

紫外固化环氧树脂复合材料及其修补性能研究

还大军 刘博 李勇 肖军 陈云雷

(南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京, 210016)

摘要:为了推进紫外固化技术在树脂基复合材料的制备及结构修补中的应用,制备了紫外固化环氧树脂基复合材料并进行力学性能测试和微观组织分析。在此基础上,采用紫外固化复合材料对含人工缺陷的层合板试样进行了修补。结果表明,与热固化复合材料相比,采用紫外固化技术制备的复合材料具有良好的综合力学性能,复合材料中树脂基体与纤维之间结合良好;紫外固化复合材料制成的修补贴片对缺陷试样的修补效果显著,修补后试样的拉伸强度可以达到标准试样的 84.1%,是缺陷试样的 1.21 倍。实验证明采用紫外固化复合材料修补贴片对缺陷进行修补是一种快速、有效的修补方法。

关键词:环氧树脂;复合材料;紫外固化;力学性能;修补

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)04-0638-08

Mechanical Properties and Repairing Performance of UV-curing Epoxy Composite

Huan Dajun, Liu Bo, Li Yong, Xiao Jun, Chen Yunlei

(College of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: In order to promote the application of UV-curing technology, the mechanical properties and the microstructure of the UV-curing epoxy composite are studied. On this basis, the UV-curing epoxy composite is used to repair the pre-damaged laminated beams for studying its repairing performance. The results reveal that, the mechanical properties of the UV-curing epoxy composite are favorable, compared with the thermal curing composite, and the bonding between resin matrix and fiber is good. The UV-curing epoxy composite patches significantly increase the tensile strength of the damaged laminated beams, and the strength of the repaired samples can reach 84.1% of the standard samples and is 1.21 times the strength of the unrepaired samples. Fiber reinforced UV-curing resin is a fast and effective method for repairing damaged composite laminates.

Key words: epoxy resin; composites; UV-curing; mechanical properties; repair

先进树脂基复合材料具有比强度高、比模量高,可设计性强,抗疲劳强度和环境稳定性好,适于整体设计和制造等独特的优点,备受国内外航空、航天工业的青睐,应用日益广泛。复合材料结构在生产制造和使用过程中不可避免地会存在缺陷或遭受损伤,影响结构的安全服役,为了满足构件的正

常使用或延寿的需要,必须对受损部位进行维修或更换。复合材料的修理方法可分为机械修理和粘接修理两大类,粘接修理方法作为一种优质、高效的修理方法在复合材料结构损伤修理中得到广泛应用^[1-2]。对于大型复合材料构件,如飞机结构、风电叶片等,其维修经常需要在外场条件下完

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAA01B02)资助项目。

收稿日期: 2013-11-25; **修订日期:** 2014-01-16

通信作者: 还大军,男,讲师, E-mail: huandj@nuaa.edu.cn。



图2 紫外固化设备图

Fig. 2 Device for UV-curing

由紫外光光源、反光罩、工作台、风扇等部分组成。紫外光光源采用1 000 W 高压汞灯,由东莞市尔谷光电科技有限公司生产,该灯光谱范围在350~450 nm 之间,主峰值为365 nm。紫外灯固定在可上下移动的水平支架上,可通过调节紫外灯与被固化样品之间的辐射距离来改变样品表面的紫外光强度,辐射距离越小紫外光强度越大。前期的实验研究表明,当辐射距离为12 cm 时,树脂具有较好的固化效果。此外,在光固化过程中,树脂中的光引发剂会吸收一定量的紫外光,且紫外光在固化样品中传播时会发生折射、反射等现象造成能量损失,使得一定深度处的紫外光强度小于表面的紫外光强度,影响整体固化效果。为此采用上下两盏紫外灯对试样的上下表面同时进行光照。

树脂的热固化在上海精密试验设备有限公司生产的DHG-9246A 型电热恒温鼓风干燥箱中进行。

试样的力学性能测试均采用深圳新三思公司的CMT5105 型电子万能试验机,最大量程100 kN。

树脂体系的粘度测试采用上海衡平仪器仪表厂的SNB-2 型旋转粘度计,1号转子,温度25℃。

2.3 复合材料试样制备

本文采用手糊工艺制备复合材料层合板,共铺叠10层。

采用上下两块平整的玻璃板作为模具,上模板开有用于安装真空装置的圆孔,如图3所示。固化时物料置于两模板中间,利用耐高温密封胶带将两模板密封,采用抽真空的方式将铺叠好的物料加压至0.1 MPa,保压至固化结束。分别采用紫外固化和热固化两种方式对物料进行固化,由于紫外固化速率较快,为使树脂能够充分流动,在开始光照前,先将物料加压至0.1 MPa 并保压10 min,再进行光照固化。

