

复合材料修复铝合金薄板的湿热特性

王跃然 肖加余 曾竟成 邢素丽 文思维

(国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

文 摘 采用真空袋压技术将 T300/CYD128 复合材料补片胶接修复于含中心裂纹的铝合金 1.76 mm 薄板。研究了实验室模拟湿热环境对复合材料修复铝合金薄板的力学性能影响,修复用复合材料的吸湿特性,以及修复用复合材料拉伸试样及其基体树脂浇铸体的湿热性能。结果显示,浇铸体饱和吸水率为 0.9%,复合材料吸湿动力学曲线则出现台阶;随湿热老化时间延长,浇铸体与复合材料拉伸性能先升后降,其性能峰值出现时间分别为 500 h(73.9 MPa)和 300 h(1.531 MPa);随湿热老化时间延长,铝合金裂纹板拉伸性能基本呈线性下降,断裂载荷下降速率 $N = 0.12 \text{ kN}/100 \text{ h}$,修复板性能出现波动。

关键词 复合材料修复,环氧树脂,铝合金,湿热

Hygrothermal Properties of Bonded Composite Repair of Aluminum Alloy Substrates

Wang Yueran Xiao Jiayu Zeng Jingcheng Xing Suli Wen Siwei

(College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense and Technology, Changsha 410073)

Abstract Bonded T300/CYD128 composite repair of 1.76mm aluminum substrates was prepared by vacuum bagging technology. The hygrothermal properties of bonded composite repair of aluminum substrates were investigated, so do the composite material's pulling sample and its epoxy casting sample. The Results show that the saturated water absorption of epoxy casting samples is 0.9%, but there is an obvious step in the water absorption dynamics curve. Along with the extending of the hygrothermal effect, the properties of composite material and its epoxy casting sample are increased at first and then decreased. The peak properties appear at 300 h (1.531 MPa) and 500 h (73.9 MPa) respectively. Along with the extending of the hygrothermal effect, the properties of cracking-aluminum substrates fall nearly linearly, the falling rate of fracture load is 0.12 kN/100 h. The properties of bonded-aluminum substrates are unstable.

Key words Bonded composite repair, Epoxy, Aluminum alloy, Hygrothermal

1 前言

复合材料胶接修复技术是一种可靠、高效、低成本的飞机结构修复技术。较传统的螺栓连接、铆钉连接、焊接等修复工艺而言,该技术具有轻质高强、不对构件再破坏、不产生新的应力集中、便于原位操作等突出优点^[1]。在复杂恶劣气象条件下,传统的利用金属的修复手段同样要面临被环境侵蚀的危险,而利用耐环境性较好、力学性能优异的复合材料进行修复可有效延长复杂环境下飞机的使用寿命。

环氧树脂基复合材料综合性能优越,已广泛应用于航空铝合金修复工艺中,但其耐湿热和抗冲击性能的不足,使之作为主承力相的应用受到很大限制^[1]。黄业青^[2]等发现在 80% 相对湿度为 95% 的环境中,

T700 环氧复合材料在老化 2 000 h 过程中,剪切和抗拉强度分别在 47.5 和 1 950 MPa 上下波动,性能下降不大。乔海霞^[3]发现 T300/CYD128 复合材料在 80%、RH95% 的湿热箱中老化 2 500 h 后,弯曲强度由 1 675.8 MPa 下降至 1 005.3 MPa,剪切强度由 76.1 MPa 下降至 48.0 MPa。张蕾英^[4]发现铝合金在高温潮湿气氛中曝露三个月后,表面受到破坏,但性能影响不大。本文所述胶接修复技术涉及复合材料与铝合金两相,分别考察其湿热性能可为将两相胶接修复后整体的湿热性能提供支撑。

2 实验

2.1 原材料

选择 LY12CZ 为待补强的金属基板,尺寸为 280

收稿日期:2009-05-05;修回日期:2009-07-27

作者简介:王跃然,1984 年出生,硕士研究生,主要从事复合材料修复方面的研究

mm ×60 mm ×1.76 mm。碳纤维选用日本东丽公司生产的 T300(3 k)。环氧树脂为湖南巴陵石化公司生产的 CYD128。胶黏剂为聚氨酯改性的环氧类胶黏剂,黑龙江石油化学研究院生产。

