

【航空科学与工程研究】

CFRP 和 AA6061 铝合金异质叠层板 自冲铆过程分析

陈中傲¹, 黄晓明², 苏 洲¹, 王志勇²

(1. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001;

2. 滨州学院 机电工程学院, 山东 滨州 256603)

摘 要:为探究 CFRP 和 AA6061 铝合金异质叠层板的自冲铆过程, 设计了自冲铆试验, 分析了不同厚度 CFRP 和不同厚度 AA6061 铝合金组合方式对铆接质量影响, 并确定了最佳组合方式。基于损伤失效本构关系, 建立 CFRP 和 AA6061 铝合金自冲铆接有限元模型, 分析铆接过程中损伤与变形情况。结果表明: CFRP(2 mm)和 AA6061 铝合金(2 mm)组合方式自冲铆连接后表面成形质量最佳, 该种组合异质板接头残余底厚为 0.72 mm, 互锁长度为 0.36 mm, 铆钉开口量为 0.73 mm; 自冲铆工作完成后, CFRP 和 AA6061 铝合金接头残余应力主要分布在铆钉孔内外侧的 CFRP 区域内, 钉脚尖与 AA6061 铝合金之间的最大挤压应力值为 2910 MPa; 铆接过程可分为压紧阶段、刺穿阶段和成形阶段, 铆接力峰值载荷为 19.6 kN。

关键词:航空复材; 航空铝合金; 自冲铆接; 铆接质量; 有限元模型

中图分类号: TG 44; TB 33 **文献标识码:** A DOI:10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.06.001

0 引言

复合材料是由两种或两种以上性质不同的物质组成的各向异性材料。复合材料与传统材料相比, 具有质量轻、比模量高、抗疲劳性能好及减振性能好等诸多优点, 被广泛应用于机械工程、航空、航天、汽车、电子等领域^[1-2]。据统计, A350 和 B787 等大型飞机的复合材料用量均超过了 50%^[3]。碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)作为一种主要航空用复合材料, 已广泛应用于机翼、机身等主承力结构。在飞机装配中, CFRP 结构件需要与金属板材进行连接。航空铝合金作为航空工业三大合金之首, 具有比强度高、延展性好、耐腐蚀性强的优点^[4-5]。航空铝合金包括 2 系(2024、2A12 等)、6 系(6061、6082 等)、7 系(7050、7075 等)等系列铝材, 被广泛应用于飞机蒙皮、机身框架等结构件中^[6]。

CFRP 和铝合金的连接属于异质材料连接, 不同材料间力学性能的巨大差异使得异质板连接成为工程应用中的难点^[7]。自冲铆接(SPR)作为一种新轻型薄板连接工艺, 可通过铆钉将多层不同材料的板材穿透进行连接。自冲铆接无须进行预钻孔, 在连接过程中不会向材料传递热量, 接头连接性能及抗疲劳性能更为优秀, 在工程应用中有着独特优势^[8-9], 因此引起学者对该技术的广泛关注。张杰等^[10]基于 CFRP 和 AA5052 铝合金板的自冲铆接头进行了多种组合方式的拉伸剪切实验, 发现应采用 CFRP 为上板,

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51605037)

第一作者简介: 陈中傲(1997—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事航空复材自冲铆接工艺研究。

E-mail: chenaoxiang0629@163.com

AA5052 铝合金板为下板的搭接方式,其失效形式是 CFRP 纤维断裂以及层间开裂,并且上板厚度越大,失效载荷以及能量吸收值越大。Meschut 等^[11]采用冲孔试验评估了自冲铆过程中 CFRP 损伤程度,研究表明 CFRP 主要发生分层损伤,弯曲刚度降低,导致结构过早失效。Liu 等^[12]建立了二维轴对称模型,系统地研究了铆接影响因素对铝合金自冲铆成形质量的影响,研究表明铆钉脚张开半径随模具直径和凸台高度的增加而增大,随模具深度的增加而减小。Liu 等^[13]研究了 CFRP 与铝合金自冲铆接头的连接及损伤机理,提出了考虑剪切效应的复合材料损伤本构模型,研究表明其本构模型可以预测 CFRP 在大变形作用下的复杂损伤行为。