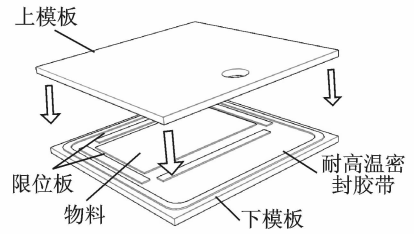


图3 固化装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of curing equipment

紫外固化用树脂体系的成分配比将通过实验确定。考虑到紫外光在树脂及玻璃纤维中传播时其能量会大幅度下降,为使内层树脂同样达到较高的固化度并保证层间的结合强度,采用以下两种固化工艺制备复合材料层合板:(1)直接铺叠10层物料,然后置于两盏紫外灯之间,物料表面到灯管的距离为12 cm,双面光照5 min 一次完成固化;(2)固化过程分为两步,先铺叠5层物料,置于紫外灯下12 cm 处单面光照20 s(使表层树脂中部分光引发剂被激发,同时树脂并不达到很高的固化度),然后在光照一面再铺叠5层物料,完成10层铺叠,同样置于两盏紫外灯之间12 cm 处,双面光照5 min 完成固化。

热固化采用的树脂体系为质量比环氧树脂E51:650 聚酰胺固化剂:活性稀释剂660A=100:80:12,固化工艺为65℃,保温3 h。

2.4 缺陷试样的制备及修补

考虑到修补材料应与原材料体系相同,且性能处于同一水平^[19],本文采用玻璃纤维增强环氧树脂层合板作为修补试样母材。人工缺陷的制造模拟挖补工艺进行,挖补作为一种永久性的修补方法,在复合材料结构的修补中广泛使用,在挖补工艺中,切除部分通常为损伤区域的外接圆,在某些情况下也可采用矩形或椭圆形^[20],为便于后续修补试验的开展,本文选择圆角矩形作为人工缺陷的形状,缺陷试样几何尺寸如图4所示。缺陷试样分为3组,分别用于紫外固化修补试验、热固化修补试验及空白对比试验。

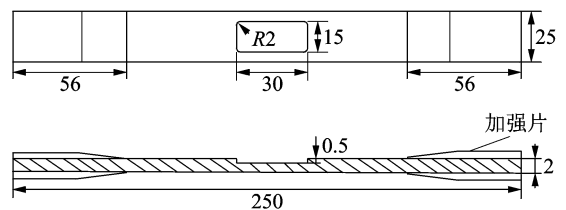


图4 缺陷试样示意图

Fig. 4 Schematic diagram of notched specimen

采用手糊工艺对缺陷试样进行修补,修补材料为高硅氧平纹织物增强紫外固化环氧树脂基复合材料,共 3 层。在修补过程中,补片在缺陷区域四周应有一定的延展,使补片与原试样之间形成搭接,以获得更好的修补效果^[12]。为此,设计 3 层补片的尺寸分别为 30 mm × 15 mm, 35 mm × 20 mm, 40 mm × 25 mm。修补前,先用砂纸对试样缺陷区域进行打磨,使缺陷边缘有一定的坡度,同时增加缺陷四周搭接表面的粗糙度,增加粘接强度。将铺覆好修补材料的试样置于紫外灯下,光照 5 min 完成固化。对于热固化修补试样,采用上述相同的修补工艺,修补材料及固化工艺同 2.3 节中的热固化复合材料体系。

2.5 力学性能测试

拉伸试验和弯曲试验分别参照 GB 1447—83《玻璃纤维增强塑料拉伸性能试验方法》和 GB 1449—83《玻璃纤维增强塑料弯曲性能试验方法》实施,试验在室温干燥环境下进行,加载速率为 2 mm/min。

