

GFRP 层压板挖补修理后的吸湿行为

王志平 梁吉勇 张国尚

(中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室,天津 300300)

文 摘 对采用不同台阶比率挖补修理的玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板进行了吸湿实验,获得了各种台阶比率试样的吸湿规律以及损伤行为。通过面内剪切强度测试以及形貌观察,研究分析了导致吸湿试件强度降低以及层间开裂的主要因素。实验发现:玻璃纤维增强树脂基复合材料的孔隙率是影响层合板吸湿率和层间开裂的重要影响因素,孔隙率越高,吸湿率越高,但层间开裂倾向却降低;台阶比率对长时间吸湿试件的强度保持率有较大的影响,恰当选择台阶比率不但有助于提高强度恢复率,还可减小因吸湿而产生的强度降低幅度;吸湿会导致玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板的面内剪切强度大幅度下降,导致这种结果主要原因之一是吸湿会严重劣化纤维/树脂界面粘结状态。

关键词 复合材料, 修补, 吸湿, 裂纹, 孔隙

中图分类号: TQ32

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.02.007

Moisture Absorption Behavior on Scarf Patch Repair GFRP Laminates

WANG Zhiping LIANG Jiyong ZHANG Guoshang

(Tianjin Key Laboratory for Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300)

Abstract Hygroscopic behavior was investigated with different scarf patch repair methods of GFRP laminates, then hygroscopic law and damage behaviors were gained. Main factors leading to decrease of hygroscopic property and interlaminar fracture were investigated and analysed through the in-plane shear properties tests and morphology observation, which show that hygroscopic behavior increases with the increase of porosity, while the interlaminar fracture tendency decreases, the important factors influencing hygroscopy and interlaminar cracks is the porosity of GFRP laminates. Step ratio has a great influence on intensity of laminates, selecting the best step ratio is a good way to improve strength retention and decrease the strength reduction influenced by hygroscopic behavior. The investigation also confirms that hygroscopic behavior can seriously weaken fibre resin interface bonding state and the hygroscopic behavior is one of the main reasons which lead to the significant reduction of in-plane shear strength of laminates after moisture absorption.

Key words Composite materials, Scarf patch repair, Hygroscopic behavior, Crack, Porosity

0 引言

随着玻璃纤维增强树脂基复合材料在航空、航天、体育、汽车等领域的广泛应用,其在服役过程中力学性能易受湿热、紫外线等环境影响的问题,受到了国内外业内人士的广泛关注^[1-12]。研究表明,玻璃纤维增强树脂基复合材料具有较强的吸湿能力,吸入的水分对基体有明显的塑化/溶胀作用,还会在纤维/树

脂界面引起可致微观开裂的应力,从而导致复合材料性能劣化。目前关于吸湿的研究对象主要集中在一次成型后的复合材料,而实际复合材料服役部件上却常存在局部损伤修补区,但是修补区的吸湿规律、机理以及力学性能的演化至今未得到关注。

本文以玻璃纤维增强树脂基复合材料修补区为对象,通过实验与形貌分析,研究其吸湿行为,揭示其

修回日期:2014-01-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(JXH2012J002)

作者简介:王志平,1963年出生,博士,教授,主要研究方向:民用航空材料损伤评价与维修技术。E-mail:zpwang@cauc.edu.cn

吸湿破坏机理、吸湿后面内剪切性能的演化规律。

1 实验

1.1 材料

母板及修补材料所用的玻璃纤维预浸布 MXB7701-1581-B3 型,由美国 Cytec 公司提供;胶膜为 AF-163-2K(Knit Carrier)型中温固化胶膜,由 3M 公司提供。

1.2 主要仪器设备

HCS9000B 型热补仪;Smart-II 型复合材料精密磨床;小型热压罐为 SKD-12-02,最高工作压力为 10 MPa,设计温度为 200℃。

1.3 试样制备

母板铺层方式为 $[+45/-45]_{4S}$,将铺好的预浸料与模具一起放入热压罐,抽真空后开始加压固化。固化温度为 121℃,时间为 150 min,压力为 3.07 MPa。

