

湿热对复合材料粘接修理裂纹铝合金板 疲劳性能的影响

戴京涛, 苏洪波, 谭晓明, 汪余博, 赵培仲

(海军航空大学青岛校区 航空机械工程与指挥系, 山东 青岛 266041)

摘要: **目的** 研究湿热对复合材料粘接修理结构疲劳性能的影响。**方法** 在表面处理工艺中分别选择 KH550 和 AC130 两种偶联剂, 设计制备一系列复合材料粘接修理试样。在温度为 55 °C、相对湿度为 98% 的环境试验箱中湿热处理 72 h。测试湿热前后复合材料粘接修理结构的疲劳性能。**结果** 复合材料粘接修理后, 采用 KH550、AC130 修理试样的疲劳寿命分别是未修理试样的 4.3、5.2 倍。湿热处理后, 相较于未修理试样, 采用 KH550 的修理试样, 疲劳寿命提高了 3.8 倍, 而采用 AC130 的试样为 4.6 倍。**结论** 湿热处理导致粘接界面和复合材料补片的性能下降, 从而造成疲劳性能降低。采用 AC130 偶联剂比采用 KH550 偶联剂能够获得更好的疲劳性能, 且湿热后, 其疲劳性能下降较少。采用 AC130 的试样, 其裂纹扩展速率比较低。

关键词: 湿热; 复合材料粘接修理; 裂纹扩展; 偶联剂; 疲劳性能; 扩展速率

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)08-0094-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.08.0016

Effect of Hygrothermal Treatment on Fatigue Property of Cracked Aluminum Plate Repaired by Bonding Composite Patch

DAI Jing-tao, SU Hong-bo, TAN Xiao-ming, WANG Yu-bo, ZHAO Pei-zhong

(Department of Aeronautical and Mechanical Engineering, Qingdao Campus of Naval Aeronautical University, Qindao 266041, China)

ABSTRACT: In order to investigate the effect of hygrothermal treatment on the fatigue property composite bonded repair structures, a series of samples were prepared according to applications of different coupling agents (KH550 and AC130). The composite repaired samples were treated for 72 h in the environment test chamber under the condition of 55 °C and 98% humidity. The fatigue life and crack growth were investigated before and after the hygrothermal treatment. According to the test data, the fatigue life of the cracked aluminum plate was increased obviously after composite bonded repair. For sample repaired with KH550, the fatigue life became 4.3 times of the unrepaired one. For sample repaired with AC130, it was 5.2 times. The fatigue life became 3.8 and 4.6 times of the unrepaired ones, respectively for the KH550 and AC130 sample. The hygrothermal treatment can lead to obvious decrease of the fatigue property. Application of AC130 agent can result in better fatigue property compared with KH550 agent. Also, after hygrothermal treatment, the fatigue life of sample using AC130 agent decreased less,

收稿日期: 2021-04-09; 修订日期: 2021-05-06

Received: 2021-04-09; Revised: 2021-05-06

作者简介: 戴京涛 (1972—), 男, 副教授, 主要研究方向为复合材料粘接修理技术。

Biography: DAI Jing-tao (1972—), Male, Associate professor, Research focus: adhesively bonded composite repair.

引文格式: 戴京涛, 苏洪波, 谭晓明, 等. 湿热对复合材料粘接修理裂纹铝合金板疲劳性能的影响[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 094-099.

DAI Jing-tao, SU Hong-bo, TAN Xiao-ming, et al. Effect of hygrothermal treatment on fatigue property of cracked aluminum plate repaired by bonding composite patch[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 094-099.

and the crack growth rate was lower, too.

