

复合材料胶接结构低速冲击损伤研究进展

尚仁志^{1,2}, 刘小川², 许飞^{1,2}

(1. 中国飞机强度研究所 第十三研究室, 西安 710065)

(2. 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065)

摘要: 胶接结构在飞机复合材料承力部件、传力接头和修补中被广泛使用。在飞机服役过程中, 像胶接接头这样的薄弱连接部位极有可能遭受外物冲击的威胁, 然而这类结构的低速冲击损伤性能和损伤容限很少在飞机结构设计中被考虑到。为了充分认识和了解目前关于复合材料胶接结构的低速冲击损伤特性, 本文概述了相关试验方法和有限元仿真技术, 从力学响应、损伤失效模式、影响因素等方面系统介绍了复合材料胶接结构低速冲击领域的研究进展, 并结合航空工程中胶接结构的应用情况与服役环境, 展望了航空领域复合材料胶接结构冲击研究的未来发展方向。研究成果可为胶接结构在航空领域后续开展更深入地研究和工程应用提供有益参考。

关键词: 复合材料; 胶接结构; 低速冲击; 损伤特性; 湿热环境; 剩余强度

中图分类号: V214.8

文献标识码: A

Research progress on low-velocity impact damage in adhesive composite structures

SHANG Renzhi^{1,2}, LIU Xiaochuan², XU Fei^{1,2}

(1. Thirteenth Research Division, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

(2. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Xi'an 710065, China)

Abstract: Adhesively bonded composite structures are widely adopted in aircraft load-bearing components, load-transfer joints, and structural repair schemes. During service, these vulnerable joint areas are highly susceptible to foreign object impacts. Nevertheless, the low-velocity impact damage characteristics and damage tolerance of such structures are rarely taken into account in aircraft structural design. To gain a thorough understanding of state-of-the-art research concerning low-velocity impact damage behaviors of adhesively bonded composite structures, this paper summarizes relevant experimental approaches and finite element simulation techniques, and systematically reviews research progress in this field from the perspectives of mechanical response, damage and failure modes, and influencing factors. Finally, in view of the engineering applications and service environments of bonded structures, this paper outlines future research directions for low-velocity impact performance of aeronautical adhesively bonded composites. The research findings can provide valuable references for further in-depth studies and engineering applications of adhesive structures in the aerospace field.

Key words: composite materials; adhesive-bonded structures; low-velocity impact; damage characteristics; hygro-thermal environment; residual strength

收稿日期: 2026-06-12; 修回日期: 2026-07-26

通信作者: 刘小川(1983—), 男, 博士, 研究员。E-mail: liuxiaochuan@cae.ac.cn

引用格式: 尚仁志, 刘小川, 许飞. 复合材料胶接结构低速冲击损伤研究进展[J]. 航空工程进展.

SHANG Renzhi, LIU Xiaochuan, XU Fei. Research progress on low-velocity impact damage in adhesive composite structures[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

复合材料的高效连接是保证结构整体力学性能的核心环节,与传统铆接、螺栓连接等机械连接方式相比,胶接技术无需钻孔,避免了纤维切断带来的材料性能损失与孔边应力集中,可实现载荷的均匀传递,同时能显著减轻结构重量、提升结构疲劳寿命与气动外形完整性,已成为复合材料结构最主要的连接形式之一^[1]。随着胶接技术持续迭代,复合材料胶接结构在先进飞行器中的应用规模持续扩大。例如,波音707整机胶接面积仅224 m²,发展至波音747已达3 200 m²,波音787以复合材料构件大量替换传统金属,胶接结构用量进一步提升;我国在研的C929客机的复合材料重量占比旨在超过50%,整机同样需要大规模采用胶接连接工艺。综合国内外机型发展趋势可以预见,胶接技术在航空器制造中的应用规模将持续扩大^[2]。

在飞机的制造、维护及服役全生命周期中,不可避免地会遭遇诸如工具意外坠落、跑道上碎石或冰雹撞击等冲击事件^[3],这类冲击载荷的能量普遍较低,却会导致复合材料的结构刚度与剩余强度显著下降。胶接接头是飞机一体化连接体系中的薄弱部位,其力学性能通常低于复合材料本身,冲击载荷极易在胶层中引发高应力集中,导致胶层内聚破坏或胶层/被粘物界面脱粘,且胶接结构对湿热环境高度敏感,服役环境中的水分会通过扩散作用渗入复合材料本体和胶层,引起材料塑化/玻璃化转变、温度下降、界面结合力削弱等一系列物理化学变化^[4],致使在冲击前就已发生材料性能的退化。因此,在设计胶接接头时不仅要考虑材料自身的冲击性能,还应充分考虑接头的冲击性能^[5]。

复合材料胶接结构的低速冲击性能研究,起源于20世纪70年代兴起的复合材料层合板低速冲击性能研究。1976年,McQuillen等^[6]首次系统研究了石墨环氧树脂基复合材料在低速横向冲击下的结构动态响应和损伤机制,分析了冲击速度、层合板厚度及铺层顺序对接触力、能量吸收、分层损伤及基体裂纹的影响,为后续复合材料胶接结构的低速冲击研究提供了重要的基础;1987年,夏源明等^[7]对比了纯树脂和玻璃纤维增强复合材料在高应变率拉伸冲击下的动力学响应,指出复合

材料抗冲击性能取决于纤维与基体的动态断裂应变是否匹配,只有当两者相近时才能获得高抗冲击性,否则基体先于纤维脆断会降低整体性能。该文是国内首篇系统研究复合材料冲击性能的论文。20世纪90年代,随着计算机技术和有限元方法的发展,关于复合材料胶接结构冲击行为的研究开始出现,1997年,Sato等^[8]通过有限元法结合黏弹性本构模型,系统研究了锥度搭接胶接接头在冲击载荷下的应力波传播和动态应力集中,发现优化接头几何构型(增加锥度长度)可有效降低接头中的应力集中。国内对胶接结构的冲击研究始于2008年,游敏等^[9]研究了0.3~7.0 m/s范围内低速冲击速率对胶层力学响应的影响规律,发现冲击速率不仅显著影响胶层等效应力峰值与弹塑性变形程度,还会改变高应力区域分布及接头失效模式。

目前对复合材料胶接结构的低速冲击损伤响应、数值模拟方法与试验表征技术的研究已取得诸多研究成果。本文系统梳理复合材料胶接结构低速冲击损伤领域的早期发展历程与研究进展,结合当前研究的薄弱环节,对未来的发展方向进行展望,以期对胶接结构在航空领域的深入研究和工程应用提供有价值的参考。

1 复合材料胶接结构低速冲击研究方法

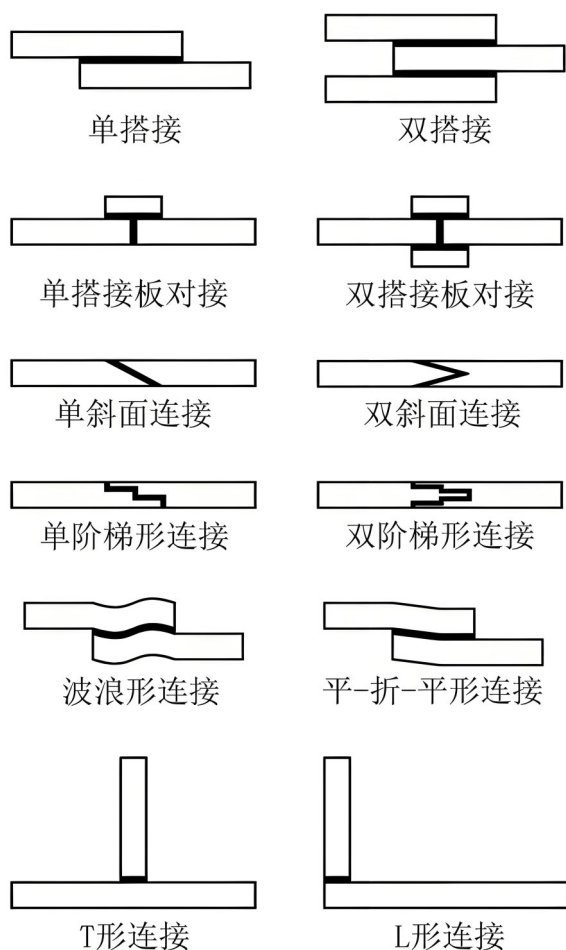
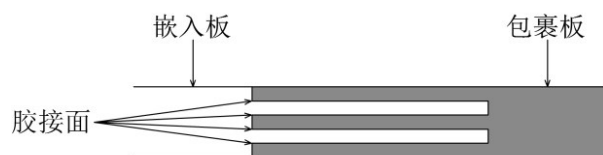
1.1 常用胶接形式

