

引文格式: 闫涵, 曹增强, 闫璐, 等. 铆接方法对CFRP 铆接接头损伤行为的影响研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(21): 136-144.

YAN Han, CAO Zengqiang, YAN Lu, et al. Study on effect of riveting methods on damage behavior of CFRP riveted joints[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(21): 136-144.

铆接方法对 CFRP 铆接接头损伤行为的影响研究*

闫 涵¹, 曹增强^{1,2}, 闫 璐¹, 鲁珉希¹, 霍鲁斌¹

(1. 西北工业大学机电学院, 西安 710072;

2. 陕西大工旭航电磁科技有限公司, 西安 710100)

[摘要] 铆接是碳纤维增强聚合物基复合材料(CFRP)的一种重要连接方法,但是传统铆接极易导致CFRP接头出现过大的干涉量和严重的损伤,造成质量隐患。本文通过试验方式对CFRP试件开展了纯铆接、垫圈铆接、衬套铆接和垫圈+衬套铆接的损伤行为研究。结果表明,纯铆接接头的平均干涉量最大(远大于2%),且接头截面损伤最严重;垫圈铆接接头的平均干涉量为0.757%,接头截面几乎没有损伤;衬套铆接接头的平均干涉量为0.956%,但是铆头歪斜对孔周造成了挤压变形等损伤;垫圈+衬套铆接接头的平均干涉量为-0.915%,没有形成有效干涉,接头截面未见明显损伤。

关键词: 碳纤维增强聚合物基复合材料(CFRP); 铆接; 垫圈; 衬套; 干涉量; 损伤

中图分类号: V25; TH131.1

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.21.136

Study on Effect of Riveting Methods on Damage Behavior of CFRP Riveted Joints

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

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Shaanxi Dagong Xuhang Electromagnetic Technology Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

[ABSTRACT] Riveting is an important connection method for carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites, however, traditional riveting is highly susceptible to causing excessive interference and severe damage to CFRP joints, leading to potential quality hazards. This study experimentally investigated the damage behavior of CFRP specimens subjected to various riveting methods, including straight riveting, washer riveting, chuck bushing riveting, and washer-chuck bushing riveting. The results indicate that the average interference of straight riveted joints is the highest, substantially greater than 2%, with joints exhibiting the most severe cross-sectional damage. In contrast, joints riveted with washers show an average interference of 0.757% with virtually no damage to the joints' cross-section. Joints riveted with chuck bushings are of an average interference of 0.956%, but the tilt of rivet head causes compressive deformation and other damages around the hole. The combination of washer and chuck bushing riveting results in an average interference of -0.915%, without forming effective interference and observing no tangible damage on the joints' cross-section.

Keywords: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite; Riveting; Washer; Chuck bushing; Interference amount; Damage

以碳纤维增强聚合物基复合材料(CFRP)为代表的先进复合材料因比强/刚度、疲劳性能好和耐腐蚀的优异特性,已经被广泛应用于航空制造领域,其用

量占比是衡量飞机先进性的重要指标之一^[1]。当前,CFRP结构的连接方式仍以机械连接为主,主要包括螺栓和铆接^[2-4]。螺栓应用范围广,能承受较大载荷,且

* 基金项目: 中央高校基本科研业务费(D5000240092)。

易于检查和拆卸,但制造成本高、效率低^[5]。铆接多应用于平整性较高的区域,连接强度低,对工人熟练度要求较高^[6]。相较于螺接,铆接干涉量的可控性很低,而且铆接过程中由于钉杆的不均匀膨胀,以及镦头成形所带来的冲击和挤压等,使得复合材料孔壁和表面极易出现损伤^[7]。因此,目前复合材料的机械连接主要采用螺接,但是单个铆钉价格便宜且铆接自动化程度高^[8],为此,研究复合材料无损铆接方法对航空领域具有深远影响。

当前,已经有大量关于复合材料铆接的研究。宋丹龙等^[9]对 CFRP/Al 试件的无头铆钉进行了最大压铆力选取方法的研究,建立了压铆力的理论公式,并通过有限元仿真证实了公式的有效性。刘洋等^[10]采用温热自冲铆工艺对 CFRP/Al 试件进行铆接,发现该工艺可以有效减少接头的成形损伤,避免接头表面产生宏观裂纹。丛志伟^[11]设计了一种埋置在 CFRP 试件铆接孔内的复杂阶梯型金属零件,有限元铆接仿真后发现该零件能够抵消层合板内大部分的铆接变形,铆接孔壁附近的损伤也得到了有效抑制。Cao 等^[12]采用“限制垫圈”和电磁铆接结合的工艺方法,发现垫圈减小了镦头成形对复合材料层合板表面造成的挤压变形。魏誉豪等^[13]通过压铆机进行干涉衬套安装,研究了纯钛干涉衬套在不同相对挤压量下的复合材料内部损伤,结果表明,相对挤压量 <3% 时,相应 CFRP 的内部微观损伤较小。尽管现有铆接技术已在一定程度上减轻了对 CFRP 的损伤,但与实现无损铆接的目标仍有一段距离,铆接过程中的干涉行为如何影响 CFRP 的损伤分布,以及研发既经济又高效的无损铆接方法,这些问题仍然需要深入研究和探索。

综上,本文采用垫圈和衬套两种对复合材料有保护作用且成本较低的零件,通过对比纯铆接、垫圈铆接、衬套铆接、垫圈+衬套 4 种铆接方法下 CFRP 铆接接头的干涉量水平和铆接损伤,系统探究了不同铆接方法对

