

复合材料修补金属裂损结构吸湿老化的试验与有限元分析*

王 跃

(空军研究院, 北京 100085)

摘要: 暴露在湿热环境中的复合材料修补金属裂损结构易吸湿老化, 导致该结构性能下降, 服役寿命缩短。为研究吸湿性对复合材料修补金属裂损结构修补效果和耐久性的影响, 利用试验方法分析了吸湿性对复合材料胶补金属裂损结构及胶黏剂力学性能的影响; 利用有限元方法评估了吸湿性对复合材料胶补金属裂损结构试验件修补效果和耐久性的影响。研究表明: 吸湿后含穿透双边裂纹铝合金板玻璃纤维单面胶补试验件的疲劳裂纹扩展寿命和极限载荷的平均值分别下降为吸湿前的 71% 和 90%; 吸湿造成拉伸条件下复合材料胶补金属裂损结构胶层失效模式由内聚破坏为主转变为界面破坏为主; 在“湿-热”老化 30 天后, E44/聚酰胺环氧树脂胶黏剂试验件吸水饱和, 弹性模量下降为未老化前的 40%, 塑性应变超过了总应变的 25%; 有限元分析发现胶层损伤受吸湿影响明显, 吸湿性加速了胶层损伤, 且裂纹长度越长, 加速作用越明显; 同时吸湿使得裂纹尖端的 J 积分值急剧增大, 导致修补结构的疲劳裂纹扩展寿命缩短, 裂纹长度越长, 吸湿性对于复合材料胶接修补效果的危害越严重。

关键词: “湿-热”老化试验; 吸湿性; 复合材料单面胶补; 损伤区域理论; J 积分

中图分类号: TB330.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2020)04-064-07

Experimental study and finite element analysis on hygroscopic aging of adhesively bonded composite repaired metallic structures with cracks

WANG Yue

(Air Force Research Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: Due to serve under the environment of high temperature and high humidity, hygroscopic aging behaviors are commonly discovered in adhesively bonded composite repaired metallic aircraft structures, which results in the decrease in mechanical properties and server life. In order to investigate the effect of hygroscopic aging on adhesively bonded composite repaired structures, moisture absorption and aging test were performed on adhesively bonded composite repaired aluminum alloys plates containing double-sides cracks with single patch and E44/Polyamide epoxy resin, then the effect of hygroscopic aging on load carrying capability, crack propagation life, repaired effect and duration of fatigue load were analyzed by the experimental method and finite element method (including damage zone theory and J -integral). Results show that hygroscopic aging lowers the load carrying capability and fatigue crack propagation life greatly, with the result that the average value of fatigue crack propagation life and ultimate load of repaired structure decreases by 29% and 10% respectively after immersing in water for 40 days, and the failing mode of adhesive changes into interfacial failure from cohesive failure. After immersing in water for 30 days, the adhesive specimens became completely plastic, whose elastic module decreases by 60%, and plastic deformation increases to 25%. The effect of hygroscopic aging on the damage zone was obvious, which results in the fast damage of adhesive, and the longer the crack is, the faster the damage is. The hygroscopic aging of repaired structure also increases the value of J -integral around the crack tips, which decreases the crack propagation life of repaired structures.

Keywords: hydrothermal aging test; hygroscopic property; adhesively bonded composite repair; damage zone theory; J -integral

由于含有对水分子有吸引力的亲水化合物, 环氧树脂胶层容易遭受潮湿空气的侵害, 胶层吸收的湿气可以看作塑化剂、溶解/水解剂。对于环氧树脂胶层, 塑性和膨胀的影响是可逆的, 而微裂纹、水解性能等影响是不可逆的, 这些行为都造成了胶层热性能、力学性能、化学和物理性能等的退化。Parker^[1]以碳纤维/增强环氧树脂复合材料

胶接接头为研究对象, 在 50 °C、相对湿度为 95% 的条件下进行了 3 年的环境试验, 研究吸湿性对胶接接头性能的影响发现, 胶接接头的破坏主要分布于复合材料胶接处或搭接胶层处, 破坏主要取决于胶层。Megueni 等^[2]分析了碳纤维/环氧树脂复合材料“湿-热”老化对修补结构裂纹尖端应力强度因子的影响发现, 随着温度的升高, 裂

* 收稿日期: 2018-11-27

作者简介: 王跃(1989—), 男, 山东桓台人, 工程师, 博士, E-mail: 807697221@qq.com

纹尖端的应力强度因子线性增加,并建议在补片设计时要考虑材料老化造成的复合材料强度损失。任三元等^[3]针对复合材料胶补结构编制环境加速谱进行相应的盐雾老化试验,利用小样本试验结果和更正系数计算了复合材料修补结构经历盐雾老化试验后的疲劳裂纹扩展寿命。

