

# 防火涂料局部破损后约束钢柱的临界温度

王卫永<sup>1</sup>, 李国强<sup>2,3</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;  
3. 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 为了研究防火涂料局部破损后钢柱的抗火性能, 根据分段平衡微分方程, 分别推导了两端铰支和固支的钢柱局部防火涂料破损后高温下的挠曲线方程, 采用边缘屈服准则得出了局部防火涂料破损后轴向约束钢柱临界温度的计算方法。用有限元对高温下的挠度和轴向位移进行了验证, 结果吻合较好。通过算例计算了两端铰支轴向约束刚度内力随温度的变化关系, 并计算了临界温度。研究表明: 轴向约束增加高温下钢柱的内力, 降低钢柱的临界温度; 破损长度越长、轴向约束刚度越大, 临界温度越低。

**关键词:** 防火涂料; 钢柱; 临界温度; 计算方法; 挠度; 轴向约束; 抗火

中图分类号: TU392 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2010)01-0084-06

## Critical Temperature of Axially Restrained Steel Columns with Partial Fire Retardant Coating Damage

WANG Wei-yong<sup>1</sup>, LI Guo-qiang<sup>2,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China; 3. State Key Lab for Disaster Reduction in Civil Engineering, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the fire resistance of steel columns with partial fire retardant coating damage in fire, based on the differential equation of equilibrium on each portion of steel column, the deflection of steel column after the fire retardant coating damage was derived, with the pinned ends and rigid ends of the columns at elevated temperatures. The critical temperature calculation method was proposed for partial fire protection damage and axial restrained steel columns by taking the edge yielding criteria. The deflection and axial displacement were verified by finite element method at elevated temperature. With a case study, the critical temperature and relationship of axial force and temperature were obtained for pinned column with axial restraint. It was shown that the axial force of the steel column at elevated temperatures was increased and the critical temperature was decreased by the axial restraint. The longer the fire retardant coating damage was and the higher the axial restraint was, the lower the critical temperature was.

**Key words:** fire retardant coating; steel column; critical temperature; calculations; deflection; axial restraint; fire resistance

收稿日期: 2009-05-19

基金项目: 国家创新研究群体科学基金 (50621062); 国家自然科学基金 (50738005); 教育部高等学校博士学科点科研基金 (20090191120032)

作者简介: 王卫永 (1982-), 男, 博士, 主要从事钢结构抗火设计与理论研究, (E-mail) wwyong200@yahoo.com.cn。

李国强 (联系人), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事多高层钢结构和钢结构抗火设计与理论研究, (E-mail) gqli@tongji.edu.cn。

钢结构建筑具有许多优点,在建筑中应用越来越广泛。建筑钢材不耐火,在火灾下有很强的非线性<sup>[1]</sup>。无防火保护的钢结构建筑在火灾下很容易达到承载力极限状态而破坏。通常采用防火涂料来提高钢结构的抗火性能,常用的防火涂料有厚型,薄型和超薄型,厚型防火涂料由于价格低,施工方便,耐火性能好等优点而广泛应用。厚型防火涂料与钢材之间的粘结性能较差,容易在外力作用下破坏而剥落,从而部分失去防火保护的作用。所以研究防火涂料部分脱落后钢结构的抗火性能有现实意义。