CFRP 试件损伤行为的影响,并且对垫圈和衬套的工作机理进行分析,为二者在飞机工艺装配中的应用提供技术参考。

1 试验方法及设备

1.1 试验方法

4 种不同铆接方法的示意如图 1 所示。纯铆接是直接 将铆钉放入带预制孔的 CFRP 试件内实施压铆;垫圈铆接是在镦头侧增加垫圈后再对铆钉实施压铆;衬套铆接是将衬套先安装在 CFRP 试件预制孔内,再将铆钉放进衬套内实施压铆;垫圈+衬套铆接是在 CFRP 试件预制孔内安装衬套的同时在镦头成形侧增设垫圈,然后再完成压铆。

1.2 试验材料

所用 CFRP 板由 T700/7901 单向纤维预浸料(威海光威公司)制得,其力学性能如表 1 所示^[14],层合板的铺层信息为 [45/0/-45/90/-45/0/45/0/-45/90/-45/0/45],单层铺层的名义厚度为 0.15 mm,共 13 层。铆钉材料采用的是已经广泛应用于各种先进军民机^[15]且与 CFRP 板材有良好电学兼容性的 Ti45Nb 钛铌合金;垫圈材料为 TC4 钛合金,抗拉强度为 1100 MPa,在大载荷下作用也不易变形;衬套选用塑性较好的 TA1 钛合金,上述 3 种材料的力学性能如表 2 所示。

1.3 试件制备

铆接试件由两块复合材料层合板叠加而成,根据 ASTM D5961 标准(端距与孔直径之比 $E/D=3$,宽度与孔直径之比 $W/D=6$)进行设计^[16],试件参数及实物如图 2 所示,单块层合板长度为 100 mm,厚度为 2 mm,宽度为 30 mm,每个试件上制 3 个等间距的铆接孔,从左至右分别为孔 1、孔 2、孔 3,孔间距为 30 mm,孔边距为 15 mm,钉孔直径为 5.1 mm,实际测得的钉孔直径数据如表 3 所示,根据 GB/T 38825—2020 标准可知,实际钉孔直径均在容许偏差范围内^[17]。试验所用零件如图 3

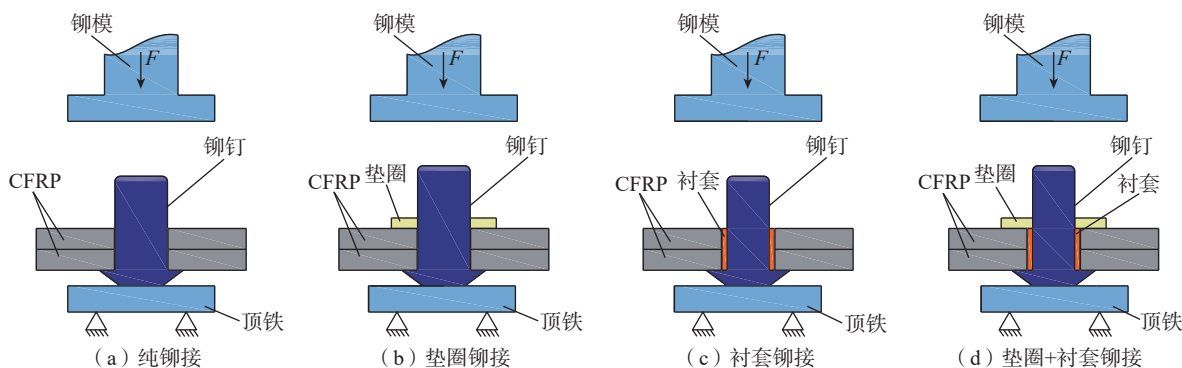


图 1 不同铆接方法示意图

Fig.1 Schematic diagrams of different riveting methods

表1 T700/7901 复合材料的力学性能^[14]

Table 1 Mechanical properties of T700/7901 composite^[14]

参数	数值	参数	数值
E_{11}	115 GPa	X_T	2300 MPa
$E_{22}=E_{33}$	7.8 GPa	X_C	1050 MPa
G_{12}	4160 GPa	Y_T	50.1 MPa
G_{13}	4160 GPa	Y_C	183 MPa
G_{23}	2671 GPa	Z_T	50.1 MPa
$S_{12}=S_{13}=S_{23}$	83.9 MPa	Z_C	183 MPa

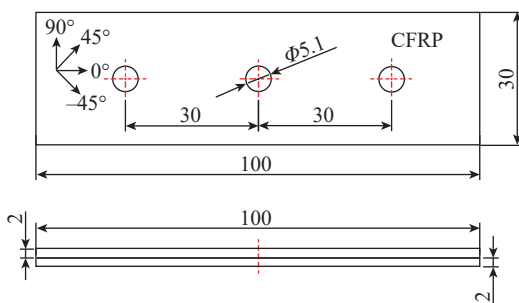
注： E_{11} 、 E_{22} 、 E_{33} 分别为 3 个主方向的弹性模量； G_{12} 、 G_{13} 为层间剪切模量； G_{23} 为面内剪切模量； S_{12} 、 S_{13} 、 S_{23} 分别为 3 个主方向的剪切强度； X_T 、 X_C 、 Y_T 、 Y_C 、 Z_T 、 Z_C 分别为材料在 3 个主方向的拉伸及压缩强度。

表2 Ti45Nb、TC4 垫圈和 TA1 衬套的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Ti45Nb rivet, TC4 washer and TA1 chuck bushing

