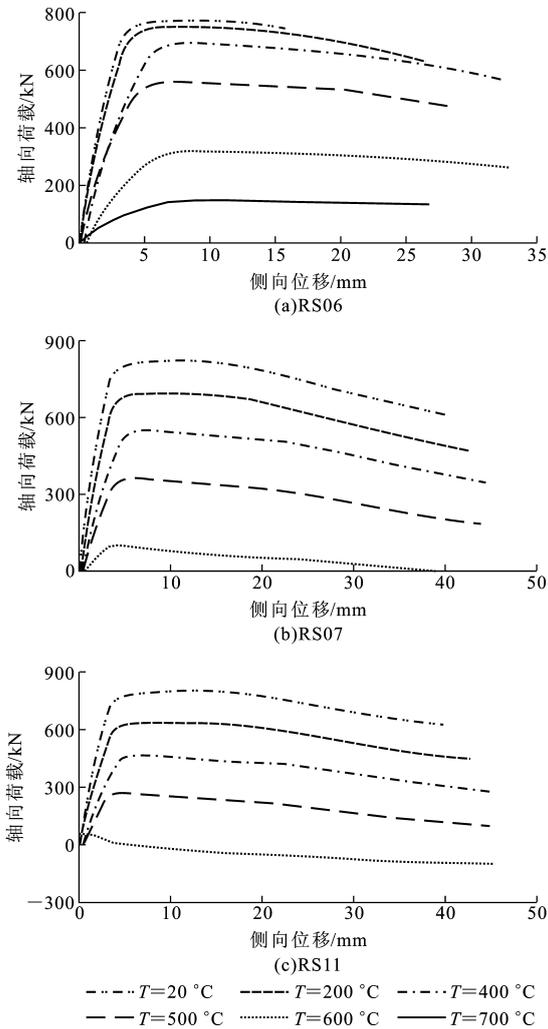


图 6 节点侧向位移-荷载关系

Fig. 6 Relation of Lateral Displacement and Load of Node

如同轴向约束刚度对钢结构柱极限承载力的影响,在室温 20 °C 状态下,钢结构柱承载力随轴向约束率的提高而增大,如图 7 (a) 所示。在 200 °C、400 °C、500 °C 的高温(火灾)状况下,不同轴向约束率的钢结构柱的柱中截面某节点的侧向位移与轴向外荷载的关系曲线如图 7 (b)~(d) 所示。由图 7 可以看出,约束刚度高反而对钢柱高温极限承载力有负面影响,在温度为 20 °C、200 °C 状况下,RS06、RS07、RS11 的曲线差异不大,但温度到 400 °C 以

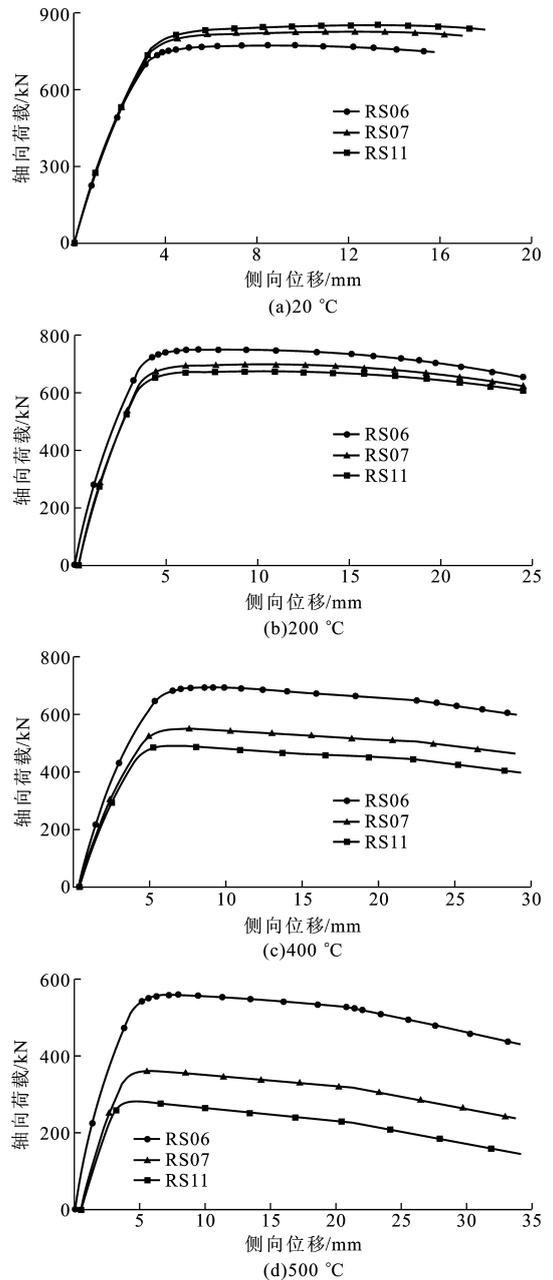


图 7 轴向约束的位移-荷载关系

Fig. 7 Relation of Displacement and Load of Axial Restraint

后,即 500 °C 时,约束率的提高明显降低钢结构柱的抗火承载力。这是因为 450 °C 之前,由于钢材的弹性模量改变与构件热膨胀,导致承载力的降低;在 450 °C 之后,弹性模量与屈服强度的折减及热膨胀所导致的更大的约束反力,使得高温下的结构构件更早失效。

