

# 碳纤维复合材料结构损伤的自检方法研究进展

王志平 叶亮 路鹏程 李娜 苏景新

(中国民航大学,天津市民用航空器适航与维修重点实验室,天津 300300)

**文 摘** 监测碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)的结构损伤是一个关键问题。本文就目前国内外研究较热且应用前景较大的一类新型无损检测技术——基于CFRP导电网络的自检技术进行综述,总结了直流法和交流法的原理和技术特点,尤其是对各种检测方法适用的环境和损伤类型进行了评估。最后指出了发展出一套智能化的CFRP结构损伤自检体系所要进一步开展的研究工作。

**关键词** 碳纤维增强树脂基复合材料,损伤,自检,直流法,交流法

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2016.05.003

## Review of Self-Sensing Detection Methods of Structural Damage in Carbon Fiber Composites

WANG Zhiping YE Liang LU Pengcheng LI Na SU Jingxin

(Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance,  
Civil Aviation University of China, Tianjin 300300)

**Abstract** Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) composites have been successfully applied to the main load-carrying structures in aircrafts, but how to monitor the structural damage is still a key problem. In this paper, a new and promising nondestructive testing technology—the self-sensing detection technology based on CFRP conductive network, which has become a hot field. The principles and technical characteristics of various methods including direct current (DC) methods and alternating current (AC) methods were summarized, especially evaluating the applicable environment and damage types of all kinds of detection methods. Finally, the further research for developing a set of intelligent self-sensing detection system of CFRP structural damage was pointed out.

**Key words** CFRP, damage, Self-sensing, DC method, AC method

### 0 引言

以碳纤维复合材料为代表的先进复合材料,由于具备高的比强度、比模量,且抗疲劳、抗腐蚀以及可设计性能优异等特点,已成功应用到航空器的主承力结构上。而复合材料在制造过程中会不可避免出现如孔隙、夹杂、固化不完全等缺陷,另外飞机复合材料结构在整个服役过程中将受到老化、雷击、外来物撞击等引起的各类损伤。这些损伤通常以分层、纤维-基体脱粘以及纤维断裂的形式出现<sup>[1]</sup>,也经常发生在材料内部,外表面不可见或相对微小,但是它们对飞机的安全服役构成极大的威胁,因此有必要对其进行实时检测。

超声检测(NDT)技术在探测尺寸较大(至少1 mm)的表层简单缺陷(如分层裂纹)时较为灵敏<sup>[2-3]</sup>。但是它通常使用水作为耦合剂(虽然也有空气耦合剂,但其超声衰减更严重),一旦水渗入具有缺陷的碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)中,将加速CFRP结构在服役过程中的损伤。X射线检测<sup>[4-5]</sup>微缺陷的分辨率比超声检测更低。声发射能对缺陷进行实时检测<sup>[6]</sup>,但它不能检测出静态缺陷,即CFRP结构件必须在承受应力的状态下进行声发射检测<sup>[7]</sup>,它并不是完全意义上的NDT技术。还有其他损伤检测手段也受到了广泛的关注,如在复合材料上贴附或嵌入传感器,如光纤<sup>[8]</sup>和压电传感器<sup>[9]</sup>,但这

收稿日期:2016-02-04

基金项目:国家自然科学基金(基金号61471364);中央高校(3122014K014)

作者简介:王志平,1963年出生,博士,教授,主要研究方向:航空材料加工与测试。E-mail: zpwang@cauc.edu.cn

类方法不仅成本高、修复难,还有可能影响到 CFRP 结构件的力学性能。

CFRP 损伤自检方法主要基于 CFRP 内部的导电网络结构,当内部出现损伤时,这种导电网络会随之改变,最后这种变化再通过电学测试得到放大体现。自检不需要在结构表面贴附或嵌入传感器,结构件本身就是一个传感器<sup>[10]</sup>。这些目前可以分为两大类:一类是直流(DC)法,其中具有代表性的是由 K. SCHULTE 等<sup>[11]</sup>提出的 DC 电阻测量法,之后关于这种方法的研究也最为广泛。此外,由电阻测量法衍生的 DC 电势法也受到了广泛的关注。另一类电学测量方法则是交流(AC)法,其中最具代表性的是介电分析法。AC 法基于这样一个假设,即将 CFRP 看作导体材料(碳纤维)和绝缘材料(树脂基体)的组合,所以 CFRP 在电学上可以简单视作一个 RC 电路<sup>[12]</sup>,如图 1 所示,只要监测材料在损伤过程中阻抗值或介电参量的异常变化,便可实现结构损伤的检测。

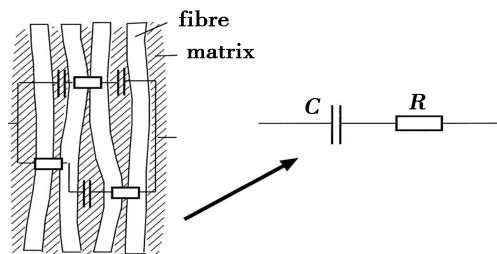


图 1 CFRP 层板中存在的状态以及可能的等效电路  
Fig. 1 Condition in CFRP laminate and possible equivalent circuit

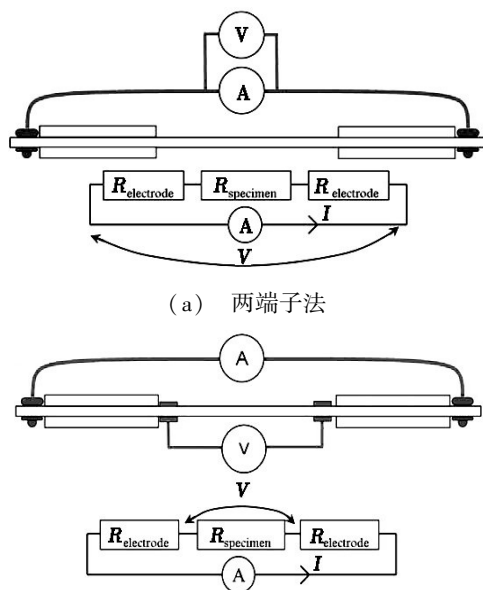
## 1 CFRP 结构损伤的自检 DC 法

DC 法适合检测与碳纤维相关的结构损伤,因为 CFRP 结构材料中一旦出现纤维损伤或者导电路径的改变,将会引起电阻急剧变化。相比于其他无损检测方法,DC 法检测方便,成本较低,响应更快,能对 CFRP 结构整体实现原位检测,并实时提供内部微结构变化(甚至是纳米尺度上)信息<sup>[10]</sup>。关于 DC 法的研究主要分为两大类:一种是通过测量 CFRP 层板的体积电阻、表面电阻或电势变化来表征如基体开裂、分层以及纤维断裂等损伤形式;另一种是通过测量 CFRP 层间界面的接触电阻变化来监测环境因素(如温度、湿热、应力等)对层间界面的影响,或者对损伤(如热损伤、冲击损伤等)直接检测。

