铆钉结构对CFRP/钛合金摩擦铆焊工艺及接头力学行为的影响

朱 峰[1,2] 余飞龙[1,2] 周恩涛[3] 万海浪[1,2] 马运五[1,2*] 葛恩德[3]
赵亦希[1,2] 李永兵[1,2]

1.上海交通大学机械系统与振动全国重点实验室，上海，200240
2.上海交通大学上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室，上海，200240
3.中国商飞上海飞机制造有限公司，上海，201324

摘要：针对预制孔复合材料与钛合金叠层构件，提出基于半空心铆钉的复材单层制孔摩擦铆焊（C-PDFR）工艺：驱动钛合金铆钉进入CFRP板材预制孔，铆钉高速旋转与钛合金板材相互作用，实现管状铆钉体与板材的摩擦焊连接，并通过钉帽锁紧CFRP板材，实现CFRP与钛合金的高性能连接。研究了外倾型、对称型、内倾型铆钉尖端结构对摩擦焊过程中材料流动方向、铆钉/钛板界面焊合质量的影响规律，分析了典型接头的微观组织特征、硬度分布及拉剪性能。结果表明，铆钉/钛板界面形成了细晶搅拌区，在铆钉的旋转进给作用下，细晶区形成金属飞边，并向铆钉内外侧流动。采用外倾型或对称型铆钉时，大量金属飞边流向铆钉内部，造成界面焊合质量降低。而内倾型铆钉能够有效抑制金属飞边向内部流动，进而改善界面焊合质量。外倾型铆钉获得的接头在拉剪测试中呈现低强度界面失效，而内倾型铆钉的接头呈现高强度铆钉剪切断裂，拉剪峰值力和能量吸收分别提高了137.0%和159.1%。

关键词：复材单层制孔摩擦铆焊；碳纤维增强复合材料；钛合金；半空心铆钉；失效机理
中图分类号：TG44
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.026 **开放科学（资源服务）标识码（OSID）**：

Effect of Rivet Structure on Friction Riveting Process and Mechanical Behavior of CFRP/Titanium Alloy Joints

ZHU Feng[1,2] YU Feilong[1,2] ZHOU Entao[3] WAN Hailang[1,2] MA Yunwu[1,2*] GE Ende[3]
ZHAO Yixi[1,2] LI Yongbing[1,2]

1.State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240
2.Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-Walled Structures, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240
3.COMAC Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai, 201324

Abstract: A C-PDFR process was proposed for pre-drilled CFRP/titanium alloy stacks using semi-tubular rivets. A titanium rivet was driven into a CFRP pre-hole, then rotated at high speed against a titanium alloy plate to achieve friction welding between the tubular rivet and the plate, while the rivet head locked the CFRP, forming high-performance joints. The effects of outward-inclined, symmetrical, and inward-inclined rivet tips on material flow direction and rivet/Ti-plate interfacial bonding quality were investigated. The microstructure, hardness distribution, and tensile-shear performance of typical joints were analyzed. The results show that a fine-grained stirred zone is formed at the rivet/Ti-plate interface. Under the rotational feed of the rivet, metal flash is generated from the stirred zone and flows toward both the inner and outer sides of the rivet. Outward-inclined/symmetrical rivets cause significant inward flash flow, degrading bonding, whereas inward-inclined rivets suppress inward flow, enhancing bonding quality. Tensile-shear tests demonstrate low-strength interfacial failure for outward-inclined rivets versus high-strength rivet shear fracture for inward-inclined variants, with peak force and energy absorption increasing by 137.0% and 159.1%, respectively.

Key words: composite-pre-drilled friction riveting (C-PDFR); carbon fiber reinforced polymer (CFRP); titanium alloy; semi-tubular rivet; failure mechanism

收稿日期：2025-08-17
基金项目：国家自然科学基金（52305393，52025058）

0　引言

民用大飞机作为“大国重器”之一，其自主设计与制造是我国民用航空工业发展的重要里程碑，推动着民航工业产业链的全面快速发展，释放出巨大的经济价值。面向下一代宽体客机，综合考虑轻量化、承载等需求，其机身、机翼、方向舵等部件将采用碳纤维增强复合材料（carbon fiber reinforced polymer，CFRP）与钛合金的混合结构[1-2]。因此，实现CFRP与钛合金的高性能连接是保障飞机结构安全服役的关键。

航空薄壁结构装配制造主要依赖铆接与螺栓连接，二者均需预制孔。以干涉配合铆接为例，制孔节拍约15～20秒/钉，生产效率低，且制孔易产生毛刺、碎屑等多余物，需额外清理以保证服役安全。CFRP/TC4叠层制孔时热量积聚、难散发，容易造成材料烧伤，制孔过程先后经历CFRP脆性断裂、叠层界面混合去除和钛合金塑性变形，产生复杂耦合效应，影响孔质量、装配精度和疲劳寿命。特别是复合材料与钛合金去除模式差异大，工艺参数需从高转速低进给（5000～6000 r/min、0.05～0.10 mm/r）突变为低转速高进给（400～500 r/min、0.10～0.30 mm/r），引发切削力剧烈波动和不良振动，导致孔出入口缺陷、孔壁损伤、孔径一致性差及刀具严重磨损[3-8]。

为解决上述问题，研究者提出了液态CO_2内冷钻削（可降低钻削温度，孔径偏差小于0.5%且CFRP层无分层）和DLC-Bn涂层钻头（降低推力扭矩、减少磨损和崩刃）等方案[9-10]。为避免制孔，胶接和激光连接等无孔连接技术受到关注。胶接受环境制约大、固化时间长，影响成形效率[11-12]；激光焊接热输入小、热变形小，适合连接金属与复合材料[13-14]。例如，CFRP与TC4激光焊接可获得机械互锁，在650 W、10 mm/s时剪切力达926 N，但界面温度需精确控制（峰值约440℃、熔融时间9 s且分布均匀），否则易出现结合不良或CFRP热损伤[15-16]。

当前CFRP/TC4主流连接工艺的核心挑战可归纳为：①叠层制孔过程中切削力波动与振动导致的CFRP纤维撕裂和热损伤；②各连接工艺的固有缺陷，包括机械连接引入的机械/热损伤、胶接的稳定性与效率不足，以及热连接易致CFRP热损伤，目前该类技术主要适用于热塑性复合材料。

