

文章编号: 1000-8055(2010)10-2163-07

国产碳纤维 CCF300 与 T300 碳纤维复合材料 拉伸载荷下的失效模式分析

傅惠民, 杨雨松, 张勇波

(北京航空航天大学 小样本技术研究中心, 北京 100191)

摘 要: 通过常温干态、常温湿态、高温干态、高温湿态四种环境条件下, 对 5 种国产碳纤维与 T300 碳纤维复合材料进行纵向拉伸试验, 采用宏微观相结合的方法, 从数据表现、宏观形貌以及微观形貌(电镜扫描照片)三个方面对其失效模式和损伤机理进行了研究. 结果表明国产纤维复合材料虽然在拉伸性能上基本能超越 T300 复合材料, 但是其失效模式却不尽相同, 特别是由于界面性能的不同而造成的失效模式的差异尤为明显. 因此, 国产碳纤维复合材料要得到更为广阔的应用, 还需进一步改进其界面性能.

关 键 词: 国产碳纤维; 复合材料; 失效模式; 宏观形貌; 电镜扫描照片

中图分类号: TB332

文献标识码: A

Failure mode research on CCF300 and T300 composites under tensile strength

FU Huimin, YANG Yurong, ZHANG Yongbo

(Research Center of Small Sample Technology,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Five kinds of domestic carbon fiber (CCF) 300 and T300 carbon fiber composites had been tested for tensile property under the condition of 23 °C dry, 23 °C wet, 130 °C dry and 130 °C wet. The failure mode and damage mechanism had been analyzed basing on data, macro character and scanning electron microscope appearance. The result shows that although the tensile property of domestic carbon fiber composites is higher than the T300 carbon fiber composites on the whole, their failure mode is different basically, especially the differences making by the difference of interface property is quit distinct. Therefore, the domestic carbon fiber composites need to improve their interface property to achieve wide application.

Key words: domestic carbon fiber; composite; failure mode; macro character; scanning electron microscope appearances

碳纤维复合材料以其优异的性能在航空航天领域得到了广泛的应用^[1-5], 且最近几年更是以迅猛的势头发展. 但是, 我国对于高性能碳纤维长期依靠进口的现状没有改变^[6-7], 这就造成碳纤维复

合材料的应用常常受制于人, 因此, 必须研制自己的高性能碳纤维. 而本文正是针对某国产碳纤维复合材料展开研究, 通过宏微观相结合的方法, 从性能数据、宏观形貌及微观形貌三个方面分析国

收稿日期: 2010-04-12; 修订日期: 2010-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(10472006); 北京市教育委员会共建项目(XK100060418)

作者简介: 傅惠民(1956-), 男, 浙江遂昌人, “长江学者”特聘教授, 博士, 从事小样本信息技术、软校准技术、数据融合方法及可靠性研究.

产碳纤维与 T 300 碳纤维复合材料性能、失效模式以及损伤机理的异同,为国产碳纤维复合材料更为广泛的应用提供理论依据。

对于碳纤维复合材料失效模式的研究已有过相关的报道,刘兴洲、曹莹、刘军、杨光松、习年生等^[8-12]总结了常规载荷条件下纤维增强复合材料单向板的四种基本失效模式,同时还分析了多向层合板的损伤特征,但是正如文中所述由于复合材料本身的多样性和复杂性,失效分析工作者往往感到无从下手,其失效分析总体上还处于起步阶段。但是本文抓住最为基本的和较为单一的单向板的失效模式展开研究,以失效模式对比的角度,通过与 T300 碳纤维复合材料在拉伸载荷下的失效模式对比,找出材料的缺陷,为国产碳纤维研究提供建议,同时也为复合材料失效分析提供一种新的方法。

1 试验

1.1 原材料

碳纤维为国产碳纤维 CCF300 和 T300 碳纤维;两种上浆剂(分别表示为 A, B);树脂分别为 QY8911 和 5405。

1.2 仪器

湿热老化环境箱 SH050A 型;疲劳试验机 INSTRON 1332;扫描电镜 JSM-35CF 型;应变计为常温应变计 BA120-2AA(11)和高温应变计 BA120-2AA 150,胶黏剂 H-610;引伸计。

