

文章编号: 1000-8055(2008)02-0286-07

复合材料单钉接头损伤失效试验

王丹勇¹, 温卫东²

(1. 中国兵器工业集团 第五三研究所, 济南 250031;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 对 104 件层合板接头静载力学性能及疲劳特性进行了试验研究, 其中考虑了三种不同铺层、九种不同几何尺寸及两种拧紧力矩工况对其力学性能的影响。使用渗透剂增强的 X 射线图象技术对静载荷分级加载和疲劳载荷分时加载下试样损伤扩展及累积过程进行了无损检测, 探讨了复合材料层合板接头实际损伤失效形式及破坏规律。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 复合材料; 接头; 试验; 失效

中图分类号: TB323

文献标识码: A

Experiments on damage failure test of single bolted joints in composite laminates

WANG Dan-yong¹, WEN Wei-dong²

(1. China North Industries Group Corporation Institute 53, Jinan 250031, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The static-load mechanical properties and fatigue characteristics of 104 specimens were tested on single bolted joints in composite laminates, of which including nine sizes, three types of lay orientations and two types of torques. Dye-Enhanced X-Radiography technique was used to conduct nondestructive test of the progressive damage process of specimens during static and fatigue loadings. The real damage types and failure rules of single bolted joints in composite laminates were also discussed.

Key words: aerospace propulsion system; composites; joint; experiment; failure

复合材料机械连接接头是连接结构件的关键部位。我国目前某发动机复合材料机匣采用上下剖分结构, 并通过机械连接剖分结构及机匣前后安装边, 每件机匣使用紧固件达近百个。由于机匣受有轴向力、气体内压力、扭矩以及弯矩等, 受力复杂。这使得其连接部位孔边的应力分布复杂, 导致连接部位失效模式呈多样性和复杂性。因此, 如何准确地预测连接部位的强度、疲劳寿命以及失效模式与失效规律, 对于机匣结构的设计是极为重要的。

目前, 累积损伤分析方法已应用于复合材料层

合板接头静强度^[1-4]、疲劳寿命预测及损伤失效分析中^[5-7], 为接头结构合理设计提供了重要依据。试验研究是检验理论分析正确与否的关键环节, 为理论研究方法投入工程实际应用提供有力保障。

为探讨复合材料层合板接头实际损伤失效形式及破坏规律, 同时验证文献[5]发展的接头静载及疲劳加载累积损伤方法的准确性, 本文对 104 件层合板接头试样静载力学性能及疲劳特性进行损伤失效试验研究, 其中主要考虑三种不同铺层、九种不同尺寸及两种拧紧力矩工况对其力学性能

收稿日期: 2007-01-09; 修订日期: 2007-04-02

作者简介: 王丹勇(1973-), 男, 吉林通化人, 博士, 研究方向为复合材料结构强度与寿命。

的影响。

1 试验方法

本文研究的复合材料螺栓机械连接接头尺寸简图如图 1 所示,其中: W 为层合板宽度; D 为螺栓孔孔径; d 为螺栓外径; E 为端距; h 为厚度; λ 为间隙; P 为加载力。螺栓孔的中心位于层合板对称线上。

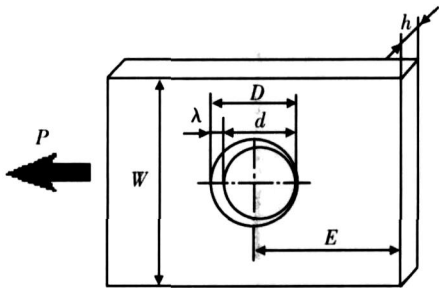


图 1 接头尺寸简图
Fig.1 Geometry of the joint

试验使用的复合材料单向层合板材料牌号为: T300/ BMP-316 聚酰亚胺树脂基复合材料。对于层合板接头试验试样,依据三种最基本接头破坏模式: 剪切破坏、拉伸破坏及挤压破坏,合理地进行了尺寸选取。铺层方式则选取含辅助铺层(即为了传递较大载荷,在连接区采取局部加强设计)及两种不含辅助铺层的三种不同铺层层合板接头进行试验研究,表 1 及表 2 列出了各层合板接头铺层情况。本文将表 1 中铺层方式的层合板接头统称为含辅助铺层层合板接头,将表 2 中接头类型 1 称为主铺层层合板接头。螺栓连接孔直径为 6.3 mm。

