

文章编号: 1674-8190(2024)03-052-10

湿热环境对复合材料层间断裂韧性的影响 规律及其机理

符景皓¹, 程鹏飞²

(1. 西北工业大学 伦敦玛丽女王大学工程学院, 西安 710129)

(2. 中国飞机强度研究所 材料力学性能测试技术研究室, 西安 710065)

摘要: 层间断裂韧性是表征复合材料抗层间分层扩展能力的主要指标, 湿热环境是飞机复合材料结构面临的主要严酷环境, 研究湿热环境下的层间断裂韧性在航空领域具有重要意义。通过不同湿热环境条件下的 I 型和 II 型层间断裂韧性实验, 分析其微观结构, 获取湿热环境对树脂基复合材料层间断裂韧性的影响规律和湿热环境对层间断裂韧性的影响机制。结果表明: 湿热环境会对树脂基复合材料 I 型和 II 型层间断裂韧性产生截然相反的影响, 随着温度上升, 树脂基复合材料层压板 I 型层间断裂韧性呈上升趋势, 而 II 型层间断裂韧性呈下降趋势; I 型分层时会出现大量纤维桥联现象, 湿热环境下树脂发生软化, 纤维桥联现象增多, 导致 I 型层间断裂韧性随温度升高而增大; 湿热环境下随着温度的升高, 树脂的剪切强度会逐渐降低, 树脂与纤维的界面剪切强度也会逐渐降低, 导致 II 型层间断裂韧性随温度升高而降低。

关键词: 复合材料; 层间断裂韧性; 湿热环境; 树脂

中图分类号: V214.8; TB33

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.03.05

Influence of humid and hot environment on the interlayer fracture toughness of composite materials and its mechanism

FU Jinghao¹, CHENG Pengfei²

(1. Queen Mary University of London Engineering School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

(2. Mechanical Properties of Materials Testing Technology Laboratory, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: Interlayer fracture toughness is the main indicator of the ability of composite materials to resist interlayer delamination propagation. The humid and hot environment is the main harsh environment faced by aircraft composite structures. Studying the interlayer fracture toughness in humid and hot environments is of great significance in the aviation field. In this paper, the microstructure of type I and type II interlayer fracture toughness experiments under different wet and thermal conditions are analyzed, and the effect of wet and thermal environment on the interlayer fracture toughness of resin matrix composites is obtained. The research results indicate that the humid and hot environment has a completely opposite effect on the interlayer fracture toughness of type I and type II resin composite materials. As the temperature increases, the interlayer fracture toughness of type I resin composite laminates shows an upward trend, while the interlayer fracture toughness of type II resin composite laminates shows a downward trend. During type I delamination, a large number of fiber bridging phenomena occur. In humid and hot environments, the resin softens and fiber bridging phenomena increase, leading to an increase in type I interlayer fracture toughness with increasing temperature; In a humid and hot environment, as the temperature increases, the shear strength of the resin gradually decreases, and the interfacial shear strength between the resin and fibers also gradually decreases, resulting in a decrease in type II interlayer fracture toughness with increasing temperature.

Key words: composite materials; interlayer fracture toughness; humid and hot environment; resin

收稿日期: 2023-11-23; 修回日期: 2024-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(52235003)

通信作者: 符景皓(2003-), 男, 本科生。E-mail: 2456354040@mail.nwpu.edu.cn

引用格式: 符景皓, 程鹏飞. 湿热环境对复合材料层间断裂韧性的影响规律及其机理[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 52-61.

FU Jinghao, CHENG Pengfei. Influence of humid and hot environment on the interlayer fracture toughness of composite materials and its mechanism[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 52-61. (in Chinese)

0 引言

优异的比强度、比刚度、抗疲劳特性和可设计性是复合材料的主要优点,因而在航空航天、轨道交通和汽车等领域得到广泛应用,特别是在航空领域,已成为军民机的主要结构材料之一^[1-5]。复合材料的损伤形式主要包括基体开裂、纤维断裂、纤维基体脱胶和层间分层等,其中又以层间分层损伤最为常见,易发生层间分层也是树脂基复合材料的主要缺点之一,是飞机树脂基复合材料研发和结构设计关注的焦点^[6-11]。复合材料的分层可以分解为互相垂直的3种分层模式,分别为I型(张开型)、II型(滑移剪切型)、III型(撕裂剪切型),其中I型、II型及其混合型分层是航空复合材料层压板结构最常见的分层形式^[12-13]。

层间断裂韧性是表征复合材料抗层间分层扩展能力的主要指标,是复合材料分层扩展分析的重要输入参数^[2,12]。分析复合材料层间断裂韧性在不同环境条件下的演化规律并揭示其机理,有助于材料研究者开发出环境适应性更强、抗分层能力更高的复合材料。由于湿热环境条件下树脂基复合材料的综合性能会发生显著退化,因而是航空复合材料研发、结构与验证最为关注的环境条件。国内,伊翠云等^[6]研究了树脂基体或层间树脂改性对复合材料室温层间断裂韧性的影响规律;常舰等^[2]研究了不同工艺参数和界面改性对碳纤维增强聚苯硫醚复合材料I型层间断裂韧性的影响规律;白桃林等^[14]对低温干态、室温干态和高温湿态3种环境下的某型聚酰亚胺复合材料层压板进行拉脱试验,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;郭壮壮等^[15]建立了低温环境下测试复合材料I型层间断裂韧性的简易方法;管国阳等^[16]研究了湿热环境对复合材料混合断裂韧性的影响规律。国外,Shin等^[17]基于微观力学评价研究了复合材料不同类型老化后的力学和界面性能;Davidson等^[18]研究了模式I和模式II行为之比以及湿热条件对热塑性颗粒层间碳/环氧复合材料分层韧性的影响;Almansour等^[19]研究了吸水性对亚麻/玄武岩增强乙烯基酯杂化复合材料I型层间断裂韧性的影响。综上,目前国内外对于湿热环境条件下的复合材料基本力学性能研究较多,且较为深入,但对于湿热环境下的复合材料层间断裂韧性研究相对较零散,系统性不足。

