

文章编号: 1674-8190(2022)05-078-08

# 湿热环境下聚酰亚胺复合材料的拉脱性能研究

白桃林<sup>1</sup>, 陈普会<sup>1</sup>, 孔斌<sup>1,2</sup>, 张雅会<sup>1</sup>, 蒋坤<sup>2</sup>, 甘建<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

(2. 中国航空工业集团有限公司 成都飞机设计研究所, 成都 610091)

**摘要:** 复合材料结构已被广泛应用于航空航天领域, 为了研究复合材料在不同湿热环境下的力学性能, 分别对低温干态(CTD)、室温干态(RTD)和高温湿态(ETW)三种环境下的某型聚酰亚胺复合材料层压板进行拉脱试验, 并对RTD试验过程进行仿真分析; 通过试验获得两类典型铺层的拉脱强度与破坏模式, 并利用有限元仿真预测失效载荷。结果表明: 某型聚酰亚胺复合材料具有优异的热稳定性, CTD环境下其拉脱强度较RTD环境下的拉脱强度提升8.1%~9.0%, ETW环境下其拉脱强度与RTD环境下的拉脱强度相当; (30/60/10)铺层的拉脱强度略高于(50/40/10)铺层。

**关键词:** 聚酰亚胺复合材料; 机械连接; 拉脱强度; 湿热环境; 数值仿真

中图分类号: V214.8; TB33

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.05.08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Pull-through Properties of Polyimide Composites in Hygrothermal Environments

BAI Taolin<sup>1</sup>, CHEN Puhui<sup>1</sup>, KONG Bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Yahui<sup>1</sup>, JIANG Kun<sup>2</sup>, GAN Jian<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Ltd., Chengdu 610091, China)

**Abstract:** Composite structures have been widely used in the field of aerospace. In order to study the mechanical properties of composites in hygrothermal environments, the pull-through tests of a type of polyimide composite laminates are carried out under three test environments: cold temperature dry (CTD), room temperature dry (RTD) and elevated temperature wet (ETW). The numerical simulation analysis of the RTD test process is carried out. The pull-through strength and failure mode of two typical laminates are obtained by experiment, and the failure load is predicted by simulation analysis. The results show that the type of polyimide composites have excellent thermal stability. The pull-through strength of the composites under CTD condition is 8.1%~9.0% higher than that under RTD condition, and the pull-through strength of the composites under ETW condition is equivalent to that under RTD condition. The pull-through strength of (30/60/10) ply is slightly higher than (40/50/10) ply.

**Key words:** polyimide composites; mechanical joint; pull-through strength; hygrothermal environments; numerical simulation

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2022-03-10

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目

通信作者: 白桃林, tlbai@nuaa.edu.cn

引用格式: 白桃林, 陈普会, 孔斌, 等. 湿热环境下聚酰亚胺复合材料的拉脱性能研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 78-85.

BAI Taolin, CHEN Puhui, KONG Bin, et al. Research on pull-through properties of polyimide composites in hygrothermal environments[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 78-85. (in Chinese)

## 0 引言

在复合材料连接结构设计中,机械连接因具有承载能力强、连接质量易于控制等优点被广泛应用于航空结构<sup>[1]</sup>。设计机械连接结构需对连接部件进行开孔处理,对于开孔结构的面内性能已有较多研究<sup>[2-4]</sup>,但因设计复合材料层压板时要求尽量避免面外载荷,导致复合材料层压板的面外性能常被忽视<sup>[5]</sup>。

Y. S. Rao等<sup>[6]</sup>对纤维增强多层复合材料开孔结构面外性能的研究表明,结构开孔后的抗分层能力较弱。开孔除了会影响复合材料层压板的力学性能外,湿热环境也会影响复合材料的力学性能<sup>[7-9]</sup>,因此对复合材料热力学性能的研究必不可少。谢伟等<sup>[10]</sup>建立了湿热环境下复合材料层压板的本构模型;管清宇等<sup>[11]</sup>通过试验研究了湿热环境对7781/CYCOM7701玻璃纤维/环氧复合材料拉脱性能的影响,试验结果表明高温湿态环境下复合材料的拉脱强度较常温干态环境降低26%;M. I. Kabir等<sup>[12]</sup>发现湿热环境可使复合材料黏结强度下降15%;高泉喜等<sup>[13]</sup>研究了E400/MFE-2DS玻璃纤维复合材料的湿热性能,试验结果表明,当温度上升至150℃时,其弯曲性能下降至常温的10%~24%。

