

文章编号: 1000-3851(2004) 02-0081-06

湿热环境下复合材料的混合型 层间断裂特性研究

管国阳, 矫桂琼, 潘文革

(西北工业大学 工程力学系, 西安 710072)

摘要: 采用混合型挠曲(MMF)试件,研究了材料吸湿和环境温度对 T 300/ 5405 复合材料混合型层间断裂韧性的影响。给出了在不同温度下,不同吸湿含量试件分层临界扩展时的 II 型分量和 III 型能量释放率分量散点图。结果表明:在吸湿和温度的综合作用下,分层尖端存在塑性变形;常温下,吸湿对材料的层间断裂韧性影响不明显,在高温环境中,随吸湿量增加,层间断裂韧性显著增加;温度对干态材料的断裂韧性影响较小,试件吸湿后,随温度升高,韧性增强。

关键词: 混合型分层;湿热;层间断裂韧性;层压板;能量释放率

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

EXPERIMENTAL STUDY ON THE INTERLAMINAR FRACTURE TOUGHNESS OF COMPOSITE LAMINATE ON HYGROTHERMAL CONDITIONS

GUAN Guoyang, JIAO Guiqiong, PAN Wenge

(Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: With mixed-mode flexure (MMF) specimens, the mixed-mode interlaminar fracture toughness of composite laminate was investigated experimentally, mainly focused on the hygrothermal effect on the strain energy release rates. It was found that: the co-function of heat and moisture caused plasticity near the tip of delamination. The critical energy release rates were calculated with two expressions (for mode II and mode III components, respectively) based on the beam theory. Scatter graphs of G_{II} versus G_{III} , the mode II and mode III components of critical energy release rates in different hygrothermal conditions, were given. The result showed that at room temperature, the hygroscopic absorption had little effect on the interlaminar fracture toughness, while at higher temperature conditions, the toughness increased as the hygroscopic degree increased. For dry laminates, the fracture toughness showed no distinct difference as the temperature increased, and for highly moisture absorbed specimens, the toughness was improved markedly. The fractograph was examined for further understanding of the mechanism.

Key words: delamination; hygrothermal; interlaminar fracture toughness; laminate; energy release rate

复合材料的损伤形式分为基体开裂、纤维断裂、纤维基体脱胶和层间分层四种形式。层压板的低层间强度,制造和使用的过程中,因初始缺陷、铺层的泊松比不匹配等特点引起的应力集中以及冲击载

荷,使分层成为最主要的一种失效形式。认识分层的规律以及典型层压板的分层特性,提高层压板的抗分层能力,有利于材料研究者开发韧性更好的基体树脂,设计出抗分层能力较高的层压板。对于结构设

计人员来说,了解层压板的分层特性,可以更合理地利用材料,充分发挥材料的性能。分层产生以后,层压板的刚度、强度急剧下降,甚至引起结构的失效。所以,对层压板的分层行为进行研究具有非常重要的工程意义,一直是复合材料以及力学工作者感兴趣的课题^[1~3]。

用于舰艇、飞机等的复合材料构件在湿度较高的区域服役,树脂会吸湿,材料的性能可能会退化^[4]。这时湿热环境成为不可忽略的影响因素。

湿热的单独作用下,纯Ⅰ型、纯Ⅱ型复合材料层压板的层间断裂性能的研究很多^[5~8],对于湿和热的共同作用以及湿热作用下混合型层间断裂特性的研究较少。本文作者研究在湿热综合作用下,复合材料层压板的混合型层间断裂的演化特点和规律。

1 试 验

1.1 混合型挠曲(MMF)试验原理

有限的空间限制了试验装置的选择,本文作者采用环境箱内的混合型挠曲(MMF)试验装置^[9],来研究树脂基复合材料在湿热环境下的混合型层间断裂特性。

混合型挠曲试验所用的试件以及装置如图 1 所示。先在裂纹张开的一端塞入一垫块,等效于施加裂纹张开位移 W 然后放在三点弯曲装置上进行加载。这两种载荷共同作用下,在裂尖正应力和剪应力同时存在,属于混合型层间裂纹。

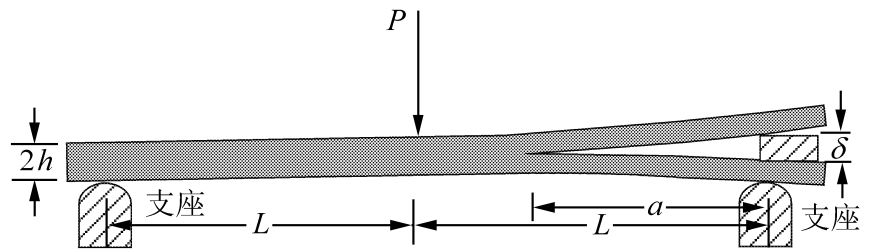


图 1 混合型挠曲试件及加载装置图

Fig.1 The MMF specimen and loading sketch

试件所受的外载(力和位移),可以看成力载荷和位移载荷分别作用的叠加。力载荷作用下,等效于Ⅱ型加载;位移载荷的作用,相当于Ⅰ型裂纹问题中固定位移的情形。试件的应变能释放率为