研究防火涂料破损后钢柱抗火性能的文献不多,李国强等<sup>[2]</sup>采用连续体模型计算了防火涂料局部破损后钢柱的极限承载力;王卫永等<sup>[3]</sup>采用势能驻值原理推到了两端有转动约束的钢柱考虑防火涂料局部破损后的弹性极限承载力。WANG 等<sup>[4]</sup>研究了防火涂料局部破损后固支钢柱的极限承载力,并进行了防火涂料破损后钢柱抗火性能试验<sup>[5]</sup>。钢柱一般会受到轴向约束,李国强等<sup>[6]</sup>对约束钢柱进行了抗火性能试验研究;王培军等<sup>[7]</sup>提出了约束钢柱抗火设计方法。Rodrigues 等<sup>[8]</sup>研究表明忽略高温下钢柱轴向约束的影响会过高的估计钢柱的抗火性能。Valente 和 Neves<sup>[9]</sup>采用有限元方法研究了轴向和转动约束对高温下钢柱临界温度的影响。Huang 和 Tan<sup>[10]</sup>研究了轴向约束和钢材蠕变对临界温度的影响。Wang 和 Davies<sup>[11]</sup>通过试验研究了约束钢柱端部弯矩的变化规律和这种变化对临界温度的影响。Tan<sup>[12]</sup>等通过试验研究了约束钢柱在高温下的反应,结果表明轴向约束和初弯曲能明显降低构件的耐火极限。论文采用分段平衡微分方程,分别推导了两端铰支和固支的钢柱局部防火涂料破损后高温下的挠曲线方程,采用边缘屈服准则得出了局部防火涂料破损后轴向约束钢柱临界温度的计算方法。

### 1 柱的挠曲线方程

计算假定:

- 1)防火涂料的破坏位于柱的两端,并且上下两端对称分布。
- 2)防火涂料破坏部分的柱在火灾下温度均匀分布。
- 3)防火涂料未破坏部分的柱在火灾下温度均匀分布。
- 4)钢柱初弯曲符合正弦或余弦曲线。

设柱高温下的抗弯刚度为  $E_T I$ , 长度为  $l$ , 截面高度为  $h_c$ , 截面面积为  $A$ , 截面模量为  $W$ , 长细比为

$\lambda$ , 每端破损长度为  $l'$ , 轴压荷载为  $P$ 。定义破损长度系数  $\mu$ , 初始弯曲率  $\epsilon$ :

$$\mu = l'/l, \epsilon = a_0/l \tag{1}$$

设钢柱的初始弯曲函数表达式为:

对于两端铰接的柱:

$$y_0 = a_0 \sin(\pi x/l) \tag{2}$$

对于两端刚接的柱:

$$y_0 = \frac{1}{2} a_0 \left( 1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right) \tag{3}$$

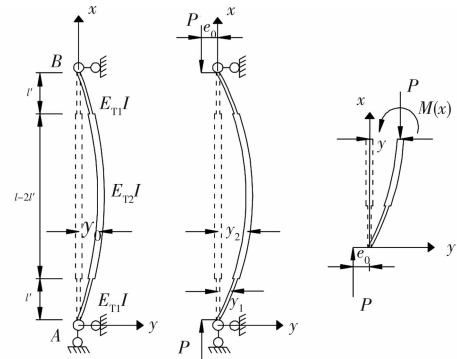
钢柱分析模型见图 1 所示。根据对称性,取柱的下半部分进行分析,设荷载作用下防火涂料破损段柱的挠曲线函数为  $y_1 (0 \leq x \leq l')$ , 中间未破损段的挠曲线函数为  $y_2 (l' \leq x \leq l/2)$  根据平衡条件得:

铰支柱:

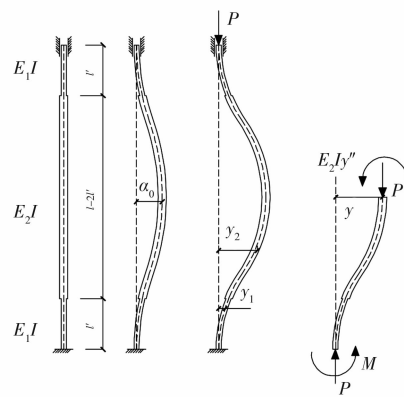
$$\begin{cases} E_{T_1} I (y_1 - y_0)'' + P(y_1 + e_0) = 0 & (0 \leq x \leq l') \\ E_{T_2} I (y_2 - y_0)'' + P(y_2 + e_0) = 0 & (l' \leq x \leq l/2) \end{cases} \tag{4}$$

固支柱:

$$\begin{cases} E_{T_1} I (y_1 - y_0)'' + P y_1 - M = 0 \\ E_{T_1} I (y_2 - y_0)'' + P y_2 - M = 0 \end{cases} \tag{5}$$



