

螺栓连接和铆接对复合材料结构拉伸失效行为的影响研究

鲁珉希¹, 曹增强^{1,2}, 闫璐¹, 闫涵¹, 霍鲁斌¹

(1.西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072; 2.陕西大工旭航电磁科技有限公司, 陕西 西安 710100)

摘 要:螺栓连接在航空复合材料连接结构中应用广泛,但存在接头质量大、成本高、安装效率低的缺点。而铆接工艺简单、成本低,但铆接过程容易造成复合材料损伤。为实现结构减重,在复合材料结构中探索“以铆代螺”的可行性具有重要工程意义。通过准静态拉伸试验对比了纯铆接、垫圈铆接及螺栓连接接头的力学性能及损伤失效形式。基于等代设计原则研究使用铆接工艺代替螺栓连接后的接头强度,进而探究“以铆代螺”可行性。结果表明:准静态拉伸剪切载荷下,垫圈铆接接头承受的峰值载荷高于螺栓连接,单位质量承载能力与螺栓接头持平,但单位质量吸收能量远高于螺栓接头。从单位质量承载能力和能量吸收能力来讲,“以铆代螺”具有一定的可行性。

关 键 词:复合材料;铆接;垫圈铆接;螺栓连接;剪切强度;失效机制

中图分类号:V261.2⁺9

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2025)04-0694-08

碳纤维增强复合材料(CFRP)因具有高比强度、高比刚度、耐疲劳、耐腐蚀等特点^[1-2],被广泛应用于航空航天制造领域^[3-4]。复合材料虽便于整体化设计,但不可避免地存在结构连接。在航空航天领域,复合材料的主要连接方式有螺接、铆接与胶接^[5-6]。其中,胶接具有连接质量轻、成本低、结构完整性高等优势^[7],但剥离强度低,有机胶黏剂受温度影响大、抗冲击性能差^[8]。螺栓连接具有高承载力、高强度、可拆卸等优点^[9-10],目前大范围应用于复合材料连接工艺,但存在成本高、质量大的问题^[11]。铆接在飞机装配中应用广泛,具有强度高、工艺简单、成本低等优势^[12],但在复合材料铆接工艺中复材板易出现损伤,从而导致接头强度下降,出现工艺性能不达标等问题^[13]。因此,优化复合材料铆接工艺,减少复合材料铆接损伤,实现“以铆代螺”,对复合材料机械连接接头减重及降低成本有重要的工程实际意义。

目前,研究人员已对金属材料“以铆代螺”进行

了研究,于海平等^[13]对比了双层铝合金结构中大直径铝合金铆接接头和钢制螺栓接头的力学性能,发现铆接接头可承受的最大剪切载荷和拉脱载荷均高于钢制螺栓;陈乾^[14]提出在中、重型载货车车架结构中用等直径($\Phi 6$ mm)钢铆钉和等载荷($2 \times \Phi 5$ mm)钢铆钉替代 M6 螺栓结构的方案,其中 $2 \times \Phi 5$ mm 铆接结构相比螺接结构,抗剪切性能提高,且疲劳寿命高于螺接。上述研究提供了金属搭接板的“以铆代螺”方案,但在复合材料中“以铆代螺”的可行性研究仍处于欠缺状态。研究复合材料“以铆代螺”的关键为优化铆接工艺减小铆接损伤,提升接头强度,从而满足等代设计原则。

研究人员对优化复合材料铆接工艺以降低接头损伤进行了研究。曹增强等^[11]提出采用电磁铆接工艺加限制垫圈的方式来减少铆接损伤;赵乐天等^[15]探讨了使用垫圈和沉头衬套铆接工艺后接头的拉伸剪切及拉脱性能,发现垫圈/衬套铆接可以抑制钉杆膨胀,降低铆接损伤;符平坡等^[16]提出改进自冲铆接工艺以减小复合材料铆接损伤。现有研究已证实利用垫圈可以有效减低铆接损伤,提升接头强度。Yang 等^[17]在 $\Phi 4$ mm 钛合金铆钉压铆过程中使用平头垫圈优化铆接工艺,发现铆接过程中复