本文通过不同湿热环境条件下的I型和II型层间断裂韧性实验研究湿热环境对树脂基复合材料I型层间断裂韧性和II型层间断裂韧性的影响规律,在此基础上采用扫描电镜SEM观测复合材料层压板分层区域的微观形貌,获取湿热环境下分层区域微观形貌与室温干态环境的差异,进而揭示出湿热环境对复合材料层间断裂韧性的影响机制。

1 试验

按ASTM D5528推荐的试验件构型,本文加工T800级复合材料预浸料制造的复合材料0°单向层压板I型层间断裂韧性试验件;按照HB 7403—1996推荐的试验件构型,加工T800级复合材料预浸料制造的复合材料0°单向层压板II型层间断裂韧性试验件。具体试验件信息如表1所示。

表1 试验件信息
Table 1 Information of test pieces

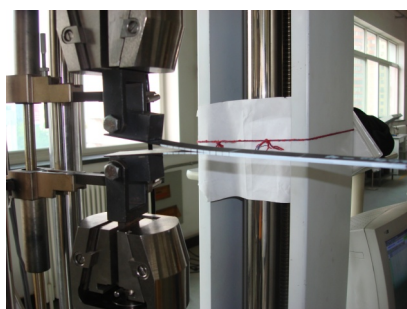
试验件类型	铺层	预浸料	名义厚度/mm	长度/mm	宽度/mm	试验件数量/件
I型试验件	[0] ₂₄	T800单向带	4	150	25	18
II型试验件	[0] ₁₆	T800单向带	4	150	25	13

首先对需要进行湿热试验的试验件进行吸湿处理。吸湿处理按照ASTM D5229方法进行。吸湿前将伴随件进行称重,然后将试验件连同伴随件一同放入湿热试验箱(温度(70±3)℃,相对湿度(RH)85%±5%)。在相距(7±0.5)天内的相继两个读数中,伴随件平均吸湿量的变化小于0.05%,则达到了有效的吸湿平衡。

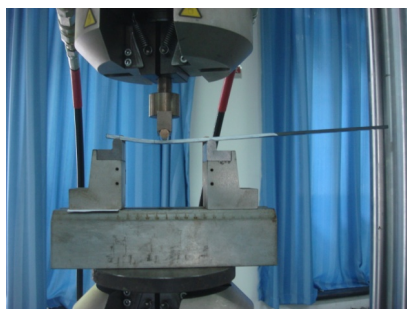
I型层间断裂韧性试验按照ASTM D5528“单向纤维增强聚合物基复合材料I型层间断裂韧性标准试验方法”执行^[20-21]。试验前,在试验件侧面喷漆划线,作为观测分层长度的标记。试验时以1 mm/min的恒定横梁速率对试验件重新加载,连续记录载荷一位移数据,当观测到分层从预制裂纹处开始扩展及分层扩展到每一个划线标记时,立刻对实时显示载荷一位移数据的计算机截屏以记录分层起始和分层到达每个标记时的载荷、位移。当分层扩展通过了最后的标记时,停止试验,对试验件卸载。

II型层间断裂韧性试验按照HB 7403—1996“碳纤维复合材料层合板II型层间断裂韧性试验方法”标准执行。试验前也需要在试验件侧面喷

漆划线,作为观测分层长度的标记。试验夹具为三点弯曲夹具,分两次加载。初次加载:调整支座跨距 $2L$ 为70 mm,有效裂纹长度 $a \geq 0.7L$;以1~2 mm/min的恒定速率加载,直至裂纹扩展5 mm左右,停止加载,标记裂纹前沿位置,对试验件卸载。二次加载:调整支座跨距 $2L$ 为100 mm,按有效裂纹长度 $a=0.5L$ 安装试验件,以和初次加载相同的速率对试验件加载,连续记录试验件的载荷—挠度曲线,当载荷下降时,停止试验。室温干态断裂韧性试验状态照片如图1所示。



(a) I型层间断裂韧性试验



(b) II型层间断裂韧性试验

图1 室温干态断裂韧性试验状态照片
Fig. 1 Photos of dry fracture toughness test at room temperature

进行高温湿热 I 型层间断裂韧性试验和 II 型层间断裂韧性试验时,试验件位于高温环境箱内,无法通过目视直接观测裂纹扩展。为了解决高温环境下的裂纹观测问题,将DIC设备与试验机连接,将DIC摄像头架设在环境箱外部,对准试验件预制分层区域进行观测,在试验过程中成功识别出分层裂纹尖端,观测裂纹扩展过程。采用DIC设备在高温环境箱外部观测试验件的分层扩展状态照片如图2所示。对于 I 型层间断裂韧性试验,所进行的试验环境条件包括:23 °C干态、23 °C湿态、80 °C湿态、100 °C湿态、120 °C湿态和135 °C湿态。对于 II 型层间断裂韧性试验,所进行的试验环境条件包括:23 °C干态、23 °C湿态、80 °C湿态、

120 °C湿态和130 °C湿态。

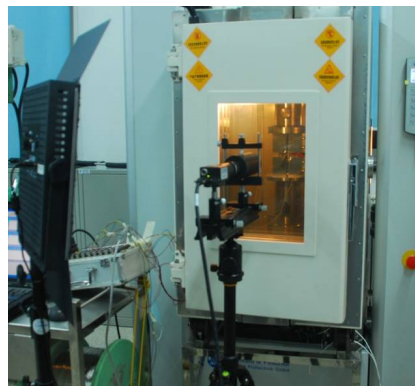


图2 采用DIC设备在高温环境箱外部观测试验件的分层扩展
Fig. 2 The layered extension of the test piece observed outside the high-temperature environment chamber with DIC equipment