材料名称	状态	R_m /MPa	A /%	Ψ /%	τ /MPa
Ti45Nb	退火	450	25	60	—
TC4	退火	1100	10	20	665
TA1	退火	345	25	50	240

注： R_m 为抗拉强度； A 为伸长率； Ψ 为断面收缩率； τ 为剪切强度。



(a) 几何尺寸



(b) 实物图

图2 铆接试件 (mm)

Fig.2 Riveted specimen (mm)

所示。铆接过程中垫圈放置于镦头成形侧,本课题组通过试验发现垫圈内径决定铆钉塑性变形的抑制效果,外径主要影响接头的承载面积,厚度则关系到垫圈的整体

表3 钉孔的实测直径

Table 3 Actual measured diameters of rivet holes

被测孔	孔径/mm	被测孔	孔径/mm
纯铆接孔 1	5.102	衬套铆接孔 1	5.099
纯铆接孔 2	5.105	衬套铆接孔 2	5.101
纯铆接孔 3	5.098	衬套铆接孔 3	5.098
垫圈铆接孔 1	5.103	垫圈+衬套铆接孔 1	5.097
垫圈铆接孔 2	5.105	垫圈+衬套铆接孔 2	5.101
垫圈铆接孔 3	5.103	垫圈+衬套铆接孔 3	5.099

刚度^[18],因此建议垫圈厚度 t 取 0.8~1.0 mm,如图 3 (a) 所示,外径 D_1 和内径 D_2 应满足如下条件。

$$D_1 / D_2 \leq 2.5 \quad (1)$$

$$D_2 = d + 0.1 \sim 0.2 \quad (2)$$

式中, d 为铆钉直径。

因此,垫圈厚度取 1 mm,针对垫圈铆接方法设计垫圈外径 $\Phi 10$ mm,内径 $\Phi 5.1$ mm,针对垫圈+衬套铆接方法设计垫圈外径 $\Phi 9$ mm,内径 $\Phi 4.1$ mm。由 1.1 节已知,衬套需要安装于复合材料试件预制孔内,衬套高度须与复合材料叠层厚度保持一致,因此设计衬套外径 $\Phi 5$ mm,内径 $\Phi 4$ mm,高度 4 mm,如图 3 (b) 所示,实际测得的衬套内外径数据如表 4 所示,可知衬套内径误差范围为 $-0.002 \sim 0.004$ mm,衬套外径误差范围为 $-0.02 \sim 0.03$ mm,均在试验设计的许可范围内。按照试验需要选取两种钛合金平圆头铆钉直径 d 分别为 5 mm 和 4 mm,如图 3 (c) 所示,根据经验公式(式 (3))^[19],则钉杆长度 L 为

$$L = H + \alpha \times d \quad (3)$$

式中, H 为叠层板厚度; α 为系数,取值范围 0.9~1.3。本试验中试件总厚度为 4 mm,在保证铆钉外伸量一致的前提下,得到不同铆接方法对应的铆钉尺寸如表 5 所示,此时 4 种铆接方法的铆钉外伸量均为 5 mm。

1.4 铆接试验和铆接损伤检测方法

本次试验使用 TOX 气动压铆机进行铆接,铆接装置与铆接后试件如图 4 所示。将待铆试件放置于顶铁上,驱动模块的气压增力缸推动铆模向下移动,使钉杆镦粗成形。设计 4 组试验分别对应不同的铆接方法,每组重复铆接 3 次,以确保试验结果的可重复性和结论的可靠性。此外,在铆钉外伸量均为 5 mm 的前提下,镦头高度的一致性通过控制气动压铆机的位移来实现,将压铆机的位移统一设定为 90.2 mm 进行铆接。铆接完

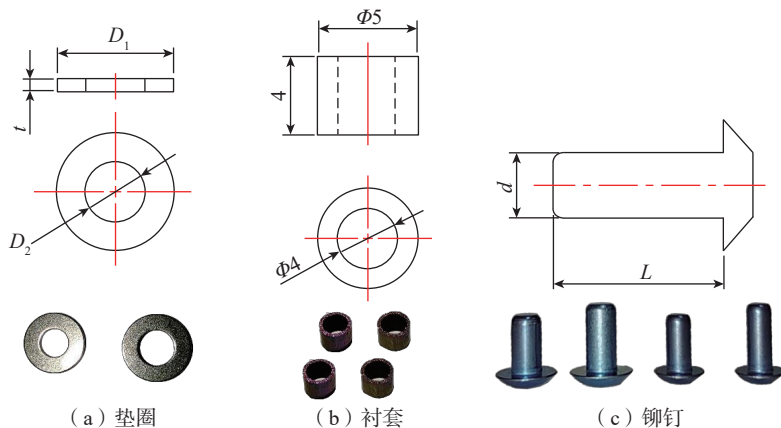


图3 试验所用零件(mm)
Fig.3 Experimental parts (mm)

表4 衬套内外径实测尺寸

Table 4 Actual measured internal and external diameters of chuck bushings

被测衬套	内径 / mm	外径 / mm	被测衬套	内径 / mm	外径 / mm
衬套铆接衬套1	4.002	5.03	垫圈 + 衬套铆接衬套1	3.998	4.99
衬套铆接衬套2	4.003	5.03	垫圈 + 衬套铆接衬套2	4.001	4.98
衬套铆接衬套3	4.001	4.99	垫圈 + 衬套铆接衬套3	4.004	4.99