目前对复合材料拉脱性能的研究多集中于对拉脱强度和破坏模式的研究,在有关湿热环境对复合材料拉脱性能影响的研究中,不同类型复合材料的试验结果各不相同。对于特定类型的复合材料,需单独进行拉脱试验才能获得其拉脱性能在不同环境下的变化规律。

本文以某型聚酰亚胺复合材料层压板为研究对象,在不同湿热环境下对其进行拉脱试验,结合试验与数值仿真分析结果,对比分析其拉脱强度与破坏模式,并获得湿热环境对其拉脱性能的影响规律。

## 1 试验

### 1.1 试验件

试验件由某型聚酰亚胺复合材料制成,其纤维材料为碳纤维,基体材料为聚酰亚胺树脂,成型

工艺为热压成型。材料单层厚度为0.125 mm,室温干态(RTD)环境下单层材料属性如表1所示。试验件与沉头螺栓的尺寸分别如图1和表2所示。沉头螺栓与试验件的中心孔配合,制造标准为GJB121.12-86,制造材料为17-4PH合金钢,弹性模量为213 GPa,泊松比为0.27。试验矩阵如表3所示,试验件按试验环境分为低温件、常温件、高温件三类,每类包含两种铺层,每种铺层试验件各6件,共36件。试验件按X-Y-Z规则编号,其中X表示试验环境,Y表示试验件铺层,Z表示试验件序号。

表1 复合材料单层板的材料属性  
Table 1 Mechanical properties of the composite laminate

参数	数值	参数	数值
$E_1/\text{MPa}$	148 000	$X_C/\text{MPa}$	1 345
$E_2/\text{MPa}$	9 440	$Y_T=Z_T/\text{MPa}$	46
$G_{12}=G_{13}/\text{MPa}$	4 530	$Y_C=Z_C/\text{MPa}$	213
$G_{23}/\text{MPa}$	3 190	$S_{12}=S_{13}/\text{MPa}$	70
$\mu_{12}=\mu_{13}$	0.33	$S_{23}/\text{MPa}$	70
$\mu_{23}$	0.48	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 600
$X_T/\text{MPa}$	1 836		

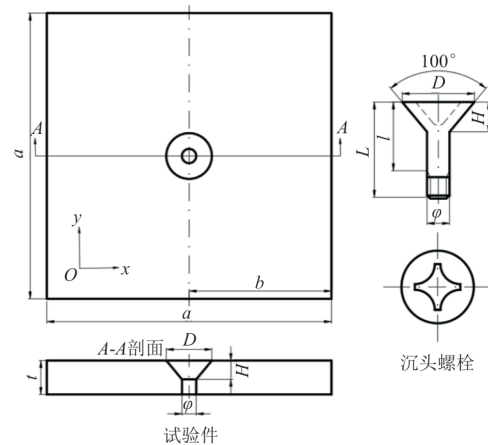


图1 拉脱试验件示意图

Fig. 1 Dimension diagram of pull-through specimen

表2 拉脱试验件尺寸  
Table 2 Dimension of pull-through specimen

参数	数值	参数	数值
$\phi/\text{mm}$	5	$a/\text{mm}$	72
$D/\text{mm}$	10	$b/\text{mm}$	36
$t/\text{mm}$	2.5	$L/\text{mm}$	16
$H/\text{mm}$	2.11	$l/\text{mm}$	6

表 3 拉脱试验矩阵  
Table 3 Test matrix of pull-through experiment

环境条件	铺层顺序	数量
CTD	A	6
	B	6
RTD	A	6
	B	6
ETW	A	6
	B	6

注:①铺层 A—[45/0/-45/90/0/0/45/0/-45/0]<sub>s</sub>;②铺层 B—[45/-45/0/90/0/45/-45/0/45/-45]<sub>s</sub>;③CTD—低温干态:试验温度 -55 °C,吸湿量=制造状态;④RTD—室温干态:试验温度 21 °C,吸湿量=制造状态;⑤ETW—高温湿态:试验温度 350 °C, 70 °C/85% 相对湿度环境下达到吸湿平衡。

