

平板焊接变形对铝合金搅拌摩擦焊加筋板 轴压稳定性能的影响

邵青 何宇廷 张腾 冯宇

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安, 710038)

摘要:对搅拌摩擦焊加筋板筋条间平板的焊接几何变形形式进行了简化,参考 Paik 等人的统计分析结果给出了几何变形的幅值;采用有限元方法对结构的轴向压缩稳定性能进行数值计算,得到不同的几何变形形式对结构屈曲失稳和承载能力的影响,并分析了侧边支持条件对计算结果的影响。计算分析表明,总体上,文中定义的平板几何变形会使加筋板结构的一阶屈曲载荷增大,但会在一定程度上降低结构的承载能力;变形形式会影响结构的屈曲模态、屈曲载荷以及承载能力。

关键词:搅拌摩擦焊;加筋板;几何变形;稳定性;有限元方法

中图分类号:V214.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)06-0963-06

Influence of Weld-Induced Plate Distortion on Compressive Stability Performance of Friction Stir Welded Aluminum Alloy Stiffened Panel

Shao Qing, He Yuting, Zhang Teng, Feng Yu

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an, 710038, China)

Abstract: Weld-induced geometric distortion of plate between the stiffeners of friction stir welded (FSW) stiffened panel is idealized. The plate distortion magnitude is defined according to the statistical data from Paik's analysis results. By the use of finite element method (FEM), the stability performance of FSW stiffened panel subjected to longitudinal compression is calculated and the effects of plate distortion shapes and boundary conditions on the stability performance of the structure are analyzed. Calculation results show that, in general, the plate geometric distortion presented in this work increases the critical buckling load but reduces the ultimate strength of the structure. The plate distortion shape affects the buckling mode and buckling load as well as the ultimate strength of the structure.

Key words: friction stir weld; stiffened panel; geometric distortion; stability; finite element method

搅拌摩擦焊(Friction stir weld, FSW)作为一种新型的固相连接技术在航空铝合金的焊接方面显示出了较大的优势。加筋板结构是飞机机翼、机身以及尾翼的主要结构,与传统的铆接/螺接连接工艺相比,采用搅拌摩擦焊可显著减轻加筋板结构的重量,降低加工成本^[1]。

然而,焊接过程不可避免地会引起结构产生一

定程度的残余应力和几何变形等初始缺陷,并会引起焊接区材料性能的退化。为此,国外学者和机构对搅拌摩擦焊加筋薄壁结构的初始缺陷问题进行了一定的理论和试验研究。Yoon 等^[2]研究了焊接几何变形幅值和焊接区材料强度降低对搅拌摩擦焊整体加筋板屈曲性能的影响;Paik 等^[3]通过试验测量了不同构型的铝合金搅拌摩擦焊加筋板的

残余应力分布、几何变形及焊接区材料强度,对结构的屈曲和后屈曲性能进行了试验及数值仿真研究,并将结果与熔焊加筋板的性能进行了对比;Murphy等^[4-6]通过试验和仿真方法研究了不同形式的焊接缺陷对加筋板稳定性的影响程度,并改进了飞机搅拌摩擦焊加筋板稳定性分析的理论 and 有限元计算方法。自从引进搅拌摩擦焊技术后,国内学者和机构也开始对搅拌摩擦焊加筋板开展研究。鄢东洋等^[7]对搅拌摩擦焊接铝合金加筋板的残余变形进行了数值仿真预测;北京航空制造工程研究所^[8]系统地开展了机身整体壁板搅拌摩擦焊技术基础工艺试验、缺陷监测、焊接变形控制等一系列研究。

目前,国内关于焊接初始缺陷对搅拌摩擦焊加筋薄壁结构性能影响的相关研究相对较少。本文对搅拌摩擦焊加筋板结构轴向压缩屈曲性能进行有限元仿真计算,初步研究焊接引起的几何变形形式对该型结构稳定性的影响。