表5 不同铆接方法所用铆钉尺寸

Table 5 Rivet sizes used for different riveting methods

铆接方法	铆钉直径 /mm	钉杆长度 /mm
纯铆接	5	9
垫圈铆接	5	10
衬套铆接	4	9
垫圈 + 衬套铆接	4	10



图4 铆接装置及铆接后试件
Fig.4 Riveting setups and specimens after riveting

成后,使用水射流切割机切割试样,切割部分略微偏离铆钉孔轴线,随后使用抛光机 / 研磨机将试件抛光至铆钉中心轴位置。采用校正尺(精度为 0.1 mm)对测量膨

胀直径所用的光学显微镜进行精准校准,校准后将接头放置在光学显微镜下测量铆接膨胀直径,测量完成后通过扫描电子显微镜(SEM)观察初始铆接损伤。

2 结果与讨论

2.1 相对干涉量分析

铆接干涉量是指铆钉在铆接过程中与孔壁之间的干涉程度,适当的干涉量可以改善孔周围的应力分布,从而增强接头的疲劳性能,过高的干涉量可能导致铆钉轴向挤压复合材料孔壁,引起严重损伤(如基体破碎、分层和纤维屈曲)。因此,干涉量是影响铆接接头连接性能的重要因素,也是评估铆接质量最直接的标准之一^[20]。在铆接过程中,钉杆膨胀,挤压孔壁,从而使铆钉与孔壁形成紧密干涉配合。不同直径铆钉对应的铆接接头干涉量会有较大差距,通常采用相对干涉量的概念来描述,计算式为

$$I = \frac{d_0 - D}{D} \times 100\% \quad (4)$$

式中, d_0 为铆钉膨胀直径; D 为铆钉孔直径。

铆接时铆钉会沿着轴线方向不均匀膨胀,需要在观察截面的不同位置处测量铆钉膨胀直径,以便更真实地反映干涉分布。本试验参照 GJB 715.25—90 标准选取了 5 个测量位置,如图 5 所示,位置 1、位置 5 分别为镦头侧叠层板边缘和钉头侧叠层板边缘,取钉杆中部为位置 3,在孔内厚度为 $0.25H$ 和 $0.75H$ 处分别取位置 2 和位置 4。其中,安装有衬套的试验组将衬套与铆钉视为一体,测量衬套的膨胀直径。测量数据如表 6 所示。根据式(4)计算得到 4 种铆接方法在不同测量位置的相

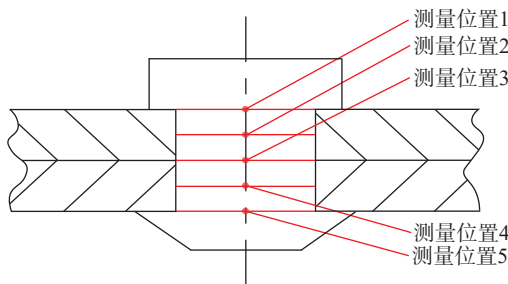


图 5 铆钉膨胀直径的测量位置

Fig.5 Measuring positions of rivet expansion diameter

表 6 铆钉膨胀直径测量数据

Table 6 Measured data of rivet expansion diameter

铆接方法	测量数据 /mm				
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
纯铆接	6.638	5.162	5.100	5.097	5.118
垫圈铆接	5.169	5.126	5.126	5.140	5.151
衬套铆接	5.249	5.115	5.089	5.126	5.162
垫圈+衬套铆接	5.002	5.024	5.035	5.097	5.104

对于干涉量,求取平均值以表征铆接干涉量。

计算得到的平均干涉量如图 6 所示。已有研究表明,在复合材料的结构连接中引入适当干涉量是有益的,但研究人员一般认为干涉量最大不宜超过 2%^[12]。由图 6 可知,纯铆接的干涉量高达 6.299%,可以推测该铆接方法可能会对 CFRP 孔壁造成严重损伤。垫圈铆接和衬套铆接方法都将铆接干涉量控制在 2% 以下,说明单独使用垫圈或衬套均能有效抑制钉杆膨胀。垫圈的作用机理是在镦头膨胀接触到自身内径时,开始限制镦头侧钉杆材料流入孔内,从而减少材料的流入,限制铆钉的金属膨胀;而衬套的作用机理则是直接为孔内钉杆材料的流动提供一个内部限制,阻止铆钉在衬套内部过度膨胀。垫圈铆接干涉量略小于衬套铆接干涉量,表明垫圈对钉杆膨胀的限制效果更明显。相比于衬套铆接方法,垫圈+衬套铆接方法产生了 0.915% 的负干涉量间隙配合,导致二者干涉量相差较大的原因可能是:衬套由塑性较好的 TA1 钛合金材料制成,因此铆接过程中镦头侧、钉头侧这些受力较大的位置仍会有大量钉杆材料流入孔内。虽然衬套与铆钉孔之间存在 0.1 mm 的初始间隙,但是对于衬套铆接,钉杆膨胀迫使衬套发生大程度塑性变形并与孔壁发生干涉;对于垫圈+衬套铆接,垫圈和衬套的使用不仅限制了镦头侧材料流入孔内,还阻止了铆钉在衬套孔内的过度膨胀,在此基础上,初始间隙的存在为钉杆膨胀提供了空间,但这种小幅度膨胀在初始间隙范围内,导致衬套难以与孔壁形成有效干涉,因此平均干涉量结果为负值,进一步增大了衬套铆接和垫圈+衬套铆接之间的差距。

4 种铆接方法在各个测量位置的相对干涉量如图 7 所示,结合表 6 可知,纯铆接、垫圈铆接、衬套铆接接头截面的基本形状均为“两头大、中间小”的鞍形,最大膨胀直径出现在测量位置 1;垫圈+衬套铆接接头截面为正梯形,最大膨胀直径出现在测量位置 5。值得注意的

