



# 约束高强度 Q460 钢梁的抗火性能

何平召, 王卫永

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**为了研究约束高强度 Q460 钢梁的抗火性能,在已有约束钢梁分析理论的基础上,引入残余应力,提出了约束钢梁的抗火性能分析方法,并采用普通强度约束钢梁试验数据对分析方法进行了验证。考虑高强度 Q460 钢材高温下力学性能参数,利用所提出的方法分析了约束高强度 Q460 钢梁的抗火性能,并与普通强度 Q345 钢梁进行了对比。对影响约束高强度 Q460 钢梁的抗火性能参数进行了分析,包括荷载比、残余应力、轴向约束刚度、转动约束刚度和受火方式等。研究表明:所提出的分析方法准确可靠,高强度 Q460 钢梁抗火性能与普通强度钢梁具有较大的区别,高强度 Q460 约束钢梁的抗火性能明显优于普通强度约束钢梁。荷载比、轴向约束刚度、转动约束刚度、受火方式对高强度 Q460 约束钢梁有较大影响。

**关键词:**高强度钢;钢梁;抗火性能

**中图分类号:**TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)02-0052-08

## Fire resistance performance on restrained high strength Q460 steel beams

He Pingzhao, Wang Weiyong

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** In order to study the fire resistance of restrained high strength Q460 steel beam, the residual stresses were introduced to analyze the fire resistance of restrained steel beam. The method was validated by experiment conducted on restrained mild steel beams. Fire resistance of restrained high strength Q460 steel beams was analyzed and compared with that of restrained mild Q345 steel beams and parameters affecting the fire resistance of restrained high strength Q460 steel beams were studied. The parameters included load ratio, residual stress, stiffness of axial restraint, stiffness of rotational restraint and fire exposure mode. The results showed that the innovative method proposed was accurate and reliable; the fire resistance of restrained high strength Q460 steel beam was much better than mild steel beam and the former. Load ratio, stiffness of axial restraint, stiffness of rotational restraint and fire exposure mode had significant influence on fire resistance of restrained Q460 steel beam.

**Key words:** high strength Q460 steel; restrained steel beam; fire resistance

**收稿日期:**2014-12-11

**基金项目:**中央高校基本科研业务费资助(CDJZR12200004、106112013CDJZR200006)

**作者简介:**何平召(1990-),男,主要从事结构抗火性能研究,(E-mail)1260718629@qq.com。

王卫永(通信作者),男,博士,副教授,(E-mail)wywang@cqu.edu.cn。

**Received:**2014-12-11

**Foundation item:** Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (No. CDJZR12200004, 106112013CDJZR200006)

**Author brief:** He Pingzhao (1990-), main research interest: fire resistance of structures, (E-mail)1260718629@qq.com.

Wang Weiyong (corresponding author), PhD, associate professor, (E-mail)wywang@cqu.edu.cn.

独立构件的受力状态及约束条件与整体结构中的构件有很大不同。在钢结构火灾中发现<sup>[1]</sup>,由于结构中的梁受到周围构件的约束,结构中的梁比独立梁具有更好的抗火性能。近年来,不少学者开展了约束钢梁的抗火性能研究,其中 Liu 等<sup>[2]</sup>做了一系列约束 S275 钢梁的试验研究,考虑了荷载比、转动约束刚度和轴向约束刚度对约束钢梁的影响,研究表明约束钢梁的抗火性能优于一般的独立梁。Li 等<sup>[3]</sup>做了 2 根考虑升温 and 降温段的约束 Q345 钢梁的受力性能试验,也发现约束钢梁的抗火性能与单独的钢梁有很大不同,并且还发现梁端的局部屈曲对约束钢梁的轴力有很大影响。Yin 等<sup>[4-5]</sup>对约束钢梁的悬链线效应进行了研究,提出了温度均匀分布和不均匀分布时考虑悬链线效应的简化计算方法。Li 等<sup>[6]</sup>建立了约束钢梁在升温段和降温段全过程的分析方法,与试验结果吻合较好。但上述两种方法均未考虑残余应力的影响。Dawikat 等<sup>[7]</sup>根据平衡和相容原则,提出了约束钢梁考虑端部约束、连接构造、温度梯度等因素的分析方法,计算结果和 ANSYS 有限元计算吻合较好。虽然已对各种普通强度钢梁的抗火性能进行了大量研究,但对约束高强度钢梁的研究还比较少。由于高温下高强 Q460 钢材的强度和刚度折减系数与普通强度钢材有一定的差异<sup>[8]</sup>,且高强 Q460 钢在建筑中的应用越来越广泛,因此,有必要对约束高强度 Q460 钢梁的抗火性能进行研究。王卫永等<sup>[9-10]</sup>采用临界应力法对 Q460 高强度钢梁与普通强度钢梁的抗火性能进行了比较,发现高强度钢梁的抗火性能与普通强度钢梁有较大差异。