(a) 两端铰支柱



(b) 两端固支柱

图 1 钢柱的分析模型

根据端点位移为零、位移、截面和转角连续条件,对称条件,可得边界条件为:

铰支柱:

$$\begin{cases} y_1(0) = 0, y_1(l') = y_2(l') \\ y_1'(l') = y_2'(l'), y_2'(l/2) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

固支柱:

$$\begin{cases} y_1(0) = 0, y_1'(0) = 0 \\ y_1(l') = y_2(l'), y_1'(l') = y_2'(l'), y_2'(l/2) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

令

$$P_{cr1} = \pi^2 E_{T_1} I / l^2, P_{cr2} = \pi^2 E_{T_2} I / l^2,$$

$$\alpha = \sqrt{P/P_{cr1}}, \beta = \sqrt{P/P_{cr2}} \quad (8)$$

解得微分方程的通解为:

铰支柱:

$$\begin{cases} y_1 = C_1 \sin(\alpha\pi x/l) + C_2 \cos(\alpha\pi x/l) + \frac{a_0}{1-\alpha^2} \sin(\pi x/l) \\ y_2 = C_3 \sin(\beta\pi x/l) + C_4 \cos(\beta\pi x/l) + \frac{a_0}{1-\beta^2} \sin(\pi x/l) \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$C_1 = \frac{\{a_0 [1/(1-\beta^2) - 1/(1-\alpha^2)] \sin(\mu\pi)\} [\beta \tan(\beta\pi/2) \cos(\mu\beta\pi) - \beta \sin(\mu\beta\pi)]}{\sin(\mu\alpha\pi) [\beta \tan(\beta\pi/2) \cos(\mu\beta\pi) - \beta \sin(\mu\beta\pi)]} \rightarrow$$

$$\leftarrow \frac{-\{a_0 [1/(1-\beta^2) - 1/(1-\alpha^2)] \cos(\mu\pi)\} [\cos(\mu\beta\pi) + \tan(\beta\pi/2) \sin(\mu\beta\pi)]}{-\alpha \cos(\mu\alpha\pi) [\cos(\mu\beta\pi) + \tan(\beta\pi/2) \sin(\mu\beta\pi)]} \quad (10)$$

$$C_2 = 0 \quad (11)$$

$$C_3 = \frac{\{a_0 [1/(1-\beta^2) - 1/(1-\alpha^2)] \sin(\mu\pi)\} \alpha \cos(\mu\alpha\pi) - \{a_0 [1/(1-\beta^2) - 1/(1-\alpha^2)] \cos(\mu\pi)\} \sin(\mu\alpha\pi) \} \tan(\beta\pi/2)}{\sin(\mu\alpha\pi) [\beta \tan(\beta\pi/2) \cos(\mu\beta\pi) - \beta \sin(\mu\beta\pi)] - \alpha \cos(\mu\alpha\pi) [\cos(\mu\beta\pi) + \tan(\beta\pi/2) \sin(\mu\beta\pi)]} \quad (12)$$

$$C_4 = \frac{\{a_0 [1/(1-\beta^2) - 1/(1-\alpha^2)] \sin(\mu\pi)\} \alpha \cos(\mu\alpha\pi) - \{a_0 [1/(1-\beta^2) - 1/(1-\alpha^2)] \cos(\mu\pi)\} \sin(\mu\alpha\pi) \} \tan(\beta\pi/2)}{\sin(\mu\alpha\pi) [\beta \tan(\beta\pi/2) \cos(\mu\beta\pi) - \beta \sin(\mu\beta\pi)] - \alpha \cos(\mu\alpha\pi) [\cos(\mu\beta\pi) + \tan(\beta\pi/2) \sin(\mu\beta\pi)]} \quad (13)$$