高温、高湿是沿海地区航空设备服役环境的显著特点,对于复合材料胶补金属裂纹结构、复合材料补片延缓疲劳裂纹扩展的效率以及提高结构承载载荷的能力随着暴露在“湿-热”环境中时间的增加而不断下降,因此对“湿-热”环境条件下复合材料修复结构发生的老化现象与该结构修补效果、耐久性能之间进行的分析与研究,对保证此类结构日常使用的安全性非常重要^[3-4]。现阶段,国内对此方面的研究并不多见,因此本文通过试验与有限元仿真相结合的方法,研究了吸湿性对复合材料胶补金属裂纹结构的影响,通过“湿-热”试验确定复合材料修补结构胶层的破坏模式以及胶层的弹塑性性能变化,基于 J 积分理论和损伤区域理论评估了吸湿性对修补试验件修补效果和耐久性的影响。

1 试验及结果分析

1.1 复合材料胶补试验件“湿-热”老化试验与结果分析

文献[5-6]利用复合材料对损伤结构进行修补,之后放置于40℃恒温蒸馏水中,当浸水时间为40天时,修补结构吸水饱和,整体质量不再增加。因此,本文以文献[5]和文献[6]的试验方法为参考,将含双边裂纹铝合金板玻璃纤维单面胶补试验件浸入蒸馏水中,并置于40℃的恒温箱中保存40天,评估吸湿性对复合材料胶补结构力学特性的影响,并确定胶补试验件胶层的失效模式。本试验共制备了14件复合材料胶接修补试验件,复合材料胶补修补试验件补片尺寸、胶补工艺等参照文献[7-10],将复合材料胶补试验件分为两组,每组试验件的数量为7,一组进行“湿-热”老化试验,另一组干燥处理进行对比试验。“湿-热”老化试验后分别进行试验件的疲劳裂纹扩展试验和单向静拉伸试验。由于试验件数量的限制,含双边裂纹未修补试验件只剩6件,将3件进行单向静拉伸试验,3件进行疲劳裂纹扩展试验,用来对比“湿-热”老化前后的修补效果。

图1和图2分别为含穿透双边裂纹未修补试验件、含穿透双边裂纹修补试验件和“湿-热”老化试验40天后含穿透双边裂纹修补试验件的疲

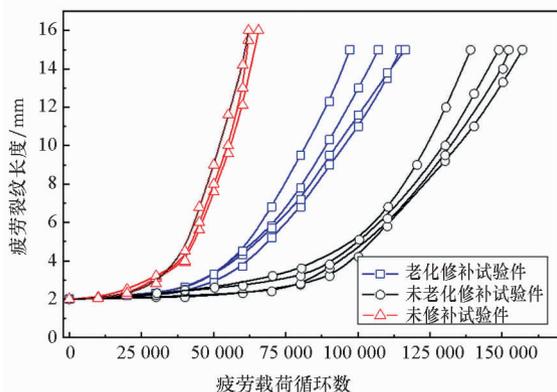


图1 未修补试验件、未老化修补试验件和老化修补试验件的疲劳试验结果

Fig.1 Cycles of fatigue load for specimens without patches, specimens with patches and specimens with patches immersion in water

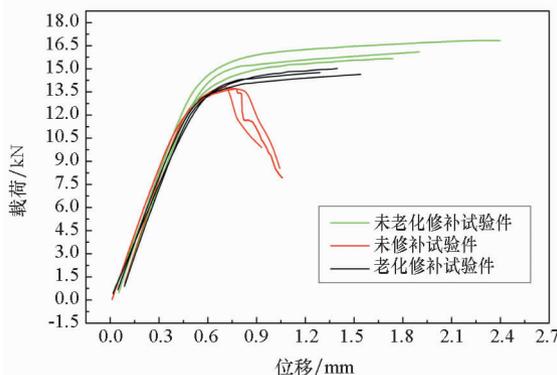


图2 未修补试验件、未老化修补试验件和老化修补的载荷-位移曲线

Fig.2 Curves of loading-displacement of specimens without patches, specimens with patches and specimens with patches immersion in water

劳裂纹扩展试验结果(裂纹长度随疲劳载荷循环数变化的曲线,疲劳载荷加载波形为正弦波,最大载荷为含裂纹未修补试验件极限载荷的50%,基准应力比为0.1,频率为10 Hz)和单向静拉伸试验结果,单向静拉伸试验方法与文献[10]方法一致。从图1中可以看出,未老化含双边裂纹修补试验件断裂时的疲劳寿命裂纹扩展平均值提高了2.3倍,而老化含穿透双边裂纹修补试验件的疲劳裂纹扩展寿命平均值提高了1.5倍,下降为老化试验前的0.71倍,这说明经复合材料修补后,含损伤飞机结构的服役寿命显著提高;复合材料修补金属裂纹结构在吸湿后疲劳性能发生了很大变化,吸湿明显缩短了复合材料修补金属裂纹结构的疲劳裂纹扩展寿命,降低了胶接修补的效果。含穿透双边裂纹修补未老化试验件与含穿透双边裂纹修补老化试验件两条边的裂纹长度都发生了