## 1.2 试验方法

根据 ASTM D7332 标准<sup>[14]</sup>中的方法 B 测试聚酰亚胺复合材料在 RTD、CTD 和 ETW 三种环境下的拉脱强度。

RTD 试验采用微机控制万能试验机进行加载,如图 2 所示。试验夹具包括 T 形底板、帽形件和夹具拉头三部分,制作材料均为 A3 钢。T 形底板下端夹持在试验机下夹头中,上端与帽形件通过四角螺栓固定连接。帽形件中心开有直径为 38 mm 的间隙孔。间隙孔中心与试验件的螺栓孔中心重合以消除加载偏心。试验件四边与 T 形底板四边平行,装配时沉头螺栓穿过试验件中心孔、帽形件间隙孔和夹具拉头底部的通孔,并通过螺母连接试验件与夹具拉头(图 2(b))。试验时采用位移加载,加载速率为 0.5 mm/min。载荷通过夹具拉头传递到沉头螺栓,进而挤压试验件中心的螺栓孔。

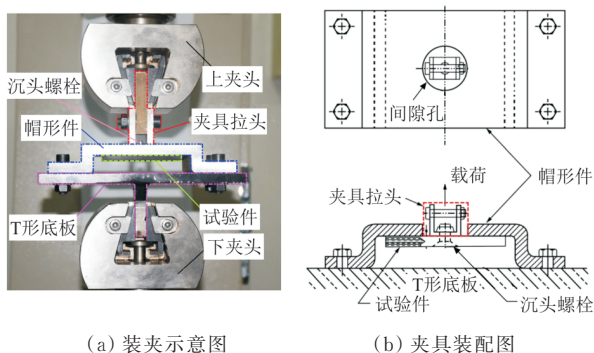


图 2 拉脱试验装置

Fig. 2 Schematic diagram of pull-through test

CTD、ETW 试验的加载过程与 RTD 试验相同,区别在于需要使用不同的试验设备来满足对应的试验条件。CTD 试验采用带低温环境箱的 MTS 试验机进行加载,通过液氮达到 -55 °C 的低温条件,如图 3 所示。

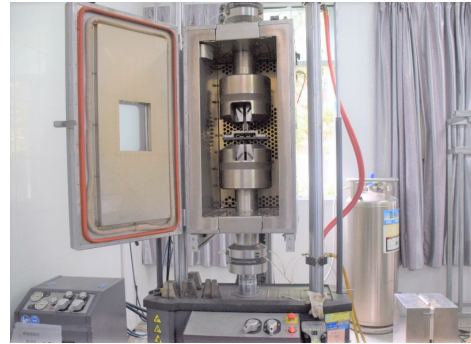


图 3 带低温环境箱的试验机

Fig. 3 Testing machine with low-temperature environment box

ETW 试验加载前按照 ASTM D5229 标准<sup>[15]</sup>对试验件进行吸湿平衡试验:将试验件放置在 XB-OT5-408B-C 程式恒温恒湿环境箱中,如图 4(a)所示。环境箱内保持 70 °C/85% 相对湿度,每隔 7 天测量一次试验件的质量,当试验件吸湿后的质量较前一次的增量不超过 0.020% 时,认为试验件达到吸湿平衡。达到吸湿平衡后,将 ETW 试验件从恒温恒湿环境箱转移到高温试验环境箱,如图 4(b)所示。ETW 试验需在 30 min 内完成以保证试验件处于规定的吸湿状态。



(a) 恒温恒湿环境箱

(b) 带高温环境箱的试验机

图 4 高温试验设备

Fig. 4 High temperature test equipment

## 2 试验结果

### 2.1 ETW 试验件吸湿平衡结果

对试验件进行 8 次称重后,测得试验件吸湿后的质量较前一次的增量变化范围为 0.005%~0.020%,满足吸湿平衡标准。试验过程中 ETW 试验件的最大吸湿量(吸湿后质量较干态质量的增量最大值)为 0.485%。

### 2.2 拉脱试验破坏过程与破坏模式

拉脱载荷下复合材料层压板的载荷—位移曲线如图 5 所示,可以看出:加载初始阶段沉头螺栓头部挤压试验件,引起试验件孔边挤压变形;随着拉伸位移的增大,沉头螺栓逐渐嵌入试验件内部,载荷达到一定值后,试验件产生一声巨响后掉载(掉载幅度大于 10%);随着拉伸位移的进一步增大,载荷总体呈上升趋势,期间伴随断断续续的响声;当载荷增加至最大值时,试件在一声巨响后再次掉载,随后试件损伤加速扩展,载荷逐步降至最大载荷的 70% 时停止加载。

