http://pmse.scu.edu.cn

挖补修理复合材料层合板疲劳性能研究进展

邓金鑫[1,2]，陈 林[3]，徐 辉[3]，黄文俊[4]，程小全[1,2]

（1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191；2. 北京航空航天大学宁波创新研究院，浙江 宁波 315800；
3. 大连长丰实业总公司，辽宁 大连 116038；4. 中国直升机设计研究所，江西 景德镇 333001）

摘要：随着纤维增强复合材料结构的应用更加广泛，其结构修理问题日渐凸显。挖补修理在复合材料层合板修理中具有重要地位，而修理后结构的疲劳性能是评价结构修理质量的重要依据，因此对复合材料挖补修理层合板疲劳性能的研究意义重大。文中从模型和试验两方面总结了挖补修理复合材料层合板疲劳性能研究现状，指出了当前挖补修理复合材料层合板疲劳性能研究存在的问题，可为复合材料结构挖补修理研究和工程应用提供参考。

关键词：复合材料；层合板；挖补修理；疲劳性能

中图分类号：TB33 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）02-0164-09

复合材料因其比强度高和比刚度高、可设计、耐腐蚀等诸多优点，在大型飞机、先进战斗机、直升机和空天往返器等的先进飞行器结构中大量应用[1-3]。复合材料结构层间性能低、抗冲击性能差，服役期间承受的疲劳、冲击载荷和高温、高湿环境考验使复合材料结构修理问题日益突出[4]。

层合板是复合材料结构的典型应用形式，其修理方法包括机械连接修理和胶接修理两大类。胶接挖补修理具有应力集中程度小、抗疲劳性能好、结构增重少、气动外形影响小等特点，在层合板修理方法中具有重要地位[5]。修理后结构的力学性能是评估修理效果的关键指标，对复合材料挖补修理层合板的力学性能研究具有重要意义。

迄今为止，国内外针对修理结构的静力性能研究已经较为成熟，而对疲劳性能的研究较少，仅有少量有关复合材料胶接修理结构的疲劳性能研究综述。Wahab对胶接结构疲劳性能的早期研究进行了梳理，其研究对象只涉及胶接接头，没有挖补修理结构的直接研究[6]。郭霞等单方面总结了复合材料胶接结构疲劳性能和寿命预测方法，缺乏对胶接结构疲劳性能试验研究的介绍[7]。Orsatelli从模型和试验两方面总结了复合材料胶接结构力学性能研究现状，但涉及胶接结构疲劳性能的内容较少，而且缺乏对挖补修理结构的疲劳性能研究的介绍[4]。本文将从模型和试验两方面总结挖补修理复合材料层合板疲劳性能研究现状，分析当前挖补修理复合材料层合板疲劳性能研究存在的问题，旨在为复合材料结构挖补修理研究和工程应用提供参考。

1 挖补修理复合材料层合板的疲劳模型

挖补修理复合材料层合板按几何区域可以分为被修理母板、修理补片和胶黏剂三部分，按材料属性可分为复合材料和胶黏剂两部分。2种材料分别适用不同的疲劳模型，包括本构关系、损伤判据和衰减准则三部分。

1.1 层合板疲劳模型

自20世纪70年代以来，众多学者针对复合材料疲劳性能建立了多种多样的模型，这些模型研究主

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0026
收稿日期：2023-04-11
通讯联系人：程小全，主要从事复合材料结构分析与设计研究，E-mail: xiaoquan_cheng@buaa.edu.cn

要关注3个问题:疲劳寿命、结构剩余力学性能和疲劳损伤扩展行为。文献[8]对此做了较为系统的总结。当前复合材料疲劳性能分析模型大都以静力模型为基础,认为静力状态下的复合材料本构关系在疲劳载荷下仍然适用,但模量、强度等材料性能随着疲劳循环数的增加而不断变化,并且其变化规律受到载荷水平、应力比、加载频率等多种因素影响,从而建立复合材料层合板疲劳性能分析模型。