$$G = \frac{5U}{b5a} = \frac{5U}{b5a} + \frac{5U}{b5a} = G + G \tag{1}$$

式中:U 是弹性应变能;b 为试件宽度;G ,G 分别表示总应变能释放率的Ⅰ型、Ⅱ型分量。用 E₁₁表示沿试样长度方向的弹性模量,它们的表达式可分别

表示为

$$G = \frac{3E_{11}h^3W}{16a^4} \tag{2}$$
$$G = \frac{9P^2a^2}{16E_{11}b^2h^3}$$

1.2 试样与试验

本研究中,试验所使用的材料是 T300/5405,是一种碳纤维增强双马来酰亚胺复合材料。

试样的几何形状如图 2 所示,初始层间裂纹通过在试样一端预埋聚四氟乙烯薄膜获得。根据树脂基复合材料层压板湿热环境吸湿方法^[10]对试件进行烘干、吸湿处理,使之具有不同的吸湿量。试验中用 X-Y 记录仪记载试验载荷-位移曲线,用移动望远镜观察裂纹扩展,并读取裂纹的长度。从望远镜中观察到裂纹每扩展 2 mm~3 mm,进行一次卸载。试样具有三种吸湿量:干态,吸湿 0.75 %,吸湿 1.1 %,在室温,60 ,90 ,120 四种温度下试验。

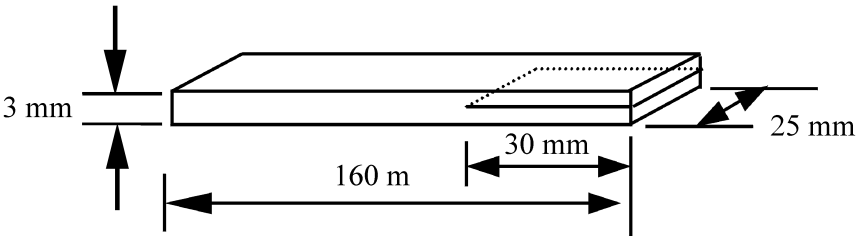


图 2 试件形状和尺寸

Fig.2 Geometry and dimensions of the specimen

2 结果与讨论

2.1 湿热的综合作用下,裂尖有塑性变形存在

比较常温干态条件下和高温吸湿条件下混合型试验的载荷-位移曲线图,图 3 和图 4,容易看出:常温干态下,在裂纹扩展以前,载荷位移呈线性关系,裂纹扩展后,裂纹长度 a 增大,梁的刚度下降,进入非线性段,但卸载线是指向原点的直线,线性关系依然成立,卸载后试件不存在永久变形。在高温、高湿环境中,载荷-位移曲线在裂纹扩展以前已有非线性段,这在 120 ,1.1 % 吸湿条件的试验中最为突出,见图 4 所示。显然,在裂纹的尖端存在一定的塑性变形。在机理上,层间树脂在吸湿以后,引起树脂的玻璃化转变温度下降,在高温时,环境的温度非常接近材料吸湿后的玻璃化转变温度,裂尖应力较高时,容易发生塑性流动,试件卸载后存在残余变形。