2 试验结果与分析

不同环境条件下 I 型层间断裂韧性试验的单个试验结果如表2所示,不同环境条件下 II 型层间断裂韧性试验的单个试验结果如表3所示。

表2 不同环境条件下 I 型层间断裂韧性试验的单个试验结果

Table 2 Individual test results of type I interlayer fracture toughness test under different environmental conditions

环境条件	试验件编号	宽度/mm	厚度/m	I型层间断裂韧性/(J·m ⁻²)
23 °C 干态	RTD-1	25.14	3.951	160
	RTD-2	25.12	3.905	187
	RTD-3	25.14	3.906	177
	RTD-4	25.13	3.980	167
	RTD-5	25.13	3.944	182
23 °C 湿态	RTW-1	25.10	3.959	207
	RTW-2	25.10	3.967	204
	RTW-3	25.10	3.956	211
80 °C 湿态	ETW80-1	25.09	3.930	261
	ETW80-2	25.09	3.922	255
	ETW80-3	25.09	3.964	277
100 °C 湿态	ETW100-1	25.10	3.973	344
	ETW100-2	25.11	3.942	300
	ETW100-3	25.11	3.959	303
120 °C 湿态	ETW120-1	25.12	3.944	386
	ETW120-2	25.09	3.972	404
	ETW120-3	25.10	3.983	413
130 °C 湿态	ETW130-1	25.10	3.812	402
	ETW130-2	25.11	4.064	391
	ETW130-3	25.11	3.976	414

表 3 不同环境条件下 II 型层间断裂韧性试验的单件试验结果
Table 3 Individual test results of type II interlayer fracture toughness test under different environmental conditions

环境条件	试验件编号	宽度/mm	厚度/mm	临界载荷/kN	变形量/mm	II 型层间断裂韧性/(J·m ⁻²)
23 °C 干态	DBK-RTD-1	25.13	3.921	2.101	3.115	2 467
	DBK-RTD-2	25.15	3.918	2.114	3.101	2 469
23 °C 湿态	DBK-RTW-1	25.15	3.911	2.000	3.130	2 359
	DBK-RTW-2	25.14	3.915	2.014	3.079	2 337
80 °C 湿态	DBK-80-3	25.15	3.936	1.710	2.769	1 783
	DBK-80-4	25.15	3.901	1.708	2.743	1 765
	DBK-80-5	25.15	3.941	1.738	2.798	1 832
120 °C 湿态	DBK-120-6	25.17	3.933	1.487	2.524	1 413
	DBK-120-7	25.15	3.948	1.437	2.446	1 324
	DBK-120-8	25.15	3.908	1.441	2.516	1 365
130 °C 湿态	DBK-130-9	25.14	3.955	1.438	2.391	1 295
	DBK-130-10	25.14	3.933	1.368	2.378	1 226
	DBK-130-11	25.13	3.930	1.393	2.385	1 253

不同环境条件下 I 型层间断裂韧性 G_{Ic} 的柱状图如图 3 所示,可以看出:1) 室温湿态环境条件下的 I 型层间断裂韧性高于室温干态环境条件下的 I 型层间断裂韧性,说明对于所测试的树脂基复合材料,吸湿后其 I 型层间断裂韧性会升高; 2) 对于吸湿后的试验件,23、80、100、120 和 130 °C 温度条件下, I 型层间断裂韧性逐渐升高,说明对于所测试的树脂基复合材料,在湿态环境下,随着温度的升高,其 I 型层间断裂韧性逐渐升高。

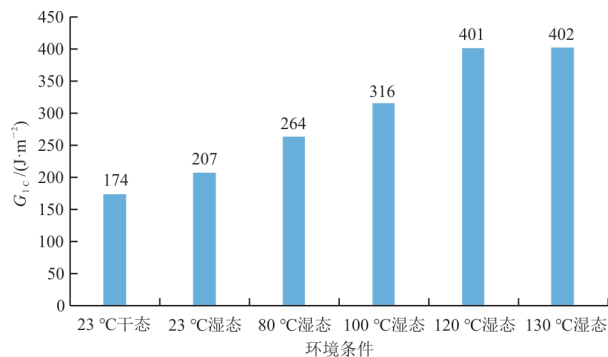


图 3 不同环境条件下的 I 型层间断裂韧性的柱状图
Fig. 3 Columnar graphs of type I interlayer fracture toughness under different environmental conditions

不同环境条件下 II 型层间断裂韧性 G_{IIc} 的柱状图如图 4 所示,可以看出:1) 室温湿态环境条件下的 II 型层间断裂韧性略低于室温干态环境条件下的 II 型层间断裂韧性,说明对于所测试的树脂基复合材料,吸湿后其 II 型层间断裂韧性会降低; 2) 对于吸湿后的试验件,23、80、120 和 130 °C 温度