3 结果分析与讨论

3.1 环氧树脂紫外固化体系研究

图 5 给出了相同固化条件下(固定活性稀释剂的含量为 10 份)树脂固化度与光引发剂含量之间的关系。由图 5 可以看出,随着树脂体系中光引发剂含量的增加,树脂体系的固化度呈上升趋势并逐渐趋于平缓,表明提高树脂体系中光引发剂的含量可在相同的固化条件下提高树脂的固化度。这主要是因为随着光引发剂含量的增加,光照后产生的阳离子活性种也随之增多,从而加快了环氧树脂进行阳离子开环聚合反应的速率。但光引发剂的含量并非越多越好,当树脂体系达到一定固化度后,由于先形成的交联网络的限制,阳离子活性种和环氧基团的运动受到阻碍,从而限制了环氧树脂的开环聚合反应速率。

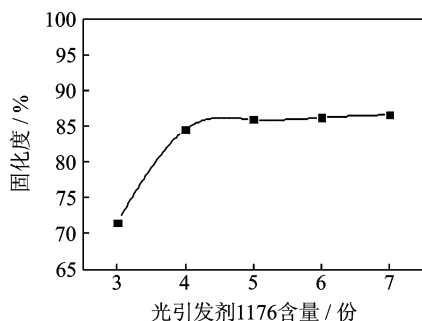


图 5 树脂固化度与光引发剂含量的关系

Fig. 5 Plot of resin curing degree and photoinitiator amount

图 6 给出了相同固化条件下(固定光引发剂的含量为 5 份)树脂固化度与活性稀释剂含量之间的关系。由图 6 可以看出,在其他条件相同的情况下,树脂的固化度随稀释剂含量的增加表现为先上升后下降的规律,这主要是因为:一方面,活性稀释剂的加入可以显著降低树脂体系的粘度,使阳离子活性种和环氧基团的运动更容易,从而加快了环氧树脂的开环聚合反应速率;另一方面,活性稀释剂的加入降低了树脂体系中环氧树脂的含量,活性稀释剂本身虽然具有一定的反应活性,但与环氧树脂相比其反应活性较低,因此使整个树脂体系的反应活性降低,相同固化条件下树脂体系的固化度下降。

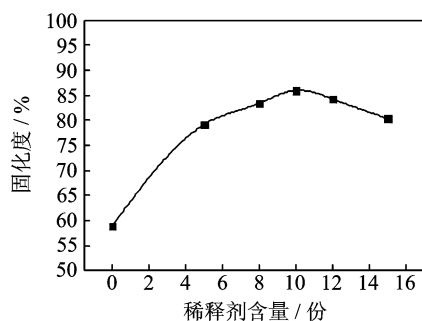


图 6 树脂固化度与稀释剂含量的关系

Fig. 6 Plot of resin curing degree and active diluent amount

综合以上两方面考虑,最终确定紫外固化树脂体系的配方为质量比环氧树脂 E51 : 活性稀释剂 660A : 光引发剂 1176 = 100 : 10 : 5。图 7 为该树脂体系光照不同时间后的红外光谱图,由图中环氧基团(913 cm^{-1})相对于苯环(1610 cm^{-1})相对吸光度的变化可以计算出,光照 150 s 后树脂的固化度即可达到 93.15%;同时,该树脂体系具有较低的粘度,其在 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的粘度为 $0.75\text{ Pa}\cdot\text{s}$,便于手糊成型工艺的实施。

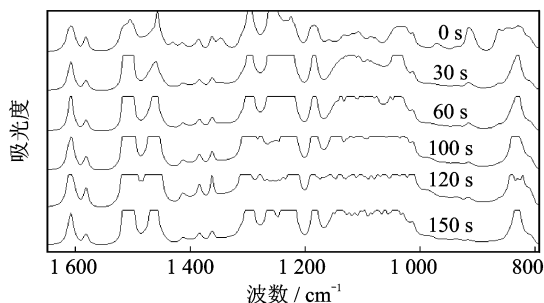


图 7 光照不同时间树脂体系的红外光谱图

Fig. 7 FT-IR spectra of resin system with different illumination time

3.2 紫外固化复合材料力学性能及与热固化复合材料性能比较

采用紫外固化技术制备复合材料时,由于紫外光本身的穿透能力较差,同时增强材料的存在使得紫外光在复合材料制件中的传播比在纯树脂体系中复杂得多,这些都使得固化深度成为制约紫外固化技术应用于复合材料制备的关键因素。为了克服这一难点,本文采用紫外二次固化工艺制备复合材料并进行研究。紫外固化、紫外二次固化及热固化复合材料的力学性能测试结果列于表1。