收稿日期:2024-09-14

基金项目:中央高校基本科研业务费(D5000240092)资助

作者简介:鲁珉希(2000—),硕士研究生

通信作者:霍鲁斌(1991—),副教授 e-mail:l.huo@nwpu.edu.cn

合材料结构的安装损伤大幅度减小。

综上所述,螺栓质量过大、价格昂贵,铆接经济性好,但容易产生损伤,现已证实在铆接过程中使用垫圈可以较好地解决损伤问题,但缺乏其对连接强度的影响研究。因此,本文采用加垫铆接工艺研究复合材料“以铆代螺”可行性。

1 试验方案设计

为研究复合材料连接“以铆代螺”的可行性,本文设计铆钉纯铆接、加垫铆接及高锁螺栓连接 3 种连接工艺,通过准静态拉伸试验比较 3 种铆接工艺复合材料的接头强度。螺栓和铆钉的直径均为 5 mm。

1.1 试验材料及设备

本试验中,选用 Lisi Aerospace 公司生产的抗拉脱型高锁螺栓,型号为 HI-LITE™ HST12-6,材质为钛合金,螺栓直径 5 mm,螺母为带固定拧紧力矩螺母,固定拧紧力矩为 5 N·m。本试验选用钛合金(Ti45Nb)平头铆钉,钉杆直径 5 mm。为保证外伸量一致,纯铆接铆钉钉杆长 $L=9$ mm,加垫铆接铆钉钉杆长 $L=10$ mm。垫圈材质为钛合金(TC4),外径 $D_1=10$ mm,内径 $D_2=5$ mm,与铆钉间隙配合。相较于常规尺寸,该特制垫圈外径更大、内径更小,可以在铆接时约束铆钉,减少钉杆膨胀。铆钉、垫圈及高锁螺栓选取参数如图 1 所示。

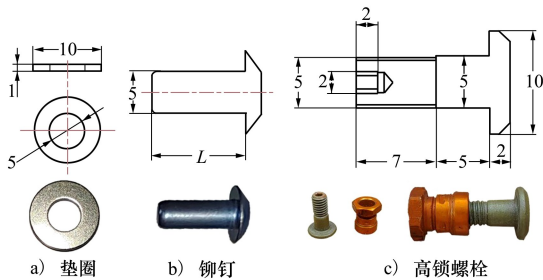


图 1 垫圈、铆钉和高锁螺栓尺寸(单位 mm)

试验所用的层合板为碳纤维增强树脂基复合材料,预浸料牌号为 T700/7901,层压板铺层序列为 [45/0/-45/90/-45/0/45/0/-45/90/-45/0/45], 单层厚度为 0.15 mm,共铺设 13 层,层压板总厚度为 2 mm。试验件为单搭接接头,每块试验件由 2 块层合板搭接构成,单块层合板长为 100 mm,宽为 30 mm,2 块层合板重叠部分尺寸为 30 mm×30 mm,

两端粘贴复合材料垫板。搭接板的孔边距和端距均为 15 mm,铆接试件孔径 5 mm,高锁螺栓连接试件孔径 5 mm。

1.2 试验件制备

使用如图 2a) 所示的 TOX 气动压铆机制备铆接试验件,制备纯铆接试验件时在复合材料板孔内放入铆钉并实施准静态压铆铆接;制备加垫铆接试验件时先将铆钉放入孔内,在墩头处放入垫圈并实施准静态压铆铆接,铆接方法如图 2b) 所示。2 种铆接单搭接试验件的尺寸和实物图如图 3 所示。



图 2 铆接设备和 2 种铆接方法示意图

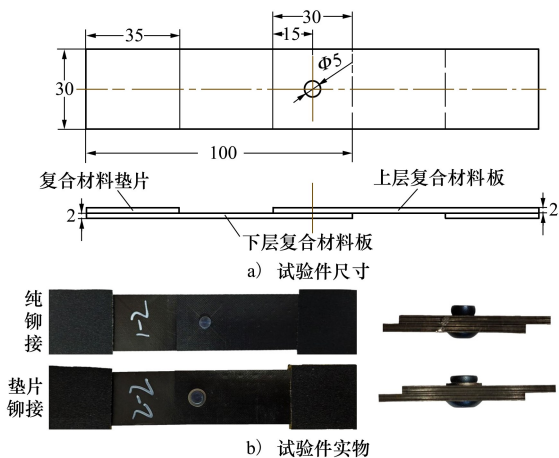


图 3 2 种铆接单搭接件的尺寸图和实物图(单位 mm)