1 焊接引起的加筋板几何变形

本文研究的结构为2024-T3铝合金薄壁加筋板,筋条与平板为同种材料,采用搅拌摩擦焊接技术相连接。结构的基本尺寸如下:宽度 $w=640$ mm,长度 $l=750$ mm,筋条间距 $b_s=180$ mm,平板厚度 $t_s=1.8$ mm。结构由4根筋条组成,筋条的剖面为Z型,结构外形及筋条剖面尺寸示意图如图1所示。

焊接过程引起的结构初始缺陷主要包括结构几何变形、残余应力以及材料的性能退化等。几何变形主要包括筋条间平板的面外几何变形,筋条的柱形变形以及筋条的侧向变形;残余应力主要包括筋条间平板和筋条上的残余拉伸、压缩应力;材料性能的退化主要是指焊接区域材料屈服强度的降低。

对于加筋板结构而言,筋条间平板由于尺寸跨度较大,因此焊接过程更容易引起面外几何变形;相比而言,筋条的尺寸较小,变形较小。本文忽略

加筋板两加载端的几何变形,主要研究焊接过程引起的筋条间平板几何变形对加筋板结构在轴向压缩载荷下稳定性的影响。

实际结构中,焊接引起的几何变形是不规则的,为了便于进行分析,本文对筋条间平板的几何变形进行简化。平板的变形一般表现为四周变形量小、中间变形量大的特点,因此筋条间平板的变形形式可理想化为分别沿着横向和纵向的正弦波。考虑到筋条间平板宽度相对于平板长度较小,因此沿着平板宽度方向上的变形理想化为一个正弦(余弦)半波(如图2所示)。理想化的筋条间平板的变形形式可按照式(1)来确定^[3]

$$w_{opl} = w_{opl}^* \sin \frac{\pi x}{b_s} \sin \frac{n\pi y}{l} \quad (1)$$

式中: n 表示筋条间平板变形沿着长度方向的正弦(余弦)半波数, l 表示筋条间平板长度, w_{opl}^* 表示筋条间平板最大变形量, x 、 y 表示筋条间平板上各点的相对位置横、纵坐标。

Paik等^[9]对78件熔焊铝合金加筋板的6种焊接引起的初始缺陷进行了测量,根据统计分析得到轻微、中等、严重3种水平下初始缺陷测量结果的平均值和标准差。式(2)是统计得到的筋条间平板最大初始变形平均值

$$w_{opl} = \begin{cases} 0.018\beta^2 t & \text{轻微水平} \\ 0.096\beta^2 t & \text{中等水平} \\ 0.252\beta^2 t & \text{严重水平} \end{cases} \quad (2)$$

式中: β 为筋条间平板的长细比, $\beta = \frac{b_s}{t_s} \sqrt{\frac{\sigma_{YP}}{E}}$, E 为弹性模量, σ_{YP} 为平板材料屈服强度。

作为一种固相连接工艺,相较于熔焊等,采用搅拌摩擦焊接工艺可以得到更好的材料性能、更低的残余应力水平和更小的几何变形。本文以熔焊加筋板的初始缺陷为参考,采用式(2)中中等水平的最大初始变形平均值作为搅拌摩擦焊加筋板筋条间平板的最大面外变形量。对于本文结构, b_s 为180 mm, t_s 为1.8 mm,材料的弹性模量 E