扩展,其中裂纹扩展长度增加较大的一条称为主裂纹,扩展长度增加较短的一条称为从裂纹。

从图 2 中可以看出,经复合材料补片修补后,含穿透双边裂纹铝合金板的极限强度有较大的提高,修补后极限强度的平均值比未修补前提高了 15.3%,这就是复合材料修补后疲劳裂纹扩展寿命明显增加的原因。吸湿后的修补结构补片与胶层之间产生了内部应力,老化含穿透双边裂纹修补试验件的极限强度要低于未老化修补试验件,极限强度平均值下降为未老化前的 90%,但高于未修补试验件。

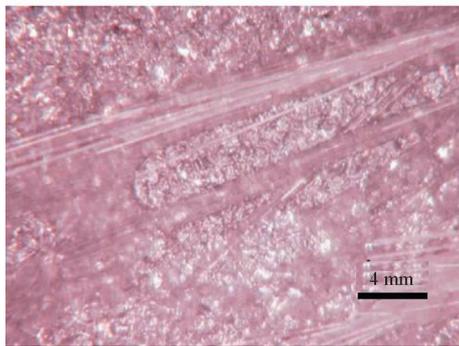
图 3(a)和图 3(b)分别为老化试验前后复合材料修补金属裂损结构试验件脱胶区域的局部放大图。通过对比图 3(a)和图 3(b)可以发现,未老化修补试验件胶层的破坏模式以内聚破坏为主,说明采用的胶补工艺满足试验要求,而老化试验后的修补试验件胶层则以界面破坏为主。而复合材料补片完好,未发现损伤。由此可以推断,在复合材料修复结构吸湿过程中,胶黏剂不断老化变性,使金属修补区域与复合材料补片之间黏合力持续下降,最终造成了修补区域与复合材料补片的提前脱胶。因此可以认为,造成修补试验件

修补效果下降的主要原因是胶层的老化变性。

1.2 胶黏剂试验件“湿-热”老化试验与结果分析

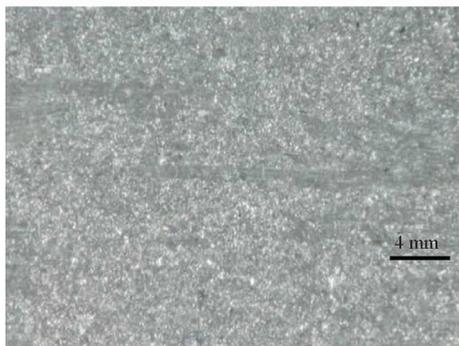
通过上一节分析,可以发现复合材料修补试验件经历“湿-热”老化试验后,修补效果的下降很大程度上取决于胶层的老化程度,胶层的老化甚至导致了复合材料修补结构胶层破坏模式的改变,因此,参照复合材料修补试验件的“湿-热”老化试验方法以及 ASTM D1183-70(1981)标准,进行胶黏剂试验件的“湿-热”老化试验,研究吸湿性对胶黏剂性能的影响。

胶黏剂试验件制作过程如图 4 所示。共制作了 28 件胶黏剂试验件,分别在 40 °C 蒸馏水中进行浸水 0 天、1 天、5 天、10 天、20 天、30 天、40 天的 7 组环境试验,每组试验件的数量为 4。对不同老化程度的 28 件 E44 胶黏剂试验件进行了单向拉伸试验,不同浸水时间下胶黏剂试验件的真实应力-应变曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出,随着吸湿时间的增加,胶层极限强度急剧下降,浸水时间对胶层力学性能的影响较大。在浸水 10 天后,胶黏剂的极限强度下降为未浸水时的 51%,弹性模量也下降为原来的 45%。在浸水时间超过 20 天后,弹性模量下降为未老化试验件的 40%,极限强度下降为未老化试验件的 43%。在浸水 30 天以及 40 天后,胶黏剂试验件的力学性能变化不大,说明胶黏剂试验件吸水饱和,其塑性应变超过了总应变的 25%。



(a) 未老化含双边裂纹修补试验件

(a) Repaired specimens before immersion



(b) 老化含双边裂纹修补试验件

(b) Repaired specimens immersion in water for 40 days

图 3 不同试验件铝合金板脱胶区域的局部放大图(50 ×)

Fig.3 Partial enlarged detail of de-bonded zone of different specimens(50 ×)