表1 复合材料力学性能测试结果

Tab. 1 Results of mechanical tests of composites

复合材料	拉伸 强度/ MPa	拉伸 模量/ GPa	弯曲 强度/ MPa	弯曲 模量/ GPa
紫外固化	101.68	16.43	226.76	14.73
紫外二次固化	100.87	16.46	248.18	15.19
热固化	97.53	14.07	162.90	12.26

由表1中数据可以看出,采用紫外固化工艺制备的环氧树脂基复合材料具有良好的综合力学性能,其拉伸强度较热固化复合材料分别提高了4.3%和3.5%,拉伸模量分别提高了16.8%和17.0%,弯曲强度分别提高了39.2%和52.4%,弯曲模量分别提高了20.1%和23.9%,而其固化时间仅为5 min,相对于热固化工艺大大缩短了固化时间。

比较两种不同紫外固化工艺制得的试样的力学性能可以发现,采用二次固化工艺制得的试样其拉伸性能与一次直接固化制得的试样相差不大,而其弯曲强度和模量较一次直接固化制得的试样分别提高了9.4%和3.1%,表明在手糊铺叠过程中适当的光照处理有利于复合材料弯曲性能的提高。这是因为:紫外固化反应的能量主要来源于紫外光辐射能量,而紫外光的穿透能力弱,由于树脂中光引发剂的吸收以及发生折射、反射等现象将造成其能量的大幅下降,使得一定深度处的紫外光强度低于表面的紫外光强度,虽然本文采用双面固化工艺,但样品中间层的紫外光强度仍低于表面层,造成复合材料的固化不均匀,中间层树脂的固化度低于表面层,影响其力学性能;由于阳离子光固化具有“后固化”特性,固化过程中切断光源固化并不会马上停止,而仍以较快速率进行,因此采用紫外二次固化工艺,在手糊铺叠过程中进行适当的光照处理,将使复合材料内层树脂中部分光引发剂被激发,引发内层树脂的固化反应,从而可有效提高复合材料内层树脂的固化度,使固化更均匀,在一定

程度上提高了复合材料的力学性能。这一结论对克服厚度对紫外固化技术应用于复合材料制备中的限制具有重要的意义。

综上所述,将紫外固化技术用于环氧树脂基复合材料的制备是切实可行的,制得的复合材料具有良好的综合力学性能,同时,相对于传统热固化可大大缩短固化时间;采用紫外固化技术制备复合材料时,合理安排固化工艺可在一定程度上进一步提高材料的性能。

3.3 复合材料的微观组织分析

对于纤维增强树脂基复合材料,增强纤维与树脂基体间的界面结合效果对复合材料的性能有很大的影响。图8(a,b)分别为采用紫外固化工艺及紫外二次固化工艺制备的复合材料试样拉伸断口的SEM照片。从照片中可以观察到,两种固化工艺下,复合材料的微观组织无明显区别:复合材料中树脂基体和纤维分布均匀,垂直于断口方向上纤维断裂较整齐,断口处仅有少量纤维拔出,拔出纤维的长度均较短,且纤维上粘附有少量树脂;断口处纤维除部分从树脂基体中拔出外,其他纤维依然较紧密地粘接为一个整体,表明复合材料中纤维和树脂基体是作为一个整体发生断裂而并非各自独立的破坏,树脂基体对纤维起到了很好的粘接作用,并可较好地传递载荷,使纤维受力均匀,充分发挥了纤维的增强作用,因而复合材料具有良好的力学性能。图8(c)为热固化复合材料拉伸断口的SEM照片,可以看出:其微观组织总体上与上述两种固化工艺制得的复合材料相同,纤维与树脂基体间有良好的结合,但同时也可以明显地观察到,其断口中存在较长的纤维拔出,且拔出的纤维表面光滑,无明显的树脂粘附,表明复合材料中纤维与树脂基体间的结合不如紫外固化工艺及紫外二次固化工艺制备的复合材料;同时,从SEM照片中还可以观察到,热固化复合材料中存在少量气泡,这主要是因为,热固化采用的树脂体系固化温度较低,室温条件下树脂粘度随时间变化明显,手糊成型过程中可明显感觉到树脂粘度变大,浸润性下降。图9为25℃时树脂粘度与时间的关系,可以看出,树脂的粘度随时间的增加明显变大。由于树脂具有较大的粘度,且固化采用真空加压的方式,未能施加足够的压力,从而使树脂中少量气泡在固化工程中难以逸出而残留在复合材料中。微观结构的差异将导致热固化复合材料的力学性能低于紫外固化工艺及紫外二次固化工艺制备的复合材料,这与3.2节中力学性能的测试结果相吻合。

