DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2006.03.025
2006年 3月 北京航空航天大学学报 March 2006
第32卷 第3期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.3

薄板钢构件火灾下的变形能力和承载能力分析

朱建明 魏 东 刘应华

（北京航空航天大学 土木工程系，北京 100083） （清华大学 工程力学系，北京 100084）

摘 要：钢结构塑性设计和抗震设计中都要求组成钢结构的板件有足够的局部变形能力，以防止板件局部的屈曲而降低钢板件的承载能力.结合常温状态下钢板件变形和承载能力分析的基本原理和方法，用非线性有限元法，对钢结构中常用的四边支撑钢板件在高温下的屈曲性能进行分析，着重考虑了板件宽厚比、边界约束和初始缺陷等因素对板件变形能力和承载能力的影响.此外，通过参数的分析，还给出了板件宽厚比与变形能力和承载力的相关关系.

关 键 词：火灾；钢板件；宽厚比；变形能力；承载能力

中图分类号：TU 352.5

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2006)03-0357-04

Deformation capability and load-carrying capability of steel plate element under high temperature

Zhu Jianming Wei Dong

(Dept. of Civil Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Liu Yinghua

(Dept. of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the plastic design and anti-seismic design of steel structures, It is demanded that the component plates undergo large local deformations for the plastic hinge to develop and the load-carrying capability doesn't decrease because of local buckling of the plates. Based on the basic principles and methods which are used to analyze the deformation capability and load-carrying capability of steel plates under normal temperature condition, the nonlinear finite element method was used to analyze the buckling behaviors of four-edge supported plates under uniform uniaxial compression and high temperature. The width-to-thickness ratio, constraint conditions of boundary and initial geometric imperfections were all considered. The relationships among the width-to-thickness ratio, deformation capability and the load-carrying capability were carefully studied. Furthermore, the formulas and the relationships among width-to-thickness ratio, deformation capability and load-carrying capability were also showed according to the parameter analysis, which can be used to evaluate the ductility of steel plates under high temperature.

Key words: fire; steel plate element; width-to-thickness ratio; deformation; load-carrying

矩形钢薄板是工程中较为常用的一种结构形式.为充分发挥材料的性能和结构构件中的某些截面的变形承载能力，需对组成构件截面的宽厚比等进行严格的限制[1].常温分析中，文献[2～4]等已给出了保证板件这一性能的宽厚比值范围，而对高温下薄板构件的变形能力和承载能力方面的研究还不多[5,6]，且没有考虑随温度的升高所引发的钢板件材料性质和力学特性的剧烈变化.高温条件下钢板件，不仅受到温度载荷的作用，还会引起钢材料性质和力学性能的严重劣化.探讨高温影响下的钢板件变形能力和承载能力，对了解和计算火灾时钢板件的抗火性能有重要意义.

收稿日期：2005-06-20

基金项目：国家重点基础研究专项基金资助项目(2001CB409603)

作者简介：朱建明(1963－)，男，江苏盐城人，副教授，zjm2000@buaa.edu.cn.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本文采用非线性有限元法，以四边支撑均匀受压的薄板构件为例，对火灾(高温)下薄板屈曲的全过程进行了分析，着重考虑薄板宽厚比、边界约束和初始缺陷等对板件变形能力和承载能力的影响，并结合相关参数分析，给出了高温下的板件极限承载力退化系数及变形能力与板件宽厚比的相关关系式.

1 基本分析模型

基于ANSYS软件，本文采用ECCS3等向强化模型，对四边支撑单向受力($\sigma=1\ \mathrm{kN/mm^2}$)的钢薄板(见图1)在国际标准升温曲线作用下的特性进行了分析，其计算模型基本参数见表1. a 为板长度，b 为板宽度，t 为板厚度，$ABCD$ 为板的四角.

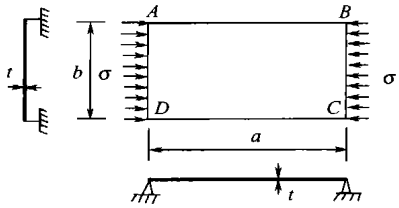


图1 分析模型基本尺寸载荷图

表1 均匀受压四边支撑钢板件的参数

基本参数	参数范围
a/b	2,1
b/t	20～80
初始缺陷 w/w_{max}	0.005
边界约束条件	四边支撑

注：w_{max} 指常温下板中最大位移值；四边支撑包括四边简支、三边简支加载边(BC)固支和未加载边(AB)固支.