KEY WORDS: hygrothermal treatment; adhesively bonded composite repair; crack growth; couple agent; fatigue property; growth rate

复合材料粘接修理金属结构损伤比传统的机械修理方法具有独特的优势,可以避免钻孔、减少应力集中、较少结构增重等^[1-3],可以获得更好的疲劳和耐腐蚀性能。复合材料粘接修理是通过胶层树脂将复合材料补片和金属损伤结构连接起来,分担结构载荷,恢复其承载能力^[4]。因此,胶层的失效将会直接导致粘接修理的失效。然而,粘接修理结构通常对于湿热环境比较敏感。一方面,湿热环境会造成胶层及粘接界面性能的下降;另一方面,湿热环境还会导致复合材料补片本身的性能下降,因而影响到粘接修理结构的性能^[5-7]。研究表明,在湿热条件下,复合材料的力学性能会有明显下降。冯青等^[8]研究发现,吸湿率是影响层间剪切强度的决定性因素,复合材料性能的退化主要是基体吸水塑化和湿应力导致的。闫伟等^[9]建立了湿-热-力耦合条件下复合材料宏观性能的定量表达式,分析了湿热对复合材料拉伸压缩性能的影响。王跃然等^[10]研究发现,复合材料粘接修理铝合金裂纹板结构,在湿热老化后,不考虑后固化的影响,结构静拉伸强度会快速下降。湿热诱发的复合材料补片性能下降、胶层以及界面性能下降,不仅影响静强度,而且会导致裂纹尖端应力强度因子的提高,进而导致疲劳性能的下降^[11-13]。粘接结构的破坏一般包括粘接件(复合材料补片或铝合金板)本体的破坏、胶层内聚破坏以及粘接界面的破坏^[14]。粘接界面的破坏将会影响载荷从损伤结构向复合材料补片传递的效率,严重影响粘接修理的效果。事实表明,界面破坏很多情况下是由于粘接之前的表面处理质量不高所导致的^[15-17]。特别是在湿热环境下,如果表面处理质量不高,界面更容易出现脱粘等损伤,诱发应力集中,脱粘区域不断扩展,最终引发粘接结构的失效^[18]。偶联剂的使用对于获得高质量的表面处理质量十分关键,它可以分别和复合材料补片与铝合金表面之间形成化学键,提高粘接性能^[19]。因此,文中在研究湿热对复合材料粘接修理结构疲劳性能影响的同时,重点考虑了不同偶联剂的使用对疲劳寿命和裂纹扩展的影响。

1 实验

1.1 试样制备

裂纹损伤试样的制备,将铝合金板裁剪成为 200 mm×50 mm×1.5 mm 的矩形板,并在试样中央预制长为 10 mm 的穿透裂纹,如图 1 所示。

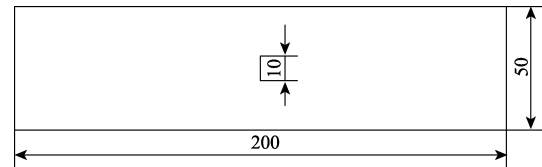


图 1 中心裂纹铝合金板
Fig.1 AL alloy plate with its center cracked

损伤试样的表面处理。用乙酸乙酯溶剂清洗粘接区域,并干燥;采用干燥的碳化硅对粘接区域进行喷砂处理;清除表面砂粒。清洁干燥后,涂布偶联剂。偶联剂分别采用 KH550 和 AC130 两种。涂布偶联剂后,在 60 °C 的烘箱中放置 30 min 左右。

粘接修理试样的制备。粘接修理材料为玻璃纤维布和 Hysol EA9394 环氧树脂。根据设计的补片尺寸,裁剪相应的玻璃纤维布。调配环氧树脂。采用湿铺法逐层铺设,粘接修理预制的损伤铝合金试样。铺层宽度 50 mm 保持不变,长度从 110 mm 依次递减 10 mm,铺设 6 层,如图 2 所示。之后,采用复合材料热补仪完成试样的固化,以 3 °C/min 的升温速率将固化温度升至 80 °C,保持 1 h。固化后,补片的厚度为 0.8 mm。将未经修理的裂纹损伤试样标记为 UP-1 等系列试样,修理后直接进行疲劳实验的试样标记为 P-1 等系列试样,修理后用于湿热处理的修理试样标记为 HP-1 等系列试样。