复合材料胶接连接主要包括平面形式连接和正交形式连接^[10],如图1所示。平面形式连接包括单搭接、双搭接、对接、斜接、阶梯形连接、波浪形连接和平一折一平形连接等,主要应用于机身连接、次承力部件和修补等场景;正交形式连接包括T形、L形和 π 形等,主要应用于蒙皮—长桁整体壁板、机翼加筋结构等主承力部件。

现有研究大多针对的都是平面形二次胶接连接,其中,单搭接结构由于兼具轻量化、工艺性和低成本等优点,成为最主要的研究对象,其他研究对象还包括斜对接结构和阶梯形连接结构。

杨沫等^[11]提出了一种梳状交错嵌入的新型复合材料胶接结构,如图2所示,其核心特征为嵌入板与包裹板沿厚度方向交错贴合,构成多层并行

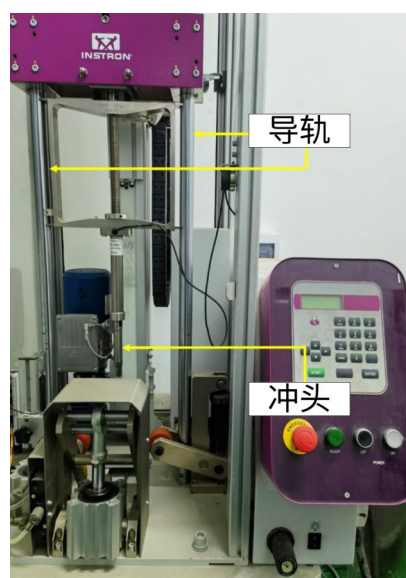
胶接界面。与图1中的传统多级阶梯搭接接头相比,该接头不再依靠沿搭接方向逐级削减应力峰值的单一路径优化思路,而是借助厚度方向多界面载荷分流效应与页片嵌合带来的机械互锁作用协同承力。具体来看,传统阶梯搭接内部胶层呈连续整体,主裂纹一旦沿搭接方向完全扩展贯通便会引发接头整体失效;而该页型接头呈现逐层递进式失效模式,抗冲击脱粘性能得到明显提升。试验结果表明,该接头剩余强度系数随冲击能量升高而减小、随搭接长度增大而提高,其剩余强度最高可达同规格单搭接接头的4倍以上。

图1 胶接的主要形式^[10]Fig. 1 Main forms of adhesive bonding^[10]图2 页型胶接接头^[11]Fig. 2 Laminate adhesive joint^[11]

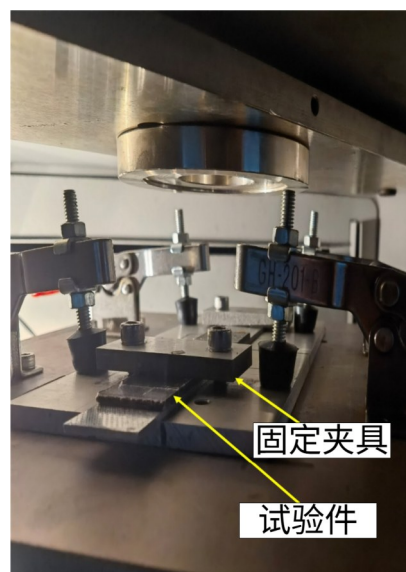
1.2 试验研究

复合材料胶接结构的冲击损伤主要通过落锤式冲击试验机和摆锤式冲击试验机来引入,具体的选择取决于冲击载荷的作用方向。

落锤式冲击试验机通常包括落锤、滑轨、夹具、反回弹装置、压电传感器和光电传感器等,能够获取冲击前的落锤速度及冲击过程中的接触力—时间响应^[12],试验装置如图3所示。



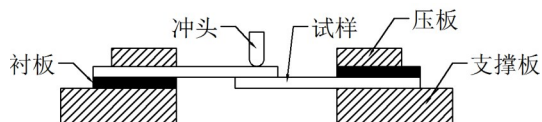
(a) 落锤冲击试验机



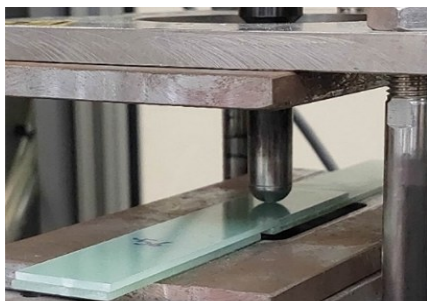
(b) 落锤冲击夹持平台

图3 落锤式冲击试验装置^[13]Fig. 3 Falling hammer impact test device^[13]

落锤冲击试验机的冲击载荷通常作用于垂直于胶接面的胶接区域,这种工况对应于飞机外表面的胶接处直接受到外部冲击作用,是最常见的工况。胶接结构的低速落锤冲击标准试验可参考复合材料层合板落锤冲击标准试验方法 ASTM D7136 进行,试验件的尺寸可根据具体需求确定,典型的试验模型如图 4 所示。



(a) 冲击模型示意图



(b) 冲击模型实物图

图 4 胶接结构冲击的试验模型^[14]

Fig. 4 Experimental model for impact of adhesive joints^[14]

摆锤式冲击试验机由机座、机架、摆锤、操作机构和读数装置五部分组成^[15],摆锤通过重力势能释放撞击试验件,运动过程中受到的阻力更少,能量损失更少,其冲击功由摆锤摆动角度变化通过机械指针或光电编码器精确换算得出,试验装置如图 5 所示。

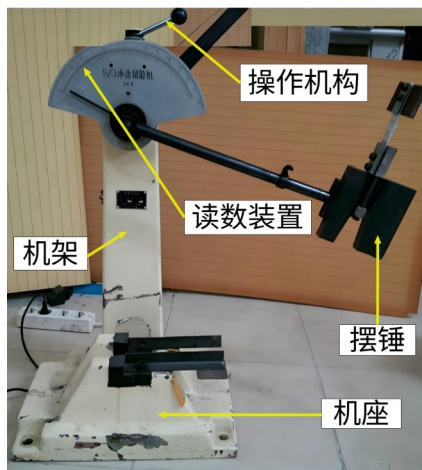


图 5 摆锤式冲击试验装置^[16]

Fig. 5 Pendulum impact test device^[16]

摆锤冲击试验机的冲击载荷沿胶接面的轴向方向,即平行于胶接面,目的是使胶层承受拉伸应力,模拟“撕裂”或“拉断”失效模式,该工况对应飞机外表面胶接结构在气动载荷作用下发生的拉伸失效模式。

总的来说,关于复合材料胶接结构的试验研究并不常见,近年来随着汽车工业的快速发展,针对小尺寸胶接结构的冲击研究逐渐增多,但针对航空领域的工程化胶接结构的冲击研究却很匮乏。不同研究者多根据自身需求定制试验方案,测试指标与方法尚不统一,并且,到目前为止,尚未形成统一的复合材料胶接结构冲击试验标准。在此背景下,现有研究的核心价值集中于控制变量下的相对规律比较:在同一试验体系、相同边界条件下,不同冲击能量、不同构型、不同材料参数的性能差异与影响规律具备可靠的学术意义,可用于揭示损伤机理、优化结构设计。同时,多数研究参照 ASTM D7136 复合材料层合板落锤冲击标准的试验框架开展,在试样参数、边界条件完整披露的前提下,特定体系下的性能数据具备可重复性与有限的绝对表征价值,可作为对应工况下的工程参考依据。

