

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202305001



高温下铝合金薄板面内 轴压屈曲特性分析

卢松凯, 董毓利, 房圆圆, 齐建全

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 研究高温下铝合金薄板面内轴压屈曲特性, 结合试验结果证明所建立有限元模型的可靠性. 基于模型开展高温下不同参数的屈曲分析, 获得薄板的荷载-挠度曲线; 运用 Mann-Kendall 准则, 判断初始突变温度. 结果表明: 恒温加载下, 提高边界条件的约束作用、选择短边加载或长宽比较大的截面能有效降低屈曲阶段薄板挠度; 恒载升温下, 板边缘的转动能有效减小热应力产生的屈曲挠度; 长边加载下, 选择长宽比较小的薄板能有效降低挠度; 初始缺陷影响薄板屈曲时的挠度变化, 初始缺陷越大, 屈曲阶段挠度变化的斜率越大.

关键词: 铝合金薄板; 有限元分析; 高温屈曲; Mann-Kendall 准则; 非线性

中图分类号: TG 115.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)05-0563-11

Analysis of In-Plane Axial Compression Buckling Characteristics of Aluminum Alloy Sheet at High Temperatures

LU Songkai, DONG Yuli, FANG Yuanyuan, QI Jianquan

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The in-plane axial compression buckling characteristics of aluminum alloy sheet at high temperature are studied, and the reliability of the finite element model is verified by the experimental results. Based on the model, the buckling analysis of different parameters at high temperature is carried out to obtain the load-deflection curves of the sheet. Mann-Kendall rule is used to determine the initial abrupt temperature. The results show that under constant temperature loading, the deflection of sheet can be reduced effectively by improving the constraint of boundary conditions, selecting the short side loading or the section with large length-width ratio; under constant load heating, the rotation of the plate edge can effectively reduce the buckling deflection caused by thermal stress; under long side loading, the deflection can be reduced effectively by choosing sheet with smaller length-width ratio. The initial defect affects the deflection change of the sheet during buckling, and the larger the initial defect leads to the larger slope of the deflection change in the buckling stage.

Keywords: aluminum alloy sheet; finite element analysis; high temperature buckling; Mann-Kendall rule; nonlinearity

薄板的厚度远小于长度和宽度方向的尺寸, 被广泛应用于航空航天领域中^[1]. 铝合金具有易加工、易维修、耐腐蚀性好、强度高、成本低等优点, 是航空航天器主要的结构材料^[2-6]. 目前, 对铝合金薄板屈曲性能的研究大多为常温稳定性^[7-13], 高温试验研究则主要集中于热屈曲性能^[14-16], 未见薄板高温下轴

收稿日期: 2023-05-29

通信作者: 董毓利(1965-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事结构在高温下性能的研究. E-mail: dongyl@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978293)

压屈曲稳定的试验研究,多体现在理论研究^[17-20].

航空航天器中薄板结构受面内轴压作用,结构发生屈曲直至失稳,屈曲后薄板的受力性能和承载力随之发生变化.薄板屈曲试验对精度要求高,不易开展大量试验.因此,本文根据 Yamaki^[21]的铝合金薄板轴压屈曲试验,通过 ABAQUS 有限元分析软件建立铝合金薄板屈曲模型,分析高温下不同边界条件、不同截面尺寸及不同大小的几何初始缺陷对屈曲性能的影响.

1 铝合金方形薄板屈曲试验及有限元分析

1.1 试件及试验装置

试件采用边长为 300 mm,厚度分别为 1.24,0.99 mm 的正方形铝合金薄板,试件参数^[21]如表 1 所示.表 1 中: E 为弹性模量; ν 为泊松比.

表 1 试件参数
Tab.1 Test piece parameters

| 试件编号 | 长×宽×厚/mm×mm×mm | 边界条件 | E /GPa | ν |
|------|----------------|--------------|----------|-------|
| BC1 | 300×300×1.24 | 四边简支 | 67.453 1 | 0.32 |
| BC2 | 300×300×0.99 | 加载边简支、非加载边固支 | 67.728 7 | 0.32 |
| BC3 | 300×300×1.24 | 加载边固支、非加载边简支 | 67.453 1 | 0.32 |
| BC4 | 300×300×1.24 | 四边固支 | 67.453 1 | 0.32 |

试验装置示意图,如图 1 所示.通过夹具(图 1)将轴向压力传递到试件上,采用刀刃型夹具模拟简支边界条件(图 2).开展轴压试验,最大负载为 22.65 MPa,采用线性均速加载.在薄板前、后设置位移器,记录屈曲过程中的挠度变化.

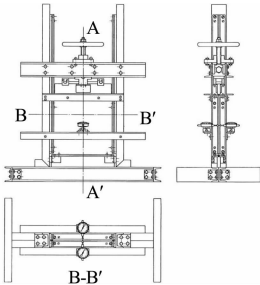


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of test device

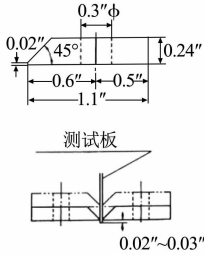
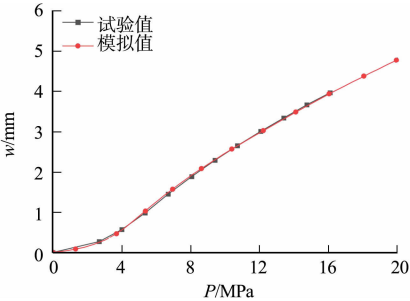


图 2 刀刃型边界条件

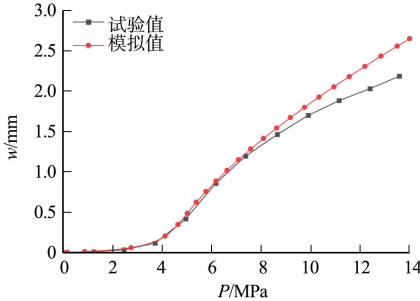
Fig.2 Edge type boundary condition

1.2 铝合金方形薄板有限元屈曲分析

1.2.1 常温下铝合金方形薄板屈曲分析 1) 有限元验证.通过 ABAQUS 有限元分析软件建立铝合金薄板模型,薄板模型被划分为 10 000 个长度和宽度均为 3 mm 的 S4R 壳单元,薄板材料为各向同性的线弹性材料(表 1).运用弧长法对 4 种边界条件下的薄板进行模拟.首先,对铝合金薄板进行特征值屈曲分析,导出一阶屈曲模态^[22];然后,复制模型,改用弧长法分析,设置最大荷载因子,并以弧长为总步长划分分析步,导入一阶屈曲模态作为薄板的几何初始缺陷进行模拟分析;最后,对比模拟与试验的结果.面内轴压试验有限元模拟值与试验值对比,如图 3 所示.图 3 中: P 为荷载; w 为挠度.