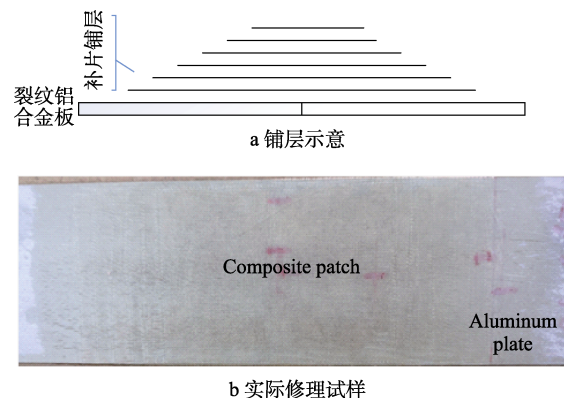


图 2 复合材料粘接修理试样

Fig.2 Schematic of the adhesively bonded composite repair structure: a) lamination; b) repaired sample

1.2 湿热处理

参照 GJB 3383—1998,对粘接修理试样进行湿热处理。在高低温环境试验箱中进行定值实验。设置环境温度为 55 °C,相对湿度为 98%。保持 72 h 后取出,室温放置 24 h。

1.3 疲劳性能测试

采用 TST-DL4205 疲劳试验机, 测试试样的疲劳性能。试验选择正弦波, 频率为 10 Hz。采用试验力值控制方式, 峰值为 7 kN, 谷值为 0.7 kN。

2 结果与讨论

2.1 湿热处理对疲劳性能的影响

经过湿热处理后, 粘接修理试样的疲劳性能都明显下降, 见表 1。但是, 和未修理的试样相比较, 疲劳性能仍然有较大提高。在湿热环境条件下, 水分子容易进入胶层和复合材料补片的基体树脂中, 扩散到分子之间, 削弱分子间相互作用力, 使树脂体积膨胀。体积膨胀产生内应力, 会导致薄弱部位产生损伤, 降低树脂的力学性能。在复合材料补片中, 和树脂基体相比, 纤维吸水性很低, 基体树脂的膨胀, 将会使树脂和纤维的界面处由于膨胀的不匹配产生内应力。由此可能诱发界面处产生细微裂纹损伤, 降低纤维和树脂之间的粘接强度, 影响补片的力学性能。类似地, 在胶层和铝合金的界面也会存在由于体积膨胀不匹配, 引起的界面粘接性能下降。对于界面处的偶联剂层, 也会因为水分子的进入, 导致性能下降。此外, 在湿热环境中, 纤维中还会有部分成分被水溶解掉, 降低纤维本身的力学性能。这些因素共同作用, 导致湿热对复合材料粘接修理结构产生不利的影响。

表 1 试样的疲劳试验结果
Tab.1 Fatigue test data

试样	偶联剂	疲劳寿命	平均值	提高倍数
UP-1	—	12 949		
UP-2	—	28 864	20 830	—
UP-3	—	20 678		
P-1	KH550	98 326		
P-2	KH550	89 743	89 918	4.3
P-3	KH550	81 687		
P-4	AC130	105 774		
P-5	AC130	122 547	108 776	5.2
P-6	AC130	98 007		
HP-1	AC130	95 952		
HP-2	AC130	92 586	96 455	4.6
HP-3	AC130	100 829		
HP-4	KH550	78 809		
HP-5	KH550	81 023	79 894	3.8
HP-6	KH550	79 851		

要改善复合材料粘接修理结构的耐湿热性能, 一方面, 要选择性能优异的复合材料补片基体树脂和胶层树脂; 另一方面, 则要做好粘接表面处理。同时,

还要严格工艺过程控制, 避免气泡和其他杂质的混入, 保证粘接质量, 减少湿气的侵入。从图 3 中可以看出, 在裂纹扩展的初期, 湿热前后的差别并不大。这可能是因为胶层和补片由于水分子的塑化作用, 阻尼增加, 在疲劳试验的初期, 可以耗散部分机械能。但是, 胶层或补片很快出现细微损伤。并不断扩展, 裂纹扩展随之快速增大, 超过未湿热处理的试样。湿热处理前后裂纹扩展速率随裂纹长度的变化如图 4 所示。总体上看, 不论是采取哪种偶联剂, 湿热处理之后的裂纹扩展速率要大于湿热处理之前。从破坏模式上看, 湿热处理之前, 试样疲劳断裂基本上是补片和试样一起断裂。湿热后, 则主要出现的是界面失效, 补片和铝板脱离, 如图 5 所示。