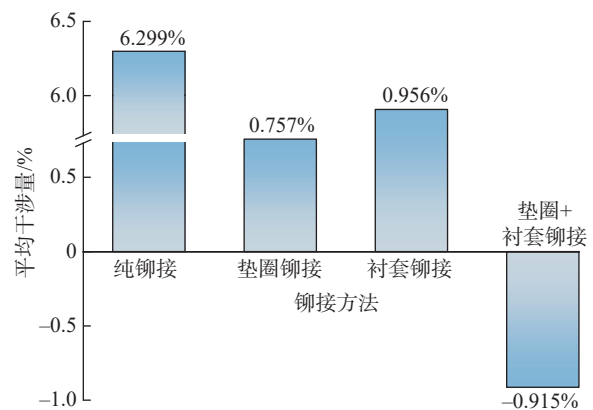


图 6 不同铆接方法的平均干涉量

Fig.6 Average interference amount of different riveting methods

是,4种压铆工艺下进行的铆接试验中都出现了“接头中部膨胀直径较小”的问题,大量研究表明,飞机服役过程中铆接接头中部承受的剪切载荷最大,该部分的钉杆膨胀直径大小对接头整体的抗剪能力存在影响,因此上述问题对接头的力学性能产生负面影响^[21-22]。纯铆接接头和衬套铆接接头在位置1处的相对干涉量大于2%。其中,纯铆接接头的相对干涉量高至30.120%,说明该组试件的铆头侧层合板已经产生了明显的挤压变形;衬套铆接接头在衬套的作用下,干涉量降低至2.934%,说明衬套对钉杆材料在铆头一侧的流动也起到一定的限制作用,但铆头侧层合板仍有可能出现了较为明显的损伤。

为了定量评估干涉量分布的均匀性,引入统计学中的标准差系数(SDC),即

$$SDC = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i)^2 / \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i} \quad (5)$$

式中, N 为测量位置的总数; Δ_i 为第 i 个测量位置的干涉量。

一般认为SDC值越大,干涉波动越大,铆钉杆膨胀越不均匀;SDC的绝对值越接近0,波动就越小;当SDC=0时,则表示干涉不存在波动^[23]。根据不同测量位置相对干涉量的大小,计算所有铆接方法对应的SDC,并取绝对值,如图8所示。可以看出,纯铆接试件的SDC值为1.892,远高于其他3组试件,垫圈和衬套均有效降低了相应试件干涉量的SDC值,减小了铆接过程中的干涉波动。其中,垫圈铆接试件的SDC值最趋近于0,垫圈+衬套铆接产生的干涉波动大于垫圈铆接的干涉波动,但小于衬套铆接产生的干涉波动,表明垫圈和衬套的双重限制对干涉均匀性起到了反作用,单独使用垫圈对于促进钉杆均匀膨胀的效果反而更显著,而且衬套与铆钉孔之间存在0.1 mm的初始间隙,导致铆钉膨胀迫使衬套塑性变形的过程在初始间隙范围内不受控制,干涉分布的不均匀性增加。此外,铆接干涉分布也受试验所用衬套制造精度的影响。

通过以上分析可知,单独使用垫圈或衬套都能有效控制铆接接头干涉量,其中铆头侧增设垫圈能使钉杆膨胀更加均匀,而同时使用垫圈和衬套虽然显著改善了铆接过程中钉杆材料径向变形挤压孔壁的现象,但铆接接头为间隙配合,对提高连接强度无益。

2.2 铆接损伤分析

为了进一步分析铆接试件的内部损伤情况,使用SEM观察接头截面内部的微观损伤,如图9所示。在每个试件中,层合板上表面与铆头或者垫圈之间的接触区域是铆接过程中产生损伤的最关键区域,因此对该区域进行高倍率放大观察。可以看出,CFRP试件铆接产