条件下 II 型层间断裂韧性逐渐降低,说明对于所测试的树脂基复合材料,在湿态环境下,随着温度的升高,其 II 型层间断裂韧性会逐渐降低。

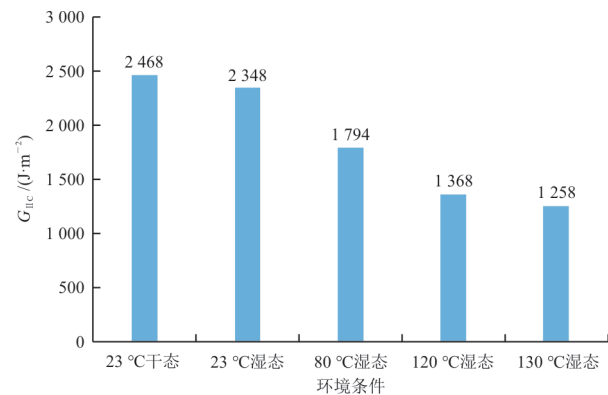
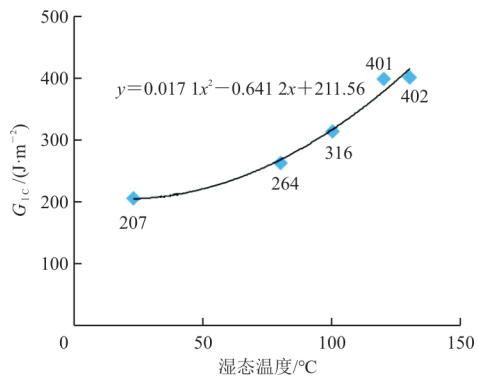
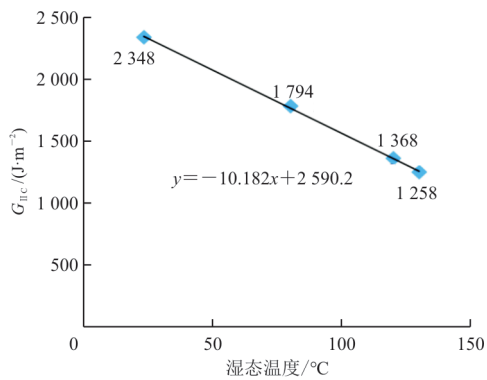


图 4 不同环境条件下的 II 型层间断裂韧性的柱状图
Fig. 4 Histogram of type II interlayer fracture toughness under different environmental conditions

进一步研究湿态条件下温度对 I 型层间断裂韧性和 II 型层间断裂韧性的影响趋势如图 5 所示。从图 5(a)可以看出:湿态条件下温度对 I 型层间断裂韧性的影响呈非线性正相关(图 5(a)根据试验结果拟合出的关系为二次多项式形式),即随着湿态条件下温度的增加, I 型层间断裂韧性呈现出非线性增加的趋势。从图 5(b)可以看出:湿态条件下温度对 II 型层间断裂韧性的影响呈线性负相关(图 5(b)根据试验结果拟合出的关系为线性形式),即随着湿态条件下温度的增加, II 型层间断裂韧性呈现出线性降低的趋势。



(a) I 型层间断裂韧性



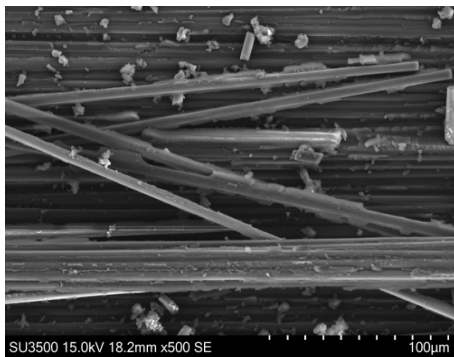
(b) II 型层间断裂韧性

图 5 层间断裂韧性与湿态温度的关系曲线
Fig. 5 Relation curve between interlayer fracture toughness and wet state temperature

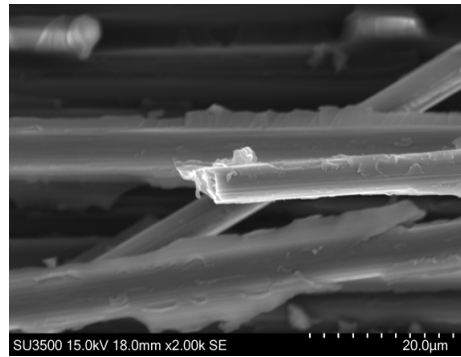
3 微观形貌分析

3.1 湿热环境 I 型层间分层分析

采用扫描电镜 (SEM) 对不同环境条件下完成试验的 I 型层间断裂韧性试验件进行微观结构形貌观测。分层区的微观形貌如图 6 所示, 可以看出: I 型分层界面出现大量的纤维桥联现象。



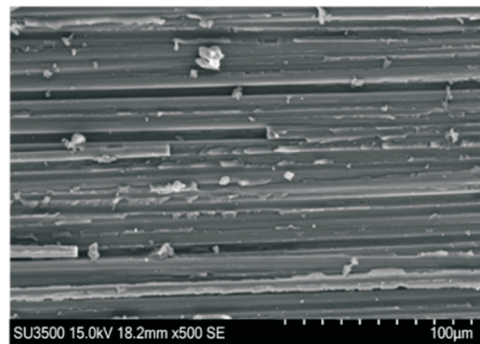
(a) I 型分层界面 (放大 500 倍)



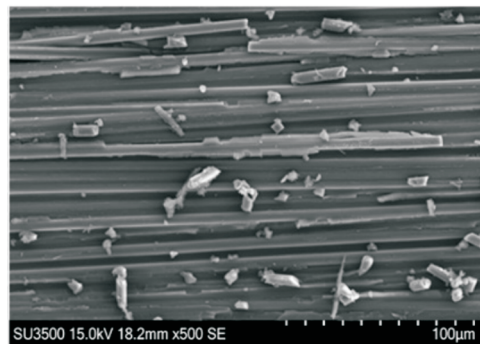
(b) I 型分层界面 (放大 2 000 倍)

图 6 I 型分层界面 SEM 图片
Fig. 6 SEM image of type I layered interface

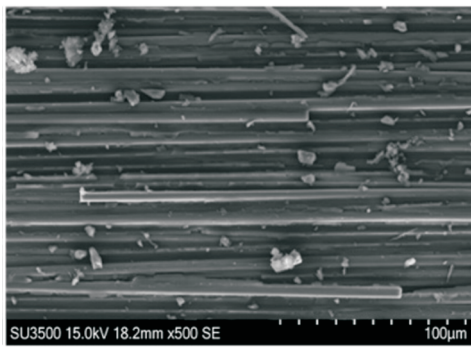
对比不同环境下的微结构 (如图 7 所示), 可以看出: 随着温度的升高, 纤维桥联的数量越来越多。已有研究结果表明, I 型分层的扩展过程实际是克服纤维桥联的过程^[21-24]。由此推测, 导致高温湿态环境随着温度的升高 I 型层间断裂韧性逐渐增大的原因为: 复合材料吸湿后, 随着温度的升高, 树脂软化, 纤维桥联现象增多, 使分层阻抗增加, 从而使 G_{IC} 增大。