1.2　胶黏剂疲劳模型

胶接结构的疲劳性能与胶黏剂性能密切相关,而胶黏剂的力学性能显著低于层合板,因此胶黏剂的疲劳模型是胶接结构疲劳性能预测的关键。

1.2.1　胶黏剂的力学本构模型:关于胶黏剂力学本构模型,目前主要存在2种观点,并分别对应不同的破坏准则和衰减准则。

一些学者将胶接区域视为各向同性材料,采用弹性或弹塑性本构来描述胶黏剂的载荷响应[9],其采用的破坏判据主要有第三强度理论和第四强度理论。在疲劳载荷下,材料性能衰减既要考虑各应力分量导致材料破坏引起的性能突降,又要考虑疲劳循环引起的性能渐降,有如下表达式

$$d=\begin{cases} d_{\mathrm{s}}, \varepsilon \geqslant \varepsilon_{\mathrm{f}} \\ d_{\mathrm{f}}, \varepsilon < \varepsilon_{\mathrm{f}} \end{cases} \tag{1}$$

式中:d,d_{s}和d_{f}——分别表示总的材料性能折减系数、各应力分量导致材料破坏引起的性能突降和疲劳循环引起的性能渐降;ε和ε_f——分别表示当前应变和破坏应变。

性能突降规律一般沿用静力状态的衰减准则;性能渐降规律可能受到应力状态、应力水平、加载频率等多种因素影响,目前没有发现胶黏剂疲劳性能渐降准则的研究报道。有学者参考复合材料疲劳性能退化准则,建立了胶黏剂的强度和刚度退化准则,分别为[10]

$$R(n,\sigma,k)=\left[1-\left(\frac{\lg n-\lg 0.25}{\lg N_{\mathrm{f}}-\lg 0.25}\right)^{\beta}\right]^{\frac{1}{\alpha}}\times(R_0-\sigma)+\sigma \tag{2}$$

$$K(n,\sigma,k)=\left[1-\left(\frac{\lg n-\lg 0.25}{\lg N_{\mathrm{f}}-\lg 0.25}\right)^{\lambda}\right]^{\frac{1}{\gamma}}\times\left(K_0-\frac{\sigma}{\varepsilon_{\mathrm{f}}}\right)+\frac{\sigma}{\varepsilon_{\mathrm{f}}} \tag{3}$$

式中:$R(n,\sigma,k)$,$K(n,\sigma,k)$——循环数为n时的胶黏剂强度和刚度;R_0,K_0——胶黏剂的初始强度和刚度;n,N_f——分别为当前循环数和失效循环数;σ——当前应力水平。考虑到复合材料层合板与斜搭接头在疲劳载荷下强度和刚度退化曲线的相似性,这种做法具有一定的合理性。但文献[10]中未就此开展进一步试验验证。

在复合材料胶接修理结构中,胶接区域很薄,其厚度一般仅为0.1~0.2 mm,因而有一些学者采用断裂力学方法,利用基于牵引-分离理论的内聚力模型(Cohesive zone model, CZM)来描述其力学行为,其中又以双线性本构模型为主[11~13],对应的材料破坏准则有最大应力/应变准则、平方应力/应变准则、指数型应力/应变准则等,其中以平方应力准则应用较多。牵引-分离本构理论中的性能突降规律同样源于静力状态的衰减准则,并有学者提出了多种性能渐降规律[14,15]。Moura认为总的材料性能折减(d)应当是应力分量导致的性能突降(d_{s})与疲劳循环导致的性能渐降(d_{f})之和[15],即

$$d=d_{\mathrm{s}}+d_{\mathrm{f}} \tag{4}$$

并且引入修正的Paris公式来描述疲劳循环导致的性能渐降(d_{f}),其表达式为

$$\Delta d_{\mathrm{f}}(\Delta N)=\frac{\delta_{\mathrm{umk}}\delta_{\mathrm{omk}}C_{1\mathrm{mk}}r_{\mathrm{wk}}}{\delta_{\mathrm{maxk}}^{2}A_{\mathrm{tk}}n_{\mathrm{FPZ}}}\left(\frac{\Delta G_{\mathrm{k}}}{G_{\mathrm{ck}}}\right)^{C2\mathrm{mk}}\Delta N \tag{5}$$

该方法的计算结果与试验吻合较好,已被一些学者采用[11~13]。

1.2.2　不同模型的比较:Tab.1列出了近年来一些学者在研究复合材料胶接结构力学性能时的胶黏剂模型应用情况,其中最后一列为计算结果与试验的相对误差。可以看出,弹性/弹塑性模型较早应用于胶接结构的模型分析,随后CZM模型的应用也渐渐得到推广。对于胶接接头,CZM模型在静力性能分析中逐渐成为主流,在疲劳性能分析中应用更为广泛;