(a) 四边简支



(b) 加载边简支、非加载边固支

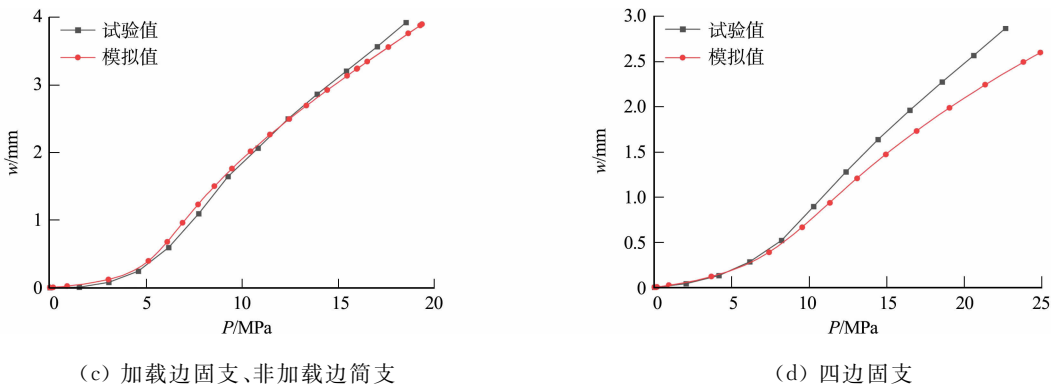


图 3 面内轴压试验有限元模拟值与试验值对比
Fig. 3 Comparison between finite element simulation values and experimental values for in-plane axial compression tests

由图 3 可知:在结构屈曲前,荷载与挠度之间呈线性关系;结构进入屈曲阶段后,荷载与挠度的斜率发生变化,随着荷载增加,挠度呈非线性增大;固支边数量增加后,试验值与模拟值存在较小的误差,这是因为在加载边简支、非加载边固支工况下,试验中与荷载垂直方向的面内位移约束没有达到理想情况,在加载过程中,不能完全抵挡这部分位移,致使薄板产生较小的平面拉伸,降低了挠度;在四边固支工况下,试验中板边缘不能完全约束面内转动,导致后期屈曲产生的挠度略大于模拟结果.模拟值与试验值整体趋势保持一致,表明所建立的铝合金方形薄板屈曲分析模型符合试验要求,可以此模型开展后续的参数分析.

2) 几何初始缺陷.由于每块薄板存在不同程度的几何初始缺陷,即使在相同荷载作用下,结构的屈曲性能也不完全相同,因此,研究不同几何初始缺陷对薄板屈曲性能的影响.常温下不同几何初始缺陷的铝合金方形薄板参数,如表 2 所示.

表 2 常温下不同几何初始缺陷的铝合金方形薄板参数

| 试件编号 | 长×宽×厚/mm×mm×mm | 边界条件 | 几何初始缺陷/% | E /GPa | ν |
|------|----------------|------|----------|----------|-------|
| II1 | 300×300×1.24 | 四边简支 | 0 | 67.453 1 | 0.32 |
| II2 | 300×300×1.24 | 四边简支 | 0.5 | 67.453 1 | 0.32 |
| II3 | 300×300×1.24 | 四边简支 | 1.0 | 67.453 1 | 0.32 |
| II4 | 300×300×1.24 | 四边简支 | 1.5 | 67.453 1 | 0.32 |
| II5 | 300×300×1.24 | 四边简支 | 2.0 | 67.453 1 | 0.32 |

通过 ABAQUS 软件建立 5 个试件并进行分析,得到各工况的荷载与弧长的关系,提取弧长与挠度的关系,绘制不同几何初始缺陷下铝合金方形薄板的荷载-挠度曲线,如图 4 所示.

由图 4 可知:在不同几何初始缺陷下,铝合金方形薄板的屈曲变化保持一致;几何初始缺陷对挠度变化影响主要发生在薄板的屈曲变形阶段,在线弹性阶段各工况挠度变化保持一致,几何初始缺陷越大,挠度越大,挠度变化的斜率也越大.

综上所述,几何初始缺陷大小对结构屈曲阶段的挠度变化影响较大,对线弹性阶段的挠度影响较小;几何初始缺陷越大,挠度变化的斜率越大.

1.2.2 恒温加载下铝合金方形薄板屈曲分析 航空航天器在超音速飞行过程中除受外力荷载作用外,还受到温度场的作用.高温下材料容易发生劣化,导致承载能力下降.不同边界条件和几何初始缺陷在高温条件下的屈曲性能也各不相同.研究温度为 500 ℃时,6061-T6 铝合金薄板的屈曲性能,依据文献[23]中 6061-T6 铝合金热物理参数(表 3)确定有限元分析模型的力学参数.表 3 中: θ 为温度; λ 为热传导系数; c 为比热容; α 为线膨胀系数; ρ 为密度.

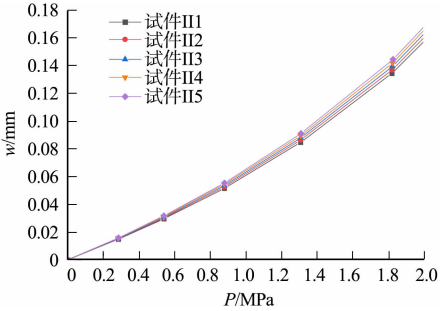


图 4 不同几何初始缺陷下铝合金方形薄板的荷载-挠度曲线

Fig. 4 Load-deflection curves of aluminum alloy square sheets with different geometric initial defects

表 3 6061-T6 铝合金高温力学参数

Tab. 3 High temperature mechanical parameters of 6061-T6 aluminum alloy

| $\theta/^{\circ}\text{C}$ | $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ | $c/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$ | $\alpha/\times 10^{-5}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ | $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | E/GPa |
|---------------------------|---|--|--|------------------------------------|----------------|
| 20 | 119 | 900 | 2.23 | 2 700 | 66.7 |
| 100 | 121 | 921 | 2.28 | 2 700 | 60.8 |
| 200 | 126 | 1 005 | 2.47 | 2 700 | 54.4 |
| 300 | 130 | 1 047 | 2.55 | 2 700 | 43.1 |
| 400 | 138 | 1 089 | 2.67 | 2 700 | 38.9 |
| 500 | 145 | 1 129 | 2.70 | 2 700 | 30.0 |

1) 边界条件. 不同边界条件下铝合金方形薄板的模型参数,如表 4 所示. 绘制 500 ℃下不同边界条件铝合金薄板的荷载-挠度曲线,如图 5 所示.

