

轴力作用下的约束钢柱受火性能参数分析

王培军^{1, 2}, 李国强^{1, 3}, 王永昌⁴

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061;
3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 4. 曼彻斯特大学 力学、航空航天和土木工程学院, 曼彻斯特 M60 1QD)

摘要: 利用经过试验验证的有限元模型对轴力作用下约束钢柱火灾下的受力性能进行了参数分析. 分析结果包括各参数对钢柱轴力—温度关系曲线、钢柱跨中弯矩—温度关系曲线、约束钢柱破坏温度、无约束钢柱与约束钢柱破坏温度之差、约束钢柱破坏温度与屈曲温度之差的影响等. 参数分析表明: 约束钢柱屈曲前, 轴力基本线性增加, 截面弯矩变化较小; 约束钢柱屈曲后, 截面弯矩突然增大, 钢柱处于轴力和弯矩的共同作用下; 轴向约束减小约束钢柱的破坏温度, 但是存在一个临界轴向约束刚度比, 当大于该临界比时, 轴向约束刚度比的大小对钢柱的破坏温度影响很小.

关键词: 约束钢柱; 屈曲温度; 破坏温度; 参数分析; 数值模拟

中图分类号: TU 393.2 **文献标识码:** A

failure and buckling-temperature of restrained column. Results of parametric study show that: ① before the column buckles, the axial force in column increases linearly and bending moment only varies a little; ② after the column buckles, the bending moment in column increase suddenly, and the column is loaded under combined axial force and bending moment; ③ the axial restraint reduces failure temperature of restrained column; and the reduction in failure temperature increases with increasing of axial restraint stiffness. However, there is a critical restraint stiffness ratio, above which no further reduction in column failure temperature occurs.

Key words: restrained column; buckling temperature; failure temperature; parametric analysis; numerical simulation

Parametric Studies on Restrained Steel Column in Fire (I): Under Axial Load Only

WANG Peijun^{1,2}, LI Guoqiang^{1,3}, WANG Yongchang⁴

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 3. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, Manchester, M60 1QD, U K)

Abstract: This paper investigates behaviors of the restrained column under axial load in fire through using a calibrated finite element method model. Presented results include the column axial force - temperature evolution curve, column bending moment - temperature evolution curve, failure temperature of restrained column, difference between failure temperature of unrestrained and restrained-column, and difference between

1 概述

火灾下受约束结构构件与单独构件受力性能有很大不同, 如 Wang^[1], Franssen^[2] 和 Neves 等^[3] 对轴向约束钢柱在轴心荷载作用下的受火性能进行了参数分析; 王培军和李国强^[4] 用一个简单模型对约束钢柱进行了受火性能参数分析. 但上述研究者^[1-4] 的分析结果主要集中在钢柱的轴向变形方面, 比如主要给出了约束钢柱的轴力—温度关系曲线. 但约束钢柱在屈曲后, 截面同时处于轴力和弯矩作用下, 因此有必要研究约束钢柱截面的弯矩—温度关系曲线, 这有助于建立约束钢柱的实用设计方法.

约束钢柱的屈曲温度 $t_{res,b}$ 为火灾升温下钢柱轴

收稿日期: 2008-09-17
基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50738005); 国家自然科学基金委创新研究群体资助项目(50621062); 土木工程防灾国家重点实验室开放课题基金资助项目(SLDRCE-08-TS-02)
作者简介: 王培军(1976—), 男, 工学博士, 主要研究方向为钢结构抗火性能和设计理论. E-mail: tjwangpj@gmail.com
李国强(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为多高层钢结构和钢结构抗火性能理论. E-mail: gqli@tongji.edu.cn

力达到最大值时对应的温度. 钢柱轴力达到最大值后, 钢柱发生整体失稳, 挠度将突然增大, 轴力开始减小. 约束钢柱的破坏温度 $t_{\text{res},f}$ 为钢柱轴力恢复至其初始值时的温度, 因为初始值代表钢柱的设计功能. 约束钢柱的破坏温度一般大于或等于其屈曲温度. 如果钢柱所受轴向约束刚度很小或者荷载比很大, 钢柱屈曲后轴力会突然下降, 钢柱的屈曲温度将与破坏温度相同. 对无约束钢柱来说, 其屈曲温度与破坏温度相同, 用 $t_{\text{free},b}$ 表示.

