

不同孔隙率 CFRP 层合板冲击后力学性能试验表征

张阿樱^{1,2}, 张东兴¹

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 150001 哈尔滨; 2. 哈尔滨学院 图书馆, 150086 哈尔滨)

摘 要: 为了研究吸湿量、孔隙率及冲击能量对 CFRP 层合板冲击后剩余拉伸强度及剩余弯曲强度的影响规律, 首先将 3 种孔隙率 CFRP 层合板试样置于湿热环境中分别吸湿 7、14 d 及吸湿至饱和状态, 然后在室温环境中对 3 种孔隙率不同老化程度的 CFRP 层合板试样分别进行 5 种能量即 3–15J 的冲击作用, 并测量其冲击后剩余拉伸强度及剩余弯曲强度. 试验结果表明: 随着冲击能量的提高, CFRP 层合板冲击后剩余拉伸强度及剩余弯曲强度均显著下降; 冲击能量相同时, 孔隙率对 CFRP 层合板冲击后剩余拉伸强度及剩余弯曲强度的影响并不明显. 分析认为层合板受到冲击作用后产生的分层损伤降低了孔隙率对冲击试样剩余强度的影响程度.

关键词: 孔隙; 复合材料; 冲击; 湿热环境; 力学强度

中图分类号: TB33 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2014)03-0054-07

Experimental characterization of the mechanical strength after impact of CFRP laminates with different void contents

ZHANG Aying^{1,2}, ZHANG Dongxing¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. Library, Harbin University, 150086 Harbin, China)

Abstract: The influences of porosity, impact energies and moisture contents on the residual tensile strength and bending strength after impact of CFRP laminates are evaluated. CFRP laminates of three porosity levels were immersed in water for 7、14 days and moisture saturation. Impact tests on the CFRP laminates of three porosity levels with different immersion time were conducted at five impact energy levels of 3–15J at room temperature, followed by the residual tensile test and bending test performed on the specimens. The experimental results show that the residual tensile strength and bending strength after impact decreased significantly with the increasing impact energy. For the same impact energy, no obvious effects of void contents on the residual tensile strength and bending strength after impact were observed. The delamination induced by the impact would reduce the influence of void on the residual strength of the impacted specimens.

Keywords: void; composites; impact; hygrothermal environment; mechanical strength

碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer/plastics, CFRP)具有比强度高、比模量高、耐高温、抗疲劳及耐腐蚀性能好等优点,广泛地应用于军用及商业领域^[1-3].但是,复合材料层合板结构对低速冲击比较敏感,即使很小的损伤也会导致结构整体性发生破坏,从而限制了层合

板结构的应用^[4].低速冲击作用后,目视通常难以观察到复合材料层合板表面的损伤,但是复合材料内部已经产生基体裂纹、分层及纤维断裂等损伤,可导致复合材料力学性能显著下降^[5-6].为了保证服役期间受到冲击后复合材料层合板结构不发生突发性破坏,对复合材料的冲击损伤容限性能进行研究、评估复合材料结构受到冲击后的剩余强度具有重要意义.

此外,复合材料结构不仅要承受复杂的荷载作用,同时也会受到温度、湿度及各种严苛环境因素的影响,其中湿热环境是导致复合材料性能发

收稿日期: 2013-04-01.

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究资助项目; 哈尔滨青年(博士)科研基金资助项目(HUDF2013-006).

作者简介: 张阿樱(1973—),女,博士;

张东兴(1961—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 张东兴, dongxingzhang@163.com.

生退化的最为重要的环境因素之一^[2,7]. 研究表明: 孔隙作为复合材料最为常见的制造缺陷, 对复合材料结构的物理及力学性能存在有害影响^[8-11]. 并且孔隙对水的渗透和环境因素极为敏感, 孔隙可加速复合材料吸湿, 而吸湿可导致复合材料强度发生退化, 因此孔隙和环境因素均对复合材料层合板的力学性能产生影响^[12]. 目前, 国内外学者对复合材料的冲击阻抗性能及损伤容限性能已进行了大量研究, 但是, 针对湿热环境下不同孔隙率复合材料层合板冲击后力学性能的研究还未见报道. 因此, 本文研究了 3 种孔隙率的 CFRP 层合板未吸湿试样、湿热 7 d 试样、吸湿 14 d 试样及吸湿饱和试样分别受到 5 种能量即 3-15 J 冲击后剩余拉伸强度及剩余弯曲强度, 分析了孔隙率、吸湿量及冲击能量对复合材料层合板冲击损伤容限性能的影响规律.