笔者在已有分析理论的基础上,在钢梁截面中考虑了残余应力分布,提出了约束钢梁抗火性能分析方法,采用试验数据验证了该方法的可靠性。利用所提出的方法分析了约束高强度 Q460 钢梁的抗火性能,并和相同条件下的普通 Q345 钢梁进行了对比。最后,对影响约束高强度 Q460 钢梁的抗火性能参数进行了分析,包括荷载比、残余应力模式、轴向和转动约束刚度、受火模式等。

## 1 高强 Q460 钢高温力学性能

目前的主要结构抗火规范,例如欧洲钢结构规范 EC3<sup>[11]</sup>以及《建筑钢结构防火技术规范》(CECS 200 : 2006)<sup>[12]</sup>等,给出的钢材的高温材料特性主要是针对普通结构钢材。刘兵<sup>[8]</sup>对中国产高强度 Q460 钢材的高温材料特性进行了试验研究,采用恒温加载的方式进行了拉伸试验,测量了 Q460 钢材高温下的

屈服强度和抗拉强度。并采用动态法测量了高温弹性模量。每个温度下,测量了 3 个试件,取其平均值作为代表值,在试验数据的基础上,拟合了高温屈服强度和弹性模量的降低系数,表达式分别为

$$\frac{f_{yT}}{f_y} = -5.589 \times 10^{-14} T^5 + 1.379 \times 10^{-10} T^4 - 1.2126 \times 10^{-7} T^3 + 4.180 \times 10^{-5} T^2 - 4.67 \times 10^{-3} T + 1.068 \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$\frac{E_T}{E} = -1.384 \times 10^{-9} T^3 + 7.404 \times 10^{-7} T^2 - 3.686 \times 10^{-4} T + 1.011 \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (2)$$

式中: $f_{yT}$ 为高温下的屈服强度,MPa; $f_y$ 为常温下的屈服强度,MPa; $E_T$ 为高温下的弹性模量,MPa; $E$ 为常温下的弹性模量,MPa; $T$ 为钢材的温度, $^\circ\text{C}$ 。

刘兵<sup>[8]</sup>试验得到的 Q460 钢材的屈服强度和弹性模量折减系数与 EC3 以及《建筑钢结构防火技术规范》(CECS 200 : 2006)给出的折减系数的比较如图 1、2 所示。从图中可以看出,温度小于  $200^\circ\text{C}$  时, Q460 钢材的屈服强度有所降低。温度在  $200 \sim 800^\circ\text{C}$  时, Q460 钢材的屈服强度折减系数高于 EC3 以及 CECS 200 : 2006。当温度大于  $300^\circ\text{C}$  时, Q460 弹性模量折减系数相对 EC3 以及 CECS 200 : 2006 明显提高。总体而言, Q460 钢材的高温力学性能比普通钢材的力学性能好,如果仍采用普通结构钢的高温材料参数分析高强度 Q460 钢结构的抗火性能,结果就会过于保守。

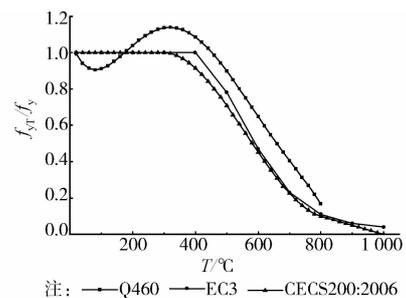


图 1 屈服强度折减系数对比

Fig. 1 Comparison of reduction factor of yield strength

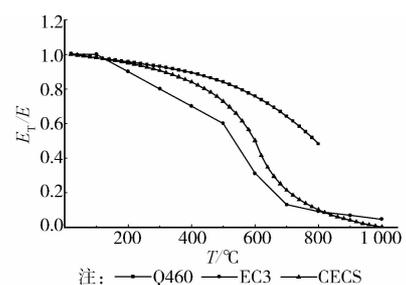


图 2 弹性模量折减系数对比

Fig. 2 Comparison of reduction factor of elastic modulus

## 2 约束钢梁分析方法

典型的约束钢梁力学模型如图 3 所示。 $K_{a1}$  和  $K_{a2}$  分别为梁两端的轴向约束刚度。 $K_r$  为梁两端的转动约束刚度。

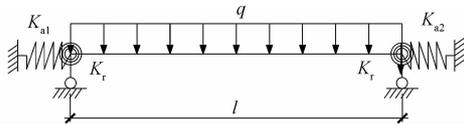


图 3 约束钢梁分析模型

Fig. 3 Analytical model of restrained steel beam

一般情况下的三面受火工字型钢梁,可以认为梁内温度沿梁长度方向均匀分布,腹板和下翼缘的温度为  $T_b$ ,上翼缘温度为  $T_t$ 。截面尺寸为  $h \times b \times t_w \times t_f$ 。由于结构中钢梁上翼缘有楼板的支撑,不考虑整体失稳。主要计算步骤为:

1) 把截面分成 2 部分。上翼缘为一部分,截面形状系数为  $(b + 2t_f)/(bt_f)$ 。腹板和下翼缘为一部分,截面形状系数为  $(2h + 2b - 2t_f - t_w)/[bt_f + (h - 2t_f)t_w]$ 。分别计算出钢梁 2 个组件在 ISO-834 标准空气升温下的温度曲线。

