

复合材料微波快速抢修技术在某重型 战机抢修中的应用

许陆文

(南京航空航天大学再制造工程研究所, 江苏 南京 210016)

摘要: 我国空军多架现役重型战斗机的结构损伤(裂纹)经用复合材料微波快速抢修技术修复。本文以此为例, 详细推介了这一我国独创的快速抢修技术。

关键词: 结构损伤; 复合材料; 微波技术; 快速抢修

中图分类号: TH307

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289-(2006)05+-0223-04

The Technology of Microwave Fast Repair by Use of Composite Materials and It Apply to Rush Repair for the Heavy-duty Fighter-bomber

XU Lu-wen

(jaingsu nanjing 210016)

Abstract: The paper detailed present with the ourselves original technology of microwave fast repair by use of composite materials and tack an example for the rush repair of heavy-duty fighter-bomber.

Key words: structure damages; composite materials; microwave technique; rush repair

0 引 言

现代战争中, 飞行器常因参战而出现划伤、裂纹、断裂、穿孔等结构损伤现象, 严重影响其再次出动, 降低空军的战斗力。因此, 各空军强国都非常重视对战伤飞机外场快速抢修技术的研究^[1]。

目前我军外场常用的修复方法是更换受损结构件, 或使用金属补强板修复损伤部位。这种多年沿用的传统修复方法的缺点是使结构重量增加、连接效率大大降低。在采用螺接或铆接时, 将形成新的应力集中区, 难以实现对受损结构的有效修复。更为严重的缺点是修复作业时间长(当采用胶接时, 常规固化一般需 24 h 方能达到预期强度), 根本无法实现外场条件下的“快速抢修”。因此, 寻找一种适合于外场使用的损伤结构快速修复方法、研制部队缺如的快速抢修设备, 对实战中不可避免的飞机结构损伤予以快速修复, 以保证作战飞机快速再次出动、提高我军战斗力, 已成为当务之急。

随着复合材料的开发应用, 将高性能的复合材

料作为新型连接件直接胶接到金属飞机的损伤部位, 国外已取得成功^[2]。应该说, 用复合材料作为结构损伤区的连接件, 在理论上与技术上已经成熟。特别是美国军方, 系统地对波音 707 等机种机翼大梁的疲劳裂纹进行长达 8 年的修复后跟踪试验, 验证了“用复合材料修补金属结构”的可靠性。但国外在从事这项工作时, 仍是运用传统的热粘接法。由于金属的导热性能与复合材料显著不同, 在采用热粘法时, 热影响区问题不易解决, 从而导致外围设备增多、修补设备复杂、维修环境要求苛刻, 难以实现现役飞行器的外场修复, 更难作为“快速抢修”的有效手段推出。

我们提出的“飞机战伤快速抢修技术”的先进性表现在两个方面: 一是利用高性能的复合材料(预制件与预浸料)作为新型连接件直接胶接到金属飞机的损伤部位, 以提高修补效率; 二是利用微波技术使胶层迅速固化(数十秒至数分钟), 从而提高界面强度并实现“快速抢修”。用这种最新的先进技术建立的我军独有的“飞机结构外场快速抢修”体系, 必将进一步提高未来战争中我军针对各类飞机结构战伤的快速抢修能力, 其推广应用后, 也会提

收稿日期: 2006-08-10 修回日期: 2006-09-20

作者简介: 许陆文(1938-), 男(汉), 江苏人, 教授。

高我军其它军事装备的损伤修复能力。

1 结构损伤情况与修复方案的确定

某重型战斗机服役一段时间后,发现机身 28 框下部导弹挂架支座处的左右翼(整体油箱)连接板(材料 LC-4,板厚 4 mm)产生纵向裂纹(图 1)。这一裂纹继续扩展将引起严重后果,决定立即实施修复作业以防止裂纹扩展。



图 1 某机机身 28 框处仰视图(纵向裂纹明显可见)
Fig.1 Bottom view of the 28th location in fighter-bomber body (longitudinal crack)