1.3 试样制备

将碳纤维制成预成型体,用热压罐在 185℃ 下固化 2 h, 200℃ 下加热 3 h 后处理得到碳纤维体积分数为 60% 的复合材料板。制备得到五种复合材料分别为: CCF300/QY8911(A 上浆剂), CCF300/QY8911(B 上浆剂), CCF300/5405(A 上浆剂), CCF300/5405(B 上浆剂), T300/QY8911;两种铺层顺序分别进行 0° 拉伸和 90° 拉伸试验,其中 $[0]_8$ 的尺寸为 250 mm × 15 mm × 0.96 mm, $[0]_{16}$ 的尺寸为 230 mm × 25 mm × 1.92 mm。

1.4 试验环境要求

试验分别在四种环境条件下进行,分别为:室温干态条件,温度(23±3)℃,湿度(50±5)%;室温湿态条件,温度(23±3)℃,试验件在(82±2)℃水里浸泡 168 h;高温干态条件,温度(130±3)℃;高温湿态条件,温度(130±3)℃,试验件在

(82±2)℃水里浸泡 168 h。

1.5 力学性能的测定

试验按照 ASTM D3039 聚合物基复合材料拉伸性能标准试验方法进行,并观察上述进行拉伸性能测定后的试样破坏模式。

1.6 观察试样断口形貌

将上述 90° 拉伸试验后的试件断口切下,喷金处理后,通过 JSM35CF 型扫描电子显微镜观察断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 0° 拉伸条件下各复合材料性能对比分析

首先,从试验数据入手比较国产碳纤维复合材料 CCF300 与 T300 复合材料性能上的异同。图 1 列出的是 CCF300 与 T300 两种碳纤维及 A, B 两种上浆剂组成的五种复合材料在四种环境条件下的纵向拉伸强度均值与 T300/QY8911 复合材料的比值,其中 A 和 B 是两种已知上浆剂而 T300 碳纤维为单独进口,其上浆剂未知。从图中可以看出,四种国产纤维复合材料的拉伸强度均值在四种环境条件下均高于 T300 复合材料,尤其在最为恶劣的高温湿态环境条件下,有三种国产复合材料拉伸强度均值都在 T300 复合材料的 150% 以上。对于 0° 铺层的复合材料层合板,拉伸性能主要取决于纤维的强度,因此通过图中性能数据可以看出,国产碳纤维在四个环境条件下都具有较好的拉伸强度。同时还可以看到, A 和 B 两种上浆剂对于国产碳纤维复合材料的影响不明显。

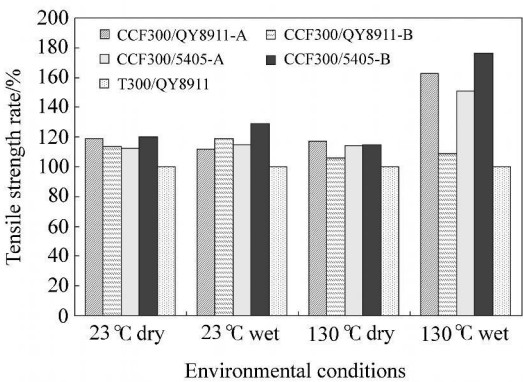


图 1 不同环境条件纵向拉伸强度比值

Fig. 1 Longitudinal tensile strength rate under varied environmental conditions

2.2 90° 拉伸条件下各复合材料性能对比分析

图 2 列出的是 CCF300 与 T300 两种碳纤维

及 A、B 两种上浆剂组成的五种复合材料在四种环境条件下的横向拉伸强度均值与 T 300/ QY8911 复合材料的比值. 从图中可以看出, CCF300/ QY8911 复合材料在常温干态条件下的横向拉伸强度均值与 T 300/ QY8911 复合材料接近, 而在常温湿态、高温干态及高温湿态条件下, 其横向拉伸强度均值都要比 T 300/ QY8911 复合材料稍低. 而 CCF300/ 5405 复合材料在各种环境条件下则要比 T 300/ QY8911 复合材料高出较多. 对于单向层合板其横向拉伸强度主要取决于基体的拉伸强度与纤维与基体的黏结强度, 由于 CCF300/ QY8911 与 T300/ QY8911 复合材料为相同的基体, 因此上述比较中 CCF300/ QY8911 复合材料横向拉伸强度值偏低一定程度上反映其纤维与基体的黏结强度偏低, 所以要改善其横向拉伸强度还需要提高其界面强度.