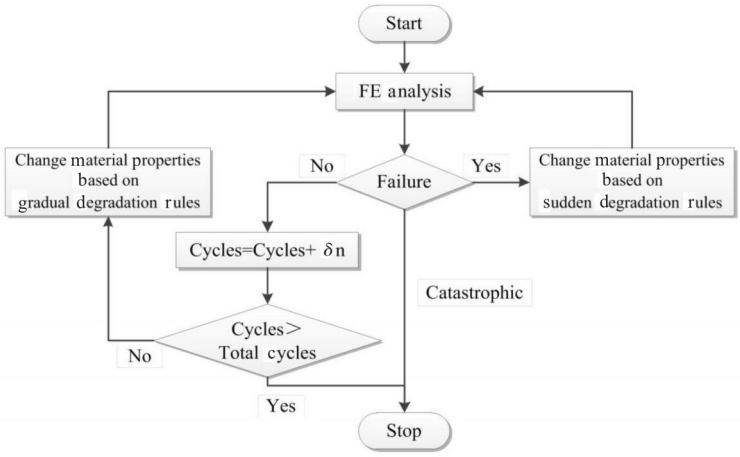


Fig. 1 Flowchart of Shrokrieh's progressive damage model[24]

对于挖补修理层合板，其静力性能分析仍以弹性/弹塑性模型为主，疲劳性能分析中CZM模型应用更少。其原因在于，采用弹性/弹塑性模型分析时，材料性能在大部分阶段是恒定的；而采用CZM模型进行分析时，在超过损伤起始载荷后材料性能就随着加载过程不断退化，导致计算过程可能导致严重的不收敛。这也对模型参数的合理确定提出了更高的要求，而CZM模型还需要提供界面强度、界面刚度、断裂韧性等更多的材料参数。在同一个有限元分析模型中同时采用连续损伤模型（用于复合材料分析）和CZM模型（用于胶黏剂分析）会极大提高模型的非线性，导致庞大的计算量和更差的收敛性；疲劳性能分析还会引入层合板的材料非线性；此外，挖补修理层合板比胶接接头具有更复杂的几何外形和更多的网格数量。这些因素进一步限制了CZM模型在挖补修理层合板和疲劳性能研究中的应用。

1.3 疲劳渐进损伤分析流程

以疲劳寿命模型和唯象模型为基础发展而来的渐进损伤模型，不仅能预测疲劳寿命，还能通过失效准则和损伤变量对材料性能进行退化，进而预测损伤扩展和材料剩余力学性能，近年来备受关注。典型的挖补修理复合材料层合板疲劳渐进损伤分析流程见Fig.1。

在胶接结构疲劳性能有限元分析过程中，学者们大都沿用复合材料疲劳分析的假设，认为疲劳损伤仅在载荷达到循环峰值时萌生和扩展，从而将疲劳分析过程简化为一个从0到最大值的加载过程和保持最大载荷直至分析终止的静态过程（见Fig. 2）[15]，从而避免对每次加载-卸载循环进行计算；此外，将模型分析过程的1个增量步等效为N个循环数，通过调整N的取值来平衡计算速度与计算精度。通过上述措施，极大简化了分析流程并降低了计算成本。

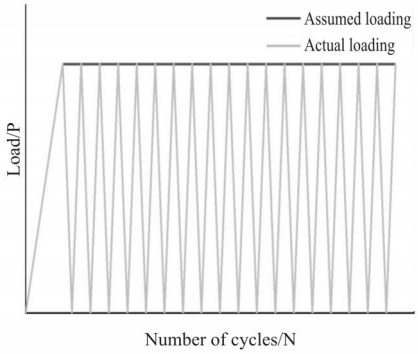


Fig. 2 Constant load process simplified from the loading-unloading process

2 挖补修理复合材料层合板的疲劳性能

胶黏剂的力学性能显著低于复合材料，其中胶黏剂的强度和模量比复合材料单向带低1~2个数量级，使得胶接区域成为胶接结构的薄弱环节。

挖补修理改变了结构的原有构型，尤其是胶层的引入增加了载荷分配和传递的不确定性，因此需要专门研究复合材料挖补修理结构的疲劳性能。由于斜搭接头的传载形式较为简单，能更直观地反映胶黏剂的疲劳性能，且便于观测疲劳裂纹在胶接区域的扩展情况，因此多数学者以斜搭接头为对象进

Tab. 1 Adhesive models in the studies of mechanical properties of composite bonded structures

