

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240705003

高强钢约束柱受火后剩余承载性能实用评估方法*

宋林昕^{1,2}, 李国强^{2,3}, Wang Y C⁴

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092;
3. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092;
4. School of Engineering, University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK)

摘要: 确定高强钢约束柱受火后剩余承载性能是高强钢结构受火后安全评估的关键。采用经验证的有限元模型对高强钢约束柱受火后剩余承载性能进行了系统的参数分析, 考虑了最高过火温度、长细比、轴向约束刚度比、转动约束刚度比、荷载比、荷载偏心率以及高强钢强度等级与交货状态的影响。结果表明: 当约束钢柱的最高过火温度小于最大轴向承载力温度时, 受火升降温过程对剩余承载力的影响很小, 此后剩余承载力随最高过火温度的增大而减小; 在一定情况下, 中长细比约束钢柱受火后剩余承载力的折减程度更严重, 剩余承载力的折减程度随轴向约束刚度比、荷载比、荷载偏心率的增大而减小; 转动约束刚度比通过影响钢柱的长细比而影响剩余承载力; QT型Q890高强钢约束柱受火后剩余承载力的折减程度通常最小。结合参数分析结果与现行标准规定, 提出了高强钢约束柱受火后剩余承载性能实用评估方法, 包括高强钢约束柱受火后剩余承载力简化计算方法以及高强钢约束柱受火后可继续使用的条件与分级。

关键词: 高强钢约束柱; 受火后; 剩余承载性能; 参数分析; 实用评估方法

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1098-12

Practical Assessment Method for Post-fire Residual Bearing Capacity of Restrained High Strength Steel Columns

SONG Linxin^{1,2}, LI Guoqiang^{2,3}, Y C Wang⁴

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
4. School of Engineering, University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK)

Abstract: Determining the post-fire residual bearing capacity of restrained high strength steel columns is crucial for the post-fire safety assessment of high strength steel structures. A validated finite element model was used to conduct a systematic parametric analysis of the post-fire residual bearing capacity of restrained high strength steel columns, considering the effects of maximum fire temperature, slenderness ratio, axial restraint stiffness ratio, rotational restraint stiffness ratio, load ratio, load eccentricity, and high strength steel grade and manufacturing process. The results showed that when the maximum fire temperature of the restrained steel column was lower than the temperature corresponding to its

* 收稿日期: 2024-07-05; 修回日期: 2024-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878506)资助

作者简介: 宋林昕(1996—), 女, 副教授, 硕导, 博士。主要从事钢结构抗火研究。E-mail: linlinslx@fzu.edu.cn

通信作者: 李国强(1963—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事多高层钢结构、钢结构抗震、钢结构抗火研究。

E-mail: gqli@tongji.edu.cn

maximum axial bearing capacity, the heating and cooling process during the fire had little effect on the residual bearing capacity. Beyond this point, the residual bearing capacity decreased as the maximum fire temperature increased. Under certain circumstances, restrained steel columns with medium slenderness ratios experienced more severe reductions in post-fire residual bearing capacity, and the degree of reduction decreased with an increase in the axial restraint stiffness ratio, load ratio, and load eccentricity. The rotational restraint stiffness ratio affected the residual bearing capacity by influencing the slenderness ratio of the steel column. The reduction degree of post-fire residual bearing capacity of the restrained QT Q890 high strength steel columns was usually the smallest. Based on the results of the parametric analysis and the provisions of current standards, a practical assessment method for the post-fire residual bearing capacity of restrained high strength steel columns was proposed. This method included a simplified calculation approach for determining the post-fire residual bearing capacity, along with conditions and classifications for the continued use of high strength steel columns after fire exposure.

Keywords: restrained high strength steel column; post-fire; residual bearing capacity; parametric analysis; practical assessment method

0 引言

钢结构建筑经历火灾极易损伤。对于火灾后未倒塌的钢结构,若经安全评估与修复加固能确保其安全,则可继续使用,从而减少火灾造成的社会、经济损失。钢柱是钢结构的重要承载构件,由于其通常受到与之相连构件的约束,在火灾升降温时将产生额外的内力与变形^[1-2]。同时火灾高温环境会严重影响钢材的力学性能。虽然高强钢应用于建筑结构中比普通钢更具优势,但高强钢高温力学性能的折减程度也更严重^[3-4]。因此,确定高强钢约束柱受火后剩余承载性能是高强钢结构火灾后安全评估的重要内容。

钢柱在钢结构建筑中受到的相连构件的约束可分为轴向约束与转动约束,国内外学者已深入研究了约束对钢柱火灾响应的影响^[1-2,5-10]。研究表明,随着火灾升温,轴向约束使钢柱轴力先增大,故约束钢柱比无约束钢柱更早达到高温下屈曲承载力而屈曲。屈曲时钢柱轴力开始下降,但只要轴向约束刚度比超过一个较小的值,钢柱仍可能具有相当大的抗压承载力,没有失效,可利用其屈曲后性能。若温度继续升高,使钢柱轴力下降至低于初始值时,该柱失效,不可再利用其屈曲后性能。转动约束主要减小钢柱的计算长度,进而提高钢柱的抗火性能。

针对约束作用对钢柱受火后响应的影响,王新堂等^[11]对无约束、对称约束和非对称约束的Q345钢柱进行了试验研究,发现受火后无约束钢柱主要沿弱轴方向屈曲,约束钢柱破坏时沿强轴与弱轴都弯曲明显,其中非对称约束钢柱沿两个方向的变形更显著且较接近,失效前的整体刚度更高。李国强等^[12-13]

对受轴向约束的调质型(QT型)Q550高强钢轴心受压柱进行了试验研究,对轴向约束高强钢柱受火后的轴压剩余承载力进行了参数分析,发现当最高过火温度超过屈曲温度时,剩余承载力随最高过火温度的升高而线性下降;在此基础上提出了轴向约束高强钢柱受火后轴压剩余承载力简化计算方法。宋林昕等^[14-15]对受轴向约束或转动约束的QT型Q690高强钢轴心受压与偏心受压柱进行了试验研究,发现仅受轴向约束的钢柱受火后剩余承载力折减明显,且剩余承载力折减程度随偏心距的增大而减小;而同时受轴向与转动约束的钢柱受火后剩余承载力折减很少,甚至超过了相应的未受火的极限承载力。

高强钢约束柱受火后剩余承载性能的研究不仅对其受火后评估十分重要,而且有助于在防火设计阶段及时调整防火设计以提高其受火后可继续使用的可能。然而,目前对同时受轴向与转动约束的轴心受压或偏心受压高强钢柱受火后剩余承载性能的研究缺乏系统性与实用性。因此,本文通过参数分析系统研究超500 MPa高强钢约束柱受火后剩余承载性能的主要影响因素与影响规律,考虑最高过火温度、长细比、轴向约束刚度比、转动约束刚度比、荷载比、荷载偏心率以及高强钢强度等级与交货状态的影响,并在此基础上提出高强钢约束柱受火后剩余承载性能实用评估方法。

1 分析模型

1.1 有限元模型与基本参数

采用弹簧模拟柱端的约束作用,建立如图1所示的约束柱分析模型,以下称为“柱弹簧模型”。其

中, k_1 表示轴向弹簧, k_{r1} 、 k_{r2} 表示转动弹簧。采用通用有限元软件 ABAQUS 进行参数分析, 高强钢约束柱的横截面为 H200×180×10×14 mm, 通过改变柱长研究长细比的影响。钢柱采用 S4R 壳单元模拟, 沿纵向划分为 50 个单元; 横截面上腹板划分为 20 个单元, 翼缘两侧以腹板为界分别划分为 10 个单元。约束作用采用 SPRING1 弹簧单元模拟。初始缺陷考虑初始几何缺陷(初弯曲)与焊接残余应力。初弯曲形状采用钢柱一阶屈曲模态, 幅值取 1/1 000 柱长。焊接残余应力采用高强钢焊接构件工字形横截面残余应力统一分布模型^[16]计算的结果。