另外,在裂纹扩展的初期,裂纹较短时,裂纹的扩展是稳态的;在裂纹扩展的后期,裂纹较长,在位移控制加载方式下,裂纹呈非稳态扩展。

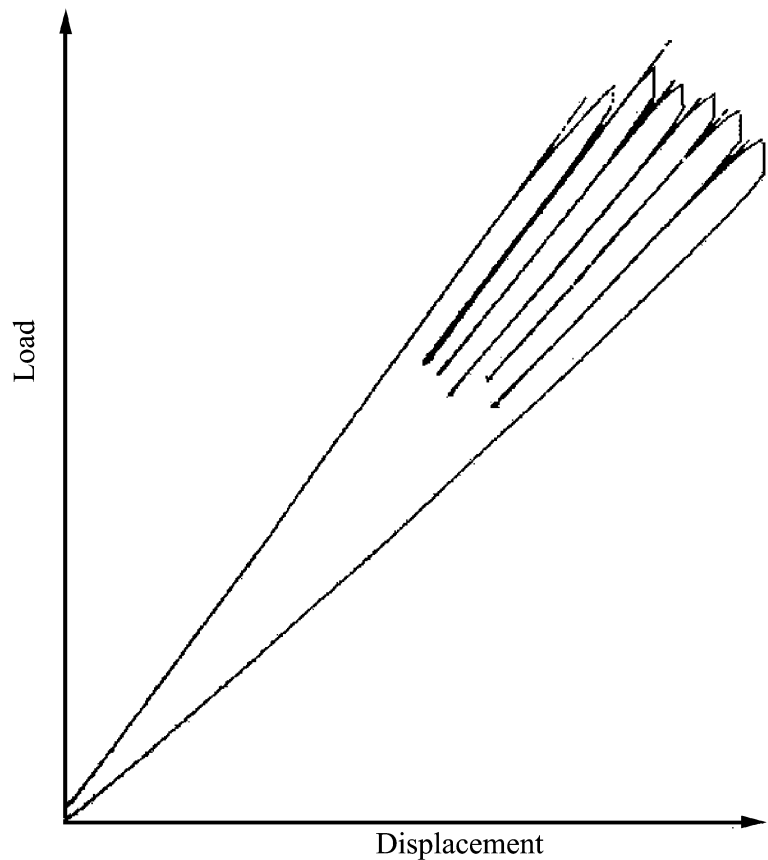


图 3 常温干态时载荷-位移曲线示意图

Fig. 3 Load-displacement curve of specimen at room temperature

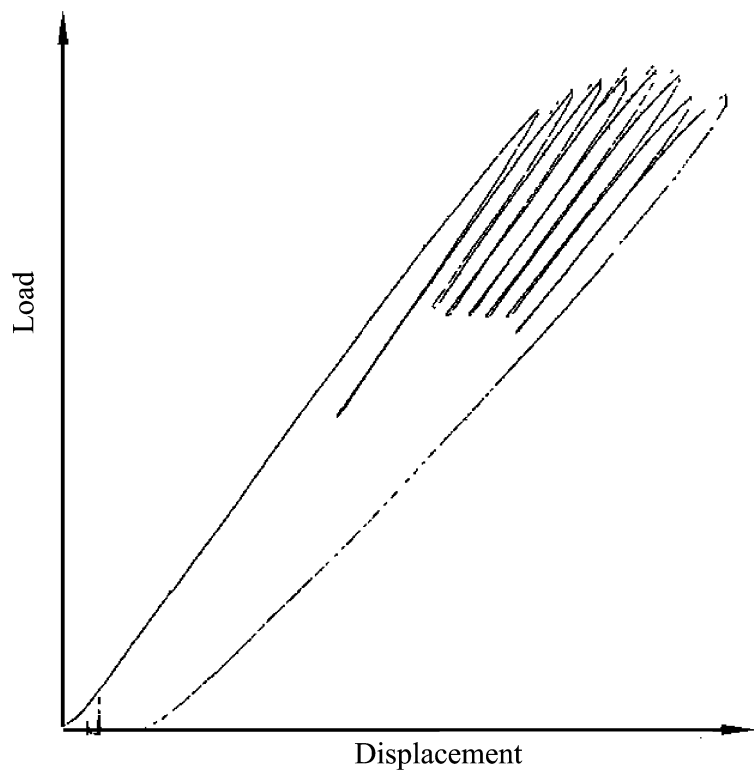


图 4 120 °C 下, 吸湿 1.1 % 的载荷-位移曲线示意图

Fig. 4 Load-displacement curve at 120 °C with 1.1 % hygroscopic capacity

2.2 吸湿量的影响

由图 5 中可以看出: 室温(30 °C)下, 吸湿量对层间断裂韧性的影响不大, 各吸湿水平下的数据点都位于同一分散带内; 而在高温(120 °C)下, 可以明显看出: 吸湿量的影响明显, 随着吸湿量增加, 韧性显著提高, 见图 6。所以, 湿和热的共同作用使得 T300/5405 单向板的层间韧性增加。观察断面电镜照片发现: 其断口呈现出韧性破坏的形态, 吸湿后树

脂软化, 韧性增强。如图 8(a) 常温湿态 I 型为主的情况, 树脂的断面不同于图 7(a) 常温干态。断口上树脂出现了类似于金属材料颈缩时的韧性收缩, 断裂部分比较光滑。在以 II 型断裂为主的断口上, 常温吸湿后(图 8(b)), 树脂最终被剪切成孤立碎片, 较干态时(图 7(b)) 更为严重, 而且剪断的树脂存在收缩现象。

2.3 温度的影响

比较干态、吸湿 1.1 % 两种吸湿水平下, 不同温度时的 G_{II} ~ G_I 图, 见图 9 和图 10。干态时温度的升高并不会对 T300/5405 的混合型断裂韧性值产生明显影响(图 9); 而当含湿量较高时, 温度低于 60 °C 时韧性变化不大, 高于 60 °C 后, 随着温度升高韧性明显提高(图 10)。这说明, 单纯温度的作用, 对