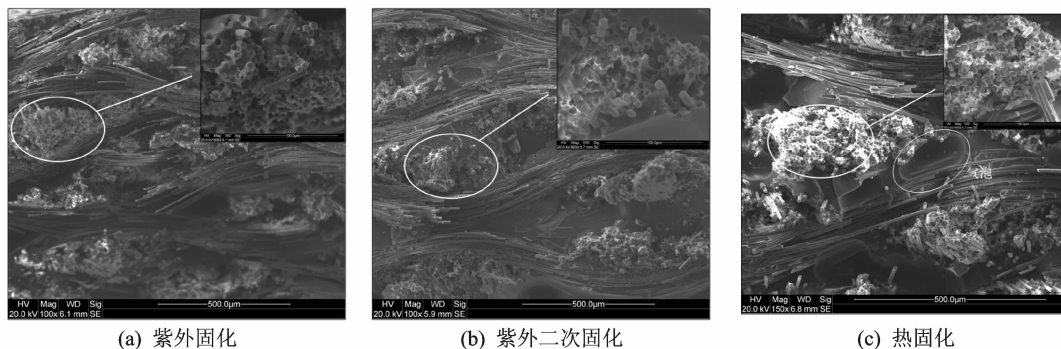


图 8 不同固化工艺制备的复合材料拉伸断口 SEM 照片

Fig. 8 SEM images of tensile fracture of composites with different curing crafts

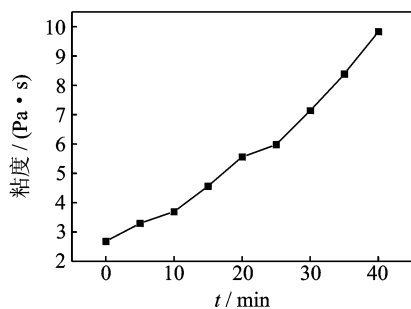


图 9 热固化树脂粘度与时间的关系

Fig. 9 Plot of viscosity of thermal cured resin and time

3.4 紫外固化复合材料修补性能

修补试样、未修补空白对比试样及标准试样拉伸性能的测试结果列于表 2。

表 2 不同试样拉伸性能测试结果

Tab. 2 Tensile test results for different specimens

试样	接伸强度/ MPa	标准差值/ %
紫外固化修补试样	124.43	6.4
热固化修补试样	131.72	2.0
未修补试样	102.89	5.2
标准试样	147.91	8.8

由表 2 中的数据可以看出,缺陷未修补试样的拉伸强度仅为标准试样的 69.6%,缺陷对材料的力学性能影响较大;修补后试样的拉伸强度相对于未修补试样均有显著的提高,紫外固化修补试样的拉伸强度可达到标准试样的 84.1%,是缺陷试样的 1.21 倍,与热固化修补试样相当,表明紫外固化修补贴片对含缺陷母材力学性能的恢复具有显著的效果。

复合材料挖补修理后,其拉伸试样的失效形式有多种类型^[21],常见的主要有图 10 所示的 3 种类型:(a)补片与基体脱胶,这是因为补片固化完好,强度与完整基体差距较小,所以,界面处变得较为

薄弱,容易最先失效;(b)外部的几层补片断裂、下部补片与基体脱胶,这是因为整个补片是逐层递增的,外部的几层补片较薄,容易断裂,在断裂的直线位置上,下面是基体,其整体强度较好且与补片属于粘接而并不是一个整体,因此补片处的裂纹扩展不到基体上,而界面处的粘接强度低于基体,故断裂沿粘接界面展开;(c)断裂发生在基体处,在这种情况下,补片与基体粘接强度较好,补片加强了打磨斜接处基体的强度,因而在拉伸过程中基体会在斜接开始的位置产生裂纹,从而引发基体断裂,此种破坏形式修补效果较好。