本文针对钛合金与CFRP连接存在的挑战，采用单层复材制孔摩擦铆焊（composite-predrilled friction riveting，C-PDFR）工艺，通过轻量化半空心铆钉穿过复材预制孔并高速旋转产生摩擦热，使得铆钉与钛合金工件表面局部软化而产生塑性流动实现界面固相焊合，并通过铆接实现CFRP上层板与TC4下层板的紧密连接，形成铆接-摩擦焊复合连接接头。通过研究不同铆钉结构对接头宏微观形貌与显微硬度分布的差异，揭示铆钉结构对C-PDFR接头质量的影响规律。在此基础上，比较不同铆钉结构对接头静态力学性能以及失效模式的影响，阐明不同铆钉结构下C-PDFR接头的强化机理。

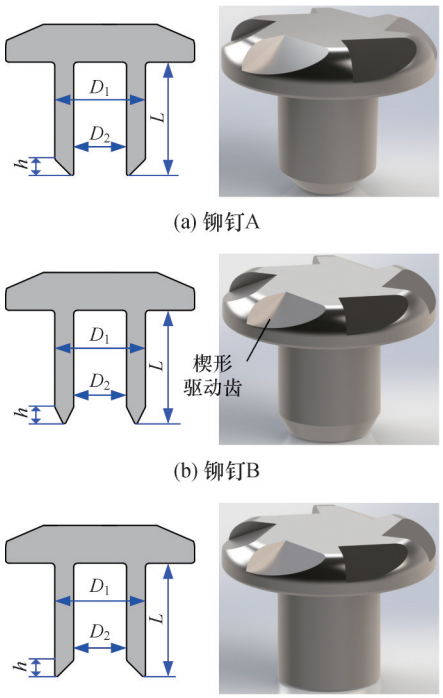
1　试验方法

1.1　试验材料

试验所用材料为各4 mm厚的CFRP层合板和TC4钛合金板材；CFRP板材由东丽T300碳纤维和环氧树脂制成，采用±45°铺层，树脂含量为40%，铺层层数为32层。所用半空心铆钉包括铆钉帽与铆钉体两部分。其中铆钉帽主要承担传递扭矩与轴向压力的作用，其直径为10 mm，高度为2 mm，钉帽上端有6个楔形驱动齿，用于与驱动结构啮合，实现对铆钉高速旋转与轴向进给的稳定驱动。

铆钉的外径设计参考现有民用大飞机蒙皮壁板以及对接带板连接的钻铆工况孔径，设计为外径D_1=4.8 mm，内径D_2=2.8 mm。考虑到CFRP层合板板厚为4 mm，以及钛合金摩擦焊形成可靠连接所需要消耗的材料体积，经过理论计算，设计铆钉钉腿长度L=6 mm。钉帽部分的楔形齿的作用主要体现在定位与传递扭矩两方面，楔形驱动齿结构由竖直方向与倾斜方向两个平面组成，其中竖直平面与驱动机构啮合起到传递扭矩的作用，而楔形驱动齿的斜面与钉帽顶端的水平面共同作用承担铆钉的定位作用。

铆钉尖端结构是影响铆钉/钛板相互作用以及摩擦产热的关键结构。考虑到尖端结构对钛合金摩擦焊过程材料流动方向的引导作用，根据铆钉尖端顶点的不同位置设计了3种铆钉，即铆钉A（外倾型）：尖端顶点在铆钉内壁；铆钉B（对称型）：尖端顶点在铆钉内外壁之间；铆钉C（内倾型）：尖端顶点在铆钉外壁。3种铆钉的外观形貌与几何尺寸如图1所示，铆钉尖端结构的高度h均为1 mm。半空心铆钉采用TC4钛合金制备，质量约为0.87 g。CFRP层合板与钛合金板材及钛合金铆钉的化学成分与力学性能如表1和表2所示。试验所用铆钉与钛板母材的扫描电子显微



(a) 铆钉A

(b) 铆钉B

(c) 铆钉C

图1 不同铆钉结构的外观形貌与几何尺寸

Fig.1 The appearance and dimension of different rivets

表1 TC4钛合金材料的化学成分(质量分数)

Tab.1 The chemical composition of TC4 titanium alloy

(mass fraction) %

材料牌号	w(Ti)	w(Al)	w(V)	w(Fe)	w(Si)	w(C)	w(N)	w(H)	w(O)
TC4	余量	5.5~6.8	3.5~4.5	0.30	0.10	0.10	0.05	0.015	0.015

表2 CFRP-T300复合材料及TC4钛合金的力学性能

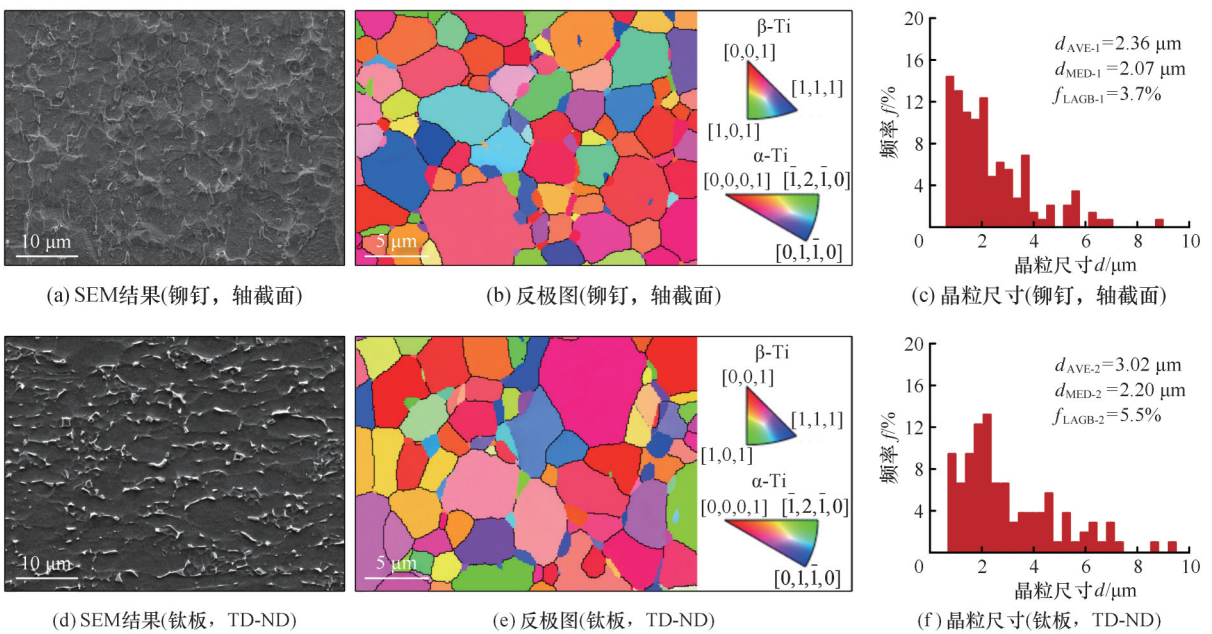
Tab.2 The mechanical properties of CFRP-T300 and TC4 titanium alloy