安装高锁螺栓时,将螺杆放入孔洞,另一端配合螺母,拧紧螺母至其在凹槽部位断裂,螺杆直径 5 mm,搭接板与高锁螺栓为间隙配合。高锁螺栓连接单搭接复合材料试验件尺寸及实物如图 4 所示。

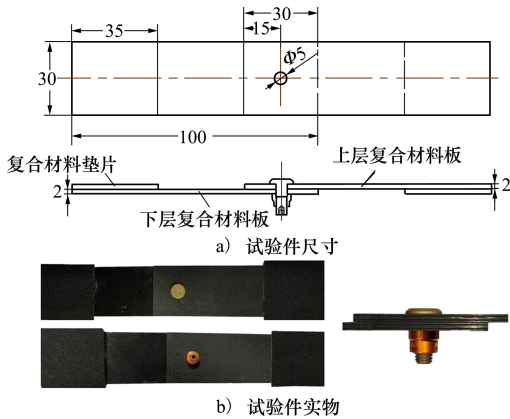


图 4 高锁螺栓连接单搭接试件尺寸图和实物图(单位 mm)

1.3 拉伸剪切试验

在飞机服役过程中,接头所承载的载荷 90% 为剪切载荷^[18],拉伸剪切强度可以有效反映实际工作中接头的承载能力和可靠性。因此,使用已制备的试验件进行准静态拉伸剪切测试,设置纯铆接组、高锁螺栓连接组和加垫铆接组。使用 WLN-10010T 电子万能试验机进行拉伸剪切试验(如图 5 所示),试验在室温下进行,拉伸加载速度 1 mm/min。

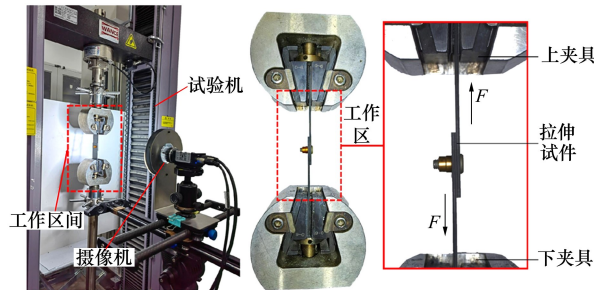
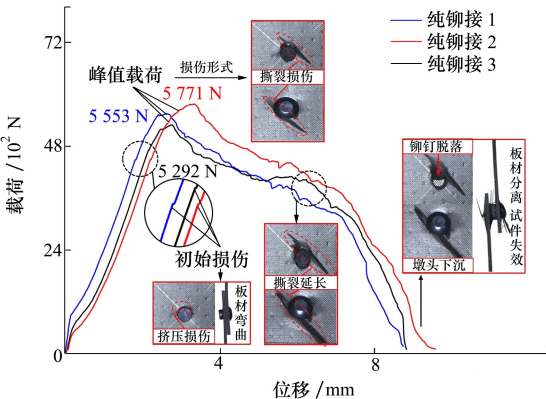


图 5 准静态拉伸试验设备及其细节



a) 纯铆接接头的载 荷 - 位移曲线及失效过程

2 结果与讨论

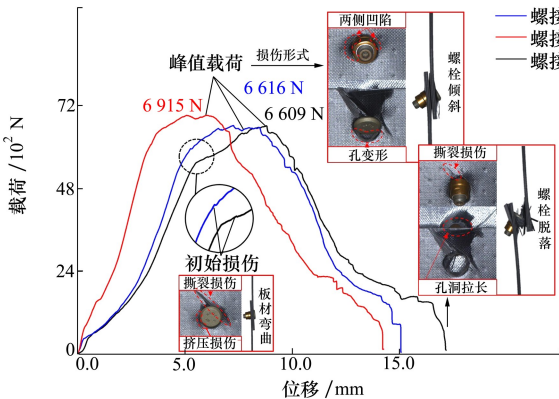
本文对纯铆接、垫圈铆接及高锁螺栓连接接头进行了准静态拉伸试验,获取了接头的拉伸载荷-位移曲线。对接头在拉伸载荷下由线性至失效的阶段以及峰值载荷进行分析讨论,对接头损伤及失效形式进行研究。本节分别比较纯铆接接头、螺接接头和垫圈铆接接头的拉伸力学性能。同时,通过综合分析铆接及螺栓连接接头在质量、强度及能量吸收方面的能力来探究“以铆代螺”可行性。