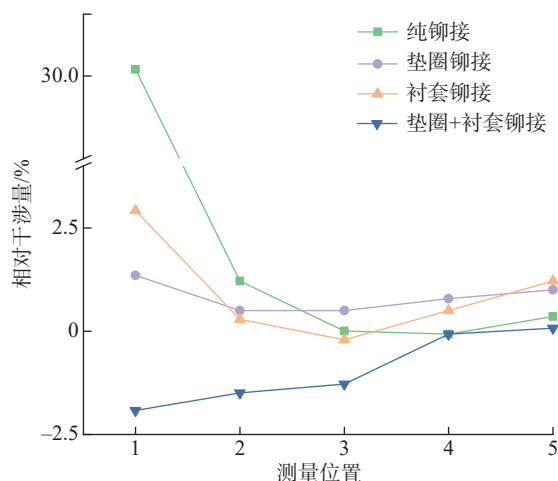


图7 各个测量位置的相对干涉量

Fig.7 Relative amount of interference at each measuring position

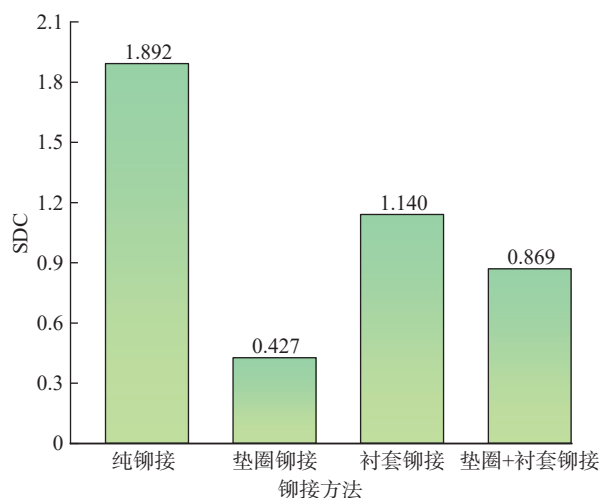


图8 不同铆接方法的标准差系数

Fig.8 SDCs of different riveting methods

生的损伤形式主要有基体开裂、纤维折断、分层、弯曲、脱粘等。

纯铆接时,损伤主要产生在铆头侧层合板表面,证实了2.1节中的结论,即纯铆接在测量位置1处产生的巨大干涉量(30.120%)导致复合材料层合板对应位置出现明显的挤压变形。具体为,层合板+45°铺层基体开裂,同时+45°铺层与0°铺层之间出现分层,+45°、0°、-45°铺层均发生了层弯曲,+90°铺层出现纤维扭折,这是因为在铆头一侧钉杆材料膨胀堆积,对CFRP孔周过分挤压,验证了“纯铆接SDC值最大,干涉波动最明显”的试验结果。

垫圈铆接接头截面几乎没有观察到损伤,可以推测是垫圈有效限制了钉杆的过分膨胀,并且增大了CFRP试件与连接件的接触面积,减小了铆头附近层合板的受力压强,从而减小了板材表面和铆接孔内的损伤。衬套

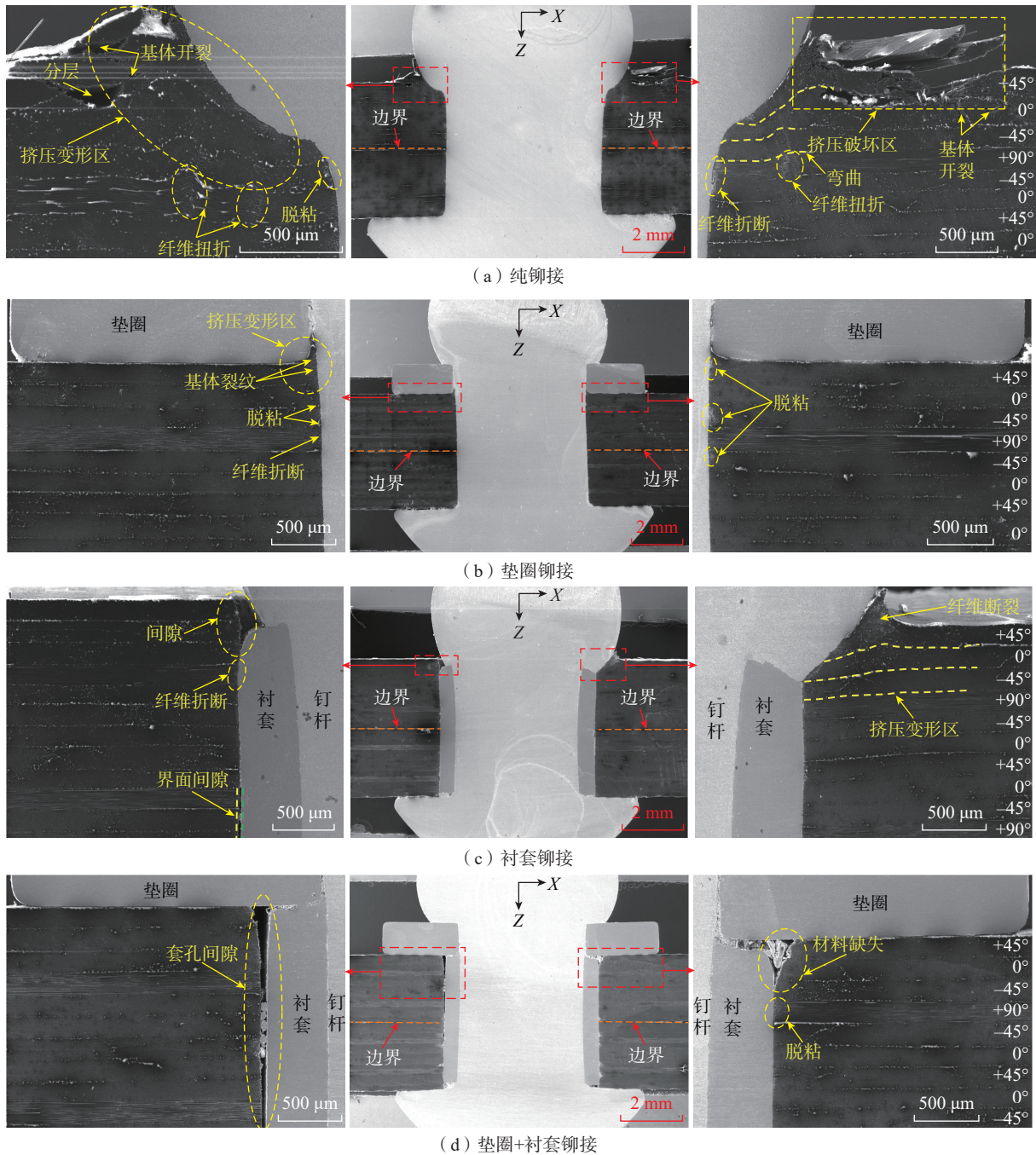


图9 不同铆接试件的典型截面内部损伤 SEM 图

Fig.9 SEM images of typical cross-sectional internal damage of different riveted specimens

