

文章编号:1674-8190(2013)02-170-05

复合材料与金属胶接结构的次弯曲效应研究

李波,赵美英,万小鹏

(西北工业大学 航空学院,西安 710072)

摘要: 复合材料与金属胶接单搭接的次弯曲效应引起的剥离应力,会大大降低接头的强度。采用有限元方法分析复合材料铺向角、铺层顺序及斜削对次弯曲的影响,并进一步研究分析次弯曲和胶层剥离应力、板的弯曲刚度之间的关系。结果表明:次弯曲影响剥离应力的大小;弯曲刚度越大,次弯曲越小;斜削有助于减小次弯曲。

关键词: 复合材料;金属;单搭接;胶接;次弯曲

中图分类号: TB33

文献标识码: A

Research on the Secondary Bending of Composite-metal Adhesively Bonded Joints

Li Bo, Zhao Meiyong, Wan Xiaopeng

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Peel stress causing by secondary bending in composite-metal adhesively single lap joints will decrease strength of the joints. The effect of different ply orientation angle, different ply stacking sequence and chamfering to secondary bending of bonded single lap joints is analyzed by using finite element method. The relations between secondary bending and peel stress, bending stiffness are also analyzed. It is found that the bending stiffness affects the peel stress, the bigger the bending stiffness is, the smaller the secondary bending will be, and the chamfering helps to reduce secondary bending.

Key words: composite; metal; single lap joints; adhesive joints; secondary bending

0 引言

复合材料以其高比强度、高比模量、良好的抗疲劳损伤、力学性能的可设计性等优良性质,在飞机上的应用越来越广泛。但由于当前技术水平的限制和结构设计、工艺、维修、检查的需要,必须安排一定的设计分离面,随之出现的是复合材料与金属的混合连接结构。

单搭接接头是航空工业最常用的胶接接头之一,其应力分布均匀,缓解了应力集中,从而使结构具有优良的疲劳特性;另外,单搭接接头质量轻、成

本低、表面光滑,具有其他接头所没有的密封特点。但是,在复合材料与金属的单搭接中,由于载荷的偏心作用,在搭接处会有附加弯矩形成,使接头产生侧向位移(二次弯曲),即次弯曲效应^[1]。次弯曲效应会导致胶层内除了有平行于外力的剪切应力外,还有偏心弯矩引起的垂直于胶接面的正应力—剥离应力,从而大大降低接头强度,甚至导致接头失效。胶接的单搭接接头对剥离应力的承受能力很差,在进行单搭接时,应尽量减小次弯曲效应。因此,研究复合材料与金属单搭接的次弯曲效应十分重要。

目前,对胶接的次弯曲效应的研究比较少,主要集中在机械连接的次弯曲效应上。T. Ireman等^[2-3]研究复合材料—金属单钉单剪接头,发现层合板的几何尺寸影响次弯曲,且搭接板材料属性对

收稿日期:2012-01-13; 修回日期:2012-03-27

通信作者:李波,libo050009@163.com

次弯曲也有影响。T. Ireman 等^[2-4] 研究还发现侧向支撑对次弯曲有不利影响。Van der Linden H H^[5] 研究发现次弯曲量与轴向应变大小有关,轴向应变由外载荷决定。现有的文献对各种金属与复合材料单搭接接头研究表明,偏心载荷引起的次弯曲效应是导致接头失效的重要原因。

次弯曲量可以表示接头受附加弯矩的影响程度,附加弯矩=拉伸载荷×搭接板厚度,次弯曲量可由下式^[6]计算

$$SB = \frac{\epsilon_b - \epsilon_t}{\epsilon_b + \epsilon_t} \quad (1)$$

式中:SB(Second Bending)表示次弯曲量; ϵ_b 和 ϵ_t 分别表示复合材料层合板底部和上表面的应变。

本文通过 ABAQUS 有限元分析软件,对不同情况下的复合材料与金属的单搭接进行有限元分析,给出复合材料层合板中线的次弯曲量曲线图,经对比分析,寻找次弯曲量与胶层剥离应力、弯曲刚度以及板的变形之间的关系。