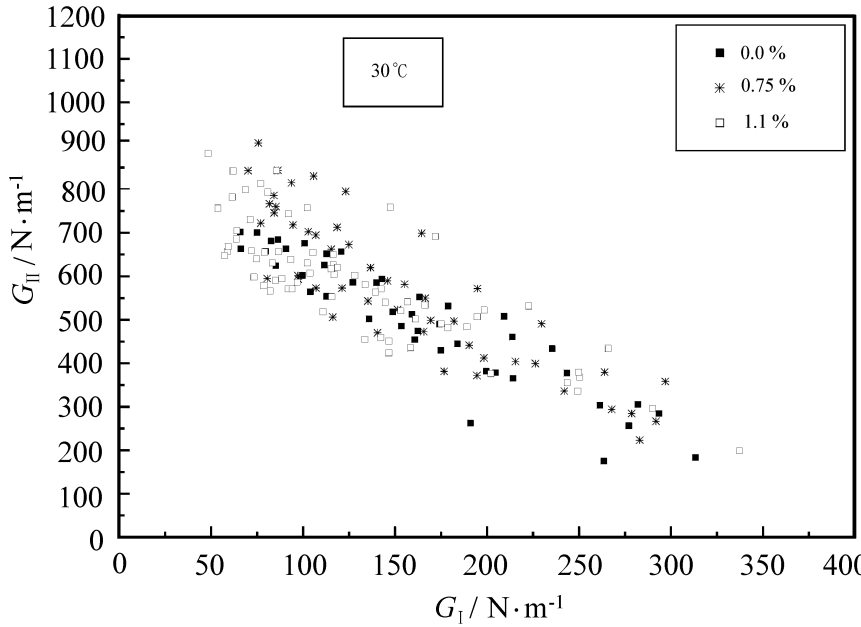


图 5 30 °C 下, 不同吸湿量试件的层间断裂韧性

Fig. 5 G_{II} versus G_I of specimens with different hygroscopic degrees at room temperature

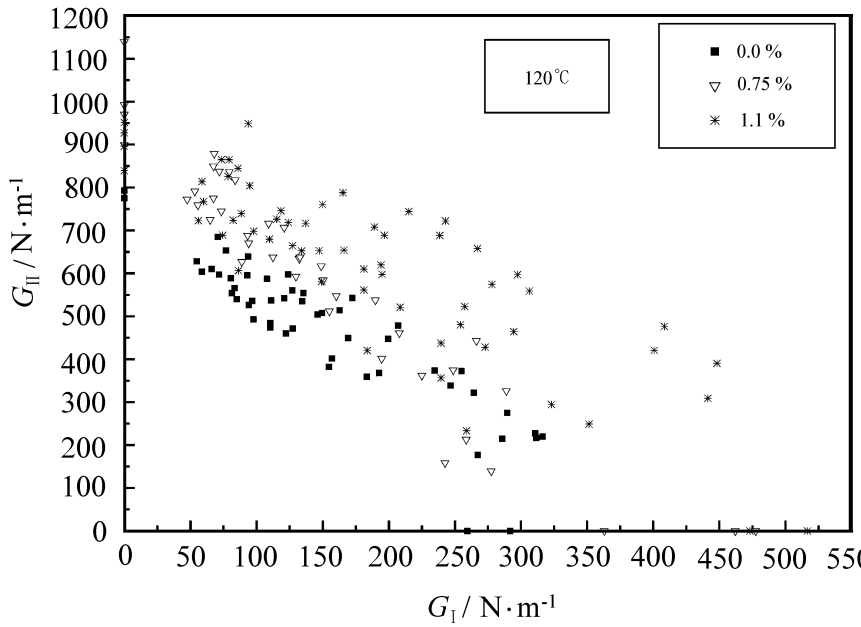


图 6 120 °C 下, 不同含湿量试件的层间断裂韧性

Fig. 6 G_{II} versus G_I of specimens with different hygroscopic degrees at 120 °C