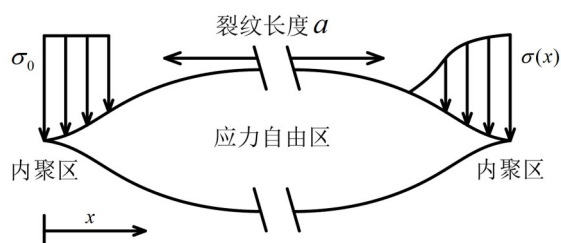
1.3 仿真研究

仿真计算可捕捉各类试验难以直接测得的应力、应变、损伤场变量,弥补落锤冲击试验无法全程追踪结构内部损伤动态演化的短板,是研究复合材料胶接结构低速冲击损伤的重要手段。一套高精度仿真体系的构建,需要合理搭配层合板连续损伤力学模型(CDM)与界面内聚力模型(CZM),两套模型的选型与参数标定共同决定冲击接触响应、内部损伤形貌的预测精度。

连续损伤力学模型的失效准则和刚度退化演化规律选取会直接影响冲击接触力、损伤面积等核心仿真结果。三维 Hashin 准则可独立区分纤维、基体拉压损伤,因此应用最为广泛^[17],但未考虑基体压缩斜截面断裂机理,在压剪耦合冲击下预测精度较低,工程上常采用 Puck 准则修正基体损伤判定。於卫军等^[18]分别采用三维 Hashin 准则和 Puck 准则描述复合材料的纤维和基体损伤,有效提升了失效载荷的预测精度。除此之外,LaRC05 准则引入纤维扭结机理、斜截面基体摩擦

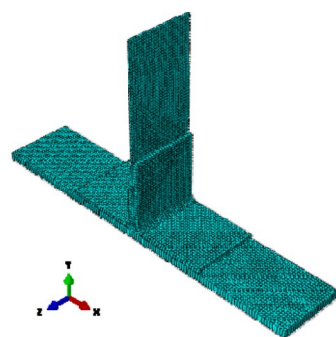
与就位强度效应,预测精度进一步提升,但模型方程复杂、标定参数数量多,子程序开发与计算成本更高^[19]。张幻实等^[20]将Hashin、LaRC05准则分别与XFEM耦合建模,证实LaRC05准则对拉伸工况载荷响应、裂纹扩展及分层损伤的仿真结果与试验匹配度更高,还可量化紧固件对损伤演化的影响。在刚度退化演化方面,模型分为直接退化与渐进退化两类,选择合适的退化律能够兼顾物理机理、计算收敛性与仿真精度^[21]。Xu G H等^[22]和Lyu Q H等^[23]的研究表明:直接刚度退化依赖经验参数,物理机理缺失,且对分层、基体损伤预测保守,仅适用于粗略强度估算。李峰忠等^[24]指出线性软化因形式简单、数值稳定成为低速冲击仿真主流方案,指数软化更适配Puck准则用于基体压剪断裂精细化预测,而准则与退化律组合不匹配会引发过度刚度退化、穿透损伤等仿真失真问题。

内聚力模型是目前描述胶层与界面失效最广泛的模拟方法,该概念最早由Dugdale^[25]为消除裂纹尖端应力奇异性提出,其核心假设是材料受载后裂纹不会瞬间完全张开,而是先经历伴随内聚力作用的分离过程,如图6所示。

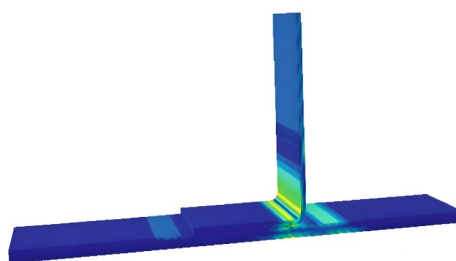
图6 内聚力模型^[26]Fig. 6 Cohesive zone model^[26]

CDM+CZM的耦合方法,现已成为胶接接头冲击仿真标准框架。Liu等^[27]以航空CFRP阶梯胶接修复接头为对象开展3~10 J低速冲击试验,揭示其冲击响应、多尺度损伤演化规律并确定4 J为接头强度衰减临界冲击能量。CDM+CZM方法还可以用于胶接修补的仿真分析。孙振辉等^[28]发现不同相对冲击位置和补片层数对单面胶接修补开孔CFRP层合板抗冲击性能具有显著影响。针对T形、L形、π形等正交形式胶接接头的建模则提出了更高技术要求。如图7(a)所示,周祥等^[29]、王彬^[30]基于内聚力模型建立了T形胶接接头有限元模型,通过面外拉伸仿真发现损伤最先

萌生在蒙皮与L型板连接胶层,并总结出胶层剥离、剪切应变随载荷变化的三阶段演化特征。如图7(b)所示,拓宏亮等^[31]建立了L形胶接接头的有限元模型,且修正了能量释放率计算方法,使结构剩余强度仿真误差控制在2%以内。江峰等^[32]针对π形接头仿真指出,层间单元是损伤集中区域,剥离应力峰值会随损伤扩展由接头端部向内偏移。但需注意,上述针对T、L、π形正交接头的仿真分析大多仅围绕准静态拉伸载荷开展,面向低速冲击工况的建模与试验验证成果十分匮乏,这类正交接头存在多处胶接界面与应力集中圆角区域,受力状态远比平面单搭接复杂,冲击作用下胶层、层合板会出现多界面同步竞争失效行为,当前CDM+CZM的耦合框架能否精准区分各类损伤萌生、扩展的先后次序,仍缺乏系统性对比与试验佐证。



(a) T形胶接接头



(b) L形胶接接头

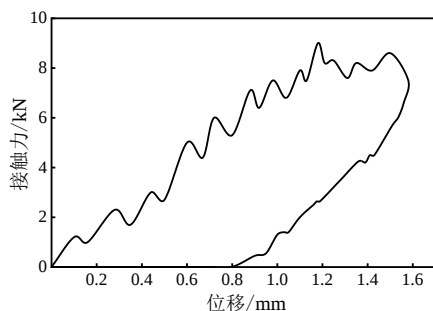
图7 正交形式胶接接头的有限元模型^[30-31]Fig. 7 Finite element model of orthogonal adhesive joints^[30-31]

现有数值模拟体系虽已能够完整求解低速冲击全过程,但仍存在几处关键短板:一是复合材料损伤判定与刚度退化模型适配性差异较大;二是缺少复杂胶接结构的低速冲击有限元验证案例,尤其是湿热等复杂环境下的情况。

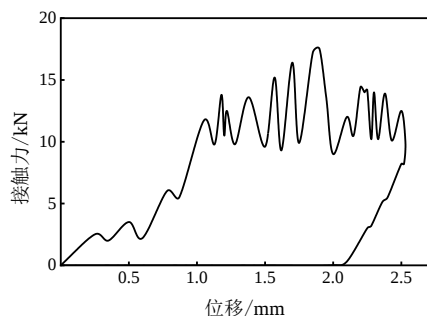
2 复合材料胶接结构的低速冲击响应及损伤模式

2.1 低速冲击响应

在接触力一位移曲线特征方面,胶接结构与层合板具有一定的相似性,同时因胶接界面的存在显著差异,能量逐渐增加情况下的接触力一位移曲线如图8所示。冲击能量较低时,结构仅发生弹性变形与轻微基体微损伤,接触力一位移曲线呈闭合包络正弦状,加载阶段接触力随位移同步上升,冲击反力达到最大时,锤头速度降为0 m/s,锤头立即反弹,直至与锤头分离。冲击能量较高时,随着冲击能量的上升,曲线的峰值载荷会增高,且出现持续的振荡现象,这一特征对应胶层界面脱粘、复合材料层间分层、纤维断裂等渐进损伤过程,是损伤由微损伤向宏观损伤转变的核心标志,当冲击力达到最大时,速度并未降为0 m/s,继续下降一定距离后,锤头回弹,直至与试样分离。



(a) 冲击能量较低的接触力一位移曲线



(b) 冲击能量较高的接触力一位移曲线

图8 不同冲击能量下复合材料胶接接头
接触力一位移曲线^[33]

Fig. 8 Contact force-displacement curves of adhesive joints in composite materials under different impact energies^[33]