### 1.1 DC 法原理

DC 法检测损伤既可以采用两端子法也可以采用四端子法。I. DE BAERE 等<sup>[13]</sup>用两端子法监测到 CFRP 试样的电阻随时间呈上升趋势,而用四端子法时电阻几乎不变。这是因为两端子法存在接触电阻的问题。由图 2(a)可知两端子法所测电压为:

$$V = R_{\text{tot}} \cdot I = (2R_{\text{electrode}} + R_{\text{specimen}}) \cdot I \quad (1)$$



(a) 两端子法

(b) 四端子法

图 2 DC 法<sup>[29]</sup>

Fig. 2 DC methods<sup>[29]</sup>

当 CFRP 与电极接触的部位发生性能恶化(如蠕变)时, $R_{\text{electrode}}$  会随时间发生波动,所以试样电阻值  $R_{\text{specimen}}$  很不稳定。如图 2(b) 所示,通过四端子法测得的电压由(2)式表示:

$$V = R_{\text{specimen}} \cdot I \quad (2)$$

可见四端子法不存在接触电阻,因此四端子法在精度(数据发散程度)、准度以及灵敏度上都优于两端子法<sup>[14]</sup>。由于接触电阻一般较难测得,有时候可能比试样的真实电阻值都要大,所以在结构损伤的自感应测量中一般不采用两端子法,即使采用也可能使测量结果产生争议。例如采用两端子法监测 CFRP 单向层合板的纵向拉伸时,发现纵向电阻随拉应力的增加而上升,即出现所谓的“正压阻”现象<sup>[15-17]</sup>,而 S. WANG 等<sup>[18]</sup>通过四端子法测得了“负压阻”。这是由于两端子法测得的“正压阻”是由接触电阻的上升引起的,而四端子法测得的“负压阻”是因为纤维在拉应力作用下由原来的弯曲状态再次对齐引起的。之后很多研究人员在结构损伤检测中均采用四端子法,如评价 CFRP 的冲击损伤<sup>[27]</sup>、弯曲损伤<sup>[27]</sup>、拉伸损伤<sup>[27]</sup>以及热损伤<sup>[28-30]</sup>。

当然,四端子法也有不足。首先,四端子法的测量精确度不可避免的会受电极质量的影响。N. ANGELIDI 等<sup>[31]</sup>以银胶做电极时,通过四端子法测得了“正压阻”;而采用碳胶做电极时,由于电极接触不好导致出现“负压阻”。A. TODOROKI 等<sup>[32]</sup>在对银胶电极涂覆处打磨处理后,发现 CFRP 单向层合板沿纤维方向拉伸时呈现“正压阻”现象,而未经打磨处理

的试样呈现“负压阻”现象。这是因为在未打磨处纤维和银胶稀疏的电接触使电势场扭曲,从而使测得的电阻具有很大的误差<sup>[33]</sup>。其次,两个电压电极之间不均匀的电流密度会给测量带来极大的误差。因此,四端子法测量时要选择合适的电极间距<sup>[34]</sup>。

### 1.2 CFRP 层板损伤的自检 DC 法

CFRP 层板损伤的 DC 法可针对不同的损伤设计不同的电极。图 3(a)为 CFRP 层板表面电阻的测量装置,它需要将两个电流电极布置在同一表面<sup>[26]</sup>。其中纵向表面电阻测量对纤维损伤较为敏感,横向表面电阻测量更适合检测层内基体开裂,因为层内的基体开裂导致横向纤维接触减少,横向电导率随之降低。体积电阻测量需要电流流经与测量方向垂直的整个截面,而且整个截面上的电流密度应当均匀。体积电阻可以分为面内体积电阻<sup>[26]</sup>[图 3(c)],纵向体积电阻<sup>[26]</sup>[图 3(d)],厚度方向体积电阻<sup>[10]</sup>[图 3(e)(f)]以及斜电阻<sup>[26]</sup>[图 3(b)]。面内体积电阻测量以及纵向体积电阻在表征纤维损伤上特别灵敏,厚度方向电阻测量则对分层损伤较为敏感。然而,采用图 3(f)的装置测量厚度方向体积电阻时,由于纵向电阻率低于厚度方向电阻率,电流在穿过厚度方向时也会在纵向发生扩散而向外弯曲[图 3(e)],导致电流实际流过的面积要大于环形电流电极的面积,最终使测得的厚度电阻率偏大<sup>[10]</sup>。斜电阻测量对于纤维损伤和分层损伤的检测都很灵敏。

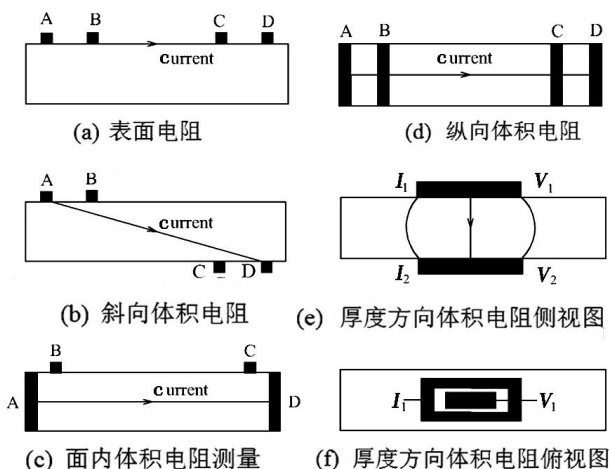


图 3 表面电阻和体积电阻的电极装置,箭头为电流方向  
Fig. 3 Electrical contacts configurations of surface resistance and volume resistance, the arrow points to the current direction