本文利用有限元方法研究约束钢柱的抗火性能. 研究的参数包括: 轴力荷载比 ρ_N , 轴向约束刚度比 β_1 , 转动约束刚度比 β_r 和长细比 λ 等. 轴力荷载比 ρ_N 的定义为

$$\rho_N = \frac{N}{N_{\text{cr},0}} \quad (1)$$

式中: N 为火灾下钢柱的设计轴力^[5]; $N_{\text{cr},0}$ 为常温下钢柱的屈曲承载力^[6]. 轴向约束刚度比 β_1 和转动约束刚度比 β_r 的定义分别为

$$\beta_1 = \frac{k_1}{k_{c,0}}, \quad \beta_r = \frac{k_r}{k_{r,0}} \quad (2)$$

式中: $k_{c,0} = E_{20}A/L$, 为常温下钢柱的轴向刚度; E_{20} 表示常温下钢材弹性模量; A, L 分别表示钢柱截面面积和长度; $k_{r,0} = E_{20}I/L$, 为常温下钢柱的抗弯刚度; k_1 和 k_r 分别为轴向约束刚度和转动约束刚度.

2 约束钢柱火灾下的受力性能

利用验证的有限元模型^[7]对约束钢柱火灾下的受力性能进行参数分析. 钢柱为焊接 H 型截面 H 200×14×250×10 (翼缘宽度 200 mm, 截面高度 250 mm, 翼缘和腹板厚度分别为 14 mm 和 10 mm), 常温下钢材屈服强度为 235 MPa, 弹性模量为 205 GPa, 升温条件下钢材材料模型采用 EC3^[8] 模型. 分析参数见表 1. 对铰接框架, 钢柱受到的轴向约束刚度比一般为 0.02^[1]; 对刚接和半刚接框架, 钢柱受到的轴向约束刚度比将大于 0.02, 表 1 给出的轴向约束刚度比 0.05 和 0.10 即代表此情况; 约束刚度比 10.0 则代表完全约束钢柱. 即使对铰接的钢柱, 也不可避免地存在一定程度的转动约束^[7], 表 1 中转动约束刚度比的取值分别代表钢柱从铰接到完全固接.

表 1 分析参数

Tab.1 Parameters

参数影响	变化参数	固定参数
ρ_N 的影响	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9	$\beta_1 = 0.05$ $\lambda = 80$ $\beta_r = 0.0$
β_1 的影响	0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.10, 10.00	$\rho_N = 0.5$ $\lambda = 80$ $\beta_r = 0.0$
λ 的影响	40, 60, 80, 100, 120, 150	$\rho_N = 0.5$ $\beta_1 = 0.05$ $\beta_r = 0.0$
β_r 的影响	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 10.0, 50.0	$\rho_N = 0.5$ $\beta_1 = 0.05$ $\lambda = 80$

2.1 轴力的影响

在约束钢柱屈曲前, 轴力线性增加, 当其达到高温下的屈曲承载力时, 发生屈曲, 轴力下降. 对于轴力荷载比小的钢柱, 则轴力下降较为缓慢, 如图 1a 所示, 约束钢柱破坏温度 $t_{\text{res},f}$ 将大于其屈曲温度 $t_{\text{res},b}$, 在这种情况下, 考虑屈曲后性能可提高钢柱的临界温度; 对于荷载比大的钢柱, 轴力将突然下降, 即 $t_{\text{res},f}$ 与 $t_{\text{res},b}$ 相同, 此时考虑屈曲后性能对提高临界温度的效果不明显.