采用磨床将层合板材料加工成如图 1 所示的待修补母板。台阶比率为 R_n :

$$R_n = H : D = 1 : n \quad (1)$$

式中, H 为修补区域厚度, D 为修补区域宽度的 1/2,修补台阶比率分别表示为 R_{10} 、 R_{20} 、 R_{30} 、 R_{40} 、 R_{50} 、 R_{60} ,完好试样用 R_0 表示。

首先使用 150# 砂纸打磨修补表面,然后用蘸有丙酮的棉布擦拭干净,晾干后铺放胶膜,最后将裁剪好的 8 层补片以阶梯形逐层粘贴至待修补区域。修理层数、铺层方向与母板相同,如图 1 所示。采用热补仪固化修补试件,固化温度为 121℃,时间为 150 min,真空度为 74 kPa。采用磨床将修补固化后的试件加工成 250 mm×25 mm 的样条。

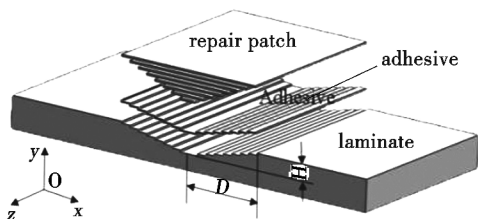


图 1 修补试验件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scarf repairs to composite laminates

1.4 吸湿试验

采用 HB7401-96^[13] 标准进行吸湿试验,湿热环境为 70℃ 水浸 14、70、120 d。材料的吸湿率定义为 M_t :

$$M_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_0 为干态试样质量, W_t 为浸水试样在时间 t 的质量。

1.5 力学性能测试

根据 ASTM D3518^[14] 标准,使用 Instron 5982 万能试验机测试复合材料层合板吸湿后面内剪切性能。测试前首先在 82℃ 下保温 2 min,测试结果取 5 个试样平均值。

1.6 形貌分析

采用 LEO1530VP 型扫描电子显微镜(SEM)观察未吸湿、吸湿后的试件剖面和拉伸断口。

2 结果与讨论

2.1 吸湿结果

图 2 为 7 组试样 120 d 吸湿曲线,可见所有试样吸湿 120 d 均未达到饱和吸湿状态。这主要由于母板吸湿后树脂溶胀,在纤维/树脂基体界面上产生局部内应力,当内应力大于界面粘结力时,纤维/树脂基体界面会出现裂纹(图 3)。

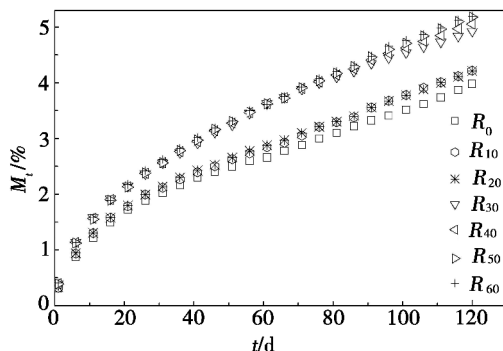
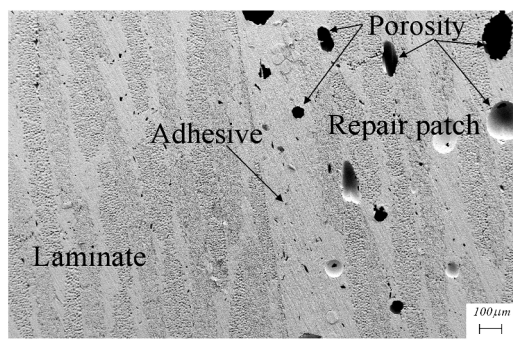
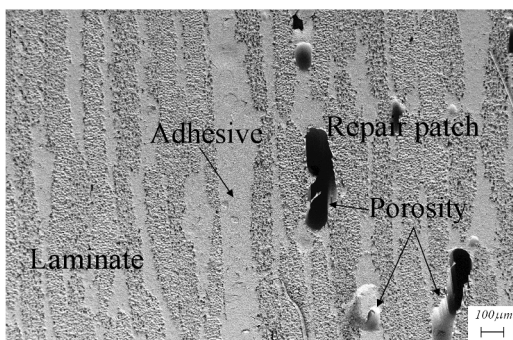