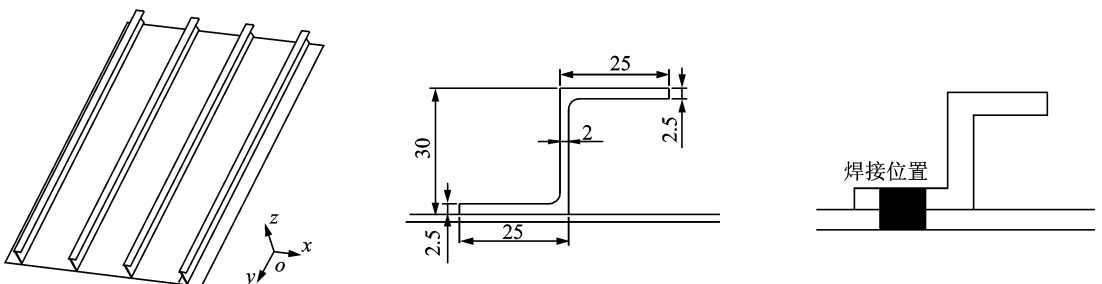


图1 搅拌摩擦焊加筋板结构外形尺寸示意图

Fig. 1 Configuration sketch of FSW stiffened panel

为 73 800 MPa,屈服强度 σ_{YP} 为 262 MPa,将各参数代入式(2),可得到筋条间平板的最大面外变形量 w_{opl}^* 为 6.1 mm。将 w_{opl}^* 代入式(1),可得理想化的筋条间平板的变形形式