#### 4 有限元结果与试验结果的比较

以同样的有限元模型计算钢结构柱极限温度承载力,取钢结构柱所受初始荷载为  $P_0$  ( $P_0 = P_y/2 = f_y A/2$ ,  $f_y$  为钢材屈服强度,  $A$  为截面面积),保持该

荷载不变,按照图2中时间-温度曲线升温,直至钢结构柱发生非常明显的侧向位移,由数据所得曲线来判断其抗火失效温度。计算结果与试验结果对比见图8。

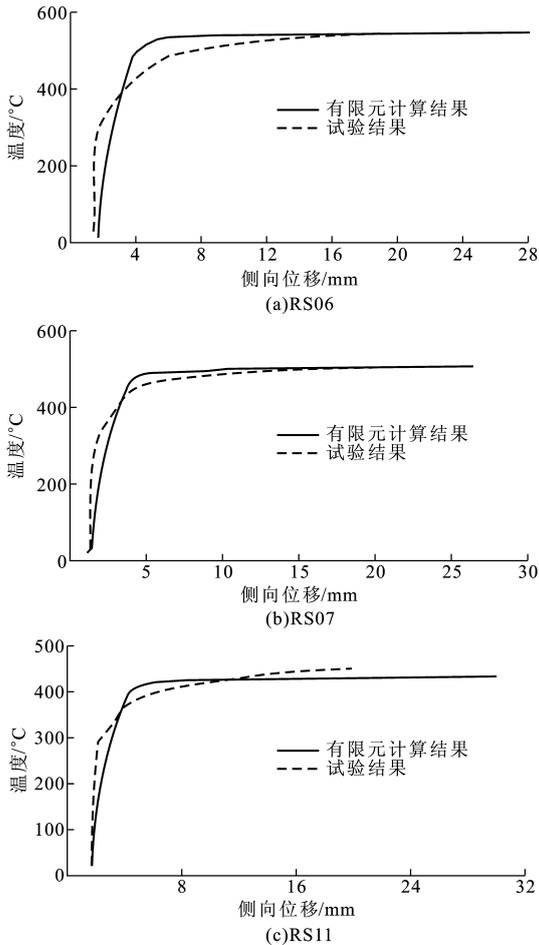


图8 截面侧向位移-温度关系

Fig. 8 Relation of Lateral Displacement and Temperature of Section

由图8可以看出,有限元计算结果与试验结果两条曲线非常接近,误差较小;3种约束刚度的钢结构柱分别在390℃、440℃、350℃时,两条曲线相交,在到达交点之前,钢结构柱中截面侧向位移的有限元计算结果相对于试验结果偏大,即较安全。对于极限温度承载力预估计,由图8可以看出,试验结果曲线在交点之后递增稍缓,在逐渐逼近有限元结果曲线时趋于平缓,说明了有限元模拟所得到的极限温度承载力较为精确。对于RS11,在钢结构柱中界面侧向位移达到18mm时,试验曲线达到最高点,其对应的温度稍高于有限元结果,两者相对误差约为4%,这是由于有限元模拟钢结构柱的边界条件(简支,精确的约束刚度)较为理想,而试验中对钢结构柱的边界条件进行模拟时存在一定的误差(无

法避免的简支端的摩擦阻力),因此试验得到的RS11的温度极限温度承载力略高于有限元计算结果,但后者偏于安全。

从图9可以看出,RS06、RS07、RS11三种约束钢结构柱的极限温度承载力分别在温度550℃、500℃、420℃左右,另外,在同一高温情况下,具有较强约束的钢结构柱中截面所产生的侧向位移大于约束强度较弱的,且随着温度的升高,钢结构柱的变形更加显著,因此,随着钢结构柱轴向约束刚度的提高,其抗火(耐高温)能力反而降低,换言之,说明轴向约束刚度的增大对钢结构柱的抗火能力具有负面影响。

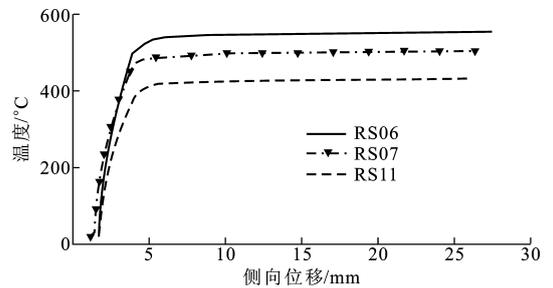


图9 不同约束钢结构柱抗火能力比较

Fig. 9 Comparison of Capacity of Fire Resistance for Different Restraint Steel Column

## 5 结语

(1) 高温可降低结构构件的极限承载力。450℃之前,由于钢材的弹性模量改变与构件的热膨胀,导致承载力的降低;在450℃之后,弹性模量与屈服强度的折减及热膨胀所导致的更大的约束反力,使得高温下的结构构件更早失效。

(2) 轴向约束刚度的大小对钢结构柱的抗火能力有一定的影响,轴向约束的提高降低了高温下钢结构柱的极限承载力,并降低了钢结构柱的极限温度承载力。在温度越高的条件下,约束刚度所带来的差异越趋明显。

(3) 采用有限元方法模拟抗火计算是可行的。在无试验条件或者边界条件难以在试验中模拟的情况下,可以考虑应用本文中所采用的有限元方法来模拟真实试验,并得到可靠的分析结果。

## 参考文献:

## References:

- [1] 聂建国,秦凯,张桂标.方钢管混凝土柱内隔板式节点的抗弯承载力研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(1):42-49.