表 4 不同边界条件下铝合金方形薄板的模型参数

Tab. 4 Model parameters of aluminum alloy square sheets under different boundary conditions

| 试件编号 | 长×宽×厚/mm×mm×mm | 边界条件 | E/GPa | ν | $\theta/^{\circ}\text{C}$ |
|------|----------------|--------------|----------------|-------|---------------------------|
| BCT1 | 300×300×1.24 | 四边简支 | 30 | 0.32 | 500 |
| BCT2 | 300×300×0.99 | 加载边简支、非加载边固支 | 30 | 0.32 | 500 |
| BCT3 | 300×300×1.24 | 加载边固支、非加载边简支 | 30 | 0.32 | 500 |
| BCT4 | 300×300×1.24 | 四边固支 | 30 | 0.32 | 500 |

由图 5 可知:4 种边界条件下的挠度变化保持相对一致;达到最大挠度时,试件 BCT1 挠度最大,为 7.23 mm,随着固支边数量的增加,铝合金薄板受到的约束逐渐增大,挠度相应减少,试件 BCT4 的挠度最小,为 2.97 mm;随着固支边数量的增加,屈曲阶段的荷载-挠度曲线斜率变小;四边固支薄板在达到 13.29 MPa 后,出现软化而发生“跳跃”,结构开始卸载,当荷载达到 11.83 MPa 后,结构开始“回弹”,进入强化阶段.

铝合金薄板在跳跃屈曲状态时的屈曲模态变化,如图 6 所示. 由图 6 可知:结构最初受荷载作用呈现一阶屈曲模态的形式,随着荷载的增加,最大挠度区域开始向加载边偏移,之后屈曲模态逐渐向二阶屈曲模态转变,此时铝合金薄板发生“跳跃”,挠度随荷载增大而减小;随着荷载的增加,二阶屈曲模态逐渐趋于稳定,当结构处于“回弹”点时,二阶屈曲模态形式达到稳定,随着荷载增大,挠度继续增大.

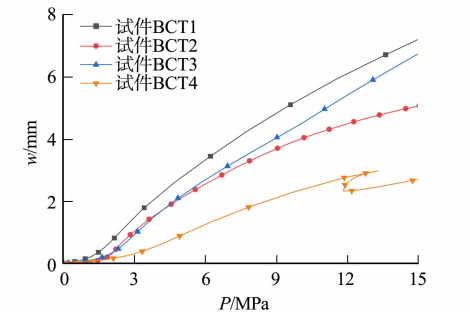
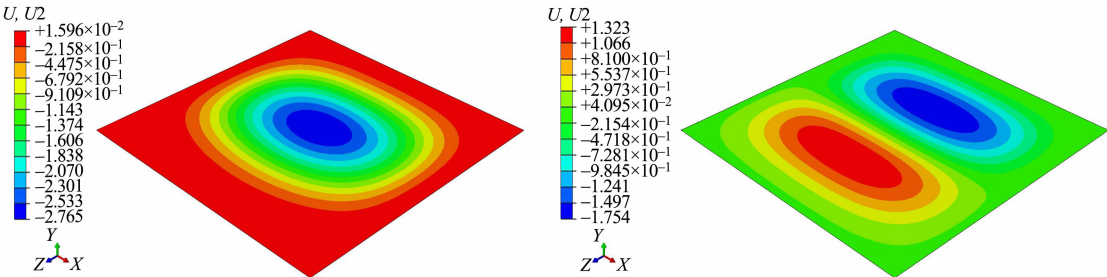


图 5 500 ℃下不同边界条件铝合金薄板的荷载-挠度曲线

Fig. 5 Load-deflection curves of aluminum alloy sheets under different boundary conditions at 500 ℃



(a) 铝合金薄板“跳跃”时 (b) 铝合金薄板“回弹”时

图 6 铝合金薄板在跳跃屈曲状态时的屈曲模态变化

Fig. 6 Buckling mode change of aluminum alloy sheet in snap buckling state

500 ℃下,铝合金薄板的荷载-挠度曲线的变化规律与常温下相似. 绘制常温与 500 ℃下不同边界条件薄板的荷载-挠度曲线,如图 7 所示. 由图 7 可知:500 ℃下,无论在何种边界条件,铝合金薄板相同荷载作用下产生的挠度均大于常温下所产生的挠度,且 500 ℃下的屈曲变化更为明显;与高温下四边固支薄板发生跳跃屈曲类似,常温薄板在达到上临界荷载 30 MPa 后,结构出现软化而卸载,又在达到下

临界荷载 26.56 MPa 后,进入强化阶段;高温下铝合金薄板达到“跳跃”点所需的上临界荷载比常温下减小了 16.71 MPa,达到“回弹”点所需的下临界荷载比常温下减小了 14.73 MPa.

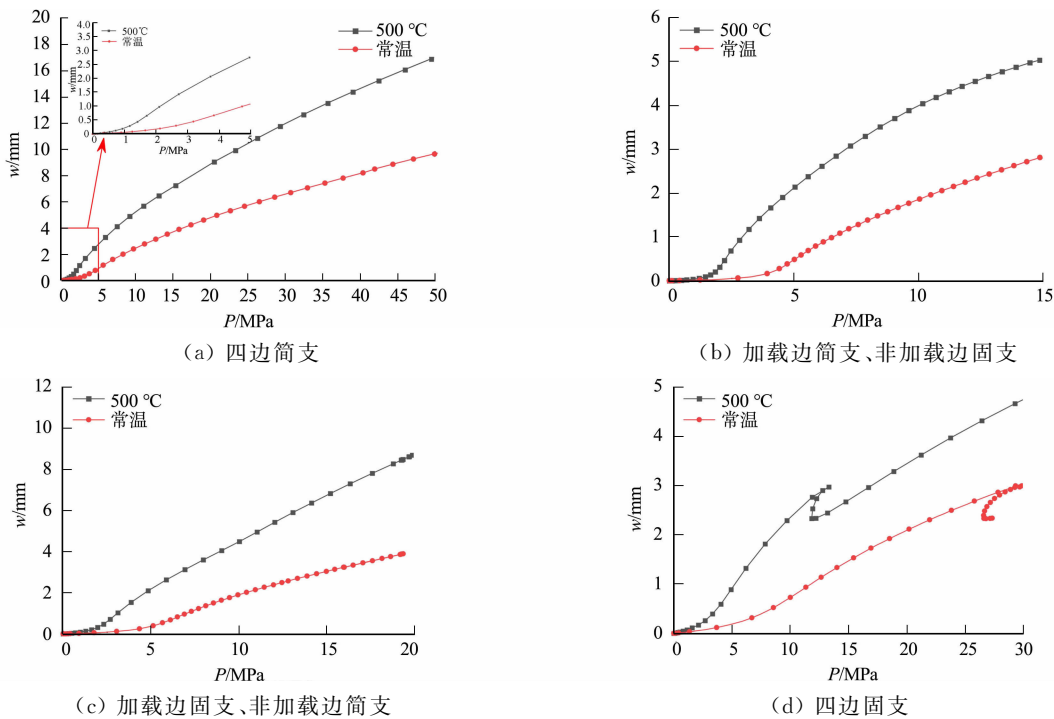


图 7 常温与 500 °C 下不同边界条件薄板的荷载-挠度曲线

Fig. 7 Load-deflection curves of sheets under different boundary conditions at ambient temperature and 500 °C

2) 几何初始缺陷. 对 500 °C 下不同几何初始缺陷的试件进行恒温屈曲试验,得到 5 种工况下铝合金薄板荷载与弧长,以及弧长与挠度之间的关系. 通过两组数据绘制不同几何初始缺陷薄板的荷载-挠度曲线,如图 8 所示. 由图 8 可知:薄板在不同几何初始缺陷下的荷载-挠度曲线的变化规律一致;前期线弹性工作阶段,5 种几何初始缺陷下的薄板曲线相重合,而进入屈曲阶段后,随着几何初始缺陷的增大,薄板发生的挠度越大.

