

文章编号:1000-582X(2010)10-076-07

## 轴心受压高强度 H 型钢柱抗火性能

王卫永<sup>1</sup>, 李国强<sup>2</sup>, 戴国欣<sup>1</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)

**摘要:**引入高强度钢高温下的力学性能参数, 推导了高强度钢轴心受压柱在高温下的临界应力, 进而得到高温下整体稳定系数与临界温度。将高强度钢和普通钢轴心受压柱在高温下的稳定系数和临界温度进行了对比, 结果表明:普通钢轴心受压柱高温下的整体稳定系数和临界温度不适用于高强度钢轴心受压柱, 高强度钢轴心受压柱整体稳定系数比普通钢低。使用有限元方法对文中给出的高强度钢轴心受压柱的整体稳定系数进行了验证, 二者得出的结果吻合较好。

**关键词:**高强度钢; 柱; 抗火性能; 整体稳定; 临界温度

**中图分类号:** TU392

**文献标志码:** A

## Fire-resistance performance of high-strength-steel H shaped columns under the axial compression

WANG Wei-Yong<sup>1</sup>, LI Guo-Qiang<sup>2</sup>, DAI Guo-Xin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** In order to investigate the fire-resistance performance of high-strength-steel column, this paper deduces the critical stress of high-strength-steel columns under the axial compression at high temperature by introducing the mechanical properties of high-strength-steel at high temperature. Moreover, coefficients of overall stability and critical temperature for high-strength-steel column under the axial compression are obtained which can provide a reference for design. The comparison of overall stability coefficient and critical temperature between high-strength-steel and normal steel is made. The results show that the overall stability coefficient and critical temperature for normal steel is not applicable for high-strength-steel, and the overall stability coefficient for high-strength-steel is smaller than that for normal steel. The paper uses the finite element analysis to validate the overall stability coefficient, and good match was found between them.

**Key words:** high-strength-steel; column; fire resistance; overall stability; critical temperature

高强度钢具有较高的强度, 可有效减轻结构自重, 提高结构的抗震性能, 在建筑中得到越来越广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。例如: 德国柏林索尼中心大楼 (Sony Center) 屋顶桁架采用了 S460 和 S690 钢材

(强度标准值 460 MPa 和 690 MPa); 澳大利亚悉尼的星城饭店 (Star City) 采用了屈服强度为 650 MPa 和 690 MPa 的钢材。位于澳大利亚悉尼中心区世界广场 (World Square) 的 Latitude 大厦, 在转换层

收稿日期: 2009-05-19

基金项目: 教育部高等学校博士学科点科研基金资助项目 (20090191120032); 国家自然科学基金资助项目 (51008320)

作者简介: 王卫永 (1982-), 男, 重庆大学博士, 从事钢结构抗火设计研究, (E-mail) wwyong200@yahoo.com.cn。

的钢结构中,采用了 16 mm 厚的 Bisplate80 (690 MPa) 钢板,以减小结构重量。横滨的 Landmark Tower 大厦,其 I 形截面柱采用了屈服强度为 600 MPa 钢材<sup>[3]</sup>。在我国,2004 年,低合金高强度钢 ASTM A913 Gr60(相当于 Q420)在北京新保利大厦工程成功使用<sup>[4]</sup>,经过几年的发展,目前,国内已有数个钢结构工程使用高强度钢,如国家体育场(鸟巢)使用国产 Q460E-Z35 钢,最大板厚 110 mm<sup>[5]</sup>。国家游泳中心(水立方)工程使用国产 Q420C 钢<sup>[6]</sup>,中央电视台新台址工程也使用了 Q420D-Z25、Q460E-Z35 级别钢<sup>[7]</sup>。

关于高强度结构钢的屈服强度标准,目前还不统一。澳大利亚规范<sup>[8]</sup>定义屈服强度大于 450 MPa,美国 ASTM<sup>[9]</sup>规定屈服强度大于 690 MPa,香港规范<sup>[10]</sup>定义屈服强度在 460~690 MPa 之间,欧洲标准<sup>[11]</sup>规定屈服强度大于 460 MPa,我国李国强教授<sup>[12]</sup>定义屈服强度大于等于 440 MPa,抗拉强度大于等于 590 MPa 的钢材,在建筑结构中均属于高强度钢材。