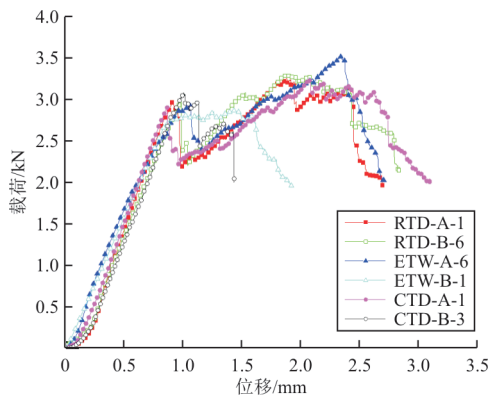


图 5 拉脱试验载荷—位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of pull-through test

试验结束后检查试验件破坏形貌,除 ETW-B-4 试验件出现螺母断裂(FCS)外,其余试验件的破坏模式一致,均为层压板承载孔拉脱(PLT)、孔边层压板分层(DL)和螺栓端部凹陷变形(FHD)。试验件的破坏形貌如图 6 所示,可以看出:损伤集中在沉头孔附近,试验件正面(螺栓头一侧)在沉头孔周围出现基体压溃现象和大量的分层损伤,主要由螺栓头挤压试验件造成;试验件背面(螺母一侧)出现严重的分层损伤。

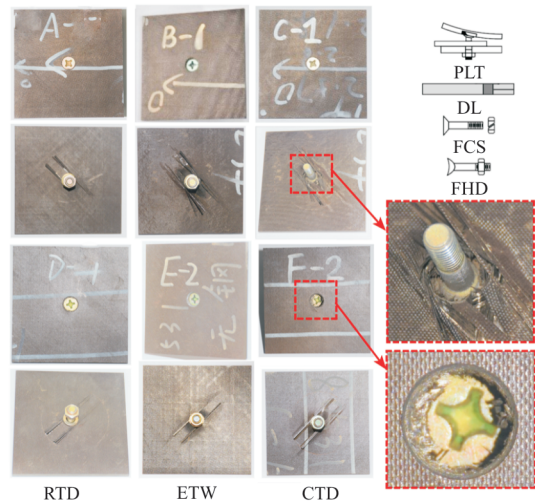


图 6 拉脱试验失效模式

Fig. 6 Failure mode of pull-through test

### 2.3 湿热环境和铺层顺序对拉脱强度的影响

拉脱强度的定义须能真实反映材料的性质,本文中拉脱强度按照式(1)计算<sup>[16]</sup>:

$$\sigma = P_f / (\pi D t) \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为拉脱强度; $P_f$ 为第一个峰值载荷; $D$ 为沉头孔最大直径; $t$ 为试验件厚度。

CTD、ETW、RTD 三种环境下两种典型铺层的试验结果如表 4 所示。铺层相同的试验件在 CTD、RTD、ETW 三种试验环境下的拉脱强度呈递减趋势,如图 7 所示。以 RTD 环境下的拉脱强度值为基准,CTD 环境下 A、B 铺层的拉脱强度分别为 RTD 环境下的 108.1%、109.0%,ETW 环境下的拉脱强度基本与 RTD 环境下的相当。

B 类铺层的拉脱强度略高于 A 类铺层:在 CTD、RTD、ETW 环境下铺层 B 的拉脱强度分别为铺层 A 的 104.6%、103.7%、102.8%,但两类铺层拉脱强度的差异并不明显。

表 4 复合材料层压板拉脱试验结果

Table 4 Experimental results of the pull-through resistance test of composite laminates

试验件类型	$P_{ave}/kN$	$\sigma_{ave}/MPa$	离散系数/%
CTD-A	3.188	40.59	2.99
CTD-B	3.334	42.45	4.05
RTD-A	2.949	37.55	2.88
RTD-B	3.058	38.94	4.36
ETW-A	2.933	37.34	3.55
ETW-B	3.015	38.39	4.73