材料	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa	延伸率/%
CFRP-T300	230		911	2.0
TC4(板材)	110	860	996	12.0
TC4(铆钉)	110	825	932	18.0

镜(SEM)和电子背散射衍射(EBSD)结果如图2所示。图中TD-ND表示垂直于轧制方向的板材横截面。

1.2 工艺方法及试验设备

单层复材制孔摩擦铆焊C-PDFR的工艺过程如图3所示,主要包括定位、摩擦焊、保压、释放



(a) SEM结果(铆钉,轴截面) (b) 反极图(铆钉,轴截面) (c) 晶粒尺寸(铆钉,轴截面)

(d) SEM结果(钛板,TD-ND) (e) 反极图(钛板,TD-ND) (f) 晶粒尺寸(钛板,TD-ND)

图2 TC4母材的SEM与EBSD结果

Fig.2 SEM and EBSD results of TC4 base material

4个阶段。在定位阶段,驱动机构与铆钉帽上表面的楔形齿进行啮合,驱动机构按照设定进给速度f_0进行轴向进给,使铆钉能够无干涉地穿过复合材料板的预制孔,并靠近待连接钛合金板材的上表面;在摩擦焊阶段,铆钉接触钛合金板材上表面后,按照转速n、进给速度f_1向下运动进给,与钛合金板材发生搅拌摩擦,在界面处产生大量摩擦热,使接触区材料受热软化并产生塑性流动,进而在铆钉与钛合金界面处形成固相焊合区;轴向进给达到预定的进给深度χ后,驱动机构停止旋转与进给运动,驱动头在当前位置保压1 s;最后,驱动机构进行反向进给,回至原位,压边圈释放,形成铆接-摩擦焊复合接头。

根据前期对工艺参数的探索,确定了实现可靠连接的工艺参数组合:定位阶段的进给速度f_0=0.2 mm/s,摩擦焊阶段的进给速度f_1=10 mm/s、

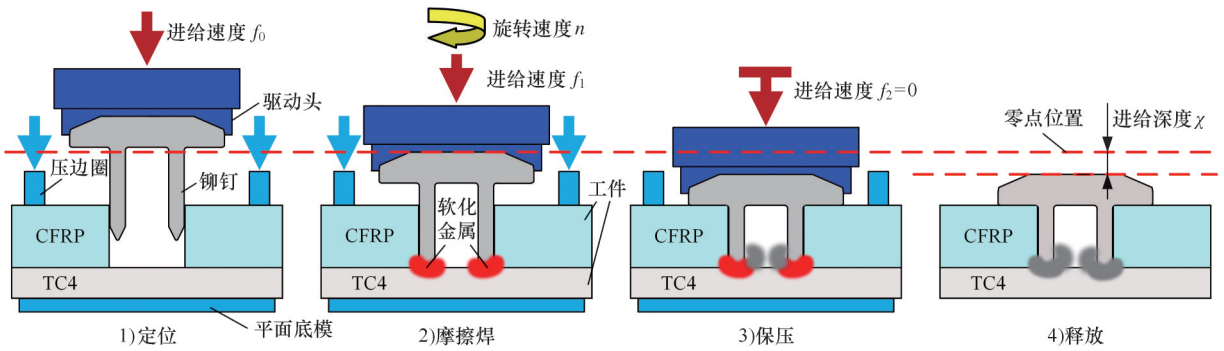
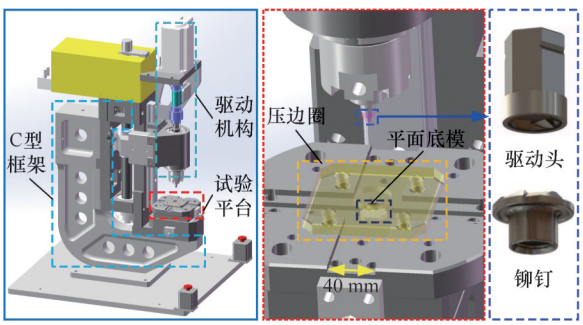


图3　C-PDFR工艺过程示意图

Fig.3　Schematic diagram of C-PDFR process

旋转速度 n=1800 r/min；进给深度 χ=2.0 mm。

上述所有工艺步骤均在C型框架摩擦铆焊实验系统上实现，如图4所示。设备主要由C型框架、驱动机构和试验平台三部分组成，其中试验平台和驱动机构分别位于C型框架的两端开口处，试验过程中由驱动轴驱动铆钉进行高速旋转与轴向进给复合运动[17]。试验平台包括宽度为40 mm的矩形槽（用于限制工件的平面运动）、平面底模（用于保证接头底部平整），以及矩形压边圈（用于提供足够的预压力）；驱动机构与两台伺服电机相连，实现铆钉的周向旋转与轴向进给运动。同时，在设备上共安装了3个传感器。其中，压力传感器内置于驱动轴上方，其量程为50 kN，精度为0.25 kN；扭矩传感器安装在主轴和旋转电机输出端之间，以实时获得工艺过程中的主轴扭矩数据，其量程为50 N·m，精度为0.05 N·m；铆钉的进给位移采用光栅尺测量，其量程为150 mm，分辨力为0.005 mm，上述传感器的采样频率均为2.0 kHz[18]，满足工艺过程中铆钉旋转、进给运动的稳定控制要求。



(a)整体设备示意图　(b)试验平台与驱动结构示意图

图4　C型框架摩擦铆焊实验系统

Fig.4　Friction self-piercing riveting experimental system

1.3　接头质量评价方法

本研究主要从铆焊接头的宏微观形貌、显微硬度、力学性能3个方面对接头的连接质量进行评价。使用水刀沿铆钉轴线切割C-PDFR接头后，对试样进行镶嵌、研磨与抛光，使用徕卡金相显微镜Leica DM6M观测接头截面宏观形貌，并用钛合金金相腐蚀液进行金相腐蚀后，使用金相显微镜观察界面连接处的微观形貌差异。