2) 给出钢梁在某一时刻的跨中挠度试算值  $\delta$ (该时刻的第 1 次试算值可取上一时刻的计算结果)。

3) 计算钢梁在该挠度下的附加轴力  $N$

$$N = \Delta l K_{e,a} \quad (3)$$

式中: $\Delta l$  为梁端总的水平位移,取值为: $\Delta l = \alpha_s l (T - T_0) - \lambda \frac{\delta^2}{l}$ ;  $\alpha_s$  为钢材热膨胀系数; $T$  为钢梁截面平均温度; $T_0$  为钢梁受火前初始温度; $l$  为钢梁跨度; $\lambda$  为与钢梁变形曲线有关的系数。 $K_{e,a}$  为梁的有效轴向刚度,取值为:

$$K_{e,a} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_{a1}} + \frac{1}{K_{bt}} + \frac{1}{K_{a2}}\right)}$$

$K_{a2}$  分布为梁两端的轴向约束刚度; $K_{bt}$  为梁自身的轴向刚度。

4) 求出梁端部的曲率  $\varphi_{end}$  以及跨中的曲率  $\varphi_{mid}$ 。假设梁大变形的挠曲线  $f_m(x)$  与弹性状态下的形状相似。曲率计算公式为:

$$\varphi = \varphi_m + \varphi_T = \frac{d^2 f_m(x)}{dx^2} + \frac{K_{e,r}}{E_T} \frac{\alpha_s (T_b - T_t)}{h} \quad (4)$$

式中: $K_{e,r}$  为梁的等效转动约束刚度; $I$  为截面的惯性矩。

5) 计算端部弯矩  $M_{end}$  以及跨中弯矩  $M_{mid}$ 。为了考虑残余应力,把梁的截面按一定的间距分成多个

单元,如图 4 所示。钢材高温下的应力应变关系采用理想的弹塑性模型,如图 5 所示。程序采用的残余应力分布模式如图 6 所示。任意单元  $i$  点处的应力和应变分别为  $\epsilon_i, \sigma_i$ ;残余应力为  $\sigma_{rc,i}$ ;面积为  $A_i$ ;与形心的  $y$  向距离为  $y_i$ ;  $\epsilon_0$  为外力引起的形心应变;截面面积为  $A$ 。该步骤的计算流程如图 7 所示。

6) 计算约束钢梁大变形下的平衡方程

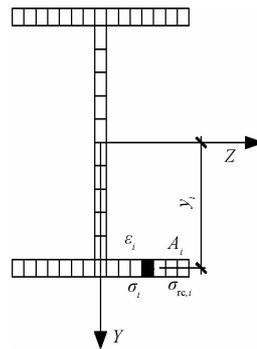


图 4 截面网格划分  
Fig. 4 Mesh of section

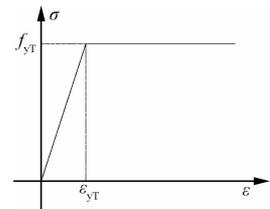


图 5 钢材高温下的应力应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationship of steel at elevated temperature

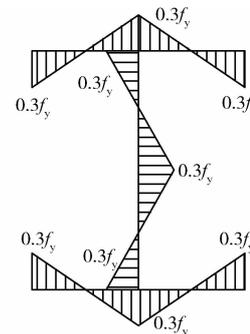


图 6 残余应力分布模式

Fig. 6 Residual stress distribution

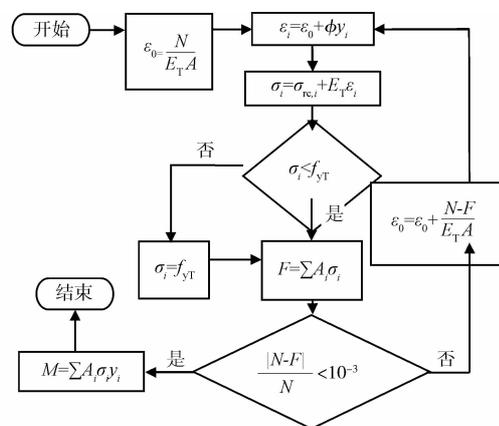


图 7 考虑残余应力后弯矩计算流程图

Fig. 7 Flow chart of moment calculation after taking residual stress into consideration

$$M_{\text{end}} + M_{\text{mid}} - M_{\text{eff}} - N\delta = 0 \quad (5)$$

式中:  $M_{\text{eff}}$  为外荷载对梁端的弯矩;  $N$  为轴力。

若满足平衡, 则  $\delta$  为该时刻下的跨中挠度; 若不满足, 对挠度  $\delta$  增加一微小值  $\Delta\delta$  (综合考虑计算时间和计算精度两个因素,  $\delta$  可取 0.1 mm), 重复 2) 到 6), 直到满足平衡条件。