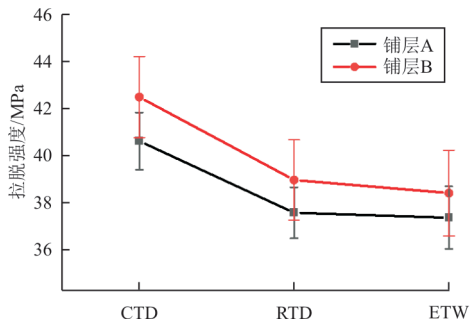


图7 湿热环境对拉脱强度的影响

Fig. 7 Effect of hygrothermal environments on pull-through strength

湿热环境主要通过对基体材料及界面产生作用来影响拉脱强度。CTD条件下基体分子间的化学键收缩,基体的热收缩使界面结合得更紧密,提高了层压板的力学性能<sup>[17]</sup>。高湿条件下水分子在基体中扩散,玻璃化转变温度降低,力学性能下降<sup>[18]</sup>。吸湿量是温度和相对湿度的函数<sup>[19]</sup>,高温条件下水分子的扩散加剧,同时纤维与基体热膨胀系数的差异会导致界面间结合强度降低,进一步降低了材料的力学性能<sup>[20]</sup>。本试验RTD、ETW环境下试验件的拉脱强度相当,原因是聚酰亚胺复合材料在ETW条件下的吸湿量(本试验最大吸湿量为0.485%)远低于环氧树脂、双马来酰亚胺等树脂基复合材料的吸湿量<sup>[21]</sup>,同时聚酰亚胺复合材料的玻璃化转变温度高于300℃,有效地阻止了水分子的扩散与分子链的断裂。

### 3 有限元仿真

#### 3.1 有限元模型

使用有限元软件ABAQUS建立RTD条件下层压板的拉脱模型,有限元模型如图8所示(图中仅展示了有限元模型的一半)。有限元模型共包含3个部件:试验件、简化的帽形件与沉头螺栓(包含螺母在内),均使用8节点六面体线性减缩积分单元(C3D8R)进行离散,整体网格尺寸设为2.0 mm。试验件孔边区域的网格尺寸细化为0.4 mm(红色虚线内)。试验件单层厚度方向单元数量为1,相邻层的界面采用粘单元模拟。帽形件的作用为约束试验件的面外位移,建模时将其简化为100 mm×100 mm×6 mm的矩形开孔板,中心孔直径为38 mm。沉头螺栓与螺母建立为整

体,网格尺寸为0.4 mm。采用显式分析的通用接触定义部件之间的接触关系,摩擦系数为0.2。采用三维Hashin准则作为损伤起始判据<sup>[22]</sup>,并基于双线性连续退化模型模拟复合材料的渐进损伤,能量参数如表5所示。

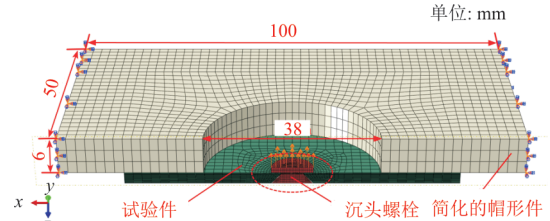


图8 拉脱试验有限元模型

Fig. 8 Finite element model for pull-through test

表5 退化模型能量参数<sup>[23]</sup>Table 5 Energy parameters of degradation model<sup>[23]</sup>

参数	数值	参数	数值
$G_{ft}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	92	$G_{mt}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.21
$G_{fc}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	80	$G_{mc}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.80

注: $G_{ft}$ —纵向拉伸断裂韧性; $G_{fc}$ —纵向压缩断裂韧性; $G_{mt}$ —横向拉伸断裂韧性; $G_{mc}$ —横向压缩断裂韧性。

为了模拟真实的加载过程,约束简化的帽形件左右端面全部自由度,并对沉头螺栓施加速率为60 mm/s的面外位移载荷。该加载速率下结构动能(ALLKE)小于内能(ALLIE)的5%,满足准静态加载要求。

#### 3.2 仿真结果与分析

仿真结果的载荷—位移曲线和试验结果的对比如图9所示。

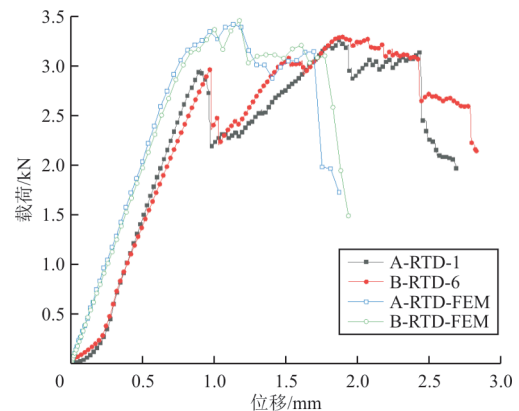


图9 载荷—位移仿真曲线与试验结果对比

Fig. 9 Comparison between load-displacement simulation curve and test results

从图 9 可以看出:结构出现初始损伤之前,载荷一位移曲线呈线性上升;由于试验机内部及夹持装置各部件间存在间隙,试验的载荷一位移曲线在加载初始阶段呈非线性上升。

拉脱强度仿真结果与试验值的对比如表 6 所示,可以看出:A、B 铺层拉脱强度的仿真误差分别为 13.6%、10.2%,拉脱强度的数值仿真结果与试验结果吻合较好。

表 6 拉脱强度仿真结果与试验结果的比较  
Table 6 Comparison of pull off strength simulation results with test results