图5所示为C-PDFR接头的宏观形貌评价指标，主要为：金属飞边形貌、固相焊合面积、铆钉剩余高度。其中铆钉剩余高度 H_{res} 为铆钉钉帽下端与TC4板材上端的平均间距；固相焊合面积 S_{weld} 通过等效圆环面进行近似计算：

$$S_{weld}=\frac{\pi}{4}(D_{out}^2-D_{in}^2)$$

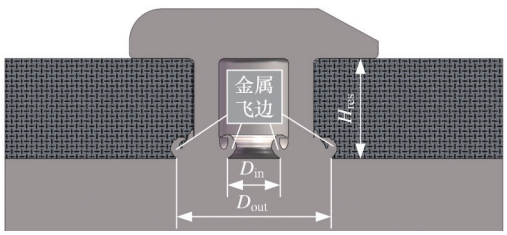


图5　C-PDFR接头的几何特征示意图

Fig.5　The schematic showing geometrical features of C-PDFR

采用分析型高分辨扫描电镜MIRA3对试样进行EBSD与SEM测试。试样经磨抛、振动抛光去除表面残余应力后进行EBSD测试，具体参数为：加速电压20.00 kV、步长0.5 μm、放大倍数10 000，对不同接头的各区域进行EBSD表征。试样进行磨抛并使用Kroll试剂（HF∶HNO_3∶H_2O=1∶2∶97）进行金相腐蚀后再进行SEM测试，具体参数为：加速电压5.0 kV、放大倍数5000。

采用显微硬度仪Wilson VH1102对磨抛后的试样进行维氏硬度测试，其中复合材料不进行硬度测试，钛合金板材与铆钉的测试载荷为2.94 N（0.3 kgf），硬度点阵的间隔为0.20 mm，与试样边缘的距离为0.15 mm。

接头的拉剪性能测试试样如图6所示，复合材料与钛合金工件试样尺寸均为130 mm×38 mm×4 mm，将两片工件进行搭接，搭接长度为38 mm。复合材料层合板在搭接区域的中心进行

预制通孔，孔径为4.9 mm；铆钉与预制孔满足同轴配合关系，即铆焊区域为搭接区域中心位置。拉剪试验中，为了避免由于工件轴线与所受拉力不平行所产生的旋转扭矩对实验结果产生影响，在两片工件的夹持端放置一对垫片，垫片尺寸为38 mm×38 mm，两块垫片厚度均为4.0 mm。力学性能试验在SUNS UTM5504X电子试验机上进行，拉伸速率为2.0 mm/min，每组参数下重复测试3次。

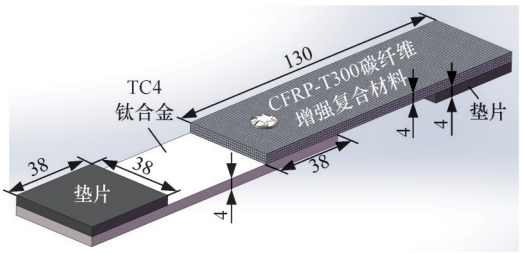


图6 接头力学性能拉剪试样尺寸

Fig.6 The sample size of tensile-shear specimens for joint mechanics performance testing

2 结果与讨论

2.1 接头宏观形貌

为了探究不同的铆钉体尖端结构对铆焊接头的宏观形貌产生的影响，设置进给深度χ分别为1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm，观察不同铆钉结构对应的飞边形貌和流动行为的差异（图7），计算其固相焊合面积，并测量不同接头的铆钉剩余高度，如表3所示。如图7a～图7c所示，当进给深度为1.0 mm时，钉体尖端的倾角部分刚好全部消耗完，铆钉A所产生的金属飞边向铆钉内部流动，铆钉B产生的飞边向两侧均匀流动，铆钉C所产生的金属飞边向铆钉外部流动。当进给深度为1.5 mm与2.0 mm时，材料流动整体呈向内外两侧均匀流动，但由于第一阶段材料流动造成的影响，其飞边最终形貌呈显著差异，如图7g～图7i所示。

图8展示了铆钉结构对焊合面积的影响，结果表明：随着进给深度加深，3款铆钉对应的固相焊合面积均呈增大趋势，铆钉A、B、C对应的焊合面积分别为21.16 mm^2、21.39 mm^2、22.99 mm^2。由于外部复合材料的限制与铆钉材料流动方向的影响，随着进给深度的加深，铆钉C的固相焊合面积增量最小，而最终接头的固相焊合面积则是铆钉C最大。

2.2 接头微观形貌

3种铆钉结构的接头腐蚀后的局部放大图见图7j～图7l，可以观察到3种接头固相焊合界面附近的微观组织分区规律相似，但各区域的尺寸与

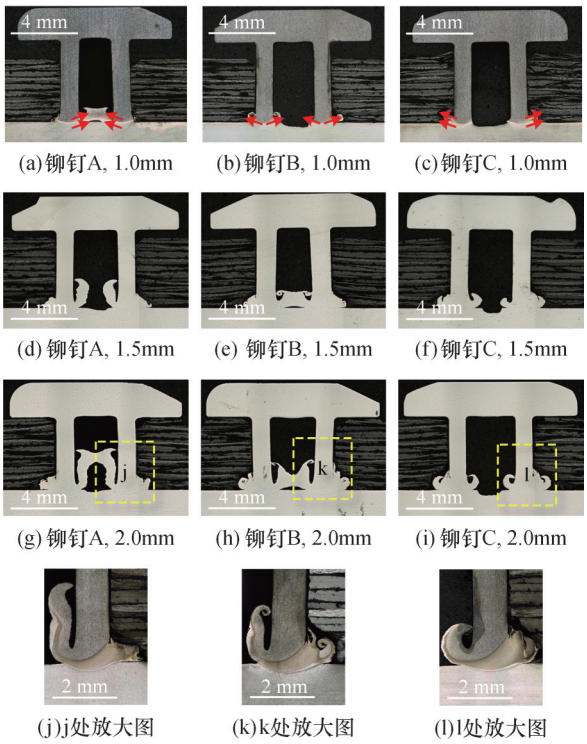


图7 不同结构铆钉的接头金相宏观形貌对比

Fig.7 The comparative macro-metallography for different riveting joints

表3 不同结构铆钉接头的铆钉剩余高度

Tab.3 The residual joint height of different riveting joints

铆钉类型	铆钉剩余高度H_{res}		
	χ=1.0 mm	χ=1.5 mm	χ=2.0 mm
铆钉A	5.21 mm	4.71 mm	4.24 mm
铆钉B	5.13 mm	4.59 mm	4.19 mm
铆钉C	5.10 mm	4.55 mm	4.17 mm