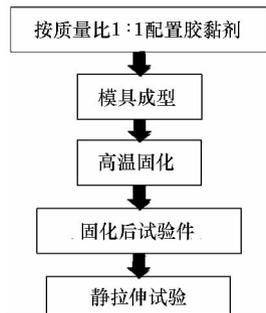


图 4 “湿-热”老化试验的胶黏剂试验件制作过程

Fig.4 Process of making adhesive specimens for hydrothermal aging test

对于含穿透双边裂纹铝合金板复合材料修补结构,复合材料补片延缓疲劳裂纹扩展的效率随着暴露在“湿-热”环境中时间的增加而不断下降,湿气造成胶层强度和刚度性能衰减,导致铝合金板胶层界面的脱胶和补片的侵蚀。可以推断,当复合材料胶接修补结构受到较大拉伸载荷时,未老化试验件的胶层处于弹性阶段,而吸湿后的老化试验件胶层却发生较大塑性变形,当塑性变

形达到一定值时,胶层将发生破坏,最终导致复合材料补片的脱落。因此,可以通过建立修补结构的有限元模型,以胶层前后的材料性能变化为依据,通过胶层塑性区尺寸以及裂纹尖端 J 积分为损伤依据,分析吸湿对复合材料胶接修补结构耐久性和修补效果的影响。

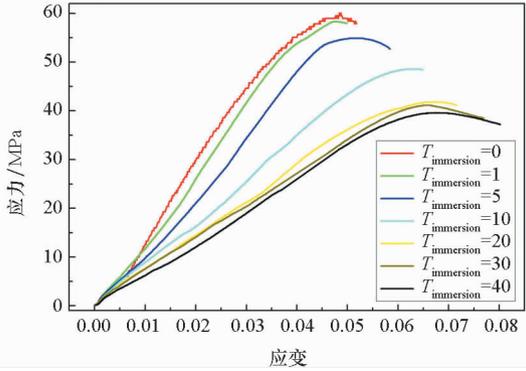


图5 不同浸水时间下胶黏剂试验件的真实应力-应变曲线

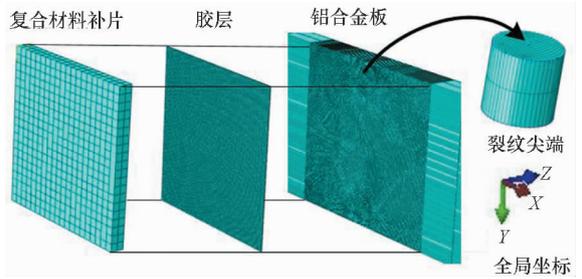
Fig. 5 Stress-strain curve of adhesive epoxy for different days of immersion in water

2 数值仿真分析

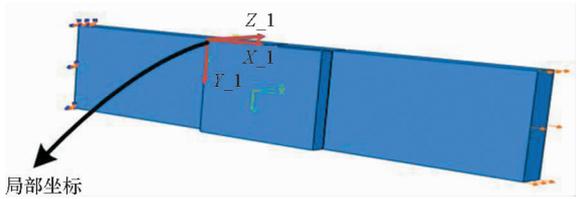
对含穿透双边裂纹修补试验件进行三维数值建模使用的是商业有限元软件 ABAQUS。考虑金属板的弹塑性性能,采用 C3D20R 单元(20 节点六面体二次减缩积分单元)进行仿真,裂纹使用 Seam 穿透型裂纹模拟,厚度方向设置为 6 层,裂纹尖端按照网格密度为 0.1 mm 进行细化;采用 C3D8R 单元(8 节点六面体二次减缩积分单元)模拟胶层,胶层厚度为 0.1 mm;采用 SC8R 单元(4 节点连续壳单元)仿真复合材料补片。修补结构三维模型的全局种子大小设置为 3 mm,修补区域的金属、胶层及补片种子大小设置为 1 mm。胶层与金属板修补区域、复合材料补片之间采用绑定约束,这种约束是将三者界面节点的自由度完全绑定,可以很好地模拟三者的协调变形关系。修补结构的边界条件为金属基板一端固定,一端施加载荷。“湿-热”老化试验后修补试验件的有限元模型建立如图 6 所示,由于“湿-热”老化的作用,胶层的性能参数发生了变化,胶层的弹塑性性能参数由图 5 获得。