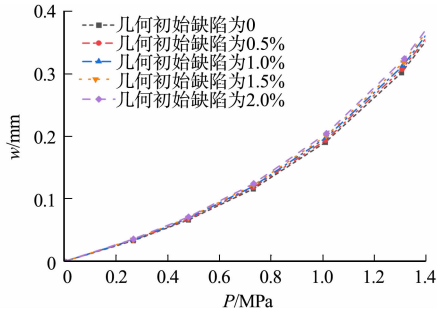
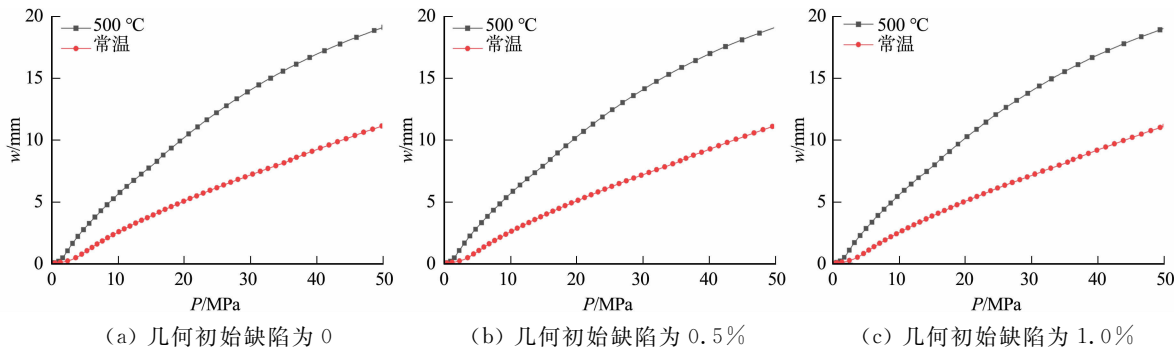


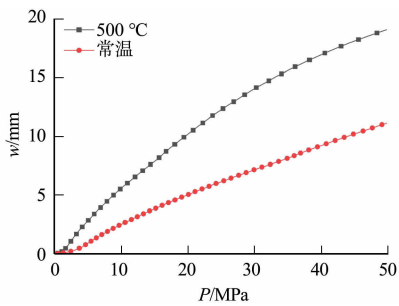
图 8 500 °C 下不同几何初始缺陷薄板的荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curves of sheets with different geometric initial defects at 500 °C

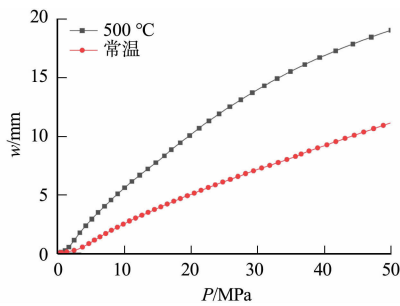
对比 500 °C 和常温下的荷载-挠度曲线,如图 9 所示. 由图 9 可知:500 °C 下铝合金薄板受荷载作用,初始缺陷相同时产生的挠度大于常温工况下的挠度,通过分析初始屈曲阶段的荷载-挠度曲线可以发现,高温下初始屈曲特征更为明显;初始缺陷对薄板屈曲时荷载-挠度曲线的斜率影响较大,初始缺陷越大,挠度变化斜率越大.

1.2.3 恒载升温下铝合金方形薄板屈曲分析 在升温过程中,结构的材料性质会随温度的改变发生变化. 恒载升温试验中,选用文献[23]中的 6061-T6 铝合金作为试件材料.





(d) 几何初始缺陷为 1.5%



(e) 几何初始缺陷为 2.0%

图 9 常温与 500 °C 下不同初始缺陷薄板的荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curves of sheets with different geometric initial defects at ambient temperature and 500 °C

1) 边界条件. 恒载升温下不同边界条件薄板的模拟试验参数,如表 5 所示. 表 5 中: P_y 为屈服荷载; P_a 为结构施加荷载; θ_{\max} 为发生大挠度所需温度; $w_{500\text{ }^{\circ}\text{C}}$ 为 500 °C 时产生的挠度. 恒定荷载为各工况常温下屈曲荷载特征值的 0.7 倍,温度为 0~500 °C 的线性升温模式.

表 5 恒载升温下不同边界条件薄板的模拟试验参数

Tab. 5 Simulation experimental parameters of sheets with different boundary conditions under constant load heating

| 试件编号 | 边界条件 | P_y/MPa | P_a/MPa | $\theta_{\max}/^{\circ}\text{C}$ | $w_{500\text{ }^{\circ}\text{C}}/\text{mm}$ |
|------|--------------|------------------|------------------|----------------------------------|---|
| BC5 | 四边简支 | 4.94 | 3.46 | 380 | 1.89 |
| BC6 | 加载边简支、非加载边固支 | 5.06 | 3.54 | 450 | 1.46 |
| BC7 | 加载边固支、非加载边简支 | 6.29 | 4.40 | 375 | 1.90 |
| BC8 | 四边固支 | 10.32 | 7.22 | 415 | 1.68 |

不同边界条件下铝合金方形薄板的荷载-挠度曲线,如图 10 所示. 图 10 中: t 为厚度. 由图 10 可知:恒载升温下,4 种边界条件下挠度的变化规律一致. 由表 5 可知:与恒温不同,恒载升温时,加载边固支、非加载边简支产生的挠度最大,为 1.90 mm,加载边简支、非加载边固支条件下产生的挠度最小,为 1.46 mm. 这可能是因为薄板受温度变化,弹性模量降低,产生热应力,薄板发生屈曲,同时板边缘的简支边界允许转动,抵消了部分热应力,而固支条件约束转动,无法抵消这部分应力,因此增大了挠度.

当薄板产生接近自身厚度大小的挠度($w/t>1.0$)时,称薄板发生大挠度屈曲. 由表 5 可知:加载边固支、非加载边简支在 375 °C 最早发生大挠度屈曲,加载边简支、非加载边固支在 450 °C 最晚发生大挠度屈曲.

2) 几何初始缺陷. 将铝合金薄板常温下 0.7 倍的屈曲荷载特征值作为结构所施加的荷载. 恒载升温下不同几何初始缺陷薄板的模拟试验参数,如表 6 所示.