图1 约束柱分析模型

Fig.1 Analysis model of restrained column

钢材本构模型采用三线性模型^[14]。泊松比取 0.3, 热膨胀系数取 $1.4 \times 10^{-5} \text{ m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ^[17]。不同强度等级与交货状态的高强钢在火灾前^[18-19]、火灾下^[20-22]、火灾自然冷却后^[18-19, 23]的弹性模量与屈服强度采用相应参考文献提出的力学性能参数计算模型计算得到。除进行特征值屈曲分析以得到一阶屈曲模态外, 设置四个分析步分别模拟加载至设计荷载、恒载升温、恒载降温、非线性极限承载力分析的过程。其中, 假设温度沿钢柱纵向与横截面均匀分布。

1.2 验证

按上述方法建立柱弹簧模型与梁柱模型(采用钢梁模拟柱端的约束作用)^[14]对 QT 型 Q690 高强钢约束柱受火后剩余承载性能试验^[14]进行模拟。钢柱试件横截面为 H80×80×8×8 mm, 其他基本信息见表 1。各试件在恒载作用下先升温至设计温度再自然冷却至室温, 最后在室温下加载直至失效。柱弹簧模型是梁柱模型的简化模型, 不考虑试验观测到的梁端滑移与反力架变形时采用两种模型模拟所得的火灾响应如图 2 所示。梁柱模型已由试验

表 1 试件基本信息^[14]

Table 1 Basic information of specimens^[14]

试件编号	总长/mm	β_t	β_r	ρ	e_y/mm	$T_{\max}/^\circ\text{C}$
C1-1	1 230	0.37	0	0.16	0	548
C1-2	1 230	0.37	0	0.32	0	498
C2-1	1 230	0.37	0	0.33	10	498
C2-2	1 230	0.37	0	0.51	10	460
C3-1	1 340	0.40	99.32	0.29	0	670
C3-2	1 340	0.40	99.32	0.65	0	538
C4-1	1 340	0.40	99.32	0.54	10	563
C4-2	1 340	0.40	99.32	0.66	10	609

注: β_t 、 β_r 、 ρ 、 e_y 、 T_{\max} 分别为轴向约束刚度比、转动约束刚度比、荷载比、荷载偏心率、钢柱的最高过火温度, 定义详见 2.1 节

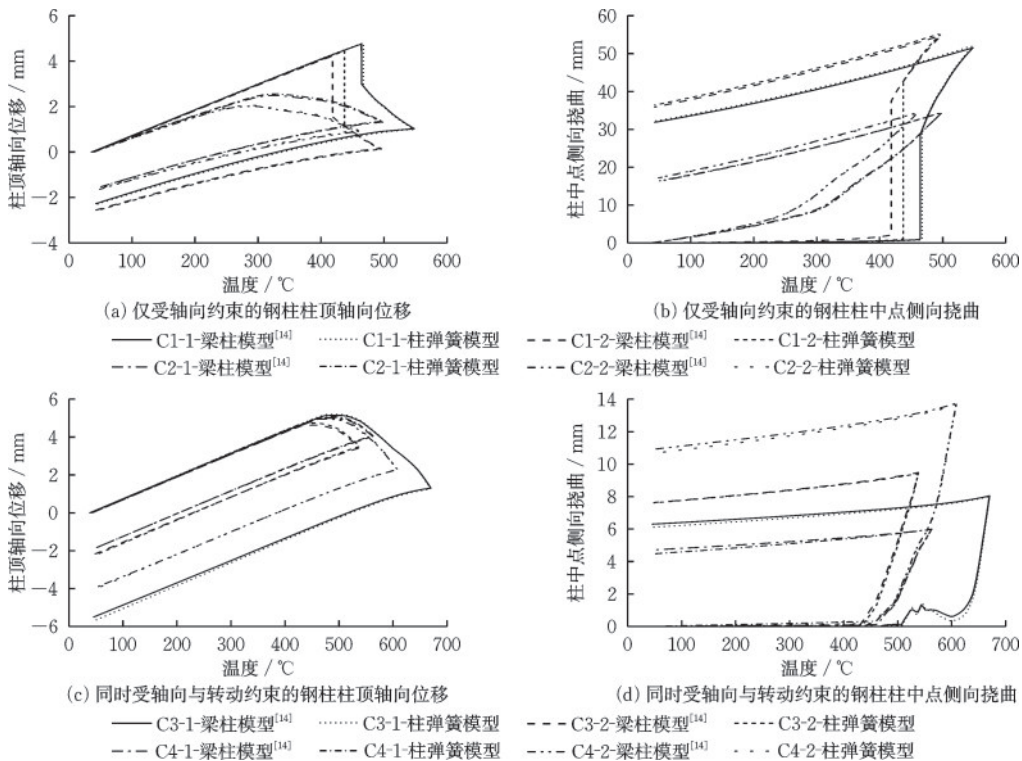


图2 高强钢约束柱试件^[14]火灾响应两种模型模拟结果对比

Fig.2 Comparison of numerical results between two models for fire response of restrained high strength steel column specimens^[14]

验证了其准确性^[14],而两种模型模拟所得的位移—温度曲线基本重合。因此,柱弹簧模型的准确性也得到了验证,可用其进行参数分析。

2 参数分析方案

2.1 重要术语定义

(1) 最大轴向承载力温度(T_u):升温阶段钢柱轴力最大时钢柱的温度,如图3所示。此时钢柱达到其高温下的屈曲或屈服承载力,对于高温下主要发生整体屈曲或截面屈服的钢柱,可分别定义为屈曲温度(T_{bu})或屈服温度(T_{yi})。

(2) 临界温度(T_{cr}):升温阶段钢柱轴力恢复到其初始轴力时的温度,如图3所示。钢柱温度高于临界温度时钢柱轴力将低于初始轴力,该柱达不到原先设计的承载能力,此时钢柱轴力与其初始轴力的欠缺值将由结构其他构件承担,可能导致结构破坏。

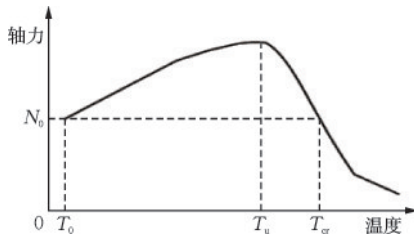


图3 升温阶段高强钢约束柱的轴力—温度曲线

Fig.3 Axial force-temperature curve of restrained high strength steel column during heating process

(3) 相对温度系数(η): $\eta = (T_{max} - T_u) / (T_{cr} - T_u)$, T_{max} 为钢柱的最高过火温度,即钢柱经历的最高温度。 $T_{max} = T_u$ 时 $\eta = 0$, $T_{max} = T_{cr}$ 时 $\eta = 1$ 。

(4) 轴向约束刚度比(β_1): $\beta_1 = k_1 / k_{cr}$, k_1 、 k_{cr} 分别为常温下轴向约束刚度、钢柱轴向刚度。

(5) 转动约束刚度比(β_r): $\beta_r = k_r / k_{cr}$, k_r 、 k_{cr} 分别为常温下转动约束刚度、钢柱转动刚度。

(6) 长细比(λ): $\lambda = \mu l / i_y$, μ 为钢柱计算长度系数; l 为钢柱长度; i_y 为绕弱轴的回转半径。本文研究考虑绕弱轴的长细比。另,记 $\lambda_0 = l / i_y$ 为将钢柱视为两端铰接时的长细比,当 $\beta_r = 0$ 时 $\lambda_0 = \lambda$ 。