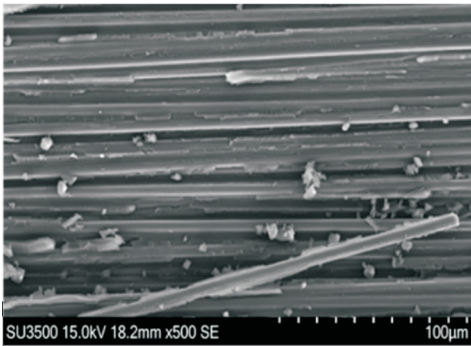
(a) 室温干态



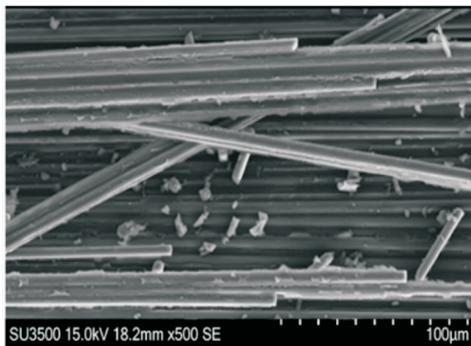
(b) 室温湿态



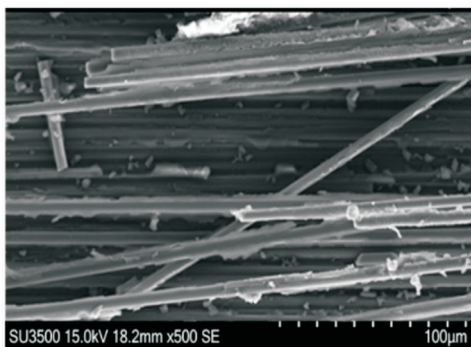
(c) 80 °C湿态



(d) 100 °C湿态



(e) 120 °C湿态



(f) 135 °C湿态

图 7 不同环境条件下的 I 型分层界面 SEM 图片
Fig. 7 SEM images of type I layered interface under different environmental conditions

3.2 湿热环境 II 型层间分层分析

采用扫描电镜对不同环境条件下试验后的 II 型层间断裂韧性试验件进行微观结构形貌观测,如图 8 所示,可以看出:对于 II 型层间断裂韧性试验件,在分层面呈现出明显的因层间滑移剪切所导致的“层间树脂脱落”(下层的纤维与层间树脂脱落分离)和“层间树脂保留”(下层的纤维与层间树脂仍然黏结保留在一起)两种形貌特征。其中层间树脂脱落区域,是分层中面相邻下层的纤维与层间树脂脱落分离;层间树脂保留区域是分层中面相邻下层的纤维与层间树脂仍然保留在一起,但分层中面相邻上层的纤维与层间树脂已经脱落分离。这种微观形貌说明:在 II 型层间断裂韧性试验过程中,位于中面上下的相邻两层之间会发生滑移剪切破坏(II 型分层即为滑移剪切型分层),这种剪切破坏发生在纤维与相邻的层间树脂之间,即发生在纤维与相邻层间树脂之间的界面上,也发生在层间树脂本身上。

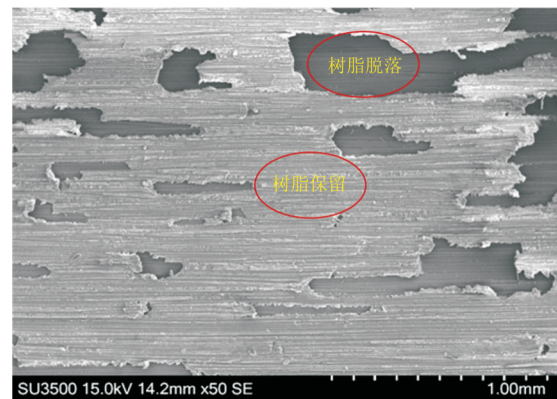
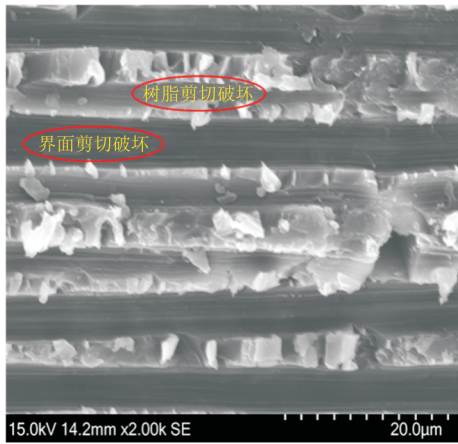
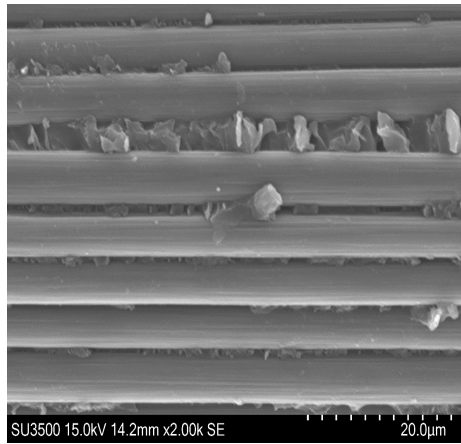


图 8 II 型层间断裂试验件分层面的 SEM 图片
Fig. 8 SEM image of layered surface of type II interlayer fracture test piece