值得注意的是,二次胶接的界面是弱界面,其界面强度小于复合材料层间强度,如果胶粘剂的韧性较差,当冲击能量超过损伤阈值时,接触力将在达到峰值后迅速降至零,而挠度未发生明显变化^[14],如图9所示。这种突然的力下降是由于胶层搭接端部发生了显著的剥离现象,黏接剂无法再吸收更高能量,复合材料粘接端部发生分离,破坏了胶接接头的整体性。在此过程中,冲击难以产生穿透胶层区的损伤,但冲击面上仍可能产生一定的凹坑深度。Sayman等^[34]和Liu等^[35]在评估不同能量等级的冲击效应时发现:相较于无冲击状态,承受特定能量冲击后的单搭接接头在拉伸试验中承载能力显著增强,这是由于冲击发生时冲头接触点处会形成穿透粘接区域的局部凹坑,这种结构缺陷导致粘接剂与基板发生机械互锁,产生剪切阻力使接头破坏载荷升高。

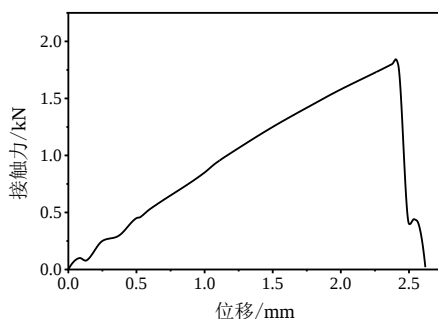


图9 胶头端部脱粘时的接触力一位移曲线^[14]

Fig. 9 Contact force-displacement curve of the adhesive tip debonding^[14]

在冲击能量演化特征方面,胶接结构的能量吸收机制与层合板存在本质区别。对于复合材料层合板,损伤耗散能主要由基体开裂、纤维断裂、层间分层等损伤进行消耗,而对于胶接结构,胶层的塑性变形、内聚破坏和胶层/基板的界面脱粘成为重要的能量耗散途径^[36],韧性胶粘剂的内聚破坏可显著提升结构的能量吸收能力。复合材料胶接结构在低速冲击载荷作用下的典型能量一时间曲线如图10所示,总的冲击能量由冲头的质量与速度决定,其去向包括弹性吸能、损伤耗散能与冲击过程中的摩擦热能,根据能量一时间曲线可以区别弹性能量和损伤耗散能量,同时,弹性能量也可根据接触力一位移曲线中卸载曲线部分包围的面积计算,耗散能量则对应于加载和卸载曲线之间包围的面积。

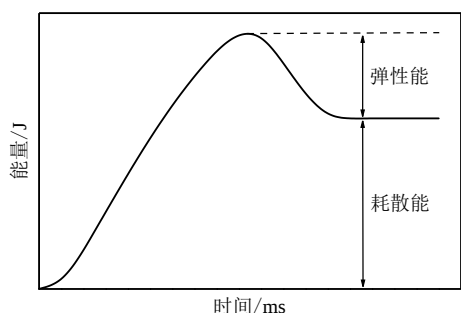


图10 冲击载荷下复合材料胶接接头吸收能量—时间曲线^[33]

Fig. 10 Energy absorption-time curve of adhesive joints in composite materials under impact loading^[33]

2.2 损伤模式

复合材料胶接结构在低速冲击载荷下的损伤是一个非线性、多尺度、多物理场耦合的复杂过程,整体可分为复合材料被粘物的基体损伤与胶接体系的界面损伤两大类,两类损伤相互作用、协同演化,最终决定结构的失效形式与剩余承载能力^[37]。

复合材料被粘物与层合板低速冲击损伤模式基本一致,其内部损伤模式包括基体开裂、纤维/基体界面脱粘、层间分层和纤维断裂,如图11所示,损伤通常按以下顺序演化^[38]:1)基体开裂,是低能量冲击下最先出现的损伤形式,由横向剪切应力与弯曲应力共同引发,主要分布在冲击点背面与层合板表面;2)纤维/基体脱粘,是微观尺度的损伤形式,会加速基体裂纹扩展与层间分层的萌生;3)层间分层,是复合材料最典型的冲击损伤模式,由层间剪切应力与剥离应力共同驱动,易发生在铺层角度差异较大的界面,即使无目视表面损伤,内部也可能产生大面积分层,是结构压缩强度下降的核心诱因;4)纤维压缩屈曲与拉伸断裂,低能量冲击下仅出现少量纤维微屈曲,高能量冲击下会发生大量纤维拉伸断裂,是结构承载能力急剧下降的标志。

胶接体系的损伤是胶接结构区别于层合板的核心特征,也是决定接头冲击后剩余性能的关键因素,如图12所示,主要分为三种典型失效模式^[39]:1)胶层内聚破坏,损伤完全发生在胶层本体内部,界面结合保持完好,该模式通常发生在胶接界面强度高于胶层本体强度的工况下,韧性胶粘剂更易发生内聚破坏,其能量吸收远高于界面脱粘,是胶接结构理想的失效模式;2)界面/被粘物

界面脱粘,损伤发生在胶层与复合材料被粘物的结合界面,胶层本体无明显损伤,这是胶接结构冲击下最常见的失效模式,冲击载荷引发的界面剥离应力与剪切应力超过界面结合强度时,会导致界面分离,且脱粘损伤具有显著的扩展性,会大幅降低接头的承载能力;3)混合失效,即胶层内聚破坏与界面脱粘同时发生,是工程实际中最普遍的失效形式,冲击能量、界面性能、胶层韧性的差异,会导致两种损伤模式的占比不同,低能量冲击下以界面微脱粘为主,高能量冲击下内聚破坏占比显著提升。

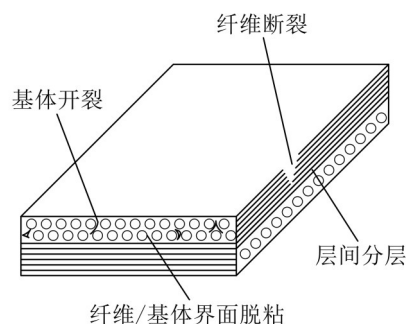


图11 复合材料的损伤模式^[38]

Fig. 11 Damage modes of composite materials^[38]

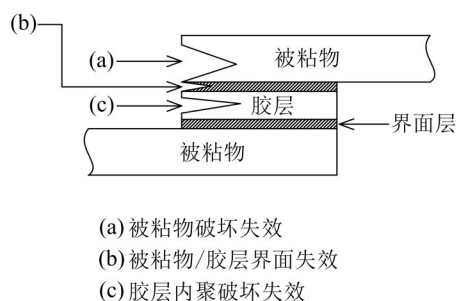


图12 胶接接头的损伤模式^[39]

Fig. 12 Damage modes of adhesive joints^[39]

对层合板与胶接体系损伤行为的分析表明,低速冲击载荷会同步诱发层合板内部多级损伤与胶接界面失效,这两类损伤并非独立演化,而是相互诱导、竞争耦合扩展,直接决定了结构在冲击后的剩余承载能力与失效演化规律。

3 复合材料胶接结构低速冲击损伤的影响因素

3.1 冲击载荷特性

冲击载荷特性对损伤程度具有决定性影响,主要因素包括冲击能量、冲击速度、冲头几何形

状、冲击角度和冲击位置等。

1) 冲击能量:是影响胶接结构冲击响应最核心的因素,直接决定损伤的严重程度,能量越高,造成的损伤越严重,包括更大的表面凹坑、更广的脱粘面积和更高的纤维断裂概率,单搭接胶接结构在不同能量冲击下的接触力-时间曲线如图13所示。对于低速冲击,航空工程中通常以勉强目视可见冲击损伤(Barely Visible Impact Damage, BVID,通常指冲击后立即测量的凹坑深度1.0~1.3 mm)和目视可见冲击损伤(Visible Impact Damage, VID,通常指冲击后立即测量的凹坑深度约2.5 mm)作为两个关键的能量阈值,分别代表结构安全的“红线”和需要立即维修的界限^[40]。值得注意的是,BVID作为层合板损伤容限设计的基准点,其与结构设计许用值的映射关系已形成较为成熟的体系;但对于胶接结构,由于胶层界面脱粘与被粘物内部分层的耦合效应,同一凹坑深度可能对应截然不同的内部损伤状态,直接套用层合板的BVID许用值映射方法存在安全裕度不足的风险,二者的精准量化对接仍是当前研究中亟待解决的工程问题。

