维修期间水分对风力涡轮机叶片固化的影响

修复

Sagar P. Shah， Michael N. Olaya、Evgenia Plaka、Joseph McDonald、Christopher J. Hansen、Marianna Maiarù*

马萨诸塞大学洛厄尔分校，洛厄尔，马萨诸塞州 *01854*，美国。

* 通讯作者

摘要

高效修复风力涡轮机叶片的结构，对于遏制全球变暖和降低平准化能源成本（LCOE）至关重要。塔上修复容易受到环境条件的影响，因此必须考虑这些条件在加工过程中对材料性能的影响，才能准确预测修复结果。本研究探讨了环境暴露导致的含水量对风力涡轮机叶片制造和修复中所用灌注树脂体系固化动力学的影响，并提供了一种经实验验证的有限元工具，可根据修复几何形状和含水量分析固化周期修复。对双组分灌注体系进行的吸湿测试表明，在高温和高相对湿度条件下，固化剂的水分吸收量最高可达 12%。对含水树脂进行的差示扫描量热测量显示，其固化行为加快。修复模型的数值预测与相应的实验室规模修复结果高度吻合，并揭示修复补片内部存在显著的温度滞后，由此形成热梯度，且固化度呈空间分布。研究表明，修复几何形状和加速固化动力学对修复内部的温度和固化分布有显著影响。所提出的方法可通过缩短固化时间来减少风力涡轮机停机时间。

关键词：材料表征、风能、结构修复、环境水分、工艺建模、热传递、固化动力学

1. 引言

目前最先进的风力涡轮机叶片由热固性纤维增强聚合物复合材料（FRPC）制成，这种材料凭借优异的比力学性能，兼具高力学性能和轻质特点 [1], [2]。过去二十年间，风力涡轮机的尺寸不断增大，以更大规模地利用风能，满足全球对增加可持续能源产量的需求 [1], [3]。在约 20–25 年的运行寿命内，风力涡轮机叶片会暴露于各种恶劣环境条件，包括雷击、极端风况、降雨、热循环和异物撞击，所有这些都会导致材料劣化和结构损伤[2]–[5]。发生损伤后，修复对于恢复叶片的结构完整性和气动效率至关重要，可确保风力涡轮机可靠运行 [6]。在风力涡轮机的整个使用寿命内，运行与维护（O&M）成本约占每千瓦时发电量平准化成本的惊人 25% [7], [8]。修复工艺高度取决于受损区域；当修复规模适中时，会根据维护时的地点、日期和时间，在多变的环境条件下于塔上进行修复。为减少风力涡轮机停机时间并提高风能生产的平准化度电成本（LCOE），需要采用高效、精准的计算技术来预测修复结果，并制定优化的固化周期，以确保树脂在最短时间内完全固化。

在评估损伤并移除受损基材 [1], [3], [6]–[8] 后，通过施加斜接补片进行结构修复。补片由浸渍纤维的黏性树脂制成，需要通过施加温度和压力在母层合板内固化，以恢复材料的承载能力。在修复区域内，固化程度和温度的空间分布均匀性对于实现高质量修复至关重要。激进的固化周期可能导致修复区域内出现温度梯度，造成组成材料固化不均匀以及母体构件过热，进而可能在修复补片中引入工艺诱导变形、残余应力产生和微裂纹 [1]。深入了解工艺参数的影响

（包括升温速率、保温温度和保温时间）对修复区域内体积热生成及其分布的影响，可避免修复补片中出现上述工艺诱导缺陷，并有助于以节省时间和成本的方式实现叶片的最终结构完整性 [9]。

结构修复的计算建模有助于预测和评估给定环境条件下任意修复几何形状的复合材料加工，并提供针对具体修复方案的优化工艺，以实现最高质量的修复 [7], [8]。多种数值方法采用唯象动力学模型和三维传热方程，预测大型叶片修复过程中的固化演化和温度分布 [6], [10]–[16]。一些研究还采用本构关系预测残余应力的产生与分布，评估缺陷和修复缺陷对修复结构强度及使用寿命的影响，并优化修复补片和斜接接头构型 [7], [9], [17]–[23]。尽管这些研究为叶片修复工艺提供了宝贵见解，但常被忽略的一个方面是实施修复时的环境条件及其对树脂反应性和力学行为的影响。例如，环境暴露（相对湿度和温度）导致的树脂化学性质变化，可能意味着要实现有效修复，需要采用一套与标准操作规程截然不同的工艺条件。因此，在规划修复之前，评估环境暴露对树脂行为的影响至关重要 [1], [24]–[27]。

多项研究报告了含水量对聚合物树脂力学性能和反应性的有害影响 [1], [3], [6], [24]–[28]。众所周知，树脂和胶黏剂在固化前吸湿会加速自催化固化反应，进而影响体积热生成 [6], [25], [26]。树脂的水分吸收高度取决于修复期间的环境条件和暴露时间，因此极难确定修复的最佳固化周期。此外，已有大量研究报告指出，吸湿会导致树脂强度和刚度劣化，其原因包括增塑、玻璃化转变温度降低，以及化学溶胀/劣化等现象 [1], [24], [26]–[28]。最后，吸湿会使