建筑火灾是火灾中发生次数最多,损失最大的一种,对人类的生命和财产造成严重威胁。2008 年 2 月 9 日晚上,中央电视台新台址北配楼发生火灾,大火燃烧了近 6 h。前面提到中央电视台新台址工程使用了 Q420D-Z25、Q460E-Z35 级别高强度钢,而北配楼结构形式则为耐火性能较好的型钢混凝土结构,所以大楼整体结构受损并不大。若是主楼高强度钢结构发生火灾,后果不堪设想,因为高强度钢与普通钢材类似,不耐热,在火灾下容易破坏,所以研究高强度钢构件的受火性能具有重要理论意义和工程应用价值。

目前,关于高强度钢的抗火研究还不多,李国强等<sup>[13]</sup>对高强度螺栓用钢 20MnTiB 进行了高温下的试验研究,得到了屈服强度、极限强度、弹性模量、伸长率和膨胀系数的计算方法。屈立军<sup>[14]</sup>对某型 Q420 结构用钢在高温下的强度性能进行试验研究,结果表明,恒载加温比恒温加载钢材的强度要小。Chen<sup>[15]</sup>对高强度钢 BISPLATE80(相当于 ASTM A 514, EN 10137-2 Grade S690Q, 和 JISG3128)和普通钢 XLERPLATE Grade 350(相当于 ASTM 573-450)进行了稳态和瞬态试验研究,结果表明高强度钢和普通钢的弹性模量和屈服强度在 22~540 °C 之间时非常相似,温度超过 540 °C 以后差别较大。Chen<sup>[16]</sup>使用有限元软件 ABAQUS 研究了高强度箱型和 I 字形钢柱在高温下的强度,并将有限元分析结果和美国、欧洲、澳大利亚规范得出的热

轧钢柱在高温下的承载力结果进行了比较,结果发现,使用美国和欧洲规范计算得出的高强度钢柱的承载力结果偏于保守。

引入高强度钢高温下的力学性能参数,推导了高强度钢轴心受压柱在高温下的临界应力,得到高强度钢轴心受压柱高温下整体稳定系数与临界温度,供工程抗火设计计算时参考。

## 1 高强度钢高温下的力学性能

高强度钢在建筑中的应用主要有制造高强度螺栓和制作结构基本构件,影响高强度钢抗火性能的主要力学性能参数为高温下的屈服强度和弹性模量,文中采用 Chen<sup>[15]</sup>对高强度钢 BISPLATE80 的试验结果得出的高强度钢弹性模量和对应残余应变为 0.2% 时的屈服强度。根据试验结果,Chen<sup>[16]</sup>给出了一组拟合公式,即:

高强度钢高温下屈服强度

$$\frac{f_{y,T}}{f_y} = a - \frac{(T-b)^n}{c}, \quad (1)$$

式中: $f_{y,T}$ 为温度  $T$  °C 时高强度钢材的屈服强度, $f_y$ 为常温下高强度钢的屈服强度。参数  $a, b, c, n$  的取值见表 1。

表 1 屈服强度公式中参数取值表

温度/°C	$22 \leq T < 350$	$350 \leq T < 650$	$650 \leq T < 1000$
$a$	1	0.88	0.45
$b$	22	300	650
$c$	140	285 000	13
$n$	0.5	2	0.3

高强钢高温下弹性模量

$$\frac{E_T}{E} = 1.0 - \frac{T-22}{978}, \quad (2)$$

式中: $E_T$ 为温度  $T$  °C 时高强度钢材的弹性模量, $E$ 为常温下高强度钢的弹性模量。

## 2 高温下高强度钢轴心受压柱临界应力

我国钢结构设计规范<sup>[17]</sup>,按 1‰ 构件长度的初弯曲,同时考虑残余应力的影响计算常温下轴压构件的极限承载力,并且按截面形式的不同,将轴压稳定系数  $\varphi$  归类为  $a, b, c, d$  4 条曲线。