1 试 验

1.1 CFRP 层合板制备

本试验原材料为织物碳纤维/环氧树脂 (T300/914) 层合板, 碳纤维/环氧树脂预浸料由 Hexel 生产, 纤维体积分数为 52%. 层合板采用热压罐成型, 铺层方式为 $[(\pm 45)_4/(0, 90)/(\pm 45)_2]_s$. 通过调整固化压力生产出孔隙率分别为 0.33%、0.71% 及 1.50% 的 CFRP 层合板.

1.2 湿热老化试验

根据 HB7401—1996《树脂基复合材料层合板湿热环境吸湿试验方法》对孔隙率分别为 0.33%、0.71% 及 1.50% 的 CFRP 层合板试样进行湿热老化试验, 分别吸湿 7、14 d 及达到吸湿饱和状态.

碳纤维增强环氧树脂 (T300/914) 层合板的吸湿量为

$$M_i = \frac{G_i - G_0}{G_0} \times 100.$$

式中: M_i 为层合板试样的吸湿量, %; G_i 为层合板试样吸湿后质量, g; G_0 为层合板工程干态试样质量, g.

本试验中试样分为两种: 1) 未老化试样. 将 CFRP 层合板试样置于室温环境, 作为参考试样; 2) 湿热老化试样. 将烘干为工程干态的 CFRP 层合板试样放入 70 °C 恒温水浴中分别浸泡 7、14 d 及吸湿至饱和状态.

1.3 金相显微镜检测

根据 GB/T 3365—2008《碳纤维增强塑料孔隙体积分数和纤维体积分数试验方法》用金相显

微镜 (VNT-100) 对 CFRP 层合板试样孔隙形貌进行检测.

1.4 拉伸强度试验

根据 GB/T3354—1999《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》测量 CFRP 层合板的拉伸强度, 拉伸试样尺寸为 230.0 mm × 25.0 mm × 4.5 mm, 采用 Instron 5569 万能试验机, 拉伸试验加载速度设定为 2 mm/min. 每组试验取 5 个未冲击试样, 将其平均值作为 CFRP 层合板未冲击试样的拉伸强度.

1.5 弯曲强度试验

根据 GB/T3356—1999《单向纤维增强塑料弯曲性能试验方法》采用 3 点加载方式测量 CFRP 层合板的弯曲强度, 弯曲试样尺寸为 90.0 mm × 25.0 mm × 4.5 mm, 跨度为 72 mm. 弯曲试验采用万能试验机 (WDW-10), 弯曲试验加载速度设定为 5 mm/min. 每组试验取 5 个未冲击试样, 将其平均值作为 CFRP 层合板未冲击试样的弯曲强度.

1.6 冲击试验

根据 ASTM D 7136《纤维增强聚合物基复合材料落锤冲击损伤阻抗测量标准试验方法》对 CFRP 层合板的进行冲击试验. 采用落锤式冲击试验机 (JLW-100), 钢制半球形冲头质量为 5.0 kg, 半径为 6.35 mm. 在室温环境中对孔隙率为 0.33%、0.71% 及 1.50% 的 CFRP 层合板未吸湿试样、湿热 7 d 试样、吸湿 14 d 试样及吸湿饱和试样分别进行 5 种能量即 3、6、9、12、15 J 的冲击试验, 每组冲击试验分别取 5 个试样.

1.7 冲击后剩余力学强度试验

为了研究不同孔隙率及不同吸湿量的 CFRP 层合板受到冲击后力学性能的变化情况, 在室温环境下对 3 种孔隙率不同老化程度的 CFRP 层合板冲击试样进行冲击后剩余拉伸强度试验和剩余弯曲强度试验, 试验方法同未冲击试样拉伸强度和弯曲强度的试验方法.

2 结果与讨论

2.1 CFRP 层合板吸湿曲线

为了研究不同孔隙率 CFRP 层合板拉伸及弯曲试样的吸湿规律, 跟踪测量了孔隙率分别为 0.33%、0.71% 和 1.50% 的拉伸及弯曲试样的吸湿量 (如图 1 所示). 试验结果表明, 孔隙率为 0.33%、0.71% 和 1.50% 的拉伸试样饱和吸湿量分别为 1.223%、1.275% 及 1.373%, 孔隙率为 0.33% 和 1.50% 的弯曲试样饱和吸湿量分别为

1.123%及 1.205%。由图 1(a)、(b)可知,CFRP 层合板拉伸及弯曲试样的吸湿量在吸湿初期均快速增长,随着吸湿时间的增加,CFRP 层合板试样吸湿量的增长趋势放缓,吸湿曲线出现一个平台,维持一段时间后吸湿速率再次提高。试验结果表明,CFRP 层合板拉伸及弯曲试样的吸湿量均随孔隙率的增加而增大,说明孔隙促进了 CFRP 层合板吸湿。