母层合板和修复补片在修复的固化阶段产生孔隙，进而可能导致分层，使修复失效 [3]。因此，要成功完成修复，必须考虑环境条件和工艺条件及其对修复结构完整性的影响。

本研究旨在考察环境暴露导致的含水量对风力涡轮机叶片制造和修复中所用灌注树脂体系固化动力学的影响，并提供经实验验证的计算工具，用于分析固化周期修复。首先，通过开展一系列吸湿测试，评估水分对树脂固化动力学的影响；测试中，双组分树脂体系暴露于多种环境条件下。随后，对不同含水量条件下的树脂固化动力学进行表征。基于获取的固化动力学数据，利用用户编写的子程序，在商用软件 Abaqus 中构建三维有限元固化模型，以模拟修复补片的固化过程，并预测该过程中的固化度和温度演变。通过温度分布和固化度演变，对仿真的数值结果进行实验验证。最后，利用该数值模型分析修复几何形状和环境条件对修复区域内温度及固化度空间分布的影响。

本研究是迈向开发基于计算的集成计算材料工程（ICME）框架的重要里程碑，该框架旨在优化修复工艺，以提升修复质量并确保修复后叶片的长期结构完整性。本文重点预测修复过程中的固化度和温度演变，并认识到温度梯度和固化度梯度会影响树脂力学性能的演变，进而影响残余应力的产生 [12]。本研究不涉及残余应力产生的预测，也不研究修复后的力学性能。未来的工作将把本研究建立的固化模型纳入集成计算材料工程框架，连接多种尺度上的材料模型、结构模型和实验，以构建叶片的数字孪生 [9], [21]–[23], [29]–[37]。

本文结构如下：第 2 节介绍研究水分对树脂灌注固化动力学影响的方法及相应的固化模型。第 3 节详细介绍针对两种不同斜削坡度和不同含水量的建模结果及其验证。第 4 节总结主要结论。

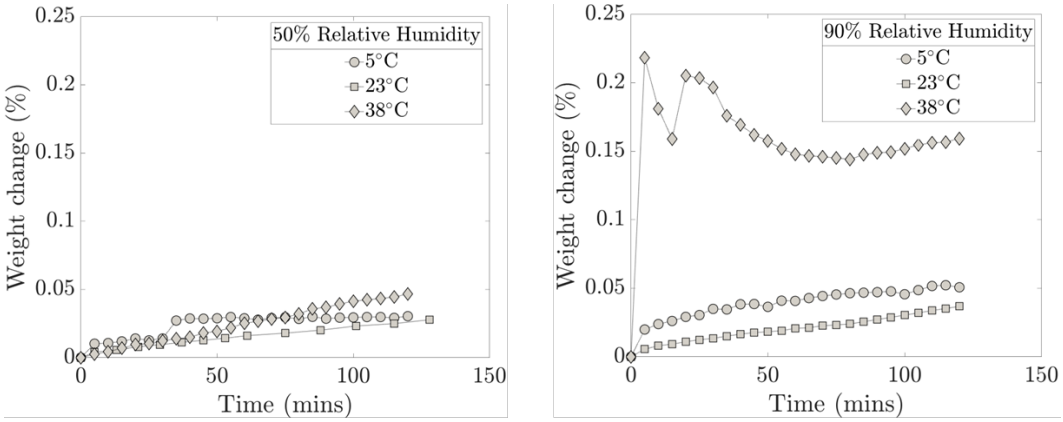
2. 方法

在现场修复过程中，树脂混合物可能长时间暴露于环境水分中，这可能改变固化动力学。首先，按照运行与维护说明对吸湿量进行了量化。随后，通过差示扫描量热法（DSC）表征了 Westlake Epoxy 为风能应用开发的一种广泛使用的商用环氧树脂体系的固化动力学：灌注系统 EPIKOTE™ 树脂 MGS RIMR 135 与 EPIKURE™ 固化剂 MGS RIMH 1366（下文简称 RIM R135-H1366）。RIM R135-H1366 是一种黏度相对较低、固化温度较高的体系，适用于真空辅助灌注工艺。该体系由双酚A基础环氧树脂和胺类固化剂组成。采用了由 Saertex 制造、Fibre Glast Developments Corp. 经销的单向（UD）缝编E玻璃纤维（面密度为 955 g/m2）作为增强材料。水分吸收测试详见第 2.1 节。第 2.2 节介绍固化动力学表征。第 2.3 节讨论固化模型的实现。

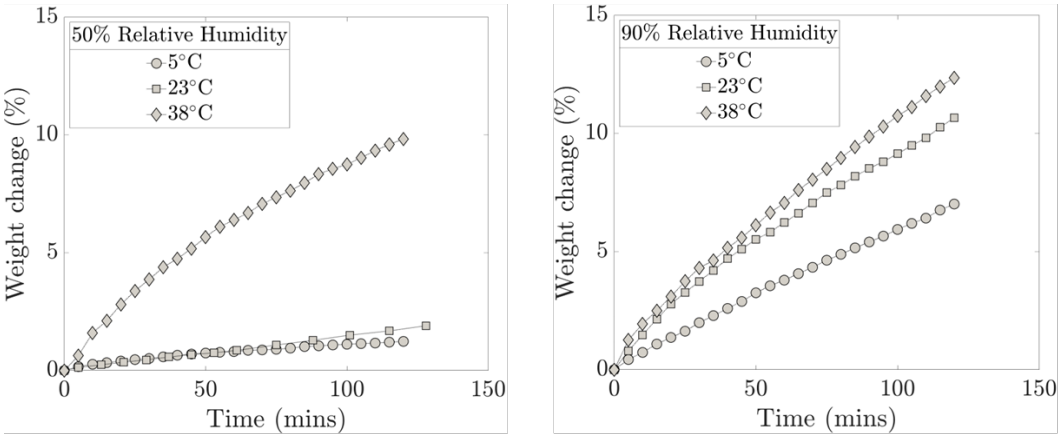
2.1 吸湿特性表征

通过将基础环氧树脂和固化剂这两种组分分别置于现场修复过程中遇到的环境条件下，表征修复期间它们吸收的水分。将60 g的RIM R135环氧树脂样品和20 g的RIM H1366固化剂样品分别装入容器，置于环境试验箱内。试验箱设置为温度（5°C、23°C和38°C）与相对湿度（RH为50%和90%）的多种组合。测试前记录试样的初始重量，随后每隔五分钟称量一次试样，持续两个——