固支柱:

$$\begin{cases} y_1 = C_1 \sin\left(\sqrt{\frac{P}{E_{T_1} I}} x\right) + C_2 \cos\left(\sqrt{\frac{P}{E_{T_1} I}} x\right) + \frac{2a_0 E_{T_1} I \pi^2}{Pl^2 - 4E_{T_1} I \pi^2} \cos \frac{2\pi}{l} x + \frac{M}{P} \\ y_2 = C_3 \sin\left(\sqrt{\frac{P}{E_{T_2} I}} x\right) + C_4 \cos\left(\sqrt{\frac{P}{E_{T_2} I}} x\right) + \frac{2a_0 E_{T_2} I \pi^2}{Pl^2 - 4E_{T_2} I \pi^2} \cos \frac{2\pi}{l} x + \frac{M}{P} \end{cases} \quad (14)$$

其中:

$$C_1 = 0 \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{2a_0(\alpha^2 - \beta^2) \{ \beta \cos(2\mu\pi) \cdot [\cos(\mu\beta\pi) - \cot(0.5\beta\pi) \sin(\mu\beta\pi)] + 2\sin(2\mu\pi) [\sin(\mu\beta\pi) + \cot(0.5\beta\pi) \cos(\mu\beta\pi)] \}}{[(\alpha^2 - 4)(\beta^2 - 4)] \{ \beta \cos(\mu\alpha\pi) [\cos(\mu\beta\pi) - \cot(0.5\beta\pi) \sin(\mu\beta\pi)] + \alpha \sin(\mu\alpha\pi) [\sin(\mu\beta\pi) + \cot(0.5\beta\pi) \cos(\mu\beta\pi)] \}} \quad (16)$$

$$C_3 = \frac{[2\sin(2\mu\pi) \cos(\mu\alpha\pi) - \cos(2\mu\pi) \alpha \sin(\mu\alpha\pi)] 2a_0(\alpha^2 - \beta^2)}{[(\alpha^2 - 4)(\beta^2 - 4)] \{ \beta \cos(\mu\alpha\pi) [\cos(\mu\beta\pi) - \cot(0.5\beta\pi) \sin(\mu\beta\pi)] + \alpha \sin(\mu\alpha\pi) [\sin(\mu\beta\pi) + \cot(0.5\beta\pi) \cos(\mu\beta\pi)] \}} \quad (17)$$

$$C_4 = \frac{[2\sin(2\mu\pi) \cos(\mu\alpha\pi) - \cos(2\mu\pi) \alpha \sin(\mu\alpha\pi)] 2a_0(\alpha^2 - \beta^2) \cot(0.5\beta\pi)}{[(\alpha^2 - 4)(\beta^2 - 4)] \{ \beta \cos(\mu\alpha\pi) [\cos(\mu\beta\pi) - \cot(0.5\beta\pi) \sin(\mu\beta\pi)] + \alpha \sin(\mu\alpha\pi) [\sin(\mu\beta\pi) + \cot(0.5\beta\pi) \cos(\mu\beta\pi)] \}} \quad (18)$$

$$M = \frac{-2a_0 P(\alpha^2 - \beta^2) \{ \beta \cos(2\mu\pi) \cdot [\cos(\mu\beta\pi) - \cot(0.5\beta\pi) \sin(\mu\beta\pi)] \}}{[(\alpha^2 - 4)(\beta^2 - 4)] \{ \beta \cos(\mu\alpha\pi) [\cos(\mu\beta\pi) - \cot(0.5\beta\pi) \sin(\mu\beta\pi)] \}} \dots$$

$$+ \frac{2\sin(2\mu\pi) [\sin(\mu\beta\pi) + \cot(0.5\beta\pi) \cos(\mu\beta\pi)]}{\alpha \sin(\mu\alpha\pi) [\sin(\mu\beta\pi) + \cot(0.5\beta\pi) \cos(\mu\beta\pi)]} - \frac{2a_0 P}{\alpha^2 - 4} \quad (19)$$

假定火灾下不考虑构件截面的塑性发展,常温下钢材的屈服强度为  $f_{y20}$ , 高温下钢材的屈服强度为  $f_{yT}$ , 以柱截面边缘纤维屈服为破坏准则, 则柱达到极限承载力时满足:

铰支柱:

固支柱:

$$\begin{cases} \frac{P}{A} + \frac{Pa_{\max 1}}{W} = f_{yT_1} \\ \frac{P}{A} + \frac{Pa_{\max 2}}{W} = f_{yT_2} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \frac{P}{A} + \frac{M}{W} = f_{yT_1} \\ \frac{P}{A} + \frac{|M - Pa_{\max 1}|}{W} = f_{yT_1} \\ \frac{P}{A} + \frac{|M - Pa_{\max 2}|}{W} = f_{yT_2} \end{cases} \quad (21)$$

式中:

$$\begin{cases} a_{\max 1} = y_1(l') \\ a_{\max 2} = y_2(l/2) \end{cases} \quad (22)$$

根据方程组(20)和(21)可解出  $P$  值,其中  $P$  的最小值就为相应铰支或固支钢柱的极限承载力。

## 2 轴向约束柱的临界温度

对于一个轴向约束柱,如图 2 所示,例如框架柱中的钢柱,在受火的情况下,由于钢材的热膨胀,钢柱的内力会增加。随着温度的升高,钢柱的受热膨胀伸长量可以表示为:

$$\Delta l_{th} = \alpha_T(T_1 - T_0) \times 2l' + \alpha_T(T_2 - T_0) \times (l - 2l') \quad (23)$$

式中:  $\alpha_T$  是钢材的热膨胀系数;  $T_0$  是常温下钢材的温度。

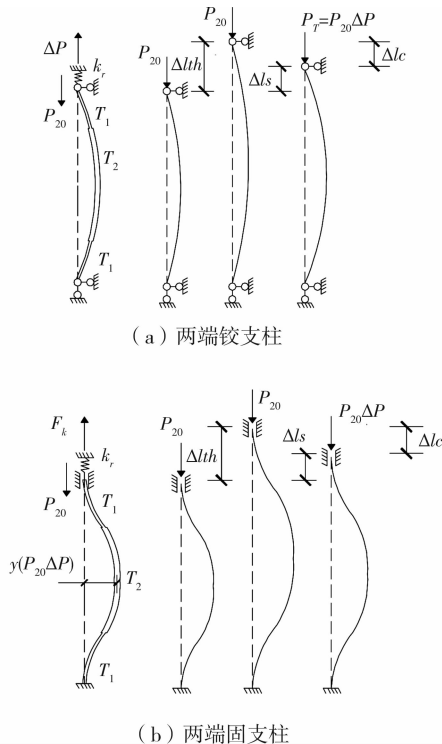


图 2 钢柱的轴向变形示意图

由于内力的增加和高温下钢材弹性模量的降低,钢柱会被轴向压缩,此外,钢柱的挠曲变形也会带来轴向长度的减少,钢柱的总的轴向收缩变形可以表示为:

$$\Delta l_c = \frac{P_T \times 2l'}{E_{T_1} A} + \frac{P_T(l - 2l')}{E_{T_2} A} - \frac{P_{20} l}{E_{20} A} +$$

$$\int_0^{l'} [y_1'(P_T)^2 - y_1'(P_{20})^2] dx + \int_{l'}^{l/2} [y_2'(P_T)^2 - y_2'(P_{20})^2] dx \quad (24)$$

式中:  $P_T$  为在给定的温度下钢柱的内力;  $P_{20}$  是钢柱常温下承载力设计值;  $E_{20}$  是钢材常温下的弹性模量。

代表轴向约束刚度的弹簧由于钢柱内力的增加会被压缩,弹簧的压缩量可以根据胡克定律得到:

$$\Delta l_s = \Delta P / k_r \quad (25)$$

式中:  $\Delta P = P_T - P_{20}$ ;  $k_r$  是钢柱的轴向约束刚度。

根据图 2 中可以得到:

$$\begin{aligned} \alpha_T(T_1 - 20) \times 2l' + \alpha_T(T_2 - 20)(l - 2l') = \\ \frac{P_T - P_{20}}{k_r} + \frac{P_T \times 2l'}{E_{T_1} A} + \frac{P_T(l - 2l')}{E_{T_2} A} - \frac{P_{20} l}{E_{20} A} + \\ \int_0^{l'} [y_1'(P_T)^2 - y_1'(P_{20})^2] dx + \\ \int_{l'}^{l/2} [y_2'(P_T)^2 - y_2'(P_{20})^2] dx \end{aligned} \quad (26)$$