1 复合材料与金属胶接接头模型

对单搭接的次弯曲效应产生影响的主要因素有复合材料层合板的铺向角、铺层顺序以及斜削。本文对这三个因素进行分析,其中铺向角对次弯曲的影响选择工程中常用的 0° 、 $\pm 45^\circ$ 和 90° 三种角度来分析。

为了深入分析不同单搭接情况下的次弯曲,采用有限元方法对铝板与不同铺向角、铺层顺序以及具有斜削的单搭接接头进行仿真分析,利用 ABAQUS 有限元软件建模分析。假设胶层是致密的各向同性材料;胶黏剂与金属板、复合材料板之间紧密连接,不存在缺陷^[7];胶层的上下界面分别与黏物界面采用 Tie 约束绑定在一起。复合材料和金属单搭接胶接的尺寸如图 1 所示。

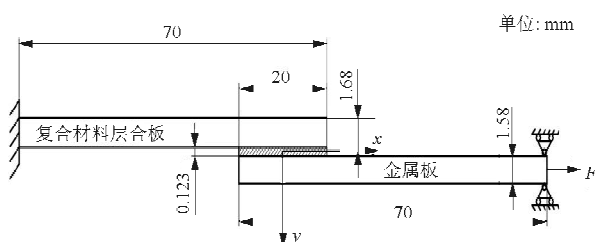


图 1 复合材料与金属胶接单搭接接头

Fig. 1 Composite-metal single lap adhesive bonded joints

图 1 中,上层为复合材料层合板,下层为金属板。建立的模型尺寸以文献^[8]中的金属和复合材料胶接试验件为参考,被粘板长为 70 mm,宽为 25 mm,搭接区长度为 20 mm;复合材料层合板厚度为 1.68 mm,金属板厚度为 1.58 mm;复合材料采用编号为 SK Chemical USN125 的碳纤维/环氧树脂,总共铺 16 层,每个铺层厚度为 0.105 mm;使用的胶黏剂为 FM73M,胶层厚度为 0.123 mm。边界条件采用一端固支,另一端铰支并限制除 x 轴方向以外的所有自由度。在金属板的端部沿 x 轴方向进行加载。接头的材料性能如表 1 所示。

表 1 各种材料属性及参数

Table 1 Properties and parameters of various materials

材料名称	E/GPa	G/GPa	μ
铝	73	26	0.33
	$E_{11}=162$	$G_{12}=6.1$	$\mu_{12}=0.298$
	$E_{22}=9.6$	$G_{13}=6.1$	$\mu_{13}=0.298$
HTA/6376	$E_{33}=9.6$	$G_{23}=3.5$	$\mu_{23}=0.470$
	2.8	0.842	0.38
胶层			

有限元网格划分为:复合材料板和金属板在厚度方向上划分四层网格,沿板宽方向的网格尺寸金属板为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,复合材料板为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。胶层厚度方向上划分一层网格,沿整个搭接区内的网格细分,网格尺寸为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 。金属板网格划分采用结构化网格(Structured),单元类型为 8 节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)。复合材料板网格划分采用扫略网格(Sweep),单元类型为 C3D8R。胶层网格划分采用 Sweep,单元类型为 8 节点六面体线性粘单元(COH3D8)。

为了验证模型的正确性和有效性,本文对文献^[8]中的加载实验进行模拟。FM73M 胶的拉伸破坏强度为 48.3 MPa,剪切破坏强度为 40.9 MPa,强度准则采用 ABAQUS 自带的二次名义应力准则和 B-K 准则,加载方式按照实验中的加载方式进行。数值模拟与实验载荷一位移曲线对比如图 2 所示。

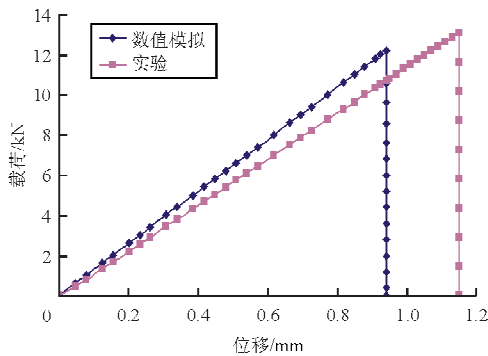


图2 数值模拟与实验载荷一位移曲线对比
Fig. 2 Contrast of numerical simulation and experiment's load-displacement curves