小时的暴露时间。该暴露时段是根据Pattern Energy和TPI Composites提供的风力涡轮机维修报告分析结果选定的。根据样品中各数据点计算出的相对百分比增重反映了暴露时间内吸收的水分。



(a) RIM R135



(b) RIM H1366

图 *1*：吸湿试验结果，显示基础环氧树脂 *RIM R135*（*a*）和固化剂 *RIM H1366*（*b*）在不同温度和相对湿度条件下的重量变化百分比。

图1显示了树脂和固化剂在全部六种试验条件下的吸湿试验结果。RIM R135树脂的结果见图1(a)：经过调节的RIM R135环氧树脂重量变化极小，表明其未发生吸湿。这一结果符合预期，因为树脂黏度相对较高，且其双酚A化学体系阻碍了吸湿。相反，

如图1(b)所示，胺类固化剂RIM H1366表现出明显的吸湿现象。这归因于固化剂黏度较低，以及其中胺基的亲水性，使其能够吸收表面沉积的水分。RIM H1366在38°C、90%相对湿度条件下的含水量最高，达到初始重量的12%。其他试验条件下记录的含水量相对较低，汇总见表1。随后，采用差示扫描量热法（DSC）评估混合树脂与固化剂在六种试验情形下的固化动力学：相对湿度为50%和90%，各自在5°C、23°C和38°C条件下进行。

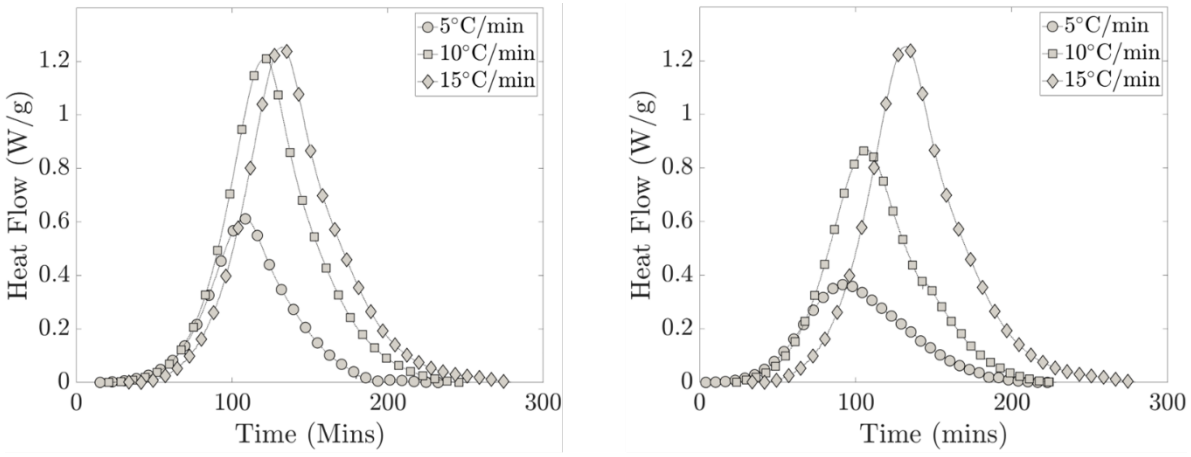
表*1*：基础环氧树脂 *RIM R135* 和固化剂 *RIM H1366* 在各种环境条件下的吸湿百分比。

温度 (°C)	相对湿度 (%)	吸湿率（%） RIM R135	RIM H1366
5	50	0.03	1.23
	90	0.05	7.01
23	50	0.04	3.07
	90	0.04	10.66
38	50	0.05	9.82
	90	0.22	12.35

2.2 固化动力学定律

采用 DSC（Discovery，TA Instruments）对含水量对树脂固化动力学的影响进行了实验表征。对密封在密封铝盘中的少量未固化混合物（重量比为 100:30）进行动态扫描，铝盘重量约为 5 mg。首先将 DSC 试样置于差示扫描量热仪腔室内，在 -10°C 下平衡两分钟，以避免过早固化。随后，腔室温度从平衡温度升至 250°C，分别采用 5°C/min、10°C/min 和 15°C/min 三种升温速率。测量每次动态扫描中固化树脂的反应放热随时间和温度的变化，如图 2(a) 所示。瞬时反应热 dH/dT 取任意给定时刻 t 的归一化热流。部分反应热 $H(t)$（截至时间 t ）以及总反应热 H_T,