2.1 拉伸载荷位移曲线

不同接头的拉伸载荷-位移曲线如图 6a)~6c) 所示。由图 6 可知,纯铆接接头、高锁螺栓连接接头、垫圈铆接接头 3 组试验下的拉伸载荷-位移曲线均存在线性增长阶段、渐进损伤阶段及失效破坏阶段。在线性增长阶段,材料发生弹性变形,损伤产生,曲线发生微小波动。渐进损伤阶段,载荷进一步增大,损伤加剧,此阶段图像表现为达到峰值载荷后曲线呈现下降趋势,图像发生明显波动。失效阶段,接头损伤程度加剧,承载能力明显下降,短时间内载荷下降较大。

分析纯铆接接头的载 荷 - 位移曲线(见图 6a))发现,纯铆接接头在线性阶段后迅速到达峰值载荷,经历短暂波动后曲线迅速下降;高锁螺栓连接载 荷 - 位移曲线(见图 6b))在线性阶段后曲线存在波动上升,到达峰值载荷后曲线迅速下降;垫圈铆接载 荷 - 位移曲线(见图 6c))在线性阶段后波动上升,到达峰值载荷后曲线有下降趋势,波动明显。

由图 6d)中不同连接接头的准静态拉伸曲线对比可知:纯铆接接头的峰值载荷为 5 553 N,高锁螺栓接头峰值载荷为 6 915 N,加垫铆接接头峰值载荷为 8 026 N。螺接接头峰值载荷比纯铆接高 24.5%,



b) 高锁螺栓连接接头的载 荷 - 位移曲线及失效过程

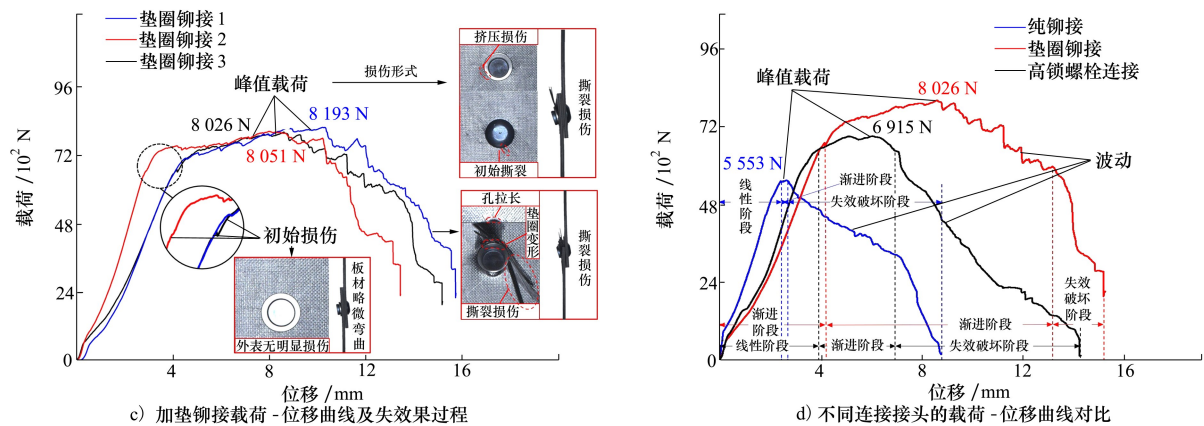


图 6 3 种连接形式拉伸剪切试验载荷-位移曲线及失效过程图

因此,通过纯铆接工艺以实现“以铆代螺”并不实际;而垫圈铆接接头的峰值载荷相较螺栓连接提升了 16.1%,垫圈铆接工艺在剪切强度上超越了螺栓连接,进一步增加了“以铆代螺”的可行性。垫圈铆接接头峰值载荷远高于纯铆接和高锁螺栓连接,推测是由于垫圈增大了承载面积,从而提高了接头的抗拉强度,改变了接头最终破坏形式,这将在 2.2 节中作进一步讨论。

2.2 复合材料试件损伤及失效形式

复合材料接头损伤及失效模式反映了接头连接质量,根据等代设计原则^[19],“以铆代螺”研究中替换的铆接接头强度不能降低,或者紧固件的强度远大于层合板强度,更换后在减重的同时不降低连接性能。在准静态拉伸试验中,3 种连接接头试样的失效过程如图 6 所示,最终失效模式如图 7 所示。