- NIE Jian-guo, QIN Kai, ZHANG Gui-biao. Experimental Research and Theoretical Analysis on Flexural Capacity of Connections for Concrete-Filled Steel Square Tubular Columns with Inner Diaphragms[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1):42-49.
- [2] 周绪红,石宇,周天华,等.低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系[J].建筑科学与工程学报,2005,22(2):1-14.
- ZHOU Xu-hong, SHI Yu, ZHOU Tian-hua, et al. Cold-Formed Steel Framing System of Low-Rise Residential Building[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2):1-14.
- [3] 赵均海,郭红香,魏雪英.圆中空夹层钢管混凝土柱承载力研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(1):50-54.
- ZHAO Jun-hai, GUO Hong-xiang, WEI Xue-ying. Research on Bearing Capacity of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes Column[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1):50-54.
- [4] 周圣凯,郝际平,史小强,等.剖分T型钢轴心压杆试验研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(1):87-90.
- ZHOU Sheng-kai, HAO Ji-ping, SHI Xiao-qiang, et al. Experimental Research of Cut T-Shape Column Subject to Axial Compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1):87-90.
- [5] 张生录,惠会清.钢筋混凝土灌注桩试桩静载试验[J].建筑科学与工程学报,2005,22(2):66-68.
- ZHANG Sheng-lu, HUI Hui-qing. Plate Loading Test of Reinforced Concrete Pile[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2):66-68.
- [6] 周天华,何保康,周绪红,等.高强冷弯薄壁型钢轴压短柱受力性能试验研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(3):36-44.
- ZHOU Tian-hua, HE Bao-kang, ZHOU Xu-hong, et al. Experimental Research on Bearing Capacity of High-Strength Cold-Formed Steel Stub Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3):36-44.
- [7] 李国强.现代钢结构抗火设计方法[J].消防科学与技术,2002,21(1):8-11.
- LI Guo-qiang. Fire Resistance Design Method for Modern Steel Structure[J]. Fire Science and Technology, 2002, 21(1):8-11.
- [8] 蒋首超,李国强.局部火灾下钢框架温度内力的实用计算方法[J].工业建筑,2000,30(9):56-62.
- JIANG Shou-chao, LI Guo-qiang. A Practical Approach for Thermal Forces of Steel Frames Subjected to Local Fire[J]. Industrial Construction, 2000, 30(9):56-62.
- [9] ANDERBERG Y. Modeling Steel Behavior[J]. Fire Safety Journal, 1988, 13(1):17-26.
- [10] TWILT L. Strength and Deformation Properties of Steel at Elevated Temperatures; Some Practical Implications[J]. Fire Safety Journal, 1988, 13(1):9-15.
- [11] 宋晓勇,邹银生,涂文戈,等.受火钢筋混凝土柱截面极限承载力研究[J].建筑科学与工程学报,2005,22(4):61-64.
- SONG Xiao-yong, ZOU Yin-sheng, TU Wen-ge, et al. Research on Ultimate Load Capacity of Cross Section of Reinforced Concrete Columns Exposing to Fire[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4):61-64.
- [12] 余志武,唐国庆,丁发兴.三面受火钢筋混凝土梁温度场非线性分析[J].建筑科学与工程学报,2005,22(4):11-14.
- YU Zhi-wu, TANG Guo-qing, DING Fa-xing. Nonlinear Analysis of Temperature Field of Reinforced Concrete Beam with Three Surfaces Exposing to Fire[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4):11-14.
- [13] SIMMS W I. An Experimental Investigation of Axially Restrained Steel Columns in Fire[D]. Ulster; University of Ulster, 1997.
- [14] RODRIGUES J P, NEVES I C, VALENTE J C. Experimental Research on the Critical Temperature of Compressed Steel Columns with Restrained Thermal Elongation[J]. Fire Safety Journal, 2000, 25(2):77-98.
- [15] TAN K H. Fire Resistance of Steel Columns Subjected to Different Restraint Ratios [C]//CHANG-KOON C. The Second International Conference on Steel and Composite Structures. Seoul: Technology Press, 2004:110-119.
- [16] BAILEY C G. The Influence of the Thermal Expansion of Beams on the Structural Behavior of Columns in Steel-Framed Structures During a Fire[J]. Engineering Structures, 2000, 22(7):755-768.
- [17] Eurocode 3 Part 1, 2, Design of Steel Structures; General Rules—Structural Fire Design[S].