从图2可以看出,通过两种方法所得出的载荷一位移曲线基本吻合,可以证明此模型是正确有效的。

2 有限元计算结果及分析

读取复合材料层合板底部和上表面的应变值,并通过公式(1)计算出次弯曲量。不同铺向角和不同铺层顺序时搭接区域的次弯曲量曲线分别如图3和图4所示。

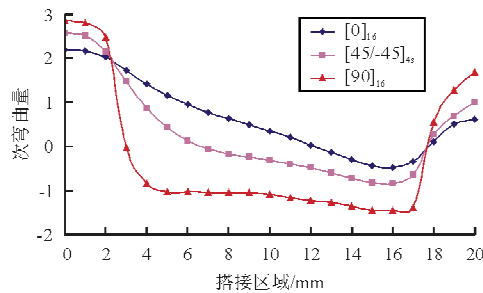


图3 不同铺向角下的次弯曲量曲线
Fig. 3 Secondary bending of composite laminates for different ply orientation angle

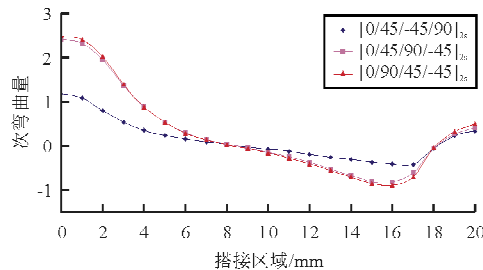


图4 不同铺层顺序下的次弯曲量曲线
Fig. 4 Secondary bending of composite laminates for different ply stacking sequence

从图3可以看出,对于不同铺向角的层合板,其次弯曲量曲线是不同的,甚至会有很大差别,但次弯曲量曲线的变化趋势基本一致;次弯曲量曲线基本上有两个峰值,分别在层合板搭接区域的两端达到最大值。

从图4可以看出,不同铺层顺序下的次弯曲量曲线相对于不同铺向角下的曲线,变化较规律,曲线之间的差别不大;除了具有不同铺向角的次弯曲量曲线所具有的规律外,不论铺层顺序如何变化,在距左端8 mm处和距右端2 mm处的次弯曲量都为0。

2.1 次弯曲与胶层剥离应力之间的关系

不同铺向角和不同铺层顺序下的剥离应力曲线图分别如图5、图6所示。

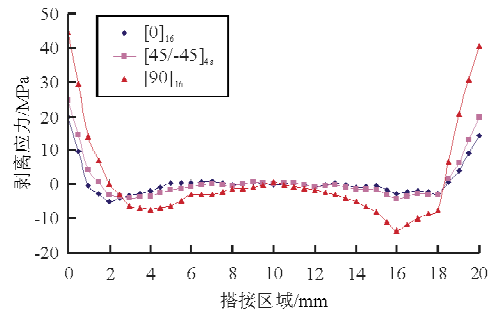


图5 不同铺向角下的剥离应力曲线
Fig. 5 Peel stress of composite laminates for different ply orientation angle

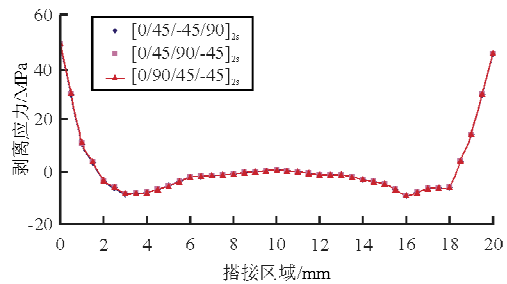


图6 不同铺层顺序下的剥离应力曲线
Fig. 6 Peel stress of composite laminates for different ply stacking sequence

将次弯曲曲线图和对应的剥离应力曲线图进行对比分析,可以发现,对于同一个层合板的次弯曲曲线和剥离应力曲线来说,两者有着一定的对应关系,即在搭接区域的次弯曲曲线的峰值处往往也对应着剥离应力的峰值。

对于不同层合板的次弯曲曲线和剥离应力曲线来说,两者也有着一定的对应关系。对于不同的层合板,不论是不同铺向角还是不同铺层顺序,次弯曲曲线越小,其对应的剥离应力曲线越小。因此,可以考虑通过减小次弯曲来减小单搭接接头的剥离应力。