表 1 含辅助铺层层合板接头铺层情况

Table 1 Ply orientations of joints with auxiliary plies		
铺层方式	铺层顺序	层数
主铺层	[45/- 45/90/0/- 45/0/45/0/90/0] _s	20
辅助铺层	[0 ₂ /0 ₂ /90 ₂ /90 ₂ / - 45 ₂ /45 ₂]	12

表 2 无辅助铺层的层合板接头铺层情况

Table 2 Ply orientations of joints without auxiliary plies		
接头类型	铺层顺序	层数
1	[45/- 45/90/0/- 45/0/45/0/90/0] _s	20
2	[(0/ ±45/90) ₃] _s	24

由于篇幅有限,含辅助铺层层合板接头和无辅助铺层的层合板接头几何尺寸、静载破坏强度及疲劳寿命具体试验数据,本文不予列出,详见文献[5]。

对于层合板接头,除了经受振动、噪声等高频载荷的少部分构件外,承受机动和突风载荷谱的机体主承力结构,经常使用 $10^4 \sim 10^6$ 次循环范围内的 S-N 曲线,而 10^7 次循环疲劳极限的工程应用并不多,因此常用 10^6 次循环不发生破坏为其条件疲劳极限^[8]。由此,本文使用 10^6 次循环不发生破坏为层合板接头条件疲劳极限寿命。

在研究层合板接头静载及疲劳载荷作用下各力学性能特性时,需要采用相关夹具及盖板装置。本次试验采用崔海涛^[9]所用层合板接头夹具及盖板进行试验研究。复合材料双盖板接头试验模型如图 2 所示。

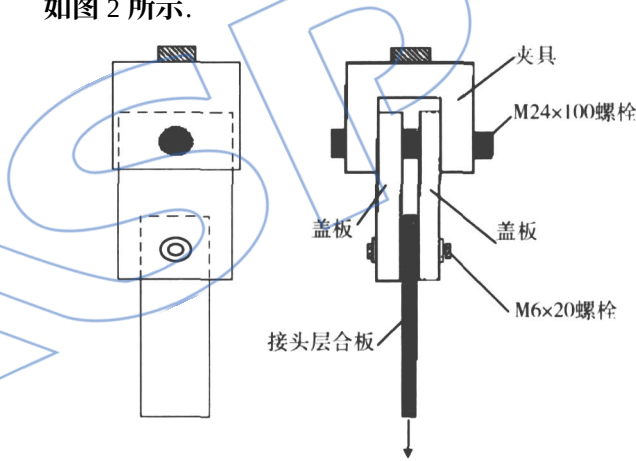


图 2 双盖板接头试验模型
Fig.2 A schematic of the double lap bolted joint test fixture

2 层合板接头准静态拉伸试验

本节对层合板接头准静态拉伸力学性能进行了试验研究,同时为其拉-拉疲劳试验各级应力水平的选取提供依据。本文复合材料层合板接头静强度统一取 $\sigma = P / (W \times \text{安装孔处厚度})$ 。在层合板接头静拉伸试验中,考虑了九种几何尺寸因素、三种铺层顺序及两种拧紧力矩工况即不施加拧紧力矩(手动拧紧)及施加拧紧力矩 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 对其力学性能的影响,共 49 个试验件。

层合板接头在准静态拉伸试验中,每件试样都以 1 mm/min 的加载速率加载,直到其最终失去承载能力。本次层合板接头静载及疲劳加载试验研究,以层合板接头不能继续承载为其最终破坏标准,因此试验研究中并不考虑纯挤压破坏模

式.

2.1 有辅助铺层层合板接头准静态拉伸试验

图 3 及图 4 分别描述了宽径比 W/D 或端径比 E/D 不变时,无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头静强度随端径比或宽径比变化情况.从中可以看出:当层合板接头板宽不变时,随着层合板端径比 E/D 从 2.0 增加到 3.0,其强度逐渐增大;当层合板接头端距不变时,随着层合板宽径比 W/D 从 3 增加到 5,其强度逐渐减小.