2.1 损伤区域理论简介

损伤区域理论假设修补结构中胶层的破坏和铝合金板的裂纹起始发生在损伤区域出现之后。采用合适的失效准则,通过判断单元的失效参数是否达到了单元失效的临界值来定义损伤区



(a) 有限元模型的网格划分和全局坐标系
(a) Meshing and global coordinates



(b) 边界条件和局部坐标系

(b) Boundary conditions and local coordinates

图6 含穿透裂纹修补试验件有限元模型

Fig. 6 Finite element model of repaired specimens

域^[10-11]。有限元分析模型中胶层为强化塑性材料,其经历的是韧性断裂破坏。因此,胶层破坏失效准则采用等效 Von Mises 应变准则^[12-13],即:

$$\varepsilon_{\text{equiv}} = \frac{1}{\sqrt{2(1+\nu)}} \times \sqrt{(\varepsilon_{p1} - \varepsilon_{p2})^2 + (\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p3})^2 + (\varepsilon_{p3} - \varepsilon_{p1})^2} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_{\text{equiv}}$ 为等效塑性应变,即为 ABAQUS 程序中的等效塑性应变参数^[14-15]; ε_{pi} 为不同主方向的塑性应变; ν 为泊松比。当材料的最大主应变达到极限主应变时,失效准则有效,定义极限应变后,其失效对应的损伤区域尺寸随之确定。修补试验件中胶层的损伤破坏可以使用失效区域比例方法来预测^[16]。损伤区域比例 D_R 可以用下式来计算:

$$D_R = \frac{\sum A_i}{l_{\text{adhesive}} \cdot w_{\text{adhesive}}} \quad (2)$$

式中, A_i 为胶层中有效塑性变形超过 7.789×10^{-3} 的面积, l_{adhesive} 和 w_{adhesive} 分别为胶层的长度和宽度。对未浸入水中的修补试验件施加极限强度,有限元模型得到的损伤区域分布如图 7 所示,此时胶层的损伤区域比例 D_R 达到了 0.247,为损伤区域比例的临界值,即损伤区域比例达到此临界值时,胶层完全失效。

2.2 “湿-热”老化试验后胶层损伤区域的有限元分析

利用损伤区域理论对“湿-热”环境后复合

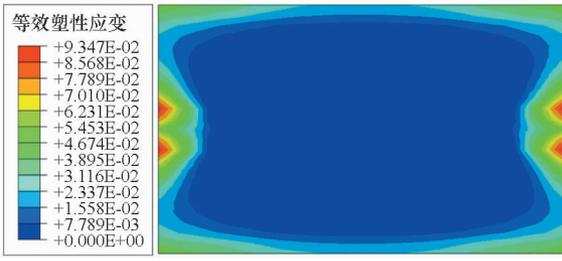


图 7 未老化修补试验件施加极限强度时胶层损伤区域分布

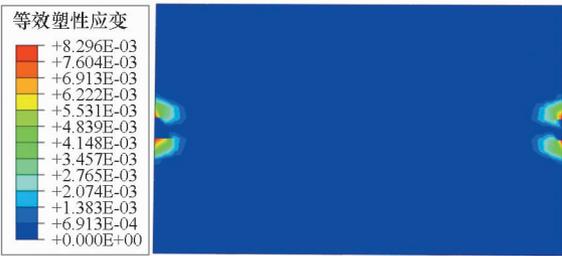
Fig. 7 Plastic zone of adhesive of repaired structure before immersion in water

材料修补结构胶层的损伤区域进行了研究。首先计算 100 MPa 载荷条件下修补结构胶层的损伤区域尺寸,图 8(a)和图 8(b)分别为未浸入水中 and 浸入水中 40 天后主裂纹长度 $a_{main} = 2$ mm 时的胶层损伤区域分布图。从图中可以发现,胶层局部损伤区域主要集中于裂纹尖端附近和胶接边缘区域,且裂纹尖端附近区域更为严重,胶接边缘区域的损伤区域相对较小,这主要是因为胶接边缘区域的应力集中不足以产生较大的损伤区域。裂纹尖端附近区域的局部损伤区域会导致此区域胶层的提前破坏,但对边缘区域胶层影响较小。而胶层大部分区域未产生损伤,裂纹板与补片之间传递力的路线仍然稳定。通过本文模型分析,可以

确定在裂纹位置区域的胶层损伤会沿着胶层进行扩展,最终导致基板与复合材料补片连接处的破坏。胶层的吸湿增加,提高了胶层的延展性能,但高延展性能造成了胶层的严重损伤。根据图 8 的结果,相比于胶层胶接边缘处的损伤区域,吸湿性对胶层裂纹尖端附近的损伤区域影响更大,此时未浸水与浸水 40 天后裂纹胶层附近的损伤区域都比较小。

对于主裂纹长度 $a_{main} = 10$ mm 时,情况发生了变化,图 9(a)和图 9(b)为主裂纹长度 $a_{main} = 10$ mm 时,未浸水与浸水 40 天的胶层损伤区域分布图。从图中可以看出,无论是浸水 40 天还是未浸水,胶层边缘区域和裂纹尖端附近的损伤区域尺寸都很明显。对于裂纹长度较长的情况,吸湿性增加了胶层破坏的危险。这是由于随着裂纹长度的增加,更高的应力从裂纹板传递到了胶层,导致胶层的塑性变形增大,使胶层在边缘区域和裂纹尖端附近区域产生了更大面积的局部损伤。由于主裂纹与从裂纹之间的干涉效应,胶层的损伤区域位置发生了变化,主要集中于主裂纹的裂纹尖端附近及胶层边缘。

