

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.07.010

# 复合材料液体成型树脂三维流前及干斑监测技术

张峰嘉<sup>1</sup>, 曹鹏军<sup>2</sup>, 郭浩昌<sup>2</sup>, 周何乐子<sup>1</sup>, 黄志高<sup>1</sup>, 周华民<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 洛阳船舶材料研究所, 河南洛阳 471003)

**摘要:** 为准确、便捷地在复合材料制件的实际生产中监测漏气、树脂液体流动及干斑缺陷, 建立了基于介电传感器的复合材料液体成型树脂三维流前及干斑监测技术。将两张相同大小、相互平行的柔性金属箔及金属箔间的纤维复合材料组成平行板式电容传感器, 根据树脂流动过程中传感器内部电介质的状态变化与金属箔间的厚度变化实现监测功能。通过人为制造不同程度的漏气情况, 验证了传感器监测纤维承压情况与漏气的准确性; 通过在纤维预成型体内不同位置设置电容传感器, 利用真空辅助树脂灌注工艺使树脂在纤维预成型体内流动, 其实际观测结果与传感器监测信号分析结果一致, 证明了传感器具有监测树脂流动前沿与树脂流动速率的能力; 在纤维布表面利用凡士林与纤维铺层固定剂制造干斑缺陷, 基于树脂流动监测功能, 验证了传感器识别干斑缺陷的可靠性。该技术为复合材料制件在实际生产中出现的漏气情况、树脂流动情况及成型缺陷等提供了有效在线监测手段。

**关键词:** 纤维增强树脂基复合材料; 复合材料液体成型; 电容式传感器; 树脂流动; 在线监测

**中图分类号:** TQ327.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)07-0058-07

## In Situ Monitoring for Three-Dimensional Resin Flow and Dry Spots in Liquid Composite Molding Process

Zhang Fengjia<sup>1</sup>, Cao Pengjun<sup>2</sup>, Guo Haochang<sup>2</sup>, Zhou Helezi<sup>1</sup>, Huang Zhigao<sup>1</sup>, Zhou Huamin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die &amp; Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471003, China)

**Abstract :** In order to accurately and conveniently monitor air leakage, resin liquid flow and dry spot defects in the actual production of composite parts, an in-situ monitoring technology for three-dimensional resin flow and dry spots based on dielectric sensors in liquid composite molding (LCM) was established. The parallel plate dielectric sensor was formed by two flexible metal foils of the same size and parallel to each other and the composites between the metal foils. The monitoring function was realized according to the state change of the dielectric inside the sensor and the thickness variation between metal foils during the resin infiltration process. The accuracy of the sensors in monitoring atmospheric pressure and air leakage was verified by creating artificial air leakage situations. The ability of the sensor to monitor the resin flow front and resin flow velocity was demonstrated by consistency of actual observations with monitoring signals according to set the sensor at different locations in the fiber preform during the vacuum assisted resin infusion process. The reliability of the sensor to identify dry spot defects was verified by creating dry spot defects through Vaseline and glue on the surface of fabric, based on the resin flow monitoring function. The technology provides effective an in-situ monitoring method for air leakage, resin flow and defects in composite molding process.

**Keywords :** fiber reinforced polymer composites ; liquid composite molding ; capacitive sensor ; resin flow ; in-situ monitoring

近年来, 先进复合材料行业发展快速, 复合材料凭借其优异的性能以及在各种复杂工作环境中所体现出的综合优势, 对各行各业的发展起到了重要推动作用, 目前已成为国家发展的关键战略材

料, 广泛应用于国家重大装备工程与基础设施, 成为各产业发展的关键一环。纤维增强树脂基复合材料凭借其高比强度、比模量、优异的耐腐蚀性等<sup>[1]</sup>, 已经广泛应用于航空航天<sup>[2]</sup>、海洋船舶<sup>[3]</sup>领域并

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52275336)

**通信作者:** 郭浩昌, 硕士研究生, 工程师, 从事树脂基复合材料研究工作

**收稿日期:** 2023-06-12

**引用格式:** 张峰嘉, 曹鹏军, 郭浩昌, 等. 复合材料液体成型树脂三维流前及干斑监测技术[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(7): 58-64.

Zhang Fengjia, Cao Pengjun, Guo Haochang, et al. In situ monitoring for three-dimensional resin flow and dry spots in liquid composite molding process[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(7): 58-64.