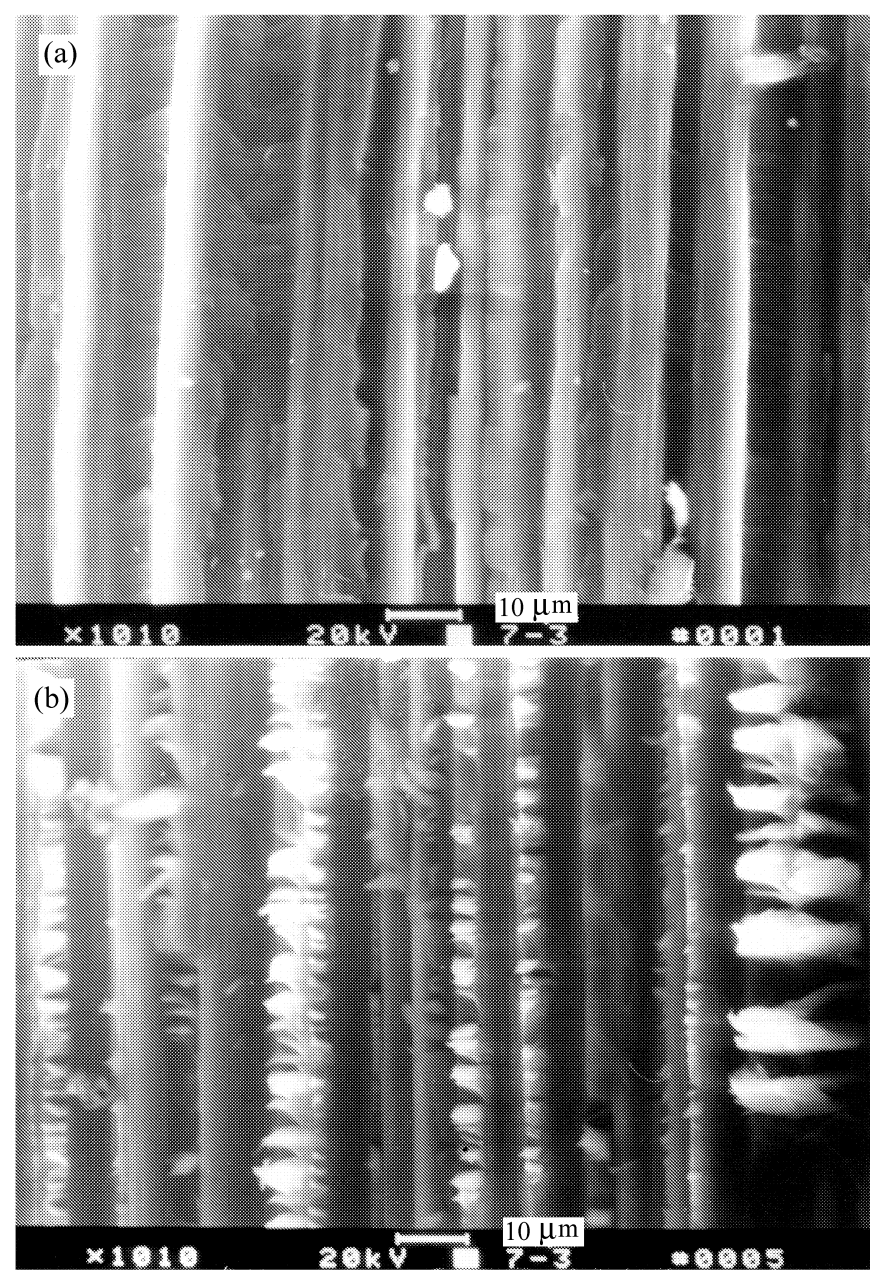


图 7 干态试样在室温下断裂断面照片

Fig. 7 Fractograph of dry specimens at room temperature

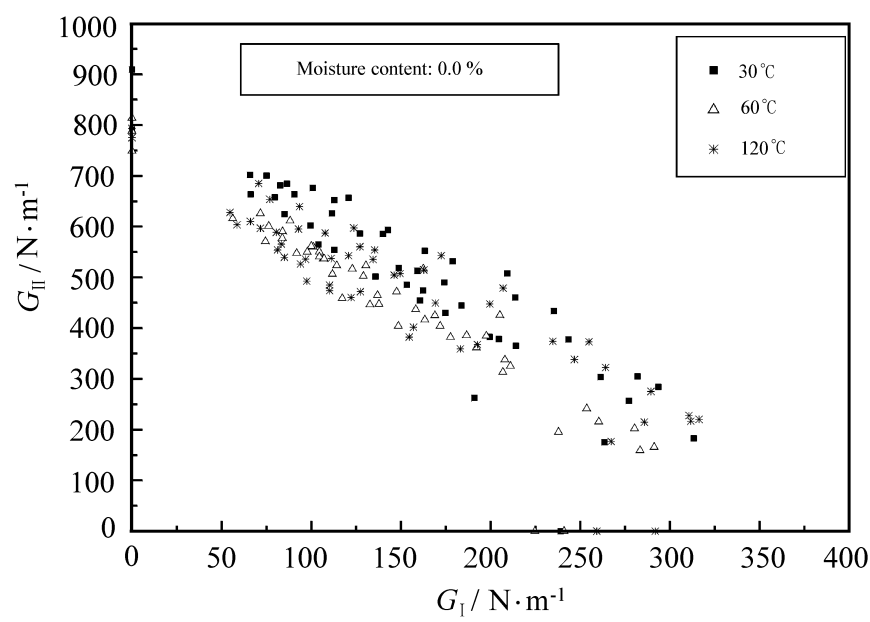


图 9 干态试件在不同温度下的层间断裂韧性

Fig. 9 G_{II} versus G_I of dry specimens at different temperatures

T300/ 5405 单向板的混合型断裂韧性影响不大;但当两者共同作用时,材料的的韧性值会显著提高。这也表明:改性双马树脂 5405 制成的复合材料,具有较好的耐湿热性能。高温对树脂韧性的影响不明显。