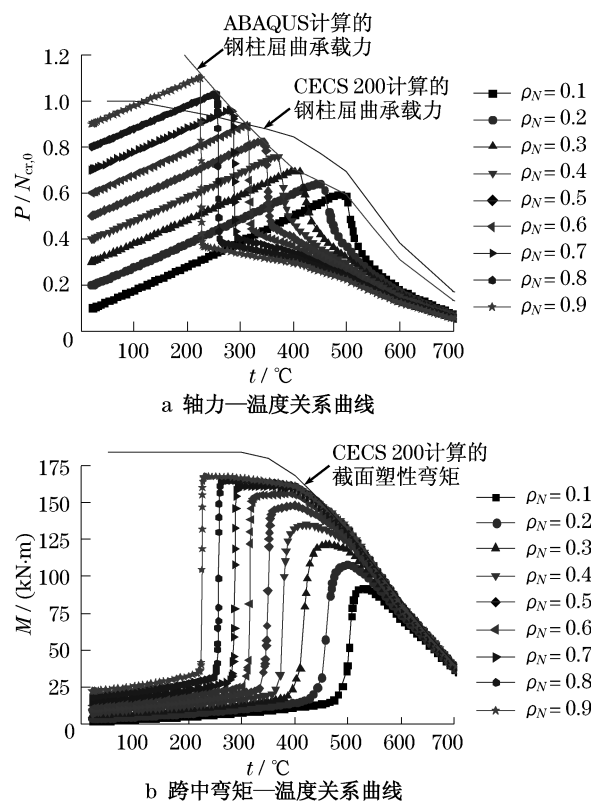


图 1 轴力对约束钢柱受火性能的影响 ($\lambda = 80, \beta_1 = 0.05$)

Fig.1 Effects of axial load on behaviors of restrained column in fire

图1a给出了ABAQUS有限元模型^[7]和CECS 200公式(7.2.2)^[5]计算的无约束钢柱高温下的屈曲承载力.当温度小于300℃时,CECS 200计算的钢柱屈曲承载力小于有限元分析结果;但当温度大于300℃时,CECS 200计算结果大于有限元分析结果.这种差别,主要是由于有限元模型和CECS 200公式采用了不同的材料模型.有限元模型中,升温条件下的钢材材料模型采用EC3模型^[8],而公式(7.2.2)采用了CECS 200中规定的材料模型^[5].

约束钢柱屈曲前,跨中弯矩 M 较小,并且基本保持不变;钢柱屈曲后,跨中弯矩将突然增大,如图1b所示.因此约束钢柱屈曲前,假设钢柱仍为轴心受力构件;在约束钢柱屈曲后阶段,考虑轴力和弯矩的共同作用.约束钢柱屈曲后,跨中弯矩几乎接近高温钢柱截面的塑性弯矩.

2.2 轴向约束的影响

如图2所示,随着轴向约束刚度比的增加, $t_{res,b}$ 和 $t_{res,f}$ 都减小.但当约束刚度比超过某一数值后(此算例中为0.05),随着约束刚度比的增加, $t_{res,f}$ 将不再减小.另外,当约束刚度比小于某一数值后(此处为0.005), $t_{res,f}$ 和 $t_{free,b}$ 基本相同,此时可不考虑约

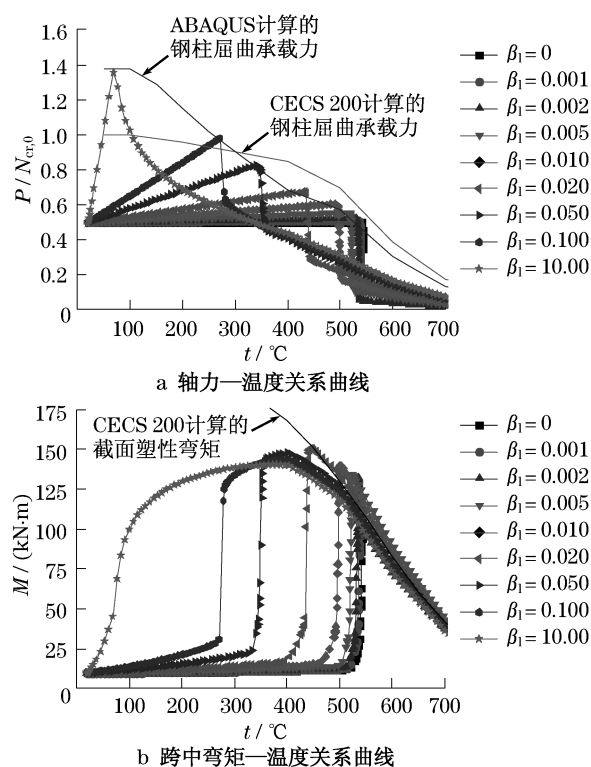


图2 轴向约束对约束钢柱受火性能的影响($\lambda=80, \rho_N=0.50$)

Fig.2 Effects of axial restraint on behaviors of restrained column in fire

束对 $t_{res,f}$ 的影响.如图2a所示,约束刚度比为0.005的约束钢柱, $t_{res,f}$ 为520℃,与 $t_{free,b}$ 几乎相同.

