

文章编号:1001-5132(2009)02-0276-05

# 火灾温度场下约束钢柱的结构响应分析

王学夫<sup>1</sup>, 郑小尧<sup>2</sup>, 王新堂<sup>2</sup>, 丁勇<sup>2</sup>

(1.浙江省二建钢结构有限公司, 浙江 宁波 315207; 2.宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 假定火灾温度场为国际标准火灾曲线, 考虑钢材热工参数的非线性及几何非线性对其热响应的影响, 利用有限元方法计算分析了 H 型钢柱在不同温度分布场下随温度变化的应力、位移等结构响应. 研究表明: H 型钢柱在均匀温度场下与非均匀温度场下的应力、位移等热响应的变化规律截然不同, 且均匀温度场下的结构响应解相对偏小, 因而在轴心受压钢柱的防火设计中应考虑非均匀温度场实际情况对设计的影响, 从而提出对现行防火设计规范中假设均匀温度场的防火设计要求及规定应进行适当的补充和完善.

**关键词:** 火灾温度场; H 型钢柱; 热响应

**中图分类号:** TU352.5      **文献标识码:** A

相对于钢筋混凝土结构, 钢结构在火灾高温下, 其强度和刚度等基本力学性能都将迅速降低, 使得结构在较短时间内达到极限状态以至破坏. 有学者对温度非均匀分布时钢柱的临界温度进行了研究, 结果证明截面温度非均匀分布在某些情况下对钢柱的承载力是不利的, 因而对截面温度均匀分布的柱试验结果能否用于温度非均匀分布的情况提出了置疑, 即要求对温度非均匀分布的柱截面的防火设计进行有限元分析. 目前非均匀温度分布柱试验局限于完全屈服的破坏模式, 还需对易发生局部屈曲的细长柱作进一步的研究<sup>[1-2]</sup>. 李国强等<sup>[3-5]</sup>对高温下的钢材料特性变化、钢构件温度场以及钢柱在不同荷载下的防火计算与设计等方面做了大量的工作, 并取得了重大研究成果.

作者采用国际标准火灾升温曲线作为已知的温度场, 考虑了钢材热工参数的非线性以及几何

非线性对其热响应的影响, 通过有限元程序对 H 型钢柱的热响应进行了数值模拟, 得到了 H 型钢柱在不同温度分布场下的应力、位移等随温度变化的热响应. 通过分析得到: H 型钢柱在均匀温度场下与非均匀温度场下的应力、位移等结构响应的变化规律截然不同, 且均匀温度场下的结构响应解相对偏小, 提出要在轴心受压柱的防火设计中应考虑非均匀温度场实际情况对设计的影响, 并对现行防火设计规范中假设均匀温度场的防火设计承载力和临界温度进行适当的折减.

## 1 基本理论

火灾时热空气向构件传热主要是通过辐射和对流, 而固体的构件内部传热则是热传导. 钢构件温度场为无内热源三维瞬态温度场. 根据傅立叶

收稿日期: 2008-10-23.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 浙江省科技计划项目(面上重点)(2008C23013); 宁波市自然科学基金(2007A610060).

第一作者: 王学夫(1969-), 男, 浙江诸暨人, 工程师, 主要研究方向: 钢结构与施工. E-mail: zejgbgs@mail.nbptt.zj.cn

导热定律及热平衡原理可以得到钢构件导热微分方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}),$$

式中,  $\rho$  为介质密度,  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $c$  为比热,  $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ ;  $\lambda$  为导热系数,  $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ ;  $T$  为  $t$  时刻的温度,  $^{\circ}\text{C}$ .

对流边界条件为:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = \alpha_c (T_g - T_b),$$

辐射边界条件为:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = \varphi \varepsilon_r \sigma [(T_g + 273)^4 - (T_b + 273)^4],$$

式中,  $\alpha_c$  为对流传热系数,  $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ ;  $\varphi$  为形状系数, 一般取 1.0;  $\varepsilon_r$  为综合辐射系数, 取 0.5;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ,  $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)^{-1}$ ;  $T_g$  为空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_b$  为构件表面(或保护层表面)温度,  $^{\circ}\text{C}$ .