铆接方法下,由于衬套类薄壁管件加工成本高、难度大,而本文所使用的衬套工艺简单,加工精度低,衬套上端面没有达到理想的平面度公差,所以铆钉出现了偏斜失稳现象,造成了铆头歪斜并在 CFRP 试件预制孔内成形的情况,对孔周造成挤压变形,因此孔壁出现了纤维断裂等损伤,这一结果解释了 2.1 节中衬套铆接在测量位置 1 处具有较大干涉量(2.934%)及衬套铆接 SDC 值大于垫圈铆接 SDC 值的原因。此外,虽然钉杆膨胀过

程中会迫使衬套膨胀,但衬套和孔壁有 0.1 mm 的初始间隙,且 TA1 材料的衬套具有一定的抗拉强度,对钉杆材料的流动有阻碍作用,所以中间部分衬套与孔壁有明显的界面间隙。

垫圈+衬套铆接接头的截面损伤很小,孔壁处材料有部分缺失,这可能与 CFRP 试件制孔精度有关,也有可能是在抛磨过程中由机器速度过快导致的。衬套与铆接孔壁之间有明显的套孔间隙,是因为垫圈减少了钉

杆流进孔内的材料,同时衬套限制孔内钉杆的膨胀,验证了2.1节中的负干涉结果。

综上所述,铆接接头损伤主要来源于镦头成形时对层合板表面的挤压破坏,增设垫圈可以减小铆接过程对复合材料表面造成的挤压损伤。衬套对提高铆接质量有一定的积极作用,但该铆接方法工艺要求严格,因此需要进一步对材料、几何参数等进行优化。

3 结论

本文系统研究了纯铆接、垫圈铆接、衬套铆接、垫圈+衬套铆接4种方法对碳纤维增强聚合物基复合材料(CFRP)损伤行为的影响,通过对比4组铆接接头的干涉水平和内部损伤,发现铆接过程中只在镦头侧增设垫圈产生的干涉波动最小,内部铆接损伤也最少,并且进一步分析了垫圈和衬套的作用机理,主要结论如下。

(1) CFRP纯铆接接头干涉量远超2%的标准,使用垫圈和衬套都能有效减小铆接干涉量,但是垫圈+衬套铆接接头的干涉量为负值,衬套与孔壁仍然为间隙配合,对提高连接强度无益。纯铆接、垫圈铆接和衬套铆接接头的最大干涉量均出现在位置1处,说明大干涉量的产生主要与镦头成形有关。

(2) CFRP试件的损伤主要来源是镦头成形时对层合板表面的挤压破坏,纯铆接接头层合板上表面有严重的挤压变形,衬套铆接接头上表面孔周出现了一侧挤压损伤,垫圈铆接和垫圈+衬套铆接都因垫圈的作用几乎没有产生损伤。

(3) 在铆接过程中垫圈能够有效限制钉杆的过分膨胀,使铆钉干涉分布更均匀,并且可以减小铆接过程对复合材料表面造成的挤压损伤。衬套对钉杆膨胀有一定限制作用,但由于工艺限制,衬套组试验结果出现了局部干涉量过大、镦头歪斜、试件表面孔周出现挤压变形等负面效果,因此,还需要进一步开展材料选择、尺寸优化及套孔初始间隙选取等方面的研究。

参考文献

- [1] 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(1/2):26-37.
- [2] 侯赤,万小鹏,黄河源,等.复合材料层合板多钉连接的紧固件连接柔度[J].航空学报,2018,39(3):221593.
- [3] ZHANG D W, ZHANG Q, FAN X G, et al. Review on joining

process of carbon fiber-reinforced polymer and metal: Methods and joining process[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(12): 3686-3696.

[4] CAO Y J, CAO Z Q, ZHAO Y, et al. Damage progression and failure of single-lap thin-ply laminated composite bolted joints under quasi-static loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 170: 105360.

[5] 魏景超,矫桂琼,闫照明,等.单面螺纹抽钉干涉配合复合材料连接件挤压强度研究[J].航空学报,2013,34(7):1627-1635.

WEI Jingchao, JIAO Guiqiong, YAN Zhaoming, et al. Bearing strength of composite joints interference-fitted with blind bolts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(7): 1627-1635.

[6] 夏平,刘兰.铆接铆钉分布压力的计算[J].现代制造工程,2003(12):99-100,108.

XIA Ping, LIU Lan. Distributed force calculation on rivets in riveted structure[J]. Machinery Manufacturing Engineer, 2003(12): 99-100, 108.

[7] 李奕寰.复合材料电磁铆接工艺研究[D].西安:西北工业大学,2013.

LI Yihuan. Study on composite electromagnetic riveting process[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013.

[8] 代瑛.电磁铆接技术在复合材料结构中的应用研究[D].西安:西北工业大学,2007.

DAI Ying. Research on application of electromagnetic riveting technology in composite structures[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.

[9] 宋丹龙,李原,骆彬,等.CFRP/Al复合构件无头铆钉压铆力建模与仿真分析[J].西北工业大学学报,2012,30(4):558-564.

SONG Danlong, LI Yuan, LUO Bin, et al. An effective mathematical modeling for and simulation analysis of flush rivet pressing force of CFRP/Al components[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(4): 558-564.

[10] 刘洋,庄蔚敏.碳纤维增强树脂复合材料和铝合金热自冲铆接工艺及接头力学性能[J].复合材料学报,2021,38(11):3563-3577.

LIU Yang, ZHUANG Weimin. Joining process and mechanical properties of warm self-piercing riveting for carbon fiber reinforced polymer and aluminum alloy[J]. Acta Materialia Composita Sinica, 2021, 38(11): 3563-3577.