计算高温下轴心受压高强度钢柱的极限承载力(或临界应力)时,可采用与常温下同样的假定和计

算方法<sup>[12]</sup>,即假定构件有初弯曲  $y_0$  (见图1),

$$y_0 = \delta_0 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right), \quad (3)$$

构件受轴压力  $N$  作用后,挠度曲线为

$$y = \left[ \frac{\delta_0}{\left(1 - \frac{N}{N_{ET}}\right)} \right] \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right), \quad (4)$$

式中,  $N_{ET}$  为高温下构件的欧拉临界力,按下列公式计算:

$$N_{ET} = \sigma_{ET} A, \quad (5)$$

$$\sigma_{ET} = \pi^2 \frac{E_T}{\lambda^2}, \quad (6)$$

其中,  $A$  为构件的毛截面面积;  $\lambda$  为构件的长细比。

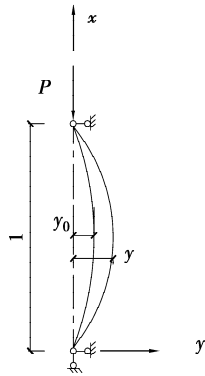


图1 轴压高强度钢构件的计算模型

构件的最大挠度  $\delta_{\max}$  在中点处,为

$$\delta_{\max} = y \Big|_{x=\frac{l}{2}} = \frac{\delta_0}{\left(1 - \frac{N}{N_{ET}}\right)}, \quad (7)$$

构件中点截面除受轴压力  $N$  外,还受附加弯矩  $M = N\delta_{\max}$ ,则截面边缘应力为

$$\sigma = \frac{N\delta_{\max}}{W} + \frac{N}{A}, \quad (8)$$

式中,  $W$  为构件的毛截面模量。将式(5)、(7)代入式(8)得

$$\sigma = \frac{N}{A} \left[ \frac{\delta_0 \frac{A}{W}}{1 - \frac{N}{(A\sigma_{ET})}} + 1 \right], \quad (9)$$

令

$$e_0 = \delta_0 \frac{A}{W}. \quad (10)$$

称  $e_0$  为构件的初偏心率,该参数显然与温度无关。当构件中点截面边缘屈服时,塑性变形将迅速发展,而在构件中点形成塑性铰,构件丧失稳定。因此可将构件中点截面边缘屈服时平均应力状态作为构件的极限承载应力状态(临界应力)。从而,由式

(9)、(10)有

$$\sigma_{\sigma T} \left[ \frac{e_0}{1 - \frac{\sigma_{\sigma T}}{\sigma_{ET}}} + 1 \right] = f_{yT}, \quad (11)$$

式中,  $\sigma_{\sigma T}$  表示高温下轴压构件的临界应力。由式(11)可解得

$$\sigma_{\sigma T} = \frac{1}{2} \{ (1 + e_0) \sigma_{ET} + f_{yT} - \sqrt{[(1 + e_0) \sigma_{ET} + f_{yT}]^2 - 4 f_{yT} \sigma_{ET}} \}, \quad (12)$$

上式中,  $\sigma_{ET}$ 、 $f_{yT}$  取构件常温下的欧拉临界应力

$\sigma_E = \pi^2 \frac{E}{\lambda^2}$ 、屈服强度  $f_y$  时,即为轴压构件在常温下的临界应力  $\sigma_{\sigma}$ ,

$$\sigma_{\sigma} = \frac{1}{2} \{ (1 + e_0) \sigma_E + f_y - \sqrt{[(1 + e_0) \sigma_E + f_y]^2 - 4 f_y \sigma_E} \}, \quad (13)$$