Year	Reference	Geometry	Load type	FEM type	Constitutive model	Failure criteria	Degradation criteria	Error/%
2009	Yu[16]	SP	Static,compression	3D	Elastic	Third	Sudden	3~9
2009	Breitzman[17]	SP	Static,tension	3D	Elastic-plastic	Fourth	Sudden	7
2013	Cheng[18]	SP	Static,tension	3D	Elastic	Third	N/A	<10
2015	Liu[19]	SP	Static,CAI	3D	Elastic	Third	Sudden	7
2016	Liu[20]	DLJ	Static,tension	3D	Elastic& CZM	Third& square	Sudden& power	3~13
2018	Cheng[21]	SP	Static,compression	3D	Elastic	Third	Sudden	4~13
2020	Zhang[9]	SP	Static,tension & compression	3D	Elastic	Fourth	Sudden	2
2020	Cheng[22]	SCJ	Static,tension	3D	Elastic& CZM	Fourth& maximum	N/A	~5
2008	Tenchev[14]	STJ	Fatigue,tension	2D	CZM	Square	Linear& exponential	N/A
2015	Li[23]	PP	Fatigue,tension	3D	Elastic-plastic	Third	Step	4~9
2015	Moura[15]	SLB	Fatigue,tension	2D	CZM	Square	Linear& paris	N/A
2018	Nie[10]	SP	Fatigue,tension	3D	CZM	Square	Sudden& gradual	No experiment
2020	Moreira[11]	SCJ	Fatigue,tension	2D	CZM	Square	Linear& paris	4
2022	Tuo[13]	SLJ	Fatigue,tension	3D	CZM	Square	Linear& Paris	8.4

SLB: single-leg bending; SLJ: single-lap joint; DLJ: double-lap joint; SCJ: scarf-bonded joint; STJ: step-bonded joint; SP: scarf-repaired panel; PP: patch-repaired panel; Third: third strength criterion; Fourth: fourth strength criterion; Maximum: maximum stress criterion; Square: square stress criterion; Sudden: sudden degradation rules; Gradual: gradual degradation rules; Linear: linear displacement degradation rules; Step: step degradation rules; Power: power degradation rules; Exponential: exponential degradation rules

行疲劳性能研究。

2.1　斜搭接头的疲劳性能

斜搭接头的疲劳性能远低于完好层合板，疲劳强度恢复率也低于静强度。Yoo等发现，斜搭接头的拉伸疲劳强度仅为完好层合板的40%~50%，相比之下静强度约为完好层合板的80%左右[25]。Tenchev等对比了完好层合板和阶梯式斜搭接层合板的拉-拉疲劳性能，发现搭接层合板10^6疲劳寿命对应的载荷水平仅为完好层合板的35%左右[14]。Kim等别进行了完好层合板和阶梯式斜搭接层合板的拉-拉疲劳试验，其中后者的载荷水平为前者的30%，发现经历10^6次循环后，斜搭接层合板的剩余强度和剩余刚度仅为初始状态的93%和80%[26]。众多研究表明，在疲劳载荷下，胶接结构的破坏模式均为胶接区域破坏，且破坏起始于接头表面[27]，在疲劳寿命的大部分阶段，胶黏剂中的裂纹都稳定缓慢扩展，直到最后迅速破坏[11]，而被胶接接头基本完好[14,26]。斜搭接头的刚度退化呈现为2个阶段：在第1阶段，结构刚度平缓下降，从开始至约90%的疲劳寿命；在第2阶段，结构刚度开始加速下降，直至结构破坏；整个寿命期内的刚度退化不超过10%[28]。

材料性能、设计参数、工艺条件、载荷参数等均会影响斜搭接结构的疲劳性能。

2.1.1　*材料性能的影响*：胶黏剂破坏是斜搭接结构最主要的破坏形式，提升胶黏剂性能对提升结构疲劳性能具有重要意义。Khashaba等的研究表明，利用SiC或Al_2O_3粉末对胶黏剂改性可以显著提高胶黏剂模量、强度和胶接接头的疲劳性能，其中疲劳强度

