

非常规固化技术在飞机复合材料维修中的应用

Application of Unconventional Curing Technology in Aircraft Composites Maintenance

中国民航飞行学院航空工程学院 秦文峰



秦文峰

博士, 讲师, 主要从事复合材料结构修理与表面技术相关的教学与科研。

复合材料以其轻质、高强、高刚、耐腐蚀等优点, 成为民用飞机结构材料的生力军^[1]。先进民用飞机在结构中大量地使用了复合材料, 主要部位有: 整流包皮、副翼、发动机

随着复合材料在飞机中应用比重的不断扩大, 以及飞机应用领域和部件的发展, 复合材料的低成本维修技术显得越来越重要, 随之高新的非常规固化技术也将不断拓展。因此, 可以预见, 未来的复合材料的胶结固化修理研究将以非常规固化技术为核心展开。

机罩、阻力板、扰流器、起落架舱门、水平和垂直尾翼、方向舵及其他主要及次要承力结构件等。其非同寻常的物理特性和可设计性, 以及近年来生产成本的降低, 加速了飞行器结构选材从金属材料向复合材料转变的进程。复合材料可使飞机结构减重 10%~40%、结构设计成本降低 15%~30%。面对较高的燃油价格和越来越严格的污染物排放标准, 复合材料能使飞机减重的优点显得尤为重要^[2]。如 B777 飞机复合材料用量

已占整机结构重量的 11%。B787 飞机主要结构件全部采用复合材料, 结构重量中复合材料占到了 50%。从民用飞机使用复合材料的情况来看, 复合材料在飞机上的用量和应用部位已成为衡量飞机结构先进性的重要指标之一。

飞机复合材料结构在鸟撞、雷击、弹伤以及维护或操作不当情况下, 非常容易发生损伤, 如分层、缺口、裂纹、破孔和断裂等^[3]。这些损伤会显著降低飞机复合材料的静、动

态承载性能,严重时直接威胁飞机的安全。传统的机械修理方法是把金属补强板用铆接或螺接的方法在损伤部位进行局部补强。这种修理方法的突出缺点是结构重量增加很多,并且由于在修理过程中需要对原结构开孔,会形成新的应力集中源,导致结构提前开裂破坏。胶结修理技术由于具有结构增重小、成型性能好、抗疲劳和耐腐蚀性能好、修理时间短、成本低等优点,在飞机复合材料结构维修中得到了应用,并取得了良好的经济效益。然而,一般的胶结修理,在固化过程中存在传热速度慢、温度梯度大、固化不均匀和固化速度低等缺陷,从而导致修补设备复杂、维修环境要求苛刻,难以实现快速、高质量的维修需要。近年,在飞机复合材料结构胶结修理中引入非常规固化技术,不仅可有效提高维修质量,缩短维修周期,而且体现出节能、环保等诸多优点,其作为实现绿色工艺的手段之一而受到人们的广泛重视。

电子束固化技术

众所周知,离子辐射作用本质上是将能量转移给靶子材料中的电子,使这些电子从原子中逸出而得到正电荷离子和自由电子,或者使电子运动到更高能级轨道产生被激活的原

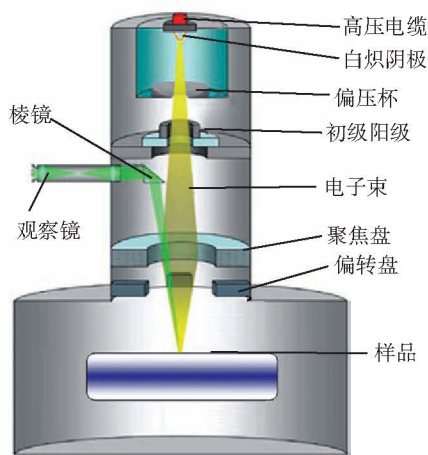


图1 一般电子束固化系统

子和分子。这些离子、电子和活性粒子就成了产生某些神奇化学变化的内因。一般电子束固化系统见图1。

树脂基复合材料中的树脂采用电子加速器,给电子以足够的能量,照射树脂体系,高能电子撞击 C-H 键,给分子以足够的能量,使原有的热平衡破坏,使某些键断裂放出 H 原子和带有被激活 C 原子的分子,形成活性中间体,如离子、电子、自由基等。当此过程发生在两相邻分子之间或相近位置时,被激活的 C 原子就可能释放出活化能而形成化学键,使两分子之间会产生交联反应而固化。因此通过离子辐照就能使聚合物发生合成、改性或降解等反应。当然聚合物所发生的反应程度取决于聚合物本身、固化剂、促进剂和稳定剂之间的复杂化学反应^[4]。与普通的热固化方式相比,电子束固化具有可室温或低温固化、固化时间短(几秒到几分钟)和可选择区域固化等优点。它不仅可完全避免热修理中“热应力”所引起的构件翘曲变形和脱粘,而且由于电子束固化温度接近室温,可以忽略不同材料在流动性、线胀系数等方面的差异,因此,可用于粘接性能差异很大的材料。除此之外,电子束固化用的胶粘剂一般对“热”不敏感,因此其固化材料可在室温下长期贮存,便于保管。