通过以上步骤, 可以求出任一时刻的跨中挠度  $\delta$ 、轴力  $N$ 、端部弯矩  $M_{\text{end}}$  和跨中弯矩  $M_{\text{mid}}$ 。这样, 就可以求出约束钢梁在考虑残余应力时随温度变化的结构响应。

### 3 方法验证

为了验证该分析方法的正确性, 采用所提出的方法计算了文献[3]中的试验试件在火灾下的结构反应, 并与试验数据进行了对比。文献[3]中介绍了 2 根 Q345 约束钢梁的抗火试验。约束梁截面均为  $H250 \times 250 \times 8 \times 12$ , 加载方式为两点集中加载, 荷载均为 130 kN, 受火方式为三面受火。经计算, 试件 1 轴向约束刚度和转动约束刚度分别为 39.54 kN/mm 和  $1.09 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 。试件 2 轴向约束刚度和转动约束刚度分别为 68.3 kN/mm 和  $1.13 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 。试验测得 Q345 钢材常温下的屈服强度为 331 MPa, 高温下的屈服强度和弹性模量折减系数按照 EC3<sup>[11]</sup> 取值, 应力应变关系曲线按照图 5 的简化双折线模型, 残余应力分布模式按照图 6 的分布取值。

假设梁的变形形状与弹性状态下相似。可以计算出其挠曲线方程为

$$f(x) = \frac{\frac{\delta}{l^3} \left[ \frac{x^3}{6} - u \frac{x^2 l}{9} + (u-1) \frac{l^2 x}{9} \right]}{\left( \frac{23}{648} - \frac{u}{36} \right)}$$

$$0 \leq x \leq \frac{l}{3} \quad (6)$$

$$f(x) = \frac{\frac{\delta}{l^3} \left[ \left( \frac{1}{6} - \frac{u}{9} \right) x^2 l + \left( \frac{u}{9} - \frac{1}{6} \right) x l^2 + \frac{l^3}{162} \right]}{\left( \frac{23}{648} - \frac{u}{36} \right)}$$

$$\frac{l}{3} < x \leq \frac{l}{2} \quad (7)$$

$$u = \frac{k_r}{(k_r + 2EI/l)} \quad (8)$$

采用该方法计算挠度和轴力随温度的变化曲线与试验结果对比如图 8、9 所示。从图中可以看出, 该方法与试验结果吻合较好。跨中挠度在升温的前半部分吻合很好, 在 600 °C 以后, 挠度变化加快, 由于试

验中加载存在滞后现象, 所以, 试验挠度比计算值偏小。在挠度较小的时候, 附加轴力主要是由于钢梁的热膨胀引起的, 附加轴力大小为端部位移与约束刚度的乘积。从图 8(b) 和图 9(b) 还可以看出, 附加轴力在升温初期比较接近, 随着轴力的增加, 约束构件提供的轴向约束刚度会降低。所以, 试验的附加轴力随温度的变化率逐渐降低。随着挠度的增加, 挠度对端部轴向位移的影响增加, 进而影响到约束钢梁的附加轴力。

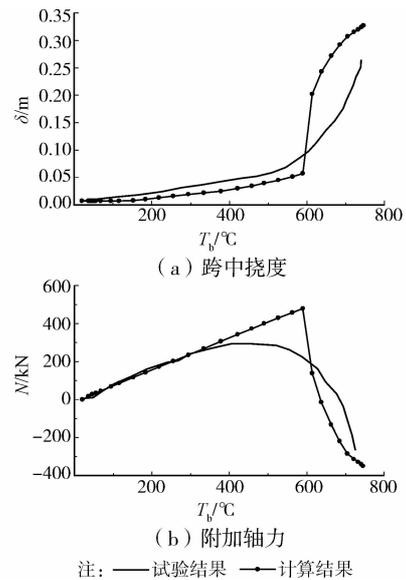


图 8 试件 1 计算结果和试验结果对比  
Fig. 8 Comparison between calculation result and test data of specimen 1

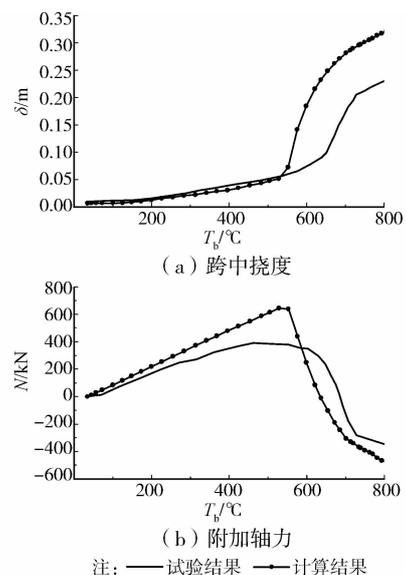


图 9 试件 2 计算结果和试验结果对比  
Fig. 9 Comparison between calculation result and test data of specimen 2