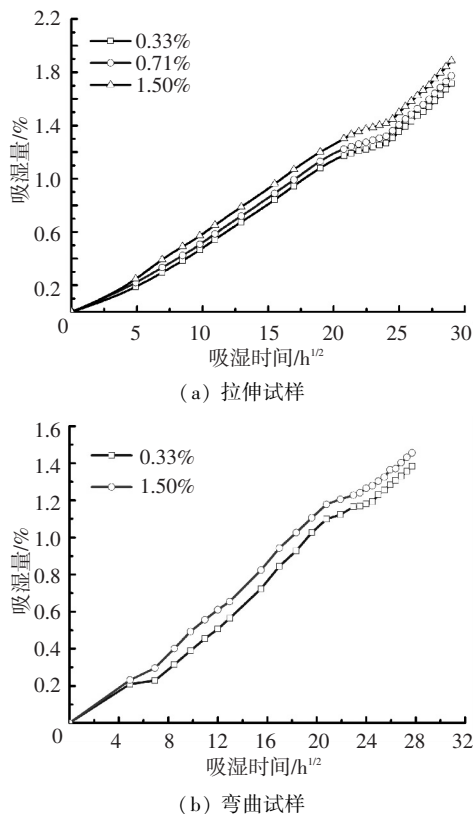


图 1 不同孔隙率 CFRP 层合板拉伸及弯曲试样吸湿曲线

由图 1 可知,拉伸及弯曲试样的吸湿曲线均呈现“两阶段扩散”模式,与文献[13]得出的结论相一致。分析认为,CFRP 层合板试样吸湿的第 1 阶段,水分一般是通过扩散作用进入树脂基体、通过毛细作用进入纤维及基体之间的界面,或者通过复合材料中的孔隙、微裂纹等内部缺陷进入复合材料。吸湿的第 2 阶段,由于复合材料在湿热环境中产生界面脱黏及分层、纤维与基体之间变形不均匀产生的内应力导致材料内部微裂纹产生;水分子扩散进入基体产生的渗透压导致基体内微裂纹的产生,进一步加速了吸湿;同时水分子促进裂纹进一步扩展,以及复合材料内部其他缺陷是“二次吸水”现象发生的主要原因^[14-17]。

2.2 冲击凹坑深度

图 2 为不同孔隙率的 CFRP 层合板冲击能量-凹坑深度曲线,试验结果表明,CFRP 层合板的冲击凹坑深度随着冲击能量的增加呈增长趋势。

由图 2 可知,当冲击能量低于 9 J 时,随着冲击能量增长,凹坑深度增长速度较慢;当冲击能量超过 9 J 后,随着冲击能量增长,凹坑深度的增加速度明显加快。通过热揭层试验发现,这是由于冲击能量超过 9 J 后试样表面开始出现纤维断裂现象,并且随着冲击能量的增加,纤维断裂程度趋于严重,进而导致凹坑深度快速增长。由图 2 可知,冲击能量相同时,随着孔隙率的增大,凹坑深度呈增大趋势。试验结果表明,孔隙对 CFRP 层合板试样冲击后凹坑深度存在不利影响。

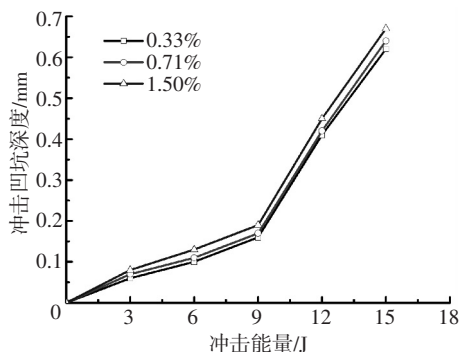


图 2 不同孔隙率 CFRP 层合板冲击能量-凹坑深度曲线

2.3 冲击后剩余拉伸强度

图 3(a)~(d)为不同湿热老化程度 CFRP 层合板冲击后拉伸强度曲线。图 3(a)为不同孔隙率的 CFRP 层合板未吸湿试样在 5 种能量冲击后的剩余拉伸强度曲线。试验结果表明,同未吸湿试样冲击前拉伸强度相比,当冲击能量增至 3 J 时,孔隙率分别为 0.33%、0.71%及 1.50%的未吸湿试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 89.41%、86.21%及 90.13%;当冲击能量增至 15 J 时,孔隙率分别为 0.33%、0.71%及 1.50%的未吸湿试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 43.13%、41.48%及 41.71%。