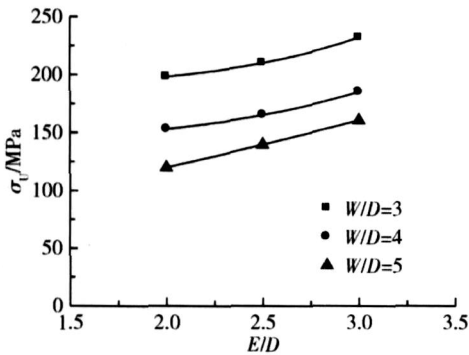


图 3 宽径比一定,端径比对静强度影响

Fig. 3 Strength at various E/D ratios under constant W/D

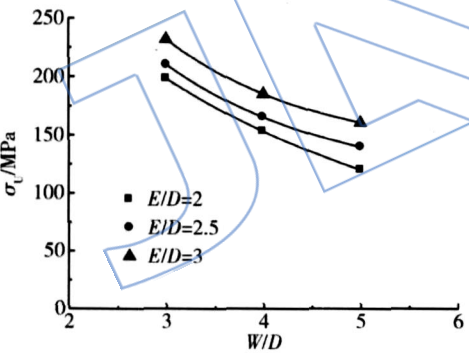


图 4 端径比一定,宽径比对静强度影响

Fig. 4 Strength at various W/D ratios under constant E/D

九种不同尺寸无拧紧力矩层合板接头静拉伸试样破坏 X 光照片如图 5,从中可以清晰看到不同尺寸层合板接头静拉伸破坏损伤程度、损伤范围及破坏模式.层合板接头几何参数的不同,其破坏模式也各不相同.当层合板接头板宽与孔径之比 W/D 为 5 时,随着端距与孔径之比 E/D 值从 2 增加到 3 时,层合板接头破坏模式由以剪切破坏为主过渡到以挤压破坏为主.当端距与孔径之比 E/D 为 2 时,随着板宽与孔径之比 W/D 值从 3 增加到 5,层合板接头破坏模式从以拉伸破坏为主过渡到以剪切破坏为主.由此可以看出,层合板

接头的破坏模式与其几何参数密切相关.

有无拧紧力矩层合板接头承载能力对比如图 6 所示.图中可以清楚看出:有一定拧紧力矩的层合板接头明显比无拧紧力矩层合板接头承载能力高.

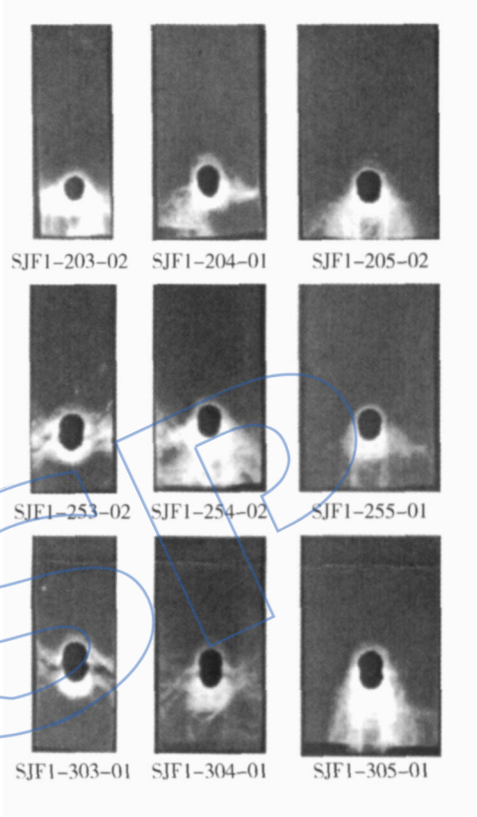


图 5 无拧紧力矩含辅助铺层接头静拉伸破坏 X 光照片

Fig. 5 X-radiographs of joint specimens with auxiliary plies without clamping torque after final collapse