## 4 高强 Q460 钢梁和普通 Q345 钢梁 抗火性能对比

为了对比高强度 Q460 约束钢梁和普通 Q345 约束钢梁抗火性能的差异。设计了 2 根截面尺寸为  $\text{HN}400 \times 200 \times 8 \times 13$ , 作用均布荷载, 荷载比  $R$  (实际作用荷载与梁在常温下屈服荷载的比值) 为 0.5 的钢梁。高强 Q460 钢材高温材性采用刘兵<sup>[8]</sup> 试验拟合公式, Q345 钢材高温材性采用 EC3<sup>[11]</sup> 参数, 钢梁跨度为 5 m, 考虑三面受火模式, 残余应力分布模式如图 6 所示, 轴向约束刚度为  $0.3EA/l$ , 转动约束刚度为  $EI/l$ 。计算在 ISO834 标准升温条件下约束钢梁的结构响应。

计算得到高强 Q460 钢梁和普通 Q345 钢梁的跨中挠度和附加轴力随下翼缘温度的变化曲线如图 10 所示。从图中可以看出, 温度较低时, 由于 Q460 钢与 Q345 钢在常温下的弹性模量相等, 而屈服强度相差较大, 在相同条件下 Q460 钢梁的荷载大于 Q345 钢梁的荷载, 因此, Q460 钢梁挠度大于 Q345 钢梁。但由于 Q460 钢的屈服强度高, 能承受的轴力大, 因此屈服较晚。在钢梁截面完全屈服后,  $M_{\text{end}} + M_{\text{mid}} = 0$ , 根据式(7), 平衡条件变成  $M_{\text{eff}} + N\delta = 0$ 。相同荷载比下 Q460 钢梁与 Q345 钢梁的外荷载对梁端产生的弯矩  $M_{\text{eff}}$  之比等于其屈服强度之比。而由于 Q460 钢材具有更好的高温力学性能, 所以, Q460 钢梁与 Q345 钢梁的轴力  $N$  之比大于其屈服强度之比, 因此, Q460 钢梁的挠度小于 Q345 钢梁。总体而言, 在相同条件下, 约束 Q460 钢梁比 Q345 钢梁具有更好的抗火性能。在挠度达到  $l/20$ , 即发生弯曲破坏的时候, Q460 钢梁的临界温度比 Q345 钢梁高  $50^\circ\text{C}$  左右。

## 5 参数分析

### 5.1 荷载比

为了研究荷载比对高强 Q460 约束钢梁的影响, 对一组不同荷载比的约束钢梁进行了分析。梁截面为  $\text{HN}400 \times 200 \times 8 \times 13$ , 轴向约束刚度为  $0.3EA/l$ , 转动约束刚度为  $EI/l$ , 跨度为 5 m, 考虑三面受火, 残余应力最大值为 0.5 倍屈服强度, 分布模式如图 6。作用均布荷载, 荷载比  $R$  分别为 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9。

计算得到该组钢梁的跨中挠度、附加轴力随温度的变化曲线如图 11 所示。从图中可以看出, 荷载比对约束高强度 Q460 钢梁升温中挠度变化的整个过程都有影响, 荷载比越大, 约束梁的跨中挠度越

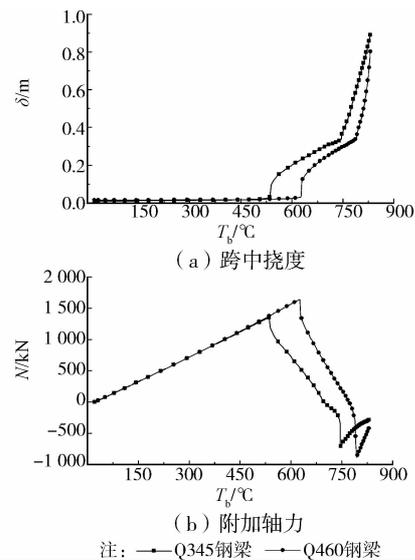


图 10 高强 Q460 钢梁和普通 Q345 钢梁抗火性能对比  
Fig. 10 Comparison of fire resistance between restrained Q460 and Q345 steel beam

大, 越早屈服。在温度较低时, 荷载比对梁内附加轴力影响较小。但荷载比越小, 梁屈服时的温度越高, 相邻荷载比钢梁屈服时温度相差约  $30^\circ\text{C}$ 。轴向膨胀变形越大, 因此附加轴向压力越大, 相差约 100 kN。当挠度达到  $l/20$  的时候, 临界温度相差约  $30^\circ\text{C}$ 。因此, 较高的荷载比不利于发挥约束梁高温下的承载能力。

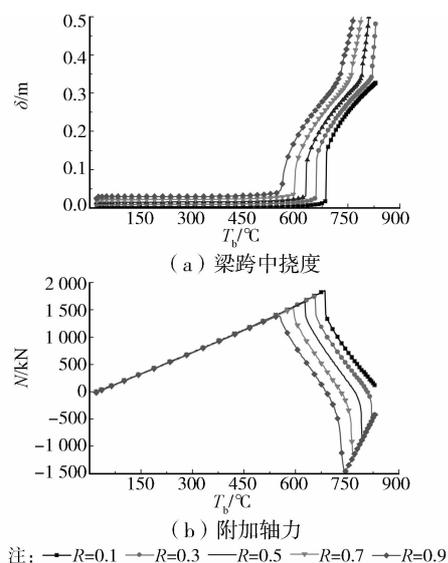


图 11 荷载比对约束高强 Q460 钢梁抗火性能的影响  
Fig. 11 Effect of load ratio on fire resistance of restrained Q460 steel beam