图 3(b)为不同孔隙率的 CFRP 层合板吸湿 7 d 试样在 5 种能量冲击后的剩余拉伸强度曲线。试验结果表明,同吸湿 7 d 试样冲击前的拉伸强度相比,当冲击能量增至 3 J 时,孔隙率分别为 0.33%、0.71%及 1.50%的层合板吸湿 7 d 试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 91.10%、84.77%及 91.22%;当冲击能量增至 15 J 时,孔隙率分别为 0.33%、0.71%及 1.50%的层合板吸湿 7 d 试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 43.97%、38.89%及 43.01%。

图 3(c)为不同孔隙率的 CFRP 层合板吸湿 14 d 试样在 5 种能量冲击后的剩余拉伸强度曲线。试验结果表明,同吸湿 14 d 试样冲击前的拉伸强度相比,当冲击能量增至 3 J 时,孔隙率分别

为 0.33%、0.71% 及 1.50% 的层合板吸湿 14 d 试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 95.16%、96.03% 及 95.37%; 当冲击能量增至 15 J 时, 孔隙率分别为 0.33%、0.71% 及 1.50% 的层合板吸湿 14 d 试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 45.38%、43.67% 及 44.18%。

图 3(d) 为不同孔隙率的 CFRP 层合板吸湿饱和试样在 5 种能量冲击后的剩余拉伸强度曲线。试验结果表明, 同吸湿饱和试样冲击前的拉伸强度相比, 当冲击能量增至 3 J 时, 孔隙率分别为 0.33%、0.71% 及 1.50% 的层合板吸湿饱和试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 89.52%、89.02% 及 93.33%; 当冲击能量增至 15 J 时, 孔隙率分别为 0.33%、0.71% 及 1.50% 的层合板吸湿饱和试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 43.74%、42.08% 及 43.56%。

由图 3(a)~(d) 可知, 3 种孔隙率的 CFRP 层

合板试样冲击后剩余拉伸强度均随着冲击能量的提高显著下降。分析认为, 由于 CFRP 层合板的拉伸强度主要由纤维的强度和刚度决定, 随着冲击能量的增加, CFRP 层合板中纤维断裂程度加重, 导致层合板冲击后剩余拉伸强度下降。由图 3(a)~(d) 可知, 吸湿量的变化对冲击后剩余拉伸强度的影响并不显著, 分析认为这是由于碳纤维基本不吸湿, 因此温度和湿度对碳纤维的强度和刚度影响较小, 导致 CFRP 层合板冲击后剩余拉伸强度受吸湿量影响相对较小。

由图 3(a)~(d) 可知, 冲击能量相同时, 孔隙率对 CFRP 层合板冲击后剩余拉伸强度的影响并不明显。分析认为这是由于层合板受到冲击作用后产生的分层损伤降低了孔隙率对层合板界面面积的影响程度, 进而降低了 CFRP 层合板冲击后剩余拉伸强度对孔隙率变化的敏感度。