CFRP 层板的冲击损伤是复合材料飞机结构检修所关心的一个重要问题。特别是低速冲击引起的勉强目视可检损伤,它可能同时发生基体开裂、分层和纤维断裂。虽然基于安全寿命原则可以使损伤结构承受理论上的突变失效,但忽视这些损伤仍可能造成灾难性后果。DC 电阻法检测冲击损伤具有较高的宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016 年 第 5 期

灵敏度,测量装置如图 4 所示。随着冲击损伤的出现,电阻不可逆上升,而且电阻一般随冲击能的增加而上升<sup>[19-26]</sup>。这种趋势在上下表面电阻(上表面为冲击面)、斜电阻以及厚度电阻测量中都相同,其中斜电阻和厚度电阻测量的灵敏度要高于上下表面电阻测量<sup>[19]</sup>。

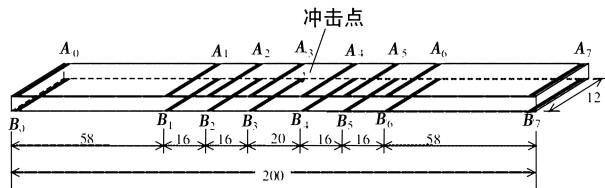


图 4 冲击损伤的电阻测量装置<sup>[1]</sup>

Fig. 4 Configuration for measuring the electrical resistance of the impact damage<sup>[1]</sup>

除了对冲击点区域进行电阻测量, D. D. L. CHUNG 等<sup>[21]</sup>在对远离冲击点区域的厚度电阻和斜电阻进行测量时发现,电阻变化率的上升趋势会随远离冲击点的距离的增加而降低。但是在距离冲击点 150 mm 处,无论冲击能多大,其厚度电阻变化率仍大于零。这是由于厚度方向上的电流发生了纵向扩散(图 5),并且纵向电阻率与厚度方向电阻率的比值越大,电流的纵向扩散程度越大。这说明可以在远离冲击点区域实现损伤的自检,虽然其灵敏度下降,但极大减少结构检修中电极网络的布置。此外,冲击会使表面附近的电流路径发生扭曲,所以冲击点区域及相邻区域的表面电阻测量也可用来表征分层和纤维断裂等损伤<sup>[14]</sup>。还有人研究了铺层方式和厚度对电阻测量检测冲击损伤的影响<sup>[19]</sup>,发现对于任何形式的铺层和厚度,斜电阻检测冲击损伤的综合性能最佳,尤其是它测量方便且对微损伤很敏感。

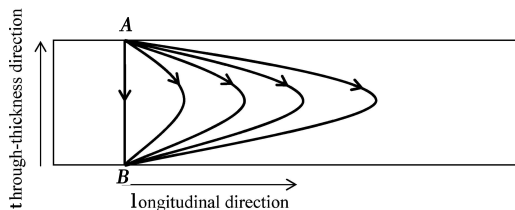


图 5 厚度方向的电流发生纵向扩散<sup>[21]</sup>

Fig. 5 Through-thickness current spreads in longitudinal direction<sup>[21]</sup>

上述自检方法属于一维电阻测量法,此外,二维电势法也可以对冲击损伤实时检测<sup>[35-37]</sup>。电势法与电阻法不同在于,电阻法中电流线和电势线是重合的,然而电势法中却不是重合的<sup>[25]</sup>,如图 6 所示。二维电势法的电流线和电势线存在一定间距,所以它的灵敏度不及一维电阻法,但它更适合检测损伤的确切位置。二维电势法的电极装置<sup>[26]</sup>如图 7 所示,除了对角线上的一对电极作为电流电极外,其余的电极被

用来进行电势测量。与之相似的还有一种将点电极在二维平面上进行排列(如  $11 \times 11$  排列)的电势法<sup>[24]</sup>,通过监测每一个电极的电势(相对于地面)变化来检测损伤,虽然灵敏度提高,但电极布置和测量较为繁琐,且不利于结构件的正常使用。相比之下,图7所示的二维电势法可以在使用较少电极的情况下获得更多损伤信息,这一点对飞机结构检修特别重要。

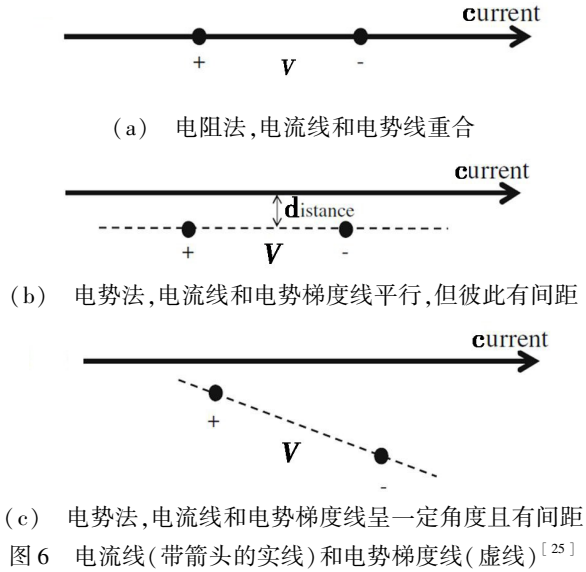


图6 电流线(带箭头的实线)和电势梯度线(虚线)<sup>[25]</sup>

Fig. 6 Current line (solid line with arrow) and potential gradient line (dashed line)<sup>[25]</sup>

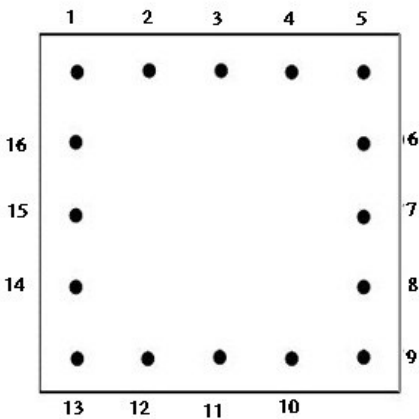


图7 二维电势法<sup>[26]</sup>

Fig. 7 Two-dimensional potential method<sup>[26]</sup>

S. WANG 等<sup>[27]</sup>测量了弯曲加载下试样的压缩面和拉伸面的表面电阻以及斜电阻,发现表面电阻随挠度非线性变化,同时压缩面出现微裂纹,而斜电阻对这种微损伤更敏感。当损伤由小变大直至失效时,拉伸面、压缩面的表面电阻以及斜电阻也随之急剧上升,并且这种上升趋势不可逆。D. D. L. CHUNG 等<sup>[38-47]</sup>采用 DC 电阻法研究了 CFRP 层板单轴疲劳拉伸过程,发现纵向(纤维方向)体积电阻变化率随疲劳加载而不可逆上升,同时模量出现明显的下降,