目前不同学者针对 CFRP 和铝合金异质叠层板自冲铆工艺进行了大量研究,但主要集中于铆接质量与接头破坏形式^[14],对不同厚度 CFRP 和不同厚度铝合金叠层板自冲铆差异研究尚不完善,缺乏 CFRP 和 AA6061 铝合金(CFRP/AA6061)自冲铆过程分析。本文通过不同厚度 CFRP 和 AA6061 铝合金组合的自冲铆试验,定量分析铆接质量,确定最优厚度组合,基于 CFRP 损伤失效模型,对铆接过程中 CFRP 和 AA6061 铝合金的损伤变形情况进行有限元模拟,分析自冲铆接头形貌、层间状态及铆接力等。

1 试验设计

图 1 为自冲铆接件示意图。图 1(a)为铆钉及模具示意图,半空心铆钉的半径为 2.65 mm、长度为 6 mm,铆钉材质为 2A10 铝合金。采用图 1(b)所示搭接方式,CFRP 为上板,AA6061 铝合金为下板^[10],试件长宽尺寸规格为 120 mm×25 mm。

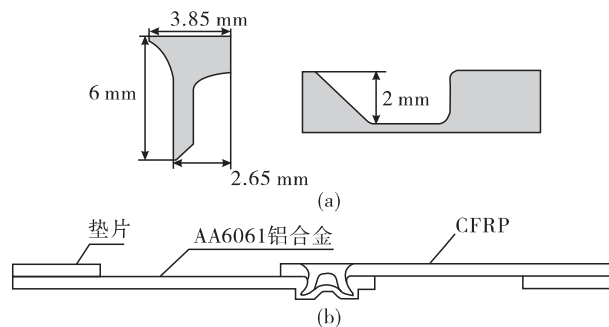


图 1 自冲铆接件示意图

自冲铆试验设计如表 1 所示,其中搭接件总厚度为 4 mm,选用不同厚度 CFRP 和不同厚度 AA6061 铝合金进行组合。铝合金试件厚度分别为 1 mm、2 mm 和 3 mm;CFRP 厚度由预制过程中的铺层数决定,CFRP 铺层数 3、6、9 分别对应厚度 1 mm、2 mm、3 mm。

表 1 不同厚度 CFRP/AA6061 组合方式试验设计

序号	连接件材料	搭接件厚度	铆钉长度/mm	铆钉直径/mm
SPR ₁	CFRP/AA6061	1 mm/3 mm	6	5.3
SPR ₂	CFRP/AA6061	3 mm/1 mm	6	5.3
SPR ₃	CFRP/AA6061	2 mm/2 mm	6	5.3

采用 YTR-50T 四柱液压机作为自冲铆接工具,根据铆钉高度设置冲头行程为 6 mm,保持 1 mm/s 匀速下压。为观测铆接接头结构及铆接质量,沿子午线对接头进行打磨抛光,侵蚀剂选用 Keller 试剂(氢氟酸 1.0 mL、盐酸 1.5 mL、硝酸 2.5 mL、水 95.0 mL),侵蚀 15 s 后用温水清洗,利用 CX-H4800 光学显微镜观察接头截面。

2 有限元模型

2.1 建模过程

有限元模型中,模型设置与试验设置相一致。CFRP 采用六层平纹编织铺层板,利用 CATIA 数值软件进行几何建模。

自冲铆过程中,冲头及模具设置为刚体,金属定义为各向同性材料属性,铆钉和铝合金板的材料属性

如表 2 所示。冲头与铆钉之间的连接设定为固接。接触为面-面接触算法, 铆钉与 CFRP、铝合金板之间接触定义为罚函数, 系数取 0.2。CFRP 和铝合金板约束方式为侧边全固定, 模具为全固定, 冲头保留自由度 U3, 添加位移载荷, 幅值为 6.00 mm。对于铆接过程中大应变网格扭曲模拟, 单元类型设置为线性减缩积分单元 C3D8R, 自冲铆钉及铝合金板的全局网格尺寸均为 0.15 mm, CFRP 全局网格尺寸为 0.10 mm。