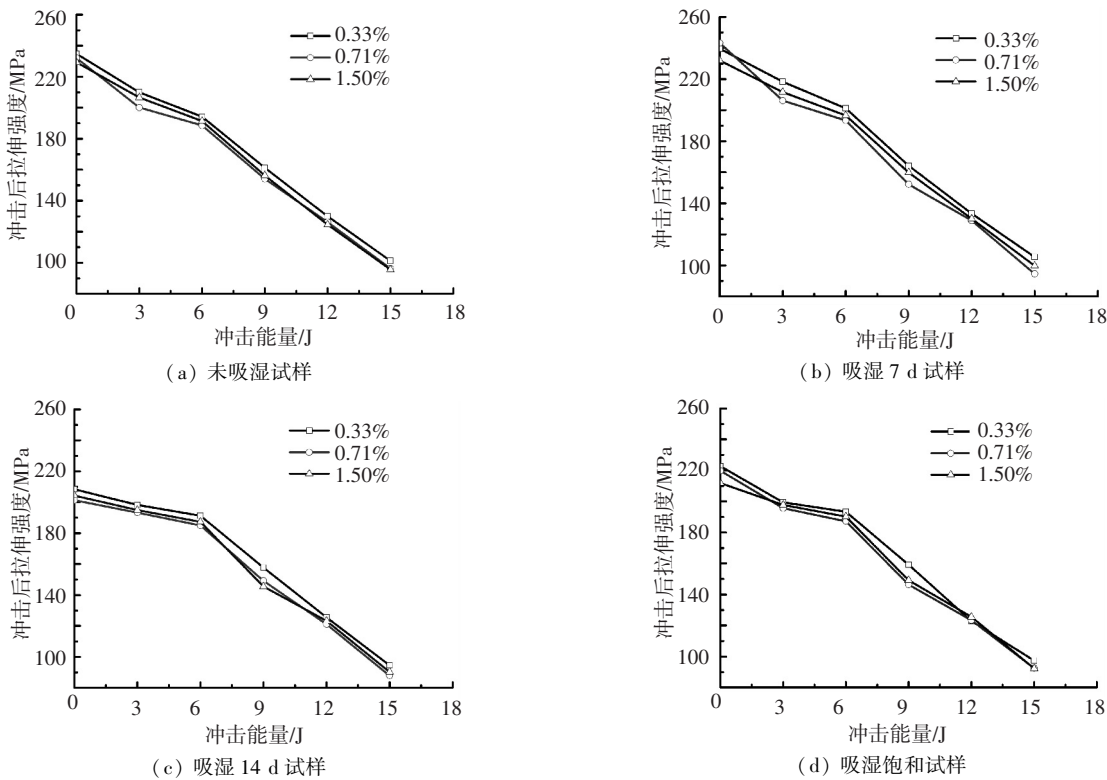


图 3 不同湿热老化程度 CFRP 层合板冲击后拉伸强度

2.4 冲击后剩余弯曲强度

图 4(a)~(d) 为不同湿热老化程度 CFRP 层合板冲击后弯曲强度曲线。图 4(a) 为不同孔隙率的 CFRP 层合板未吸湿试样在 5 种能量冲击后的剩余弯曲强度曲线。试验结果表明, 同未吸湿试样冲击前弯曲强度相比, 当冲击能量增至 3 J 时, 孔隙率分别为 0.33%、0.71% 及 1.50% 的层合板未吸湿试样的冲击后剩余弯曲强度保持率分别为 90.16%、88.51% 及 87.86%; 当冲击能量增至

15 J 时, 孔隙率分别为 0.33%、0.71% 及 1.50% 的层合板未吸湿试样的冲击后剩余弯曲强度保持率分别为 42.96%、43.30% 及 43.61%。

图 4(b) 为不同孔隙率的 CFRP 层合板吸湿 7 d 试样在 5 种能量冲击后的剩余弯曲强度曲线。试验结果表明, 同吸湿 7 d 试样冲击前弯曲强度相比, 当冲击能量增至 3 J 时, 孔隙率分别为 0.33%、0.71% 及 1.50% 的层合板吸湿 7 d 试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 86.90%、

84.97%及 88.80;当冲击能量增至 15 J 时,孔隙率分别为 0.33%、0.71%及 1.50%的层合板吸湿

7 d 试样的冲击后剩余弯曲强度保持率分别为 41.69%、41.12%及 43.49%.