根据上式可以得到约束钢柱在高温下的内力。

随着温度的升高,钢柱的内力增加到钢柱的极限承载力时,钢柱即发生破坏。局部防火涂料破损后钢柱的临界温度定义为防火涂料破损段的温度升高到钢柱的内力达到极限承载力时的温度。

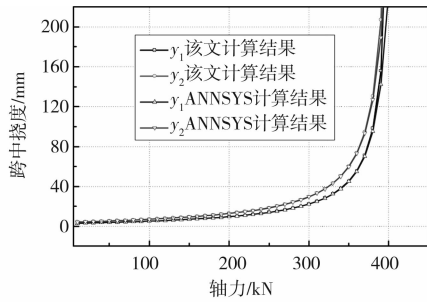
## 3 有限元验证

为了验证上述挠曲线方程的正确性,采用有限元方法进行高温下防火涂料破损后钢柱的挠度分析。钢柱的尺寸为  $H100 \times 100 \times 6 \times 8$ ,长度为 4 m,防火涂料破损长度系数为 0.25,初始弯曲取钢柱长度的 1‰,破损段的温度取  $600^\circ\text{C}$ 。高温下钢材弹性模量的折减系数取现行《建筑钢结构防火技术规范》<sup>[13]</sup> 中的规定。

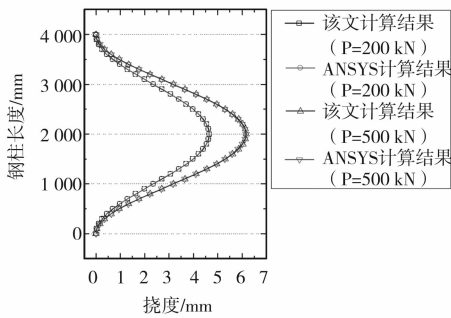
使用文中的公式和有限元方法计算了两端铰支柱的跨中和防火涂料破损界面处的挠度随荷载的变化曲线,见图 3(a)所示。使用文中的公式和有限元分析进行了两端固支柱在不同荷载作用下的挠曲线,计算结果见图 3(b)所示。从图 3 中可以看出,该文的计算结果和有限元吻合较好。

为了验证该文推导的有轴向约束的钢柱内力计算公式,采用有限元对文中推导的轴向位移计算方法进行了验证,分析中采用的钢柱尺寸为:  $H100 \times 100 \times 6 \times 8$ 。长度为  $l = 4$  m,常温下的轴力  $P_{20} = 50$  kN,两端铰支柱的防火涂料破损长度系数为  $\mu = 0.2$ 。两端固支柱的防火涂料破损长度系数为  $\mu = 0.25$ ,钢材的热膨胀系数取  $1.2 \times 10^{-5}$ 。随着温度的升高,轴向位移的计算结果见图 4 所示。从图中可以看出,该文的计算结果和有限元分析结果

吻合较好。

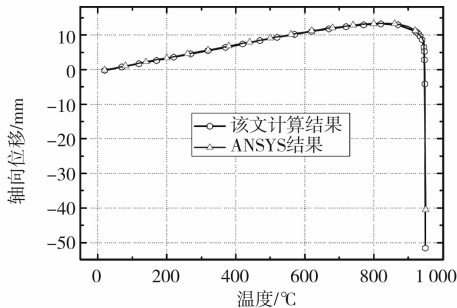


(a) 两端铰支柱

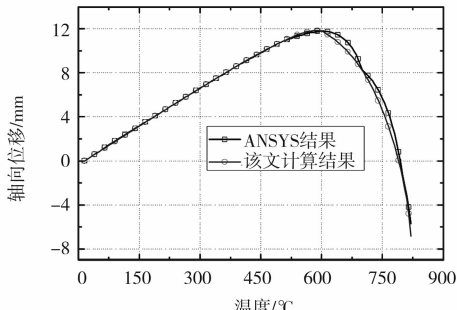


(b) 两端固支柱

图 3 挠曲线的有限元验证



(a) 两端铰支柱



(b) 两端固支柱

图 4 轴向位移的有限元验证

### 4 算例分析

为了说明防火涂料局部破损的轴向约束钢柱的临界温度的计算方法,进行了一个算例分析,使用该文给出的方法计算了两端铰支轴向约束钢柱的内力随温度变化的关系,并计算了该柱的临界温度。

