

引文格式: 沈艳, 鲁泳, 刘舒霆, 等. 飞机复合材料构件固化度在线监测方法 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(11): 76-85.

SHEN Yan, LU Yong, LIU Shuting, et al. Online monitoring method for curing degree of aircraft composite components[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(11): 76-85.

飞机复合材料构件固化度 在线监测方法*

沈艳¹, 鲁泳², 刘舒霆¹, 郝小忠¹

(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 南京工程学院, 南京 211167)

[摘要] 固化度对 CFRP 构件最终成型质量起决定性作用, 固化度在线监测对于指导航空级复合材料构件的固化工艺控制具有重要意义。针对飞机复合材料构件高质量、高效率固化的实际需求, 提出了基于热耗散特征重构的能量-固化度监测方法, 实现了准确、无损的 CFRP 构件固化度在线监测。根据输入能量与整体热能变化差值的时域分布特征, 实时重构整体热耗散, 实现了固化度直接在线监测。通过有限元仿真与真实试验, 验证了方法的有效性, 结果表明, 本方法在数值仿真模型中的固化度计算误差为 2.3%, 在实际固化试验中的监测误差为 5.0%。

关键词: 复合材料; 固化在线监测; 固化度; 能量转化平衡; 热耗散

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.11.076



沈艳

硕士, 研究方向为复合材料结构设计
与制造、飞机复合材料固化监测技术。

碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 具有高比强度和比模量等优点, 可显著减少飞机结构重量、增加有效载荷、节约整机能耗、提高结构效率。先进复合材料用量与应用水平已经成为衡量航空结构先进性的重要标志^[1]。CFRP 构件的固化是影响构件最终质量的关键过程之一^[2-3], 固化度在线监测技术对于航空复合材料构件的固化工艺控制具有重要意义。在固化过程中, 复合材料的热机械性能随固化度的增加而提高, 当固化度达到 90%, 复合材料的热机械性能随固化度的增大而变化缓慢^[4]。若固化时间不充分, 构件

的固化度过低, 过早脱模得到的构件成型质量无法满足设计指标^[5-6]。由于缺乏成熟的固化度在线监控技术, 工业上常采用保守的固化工艺周期, 造成了极大的时间损耗和能源浪费, 甚至可能导致过度固化, 无法保证零件性能^[7]。此外, 若固化速率过快, 树脂流动不充分, 纤维无法充分浸润, CFRP 构件内部原有的气体以及固化挥发出的气体无法充分排出, 导致成型后的构件有较高的孔隙率, 机械强度降低^[8-10]。因此, 为了保证飞机复合材料高质高效地固化成型, 固化度在线监测极为重要。

目前, 研究者们已提出了大量基于传感器的固化度在线监测方

* 基金项目: 国家自然科学基金 (51775261); 江苏省研究生研究于实践创新项目 (KYCX18_0319)。

法,例如光纤传感法^[11-19]、介电传感法^[2, 20-23]、碳纳米传感法^[24-26]和超声传感法^[27-31]等,通过折射率、温度-电阻特性、声波传输特性等材料性质变化来间接表征固化度变化。上述方法使得固化度在监测方面取得长足进步,极大促进了固化技术的发展。但是,由于上述方法引入了尺寸、性质不同于CFRP构件材料体系的异质传感器,考虑到飞机复合材料构件在服役过程中受到的冲击等严苛载荷,传感器附近材料层间结合强度的不连续性将影响构件综合机械性能。

近两年,有学者提出了无需嵌入传感器的CFRP构件固化度监测方法。该方法是将CFRP构件自身作为传感器的一部分,通过跟踪CFRP构件固化过程中电性能的变化来反映固化程度。Marguerès等^[32-35]提出了整体阻抗分析法,基于微米级的薄片电极研究了CFRP构件固化过程中电学性能随固化进程的变化规律。Jeong等^[36]提出了碳纤维自传感技术,通过监测真空辅助树脂传递模塑(Vacuum assistant resin transfer molding, VARTM)固化过程中CFRP构件面内、沿厚度方向以及整体的相对电阻变化,来判断树脂浸渍、固化的时间。上述方法在无传感器固化度监测技术方面提供了重要的启示意义。但由于在固化过程中CFRP构件的电阻、电容等电学特性还受到温度、纤维床压实搭接以及外部载荷的综合影响,难以剥离出由树脂固化度变化造成的构件整体电学特性变化,因此,目前可直接反映CFRP构件固化度的无传感器在线监测方法尚需进一步发展。

本团队在前期的研究工作中,从能量转化的角度,提出了一种基于CFRP构件固化过程中能量转化平衡的固化度监测方法^[37]。通过精确测量实时输入到CFRP构件中的能量以及构件内部热能变化,计算CFRP构件整体发生固化交联反应

实时放出的化学热,实现了对CFRP构件固化度的无损、准确、定量监测。然而,由于热耗散的直接计算受限于模具导热系数、对流换热系数及构件与接触物之间热阻等参数的不确定,需要事先以完全相同的温度工艺加热具有相同尺寸和材料体系的完全固化构件来获得实时等效热耗散,这使得该方法仅能适用于工艺制定阶段某批量生产的零件,难以在小批量高附加值的CFRP构件实际固化过程中得到应用。

本文提出了一种不依赖对照等效的固化度直接在线监测方法。通过精确测量单位时间内CFRP构件的实时输入能量与整体热能变化,根据两者差值的时域分布特征,实时重构CFRP构件整体热耗散,实现了对CFRP构件固化度的直接在线监测。以可精准测量CFRP构件实时输入电能的自阻电热固化工艺为例,通过有限元数值仿真与实际试验,验证了该方法在不同温度工艺下的有效性。

热耗散特征曲线实时重构方法

1 基于能量转化平衡的热耗散模型

在传热学中,对于任意控制体,能量守恒定律可以描述为:进入控制体的所有形式的能量与控制体自身所产生的能量的和等于控制体内储存能量的变化与流出控制体的所有形式能量的和^[38]。

CFRP构件的固化过程是将未固化的CFRP预浸料中的低分子量、低黏度的树脂单体逐渐转化为三维网状交联大分子结构的过程^[39]。交联是化学反应的结果,需由外部热源或者树脂自身产生的热量来驱动。在自阻电热固化过程中,若将CFRP构件视作有限控制体,那么直流电源通过电极输入到CFRP构件中的电能 Q_e ,即为进入控制体的能量;树脂化学反应放热量 Q_{exo} ,即为控制体自身产生的能量;CFRP构件内部热能的变化 Q_c ,即为控制体内储存能量的