(7) 荷载比(ρ): $\rho = N_0 / N_{cr}$, N_0 为钢柱初始轴力; N_{cr} 为钢柱未受火的室温极限承载力。

(8) 荷载偏心率(ϵ): $\epsilon = e_y A / W_y$, e_y 为荷载绕弱轴的偏心距; A 为钢柱横截面面积; W_y 为绕弱轴的截面抵抗矩。本文研究考虑绕弱轴的荷载偏心。钢柱轴心受压时 $\epsilon = 0$,偏心受压时 $\epsilon > 0$ 。

(9) 剩余承载力系数(α): $\alpha = N_{crT} / N_{cr}$, N_{crT} 为钢柱受火后的极限承载力,即剩余承载力。剩余承载力系数用于表示高强钢约束柱受火后极限承载力的退化程度。

(10) 残余弯曲变形(w_T):受火后钢柱中点的侧向挠曲值。

2.2 参数分析方案

为了尽可能囊括实际工程场景情况,参数分析方案如下(采用相对温度系数研究最高过火温度的影响):

(1) 相对温度系数 η : -0.05, 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1。

(2) 长细比 λ : 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150。

(3) 轴向约束刚度比 β_1 : 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1, 10。

(4) 转动约束刚度比 β_r : 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 5, 50。

(5) 荷载比 ρ : 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9。

(6) 荷载偏心率 ϵ : 0, 0.2, 0.6, 1, 2, 4, 10, 20。

(7) 高强钢强度等级与交货状态:调质型(QT型)Q550高强钢,控轧控冷型(TMCP型)Q550高强钢,QT型Q690高强钢, TMCP型Q690高强钢, QT型Q890高强钢。

约束钢柱的临界温度(T_{cr})与最大轴向承载力温度(T_u)之差越大,钢柱高温下屈曲或屈服后性能的可利用程度越高。因此,本文认为当 $T_{cr} - T_u \geq 20$ °C时该柱在高温下屈曲或屈服后性能仍可被利用,故计算其受火后极限承载力以考虑其受火后剩余承载性能;否则,认为该柱在高温下屈曲或屈服后立即失效,不考虑其受火后剩余承载性能。

3 参数分析

3.1 最高过火温度的影响

以 $\lambda = 30, 60, 150$, $\beta_r = 0$, $\rho = 0.4$, $\epsilon = 0, 2$ 的QT型Q690高强钢柱为例,不同 β_1 下 $\alpha - \eta$ 曲线如图4。

当 $\eta < 0$ ($T_{max} < T_u$)时,极少数小长细比、小轴向约束刚度比、小荷载比的轴心受压钢柱受火后剩余承载力略有折减(为常温值的90%以上),但大多数情况下 $\alpha \approx 1$,即约束钢柱受火后的剩余承载力

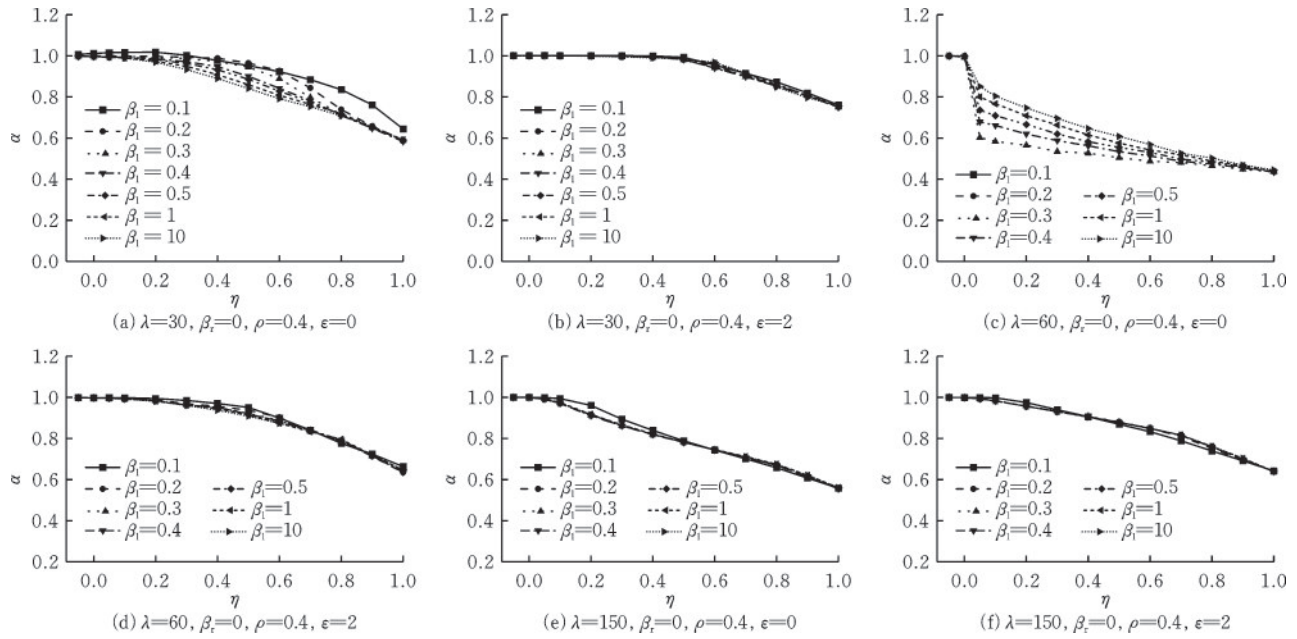


图4 最高过火温度的影响

Fig.4 Effect of maximum fire temperature

普遍与其未受火的极限承载力相近。原因是约束钢柱在高温下屈曲或屈服前主要发生弹性变形,冷却至室温后弹性变形能完全恢复。同时,参数分析发现高强钢约束柱的最大轴向承载力温度通常小于 600°C ,当最高过火温度低于 600°C 时,高强钢高温后力学性能与火灾前基本一致。因此,当约束钢柱的最高过火温度低于其最大轴向承载力温度时,升降温过程对其受火后剩余承载力的影响很小。

当 $\eta = 0 (T_{\max} = T_u)$ 时,约束钢柱达到高温下的最大轴力,即其高温下的屈曲或屈服承载力。当温度略高于最大轴向承载力温度 ($\eta = 0.05$) 时,对于中长细比柱,轴心受压下 α 骤降,如图 4(c) 所示;而对于其他情况, $\alpha \approx 1$, 没有明显变化。

当 $0 < \eta < 1 (T_u < T_{\max} < T_{cr})$ 时, α 随着 η 增大而减小,即剩余承载力随着最高过火温度升高而减小。原因是随着最高过火温度升高,钢柱高温下塑性变形继续发展,高强钢高温下力学性能继续折减,则受火后约束钢柱残余变形更大且高强钢力学性能折减更严重,导致其剩余承载力继续折减。但 α 随最高过火温度升高而减小的规律与长细比、约束刚度比、荷载比、荷载偏心率等有关。

当 $\eta = 1 (T_{\max} = T_{cr})$ 时,约束钢柱达到临界状态。若温度继续升高,钢柱轴力将小于其初始轴力,高温下无法承担设计荷载,该柱失效,故不考虑受火后剩余承载性能。因此, T_{cr} 是本研究的最大 T_{\max} 。

$\eta = 0 (T_{\max} = T_u)$ 、 $\eta = 1 (T_{\max} = T_{cr})$ 分别对应

约束钢柱高温下屈曲或屈服状态、临界状态,且分别对应受火后剩余承载力的最大、最小值;温度略高于其最大轴向承载力温度时剩余承载力可能骤降。因此,以下重点关注 $\eta = 0.05 (T_{\max}$ 略高于 $T_u)$ 、 $\eta = 1 (T_{\max} = T_{cr})$ 时其他参数对剩余承载力的影响。

3.2 长细比的影响

以 $\beta_1 = 0.3, \beta_r = 0, \epsilon = 0, 2, \eta = 0.05, 1$ 的 QT 型 Q690 高强钢柱为例,不同 ρ 下的 $\alpha-\lambda$ 曲线如图 5 所示。