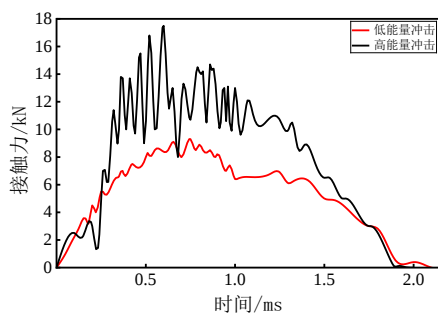


图13 不同冲击能量下胶接接头的接触力-时间曲线^[33]

Fig. 13 Contact force-time curves of adhesive joints under different impact energies^[33]

2) 冲击速度:在相同能量下,不同冲击速度和质量的组合也会产生不同的损伤模式,低速高质量冲击易引发大面积界面脱粘,高速低质量冲击易造成局部纤维断裂和内聚破坏。Galliot等^[41]的研究发现相同冲击能量下,冲击速度(加载速率)主导复合材料胶接结构的抗冲击性能:速度越高,结构的失效载荷、吸收能量和刚度均显著提升,而失效伸长量不受影响。

3) 冲头几何形状:冲头的形状(如球形、圆柱形)决定了接触面积和应力分布,尖锐的冲头会产

生更高的局部应力,更容易造成更深的凹坑或穿透损伤,而钝头冲击则倾向于产生更大面积的内部损伤(如分层)。Hosseinzadeh等^[42]的研究对比半球形(直径12.7 mm)与圆柱形(直径6.35 mm)冲头的冲击效果,发现圆柱形冲头冲击后试样表面凹坑更小,但内部损伤扩展范围更广,总损伤面积较半球形冲头扩大约30%。该差异主要源于两方面机制:一是圆柱形冲头接触面积更小,局部接触压强更高,更易诱发基体压溃与纤维屈曲;二是圆柱形冲头端部存在锐边,冲击过程中会在接触界面边缘形成显著的剪切应力集中,产生环形剪切损伤带,进一步加剧胶层内聚破坏与内部层间损伤扩展。

4) 冲击角度:不同的冲击角度对复合材料胶接结构造成的损伤不同。Atahan等^[43]研究了0°~60°斜向冲击对单搭接胶接结构的影响,发现冲击角度的增大会显著降低接触力峰值并延长接触时间,降低损伤程度。

5) 冲击位置:不同的冲击位置对接头损伤程度的影响极为显著。聂恒昌等^[44]对在搭接区域3个不同位置承受低速冲击的斜搭接接头进行冲击后拉伸试验,发现冲击位置会通过胶层缓冲效果显著改变复合材料斜搭接接头的冲击损伤程度与冲击后拉伸剩余强度,搭接中部抗冲击性能最优、搭接尖端背侧最弱,胶层脱粘与纤维大范围断裂共同引发接头最终失效。

3.2 环境因素

在复合材料胶接结构的实际服役环境中,温度和湿度是两个最为普遍且影响深远的外部因素,高温、高湿或二者共同作用会显著劣化基体和胶层的力学性能,进而对结构的低速冲击损伤行为产生决定性影响。其中,湿热耦合作为航空器在热带、海洋等典型服役场景下的真实环境,已成为学术界和工业界关注的重点。

在湿热环境下,水分会通过扩散作用逐渐渗入层合板和胶粘剂内部,导致复合材料胶接结构发生性能退化,其主要劣化机制如下^[45]:1)塑化效应,水分作为增塑剂,削弱了聚合物分子链间的相互作用力,导致材料模量、强度、玻璃化转变温度显著降低;2)内应力效应,吸湿膨胀会在纤维/基体界面、铺层之间以及胶接界面处产生额外的内应力,可能诱发微裂纹或加速已有缺陷的扩展;3)

水解效应,在高温条件下,水分可能与树脂基体或胶粘剂中的某些化学键发生水解反应,造成不可逆的化学降解,从根本上削弱材料的承载能力。

对于胶接结构而言,胶层因其较大的比表面积和相对疏松的网络结构,对湿热环境尤为敏感,湿热老化会严重削弱胶粘剂自身的内聚强度以及其与被粘物之间的界面结合力,使得胶接接头在冲击载荷下更容易发生脱粘或内聚破坏。因此,在评估复合材料胶接结构的抗冲击性能时,必须充分考虑其在湿热环境下的性能衰减,以确保结构在全生命周期内的安全性和可靠性。

现有研究主要侧重单一环境因素对复合材料胶接结构的抗低速冲击性能的影响,且大多数学者将重点集中在温度作用上。Sayman等^[34]的研究以玻璃纤维-环氧复合材料单搭接胶接接头为对象,设置4种冲击温度(−20、23、50和80℃),发现常温下接头承载能力最优,高低温均会削弱胶接性能。Huang等^[46]以CFRP、GFRP及高强度钢为被粘物,用环氧胶制单搭接接头,研究−40~80℃与0.5~2.5J低能量冲击耦合对剩余拉伸性能的影响,研究发现发现低温易致复合材料断裂,50℃因“裂纹钝化效应”剩余强度随冲击能量提升。栾

建泽等^[47]对铝合金-BFRP粘接接头在−10℃、−40℃下进行0~30天低温老化试验,发现低温不直接破坏BFRP材料自身结构,但会通过热应力削弱粘接界面,降低接头抗冲击性能,且温度越低、时间越长,劣化越显著。相较探究温度影响的相关研究,胶接结构在高湿环境下的抗冲击性能研究则相对偏少。Mertgenç Yoldaş等^[48]探究爱琴海海水浸泡时长对GFRP、CFRP单搭接胶接接头吸湿与轴向冲击损伤的影响,发现GFRP吸湿与冲击韧性增幅更大,但海水造成的界面损伤更严重,CFRP胶接接头海洋环境耐久性能更优。

3.3 材料特性

构成胶接结构的各组分材料的性能是直接决定胶接结构抗冲击性能的根本因素,主要包括胶粘剂性能与复合材料被粘物性能两大核心部分。

1) 胶粘剂:胶粘剂的类型(如环氧、改性环氧、热塑性胶)、模量、韧性、强度等是影响胶接接头性能的核心参数。国内航空工程中常用的胶粘剂型号有SY-14、SY-24C、J-116B、FM-73M、Araldite 2015、Redux 312等,它们的基本力学性能参数如表1所示。

表1 常用胶粘剂的基本力学性能参数^[49-57]
Table 1 Basic mechanical property parameters of commonly used adhesives^[49-57]

胶粘剂型号	弹性模量 (MPa)	泊松比 ν	剥离强度 (MPa)	剪切强度 (MPa)	断裂韧性 G_{IC}/G_{IIC} (N/mm)
SY-14 ^[49-50]	3 600	0.35	66.0	40.0	0.70/1.40
SY-24C ^[51-52]	5 750	0.30	45.2	36.5	0.48/0.64
J-116B ^[53]	2 000	0.39	10.0	24.5	0.25/0.67
FM-73M ^[54]	2 270	0.35	37.3	46.1	0.90/1.80
Araldite 2015 ^[54-55]	1 850	0.33	21.6	17.9	0.43/4.70
Redux 312 ^[56-57]	3 000	0.40	9.1	43.0	0.35/0.95

Komorek等^[58]的研究采用6种不同胶粘剂制作单搭接胶接接头,发现受载破坏时内聚破坏和脱粘比例相等的胶粘剂具有最优的静态剪切强度和冲击强度。Vaidya等^[59]对比三种不同性能的胶粘剂,发现胶粘剂类型对复合材料胶接结构抗冲击性能影响显著,核心取决于胶粘剂的韧性、弹性模量及失效应变等性能,韧性更高的胶粘剂,其胶接结构抗冲击性能更好,且弹性模量与失效应变的变化若相互抵消,不会显著改变结构抗冲击性

能。罗书舟等^[60]的研究也表明,复合材料胶接接头的抗冲击能力、失效形貌、吸能特性高度依赖胶粘剂自身力学性能,胶层韧性是胶接抗冲击设计的关键控制参数。

2) 被粘物:被粘物的材料(CFRP、GFRP等)及其表面状态(粗糙度、清洁度、底涂处理)直接影响界面结合强度。Luan等^[13]分别以铝合金和碳纤维增强热塑性复合材料为冲击面进行横向冲击实验,发现冲击面选择对胶接结构抗冲击性能影响