变化;而由于与接触固体的热传导、与空气的对流换热以及CFRP构件的辐射换热,总称为热耗散 Q_{out} ,即为流出控制体的能量。因此CFRP构件自阻电热固化过程中的能量转化平衡方程可以描述为:

$$Q_e + Q_{exo} = Q_c + Q_{out} \quad (1)$$

单位时间内,CFRP构件固化过程中能量转化平衡方程可表示为:

$$P_e + P_{exo} = P_{\Delta T} + P_{out} \quad (2)$$

其中, P_e 为CFRP构件整体的实时输入电功率; P_{exo} 为单位时间内CFRP构件的整体固化反应放热量,即整体放热速率; $P_{\Delta T}$ 为CFRP构件的整体热能变化速率; P_{out} 为单位时间内CFRP构件的整体热耗散量,即整体热耗散速率,可以表示为:

$$P_{out} = P_{exo} + P_e - P_{\Delta T} \quad (3)$$

在自阻电热固化过程中, P_e 可以使用功率计监测CFRP构件两端的电压、电流来实时获取。 $P_{\Delta T}$ 可以通过红外热成像、热电偶等监测温度场来实时获得:

$$P_{\Delta T} = \rho \sum_{i=1}^n \left(V_i C_{p_i} \frac{\partial \Delta T_i}{\partial t} \right) \quad (4)$$

其中, ρ 为CFRP构件的密度; V_i 为CFRP构件中微元 i 的体积; C_{p_i} 为CFRP构件的可逆定压比热容; $\frac{\partial \Delta T}{\partial t}$ 为单位时间内的温度变化。

结合图1,在CFRP构件整体固化反应放热开始之前和结束之后的整体放热速率为0,如果把CFRP构件固化过程分为放热前($t \leq t_1$)、放热中($t_1 < t \leq t_4$)和放热后($t > t_4$),根据能量转化平衡原理,CFRP构件的整体热耗散速率可以表示为:

$$P_{out} = \begin{cases} (P_e - P_{\Delta T}), t \leq t_1 \\ P_{exo} + (P_e - P_{\Delta T}), t_1 < t \leq t_4 \\ (P_e - P_{\Delta T}), t > t_4 \end{cases} \quad (5)$$

根据式(1)可知,在CFRP构件整体固化反应开始 t_1 之前和结束 t_4 之后,整体热耗散速率等于CFRP构

件的实时输入电功率与整体热能变化的差值。

实时监测输入到 CFRP 构件中的电功率与构件整体热能变化速率,若能根据两者的差值曲线实时重构出整体热耗散曲线,便可以实时计算 CFRP 构件的整体放热速率,即:

$$P_{\text{exo_cal}} = P_{\text{out_cal}} - (P_e - P_{\Delta T}) \quad (6)$$

为了掌握目标 CFRP 预浸料构件的实时固化程度,首先需要提前测得 CFRP 构件完全固化时的最大化学反应放热量 $Q_{\text{exo_cal_max}}$ 。在前期研究中,本团队发现在自阻电热固化过程中存在边缘温度梯度效应,即中心温度高边缘温度低。经过工艺优化发现当模具相对于 CFRP 构件的尺寸超差小于 10% 时可将其面内最大温差控制在 20℃ 以内。因此,有必要提前设计一个温度工艺保证 CFRP 构件整体能够完全固化,即采用缓慢的升温速率(本文采用出厂工艺推荐的 1℃/min)与足够长的保温平台,以保证构件边缘低温区也能够达到固化反应温度并完全固化,获得该批次、该几何尺寸的 CFRP 构件完全固化时的最大放热量。

因此,CFRP 构件的固化度可由实时累计的 CFRP 构件的整体放热量与构件完全固化时的整体最大反应放热量的比值求得:

$$\alpha_{\text{-cal}} = \frac{Q_{\text{exo_cal}}}{Q_{\text{exo_cal_max}}} \times 100\% = \frac{\int_{t_1}^t P_{\text{exo_cal}} dt}{Q_{\text{exo_cal_max}}} \times 100\% \quad (7)$$

其中, $Q_{\text{exo_cal_max}}$ 为使用基于热耗散特征重构计算出的 CFRP 构件整体完全固化时的最大放热量。

2 热耗散特征分析

本文的固化度监测方法的监测内容包括:固化过程中实时输入到材料体系中的能量(在自阻电热工艺中,此项为实时输入电能)和材料体系的热能变化(此项为比热容与温度的函数,可通过提前表征该材料体系

的比热容与温度的关系,故主要监测对象为材料温度场)。考虑到在监测过程中输入电能与材料整体热能表征的准确性受几何形态的影响有限,为了更加直观地验证本方法的准确性,本文初步采取了平板件来进行热耗散特征数值分析与试验验证。

2.1 数值仿真模型

借助 COMSOL Multiphysics 5.4 软件,建立了 CFRP 构件自阻电热固化的多物理场数值仿真模型,用于模拟和分析不同温度工艺下的 CFRP 构件整体热耗散特征。图 2 是 CFRP 构件自阻电热固化的三维几何模型,包括 200mm × 200mm × 2mm 的单向 CFRP 层合板、一对 250mm × 10mm × 2mm 的铜电极块、250mm × 250mm × 2mm 的不锈钢模具和上下两层 500mm × 500mm × 30mm 的用来保温的气凝胶毡。

CFRP 构件自阻电热固化的多

物理场数值仿真模型共包含 3 种物理场,即电场、温度场和固化度场,因此分别设置了电流模块、固体传热模块和一般形式偏微分方程模块来表征。不同于热压罐、烘箱工艺中热量由外向内传入构件,在自阻电热、微波加热、感应加热等自热源固化工艺中,固化环境中的模具、辅助材料以及空气的初始状态均处于室温,材料自身发热,由于温差的存在,CFRP 构件在固化过程中不断向外耗散热量。但由于 CFRP 构件-模具尺寸差异、热物性系数不匹配等因素,在自热源的固化工艺中往往存在明显的从中心向边缘分布的面内温度梯度。以本文采用的平板型试件为例,在自阻电热工艺中,其面内等温线的分布呈同心圆式,因此本文选用目标 CFRP 构件的对角线的一半上的等距的 7 点作为测温、控温点。为了分析不同温度工艺下的 CFRP 构件热

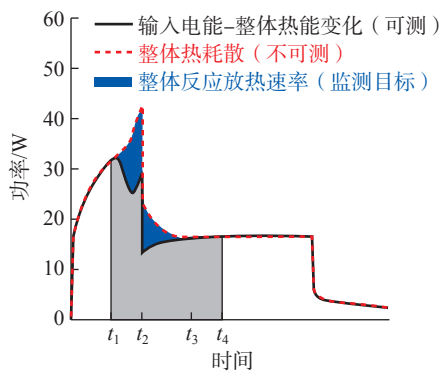


图 1 CFRP 构件自阻电热固化的能量转化特征

Fig.1 Energy conversion characteristics of CFRP components self-resistance electric curing process

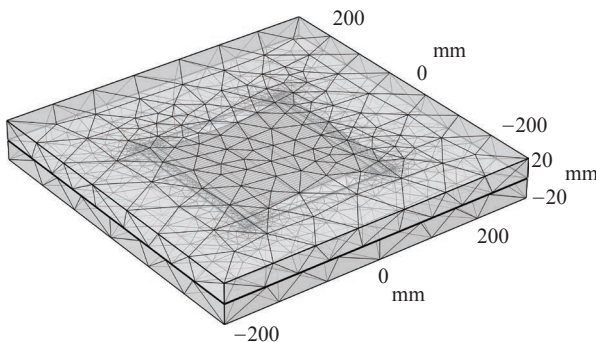


图 2 CFRP 构件自阻电热固化体系的三维几何模型

Fig.2 Three-dimensional geometric model of CFRP components self-resistance electric curing system