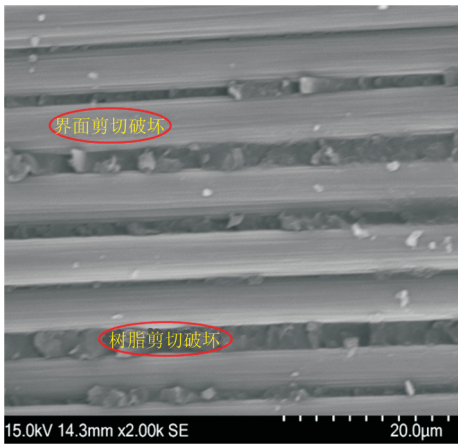
对树脂脱落区域进行 SEM 观测,可以直接看到纤维,而对树脂保留区域进行 SEM 观测无法看到纤维,因为层间的树脂覆盖在纤维之上。进一步放大倍数观测(如图 9 所示),可以看出:分层面的层间树脂自身会发生剪切破坏,纤维与层间树脂之间的界面也会发生剪切破坏;层间树脂自身破坏区域呈现出近似 45°的剪切横截面。



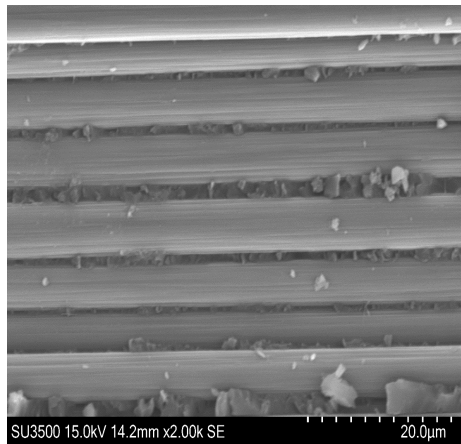
(a) 分层区域局部图像(14.2 mm)



(b) 80 °C湿态



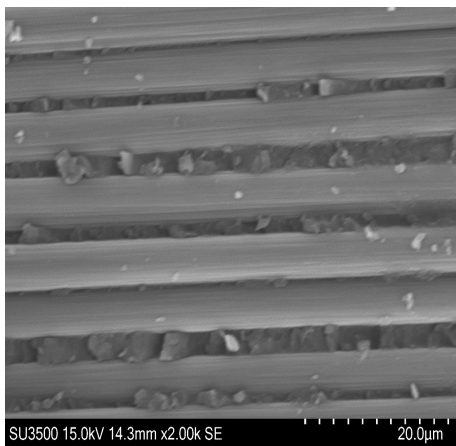
(b) 分层区域局部图像(14.3 mm)



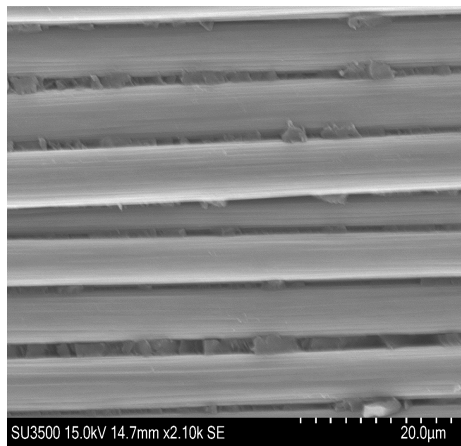
(c) 120 °C湿态

图9 分层区域局部的SEM图片
Fig. 9 SEM images of local layers

不同环境条件下的Ⅱ型层间断裂试验件分层面树脂脱落区域的SEM图片如图10所示。



(a) 室温干态



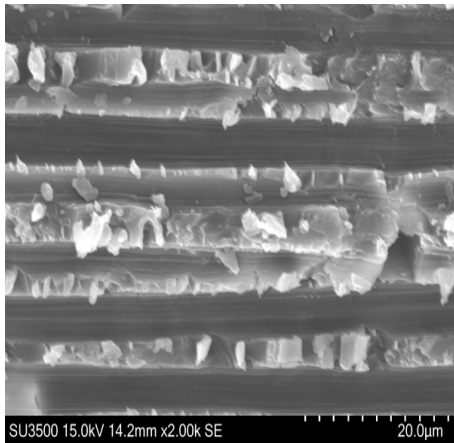
(d) 130 °C湿态

图10 不同环境条件下的Ⅱ型层间断裂试验件分层面树脂脱落区域SEM图片

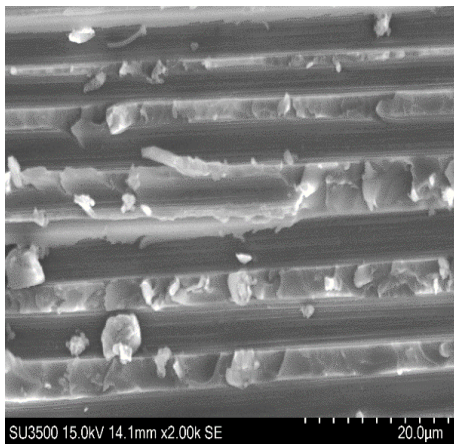
Fig. 10 SEM images of resin shedding area of type II interlayer fracture test under different environmental conditions

从图10可以看出:无论哪种环境条件,对于II型层间断裂试验件,在其分层区域均没有观测到I型层间断裂韧性试验件的分层面上两层之间的纤维桥联现象,而是观测到由于层间剪切所导致的树脂近似为 45° 剪切破坏(因为树脂破碎的块状颗粒呈现近似 45° 的界面)和纤维—树脂界面的破坏。观测还发现,随着温度的升高,树脂剪切破坏所产生树脂碎块的数量和尺寸均会降低。