试验件类型	$\sigma_{ave}/\text{MPa}$	$\sigma_{FEM}/\text{MPa}$	误差/%
RTD-A	37.55	42.65	13.6
RTD-B	38.94	42.91	10.2

工程中对层压板拉脱性能设计时多以第一个峰值载荷作为设计参考,因此本文有限元模型重点关注第一次明显掉载前的损伤过程。

仿真结果表明,层压板在拉脱载荷作用下向面外偏转,孔边铺层逐层被沉头螺栓穿过,如图 10 所示。拉脱载荷主要由层压板孔边的圆锥斜面承受,其法向分量  $F_n$  挤压孔边铺层,造成基体压缩损伤;其切向分量  $F_t$  使层压板层间产生剪切应力,起到“剥离”铺层的作用,因此层间的剪切应力有利于分层损伤的产生与扩张。

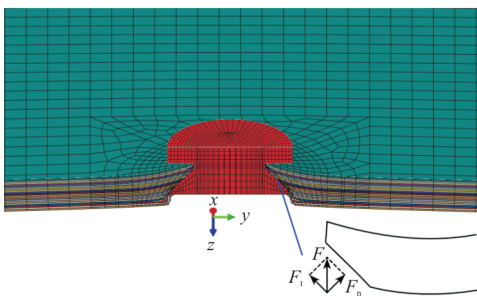


图 10 层压板产生弯曲变形  
Fig. 10 Bending deformation of laminate

此外,层压板弯曲变形会沿厚度方向产生面内的拉压应力,靠近螺栓头一侧的铺层面内受压,靠近螺母一侧的铺层面内受拉,孔边应力分布如图 11 所示,可以看出:随着载荷的增大,靠近螺栓头一侧的铺层出现基体拉伸损伤,靠近螺母一侧

的铺层出现基体压缩损伤。

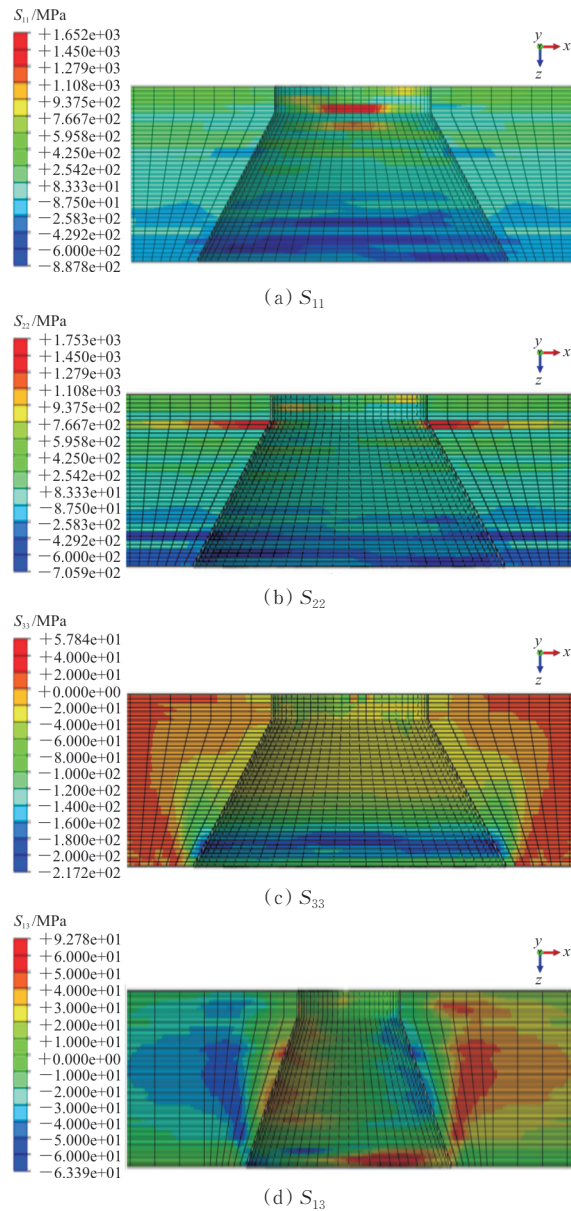


图 11 失效载荷下孔边沿厚度方向的应力分量  
Fig. 11 Stress component along thickness direction of hole edge under failure load