耗散特征,分别对3种不同升温速率的简单三段式温度工艺和两种不同变工艺进行了数值仿真计算。

2.2 基于数值仿真结果的热耗散特征分析

图3为不同升温速率下的简单三段式温度工艺中的实时输入电功率与整体热能变化速率的差值($P_e - P_{\Delta T}$)与整体热耗散速率 P_{out} 的对比。可以看出,当CFRP构件整体开始固化反应放热时,“($P_e - P_{\Delta T}$)—时间”曲线斜率开始变化,耗散曲线与($P_e - P_{\Delta T}$)曲线相切,切点就是CFRP构件整体开始放热的时间;当CFRP构件整体固化反应放热快要结束时,耗散曲线已经基本保持水平,($P_e - P_{\Delta T}$)逐渐收敛与耗散曲线重合,切点即为CFRP构件整体固化反应放热结束的时间。

如图4所示,在变工艺的CFRP构件自阻电热固化过程中,热耗散速率曲线与($P_e - P_{\Delta T}$)曲线也具有相似的特征,可以通过“($P_e - P_{\Delta T}$)—时间”曲线和“($P_e - P_{\Delta T}$)—温度”曲线的斜率变化来判断在变工艺自阻电热固化过程中CFRP构件整体固化反应放热的起始和结束时间。

3 热耗散特征曲线重构

CFRP构件的热耗散形式主要包括CFRP构件与模具、辅助材料之间的热传导以及由于保温隔热不完善导致暴露于空气中的CFRP构件表面的对流换热,均为与构件温度有关的函数。根据图3(d)、图4(b)和图4(d)可知,在固化反应放热开始之前的升温过程中,CFRP构件的整体热耗散速率与温度基本呈线性关系。因此,在固化反应放热开始时,可以通过延长热耗散—温度曲线的切线来重构升温段中的热耗散曲线。

在保温过程中,CFRP构件整体的平均温度保持不变,输入CFRP构件中的电功率与整体热能变化速率的差值曲线发生陡降。由于高温区的输入电能不足以维持原有的温度,

高温区除了向外耗散热量外还同时向零件内部的低温区传热,零件与外界的温度缓慢缩小。因此,在保温过程中,单位时间内的CFRP构件整体热耗散量逐渐减少。在CFRP构件整体固化反应放热结束之前,“热耗散—时间”曲线与“($P_e - P_{\Delta T}$)—时间”曲线逐渐趋于重合。若此时处于保温过程中,那么这两条曲线都将收敛为直线。因此,可在“($P_e - P_{\Delta T}$)—时间”收敛时,反向延长收敛点的切线来重构放热后期的整体热耗散,切点即为CFRP构件整体反应放热结束的时间。对于刚进保温阶段时的整体热耗散的重构,可以由刚进保温时的陡降的“($P_e - P_{\Delta T}$)—时间”曲线与该切线反向延长线的结合的分段直线的非线性有理函数(Rational)拟合得到。

综上所述,简单三段式自阻电热温度工艺的CFRP构件整体热耗散速率可以由式(8)重构得到。

$$P_{out_cal} = \begin{cases} (P_e - P_{\Delta T}), t \leq t_1 \\ k_1(T - T_1) + (P_{e1} - P_{\Delta T1}), t_1 < t \leq t_2 \\ \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}, t_2 < t \leq t_3 \\ k_2(t - t_4) + (P_{e4} - P_{\Delta T4}), t_3 < t \leq t_4 \\ (P_e - P_{\Delta T}), t > t_4 \end{cases} \quad (8)$$

其中, t_1 是CFRP构件整体固化反应放热开始的时间,在 $t_1 \sim t_2$ 之间CFRP构件继续匀速升温,热耗散速率仍然可以视为是关于CFRP构件平均温度的线性函数; T_1 为固化反应放热开始时的温度; k_1 为此时热耗散—时间曲线的切线斜率;($P_{e1} - P_{\Delta T1}$)为此时输入电功率与整体热能变化速率的差值; t_2 为刚进保温段的时刻,在 $t_2 \sim t_3$ 之间热耗散—时间曲线呈圆弧状的“L”形(图5); a 、 b 、 c 、 d 为 $t_2 \sim t_3$ 之间“热耗散—时间”曲线的有理函数拟合参数; t_4 为CFRP构件整体固化反应结束的时间; k_2 为此时保温后期“($P_e - P_{\Delta T}$)—时间”曲线的切

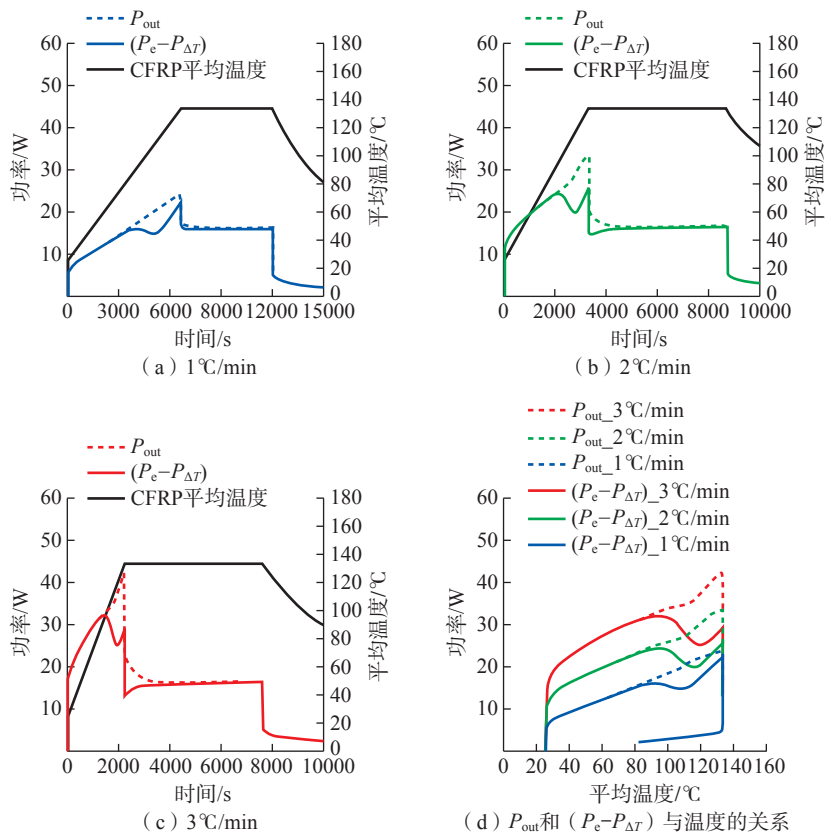


图3 不同升温速率的简单三段式温度工艺中的 P_{out} 与($P_e - P_{\Delta T}$)的关系

Fig.3 Relationship between P_{out} and ($P_e - P_{\Delta T}$) in three-stage processes with different heating rates