加拿大航空公司于 20 世纪末计划实施一系列的典型试验研究以评价电子束技术用于复合材料结构修理的可行性和经济效益。用于研究的第一个部件是空中客车 A320 飞机上的整流罩。该整流罩是由玻璃纤维和环氧树脂在 120℃ 热固化制造而成的。试验件选用的电子束 1L0-ORNL 固化树脂和胶粘剂 11L-ORNL。试验件铺层数均为 8 层,铺层方向均为 0°。电子束固化在辐射剂量 150kG 和真空压力下进行,固化约 30min。取得了良好的效果^[5]。

随着电子及电磁技术的进步,电

子加速器的性能及外形尺寸都有了很大的进步。美国 SRC 公司开发出了一系列便携式高能电子加速器,使电子束固化外场修补复合材料成为可能^[6]。但由于目前电子束设备还比较昂贵,其操作的安全性还有待进一步考证,所以作为一种有前途的修理技术,电子束固化修理目前还处于研究试用阶段。

微波固化技术

材料在微波作用下会产生升温、熔融等物理现象,同时还会发生化学反应。对于微波固化的原理,主要有“致热效应”和“非致热效应”两种解释。“致热效应”认为微波固化是由于微波使材料反应温度升高,从而加速反应所致;而“非致热效应”认为微波固化是由于微波辐射场对离子和极性分子的洛仑兹力作用所致。传统观点认为微波固化可以加速化学反应主要是由于“致热效应”所致,即材料在外加电磁场作用下内部介质发生极化,产生的极化强度矢量落后于外电场一个角度,导致与电场相同的电流产生,构成了材料内部的功率耗散,从而将微波能转变成热能。微波处理材料的吸收微波特性一般是不一致的,材料与微波电磁场相互耦合,会形成各种功率耗散从而达到能量转化的目的,不同材料的吸波特性见图 2。微波加热不同于一般的外部热源由表及里的传导式加热,是被加热物体在电磁场中由于介质损耗引起“体积加热”,因此微波修理具有传热均匀、加热效率高、固化速度快、易于控制等优点^[7]。

代永朝根据微波快速固化、均匀制热的机理,研制开发了新型复合材料微波快速粘接修复系统,并进行了修补试验。试验结果表明,该技术完全满足飞机等装备一般结构件的修复要求,并且显著缩短了一般结构件的修复时间^[8]。

微波修复技术应用的关键是便

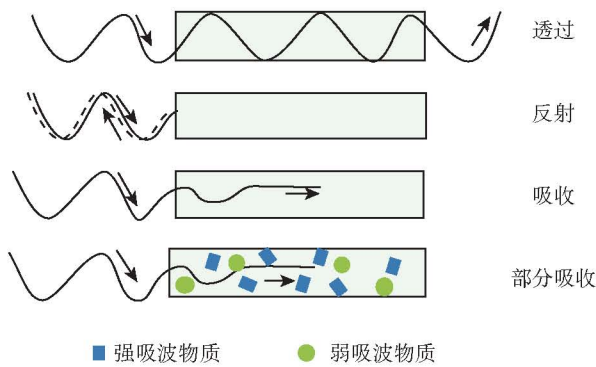


图2 不同材料的吸波特性

携式的微波修复机和微波结构胶粘剂的研制。许陆文等和空军第一航空学院合作^[9],成功地研制开发了便携式微波修复机(频率为2.45GHz、功率为200W)和数种微波施加器。利用这种设备,以短纤维/环氧胶作修复胶,修复了带孔碳纤维/环氧和玻纤/环氧复合材料,固化时间仅为20~24s。固化修复后,复合材料构件拉伸强度可达原构件的80%以上。经试验证实,该技术对金属复合材料粘接修理和复合材料结构的粘接修理,都具有优异的效果。

紫外光固化技术

紫外线光(UV)固化是利用光引发剂(光敏剂)的感光性、在紫外线光照射下光引发形成激发态分子,分解成自由基或是离子,使不饱和和有机物进行聚合、接枝、交联等化学反应达到固化的目的^[10]。