分别通过对归一化热流-时间曲线截至时间 t 以及反应结束时的曲线下面积进行积分计算得出。



(a) No moisture (b) 12% moisture

图 *2*：不同升温速率下动态差示扫描量热测量得到的归一化热流随时间变化图：（a）无水分；（b）含水量为 *12%*。

随后，根据任意时间$\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t$，以及$\phi$，分别计算了每种升温程序下的固化速率和固化度。计算依据是固化热固性材料在任意时间$\mathrm{d}H/\mathrm{d}t$ 的t 和H_T ，如公式 （1）和（2）所示。

$$\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{H_T}\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

$$\phi(t) = \frac{1}{H_T}\int_0^t \frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t}\,\mathrm{d}t = \frac{H(t)}{H_T} \tag{2}$$

根据方程 (1) 和 (2) 得到的固化速率和固化度，采用自催化 Prout-Thompkins 现象学动力学模型进行拟合，以确定动力学常数，

$$\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = A\exp\left(-\frac{E_a}{RT^*}\right)[\phi^m(1-\phi)^n] \tag{3}$$

在方程 (3) 中，通过对实验数据进行数据拟合过程，确定了四个材料特定参数，即活化能E_a、指前因子A以及无量纲建模参数m 和n。其中， R 为通用气体常数， T^* 为以开尔文表示的绝对温度。我们使用 MATLAB 开发了内部数据拟合工具，对实验数据进行非线性最小二乘分析，以确定材料特定的动力学常数。Kissinger 方法用于为E_a 和A [6]提供初始估计值， [9] 并使用 MATLAB 的“*lsqnonlin*”函数进行拟合。所有升温速率下得到的最佳拟合结果给出了表2中汇总的动力学常数。根据方程 (3) 计算得到的未调湿试样的模型预测值，即固化度随时间的变化关系$\phi(t)$，与 DSC 重复实验结果进行了比较，以确定残余反应热。实验结果与模型预测高度吻合，从而验证了该动力学模型。

表*2*：不同含水量下的固化动力学建模参数。

水分含量 (%)	总反应热 H_T (J/g)	动力学常数			
		E_a (千焦/摩尔)	A (秒$^{-1}$)	m (-)	n (-)
0	413.82	46.67	11000	0.3	1.5
2	392.62	38.44	750	0.4	1.4
7	361.28	55.4	450000	0.25	1.75
9	337.1	30.45	100	0.45	1.3
10	390.43	39.61	2250	0.25	1.35
12	364.75	29.3	60	0.38	1.2

对含水量不同（最高达 12%）的调湿试样，重复进行了差示扫描量热测试和用于确定固化动力学的数据拟合过程。通过向树脂混合物中添加去离子水来调湿试样，添加量对应表1所总结的数值。图2(b)展示了含水量最高为 12% 时的结果，并与未调湿试样的结果进行了比较。如表2所总结，未调湿试样的放热峰相对较高，且分布在比含水量为 12% 时更窄的温度范围内。此外，添加 12% 水分降低了活化能 E_a 和指前因子 A,

（见表2）。较低的活化能和指前因子表明，反应开始自催化所需的能量更少，达到指数增长所需的时间更短，之后固化反应速率会减缓。图3 比较了在指定固化周期下，未调湿试样与不同含水量的调湿试样的固化度随时间的演变情况。图3显示，随着含水量增加，固化度演变加快。在指定温度曲线下，未调湿试样需要 250 分钟才能达到完全固化状态（$\phi = 1$），而含水量为 12% 的树脂在相同周期内 100 分钟即可固化。这些趋势与 Sharp 等人[26]的研究结果一致。他们报告称，水分会增加未固化环氧树脂中的分子扩散，从而加速固化。然而，交联键形成充分后，环氧树脂中的水分会形成阻碍进一步分子扩散的区域，显著降低固化速率。根据含水量推导出的固化动力学可用于理解水分对风电叶片修复补片固化的影响，详见第3节。

2.1 叶片修复工艺建模

风电叶片修复的工艺建模对于理解固化周期的影响至关重要，因为修复的尺寸和几何形状、工艺参数以及包括温度和水分在内的环境条件都会产生影响。下文将介绍所提出的虚拟固化流程，包括对规定温度曲线的详细说明，以及仿真中采用的适当边界条件。数值模型在有限元软件 Abaqus 中建立，并辅以用户编写的子程序 UMATHT，以模拟固化过程。后续段落将介绍模型几何形状和实验室制作的修复补片，详细说明虚拟重建补片模型的流程，包括修复所用层合板的铺层顺序及材料的热性能，并介绍在实验室实施的实验流程，以验证有限元模型预测结果。数值与实验研究的结果将在第 3 节中呈现，重点讨论斜削坡度和含水量对修复完全固化所需时间的影响。此处将数值结果中的