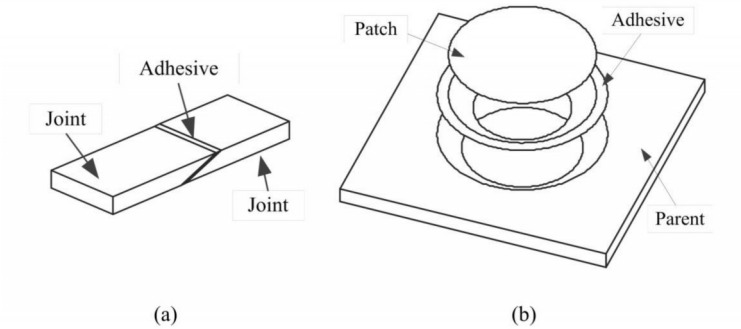


Fig. 3 (a)Scarf-bonded joint and (b)scarf-repaired panel

可提升22%，疲劳寿命可提高12倍以上[29,30]。Jin等提出一种新型自修复环氧胶黏剂，可以有效提高疲劳寿命[31]。

2.1.2 设计参数的影响：胶接结构设计参数主要包括接头几何构型、挖补角度、胶层厚度等方面。

不同接头构型的疲劳性能存在差异。Moreira利用有限元模型比较了单搭接、双搭接、斜搭接、阶梯形搭接等不同构型的胶接结构疲劳性能，结果表明，斜搭接头的疲劳性能最好[32]。考虑到接头的破坏均起始于胶接区域表面，曹双辉等建议对表面铺贴额外铺层予以保护[27]。

修理结构挖补角度对结构疲劳寿命和破坏模式均有显著影响。Yoo等发现，搭接角度的增大会降低结构强度，且搭接角度变化对疲劳强度的影响比静强度更大[25]。Jen等[33]和Kim等[26]也发现了类似的角度与疲劳强度的影响关系；Jen等的研究还表明，随着胶接斜面与载荷方向夹角的增大，破坏模式也从粘接界面破坏逐渐转为胶层破坏[33]。

接头疲劳强度也胶层厚度有关。Khashaba等发现，将胶层厚度从0.25 mm减至0.17 mm后，结构疲劳强度提升了55%[30]。

2.1.3 胶接质量的影响：胶接缺陷会对接头疲劳性能造成不利影响。Moreira等研究了斜搭接头的高周疲劳性能，结果表明，疲劳性能比静力性能对胶黏剂中的气孔缺陷更为敏感，这一点与金属材料十分相似[11]。Olajide等发现，胶接质量导致的疲劳性能分散性比静强度分散性更大[34]。

2.1.4 载荷参数的影响：疲劳载荷参数也会影响疲劳性能。Lin等发现，较高的平均应力和应力幅值会提高胶黏剂累积残余应变，从而降低疲劳寿命；对于变幅疲劳循环，不同水平的载荷加载时序也会影响疲劳寿命[35]。Olajide等在变幅加载条件下讨论了不同频率对斜接修理结构疲劳性能的影响，结果表明，随着加载频率提高，结构温度变化不明显，但疲劳寿命不断降低，当加载频率从2 Hz增加至15 Hz，结构疲劳寿命降幅约为30%[36]。

2.1.5 环境条件的影响：湿热环境对胶接结构疲劳性能的影响主要体现为疲劳强度下降、疲劳寿命缩短和破坏模式转变，过去有不少学者开展了相关研究，Wahab对此进行了总结[6]。需要注意的是，这些结论均基于单搭接或双搭接接头的研究，目前对复合材料斜搭接头疲劳性能的湿热环境影响研究较少，更缺乏温度湿度联合作用的影响研究。

2.2 挖补修理层合板的疲劳性能

斜搭接结构能直接反映胶黏剂的疲劳行为，但对于挖补修理层合板来说，由于修理母板剩余截面的存在，使其传力路径、应力分布和承载能力、损伤模式均与斜搭接头存在差异。有研究表明，由于修理母板的载荷分配，使得挖补修理结构的胶黏剂平均应力比斜搭接头中降低25%[37]。因此，斜搭接头的研究结论并不能直接适用于挖补修理层合板。目前直接针对挖补修理层合板的疲劳性能研究仅见有限的文献报道。

2.2.1 模型研究：一些学者利用有限元模型研究了挖补修理复合材料层合板的疲劳性能。赵书寒研究了穿透式挖补修理复合材料层合板的拉伸疲劳性能[38]。结果表明，在85%静强度的应力水平下，母板的挖补孔边缘一开始就出现了基体损伤，并随着循环数增加不断扩展；经过10^4次循环后，结构剩余刚度和剩余强度分别下降约5%和10%；此外还讨论了