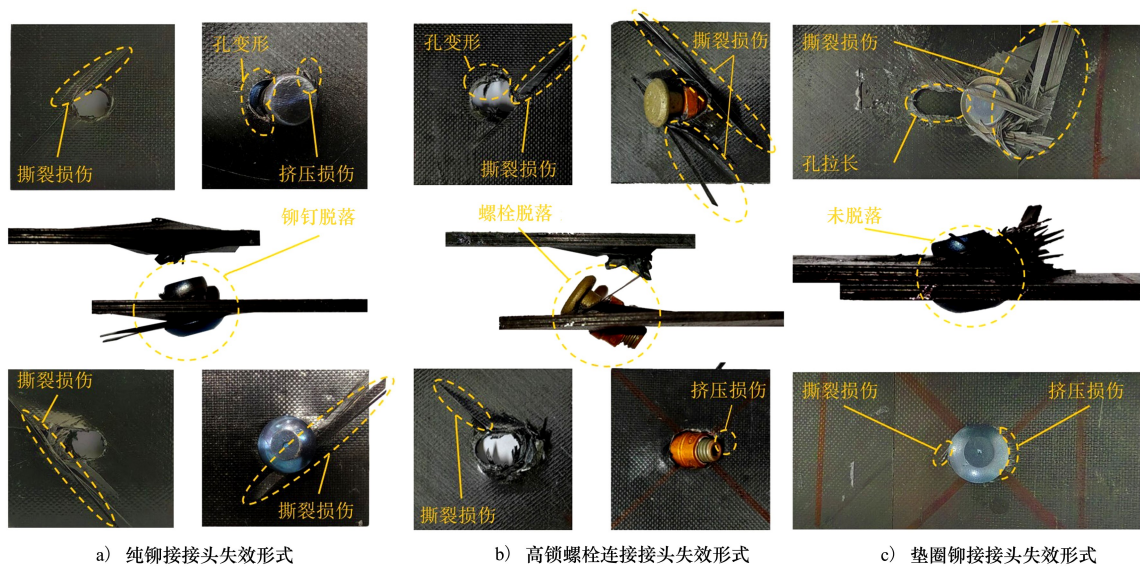


图 7 3 种连接形式接头拉伸失效模式

其中纯铆接接头拉伸失效过程如图 6a) 所示,加载至初始损伤时,复合材料板发生弯曲,铆钉倾斜,此时钉头挤压复合材料板形成挤压损伤。随着载荷增加,到峰值载荷时,钉头、墩头侧复合材料板均出现撕裂损伤并沿铆钉边缘扩展,2 块层合板间隙增大。接头进入失效阶段后,撕裂损伤明显,墩头

下沉。最终钉孔发生挤压变形,复合材料板有明显撕裂损伤,铆钉倾斜进而脱落。如图 7a) 所示,失效形式为拉脱-挤压混合失效。图 6b) 为螺接接头拉伸失效过程,发生初始损伤时,板材翘曲,螺栓钉头侧出现明显挤压损伤和撕裂损伤。随着载荷增加至峰值,钉尾两侧复合材料板发生凹陷,螺栓倾斜明

显,钉头处发生孔变形。随着载荷进一步增加,层合板撕裂损伤增加,螺孔被拉长。最终螺栓从螺孔脱落。层合板发生大量撕裂和挤压损伤,失效形式如图 7b) 所示,失效形式为拉脱-挤压混合失效。图 6c) 为加垫铆接接头拉伸失效过程,加载至发生初始损伤时,试样外表无明显损伤,继续加载至峰值载荷,载荷作用于垫圈造成垫圈翘曲,对垫圈侧复合材料板造成挤压损伤,层合板发生初始撕裂。随着载荷继续增加,垫圈变形明显,两侧层合板撕裂损伤延伸。最终如图 7c) 所示,钉孔被严重拉长,层合板发生大面积撕裂损伤,同时垫圈发生翘曲变形,该组试件铆钉与垫圈均未脱落,为挤压失效。试验表明,在准静态拉伸载荷作用下,纯铆接与螺接试件接头均出现铆钉、螺栓倾斜现象,钉孔、螺孔发生变形并最终导致接头拉脱-挤压混合失效。而垫圈铆接试件在拉伸试验中垫圈影响载荷传递,增加了承载面积,同时垫圈对铆钉钉头脱落有抑制作用,钉孔在剪切作用下被拉长,垫圈与铆钉均未脱落,最终失效形式为挤压失效。加垫铆接试件失效后层合板仍未分离,且铆钉表面损伤微小,并未被剪断,符合紧固件的强度远大于层合板强度的原则。加垫铆接提升了连接质量,提升后接头在拉伸性能上优于螺栓连接接头。因此,从准静态拉伸强度层面来讲,对于复合材料单搭接试件使用垫圈铆接代替高锁螺栓连接可行。