对于轴心受压约束钢柱 ($\epsilon = 0$),当 $\eta = 0.05$ 或 1 时, α 随 λ 增大先减小后增大,且在 $\lambda = 60$ 时达到最小值,如图 5(a)、(b) 所示。原因是中长细比轴心受压钢柱在 $\eta = 0.05$ 时柱中点侧向挠曲迅速发展,受火后残余弯曲变形与柱长之比 (w_T/l) 明显大于其他情况。这也是 3.1 节中 $\eta = 0.05$ 时中长细比钢柱在轴心受压下 α 骤降的原因。此外,高温下,小长细比钢柱主要发生截面屈服,温度内力主要通过塑性轴向变形释放;中、大长细比钢柱主要发生整体屈曲,温度内力主要通过塑性弯曲变形释放。由于中长细比钢柱的 w_T/l 大于大长细比钢柱,所以中长细比钢柱受火后剩余承载力的折减也更严重。本算例中,可将钢柱长细比 $\lambda < 45$ 时定义为小长细比钢柱, $45 \leq \lambda \leq 90$ 时定义为中长细比钢柱, $\lambda > 90$ 时定义为大长细比钢柱。

对于偏心受压约束钢柱 ($\epsilon > 0$),荷载偏心率较小时,长细比的影响与轴心受压约束钢柱类似;但

当 $\eta = 0.05$ 时, α 随着 λ 的变化程度小于轴心受压约束钢柱。荷载偏心率较大时, 如图 5(c)、(d) 所示, 当 $\eta = 0.05$ 时, $\alpha \approx 1$, 即约束钢柱受火后剩余承载力几乎没有折减, 基本不受长细比的影响; 当 $\eta = 1$ 时, α 随着 λ 的增大先减小再趋于不变。

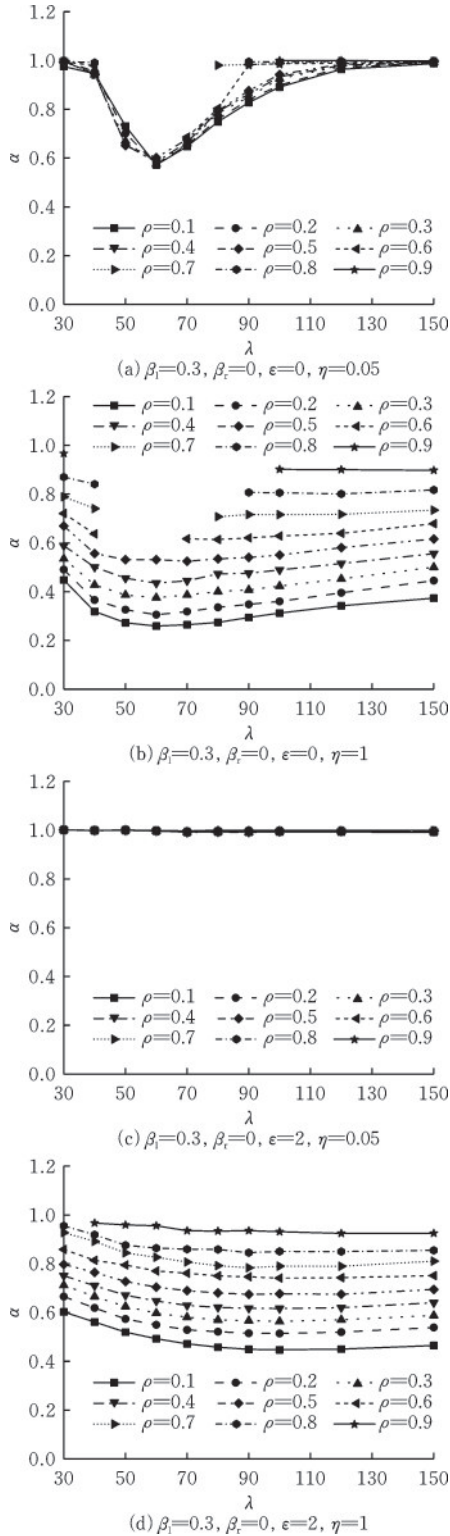


图 5 长细比的影响

Fig.5 Effect of slenderness ratio

3.3 轴向约束刚度比的影响

以 $\lambda = 60, \beta_r = 0, \epsilon = 0.2, \eta = 0.05, 1$ 的 QT 型 Q690 高强钢柱为例, 不同 ρ 下 $\alpha-\beta_1$ 曲线如图 6 所示。

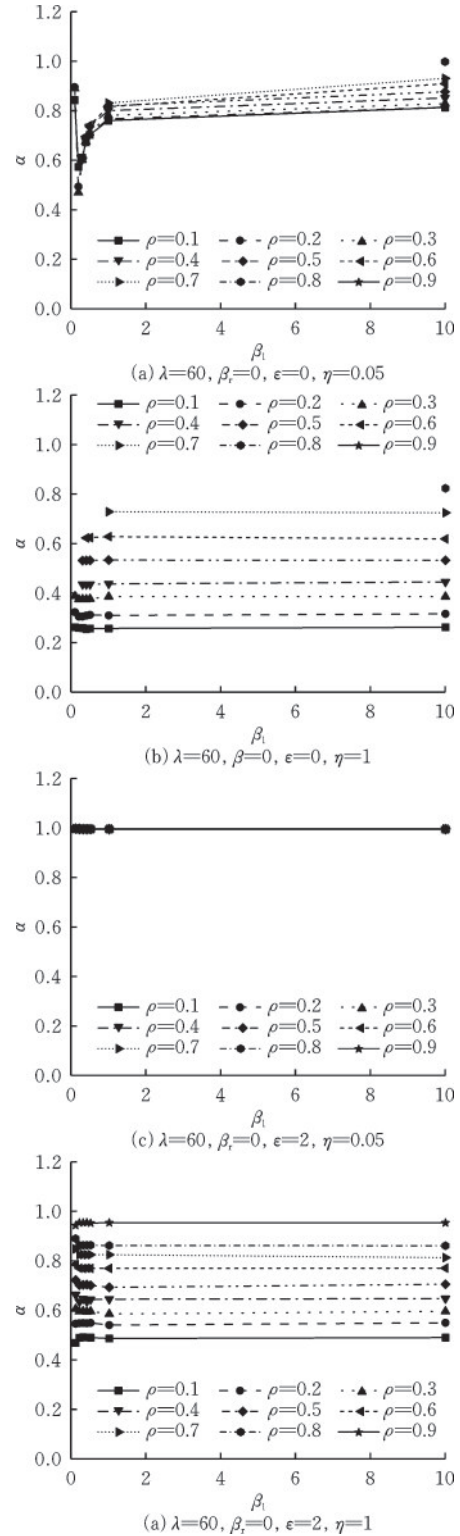


图 6 轴向约束刚度比的影响

Fig.6 Effect of axial restraint stiffness ratio

当 $\eta = 0.05$ 时,在一定情况下 β_1 对 α 影响显著;当 $\eta = 1$ 时, β_1 对 α 影响很小。图 4 亦可得到此规律。

当 $\eta = 0.05$ 时,对于中长细比的轴心受压约束钢柱, $\beta_1 \geq 0.2$ 时 α 随着 β_1 增大而增大。原因是轴向约束刚度比越大,钢柱不自由热膨胀引起的热应力越大,高温下屈曲或屈服状态更早发生,即最大轴向承载力温度更小。同时,轴向约束的能量密度随着轴向约束刚度比增大而增大,则钢柱高温下屈曲或屈服后发生较小的塑性变形即可释放较大的温度内力。因此,高温下钢柱塑性变形发展更小,高强钢力学性能折减程度更小,则受火后钢柱残余塑性变形与高强钢力学性能折减程度更小,使剩余承载力折减程度也 smaller。但轴向约束刚度比有上限值,超过时 β_1 增大对 α 的影响很小。本算例中,该上限值对于 $\lambda = 50 \sim 70$ 的钢柱为 10,对于 $\lambda = 80 \sim 90$ 的钢柱为 1。大多数情况下, $\beta_1 = 0.1$ 时 α 比 $\beta_1 = 0.2$ 时的大,原因是 $\beta_1 = 0.1$ 时 α 没骤降,而 $\beta_1 \geq 0.2$ 时 α 骤降,轴向约束刚度比的影响在 $\beta_1 \geq 0.2$ 时才显现。