公式(13)为考虑初弯曲,根据边缘屈服准则得出的临界应力公式,我国现行钢结构设计规范关于轴压构件的临界应力计算公式<sup>[17]</sup>,考虑了初弯曲和残余应力的综合影响,并采用最大强度准则,得到了与公式(13)形式相同的临界应力计算公式,其中,各类截面构件的初偏心率  $e_0$  取值如下:

a类截面:

$$e_0 = 0.152\bar{\lambda} - 0.014, \quad (14)$$

b类截面:

$$e_0 = 0.300\bar{\lambda} - 0.035, \quad (15)$$

c类截面:

$$\begin{cases} e_0 = 0.595\bar{\lambda} - 0.094, \bar{\lambda} \leq 1.05 \\ e_0 = 0.302\bar{\lambda} + 0.216, \bar{\lambda} > 1.05 \end{cases} \quad (16)$$

d类截面:

$$\begin{cases} e_0 = 0.915\bar{\lambda} - 0.132, \bar{\lambda} \leq 1.05 \\ e_0 = 0.432\bar{\lambda} + 0.375, \bar{\lambda} > 1.05 \end{cases} \quad (17)$$

上述各式中:

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}}. \quad (18)$$

### 3 高温下高强度钢轴心受压柱稳定系数

#### 3.1 高温下高强度钢轴心受压柱稳定系数

按照与常温下相似的方法,将高强度钢高温下临界应力  $\sigma_{\sigma T}$  表示为

$$\sigma_{\sigma T} = \varphi_T f_{yT}, \quad (19)$$

式中,  $\varphi_T$  为高温下轴压钢柱的稳定系数。

则由式(19)及式(1)、(2)、(12)、(14)~(18)可根据长细比和截面类型(a、b、c或d)计算出各类截面构件的  $\varphi_T$ 。文中计算了高强度钢 BISPLATE 80

不同的长细比高温下的稳定系数,结果见图 2 和图 3 所示。从图 3 中可以看出,高强度钢的稳定系数随长细比的增加而降低,温度为 500 ℃时,稳定系数随长细比的变化最明显,温度为 900 ℃时,稳定系数随长细比的变化最不明显。从图 3 中可以看出,确定的长细比下,随着温度的升高,稳定系数先降低,