发挥着越来越重要的作用。

目前,用于复合材料成型的制造技术<sup>[4]</sup>主要包括手糊成型、挤出成型、热压成型、纤维自动铺放及复合材料液体成型工艺(LCM)等<sup>[5]</sup>。凭借经济、高效且适用于制造复杂形状大型构件等优点,复合材料液体成型工艺已成为一种常用的纤维复合材料制造工艺。典型的复合材料液体成型工艺是将低黏度的热固性树脂通过外部的压力或真空负压灌注到含有纤维预成型体的模具内,依靠树脂在纤维束间与纤维束内的流动、渗透,在一定温度和压力下固化成型纤维增强树脂基复合材料。

复合材料的液体成型主要依靠真空辅助成型工艺,其多采用单面模具,依靠大气压力辅助成型。在灌注树脂之前,保持袋膜内的真空环境、检查是否漏气是成型工艺中至关重要的一步。一旦出现漏气情况而未察觉,将严重影响后续的成型过程甚至使制件报废。目前在生产中主要依靠操作者眼看、耳听、在真空管路接入真空表等进行漏气检测,存在微小漏气检测难、时间长、效率低等问题。

此外,在实际生产中,纤维预成型体表面铺设的多孔导流介质、树脂流动中存在的边缘效应、纤维布渗透率不均匀及工艺辅助用品(如固定剂)等因素会导致成型过程中树脂液体在纤维预成型体中不同厚度、不同方向的流动速率不一致。当树脂在纤维预成型体中的流动速率存在较大差异时,往往一部分树脂会较早到达出胶口形成流动通路,使树脂流速较慢区域的纤维预成型体很难被及时浸润,从而容易形成孔隙、干斑等缺陷,严重降低复合材料制件的力学性能<sup>[6]</sup>。

复合材料液体成型在线监测技术可以通过原位传感器实时监测树脂液体在纤维预成型体内部的流动情况<sup>[7]</sup>,及时监测树脂液体的异常流动、优化成型工艺,准确检测成型过程的漏气,有效减少复合材料液体成型过程中孔隙、干斑等缺陷的产生,保证复合材料构件的质量可靠性和安全性。

目前用于复合材料液体成型过程的树脂流动监测的传感器主要包括光纤传感器<sup>[8-9]</sup>、热电偶<sup>[10]</sup>、压力传感器<sup>[11]</sup>、压阻式传感器<sup>[12-14]</sup>、压电式超声传感器<sup>[15-16]</sup>等。但这些传感器存在众多不足,如成本高、传感器脆弱易碎、使用操作难度大、精度低、制备过程复杂、嵌入后降低复合材料制件的力学性能等。介电传感器<sup>[17-21]</sup>凭借成本低、精度高、测量装置稳定

易操作等优点在复合材料液体成型树脂流动监测领域具有广阔的应用前景。目前介电传感器可分两类,一类是置于纤维预成型体外部的平行板式电容传感器,该传感器可在外部监测树脂流动,不影响纤维内部的树脂流动与复合材料构件质量,但不适用于大厚度制件,无法监测树脂液体在不同厚度处的流动情况;另一类介电传感器是叉指式电容传感器,这类传感器可在单侧监测树脂流动情况,可预埋于复合材料内部,但传感器制备过程较复杂。

为此,笔者提出一种制备简单、使用方便的嵌入式柔性平行板电容传感器。基于柔性金属电极,以纤维预成型体和树脂流体作为电介质,根据漏气、树脂流动等引起的传感器区域的电介质变化,在实际应用中实现漏气与三维树脂流动在线监测,并通过人为预制缺陷,验证了该传感器监测复合材料液体成型过程中干斑等缺陷的能力。

## 1 实验部分

### 1.1 原材料

四轴向E玻璃纤维布:EKQX1200,苏州华基新材料科技有限公司;

乙烯基树脂(30-200P)、固化剂(LPT):华东理工大学华昌聚合物有限公司;

纤维铺层固定剂:WD2078,康达新材料(集团)股份有限公司;

工业白凡士林:市售。

### 1.2 仪器及设备

信号采集设备:LZ-01ARC型,杭州领擎科技有限公司。

用于复合材料液体成型在线监测的介电监测系统包括信号分析软件(TruEbox-01RC)、信号采集设备及嵌入式柔性平行板电容传感器。传感器采用厚度为0.05 mm的柔性铜箔作为电极,以玻璃纤维预成型体与乙烯基树脂作为电介质,尺寸为20 mm×5 mm。实验信号采集设备的测量频率为250 kHz,测量电压为30 mV。