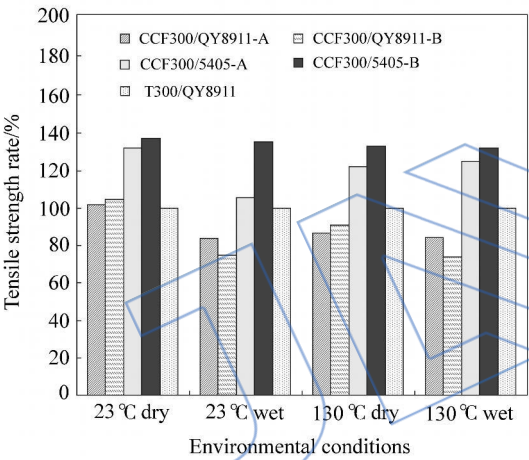


图 2 不同环境条件下横向拉伸强度比值
Fig.2 Transverse tensile strength rate under varied environmental conditions

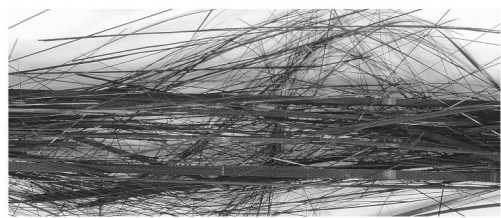
2 3 0°拉伸条件复合材料失效模式对比分析

对于 0°铺层的单向复合材料层合板, 在纵向拉伸载荷下, 其拉伸性能主要取决于纤维的强度. 由于纤维与基体之间的载荷传递主要靠界面, 因此, 纤维与基体黏结强度的高低也将直接影响到失效模式的异同.

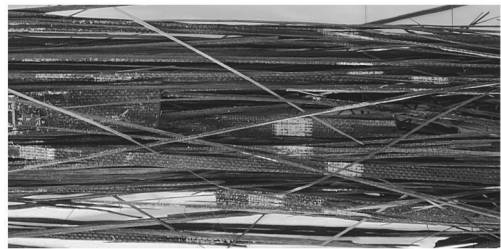
常温干态条件下, CCF300/ QY8911(A 上浆剂) 复合材料试件表现为整体的粉碎性破坏, 任何位置都可见纤维断裂和大量的分层、纤维拔出及脱黏现象, 说明纤维与基体黏结强度较低, 整个加载过程中基体和界面发生了较为严重的破坏. CCF300/ QY8911(B 上浆剂) 复合材料破坏模式也是整体性的粉碎性破坏, 其分层、纤维拔出和脱

黏的情况更为严重, 因此可知 CCF300/ QY8911 (A 上浆剂) 复合材料纤维与基体的黏结强度也偏低. 而 CCF300/ 5405(A 上浆剂) 复合材料的失效模式则表现为不规则的破坏, 主要为局部的脆性断裂并伴有纤维拔出, 少数几处有脱黏分层的现象, 比起上述两种复合材料, 其分层脱黏现象明显改善. 同时 CCF300/ 5405(B 上浆剂) 复合材料的失效模式与之接近, 说明这两种复合材料的纤维与基体具有中等的黏结强度. T 300/ QY8911 复合材料的破坏模式也主要表现为局部的脆性断裂并伴有纤维的拔出, 分层与脱黏现象不明显, 与 CCF300/ 5405 复合材料相似. 在常温湿态与高温干态条件下, 各复合材料失效模式没有发生较大的改变, 说明单独的吸湿及单独的高温对于复合材料的失效模式影响不大.