分析中采用的钢柱为  $H100 \times 100 \times 6 \times 8$ , 面积

为  $A=2190 \text{ mm}^2$ , 惯性矩为  $I=383 \text{ cm}^4$ , 截面模量为  $W=76.5 \text{ cm}^3$ , 常温下钢材的弹性模量为  $E_{20}=2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 常温下钢材的屈服强度为  $f_{y20}=235 \text{ MPa}$ , 钢柱的长度为  $l=4 \text{ m}$ , 长细比为 96。防火涂料的厚度取  $30 \text{ mm}$ , 使用《建筑钢结构防火技术规程》中给出的温度计算方法分别计算了防火涂料破损段和未破损段的温度, 见图 5 所示。

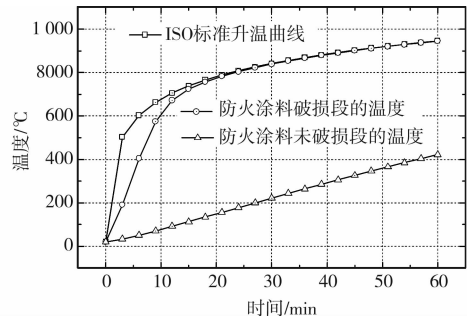
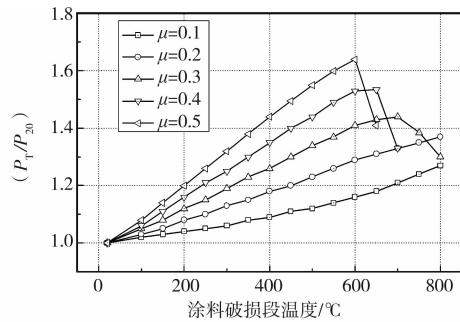


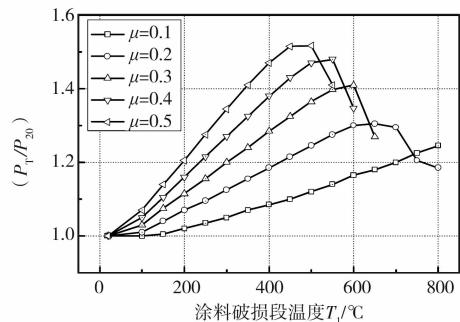
图 5 钢柱的温度

使用文中的方法计算了防火涂料破损段的温度与钢柱内力之间的关系, 见图 6 所示。图中  $\chi$  是钢柱的承载力设计值与截面屈服承载力的比值,  $\zeta$  是轴向约束刚度比, 定义为:

$$\chi = P_{20} / (f_{y20} A), \zeta = k_r / (E_{20} A / l) \quad (27)$$



(a)  $\chi=0.13, \zeta=0.05$



(b)  $\chi=0.26, \zeta=0.02$

图 6 两端铰支柱内力与温度变化之间的关系

根据防火涂料局部破损后钢柱的临界温度的定义, 使用文中的方法计算了钢柱的承载力和轴向约束钢柱的内力随温度的增加值, 从而得到了钢柱的临界温度。计算结果见图 7 所示。