含水条件下补片的固化情况，与假定树脂不吸收水分时同一修复方案的情况进行比较。

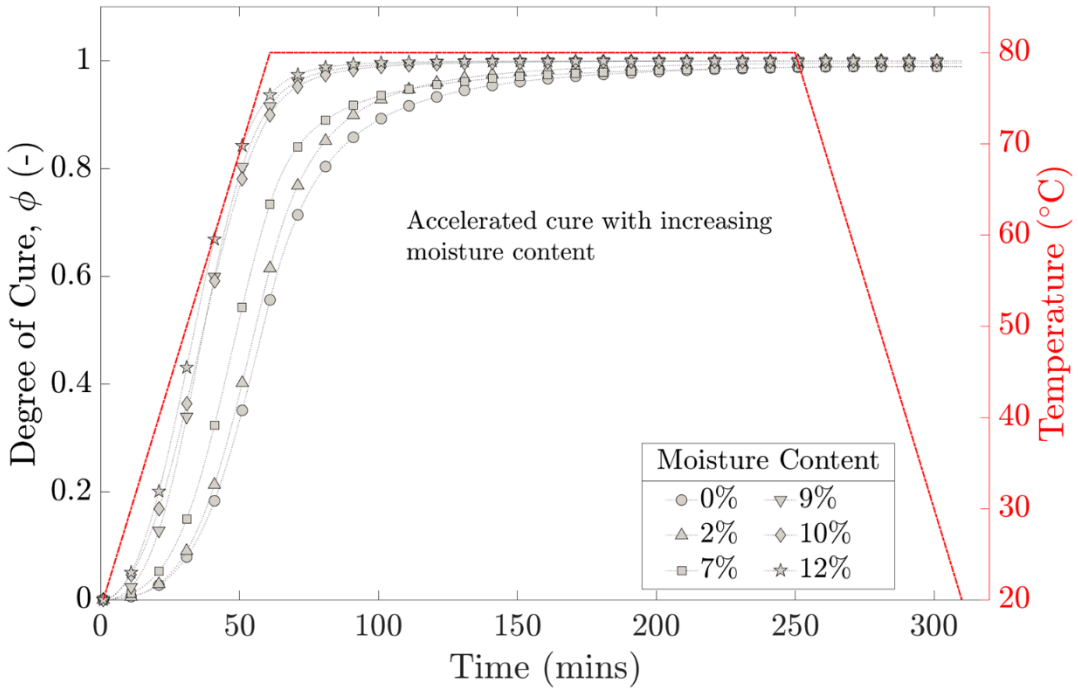


图 *3*：固化动力学模型计算得出的、在给定温度曲线下未调湿（无水分）和经调湿（含水量为 *2%–12%*）试样的固化度变化。

采用有限元工艺建模方法对具有代表性的斜接修复补片几何形状进行建模和虚拟固化，以评估补片的水分含量和几何形状对修复固化时间和固化度的影响。本分析选取了能够代表小型塔上结构修复的斜接几何形状，如图4所示。修复补片在实验室制造，并在烘箱中固化。沿修复补片厚度方向以及斜接处，在层合板中嵌入了多个热电偶，以监测温度演变，如图4所示。此外，还在烘箱内、补片外部放置了一个热电偶，以跟踪整个修复过程中的烘箱温度。

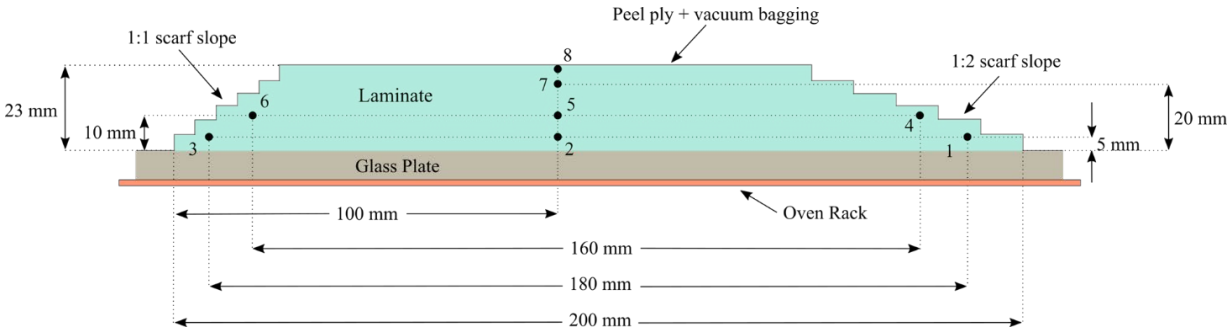


图*4*：用于工艺建模和实验室规模修复的修复补片几何形状。

修复几何形状包括一块长200 mm、深2 mm的基底层合板，由E玻璃纤维灌注RIM R135-H1366环氧树脂制成；通过非对称铺层递减进行堆叠，使两侧形成不同的斜削坡度。修复补片的一侧采用1:1斜削比制造，另一侧则采用2:1斜削比，以评估不同几何斜削比对温度和固化度分布的影响。修复补片模型高23 mm。选择该层合板厚度是为了模拟固化过程中会产生显著放热的修复，从而测量修复补片内部的热梯度。制造后未对斜削表面进行平滑处理，如图4所示。数值模型包括用于支撑层合板的玻璃板、烘箱搁板、剥离布，以及灌注所需的真空袋材料，以尽可能贴近实验室规模修复。仿真中使用的热性能汇总于表3。灌注过程通过将单向E玻璃纤维与灌注后的RIM R135-H1366树脂体系的性能进行均质化处理来建模；假设该树脂体系的热性能随固化度呈线性变化，如公式（4）和（5）所示。

$$c_p = c_p^0 + \phi * (c_p^1 - c_p^0) \tag{4}$$

$$k = k^0 + \phi * (k^1 - k^0) \tag{5}$$

c_p^0 和k^0 分别表示未固化树脂的比热容和热导率，而 c_p^1 和 k^1 分别表示完全固化树脂的比热容和热导率。ϕ 表示固化度。根据表3中汇总的组分材料属性和纤维体积分数，采用混合法则[38], 对复合材料属性进行均质化处理。测得层合板的纤维体积分数为$v_f = 0.52$。