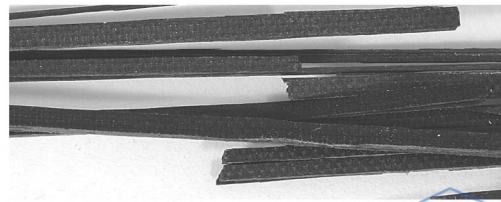
但是, 在高温湿热条件下, 各复合材料失效模式发生较大改变, 如图 3 所示. 从图中可以看到, CCF300/ QY8911(A 上浆剂) 复合材料试件表现为相当严重的整体性粉碎破坏, 表明其界面强度较低, 能量基本耗散在界面上, 进而引起较多的脱黏, 形成大量分层, 基体大面积剪切破坏, 同时造成纤维在不同位置断裂. 同时 CCF300/ QY8911 (B 上浆剂) 复合材料破坏模式也为较严重的整体粉碎性劈裂, 虽然单根纤维脱黏的现象没有那么严重, 但也有较多部位出现分层, 基体破坏也较为严重, 因此可知 CCF300/ QY8911(A、B 上浆剂) 两种复合材料纤维与基体的黏结强度受温度与湿度的联合作用下降较多. 图 3 中 CCF300/ 5405(A 上浆剂) 复合材料虽然整体也表现为劈裂, 但是主要呈现块状的断裂, 即多个部位出现带纤维拔出的脆性断裂, 分层与脱黏现象也不如前面两种复合材料严重, 说明 CCF300/ 5405(A 上浆剂) 复合材料的界面黏结强度受温度与湿度的影响要稍弱. 而 CCF300/ 5405(B 上浆剂) 复合材料的失效模式与 CCF300/ 5405(A 上浆剂) 接近, 为块状的脆性断裂, 表明该两种复合材料具有相同的界面强度. T 300/ QY8911 复合材料, 其破坏模式则主要表现为不规则的整体性劈裂, 偶有局部的脆性断裂与纤维拔出, 分层现象较为明显, 但单根纤维的脱黏不怎么明显, 因此, 可以判断, T 300/ QY8911 复合材料虽然在温度与湿度的联合作用下还是具有中等的界面黏结强度, 与之较为接近的为两种 CCF300/ 5405 复合材料.



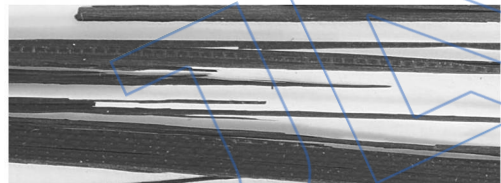
(a) CCF300/QY8911-A



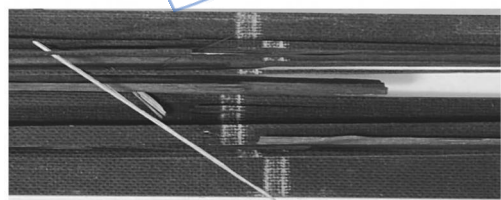
(b) CCF300/QY8911-B



(c) CCF300/5405-A



(d) CCF300/5405-B



(e) T300/QY8911

图 3 各种复合材料在高温湿态条件下的纵向拉伸失效模式

Fig. 3 Failure mode of all kinds of composites under high temperature wet conditions subjecting to longitudinal tensile strength

2 4 90°拉伸条件复合材料失效模式对比分析

单向复合材料在垂直于纤维方向受拉时,在基体和界面上会产生应力集中.因此受横向拉伸

载荷作用时单向复合材料的破坏起源于基体或界面的拉伸破坏.在某些场合也有可能出现因纤维的横向性能较差而导致复合材料的破坏,即裂纹由纤维产生并向基体扩展.因此,横向拉伸的基本失效模式有两种:第一种,基体的拉伸破坏;第二种,纤维与基体脱黏或纤维的横向撕裂.