2.2 过程

在铝合金板中心沿宽度方向线切割出长度 $2a = 10$ mm 的裂纹,然后将其置于平均载荷为 40 MPa 应力比为 0.1 的疲劳载荷下,制得长度为 14 mm 左右的预裂纹。补片采用预固化的 T300/CYD128 料单向板(铺层方式为 $[0]_4$,固化制度见图 1),其尺寸为 80 mm ×60 mm ×1.35 mm。用真空袋压法将补片胶接于铝合金裂纹板,真空度不小于 95 kPa。裂纹板及修复后试样见图 2。

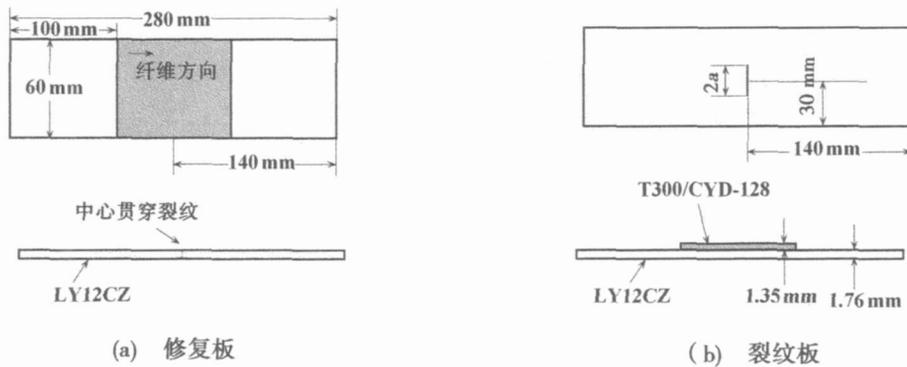


图 2 复合材料修复铝合金裂纹板效果示意图

Fig 2 Sketch map of bonded composite repair of aluminum alloy substrates

按照 ASTM D5229/D5229M 制备试样后,将试样真空干燥至质量恒定,称其质量并记为 m_i ,然后将其置于恒温介质中,间隔一定时间取三个平行试样,用蒸馏水冲洗试样表面,拭干试样表面水分,再次称其质量记为 m_t 。材料在时间 t 内的吸湿率 M 为:

$$M_t = (m_t - m_i) / m_i \times 100\% \quad (1)$$

按照 GB/T 3354—1999 加工碳/环氧树脂复合材料拉伸试样。按照 GB/T 2568—1995 制备基体树脂浇铸体哑铃形拉伸试样,固化制度与单向板固化制度一致。

将修复好的试样、未修复的试样、复合材料拉伸试样连同基体树脂浇铸体试样一同放入湿热试验箱中(GDJS-100型,江苏常州华夏环境试验设备有限公司),在 80 °C、相对湿度 95% 条件下进行湿热老化。间隔 200 h 取三个试样,按照 GB/T 3354—1999 在长春材料试验机厂生产的 WDW-100 万能试验机进行拉伸测试。SEM 形貌观察在中国科学院物理所生产的 KYKY-2800 扫描电镜上进行。