这说明 DC 电阻测量可以实时监测疲劳损伤。随后他们还发现单丝拉伸试验中电阻变化率会随纤维损伤出现而不可逆上升<sup>[38]</sup>,测试装置如图8所示。

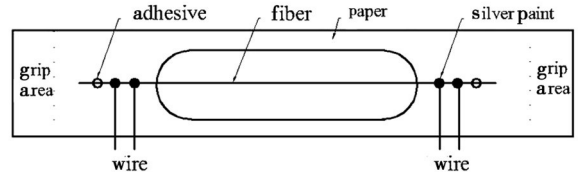


图8 单丝拉伸测试装置

Fig. 8 Configuration for single fiber tension testing

相比之下,I. DE BAERE 等<sup>[13]</sup>在进行不同加载频率的疲劳测试时发现,电阻变化率的平均值均随循环次数的增加整体呈现下降的趋势。由于疲劳测试中试样刚度几乎不变(仅有轻微的塑性变形),所以认为电阻测量无法监测拉伸损伤的演变。

上述两种结论的区别在于,前者的疲劳实验中出现的损伤形式为纤维断裂<sup>[37]</sup>,所以电阻变化率随疲劳寿命的增加而不可逆上升;后者的疲劳实验中仅出现基体损伤(导致相邻纤维的接触增加),所以刚度没有明显变化,但电阻变化率随循环次数的增加而降低。以上两组实验指出了一点,即 DC 法可以灵敏地感应到拉伸加载中出现的纤维损伤(或断裂)。

### 1.3 CFRP 层间界面损伤的自检 DC 法

DC 法的另一研究方向是通过测量层间接触电阻率来监测环境因素对层间界面结构的影响<sup>[20,28-30,39-40,42-44]</sup>,即将 CFRP 层板的层间界面视作一个传感器。测量装置如图9所示,它由两层条状 CFRP 单向预浸料交叉铺贴固化而成,A-D 方向通以电流,B-C 两端测量电压,两层板的粘接区域即构成了一个简单的层间界面。

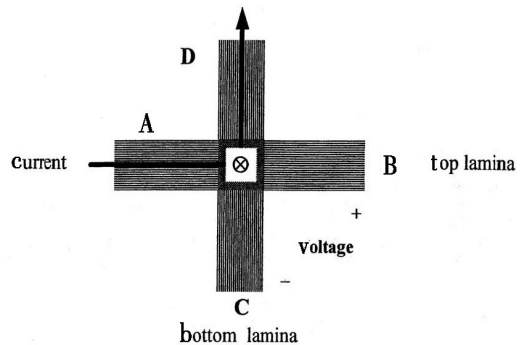


图9 接触电阻率的测量装置<sup>[20]</sup>

Fig. 9 Configuration for measuring contact electrical resistivity<sup>[20]</sup>

环境温度的上升会造成层间界面的接触电阻率可逆降低<sup>[42-43]</sup>。由于 CFRP 存在层间纤维接触,电子能由一根纤维跃迁到另一根纤维上。而电子的这种跃迁是一种热激发过程(与激活能有关),温度越

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016年 第5期



高,电子跃迁越容易。因此接触电阻率可以定量的表征温度对层间界面的影响。

层间界面还可以作为应力的传感器,即通过测量接触电阻的变化来监测应力的变化。例如,在循环压应力的作用下,层与层之间的纤维接触增多,所以层间界面的接触电阻率不可逆降低<sup>[43]</sup>。

吸湿会造成基体(尤其是环氧基)以及纤维-基体界面性能恶化。由于层间界面是 CFRP 层板结构的主要损伤位置,因此定量的测量层间接触电阻率对于监测吸湿对界面的影响将很有意义。例如,在湿循环作用下,CFRP 层间界面的接触电阻率随相对湿度的增加而可逆上升<sup>[30]</sup>,这是因为树脂基体吸湿使相邻层纤维的间距增加。

此外,由于飞机在整个服役过程中会不可避免受到热循环的影响,如飞机的红外除冰过程以及起降过程的温度变化,这种热循环经常会引起 CFRP 分层或基体开裂,继而造成层间纤维接触减少,所以利用层间接触电阻率测量来检测层间界面的热损伤或热疲劳是可行的<sup>[28-30,42-44]</sup>。层间界面的热损伤通常以热循环的初期接触电阻率上升峰值的出现为标志,如图 10 所示,损伤越严重,峰值上升的越厉害<sup>[28]</sup>。而热疲劳只有在热循环次数达到一定量后才出现,出现的标志是接触电阻上升至一个小的峰值<sup>[29,44]</sup>。

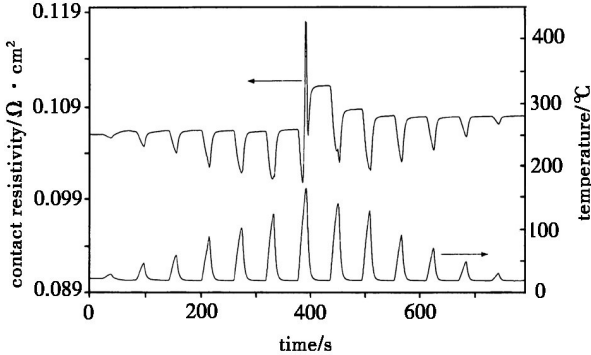


图 10 热循环过程中接触电阻率随时间变化以及温度随时间变化<sup>[28]</sup>

Fig. 10 Variation of contact electrical resistivity with time and the temperature versus time during thermal cycling<sup>[28]</sup>

接触电阻测量还能反映冲击对层间界面微结构的影响。例如有人以冲击能递增和递减的方式冲击层间界面时,接触电阻均不可逆下降,这是因为冲击使层与层之间的纤维接触增多<sup>[20]</sup>。并且还发现接触电阻所检测的冲击损伤阈值要低于之前体积电阻所检测的阈值,所以他们认为层间接触电阻测量比体积电阻测量更灵敏。但要注意这里的层间界面仅仅是一个单层板搭接结构,它所承受的极限冲击能要远低于多层板结构所承受的极限冲击能,所以接触电阻测量在监测界面微结构变化上是否比体积电阻