从图 7 中可以看出, 防火涂料局部破损后两端

铰支柱的临界温度随着轴向约束刚度和防火涂料破损长度系数的增加而降低。

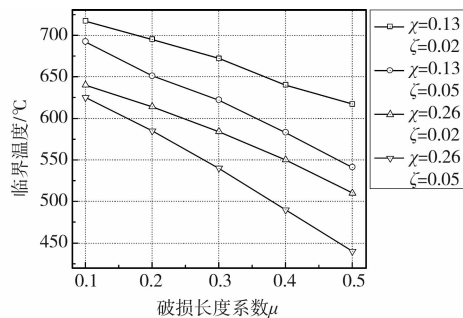


图7 两端铰支柱的临界温度与破损长度的关系

## 5 结论

通过对防火涂料局部破损后钢柱的挠曲线和轴向约束钢柱的位移随温度升高的变化进行计算,得到了轴向约束钢柱的临界温度计算方法。并使用有限元分析对该方法进行了验证,结果吻合较好。此方法可用于评估轴向约束钢柱的抗火性能,可为判别防火涂料的破损是否需要修复提供参考。通过对两端铰支钢柱防火涂料局部破损后在火灾下的内力变化进行分析,得到了临界温度。并得出了以下结论:

1) 火灾下防火涂料局部破损后钢柱的轴向约束会引起钢柱的附加内力,从而较早的达到极限承载力而破坏。

2) 对于火灾下两端铰支的轴向约束钢柱,防火涂料局部破损后,防火涂料的破损长度和轴向约束刚度的大小对钢柱的临界温度产生较大的影响,破损长度越长,轴向约束刚度越大,钢柱的临界温度越低。

### 参考文献:

- [1] LI G Q, JIANG S C, YIN Y Z, et al. Experimental studies on the properties of constructional steel at elevated temperatures [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(12): 1717-1721.
- [2] 李国强,王卫永,陈素文. 火灾下防火涂料破损后钢柱的极限承载力[J]. 工程力学, 2008, 25(12): 1-7.  
LI GUO-QIANG, WANG WEI-YONG, CHEN SU-WEN. Ultimate bearing capacity for steel columns after damage of fire retardant coating in fire[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 1-7.
- [3] 王卫永,李国强,王培军. 火灾下防火涂料破损后约束钢柱的稳定承载力[J]. 力学季刊, 2008, 29(1): 120-126.  
WANG WEI-YONG, LI GUO-QIANG, WANG PEI-JUN. Stable bearing capacity for restrained steel

column after damage of fire retardant coating in fire[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2008; 29(1): 120-126.

- [4] WANG W Y, LI G Q, DAI G X. Fire-resistance study of steel columns with partial fire protection damage[C]// The 5th International Symposium on Steel Structures, Korea. 2009(3): 277-283.
- [5] WANG WY, LI GQ. Behavior of steel columns in a fire with partial damage to fire protection[J]. Journal of constructional steel research. 2009, 65(6): 1392-1400.
- [6] 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.  
LI GUO-QIANG, WANG PEI-JUN, WANG YONG-CHANG. Experimental study on restrained steel column subjected to fire [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 184-190.
- [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.  
WANG PEI-JUN, LI GUO-QIANG, WANG YONG-CHANG. Overall stability design of restrained h-section steel columns under axial load in fire [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(4): 31-36.
- [8] RODRIGUES JPC, NEVES IC, VALENTE JC. Experimental research on the critical temperature of compressed steel elements with restrained thermal elongation[J]. Fire Safety Journal, 2000, 35(2): 77-98.
- [9] VALENTE JC, NEVES IC. Fire resistance of steel columns with elastically restrained axial elongation and bending[J]. Journal of Constructional Steel Research 1999, 52(3): 319-331.
- [10] HUANG Z F, TAN K H. Analytical fire resistance of axially restrained steel columns [J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2003, 129(11): 1531-1537.
- [11] WANG Y C, DAVIES JM. Fire tests of non-sway loaded and rotationally restrained steel column assemblies [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(3): 359-383.
- [12] TAN K H, TOH WS, HUANG Z F, et al. Structural responses of restrained steel columns at elevated temperatures. Part 1: Experiments [J]. Engineering Structures, 2007, 29(8): 1641-1652.
- [13] 中国工程建设标准化协会标准. CECS200-2006 建筑钢结构防火技术规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2006.

(编辑 王秀玲)