3 结果与讨论

3.1 复合材料与基体树脂浇铸体的吸湿特性

图 3 给出了复合材料与其基体树脂浇铸体的吸

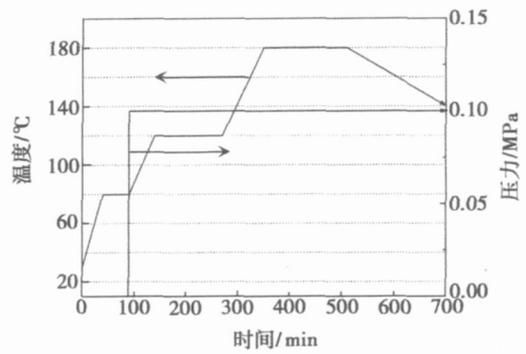


图 1 碳/环氧树脂复合材料板固化制度

Fig 1 Cure cycle of carbon/epoxy composite prepreg

湿动力学曲线。

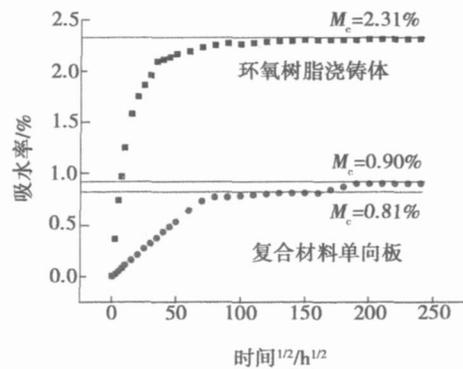


图 3 复合材料与树脂浇铸体吸湿动力学曲线

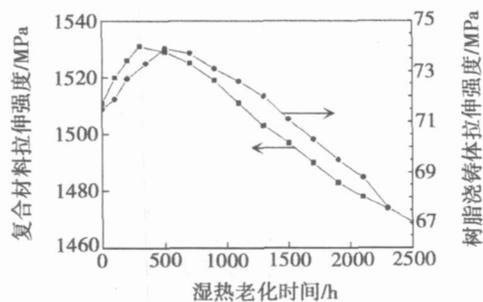
Fig 3 Water absorption dynamics curve of composites and epoxy

图 3 可以看出,水分在树脂浇铸体中的扩散全程遵循 Fick 扩散定律^[5],即在初始阶段,材料中的吸湿量与吸湿时间的平方根成正比,最后吸湿量达到平衡,达到饱和吸湿状态;而在复合材料中,虽然初始阶段材料的吸湿量也与吸湿时间的平方根成正比,但是在扩散的后半部分(约 160 h 后),曲线上产生一个明显的台阶,这与吸湿增重和聚合物开始缓慢松弛有

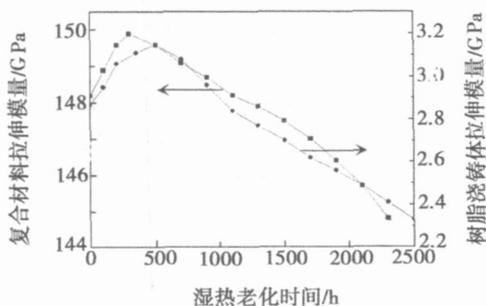
关,使之获得了额外的吸湿,即后一阶段水分在复合材料中的扩散已偏离了 Fick 扩散定律^[6~7]。

3.2 湿热环境对复合材料和树脂浇铸体的力学性能的影响

图 4 给出了复合材料和树脂浇铸体拉伸性能随湿热老化时间的变化,图中各点均为五个平行试样取平均值而得。可以看出,随湿热老化时间的延长,两者的性能均呈现先升后降的趋势。树脂浇铸体性能在老化 500 h 后达到最高 ($\sigma_c = 73.9 \text{ MPa}$, $E = 3.18 \text{ GPa}$),复合材料性能在老化 300 h 后达到最高 ($\sigma_c = 1531 \text{ MPa}$, $E = 150 \text{ GPa}$)。从湿热环境对复合材料及树脂基体的作用原理分析,基体树脂可能在受热过程中进一步固化,使得基体树脂性能提高。对于复合材料单向板而言,老化前期除固化度提高使性能提高外,湿气渗入到复合材料内部,使树脂基体发生增塑^[2],使纤维韧化,且与基体中的某些化学键作用,使界面性能受到削弱,导致复合材料性能下降,且峰值的出现时机早于树脂基体。