从理论上讲,各种波长的光段都可以引发固化反应,但目前主要以紫外固化修理为主。该技术使用便携式的紫外光源(或光固化修复机)辐照光敏胶的修复区引发快速固化。紫外固化也可在室温和低温下固化,且固化速度也很快,紫外固化修理更为简便,对设备的要求也最低,紫外光线(UV)固化在复合材料制备过程中得到了广泛应用。

疲劳裂纹的萌生和扩展是材料在变载荷作用下的主要失效形式。试验针对飞机光固化复合材料修理

补片的疲劳寿命进行了测试,并考核了不同修理工艺(半宽度胶接、全宽度胶接及铆接修理)试样的疲劳寿命,为确定最佳修理工艺提供了试验依据。光固化复合材料补片的修理方法可以明显地延缓疲劳裂纹的起始扩展,修理后试样与未修理试样相比,疲劳寿命增加了一倍。该修补方法大大降低了裂纹扩展速率,可承受使用期限内的疲劳载荷,而不发生胶接破坏^[11]。在X军机机翼下壁板的疲劳载荷谱疲劳试验中,光固化修补试件疲劳寿命高于金属补片铆接修补的疲劳寿命,全宽度光固化复合材料补片胶接修补试件疲劳寿命略高于半宽度光固化复合材料补片胶接修补试件的疲劳寿命。

魏东^[12]介绍了用光敏树脂浸渍纤维增强材料制成柔性预浸料修理补片,以胶接的方法贴补到飞机蒙皮的损伤区,在紫外光的照射下迅速固化,从而实施快速修复的一种方法。从测试结果可以看出,补片的固化时间、剪切强度等性能均达到预定指标,可以满足飞机蒙皮快速抢修的要求。通过对某型飞机机翼下壁板蒙皮裂纹的修复,表明该修补方法大大降低了裂纹的扩展速率,在使用期限内承受疲劳载荷的条件下未发生胶接破坏。也适用于民用机械设备的快速修复,并已在气泵铝合金导管、油箱等设备的修复中得到应用。此项技术具有设备简单、结构增重小、修补强度高、易于成形、通用性强、操作简便的特点。

但紫外固化目前还存在以下几个缺点:一是目前所使用的紫外固化胶剪切强度偏低(普遍低于20MPa),只能适用于一些轻微损伤

的修理;二是对粘接体系的颜色及透光性要求较高,大部分设备的辐照深度不足2mm,只能用于表层处理。因此开发高强度的紫外光敏胶和提高紫外固化辐射深度将是该技术研究的发展方向。

结束语

随着复合材料在飞机中应用比重的不断扩大,以及飞机应用领域和部件的发展,复合材料的低成本维修技术显得越来越重要,随之高新的非常规固化技术也将不断拓展。因此,可以预见,未来的复合材料的胶结固化修理研究将以非常规固化技术为核心展开。

参考文献

- [1] 黄汉生. 复合材料在飞机主结构的应用动向. 化工新型材料, 2004, 32(10): 51-52.
- [2] 冯军. 复合材料技术在当代飞机结构上的应用. 航空制造技术, 2009, 22: 40-42.
- [3] 羊海棠, 吕群, 方征平. 聚合物基自修复材料研究进展. 材料科学与工程学报, 2009, 5: 798-803.
- [4] 王宇光, 黎观生, 张庆茂, 等. 电子束固化技术及可电子束固化环氧树脂体系. 绝缘材料, 2002, 6: 27-31.
- [5] 王宇光, 黎观生, 江璐霞, 等. 复合材料结构修理研究现状. 航空维修与工程, 2003, 3: 31-34.
- [6] 毛淑莉, 隋刚, 仲伟虹. 电子束固化技术及在复合材料制造领域的应用. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(6): 628-632.
- [7] 赵景飞, 颜红侠, 吴浩. 微波固化技术及其在聚合物中的应用. 中国胶粘剂, 2008, 17(8): 55-59.
- [8] 代永朝, 郑立胜. 飞机微波固化粘接修补技术试验研究. 粘接, 2008, 6: 38-41.
- [9] 许陆文, 代永朝, 苗勋刚. 飞机结构战伤复合材料微波快速抢修技术. 航空维修与工程, 2002, 3: 17-19.
- [10] 吴良义. 光固化不饱和聚酯树脂研究进展. 热固性树脂, 2007, 22(5): 48-52.
- [11] 张伟, 卢芳云, 杨凯, 等. 飞机结构损伤光固化复合材料疲劳寿命研究. 试验技术与试验机, 2006, 2: 5-9.
- [12] 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. 航空制造技术, 2003, 7: 65-67. (责编 岩石)