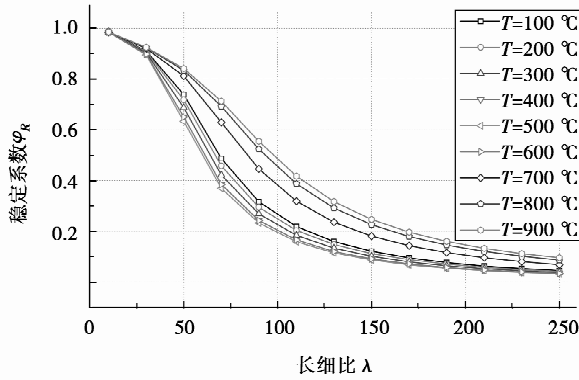


图 2 高强度钢轴心受力构件高温下稳定系数与长细比的变化曲线

然后再升高,在 500 ℃左右降到最低,在 650 ℃以后开始剧烈增加。原因可能是高强钢的屈服强度随温度的变化曲线在 650 ℃存在一个拐点。

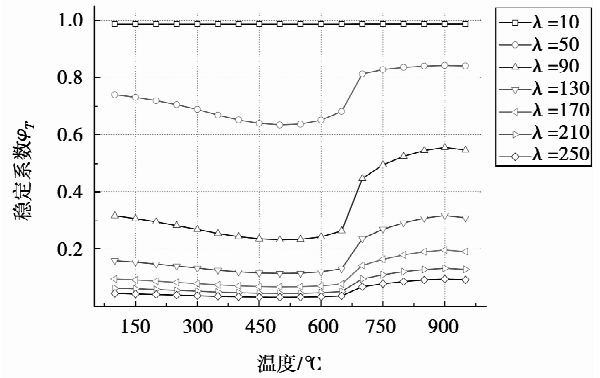


图 3 高强度钢轴心受力构件稳定系数随温度的变化曲线

由于

$$\sigma_{cr} = \varphi f_y, \quad (20)$$

式中,  $\varphi$  为常温下轴压钢构件的稳定系数,其中  $\varphi$  可直接查规范有关表格得到<sup>[17]</sup>。

表 2 高温下轴心受压钢构件(高强度结构钢)的稳定验算参数  $\alpha_c$

℃

长细比 $\lambda$	温度																
	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900
10	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
50	0.995	0.983	0.969	0.953	0.933	0.910	0.891	0.877	0.871	0.874	0.890	0.925	1.095	1.119	1.132	1.140	1.145
90	0.987	0.960	0.929	0.895	0.857	0.816	0.785	0.764	0.754	0.759	0.784	0.843	1.313	1.427	1.497	1.544	1.569
130	0.985	0.954	0.918	0.879	0.838	0.793	0.759	0.737	0.727	0.732	0.758	0.822	1.399	1.566	1.679	1.757	1.801
170	0.984	0.951	0.914	0.873	0.830	0.784	0.749	0.726	0.716	0.721	0.748	0.814	1.436	1.628	1.761	1.856	1.909
210	0.984	0.950	0.912	0.870	0.826	0.779	0.744	0.721	0.710	0.715	0.742	0.809	1.456	1.662	1.806	1.911	1.970
250	0.983	0.949	0.910	0.868	0.823	0.776	0.740	0.717	0.707	0.712	0.739	0.807	1.469	1.683	1.835	1.945	2.008

定义轴心受压构件高温下和常温下的稳定系数之比为参数  $\alpha_c$ <sup>[12]</sup>,即

$$\alpha_c = \frac{\varphi_T}{\varphi} = \frac{\sigma_{crT} f_y}{\sigma_{cr} f_{yT}}, \quad (21)$$

则由式(21)及式(1)、(12)~(18)可计算出各类截面构件的  $\alpha_c$ 。计算结果表明,各类截面构件的  $\alpha_c$  差别不大,取其平均值作为其代表值,  $\alpha_c$  主要取决于构件的温度和构件的长细比  $\lambda$ 。在进行高强度轴心受压构件抗火计算时,  $\alpha_c$  可直接按表 2 取用。

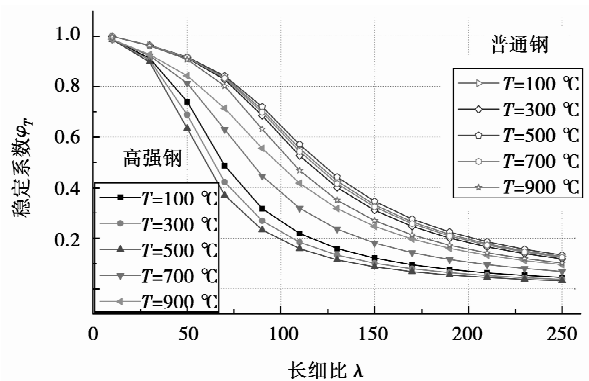


图 4 高强度钢和普通结构钢高温下稳定系数的比较

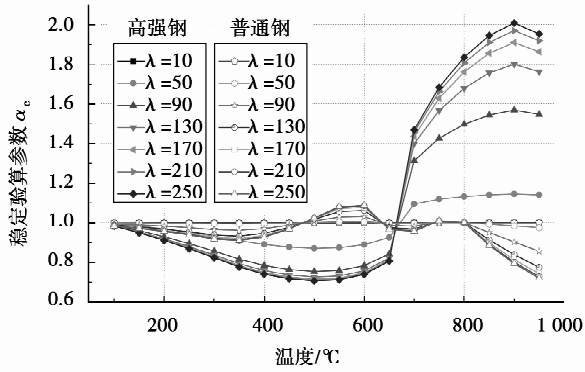


图 5 高强度钢和普通结构钢高温下稳定计算参数的比较

### 3.2 高温下高强度钢与普通钢轴心受压柱稳定系数的比较

为了得到高强度钢和普通钢稳定系数随温度变化规律的区别,采用文献<sup>[12]</sup>的方法计算了普通结构钢高温下稳定系数  $\varphi_T$  和稳定验算参数  $\alpha_c$ ,采用文中的方法计算了高强度结构钢高温下稳定系数  $\varphi_T$  和稳定验算参数  $\alpha_c$ ,并将他们的计算结果进行了比较,见图 4 和图 5 所示。从图 4 可以看出,同样的长细比和温度下,高强度钢的稳定系数比普通结构钢低,对中度长细比的构件二者相差最大。主要原因是轴心轴压构件的稳定系数与钢材的强度呈反相关