层压板损伤的扩展趋势如图 12 所示,螺栓通过挤压沉头孔不断嵌入层压板,并使层压板发生面外弯曲,靠近螺母一侧的铺层较早出现基体拉伸损伤,随后基体压缩损伤和分层损伤在螺栓头一侧的铺层出现。上述损伤随着载荷的增大向面内径向和面外厚度方向扩展。A. Banbury 等<sup>[24]</sup>对凸头螺栓拉脱失效过程进行了试验研究和数值分析,得到了相似的结论。

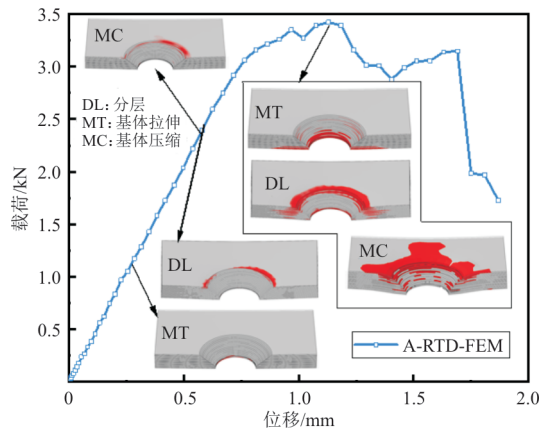


图 12 拉脱损伤过程

Fig. 12 Damage process of pull-through experiment

## 4 结 论

(1) RTD、ETW、CTD 三种环境下聚酰亚胺复合材料层压板的破坏模式基本相同,主要损伤表征为螺栓嵌入层压板中,并在层压板孔边形成以基体损伤和分层损伤为主的复合失效形式。

(2) 聚酰亚胺复合材料的拉脱强度随温度的升高呈下降趋势。以 RTD 环境下聚酰亚胺复合材料的拉脱强度为基准,CTD 环境下拉脱强度提升 8.1%~9.0%,ETW 环境下拉脱强度与常温干态环境的拉脱强度相当,表明该复合材料耐热性能较强,可用于高温结构。

(3) 对于聚酰亚胺复合材料,(30/60/10)铺层具有较高的拉脱强度。CTD、RTD、ETW 环境下(30/60/10)铺层的拉脱强度分别比(50/40/10)铺层高 4.6%、3.7%、2.8%。

(4) 对 RTD 拉脱试验过程进行了有限元仿真分析,有限元模型能够较准确地预测拉脱过程中的失效载荷(第一个峰值载荷)。

### 参考文献

- [1] 陈龙,陈普会. 复合材料-钛合金混合结构多钉连接钉载分布及有限元计算[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 679-685.  
CHEN Long, CHEN Puhui. Load distribution and finite element analysis of composite-to-titanium hybrid structure with multiple-bolted joints[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5): 679-685. (in Chinese)
- [2] GAN K, LAUX T, TAHER S, et al. A novel fixture for determining the tension/compression-shear failure envelope of multidirectional composite laminates [J]. Composite Structures, 2018, 184(15): 662-673.
- [3] MEZA L, SCHORMANS J, REMMERS J, et al. Shear

response of 3D non-woven carbon fibre reinforced composites [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2019, 125(3): 276-297.