显著,碳纤增强热塑性复合材料作为冲击面时能通过自身高硬度与纤维层缓冲作用减轻损伤、维持更高剩余强度,且冲击过程中冲击损伤与机械互锁效应共同决定接头最终力学性能。

3.4 结构设计参数

合理的结构设计可以在不增加重量的前提下,有效提升抗冲击性能。

1) 胶接形式:不同的胶接形式对应力分布有显著影响。单搭接接头因载荷偏心会产生较大的剥离应力,容易在端部引发脱粘;双搭接接头载荷对称,以纯剪切为主,应力状态更优;斜面或阶梯式搭接则能有效缓解剥离应力集中^[27,36]。

2) 搭接长度:搭接长度影响载荷传递的有效区域。Gomes等^[61-62]发现搭接长度增大可提升复合材料胶接结构的抗冲击最大载荷,但影响效果因胶粘剂类型而异。赵明明等^[63]对不同搭接长度的CFRP单搭接胶接接头开展低速冲击与拉伸实验,发现无损与受特定低能量冲击后的接头拉伸强度均随搭接长度提升而增大,搭接长度达到一定值时冲击后剩余强度保有比例趋于稳定。

3) 铺层角度:对于复合材料被粘物,其铺层角度决定了层合板的刚度、强度和损伤模式。Janjua等^[64]分析了局部加厚设计以及加厚层的铺层角度对碳纤维/环氧树脂胶接单搭接接头抗冲击性能和损伤容限的影响,发现合理的铺层设计可以作为一种有效的设计策略,显著提升复合材料胶接接头的抗冲击性能和失效耐受能力。

4 总结与展望

复合材料胶接结构低速冲击损伤研究经数十年发展,已在试验方法、仿真建模、损伤机理与影响因素等方面形成了较为系统的研究体系,但仍存在多处待突破的研究瓶颈。基于前文对国内外研究进展的系统梳理,本文对未来发展方向作出如下展望:

1) 针对当前试验局限于小尺寸单搭接试件且缺乏统一标准的现状,未来亟需建立面向大尺寸工程化胶接结构的低速冲击试验能力。尽管复合材料层合板已有ASTM D7136等成熟标准可供参考,但针对飞机蒙皮-长桁整体壁板等复杂共胶接/共固化结构,仍需对传统落锤/摆锤方法进行

适应性升级,以模拟真实服役边界条件,并探索适配工程级结构的新型试验方法。

2) 现有数值模拟体系多聚焦于简单平面接头,且模型参数依赖专属试验标定,通用性较差^[17-19]。未来研究应致力于发展面向复杂工况与结构的高保真仿真技术,将仿真研究对象拓展至T形、L形、 π 形等复杂正交接头^[29-32],并建立湿热环境与冲击载荷的耦合仿真框架;同时,发展多尺度建模方法以提升模型通用性,并将分析范围从单次瞬态冲击延伸至结构全生命周期的性能预测。

3) 王安妮等^[65]的研究指出,现有无损检测技术难以实时捕捉冲击过程中内部损伤动态演化过程,未来亟需开发融合高速摄像、声发射、同步辐射CT及DIC技术的多场同步原位监测平台,以厘清多尺度损伤的竞争扩展机理。更重要的是,应建立胶接结构的冲击后损伤评估与维修决策体系,单纯依赖凹坑深度判定可能低估安全隐患^[38-40],建议构建“凹坑深度-脱粘面积-剩余强度”三级映射关系:首先通过凹坑深度快速筛查潜在损伤,进而对超阈值区域辅以超声C扫描或锁相热成像精确标定脱粘尺寸,最终基于脱粘面积与剩余强度的量化关系判定维修策略,形成从快速筛查到精确评估的决策链条。

4) 鉴于航空胶接结构在高湿高热环境下的服役需求,单纯研究室温干态或单一因素下的低速冲击性能已无法满足工程需要^[66],未来的研究重点应转向湿热环境与冲击载荷的耦合作用。这要求建立“湿热—冲击”“冲击—湿热”等序贯试验与理论分析框架,深入揭示水分扩散、温度变化对胶层韧性、界面结合力以及复合材料基体性能的协同退化机制^[4,45]。特别是需要量化研究湿热环境如何改变胶接结构的损伤阈值与失效模式,从而确立适用于不同气候区的结构设计许用值与损伤容限准则。

参考文献

- [1] 王皎,侯保江,殷德政,等. 复合材料胶接及胶接+机械连接界面失效分析与试验研究[J]. 强度与环境, 2025, 52(2): 11-19.
Wang Jiao, Hou Baojiang, Yin Dezheng, et al. Failure analysis and experimental research of the adhesive bonding and adhesive Bonding+Mechanical connection interface of composite materials[J]. Structure & Environment Engineering, 2025, 52(2): 11-19. (in Chinese)

- [2] 张新建, 吴宏亮, 陈洁, 等. 民用飞机胶接技术应用分析[J]. 航空制造技术, 2014, 57(17): 46-49.
Zhang Xinjian, Wu Hongliang, Chen Jie, et al. Survey of adhesive bonding technology development of civil aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(17): 46-49. (in Chinese)
- [3] 朱洪艳, 谢志远, 王鹏飞, 等. 航空复合材料结构冲击损伤研究综述[C]// 第八届中国航空学会青年科技论坛. 北京: 中国航空学会, 2018: 26-30.
Zhu Hongyan, Xie Zhiyuan, Wang Pengfei, et al. Review on impact damage of aerospace composite structures[C]// The 8th Youth Science and Technology Forum of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2018: 18-22. (in Chinese)
- [4] 余永波, 晏冬秀, 陈萍. 吸湿对复合材料胶接影响研究及机理探索[J]. 纤维复合材料, 2021, 38(2): 34-38.
Yu Yongbo, Yan Dongxiu, Chen Ping. Study and mechanism exploration on effects of absorbed water to composite bonding process[J]. Fiber Composites, 2021, 38(2): 34-38. (in Chinese)
- [5] 游敏, 李明波, 袁有录, 等. 胶粘剂冲击性能测试方法研究现状[J]. 材料导报, 2019, 33(增刊2): 210-214.
You Min, Li Mingbo, Yuan Youlu, et al. Progress in test methods of impact properties of adhesives[J]. Materials Reports, 2019, 33(S2): 210-214. (in Chinese)
- [6] McQuillen E J, Gause L W, Llorens R E. Low velocity transverse normal impact of graphite epoxy composite laminates[J]. Journal of Composite Materials, 1976, 10(1): 79-91.
- [7] 夏源明, 杨报昌, 李铭. 树脂基体及其复合材料对拉伸冲击载荷的响应[J]. 复合材料学报, 1987, 4(2): 59-65, 107.
Xia Yuanming, Yang Baochang, Li Ming. Tensile impact response of resin matrices and their composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 1987, 4(2): 59-65, 107. (in Chinese)
- [8] Sato C, Iwata H, Ikegami K. Dynamic deformation of tapered lap adhesive joint under impact loading[J]. JSME International Journal Ser A, Mechanics and Material Engineering, 1997, 40(1): 31-36.
- [9] 游敏, 李智, 郑小玲, 等. 冲击速率对胶层中应力-应变影响的数值分析[J]. 固体力学学报, 2008(增刊1): 26-29.
You Min, Li Zhi, Zheng Xiaoling, et al. 3-d modelling of impact velocity on the stress-strain distribution in adhesive layer of metal-to-metal joint[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008(S1): 26-29. (in Chinese)
- [10] 王兆慧. 树脂基复合材料连接技术探析[J]. 纤维复合材料, 2023, 40(2): 86-90.
Wang Zhaohui. Analysis of connection techniques for resin matrix composites[J]. Fiber Composites, 2023, 40(2): 86-90. (in Chinese)
- [11] 杨沫, 万率, 胡津恺, 等. 碳纤维复合材料页型胶接接头横向冲击剩余强度研究[J/OL]. 复合材料科学与工程, 2026-02-09. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=GB7hzhCfPWhXSswOC3_pDvYclpYMryuTcwE36Wv-no_HbRHw8CQvbXm1rbU_q24j9S2GxjB5Xcq4f-PUOHs061fe6U1A3-DITjVtMwQpdeMGZMRNI4Awg-zmdxfX9fmQEDrWROmk3D3xWPiG6X4CgeMmzdEhIk-SPRCqEq6mEWRDC-8XUYAIkUbw==&-uniplatform=NZKPT&-language=CHS.
Yang Mo, Wan Shuai, Hu Jinkai, et al. Study on transverse impact residual strength of carbon fiber composite page bonded joint[J/OL]. China Industrial Economics, 2026-02-09. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=GB7hzhCfPWhXSswOC3_pDvYclpYMryuTcwE36Wv-no_HbRHw8CQvbXm1rbU_q24j9S2GxjB5Xcq4f-PUOHs061fe6U1A3-DITjVtMwQpdeMGZMRNI4Awg-zmdxfX9fmQEDrWROmk3D3xWPiG6X4CgeMmzdEhIk-SPRCqEq6mEWRDC-8XUYAIkUbw==&-uniplatform=NZKPT&-language=CHS.
- [12] 欧阳天, 关志东, 谭日明, 等. 复合材料T型加筋板条冲击损伤及冲击后压缩行为试验[J]. 复合材料学报, 2018, 35(10): 2689-2697.
Ouyang Tian, Guan Zhidong, Tan Riming, et al. Experimental study on stiffener impact damage and compression after impact behavior of T-stiffened composite panels[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2018, 35(10): 2689-2697. (in Chinese)
- [13] Luan X, Deng Y L, Chen J, et al. Damage evolution and residual strength evaluation of Al/CFRTP adhesive joints under transverse impact[J]. Journal of Composites Science, 2025, 9(9): 490.
- [14] Togar Y E, Ozenc M. An investigation on the mechanical behavior of mixed adhesively bonded composite joints subjected to transverse pre-impact following by axial post-tensile [J]. Materials Today Communications, 2023, 35: 105590.
- [15] 李剑, 刘继红. 摆锤式冲击试验机使用注意事项及一般故障的排除[J]. 品牌与标准化, 2017(8): 87-88.
Li Jian, Liu Jihong. Notes on the use of pendulum impact tester and general troubleshooting methods[J]. Enterprise Standardization, 2017(8): 87-88. (in Chinese)
- [16] Kemiklioglu U, Baba B O. Mechanical response of adhesively bonded composite joints subjected to vibration load and axial impact[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 176: 107317.
- [17] 郑佩谕, 展婷变. 碳纤维层合板冲击载荷下损伤模型对比分析[J/OL]. 兵器材料科学与工程, 2025-12-02. <https://doi.org/10.14024/j.cnki.1004-244x.20251202.005>.
Zheng Peiyu, Zhan Tingbian. Comparative analysis of damage models of carbon fiber laminates under impact load[J/