(a) 拉伸强度



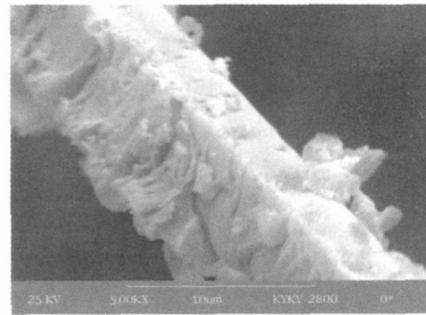
(b) 拉伸模量

图 4 湿热时间对复合材料及树脂浇铸体力学性能的影响

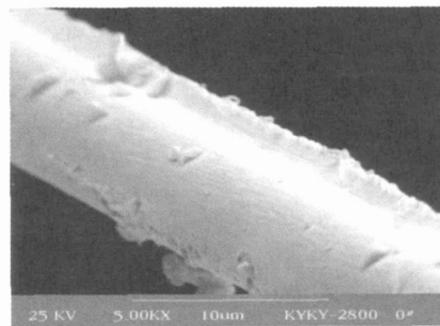
Fig 4 Relationship between hygrothermal time and properties of composites and epoxy

图 5 给出了复合材料断口湿热老化前后纤维表面的比较。湿热老化前,基体与纤维的界面粘结良好,且断裂的纤维上粘有很多树脂,如图 5(a)所示,表明界面结合强;湿热老化 1500 h 后,环氧树脂受热应力引起界面开裂,树脂与纤维的界面粘结性能变

差,同时由于水分的渗入,树脂溶胀,胶滴形貌由尖锐变得圆润,纤维表面受侵蚀,断裂的纤维上只粘有少量树脂,如图 5(b)所示,表明界面结合较弱^[7]。



(a) 湿热老化前



(b) 湿热老化 1500 h

图 5 湿热老化前后纤维表面的扫描电镜比较

Fig 5 Change of fiber surface after hygrothermal aging

3.3 环境作用对铝合金裂纹板及修复板的拉伸性能的影响

因修复试样为一个局部增厚的组合体,且因预置裂纹的存在使得拉伸试验没有明显屈服现象,故应当使用断裂载荷表征力学性能^[1],而断裂强度 σ_c 只能作为辅助指标。同时拉伸模量可以表征胶接补片对于抗外力的形变程度。表 1 给出了湿热环境作用对于铝合金裂纹板与修复板的准静态拉伸性能的影响 (N 为断裂载荷, E 为拉伸模量),表中数据均为三个平行试样取平均值。其中,承载能力保留率 η 定义为经环境作用后铝合金裂纹板和修复板拉伸断裂载荷 N_t 与未经环境作用的铝合金裂纹板和修复板拉伸断裂载荷 N_0 之比,承载能力提高率 η' 定义为相同湿热环境作用时间下修复板的拉伸断裂载荷提高幅度与裂纹板载荷 N_{crack} 之比。其中裂纹板的 $N_{0,crack}$ 和修复板的 $N_{0,patch}$ 分别为 26.04 和 37.09 kN。反映了湿热老化对试样的影响程度,反映了经湿热老化后的修复效果提高程度。即:

$$\eta = \frac{N_t}{N_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta' = \frac{N_{patch} - N_{crack}}{N_{crack}} \quad (3)$$

从表 1 可以看出,随湿热老化时间延长,含中心裂纹铝合金板的准静态力学性能呈下降趋势,断裂载荷下降速率 $N = 0.12 \text{ kN}/100 \text{ h}$;而经复合材料胶接修复后的修复板性能出现先升后降的现象,在 700 h 处出现峰值 ($N_{\max} = 38.75 \text{ kN}$),之后断裂载荷基本呈线性下降, $N = 0.30 \text{ kN}/100 \text{ h}$ 。这主要是因为修复板是一个复杂的多相体系,由铝合金板、胶黏剂层及复合材料补片组成。在 3.2 节的讨论中得知,复合材料补片及其基体树脂浇铸体的性能均随湿热老化时间延长先升后降,前者在 300 h 左右达到峰值。将其

胶接于铝合金裂纹板后,必然对整个组合体系产生相同趋势的影响,即前一阶段由于树脂性能提高致使体系性能提高的趋势大于铝合金板受老化致使体系性能降低的趋势,同时湿热环境使得真空袋压引入到胶黏剂层的热应力变小,从而使修复板性能上升;而后一阶段由于树脂固化度不再提高,使得湿热环境对复合材料及铝合金板的老化作用成为主要矛盾,从而性能开始下降。而修复板性能峰值出现时机(700 h)晚于复合材料补片(300 h)的原因可能是胶黏剂层树脂也存在后固化,但后固化速度较慢导致的。