在常温干态条件下,CCF300/QY8911(A 上浆剂)复合材料试件表现为较为明显的纤维与基体的界面破坏,各试件断口照片可以清楚看到与基体脱黏的部分断裂的单根纤维,由此可以看出,试件的失效源于界面的拉伸破坏,属于第二种失效模式.CCF300/QY8911(B 上浆剂)复合材料界面破坏也较为严重,通过各个试件的断口照片可以看到较多纤维由于局部横向强度较低而发生断裂的情况,因此说明 CCF300/QY8911(A,B 上浆剂)两种复合材料都具有较弱的界面强度.而 CCF300/5405(A 上浆剂)复合材料断口整体较光滑,虽然局部位置也能见到少许纤维与界面脱黏造成的沟槽,但与前两种复合材料相比有较大的改善,纤维断裂的情况也很少见,因此 CCF300/5405(A 上浆剂)复合材料的主要失效模式为树脂基体的拉伸破坏,其界面强度较强.同样,CCF300/5405(B 上浆剂)复合材料的破坏模式也主要表现为树脂基体的拉伸破坏,断口较为光滑,因此,CCF300/5405(A,B 上浆剂)两种复合材料均具有较强的界面强度,失效模式属于第一种.而通过 T300/QY8911 复合材料的断口可以看到,其断口相当光滑,几乎没有纤维与基体的脱黏现象,只有在试件断口接近表面的位置偶有纤维断裂的现象.所以 T300/QY8911 复合材料整体上表现为基体的拉伸断裂破坏,也是属于第一种失效模式.在常温湿态与高温干态条件下各复合材料的失效模式没有发生较大的改变,不过相比而言,吸湿对于复合材料的影响要比高温对于复合材料失效模式的影响更为严重.

但是,在吸湿与高温的双重作用下,复合材料不管是性能还是失效模式都受到较大的影响.从图 4 中可以看出 CCF300/QY8911(A 上浆剂)复合材料试件断裂面非常粗糙,受温度与湿度影响,纤维与基体界面强度急剧下降,因此试件整体表现为纤维与基体脱黏,以及纤维的断裂,断裂表面随处可见因界面拉伸破坏而形成的沟槽以及大量的断裂纤维.CCF300/QY8911(B 上浆剂)复合材料也是受温度与湿度的影响较为严重,断口断裂的纤维及破坏的基体更为明显,其表面比

CCF300/ QY8911(A 上浆剂) 复合材料更为粗糙, 因此说明其界面强度也是受到了很大的影响, 受温度湿度的双重作用, 处于较低的水平. 但是, 从图 4 中可以看到 CCF300/ 5405(A 上浆剂) 复合材料的断口就比前面两种复合材料光滑, 断口上虽有拉伸破坏形成的沟槽, 但是没有明显的纤维断裂的现象. 尽管如此, 断口上出现凸起的断裂层表明 CCF300/ 5405(A 上浆剂) 复合材料界面强度也受温度与湿度的影响发生了较大的变化, 因

此可看出 CCF300/ 5405(A 上浆剂) 复合材料的失效模式为兼有基体拉伸破坏与界面拉伸破坏的混合破坏模式. 而 CCF300/ 5405(B 上浆剂) 复合材料的断口与 CCF300/ 5405(A 上浆剂) 复合材料较为接近, 单根纤维脱黏断裂的现象不是很明显, 但是试件断口沟槽较常见, 因此说明其纤维与基体界面破坏较多, 由此判断 CCF300/ 5405(B 上浆剂) 复合材料受温度与湿度影响也较明显, 其失效模式与 CCF300/ 5405(A 上浆剂) 复合材料类似, 即为基体的横向拉伸破坏与界面拉伸破坏的混合破坏模式. 图 4 中 T300/ QY8911 复合材料的断口最为光滑, 界面拉伸破坏而形成的沟槽不是很明显, 且断口大部分位置都为光滑的基体拉伸破坏, 也未见到单根纤维脱黏断裂的现象, 因此可以判断, T300/ QY8911 复合材料的破坏模式主要为基体的横向拉伸破坏, 其失效模式受温度与湿度的影响不是很明显. 所以, 通过上述比较可以看到与 T300/ QY8911 复合材料失效模式最为接近的为 CCF300/ 5405 复合材料, 而 T300/ QY8911 复合材料的失效模式还需提高其界面性能.