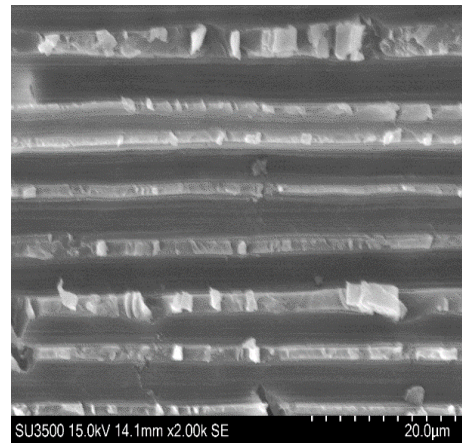
不同环境条件下的II型层间断裂试验件分层面树脂保留区域的SEM图片如图11所示,可以看出:类似于图10中的规律,II型层间断裂试验过程中,层间树脂自身会发生剪切破坏,纤维—层间树脂界面也会发生剪切破坏,层间树脂自身破坏区域呈现出近似 45° 的剪切横截面。随着温度的升高,树脂剪切破坏所产生树脂碎块的数量和尺寸均会降低。



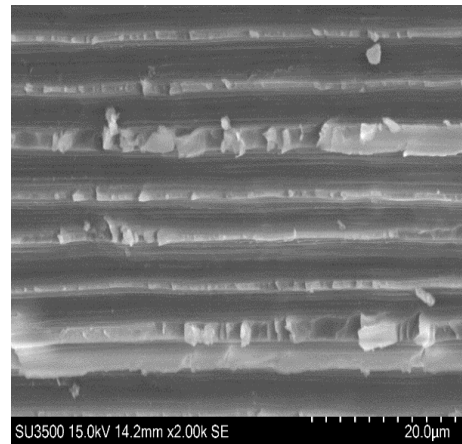
(a) 室温干态



(b) 80 °C湿态



(c) 120 °C湿态



(d) 130 °C湿态

图11 不同环境条件下的II型层间断裂试验件分层面树脂保留区域SEM图片

Fig. 11 SEM images of resin retention area of layer II interlayer fracture test pieces under different environmental conditions

已有试验结果表明,湿热环境下,随着温度的升高,树脂的剪切强度会不断降低,树脂与纤维的界面剪切强度也会不断降低^[25-27]。根据上述显微图像分析,可以推测出湿热环境下II型层间断裂韧性随温度升高而降低的机理:II型层间断裂试验过程中,位于分层区域的中面层间树脂会发生滑移剪切破坏,这种破坏既发生在下层间树脂与上下相邻纤维的界面上,也发生在层间树脂本身上,纤维与层间树脂的界面剪切破坏和层间树脂本身的剪切破坏是II型层间断裂韧性试验过程中发生在分层区域的主要破坏模式;对于树脂基复

合材料,湿热环境下,随着温度的升高,树脂的剪切强度会不断降低,树脂与纤维的界面剪切强度也会不断降低,导致树脂基复合材料的 II 型层间断裂韧性不断降低。

4 结 论

1) 湿热环境对树脂基复合材料的 I 型和 II 型层间断裂韧性影响截然相反。随着温度升高,单向层压板的 I 型层间断裂韧性逐渐增加,而 II 型层间断裂韧性则逐渐减少。

2) 湿热环境下 I 型层间断裂韧性和 II 型层间断裂韧性之所以呈现出截然相反的演化规律,是由于微观损伤模式与机制不同导致的。

3) I 型分层时会发生大量纤维桥联现象, I 型分层扩展的过程就是克服纤维桥联的过程,湿热环境下树脂发生软化,纤维桥联现象增多,导致 I 型分层阻抗增加,从而使 I 型层间断裂韧性随温度升高而增大。

4) 无论哪种环境条件,对于 II 型层间断裂试验件,在其分层区域均未观测到纤维桥联现象,而是观测到由于层间剪切所导致的树脂近似 45° 剪切破坏及纤维与树脂面之间界面的破坏。

5) II 型层间断裂试验过程中,位于分层区域的中面层间树脂会发生滑移剪切破坏,这种破坏既发生在下层间树脂与上下相邻纤维的界面上,也发生在层间树脂上,纤维一层间树脂的界面剪切破坏和层间树脂本身的剪切破坏是 II 型层间断裂韧性试验过程中发生在分层区域的主要破坏模式。对于树脂基复合材料,湿热环境下,随着温度的升高树脂的剪切强度不断降低,树脂与纤维的界面剪切强度也会不断降低,从而导致树脂基复合材料的 II 型层间断裂韧性随温度的升高而不断降低。

参考文献

- [1] 张卫红,唐长红. 航空航天装备的轻量化: 挑战与未来[J]. 航空学报, 2024, 45(5): 9-15,4.
ZHANG Weihong, TANG Changhong. Lightweighting of aerospace and aeronautical equipment: challenges and perspectives [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 9-15,4. (in Chinese)
- [2] 常舰,肖海刚,谢钟清,等. 不同工艺参数和界面改性对碳纤维增强聚苯硫醚复合材料 I 型层间断裂韧性的影响[J]. 复合材料科学与工程, 2022(1): 22-28.
CHANG Jian, XIAO Haigang, XIE Zhongqing, et al. Effects of different process parameters and interfacial modification on the fracture toughness of type I interfacial of carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide composites [J]. Composite Science and Engineering, 2022(1): 22-28. (in Chinese)
- [3] HINRICHSSEN J. The challenge of reducing both airframe weight and manufacturing cost [J]. Air & Space Europe, 2001, 3(3): 119-121.
- [4] HERRMANN A, ZAHLEN P, ZUARDY I. Sandwich structures technology in commercial aviation present [J]. Applications and Future Trends, 2005(1): 13-26.
- [5] 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)
- [6] 伊翠云, 刘甲秋, 张博文. 环氧树脂基复合材料层间性能改进研究 [J]. 纤维复合材料, 2023, 40(3): 27-30.
YI Cuiyun, LIU Jiaqiu, ZHANG Bowen. Study on electromagnetic shielding properties of carbon fiber composites [J]. Fiber Composites, 2023, 40(3): 27-30. (in Chinese)
- [7] 文立伟, 余坤, 封桥桥, 等. 缝合增强复合材料层合板层间断裂韧性研究 [J]. 材料导报, 2020, 34(22): 22162-22166, 22177.
WEN Liwei, YU Kun, FENG Qiaoqiao, et al. Study on interlaminar fracture toughness of stitched composite laminates [J]. Materials Review, 2020, 34(22): 22162-22166, 22177. (in Chinese)
- [8] 陈晨, 孙东. 飞机结构设计中对外部环境考虑 [J]. 现代制造技术与装备, 2019(2): 53, 55.
CHEN Chen, SUN Dong. Environmental consideration of composite materials in aircraft structural design [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(2): 53, 55. (in Chinese)
- [9] 韩文钦. 复合材料层合板损伤演化的实验和数值分析 [D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
HAN Wenqin. Experimental and numerical analysis of damage evolution of composite laminates [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- [10] 王力立, 杨胜春, 陈宏. 基于偏轴强度试验的复合材料失效准则评估 [J]. 工程与试验, 2018, 58(3): 3-7, 72.
WANG Lili, YANG Shengchun, CHEN Hong. Evaluation of failure criteria for composites based on off-axis strength experiment [J]. Engineering and Testing, 2018, 58(3): 3-7, 72. (in Chinese)
- [11] 沈真, 杨胜春, 陈普会. 复合材料抗冲击性能和结构压缩设计许用值 [J]. 航空学报, 2007, 28(3): 561-566.
SHEN Zhen, YANG Shengchun, CHEN Puhui. Behaviors