为更深入地理解吸湿性对复合材料修补结构耐久性的影响,绘出了不同裂纹长度时损伤区域比例 D_r 随浸水时间变化的曲线图,如图 10 所



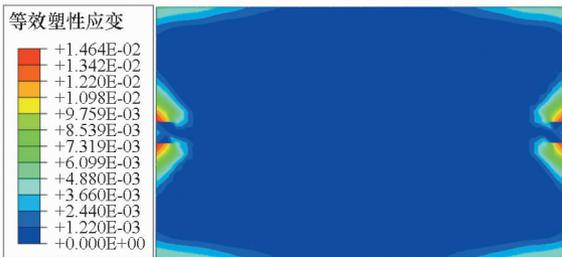
(a) 老化时间为 0 天

(a) Before immersion in water



(a) 老化时间为 0 天

(a) Before immersion in water



(b) 老化时间为 40 天

(b) Immersion in water for 40 days



(b) 老化时间为 40 天

(b) Immersion in water for 40 days

图 8 主裂纹长度为 2 mm 时不同老化时间下胶层损伤区域分布

Fig. 8 Plastic zone of adhesive when main crack length is 2 mm after immersion in water for different days

图 9 主裂纹长度为 10 mm 时不同老化时间下胶层损伤区域分布

Fig. 9 Plastic zone of adhesive when main crack length is 10 mm after immersion in water for different days

示。当主裂纹长度 $a_{\text{main}} = 2 \text{ mm}$ 时, 损伤区域比例 D_R 随浸水时间变化如图 10 黑色曲线所示, 随着浸水时间的增加, 损伤区域面积一直呈增加的趋势, 这说明当裂纹长度较短时, 吸湿性对胶层损伤的影响也较大。与损伤区域比例临界值 ($D_R = 0.247$) 相比, 浸水 10 天以后的损伤面积不可忽略, 因此即使裂纹长度较短时, “湿-热” 环境造成的胶层失效是不可忽略的。裂纹长度 $a_{\text{main}} = 6 \text{ mm}$ 时损伤区域比例 D_R 随浸水时间的变化如图 10 红色曲线所示, 由图中可以看出, 随着裂纹长度的增加, 吸湿性对胶层损伤的影响也成倍增加, 浸水时间在 10 天以内时, 随浸水时间的增加, 损伤区域比例增加幅度较大, 当浸水时间超过 10 天以后, 损伤区域比例缓慢增加, 损伤区域比例在浸水 10 天之后达到临界值, 此时吸湿性对修补结构耐久性危害极大。图 10 中绿色曲线为裂纹长度 $a_{\text{main}} = 10 \text{ mm}$ 时损伤区域比例 D_R 随浸水时间的变化情况, 由图中可以看出, 即使浸水 1 天, 其损伤区域比例也超过了临界值, 而且随着浸水时间的增加, 损伤区域比例逐渐增大, 当浸水时间超过 20 天后, 损伤区域比例基本为一常数。损伤区域比例与浸水时间呈渐近线的关系是由于吸水作用存在一个饱和的塑性应变, 最终导致胶层的失稳破坏。

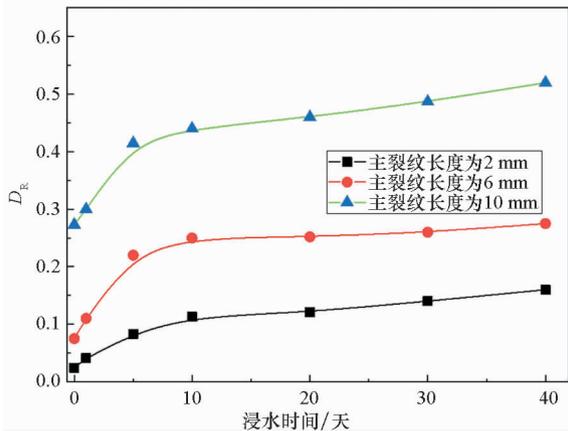


图 10 不同主裂纹长度时损伤区域比例随浸水时间变化的曲线

Fig. 10 Damage zone ratio versus time of immersion for different main crack length

2.3 “湿-热”老化试验后修补结构 J 积分的有限元分析

以黏接补片面裂纹尖端的 J 积分为修补效果的指标, 分析不同裂纹长度时, 吸湿性对修补效果的影响, 如图 11 所示。图 11 中黑色曲线为主裂纹长度 $a_{\text{main}} = 2 \text{ mm}$ 时 J 积分随浸水时间变化的