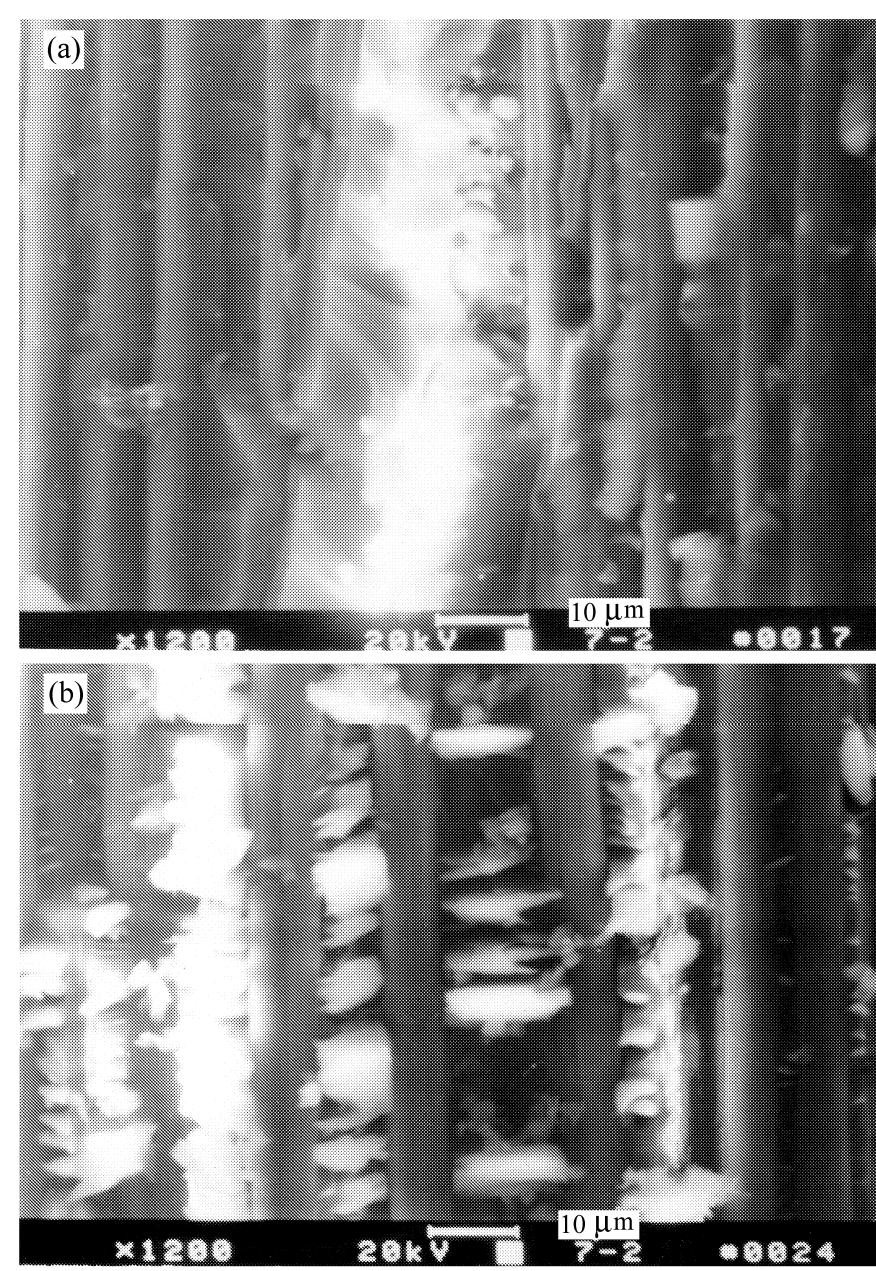


图 8 吸湿 1.1 % 的试样在室温下断裂断面照片

Fig. 8 Fractograph of specimens of 1.1% hygroscopic degree at room temperature

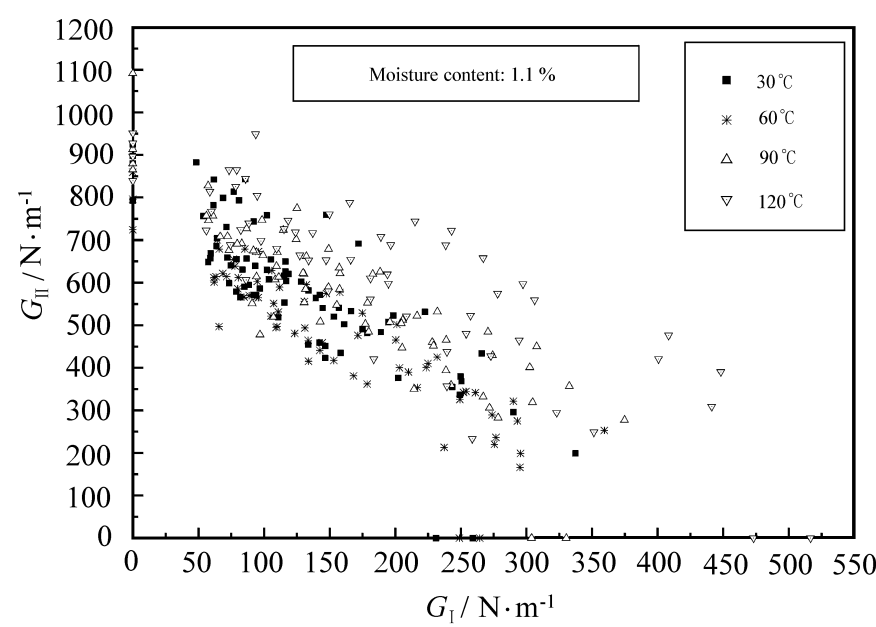


图 10 高含湿量的试件在不同温度下的层间断裂韧性

Fig. 10 G_{II} versus G_I of hygroscopic absorbed specimens at different temperatures