线斜率; $(P_{e4}-P_{\Delta T4})$ 为 t_4 时刻输入电功率与吸热速率的差值。

对于五段式“升-保-升-保-降”温度工艺和六段式“升-保-升-降-保-降”,或是其他复杂变工艺,都可以视作升温、保温、降温3种温度变化形式的组合,也可以根据实时监测得到的输入电功率与整体热能变化速率的差值 $(P_e-P_{\Delta T})$ 来实时重构 CFRP 构件的整体热耗散。

数值验证

1 验证方案

以前文中的升温速率为 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的简单三段式温度工艺和变工艺 2 为例,使用热耗散特征重构方法计算了 CFRP 构件自阻电热固化过程中的固化度,并与有限元仿真结果进行了对比分析。根据有限元模型中计算得到的电损耗功率和 CFRP 构件内(热)能变化,重构热耗散曲线,来计算 CFRP 构件整体的实时放热量。

由于在有限元模型中默认树脂处均匀,CFRP 构件最大的放热量等于单位质量的最大放热量与整体质量的乘积。因此,基于热耗散特征重构计算 CFRP 构件固化度等于计算得到的 CFRP 构件整体的实时放热量与整体最大放热量的比值。

2 数值验证结果

2.1 简单三段式温度工艺

图 5 是升温速率为 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的简单三段式温度工艺下的固化度计算过程。首先,如图 5(a)所示,根据 $(P_e-P_{\Delta T})$ -温度”曲线的斜率突变确定固化反应开始的时间为 1240s,此时 CFRP 构件整体的平均温度为 84.9°C 。重构的整体热耗散曲线如图 5(b)所示。图 5(c)是将重构的热耗散与 $(P_e-P_{\Delta T})$ 相减得到的 CFRP 构件整体放热速率。

结果表明,本方法计算得到的放热速率曲线在 2020s 达到峰值 13.21W,实际的放热速率曲线在 2110s 达到峰值 13.74W,计算误差为

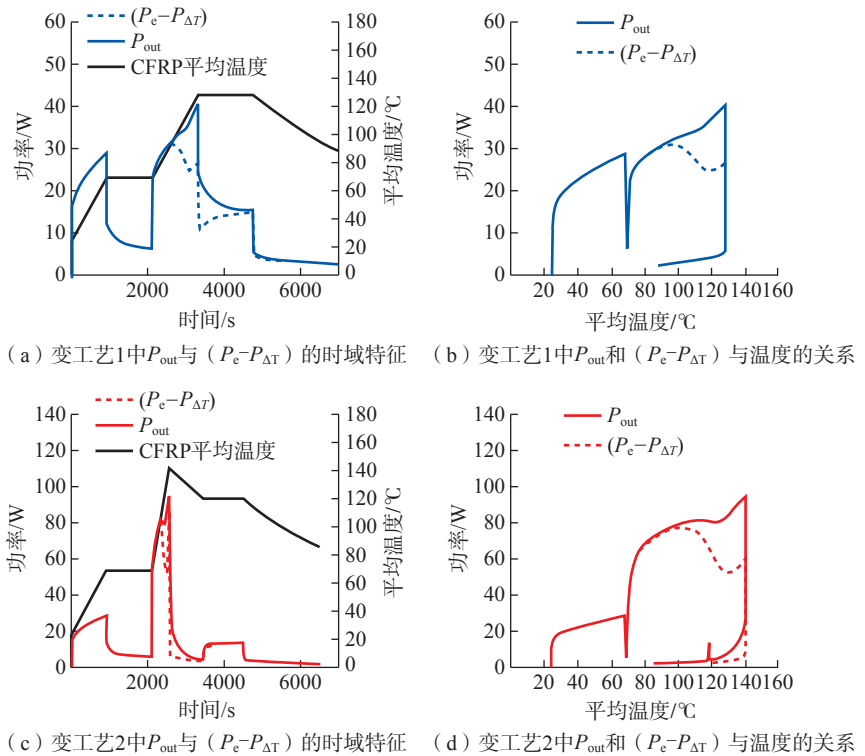


图 4 变工艺下的 P_{out} 与 $(P_e-P_{\Delta T})$ 的关系

Fig.4 Relationship between P_{out} and $(P_e-P_{\Delta T})$ in alternating processes

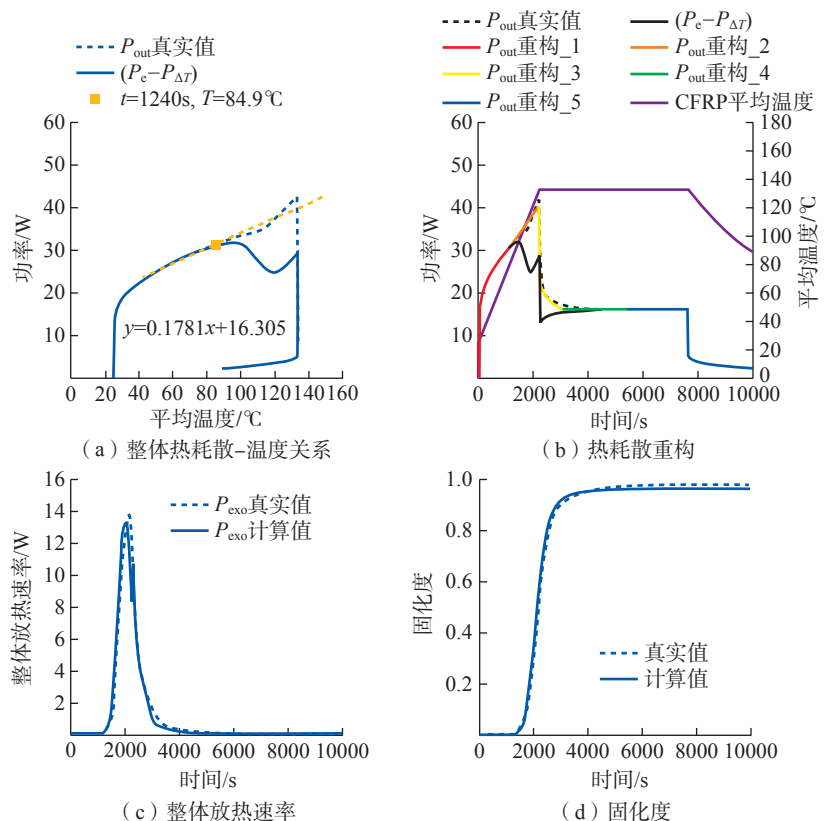


图 5 升温速率为 $3^\circ\text{C}/\text{min}$ 的简单三段式工艺下的固化度计算

Fig.5 Calculation of curing degree during the simple three-stage curing process with a heating rate of $3^\circ\text{C}/\text{min}$