载荷水平、加载顺序和挖补孔径、胶层厚度的影响。聂恒昌研究了复合材料层合板非穿透式和穿透式挖补修理的拉伸疲劳性能[10]。结果表明,在拉伸疲劳载荷下,胶层首先发生损伤,随后在母板和补片中发生纤维破坏,在胶层完全失效后结构承载性能迅速下降,损伤在母板净截面加速扩展直至结构完全失去承载能力。根据结构应力分布和破坏过程,建议采取措施降低胶层剥离应力和母板应力集中以提高结构整体疲劳性能;此外还讨论了挖补斜度、补片直径、挖补层数(深度)、单/双面贴补等修理设计参数的影响。

2.2.2 *试验研究*:目前没有直接针对挖补修理层合板的力学性能试验标准,现有研究都参考复合材料层合板性能试验标准进行。Guan等测试了分别采用预浸料补片和湿铺贴补片的非穿透式挖补修理复合材料层合板的疲劳性能[39]。拉-拉疲劳试验应力水平为静强度的5%,应力比为0.1,经过10^6次循环后进行静拉伸试验。结果表明,在疲劳加载过程中试验件基本没有发生损伤,而结构剩余刚度仅有轻微降低。田可可研究了穿透式挖补修理复合材料层合板的拉伸疲劳性能[40]。结果表明,在80%应力水平下,疲劳循环对修理层合板的剩余强度影响较小,当挖补角度较小时结构剩余强度甚至略有提高,推测原因是疲劳载荷引起了修理母板在挖补孔边的基体损伤,减缓了该区域的应力集中,从而提高了结构整体承载能力。苏雨茹等采用2种湿铺贴方法挖补了层合板,并对非穿透式挖补修理复合材料层合板的压缩疲劳性能进行了研究[41]。结果表明,在应力水平为限制载荷的70%、应力比为10的压-压疲劳载荷下循环10^6次后,结构未发生损伤和明显的刚度降,其剩余强度仍高于限制载荷,2种方法的修理效果未表现出明显差异。

3　结语

当前针对胶接接头疲劳性能的试验和模型研究已经开展了大量研究,其疲劳行为、破坏模式、损伤机理已经较为清楚,不同因素对疲劳性能的影响规律也得到了较多的研究验证。然而,挖补修理层合板与胶接接头在几何构型上的差异决定了二者疲劳性能的差异,对胶接接头的研究结论不能直接适用于挖补修理层合板。当前对挖补修理层合板疲劳性能的研究存在以下不足。

(1) 现有文献对挖补修理层合板的疲劳性能研究仅限于模型或试验研究,缺乏模型与试验的互相验证;现有的模型结果无法完全解释试验现象,挖补修理层合板疲劳性能、破坏模式、损伤机理尚未得到充分揭示。

(2) 材料性能、设计参数、修理工艺、载荷参数、湿热环境等因素对挖补修理层合板疲劳性能的影响规律尚不明确。

(3) 复合材料结构的疲劳分散性较大,且影响因素多,现有的挖补修理层合板疲劳试验较少,需要积累更多的疲劳试验数据。

(4) 当前挖补修理层合板数值研究方法的计算精度和效率的矛盾较为突出,需要对有限元分析模型开展进一步研究。

复合材料挖补修理具有显著的性能优点和良好的应用前景,疲劳寿命是复合材料结构挖补修理效果的重要评价指标。随着复合材料结构修理需求的不断增加,有必要就挖补修理层合板疲劳性能开展更多试验和模型研究,并分析材料性能、设计参数、修理工艺、载荷参数、湿热环境等对挖补修理层合板力学性能的影响,总结挖补修理层合板的力学性能、损伤行为和不同因素的影响规律,为复合材料挖补修理工程应用提供支撑。

参考文献:

[1] Zhang X, Chen Y, Hu J. Recent advances in the development of aerospace materials[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22-34.

[2] 邢丽英, 包建文, 礼嵩明, 等. 先进树脂基复合材料发展现状和面临的挑战[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1327-1338.
Xing L Y, Bao J W, Li S M, *et al*. Development status and facing challenge of advanced polymer matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1327-1338.

[3] 杨智勇, 张东, 顾春辉, 等. 国外空天往返飞行器用先进树脂基复合材料研究与应用进展[J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3029-3043.

Yang Z Y, Zhang D, Gu C H, *et al*. Research and application of advanced resin matrix composites for aerospace shuttle vehicles abroad[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3029-3043.