2.3 长细比的影响

图3a中A点—F点对应的温度为不同长细比约束钢柱破坏温度.由图可知, $t_{res,b}$ 和 $t_{res,f}$ 均随着钢柱长细比的增加而降低.但当钢柱的长细比大于80后, $t_{res,b}$ 变化不大,如当 $\lambda=80$ 时, $t_{res,f}$ 约为350℃;当 $\lambda=150$ 时, $t_{res,f}$ 约为325℃,仅降低25℃.

图3b为不同长细比约束钢柱跨中弯矩—温度关系曲线,在钢柱屈曲时,截面弯矩突然增加.对长细比小于80的钢柱,跨中截面弯矩在屈曲前很小,且随着温度的增加基本保持不变;对长细比大于80的钢柱,在钢柱屈曲前,跨中截面弯矩已经随着温度的增加而开始增加,即对长细比大的钢柱,轴向约束对弯矩的影响更大.

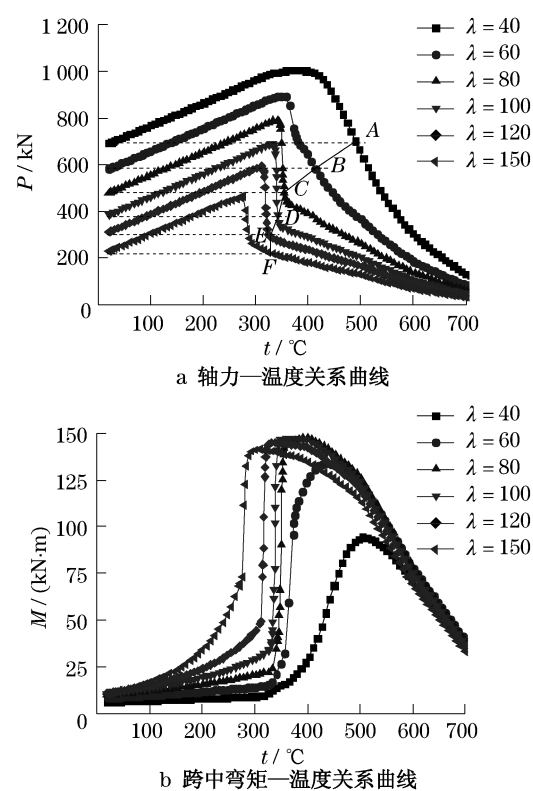


图3 长细比对约束钢柱受火性能的影响($\rho_N=0.50, \beta_1=0.05$)

Fig.3 Effects of slenderness on behaviors of restrained column in fire

2.4 转动约束的影响

随着转动约束刚度的增大, $t_{res,b}$ 和 $t_{res,f}$ 随之增大,如图4a所示,这是由于转动约束减小钢柱的计算长度,进而提高钢柱的屈曲温度和破坏温度.

当转动约束刚度较小时,其微小变化就会对

$t_{\text{res},b}$ 和 $t_{\text{res},f}$ 带来很大影响. 如图 4a 和图 4b 所示, 当转动约束刚度比从 0.2 增加到 0.4 时, $t_{\text{res},f}$ 可提高近 80 °C. 但当转动约束刚度很大时(如转动约束刚度比大于 2.0 时), 其变化基本对钢柱的抗火性能没有影响. 例如, 对约束刚度比为 2.0 和 4.0 的约束刚度, 其轴力—温度曲线和跨中弯矩—温度曲线的差别很小, 基本重合, 如图 4a 和图 4b 所示.