2.3 连接接头单位质量承载能力和能量吸收能力

本节对比了纯铆接、螺接及垫圈铆接接头的质量、单位质量承载力及单位质量能量吸收能力,以研究铆接工艺能否在保证性能的前提下实现接头轻量化。因此,本文分别测量长度为 9 mm 的铆钉、高锁螺栓及长度为 10 mm 的铆钉和垫片的质量,数据如表 1 所示。

表 1 铆钉、垫圈和高锁螺栓的质量

测量项	质量/g	测量项	质量/g
9 mm 铆钉	1.72	垫圈	0.24
10 mm 铆钉	1.81	高锁螺栓	1.67

其中高锁螺栓较 9 mm 铆钉质量下降 2.9%,较 10 mm 铆钉加垫圈总质量降低 18.6%,试验件在降低质量方面并无优势。

另一个可对比项为连接接头单位质量可承载的载荷量。在本文加载条件下,不同连接接头单位质

量可承载载荷量定义为

$$A = \frac{F_{\max}}{m}$$

(1)

式中: $F_{\max}$ 为峰值载荷; m 为连接接头质量。根据试验结果和(1) 式可得到不同试件的单位质量可承载载荷量 A 的具体值,见表 2。

表 2 试件单位质量可承载载荷量 A

试件	$A/(N \cdot g^{-1})$	试件	$A/(N \cdot g^{-1})$
纯铆接	3 227.67	垫圈铆接	3 938.66
螺接	4 027.17		

由表 2 可知,改进工艺使用垫片铆接后,接头单位质量承载力较纯铆接接头提升了 22.0%,为高锁螺栓连接单位质量承载力的 97.8%。在单位质量承载力上,使用垫圈铆接代替螺栓连接可行。

能量吸收能力是评价接头力学性能的重要指标,由载荷-位移曲线(见图 6) 计算连接接头失效过程中吸收的能量 E 的积分形式为

$$E = \int_{x_0}^{x_1} F(x) dx$$

(2)

式中: $F_{\max}$ 为峰值载荷, $x_0 = 0$ mm,对应初始位移; x_1 对应试件完全失效时的位移。根据(2) 式计算得到的总吸收能量 E 和连接件/紧固件的质量,可定义接头单位质量吸收能量值为

$$B = \frac{E}{m}$$

(3)

表 3 给出了根据(3) 式计算得到的不同接头单位质量吸收能量值 B 。

表 3 试件单位质量吸收能量值 B

试件	$B/(J \cdot g^{-1})$	试件	$B/(J \cdot g^{-1})$
纯铆接	17.95	垫圈铆接	42.48
螺接	34.20		

由表 3 中数据可知,垫圈铆接接头单位质量吸收能量值相较于纯铆接增加 136.7%,相较于高锁螺栓连接接头增加 24.2%。使用垫圈铆接代替螺栓连接可一定程度提升接头性能,在应对剪切载荷时能量吸收效果更佳。

对比连接接头单位质量下的承载载荷及单位质量下的能量吸收可知,使用垫圈铆接工艺后,铆接接头单位质量承载载荷与高锁螺栓接头持平,单位质量吸收能量值高于高锁螺栓,“以铆代螺”工艺具有

一定的可行性。

3 “以铆代螺”可行性

使用垫圈铆接代替螺栓连接后接头峰值载荷提升了 20.5%,单位质量吸收能量值提升了 24.2%,接头单位质量承载力为螺栓连接的 97.8%，“以铆代螺”工艺在这一背景下可行。此外,加垫铆接接头紧固件强度远高于层合板,符合等代设计原则。同时,本文存在以下局限性:提出“以铆代螺”工艺的主要目的为减轻接头质量,但本文选用的铆钉质量仍高于高锁螺栓的质量,从轻量化角度来说并未取得理想效果;垫圈铆接有效降低了铆接损伤,但本文并未深入分析垫片提高单搭接复合材料试件准静态拉伸强度的机理层面原因以及不同材质垫圈对准静态拉伸强度提升效果的影响。