3.4 转动约束刚度比的影响

以将钢柱视为两端铰接时的长细比 $\lambda_0 = 60、150$, $\beta_1 = 0.3, \epsilon = 0, \eta = 0.05、1$ 的 QT 型 Q690 高强钢柱为例,不同 ρ 下 $\alpha-\beta_1$ 曲线如图 7 所示。

当 $\eta = 0.05$ 或 1 时, λ_0 较小或中等的约束钢柱的 α 随着 β_1 增大而增大;但 λ_0 较大的约束钢柱的 α 随着 β_1 增大而减小。原因是 β_1 增大使钢柱计算长度减小,如图 8 所示,从而减小钢柱 λ ,进而影响 α 。如 3.2 节所述,轴心受压约束钢柱的 α 随着 λ 增大先减小后增大。对于 λ_0 较小或中等的钢柱,长细比减小后属于小长细比柱,则 α 增大;对于 λ_0 较大的钢柱,长细比减小后属于中长细比柱,则 α 减小。

但转动约束刚度比有上限值,超过时 β_1 增加对 α 的影响很小。原因是转动约束对钢柱计算长度的影响有上限值,超过时计算长度基本不变,如图 8 所示。本算例中,该上限值对于 $\lambda_0 < 90$ 的钢柱为 5,对于 $\lambda_0 \geq 90$ 的钢柱为 50。因此,转动约束刚度比影响钢柱长细比,进而影响受火后剩余承载力。

3.5 荷载比的影响

以 $\lambda = 60, \beta_1 = 0.3, \beta_r = 0, \eta = 0.05、1$ 的 QT 型 Q690 高强钢柱为例,不同 ϵ 下 $\alpha-\rho$ 曲线如图 9 所示。

α 随着 ρ 增大而增大。当 $\eta = 0.05$ 时, ρ 的影响通常很小;当 $\eta = 1$ 时, ρ 的影响十分显著。图 5~7

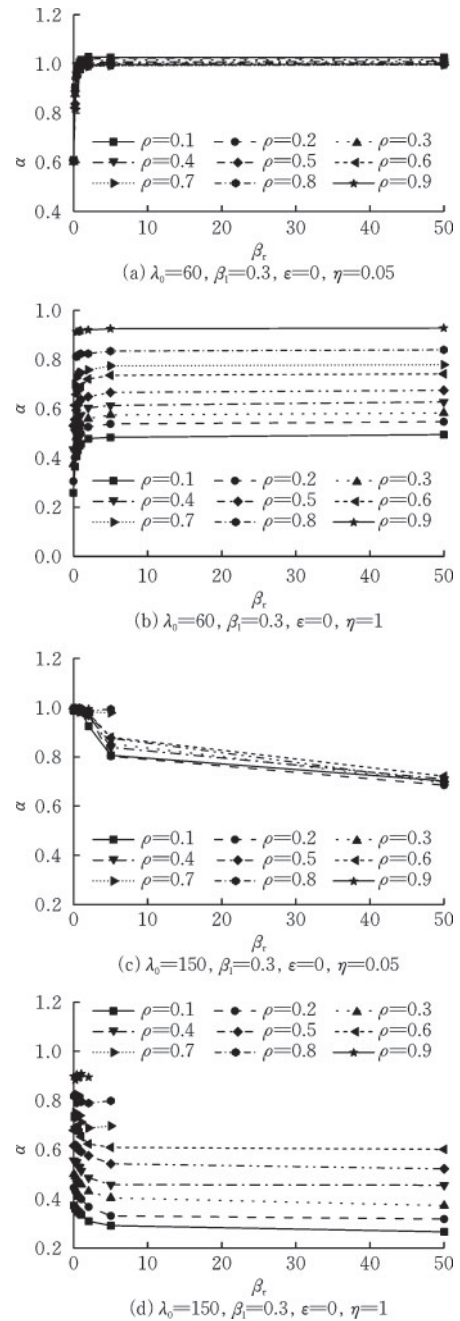


图 7 转动约束刚度比的影响

Fig.7 Effect of rotational restraint stiffness ratio

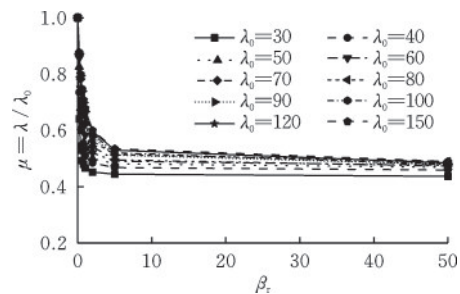
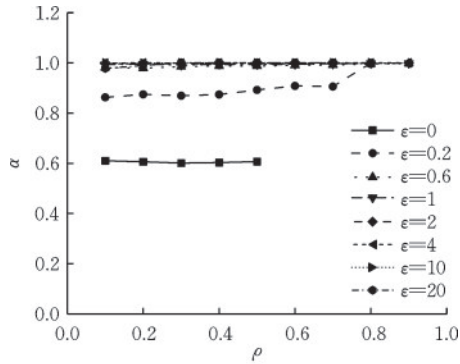
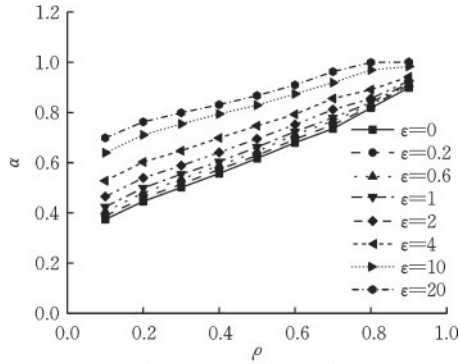


图 8 转动约束刚度比对计算长度系数 μ 的影响

Fig.8 Effect of rotational restraint stiffness ratio on effective length factor μ



(a) $\lambda=60, \beta_1=0.3, \beta_2=0, \eta=0.05$



(b) $\lambda=60, \beta_1=0.3, \beta_2=0, \eta=1$

图9 荷载比的影响

Fig.9 Effect of load ratio

亦可得到此规律。原因是荷载比增大时,约束钢柱在高温下屈曲或屈服后轴力恢复到初始值的临界状态更早发生,即临界温度更小。因此,高温下钢柱塑性变形发展更小,高强钢力学性能折减程度更小,则受火后钢柱残余塑性变形与高强钢力学性能折减程度更小,使剩余承载力折减程度也更小。

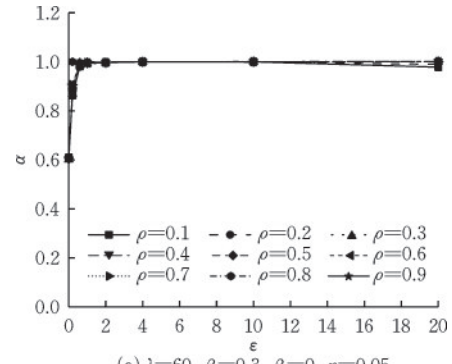
3.6 荷载偏心率的影响

以 $\lambda = 60, \beta_1 = 0.3, \beta_2 = 0, \eta = 0.05, 1$ 的 QT 型 Q690 高强钢柱为例,不同 ρ 下 $\alpha-\epsilon$ 曲线如图 10 所示。