表 6 不同几何初始缺陷薄板的模拟试验参数

Tab. 6 Simulation experimental parameters of sheets with different geometric initial defects

| 试件编号 | 几何初始缺陷/% | P_y/MPa | P_a/MPa | $\theta_{\max}/^{\circ}\text{C}$ | $w_{500\text{ }^{\circ}\text{C}}/\text{mm}$ |
|------|----------|------------------|------------------|----------------------------------|---|
| II6 | 0 | 4.94 | 3.46 | 375 | 1.887 |
| II7 | 0.5 | 4.94 | 3.46 | 375 | 1.886 |
| II8 | 1.0 | 4.94 | 3.46 | 375 | 1.885 |
| II9 | 1.5 | 4.94 | 3.46 | 375 | 1.884 |
| II10 | 2.0 | 4.94 | 3.46 | 375 | 1.883 |

模拟得到不同几何初始缺陷薄板的温度-挠度曲线,如图 11 所示. 由图 11 可知:随着几何初始缺陷的增大,初始挠度逐渐增大,在温度达到 410 °C 前,随着几何初始缺陷的增大,挠度也随之增大;当温度

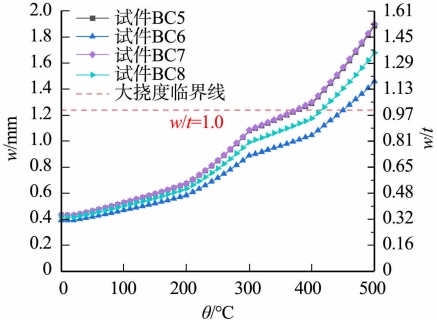


图 10 不同边界条件下铝合金方形薄板的荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curves of aluminum alloy square sheets with different boundary conditions

达到 410 ℃后,几何初始缺陷越大,挠度越小. 由表 6 可知: 500 ℃时各工况的挠度相差不大;5 种工况下进入大挠度屈曲阶段时的温度均小于 410 ℃,试件 II10 最早发生大挠度屈曲,试件 II6 最晚发生大挠度屈曲,但由于初始缺陷相差不大,导致进入大挠度时的温度差距很小,可认为 5 种几何初始缺陷下进入大挠度屈曲时所需的温度均为 375 ℃.

2 铝合金矩形薄板有限元屈曲分析

2.1 常温下铝合金矩形薄板屈曲分析

Yamaki^[21]只研究了正方形铝合金薄板在不同边界条件下的屈曲性能,却没有研究不同长宽比的矩形薄板对屈曲性能的影响. 对四边简支下不同长宽比铝合金矩形薄板的轴压屈曲性能进行研究,保持截面面积相同,材料性质见表 1,不同长宽比下铝合金矩形薄板的设计参数,如表 7 所示.

对试件 SS1~SS4 进行非线性有限元分析,与正方形截面不同,矩形截面有长边与短边的区别,因此对荷载作用于长边或短边进行研究,绘制不同长宽比下铝合金矩形薄板的荷载-挠度曲线,如图 12 所示. 由图 12 可知:当长宽比相同时,荷载作用于长边时产生的最大挠度大于荷载作用于短边时;当长宽比不同时,荷载作用于长边时试件 SS4 产生的最大挠度大于试件 SS2,荷载作用于短边时试件 SS3 产生的最大挠度小于试件 SS1.

在荷载达到 50 MPa 下,试件 SS1~SS4 的最大挠度分别为 4.26,12.72,3.86,14.97 mm. 综上可知,当荷载作用于长边时,长宽比大的工况产生的最大挠度较大;当荷载作用于短边时,长宽比小的工况产生的最大挠度较大;相同长宽比下,长边加载时产生的最大挠度较大.

2.2 恒温加载下铝合金矩形薄板屈曲性能分析

对铝合金矩形薄板进行高温下屈曲分析,研究四边简支下不同长宽比的铝合金矩形薄板在 500 ℃下的屈曲性能. 500 ℃下不同长宽比的铝合金矩形薄板的设计参数,如表 8 所示.

对试件 SST1~SST4 进行模拟,得到 500 ℃下不同长宽比的铝合金矩形薄板的荷载-挠度曲线,如图 13 所示. 由图 13 可知:当长宽比相同时,长边加载的薄板产生的挠度大于短边加载产生的挠度;当长宽比不同时,长边加载下,试件 SST4 产生的挠度大于试件 SST2,短边

表 8 500 ℃下不同长宽比的铝合金矩形薄板的设计参数

| 试件编号 | 长宽比 | 长×宽×厚/mm×mm×mm | 边界条件 | 荷载作用边 | E/GPa | ν |
|------|-------|--------------------|------|-------|-------|-------|
| SST1 | 2 : 1 | 424.26×212.13×1.24 | 四边简支 | 短边加载 | 30 | 0.32 |
| SST2 | 2 : 1 | 424.26×212.13×1.24 | 四边简支 | 长边加载 | 30 | 0.32 |
| SST3 | 3 : 1 | 519.62×173.21×1.24 | 四边简支 | 短边加载 | 30 | 0.32 |
| SST4 | 3 : 1 | 519.62×173.21×1.24 | 四边简支 | 长边加载 | 30 | 0.32 |

加载下,当荷载未达到 25 MPa 时,试件 SST1 产生的挠度大于试件 SST3,当荷载达到 25 MPa 后,两个试件的荷载-挠度曲线几乎重合;短边加载下初始屈曲时荷载-挠度曲线的斜率比长边加载工况下小,长

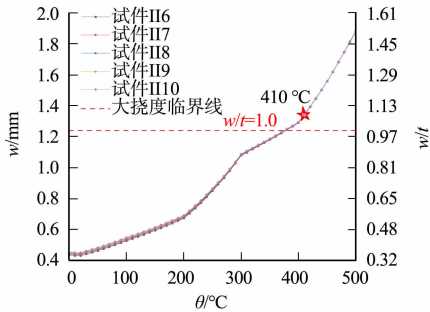


图 11 不同几何初始缺陷薄板的温度-挠度曲线

Fig. 11 Temperature-deflection curves of sheets with different geometric initial defects

表 7 不同长宽比下铝合金矩形薄板的设计参数

Tab. 7 Design parameters of aluminum alloy rectangular sheets with different length-width ratios

| 试件编号 | 长宽比 | 荷载作用边 | 长×宽×厚/mm×mm×mm |
|------|-------|-------|--------------------|
| SS1 | 2 : 1 | 短边加载 | 424.26×212.13×1.24 |
| SS2 | 2 : 1 | 长边加载 | 424.26×212.13×1.24 |
| SS3 | 3 : 1 | 短边加载 | 519.62×173.21×1.24 |
| SS4 | 3 : 1 | 长边加载 | 519.62×173.21×1.24 |

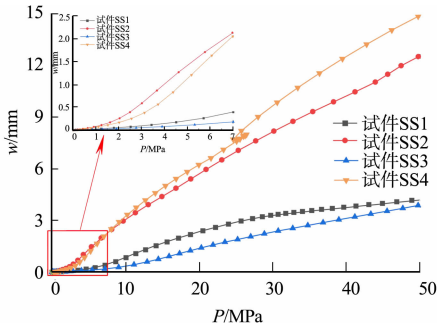


图 12 不同长宽比下铝合金矩形薄板的荷载-挠度曲线

Fig. 12 Load-deflection curves of aluminum alloy rectangular sheets with different length-width ratios