$$w_{opl} = 6.1 \sin \frac{\pi x}{180} \sin \frac{n\pi y}{750} \quad (3)$$

图 3 为不同的 n 对应的筋条间平板的变形形式,其中, $n=0$ 表示平板无变形的情况, n 为负值时平板变形形式与 n 为正值时的变形形式关于平

板平面对称。由于结构在长度方向上的对称性, $n=-2$ 、 $n=-4$ 的变形形式分别与 $n=2$ 、 $n=4$ 时相同,因此不再重复。

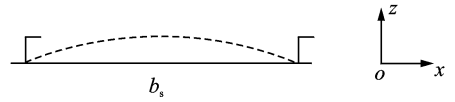
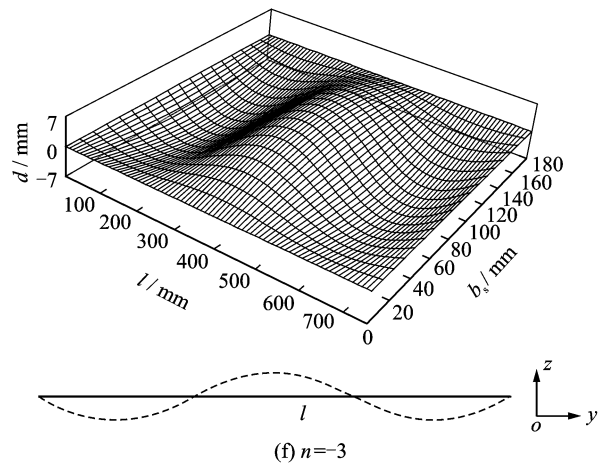
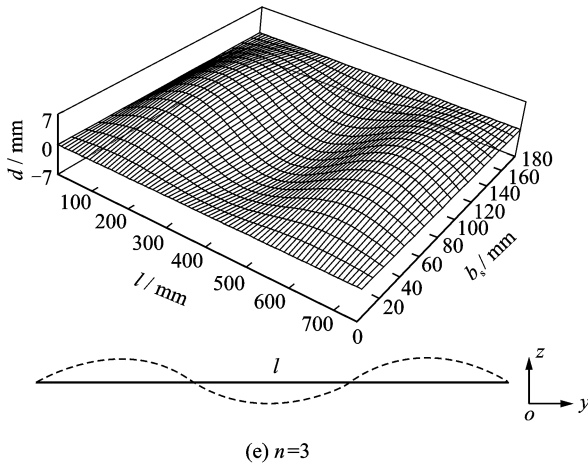
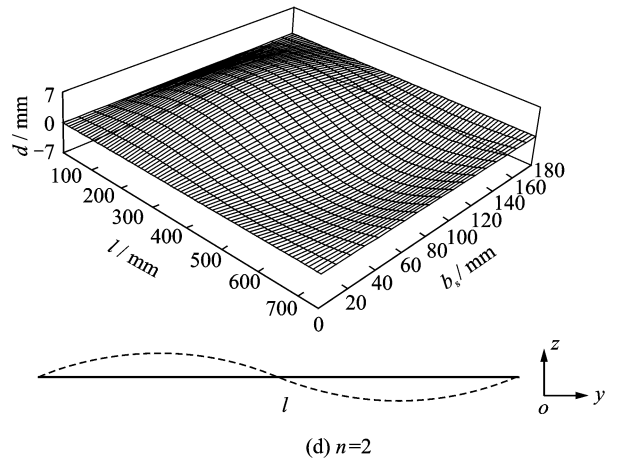
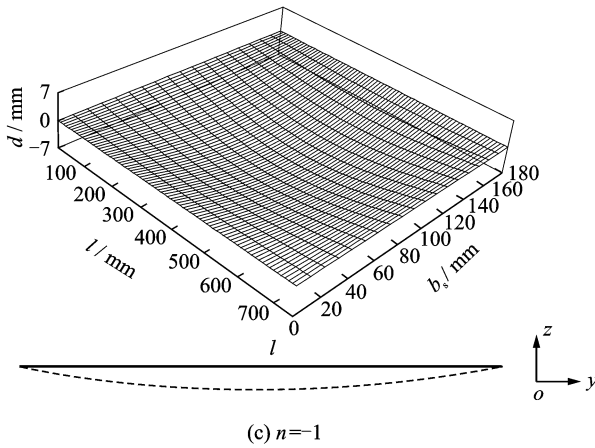
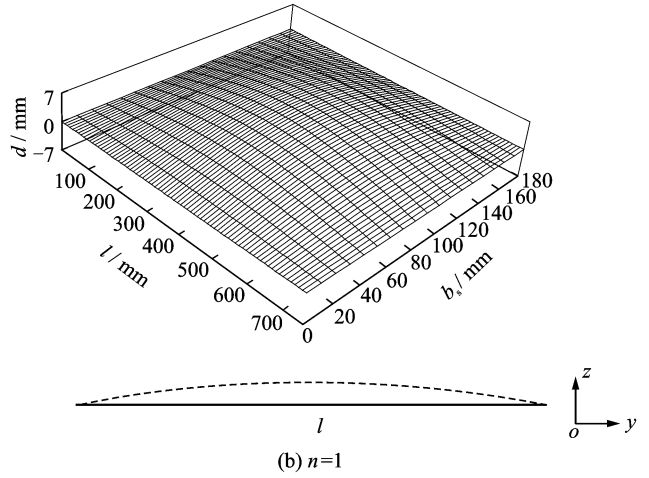
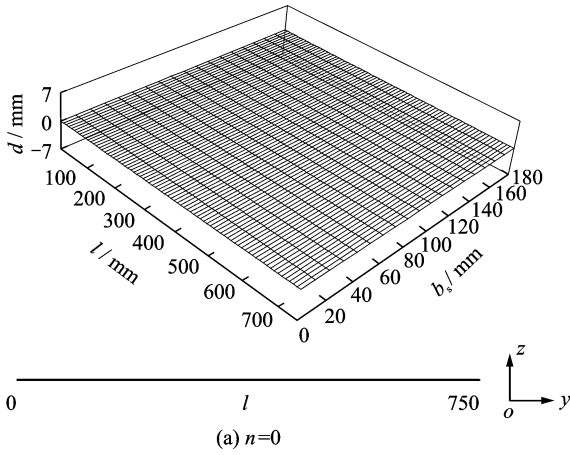


图 2 筋条间平板宽度方向上的变形示意图

Fig. 2 Geometric distortion of plate between stiffeners along plate width direction