- OL]. China Industrial Economics, 2025-12-02. <https://doi.org/10.14024/j.cnki.1004-244x.20251202.005>.
- [18] 於卫军, 王帅, 石玉红, 等. 基于Hashin-Puck准则的复合材料连接失效行为预测方法研究[J]. 宇航总体技术, 2025, 9(4): 39-45.
- Yu Weijun, Wang Shuai, Shi Yuhong, et al. A method for predicting failure behavior in composite countersunk bolt connections based on hashin-puck criterion and its applications [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2025, 9(4): 39-45. (in Chinese)
- [19] 雷在林, 张伟, 原中晋, 等. 复合材料LaRC05强度准则在Abaqus中的应用[J]. 纤维复合材料, 2019(2): 15-18, 14.
- Lei Zailin, Zhang Wei, Yuan Zhongjin, et al. Application of LaRC strength criteria for composites on Abaqus [J]. Fiber Composites, 2019(2): 15-18, 14. (in Chinese)
- [20] 张幻实, 张发, 高丽敏, 等. 复合材料带填充钉孔层压板拉伸载荷下损伤特性分析[J]. 复合材料科学与工程, 2023(3): 89-94.
- Zhang Huanshi, Zhang Fa, Gao Limin, et al. Damage characteristics analysis of composite laminates with filled nail holes under tensile load [J]. Composites Science and Engineering, 2023(3): 89-94. (in Chinese)
- [21] Long S C, Yao X H, Zhang X Q. Delamination prediction in composite laminates under low-velocity impact [J]. Composite Structures, 2015, 132: 290-298.
- [22] 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.
- [23] Lyu Q H, Wang B, Guo Z Y. Predicting post-impact compression strength of composite laminates under multiple low-velocity impacts [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 164: 107322.
- [24] 李峰忠, 金士杰, 张新垚, 等. 低速冲击下复合材料层合板损伤预测模型评估[J]. 复合材料学报, 2025, 42(6): 3521-3534.
- Li Fengzhong, Jin Shijie, Zhang Xinyao, et al. Assessment of damage prediction models for composite laminates under low-velocity impact [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(6): 3521-3534. (in Chinese)
- [25] Dugdale D S. Yielding of steel sheets containing slits [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8(2): 100-104.
- [26] 何振鹏, 邓殿凯, 刘国峰, 等. 基于内聚力模型的复合材料裂纹扩展研究[J]. 复合材料科学与工程, 2022(1): 5-12.
- He Zhenpeng, Deng Diangkai, Liu Guofeng, et al. Research on crack propagation of composite materials based on cohesive zone model [J]. Composites Science and Engineering, 2022(1): 5-12. (in Chinese)
- [27] Liu B, Han Q, Zhong X P, et al. The impact damage and residual load capacity of composite stepped bonding repairs and joints [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 158: 339-351.
- [28] 孙振辉, 铁瑛, 侯玉亮, 等. 相对冲击位置和补片层数对胶接修理CFRP复合材料层合板抗冲击性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(5): 1114-1123.
- Sun Zhenhui, Tie Ying, Hou Yuliang, et al. Effect of relative impact location and patch layer number on impact resistance of adhesive repaired CFRP composite laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(5): 1114-1123. (in Chinese)
- [29] 周祥, 胡业发, 黄向阳, 等. 碳纤维复合材料T型胶接接头损伤行为研究[J]. 数字制造科学, 2018, 16(4): 269-274.
- Zhou Xiang, Hu Yefa, Huang Xiangyang, et al. Study on damage behaviour of CFRP T-joint [J]. Digital Manufacture Science, 2018, 16(4): 269-274. (in Chinese)
- [30] 王彬. CFRP T型胶接接头胶层损伤行为仿真与实验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- Wang Bin. Simulation and experiment research on damage behavior of the adhesive layer of CFRP T-joint [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [31] 拓宏亮, 卢智先, 马晓平, 等. 基于内聚力行为的复合材料L型胶接接头分层扩展研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(2): 309-316.
- Tuo Hongliang, Lu Zhixian, Ma Xiaoping, et al. Study on delamination damage evolution of composite L-shaped adhesive joint based on cohesive behavior [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(2): 309-316. (in Chinese)
- [32] 江峰, 胡业发, 宋春生. 基于FBG传感碳纤维复合材料 π 型胶接接头损伤监测[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(7): 19-25.
- Jiang Feng, Hu Yefa, Song Chunsheng. Damage monitoring of carbon fiber reinforced plastic π adhesive joint based on fiber Bragg grating [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2018(7): 19-25. (in Chinese)
- [33] Hu C X, Huang G B, Li C. Experimental and numerical study of low-velocity impact and tensile after impact for CFRP laminates single-lap joints adhesively bonded structure [J]. Materials, 2021, 14(4): 1016.
- [34] Sayman O, Arikian V, Dogan A, et al. Failure analysis of adhesively bonded composite joints under transverse impact and different temperatures [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 54: 409-414.
- [35] Liu X L, Shao X F, Li Q, et al. Failure mechanisms in carbon fiber reinforced plastics (CFRP)/aluminum (Al) adhesive bonds subjected to low-velocity transverse pre-impact following by axial post-tension [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 172: 339-351.
- [36] 刘斌, 徐绯, 司源, 等. 飞机用复合材料斜胶接修补结构的冲击损伤[J]. 复合材料学报, 2018, 35(10): 2698-2705.
- Liu Bin, Xu Fei, Si Yuan, et al. Impact damage of compos-