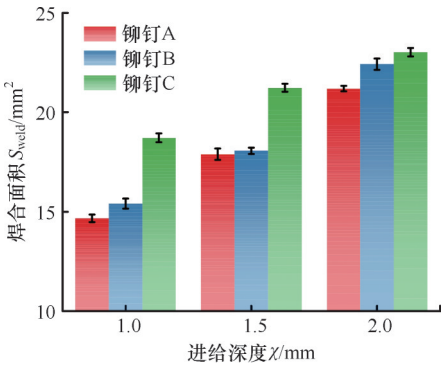


图8 不同结构铆钉接头的焊合面积

（χ=1.0，1.5，2.0 mm）

Fig.8 The welding area for different riveting joints

（χ=1.0，1.5，2.0 mm）

晶粒细化程度存在显著差异，可分为若干区域。以铆钉B为例，从上到下可分为：铆钉母材区、Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区、Ⅳ区、工件母材区，Ⅴ区与Ⅵ区分别为铆钉内部与外侧金属飞边的微观形貌，如图9所示。

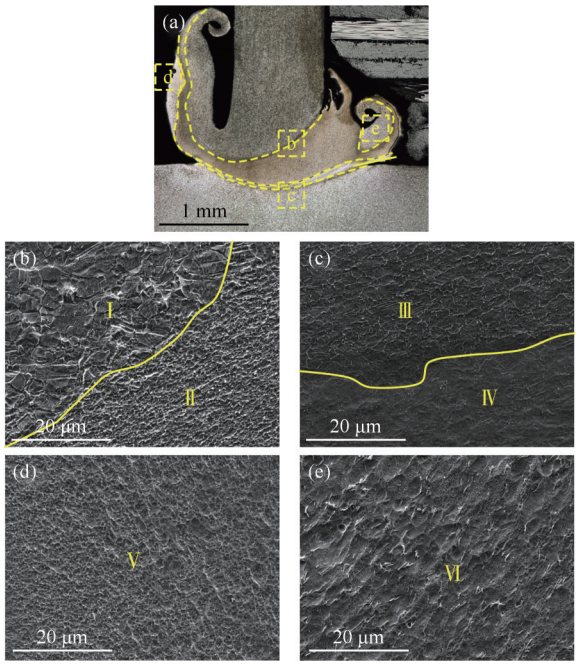


图9　C-PDFR接头的界面连接特征(铆钉B)

Fig.9　The interface joining characteristics of C-PDFR joint(rivet B)

综合分析3种接头的微观形貌，结果表明：Ⅰ区至Ⅱ区为铆钉体与金属飞边过渡的区域，其形貌存在明显边界，软化铆钉形成的金属飞边与铆钉体之间的微观形貌存在明显差异，这是因为在热力耦合作用下晶粒变形引发了动态再结晶，使得金属飞边(Ⅱ区)发生了晶粒细化。此外，靠近铆焊界面的铆钉体部分(Ⅰ区)所呈现的微观形貌与铆钉母材微观形貌存在差异。Ⅲ区为铆焊结合界面下方的区域，在摩擦铆焊的热力作用下，发生了晶粒细化，但由于塑性流动与动态再结晶程度不同，其细化程度不如Ⅱ区；而Ⅳ区基本不发生塑性流动，仅受热循环作用发生晶粒长大与粗化，并且相比于工件母材区，Ⅳ区未观察到第二相晶粒；Ⅴ区与Ⅵ区为金属飞边向外延展的区域，两者都存在明显的晶粒细化，可以观察到Ⅴ区晶粒基本都较为细小，而Ⅵ区夹杂少部分粗大晶粒。

图10所示为Ⅰ区至Ⅵ区的EBSD检测结果，不同区域的晶粒尺寸与小角度晶界占比如表4所示。结合图2的母材EBSD结果，从平均晶粒尺寸及EBSD表征可以发现以下特征：Ⅰ区晶粒尺寸与分布规律和铆钉母材类似，平均晶粒尺寸仅相差2.5%，该区在铆焊过程中经历高温变形但未达到动态再结晶温度，晶粒发生动态回复，使小角度晶界占比较母材有所增加；Ⅱ区晶粒明显细化，平均晶粒尺寸较铆钉母材减小60.6%，较工件母材减小69.2%，细小晶粒占尺寸分布的大部分，在热力耦合作用下该区发生动态再结晶，其小角度晶界占比较Ⅰ区有所降低；Ⅲ区与Ⅳ区平均晶粒尺寸较大，分别为工件母材晶粒尺寸的88.7%和108.0%，因不完全动态再结晶，小角度晶界占比显著增加；Ⅴ区与Ⅵ区的晶粒尺寸和分布规律与Ⅱ区基本类似，比较而言，Ⅴ区基本为细化晶粒，而Ⅵ区有少部分区域未发生完全动态再结晶，导致少量晶粒长大，表现为Ⅵ区平均晶粒尺寸略高于Ⅴ区。

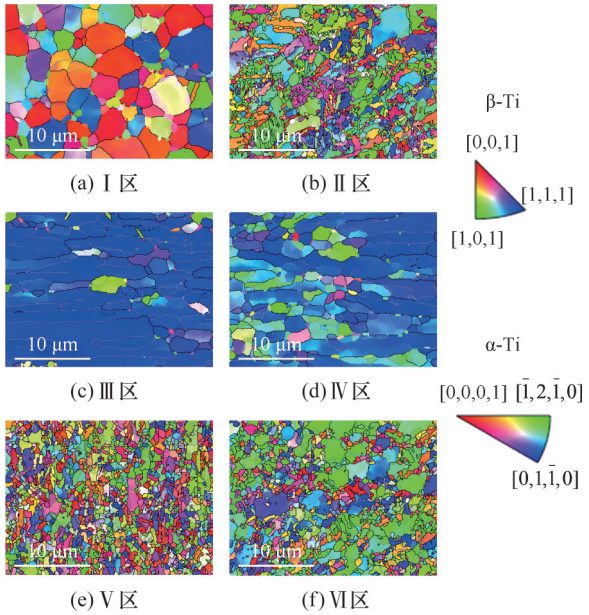


图10　铆钉B的接头各区域EBSD结果

Fig.10　EBSD results of different sections for rivet B joint

表4　不同区域的晶粒尺寸以及小角度晶界占比(铆钉B)