边加载下的挠度变化更明显。

在 500 ℃,50 MPa 荷载作用下,试件 SST1~SST4 的最大挠度分别为 8.16,21.80,8.07,23.80 mm。当长宽比相同时,长宽比为 3 : 1 的试件 SST3 比试件 SST4 的最大挠度降低了 66.09%,长宽比为 2 : 1 的试件 SST1 比试件 SST2 的最大挠度降低了 62.57%;当荷载作用边相同时,长边加载的试件 SST2 比试件 SST4 的最大挠度降低了 8.41%;短边加载的试件 SST3 比试件 SST1 的最大挠度降低了 1.11%。综上可知,荷载作用位置对屈曲挠度的影响较大。

常温与 500 ℃下不同长宽比铝合金矩形薄板的荷载-挠度曲线,如图 14 所示。由图 14 可知:500 ℃下铝合金矩形薄板产生的挠度均大于常温工况产生的挠度,且屈曲过程特征更为明显;长宽比为 3 : 1 的长边加载工况下,薄板发生跳跃屈曲,常温下试件 SS4 达到 26.61 MPa 后,结构出现软化而卸载,又在达到 24.79 MPa 后开始进入强化阶段;500 ℃下,试件 SST4 达到 12.01 MPa 后出现软化而发生“跳跃”,结构开始卸载,当荷载达到 11.25 MPa 后,结构开始“回弹”,进入强化阶段。对比常温与高温下跳跃屈曲的临界荷载变化发现,高温下铝合金薄板达到“跳跃”点所需的上临界荷载比常温工况下减小了 14.6 MPa,达到“回弹”点所需的下临界荷载比常温工况下减小了 13.54 MPa。

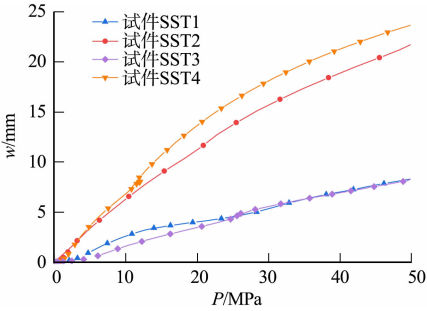
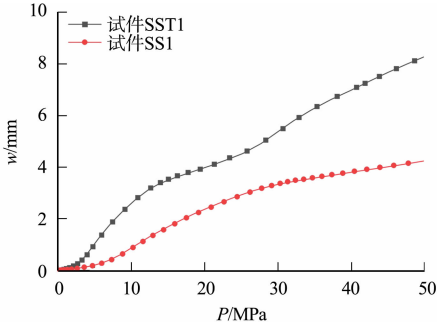
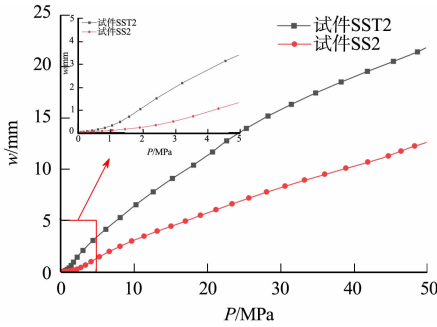


图 13 500 ℃下不同长宽比的铝合金矩形薄板的荷载-挠度曲线

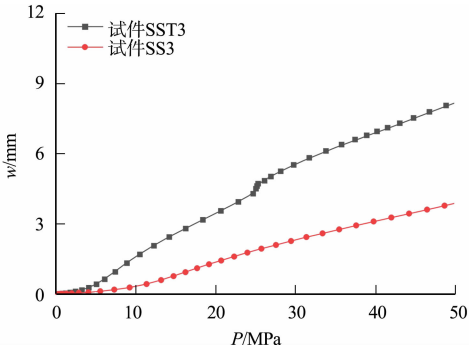
Fig. 13 Load-deflection curves of aluminum alloy rectangular sheets with different length-width ratios at 500 ℃



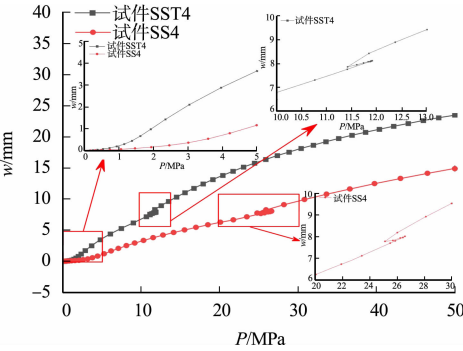
(a) 试件 SS1, SST1



(b) 试件 SS2, SST2



(c) 试件 SS3, SST3



(d) 试件 SS4, SST4

图 14 常温与 500 ℃下不同长宽比铝合金矩形薄板的荷载-挠度曲线

Fig. 14 Load-deflection curves of aluminum alloy rectangular sheets with different length-width ratios at ambient temperature and 500 ℃

2.3 恒载升温下铝合金矩形薄板屈曲性能分析

将各工况下屈曲荷载特征值的 0.7 倍作为施加荷载,恒载升温下不同长宽比铝合金矩形薄板的模拟试验参数,如表 9 所示。通过模拟绘制不同长宽比铝合金矩形薄板的温度-挠度曲线,如图 15 所示。

由图 15 可知:4 种工况下的挠度随温度变化趋势一致;当薄板的 $w/t > 1.0$ 时,挠度进入大挠度变形阶段。由表 9 可知:当荷载作用边相同时,长边加载下试件 SS5 产生的挠度比试件 SS7 减小了 0.51

表 9 恒载升温下不同长宽比铝合金矩形薄板的模拟试验参数

| Tab. 9 Simulation experimental parameters of aluminum alloy rectangular sheets with different length—width ratios under constant load heating | | | | | | | |
|---|-------|--------------------|-------|------------|------------|--------------------|---------------------------------------|
| 试件编号 | 长宽比 | 长×宽×厚/mm×mm×mm | 荷载作用边 | P_y /MPa | P_a /MPa | θ_{\max} /℃ | $w_{500\text{ }^{\circ}\text{C}}$ /mm |
| SS5 | 2 : 1 | 424.26×212.13×1.24 | 长边加载 | 3.82 | 2.68 | 410 | 1.79 |
| SS6 | 2 : 1 | 424.26×212.13×1.24 | 短边加载 | 10.13 | 7.09 | 365 | 1.92 |
| SS7 | 3 : 1 | 519.62×173.21×1.24 | 长边加载 | 4.62 | 3.23 | 315 | 2.30 |
| SS8 | 3 : 1 | 519.62×173.21×1.24 | 短边加载 | 15.34 | 10.74 | 365 | 1.93 |

mm,短边加载下试件 SS6 产生的挠度比试件 SS8 减小了 0.01 mm;试件 SS7 在 365 ℃时最先发生大挠度屈曲,试件 SS5 最晚发生大挠度屈曲,所需温度为 410 ℃.由此可知,短边加载下,长宽比对升温下薄板的挠度影响较小;长边加载下,选择长宽比较小的薄板能有效降低升温过程中产生的挠度.