3.9%；但在放热峰前后,计算的放热速率曲线与实际曲线几乎完全重合。对 CFRP 构件整体的实时放热速率实时积分,得到 CFRP 构件整体的实时累计放热量,最终累计放热量为 10825.65J,实际结果为 11085.58J。计算得到的最终固化度为 0.966,实际结果为 0.989,计算误差为 2.3%。

2.2 变工艺

变工艺 2 的热耗散特征重构与固化度计算结果如图 6 所示。根据 $(P_e - P_{\Delta T})$ -温度曲线的斜率变化确定固化反应放热开始的时刻为 2282.5s,以该点切线作为放热后升温段中的热耗散速率,见图 6 (a)。按照分段重构热耗散速率曲线的方法,可将整个热耗散曲线分为放热开始前、放热中升温段、放热中刚进降温段、放热中降温段、放热中保温段以及最后的降温段,见图 6 (b)。根据 CFRP 构件自阻电热能量转化平衡方程计算放热速率曲线,见图 6 (c)。

结果表明,基于热耗散特征重构计算得到的整体放热速率曲线在 2503s 达到峰值 37.37W,实际的放热速率曲线在 2540s 达到峰值 33.42W,对于峰值的时间判断早了 37s。在放热峰前后,2 个方法计算的整体放热速率曲线基本重合。对整体放热速率曲线进行积分运算,整体放热量的最终值为 10349.18J,实际值为 10549.58J。图 6 (d) 为计算的固化度结果,CFRP 构件固化度最终值为 0.924,实际值为 0.942,计算误差为 1.9%。

综上,对于数值仿真模型而言,基于热耗散特征曲线重构的 CFRP 构件固化度计算方法对于简单三段式温度工艺和六段式升降温工艺的固化度计算误差分别仅有 2.3% 和 1.9%,基本验证了本方法在数值计算上的准确性。

试验验证

1 试验方案

试验材料主要包括碳纤维环氧

基复合材料预浸料、钢模、聚酰亚胺隔离膜、铁氟龙脱模布、无孔隔离膜、真空袋、自主研发的 PID 控温的大功

率直流电源、功率计以及热电偶。如图 7 所示,在固化过程中采用霍尔电

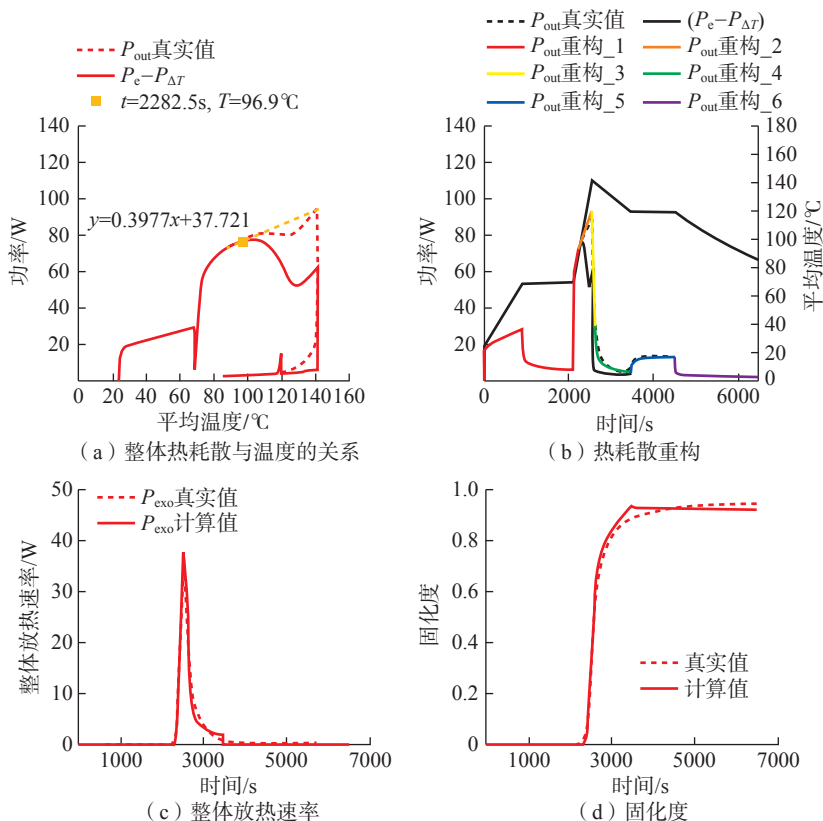


图 6 变工艺 2 固化的 CFRP 构件整体反应放热量计算结果

Fig.6 Calculation results of exothermic heat of CFRP component during the 2nd alternating curing process

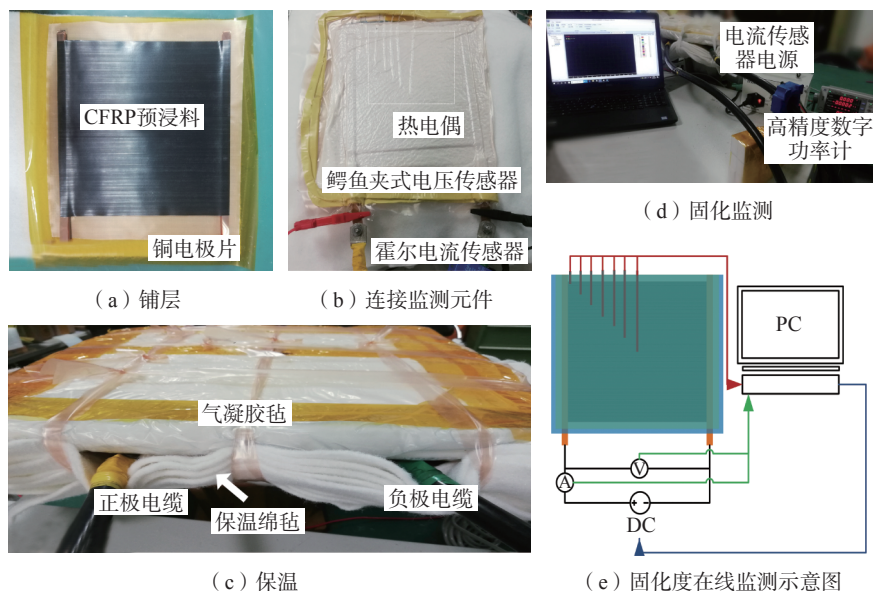


图 7 CFRP 构件自阻电热固化度在线监测系统

Fig.7 Online monitoring system for curing degree of CFRP components in self-resistance electric curing process

用鳄鱼夹式电压传感器监测铜电极两端的电压,电流与电压信号实时传入功率计系统,功率计实时将测得的电功率信号传入工控机中。控温方法与仿真中相同,采用 CFRP 构件几何对角线一半上的 7 个等距控温点的平均温度进行控温,将 7 个测温点的温度视为所在等温区的平均温度,实时计算 CFRP 构件的整体热能变化。根据测得目标 CFRP 构件的实时输入电功率与整体热能变化速率,实时重构整体热耗散,并在线计算整体放热速率、整体累计放热量与固化度。