表 3 轴心受压构件(高强度结构钢)的临界温度  $T_d$  / °C

长细比 $\lambda$	荷载比 $R$												
	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90
10	666	656	651	650	648	629	609	587	564	538	509	475	433
50	665	655	651	650	637	603	567	533	501	470	433	384	293
90	671	655	651	650	573	530	500	472	442	400	311	267	234
130	677	656	651	650	547	514	487	461	429	369	289	255	227
170	682	656	651	650	538	509	483	456	423	344	283	252	225
210	685	656	651	650	534	506	480	454	419	330	279	251	224
250	687	656	651	650	532	504	478	452	416	325	278	250	223

表 4 ANSYS 分析结果与钢结构设计规范结果的比较

长细比 $\lambda$	50		130		210	
	ANSYS 结果	规范结果	ANSYS 结果	规范结果	ANSYS 结果	规范结果
稳定系数	0.858	0.856	0.392	0.387	0.174	0.170
误差/%	0.23		1.3		2.4	

表 5 本文和 ANSYS 得到的高强度钢轴压构件稳定系数的比较

长细比 $\lambda$	稳定系数 $\varphi_T$								
	温度 300 °C			温度 500 °C			温度 700 °C		
	本文	ANSYS	误差/%	本文	ANSYS	误差/%	本文	ANSYS	误差/%
50	0.688	0.680	0.3	0.634	0.605	1.1	0.812	0.856	1.3
130	0.133	0.133	0.0	0.114	0.112	0.4	0.236	0.240	0.4
210	0.052	0.053	0.5	0.046	0.037	0.5	0.095	0.086	2.5

关系(这可以从稳定系数的计算公式得出),即钢材强度越高,稳定系数越小,钢材强度越低,稳定系数越大。但是,钢柱的承载力并不仅由稳定系数确定,还与屈服强度有关,由稳定系数与屈服强度的乘积

确定的。计算表明,尽管高强钢的稳定系数与普通钢相比稍低,由于高强钢的屈服强度比普通钢的高,高强钢的稳定系数与屈服强度的乘积仍然高于普通钢,即同样几何条件下,高强钢承载力高于普通钢。

从图 5 中可以看出,高强度钢高温下的稳定验算参数与普通钢相差很大,同样的长细比和温度下,高强度钢的稳定验算参数比普通钢大,所以,普通钢的稳定验算参数不适用于高强度结构钢。

## 4 高强度钢轴心受压柱临界温度

### 4.1 高强度钢轴心受压柱临界温度计算

为了得到高强钢轴心受压柱的临界温度<sup>[12]</sup>,设

$$\frac{N}{\varphi_T A} = f_{yT}, \quad (22)$$

式中  $\gamma_R$  为钢的抗力系数,近似可取  $\gamma_R = 1.1$ 。

构件达到抗火承载力极限状态,据此可确定轴心受压构件的临界温度  $T_d$ 。上式为关于  $T_d$  的超越方程,不能写出  $T_d$  的显式表达式,为便于应用,将上式改写为

$$\frac{N}{\varphi A f} = \frac{f_{yT}}{f_y} \gamma_{R\alpha_c}, \quad (23)$$

定义式(23)左端项为轴心受压构件的荷载比  $R$ ,即

$$R = \frac{N}{\varphi A f}, \quad (24)$$

采用数值计算,得出了各荷载比  $R$  及长细比  $\lambda$  下高强度钢轴心受压构件的临界温度  $T_d$ ,见表 3。计算中采用了高温下的稳定系数,由于前面计算的高温稳定系数取值是各类截面的平均值,所以临界温度对截面类型也不分类,各类均适用。