图 2 120 d 吸湿曲线

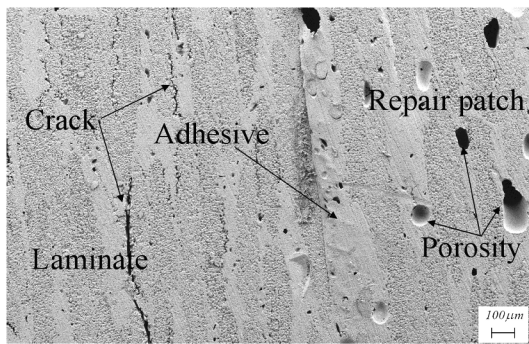
Fig. 2 Moisture content curve of 120 days



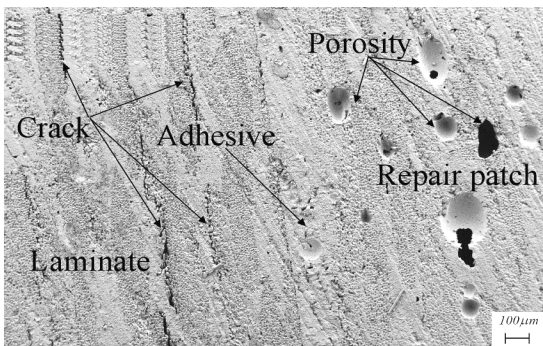
(a) 0 d



(b) 14 d



(c) 70 d



(d) 120 d

图3 不同吸湿时间剖面 SEM 照片

Fig.3 Profile SEM in different absorbing time

由于裂纹尖端易引起应力集中^[15],所以随着吸湿的不断进行,裂纹沿尖端不断扩展,为下一次吸湿提供了空间和路径,从而导致吸湿量不断增加,最终在母板表面观察到圆形鼓包[图4(d)]。

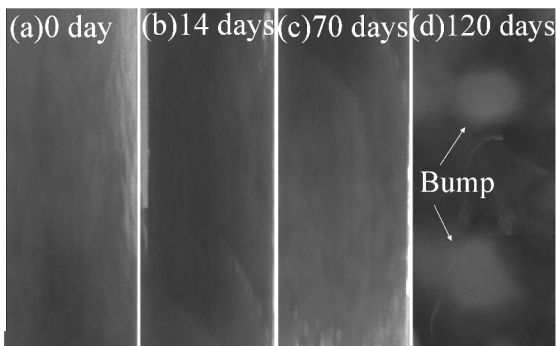


图4 不同吸湿时间母板表面形貌图

Fig.4 Morphology of laminate in different absorbing time

从图2中还可以看出,挖补后试样 R_{10} 、 R_{20} 、 R_{30} 、 R_{40} 、 R_{50} 、 R_{60} 吸湿率比试样 R_0 吸湿率分别高 5.5%、6%、23.9%、26.88%、30.15%、30.65%,说明修补区域体积越大,吸湿速度越快。这是因为修补区域采用热补仪固化,孔隙率比热压罐固化的母板高出很多,如图3所示,故其内部具有更强的吸湿能力。图5是分别采用热压罐(Autoclave)与热补仪(Hot Bonder)固化成型试样的吸湿实验结果,实验证实层合板的孔隙率对其吸湿率有明显的影响,孔隙率越高,吸湿率越大。

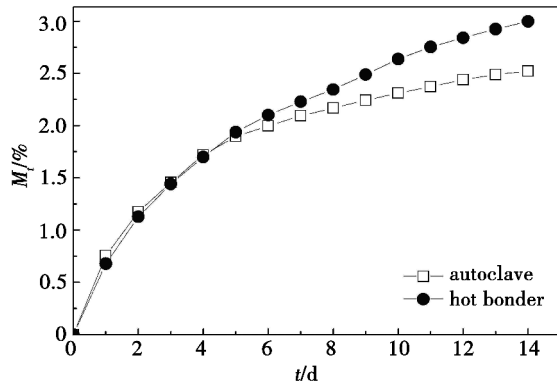


图5 热压罐与热补仪固化工艺吸湿率对比

Fig.5 Moisture content comparison of autoclave and hot bonder curing process

从图3还观察到一个现象,即吸湿试样修补区并没有像母板一样出现裂纹。两个区域的最主要差别就是孔隙率,由此可以推断层合板内的孔隙不但影响吸湿率,而且对层合板的层间开裂有重大影响。孔隙至少有以下三方面的作用:首先它可以为其周围树脂的吸湿膨胀提供形变空间,进而降低材料内应力水平;其次它可有效阻断裂纹的生长;最后,它可能影响其周围树脂的含水量,从而影响树脂的膨胀率。