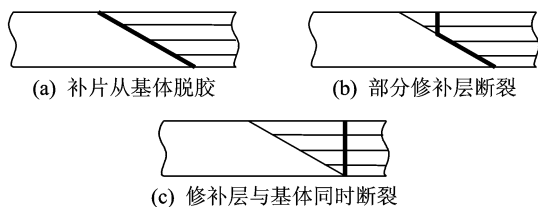
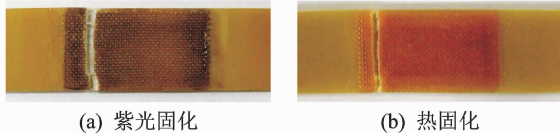


图 10 挖补试样的典型破坏位置

Fig. 10 Typical fracture regions in repaired specimens

观察拉伸破坏后的两种修补试样发现,修补试样的破坏形式均表现为图 10(c)所示破坏类型:破坏发生在缺陷区域的边缘处,试样断裂后,修补贴片与母材一起发生断裂,而并未整体从母材上脱落或发生部分修补层断裂,表明补片与母材之间具有良好的结合,其在拉伸过程中并没有与母材发生脱粘分层,在试样破坏前始终参与受力,修补效果好,故修补后试样的力学性能有显著的恢复;同时,紫外固化修补试样与热固化修补试样具有相同的失效形式,因此采用两种修补方式修补的试样力学性能相当。拉伸破坏后修补试样的破坏区域如图 11 所示。

此外,修补试样的破坏均发生在预先加工的人工缺陷边缘处。这一方面是因为该部位母材厚度



(a) 紫光固化

(b) 热固化

图 11 拉伸破坏后修补试样的破坏区域

Fig. 11 Fracture regions of broke specimens under tensile

有明显的变化,在拉伸过程中有一定的应力集中,裂纹首先在该部位产生并扩展;同时,由于修补采用的是手糊成型工艺,且缺陷边缘处并未加工很大的坡度,在该区域容易产生富树脂区域或微小的空隙,影响其性能,故断裂容易发生在该区域。

综合修补试样的拉伸强度和破坏模式两方面可以看出,紫外固化复合材料对缺陷试样具有良好的修补效果,采用紫外固化复合材料修补贴片对缺陷进行修补是一种快速、有效的修补方法。

4 结 论

(1)采用紫外固化技术制备的环氧树脂复合材料具有良好的综合力学性能,其拉伸性能和弯曲性能均优于采用热固化工艺制备的复合材料,而固化时间仅为 5 min,相对于传统热固化工艺大大缩短了固化时间。

(2)采用紫外二次固化工艺对制得的复合材料的力学性能没有明显的不利影响,反而会使复合材料的弯曲性能得到一定的提高。

(3)采用紫外固化工艺和紫外二次固化工艺制备的复合材料其微观组织并没有明显的差别,复合材料中树脂基体和纤维分布均匀,树脂基体与纤维之间的结合良好,可较好地传递载荷,纤维受力均匀,充分发挥了纤维的增强作用;鉴于复合材料厚度对紫外固化的影响,采用分次紫外固化方式对于克服对紫外固化技术应用于厚层复合材料制备中的限制具有重要的意义。

(4)紫外固化复合材料对含有人工缺陷的层合板试样具有良好的修补效果,采用紫外固化复合材料修补贴片对缺陷进行修补是一种快速、有效的修补方法。

参考文献:

[1] 张玓, 杨晓华, 周凯, 等. 复合材料补片参数对修理后金属结构疲劳性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(3): 369-373.

Zhang Ding, Yang Xiaohua, Zhou Kai, et al. Effects of patch parameters on fatigue performance of metal-

lic structure repaired with adhesively bonded composite patch[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(3): 369-373.

[2] 郑立胜, 李远才, 董玉祥. 飞机复合材料粘接修理技术及应用[J]. 粘接, 2006, 27(2): 51-52.

Zheng Lisheng, Li Yuancai, Dong Yuxiang. Investigations and applications of advanced bonded repair technique for aircraft composite structures[J]. Adhesion in China, 2006, 27(2): 51-52.

[3] 薛岭, 张杰. 复合材料风电叶片检查维护及维修[J]. 风能, 2012(7): 92-95.

Xue Ling, Zhang Jie. Inspection, maintenance and repair of composite material wind turbine blade[J]. Wind Energy, 2012(7): 92-95.