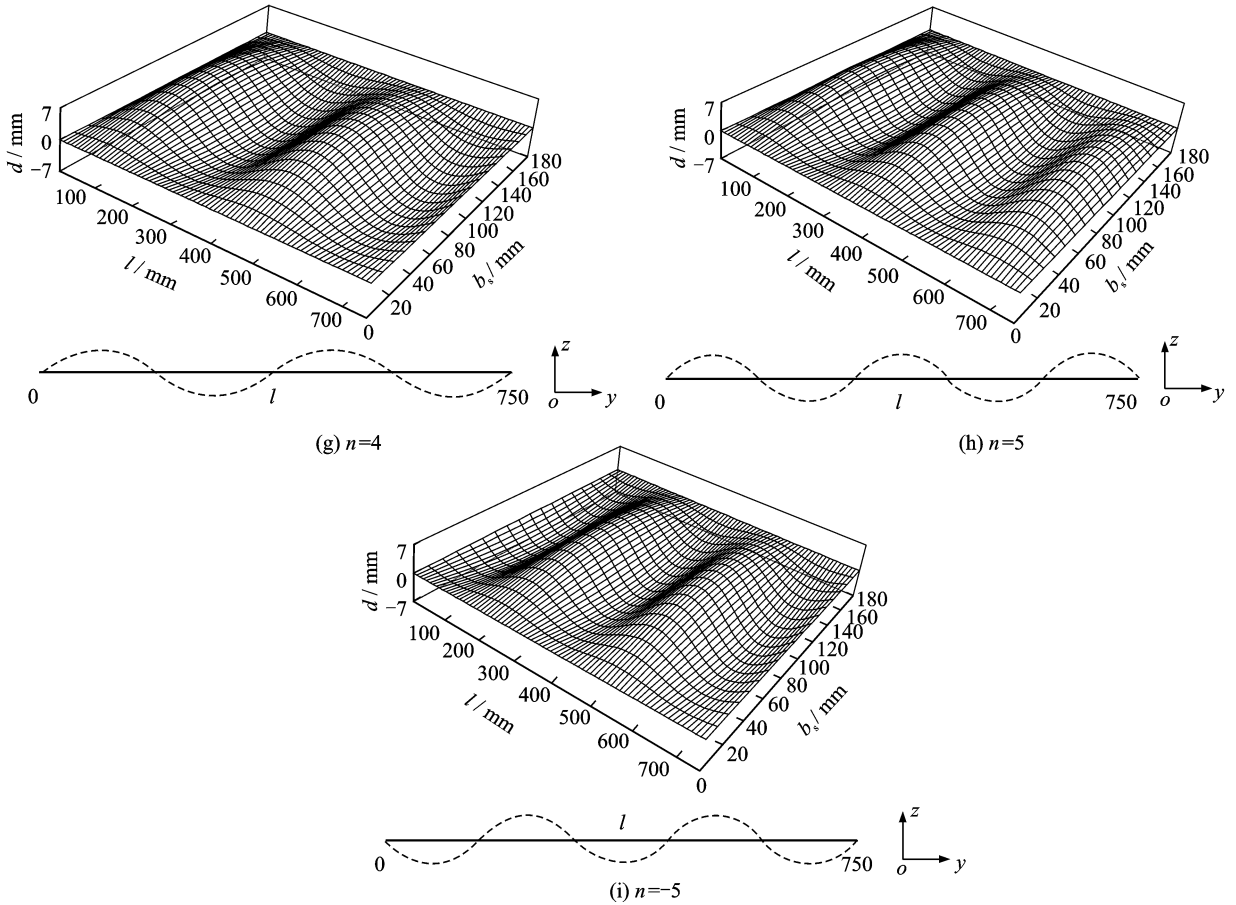


图3 筋条间平板的几何变形示意图

Fig. 3 Geometric distortion sketches of plate between stiffeners

2 有限元模型的建立

采用 MSC. PATRAN 对加筋板结构进行有限元建模,模型按照结构尺寸选择壳单元进行建立。

典型的搅拌摩擦焊接部分可分为 4 个区域:母材、热影响区、热机影响区和焊核^[10]。模型中假设各个区域的材料性能分布均匀一致,且弹性模量均与母材相同。材料的弹塑性应力-应变关系根据 Ramberg-Osgood 三参数法^[11]进行定义

$$\frac{E\varepsilon}{\sigma_{0.7}} = \frac{\sigma}{\sigma_{0.7}} + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.7}} \right)^k \quad (4)$$