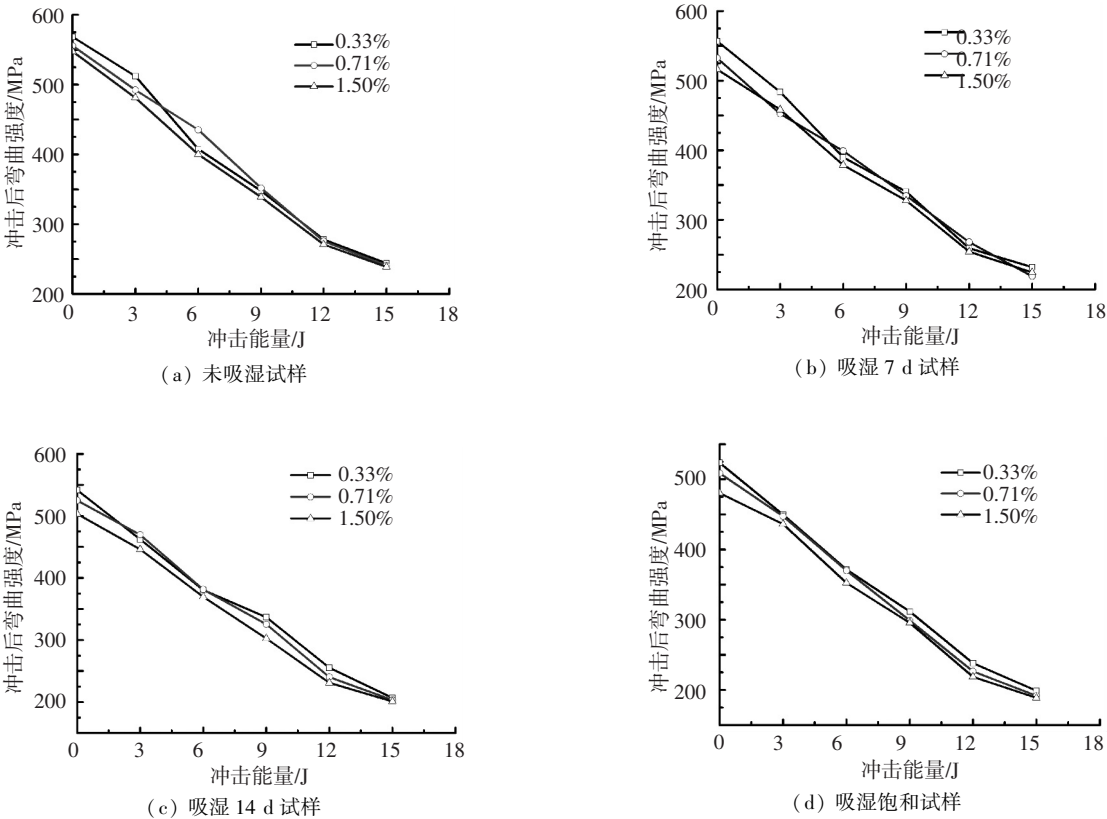


图 4 不同湿热老化程度 CFRP 层合板冲击后弯曲强度

图 4(c) 为不同孔隙率的 CFRP 层合板吸湿 14 d 试样在 5 种能量冲击后的剩余弯曲强度曲线.试验结果表明,同吸湿 13 d 试样冲击前弯曲强度相比,当冲击能量增至 3 J 时,孔隙率分别为 0.33%、0.71%及 1.50%的层合板吸湿 14 d 试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 85.36%、89.47%及 88.62%;当冲击能量增至 15 J 时,孔隙率分别为 0.33%、0.71%及 1.50%的层合板吸湿 14 d 试样的冲击后剩余弯曲强度保持率分别为 38.20%、38.71%及 39.89%.

图 4(d) 为不同孔隙率的 CFRP 层合板吸湿饱和试样在 5 种能量冲击后的剩余弯曲强度曲线.试验结果表明,同吸湿饱和试样冲击前弯曲强度相比,当冲击能量增至 3 J 时,孔隙率分别为 0.33%、0.71%及 1.50%的层合板吸湿饱和试样的冲击后剩余拉伸强度保持率分别为 85.94%、87.90%及 90.84%;当冲击能量增至 15 J 时,孔隙率分别为 0.33%、0.71%及 1.50%的层合板吸湿饱和试样的冲击后剩余弯曲强度保持率分别为 37.99%、37.66%及 39.30%.

由图 4(a)~(d)可知,3 种孔隙率 CFRP 层合板未吸湿、吸湿 7、14 d 及吸湿饱和试样冲击后剩余弯曲强度随着冲击能量的提高显著下降;冲击

能量相同时,孔隙率对 CFRP 层合板冲击后剩余弯曲强度的影响并不明显.

试验结果表明,随着吸湿时间的增长,冲击后剩余弯曲强度保持率也呈下降趋势.这是由于层合板的弯曲强度主要反映纤维及树脂基体的综合性能,层合板吸湿后基体变软、降低了对纤维的支撑力,并且吸湿削弱了纤维与基体间的黏结力,降低了纤维/基体界面机械结合力.因此,湿热环境对 CFRP 层合板冲击后剩余弯曲强度产生影响.

2.5 CFRP 层合板冲击前后损伤形式

图 5(a)~(f) 为 3 种孔隙率的 CFRP 层合板试样受到 3 J 能量冲击前后的金相显微照片.同图 5(a)、(c)及(e)中未冲击试样相比,图 5(b)、(d)及(f)中受到 3 J 能量冲击后孔隙率为 0.33%、0.71%和 1.50%的试样中出现轻微的基体裂纹.

图 6(a)~(f) 为 3 种孔隙率的 CFRP 层合板试样受到 12 J 能量冲击前后的金相显微照片.同图 6(a)、(c)及(e)中未冲击试样相比,图 6(b)、(d)、(f)中受到 12 J 能量冲击后 3 种孔隙率的试样中可以观察到明显的基体裂纹和层间裂纹,基体裂纹由孔隙处产生,且基体裂纹与层间裂纹发生贯通.