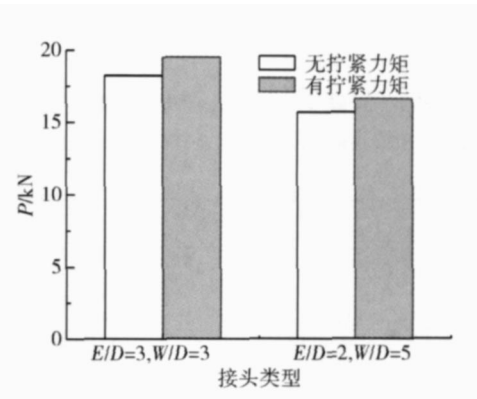


图 6 有无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头承载能力对比

Fig. 6 Comparisons of loading capability for joint specimens containing auxiliary plies with or without clamping torque

有无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头静拉伸

破坏试样 X 光照片如图 7 所示. 从中可以看出, 与无拧紧力矩层合板接头静拉伸破坏试样相比, 有拧紧力矩层合板接头在螺栓安装孔挤压方向损伤明显比无拧紧力矩层合板接头少, 说明对层合板接头施加一定侧向约束, 可以减缓损伤扩展.

为了解无拧紧力矩层合板接头静拉伸逐渐损伤扩展过程, 针对 $E/D=2, W/D=5$ 及 $E/D=3, W/D=3$ 两种类型层合板接头进行逐渐损伤扩展过程分析. 试验选择四级加载, 并用 X 光检测损伤, 最终获取静拉伸过程中各级载荷下试样损伤扩展情况, 其静拉伸分级加载试验的损伤扩展 X 光照片见图 8 及图 9.

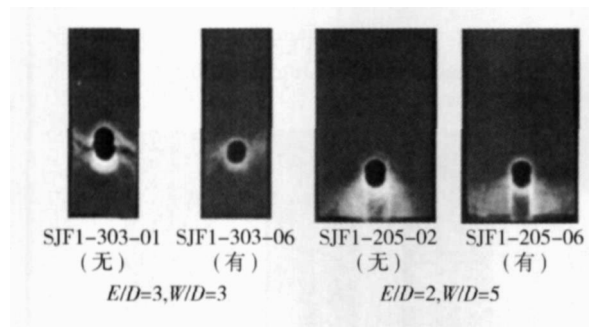


图 7 有无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头静拉伸破坏 X 光照片

Fig. 7 X-radiographs of joint specimens containing auxiliary plies with or without clamping torque after final collapse

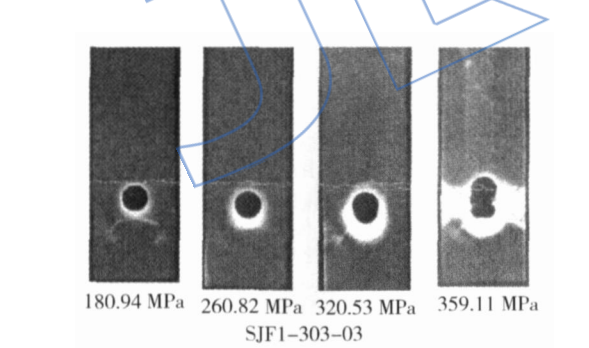


图 8 $E/D=3, W/D=3$ 无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头静拉伸逐渐损伤扩展试样 X 光照片

Fig. 8 X-radiographs of $E/D=3$ and $W/D=3$ specimens with auxiliary plies without clamping torque under static tension multistep loading

从图中可以清楚看出: 静载作用下层合板接头损伤是逐渐累积的过程, 各试样损伤都是从螺栓安装孔受挤压区域累积并扩展. 层合板接头静拉伸逐渐损伤扩展试验中, 由于每级加载后都要进行 X 光拍摄, 导致试样重新加载前, 内部就已经存在损伤, 初始损伤的存在改变了起始加载过

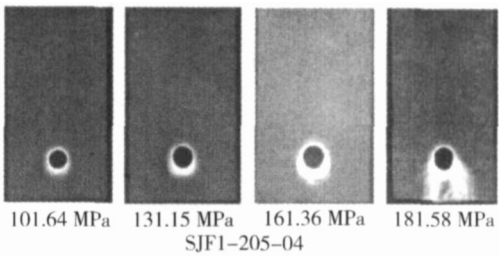


图 9 $E/D=2, W/D=5$ 无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头静拉伸逐渐损伤扩展试样 X 光照片

Fig. 9 X-radiographs of $E/D=2$ and $W/D=5$ specimens with auxiliary plies without clamping torque under static tension multistep loading

程中应力分布, 最终导致多级加载下层合板接头破坏强度结果比仅单级加载试验破坏强度结果偏低.