### 1.3 制作工艺

采用E玻璃纤维布作为增强材料,乙烯基树脂作为基体材料,固化剂用量为树脂质量的1.5%。基于实际生产中广泛使用的真空辅助树脂灌注工艺进行复合材料液体成型过程监测。为研究不同厚度的树脂流动情况,采用10层玻璃纤维布(8 mm)与30层玻璃纤维布(24 mm)两种铺层形式,纤维布尺

寸为300 mm×200 mm。此外,使用工业白凡士林与纤维铺层固定剂在纤维预成型体内预制缺陷,用于验证传感器监测干斑等缺陷的能力。

#### 1.4 复合材料液体成型介电监测原理

采用平行板电容传感器作为监测元件,实时监测复合材料液体成型过程中的树脂流动情况。平行板电容器由两张相同大小、相互平行的柔性金属箔以及金属箔之间的纤维复合材料构成。在复合材料液体成型过程中,金属箔之间的纤维复合材料发生厚度与状态的变化均会引起传感器的电容变化,可根据该电容变化实时监测,如(1)式所示<sup>[22]</sup>:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s A}{d_s} \quad (1)$$

式(1)中: $C$ 为传感器的测量电容值; $\varepsilon_0$ 为真空介电常量(近似值为 $8.85 \times 10^{-12}$  F/m); $\varepsilon_s$ 为传感器内部电介质的介电常数; $A$ 为传感器的面积; $d_s$ 为传感器两金属箔之间的距离。

该传感器在复合材料液体成型过程中的监测机理可从以下两个方面进行分析。

(1)灌注树脂前的大气压力与漏气监测。纤维预成型体的厚度与压力相关<sup>[23]</sup>;抽真空前,纤维预成型体不受压并保持自由状态,当抽真空后,纤维受到大气压力作用被压实,其厚度明显减小,此时传感器金属箔之间的距离也明显减小使电容增加,实现对大气压力作用于纤维预成型体的监测;抽真空后,在不漏气情况下,纤维预成型体的厚度保持不变;当漏气时,真空袋膜内的真空度降低,纤维预成型体受到的压力减小、厚度增大,传感器金属箔之间的距离增大,使电容降低,从而实现漏气监测;

(2)灌注过程中的树脂流动监测。树脂流进传感器区域前,传感器内部的电介质为玻璃纤维布;当树脂流进传感器区域后,传感器内部的电介质为玻璃纤维布和树脂,该区域的介电常数为玻璃纤维布和树脂的混合介电常数;随着树脂逐渐充填传感器区域的玻璃纤维布,传感器内部电介质的介电常数也不断发生变化;当树脂完全填充传感器区域的玻璃纤维布后,传感器内部的电介质不再发生变化,其介电常数保持稳定,因此传感器的电容也保持稳定,从而实现树脂流动监测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纤维承压及漏气监测

由于电容式传感器的信号变化与两电极间的厚度直接相关,因此当纤维预成型体受到的压力发

生变化时,纤维布的厚度发生变化,使传感器两电极间的厚度发生变化,从而引起信号变化。该传感器可准确监测纤维布受大气压力作用的状态变化,抽真空后,传感器的电容明显增大,且真空度稳定后电容信号也保持稳定,如图1所示,其中电容相对变化值为电容绝对变化值与电容初始值的比值的百分数。

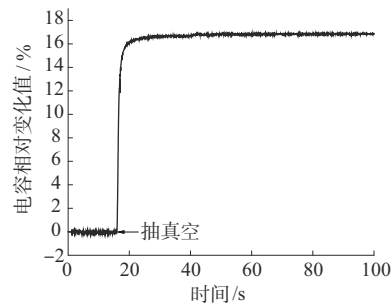


图1 电容式传感器在大气压力作用下的信号变化

为检验传感器监测漏气的效果,在真空袋膜表面扎孔模拟明显漏气情况,在双层密封胶带中间放置纸胶带模拟微小缓慢漏气情况,传感器监测结果见图2。当成型中发现明显漏气时,传感器反应迅速,电容下降趋势明显;再次抽真空后,当微小缓慢漏气发生时,传感器电容信号缓慢下降,可通过电容信号变化准确监测漏气情况并识别漏气程度。

