

研究一种利用微波修复损伤金属结构的新技术,阐明了复合材料微波修复机理,探讨了界面形成与快速固化理论。

# 飞机结构战伤复合材料微波快速抢修技术

## Technology of Microwave Repair for the Metal Structure with Warlike Damages by Use of Composite Materials

◎许陆文 / 南京航空航天大学  
代永朝 / 空军第一航空学院  
苗励刚 / 南京航空航天大学

在现代战争中,飞行器常因参战而出  
在现划伤、裂纹、断裂、撕裂、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。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  
属补强板铆接、焊接或胶接到损伤部位。  
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。

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,并取得了非常显著的经济效益。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。国外在从事这项工作,仍是运用传统的修补复合材料损伤结构的热黏胶接法。由于金属的导热性能与复合材料显著不同,在采用热黏法时,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。本文作者近年来先后完成“复合材料微波修复技术研究”与“含裂纹金属结构的复合材料微波修复(连接)技术”等的研究,提出了“飞机结构战伤复合材料微波快速

抢修”的概念。已经完成的工作表明,用微波技术实现复合材料对飞机结构损伤的修补,其修补速度快、效率高。

### 复合材料微波修复机理

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,在修复区注入微波吸收剂(或添加了“手性分子”的黏合剂),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,使之在数十秒内形成新的、更强的界面,将损伤或缺陷修复。这是一种全新概念的“胶接”技术。

微波辐射的理化作用按其机理可分为热效应与非热效应两类。常用树脂等高分子材料,包括胶黏剂多为含极性基团的聚合物。这类极性分子在交变电场作用下将随外施电场的频率转动,从而致热(偶极子加热)。当使用的微波频率高达 2450MHz 时,高分子材料或胶黏剂中的极性基团将急剧运动,迅速升温。这一现象形成了复合材料微波修复的物理学基础。

一般说来,材料在微波场中吸收的能量可由下式描述:

$$P = \frac{1}{1.8} f E^2 \epsilon_r \lg \delta \times 10^{-2}$$

式中,  $f$  为辐射频率;  $E$  为电场强度,  $\lg \delta$  为损耗系数;  $\epsilon_r$  为介电常数。

微波致热的特点如下。

#### 1. 选择性加热

置于微波场内的材料(胶黏剂)能否吸收微波能以及吸收多少,完全取决于材料本身的性质( $\epsilon_r$  及  $\lg \delta$ ),即材料的导电磁率。这是微波作为通用加热源的不足之处,但也正是作为复合材料修复含裂纹金属结构所用功率源的优点。它可使修补或连接区需要固化的树脂迅速加热而不影响其他部位;也可以通过使用微波胶(注入了微波吸收剂的黏合剂)提高修复区的导电磁率而获得高的能量(吸收)效率和优良的修复质量。对于不需要加热的部位,不存在所谓“热影响区”之虞。

#### 2. 场强高温与高频高温

介质吸收的微波能,随微波功率源的电场强度( $E$ )及辐射频率( $f$ )的变化而迅速改变,这就是微波致热的“场强高温”与“高频高温”的特征。这一特性保证了微波致热具有热惯性小而穿透力强

的优点,可使被加热介质瞬间升温,有利于实现修复区的快速控制加热。

此外,微波辐射增强了胶黏剂与基体之间的黏合。辐射引发的高聚物分子间的化学变化,将引起聚合物的物理性质和机械性质等的显著改善。例如,微波辐射使聚合物的每一个分子平均生成约一个交联单位,其结果是聚合物的黏度大大增加了。所以说,微波的非致热效应是修复区具有较强界面结合的关键所在。微波辐射引起极性基团的剧烈运动,使修复区分子或分子链段相互渗透,且在界面处产生更高的交联度,并导致相界面的消失,从而形成牢固的结合。

### 复合材料微波修复设备

为了实现现役飞行器的外场快速修复,就必须具备与之相适应的修复设备。一般传统微波加热装置具有较大的功率,因而其体积也较大,且多采用箱形结构,使用不便,尤其不适合于现役飞行器的外场修复。南京航空航天大学针对飞机结构外场快速修复的特点,研制了便携式微波修复机和微波施加器,使得微波的能量集中在修复区。

微波修复机一般由变压器、控制电路与磁控管三部分组成。磁控管是其核心,微波辐射频率由它决定。已研制出的发射功率达 200W 的便携式微波修复机,其微波辐射频率为  $2450 \times 10^6 \text{ Hz}$ 。该机针对飞机金属结构可能产生的微波反射效应而刻意设计了专门的电路,特别适用于含裂纹金属结构的复合材料外场快速

修复。

微波施加器一般由转接器(用以与微波功率源连接)、同轴馈线与辐射天线三部分组成。其中,辐射天线是微波施加器的关键部分。根据修复区损伤形式,可采用针状单极子、电偶极子或微带天线,制成植入式、直接接触式或空间辐射式多种类型。图 1 是南航研制的微波修复机和部分微波施加器,已在含裂纹金属结构复合材料修复效果试验中得到应用。

### 微波固化过程与微波结构胶

微波加热技术具有快速、高温、穿透、无污染等优点,特别适用于飞机结构外场快速修复作业。一般热固化物件必然存在因残余热收缩所引起的应力,而微波固化却不产生这种内应力的机制,从而使其产品的质量比一般的热化学产品好得多。一般说来,胶黏剂固化过程中内应力形成的原因,一是因为界面结合力阻止黏接面积缩小;二是固化收缩力图缩小黏接面积,这是黏接体系所固有的矛盾。形成内应力的条件是在胶层失去黏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黏弹性,对于获得内应力低的稳定黏接是十分重要的。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,即外部先进入玻璃态,内部处于黏流态,胶体的收缩受到限制而产生内应力。另一方面,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;也不会造成局部的交联过度,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。