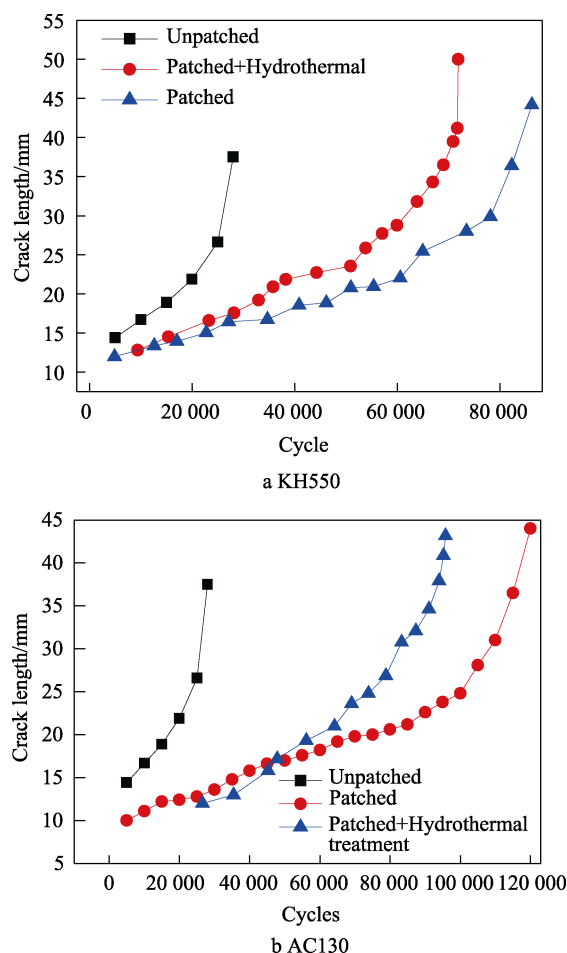


图 3 湿热处理前后复合材料粘接修理结构的疲劳性能
Fig.3 Fatigue properties of adhesively bonded composite repair structures before and after hydrothermal treatment

2.2 偶联剂对裂纹扩展的影响

粘接修理之前的表面处理是关系到结构耐性的非常关键的因素之一。偶联剂的使用可以有效地提高表面处理质量。使用不同的偶联剂, 也会对结构的耐久性产生影响。从表 1 中可以看出, 使用 AC130 可以获得更好的结构耐久性。裂纹长度随疲劳次数的变

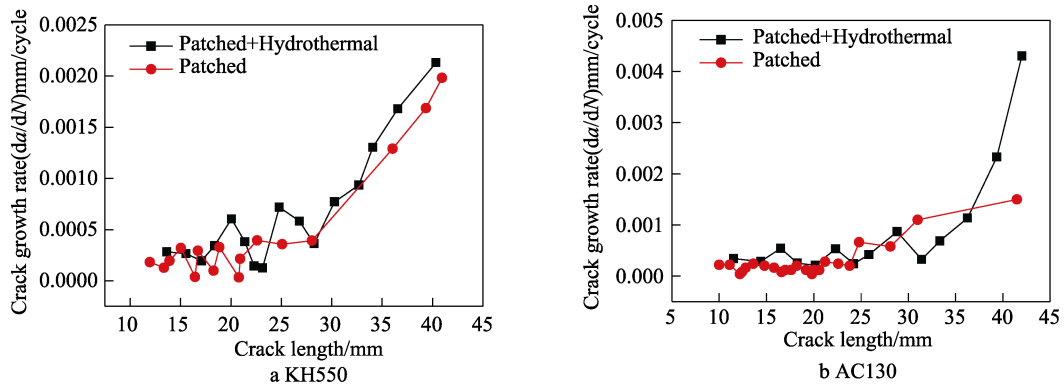


图 4 湿热处理前后复合材料粘接修理结构的裂纹扩展

Fig.4 Crack growth of adhesively bonded composite repair structures before and after hydrothermal treatment