3 恒载升温薄板的受力状态分析

恒载升温下,随着温度的增大,铝合金薄板的挠度随之增大,达到某一温度时,屈曲挠度的增速产生突变.有些温度-挠度曲线的突变温度点并不明显,需要通过特定方法进行判断.运用 Mann-Kendall 准则对恒载升温工况下,不同边界条件、不同长宽比及不同几何初始缺陷下的挠度突变的初始温度进行判断验证.

薄板屈曲过程中应变作为主要变形参数,表征了其工作状态与承载能力,从薄板截面中心线上选取 5 个点,结合应变数据实际含义,采用广义应变能作为受力状态特征参数.根据温度变化值与升温方式,计算应变点位置在发生温度变化时的广义应变能 E_g .

1) 边界条件.运用 Mann-Kendall 准则,绘制试件 BC5~BC8 的广义应变能-温度曲线,得到轴压薄板受力状态特征点,如图 16(a)所示.根据图 16(a)可判断出 4 种边界条件下挠度增速发生初始变化的温度均在 200 ℃.为确认所判断特征点的准确性,将所判断出的温度特征点在温度-挠度曲线中标记出,如图 16(b)所示.根据图 16(b)中标记的特征点位置可知,在 200 ℃前后,挠度的变化速率发生了改变,证明所判断的特征点是正确的.

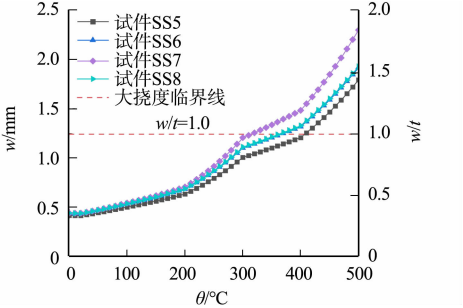
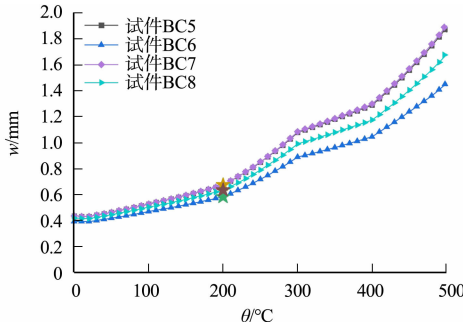
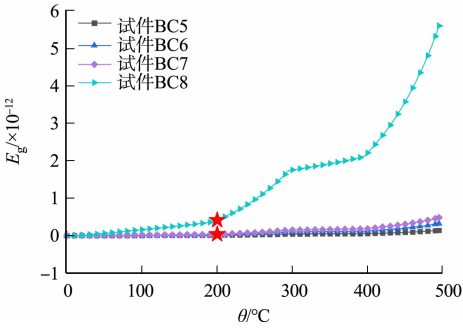


图 15 不同长宽比铝合金矩形薄板的温度-挠度曲线
Fig. 15 Temperature-deflection curves of aluminum alloy rectangular sheets with different length-width ratios



(a) 轴压薄板受力状态特征点 (b) 轴压薄板挠度模式突变特征

图 16 不同边界条件下轴压薄板的受力状态特征点和挠度模式突变特征

Fig. 16 Characteristic points of stress state and sudden changes in deflection mode of axially compressed sheets under different boundary conditions

2) 长宽比.不同长宽比下轴压薄板的受力状态特征点和挠度模式突变特征,如图 17 所示.由图 17(a)可知:不同长宽比下,挠度增速发生初始变化的温度均在 200 ℃.根据图 17(b)中标记的特征点位置可知,在 200 ℃前后,挠度的变化速率发生了改变,证明所判断的特征点是正确的.

3) 几何初始缺陷.不同几何初始缺陷下轴压薄板的受力状态特征点和挠度模式突变特征,如图 18

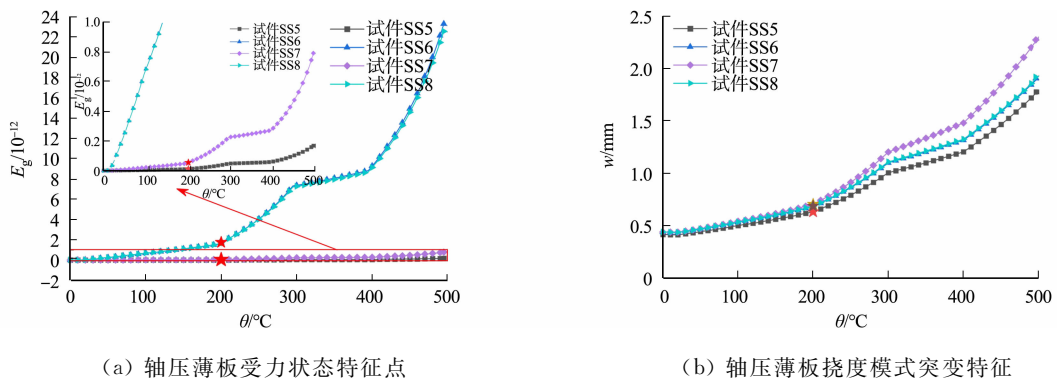


图 17 不同长宽比下轴压薄板的受力状态特征点和挠度模式突变特征

Fig. 17 Characteristic points of stress state and sudden changes in deflection mode of axially compressed sheets under different length-width ratios

所示. 由图 18(a)可知: 不同几何初始缺陷下, 特征点均为 200 ℃. 根据图 18(b)中标记的特征点位置可知, 在 200 ℃前后, 挠度的变化速率发生了改变, 证明判断的特征点是正确的.

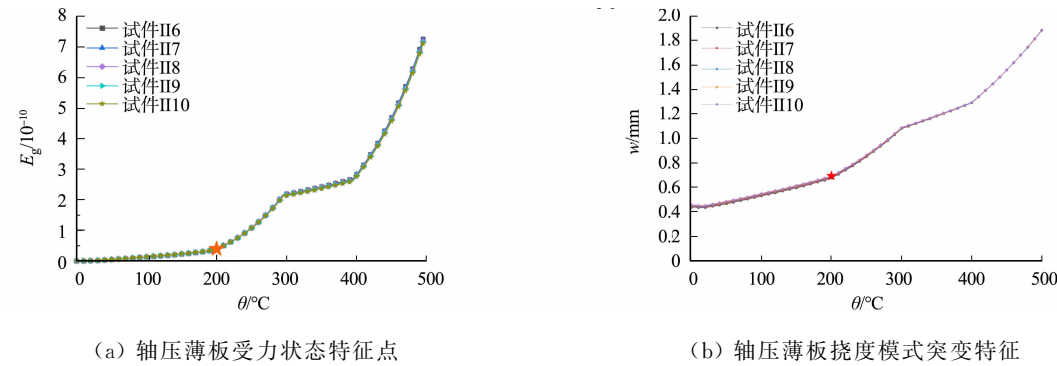


图 18 不同几何初始缺陷轴压薄板的受力状态特征点和挠度模式突变特征

Fig. 18 Characteristic points of stress states and sudden changes in deflection mode of axially compressed sheets under different geometric initial defects

4 结论

对面内轴压铝合金薄板屈曲试验进行模拟, 研究高温下不同边界条件、不同长宽比及不同几何初始缺陷对薄板屈曲性能的影响. 通过分析各工况的屈曲性能, 得到以下 3 个结论.