2.2 力学性能

图6为不同吸湿条件下复合材料层合板(含修补试件)面内剪切强度测试结果。可以看出,未吸湿时修补后试件除 R_{10} 强度保持率为70%外,其他各组试样均在81.7%~89.1%,这说明修补时适当选择台阶比率有助于增加强度保持率。吸湿14d后,各组试样均表现出吸湿后面内剪切强度下降幅度超过50%,这说明吸湿会显著降低复合材料层合板(含修补试件)的面内剪切强度,但修补因素的影响并不显著。吸湿120与14d相比, R_0 、 R_{10} 、 R_{20} 、 R_{30} 、 R_{40} 、 R_{50} 、 R_{60} 强度下降幅度分别为:13.8%、12.9%、38.2%、31.9%、6.5%、7.2%、6.1%,由此可见,修补时台阶比率对长时间吸湿试件的强度保持率有较大的影响。

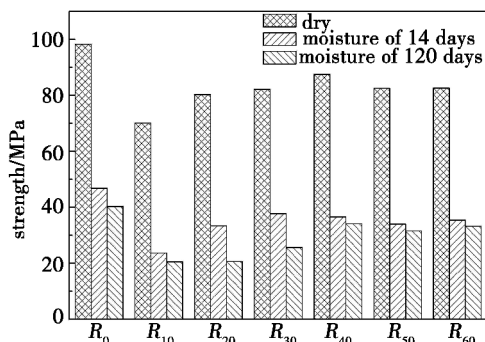
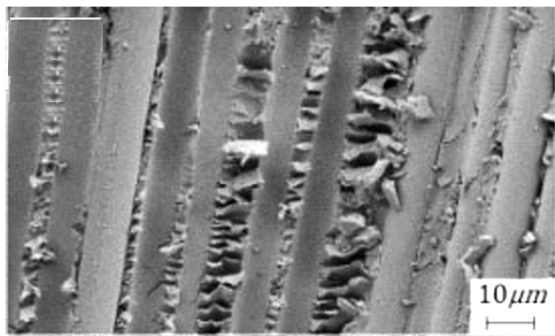


图6 不同吸湿时间面内剪切强度值对比

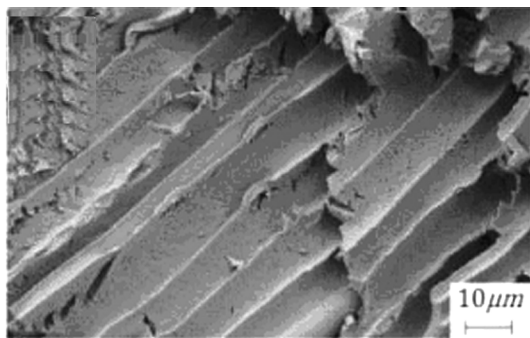
Fig.6 The in-plane strength comparison in different absorbing time