[4] Orsatelli J B, Paroissien E, Lachaud F, *et al*. Bonded flush repairs for aerospace composite structures: a review on modelling strategies and application to repairs optimization, reliability and durability[J]. Composite Structures, 2022, 304: 116338.

[5] Katnam K B, Da Silva L F M, Young T M. Bonded repair of composite aircraft structures: a review of scientific challenges and opportunities[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 61: 26-42.

[6] Abdel Wahab M M. Fatigue in adhesively bonded joints: a review [J]. ISRN Materials Science, 2012, 3: 746308.

[7] 郭霞, 迟海, 贺俊智, 等. 纤维增强复合材料胶接结构疲劳特性研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(5): 872-878.
Guo X, Chi H, He J Z, *et al*. Research progress on fatigue properties of fiber reinforced composite bonded structures[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2021, 39(5): 872-878.

[8] 程小全, 杜晓渊. 纤维增强复合材料疲劳寿命预测及损伤分析模型研究进展[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(7): 1311-1322.
Cheng X Q, Du X Y. Research development of fatigue life prediction and damage analysis model of fiber- reinforced composite[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(7): 1311-1322.

[9] 张婕, 程小全, 程羽佳, 等. 湿热环境对CCF800/环氧挖补板拉压性能的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1116-1124.
Zhang J, Cheng X Q, Cheng Y J, *et al*. Effect of hygrothermal environment on tensile and compressive properties of CCF800/epoxy scarf- repaired laminates[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(6): 1116-1124.

[10] 聂恒昌. 飞机复合材料胶接修理结构损伤容限及疲劳性能研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2018.
Nie H C. Research on the damage tolerance and fatigue behaviors of adhesively bonded repaired aircraft composite structures[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.

[11] Moreira R D F, De Moura M, Silva F G A, *et al*. High- cycle fatigue analysis of adhesively bonded composite scarf repairs[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 190: 107900.

[12] 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 H L, Lu Z X, Ma X P, *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.

[13] 拓宏亮, 吴涛, 卢智先, 等. 复合材料单搭胶接接头静力与疲劳裂纹扩展研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(4): 91-100.
Tuo H L, Wu T, Lu Z X, *et al*. Study on static and fatigue cracks propagation of single- lap bonded composite joints[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(4): 91-100.

[14] Tenchev R T, Falzon B G. An experimental and numerical study of the static and fatigue performance of a composite adhesive repair[J]. Key Engineering Materials, 2008, 383: 25-34.

[15] De Moura M, Gonçalves J P M. Cohesive zone model for high-cycle fatigue of composite bonded joints under mixed-mode I+II loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 140: 31-42.

[16] 喻梅, 许希武. 复合材料挖补修理结构的压缩强度分析[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(5): 709-714.
Yu M, Xu X W. Study of the compression strength of scarf patch repaired composite structures[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(5): 709-714.

[17] Breitzman T D, Iarve E V, Cook B M, *et al*. Optimization of a composite scarf repair patch under tensile loading[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40: 1921-1930.

[18] Cheng X Q, Baig Y, Renwei H, *et al.* Study of tensile failure mechanisms in scarf repaired CFRP laminates[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 41: 177-185.

[19] Liu S, Cheng X, Xu Y, *et al.* Study on impact performances of scarf- repaired carbon fiber reinforced polymer laminates[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2015, 34: 60-71.

[20] Liu S, Cheng X, Zhang Q, *et al.* An investigation of hygrothermal effects on adhesive materials and double lap shear joints of CFRP composite laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 91:431-440.

[21] Cheng X, Liu S, Zhang J, *et al*. Hygrothermal effects on mechanical behavior of scarf repaired carbon- epoxy laminates subject to axial compression loads: experiment and numerical simulation[J]. Polymer Composites, 2018, 39: 904-914.

[22] Cheng X, Zhang J, Cheng Y, *et al.* Effect of curing condition on mechanical properties of scarf- repaired composite laminates[J]. Steel and Composite Structures, 2020, 37: 419-429.

[23] Li K, Li C, Tie Y, *et al*. Influence of patch parameters on damage and residual strength of adhesively bonded composite repair under fatigue loading[J]. Materials Physics and Mechanics, 2015, 24: 391-402.

[24] Shokrieh M M, Lessard L B. Progressive fatigue damage modeling of composite materials, Part I: modeling[J]. Journal of Composite Materials, 2000, 34: 1056-1080.

