

碳纤维增强复合材料应力检测方法对比研究

孙喜峰

(中核装备技术研究(上海)有限公司 上海 201108)

摘要: 碳纤维增强复合材料在制备加工过程中,会在外力影响下出现分层、断裂等情况,这是应力状态对材料自身的影响。本文结合实验案例对适用于碳纤维增强复合材料的三种应力检测方法进行研究。结果表明,拉曼光谱法和电阻法更适用于实验室的应力检测,而光纤光栅法更适用于工程化的产品检测。

关键词: 碳纤维增强复合材料; 应力检测; 拉曼光谱; 电阻法; 光纤光栅

0 引言

碳纤维增强复合材料相较于金属材料而言,具有更强的刚度与耐老化优势,被广泛应用于航空航天、新能源汽车等领域的轻量化结构中。复合材料中纤维和树脂的模量、热膨胀系数不一致,制作过程中受到温度、压力的影响便会产生一定的内应力,导致结构变形、断裂等问题,严重影响构件的尺寸精度与使用效果。本文充分对比不同测试与评价方法,总结不同复合材料适用的应力测试与评估技术,有效充实复合材料的研究体系。

1 碳纤维增强复合材料的优势

碳纤维增强复合材料通常具有较高的强度以及高比模量、高耐热性、高抗老化性等优势。伴随工艺的进步和对其性能的不断研究,碳纤维增强复合材料已被广泛应用于航空航天、新能源汽车等工业领域中。以轻量化飞机构件为例,结合碳纤维增强复合材料制成的承力构件,既能够充分保障飞机的强度,以维持其飞行稳定性,又可以有效降低飞机自重,提高飞机在极端条件下的飞行安全性。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

将三种高模量碳纤维(简称M1、M2、M3)和4211、BS4、BS2三种基体材料,按照不同实验方法的要求,分别制备出九种不同的样品。制样过程中全程监控样品固化,获取样品内部温度和应变力数据(下文以M1材料组为代表进行表述)。同时为得出不同厚度对应应力检测方法的影响,特将每一种材料分别准备厚度为0.5mm、1.0mm以及2.0mm的三组样品。

2.2 实验方法

(1) 拉曼光谱法:利用碳纤维增强复合材料中晶体结构在外应力影响下的变形机制,以及入射光非弹性瑞利散射峰的偏移机制。

(2) 电阻法:利用在外力影响下碳纤维增强复合材料内部直流电阻的变化机制。

(3) 光纤光栅法:碳纤维增强复合材料在受到外应力影响下,内部光纤光栅发生形变,导致光栅反射光定量变化,推断其内应力参数。

3 实验结果与讨论

3.1 基于拉曼光谱法

实验过程中,用专用卡具对单一碳纤维样品进行不同水平的加载,识别不同样品在不同荷载下的光谱移动频率,确定样品表面的拉曼光谱特征峰值。然后利用光谱对样品内部纤维的应变曲线进行识别,对比上一步中获取的单一碳纤维应变曲线,获取不同树脂对碳纤维表面应力状态的影响。用专用卡具对样品进行应变曲线标定,将不同样品分别置于卡具中进行不同程度的微加载;并利用计算机软件描点获取不同位移加载时样品的应变曲线。

本次实验中,拉曼光谱中心波长的测试范围在 1599cm^{-1} 之内。将样品置入拉曼光谱仪中,在未加载的情况下识别其光谱,获取特定应力峰值的标准位置。而后对样品进行拉伸变形处理,在固定变形条件下定量进行光谱测试,确定样品对应变力敏感的光谱特征峰值,获得固定峰值在不同拉伸应变影响下的频移。应变关系曲线,如图1所示。

实验可知,M1样品组拉曼特征频移分别为 10.5cm^{-1} 、 11.2cm^{-1} 、 9.6cm^{-1} ,对应的纤维表面应变为-0.258%、-0.32%以及-0.259%,应力最大差值0.15GPa,