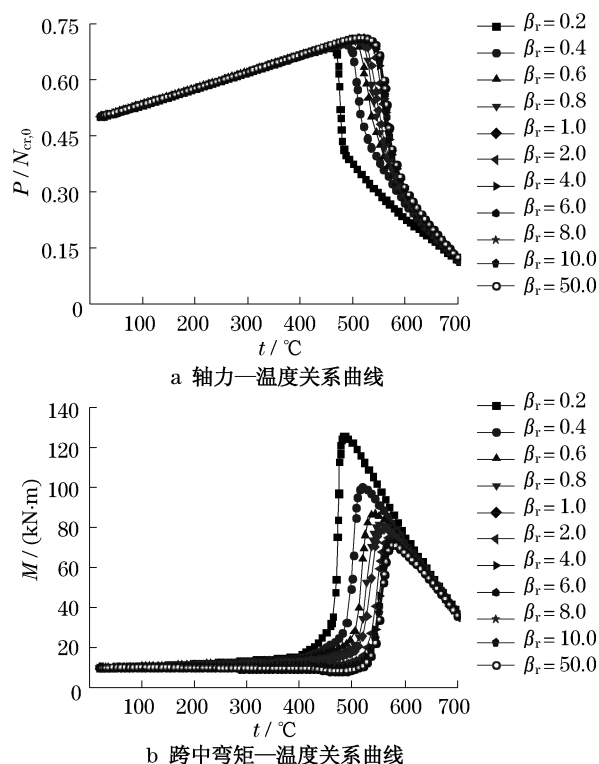


图 4 转动约束对约束钢柱受火性能的影响 ($\rho_N = 0.5, \lambda = 80, \beta_1 = 0.02$)

Fig.4 Effects of rotational restraint on behaviors of restrained column in fire

3 约束钢柱的破坏温度

约束钢柱破坏温度 $t_{\text{res},f}$ 随着轴力荷载比的增加而减小, 但是对具有不同的轴向约束刚度和不同长细比的钢柱, $t_{\text{res},f}$ 减小的程度有很大差别, 如图 5a 所示. 例如, 对于无约束钢柱, 当轴向荷载比从 0.1 增加到 0.9 时, $t_{\text{res},f}$ 将由 750 °C 减小到 350 °C; 对于轴向约束刚度比为 0.5 的钢柱, $t_{\text{res},f}$ 则由 680 °C 减小到 100 °C.

由图 5b 可知, 存在一个临界轴向约束刚度比, 当轴向约束刚度比大于该数值时, 随着轴向约束刚度比的增加, $t_{\text{res},f}$ 保持不变. 该临界轴向约束刚度比的大小与轴向荷载比有关. 如当轴向荷载比为 0.2

时, 临界约束刚度比为 0.02; 当轴向荷载比为 0.8 时, 该临界约束刚度比则为 0.5.

$t_{\text{res},f}$ 与长细比之间的关系较为复杂. 如图 5c 所示, 当约束刚度比小于 0.01 时, 随着长细比的增加, $t_{\text{res},f}$ 首先减小; 当构件的长细比大于 80 后, $t_{\text{res},f}$ 又开始增加. Wang^[1] 认为这是因为中等长细比的钢柱在火灾下其刚度降低最大.