表 2 铆钉及铝合金材料属性

名称	材质	属性			
		密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	泊松比
铆钉	2A10	2.77×10 ³	73.8	243.0	0.33
铝合金板	AA6061	2.75×10 ³	68.9	55.2	0.33

2.2 材料模型

有限元模型数值计算过程中, CFRP 和 AA6061 铝合金分别采用失效模型和 Johnson-Cook 本构模型, 利用 VUMAT 子程序在有限元中定义材料失效和本构模型。

2A10 铝合金是航空航天常用的铆钉材料之一, 属于 Al-Cu 系硬铝合金, 通常经过淬火时效处理, 屈服强度远大于 AA6061 铝合金。AA6061 铝合金为飞机蒙皮常用材料, 自冲铆过程中塑性力学特性采用 Johnson-Cook 模型^[15]。

CFRP 是典型各向异性材料, 力学性能参数如表 3 表示, 依据 Hashin 理论^[16-17], 建立 CFRP 本构模型如下式所示(下标 1, 2, 3 分别代表 X, Y, Z 方向)。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-v_{23}v_{32}}{E_2E_3\Delta} & \frac{v_{21}+v_{31}v_{32}}{E_2E_3\Delta} & \frac{v_{31}+v_{23}v_{32}}{E_2E_3\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{12}+v_{13}v_{32}}{E_3E_1\Delta} & \frac{1-v_{31}v_{13}}{E_3E_1\Delta} & \frac{v_{32}+v_{31}v_{21}}{E_3E_1\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{13}+v_{12}v_{23}}{E_1E_2\Delta} & \frac{v_{23}+v_{13}v_{21}}{E_1E_2\Delta} & \frac{1-v_{12}v_{21}}{E_1E_2\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2G_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{12} \\ \epsilon_{13} \\ \epsilon_{23} \end{bmatrix}。$$

式中: E_i ($i=1, 2, 3$) 为各方向弹性模量, G_{ij} ($i, j=1, 2, 3$) 为剪切模量, v_{ij} 为泊松比, ϵ_{ij} 为各方向应变分量, 算子

$$\Delta = \frac{1-v_{12}v_{21}-v_{23}v_{32}-v_{13}v_{31}-2v_{12}v_{23}v_{31}}{E_1E_2E_3}。$$

表 3 复合材料力学参数

E_1 /GPa	$E_2 = E_3$ /GPa	$G_{12} = G_{13}$ /GPa	G_{23} /GPa	$v_{12} = v_{13}$
138	11	5.5	4.79	0.28
V_{23}	X_{1r} /MPa	X_{1c} /MPa	X_{2r} /MPa	X_{2c} /MPa
0.40	1500	900	27	200
X_{3r} /MPa	X_{3c} /MPa	$S_{12} = S_{13}$ /MPa	S_{23} /MPa	ρ /(g·cm ⁻³)
55.5	175	80	60.5	1.76

根据失效准则定义 CFRP 单元的损伤和失效, 需要分别定义基体和纤维的损伤失效模型。基体拉伸损伤:

$$f_{mt} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{X_{2t}} + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2。$$

基体压缩损伤:

$$f_{mc} = \frac{1}{X_{2c}} \left[\left(\frac{X_{2c}}{2S_{12}}\right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{12}}\right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{2S_{23}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2。$$

纤维拉伸损伤:

$$f_{ft} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_{1t}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}}\right)^2。$$