### 5.2 残余应力

为了分析残余应力对约束 Q460 钢梁的影响, 考虑了 2 种不同的残余应力分布模型, 每种模型考

虑了 2 种不同的残余应力峰值模式,分别为 0.3 和 0.6 倍屈服强度,如图 12 所示。约束钢梁截面为 HN400×200×8×13,轴向约束刚度为  $0.3EA/l$ ,转动约束刚度为  $EI/l$ ,三面受火,作用均布荷载,荷载比  $R$  为 0.5。

分析得到该组梁的跨中挠度、附加轴力随下翼缘的温度变化曲线如图 13 所示。在温度约 550 °C 到 650 °C 之间时,考虑残余应力的约束梁的挠度稍大于不考虑残余应力的梁,这是由于残余应力会导致约束梁提前屈服,挠度变大。残余应力越大,挠度越大。残余应力分布模式对约束钢梁基本没有影响。残余应力的大小和分布模式对附加轴力基本没有影响。在截面完全屈服后,悬链线效应对梁起主要控制作用,残余应力对梁没有影响。

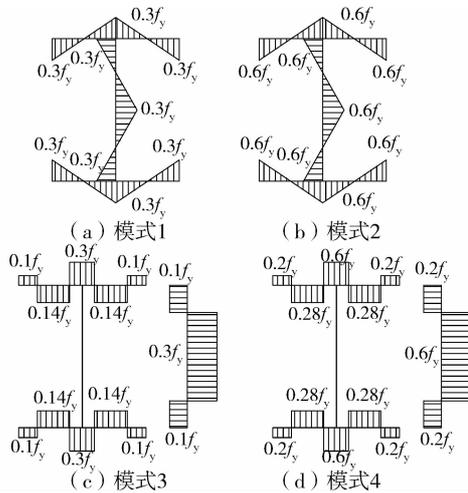
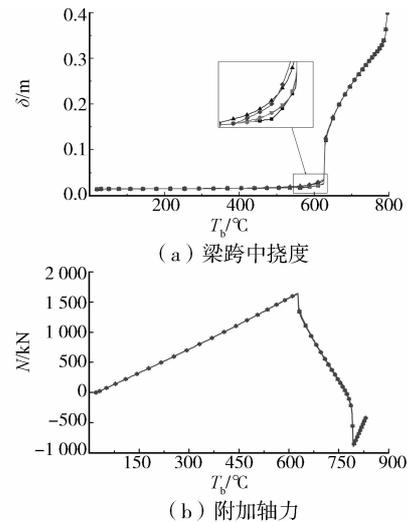


图 12 残余应力分布模式  
Fig. 12 Modes of residual stress distribution

### 5.3 轴向约束刚度

为了分析轴向约束刚度对高强 Q460 约束钢梁的影响。考虑了一组不同轴向约束刚度的约束钢梁。约束钢梁截面为 HN400×200×8×13,转动约束刚度  $EI/l$ ,三面受火,作用均布荷载,荷载比  $R$  为 0.5,残余应力最大值为 0.5 倍屈服强度,轴向约束刚度  $K_{a}$  为  $0.05EA/l$ 、 $0.1EA/l$ 、 $0.3EA/l$ 、 $0.5EA/l$  和  $1.0EA/l$ 。

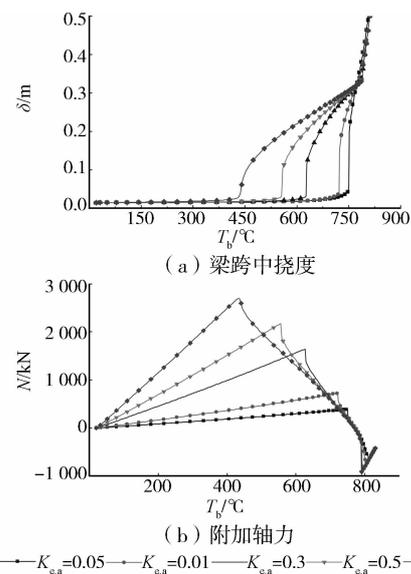
分析得到该组约束 Q460 钢梁的跨中挠度、附加轴力随下翼缘温度的变化曲线如图 14 所示。从图中可以看出,轴向约束刚度越大,约束梁在屈服后的挠度、附加轴力也越大,但在截面完全屈服后,挠度和附加轴力趋于一致。在截面完全屈服前,附加轴力主要是有效轴向刚度和两端水平位移的乘积,轴向约束刚度越大,有效轴向刚度越大,附加轴力就越大,梁也就越早屈服,变形也就越大。当梁全截面