- [4] 李沛城,常楠,赵美英,等. 一种非线性模型下的复合材料螺栓连接失效分析[J]. 航空工程进展, 2019, 10(2): 171-178.  
LI Peicheng, CHANG Nan, ZHAO Meiyong, et al. The failure analysis of composite bolted joint structure based on a nonlinear model[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(2): 171-178. (in Chinese)
- [5] 刘衍峰. 沉头螺栓与 GLARE 层合板连接结构面外拉脱力学性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
LIU Yanfeng. Analysis on mechanical properties of GLARE laminates with countersunk bolted joints subjected to out-of-plane load [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [6] RAO Y S, MOHAN N S, SHETTY N, et al. Drilling and structural property study of multi-layered fiber and fabric reinforced polymer composite—a review [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(11): 1-31.
- [7] ZHONG Yucheng, CHENG Mingyang, ZHANG Xin, et al. Hygrothermal durability of glass and carbon fiber reinforced composites—a comparative study [J]. Composite Structures, 2019, 211: 134-143.
- [8] SAPI Z, BUTLER R. Properties of cryogenic and low temperature composite materials—a review [J]. Cryogenics, 2020, 111: 103190.
- [9] 张娇蕊,山美娟,黄伟,等. 湿热环境对 CFRP 复合材料-铝合金螺栓连接结构静力失效的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(7): 2224-2233.  
ZHANG Jiaorui, SHAN Meijuan, HUANG Wei, et al. Effects of hygrothermal environment on quasi-static failure of CFRP composite-aluminum alloy bolted joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(7): 2224-2233. (in Chinese)
- [10] 谢伟,窦鹏鹏,薛展. 湿热环境下复合材料层合板本构模型研究及其应用[J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 62-72.  
XIE Wei, DOU Pengpeng, XUE Zhan. Research and application of the constitutive model of composite laminates in hydrothermal environments[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(1): 62-72. (in Chinese)
- [11] 管清宇,李卫平. 湿热环境对 7781/CYCOM 7701 玻璃纤维/环氧复合材料典型力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3288-3297.  
GUAN Qingyu, LI Weiping. Effect of hygro-thermal condition on typical mechanical property of 7781/CYCOM 7701 fiberglass/epoxy composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3288-3297. (in Chinese)
- [12] KABIR M I, SHRESTHA R, SAMALI B. Effects of applied environmental conditions on the pull-out strengths of CFRP-concrete bond [J]. Construction & Building Materi-

- als, 2016, 114(7): 817-830.
- [13] 高泉喜, 郑威, 孔令美, 等. 温度和湿热对玻纤复合材料力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(3): 66-69.  
GAO Quanxi, ZHENG Wei, KONG Lingmei, et al. Influences of temperature and humid heat environment on mechanical properties of glass fiber reinforced composite[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(3): 66-69. (in Chinese)
- [14] ASTM International. Standard test method for measuring the fastener pull-through resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite: D7332A/D7332M-16 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.
- [15] ASTM International. Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials: D5229/D5229-14 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
- [16] 迟坚, 雷显成, 谢鸣九. 复合材料拉脱强度试验方法研究[C]//第十四届全国复合材料学术会议. 宜昌:中国宇航学会, 2006: 1127-1130.  
CHI Jian, LEI Xiancheng, XIE Mingjiu. Experimental research on pull-thru strength of composites[C]//The 14th National Conference on Composite Materials. Yichang: Chinese Society of Astronautics, 2006: 1127-1130. (in Chinese)
- [17] KALIA S, FU S Y. Polymers at cryogenic temperatures [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [18] KARAD S, JONES F, ATTWOOD D. Moisture absorption by cyanate ester modified epoxy resin matrices (Part I): effect of spiking parameters[J]. Polymer, 2002, 43(19): 5209-5218.
- [19] ABDELKADER A F, WHITE J R. Water absorption in epoxy resins: the effects of the crosslinking agent and curing temperature[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 98(6): 2544-2549.
- [20] MENG J, WANG Y, YANG H, et al. Mechanical properties and internal microdefects evolution of carbon fiber reinforced polymer composites: cryogenic temperature and thermocycling effects[J]. Composites Science and Technology, 2020, 191(1/2): 108083.
- [21] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.  
CHEN Xiangbao. Handbook of polymer matrix composites [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [22] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(3): 329-334.
- [23] PINHO S, DARVIZEH R, ROBINSON P, et al. Material and structural response of polymer-matrix fibre-reinforced composites[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(19/20): 2313-2341.
- [24] BANBURY A, KELLY D W, JAIN L K. A study of fastener pull-through failure of composite laminates (Part 2): failure prediction[J]. Composite Structures, 1999, 45(4): 255-270.

#### 作者简介:

白桃林(1998—),男,硕士研究生。主要研究方向:复合材料结构设计。

陈普会(1965—),男,博士,教授。主要研究方向:复合材料结构设计。

孔斌(1986—),男,博士研究生。主要研究方向:复合材料结构设计。

张雅会(1995—),男,博士研究生。主要研究方向:复合材料结构设计。

蒋坤(1986—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空航天科学与工程。

甘建(1981—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航空航天科学与工程。

(编辑:马文静)