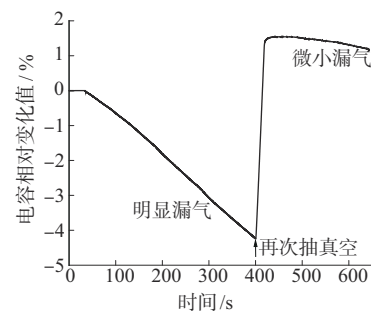


图2 电容式传感器在漏气监测中的信号变化

在实际生产中,人工眼看、耳听及真空表辅助等方法需要相对较长的时间判断真空袋膜内是否发生漏气,而该电容传感器可以及时准确地监测漏气情况,当传感器电容信号下降时,即表明存在漏气情况;传感器信号稳定时,证明真空袋膜内保持良好的真空环境,不存在漏气情况。相比于现有技术手段,该传感器具有效率高、准确灵敏的优点,将进一步减小生产中的时间成本,提高生产效率。

### 2.2 树脂流动前沿与流动速率监测

为验证传感器监测树脂液体在纤维预成型体中流动的能力,通过将两个传感器放置在纤维预成

型体同一厚度的不同位置,使树脂先后流经传感器,观察传感器监测树脂液体流动的能力,如图3所示,图中箭头表示树脂流动方向。传感器尺寸为5 mm×20 mm,传感器1右边缘与传感器2左边缘的距离为33 mm。

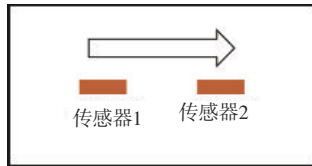


图3 传感器监测平面内树脂流动前沿及流动速率示意图

监测结果如图4所示,整体来看,当树脂流经传感器时,两个传感器均有明显信号。经过对信号的分析,即可获得树脂流动前沿的准确位置及流动速率。以传感器1为例,在381 s时,树脂液体开始流进传感器1区域,信号开始明显变化;562 s时,树脂已经完全浸润传感器区域,此后信号变化放缓并逐渐稳定。562 s后信号放缓但仍有变化是由于平行板电容传感器存在边缘电场,即在传感器区域之外仍存在一小部分区域具有弱监测能力,能够感知树脂液体流动,虽然树脂液体已经完全填充传感器区域,但由于边缘电场的存在,传感器附近的树脂流动仍会引起电容变化,当树脂液体完全流出区域后,电容信号保持稳定。由于传感器附近的弱边缘电场引起的电容变化较小且变化速率较慢,因此笔者通过电容信号变化的斜率判断树脂填充传感器区域的开始与结束。对于传感器2,881 s时树脂液体开始充填传感器2区域,1 116 s时树脂液体完全充填传感器2区域,以此数据来分析树脂液体在传感器2区域的流动速率。

传感器在流动方向的长度 $L$  (20 mm)与树脂流进与流出传感器区域的时间之差 $\Delta t$ 之比即为树脂在传感器区域内的流动速率。由信号分析可得,在

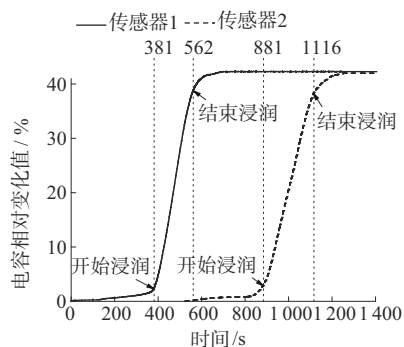


图4 电容式传感器在纤维预成型体同一厚度不同位置处对液体流动的监测效果

传感器1区域内树脂的流动速率为0.110 mm/s,传感器2区域内树脂的流动速率为0.085 mm/s,在两传感器区域间树脂的流动速率为0.103 mm/s。通过监测得到的树脂流动速率可以看出乙烯基树脂液体在四轴向玻璃纤维布的流动速率是逐渐降低的,与其他研究的结果一致。该实验也证明了传感器监测树脂面内流动的能力。

为验证传感器监测树脂液体在纤维预成型体中厚度方向流动差异的能力,通过将两个电容式传感器放置在同一位置的不同厚度处,观察树脂流经时传感器的信号变化,如图5所示,图中箭头表示树脂流动方向。传感器尺寸为5 mm×20 mm,传感器1置于纤维预成型体上部,传感器3置于纤维预成型体下部,传感器1下电极与传感器3上电极中间间隔2层玻璃纤维布(1.6 mm)。