2 5 90° 拉伸条件复合材料损伤机理对比分析

图 5 中列出的为五种复合材料在高温湿态条件下试件断面的电镜扫描照片, 下面将从微观的角度分析各复合材料在损伤机理上的异同. 从图 5(a) 中可以看到, CCF300/ QY8911(A 上浆剂) 复合材料的破坏面上可以看到纤维与基体的界面破坏较为严重. 图中看到的单根断裂纤维其界面几乎完全破坏, 且纤维表面比较光滑, 黏附的树脂基体较少, 在其上下位置的两根纤维, 虽然没有断裂, 但是其表面的树脂已经被剥离, 同时表面光滑, 黏附树脂较少. 因此, 说明该复合材料受温度与湿度的影响, 界面性能偏低, 在横向拉伸载荷作用下破坏均源于纤维与基体的界面. 图 5(b) 中 CCF300/ QY8911(B 上浆剂) 复合材料的界面破坏更为严重, 可以看到, 纤维与基体完全剥离, 纤维周围只留下了少量的基体, 且纤维表面较为光滑, 黏附的树脂较少, 与 CCF300/ QY8911(A 上浆剂) 复合材料相同, 即为典型的纤维与基体的界面拉伸破坏. 同时对于上述两种复合材料, 在常温干态条件下就能在基体上见到微小的孔洞, 这些微小的孔洞势必对其吸湿及湿态条件下吸收更多地水分, 从而对复合材料的界面性能及损伤机理造成很大的影响. CCF300/ 5405(A 上浆剂) 复合材料的破坏面上纤维与基体结合则较为紧密, 图

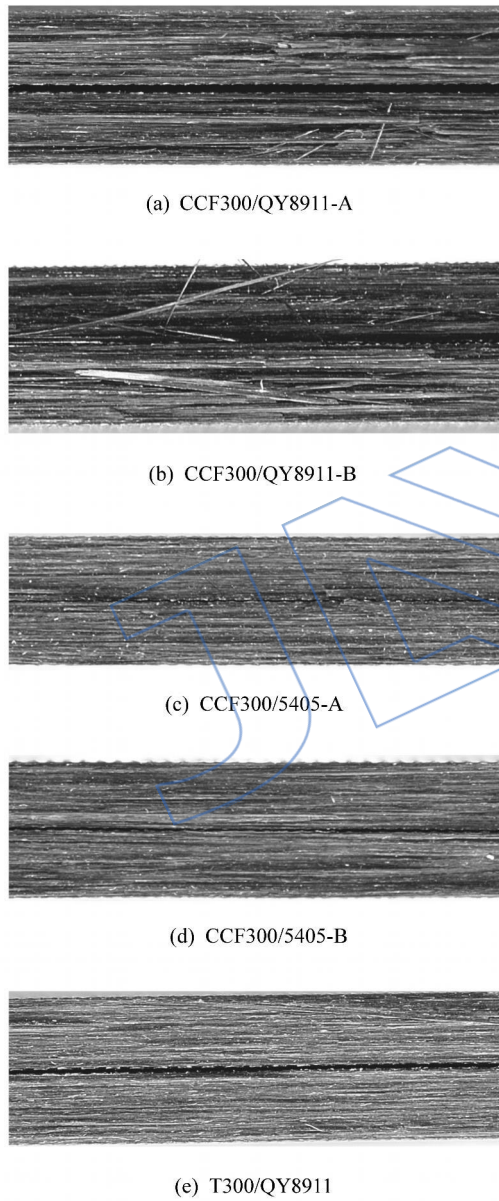
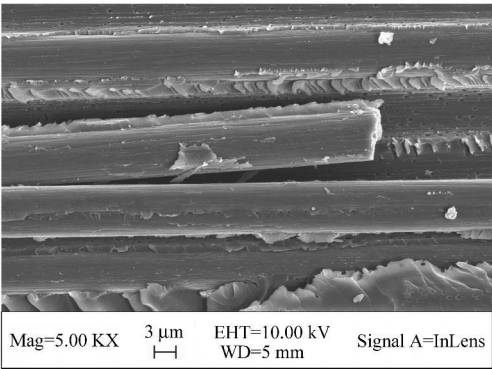
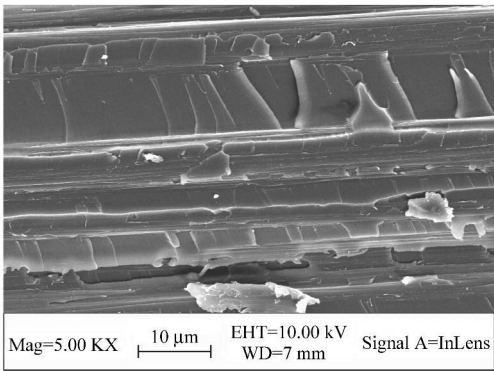