表*3*：修复工艺建模所用的组分材料属性 *ir.*

材料	属性		
	密度, ρ (g/cm³)	热导率 k (× 10^{-4} W/mm-K)	比热容 c_p (J/g-K)
硼硅酸盐玻璃板	2.23	12	1.5
304型不锈钢	7.93	163	1.4
补片脱模布薄膜	1.14	2.5	1.75
真空袋	1.14	2	1.3
RIM R135-H1366 ($\phi = 0$)	1.20	1.59	1.35
RIM R135-H1366 ($\phi = 1$)	1.20	2.45	1.62
E玻璃纤维	2.55	12	1.2

虚拟固化分析在 Abaqus/STANDARD 中进行，并采用用户编写的 UMATHT 子程序。定义了一个热分析步，同时求解加入热生成项 $\dot{Q}$ 后的傅里叶热传导定律与 Prout-Thompkins动力学模型，以预测固化反应进程所释放的热量。

$$\rho^c c_P^c \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = k^c \nabla^2 T + \dot{Q} \tag{6}$$

$$\dot{Q} = V^m \rho^m H_T^m \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} \tag{7}$$

此处，ρ^c、 c_P^c 和 k^c 分别是根据指定的纤维体积分数确定的固化补片的复合材料密度、比热容和热导率；T 是温度；而 V^m,

ρ^m 和 H_T^m 分别是反应的树脂体积分数、密度和总焓。如图 5 所示，为模拟对流烘箱内的固化过程，对模型施加了热边界条件。根据放置在烘箱架上的热电偶读数，在虚拟固化过程中，对搁板设定了以下程序：从室温以每分钟 1.5°C 的速率升温至 80°C，在 80°C 下等温保温 350 分钟，移出烘箱后在环境条件下自然冷却。对模型暴露于烘箱内强制气流的表面施加了对流边界条件。计算了层合板不同侧面的烘箱内空气对流换热系数，并通过对流膜系数施加，如图 5 所示，其中 $h_1 = 0.005$ W/mm^{2}K、$h_2 = 0.01$ W/mm^{2}K 和 $h_3 = 0.015$ W/mm^{2}K。模型采用 36753 个 DC3D8 八节点线性传热单元进行网格划分。