### 4.2 高强钢与普通钢轴心受压柱临界温度的比较

为了得到高强度钢和普通钢临界温度随荷载比变化规律的区别,采用文献[12]中给出的普通结构钢临界温度表和文中的表 3 中结果进行了比较,见图 6 所示。从图 6 可以看出,高强钢的临界温度随荷载比的变化是非线性的,并且随着长细比的增加而降低;而普通结构钢的临界温度随荷载比的增加而线性降低,并且长细比对临界温度的影响不大。所以,普通钢的临界温度结果不适用于高强度结构钢。

## 5 有限元验证

为了验证文中给出的高强度钢轴心受压柱整体稳定系数的准确性,采用 ANSYS 有限元方法分析了多个不同长细比,不同温度下的高强度钢轴心受压柱的极限承载力,将有限元分析结果和文中得出的结果进行比较。

有限元采用的单元模式为 beam188 单元,应力应变关系采用理想弹塑性,考虑几何非线性和初始缺陷对构件进行非线性屈曲分析,得到其极限承载

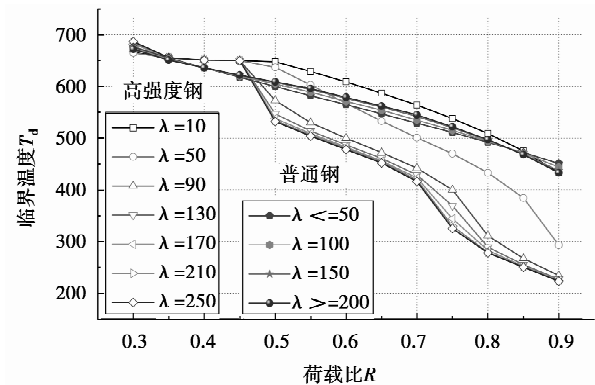


图 6 高强度钢和普通钢轴心受力构件的临界温度

力,分析中采用的柱截面规格为  $H100 \times 100 \times 6 \times 8$ ,为了验证有限元分析的正确性,首先采用有限元对常温下的 3 个普通 Q235 钢柱的极限承载力进行了分析,并与钢结构设计规范<sup>[17]</sup>计算的结果进行了比较,见表 4 所示。从表 4 中可以看出,有限元分析结果准确可靠。

采用验证后的有限元分析方法分别分析了 300、500、700 °C 3 个不同温度,3 个不同长细比 50、130、210 下的轴心受压构件的极限承载力,钢材为高强度钢 BISPLATE 80,高温下的材料参数取文中公式(1)和(2)得出的结果,应力应变关系采用理想弹塑性模型。为了考虑残余应力对承载力的不利影响,首先根据公式(18)得到计算构件的换算长细比,然后根据公式(14)得到等效初偏心率,最后由公式(10)得出构件的等效初弯曲。由于温度作用影响到公式(18)中的屈服强度和弹性模量,所以要用高温下的材料参数,公式(10)、(14)、(18)中的其他参数只和截面参数有关,所以,可以采用上述方法换算得到近似考虑残余应力作用的等效初始弯曲。

图 8 给出了各个长细比和温度下轴心受压高强度钢柱的荷载与跨中挠度曲线,从图上可以得到钢柱发生整体稳定破坏时的极限承载力,由分析得到的承载力可以得到构件的稳定系数。

ANSYS 分析得到的构件的不同长细比和温度下的稳定系数结果见表 5 所示。

从表 5 中可以看出,有限元计算结果与文中的计算结果比较接近,可见文中的理论和分析结果是正确可靠的。

## 6 结论

引入高强度钢高温下的力学性能参数,推导了高强度钢轴心受压柱在高温下的临界应力,进而得到高温下整体稳定系数与临界温度,使用有限元方

法对文中给出的高强度钢轴心受压柱的整体稳定系数进行了验证。

通过对高强度钢稳定系数和临界温度的研究,得到了以下几个结论:

1) 高强度钢柱的稳定系数随长细比的增加而降低,在 500 °C 时,稳定系数随长细比的变化最明显。

2) 确定的长细比下,随着温度的升高,稳定系数先降低,然后再升高,在 500 °C 左右降到最低。

3) 同样的长细比和温度下,高强度钢柱的稳定系数比普通结构钢低,对中度长细比的构件二者相差最大。

4) 高强度钢柱高温下的稳定验算参数与普通钢相差很大,同样的长细比和温度下,高强度钢柱的稳定验算参数比普通钢柱的大。

5) 高强钢柱的临界温度随荷载比的变化是非线性的,并且随着长细比的增加而降低。

6) 普通钢柱高温下的整体稳定系数和临界温度不适用于高强度钢柱。

#### 参考文献:

- [1] MIKI C, HOMMA K, TOMINAGA T. High strength and high performance steels and their use in bridge structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(1): 3-20.
- [2] BJORHOVDE, R. Development and use of high performance steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(3-5): 393-400.
- [3] 施刚,石永久,王元清. 超高强度钢材钢结构的工程应用[J]. 建筑钢结构进展,2008,10(4):32-38.  
SHI GANG, SHI YONG-JIU, WANG YUAN-QING. Engineering application of ultra-high strength steel structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2008, 10(4): 32-38.
- [4] 尹华钢,李志强,刘晓华,等. 北京新保利大厦结构抗震设计[J]. 建筑结构,2007,37(4):1-5.  
YIN HUA-GANG, LI ZHI-QIANG, LIU XIAO-HUA, et al. A seismic design on the structure of beijing new poly plaza[J]. Building structures,2007,37(4):1-5.
- [5] 黄明鑫,刘子祥,戴为志,等. 国家体育场“鸟巢”钢结构工程加工与安装关键技术[J]. 工业建筑,2007,37(5): 73-76.  
HUANG MING-XIN, LIU ZI-XIANG, DAI WEI-ZHI, et al. Key technologies of the steel structure fabrication and erection of national stadium [J]. Industrial Construction, 2007, 37(5): 73-76.
- [6] 万荣涛,肖璇,杨弘生,等. 厚钢板的低温焊接技术在国家游泳中心工程中的应用[J]. 焊接技术,2008,37(3): 18-20.  
WAN RONG-TAO, XIAO XUAN, YANG HONG-SHENG, et al. The application of low-temperature welding technology for thicker steel plate in national swimming centre [J]. Welding Technology, 2008, 37(3): 18-20.
- [7] 陈禄如. 中央电视台新台址主楼钢结构用钢特点[J]. 钢结构,2007,22(1):1-4.  
CHEN LU-RU. The characteristics of structural steel for the main building in new location of china central television station [J]. Steel Structures, 2007, 22(1): 1-4.
- [8] Australia Standards (AS). (1998). Steel structures [C]. AS4100:1998, Sydney, Australia,1998.
- [9] American Society for Testing and Materials (ASTM). Selected ASTM standards for structural steel fabrication [C]. ASTM, West Conshohocken, 1997.
- [10] Hong Kong Buildings Department. (2005). Code of practice for the structural use of steel [C]. Kowloon, Hong Kong: The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2005.
- [11] European Committee for Standardization, ENV 1993-1-2, Eurocode 3, Design of Steel Structures, Part1. 1 General rules and rules for buildings [C]. Brussels: CEN,2000.
- [12] 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.
- [13] GUO-QIANG LI, SHOU-CHAO JIANG, YING-ZHI YIN, et al. Experimental studies on the properties of constructional steel at elevated temperatures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE 2003, 129(12):1717-1721.
- [14] 屈立军,李焕群. Q 420 钢材高温强度试验研究 [J]. 消防科学与技术,2004,23(3):223-225.  
QU LI-JUN, LI HUAN-QUN. Study on strength of Q420 steel section at elevated temperature [J]. Fire Science and Technology, 2004, 23(3): 223-225.
- [15] CHEN J, YOUNG B, UY B. Behaviour of high strength structural steel at elevated temperatures [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE 2006, 132(12):1948-54.
- [16] CHEN J, YOUNG B. Design of high strength steel columns at elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(6): 689-703.
- [17] 《钢结构设计规范》(GB 50017—2003) [S]. 北京:中国计划出版社,2003.

(编辑 陈移峰)