2 四边支撑板件在高温下的特性

2.1 温度-变形特性

图2给出了 $a/b=2$ 时不同板厚的钢板件在四边简支条件下随温度变化时，板中心的挠度变形曲线关系，图3给出了不同 a/b 时钢板件的温度-板中心挠度变形关系比较. 分析表明钢板件的

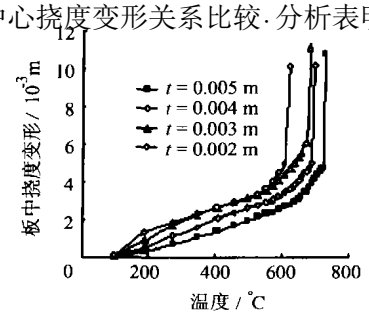


图2 $a/b=2$ 的板件温度-变形图

t 越小，相同温度下其板中挠度变形越大，最终其临界温度值也越低. 由于本文采用固定板宽的做法，因此 b/t 也符合上述规律. 当板件 t 相同时，a/b 越大，相同温度下其板中挠度变形反而越小，临界温度值也越高.

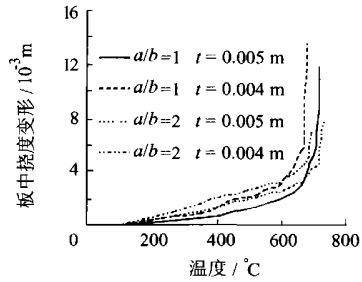


图3 不同 a/b 的板件温度-变形图

2.2 温度-内力特性

图4给出 $a/b=1$ 时不同 t 的钢板件随温度变化时，板中内力值变化，图5给出不同 a/b 板件温度-内力值比较图. 图示表明，随温度的升高，薄板 b/t 越小，其板中内力值峰值越高，且出现也越早，即相同条件下，a/b 越大和 b/t 越大，钢板件可承受更大的载荷，其临界温度也相对越高.

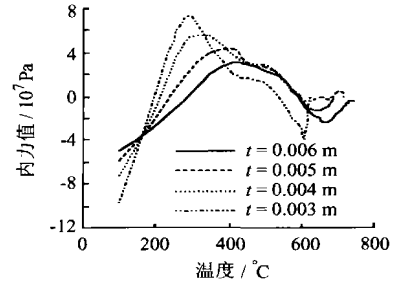


图4 板件 $a/b=1$ 时温度-内力变化图

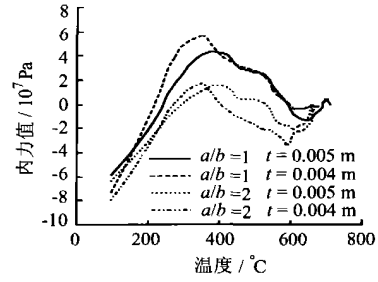


图5 不同 a/b 时板件温度-内力变化图

3 不同边界约束和初始条件的影响

3.1 不同边界约束的影响

表2给出了不同 a/b 钢板件在热力耦合作用下的不同耐火时间. 由表2可知，约束条件和板件尺寸对热力耦合作用下的钢板件耐火时间影响

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

很大,$t=0.005$ m 时,最大和最小耐火时间相差≥130 s,对应的温度值相差约 20℃;而板厚度减小 2 倍时,耐火时间也降低 2 倍多,对应的温度差值约达 180℃.

表 2　不同约束条件下钢板件耐火时间比较　　s

板件类型	钢板件 t/m			
	0.005	0.004	0.003	0.002
四边简支($a/b=1$)	1246	1020	709	480
四边简支($a/b=2$)	1404	1110	940	687
三边简支 1($a/b=1$)	1184	942	674	460
三边简支 2($a/b=1$)	1315	1028	742	510

注:三边简支 1 为未加载边固支;三边简支 2 为加载边固支.

图 6 和图 7 分别给出了不同约束下的钢板件随温度变化时,板中最大位移和内力值的变化.由图 6、图 7 可知,边界条件的不同,高温下的板件温度变形曲线区别较小,但内力变化有很大的不同.此外,边界的改变,板中最大变形和内力值处也不再位于板中心,而是向固支边移动.