[25] Yoo J S, Truong V H, Park M Y, *et al.* Parametric study on static and fatigue strength recovery of scarf- patch- repaired composite laminates[J]. Composite Structures, 2016, 140: 417-432.

[26] Kim J H, Park B J, Han Y W. Evaluation of fatigue characteristics for adhesively-bonded composite stepped lap joint [J]. Composite Structures, 2004, 66: 69-75.

[27] 曹双辉, 高弄玥, 刘斌. 飞机复合材料阶梯式胶接结构的疲劳损伤与寿命[J]. 复合材料科学与工程, 2020(2): 81-84.
Cao S H, Gao N Y, Liu B. Fatigue damage propagation and life of the multi- steps bonding structure of aircraft composites[J]. Composites Science and Engineering, 2020(2): 81-84.

[28] Feng W, Xu F, Xie W, *et al*. Fatigue performances and reliability analysis of fatigue life for scarf-repaired composite laminates[J]. The Journal of Adhesion, 2022, 98: 367-389.

[29] Khashaba U A. Dynamic analysis of scarf adhesive joints in CFRP composites modified with Al_2O_3- nanoparticles under fatigue loading at different temperatures[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 143: 106277.

[30] Khashaba U A, Najjar I M R, Almitani K H. Failure analysis of scarf adhesive joints modified with SiC- nanoparticles under fatigue loading at room temperature[J]. Composites Science and Technology, 2022, 221: 109301.

[31] Jin H, Miller G M, Sottos N R, *et al*. Fracture and fatigue response of a self-healing epoxy adhesive[J]. Polymer, 2011, 52: 1628-1634.

[32] Moreira R D F, De Moura M, Silva F G A, *et al*. Numerical comparison of several composite bonded repairs under fatigue loading[J]. Composite Structures, 2020, 243: 112250.

[33] Jen Y M. Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 36: 30-39.

[34] Olajide S O. Progress on investigation on damage analysis in bonded polymer composites under fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 96: 224-236.

[35] Lin Y C, Chen X M, Zhang J. Uniaxial ratchetting behavior of anisotropic conductive adhesive film under cyclic tension[J]. Polymer Testing, 2011, 30: 8-15.

[36] Olajide S O, Arhatari B D. Progress on interacting fatigue, creep & hysteretic heating in polymer adhesively bonded composite joints[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 98: 68-80.

[37] Gunnion A J, Herszberg I. Parametric study of scarf joints in composite structures[J]. Composite Structures, 2006, 75: 364-376.

[38] 赵书寒. 基于渐进损伤理论的复合材料挖补修理结构性能分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
Zhao S H. Analysis on the composite scarf repaired structure based on progressive damage theory[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.

[39] Guan W, Su Y, Tong G. Static and fatigue properties of scarf patch repaired composite laminates: an experimental study[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 677: 022010.

[40] 田可可. 复合材料挖补结构性能分析和实验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.
Tian K K. Numerical and experimental study on scarf repairment properties of composite material[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.

[41] 苏雨茹, 关志东, 王鑫, 等. 挖补修理复合材料层合板静力压缩与疲劳性能试验研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(5): 98-103.
Su Y R, Guan Z D, Wang X, *et al.* Experimental study on static compression and fatigue properties of scarf repaired composite laminates[J]. Composites Science and Engineering, 2021(5): 98-103.

Progress in Research of Fatigue Properties of Scarf-Repaired Composite Laminates

Jinxin Deng[1,2], Lin Chen[3], Hui Xu[3], Wenjun Huang[4], Xiaoquan Cheng[1,2]

(*1. School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China; 2. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315800, China; 3. Dalian Changfeng Industrial Corporation, Dalian 116038, China; 4. China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China*)

ABSTRACT: With wider applications of fiber reinforced composite structures, the repair problems have become increasingly prominent. The scarf repair plays a significant role in the composite laminate repair, and the fatigue properties of repaired structures are the important factors to characterize repair efficiency, thus the investigations on fatigue properties of scarf-repaired composite laminates are of great significance. In this paper, the status of research on the fatigue performance of scarf-repaired composite laminates were summarized from the aspects of models and experiments, and the problems in the current research of fatigue properties of scarf-repaired composite structures were analyzed in order to provide a reference for the research and application of scarf repair for composite structures.

Keywords: composite; laminate; scarf repair; fatigue properties