通过试样断口的观察与分析发现,纤维/树脂界面粘接状态的变化是导致复合材料层合板吸湿后面内剪切强度下降的主要原因。

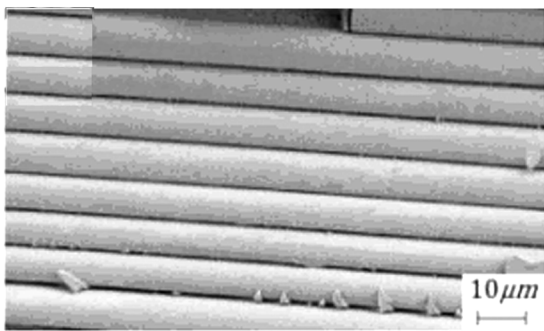
图7为不同吸湿时间试样面内剪切试验后的断口形貌。从图7(a)可以看到,干态试样断口的纤维表面附着很多树脂颗粒,且有多处破碎,说明树脂与纤维界面粘接状态良好;图7(b)显示纤维表面变得更加光滑,只附着少量树脂颗粒,树脂表面同样较光滑,只发生部分树脂破碎,这证实吸湿大幅度劣化了树脂与纤维界面粘接状态;图7(c)显示纤维和树脂表面非常光滑,基本无树脂颗粒粘连或破碎现象,这充分说明吸湿时间越长对纤维/树脂界面强度降低越显著。



(a) 干态



(b) 吸湿 14 d



(c) 吸湿 120 d

图7 不同吸湿时间试样断口 SEM 照片

Fig.7 Fracture morphology(SEM) in different absorbing time

3 结论

(1)玻璃纤维增强树脂基复合材料的孔隙率是影响层合板吸湿率和层间开裂的重要影响因素。孔隙率越高,吸湿率越高,但层间开裂倾向却降低。

(2)复合材料修补时,台阶比率对长时间吸湿试

件的强度保持率有较大的影响,恰当选择台阶比率不但有助于提高强度恢复率,还可减小因吸湿而产生的强度降低幅度。

(3)吸湿会导致玻璃纤维增强树脂基复合材料层合板的面内剪切强度大幅度下降,主要原因之一是吸湿会严重劣化纤维/树脂界面粘接状态。

参考文献

[1] Didierjean S, Michel L, Barrau J J, et al. Predicting the behaviour of graphite/epoxy laminates under hydrothermal loads [C]. Proceed-ings of euromech 453 conference internal stress-ses in polymer composite processing and service life, Saint-Etienne, 1-3 December 2003

[2] Weitsman Y. Moisture in composites: sorption and damage[J]. Fatig Compos. Mater. ,1990,9:385-429

[3] Feng T B, Zhao Y, Luo Y F. The effect of si-zing on mechanical properties of CF/BMI com-posites under under hygro-thermal cond-ition[C]. Edinburgh, ICCM-17, 2009

[4] Scida D, Abonra Z, Benzeggagh M L. The effect of ageing on the damage events in woven-fiber composite materials under different loading condition[J]. Composites Science and Technology, 2002(62):551-557

[5] 李静. 纤维增强树脂基复合材料的吸湿性和湿变形 [J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(2):69-74

[6] 过梅丽, 肇研, 谢令. 航空航天结构复合材料湿热老化机理的研究[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(4):51-54

[7] Kimhy, Grayson M A, Nairn J A. The effect of hygrothermal aging on the microcracking on the microcracking properties of some carbon fiber/polyimide [J]. Advanced Composite Letters, 1995, 4(5):185-188

[8] Boukhoulda F B, Guillaumat L, Lataillade J L, et al. Ag-ing-impact coupling based analysis upon glass/polyester composite material in hygrothermal environment[J]. Materials & Design, 2011, 32(7):4080-4087

[9] 周春华, 刘威, 张志谦, 等. CF/PMR-15 复合材料界面的湿热稳定性研究[J]. 复合材料学报, 1997, 14(4):32-37

[10] 朱洪艳, 李地红, 张东兴, 等. 孔隙率对碳纤维/环氧树脂复合材料层合板湿热性能的影响[J]. 复合材料学报, 2010, 27(2):24-30

[11] Almeida S F M, Santacreu A C M. Environmen-tal effects in composite laminates with voids[J]. Polym. and Polym. Comp. ,1995, 3(3):193-204

[12] Costa M L, Rezende M C, Almeida S F M. Effect of voidcontent on the moisture absorption in polymeric composites [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2006, 45(6):691-698

[13] HB7401-96, 树脂基复合材料层合板湿热环境吸湿试验方法[S]

[14] ASTM D3518, Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate[S]

[15] 王吉会, 郑俊萍, 刘家臣, 等. 材料力学性能[M]. 天津:天津大学出版社, 2006

(编辑 吴坚)