Tab.4　Grain size and low-angle grain boundary fraction in different regions(rivet B)

区域	平均晶粒尺寸/μm	晶粒尺寸中位数/μm	小角度晶界占比/%
Ⅰ区	2.30	1.65	22.9
Ⅱ区	0.93	0.65	14.3
Ⅲ区	2.68	1.48	65.2
Ⅳ区	3.26	2.35	49.4
Ⅴ区	1.07	0.92	19.0
Ⅵ区	1.16	0.87	23.1

综合上述微观形貌的分析，并结合图9的结果可以发现，摩擦铆焊过程所产生的金属飞边特别是铆钉内腔金属飞边，晶粒细化程度更高，而由于铆钉结构的不同，流进铆钉内腔的金属飞边存在明显差异。铆钉C在铆钉进给的过程中，铆钉体材料向外部流动，并由于复合材料的限制，铆焊形成晶粒细化的金属飞边基本上聚集在焊合界面附近，而铆钉A与铆钉B会引导部分材料向内部流动，导致晶粒细化的部分没有完全作用于铆焊结合界面。

2.3 接头显微硬度分布

图11为不同结构铆钉成形接头的显微硬度云图，可以观察到每个接头的硬度分为铆钉母材区(BM1)、工件母材区(BM2)、热影响区(HAZ)、热机械影响区(TMAZ)、搅拌区(SZ)5个区域。其中BM1的平均硬度约为340 HV，BM2的平均硬度约为310 HV。

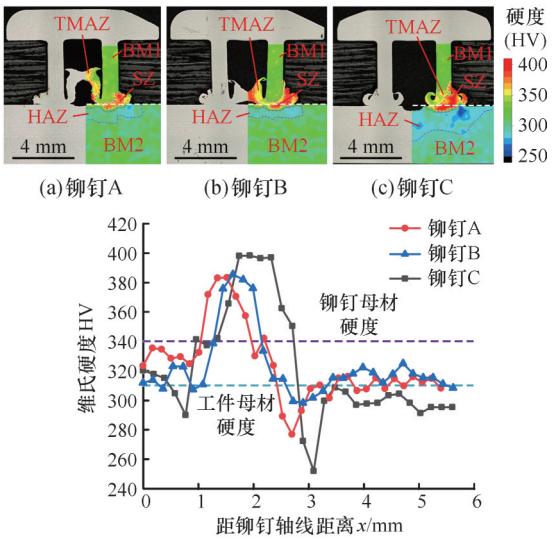


图11 不同铆钉接头的硬度分布特征以及影响区域划分

Fig.11 The hardness characteristic and affected zone partition of different rivet joints

SZ分布在摩擦铆焊界面附近，由于铆钉进行旋转-进给复合运动，材料受到铆钉的剧烈搅拌作用而发生极大的塑性流动，晶粒在高温和剧烈塑性变形的共同作用下发生完全动态再结晶，形成超细等轴晶，综合表现出整个接头的硬度最高区域。TMAZ紧邻SZ，材料进行塑性流动并在热循环的作用下发生动态再结晶，但其塑性变形程度不足，部分区域仅发生不完全动态再结晶，出现晶粒长大，硬度高于母材但略低于SZ；HAZ内材料不发生塑性流动仅受到热循环的作用，原始等轴α相发生动态回复以及球化，晶粒粗化导致晶界总面积减少，削弱晶界强化作用致使硬度下降，低于母材，由于铆钉体积小、铆焊时间短，铆钉区几乎不存在仅受热影响的HAZ(图9、图10)，即HAZ主要出现在工件一侧。

通过比较3种接头的硬度分布云图可以观察到：铆钉A与铆钉B对应接头的HAZ比较窄，而铆钉C的范围更大，这是因为铆钉C接头的成形过程中产生的发热量更大，使得工件受到的热影响更为显著，从而导致工件较大范围的区域发生不完全动态再结晶，进而形成范围更大的HAZ。铆钉C所形成的接头中，SZ径向较为聚集，集中在铆钉体附近，使得连接部分的平均硬度较高。

结合图11d可以发现，在固相焊合界面处高于铆钉母材硬度的区域，铆钉A接头为0.92 mm，铆钉B接头为0.88 mm，铆钉C接头为1.46 mm，即铆钉C接头硬度高于铆钉母材的范围，相比其他两种铆钉有显著增加。这是因为铆钉C所形成的接头中，铆钉结构引导软化材料向外部流动，受到复合材料板限制，高硬度材料集中在焊合界面附近，而铆钉A与铆钉B所形成的接头中软化材料向铆钉内腔流动的部分没有受到限制，随着进给加深，铆焊产生的高硬度材料逐渐脱离焊合界面，致使界面处高硬度区域占比减小。另外，根据硬度结果与图9b中的SEM结果发现，BM1与TMAZ之间观察不到明显的HAZ区域，微观形貌从母材部分突变到晶粒细化的动态再结晶区域，这是因为铆钉在进行高速旋转-进给复合运动，在初步阶段下铆钉母材与金属飞边之间形成的HAZ向两侧挤压，在热力作用下发展为TMAZ与SZ，使得铆钉部分的热影响区窄到几乎观测不到，从而形成从BM1到TMAZ的突变。

2.4 接头力学性能

不同铆钉结构所形成的铆焊接头的拉剪试样断口截面如图12所示，结果表明：铆钉A与铆钉B对应接头的断裂失效模式同为界面失效，判断为在拉剪过程中焊合界面与TC4板材之间发生断裂；而铆钉C对应接头呈铆钉断裂，并且断裂处钉壁发生明显弯曲，判断其在拉剪过程中金属飞边与铆钉分界处萌生裂纹，随着拉剪位移增加，裂纹沿着钉壁扩展并伴随着铆钉结构的弯曲变形，最终形成断口。