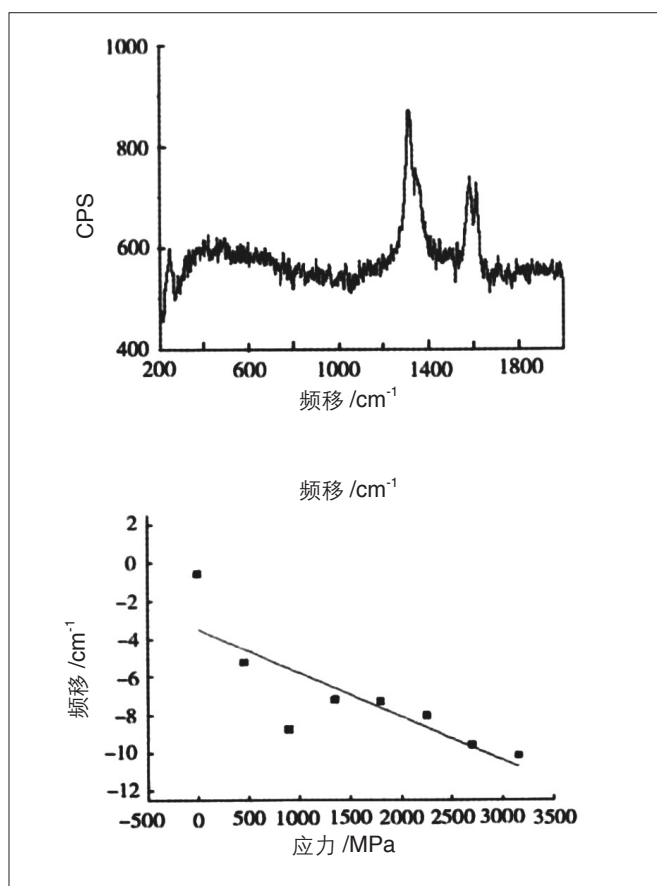


图1 碳纤维拉曼光谱特征以及频移-应力关系
主要表现为物理形态及部分微晶取向变化等。

实验结果可知：

(1) BS4样品的界面结合能力更高，固化过程中能够有效将外界荷载平均转移到纤维表面，显著发挥了碳纤维低热膨胀、刚度强等优势。

(2) BS2组合的内应力明显低于BS4。不同材料的纤维表面应力存在显著差异，且拉曼光谱法能够有效测得内部纤维具体位置的应力分布情况以及详情数值。

(3) 样品的不同厚度对实验数据、实验结论并没有显著的影响。

3.2 基于电阻法

碳纤维增强复合材料的固化加工实验过程中，能够对碳纤维电阻值造成影响的因素主要有：树脂的热膨胀和固化降温时的收缩，以及温度对碳纤维自身的影响。复合材料固化加工过程中残余应力主要分为径向压应力、环向应力以及轴向拉应力等。本文只讨论对纤维电阻数值变化产生主要影响的轴向应力，其余应力作用不做讨论。同时，研究表明，材料厚度对电阻法的影响也很小，本文亦不做过多赘述。

实验过程中，根据纤维特性依照一定的速度与频率进行加载，全程记录进给距离与其所对应的碳纤维电

阻变化情况。根据下述公式得到灵敏系数 k_1 。

$$\frac{(\Delta R_1)}{R_1} = k_1 \varepsilon$$

式中： ΔR_1 —碳纤维内部的电阻变化；

R_1 —电阻原始数值。

碳纤维的电阻会受到温度的影响，因此利用电阻法对复合材料固化过程中内应力的变化进行有效识别，就必须先排除温度对碳纤维电阻的影响。结合下述公式，获取碳纤维单丝电阻温度灵敏系数 k_2 。

$$k_2 \Delta T = \Delta R_1$$

式中： ΔT —实验中的温度变化量。

排除温度影响后碳纤维单丝固化过程中的应力曲线，如图2所示。分析可知：

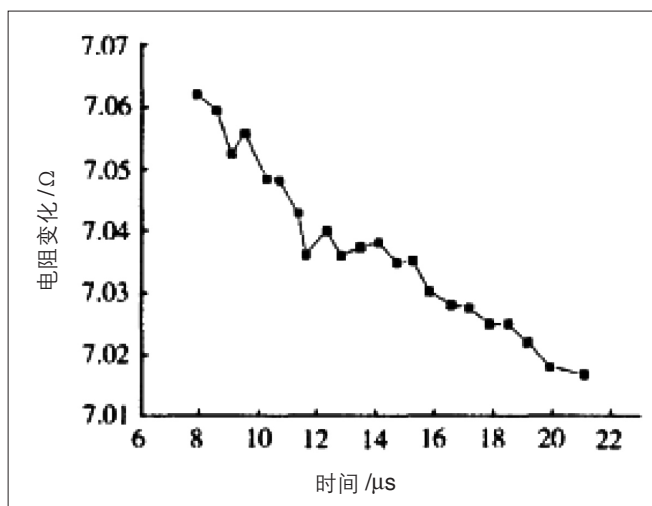


图2 排除温度影响后碳纤维单丝固化过程应力变化

(1) 针对同一树脂体系的不同碳纤维复合材料，选择更高模量的碳纤维（如M1碳纤维），能够有效降低固化加工过程中的变形。

(2) 去除温度影响后，碳纤维单丝电阻的线性程度仍能保持较好状态，因此电阻法能够有效反映碳纤维的受力情况。

3.3 基于光纤光栅法

光纤光栅在受到应变力或温度影响下，中心反射波长会发生漂移，因此可以利用光纤光栅为本次试验的传感器。实验前，将光纤光栅预埋入材料内部。光纤光栅可根据纤维排列方向放置。同时，实验中需要单独埋设温度补偿光栅。真空袋封装后放入热压罐（注意避免光栅出现破裂、折断的情况），同时全程监控光纤信号。