- ite scarf bonded repair structure for aircraft[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2018, 35(10): 2698-2705. (in Chinese)
- [37] Liu X L, Shao X F, Li Q, et al. Experimental study on residual properties of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) and aluminum single-lap adhesive joints at different strain rates after transverse pre-impact[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 124: 105372.
- [38] 孙洋, 黄建, 赵振强, 等. 二维三轴编织碳纤维复合材料的冲击响应及冲击后压缩行为[J]. *材料工程*, 2025, 53(1): 211-218.
- Sun Yang, Huang Jian, Zhao Zhenqiang, et al. Impact response and post-impact compression behavior of two-dimensional triaxially braided carbon fiber composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2025, 53(1): 211-218. (in Chinese)
- [39] 冯闯, 赵广慧. 复合材料胶接接头力学性能的研究进展[J]. *中国塑料*, 2021, 35(11): 144-160.
- Feng Chuang, Zhao Guanghui. Research progress on mechanical properties of adhesive joints in composite materials[J]. *China Plastics*, 2021, 35(11): 144-160. (in Chinese)
- [40] 孙侠生. 民用飞机结构强度刚度设计与验证指南[M]. 3版. 北京: 航空工业出版社, 2012: 191-197.
- Sun Xiasheng. Design and Verification Guide for Structural Strength and Stiffness of Civil Aircraft [M]. 3rd ed. Beijing: Aviation Industry Press, 2012: 191-197. (in Chinese)
- [41] Galliot C, Rousseau J, Verchery G. Drop weight tensile impact testing of adhesively bonded carbon/epoxy laminate joints[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012, 35: 68-75.
- [42] Hosseinzadeh A, Shariati M, Zamani P, et al. On residual mechanical behavior of aluminum-to-composite bonded joints after low velocity transverse impact[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2025, 140: 104025.
- [43] Atahan M G, Apalak M K. Experimental investigation of oblique impact behavior of adhesively bonded composite single-lap joints[J]. *Applied Composite Materials*, 2022, 29(3): 1293-1319.
- [44] 聂恒昌, 徐吉峰, 关志东, 等. 冲击位置对斜搭接接头冲击后拉伸性能的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(11): 2306-2320.
- Nie Hengchang, Xu Jifeng, Guan Zhidong, et al. Tensile behavior of scarf joints after impact in different locations[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(11): 2306-2320. (in Chinese)
- [45] Mamalis D, Floreani C, Ó Brádaigh C M. Influence of hygrothermal ageing on the mechanical properties of unidirectional carbon fibre reinforced powder epoxy composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 225: 109281.
- [46] Huang W, Sun L Y, Liu Y, et al. Effects of low-energy impact at different temperatures on residual properties of adhesively bonded single-lap joints with composites substrates[J]. *Composite Structures*, 2021, 267: 113860.
- [47] 栾建泽, 那景新, 谭伟, 等. 服役低温老化对铝合金-玄武岩纤维增强树脂复合材料粘接接头力学性能的影响及失效预测[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(8): 1884-1893.
- Luan Jianze, Na Jingxin, Tan Wei, et al. Effect of service low-temperature aging on mechanical properties of aluminum alloy-basalt fiber reinforced polymer composite bonding joints and failure prediction[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 1884-1893. (in Chinese)
- [48] Mertgenç Yoldaş D, Yoldaş M F. Investigation of diffusion of different composite materials on the damage caused by axial impact adhesive joints[J]. *Journal of Composites Science*, 2025, 9(4): 188.
- [49] Cheng X Q, Zhang J, Bao J W, et al. Low-velocity impact performance and effect factor analysis of scarf-repaired composite laminates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 111: 85-93.
- [50] 敖麒云, 李雨凡, 刘磊, 等. 复合材料结构斜挖补胶接修复形状优化[J/OL]. *复合材料学报*, 2026-06-30. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20260629.001>.
- Ao Qiyun, Li Yufan, Liu Lei, et al. Shape optimization of composite structure repaired by oblique digging and bonding[J/OL]. *China Industrial Economics*, 2026-06-30. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20260629.001>.
- [51] 方金荣, 胡俊山, 陈培林, 等. 航空钛合金损伤构件CFRP单面贴补修复界面 I 型断裂力学特性[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(5): 2514-2527.
- Fang Jinrong, Hu Junshan, Chen Peilin, et al. Mechanical characterization of mode I fracture at the interface of CFRP single-sided patch repair of damaged aerospace titanium alloy components[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2025, 42(5): 2514-2527. (in Chinese)
- [52] 李绍春, 熊峻江. 复合材料胶接修补件力学性能的实验研究与数值模拟[J]. *材料工程*, 2011, 39(6): 11-16.
- Li Shaochun, Xiong Junjiang. Experimental investigation and numerical simulation on mechanical properties of notched metallic panels repaired with bonded composite patch[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2011, 39(6): 11-16. (in Chinese)
- [53] 林国伟, 李新祥. 复合材料加筋板后屈曲分析方法及实验验证[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(4): 149-156.
- Lin Guowei, Li Xinxiang. Post-buckling analysis method of stiffened composite panels and test verification[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(4): 149-156. (in Chinese)
- [54] 冯威. 原位斜接修复复合材料结构服役环境力学性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2019.
- Feng Wei. On the performance of in-service composite structures repaired through in-situ scarf method[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019. (in Chinese)

- [55] Fernández-Canadas L M, Iváñez I, Sanchez-Saez S. Influence of the cohesive law shape on the composite adhesively-bonded patch repair behaviour[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 91: 414-421.
- [56] 葛仁红. 含负曲率复合材料加筋壁板的承载能力研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
Ge Renhong. Research on carrying capacity of negative-curved stiffened composite panels [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [57] Hexcel Corporation. HexBond™ 312 modified epoxy film adhesive product data sheet[R/OL]. Duxford: Hexcel Composites, 2019 [2026-07-26]. https://www.hexcel.com/wp-content/uploads/2025/12/HexBond_312_Data_Sheet_eu.pdf.
- [58] Komorek A, Żeglarski P, Godzimirski J. Impact strength of adhesive joints of pre-impregnated composite elements[J]. *Materials*, 2025, 18(12): 2887.
- [59] Vaidya U K, Gautam A R S, Hosur M, et al. Experimental - numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2006, 26(3): 184-198.
- [60] 罗书舟, 陈超, 伍乾坤, 等. 复合材料单搭接胶接头低速冲击数值模拟[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(1): 142-148, 186.
Luo Shuzhou, Chen Chao, Wu Qiankun, et al. Numerical simulation for low velocity impact performances of composite laminates single-lap adhesively bonded joints[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(1): 142-148, 186. (in Chinese)
- [61] Gomes L A R, Campilho R D S G, Valente J P A. Parametric analysis of double-lap composite adhesive joints under impact loads[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2023, 47: 94-101.
- [62] Gomes L A R, Campilho R D S G, Valente J P A, et al. Impact loading analysis of double-lap composite bonded joints[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2024, 128: 103547.
- [63] 赵明明, 胡业发, 张锦光, 等. 搭接长度对CFRP单搭接胶接头剩余强度影响研究[J]. *数字制造科学*, 2020, 18(1): 91-96, 110.
Zhao Mingming, Hu Yefa, Zhang Jinguang, et al. Study on the influence of the lap length on the residual tensile strength of CFRP single-lap adhesive joints with low speed damage [J]. *Digital Manufacture Science*, 2020, 18(1): 91-96, 110. (in Chinese)
- [64] Janjua R A I, Sajid Z, Mubashar A, et al. Effect of thickening configuration on tensile after impact of thickened CFRP bonded single lap joints[J]. *Thin-Walled Structures*, 2026, 229: 115183.
- [65] 王安妮, 刘晓刚, 岳清瑞. 碳纤维增强树脂基复合材料及其拉索抗低速冲击性能综述[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11): 5049-5061.
Wang Anni, Liu Xiaogang, Yue Qingrui. Low-velocity impact resistance of carbon fiber reinforced polymer composite and its cables: A review[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(11): 5049-5061. (in Chinese)
- [66] Liu T Q, Liu X, Feng P. A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191: 107958.

(编辑:马文静)