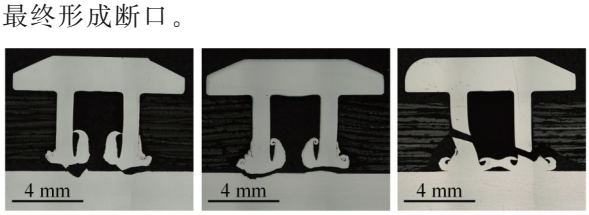


图12 不同铆钉接头的拉剪失效截面

Fig.12 The tensile-shear fracture section of different rivet joints

图13展示了不同铆钉结构在拉剪试验下的接头断裂表面，其中铆钉A与铆钉B为界面断裂失效，铆钉C为铆钉剪断失效。铆钉A与铆钉B的断裂面能够观察到典型的河流状(b区、d区)花纹解理台阶的准解理断裂形貌，判断这两种接头的断裂模式为脆性断裂。而铆钉C的断裂面为以河流状花纹的解理台阶为主体的准解理断裂形貌并带有少量等轴韧窝的韧性断裂形貌(f区)，判断

铆钉C所形成接头的断裂模式为以脆性断裂为主的脆韧性断裂。

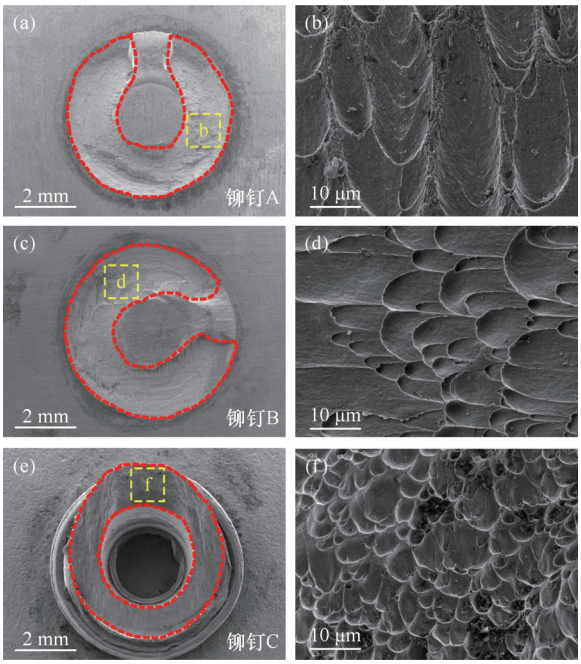


图13　不同铆钉接头的断口SEM图像

Fig.13　The SEM images of fracture surface for different rivet joints

图14所示为接头拉剪试验结果，结果表明，不同铆钉结构对应的拉剪性能存在明显差异，可以观察到：铆钉A和铆钉B接头的拉剪曲线较为相似，在达到拉剪峰值力后曲线陡降至零，拉剪力峰值也比较接近，为6.85 kN和7.60 kN；铆钉C接头的拉剪曲线在达到峰值拉剪力之后，拉剪力发生突变后进行一段相对较为平稳的下降阶段而后发生陡降，峰值力为9.69 kN。

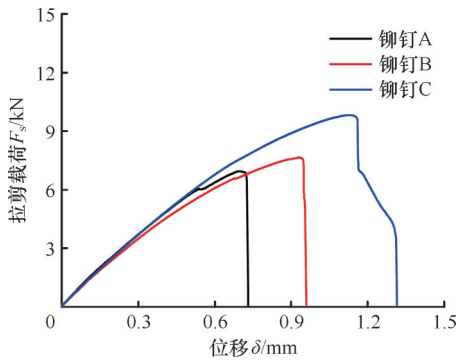


图14　不同铆钉接头的拉剪载荷-位移曲线

Fig.14　The tensile-shear load-displacement curves of different riveted joints

图15展示了不同铆钉结构所形成的铆焊接头的峰值拉剪力、断口面积、拉剪强度以及断裂吸能，结果表明，铆钉A的接头拉剪强度为306.5 MPa，铆钉B的接头拉剪强度为314.7 MPa（铆钉A的102.7%），铆钉C的接头拉剪强度为726.2 MPa（铆钉A的236.9%）。其中，断口面积不同于图8所示的焊合面积，为拉剪试验中实际失效界面所测量出的面积，根据SEM扫描结果，测量断口在垂直于工件表面方向上的投影面积所得，如图13a、图13c、图13e中红色虚线所围成的区域所示。

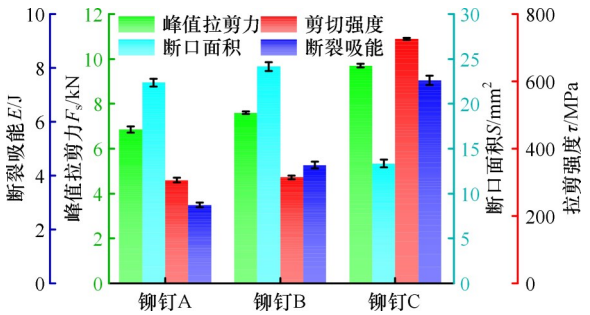


图15　不同铆钉接头的峰值拉剪力、断口面积、拉剪强度以及断裂吸能

Fig.15　The tensile-shear peak load, fracture surface area, tensile-shear strength, and fracture energy absorption of different rivet joints

结果表明：铆钉A与铆钉B在峰值拉剪力、断口面积、拉剪强度三方面并没有形成明显差异。铆钉C形成的摩擦铆焊接头的峰值拉剪力有显著增加；由于失效模式的差异，铆钉C的接头呈铆钉断裂，而铆钉A与铆钉B的断口为焊合截面，则铆钉C的断口面积相比于其他两种有明显减小，进一步导致铆钉C的拉剪强度相较于其他两种铆钉接头的拉剪强度有极大提升；并且由于铆钉C的断裂模式为铆钉剪断，这意味着铆钉C接头截面结合所提供的拉剪强度更大，使得承载过程的危险界面转移至铆钉体。

铆钉C的断口在铆钉体处而不在焊合界面处，这是铆钉C拉剪强度更高的具体表现。接头失效的断裂模式受到界面连接强度的影响：在界面连接强度较低时，界面失效模式主要表现为金属飞边的断裂而造成的界面失效，断裂位置通常为上下板分界处；而随着界面焊合强度的增大，当它超过铆钉体的拉剪强度时，接头的失效模式表现为铆钉体的断裂，初始裂纹萌生位置为铆钉体与金属飞边的分界处，裂纹进一步发展导致铆钉体断裂。结合3种铆钉的接头力学性能以及各自的断裂模式发现，铆钉A和B的接头拉剪强度较小，其失效机理为第一种模式。而铆钉C的接头拉剪强度较高，超过了铆钉体的拉剪强度，进而导致其断裂模式偏向于第二种模式，宏观体现为其断裂模式以及位置与其他两款铆钉显著不同。