实验可知：随着温度持续上升，树脂逐渐受热固化，材料内部逐渐出现变形与应力积累现象。温度达到固

表 碳纤维增强复合材料内应力检测技术特征对比

检测方法	优势	不足
拉曼光谱法	干扰因素少，能直接反映材料内部纤维表面的应力分布，可以实现非接触测试。	设备使用较繁琐，成本高，对实验环境的要求较高，只能对固化加工后的碳纤维进行应力测试。
电阻法	设备简单，操作简便，能反映加工后碳纤维复合材料的内应力情况。	结果易受环境因素干扰，只能对碳纤维表面应力平均值进行测试，对操作人员要求较高。
光纤光栅法	设备简单、操作简便，适用于现场实验，精度高、反应快。	光纤材料需预埋，工艺复杂；自身较脆弱，过程中需额外注意。

化平台，碳纤维与树脂之间的界面不断增强。材料内部的变形随着固化的稳定而有所平缓，进而逐渐下降，直至保温完成。

后续的降温环节是碳纤维增强复合材料形成内应力的最主要阶段之一。实验过程可知：碳纤维热膨胀系数为正值时，样品会在降温环境中呈现明显的收缩状态，其中树脂对碳纤维材料的收缩控制更多的表现在横向应变，而碳纤维自身的膨胀与变形情况则表现为纵向应变。碳纤维与树脂基体所展现热膨胀特性的不同，导致二者在结合界面上产生一定的内力。所以，有效控制降温速率能帮助复合材料在降温过程中缓慢释放其内应力。

实验结论：

BS4 树脂基于其自身良好的紧密性与粘合性，在固化加热后与碳纤维呈现更为紧密的结合状态，充分发挥了碳纤维受热膨胀的优势，致使二者结合材料的综合性能更具优势。

(2) BS4 树脂自身固化收缩率较小，因此以其作为基体所制备样品的综合性能明显优于 4211 树脂。

(3) 随着时间的增加，不同样品固化变形的程度亦会随着自身厚度的变化而有所变化。这主要是因为随着固化程度的增强，模具的束缚作用会逐渐减弱。

4 碳纤维增强复合材料与先进工业的结合

4.1 碳纤维增强复合材料与航空轻量化构件制造的结合

碳纤维增强复合材料可以和铝合金、钛合金等共同制备飞机轻量化构件，以达成增加机身强度、减轻机身自重的目标。现阶段我国 C919 大型客机中，碳纤维增强复合材料的用量高达 12%。复合材料的使用比例已经能够在一定程度上作为评价大飞机先进程度、质

量性、安全性的重要依据。

4.2 碳纤维增强复合材料与汽车制造的结合

碳纤维增强复合材料在汽车轻量化构件的生产加工过程中获得了十分广泛的应用。基于良好的刚度、硬度、耐热度、抗腐蚀性、抗老化性等优势，其可以完美代替传统汽车工业中的金属材料，用于轮毂、车身、引擎等多种零部件的制作工艺中。

5 结语

通过以上研究与对比可知，三种测试方法都能够在一定程度上反映碳纤维增强复合材料的应力情况。但在实际应用中，不同方法有其自身的优势、特点以及使用范围，需要根据不同材料、不同加工方式的需求来优先选取最适宜的检测方法或方法组合来对碳纤维增强复合材料进行评测与评价，如表所示。

参考文献：

[1] 王璐，菅凤侠．碳纤维增强复合材料增强钢框架肋板的节点滞回性能分析[J]．合成材料老化与应用，2022,51(02):76-78.

[2] 庄蔚敏，陈沈，吴迪．碳纤维增强复合材料包裹强化形式对钢管横向冲击性能的影响[J]．吉林大学学报(工学版)，2022,52(04):819-828.

[3] 赵鑫，邵歆茹，姜贵全，等．碳纤维增强复合材料中改性木质素的应用[J]．包装工程，2022,43(07):103-110.

作者简介：孙喜峰（1983.02-），男，汉族，上海人，本科，工程师，研究方向：复材测试。