纤维压缩损伤:

$$f_{fc} = \frac{|\sigma_{11}|}{X_{1c}}。$$

式中: S_{12} 、 S_{13} 、 S_{23} 为 1、2、3 方向上的剪切强度, X_{1t} 、 X_{1c} 、 X_{2t} 、 X_{2c} 为 1、2 方向上的拉伸和压缩强度, σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 为正应力, τ_{12} 、 τ_{13} 、 τ_{23} 为切应力。对于 CFRP 冲压断裂过程, 通过应力应变判断材料是否发生损伤, 依据损伤状态, 并更新计算应力, 最后根据失效判据决定是否失效断裂或更新应力应变。

3 结果与分析

3.1 自冲铆接头形貌

图 2 为不同厚度 CFRP 和不同厚度 AA6061 铝合金组合方式下自冲铆接头形貌。图 2(a) 为 SPR₁¹ 组合方式接头形貌, 接头上板 CFRP 的上表面产生基体裂纹, 铝合金底部成形处由于挤压损伤产生大量裂纹, 同时沿模具变形区域发生断裂。在自冲铆过程中, 铆钉在刺入铝合金板过程中钉脚逐渐张开, 当铝合金板材过厚时, 钉脚张开量较大, 致使铆钉刺穿铝合金造成接头断裂。图 2(b) 为 SPR₁² 组合方式接头形貌, 铝合金未发生断裂, 但接头表面产生裂纹, 影响密封性及接头强度。由于铝合金厚度较薄, 铆钉与铝合金形成互锁结构后, 接头下方铝合金变形区域的剩余厚度过小, 导致接头下表面形貌被破坏产生裂纹。图 2(c) 为 SPR₂² 组合方式接头形貌, 基体表面无裂纹, 下板铝合金成形质量良好, 表面光滑无裂纹。由此可见, 对应 4 mm 厚度的异质 CFRP/AA6061 组合方式, CFRP(2 mm) 和 AA6061 铝合金(2 mm) 为可行性选择, 后续分析只针对该种组合。

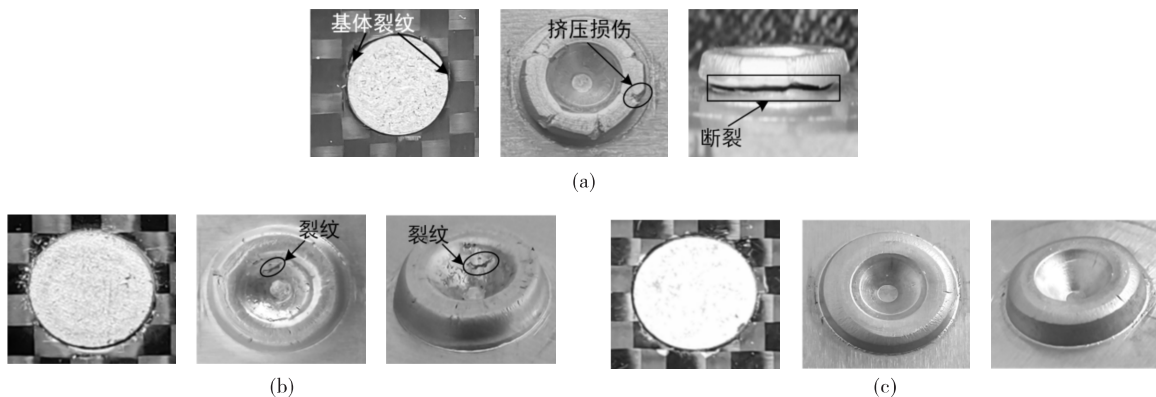


图 2 自冲铆接头形貌

3.2 CFRP 和 AA6061 铝合金接头截面分析

图 3 为 CFRP(2 mm) 和 AA6061 铝合金(2 mm) SPR 铆接后接头的截面形貌。从图中可以看出, AA6061 铝合金板材在模具作用下成型, 铆钉与板材形成互锁结构; CFRP 内部纤维有明显的断裂、挤压损伤, 沿厚度方向损伤程度加剧。这是由于在铆接过程中, 铆钉对 CFRP 产生刚性冲击和挤压, 导致 CFRP 被压碎。