[4] 聂俊, 何勇, 孙梦洲. 紫外阳离子光固化研究进展[J]. 涂料技术与文摘, 2007, 28(10): 1-4.

Nie Jun, He Yong, Sun Mengzhou. Progress in cationic UV-curing[J]. Coatings Technology & Abstracts, 2007, 28(10): 1-4.

[5] Golaz B, Michaud V, Leterrier Y, et al. UV intensity, temperature and dark-curing effects in cationic photo-polymerization of a cycloaliphatic epoxy resin[J]. Polymer, 2012, 53(10): 2038-2048.

[6] 王新伟, 李菲菲, 任妮, 等. 氢化双酚 A 型环氧树脂及其复合材料光固化研究[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(3): 171-176.

Wang Xinwei, Li Feifei, Ren Ni, et al. UV-curing of hydrogenated bisphenol A based epoxy resin and its composites[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(3): 171-176.

[7] Putzien S, Louis E, Nuyken O, et al. UV curing of epoxy functional hybrid silicones[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 126(4): 1188-1197.

[8] Park H J, Ryu C Y, Crivello J V. Photoinitiated cationic polymerization of limonene 1, 2-oxide and α -pinene oxide[J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2013, 51(1): 109-117.

[9] Tehfe M A, Lalevée J, Morlet-Savary F, et al. Near UV-visible light induced cationic photopolymerization reactions: A three component photoinitiating system based on acridinedione/silane/iodonium salt[J]. European Polymer Journal, 2010, 46(11): 2138-2144.

[10] Bulut U, Kolay M, Tarkuc S, et al. Quinoxaline derivatives as long wavelength photosensitizers in photoinitiated cationic polymerization of diaryliodonium salts[J]. Progress in Organic Coatings, 2012, 73(2): 215-218.

[11] Sangermano M, Messori M, Rizzoli A, et al. UV-cured epoxy coatings modified with perfluoropoly-

- ether-based materials[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2010, 68(4): 323-327.
- [12] Li G, Pourmohamadian N, Cygan A, et al. Fast repair of laminated beams using UV curing composites[J]. *Composite Structures*, 2003, 60(1): 73-81.
- [13] Li G, Hedlund S, Pang S S, et al. Repair of damaged RC columns using fast curing FRP composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2003, 34(3): 261-271.
- [14] Li G, Ghebreyesus A. Fast repair of damaged RC beams using UV curing FRP composites[J]. *Composite Structures*, 2006, 72(1): 105-110.
- [15] 魏东, 刘成武, 魏自明, 等. 光固化复合材料补片在飞机蒙皮修复中的应用[J]. *航空制造技术*, 2003(7): 65-67.
- Wei Dong, Liu Chengwu, Wei Ziming, et al. Application of ultraviolet curing composite patch in aircraft skin repair[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2003(7): 65-67.
- [16] 魏东, 韩斐, 刘成武. 一种飞机结构快速修理新材料的研究[J]. *包装工程*, 2011, 32(23): 150-153.
- Wei Dong, Han Fei, Liu Chengwu. Development of new material for fast repair of aircraft structure[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(23): 150-153.
- [17] 洪啸吟, 冯汉保. 鎗盐阳离子光敏聚合[J]. *高分子通报*, 1989(1): 17-23.
- Hong Xiaoyin, Feng Hanbao. Cationic photopolymerization initiated with onium salts[J]. *Polymer Bulletin*, 1989(1): 17-23.
- [18] 潘祖仁. 高分子化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- Pan Zuren. *Polymer chemistry*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [19] 陈邵杰. 复合材料结构修理指南[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- Chen Shaojie. *Manual of repair of composite structures*[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001.
- [20] 邹国发, 马军. 树脂基复合材料层压板结构挖补修理技术[J]. *洪都科技*, 2003(4): 12-18.
- Zou Guofa, Ma Jun. Cutting & repairing technique for resin-base composite material elaminated-plank[J]. *Hongdu Science & Technology*, 2003(4): 12-18.
- [21] 纪朝辉, 刘阔, 李娜, 等. 挖补修理对复合材料层合板拉伸性能的影响[J]. *中国民航大学学报*, 2013, 31(3): 50-53.
- Ji Chaohui, Liu Kuo, Li Na, et al. Tensile performance of bonded scarf repair of composite panel[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2013, 31(3): 50-53.