表 1 湿热老化对铝合金裂纹板及修复板的力学性能影响

Tab 1 Effect of hygrothermal aging on properties of crack and non-crack aluminum alloy substrates

老化时间 /h	裂纹板				修复板				/%
	N_t/kN	/%	σ_c/MPa	E/GPa	N_t/kN	/%	σ_c/MPa	E/GPa	
0	26.0	100	272	72.1	37.1	100	218	83.7	42.4
100	25.8	99.0	268	71.4	37.6	102	222	85.0	45.9
350	24.4	94.7	254	67.5	38.4	103	226	86.6	57.3
700	23.5	90.4	245	65.1	38.8	105	229	87.5	64.7
900	23.0	88.4	239	63.7	37.7	102	222	85.0	64.0
1100	22.8	87.7	238	62.2	37.4	101	220	83.1	63.8
1300	22.2	85.1	231	61.1	37.1	99.9	218	81.9	67.1
1500	21.7	83.2	226	60.1	36.7	99.0	216	80.8	69.5
1700	21.1	80.9	220	58.8	36.1	97.3	213	79.6	71.2
1900	20.7	79.5	216	57.6	35.7	96.2	210	78.1	72.2
2100	20.5	78.7	214	56.8	35.0	94.4	206	77.0	70.8
2300	20.1	77.3	210	55.6	34.8	93.7	205	75.7	72.5

对载荷能力提高率 的分析可以得出,修复板的耐湿热性能随着湿热时间的延长逐渐提高,说明裂纹板比修复板对湿热环境更加敏感,老化时间越长,修复效果越明显。但老化时间超过 700 h 后,承载能力提高幅度趋于稳定。

4 结论

(1)水分在树脂浇铸体中的扩散全程遵循 Fick 扩散定律,在复合材料中的初始阶段符合 Fick 扩散定律,160 h 后开始出现偏离 Fick 定律的明显台阶。

(2)随湿热老化时间延长,复合材料中树脂与纤维的界面粘结性能变差,同时由于水分的渗入,树脂溶胀,胶滴形貌由尖锐变得圆润,纤维表面受侵蚀,断裂的纤维上只粘有少量树脂。

(3)随湿热老化时间延长,复合材料单向板及其基体树脂浇铸体力学性能先升后降,但前者峰值出现时机 ($\sigma_c = 1531 \text{ MPa}$,约 300 h)早于后者 ($\sigma_c = 73.9 \text{ MPa}$,约 500 h)。

(4)随湿热老化时间延长,含中心裂纹铝合金板的准静态力学性能呈下降趋势,断裂载荷下降速率 $N = 0.12 \text{ kN}/100 \text{ h}$;而经复合材料胶接修复后的修复板性能出现先升后降的现象,在 700 h 处出现峰值

($N = 38.75 \text{ kN}$),之后断裂载荷基本呈线性下降, $N = 0.30 \text{ kN}/100 \text{ h}$ 。

参考文献

- 1 王遵. 复合材料单面补强含裂纹铝合金薄板的残余热应力及其影响研究. 国防科技大学博士论文, 2007
- 2 黄业青, 张康助, 王晓洁. T700碳纤维复合材料耐湿热老化研究. 高科技纤维与应用, 2006; 31(3): 19~21
- 3 乔海霞. 铝绞线复合材料芯的性能研究. 国防科技大学硕士论文, 2006
- 4 张蕾英. 有色金属铜、铝、钛及其合金在湿热地区广州十年大气腐蚀试验结果. 环境技术, 2009; (4): 1~5
- 5 Adams R D, Singh M M. The dynamic properties of fiber reinforced polymers exposed to hot, wet, conditions. Composites Science and Technology, 1996; 56: 977~997
- 6 Zhou J, Lucas J P. The effects of a water environment on anomalous absorption behavior in graphite/epoxy composites. Composites Science and Technology, 1995; 53: 57~64
- 7 Paplham W P, Brown R A, Salin IM et al. Absorption of water in polyimide resins and composites. Journal of Applied Polymer Science, 1995; 57: 133~137

(编辑 任涛)