此外，不同铆钉结构的断裂吸能体现出较为明显的差异，铆钉A吸能为2.91 J，铆钉B吸能为

4.39 J，铆钉C吸能为7.54 J。结果表明，相较于铆钉A，铆钉B的吸能提高了50.9%，铆钉C提高了159.1%。随着铆钉结构更多引导摩擦软化材料向外部流动，接头的断裂吸能有明显改善。

综合分析不同结构铆钉接头的宏微观形貌、硬度分布与力学性能可以发现：摩擦铆焊产生的金属飞边为完全动态再结晶产生的高硬度超细等轴晶，有着良好强度与硬度性质，能够有效提高焊合界面连接强度。不同铆钉结构会引导金属飞边的流动方向，铆钉A与铆钉B会引导部分高性能的金属飞边向铆钉内腔流动而远离焊合界面，导致这部分高性能组织不能贡献于焊合界面，从而降低连接强度。

3 结论

1)本文提出了复材单层制孔摩擦铆焊工艺(C-PDFR)连接碳纤维复合材料与钛合金，通过调控工艺过程中的热力作用，实现预制孔碳纤维复合材料与无预制孔钛合金的有效连接。

2)在C-PDFR工艺中，铆钉尖端结构对接头成形过程中钛合金摩擦焊飞边的流动方向具有显著影响，铆钉C能够很大程度上抑制金属飞边向铆钉内腔流动，其次是铆钉B，铆钉A对应接头中金属飞边向内腔流动的现象最显著。

3)不同铆钉的C-PDFR接头在铆钉与钛合金工件之间均实现了固相焊合，根据微观形貌与硬度分布结果，将接头分为母材区、热影响区、热机械影响区以及搅拌区。铆钉A与铆钉B的热影响区范围较小，而铆钉C的搅拌区与热机械影响区更为集中在铆钉体与焊合界面周围。

4)不同铆钉结构的拉剪性能以及失效模式存在显著差异。铆钉A与铆钉B对应接头的失效模式相近，两者均在焊合界面处发生断裂，接头拉剪强度分别为306.5 MPa与314.7 MPa；铆钉C因具有更大的焊合面积，在拉剪载荷下展现为铆钉体断裂，接头拉剪强度为726.2 MPa，并且断裂性能有显著提高，为铆钉A对应接头拉剪强度的236.9%。

参考文献：

[1] 王芳丽，刘凯，潘微，等. 民机结构绿色维修技术应用与发展[J]. 航空学报，2023，44(11)：19-37.
WANG Fangli，LIU Kai，PAN Wei，et al. Application and Development of Green Structure Maintenance for Civil Aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2023，44(11)：19-37.

[2] 姜丽萍. C919的制造技术热点及最新研制进展[J]. 航空制造技术，2013，56(22)：26-31.
JIANG Liping. Hot Topic and the Latest Advances in Manufacturing Technology of C919[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2013，56(22)：26-31.

[3] 唐臣升，王巍. 复合材料叠层结构制孔技术[J]. 工具技术，2017，51(4)：83-86.
TANG Chensheng，WANG Wei . Hole-making Technology of Composite Laminated Structure[J]. Tool Engineering，2017，51(4)：83-86.

[4] 杨晓娜，杨友涛. 飞机结构连接件制孔方式优化[J]. 航空精密制造技术，2022，58(1)：52-54.
YANG Xiaona，YANG Youtao. Optimization of Hole Making Method for Aircraft Structure Connector[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology，2022，58(1)：52-54.

[5] 耿大喜，孟繁星，孙哲飞，等. 碳纤维复合材料/钛合金叠层结构振动制孔技术研究进展[J]. 航空制造技术，2024，67(23)：14-32.
GENG Daxi，MENG Fanxing，SUN Zhefei，et al. Research Progress on Vibration Hole Making Technology of Carbon Fiber Composite/Titanium Alloy Laminated Structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2024，67(23)：14-32.

[6] 王春浩，李鹏南，邱新义，等. 纵扭超声辅助钻削CFRP/TC4叠层结构的轴向力理论建模[J]. 机械工程学报，2025，61(7)：210-219.
WANG Chunhao，LI Pengnan，QIU Xinyi，et al. Prediction of Thrust Force of CFRP/TC4 Stacks Structures in Longitudinal Torsional Ultrasonic Assisted Drilling [J]. Journal of Mechanical Engineering，2025，61 (7)：210-219.

[7] 刘凤宇，陈涛，段振岩，等. 变参数超声啄式钻削CFRP/TC4不同钻孔顺序试验研究[J]. 航空制造技术，2025，68(7)：92-99.
LIU Fengyu，CHEN Tao，DUAN Zhenyan，et al. Experimental Study on Variable-parameters Ultrasonic Pecking Drilling with Different Drilling Sequences for CFRP/TC4 Stacks [J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2025，68(7)：92-99.

[8] XU Moran，CAO Longchao，LI Junxiang，et al. Experimental，Modeling，and Numerical Simulation of Ultrasonic Assisted Drilling of CFRP/Ti Stacks[J]. Journal of Manufacturing Processes，2025，133：97-117.

[9] RODRÍGUEZ A，CALLEJA A，De LACALLE L N L，et al. Drilling of CFRP-Ti6Al4V Stacks Using CO2-cryogenic Cooling [J]. Journal of Manufacturing Processes，2021，64：58-66.

[10] KHAN S A，ROYER R，SARAIVA M，et al. In-depth Tool Wear Analysis in Drilling of CFRP-Ti Stacks by DLC Coated Drills[J]. Composite Structures，2025，363：119110.

[11] 金希红，曹琼方，魏杨，等. 考虑温度效应的胶接接头力学性能及失效机理[J]. 科学技术与工程，2024，24(29)：12497-12505.
JIN Xihong，CAO Qiongfang，WEI Yang，et al. Mechanical Properties and Failure Mechanism of Adhesive Joints with Temperature Effect[J]. Science Technology and Engineering，2024，24(29)：12497-12505.

[12] 王伟，王蔚，姚天昊，等. 激光去除碳纤维复合材料表面树脂工艺试验及胶接性能研究[J]. 红外与激光工程，2025，54(6)：20240556.
WANG Wei，WANG Wei，YAO Tianhao，et al. Experimental Study on Laser Removal of Surface Resin in Carbon Fiber Composites and Adhesive Bonding Performance[J]. Infrared and Laser Engineering，2025，54(6)：20240556.

(下转第2353页)