1) 基于 ABAQUS 有限元软件对试件进行非线性有限元模拟分析, 获得结构的荷载-挠度曲线, 与试验结果吻合较好, 证明数值模拟方法的可靠性和准确性. 运用 Mann-Kendall 准则对结构受力状态进行分析, 判断薄板屈曲过程中的突变点, 通过子模式温度-挠度曲线对所判断的特征点进行验证, 结果证明所判断特征点为挠度增长速率发生突变点, 结论合理可靠.

2) 对于铝合金正方形薄板, 恒温下通过提高边界条件的约束, 能有效减小结构产生的挠度, 提高结构的稳定性. 恒载升温下, 结构受到温度荷载作用, 产生热应力, 而板边缘的转动抵消了部分热应力作用, 导致薄板挠度减小, 加载边选择简支条件可有效减小挠度. 在恒温下, 几何初始缺陷对薄板屈曲发生阶段时挠度的变化速率影响较大, 并且几何初始缺陷越大, 挠度变化的斜率越大. 在恒载升温时, 温度达到 410 ℃前, 挠度随几何初始缺陷的增大而增大, 温度达到 410 ℃后, 情况相反, 但此时各工况下挠度大小差异不大.

3) 对于铝合金矩形薄板, 恒温下长宽比相同时, 短边加载可有效减小屈曲挠度; 长宽比不同时, 长边加载下选择长宽比较小的矩形薄板, 短边加载下选择长宽比较大的矩形薄板可有效减小屈曲挠度, 提高结构稳定性. 恒载升温时, 长边加载下选择长宽比较小的矩形薄板可有效减小屈曲挠度, 提高结构稳定性, 短边加载下长宽比对屈曲挠度的影响较小.

参考文献:

- [1] 崔德刚. 结构稳定性设计手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.
- [2] HEINZ A, HASZLER A, KEIDEL C, *et al.* Recent development in aluminium alloys for aerospace applications[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 280(1): 102-107. DOI: 10. 1016/S0921-5093(99)00674-7.
- [3] 杨守杰, 戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. 材料导报, 2005(2): 76-80. DOI: 10. 3321/j. issn: 1005-023X. 2005. 02. 023.
- [4] STALEY J T, LIU J, JR HUNT W H. Aluminum alloys for aerostructures[J]. Advanced Materials and Processes, 1997, 152(4): 17-21.
- [5] FILATOV Y A, YELAGIN V I, ZAKHAROV V V. New Al-Mg-Sc alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 280(1): 97-101. DOI: 10. 1016/S0921-5093(99)00673-5.
- [6] LIU J, KULAK M. A new paradigm in the design of aluminum alloys for aerospace applications[J]. Materials Science Forum, 2000, 331/332/333/334/335/336/337: 127-142. DOI: 10. 4028/www. scientific. net/MSF. 331-337. 127.
- [7] 张铮, 张其林. 偏心受压铝合金构件稳定的试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2008(1): 8-14.
- [8] 王元清, 石永久, 袁焕鑫, 等. 铝合金板件的受压屈曲分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, 44(1): 74-78.
- [9] 李幅昌, 张洪恩, 杨志坚, 等. 新型双铝合金板装配式屈曲约束支撑有限元分析[J]. 钢结构, 2018, 33(5): 57-62. DOI: 10. 13206/j. gjg201805011.
- [10] 常婷. 铝合金轴心受压构件局部稳定与相关稳定性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [11] 袁霖, 张其林. 铝合金受压板件局部屈曲承载力设计方法[J]. 计算机辅助工程, 2019, 28(4): 50-58. DOI: 10. 13340/j. cae. 2019. 04. 010.
- [12] 赵远征. 6082-T6 铝合金偏压、受弯构件力学性能研究及可靠度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [13] 马开开. 铝合金加筋板结构强度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [14] ÁLVAREZ J G, BISAGNI C. A study on thermal buckling and mode jumping of metallic and composite plates[J]. Aerospace, 2021, 8: 56. DOI: 10. 3390/aerospace8020056.
- [15] BAI Yunhe, YU Kaiping, ZHAO Jie, *et al.* Experimental and simulation investigation of temperature effects on modal characteristics of composite honeycomb structure[J]. Composite Structures, 2018, 201: 816-827. DOI: 10. 1016/j. compstruct. 2018. 06. 106.
- [16] XU Yingjie, REN Shixuan, ZHANG Weihong, *et al.* Study of thermal buckling behavior of plain woven C/SiC composite plate using digital image correlation technique and finite element simulation[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131: 385-392. DOI: 10. 1016/j. tws. 2018. 07. 023.
- [17] 沈惠申. 板壳后屈曲行为[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2014.
- [18] KHAZAEINEJAD P, USMANI A S. On thermo-mechanical nonlinear behaviour of shallow shells[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2016, 82: 114-123. DOI: 10. 1016/j. ijnonlinmec. 2016. 03. 006.
- [19] SHARIAT B S, ESLAMI M R. Thermomechanical stability of imperfect functionally graded plates based on the third order theory[J]. AIAA Journal, 2006, 44(12): 2929-2936. DOI: 10. 2514/1. 19492.
- [20] KHAZAEINEJAD P, USMANI A S, LAGHROUCHE O. An analytical study of the nonlinear thermo-mechanical behaviour of thin isotropic rectangular plates[J]. Computers and Structures, 2014, 141: 1-8. DOI: 10. 1016/j. compstruc. 2014. 05. 006.
- [21] YAMAKI N. Experiments on the postbuckling behavior of square plates loaded in edge compression[J]. Journal of Applied Mechanics, 1961, 28(2): 238-244. DOI: 10. 1115/1. 3641660.
- [22] CAMPBELL J, HETTY L, VIGNJEVIC R. Non-linear idealisation error analysis of a metallic stiffened panel loaded in compression[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 54: 44-53. DOI: 10. 1016/j. tws. 2012. 01. 016.
- [23] 张鹏飞, 卢嘉玮, 张兆年, 等. 6061-T6 铝合金构件焊接残余应力分布[J]. 兰州交通大学学报, 2021, 40(3): 15-19. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-4373. 2021. 03. 003.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)