如前所述,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”。一般认为修复材料(这里主要是硼-环氧、碳-环氧复合材料及为其胶接到金属结构上所使用的胶黏剂)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,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(或添加了“手性分子”的黏合剂)推出了微波固化专用的“高性能微波结构胶”,以提高修复区(连接区)的导电磁率,使修补和连接区需要固化的胶黏剂迅速加热而不影响其他部位,从而获得很高的能量(吸收)效率和优良的修复质量,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研究奠定了基础。

### 修复效果验证

通过预制裂纹试件的拉伸强度试验来考核复合材料微波修复效果。试件系截面为  $20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  铝合金试件(10 件),全部预制深度为 1mm 的横向贯穿裂纹。其中一半试件经用正交铺层 GRP 加强板修复(板厚 2.7mm),胶黏剂为高性能微波结构胶。微波固化功率 150~200W,施加微波时间  $2 \times 66$  秒,在 NCS-1 台式材料试验机上加加载,所有试件加载速率均为  $0.87\text{ mm/min}$ 。试验结果是:5 根试件的平均破坏载荷,未经修复者为 11.44kN,经微波修复者为 17.10kN。

经查,铝合金试件全部在预制贯穿裂纹处断裂。经修补者,其破坏过程均为:金属部分断裂在先,裂开后仍能承载,直至加强板拉脱。由此可见,在载荷达到胶层剪切强度前,加强板确实参加受力,因而修补后的试件破坏载荷较未修补者有大幅度提高。经与无缺口试件



图 1 南京航空航天大学研制的微波修复施加器

从维修的角度看复合材料的选择问题,指出复合材料能提供金属所不能提供的性能,但它的成本高,维修困难,因此在选用时应精心权衡。

# 复合材料的选择与维修

## Selection & Repair of Composites Materials

© 陈文国

### 空客为什么不再用芳纶纤维复合材料

由新材料的应用而带来令人头痛的事情对飞机维修业可以说是屡见不鲜。例如,早年全金属飞机的性能远远超过木制飞机,但木制飞机的优点是易修理,可以很快返航。

当代的航空公司已不愿意只是为了减重而用新材料了,因为损伤容限和可维修性已成为首要考虑的因素,所以认为复合材料的应用并不总是好的。在许多情况下,这种材料的应用只是追求时尚而非工程需要。

现代飞机因维修及零件代换而带来过多的工作及停场,引起用户很多抱怨。制造商因此很愿意根据用户需要采用不需经常维修或维修不困难的材料来制造

零件和结构。另外,对维修技术也进行了改进,尤其是对复合材料。但从维修及成本来看,在材料选择上仍有改进的空间。

空中客车工业公司的 A380 飞机结构负责人 Jen Hinrichsen 说,航空公司都抱怨蜂窝结构难于修理。公司对此已作出反应。他说:“我们打算凡有可能的地方,都不用蜂窝。趋向是采用实心的层合板结构。”在空客飞机上,蜂窝多用在机腹整流罩、尾翼前缘、还有起落架舱门上,每架飞机大约用 2.5 吨蜂窝结构。

Hinrichsen 说:“不经航空公司同意,我们不会在材料及设计上作任何决定。”“我们正在与航空公司对话:看什么地方可用层板结构代替蜂窝,什么地方仍采用蜂窝。”

机腹整流罩很容易被起落架甩出的砂石打伤。但是 Hinrichsen 又说,不用蜂

窝很难制造出轻结构的整流罩。在等重情况下,很难找到代用方案。因为设计上的缺陷可能会产生吸潮现象,特别是芳纶纤维,因此这种纤维已不在空客飞机上应用。芳纶纤维过去多用在叶片包容环、发动机吊舱整流罩、雷达罩等处。由于用户强烈要求不再用芳纶纤维,空客公司现在已不应用这种材料了。

碳纤维实心层合板占空客飞机复合材料的主体,在 A340 和 A380 上占 16% (按结构重量)。在 A380 上可达到 20%,但不能再多了,因为铝及钛合金仍有强劲的竞争力。那种只采用一种材料的飞机将只是梦想,因为不同材料适用于不同部位。

### 复合材料的维修需要技巧

在设计维修方案时,制造商及维修

比较,强度恢复率为 83.4%(无缺口试件平均破坏载荷为 20.5kN),已达预期效果。在试验中,刻意考察了胶层的剪切强度,以判断高性能微波结构胶效果:经打磨的试件,其胶层受剪面积为 4.3cm<sup>2</sup>,拉脱时载荷为 17.32kN,经计算,胶层剪切强度应达 43MPa,超过预期目标的 30MPa。

### 结论

现役飞行器含金属结构战伤快速修复是飞行器尤其是军用飞行器亟待解决的难题。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

位是近年来飞机修补作业中的最新思路。在航空科学基金资助下开展的金属—复合材料胶接固化技术研究,将微波效应应用于金属结构的快速修复中,得出以下结论。

1. 微波技术的应用,使得“用复合材料快速修复飞机结构”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. 便携式小功率微波修复机和微波施加器,已成功应用于含裂纹金属结构

的复合材料微波修复作业中。

3. 利用微波吸收剂提高胶黏剂微波能量吸收率,为微波技术在飞机结构战伤修复作业中的应用奠定了基础。已成功推出通过微波吸收剂筛选而研制的“高性能微波结构胶”,它具有微波快速固化、黏接强度高、使用方便、贮存稳定等特点,将会得到广泛的运用。

4. 金属结构复合材料微波修复技术的使用效果,经初步试验表明,经采用该技术修复的试件,其拉伸强度可恢复到无损伤试件的 80% 以上,已初步满足了使用要求。□