2.2 无辅助铺层层合板接头准静态拉伸试验

主铺层层合板接头静拉伸加载过程试验现象与含辅助铺层相应类型层合板接头静拉伸试验现象相同. 相同特征尺寸 E/D 及 W/D 无拧紧力矩主铺层层合板接头与含辅助铺层层合板接头承载能力对比如图 10 所示. 从图中可以看出: 含辅助铺层层合板接头承载能力明显比主铺层层合板接头承载能力高, 对层合板接头局部受载区增加辅助铺层起到显著增强作用.

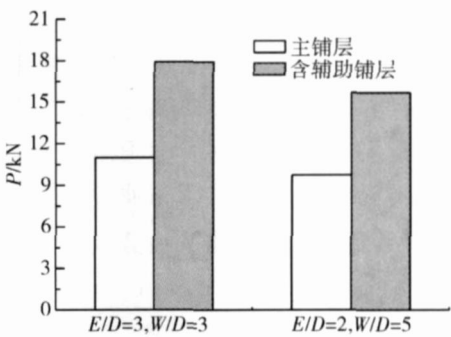


图 10 无拧紧力矩主铺层与含辅助铺层层合板接头承载能力对比

Fig. 10 Comparisons of loading capability for joint specimens with or without auxiliary plies without clamping torque

无拧紧力矩 $[(0/\pm 45/90)_3]_s$ 铺层层合板接头静拉伸破坏试验现象, 与含辅助铺层及主铺层相应类型层合板接头相似, 其静拉伸试样破坏 X 光照片见图 11. 由图可见, $E/D=3, W/D=3$ 类型层合板接头破坏模式为挤压 - 拉伸组合破坏, 并以拉伸破坏为主; 而 $E/D=2, W/D=5$ 类型层

合板接头破坏模式为挤压 - 剪切组合破坏,与含辅助铺层及主铺层相同特征尺寸层合板接头相比,由于铺层顺序的不同,其挤压破坏形式为主更加明显.

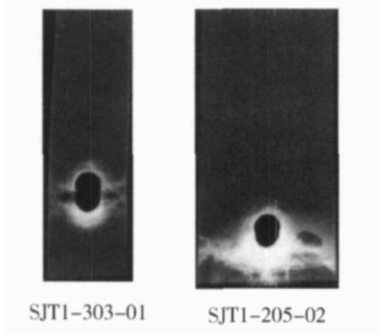


图 11 $[(0/\pm 45/90)_3]_s$ 铺层层合板接头静拉伸破坏 X 光照片

Fig. 11 X-radiographs of the $[(0/\pm 45/90)_3]_s$ specimens under static tension loading after final collapse

3 层合板接头拉-拉疲劳性能试验

对 55 件层合板接头试样疲劳性能进行了试验研究,层合板接头疲劳试验试样的夹紧压力为 12 MPa,应力比 $R=0.1$,施加载荷波形采用正弦波.

在单级常幅拉-拉疲劳试验中,分别对三种不同铺层层合板接头疲劳性能进行了试验研究,由于试验件有限,主要针对 $E/D=3, W/D=3$ 类型层合板接头,考虑了两种拧紧力矩工况(施加拧紧力矩及不施加拧紧力矩)对其疲劳性能的影响.

3.1 有辅助铺层层合板接头疲劳试验

对含辅助铺层层合板接头连接螺栓仅手动拧紧即 $T\approx 0$,图 12 为 $E/D=3, W/D=3$ 类型层合板接头拉-拉疲劳 S-N 曲线.从中可以看出,其曲线接近一条斜直线.

层合板接头相应拉-拉疲劳破坏试样 X 光照片如图 13 所示,其疲劳破坏模式为挤压-拉伸组合破坏,并以拉伸破坏为主,在疲劳载荷作用下,螺栓安装孔处损伤逐渐累积产生的宏观永久伸长变形要比静载时永久伸长变形明显.