为观测 CFRP 内部纤维变形与损伤情况, 选取接头截面处钉头与 CFRP 挤压区 R1、铆钉内腔区域 R2 和钉脚区域 R3 作为观察对象。R1 区域, CFRP 中的纤维因铆钉头部挤压, 沿铆钉曲线产生弯曲变形, 造成内部纤维断裂。R2 区域, 由于铆钉腔中空结构和模具凸台作用, CFRP 内部纤维呈现出倒“U”型断裂。R3 区域, 在钉脚挤压作用下, 纤维的压碎与断裂情况最为严重, 同时 CFRP 断裂的纤维碎片进一步挤压铝合金板, 导致铝合金剩余厚度减小。

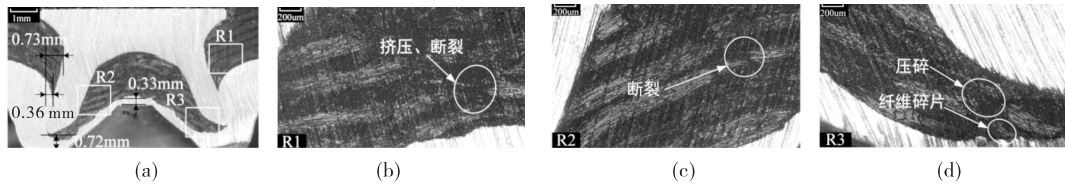


图 3 自冲铆接头截面

自冲铆后的铆接质量通常用铆接质量参数残余底厚、互锁长度和铆钉开口量定量表达^[18]。残余底厚大, 代表铆钉的刺入深度在安全范围内, 保证接头的外观、密封性和耐腐蚀性。互锁长度和铆钉开口量表明铆钉的腿已完全打开, 铆钉与铝合金板形成内部互锁结构。

从图 3(a)可以看出, 对于厚度分别为 2.00 mm 的 CFRP 和 AA6061 铝合金的自冲铆接头, 接头残余厚度为 0.72 mm, 互锁长度为 0.36 mm, 铆钉开口量为 0.73 mm。接头的铆钉互锁长度和残余底厚均大于 0.30 mm, 表明接头已形成有效镶嵌互锁结构。铆接前, 铝合金板初始厚度为 2.00 mm, 由于铝合金受到模具及 CFRP 挤压作用, 铝合金板与模具凸台形成紧密贴合, 铆钉腔下方区域的铝合金板厚度减薄为 0.33 mm。

图 4 为自冲铆过程中内部变形过程及应力分布情况, 设定冲头位移为 H 。冲头位移为 $0.25H$ 时, 板材已固定, 铆钉刺入 CFRP, 钉脚下方区域的 CFRP 受压凹陷。应力集中在上表面铺层内同时沿 CFRP 厚度方向贯穿钉脚下侧区域, 铆钉脚尖区域因与上板接触存在应力集中; 此外, 铝板在模具凸台的作用下不断发生挤压变形, 铝合金板向下变形 0.71 mm。冲头位移为 $0.5H$ 时, 钉脚未穿透 CFRP, 铆钉腔区域下侧的铝合金厚度变薄。铆钉腔内部 CFRP 纤维逐渐弯曲呈倒“U”型, 下板铝合金沿模具形状发生变形, 整体呈“W”形, 铝合金形变量增加至 1.37 mm。随冲头位移至 $0.75H$, 铆钉刺穿 CFRP, 钉脚刺入铝合金并逐渐张开, 下板铝合金填充至模具底部开始向外扩充。钉脚尖区域进入铝合金板产生应力集中, 该阶段的应力主要分布在铆钉脚区域和铝合金板变形区域。