2.2 次弯曲与弯曲刚度 D_{11} 之间的关系

弯曲刚度 D_{11} 的计算依据参考文献[9],由下式计算

$$D_{11} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{11})_k \left(h \bar{z}_k^2 + \frac{h^3}{12} \right) = h \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{11})_k \bar{z}_k^2 + \frac{h^3}{12} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{11})_k \quad (2)$$

式中: h 为第 k 层铺层的厚度; $\bar{z}_k = \frac{1}{2}(z_k + z_{k-1})$, 为第 k 层铺层中面的 z 坐标值。

将层合板的弯曲刚度 D_{11} 从大到小排列,如表 2 所示。

表 2 不同层合板的弯曲刚度 D_{11}
Table 2 Bending stiffness D_{11} of different laminates

铺层顺序	弯曲刚度 $D_{11}/(N \cdot mm^{-1})$
$[0]_{16}$	55 588.532
$[0/45/-45/90]_{2s}$	31 006.092
$[0/45/90/-45]_{2s}$	30 021.752
$[0/90/45/-45]_{2s}$	28 709.300
$[45/-45]_{4s}$	17 293.626
$[90]_{16}$	3 294.135

层合板的弯曲刚度影响着板的弯曲变形,一般来说,在受载相同的情况下,弯曲刚度越大,则板的弯曲变形会越小。表 2 中的六种层合板受载后的变形曲线如图 7~图 8 所示。

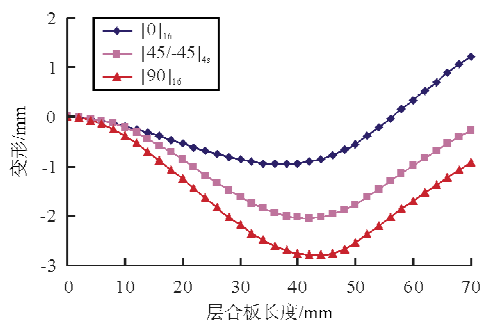


图 7 不同铺向角下的复合材料板变形曲线
Fig. 7 Deformation of composite laminates for different ply orientation angle

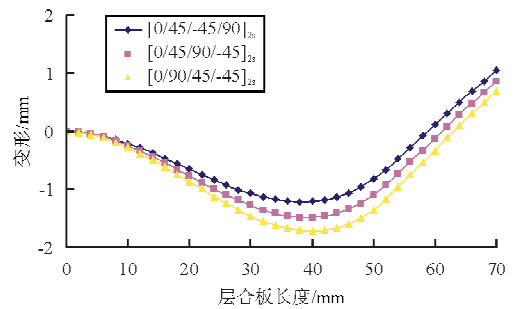


图 8 不同铺层顺序下的复合材料板变形曲线
Fig. 8 Deformation of composite laminates for different ply stacking sequence

从图 7 和图 8 可以看出,弯曲刚度的大小与层合板的变形(即层合板的最大位移)成正比。将层合板的变形曲线图和次弯曲曲线图进行对比分析,可以发现层合板的变形越小,对应的次弯曲越小,即层合板的刚度越大,其次弯曲越小。因此,在进行单搭接接头设计时,从减小次弯曲的角度考虑,可以通过调整铺向角和铺层顺序来增大层合板的刚度,以达到减小次弯曲的目的。

2.3 斜削对次弯曲的影响

在单搭接胶接接头中,为了降低接头处的应力集中,提高接头强度,通常会对接头端部进行斜削处理。本文也对搭接端部进行斜削处理,以研究斜削对次弯曲的影响。带有斜削的复合材料与金属单搭接接头的尺寸如图 9 所示。

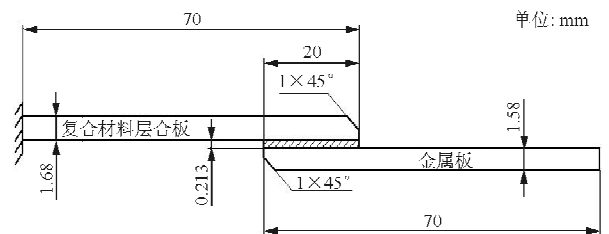


图 9 带有斜削的复合材料与金属单搭接接头
Fig. 9 Composite-metal single lap adhesive joints with chamfering