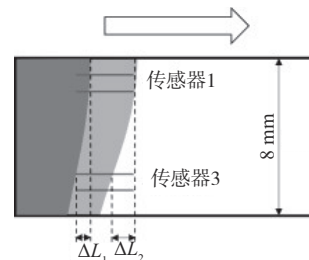


图5 传感器监测不同厚度处树脂流动前沿示意图

监测结果如图6所示,图中黑色点线依次表示树脂在传感器1区域的充填开始时间(381 s)、充填完成时间(562 s),以及树脂在传感器3区域的充填开始时间(423 s)和充填完成时间(620 s)。由图6可以看出,当纤维预成型体上部树脂流动前沿进入传感器1区域42 s后,下部树脂流动前沿才进入传感器3区域,此时纤维预成型体上部与下部流动前沿的距离差 $\Delta L_1$ 为上部树脂在传感器1区域内流动的长度4.6 mm (此时上部树脂的流动速率近似为上部树脂在传感器1区域内流动的平均速率)。当树脂液体完全充填传感器1区域时,传感器3区域被部分充填,此时上部树脂与下部树脂流动前沿的距离差 $\Delta L_2$ 为5.1 mm (此时下部树脂的流动速率近似为下部树脂在传感器3区域内流动的平均速率)。该结果证明了传感器监测树脂在纤维预成型体厚度方向流动前沿差异的有效性。

为了进一步探究电容式传感器监测不同厚度处液体流动差异的能力,将两个电容式传感器放置于24 mm厚的大厚度预成型体的上下表面,如图7所示,图中箭头表示树脂流动方向,传感器尺寸为5

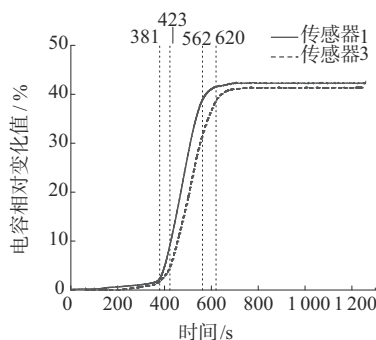


图6 传感器在同一位置不同厚度处对液体流动的监测效果

mm×20 mm,传感器间隔为16 mm。上表面传感器为传感器T,下表面传感器为传感器B。为加快流动速度便于观察树脂流动差异,在该实验中纤维预成型体表面铺设导流网。

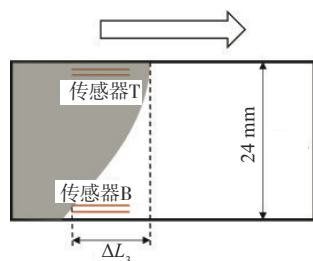


图7 传感器监测大厚度制品不同厚度处树脂流动前沿的示意图

监测结果如图8所示,图中黑色点线依次表示树脂在上表面传感器区域的充填开始时间(133 s)、充填完成时间(239 s),以及树脂在下表面传感器区域的充填开始时间(305 s)和充填完成时间(416 s)。133 s时上表面树脂流动前沿进入传感器区域,172 s后下表面树脂流动前沿才进入传感器区域,这体现出不同厚度处树脂流动的显著差异。

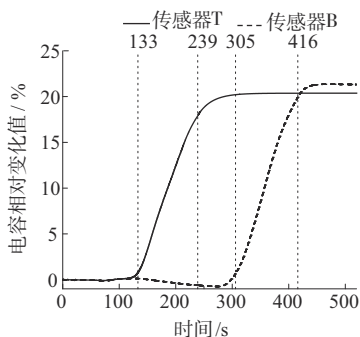


图8 传感器在大厚度制品体中不同厚度处对液体流动前沿的监测效果

纤维预成型体上表面的树脂已经流出传感器区域后,下表面的树脂才流进传感器区域,这种情况下,只能将上表面树脂在传感器区域内的平均流动速率作为近似值来计算大厚度预成型体上、下表面

树脂流动前沿距离差 $\Delta L_3$ 。上表面树脂在传感器区域内的平均流动速率为0.189 mm/s,因此当下表面树脂刚流进传感器区域时,与上表面树脂流动前沿的距离差 $\Delta L_3$ 为32.48 mm。该结果证明了,对于大厚度制品,尤其是表面铺设导流网的制品来说,上、下表面的树脂流动差异巨大,不可忽略,需要进行工艺优化避免流动缺陷,这也证明了传感器监测流动前沿的必要性。