- of composite materials to withstand impact and structural compressive design allowableness[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(3): 561-566. (in Chinese)
- [12] 彭新龙. 玻璃纤维对乙烯基酯复合材料层间性能的影响[J]. *热固性树脂*, 2023, 38(3): 49-54.
PENG Xinlong. Effect of glass fiber on interlayer properties of vinyl ester composites[J]. *Thermosetting Resins*, 2023, 38(3): 49-54. (in Chinese)
- [13] 杨新辉, 栾茂田, 杨庆, 等. 简化脆性断裂裂尖模型及复合型断裂判据[J]. *大连理工大学学报*, 2005, 45(5): 712-716.
YANG Xinhui, LUAN Maotian, YANG Qing, et al. A simplified crack tip brittle fracture model and fracture criterion for mixed mode of loading[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2005, 45(5): 712-716. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 郭壮壮, 徐武, 余音. 低温环境下测试复合材料 I 型层间断裂韧性的简易方法[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(5): 1210-1215.
GUO Zhuangzhuang, XU Wu, YU Yin. A simple method for determining mode I interlaminar fracture toughness of composite at low temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(5): 1210-1215. (in Chinese)
- [16] 管国阳, 矫桂琼, 潘文革. 湿热环境下复合材料的混合型层间断裂特性研究[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(2): 81-86.
GUAN Guoyang, JIAO Guiqiong, PAN Wenge. Experimental study on the interlaminar fracture toughness of composite laminate on hygrothermal conditions[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(2): 81-86. (in Chinese)
- [17] SHIN P S, KIM J H, PARK H S, et al. Mechanical and interfacial properties of composites after diverse types of aging using micromechanical evaluation[J]. *Fibers Polym*, 2020, 21: 225-237.
- [18] DAVIDSON B D, KUMAR M, SOFFA M A. Influence of mode ratio and hygrothermal condition on the delamination toughness of a thermoplastic particulate interlayered carbon/epoxy composite[J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 2009, 40(1): 70-79.
- [19] ALMANSOUR F A, DHAKAL H N, ZHANG Z Y. Effect of water absorption on mode I interlaminar fracture toughness of flax/basalt reinforced vinyl ester hybrid composites[J]. *Composite Structures*, 2017, 168: 813-825.
- [20] ASTM Committee D30 on Composite Materials. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites: ASTM D5528—2013[S]. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2013.
- [21] 马启文. 基于纤维桥接理论的复合材料层合板 I 型层间断裂韧性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
MA Qiwen. Study on interlaminar fracture toughness of type I composite Laminates based on fiber bridging theory[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [22] CHARENTENAY F D, HARRY J, PREL Y, et al. Characterizing the effect of delamination defect by mode I delamination test: ASTM STP 836[R]. US: ASTM, 1984: 84-103.
- [23] RUSSELL A J. Factors affecting the opening mode delamination of graphite epoxy laminates: DREP Materials Report 82-Q[R]. Victoria, BC, Canada: Defense Research Establishment Pacific, 1982.
- [24] JOHNSON W S, MANGALGARI P D. Investigation of fiber bridging in double cantilever beam specimens[J]. *Journal of Composite Technology and Research*, 1987, 9: 10-13.
- [25] 淳道勇, 付善龙, 刘鑫. 国产 T800 级碳纤维/聚酰亚胺复合材料耐环境性能研究[J]. *失效分析与预防*, 2019, 18(6): 380-386.
CHUN Daoyong, FU Shanlong, LIU Xin. The environmental resistance of domestic carbon fiber/polyimide composite materials[J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2019, 18(6): 380-386. (in Chinese)
- [26] 王威力, 魏程, 田晶. 碳纤维复合材料的湿热老化模型研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2023(11): 44-48.
WANG Weili, WEI Cheng, TIAN Jing. Research on hygrothermal ageing models of carbon fiber composites [J]. *Composite Science and Engineering*, 2023(11): 44-48. (in Chinese)
- [27] 任明伟, 自雅娴, 张莹, 等. 氧化石墨烯的尺寸对碳纤维/环氧树脂湿热界面性能的影响[J]. *材料工程*, 2019, 51(9): 208-216.
REN Mingwei, ZI Yaxian, ZHANG Ying, et al. Influence of size of graphene oxide on interfacial properties of carbon fiber/epoxy resin under damp and heat conditions[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 51(9): 208-216. (in Chinese)

(编辑:马文静)