图 4 各种复合材料在高温湿态条件下的横向拉伸失效模式

Fig.4 Failure mode of all kinds of composites under high temperature wet conditions subjecting to transverse tensile strength



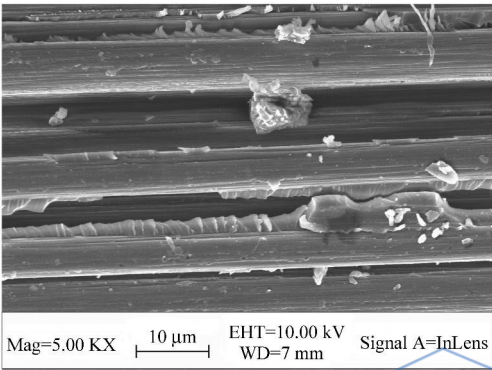
(a) CCF300/QY8911-A



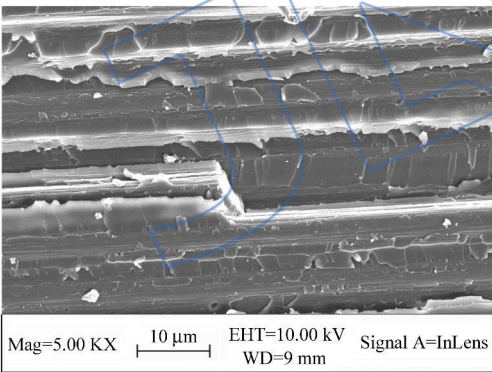
(e) T300/QY8911

图 5 各种复合材料在高温湿态条件下的横向拉伸断口照片

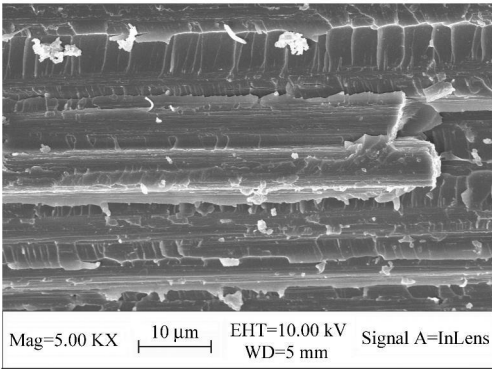
Fig. 5 Fracture pictures of all kinds of composites under high temperature wet conditions subjecting to transverse tensile strength



(b) CCF300/QY8911-B



(c) CCF300/5405-A



(d) CCF300/5405-B

中虽有单根的断裂纤维,但是其表面黏附较多的树脂基体,且其他的纤维都被紧密地包裹在树脂基体中,因此可以推断该复合材料在温度与湿度的影响下,纤维与基体界面仍保持了较好的性能.在横向拉伸作用下,破坏主要发生在基体中,同时也伴随局部由于纤维的横向性能较差而产生的横向拉断. CCF300/ 5405(B 上浆剂) 复合材料的损伤机理也与之相似,图中可以看到,断裂的单根纤维表面都较为粗糙,且黏附较多的树脂,同时即使纤维被横向拉断,剩下的大部分还紧密地包裹在树脂中,说明该复合材料即使在高温湿态条件下也保持了较好的界面性能,其横向拉伸破坏主要发生在基体中. T300/ QY8911 复合材料的断面也较为整齐,大部分的纤维都完整的包裹在基体中,即在横向拉伸载荷下,其损伤机理为典型的基体拉伸破坏.这与宏观照片中观察到的断口较为光滑的现象吻合,由此表明 T300/ QY8911 复合材料在高温湿态条件下受温度与湿度的影响有限,其失效模式与损伤机理没有发生较大的改变.