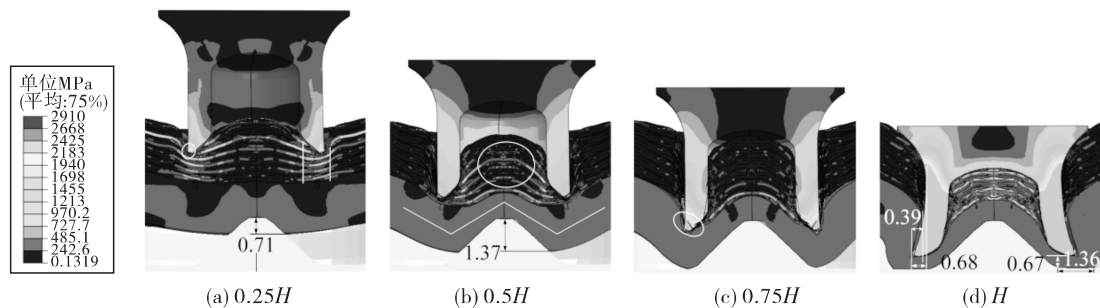


图 4 自冲铆过程应力云图

图 4(d)为铆接结束后状态, 铝合金沿模具底板向外扩充至 1.36 mm, 铆钉开口量为 0.68 mm, 互锁长度为 0.39 mm, 铆钉与板材形成有效镶嵌互锁结构。铆钉孔外侧区域 CFRP 受钉头作用向下弯曲变形与钉头紧密贴合。铆接完成时, 钉脚尖与 AA6061 铝合金之间的最大挤压应力为 2910 MPa。

由图 3(a)和图 4(d)可以看出, 试验结果与有限元模拟获取的接头截面具有一致性。表 4 为自冲铆接头截面几何参数, 试验与有限元模拟截面尺寸相对误差控制在 10% 以内, 因此有限元模型可以有效模拟

CFRP 和 AA6061 铝合金自冲铆过程。

表 4 接头截面几何参数

	残余底厚/mm	互锁长度/mm	铆钉开口量/mm
试验值	0.72	0.36	0.73
仿真值	0.67	0.39	0.68
误差	-6.9%	8.3%	-6.8%

3.3 CFRP 和 AA6061 铝合金层间状态

根据冲头位移,分别选取 CFRP 的上表面铺层 1、下表面铺层 6 探究铆钉刺入及穿透损伤效果,选取铺层 4 探究 CFRP 内部层间损伤状态,选取铝合金上表面探究铝合金变形情况。铆接过程 CFRP 层间与铝合金应力云图见图 5。

冲头位移为 $0.25H$ 时,铆钉逐渐刺入 CFRP 但并未穿透铺层 1。此时钉脚与 CFRP 发生接触,各铺层内已产生应力,且应力在铺层内呈圆环状分布;铝合金板应力主要分布在沿模具变形部位。冲头位移为 $0.50H$ 时,铺层 4 处纤维未完全断裂,且未断裂纤维处存在应力集中现象。冲头位移为 $0.75H$ 时,铆钉穿透 CFRP,进入铝合金开始向外扩张,铝合金板应力主要分布在与铆钉挤压区域。