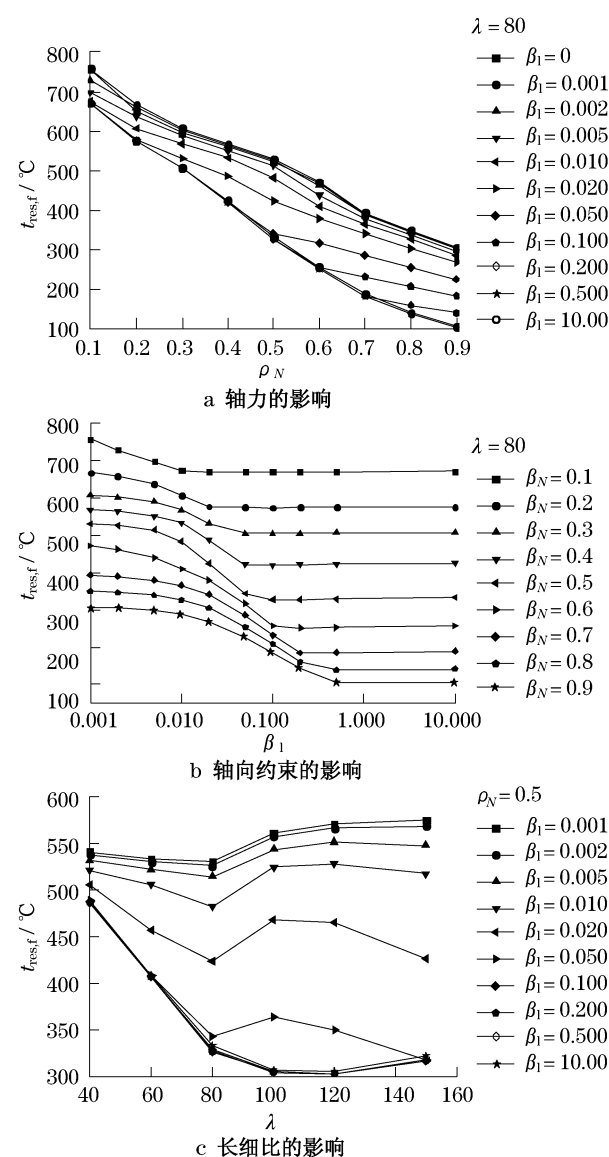


图 5 约束钢柱破坏温度

Fig.5 Failure temperatures of restrained column

4 无约束和约束钢柱破坏温度关系

如图 6 所示, 对轴向约束刚度比小于 0.002 的钢柱, $t_{\text{res},b}$ 与 $t_{\text{res},f}$ 之差很小, 如当轴力荷载比为 0.1 时, 两者之差约为 60 °C; 当轴力荷载比为 0.8 时, 两

者之差仅为 10 °C. 说明在该情况下,可不考虑轴向约束对 $t_{res,f}$ 的影响.

$t_{free,b}$ 与 $t_{res,f}$ 之差随着轴向约束刚度比的增大而增大,但当轴向约束刚度比大于 0.5,两者之差将保持不变,不受约束刚度比大小的影响. $t_{free,b}$ 与 $t_{res,f}$ 之差的最大值可超过 200 °C,如图 6 中轴向约束刚度比大于 0.1,轴向荷载比为 0.7 的钢柱.

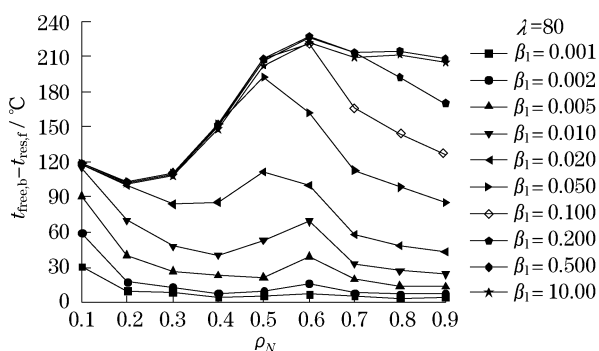


图 6 无约束钢柱和约束钢柱破坏温度的关系

Fig.6 Differences between failure temperatures of unrestrained and restrained-column