### 2.3 干斑缺陷监测

为模拟实际生产中由于树脂流动异常或纤维布固定剂的使用而引起的干斑缺陷,使用凡士林与纤维固定剂预制干斑缺陷,改变树脂在设定区域的流动与浸润情况,如图9所示。凡士林与固定剂均匀涂抹在每一层纤维布的上下表面。在树脂浸润前,可以看出处理过的区域存在明显的不同。

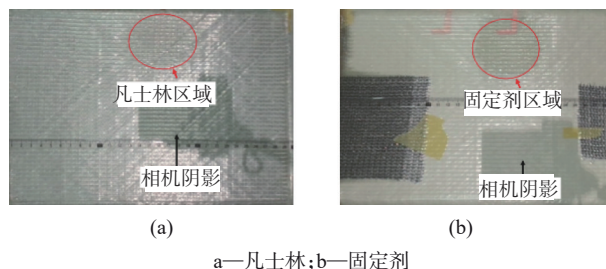
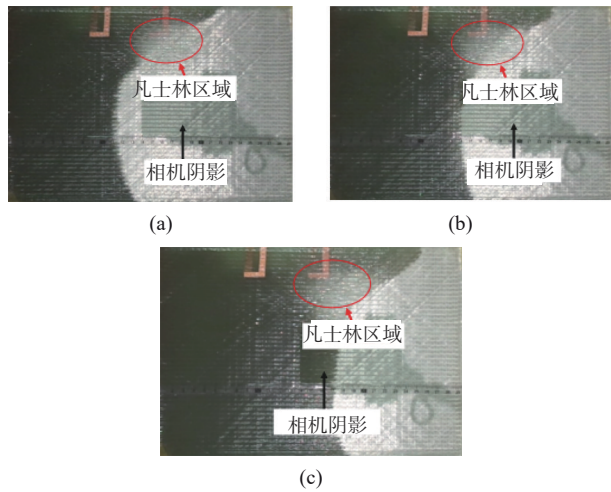


图9 经过凡士林与固定剂处理的玻璃纤维预成型体

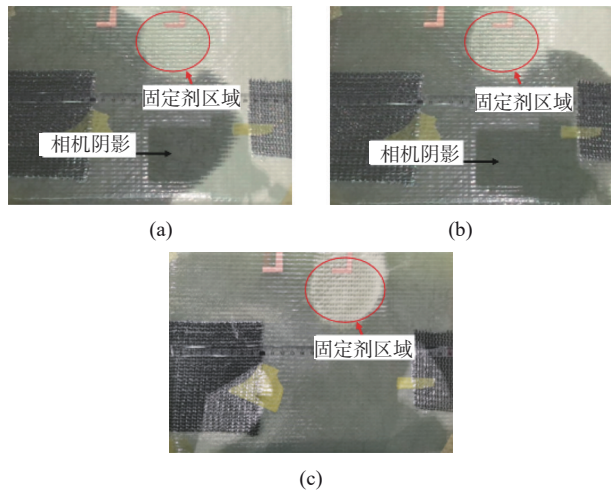
经过凡士林处理后的玻璃纤维预成型体中的树脂流动情况如图10所示,经过固定剂处理后的玻璃纤维预成型体中的树脂流动情况如图11所示。由图10和图11可以看出,凡士林处理后的纤维布仍能被树脂液体浸润,但相对于正常区域显示出的颜色较浅、浸润效果较差;固定剂处理后的纤维布则存在明显的浸润缺陷,树脂只能渗透每一张四轴向布的中间层,相对于正常区域显示出明显的干斑区域,其缺陷效果比凡士林区域更明显,当树脂充填完成后可以从固定剂区域的纤维束间的空隙看到渗透进四轴向纤维布中间层的树脂。

传感器的监测结果如图12和图13所示。在图12中,由于边缘效应过于明显,导致连接传感器的导线先被浸润而引起电容变化(图中圆形虚线部分),但不影响缺陷监测的效果。当树脂流经正常区域与凡士林区域时,电容变化存在明显差异。在凡士林区域,电容变化更加缓慢,且由于树脂渗透较慢,导致很长一段时间内,电容信号一直保持缓慢增加。最终,凡士林区域的电容的变化幅度只有正常区域的60%。图13中固定剂区域的电容变化比



a—树脂液体刚浸润凡士林区域;b—树脂液体浸润部分凡士林区域;  
c—树脂液体浸润大部分凡士林区域

图10 经过凡士林处理后的玻璃纤维预成型体中的树脂流动情况



a—树脂液体刚浸润固定剂区域;b—树脂液体浸润部分固定剂区域;  
c—树脂液体浸润大部分固定剂区域

图11 经过固定剂处理后的玻璃纤维预成型体中的树脂流动情况

正常区域缓慢。与凡士林区域不同的是,在树脂浸润后期,电容变化更加缓慢,意味着纤维布表面固定剂对树脂浸润的影响远大于凡士林,会形成明显缺陷。最终,固定剂区域的电容变化幅度只有正常区域的30%。综上所述,当树脂流经凡士林区域或