注: —无残余应力 —模式1 —模式2 —模式3 —模式4

图 13 残余应力对 Q460 约束钢梁抗火性能的影响  
Fig. 13 Effect of residual stress on fire resistance of restrained Q460 steel beam

屈服时,轴力趋于一致,由平衡方程可知,挠度也就趋于一致。总体而言,轴向约束刚度对高强 Q460 约束钢梁有很大的影响。例如,轴向约束刚度为  $0.1EA/l$  以及  $0.3EA/l$  时,屈服温度相差约 100 °C,最大轴力相差约 900 kN。在截面完全屈服后,悬链线效应对梁起主要控制作用,轴向刚度对梁结构响应几乎没有影响。



注: — $K_{c,a}=0.05$  — $K_{c,a}=0.01$  — $K_{c,a}=0.3$  — $K_{c,a}=0.5$  — $K_{c,a}=1.0$

图 14 轴向约束刚度对 Q460 约束钢梁抗火性能的影响  
Fig. 14 Effect of axial restraint on fire resistance of restrained Q460 steel beam

### 5.4 转动约束刚度

为了分析转动约束刚度对高强 Q460 约束钢梁

的影响。考虑了一组不同转动约束刚度的约束钢梁。约束钢梁截面为  $\text{HN}400 \times 200 \times 8 \times 13$ , 轴向约束刚度  $K_a$  为  $0.3 EA/l$ , 三面受火, 作用均布荷载。由于转动约束刚度会影响约束梁在常温下的承载力, 采用荷载均为  $100 \text{ kN/m}$ , 残余应力最大值为  $0.5$  倍屈服强度, 转动约束刚度  $K_r$  分别为无约束、 $0.1EI/l$ 、 $1.0EI/l$  以及完全约束。

分析得到该组钢梁的跨中挠度和附加轴力随下翼缘温度的变化曲线如图 15 所示。从该图可以看出, 在温度较低时, 转动刚度越大, 挠度越小, 附加轴力产生的弯矩也就越小, 因此梁屈服较晚, 最大轴向压力越大。在挠度突然变大后, 转动刚度越大, 挠度越小。当转动约束刚度超过  $EI/l$  时, 转动约束刚度对约束梁的影响很小。大挠度下, 无约束和完全约束在挠度相同时的温差最大不超过  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。截面完全屈服后, 悬链线效应对梁起主要控制作用, 转动约束刚度对梁基本没有影响。转动约束刚度在达到一定水平后(这里为  $EI/l$ ), 影响就很小。

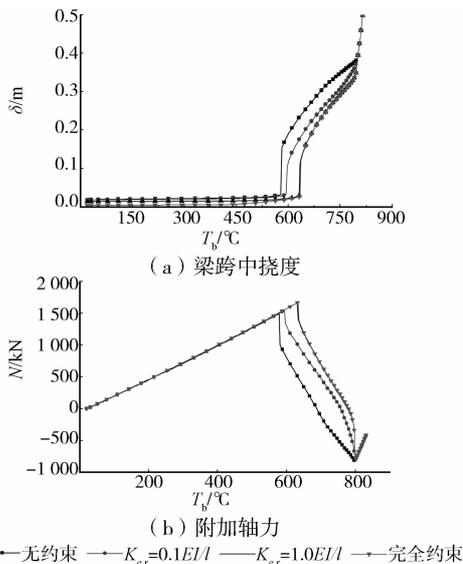


图 15 转动约束刚度对 Q460 约束钢梁抗火性能的影响  
Fig. 15 Effect of rotational resistance of restrained Q460 steel beam

### 5.5 受火方式

钢梁在火灾中有三面受火和四面受火 2 种方式。三面受火时, 上翼缘温度低于腹板及下翼缘温度。四面受火时, 截面温度均匀分布。对两根不同受火方式的 Q460 约束钢梁进行分析, 梁截面为  $\text{HN}400 \times 200 \times 8 \times 13$ , 轴向约束刚度  $0.3EA/l$ , 转动约束刚度为  $EI/l$ , 作用均布荷载, 荷载比  $0.5$ , 残余应力最大值为  $0.5$  倍屈服强度。

分析得到该组约束钢梁的跨中挠度、附加轴力

随温度的变化曲线如图 16 所示。由于四面受火钢梁的上翼缘温度高于三面受火钢梁的上翼缘温度, 所以, 在下翼缘温度相同的情况下, 四面受火的截面平均温度高于三面受火。在梁开始屈服前, 四面受火的附加轴力大于三面受火, 因此, 四面受火的约束梁比三面受火先屈服, 温度相差约  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。并且, 四面受火时整个梁的高温刚度小于三面受火, 所以其挠度大。