为获得目标构件完全固化时的最大放热量,对相同批次、相同几何尺寸的 CFRP 预浸料采用提前设计的具有缓慢升温速率(本文采用出厂工艺推荐的 1℃/min)、足够长保温平台的温度工艺进行了固化与固化度在线监测,保证构件边缘低温区能够完全充分固化。将整体放热量曲线完全收敛时的值,作为该批次、该几何尺寸下 CFRP 构件完全固化时的最大放热量。

采用的温度工艺如图 8 所示,以完全相同的固化工艺对与目标 CFRP 构件具有完全相同的尺寸、相同材料体系的完全固化件进行二次加热,来获得目标工艺下真实热耗散,从而验证基于热耗散特征重构的固化度在线监测方法在真实试验中的有效性。

2 试验验证结果

2.1 简单三段式温度工艺

图 9 是 T800/UIN10000 预浸料以升温速率为 3℃/min 的简单三段式温度工艺固化过程中的固化度在线监测结果,该构件的整体最大放热量为 9873.81J。本方法监测得到的 CFRP 构件固化反应放热开始的时刻为 1330s,仅提前了 10s,误差为 0.7%。如图 9 (b) 所示, $(P_e - P_{\Delta T})$ -时间曲线与热耗散-时间曲线放热结束时的重合时间为 4050s,比真实情况晚

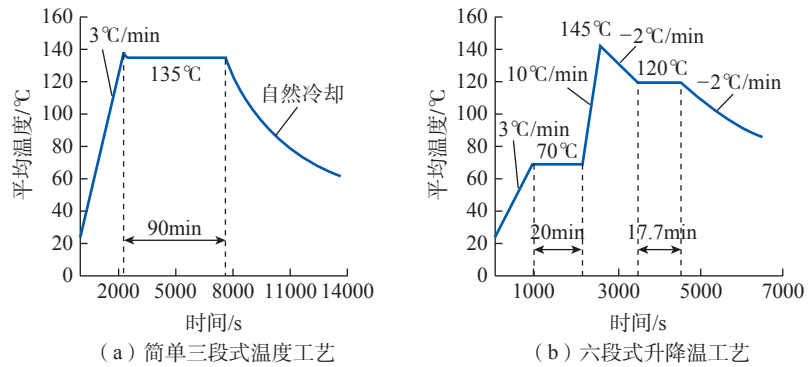


图 8 温度工艺
Fig.8 Temperature process

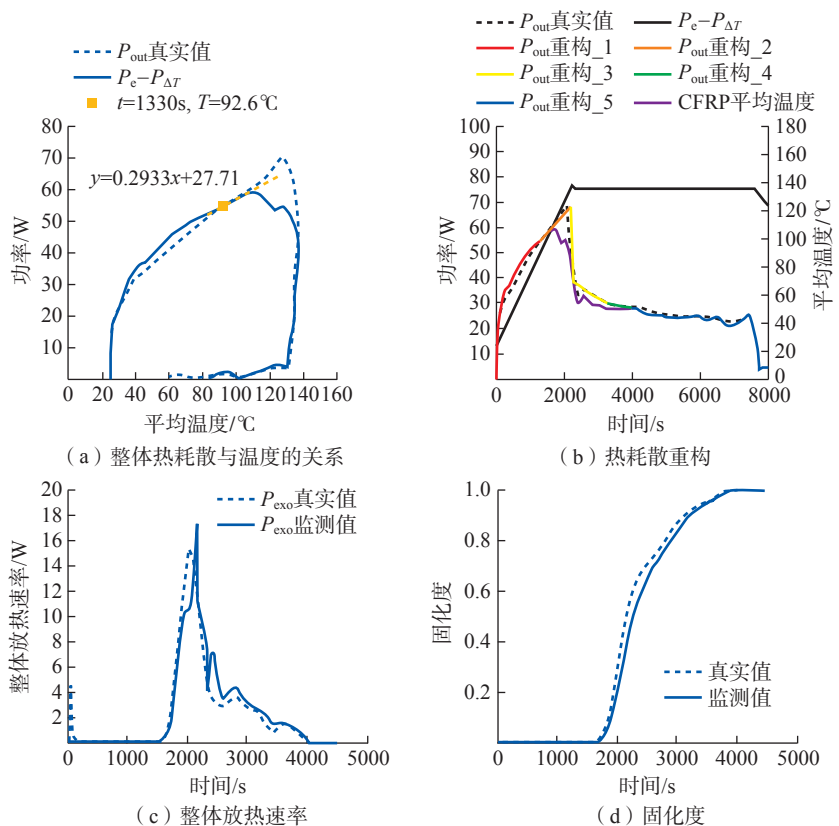


图 9 简单三段式工艺下的监测结果
Fig.9 Monitoring results of simple three-stage curing process

了 60s,误差为 1.5%。根据能量转化平衡方程实时计算放热速率曲线(图 9 (c)),积分得到最终 CFRP 构件的整体放热量为 10367.4J,计算偏差为 5.0%。固化度曲线见图 9 (d),与对照试验计算的固化度曲线相比,本方法的计算误差主要来源于放热峰处的整体放热速率的计算上,而在固化反应放热峰前后两种方法求得的固化度曲线几乎完全重合。

2.2 六段式升降温工艺

图 10 为 T800/UIN12500 预浸料构件以六段式升降温工艺进行自阻电热固化的固化监测结果,该构件的最大放热量为 12266.32J。如图 10 (c) 所示,本方法与基于对照试验计算得到的固化反应放热开始和结束的时间基本一致,测得的固化反应开始分别为 2605s 和 2615s,本方法的判断误差仅为 ±10s,误差为