4 结 论

本文通过比较单搭接复合材料试样(包括纯铆接、垫圈铆接和高锁螺栓连接)在准静态拉伸剪切载荷作用下的力-位移曲线、损伤模式、失效状态、单位质量承载能力和单位质量吸能能力,评估了“以铆代螺”方案的可行性。本文指出,垫圈铆接在

单位质量承载能力和单位质量吸能能力上优于高锁螺栓连接,在一定程度上支持了“以铆代螺”工艺的可行性。主要结论如下:

1) 在准静态拉伸剪切试验中,纯铆接、垫圈铆接和高锁螺栓连接的单搭接复合材料试样的力-位移响应均呈现线性增长阶段、渐进损伤阶段和失效阶段。高锁螺栓连接复合材料试样的峰值拉伸剪切强度比纯铆接试样高 24.5%,垫圈铆接复合材料试样较螺栓试件提升 16.1%,垫圈的使用提升了连接件强度。

2) 在准静态拉伸剪切载荷作用下,纯铆接和高锁螺栓连接的复合材料试样均表现出明显的挤压损伤和撕裂损伤,最终失效模式均为拉脱-挤压失效。而垫圈铆接的复合材料试样中,垫圈承载载荷并发生翘曲,抑制了铆钉拉脱,最终失效形式变为挤压失效。垫圈的使用改变了准静态拉伸剪切载荷条件下单搭接复合材料试件的最终失效形式。

3) 垫圈铆接复合材料试样的单位质量承载能力比纯铆接试样高 22.0%,达到高锁螺栓连接复合材料接头单位质量承载能力的 97.8%。此外,垫圈铆接接头的单位质量吸能能力比纯铆接接头高 136.7%,比高锁螺栓接头高 24.2%。因此,从单位质量承载能力和单位质量吸能能力的角度来看,“用铆钉代替螺栓”的方案是可行的。

参考文献:

- [1] STARIKOV R, SCHÖN J. Quasi-static behaviour of composite joints with protruding-head bolts[J]. Composite Structures, 2001, 51(4): 411-425
- [2] CROXFORD A M, DAVIDSON P, WAAS A M. Influence of hole eccentricity on failure progression in a double shear bolted joint(DSBJ)[J]. Composites Science and Technology, 2018, 168(10): 179-187
- [3] 唐见茂. 航空航天复合材料发展现状 & 前景[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(4): 352-359
TANG Jianmao. Current status and trends of advanced composites in aerospace[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(4): 352-359 (in Chinese)
- [4] ALAN H. The evolution of the composite fuselage-a manufacturing perspective[J]. SAE International Journal of Aerospace, 2017, 10(2): 77-91
- [5] 黄志超, 陈伟达, 程雯玉, 等. 复合材料连接技术进展[J]. 华东交通大学学报, 2013, 30(4): 1-6
HUANG Zhichao, CHEN Weida, CHENG Wenyu, et al. Development of composite connection techniques[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2013, 30(4): 1-6 (in Chinese)
- [6] 沃西源. 复合材料胶接连接工艺[J]. 航天返回与遥感, 1996, 17(1): 52-58
WO Xiyuan. Adhesive bonded technology of composite[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 1996, 17(1): 52-58 (in Chinese)
- [7] CHOWDHURY N M, WANG J, CHIU W K, et al. Static and fatigue testing bolted, bonded and hybrid step lap joints of thick carbon fibre/epoxy laminates used on aircraft structures[J]. Composite Structures, 2016, 142: 96-106