更灵敏,还需进一步研究。

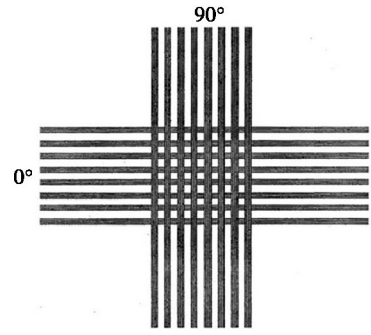


图 11 层间界面传感器的二维排列<sup>[42]</sup>

Fig. 11 Two-dimensional array of interlaminar interface sensors<sup>[42]</sup>

值得关注的是,若将两个层板正交布置,便形成一个二维排列的层间界面传感器,如图 11 所示,这样的一系列传感器可以在二维尺度上实现热、温度、应力、吸湿以及损伤的监测。

## 2 CFRP 结构损伤的自检 AC 法

AC 法主要基于树脂基体的绝缘性能(电阻率约为  $10^{13} \sim 10^{15} \Omega \cdot m$ ),所以相比于 DC 法,它更适合检测 CFRP 基体开裂,如分层、纤维-基体脱粘以及横向开裂<sup>[45]</sup>,而且 AC 法所检测的损伤信息比 DC 法要丰富<sup>[46]</sup>。AC 法不仅用于监测热固性树脂的固化、老化以及商用碳纤维复合材料的固化<sup>[47]</sup>,而且它在监测 CFRP 应变或损伤的可行性早已得到证实<sup>[48]</sup>。目前 AC 法有两大研究方向,一是实时检测 CFRP 层板的损伤<sup>[12,45,48-51]</sup>,二是用来研究环境因素(如湿热)对 CFRP 胶接结构的影响<sup>[52-56]</sup>。

### 2.1 AC 法原理

AC 法检测 CFRP 结构损伤的基本原理是将 CFRP 层板视作一种介电材料(其中低电导率的树脂基体充当电容,而高电导率的碳纤维充当电阻),通过测量 CFRP 结构中 AC 电学参量的变化来实时检测损伤。其中电容由下面公式决定:

$$C = \epsilon_0 \epsilon' \frac{A}{d} \quad (3)$$

式中, $C$  为电容,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\epsilon'$  为介电常数,  $A$  为电极面积,  $d$  为电极间距。而介电常数取决于下式:

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (4)$$

式中,  $\epsilon^*$  为复介电常数,  $\epsilon'$  为介电常数,  $\epsilon''$  为损耗因子。

$$D = \tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{X_c}{R} = \frac{1}{2\pi fRC} \quad (5)$$

式中,  $D$  为介电损耗,  $\delta$  为介电损耗角,  $X_c$  为电抗,  $R$  为电阻,  $f$  为频率,  $2\pi f = \omega$ 。

### 2.2 CFRP 层板损伤的自检 AC 法

M. KUPKE 等<sup>[12]</sup>首先利用图 12 所示的 AC 法测试系统对 CFRP 层合板拉伸损伤的演变进行了监

测。发现试样的电容随加载整体上呈降低趋势,这主要与试样内部因基体开裂形成新的表面有关。而介电损耗却呈上升趋势,尤其是出现纤维断裂时,介电损耗急剧上升。此外,在循环加载(应力幅值逐渐加大)下进行 AC 法测量,发现介电损耗的变化趋势同应力-应变曲线的变化趋势几乎一致,而电容则呈现出不可逆的下降趋势,这说明试样在整个寿命里都逐步发生性能恶化(如裂纹密度的上升)。

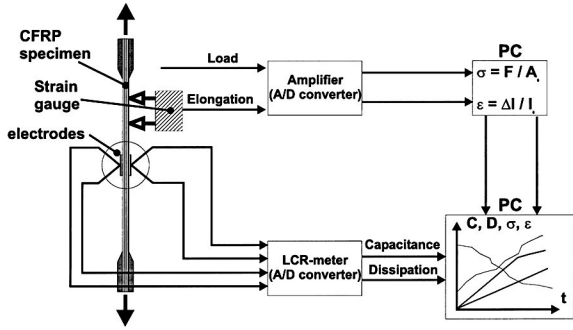


图 12 AC 法测试系统<sup>[16]</sup>

Fig. 12 Testing system of AC method<sup>[16]</sup>

J. C. ABRY 等<sup>[45]</sup>采用 AC 法对 CFRP 层板弯曲损伤的演变进行了实时监测。发现在加载初期,AC 电阻随应力增加而线性上升,电容却随应力增加而线性降低。而在下一阶段,AC 电阻和电容的变化趋势同之前一样,但呈现非线性变化。线性阶段对应试样的弹性变形,而非线性变化则对应内部损伤的演变,即基体横向裂纹密度上升到一定程度引发纤维断裂以及纤维/基体脱粘。

但是上述研究没有对 AC 电学性能变化的机理详细解释。而 R. RAIHAN 等<sup>[50]</sup>采取实时介电测试法监测拉伸过程中介电参量  $\epsilon'$  和  $\epsilon''$  的变化,见图 13,并解释了树脂基复合材料性能恶化与其介电性能变化之间的对应关系。即树脂基复合材料中存在的基体微裂纹或纤维断裂相当于在材料中引入了“新相”,这些“新相”具有不同的电导率和介电性能。在低频电场作用下这些“新相”的边界处会累积一定的电荷而发生界面极化,从而影响材料整体的介电性能。

相比于 DC 法,AC 法的优势在于它对基体微损伤(尤其是层内裂纹和层间分层)特别灵敏,并且 AC 电学测量更能作为一种实时监测手段来感应损伤的演变,这一点对损伤容限设计原则下的 CFRP 结构检修特别重要。另外,界面对其介电性能至关重要,因为新界面的出现往往伴随着电荷的累积以及界面极化。介电检测技术也可以用于评价纤维-树脂界面的粘结性能<sup>[57]</sup>。