式中: E 为材料弹性模量, σ 为应力, ε 为应变, $\sigma_{0.7}$ 为割线屈服应力, k 为描述应力-应变曲线弯曲部位的形状参数。本文中,2024-T3 母材的 k 与 $\sigma_{0.7}$ 参考文献^[11]分别取为 10 和 268.9 MPa。

对于焊接结构的静力分析,可以将热影响区和热机影响区简化为一个热影响区^[12];另外,搅拌摩擦焊接会使焊接区域材料的强度降低^[4]。本文有限元模型将热影响区、热机影响区及焊核区简化为相同的区域,参考文献^[4],将该区域的宽度定义为 4 倍的筋条凸缘厚度(即为 10 mm),该区域的材料

弹塑性应力-应变关系同样根据 Ramberg-Osgood 三参数法进行定义,该区域的割线屈服应力定义为母材割线屈服应力的 80%,即为 215.1 MPa。

对于筋条与平板的焊接部分,建模时在连接区通过共节点方式建立近似的面-面焊接约束关系,即假设焊接连接区在结构破坏过程中不发生脱焊。本文焊接区宽度取为 2 倍的筋条凸缘厚度,即焊接区取为 5 mm。本文模型不引入焊接引起的残余应力,建立的无几何变形的搅拌摩擦焊加筋板有限元模型如图 4 所示(箭头方向为加载方向),加筋板

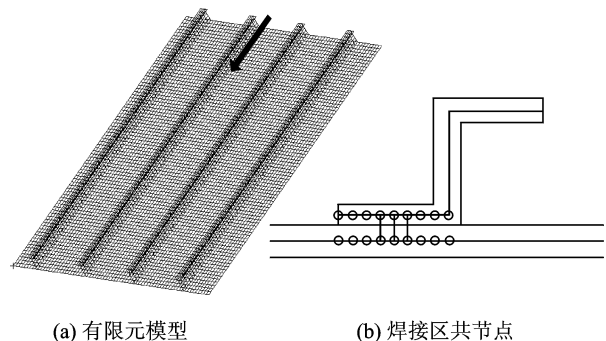


图4 加筋板有限元模型示意图

Fig. 4 FEM model of stiffened panel

下端固定,上端施加简支约束并施加压缩载荷。

两侧边界条件分为简支和自由两种情况,从而分析侧边支持条件对结构静力性能的影响。简支条件通过约束加筋板有限元模型两侧边上各节点的面外位移来施加。

根据式(3)的变形形式,通过对有限元模型中筋条间平板上各对应节点 z 方向上的坐标进行相应的偏置,从而模拟几何变形。

3 有限元计算结果与分析

分别对图 3 中 9 种筋条间平板变形形式的加筋板结构进行线性屈曲计算,得到各结构的一阶屈曲模态和一阶线性屈曲载荷,并通过非线性静力分

析对结构的承载能力进行计算。

计算结果表明,对于侧边自由的情况,当 $|n| \leq 2$ 时,结构的屈曲模态均表现为筋条间平板的局部屈曲,而屈曲形式有所不同;当 $|n| > 2$ 时,结构的屈曲模态主要表现为加筋板一侧边的局部屈曲。对于侧边简支的情况,结构的屈曲模态均表现为筋条间平板的局部屈曲,而屈曲形式各有不同;当 $|n| \leq 2$ 时,结构的屈曲模态与侧边自由条件下的屈曲模态基本一致。另外,在相同的侧边支持条件下,只要 $|n|$ 相同,结构的屈曲模态基本一致。