一般说,在确定飞行器结构损伤的修复方案时,首先进行的是受力分析。结合结构损伤的实际情况(飞行 1000 h 后已发现该裂纹,经制止裂孔后又飞行 500 h 而裂纹未有明显再扩展)与该连接板的构造特点(在挂架支座处板厚突变:由 4 mm 变为 2 mm),确定此处裂纹系(飞行振动的)应力腐蚀(应力集中)所致。因而该连接板似可进行局部增强而不必整体更换(或重新设计);

从损伤处的结构特点考虑,因左右翼系整体油箱,连接板增强若按传统的铆接补强板作业,可能引起油箱漏油等弊病。因此,此处最佳修复方案应是采用胶接复合材料补强板^[3]。

用复合材料修补金属结构的可靠性虽已由国内外多年实践所证实,但国外在从事这项工作时,仍是运用传统的热粘胶接法^[4]。为保证胶粘剂固化质量并降低固化应力,当采用热粘胶接法时,胶层的加热时间通常需 6~24 h^[5],这不但利于能源的节约,而且由于金属的导热性能与复合材料显著不同,热影响区问题亦不易解决。特别是对于某重型战斗机这类现代战机,由于按高应力水平设计,其对材料性能的要求必然苛刻,而材料长时间受热后

将引发性能指标的明显下降,因此修补这类飞机,必须重视热影响区问题(根据受损飞机的构造特点,连接板上方即是机身的主承力件、钛合金制造的 28 框,对“热影响区”特别敏感),即损伤区(修补区)材料应尽量少受热,而非修补区则最好不加热。胶接固化过程的理论研究与实验结果证明,只有改变胶层加热方式——变热传导为体加热,才能使胶层快速固化而又不产生影响胶接强度的固化应力——最方便的“体加热”方式当然首选微波加热,我们此前已经过多年研究与实践^[6],复合材料微波快速抢修技术遂被确定为某重型战斗机机身裂纹的最佳修复方案。

迄今为止国外在修复铝合金结构损伤时多半采用硼/环氧复合材料^[7],其优点除强度高、刚度好外,主要是与金属接触的电化腐蚀较少,但纤维成本高且硼/环氧复合材料加工困难。我国的实际情况是,硼纤维制造技术尚不成熟、硼/环氧复合材料缺如。结合上述连接板裂纹的修补实际,我们选用了成本较低且国内制造条件成熟的(S 玻璃布与碳布)混杂复合材料制作补强板。

至于补片的形状与尺寸选择,前此我们在采用传统的有限元分析及弹性包容理论对修补结构的强度因子与疲劳寿命进行近似计算的基础上,结合大量的实验与实际操作经验,已总结出适合裂纹、孔洞损伤抢修作业的经验公式^[8]。

为此,在某重型战斗机机身连接板裂纹的修理中,根据连接板的构造特点与受力分析,确定了补片形状为 $L \times W = 200 \times 220$ 的析板(夹角 166°),板厚 $\delta = 3.2$ mm,其铺层设置为正交铺设的 GRP 与 CRP 混杂复合材料板(图 2)。

2 复合材料微波快速抢修技术

微波在复合材料中的应用,国内外自 80 年代中期以来已陆续报导^[9],但这些研究往往偏重于复合材料的制备(固化)过程,而对复合材料及其结构外场、快速修复的微波技术,特别是金属结构修复中的微波技术,国内外报导中均鲜有涉及。所谓复合材料微波修复技术,是指将微波技术引入复合材料修补领域,在修复(或连接)区注入微波吸收剂(或添加了“手性分子”的粘合剂),以提高修复区材料的导电磁率,同时用特殊设计的微波施加器对修复区施加微波能,使之在数十秒或数分钟内形成

新的、更强的界面, 将损伤或缺陷修复(连接)、固化。我们此前应用自行研制的微波功率源与微波施加器(均已申报发明专利), 采用玻璃钢、碳—环氧、硼—环氧对含裂纹金属试件所作的修复与连接实验, 均令人信服地说明微波修复技术确实快速、高效, 有其独特的优势, 必将成为含裂纹金属结构外场、快速修复的发展方向。