为了解疲劳加载逐渐损伤扩展过程,对该类型层合板接头分时加载,选取两个试样进行 75 % σ_c 应力水平下疲劳试验,并用 X 光检测损伤状态.层合板接头疲劳试验初始加载时,由于试验机在 100 次循环左右施加力的响应才完全达到给定

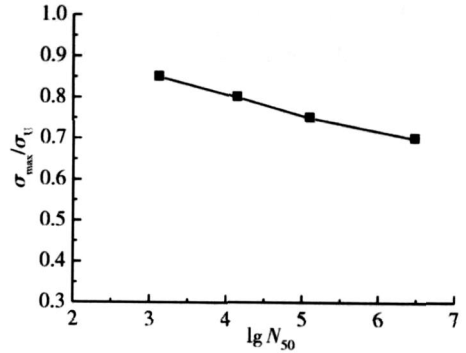


图 12 无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头拉-拉疲劳 S-N 曲线

Fig. 12 Experimental S-N curves of joint specimens with auxiliary plies without clamping torque under tension-tension fatigue loading

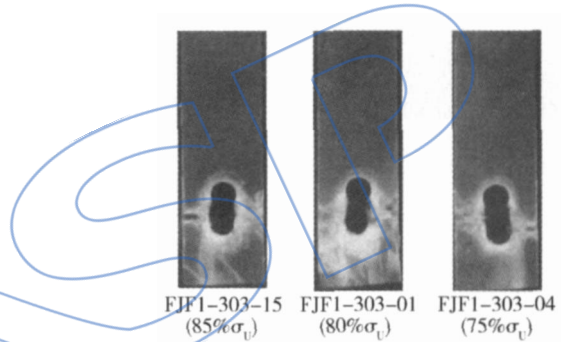


图 13 无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头拉-拉疲劳破坏试样 X 光照片

Fig. 13 X-radiographs of joint specimens with auxiliary plies without clamping torque under tension-tension fatigue loading after final collapse

疲劳最大载荷,因此,选取 100 次循环为其第一级分时点.层合板接头疲劳逐渐损伤扩展分时加载情况的 X 光照片如图 14 所示.从中可以看到,层合板接头经疲劳加载,损伤是逐渐累积的过程.由

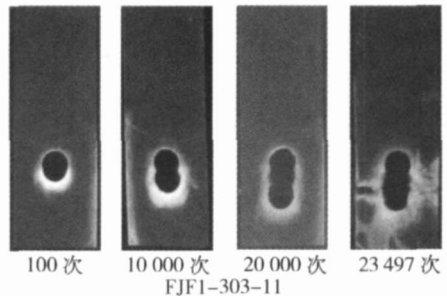


图 14 无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头拉-拉疲劳试样逐渐损伤扩展 X 光照片

Fig. 14 X-radiographs of specimens with auxiliary plies without clamping torque for progressive damage under tension-tension fatigue loading

于层合板接头试样在疲劳试验过程中多次装卸,每次装卸都会加重层合板接头受挤压区损伤范围,并且每次加载后,层合板接头由于内部损伤的加重,导致其静强度有所下降,这都大大降低了层合板接头疲劳寿命。

为分析有无拧紧力矩对含辅助铺层层合板接头疲劳性能的影响,针对 $E/D=3, W/D=3$ 类型层合板接头,对其施加的拧紧力矩为 $8\text{ N}\cdot\text{m}$,有无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头疲劳寿命曲线如图 15 所示。由图可见,同样疲劳破坏寿命下,施加一定拧紧力矩使其疲劳强度明显增加;在相同的疲劳载荷下,施加一定拧紧力矩使其寿命显著增加,这是因为层合板接头连接孔附近侧向约束阻止并延缓了局部开裂。

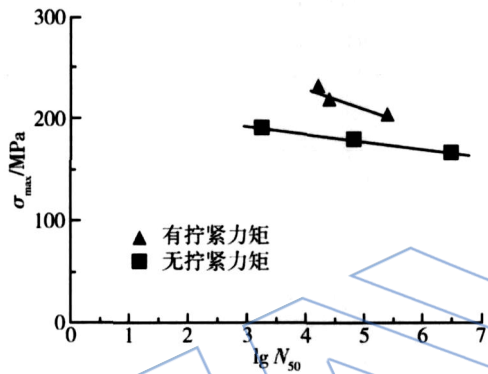


图 15 有无拧紧力矩含辅助铺层层合板接头疲劳寿命曲线
Fig. 15 Experimental S-N curves of joint specimens containing auxiliary plies with or without clamping torque under tension-tension fatigue loading