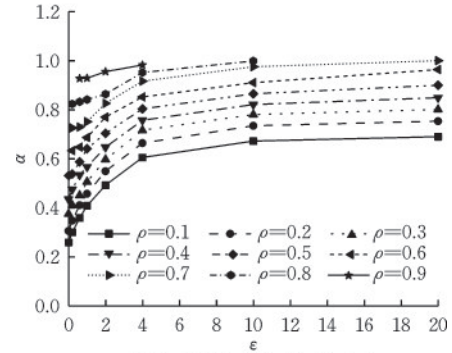
当 $\eta = 0.05$ 与 1 时, α 随着 ϵ 增大而增大。同样情况下,轴心受压约束钢柱 ($\epsilon = 0$) 受火后剩余承载力折减程度比偏心受压约束钢柱 ($\epsilon > 0$) 更严重。图 9 亦可得到此规律。这意味着火灾升降温过程对高强钢约束柱受火后剩余承载力的影响程度小于荷载偏心的影响程度。当 $\eta = 0.05$ 时,荷载偏心率有上限值,超过时 ϵ 增大对 α 的影响很小,本算例中该上限值通常为 1; 当 $\eta = 1$ 时,本算例中 ϵ 从 0 增至 20 时均有 α 随着 ϵ 增大而增大的规律。

3.7 高强钢强度等级与交货状态的影响

以 $\lambda = 80, \beta_1 = 0.3, 0.5, \beta_2 = 0, \rho = 0.4, \epsilon = 0$



(a) $\lambda=60, \beta_1=0.3, \beta_2=0, \eta=0.05$

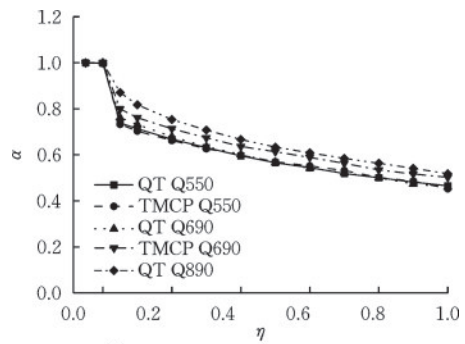


(a) $\lambda=60, \beta_1=0.3, \beta_2=0, \eta=1$

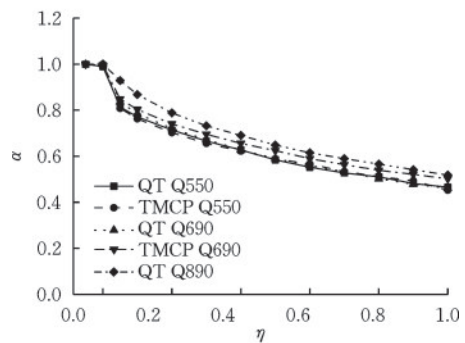
图10 荷载偏心率的影响

Fig.10 Effect of load eccentricity

为例,不同强度等级与交货状态的高强钢柱的 $\alpha-\eta$ 曲线如图 11 所示。



(a) $\lambda=80, \beta_1=0.3, \beta_2=0, \rho=0.4, \epsilon=0$



(a) $\lambda=80, \beta_1=0.5, \beta_2=0, \rho=0.4, \epsilon=0$

图11 高强钢强度等级与交货状态的影响

Fig.11 Effects of high strength steel grade and manufacturing process

相同条件下,不同强度等级与交货状态的高强钢约束柱 α 的折减规律类似但程度不同,通常有如下关系:QT型Q550高强钢 \approx TMCP型Q550高强钢 \approx QT型Q690高强钢 $<$ TMCP型Q690高强钢 $<$ QT型Q890高强钢。这和不同强度等级与交货状态的高强钢高温力学性能受温度影响不同有关。

4 实用评估方法

4.1 受火后可继续使用的残余弯曲变形上限值

对于普通钢柱,若其受火后残余弯曲变形在可接受范围内,一般初步判定该柱可继续使用;再结合承载能力、连接构造进行详细鉴定,若均能满足要求则可继续使用^[24]。我国工程建设标准化协会标准《火灾后工程结构鉴定标准》^[24]给出了受火后钢结构构件的初步鉴定评级标准,评级项目包括涂装与防火保护层、局部变形、整体变形与连接损伤情况,级别分为I、II_a、III_b、III与IV五级。该标准^[24]规定,当钢柱受火后残余弯曲变形与柱长之比 $w_T/l \leq 1/1\ 000$ 时,可采取适当措施后考虑继续使用;当钢柱受火后 $1/1\ 000 < w_T/l \leq 1/500$ 时,应采取加固或局部更换措施后再考虑继续使用。

高强钢约束柱需同时满足残余弯曲变形与剩余承载力的要求受火后方可继续使用。参数分析发现,极少数情况下,在残余弯曲变形很小($w_T/l \leq 1/1\ 000$)时钢柱剩余承载力也略有折减(为常温值的90%以上);大多数情况下,在残余弯曲变形较大时钢柱仍可能有较大的剩余承载力。结合参数分析结果与标准^[24]规定,确定高强钢约束柱受火后可继续使用的残余弯曲变形上限值为 $1/200$ 柱长。若 $w_T/l > 1/200$,即使剩余承载力仍满足要求,但钢柱变形过大将影响正常使用,故仍不可继续使用。同时,根据受火后残余弯曲变形将其继续使用分为三级:

- (1) $w_T/l \leq 1/1\ 000$,且剩余承载力满足要求,则可长久使用。
- (2) $1/1\ 000 < w_T/l \leq 1/500$,且剩余承载力满足要求,则采取局部加固措施后可长久使用。
- (3) $1/500 < w_T/l \leq 1/200$,且剩余承载力满足要求,则可临时使用(不超过5年),若长久使用需更换。

4.2 剩余承载力简化计算方法

通过对参数分析结果的统计拟合,提出高强钢

约束柱受火后剩余承载力 N_{crT} 计算式(1)。其中,剩余承载力系数 α 计算式见式(2),主要包括五项:最高过火温度项 f_η 、长细比项 f_λ 、轴向约束刚度比项 f_{β_1} 、荷载工况项 f_θ 、高强钢强度等级与交货状态项 f_{steel} 。

$$N_{crT} = \alpha N_{cr} \quad (1)$$

$$\alpha = (f_\eta \cdot f_\lambda \cdot f_{\beta_1} \cdot f_\theta + c) \cdot f_{steel} \leq 1 \quad (2)$$

式中, c 为常数项;不考虑剩余承载力增大的有利情况,规定 $\alpha \leq 1$ 。

转动约束刚度比 β 影响钢柱长细比 λ 进而影响受火后剩余承载力,故通过分析 β 与 λ/λ_0 (即计算长度系数 μ)间的定量关系考虑其对受火后剩余承载力的影响,见表2。此外,将荷载比 ρ 与荷载偏心率 ϵ 组合成荷载工况 θ 以考虑荷载的影响。

表2 考虑 β 影响的 λ/λ_0 的取值

Table 2 Values of λ/λ_0 considering effect of β

λ_0	$\beta_r=0$	$0 < \beta_r \leq 2$	$\beta_r=5$	$\beta_r \geq 50$
30	1.00	$0.07/(\beta_r+0.15)+0.47 \leq 1$	0.50	0.50
40	1.00	$0.11/(\beta_r+0.16)+0.45 \leq 1$	0.50	0.50
50	1.00	$0.22/(\beta_r+0.36)+0.44 \leq 1$	0.50	0.50
60	1.00	$0.28/(\beta_r+0.46)+0.44 \leq 1$	0.50	0.50
70	1.00	$0.33/(\beta_r+0.57)+0.44 \leq 1$	0.50	0.50
80	1.00	$0.31/(\beta_r+0.55)+0.46 \leq 1$	0.52	0.50
≥ 90	1.00	$0.37/(\beta_r+0.69)+0.46 \leq 1$	0.54	0.50