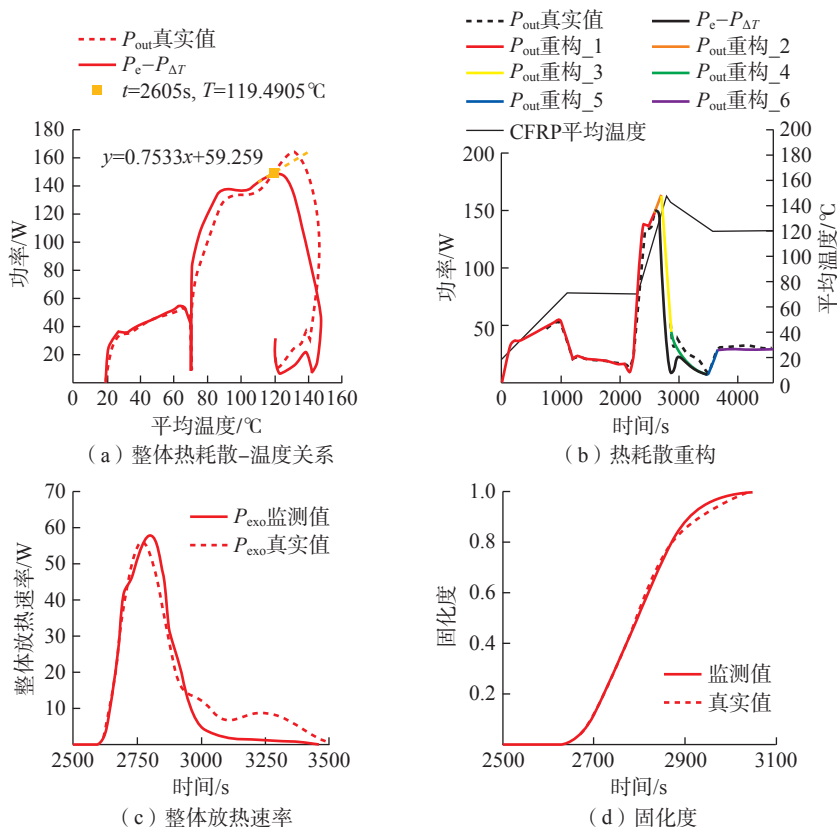


图 10 T800/UIN12500 预浸料六段式升降温工艺固化监测结果

Fig.10 Curing monitoring results of T800/UIN12500 prepregs six-stage heating and cooling process

1.8%。对于固化反应结束的时间,两个方法计算得到该构件达到最大放热量(12266.32J)的时间分别为3045s和3035s,偏差仅为0.3%。然而,达到最大放热量时,放热速率曲线并未收敛,因此可以推断在此温度工艺下树脂可能发生了热降解。两个方法测得的最终整体放热量分别为12677.88J和12317.75J,计算偏差为2.9%。图10(d)是固化度监测结果,可见在2850s之前热耗散特征重构法与对照试验计算得到的固化度曲线基本重合,并且最终两种方法测得的固化度均达到了100%。

综上所述,结合简单三段式温度工艺与六段式升降温工艺的试验验证结果可知,基于热耗散特征实时重构的CFRP构件固化度在线监测方法对于构件整体实时固化反应放热量的计算误差分别为5.0%和2.9%,基本验证了本方法在真实试验应用

中的有效性。

结论

针对飞机复合材料构件高质量、高效率固化的实际需求,提出了基于热耗散特征重构的能量-固化度监测方法,实现了准确、无损的CFRP构件固化度在线监测。

(1) 利用热耗散与($P_e - P_{\Delta T}$)在固化反应放热开始之前和结束之后相等的特性,提出了热耗散特征曲线的实时重构方法,建立了“热耗散-温度-时间”映射模型,提出了基于热耗散特征重构的CFRP构件固化度计算方法。

(2) 通过数值仿真,验证了本方法对于简单三段式温度工艺和六段式升降温工艺的固化度计算误差分别只有2.3%和1.9%;在真实试验中,本方法的监测误差分别为5.0%和2.9%,基本验证了本方法的准确性。

(3) 考虑到输入电能与材料整体热能的监测准确性受几何结构的影响有限,为了更加直观地验证本方法的准确性,本文初步采取了平板件来进行仿真与试验验证。在后续的工作中,本团队将继续在“L”形件、“C”形件以及变曲率、变尺寸构件上对本方法进行拓展研究。

(4) 理论上,本方法适用于自阻电热、微波加热和感应加热等电损耗固化工艺,在这些工艺中,可以通过直接测量或等效标定的方法获得输入到CFRP构件内部的能量,因此本方法可进一步拓展到此类新原理的电损耗固化技术中,指导飞机复合材料固化自适应动态调控。

参考文献

- [1] 杜善义. 复合材料与战略性新兴产业[J]. 科技导报, 2013, 31(7): 3.
- [2] DU Shanyi. Composite materials and strategic emerging industries[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(7): 3.
- [3] KIM J S, LEE D G. Measurement of the degree of cure of carbon fiber epoxy composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 1996, 30(13): 1436-1457.
- [4] BELLINI C, POLINI W, SORRENTINO. A new class of thin composite parts for small batch productions[J]. Advanced Composites Letters, 2014, 23(5): 96369351402300502.
- [5] 陶家祥. 碳纤维预浸料性能与固化工艺研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [6] TAO Jiaxiang. Study on the property and curing behavior of carbon fiber prepreg[D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [7] MOGHADDAM M K, BREEDE A, CHALLOUPKA A, et al. Design, fabrication and embedding of microscale interdigital sensors for real-time cure monitoring during composite manufacturing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 243: 123-133.
- [8] GOPAL A K, ADALI S, VERIJENKO V E. Optimal temperature profiles for minimum residual stress in the cure process of polymer composites[J]. Composite Structures, 2000, 48(1-3): 99-106.
- [9] SASENDRAN S. Effect of degree of cure on viscoelastic behavior of polymers and their composites[D]. Luleå: Luleå Tekniska

Universitet, 2017.

[8] HERNÁNDEZ S, SKET F, GONZÁLEZ C, et al. Optimization of curing cycle in carbon fiber-reinforced laminates: void distribution and mechanical properties[J]. Composites Science and Technology, 2013, 85: 73–82.

[9] AGIUS S L, MAGNIEZ K J C, FOX B L. Cure behaviour and void development within rapidly cured out-of-autoclave composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 47: 230–237.

[10] HUDSON T B, HOUTH, GRIMSLEY B W, et al. Development of a fully automated guided wave system for in-process cure monitoring of CFRP composite laminates[C]//Proceeding of 31st American Society for Composites Technical Conference and ASTM Committee. Williamsburg: Destech Publications, 2016: 2920–2929.

[11] LEVY R L, SCHWAB S D. Monitoring the composite curing process with a fluorescence-based fiber-optic sensor[J]. Polymer Composites, 1991, 12(2): 96–101.

[12] WOERDEMAN D L, SPOERRE J K, FLYNN K M, et al. Cure monitoring of the liquid composite molding process using fiber optic sensors[J]. Polymer Composites, 1997, 18(1): 133–150.

[13] LIU Y M, GANESH C, STEELE J P H, et al. Fiber optic sensor development for real-time in-situ epoxy cure monitoring[J]. Journal of Composite Materials, 1997, 31(1): 87–102.

[14] VATANPARAST R, LI S Y, HAKALA K, et al. Monitoring of curing of polyurethane polymers with fluorescence method[J]. Macromolecules, 2000, 33(2): 438–443.

[15] CHAILLEUX E, SALVIA M, JAFFREZIC R N, et al. In situ study of the epoxy cure process using a fibre-optic sensor[J]. Smart Materials and Structures, 2001, 10(2): 194–202.

[16] KANG H K, KANG D H, BANG H J, et al. Cure monitoring of composite laminates using fiber optic sensors[J]. Smart Materials and Structures, 2002, 11(2): 279–287.

[17] ANTONUCCI V, GIORDANO M, CUSANO A, et al. Real time monitoring of cure and gelification of a thermoset matrix[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(16): 3273–3280.

[18] 李雪芹, 周玉敬, 张子龙, 等. 光纤布拉格光栅传感器监测环氧树脂固化收缩研究[J]. 材料工程, 2012, 40(8): 73–77.