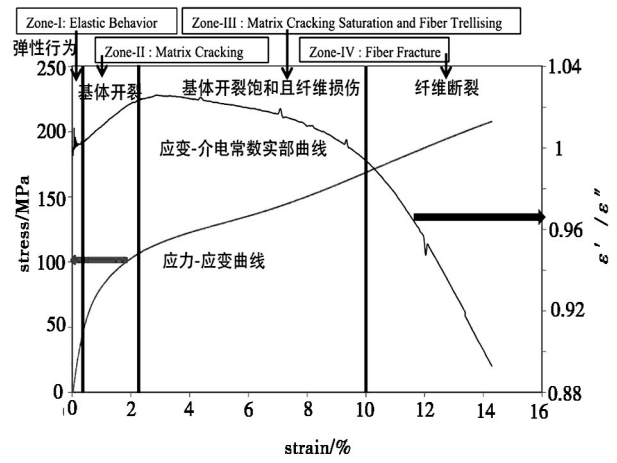


图 13 损伤演变过程中不同区域的介电响应<sup>[50]</sup>

Fig. 13 Response of the dielectric property in different zones of damage progression<sup>[50]</sup>

### 2.3 CFRP 胶接结构损伤的自检 AC 法

AC 法还被广泛地用来研究 CFRP 胶接结构的环境损伤,如利用高频介电谱技术监测 CFRP 胶接结构的湿热老化行为<sup>[52-54,56]</sup>。胶接结构经常会因吸湿而导致性能恶化,尤其是胶黏剂中水分的扩散会导致接头失效形式发生变化。虽然高频介电谱技术早已成功地应用于铝-环氧树脂-铝粘结结构的老化研究<sup>[55,58]</sup>,但直到近些年,随着航空工业逐步扩大 CFRP 复合材料在飞机主承力结构上的应用,高频介电谱技术才被用于 CFRP 胶接结构的损伤检测。

湿热老化一般会使 CFRP 胶接接头的介电常数和介电损耗均上升,如图 14 所示。介电常数上升是因为水作为一种极性杂质增强了偶极子的运动,而介电损耗上升有两个原因:首先,吸湿使树脂基体的电导率大幅上升,并在纤维之间创造导电路径,从而增强损耗;其次,水分子与环氧树脂的侧羟基等基团作用而发生介电松弛导致损耗增加。此外,接头经低温处理所产生的微裂纹增加了界面极化,也会使介电常数和介电损耗上升。与介电频域分析结合使用的时域反射法(TDR)分析可以提供关于接头完整性的相关信息,尤其能突出胶缝处的损伤<sup>[56]</sup>,如空隙和分层。一般通过 TDR 迹线上第一个正反射峰偏移参考线的位置来监测接头的老化损伤,如图 15 所示,而反射峰对应的反射时间可以用来计算损伤的位置<sup>[56]</sup>。

对于监测 CFRP 胶接接头的湿热老化行为,AC 法确实是一种无损检测方法。尤其是结合了频域分析和 TDR 分析的介电法可以灵敏的检测到接头区域存在的水和微裂纹,这在超声 C 扫描中得到了验证<sup>[54]</sup>。此外,TDR 分析自身也是一种极有前景的自检方法,它只需少量的电极布置便可检测到 CFRP 单向层板中的纤维断裂,并且它对 CFRP 交叉铺层板的

冲击损伤(如分层裂纹)也很敏感<sup>[51]</sup>。

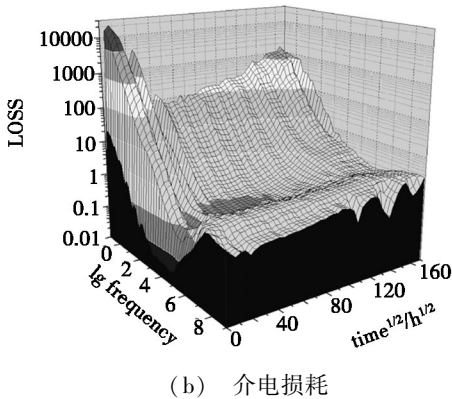
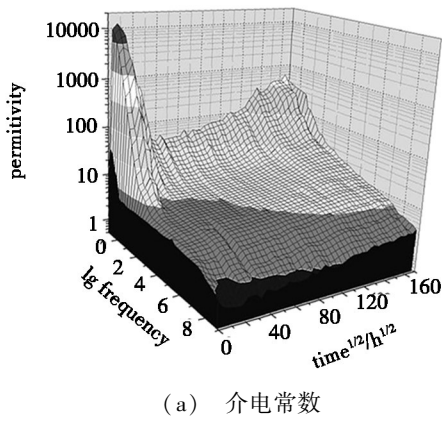


图 14 CFRP/AF 163-2K 接头在 75°C 老化过程中的平均介电常数和损耗数据<sup>[56]</sup>

Fig. 14 Average permittivity and loss data for CFRP/AF163-2K joints, aged at 75°C<sup>[56]</sup>

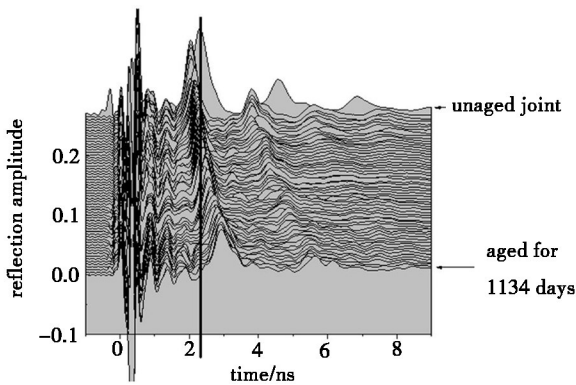


图 15 CFRP/AF 163-2K 接头老化过程的时域数据<sup>[56]</sup>

Fig. 15 Time domain data for CFRP/AF 163-2K joints, aged in water at 75°C<sup>[56]</sup>

### 3 结语

(1)DC 法和 AC 法针对不同结构损伤各有优势,且测量设备并不昂贵,最重要的是 CFRP 本身就是一个传感器,它完全可以实现损伤的自检。

(2)DC 法在检测与纤维相关的结构损伤上特别灵敏,其中横向电阻适合于检测层内基体开裂,厚度电阻对分层损伤较为灵敏,而纵向体积电阻对纤维损伤特别敏感。斜电阻检测损伤的综合性能最佳,且比表面电阻更适合表征 CFRP 内部的微损伤。二维电