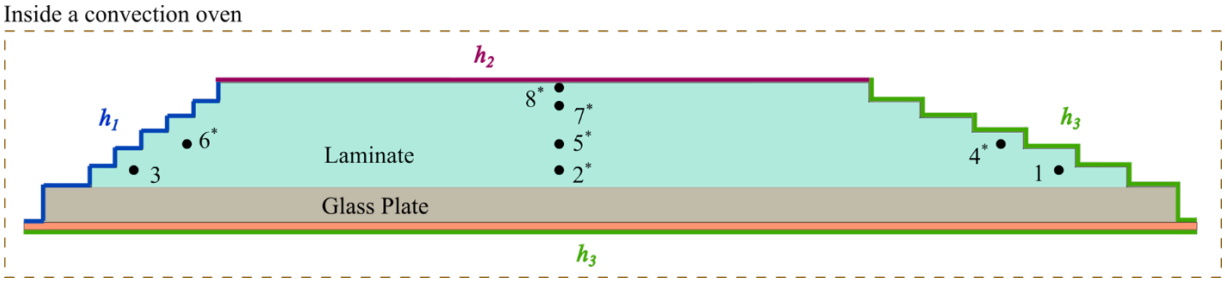


图 *5*：用于修复工艺建模的边界条件示意图。请注意，只有标有星号（*）的热电偶提供了可读数据。

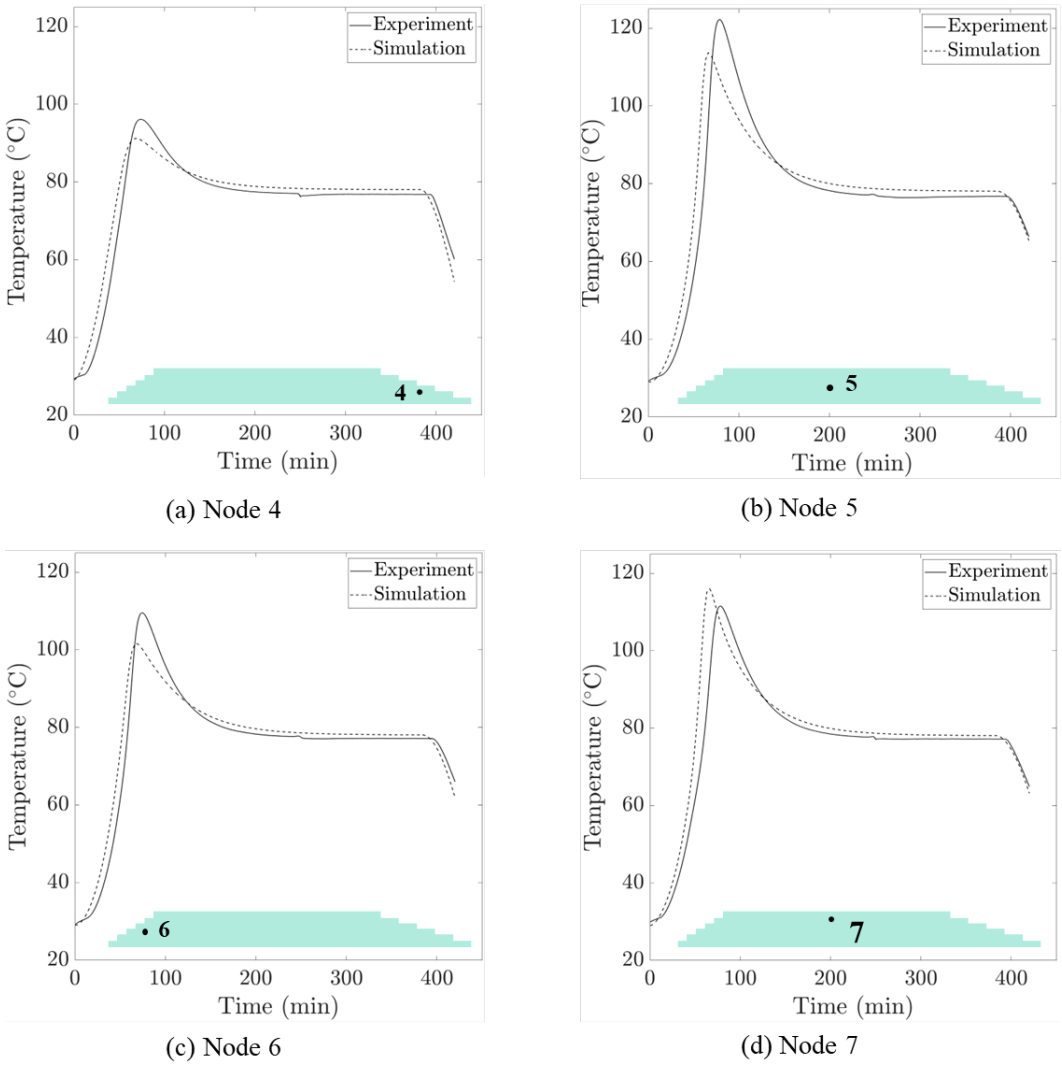
3. 建模结果与实验验证

修复补片在实验室中制造，用于验证工艺建模预测。层合板中埋设了热电偶，以记录补片各处的温度数据，并评估反应放热及其导致的固化度所引起的温度空间变化，如图4所示。将固化过程中的温度数据与数值模型对四个位置节点温度的预测进行了比较，如图5所示。图 6 比较了

虚拟修复中指定节点（4–7）的温度演变与相应的热电偶数据。数值模型预测与热电偶测量结果高度吻合。峰值温度大小和达峰时间存在轻微偏差，这可能是由于定义热电偶相对于计算节点的位置时存在细微误差所致。根据图 6 所示的温度演变数据，按照公式（3）中的 Prout-Thompkins 动力学模型计算了固化度演变，如图7所示。

3.1 斜接几何形状对叶片修复的影响

分析了 1:1 和 2:1 两种不同的斜削坡度，以评估斜接几何形状对温度和固化分布的影响。图 8(a) 展示了本研究中若干节点的温度演变叠加图。图中清楚地显示，修复补片内的温度存在空间变化。图9所示的有限元等值线图也体现了这种空间变化。峰值温度、达峰时间和固化结束温度的量化结果汇总于表 4。在 表 4 中，节点5的放热峰值温度为 113。7℃，而节点 2 的放热峰值温度最低，为 109。1℃。这种温度变化归因于修复补片的几何形状：固化反应从补片中心、靠近节点5处开始。因此，中心处的放热峰值温度最高。热量从中心向外传导，使其他节点的峰值温度较低。由于补片几何形状不对称，节点 4（2:1 坡度）的温度曲线较为特殊，其峰值温度为 91。2℃；相比之下，节点 6（1:1 坡度）的峰值温度为 101。5℃。这种差异也归因于补片的几何形状：节点 4 离中心更远，因此测得的温度较低。节点 1 和 3 表现出与节点 4 和 6 相似的趋势。为进一步说明不对称斜削坡度的影响，还监测了节点 9 的温度。需要注意的是，节点 9 不在中心线上，而是位于中心线左侧 2 mm 处。节点 9 的峰值温度为修复补片内所有节点中的最高值