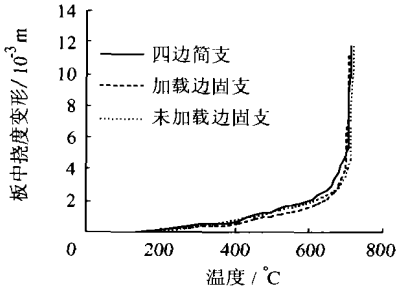


图 6　不同约束下板件温度-变形图

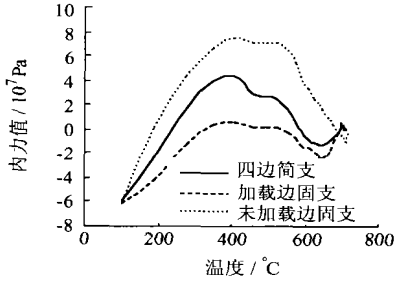


图 7　不同约束下板件温度-内力图

3.2　初始缺陷的影响

图 8 和图 9 分别给出了有初始缺陷和完善钢板件(四边简支)中挠度变形和内力变化曲线的比较.热力耦合作用下,初始缺陷的存在加剧了钢板件变形的进一步加大和极限承载力降低,使临界温度值变小.

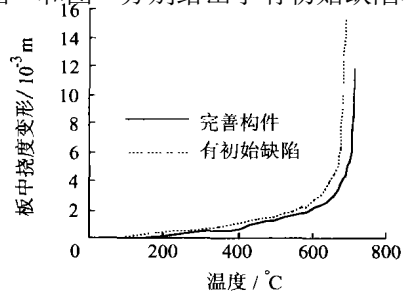


图 8　有初始缺陷板中变形曲线比较

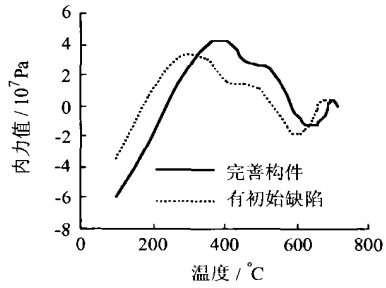


图 9　有初始缺陷板中内力变化曲线比较

4　高温钢板件变形能力和承载能力

为考虑其火灾下的变形能力和承载能力,将 b/t 正规化处理得:

$$\lambda=\sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{cr}}}=\frac{b}{t}\frac{1.05}{\sqrt{k}}\sqrt{\frac{\sigma_y}{E_T}} \tag{1}$$

式中,σ_y 为钢常温下的极限应力;σ_{cr} 为钢板件弹性状态下的屈曲应力;k 为板的屈曲系数(四边简支条件下,取 $k=4$);E_T 为钢材料火灾下的弹性模量.基于常温下的钢板件正规化 b/t 和板件加载边平均的压缩应变关系:

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{max}}{\varepsilon_y}=\frac{e}{\lambda^2}-1 \tag{2}$$

式中,e 为待定系数,常温条件下与板件边界约束、a/b 和 b/t 有关[2].在高温条件下,e 还与板件所受的温度值相关.取 $a/b=1$,$b/t=20$,$t=0.005$ m的四边简支钢板件,在 500℃时,大约在 1.6 左右,超过 600℃后,e 值变化巨大.拟合正规化 b/t 和板件加载边平均的压缩应变关系式为

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{max}}{\varepsilon_y}=\frac{1.6}{\lambda^2}-1 \qquad T\leqslant 500℃ \tag{3a}$$

$$\frac{\bar{\varepsilon}_{max}}{\varepsilon_y}=\frac{5.4\times10^{-5}T^2-6.67\times10^{-2}T+14.3}{\lambda^2}-1 \qquad 500℃<T\leqslant 600℃ \tag{3b}$$

式(3)计算值和 ANSYS 计算值比较如图 10 所示.拟合式(3)计算值比 ANSYS 计算值低,略为保守.

$\bar{\varepsilon}_{max}/\varepsilon_y$ 为板件达到最大承载力时所能承受的变形,因此,这一指标通常也称为钢板件的延性指标.由图 10 可知,随 b/t 的增大,延性指标下降很快,但是当 $\lambda\geqslant 0.8$ 时,延性性能指标曲线平缓.相应的 b/t 限值约为 30.

基于经典弹性薄板理论,均匀受压薄板高温

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

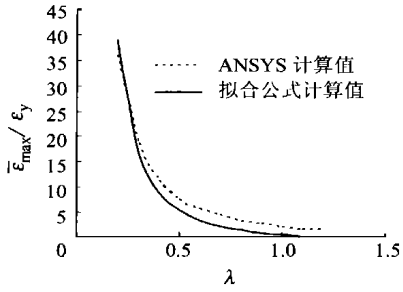


图 10 板件 b/t 和变形能力的关系

下的屈曲应力计算可如式(4)所示：

$$\sigma_{Tcr} = p_{Tcr}/t = \frac{k}{12(1-v^2)} \times \frac{\pi^2 E_T}{(b/t)^2} - p_T/t \tag{4}$$

式中，p_{Tcr}为薄板高温下的极限承载力；p_T 为温度引起的热载荷.