势法能感应损伤的确切位置,但它的灵敏度却不及一维电阻法。层间接触电阻测量可以监测热、温度、吸湿、应力等对层间界面的影响。

(3)AC 法对 CFRP 中的基体微损伤很敏感,这主要与这些微损伤所引起的界面极化有关。结合频域分析和 TDR 分析的介电法可以有效的监测 CFRP 结构损伤(尤其是湿热)。

### 4 展望

(1)在不影响结构件正常服役的前提下进行电极网络系统的合理化布置,并且这些系统能够实现绝大多数损伤形式的有效检测。

(2)系统评估损伤是基于结构在损伤和未损伤状态下各种实时数据的对比,所以必须针对不同材料的制造工艺、服役环境、损伤类型等建立原始数据库。

综上所述,虽然自检方法具有一定的前景,但要发展出一套智能化的 CFRP 结构损伤自检体系,仍面临诸多挑战。

### 参考文献

- [1] WANG D, WANG S, CHUNG D D L, et al. Comparison of the electrical resistance and potential techniques for the self-sensing of damage in carbon fiber polymer-matrix composites [J]. Journal of intelligent material systems and structures, 2006, 17(10): 853-861.
- [2] SJ? GRENA A, KRASNKOVS A, VARNA J. Experimental determination of elastic properties of impact damage in carbon fibre/epoxy laminates [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(9): 1237-1242.
- [3] IMIELI? SKA K, CASTAINGS M, WOJTYRA R, et al. Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fibre and hybrid: glass, carbon and Kevlar/epoxy composites [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157(12): 513-522.
- [4] TRAPPE V, HARBICH K W. Intralaminar fatigue behaviour of carbon fibre reinforced plastics [J]. International Journal Of Fatigue, 2006, 28(10): 1187-1196.
- [5] PAVIER M J, CLARKE M P. Experimental techniques for the investigation of the effects of impact damage on carbon-fibre composites [J]. Composites Science and Technology, 1995, 55(2): 157-169.
- [6] BOURCHAK M, FARROW I R, BOND I P, et al. Acoustic emission energy as a fatigue damage parameter for CFRP composites [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(3): 457-470.
- [7] 范金娟, 程小全, 陶春虎. 聚合物基复合材料构件失效分析基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. 36-37.
- [8] SILVA J M A, FERREIRA J A M, DEVEZAS T C. Fatigue damage of carbon-epoxy laminates with embedded optical fibres [J]. Materials Science And Technology, 2003, 19(6): 809-814.

- [9] WANG X, CHUNG D D L. Short carbon fiber reinforced epoxy coating as a piezoresistive strain sensor for cement mortar[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, 71(3): 208–212.
- [10] CHUNG D D L, WANG S. Self-sensing of damage and strain in carbon fiber polymer-matrix structural composites by electrical resistance measurement[J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2003, 11(7): 515–525.
- [11] BARON C H, SCHULTE K. Electric resistance test for in situ determination of fibre failure in CRP laminates[J]. *Materialprüfung*, 1988, 30(11): 361–366.
- [12] KUPKE M, SCHULTE K, SCHLER R. Non-destructive testing of FRP by dc and ac electrical methods[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(6): 837–847.
- [13] DE BAERE I, VAN PAEPEGEM W, DEGRIECK J. Electrical resistance measurement for in situ monitoring of fatigue of carbon fabric composites[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(1): 197–207.
- [14] WANG S, WANG D, CHUNG D D L, et al. Method of sensing impact damage in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement[J]. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(8): 2281–2289.
- [15] SCHULTE K, BARON C. Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements[J]. *Composites Science And Technology*, 1989, 36(1): 63–76.
- [16] XU M X, LIU W G, GAO Z X, et al. Correlation of change in electrical resistance with strain of carbon fiber - reinforced plastic in tension[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1996, 60(10): 1595–1599.
- [17] CEYSSON O, SALVIA M, VINCENT L. Damage mechanisms characterisation of carbon fibre/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis[J]. *Scripta Materialia*, 1996, 34(8): 1273–1280.
- [18] WANG S, CHUNG D D L. Piezoresistivity in continuous carbon fiber polymer-matrix composite[J]. *Polymer Composites*, 2000, 21(1): 13–19.
- [19] WANG S, CHUNG D D L, CHUNG J H. Effects of composite lay-up configuration and thickness on the damage self-sensing behavior of carbon fiber polymer-matrix composite[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40(3): 561–568.
- [20] WANG S, CHUNG D D L. The interlaminar interface of a carbon fiber epoxy-matrix composite as an impact sensor[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40(8): 1863–1867.
- [21] WANG S, CHUNG D D L, CHUNG J H. Self-sensing of damage in carbon fiber polymer-matrix composite by measurement of the electrical resistance or potential away from the damaged region[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40(24): 6463–6472.
- [22] WANG S, CHUNG D D L, CHUNG J H. Impact damage of carbon fiber polymer-matrix composites, studied by electrical resistance measurement[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2005, 36(12): 1707–1715.
- [23] MCANDREW J, ZHUPANSKA O I. Impact damage assessment in CFRP composites using 1D electrical resistance technique[C]//51<sup>st</sup> AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 18th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 12<sup>th</sup>. 2010: 2528.
- [24] ANGELIDIS N, KHEMIRI N, IRVING P E. Experimental and finite element study of the electrical potential technique for damage detection in CFRP laminates[J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(1): 147.
- [25] WANG D, WANG S, CHUNG D D L, et al. Sensitivity of the two-dimensional electric potential /resistance method for damage monitoring in carbon fiber polymer-matrix composite[J]. *Journal of Materials Science*, 2006, 41(15): 4839–4846.
- [26] WANG D, CHUNG D D L. Comparative evaluation of the electrical configurations for the two-dimensional electric potential method of damage monitoring in carbon fiber polymer-matrix composite[J]. *Smart Materials and Structures*, 2006, 15(5): 1332.
- [27] WANG S, CHUNG D D L. Self-sensing of flexural strain and damage in carbon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement[J]. *Carbon*, 2006, 44(13): 2739–2751.
- [28] WANG S, MEI Z, CHUNG D D L. Interlaminar damage in carbon fiber polymer-matrix composites, studied by electrical resistance measurement[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2001, 21(6): 465–471.
- [29] WANG S, CHUNG D D L. Thermal fatigue in carbon fibre polymer-matrix composites, monitored in real time by electrical resistance measurements[J]. *Polymers and Polymer Composites*, 2001, 9(2): 135–140.
- [30] WANG S, KOWALIK D P, CHUNG D D L. Effects of the temperature, humidity, and stress on the interlaminar interface of carbon fiber polymer-matrix composites, studied by contact electrical resistivity measurement[J]. *The Journal of Adhesion*, 2002, 78(2): 189–200.
- [31] ANGELIDIS N, WEI C Y, IRVING P E. The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain[J]. *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 2004, 35(10): 1135–1147.
- [32] TODOROKI A, YOSHIDA J. Electrical resistance change of unidirectional CFRP due to applied load[J]. *JSME International Journal Series A*, 2004, 47(3): 357–364.
- [33] TODOROKI A, UEDA M, HIRANO Y. Strain and damage monitoring of CFRP laminates by means of electrical resistance measurement[J]. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 2007, 1(8): 947–974.
- [34] SHEN L, LI J, LIAW B M, et al. Modeling and analysis of the electrical resistance measurement of carbon fiber polymer-matrix composite[J]. *宇航材料工艺* <http://www.yhclgy.com> 2016年 第5期