从图 11 可以看到:干态、高温使界面层树脂韧性略有增加,造成其断口呈现一种典型的树脂韧性断裂形貌,形成一些比较光滑的断面。图 12 所示高温湿

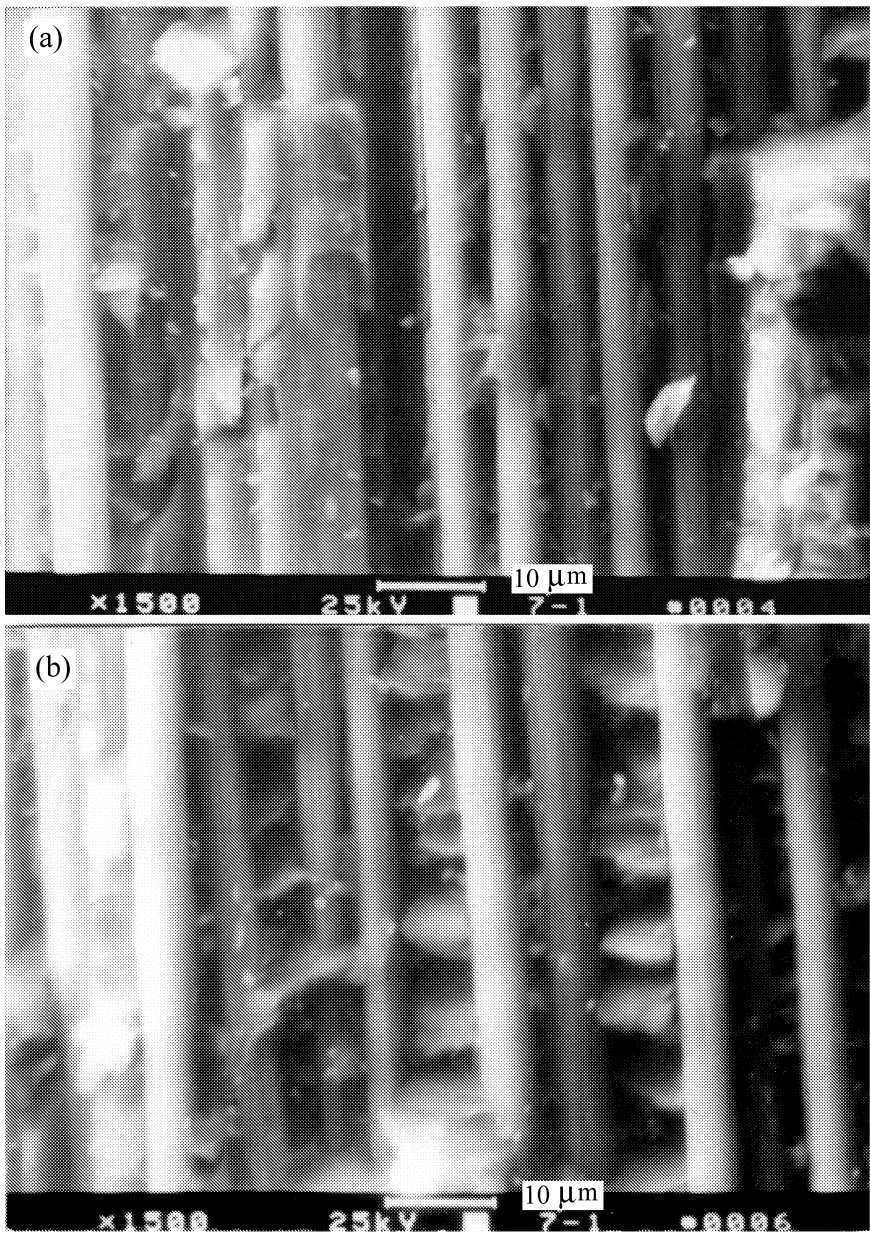


图 11 干态试样在 120 °C 环境中断裂的断面照片
Fig. 11 Fractograph of dry specimens at 120 °C

态的断口除了表现出典型的韧性断口外, 在断口上粘有大量的树脂碎粒, 这是树脂剪切破坏后, 成为碎粒, 粘在断口上(图 12(b))。

3 结 论

通过对 T300/5405 复合材料层压板在湿热环境下的 、 混合型层间断裂韧性的试验, 可以得到以下结论:

- (1) 湿热共同作用下, 在分层的尖端存在塑性变形。
- (2) 室温下, 材料吸湿量对层间断裂韧性的影响不大, 韧性随湿度的变化比较小; 高温(120 °C)下, 随吸湿量增加, 韧性显著提高。
- (3) 干态时温度的升高对 T300/5405 的混合型层间断裂韧性值影响不明显; 含湿量较高时, 当温度低于 60 °C 时, 韧性变化不大, 当温度高于 60 °C 时, 随着温度升高韧性显著提高。