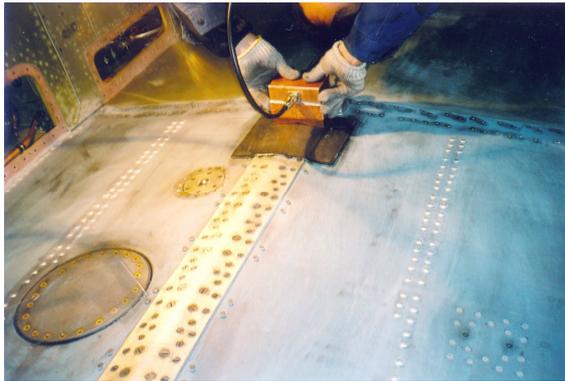


图 2 微波修复现场
Fig.2 Microwave repairing site

2.1 微波加热设备

我们针对复合材料制件和结构外场快速修复的特点, 所研制的便携式微波修复机, 其功率仅为 200 W, 并且操作简便; 利用微波传播方向性, 针对不同修复区, 研制成功了各种微波施加器, 使得微波的能量集中在修复区, 通过复合材料修复试件的强度实验验证了修复效果(经修复的损伤试件, 其破坏强度可达原金属试件的 83% 以上)。为这一新技术的实现提供了必要的条件。

现役飞行器复合材料结构快速修复, 由于受到外场条件的限制, 要求修复设备轻便、灵活, 同时由于所修复的损伤具有各种不同的类型。故我们选用了辐射型施加器, 一方面它可将微波能辐射到空间, 直接对修复结构进行照射, 各种类型的损伤都能适应。另一方面利用微波辐射的方向性, 可以将微波能集中在修复区, 提高能量的利用率, 使小功率微波修复机的使用成为可能(图 3)。

2.2 微波固化

自从 1986 年加拿大化学家 Gedye 发现微波可以显著加快有机化学合成以来, 射频电磁波特别是低频段微波对化学反应的作用正受到人们的关注。

大量的实验证实了微波能够改变分子之间的相互作用, 显著提高化学反应速度和改变反应的机制。微波能可以引发高聚合物分子间的化学反应, 并引起聚合物的物理性质和机械性质等的显著变化。



图 3 机身裂纹已经修复
Fig.3 Being repaired crack of fighter-bomber body

胶粘剂通过化学反应而固化时, 通常会体积减少、引起收缩, 在胶粘剂中产生收缩力。当收缩力超过粘接力时, 则会引起自然破坏。而当粘接力大于收缩力时, 由于界面收缩受到约束, 会产生内部应力, 使粘接强度显著降低。凡是使体系内应力增加的措施, 均会使粘接强度大幅度降低, 而采用有利于降低内应力的措施, 则会使粘接强度大大增加^[10]。

在固化的初始阶段, 胶层还处于液态或粘流态, 固化收缩只会使胶层变得更薄, 不会形成内应力。当胶层进入交联或玻璃态之后, 失去了粘性流动能力, 粘接面内的收缩, 将使胶层产生弹性变形, 从而迅速形成内应力, 并随着胶层产生弹性收缩的增加而急剧地增大。可见内应力形成的原因, 一是因为界面结合力阻止粘接面积缩小; 二是固化收缩力图缩小粘接面积, 这是粘接体系所固有的矛盾。形成内应力的条件是在胶层失去粘性流动能力之后的深度固化。在玻璃态下交联反应速度会显著减慢, 并造成固化不完全及网络形成不完全, 降低胶接强度。因此, 控制交联的程度, 提高固化温度, 使胶层在固化的全过程中都保持良好的粘弹性, 对于获得内应力低的稳定粘接是十分重要的。而微波固化在一定程度上解决了这一矛盾。首先微波固化是一种瞬间高温加热。其次微波加热是一种体加热, 且其温度梯度分布是表面冷而内部较热, 因此不存在一般加热方法形成内应力的机制。而且, 微