LI Xueqin, ZHOU Yujing, ZHANG Zilong, et al. Curing shrinkage monitoring in epoxy resin by fiber bragg grating sensors[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, 40(8): 73–77.

[19] HE Y, LI Y, LI N, et al. Online

monitoring method of degree of cure during non-isothermal microwave curing process[J]. Materials Research Express, 2018, 5(2): 025306.

[20] LEE D G, KIM H G. Non-isothermal in situ dielectric cure monitoring for thermosetting matrix composites[J]. Journal of Composite Materials, 2004, 38(12): 977–993.

[21] TODOROKI A. Electric resistance change method for cure/strain/damage monitoring of CFRP laminates[C]//Key Engineering Materials. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2004, 270: 1812–1820.

[22] INADA T, Todoroki A. Smart cure monitoring method of carbon/epoxy laminates using electric capacitance change with applied alternating current frequency[C]//Key Engineering Materials. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2005: 2903–2908.

[23] BOLL D, SCHUBERT K, BRAUNER C, et al. Miniaturized flexible interdigital sensor for in situ dielectric cure monitoring of composite materials[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(7): 2193–2197.

[24] LU S, CHEN D, WANG X, et al. Realtime cure behaviour monitoring of polymer composites using a highly flexible and sensitive CNT buckypaper sensor[J]. Composites Science and Technology, 2017, 152: 181–189.

[25] LU S, ZHAO C, ZHANG L, et al. Realtime monitoring of the curing degree and the manufacturing process of fiber reinforced composites with a carbon nanotube buckypaper sensor[J]. RSC Advances, 2018, 39(8): 22078–22085.

[26] LUO S, WANG G, WANG Y, et al. Carbon nanomaterials enabled fiber sensors: A structure-oriented strategy for highly sensitive and versatile in situ monitoring of composite curing process[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 166: 645–652.

[27] LIONETTO F, MAFFEZZOLI A. Monitoring the cure state of thermosetting resins by ultrasound[J]. Materials, 2013, 6(9): 3783–3804.

[28] MAFFEZZOLI A, QUARTA E, LUPRANO V A M, et al. Cure monitoring of epoxy matrices for composites by ultrasonic wave propagation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 73(10): 1969–1977.

[29] LIONETTO F, MONTAGNA F, MAFFEZZOLI A. Ultrasonic dynamic mechanical analysis of polymers[J]. Applied Rheology, 2005, 15(5): 326–335.

[30] GHODHBANI N, MARÉCHAL P, DUFLO H. Ultrasound monitoring of the cure kinetics of an epoxy resin: identification,

frequency and temperature dependence[J]. Polymer Testing, 2016, 56: 156–166.

[31] POMMER C, SINAPIUS M. A novel approach to monitoring the curing of epoxy in closed tools by use of ultrasonic spectroscopy[J]. Sensors, 2018, 18(1): 96–102.

[32] MARGUERÈS P, CAMPS T, VIARGUES M, et al. Preliminary experimental study on the electrical impedance analysis for in-situ monitoring of the curing of carbon/epoxy composite material for aeronautical and aerospace structures[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(9): 095005.

[33] MOUNKAILA M, CAMPS T, SASSI S, et al. Cure monitoring of composite carbon/epoxy through electrical impedance analysis[C]//2014 Second European Conference of the Prognostics and Health Management Society, France: Nantes, 2014.

[34] SASSI S, MARGUERÈS P, OLIVIER P, et al. Determination of anisotropic geometrical parameters for the electrical characterization of carbon/epoxy composite during oven curing[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 80: 204–216.

[35] MOUNKAILA M, SASSI S, HAMADI A, et al. Modelling the electrical behaviour of carbon/epoxy composites and monitoring changes in their microstructure during oven and autoclave curing using electrical impedancemetry[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(8): 085004.

[36] JEONG C, LEE T H, NOH S M, et al. Real-time in situ monitoring of manufacturing process and CFRP quality by relative resistance change measurement[J]. Polymer Testing, 2020, 85: 106416.

[37] 李迎光, 刘舒霆, 沈艳. 一种树脂基复合材料固化度在线自监测方法: CN109827995A[P]. 2019–05–31.

LI Yingguang, LIU Shuting, SHEN Yan. An online self-monitoring method for the curing degree of polymer composites: CN109827995A[P]. 2019–05–31.

[38] 张靖周. 高等传热学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

ZHANG Jingzhou. Advanced heat transfer[M]. Beijing: Science Press, 2009.

[39] CAMPBELL J, FLAKE C. Manufacturing processes for advanced composites[M]. Amsterdam: Elsevier, 2003.

通讯作者: 鲁泳, 副教授、博士, 研究方向为复合材料设计与制造。

Online Monitoring Method for Curing Degree of Aircraft Composite Components

SHEN Yan¹, LU Yong², LIU Shuting¹, HAO Xiaozhong¹

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

[ABSTRACT] Curing degree determines the final quality of CFRP components, while curing degree online monitoring is significant for guiding the curing process control of aerospace-grade composite components. Aiming at the actual demand for curing aircraft composite components with high-quality and high-efficiency, a curing degree monitoring method based on the reconstruction of heat dissipation characteristics is proposed, which implements the accurate and non-destructive online monitoring of CFRP components curing degree. According to the time-domain distribution characteristics of the difference between the input energy and the overall thermal energy change, the overall heat dissipation is reconstructed in real time so that the curing degree is directly monitored online. The effectiveness of the proposed method is verified by finite element simulation and actual curing experiments. The results show that the calculation error of the curing degree is 2.3% in the numerical simulation model and 5.0% in the actual curing experiments.

Keywords: Composite materials; On-line curing monitoring; Curing degree; Energy conversion balance; Heat dissipation
(责编 七七)

(上接第 75 页)

Study on Interlaminar Tensile Properties of Large Thickness Stitched Composites

YANG Hongyu^{1,2,3}, WU Ning^{1,2}, HAN Meiyue^{1,2}, ZHU Chao^{1,2}, CHEN Li^{1,2}

(1. Tiangong University, Tianjin 300387, China;

2. Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials, Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China;

3. Nanjing Fiberglass Research & Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

[ABSTRACT] In order to investigate the influence of the stitching process parameters on the interlaminar properties of large-thickness stitched composites, this paper prepared stitched composite specimens using a modified locking stitching technique combined with a vacuum-assisted resin infusion (VARI) molding process. The effects of the stitching spacing and prefabricated delamination position on the interlaminar tensile properties were tested using a universal material testing machine. The specimens were characterized by scanning electron microscopy (SEM) to determine the cross-sectional morphology after failure. The results showed that the interlaminar tensile properties of the specimens were best when the stitching spacing was 5mm × 5mm and the prefabricated delamination position was at the depth of 17.5mm. The interlaminar fracture mode of the stitched composites was mainly presented as: fracture of the stitches after extraction from the matrix, direct fracture of the stitches within the matrix, and direct fracture of the stitches between the layers.

Keywords: Stitching; Interlaminar properties; Stitching spacing; Stitching thread; Composite materials; Large thickness
(责编 七七)