上述相应的 X 光照片如图 16 所示。试验过程观察,与无拧紧力矩时相比,施加拧紧力矩时不同之处在于:在疲劳加载循环起始阶段,螺栓连接孔的伸长变形增长就相当缓慢,直至接近疲劳寿命时,连接孔伸长变形突然快速增长;在试验过程中,螺栓挤压区域只有少量材料碎末发生;疲劳破坏模式同样为挤压 - 拉伸组合破坏,并以拉伸破坏为主。但是,在辅助铺层与主铺层相接处,明显发生辅助铺层与主铺层发生脱离即分层,而无拧紧力矩时并没有发生这种损伤形式;其永久伸长变形与无拧紧力矩时相比,加拧紧力矩时的永久伸长变形明显要小。

3.2 无辅助铺层层合板接头疲劳试验

对主铺层 $[45/-45/90/0/-45/0/45/0/90/0]_s$ 层合板接头,连接螺栓仅手动拧紧即 $T \approx 0$,其不同应力水平下拉-拉疲劳 S-N 曲线如图 17 所示。

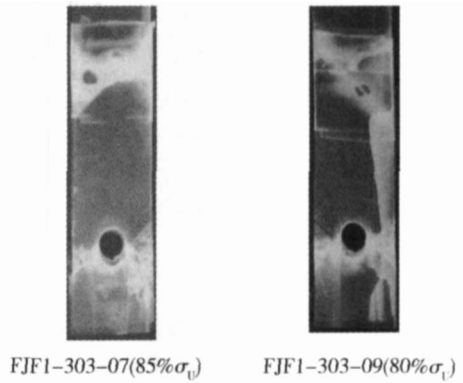


图 16 有拧紧力矩含辅助铺层层合板接头拉-拉疲劳试样 X 光照片
Fig. 16 X-radiographs of joint specimens containing auxiliary plies with clamping torque under tension-tension fatigue loading after final collapse

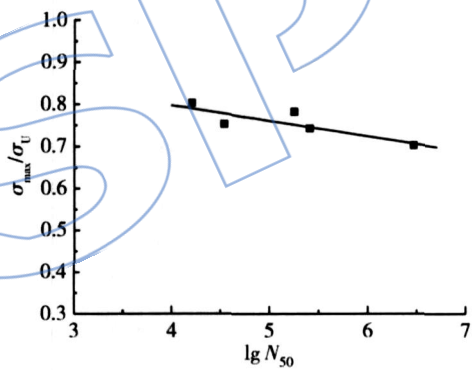


图 17 无拧紧力矩主铺层层合板接头拉-拉疲劳 S-N 曲线
Fig. 17 Experimental S-N curves of joint specimens without auxiliary plies and clamping torque under tension-tension fatigue loading

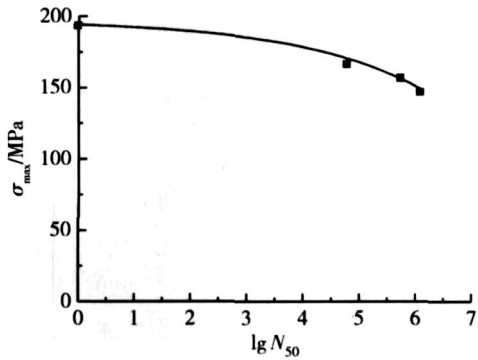


图 18 $[(0/\pm45/90)_3]_s$ 铺层层合板接头拉-拉疲劳 S-N 曲线
Fig. 18 Experimental S-N curves of $[(0/\pm45/90)_3]_s$ specimens under tension-tension fatigue loading

对 $[(0/\pm 45/90)_3]_s$ 铺层层合板接头连接螺栓仅手动拧紧即 $T \approx 0$,对于 $E/D=3$ 、 $W/D=3$ 类型层合板接头拉-拉疲劳 $S-N$ 曲线如图18所示.由图可见,其 $S-N$ 曲线较为平坦,该层合板接头表现出较好的抗疲劳性能.