钢材具有热胀冷缩的特性, 在温度作用下会产生体积变化, 产生热应变. 当热应变受到约束不能自由发展时, 就产生热应力. 具体热应力分析的有限元可描述为<sup>[6]</sup>:

$$\int_V B^T D_T B \Delta u dV = \Delta P + \int_V B^T h \Delta T dV, \quad (1)$$

其中,  $\Delta P$  为节点上的等效外力增量;  $D_T$  为依赖于温度的弹塑性矩阵, 包含弹性变形和塑性变形的贡献;  $h$  表示热应变对应力贡献大小的张量;  $B^T$  是建立节点位移  $U$  和单元总应变  $\varepsilon$  之间线性关系的转换矩阵. 方程(1)左端代表在当前温度下切线刚度的影响, 右端第 2 项代表热应变所产生的等效热荷载.

## 2 H 型钢柱结构响应的有限元分析

### 2.1 有限元模型

采用大型通用有限元程序对工字钢柱进行热传导和热应力分析. 约束钢柱的工字钢截面取  $274 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 钢柱高度为 3 m. 钢柱的约束条件为下端固支, 上端限制  $x$  方向位移, 单

元总数为 2880 个, 在热传导分析中, 采用 8 节点实体热传导单元. 在热应力分析中, 采用 8 节点实体力学单元, 有限元网格模型见图 1.

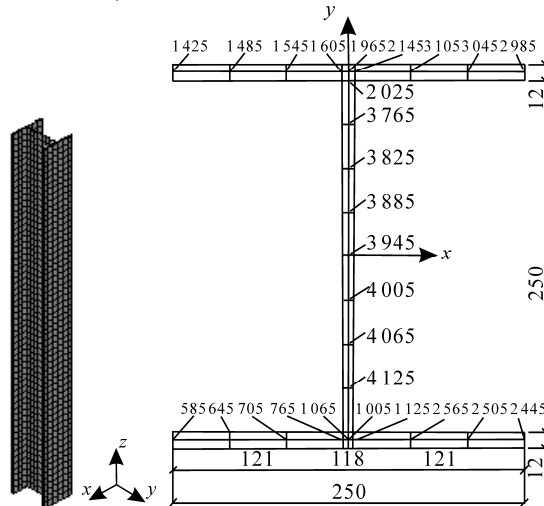


图 1 有限元网格划分 图 2 1.5 m 高度处截面的单元分布与部分节点标号

### 2.2 非均匀温度场模拟

在非均匀温度场模拟中, 分析热辐射和热对流共同作用的四面受火情况, 并且考虑钢材物理特性随温度变化引起的材料非线性, 进行瞬态热传导分析. 假设火灾升温符合升温曲线, 即

$$T_g = 20 + 345 \lg(2 / 15t + 1).$$

由于比热容  $C_s$ , 导热系数  $\lambda_s$  随温度变化较大, 分别采用公式(2)<sup>[7]</sup>计算:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= 52.08 - 5.05 \times 10^{-5} T_s^2, \\ C_s &= 483 + 8.02 \times 10^{-4} T_s^2. \end{aligned} \quad (2)$$

其他材料参数随温度变化较小, 故取常数. 密度取  $7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 泊松比取 0.3, 对流传热系数取  $50 \text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ , 综合辐射系数取 0.5.

由于加载截面有应力集中效益, 不便于分析, 故所有计算结果均取自 1.5 m 高度截面, 以下类同, 截面图见图 2.

图 3 为翼缘上节点 1425、节点 1485、节点 1545 和节点 1965 的升温曲线, 图 4 为腹板上节点 2025、节点 3825 和节点 3945 的升温曲线. 通过比较图 3 和图 4 可以看出: 由于柱的翼缘四周受火, 升温较快, 4 个节点的温度曲线几乎重合, 翼缘升