由式(4)可知，同一约束和载荷条件下，当薄板处于同一温度值时，b/t 越大，屈曲应力越小，即 b/t 的增大减小了薄板的抗弯刚度，极限承载力将减小. 火灾条件下，钢薄板仅改变材料的弹性模量和需施加相应的热载荷，而不改变屈曲系数，因此，火灾下同一板件的弹性极限屈曲载荷将低于常温下的极限载荷.

以均匀受压四边简支钢板件为例，根据不同的 b/t，利用 $p_{Tcr}/p_{cr,20}$可以求得钢板件高温下的极限承载力退化系数. 图 11 分析表明，随 b/t 的增大，高温下的钢板件极限承载力退化系数($p_{Tcr}/p_{cr,20}$)差值有逐渐减小的趋势，随温度的升高，这种趋势更加明显，约 800℃时，极限承载力退化系数几乎一致. 通过图 11，也可以方便地对钢板件不同温度下的极限承载力做出粗略的估计，方便工程应用.

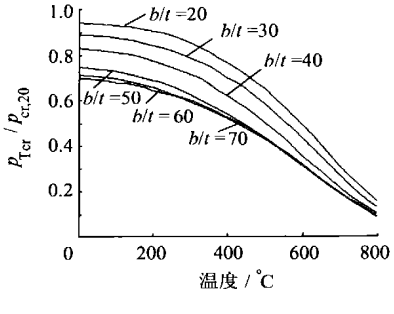


图 11 b/t 与钢板件极限承载力退化系数

5 结 论

相同条件下，钢板件边长比越大、宽厚比越大，板件有更大的变形能力和承载能力，火灾条件下，可由变形的增加来抵御温度作用带来的影响，因而临界温度值更高. 但不同约束条件下的钢板件板中变形和内力值变化差异较大.

宽厚比对板件的变形能力，特别是延性性能影响很大. 在进行钢板件塑性设计时，有必要合理选择适当的宽厚比限值，以满足截面发展为塑性或塑性铰的需要. 宽厚比对板件的承载能力影响也有显著影响，随宽厚比增大和温度上升，钢板件极限承载力明显减小，承载力退化系数最终几乎趋于一致.

参考文献 (References)

[1] Fukumoto Y. Itoh Y. Width-to-thickness ration for plate elements in earthquake engineering design of steel structures[A]. In: Fukumoto Y, Lee G C. Stability and Ductility of Steel Structures Under Cyclic Loading[C]. London: CRC Press, 1992.285～296

[2] 董永涛，张耀春. 均匀受压钢板件的变形能力和承载能力[J]. 钢结构，1997,12(2):20～26
Dong Yongtao, Zhao Yaochun. The deformation capability and load-carrying capability of steel plate element under high temperature[J]. Steel Structure, 1997,12(2):20～26(in Chinese)

[3] 王万祯，马宏伟，张振涛. 剖分T型钢轴压杆件的腹板宽厚比限值研究[J]. 西安建筑科技大学学报，2001,33(2):131～134
Wang Wanzhen, Ma Hongwei, Zhang Zhentao. Study on the webs' ratio of width to thickness of cut T-style steel elements in axial press [J]. Journal of Xi'an Univ of Arch &Tech, 2001,33(2):131～134 (in Chinese)

[4] 周圣凯，郝际平，史小强. 剖分T型钢轴心压杆试验研究[J]. 建筑科学与工程学报，2005,22(1):87～90
Zhou Shengkai, Hao Jiping, Shi Xiaoqiang. Experimental research of cut T shape columns subject to axial compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005,22(1): 87～90(in Chinese)

[5] 卫原平，阮雪榆. 高温纵向压印过程的有限元热力耦合分析[J]. 上海交通大学学报，1996,30(2):140～146
Wei Yuanping, Ruan Xueyu. Coupled thermo-mechanical analysis of hot longitudinal indentation process by rigid thermo-viscoplastic FEM [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1996, 30(2): 140～146(in Chinese)

[6] 候新录. 薄板对接焊的热弹塑性有限元法分析[J]. 太原工业大学学报，1994,25(2):41～47
Hou Xinlu. The thermoelastoplastic analysis of butt welded plate by finite element method[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1994,25(2):41～47(in Chinese)

[7] GBJ 7-88 钢结构设计规范[S]
GBJ 7-88 Code for design of steel structures[S] (in Chinese)

[8] 魏明钟. 钢结构设计新规范应用讲评[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1991.150～151
Wei Mingzhong. The application and comment of new code for design of steel structures [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1991.150～151(in Chinese)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net