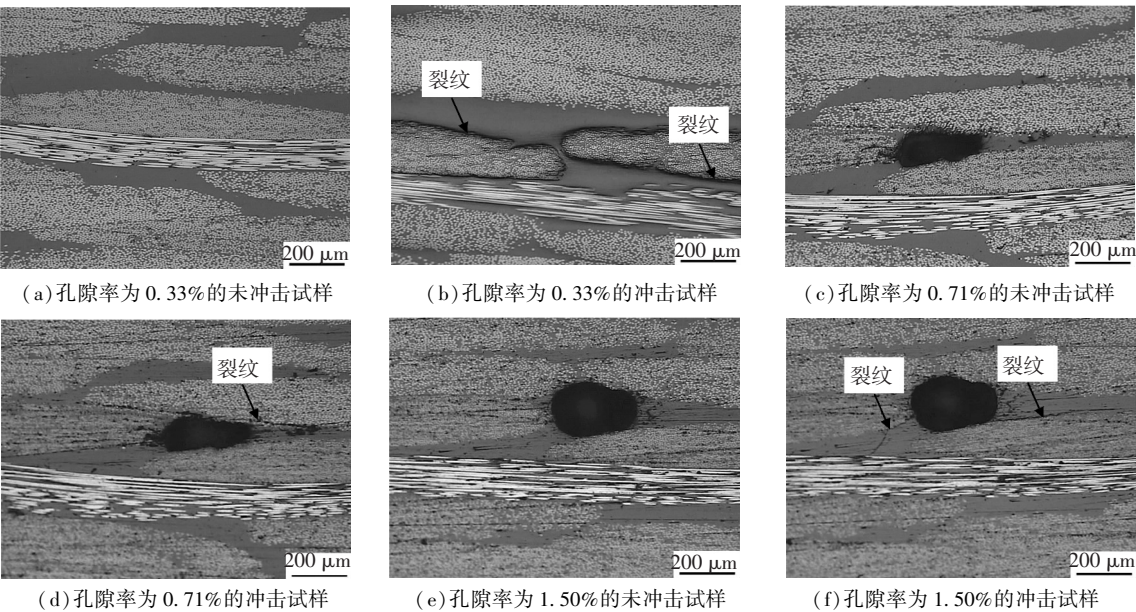


图 5 冲击能量为 3J 时拉伸试样金相显微照片

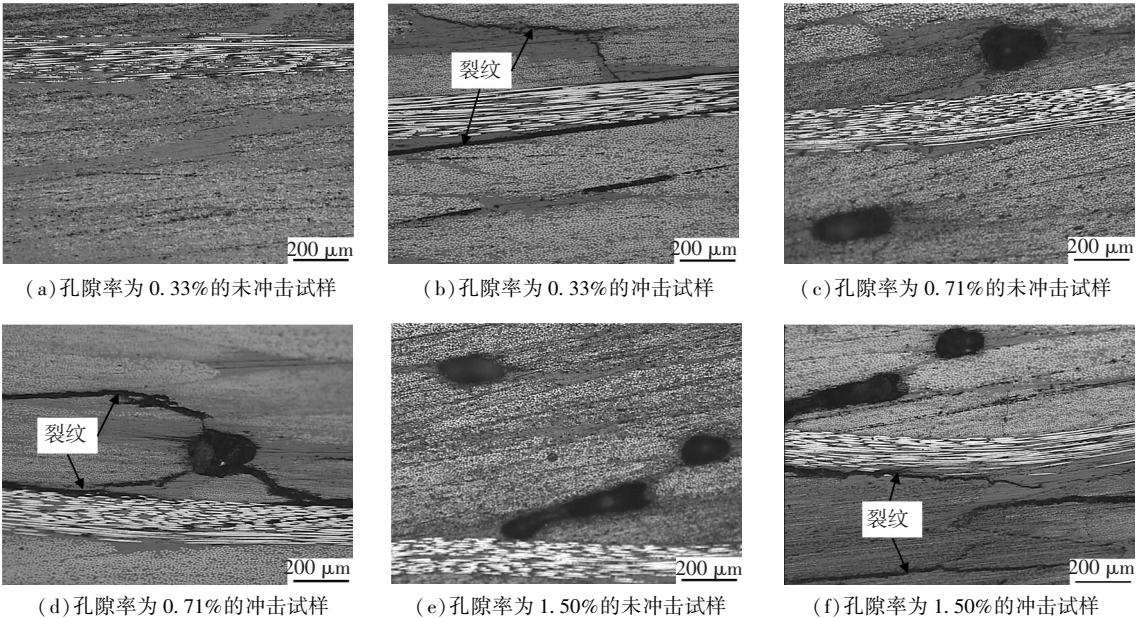


图 6 冲击能量为 12 J 时拉伸试样金相显微照片

由图 5 和图 6 可知,由于应力集中作用,冲击试样中基体裂纹及层间裂纹多由孔隙处产生.同图 5 中层合板受到 3 J 冲击能量的损伤状况相比,当冲击能量增至 12 J 后,层合板内基体裂纹及层间裂纹等冲击损伤程度明显加重.