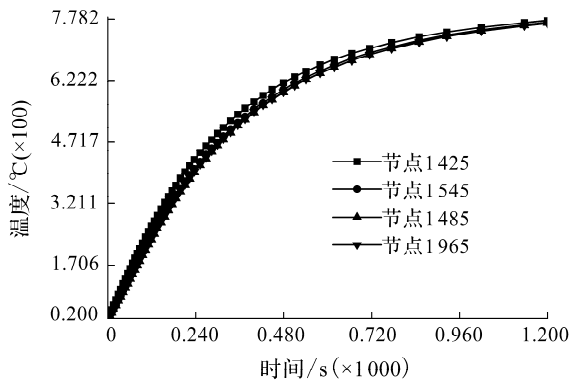


图3 翼缘上各节点的升温曲线

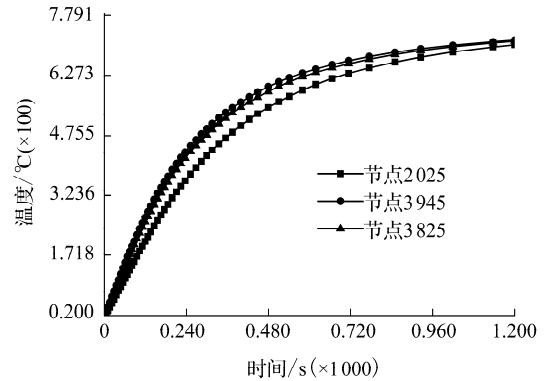


图4 腹板上各节点的升温曲线

温比较均匀, 温度梯度很小, 温度相差不大; 而腹板由于热辐射和热对流的影响, 温度普遍比翼缘高, 而且升温并不均匀, 温度梯度较大, 在截面中心节点 3 945 处达到最高。

### 2.3 结构响应分析

在热应力分析中, 考虑小应变大位移的几何非线性情况以及钢材力学性能随温度变化的材料非线性影响, 根据上述热传导分析得到的非均匀温度场分布以及假定的均匀温度场, 分别进行钢柱在静载作用下的热响应分析。其中钢材力学性能随温度变化表现为:

热膨胀系数  $\alpha_s$  随温度变化的公式为<sup>[7]</sup>:

$$\alpha_s = (11.0 + 5.75 \times 10^{-3} T_s) \times 10^{-6}.$$

弹性模量  $E_s$  随温度变化的公式为<sup>[7]</sup>:

$$E_s / E = -17.2 \times 10^{-12} T_s^4 + 11.8 \times 10^{-9} T_s^3 - 34.5 \times 10^{-7} T_s^2 + 15.9 \times 10^{-5} T_s + 1, \\ 0 \leq T_s \leq 600,$$

$$E_s / E = 8.66 \times 10^{-4} (800 - T_s), \\ 600 \leq T_s \leq 800.$$

屈服强度  $f_{yT}$ , 采用的本构为理想弹塑性模型, 随温度变化的公式<sup>[7]</sup>为:

$$f_{yT} / f_y = 1 - 4.5 \times 10^{-4} T_s - 8.8 \times 10^{-7} T_s^2.$$

由轴心受压构件抗火验算公式<sup>[7]</sup>得到轴心受压的极限荷载为 825.9 kN, 且在荷载为极限荷载的 25%, 50% 的静载的偏心受压情况下满足平面内与平面外稳定, 以及局部稳定。实验共采用 2 种工况, 分别是:

工况 1: 均匀温度场, 即根据 ISO 834S 标准升温曲线变化的均匀温度场下, 荷载为极限荷载的 25% 的静载的轴心受压情况, 临界温度为 622.5 。

工况 2: 非均匀温度场, 即在瞬态热传导分析得到的非均匀温度场下, 荷载为极限荷载的 25% 的静载的轴心受压情况, 临界温度为 608.9 。

### 2.4 不同温度分布对钢构件结构响应的影响

由工况 1 和工况 2 的计算结果知, 不同的温度分布对钢构件产生的热响应相差很大。

图 5 表示不同温度分布情况下的破坏形态。由图 5 可以知道: 工况 1 时钢柱破坏主要以加载端翼缘边缘纤维局部屈曲破坏为主; 工况 2 时钢柱出现弯扭失稳破坏。这表明代表实际情况的非均匀温度场下的临界温度相对于设计假设的均匀温度场的临界温度小得多, 即前者先于破坏, 这就要求设计规范对假设均匀温度场下的临界温度进行适当的折减。