注:未列出的情况采用相邻情况线性插值得到

基于 $w_T/l \leq 1/200$ 的参数分析结果,通过数值拟合得到式(2)中各项的表达式,见表3与式(3)~(8)。经计算,通过数值拟合得到的式(2)的 R^2 为0.904;99.75%的参数分析数据采用预测公式计算时相对误差在 $\pm 10\%$ 以内;预测公式与参数分析结果的相对误差最大值、最小值、平均值分别为12.69%、-11.79%、-0.30%。

$$f_\eta = \begin{cases} 0 & (\eta < 0) \\ \frac{0.64\eta^4 - 1.86\eta^2 - 7.66 \times 10^{-2}\eta^2 + 2.76 \times 10^{-3}\eta + 8.78 \times 10^{-5}}{\eta^2 + 2.24 \times 10^{-3}} & (\eta \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$f_\lambda = -6.37 \times 10^{-6}\lambda^2 + (\lambda + 9)/(\lambda + 42) \quad (4)$$

$$f_{\beta_1} = \begin{cases} 0.37(\beta_1 - 0.13)/(\beta_1 - 0.14) & (\beta_1 \leq 0.1 \text{ 或 } \beta_1 \geq 0.2) \\ 0.4 & (0.1 < \beta_1 < 0.2) \end{cases} \quad (5)$$

表3 f_{steel} 的取值
Table 3 Values of f_{steel}

高强度等级 与交货状态	η	≤ 0	0.05	0.1	0.5	0.8			1			
	$\beta_1 \backslash \rho$	/	/	/	/	≤ 0.2	0.3	≥ 0.5	≤ 0.1	0.2	0.3	≥ 0.5
QT型 Q550 高强度钢	0.1	1.00	0.77	0.96	1.05	1.11	1.06	1.05	1.10	1.14	1.07	1.05
	0.2	1.00	0.97	0.97	1.00	1.09	1.00	1.00	1.07	1.13	1.05	1.02
	≥ 0.5	1.00	0.95	0.97	0.98	1.04	0.99	0.99	1.07	1.13	1.05	1.00
TMCP型 Q550 高强度钢	0.1	1.00	0.77	0.96	1.05	1.18	1.06	1.05	1.20	1.18	1.08	1.05
	0.2	1.00	0.99	0.99	0.99	1.12	1.01	0.96	1.22	1.16	1.03	0.96
	≥ 0.5	1.00	0.93	0.95	0.96	1.06	1.00	0.96	1.22	1.16	1.04	0.96
QT型 Q690 高强度钢	/	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
TMCP型 Q690 高强度钢	0.1	1.00	0.74	1.04	线性 插值	1.20	1.16	1.10	1.11	1.25	1.18	1.10
	0.2	1.00	1.09	1.09		1.21	1.14	1.02	1.08	1.25	1.16	1.00
	≥ 0.5	1.00	0.97	0.98		1.15	1.14	1.00	1.10	1.25	1.16	1.00
QT型 Q890 高强度钢	0.1	1.00	0.77	1.15	线性 插值	1.32	1.23	1.11	1.40	1.30	1.23	1.11
	0.2	1.00	1.20	1.20		1.32	1.19	1.07	1.28	1.31	1.23	1.05
	≥ 0.5	1.00	1.06	1.06		1.30	1.17	1.03	1.30	1.30	1.22	1.02

注:1. f_{steel} 按相对温度系数 η 、轴向约束刚度比 β_1 、荷载比 ρ 分段取值,未列出的情况采用相邻情况线性插值得到

2. “/”表示该行或该列数值适用于所有相应情况,无需分段

$$\theta = \rho(\epsilon + 1) \quad (6)$$

$$f_{\theta} = -3.69 \times 10^{-3} \theta^2 - 4.30 \times 10^{-2} \theta + (\theta + 8.76 \times 10^{-2}) / (\theta - 4.55 \times 10^{-2}) \quad (7)$$

$$c = \begin{cases} 0.91 & (50 \leq \lambda \leq 70, \beta_1 \leq 0.1, \epsilon \leq 0.2, \rho \leq 0.3) \\ 0.96 & (60 \leq \lambda \leq 90, \beta_1 \geq 10, \epsilon = 0, \rho \leq 0.5) \\ 0.98 & (\lambda \leq 30, \beta_1 \geq 0.1, \epsilon \geq 10, \rho \leq 0.1) \\ 1.01 & (\text{其他情况}) \end{cases} \quad (8)$$

4.3 评估流程

若高强度约束柱受火后残余弯曲变形不超过1/200柱长且满足式(9),则该柱受火后可继续使用;否则不可继续使用,需更换。

$$\gamma_0 S \leq N_{crT} \quad (9)$$

式中, γ_0 为结构的重要性系数; S 为承载能力极限状态下作用组合的效应设计值。 γ_0 与 S 均按我国国家标准《钢结构设计标准》^[25]、《建筑结构可靠性设计统一标准》^[26]与《建筑结构荷载规范》^[27]的相关要求计算。

对于可继续使用的钢柱,按4.1节提出的根据钢柱受火后残余弯曲变形将其继续使用分为可长

久使用、局部加固后可长久使用、仅限临时使用三级。高强度约束柱受火后剩余承载性能评估流程如图12所示。

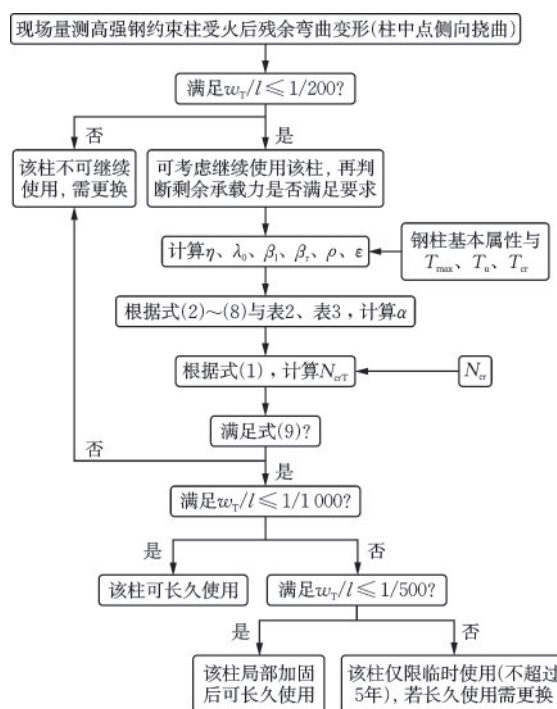


图12 高强度约束柱受火后剩余承载性能评估流程
Fig.12 Assessment process for post-fire residual bearing capacity of restrained high strength steel columns

4.4 计算算例

某一安全等级为二级的钢结构建筑发生了局部火灾。一根 TMCP 型 Q690 高强钢柱受火,其横截面为 $H300 \times 260 \times 16 \times 12$ mm,长 3 600 mm,经历的最高温度为 551°C 。火灾前,钢材弹性模量、屈服强度分别为 204 GPa、799 MPa;钢柱荷载、绕弱轴荷载偏心距、极限承载力分别为 2 139 kN、100 mm、7 820 kN。与该柱相连的构件由于防火保护较强可认为均处于未受火状态。该柱所受的轴向、转动约束刚度分别为 63 kN/mm 、 4.23×10^8 (kN·mm)/rad。该柱最大轴向承载力温度、临界温度分别为 482、 597°C 。材料燃尽后自然灭火,火灾后测得其残余弯曲变形为 16.9 mm。采用实用评估方法评估如下:

(1) 判断受火后是否满足 $w_T/l \leq 1/200$: $w_T/l = 0.0047 < 1/200$,故可考虑继续使用该柱,进一步判断其剩余承载力是否满足要求。

(2) 计算 η 、 λ_0 、 β_1 、 β_r 、 ρ 、 ϵ :由已知条件与定义计算可得 $\eta = 0.60$, $\lambda_0 = 56.45$, $\beta_1 = 0.10$, $\beta_r = 39.53$, $\rho = 0.27$, $\epsilon = 3.20$ 。

(3) 根据式(2)~(8)与表 2~3,计算 α : $\alpha = 1.02$,取 1。

(4) 根据式(1),计算 N_{crT} : $N_{crT} = 7\,820$ kN。

(5) 判断是否满足式(9):由已知条件得 $\gamma_0 = 1.0$,S取火灾前荷载 2 139 kN(若火灾后荷载发生变化,则需重新计算 S)。则 $\gamma_0 S = 2\,139\text{ kN} < N_{crT} = 7\,820\text{ kN}$,满足式(9),该柱受火后可继续使用。

(6) 判断受火后是否满足 $w_T/l \leq 1/1\,000$ 、 $w_T/l \leq 1/500$: $w_T/l = 0.0047 > 1/500$ 。因此,该柱仅限临时使用,若长久使用需更换。

简化计算方法得到的该柱受火后剩余承载力 7 820 kN 与柱弹簧模型数值模拟结果 7 574 kN 间的相对误差为 3.25%。因此,该简化计算方法可靠。

4.5 防火设计建议

在防火设计阶段,若为了最大程度地减少火灾对人们正常生活、工作的影响,火灾后钢结构构件的可修复性也需重点考虑。一方面,高强钢约束柱受火后可继续使用的首要条件受残余弯曲变形控制,而参数分析与试验^[14]均发现中、大长细比钢柱在火灾下整体屈曲后弯曲变形将在很小的温度范

围内迅速发展,进而影响残余弯曲变形,故需要控制火灾下钢柱的温度以减小火灾后残余弯曲变形。另一方面,可通过式(1)预测高强钢约束柱受火后剩余承载力,若受火后剩余承载力远低于受火前极限承载力,则该柱受火后可继续使用的可能性很小,此时需要控制钢柱最高过火温度,即调整防火设计。

综上,最高过火温度是使高强钢约束柱受火后剩余承载性能折减的最主要因素,可在防火设计阶段将高强钢约束柱的临界温度设定为略低于基于其高温下承载力的现有防火保护设计方法计算得到的临界温度^[14],这对防火保护厚度影响不大,但将使钢柱在经历相同受火时间下温度减小,即减小其最高过火温度,从而在减小钢柱受火后残余弯曲变形的同时增大其剩余承载力,大幅提高其受火后可继续使用的可能。

5 结 论

本文对高强钢约束柱进行了系统的参数分析,提出了高强钢约束柱受火后剩余承载性能实用评估方法,主要结论如下:

(1) 最高过火温度是影响高强钢约束柱受火后剩余承载力最主要的因素。最高过火温度小于最大轴向承载力温度时,受火升降温对剩余承载力影响很小,此后剩余承载力随着最高过火温度的升高而减小。

(2) 在一定情况下,中长细比约束钢柱受火后剩余承载力的折减程度比小长细比、大长细比约束钢柱更严重,剩余承载力的折减程度随着轴向约束刚度比、荷载比、荷载偏心率的增大而减小。

(3) 随着转动约束刚度比的增大,钢柱长细比减小,进而影响钢柱剩余承载力。

(4) 对于在相同受载与约束条件下不同钢材的高强钢约束柱,受火后的剩余承载力与未受火的极限承载力之比(剩余承载力系数)的大小排列通常为:QT型 Q550 高强钢 \approx TMCP型 Q550 高强钢 \approx QT型 Q690 高强钢 $<$ TMCP型 Q690 高强钢 $<$ QT型 Q890 高强钢。

(5) 确定了高强钢约束柱受火后可继续使用的残余弯曲变形上限值为 $1/200$ 柱长,提出了剩余承载力简化计算方法,并对剩余承载力满足要求的钢柱

按残余弯曲变形分为可长久使用($w_T/l \leq 1/1000$)、局部加固后可长久使用($1/1000 < w_T/l \leq 1/500$)、仅限临时使用($1/500 < w_T/l \leq 1/200$)三级。

(6) 建议防火设计时略微调低高强钢约束柱的设计临界温度,以提高其受火后可继续使用的可能。

参考文献:

- [1] Lennon T, Moore D. The natural fire safety concept: Full-scale tests at Cardington [J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(7): 623-643.
- [2] Tan K H, Toh W S, 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.
- [3] 王卫永, 李国强. 高强钢结构防火设计理论研究进展 [J]. 工业建筑, 2016, 46(7): 61-67.
Wang W Y, Li G Q. Research progress of fire resistance design theory of high strength steel structures [J]. Industrial Construction, 2016, 46(7): 61-67. (in Chinese)
- [4] 罗永峰, 任楚超, 强旭红, 等. 高强钢结构防火研究进展 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(增1): 104-121.
Luo Y F, Ren C C, Qiang X H, et al. State-of-the-art on fire-resistance behavior of high strength steel structures [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016, 49(Sup1): 104-121. (in Chinese)
- [5] Correia Rodrigues J P, Cabrita Neves I, 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.
- [6] Franssen J M. Failure temperature of a system comprising a restrained column submitted to fire [J]. Fire Safety Journal, 2000, 34(2): 191-207.
- [7] Ali F, O'Connor D. Structural performance of rotationally restrained steel columns in fire [J]. Fire Safety Journal, 2001, 36(7): 679-691.
- [8] Huang Z F, Tan K H. Rankine approach for fire resistance of axially-and-flexurally restrained steel columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(12): 1553-1571.
- [9] 李国强, 王培军. 火灾下约束钢柱受力性能实用分析方法(II): 轴力和弯矩共同作用下的约束钢柱 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(4): 23-29.
Li G Q, Wang P J. Practical analysis method for restrained steel columns in fire (II): Restrained columns under combined axial force and bending moment [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(4): 23-29. (in Chinese)
- [10] 葛勇, 王卫永. 约束高强度 Q460 钢柱抗火性能分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(1): 99-104.
Ge Y, Wang W Y. Fire resistance analysis of restrained high strength Q460 steel columns [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(1): 99-104. (in Chinese)
- [11] 王新堂, 周明, 王万祯. 约束 H 型钢柱火灾响应及火灾后力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 18-25.
Wang X T, Zhou M, Wang W Z. Experimental study of fire response and post-fire mechanical behavior of restrained H-steel columns after exposure to fire [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 18-25. (in Chinese)
- [12] 李国强, 宋林昕, 缪嘉荣. 约束高强钢柱受火后轴压剩余承载力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 79-86.
Li G Q, Song L X, Miao J R. Experimental study on residual capacities of axially restrained high strength steel columns after fire [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 79-86. (in Chinese)
- [13] 李国强, 缪嘉荣, 宋林昕. 约束高强钢柱受火后轴压剩余承载力影响参数研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 87-94.
Li G Q, Miao J R, Song L X. Parametric study on residual capacities of axially restrained high strength steel columns after fire [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 87-94. (in Chinese)
- [14] Song L X, Li G Q, Wang Y C. Experimental study on the effects of whole heating cycle on post-fire behavior of restrained high strength structural steel columns [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 70: 106385.
- [15] 宋林昕, 李国强. 轴压与偏压状态下高强钢轴向约束柱受火后剩余承载力试验研究 [J]. 土木工程学报, 2025, 58(3): 23-37.
Song L X, Li G Q. Experimental study on post-fire residual capacity of axially restrained high strength steel columns under axial and eccentric compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(3): 23-37. (in Chinese)

(本文编辑:张 艺)

(下转第 1150 页)