3 结 论

- 1)CFRP 层合板拉伸及弯曲试样的吸湿曲线均呈现“两阶段扩散”模式,拉伸及弯曲试样的吸湿量均随孔隙率的增加而增大,说明孔隙对 CFRP 层合板吸湿起到促进作用.
- 2)CFRP 层合板的冲击凹坑深度随着冲击能量的增加呈增长趋势.冲击能量相同时,孔隙对

- CFRP 层合板冲击后凹坑深度存在不利影响.
- 3) 随着冲击能量的提高,CFRP 层合板冲击后剩余拉伸强度及剩余弯曲强度均显著下降;冲击能量相同时,孔隙率对 CFRP 层合板冲击后剩余拉伸强度及剩余弯曲强度的影响并不明显.
 - 4)随着吸湿时间的增长,冲击后剩余弯曲强度保持率呈下降趋势;然而,吸湿量的变化对冲击后剩余拉伸强度的影响并不显著.
 - 5)由于应力集中作用,冲击试样中基体裂纹及层间裂纹多由孔隙处产生;随着冲击能量增加,层合板内基体裂纹及层间裂纹等冲击损伤程度明显严重.

参考文献

- [1] REIS P N B, FERREIRA J A M, COSTA J D M, et al. Fatigue life evaluation for carbon/epoxy laminate composites under constant and variable block loading [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 60(10): 154–160.
- [2] 李明, 马力, 吴林志, 等. 含孔复合材料层合板拉伸强度研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2011, 43(s1): 1–5.
- [3] MINAK G, MORELLI P, ZUCHELLI A. Fatigue residual strength of circular laminate graphite-epoxy composite plates damaged by transverse load [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(9): 1358–1363.
- [4] SANTIUSTE C, SANCHEZ-SAEZ S, BARBERO E. Residual flexural strength after low-velocity impact in glass/polyester composite beams [J]. *Composite Structures*, 2010, 92(1): 25–30.
- [5] 崔海坡, 温卫东. T300/BMP316 层合板冲击后压缩强度试验 [J]. *航空动力学报*, 2008, 23(11): 2001–2006.
- [6] 贺成红, 张佐光, 李玉彬, 等. S-2/F46 复合材料低速冲击损伤及剩余弯曲性能 [J]. *材料工程*, 2008, (6): 29–32.
- [7] AKIL H M, CHENG L W, ISHAK Z A M, et al. Water absorption study on pultruded jute fibre reinforced unsaturated polyester composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(11/12): 1942–1948.
- [8] PARK S Y, CHOI W J, CHOI H S. The effects of void contents on the long-term hygrothermal behaviors of glass/epoxy and GLARE laminates [J]. *Composite Structures*, 2010, 92(1): 18–24.
- [9] COSTA M L, ALMEIDA S F M, REZENDE M C. The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon epoxy and carbon bismaleimide fabric laminates [J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(14): 2101–2108.
- [10] CHAMBERS A R, EARL J S, SQUIRES C A, et al. The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fiber composites developed for wind turbine applications [J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(10): 1389–1398.
- [11] ALMEIDA S F M, NETO Z S N. Effects of void content on the strength of composite laminates [J]. *Composite Structure*, 1994, 28(2): 139–148.
- [12] COSTA M L, REZENDE M C, ALMEIDA S F M. Strength of hygrothermally conditioned polymer composites with voids [J]. *Journal of Composite Materials*, 2005, 39(21): 1943–1961.
- [13] WEITSMAN Y J. Anomalous fluid sorption in polymeric composites and its relation to fluid induced damage[J]. *Composites: Part A*, 2006, 37(4): 617–623.
- [14] 张汝光. 湿态环境下聚合物复合材料的吸水 (I): 现象和机理[J]. *玻璃钢*, 2000, (3): 39–48.
- [15] ZHONG Y, ZHOU J R. Study of thermal and hygrothermal behaviours of glass/vinylester composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1999, 18(17): 1619–1629.
- [16] SELZER S, FRIEDRICH K. Mechanical properties and failure behaviour of carbon fiber reinforced polymer composites under the influence of moisture [J]. *Composites: Part A*, 1997, 28(6): 595–604.
- [17] GHORBED I, VALENTIN D. Hygrothermal effects on the physicochemical properties of pure and glassfiber reinforced polyester and vinylester resins [J]. *Polymer Composites*, 2003, 14(4): 324–334.

(编辑 张 红)