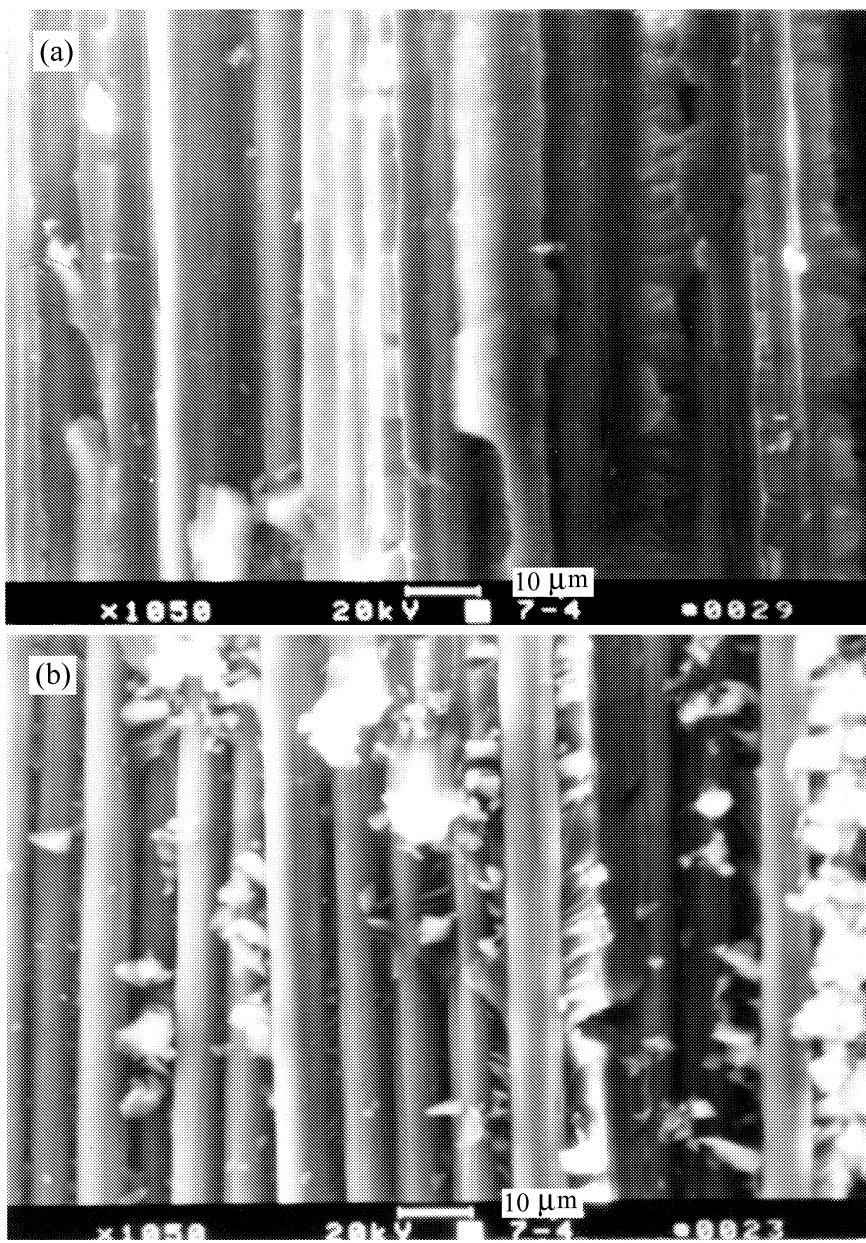


图 12 吸湿 1.1% 试样在 120 °C 环境中断裂的断面照片
Fig. 12 Fractograph of specimens of 1.1% hygroscopic degree at 120 °C

参考文献:

[1] KUNIGAL N, SHIVAKUMAR, JOHN H CREWS J R, Vishnu S Avva. Modified mixed-mode bending test apparatus for measuring delamination fracture toughness of laminated composites [J]. Journal of Composites, 1998, 32(9): 804- 828.

[2] James R Reeder, John H Crews Jr. Mixed-mode bending method for delamination testing [J]. AIAA Journal, 1990, 28(7): 1270- 1276.

[3] 白 静, 孟庆春, 张 行. 复合材料层压板三维分层问题的断裂力学分析 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(3): 75- 82.

[4] 王玉林, 万怡灶, 陈桂才, 等. 三维编织碳纤维/环氧复合材料的吸湿特性及外应力的影响 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(6): 101- 105.

[5] 郑锡涛, Gaedke M, Weber R. 湿热对复合材料层压板 型分层特性的影响 [A]. 见: 张志民. 第九届全国复合材料学术会议论文集 [C]. 北京: 世界地图出版社, 1996. 443- 447.

[6] Peter Davies, Frederic Pomies, Leif A Carlsson. Influence of water absorption on transverse tensile property and shear fracture toughness of glass/ polypropylene [J]. Journal of

Composite Materials, 1985, 22(3): 413- 417.

[7] HASHEMI S, KINLOCH A J, WILLIAMS J G. The effects of geometry, rate and temperature on the mode , mode and mixed-mode / interlaminar fracture of carbon-fiber/poly(ether-ether keton) composites [J]. Journal of Compos-ites, 1990, 24(9):918- 956.

[8] 矫桂琼, QIN Yun. 吸湿对复合材料层间断裂韧性的影响 [J]. 宇航材料工艺, 1995, 25(6): 32- 34.

[9] 贾普荣, 矫桂琼. 复合材料混合型层间断裂韧性及失效判据 [J]. 西北工业大学学报, 1996, 14(1): 105- 109.

[10] 中国航空研究院. 复合材料飞机结构耐久性/ 损伤容限设计指南 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1995. 314- 317.