3 结 论

- 1) 通过失效模式的对比分析研究,提出一种新的国产碳纤维复合材料失效分析方法,并为国产碳纤维的研究提出建议.
- 2) 从性能数据上来看,单向国产碳纤维复合材料 CCF300 的纵向与横向拉伸性能基本能超越 T300 复合材料.
- 3) CCF300/ QY8911(A, B 上浆剂) 两种复合

材料的失效模式与损伤机理较为接近,但是两种复合材料界面性能受温度与湿度的影响较大,进而对失效模式与损伤机理的影响较大。

4) CCF300/5405 复合材料与 T300/QY8911 复合材料在各种环境条件下的失效模式都较为接近,其界面性能受温度与湿度的影响相对较小,进而在最为恶劣的高温湿态条件下也能保持较好的界面性能。

5) A 和 B 两种上浆剂对于复合材料性能与失效模式的影响较小,表明两种上浆剂性能接近。

6) 国产纤维复合材料 CCF300 虽取得较好的性能,但要得到更为广泛的应用,还需改善其界面性能,特别是湿热条件下的界面性能。

参考文献:

- [1] 赵稼祥. 碳纤维复合材料在民用航空上的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(3): 1-4, 35.
ZHAO Jiaxiang. Application of carbon composite materials for civil aviation[J]. Hi tech Fiber & Application, 2003, 28(3): 1-4, 35. (in Chinese)
- [2] 赵稼祥. 碳纤维在美国国防军工上的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(1): 6-9.
ZHAO Jiaxiang. Application of carbon fiber for defence and military use in USA [J]. Hi tech Fiber & Application, 2003, 28(1): 6-9. (in Chinese)
- [3] 霍肖旭, 刘红林, 曾晓梅. 碳纤维复合材料在固体火箭上的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2000, 25(3): 1-7, 20.
HUO Xiaoxu, LIU Honglin, ZENG Xiaomei. Applications of carbon fiber composites on SRM [J]. Hi tech Fiber & Application, 2000, 25(3): 1-7, 20. (in Chinese)
- [4] 贺福, 孙微. 碳纤维复合材料在大飞机上的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2007, 32(6): 5-8, 17.
HE Fu, SUN Wei. The application of carbon fiber composite materials in giant plane [J]. Hi tech Fiber & Application, 2007, 32(6): 5-8, 17. (in Chinese)
- [5] 陈祥宝. 先进树脂基复合材料的发展和应用[J]. 航空材料学报, 2003(21): 198-204.
CHEN Xiangbao. The development and applications of advanced polymer matrix composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003(21): 198-204. (in Chinese)
- [6] 张晓虎, 孟宇, 张伟. 碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J]. 纤维复合材料, 2004, 21(1): 50-53, 58.
ZHANG Xiaohu, MENG Yu, ZHANG Wei. The state of the art and trend of carbon fiber reinforced composites [J]. Fiber Composites, 2004, 21(1): 50-53, 58. (in Chinese)
- [7] 张家杰. 国内外碳纤维生产现状及发展趋势[J]. 化工技术经济, 2005, 23(4): 12-15, 19.
ZHANG Jiajie. Market and development of carbon fiber at home and abroad [J]. Chemical Techno Economics, 2005, 23(4): 12-15, 19. (in Chinese)
- [8] 刘兴秋, 郭永良, 万志敏. 复合材料层合板的微观损伤机理[J]. 物理测试, 2004(2): 4-6.
LIU Xingqiu, GUO Yongliang, WAN Zhimin. Micro damage principle analysis of fiber reinforced composite plates [J]. Physics Examination and Testing, 2004(2): 4-6. (in Chinese)
- [9] 曹莹, 吴林志, 张博明. 碳纤维复合材料界面性能研究[J]. 复合材料学报, 2000, 17(2): 89-93.
CAO Ying, WU Linzhi, ZHANG Boming. Investigation of interfacial properties of composites reinforced by carbon fiber [J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2000, 17(2): 89-93. (in Chinese)
- [10] 刘军, 李英梅, 黄宝宗. 复合材料层板损伤失效分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(1): 76-79.
LIU Jun, LI Yingmei, HUANG Baozong. Analysis of damaging failure of composite laminates [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2006, 27(1): 76-79. (in Chinese)
- [11] 杨光松. 损伤力学与复合材料损伤[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 168-181.
YANG Guangsong. Mechanics of damage and composite damage [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 168-181. (in Chinese)
- [12] 习年生, 于志成, 陶春虎. 纤维增强复合材料的损伤特征及失效分析方法[J]. 航空材料学报, 2000, 20(2): 55-63.
XI Niansheng, YU Zhicheng, TAO Chunhu. Damage characterization and failure analysis in fiber reinforced composites [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2000, 20(2): 55-63. (in Chinese)