图 5,6 分别为侧边自由、简支条件下,有限元计算模拟得到的部分平板变形形式下加筋板结构的一阶屈曲模态。

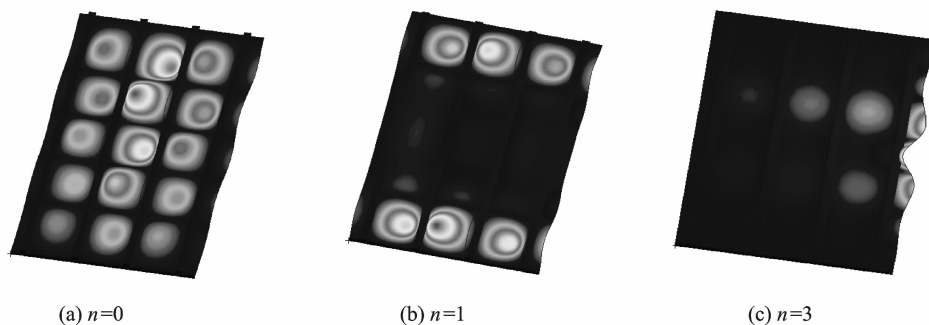


图 5 部分变形形式下加筋板结构的屈曲模态(侧边自由)

Fig. 5 Buckling modes of stiffened panel under different plate geometric distortions(sides free)

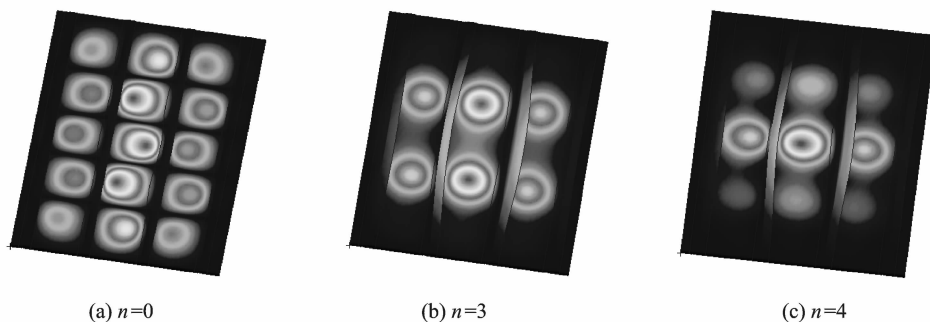


图 6 部分变形形式下加筋板结构的屈曲模态(侧边简支)

Fig. 6 Buckling modes of stiffened panel under different plate geometric distortions(sides simply supported)

图 7 为有限元计算得到的各变形形式下加筋板结构的轴压一阶屈曲载荷和承载能力。经计算, $|n|$ 相同时,两种相对称的平板变形形式下结构的屈曲载荷与承载能力基本相同,因此图 7 中仅给出了 n 为正值时的结果。

从图 7 中可以看出,总体上,本文描述的几何变形形式会使加筋板结构的一阶屈曲载荷增大,但会在一定程度上降低结构的承载能力。

侧边自由情况下, $n=1$ 时结构的一阶屈曲载荷最大,是 $n=0$ 时的 1.6 倍;当 $n > 2$ 时,各结构的一阶屈曲载荷较为接近。侧边简支情况下,当 $n \leq 2$ 时,结构的一阶屈曲载荷与侧边自由情况下的屈曲载荷基本相同;当 $n > 2$ 时,结构的一阶屈曲载荷大于侧边自由情况下的屈曲载荷,且随 n 的增加有较为明显的增大;当 $n=5$ 时,结构的一阶屈曲载荷是 $n=0$ 时的 3.5 倍,且接近结构的承载能力。