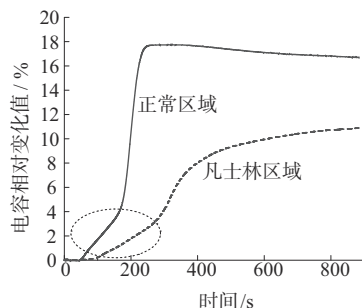


图12 树脂在凡士林区域与正常区域流动的信号对比

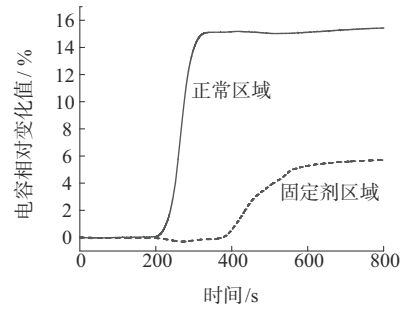


图13 树脂在固定剂区域与正常区域流动的信号对比

固定剂区域时的信号与流经正常区域的信号区别在于以下两个方面。

(1)在正常区域,树脂流动前沿完全经过传感器时,电容会保持稳定,并以此确定流动前沿位置与流动速率;但在缺陷区域,由于树脂渗透纤维布的效果差,传感器区域的电介质变化缓慢,因此在相当长的一段时间内电容信号始终保持缓慢增加,无法通过正常方法确定流动前沿位置和流动速率。

(2)在正常区域,树脂可以完全渗透、浸润纤维布,传感器的设置相同时,由于所有位置的树脂都可以完全浸润纤维布,因此即便传感器的位置不同,电容变化的幅值也应该相同;但在缺陷区域,纤维表面被凡士林或固定剂包裹覆盖,使树脂无法正常浸润部分甚至大部分纤维布,对于四轴向布来说,树脂只能通过纤维丝束浸润四轴向布的中间层纤维布,因此在只能浸润部分纤维的情况下,缺陷区域的电容变化幅值会明显小于正常区域的电容变化,且缺陷不同,纤维的浸润程度不同,电容变化的幅值也不相同。

该实验结果证明了传感器具有良好的监测复合材料液体成型中干斑缺陷的能力,可为实际生产中的成型工艺参数调整与优化提供可靠数据支撑。

### 3 结论

(1)基于平行板电容器原理制备了操作简单、使用方便、适用于实际生产的介电传感器,通过传感器内部电介质状态与电极间距离的变化实现复合材料液体成型过程中的真空状态与树脂流动状态监测。

(2)基于传感器电极间的距离变化,根据纤维预成型体的厚度与承受压力的关系,介电传感器可以准确、灵敏监测纤维预成型体的受压状态,在灌注树脂前有效判断真空袋膜内是否有漏气情况,提高复合材料制件的实际生产效率。

(3)基于传感器内电介质状态的变化,介电传感

器可以有效、准确监测树脂流动前沿位置与树脂流动速率,以此为基础监测纤维预成型体不同厚度处树脂流动前沿的距离差,为复合材料制件实际生产中的树脂流动状态提供有效在线监测手段。

(4)在树脂流动状态监测的基础上,通过人为预制干斑缺陷,验证了介电传感器监测纤维预成型体内部树脂流动异常状态的能力,为实际生产中复合材料制件内部的成型缺陷识别提供有效的在线监测技术与可靠的数据支撑。