5 约束钢柱屈曲和破坏温度关系

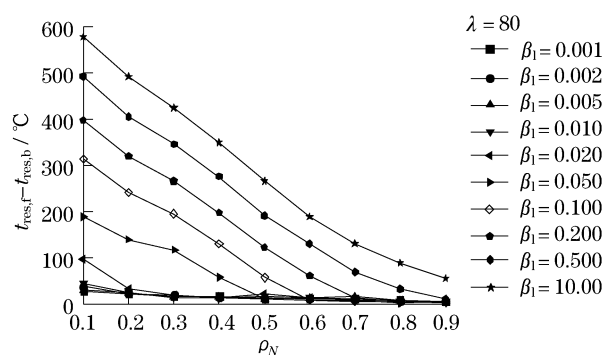
对轴向约束刚度比小的钢柱(如本例中轴向约束刚度比小于 0.02 的钢柱), $t_{res,f}$ 与 $t_{res,b}$ 之差很小, 仅为 50 °C, 如图 7a 所示. 该结论对轴力荷载比从 0.1~0.9 的钢柱均成立, 即对该类型的约束钢柱, 考虑屈曲后性能也不能显著提高其破坏温度. 对轴向约束刚度比大于 0.02 的钢柱, $t_{res,f}$ 与 $t_{res,b}$ 之差与轴向荷载比有关, 随着荷载比的增大, 该差值逐渐减小. 如图 7a 所示, 约束刚度比为 0.5 的钢柱, 当荷载比为 0.1 时, $t_{res,f}$ 与 $t_{res,b}$ 之差可达 500 °C; 但当荷载比为 0.8 时, 其差值仅为 50 °C. 即对荷载比小的轴向约束钢柱, 利用屈曲后性能, 可显著提高其破坏温度.

由图 7b 可知, 当约束刚度比小于 0.02 或大于 0.5 时, 约束刚度比对 $t_{res,f}$ 与 $t_{res,b}$ 之差的影响很小.

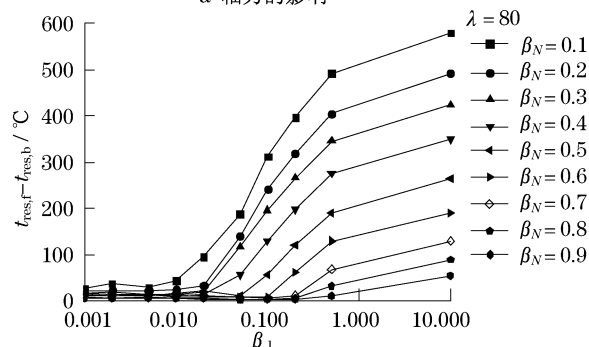
不同长细比情况下 $t_{res,f}$ 与 $t_{res,b}$ 之差如图 7c 所示. 对约束刚度比小于 0.02 的钢柱, 该差值较小, 仅为 50 °C, 且不受长细比变化的影响; 对约束刚度比大于 0.02 的钢柱, 随着长细比的增加, $t_{res,f}$ 与 $t_{res,b}$ 之差先减小后增大.

6 结论

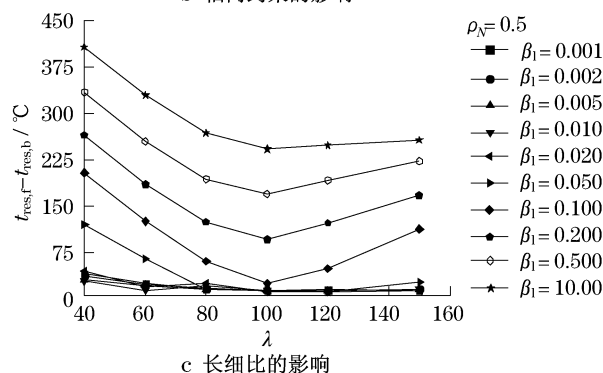
(1) 约束钢柱屈曲前, 轴力基本线性增加. 钢柱屈曲前截面弯矩较小; 约束钢柱屈曲后, 截面弯矩突



a 轴力的影响



b 轴向约束的影响



c 长细比的影响

图 7 约束钢柱破坏温度与屈曲温度的关系

Fig.7 Differences between failure and buckling-temperatures of restrained column

然增大, 钢柱处于轴力和弯矩的共同作用下.

(2) 轴向约束减小约束钢柱的破坏温度, 并且随着轴向约束刚度的增加, 钢柱的破坏温度逐渐减小; 转动约束可提高约束刚度的破坏温度, 当转动约束刚度较小时, 转动约束刚度的微小变化即可对钢柱的抗火性能有显著影响.

(3) 存在临界轴向约束刚度比, 当约束刚度比大于该临界约束刚度比时, 其大小不再对约束钢柱的破坏温度产生影响.

(4) 随着轴力荷载比和长细比的增大, 约束钢柱的破坏温度和屈曲温度之差减小, 随着轴向约束刚度比的增大, 两者之差增大.

(下转第 1632 页)