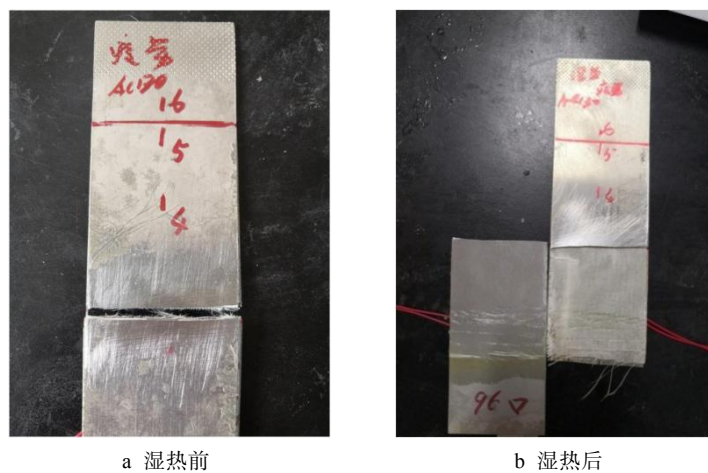


图 5 湿热前后试样破坏模式

Fig.5 Failure modes of samples (a) before and (b) after hydrothermal treatment

化如图 6 所示，显然同样疲劳次数时，使用 KH550 的试样，裂纹长度更长。采用 KH550 处理的表面，更容易受到湿热的影响，导致界面处性能下降，载荷传递过程应力集中突出，更容易诱发胶层和复合材料补片发生破坏，导致粘接结构总体性能下降更严重。

从图 6 可以看出，采用 AC130 偶联剂的试样，

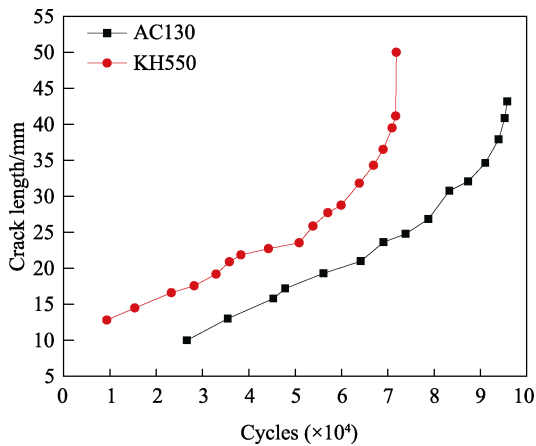


图 6 偶联剂对复合材料粘接修理结构疲劳性能的影响

Fig.6 Effect of couple agent on the fatigue properties of adhesively bonded composite repair structures

裂纹开始进入稳态扩展所对应的疲劳循环次数比采用 KH550 偶联剂的试样明显高很多。但是，曲线随循环次数变化的趋势却基本相同。和 KH550 类似，AC130 也是分别与胶层和铝合金表面形成化学键，起到改善粘接性能的作用。但是，AC130 形成的有机/无机杂化凝胶交联网络更为致密，具有更好的力学性能。因此，使用 AC130 的试样，可以获得更好的界面性能，抵抗湿热的不利影响，阻碍金属表面氧化层和水分子的水合作用。然而，界面一旦出现破坏后，不论是采用 KH550 还是 AC130，水分子侵入界面导致载荷传递效率降低，粘接修理结构的疲劳性能下降，裂纹扩展速率受此影响的程度比较接近。