波加热较常规加热更均匀,因而不会造成热应力的局部集中或局部的交联过度,而使应力集中。所以微波可使固化更完全、更充分,胶接强度更高。

2.3 高性能微波结构胶

微波加热与介质的介电常数密切相关。介电常数大的介质能有效地采用微波加热,这就是所谓微波的“选择性加热”。一般认为修复作业所使用的胶粘剂的导电磁率较低,不适宜微波加热(固化)。为提高加热效率需在其中加入添加剂。为此,我们通过反复实验,进行了微波吸收剂的筛选,通过注入微波吸收剂提高修复区(连接区)的导电磁率,使修补和连接处需要固化的胶粘剂迅速加热而不影响其它部位,从而获得很高的能量(吸收)效率和优良的修复质量,对不需要加热的部位不存在所谓“热影响区”之虞。使微波的“快速致热、瞬间升温”效应得以在复合材料修复区实现。这一突破为含裂纹金属结构复合材料微波修复技术奠定了基础。这一研究成果使我们创造了一种含“手性分子”添加剂的微波固化专用的“高性能微波结构胶”(其剪切强度 ≥ 30 MPa),它已经在修复与抢修作业中使用。

3 结 论

本文通过现役某重型战斗机机身连接板裂纹的快速抢修作业,验证了“用复合材料快速修复含裂纹金属结构”的设想。通过大量理论与实验研究,得到以下结论:

(1) 微波技术的应用,使得“用复合材料快速修复含裂纹金属结构”的设想得以实现。胶接固化原理的研究表明:利用微波的致热与非致热双重效应,可满意地实现胶接的快速固化,促使相界面的消失和形成牢固的结合;

(2) 本项目研制的便携式小功率微波修复机和微波施加器,已成功应用于现役某重型战斗机机身裂纹的复合材料微波修复作业中。理论分析与实验实施均表明,这一创造性成果适合于飞行器外场的快速修复作业,其进一步推广应用后,也会提高我军其它军事装备的损伤修复能力。

(3) 利用微波吸收剂提高胶粘剂微波能量吸收率的学术观点,为微波技术在含裂纹金属结构修复作业中的应用奠定了基础。同时,通过微波吸收剂筛选而研制的“高性能微波结构胶”(即增加了“手性分子”添加剂而组成的微波胶)已成功推出,它具有微波快速固化、粘接强度高、使用方便、贮存稳定等特点,将会有乐观的市场前景。

参考文献:

- [1] Baker A A, Jones B. Bonded repair of aircraft structures [M]. Martinus Nijhoff Publisheres, 1988.
- [2] Rose L R. A cracked plate repaired by bonded reinforcements [J]. Int Journal of Fracture, 1982, 18(2):135-144.
- [3] Sun C T, Klug J, Arend C. Analysis of cracked aluminum plates repaired with bonded composite patches [J]. AIAA Journal, 1996, 34(2): 369-374.
- [4] 许陆文. 复合材料的修理技术《复合材料大全》[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000, 689-706.
- [5] Naboulsi S, Mall S. Thermal effects on adhesively bonded composite repair of cracked aluminum panels [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1997, 74-78.
- [6] 许陆文. 复合材料微波修复 [J]. 南京航空航天大学学报, 1996, 28 (2): 157-161.
- [7] 石 林. 民用飞机的复合材料补丁修理法 [J]. 航空工程与维修, 2002, N207: 22-24.
- [8] 罗文琳, 许陆文, 等. 金属结构损伤复合材料微波修复的实验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37 (6): 736-740.
- [9] Lee W, Springer G S, J of Composite [J]. 1984, 18:387.
- [10] 周定沛. 胶层的粘弹性与固化工艺 [J]. 粘接, Vol18N6.

作者地址: 江苏南京御道街 29 号 210016

南京航空航天大学 436 信箱

Tel: (025) 84893416, 13952047773

E-mail: nuaxlw@sohu.com