#### 参考文献

- [1] Morampudi P, Namala K K, Gajjela Y K, et al. Review on glass fiber reinforced polymer composites[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 43:314-319.
- [2] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(1): 1-12.  
Du Shanyi. *Advanced composite materials and aerospace engineering*[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1):1-12.
- [3] 施军, 黄卓. 复合材料在海洋船舶中的应用[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012(S1):269-273.  
Shi Jun, Huang Zhuo. *Application of composite material in the marine structures*[J]. *Composites Science and Engineering*, 2012 (S1):269-273.
- [4] Rajak D K, Pagar D D, Menezes P L, et al. Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications [J]. *Polymers*, 2019, 11(10). DOI:10.3390/polym11101667.
- [5] Carlone P, Rubino F, Paradiso V, et al. Multi-scale modeling and online monitoring of resin flow through dual-scale textiles in liquid composite molding processes[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(5-8):2 215-2 230.
- [6] 禹岳, 王喆, 姚沛衡, 等. 复合材料液体成型树脂流动前锋监测技术研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(23):251-258.  
Yu Yue, Wang Zhe, Yao Peiheng, et al. *Research progress on monitoring methods for resin flow front during liquid composite molding process*[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(23):251-258.
- [7] 王奕首, 李煜坤, 吴迪, 等. 复合材料液体成型固化监测技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2017, 538(19):50-59.  
Wang Yishou, Li Yukun, Wu Di, et al. *Progress on cure monitoring for liquid composite molding*[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 538(19):50-59.
- [8] 杨春, 沈超. 用光纤进行树脂基复合材料的成型过程监测[J]. *材料工程*, 1999(7):36-39.  
Yang Chun, Shen Chao. *In situ cure monitoring of fabrication of epoxy resin composites with a novel fiber optic sensor*[J]. *Journal of Materials Engineering*, 1999(7):36-39.
- [9] Rufai O, Chandarana N, Gautam M, et al. Cure monitoring and structural health monitoring of composites using micro-braided distributed optical fibre[J]. *Composite Structures*, 2020, 254. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112861.
- [10] Tuncol G, Danisman M, Kaynar A, et al. Constraints on monitoring resin flow in the resin transfer molding (RTM) process by using thermocouple sensors[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(5):1 363-1 386.
- [11] Kahali M M, Salas M, Ersöz I, et al. Study of resin flow in carbon fiber reinforced polymer composites by means of pressure sensors [J]. *Journal of Composite Materials*, 2017, 51(25):3 585-3 594.
- [12] Khan T, Ali M A, Irfan M S, et al. Resin infusion process monitoring using graphene coated glass fabric sensors and infusible thermoplastic and thermoset matrices[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(5):2 924-2 940.
- [13] Zhang L, Lu Y, Lu S, et al. In situ monitoring of sandwich structure in liquid composite molding process using multifunctional MXene/carbon nanotube sensors[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(4):2 252-2 263.
- [14] Irfan M S, Khan T, Hussain T, et al. Carbon coated piezoresistive fiber sensors: From process monitoring to structural health monitoring of composites-A review[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 141. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106236.
- [15] Andreades C, Mahmoodi P, Ciampa F. Characterisation of smart CFRP composites with embedded PZT transducers for nonlinear ultrasonic applications[J]. *Composite Structures*, 2018, 206(6): 456-466.
- [16] Yu Y, Cui X, Liang Z, et al. Monitoring of three-dimensional resin flow front using hybrid piezoelectric-fiber sensor network in a liquid composite molding process[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 229(9). DOI: 10.1016/j.compscitech.2022.109712.
- [17] Yenilmez B, Murat S E. A grid of dielectric sensors to monitor mold filling and resin cure in resin transfer molding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40(4): 476-489.
- [18] Carlone P, Palazzo G S. Unsaturated and saturated flow front tracking in liquid composite molding processes using dielectric sensors[J]. *Applied Composite Materials*, 2015, 22(5):543-557.
- [19] Griffiths E R, Leigh S J. Multi-material fused deposition modeling for integration of interdigital dielectric sensors into carbon fibre composite tooling for in process cure monitoring[J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2019, 296:272-277.
- [20] Buggisch C, Gagani A, Fiedler B. Capacitance measurements on integrated conductors for detection of matrix cracks in GFRP[J]. *Functional Composite Materials*, 2021, 2(1). DOI:10.1186/s42252-020-00013-x.
- [21] Tifkitis K I, Skordos A A. A novel dielectric sensor for process monitoring of carbon fibre composites manufacture[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 123(5): 180-189.
- [22] Nakamura M. Form And Capacitance of Parallel-Plate Capacitors [J]. *IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology Part A*, 1994, 17(3):477-484.
- [23] Grofti Z, Croteau-Labouly B, Boukhili R, et al. Simultaneous characterization of preform expansion and permeability in vacuum assisted resin infusion[J]. *Polymer Composites*, 2022, 43 (6):3 560-3 573.