曲线, 从图中可以看出, 当浸水时间在 5 天以内时, 裂纹尖端的 J 积分幅值变化较小, 因此当裂纹长度较短时, 浸水时间少于 5 天对修补结构的修复效果影响不大, 这是由于浸水时间少于 5 天时, 胶层的延展性一直较小, 对裂纹尖端 J 积分的影响较小。浸水时间超过 5 天后, J 积分值显著增加, 到浸水时间为 40 天时, 其值由 $0.46 \text{ MPa} \cdot \text{mm}$ 增加到了 $0.63 \text{ MPa} \cdot \text{mm}$ 。此时, J 积分的增加量对结构疲劳裂纹扩展寿命的影响较小, 这是因为此时的裂纹尺寸不足以加速疲劳裂纹的扩展, 这一点与 Benyahia^[12] 的结论是一致的。当浸水时间较短时, 吸水性对裂纹尖端的 J 积分和应力强度因子的影响可以忽略; 当浸水时间在 10 ~ 30 天变化时, 随着时间的增加, 吸湿性对修补效果的影响明显, 在这段时间内, J 积分随浸水时间的增加呈线性增加趋势。

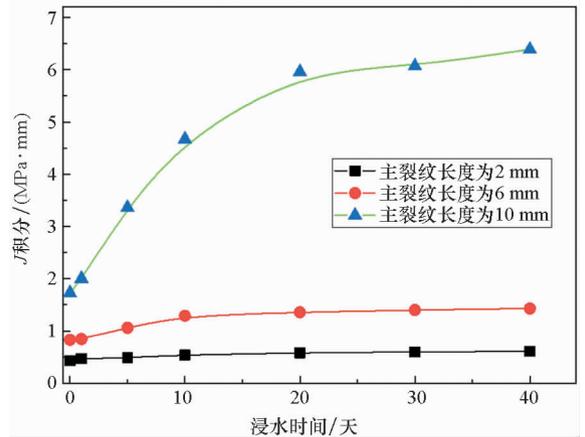


图 11 不同主裂纹长度时 J 积分随浸泡时间变化的曲线

Fig. 11 J integral versus time of immersion for different main crack length

图 11 中红色曲线为裂纹长度 $a_{\text{main}} = 6 \text{ mm}$ 时 J 积分随浸水时间变化的曲线图, 从图中可以看出, 当浸水时间在 10 天以内时, 吸湿性对 J 积分的影响不明显。浸水时间超过 10 天后, 吸湿性的影响逐渐增加, 到浸水 40 天时, 裂纹尖端 J 积分值达到 $1.4 \text{ MPa} \cdot \text{mm}$, 此时会严重缩短修补结构的疲劳裂纹扩展寿命, 降低修补效果。其可能的原因是, 随着浸水时间的增加, 胶层的强度下降, 延展性能增加, 削弱了胶层抗剪切的能力, 最终削弱了胶接区域抵抗破坏的能力。

图 11 中绿色曲线为裂纹长度 $a_{\text{main}} = 10 \text{ mm}$ 时 J 积分随浸水时间变化的曲线图, J 积分随着浸水时间的增加不断增大。裂纹长度越长, 吸湿性对于复合材料胶接修补效果的危害越明显, 到浸水 40 天时, J 积分值达到了 $6.4 \text{ MPa} \cdot \text{mm}$ 。

3 结论

本文通过试验方法获得了复合材料修补试验件胶层失效模式以及胶黏剂在不同浸水时间时的弹塑性能,通过有限元数值方法定义胶层的损伤区域,研究了不同裂纹长度时吸湿性对修补结构胶层损伤的影响,并利用 J 积分分析了吸湿对修补效果的影响,得到了以下结论:

1) 吸湿削弱了复合材料修补结构的极限强度和疲劳裂纹扩展寿命,吸湿后复合材料修补结构的裂纹扩展寿命和极限载荷的平均值分别下降为吸湿前的 71% 和 90%。

2) 吸湿造成了复合材料修补金属裂损结构胶层失效模式的改变,由以内聚破坏为主转变为以界面破坏为主,可以认为胶层老化是复合材料修补裂损结构力学性能下降的主要因素。

3) 吸湿使得胶层材料的塑性变形能力增强,但吸湿造成胶层强度和刚度性能衰减。浸水 30 天后,胶黏剂变为完全塑性,其塑性应变超过了总应变的 25%,弹性模量下降为未老化前的 40%。

4) 胶层损伤的起始和扩展存在两个区域:胶层边缘以及裂纹尖端附近区域。损伤区域受吸湿性作用影响明显,吸湿加速了胶层损伤,且裂纹长度越长,加速作用越明显。

5) 吸湿降低了修补的效果,当浸水时间超过 10 天后,吸湿对修补结构的耐久性危害极大;吸湿使得裂纹尖端的 J 积分值急剧增大,严重缩短了修补结构的疲劳裂纹扩展寿命。