[11] 丛志伟.碳纤维复合材料铆接损伤变形及力学性能分析[D].大连:大连理工大学,2021.

CONG Zhiwei. Analysis of riveting damage, deformation and mechanical properties of carbon fiber composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.

[12] CAO Z Q, CARDEW-HALL M. Interference-fit riveting technique in fiber composite laminates[J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10(4): 327-330.

[13] 魏誉豪,曹增强.复合材料结构装配中的干涉衬套强化工艺研究[J].航空制造技术,2019,62(15):63-67,74.

WEI Yuhao, CAO Zengqiang. Research on reinforcement of interference bushing in composite structure assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(15): 63-67, 74.

[14] XU G H, CHENG H, ZHANG K F, et al. Modeling of damage behavior of carbon fiber reinforced plastic composites interference

bolting with sleeve[J]. *Materials & Design*, 2020, 194: 108904.

[15] SAVAGE G. Carbon-carbon composites[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993.

[16] ASTM International. D5961/D5961M-13—Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2013.

[17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 民用飞机复合材料制件铆接要求: GB/T 38825—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Requirements of riveting connection in civil aircraft of composites: GB/T 38825—2020[S]. Beijing: Standard Press of China, 2020.

[18] 曹增强, 盛熙, 夏力农, 等. 高模量碳纤维复合材料的电磁铆接工艺研究[J]. *西北工业大学学报*, 2002, 20(2): 198–202.

CAO Zengqiang, SHENG Xi, XIA Linong, et al. On replacing bolting with electromagnetic riveting (EMR) in high modulus carbon fiber composites structure in P. R. China[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2002, 20(2): 198–202.

[19] 杨彦杰, 陈昶, 魏誉豪, 等. 手工电磁铆接过程及复合材料铆接质量研究[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(23/24): 43–51.

YANG Yanjie, CHEN Chang, WEI Yuhao, et al. Study on manual electromagnetic riveting process and riveting quality of composite materials[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(23/24): 43–51.

[20] 杨悦, 余路, 蒋红宇, 等. 铆接干涉量对疲劳寿命的影响分析[J]. *机械制造与自动化*, 2021, 50(2): 87–90.

YANG Yue, YU Lu, JIANG Hongyu, et al. The effects of interference-fit level on fatigue[J]. *Machine Building & Automation*, 2021, 50(2): 87–90.

[21] 冯东格. 基于电磁铆接的理想干涉配合铆接技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2012.

FENG Dongge. Research on ideal interference fit riveting technology based on electromagnetic riveting[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University, 2012.

[22] 党成龙. 用于锥形筒状结构铆接的半自动化电磁铆接系统研制[D]. 西安: 西北工业大学, 2019

DANG Chenglong. Development of semi-automatic electromagnetic riveting system for riveting of conical cylindrical structure[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University, 2019.

[23] WANG Y H X, CAO Z Q, ZHENG G, et al. Analysis of TB2 rivet forming quality and mechanical properties of thin sheet riveted joints based on different riveting methods[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 154: 107666.

(上接第 128 页)

[5] 杜志豪. TA15 钛合金多层结构 SPF/DB 工艺与评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

DU Zhihao. SPF/DB processing and assessment for multi-sheet structure of TA15 titanium alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[6] 李百洋. SPF/DB 宽弦空心叶片单元件弯曲疲劳性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

LI Baiyang. Research on bending fatigue behaviors of SPF/DB wide-chord hollow blade specimen[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[7] 刘杨, 李志强, 赵冰, 等. TA32 钛合金点阵结构成形与力学性能研究[J]. *锻压技术*, 2024, 49(7): 168–178.

LIU Yang, LI Zhiqiang, ZHAO Bing, et al. Study on forming and mechanical properties of TA32 titanium alloy lattice structure[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2024, 49(7): 168–178.

[8] 张钦差. 钛合金扩散连接质量超声检测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

ZHANG Qincai. Research on ultrasonic detection of diffusion bonding (DB) of titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[9] 何辰佳, 陈明和, 谢兰生. TC4 钛合金扩散连接工艺研究[J]. *热加工工艺*, 2017, 46(17): 64–68.

HE Chenjia, CHEN Minghe, XIE Lansheng. Study on diffusion bonding process of TC4 titanium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(17): 64–68.

[10] 赵冰, 杨毅, 李志强, 等. 钛合金空心点阵超塑成形 / 扩散连接成形工艺和性能研究[J]. *航空制造技术*, 2023, 66(9): 24–35.

ZHAO Bing, YANG Yi, LI Zhiqiang, et al. Research on SPF/DB process and properties of titanium alloy hollow lattice[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2023, 66(9): 24–35.

[11] CALVO F A, GÓMEZ DE SALAZAR J M, UREÑA A, et al. Diffusion bonding of Ti-6Al-4V alloy at low temperature: Metallurgical aspects[J]. *Journal of Materials Science*, 1992, 27(2): 391–398.

[12] SANDERS D G, RAMULU M. Examination of superplastic forming combined with diffusion bonding for titanium: Perspective from experience[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2004, 13(6): 744–752.

[13] LI Z Q. Superplastic forming/diffusion bonding technology of titanium alloys[M]. Springer Nature: Singapore, 2023.

通信作者: 霍鲁斌, 副教授, 研究方向为复合材料结构冲击失效分析、复合材料与金属材料连接技术。

(责编 向阳)

通信作者: 韩秀全, 研究员, 研究方向为超塑成形 / 扩散连接。

(责编 向阳)