利用方程 (1) 对数据进行拟合，得到 p 和 q 的值^[20]，结果见图 7 和表 2。

$$\lg\left(\frac{da}{dN}\right) = pa + q \quad (1)$$

从表 2 中可以发现，未修理试样的直线斜率最大，和其裂纹扩展速率最大相对应。从前面的分析中可知，使用 KH550 偶联剂的试样的裂纹扩展速率随裂纹长度的变化比使用 AC130 的要大，因此，其拟合后的直线斜率也较大。

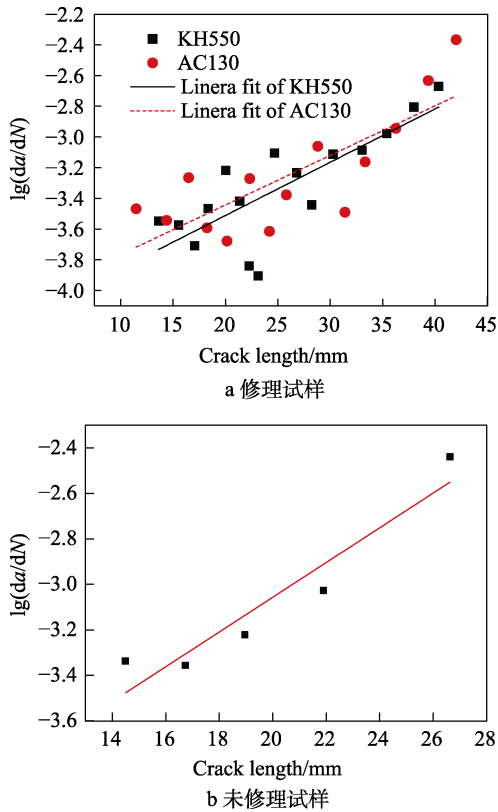


图7 裂纹扩展速率线性拟合

Fig.7 Crack growth rate equation linear fit: a) patched; b) unpatched

表2 湿热后裂纹扩展速率方程参数

Tab.2 Coefficients of crack growth rate equation after hygrothermal treatment

试样	偶联剂	p	q
未修理试样		0.076	-4.584
修理试样	AC130	0.032	-4.089
修理试样	KH550	0.035	-4.206

3 结论

复合材料粘接修理金属结构经过湿热处理后,其疲劳性能明显下降,但是,仍然比未修理的试样要好。偶联剂的使用对于表面处理质量的影响十分关键,粘接修理结构的疲劳性能也因此受到影响。文中试验表明,不论是否湿热处理,采用 AC130 可以获得更好的结构疲劳性能。湿热处理后,采用 AC130 的试样疲劳性能下降较少,说明其耐久性更好。采用 KH550 的试样,裂纹扩展速率比 AC130 的大,导致其疲劳寿命较低。采用方程 $\lg\left(\frac{da}{dN}\right) = pa + q$ 对试验数据进行拟合后,可以得到裂纹长度和裂纹扩展速率之间的关系,进而可以对结构的疲劳寿命进行预测。拟合后,直线的斜率基本上反映了裂纹扩展速率。

参考文献:

- [1] BAKER A, GUNNION A J, WANG J. On the certification of bonded repairs to primary composite aircraft components[J]. The journal of adhesion, 2015, 91(1-2): 4-38.
- [2] BAKER A A. A proposed approach for certification of bonded composite repairs to flight-critical airframe structure[J]. Applied composite materials, 2011, 18(4): 337-369.
- [3] BAKER A, GUNNION A J, WANG J, et al. Advances in the proof test for certification of bonded repairs - Increasing the Technology Readiness Level[J]. International journal of adhesion and adhesives, 2016, 64: 128-141.
- [4] 赵培仲, 胡芳友, 黄旭仁, 等. 复合材料粘接修理结构中胶层的应力分布[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(4): 65-69.
ZHAO Pei-zhong, HU Fang-you, HUANG Xu-ren, et al. Stress distribution in bondline of bonded composite repair structure[J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2012(4): 65-69.
- [5] MARIAM M, AFENDI M, ABDUL MAJID M S, et al. Influence of hydrothermal ageing on the mechanical properties of an adhesively bonded joint with different adherends[J]. Composites part B: Engineering, 2019, 165: 572-585.
- [6] LIU Shu-feng, CHENG Xiao-quan, ZHANG Qian, et al. An investigation of hygrothermal effects on adhesive materials and double lap shear joints of CFRP composite laminates[J]. Composites part B: Engineering, 2016, 91: 431-440.
- [7] ALESSI S, PITARRESI G, SPADARO G. Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites[J]. Composites part B: Engineering, 2014, 67: 145-153.
- [8] 冯青, 李敏, 顾轶卓, 等. 不同湿热条件下碳纤维/环氧复合材料湿热性能实验研究[J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 16-20.
FENG Qing, LI Min, GU Yi-zhuo, et al. Experimental research on hygrothermal properties of carbon fiber/epoxy resin composite under different hygrothermal conditions[J]. Acta materiae Compositae sinica, 2010, 27(6): 16-20.
- [9] 闫伟, 燕瑛, 苏玲. 湿-热-力耦合环境下复合材料结构损伤分析与性能研究[J]. 复合材料学报, 2010, 27(2): 113-116.
YAN Wei, YAN Ying, SU Ling. Damage analysis and strength prediction of composites structures in hygrothermal environment[J]. Acta materiae Compositae sinica, 2010, 27(2): 113-116.
- [10] 王跃然, 肖加余, 曾竟成, 等. 复合材料修复铝合金薄板的湿热特性[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(1): 45-48.
WANG Yue-ran, XIAO Jia-yu, ZENG Jing-cheng, et al. Hygrothermal properties of bonded composite repair of aluminum alloy substrates[J]. Aerospace materials & technology, 2010, 40(1): 45-48.

- [11] YU Qian-qian, GAO Rui-xin, GU Xiang-lin, et al. Bond behavior of CFRP-steel double-lap joints exposed to marine atmosphere and fatigue loading[J]. *Engineering structures*, 2018, 175: 76-85.
- [12] SHAN Mei-juan, ZHAO Li-bin, HONG Hai-ming, et al. A progressive fatigue damage model for composite structures in hygrothermal environments[J]. *International journal of fatigue*, 2018, 111: 299-307.
- [13] MEGUENI A, TOUNSI A, BACHIR BOUIADJRA B, et al. The effect of a bonded hygrothermal aged composite patch on the stress intensity factor for repairing cracked metallic structures[J]. *Composite structures*, 2003, 62(2): 171-176.
- [14] PARK S Y, CHOI W J. Investigation on the effectiveness of silane-based field level surface treatments of aluminum substrates for on-aircraft bonded repairs[J]. *International journal of adhesion and adhesives*, 2019, 95: 102414.
- [15] PARK S Y, CHOI W J, CHOI H S. A review of the recent developments in surface treatment techniques for bonded repair of aluminum airframe structures[J]. *International journal of adhesion and adhesives*, 2018, 80: 16-29.
- [16] DAVIS M, BOND D. Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs[J]. *International journal of adhesion and adhesives*, 1999, 19(2-3): 91-105.
- [17] BOUIADJRA B B, OUINAS D, SERIER B, et al. Disbond effects on bonded boron/epoxy composite repair to aluminium plates[J]. *Computational materials science*, 2008, 42(2): 220-227.
- [18] MARIAM M, AFENDI M, ABDUL MAJID M S, et al. Influence of hydrothermal ageing on the mechanical properties of an adhesively bonded joint with different adherends[J]. *Composites part B: Engineering*, 2019, 165: 572-585.
- [19] 刘元海, 邱实. 飞机金属结构胶接修理前的原位表面处理技术研究[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(3): 134-139. LIU Yuan-hai, QIU Shi. *In-situ* surface treatment technology applied in bonding-repair of aircraft structure[J]. *Equipment environmental engineering*, 2016, 13(3): 134-139.
- [20] CHUNG K H, YANG W H. Mixed mode fatigue crack growth in aluminum plates with composite patches[J]. *International journal of fatigue*, 2003, 25(4): 325-333.