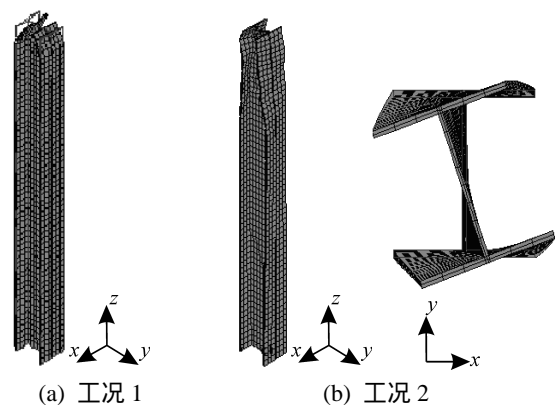


图5 不同温度分布情况下的钢柱破坏形态

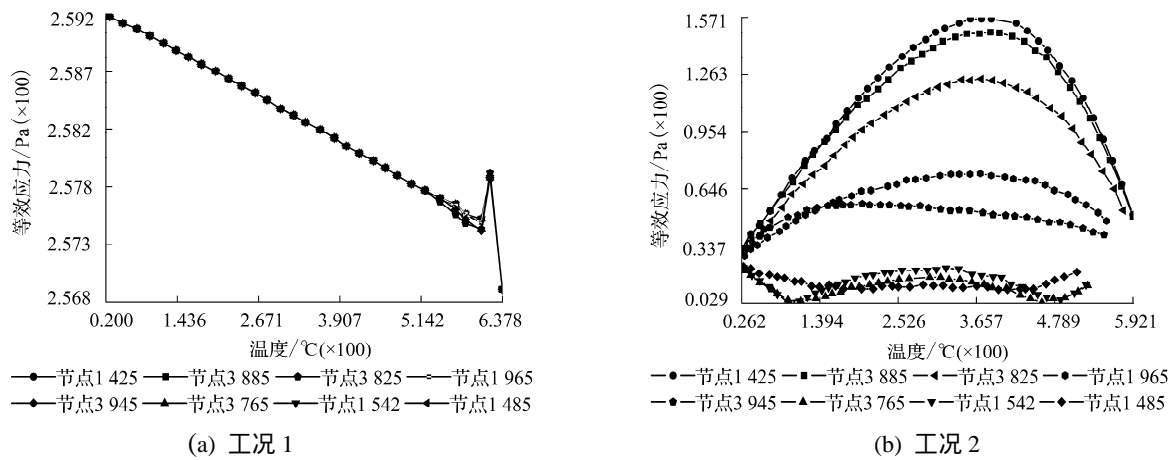


图 6 翼缘和腹板部分节点的等效 von mises 应力随温度变化的曲线

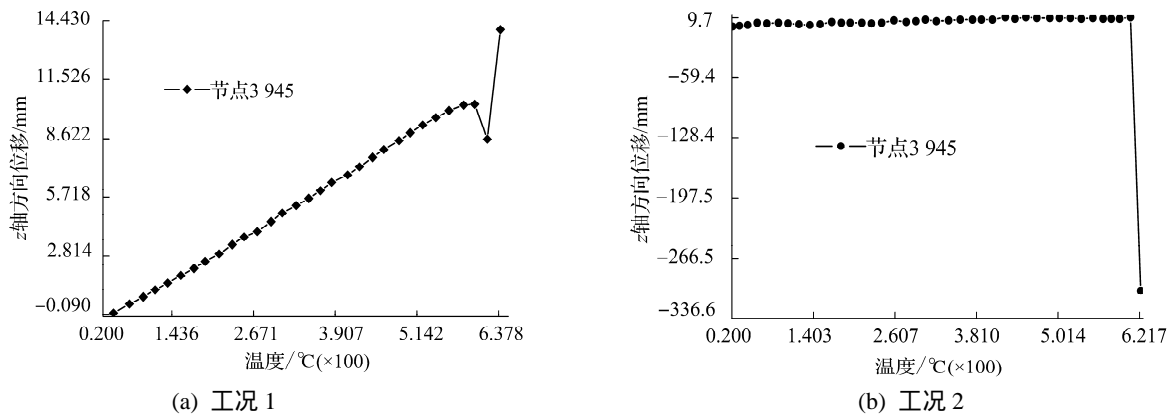


图 7 腹板上节点 3945 的 z 轴方向位移随温度变化的曲线

图 6(a)和(b)分别表示在轴心受力情况下, 均匀温度场与非均匀温度场下翼缘和腹板部分节点的等效 von mises 应力随温度变化的曲线. 结果表明: 在均匀温度场下, 截面各点的应力相等, 且呈下降趋势; 而在非均匀温度场下, 由于端部温度高, 翼缘端部节点应力增长较翼缘内部节点快, 而由于腹板的中间温度最高, 节点应力最大. 在同一时刻, 非均匀温度场节点的最大等效 von mises 应力比均匀温度场下大很多, 表明非均匀温度场下的钢材更易于屈服破坏, 即要求设计规范对假设均匀温度场下的抗火承载力进行适当的折减.

在变形方面, 钢柱的受火全过程可分为 2 个阶段: 一为占大部分时间的膨胀阶段, 二为压缩阶段. 图 7 表示在轴心受力情况下, 均匀温度场与瞬态温度场下腹板节点 3945 在 z 轴方向位移随温度变化的曲线. 在均匀温度场下, 由于构件破坏是加载翼

缘屈曲破坏, 则在 1.5 m 高处没有出现 z 轴方向变形有剧烈压缩的现象. 而在非均匀温度场下, 第一阶段中, z 轴方向变形较大, 膨胀达到 10.22 mm; 第二阶段由于钢柱突然失稳, z 轴方向变形剧烈下降, 呈严重压缩状态.

### 3 结论

(1) 代表实际情况的非均匀温度场下的临界温度相对于设计假设的均匀温度场的临界温度小得多, 即前者先于破坏, 这就要求设计规范对假设均匀温度场下的临界温度进行适当的折减.

(2) 在同一时刻, 非均匀温度场节点的最大等效 von mises 应力和变形较均匀温度场下大很多, 这就表明非均匀温度场下的钢材更易于屈服破坏, 即要求设计规范对假设均匀温度场下的抗火承载

力要作适当的折减.

(3) 均匀温度场分布与非均匀温度场分布下受压钢柱的破坏形式不同, 因而选择合理的设计准则对于抗火设计非常重要. 建议对非均匀温度场下钢柱的破坏机理开展更深入系统的研究, 并建立更科学的设计方法.

#### 参考文献:

- [1] Wang Y C, Lennon T, Moore D B. The behavior of steel frames subject to fire[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1995, 35:291-322.
- [2] Burgess I W, Olawale A O, Plank R J. Failure of steel columns in fire[J]. Fire Safety Journal, 1992, 18:183-201.
- [3] 李国强, 蒋首超, 林桂祥. 钢结构抗火计算与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [4] 李国强, 沈祖炎. 高温下轴心受压钢构件的极限承载力[J]. 建筑结构, 1993(9):23-25.
- [5] 李国强, 沈祖炎. 钢柱抗火计算与设计的实用方法[J]. 工业建筑, 1995(2):31-37.
- [6] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 李国强, 韩林海, 楼国彪, 等. 钢结构及钢 - 混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

## Thermal Response of Restrained Axially Compressed Steel Column Under the High Temperature of Fire

WANG Xue-fu<sup>1</sup>, ZHENG Xiao-yao<sup>2</sup>, WANG Xin-tang<sup>2</sup>, DING Yong<sup>2</sup>

(1. Steel Construction Co. Ltd., 2nd Construction Group, Ningbo 315207, China;

2. Faculty of Architectural Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Based upon the assumption that the varying temperature field on the steel component is in agreement with ISO834 temperature curves, and considering the influence of material nonlinearity and geometric nonlinearity on the thermal response of steel component, the finite element method is employed to compute the thermal response of steel components under the different temperature fields, including the model of failure, the stresses and displacements of the component. The computational results show that the thermal response of steel H-column without protection for fire-resistance under uniform temperature field is quite different from that under non-uniform temperature field, and the thermal response of uniform temperature field is rather smaller. It suggests that the influence of the non-uniform temperature field upon the fire-resistant design of axially compressed steel column should be taken into consideration, and the corresponding requirements and provisions of the present code for fire-resistant design is to be amended.

**Key words:** elevated temperature of fire; steel H-column; thermal response

**CLC number:** TU352.5

**Document code:** A

(责任编辑 史小丽)