铆接完成后,在挤压作用下,钉头下方弧形区域和铆钉内腔区域内的 CFRP 与铝合金表面紧密贴合,导致铆钉孔内外围区域 CFRP 铺层内仍保留有部分残余应力。

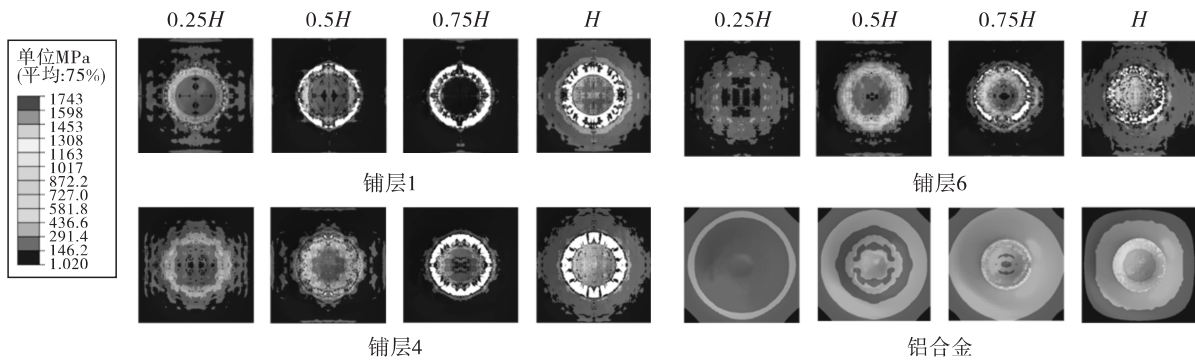


图 5 CFRP 层间与铝合金应力云图

3.4 铆接力分析

图 6 为铆接力随位移变换曲线。由图 4 可知,自冲铆成形过程可分为三个阶段:(1)压紧阶段,固定物料;(2)刺穿阶段,铆钉刺入上板;(3)成形阶段,铆钉刺穿上板,部分刺入下板并与下板形成有效互锁结构。

压紧阶段前,由于铆钉、模具与板材之间存在较小间隙,压紧阶段消除各部分之间的间隙,此阶段铆钉向下位移 0.32 mm ,铆接力迅速增加后回落,CFRP 和 AA6061 铝合金异质板压实。

当铆钉下移至 4.90 mm 时,铆钉逐渐穿透 CFRP,该阶段为 CFRP 刺穿阶段,如图 4(c)所示。在该阶段,随着铆钉下移 CFRP 断裂失效,铝合金板同时产生大应变率塑性变形。铆接力缓慢线性增加,该阶段铆接力从压紧时的 3.1 kN 增加至 6.7 kN ,铆接力上升斜率为 0.78 kN/mm 。

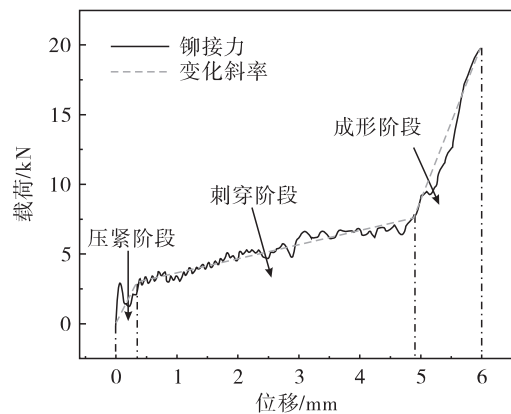


图 6 铆接力-位移曲线

进入成形阶段,受模具几何构形影响,铆钉脚由向下运动转换为向下与外扩组合变形,直至铆钉脚部

完全张开,如图4(d)所示。该阶段,铝合金下板与模具之间的接触面积逐渐增大并贴合,并伴随剧烈的塑性变形,受此影响,铆钉阻力急剧增大。当铆钉下移6.00 mm时,自冲铆接过程结束,铆接力最大峰值为19.6 kN。该阶段铆接力上升斜率为11.7 kN/mm。

4 结论

(1)CFRP(2 mm)和AA6061铝合金(2 mm)组合进行自冲铆工作,接头表面成形质量最佳,接头残余厚度为0.72 mm,互锁长度为0.36 mm,铆钉开口量为0.73 mm,形成有效镶嵌互锁结构。

(2)自冲铆后,CFRP内部纤维呈现出倒“U”型断裂,钉脚尖与铝合金处最大挤压应力为2910 MPa,残余应力主要分布在铆钉孔内外侧的CFRP区域内。

(3)铆接过程分为压紧阶段,刺穿阶段和成形阶段,铆接力大小主要由铆钉扩张成形状态决定,铆接力峰值载荷为19.6 kN。

参考文献:

- [1] 杨珍菊. 国外复合材料行业进展与应用[J]. 纤维复合材料, 2017, 34(3): 36-39.
- [2] RANA S, FANGUEIRO R. Advanced composites in aerospace engineering[J]. Advanced composite materials for aerospace engineering, 2016: 1-15.
- [3] 李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201-212.
- [4] 张新明, 刘胜胆. 航空铝合金及其材料加工[J]. 中国材料进展, 2013, 32(1): 39-55.
- [5] MO G, LIU J, LI L, et al. Dynamic simulation whole process optimization and experimental verification of milling aviation aluminum alloy aircraft structure[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2022, 121(7): 5377-5386.
- [6] 杨帅帅. AA6061 铝合金电磁辅助胀形与数值模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- [7] 姬琳辉. 半空心铆钉自冲铆接工艺及铆接检测机制的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2021.
- [8] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化薄壁结构点连接技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(6): 125-146.
- [9] ABE Y, KATO T, MORI K. Self-piercing riveting of high tensile strength steel and aluminium alloy sheets using conventional rivet and die[J]. Journal of materials processing technology, 2009, 209(8): 3914-3922.
- [10] 张杰, 何晓聪, 丁文有. 碳纤维板材与轻合金板材自冲铆接头性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2018, 41(3): 48-51.
- [11] MESCHUT G, GUDE M, AUGENTHALER F, et al. Evaluation of damage to carbon-fiber composites induced by self-pierce riveting[J]. Procedia CIRP, 2014, 18: 186-191.
- [12] LIU Y, LI H, ZHAO H, et al. Effects of the die parameters on the self-piercing riveting process [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 105: 3353-3368.
- [13] LIU Y, ZHUANG W. Self-piercing riveted-bonded hybrid joining of carbon fibre reinforced polymers and aluminium alloy sheets[J]. Thin-walled structures, 2019, 144: 106340.
- [14] LIANG Y A, TG A, MD B, et al. Towards joinability of thermal self-piercing riveting for AA7075-T6 aluminum alloy sheets under quasi-static loading conditions[J]. International journal of mechanical sciences, 2020, 189: 105978.
- [15] 刘再德, 王冠, 冯银成, 等. 6061 铝合金高应变速率本构参数研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(6): 120-123.

- [16] OZDEN I, ELAHEH G. Three-dimensional numerical modelling of drilling of carbon fiber-reinforced plastic composites[J]. Journal of composite materials, 2014, 48(10): 1209-1219.
- [17] 王金宇, 游珠杰, 辛泰阿, 等. 碳纤维增强复合板钻削工艺的有限元建模研究[J]. 现代制造工程, 2021(9): 68-76.
- [18] WANG J, ZHANG G, ZHENG X, et al. A self-piercing riveting method for joining of continuous carbon fiber reinforced composite and aluminum alloy sheets[J]. Composite structures, 2020, 259(3): 113219.

Analysis and Research on Self Piercing Riveting Process of CFRP and AA6061 Aluminum Alloy Heterogeneous Plate

CHEN Zhongao¹, HUANG Xiaoming², SU Zhou¹, WANG Zhiyong²

(1. *Mechatronics Engineering Department,*

Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Binzhou University, Binzhou 256603, China)

Abstract: To investigate the self piercing riveting process of CFRP and AA6061 aluminum alloy heterojunction laminated plates, self piercing riveting tests are designed to analyze the influence of different thicknesses of CFRP and AA6061 aluminum alloy combination on riveting quality and optimum combination is obtained by that. Based on the damage failure model, a finite element model of CFRP and AA6061 self piercing riveting is established to analyze the damage and deformation during the riveting process. The results show that the combination of CFRP (2 mm) and AA6061 (2 mm) has the best surface forming quality after self piercing riveting connection. The joint residual bottom thickness is 0.72 mm, the inner lock length is 0.36 mm and the rivet opening is 0.73 mm. After the self piercing riveting work is completed, the residual stress of the CFRP and AA6061 aluminum alloy joint is mainly distributed in the CFRP area on the inside and outside of the rivet hole, and the maximum compressive stress value between the nail toe and AA6061 is 2910 MPa. The riveting process can be divided into pressing stage, piercing stage, and forming stage, with a peak load of 19.6 kN for riveting force.

Keywords: aviation composite materials; aviation aluminum alloy; self piercing riveting; riveting quality; numerical model

(责任编辑:唐立平)