- [8] 许巍, 陈力, 张钱城, 等. 粘结界面力学行为及其表征[J]. 中国科学:技术科学, 2012, 42(12): 1361-1376
XU Wei, CHEN Li, ZHANG Qiancheng, et al. Mechanical behavior of the bond interface and its characterization[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2012, 42(12): 1361-1376 (in Chinese)
- [9] MCCARTHY M. BOJCAS: bolted joints in composite aircraft structures[J]. Air & Space Europe, 2001, 3(3): 139-142
- [10] COELHO A M G, MOTTRAM J T. A review of the behaviour and analysis of bolted connections and joints in pultruded fibre reinforced polymers[J]. Materials & Design, 2015, 74(3): 86-107
- [11] 曹增强, 张铭豪, 谭学才, 等. 航空复合材料结构铆接技术综述[J]. 航空制造技术, 2023, 66(增刊1): 26-37
CAO Zengqiang, ZHANG Minghao, TAN Xuecai, et al. Overview of riveting technology for aviation composite structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(suppl.1): 26-37 (in Chinese)
- [12] JIANG H, ZENG C, LI G, et al. Effect of locking mode on mechanical properties and failure behavior of CFRP/Al electromagnetic riveted joint[J]. Composite Structures, 2020, 257: 113-162
- [13] 于海平, 张旭, 章茂云, 等. 大直径铝合金铆钉以铆代螺可行性试验研究[J]. 航天制造技术, 2016, 4: 1-4
YU Haiping, ZHANG Xu, ZHANG Maoyun, et al. Experimental investigation on feasibility of substituting large diameter riveting for bolting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 4: 1-4 (in Chinese)
- [14] 陈乾. 电磁铆接工艺铆钉动态塑性变形及接头性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017
CHEN Qian. Study on dynamic plastic deformation of rivet and joint performance in electromagnetic riveting process[D]. Changsha: Hunan University, 2017 (in Chinese)
- [15] 赵乐天, 杨天智, 黄祺, 等. CFRP 构件垫圈/衬套铆接损伤及拉剪性能试验研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(6): 1089-1096
ZHAO Letian, YANG Tianzhi, HUANG Qi, et al. Damage behavior and mechanical property investigation of CFRP/CFRP washer-bushing riveted joints[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(6): 1089-1096 (in Chinese)
- [16] 符平坡, 曾祥瑞, 丁华, 等. 树脂基复合材料自冲铆工艺影响因素及研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(4): 1819-1840
FU Pingpo, ZENG Xiangrui, DING Hua, et al. Influencing factors and research progress of self-piercing riveting process for resin matrix composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 1819-1840 (in Chinese)
- [17] YANG Z, JIANG R, ZUO Y. Riveting damage behavior and mechanical performance assessments of CFRP/CFRP single-lap gas-ket-riveted joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 149: 107253
- [18] 袁红璇. 现代高寿命飞机的连接技术[J]. 航空工程与维修, 2002, 3: 46-47
YUAN Hongxuan. Connecting techniques of the modern long life aircraft[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2002, 3: 46-47 (in Chinese)
- [19] 王兴业, 唐羽章. 复合材料力学性能[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1998
WANG Xingye, TANG Yuzhang. Mechanical properties of composite materials[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1998 (in Chinese)

Research on influence of bolted connections and riveting on tensile failure behavior of composite structures

LU Minxi¹, CAO Zengqiang^{1,2}, YAN Lu¹, YAN Han¹, HUO Lubin¹

(1.School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.NPU Xuhang Electromagnetic Technology Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: Riveting method is simple, lightweight and cost-effective, and can thus possibly be adopted to reduce the weight of the composite structure compared to the bolted joints. To that end, this paper comprehensively assessed the practice of "replacing bolts with rivets" in composite structures. The quasi-static tensile-shear properties, damage response and failure process of single-lap composite specimens with pure riveting, riveting with washer and high-locking bolt were compared. The results show that the washer-riveted composite specimens have an ultimate strength of 16.1% higher than that of the high-lock bolted cases. The unit mass bearing capacity of the washer-riveted composite specimens is 97.8 % of that of the high-lock bolted composite specimens, while the unit mass energy absorption capacity is 24.2% higher than that of the high-lock bolted cases. Therefore, the practice of "replacing bolts with rivets" is feasible in terms of the ultimate quasi-static tensile shear strength, unit mass bearing capacity and unit mass energy absorption capacity.

Keywords: composite; riveted joints; washer-riveted joints; bolted joints; shear strength; failure mechanism

引用格式:鲁珉希, 曹增强, 闫璐, 等. 螺栓连接和铆接对复合材料结构拉伸失效行为的影响研究[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(4): 694-701

LU Minxi, CAO Zengqiang, YAN Lu, et al. Research on influence of bolted connections and riveting on tensile failure behavior of composite structures[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2025, 43(4): 694-701 (in Chinese)