mer-matrix composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2007, 67(11): 2513–2520.

[35] TODOROKI A, TANAKA Y, SHIMAMURA Y. Multi-probe electric potential change method for delamination monitoring of graphite/epoxy composite plates using normalized response surfaces[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(5): 749–758.

[36] UEDA M, TODOROKI A, SHIMAMURA Y, et al. Monitoring delamination of laminated CFRP using the electric potential change method: application of normalization method and the effect of the shape of a delamination crack[J]. *Advanced Composite Materials*, 2004, 13(3–4): 311–324.

[37] UEDA M, TODOROKI A, SHIMAMURA Y, et al. Monitoring delamination of laminated CFRP using the electric potential change method (two-stage monitoring for robust estimation)[J]. *Advanced Composite Materials*, 2005, 14(1): 83–97.

[38] WANG X, WANG S, CHUNG D D L. Sensing damage in carbon fiber and its polymer-matrix and carbon-matrix composites by electrical resistance measurement[J]. *Journal of Materials Science*, 1999, 34(11): 2703–2713.

[39] CHUNG D D L. Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing[J]. *Carbon*, 2012, 50(9): 3342–3353.

[40] CHUNG D D L. Damage detection using self-sensing concepts[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2007, 221(4): 509–520.

[41] WANG X, CHUNG D D L. Self-monitoring of fatigue damage and dynamic strain in carbon fiber polymer-matrix composite[J]. *Composites Part B: Engineering*, 1998, 29(1): 63–73.

[42] WANG S, CHUNG D D L. Interlaminar interface in carbon fiber polymer-matrix composites, studied by contact electrical resistivity measurement[J]. *Composite Interfaces*, 1998, 6(6): 497–505.

[43] WANG S, KOWALIK D P, CHUNG D D L. Self-sensing attained in carbon-fiber-polymer-matrix structural composites by using the interlaminar interface as a sensor[J]. *Smart Materials and Structures*, 2004, 13(3): 570.

[44] FOSBURY A, WANG S, PIN Y F, et al. The interlaminar interface of a carbon fiber polymer-matrix composite as a resistance heating element[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, 34(10): 933–940.

[45] ABRY J C, CHOI Y K, CHATEAUMINOIS A, et al. In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements[J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(6): 855–864.

[46] WEN J, XIA Z, CHOY F. Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, 42  
宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2016年 第5期

(1): 77–86.

[47] MAISTROS G M, PARTRIDGE I K. Dielectric monitoring of cure in a commercial carbon-fibre composite[J]. *Composites Science and Technology*, 1995, 53(4): 355–359.

[48] WITTICH H, SCHULTE K, KUPKE M, et al. The measurement of electrical properties of CFRP for damage detection and strain recording[J]. *Proc. 2. ECCM-CTS, Hamburg*, 1994, 12(4): 447–457.

[49] SCHULTE K, WITTICH H. The electrical response of strained and/or damaged polymer-matrix composites [C]//Tenth International Conference on Composite Materials. V. Structures. 1995: 349–356.

[50] RAIHAN R, ADKINS J M, BAKER J, et al. Relationship of dielectric property change to composite material state degradation[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 105(12): 160–165.

[51] TODOROKI A, YAMADA K, MIZUTANI Y, et al. Impact damage detection of a carbon-fibre-reinforced-polymer plate employing self-sensing time-domain reflectometry[J]. *Composite Structures*, 2015, 130(10): 174–179.

[52] BOINARD P, PETHRICK R A, BANKS W M, et al. Nondestructive evaluation of adhesively bonded composite structures using high frequency dielectric spectroscopy[J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(6): 1331–1337.

[53] BANKS W M, PETHRICK R A, ARMSTRONG G S, et al. Dielectric and mechanical studies of the durability of adhesively bonded CFRP structures subjected to aging in various solvents[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 2004, 218(4): 273–281.

[54] PETHRICK R A, HAYWARD D, MCCONNELL B K, et al. Use of high and low frequency dielectric measurements in the NDE of adhesively bonded composite joints [C]//Non-destructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics. International Society for Optics and Photonics, 2005: 48–58.

[55] MCCONNELL B K, PETHRICK R A. Influence of Thermal Spikes on the Ageing of Adhesively Bonded Structures-A Dielectric Study[J]. *The Journal of Adhesion*, 2008, 84(3): 193–211.

[56] MCCONNELL B K, PETHRICK R A. A dielectric study of hydrolytic ageing and the effects of periodic freezing in carbon fibre reinforced plastic jointed structures[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010, 30(4): 214–224.

[57] KECHAOU B, SALVIA M, BENZARTI K, et al. Role of fibre/matrix interphases on dielectric, friction and mechanical properties of glass fibre-reinforced epoxy composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2011, 46(2): 131–144.

[58] DAVIS G D, PETHRICK R A, DOYLE J. Detection of Moisture in Adhesive Bonds Using Electrochemical Impedance and Dielectric Spectroscopies [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009, 23(4): 507–528.