图 9 中,除了搭接端部带有斜削外,其他条件均与没有斜削时相同。将带有斜削的次弯曲曲线图和没有斜削时的进行对比分析,如图 10 所示。

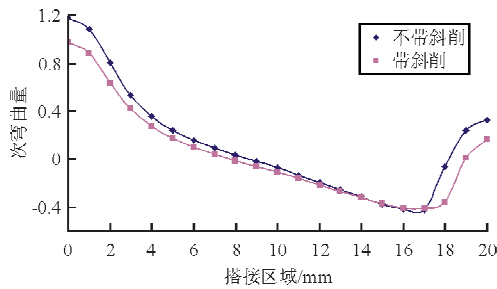


图10 $[0/45/-45/90]_{2s}$ 带斜削和不带斜削的次弯曲量曲线对比

Fig.10 Contrast between secondary bending of $[0/45/-45/90]_{2s}$ with chamfering and without chamfering

从图10可以看出,当对搭接端部进行斜削处理以后,搭接区域的次弯曲普遍降低,尤其是在搭接端部,次弯曲降低得十分明显,次弯曲降低,意味着剥离应力减小。因此,在进行单搭接接头设计时,可以考虑对端部进行斜削处理以降低次弯曲,进而减小剥离应力。

3 结论

(1) 对于不同的层合板,无论是不同铺向角还是不同铺层顺序,次弯曲曲线越小,其对应的剥离应力越小。因此,可以考虑通过减小次弯曲来减小单搭接接头的剥离应力。

(2) 层合板的刚度越大,其次弯曲就会越小。因此,在进行单搭接接头设计时,可以考虑通过调整铺向角和铺层顺序来增大层合板的刚度,以达到减小次弯曲的目的。

(3) 斜削可以降低次弯曲,因此,在进行单搭接接头设计时,可以考虑对端部进行斜削处理以降低次弯曲,进而减小剥离应力。

参考文献

- [1] 蔡天舒. 复合材料螺栓连接数值分析及次弯曲效应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学材料科学与工程学院, 2010.
Cai Tianshu. Analysis of composites bolted joints and study of secondary bending effect[D]. Wuhan: School of Materials

Science and Engineering, Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)

- [2] Ireman T, Ranvik T, Eriksson I. On damage development in mechanically fastened composite laminates[J]. Composite Structures, 2000, 49(2): 151-171.
- [3] Ireman T. Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints[J]. Composite Structures, 1998, 43(3): 195-216.
- [4] Van der Linden II II. Determination of secondary bending and load transfer[EB/OL]. National LambdaRail Memorandum SB-81-083U, 1981.
- [5] Van der Linden H H. Fatigue rated fastener systems-an AGARD coordinated testing programme[EB/OL]. Amsterdam: National Aerospace Laboratory, Technical Report AGARD No. 721, 1985.
- [6] Johan Ekh, Joakim Schon, L Gunnar Melin. Secondary bending in multi fastener, composite-to-aluminium single shear lap joints[J]. Composites Part B: Engineering, 2005, 36(3): 195-208.
- [7] 李刚, 林建平, 王立影, 等. 钢板与铝合金板胶接接头力学性能的有限元分析[J]. 计算机辅助工程, 2007, 16(3): 106-109.
Li Gang, Lin Jianping, Wang Liying, et al. Finite element analysis on mechanical behavior of adhesive joint of steel sheet and aluminium alloy sheet[J]. Computer Aided Engineering, 2007, 16(3): 106-109. (in Chinese)
- [8] Myeong-Su Seong, Tae-Hwan Kim, Khanh-Hung Nguyen, et al. A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum[J]. Composite Structures, 2008, 86(1-3): 135-145.
- [9] 郑锡涛. 复合材料力学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2009.
Zheng Xitao. Mechanical basis of the composite[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:

李波(1985-),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构分析与设计。

赵美英(1962-),女,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构设计、复合材料结构分析与设计、智能材料结构设计等。

万小鹏(1962-),男,教授,博导。主要研究方向:飞行器总体设计、飞行器结构设计。

(编辑:马文静)