4 结 论

本文对层合板接头静载力学性能及疲劳特性进行了试验研究,结论如下:

(1) 对49件不同类型层合板接头进行了静态拉伸试验研究,考虑了九种几何尺寸因素、三种铺层顺序及两种拧紧力矩工况即不施加拧紧力矩(手动拧紧)及施加拧紧力矩 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 对其力学性能的影响.静载试验结果表明:

(a) 含辅助铺层层合板接头承载能力明显比主铺层层合板接头承载能力高,对层合板接头局部受载区增加辅助铺层起到显著增强作用.

(b) 对层合板接头施加一定拧紧力矩,可增加其承载能力,提高其静强度水平.

(c) 层合板接头几何尺寸的大小直接影响到其静强度结果,当层合板接头宽径比不变时,随着层合板端径比在一定范围内的增加,其破坏强度逐渐变大;当层合板接头端径比不变时,随着层合板宽径比在一定范围内的增加,其破坏强度逐渐变小.

(d) 层合板接头板宽与孔径之比 W/D 及端距与孔径之比 E/D 大小直接影响到其破坏模式.当层合板接头 W/D 一定时,随着 E/D 值逐渐增大,破坏模式由以剪切破坏为主过渡到以挤压破坏为主;当 E/D 一定时,随着 W/D 值逐渐增大,破坏模式从以拉伸破坏为主过渡到以剪切破坏为主.

(2) 对55件层合板接头进行了拉-拉疲劳试验研究,考虑了三种铺层顺序、两种拧紧力矩工况即不施加拧紧力矩及施加拧紧力矩 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 和单级等幅加载对其疲劳性能的影响.试验结果表明:

(a) 层合板接头疲劳损伤机理与静载作用时损伤机理有一定区别,疲劳试验过程中,在螺栓孔挤压区基体挤压损伤及分层损伤更为显著,疲劳加载螺栓安装孔处损伤逐渐累积产生的宏观永久伸长变形明显要比静载作用时大.

(b) 施加一定拧紧力矩可以显著提高疲劳强度和疲劳寿命;层合板接头损伤程度与施加疲劳

最大应力水平相关,施加疲劳最大应力水平越低,其疲劳损伤越严重.

(c) 层合板接头在疲劳加载过程中,随着加载循环数的增加,螺栓连接孔伸长变形往往经历由快到慢,再由慢到快逐渐增加过程,在临层合板接头疲劳破坏之前,连接孔伸长变形急剧增加,导致层合板接头快速失去承载能力.

(d) 层合板接头静载及疲劳载荷作用下破坏形式基本类似,疲劳破坏在螺栓挤压区损伤要比静载作用时严重.

参考文献:

- [1] 王丹勇,温卫东,崔海涛. 复合材料单钉接头三维逐渐损伤破坏分析[J]. 复合材料学报, 2005, 22(3): 168-174.
WANG Danyong, WEN Weidong, CUI Haitao. Three-dimensional progressive damage analysis of single fastener joints in composite laminates[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2005, 22(3): 168-174.
- [2] 王丹勇,温卫东,崔海涛. 含材料非线性的复合材料单钉接头累积损伤分析[J]. 固体力学学报, 2006, 27(2): 186-190.
WANG Danyong, WEN Weidong, CUI Haitao. Progressive damage analysis considering the material nonlinearity of composite laminates containing a hole[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006, 27(2): 186-190.
- [3] Tserpes K I, Labeas G, Papanikos P, et al. Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates[J]. Composites: Part B, 2002, 33: 521-529.
- [4] Camanho P P, Matthews F L. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1999, 23: 2248-2249.
- [5] 王丹勇. 层合板接头损伤失效与疲劳寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006. 06.
- [6] Shokrich M M, Lessard L B. Progressive fatigue damage modeling of composite materials, Part I: modeling[J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34: 1056-1080.
- [7] Shokrich M M, Lessard L B. Progressive fatigue damage modeling of composite materials, Part II: material characterization and model verification[J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34: 1081-1116.
- [8] 中国航空研究院. 复合材料连接手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1994: 140-141.
- [9] 崔海涛,温卫东. CFRP双剪单钉连接接头强度分析[J]. 宇航材料工艺, 2004, 4: 44-47.
CUI Haitao, WEN Weidong. Strength analysis of single-bolted double-lapped joints in CFRP[J]. Aerospace Materials and Technology, 2004, 4: 44-47.