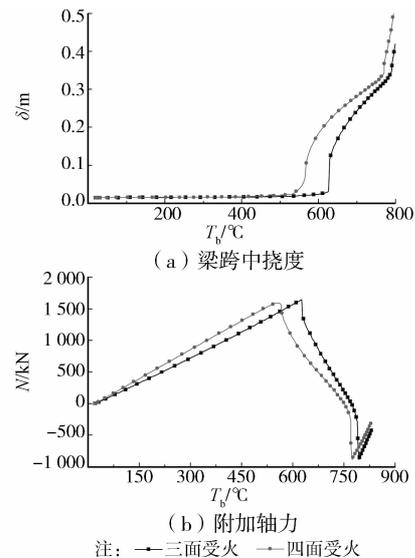


图 16 受火方式对 Q460 约束钢梁抗火性能的影响  
Fig. 16 Effect of fire exposure mode on fire resistance of restrained Q460 steel beam

## 6 结论

在已有约束钢梁分析理论的基础上, 考虑了残余应力的影响, 对已有分析方法进行了改进。通过与试验结果对比, 验证了该方法的可靠性。采用 Q460 钢材高温材料特性, 对 Q460 约束钢梁进行了抗火分析, 并与相同条件下的普通强度约束钢梁的抗火性能进行了比较。最后对影响高强度 Q460 约束钢梁的抗火性能的因素进行了参数分析, 通过研究, 得到以下主要结论:

- 1) 高强度 Q460 约束钢梁比普通 Q345 约束钢梁具有有更好的抗火性能。相同条件下 Q460 的破坏温度高  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  左右。
- 2) 轴向约束刚度和转动约束刚度对高强 Q460 约束钢梁有较大影响。其中轴向约束刚度影响更加明显, 而转动约束刚度在达到一定水平后(这里大概为  $EI/l$ ), 约束刚度的变化对 Q460 约束梁的影响变小。
- 3) 截面残余应力大小和分布模式对 Q460 约束钢梁的影响较小, 可忽略不计。

4)受火方式对高强 Q460 约束梁的影响比较大,相同条件下的三面受火的破坏温度比四面受火高 100 °C 左右。

5)荷载比对高强 Q460 约束梁的影响很明显,为了提高其抗火性能,不宜采用过大的荷载比。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Liu T C H, Fahad M K, Davies J M. Experimental investigation of behavior of axially restrained steel beams in fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(9): 1211-1230.
- [3] Li G Q, Guo S X. Experiment on restrained steel beams subjected to heating and cooling [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(3): 268-274.
- [4] Yin Y Z, Wang Y C. Analysis of catenary action in steel beams using a simplified hand calculation method, Part 1: theory and validation for uniform temperature distribution [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(2): 183-211.
- [5] Yin Y Z, Wang Y C. Analysis of catenary action in steel beams using a simplified hand calculation method, Part 2: validation for non-uniform temperature distribution [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(2): 213-234.
- [6] Li G Q, Guo S X. Analysis of restrained steel beams subjected to heating and cooling part 1: Theory [J]. Steel and Composite Structures, 2008, 8(1): 1-18.
- [7] Dwaikat M M S, Kodur V K R. A performance based methodology for fire design of restrained steel beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3): 510-524.
- [8] 刘兵. 高强度结构钢轴心受压构件抗火性能研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
- [9] 王卫永,周一超,于宝林,等. 高强度 Q460 钢梁抗火性能研究( I )-理论分析 [J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(3): 64-71.  
Wang W Y, Zhou Y C, Yu B L, et al. Fire resistance analysis of high strength Q460 steel beams-part1: theoretical analysis [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(3): 64-71. (in Chinese)
- [10] 王卫永,周一超,于宝林,等. 高强度 Q460 钢梁抗火性能研究( II )-有限元验证 [J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(3): 72-79.  
Wang W Y, Zhou Y C, Yu B L, et al. Fire resistance analysis of high strength Q460 steel beams-part2: theoretical validation [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(3): 72-79. (in Chinese)
- [11] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1. 1: General rules and rules for buildings [S]. BS EN1993-1-1, Brussels, Belgium, 2005.
- [12] CECS 200 : 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 胡英奎)

(上接第 27 页)

- Tan L R. Discussion on mechanism of disintegration and argillitization of clay-rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(1): 1-5. (in Chinese)
- [13] 余宏明,胡艳欣,张纯根. 三峡库区巴东地区紫红色泥岩的崩解特性研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(4): 77-80.  
Yu H M, Hu Y X, Zhang C G. Research on disintegration characters of red mudstone of Xirangpo in Badong area of the reservoir of three gorge project [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(4): 77-80. (in Chinese)
- [14] 吴道祥,刘宏杰,王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(Sup2): 4173-4179.  
Wu D X, Liu H J, Wang G Q. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup2): 4173-4179. (in Chinese)
- [15] Erguler Z A, Shakoor A. Relative contribution of various climatic processes in disintegration of clay-bearing rocks [J]. Engineering Geology, 2009, 108: 36-42. (in Chinese)
- [16] Walsri C, Sriapai T, Phueakphum D, et al. Simulation of sandstone degradation using large-scale slake durability index testing device [J]. Songklanakarin Journal of Science and Technology, 2012, 34(5): 587-596.

(编辑 王秀玲)