参考文献 (References)

- [1] Parker B N. The strength of bonded carbon fibre composite joints exposed to high humidity [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesive*, 1990, 10 (3): 187–191.
- [2] Megueni A, Tounsi A, Bachir B 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.
- [3] 任三元, 李涛, 鲁国富, 等. 复合材料修补结构腐蚀扩展特性实验研究 [J]. *实验力学*, 2013, 28(3): 360–367.
- REN Sanyuan, LI Tao, LU Guofu, et al. Experimental study of crack growth for pre-corrosion and composite repaired structure [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(3): 360–367. (in Chinese)
- [4] 王跃, 赵书平, 羊军, 等. “湿热”老化对复合材料胶补金属结构力学特性的影响 [J]. *航空材料学报*, 2019, 39(4): 93–100.
- WANG Yue, ZHAO Shuping, YANG Jun, et al. Influences of hydrothermal aging on cracked metallic structure with composite patch [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(4): 93–100. (in Chinese)
- [5] Albedah A, Khan S M A, Benyahia F, et al. Elastic plastic analysis of bonded composite repair in cracked aircraft

- structures [J]. *Journal of Reinforced Plastic of Composites*, 2011, 30(1): 66–72.
- [6] Albedah A, Khan S M A, Benyahia F, et al. Experimental analysis of the fatigue life of repaired cracked plate in aluminum alloys 7075 with bonded composite patch [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 145: 210–220.
- [7] 王跃. 飞机金属裂损结构复合材料胶补参数优化及力学特性研究 [D]. 青岛: 海军航空大学青岛校区, 2017.
- WANG Yue. Research on optimization design and mechanical properties of cracked metallic aircraft structure with adhesively bonded composite patch [D]. Qingdao: Aeronautical and Astronautical Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [8] 王跃, 穆志韬, 李旭东. 基于全试验设计方法的含裂纹铝合金板复合材料修补参数优化 [J]. *复合材料学报*, 2017, 34(10): 2232–2239.
- WANG Yue, MU Zhitao, LI Xudong. Optimisation of composite repair parameters for cracked aluminum alloys plate with the design of experimental design method [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(10): 2232–2239. (in Chinese)
- [9] 王跃, 穆志韬, 刘治国. 复合材料单面修补板裂纹尖端 J 积分的解析预测模型 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(2): 332–339.
- WANG Yue, MU Zhitao, LIU Zhiguo. Analytical model for prediction of J -integral of single-side-patched plates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(2): 332–339. (in Chinese)
- [10] 王跃, 穆志韬, 李旭东, 等. 单向拉伸条件下补片参数对复合材料胶接修复结构的影响 [J]. *材料工程*, 2017, 45(4): 108–112.
- WANG Yue, MU Zhitao, LI Xudong, et al. Influence of patch parameters on adhesively bonded composite repair under uniaxial tensile loading [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(4): 108–112. (in Chinese)
- [11] Benyahia F, Bouanani F B, Albedah A, et al. Effect of water absorption on the adhesive damage in bonded composite repair of aircraft structures [J]. *Materials & Design*, 2014 (57): 435–441.
- [12] Benyahia F, Aminallah L, Albedah A, et al. Experimental and numerical analysis of bonded composite patch repair in aluminum alloy 7075 T6 [J]. *Materials & Design*, 2015 (73): 67–73.
- [13] 齐红宇, 王天龙, 梁晓波, 等. 弯曲载荷下机织复合材料 T 型接头渐进失效分析 [J]. *复合材料学报*, 2016, 33(6): 1161–1167.
- QI Hongyu, WANG Tianlong, LIANG Xiaobo, et al. Progressive failure analysis of woven composite T-joints under bending load [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(6): 1161–1167. (in Chinese)
- [14] 杨孚标. 复合材料修补含中心裂纹铝合金板的静态与疲劳特性研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- YANG Fubiao. The static characteristics and fatigue properties of the center-cracked aluminum plates bonded with composite patches [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [15] 王跃, 熊玉平, 赵霞, 等. 含裂纹铝合金板单面修补结构疲劳裂纹扩展分析 [J]. *推进技术*, 2018, 39(4): 865–871.
- WANG Yue, XIONG Yuping, ZHAO Xia, et al. Analysis of fatigue crack propagation for repaired aluminum alloy plate containing crack with single patch [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(4): 865–871. (in Chinese)
- [16] Bouanani M F, Benyahia F, Albedah A, et al. Analysis of the adhesive failure in bonded composite repair of aircraft structures using modified damage zone theory [J]. *Materials & Design*, 2013 (50): 433–439.