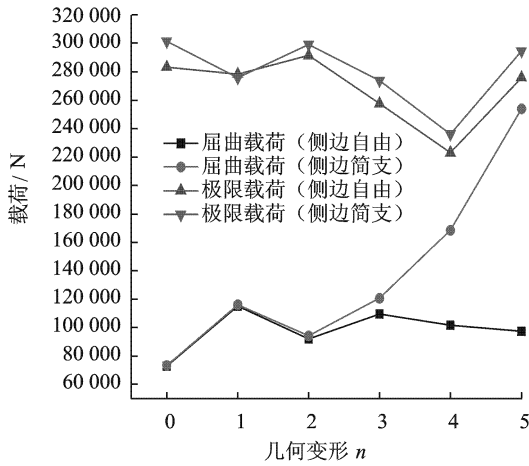


图7 各变形形式下加筋板结构的屈曲载荷与承载能力
Fig. 7 Buckling loads and ultimate strengths of stiffened panel under different plate geometric distortions

总体上看,侧边简支情况下结构的承载能力大于侧边自由的情况,当 $n=4$ 时,结构的承载能力下降较为明显,两种侧边支持条件下的下降幅度均超过20%。

4 结 论

本文通过有限元方法研究了筋条间平板焊接变形形式对搅拌摩擦焊接加筋板轴向压缩稳定性影响,并分析了侧边支持条件对结果的影响,可以得出以下结论:

(1)总体上,平板的几何变形会使加筋板结构的一阶屈曲载荷增大,但会在一定程度上降低结构的承载能力;不同的变形形式对结构稳定性的影响不同。

(2)侧边简支情况下,当平板沿长度方向上的变形半波数为5时,结构的一阶屈曲载荷是无变形时的3.5倍,且接近结构的承载能力。

(3)真实结构中焊接残余变形的形式较为复杂,与本文描述的规则的变形形式有着一定的区别,因此本文结论具有一定的局限性。但从本文得出的结果来看,残余变形对结构的稳定性能有着一定的不利影响,因此,在进行焊接加工时,既要控制焊接变形的幅值,还要控制焊接变形形式。

参考文献:

[1] 栾国红,季亚娟,简波. 飞机轻金属结构的搅拌摩擦焊[J]. 航空制造技术, 2006(12):50-53.
Luan Guohong, Ji Yajuan, Jian Bo. FSW of aircraft

light metal structure [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2006(12):50-53.

- [2] Yoon J W, Bray G H, Valente R A F, et al. Buckling analysis for an integrally stiffened panel structure with a friction stir weld [J]. Thin-Walled Structures, 2009, 47(12): 1608-1622.
- [3] Paik J K. Buckling collapse testing on friction stir welded aluminum stiffened plate structures [R]. Washington DC: Ship Structure Committee, 2009.
- [4] Murphy A, McCune W, Quinn D, et al. The characterization of friction stir welding process effects on stiffened panel buckling performance [J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(3): 339-351.
- [5] Murphy A, Lynch F, Price M, et al. Modified stiffened panel analysis methods for laser beam and friction stir welded aircraft panels [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2006, 220(G4): 267-278.
- [6] Van D V, Murphy A, Benedictus R. Post-buckling failure of welded aluminium panels [C]//47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Newport, Rhode Island. Washington DC: AIAA, 2006.
- [7] YanDongyang, Wu Aiping, Juergen S, et al. Predicting residual distortion of aluminum alloy stiffened sheet after friction stir welding by numerical simulation [J]. Materials and Design, 2011, 32(4): 2284-2291.
- [8] 孟强,董春林,栾国红,等. 国产客机机身壁板搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 航空制造技术, 2012(23/24): 79-82.
Meng Qiang, Dong Chunlin, Luan Guohong, et al. Friction stir welding technology of domestic aircraft panel [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2012 (23/24):79-82.
- [9] Paik J K, Thayamballi A K, Ryu J Y, et al. The statistics of weld induced initial imperfections in aluminum stiffened plate structures for marine applications [J]. International Journal of Maritime Engineering, 2006, 148 (A4): 19-63.
- [10] Kramer R. In-service performance of aluminum structural details [R]. Washington DC: Ship Structure Committee, 2007.
- [11] 崔德刚. 结构稳定性设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1996.
Cui Degang. Handbook of structure stability design [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1996.
- [12] Eurocode 9. Design of aluminum structures, Part 1-1: General rules [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 1998.