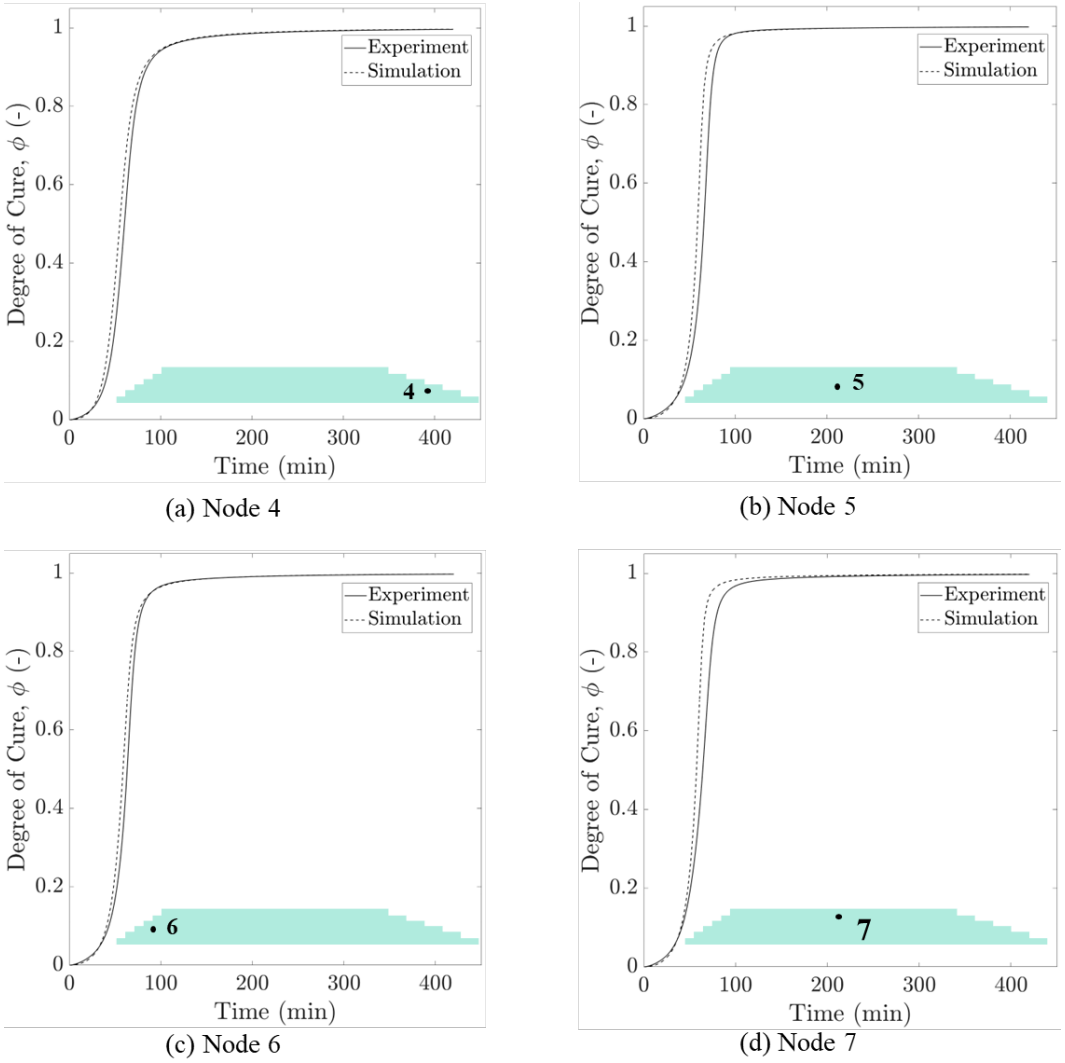
(a) Node 4 (b) Node 5

(c) Node 6 (d) Node 7

图 *6*：实验和数值模型中（*a*）节点 *4*、（*b*）节点*5*、（*c*）节点 *6* 和（*d*）节点 *7* 的修复补片温度演变随时间变化的曲线。

这表明，峰值放热反应并非从修复区域的中心线处开始，而是在其左侧 2 mm 处开始。这是因为不均匀的斜削坡度使放热峰值从中心线向较陡的一侧偏移，说明修复几何形状对修复区域内的温度演变有显著影响。此外，从图 8(a) 和表 4 可见，随着节点与中心线之间的距离增大，达峰时间从节点5的 66 分钟增加到节点 1 的 75 分钟，表明修复补片内存在温度滞后。固化结束温度值也进一步体现了这种温度滞后。节点 2、5 和 7 的固化结束温度较高

温度（> 62°C）与节点 1、3、4 和 6 相比，后者更接近规定的固化循环温度。



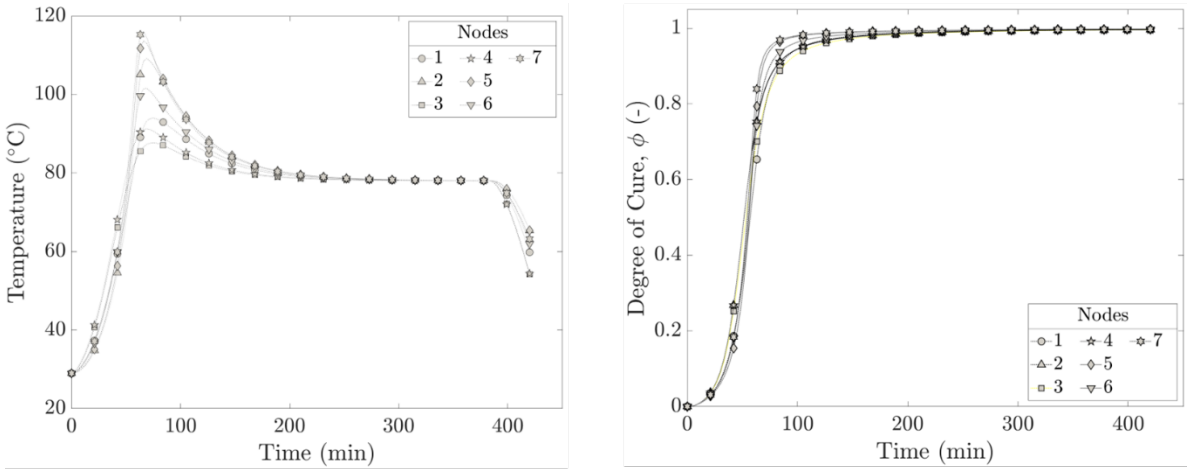
(a) Node 4　(b) Node 5

(c) Node 6　(d) Node 7

图 *7*：实验和数值模型中修复补片固化度随时间变化的曲线：*(a)* 节点 *4*，*(b)* 节点*5*，*(c)* 节点 *6*，*(d)* 节点 *7*。

图8(b)中叠加显示了所分析节点的计算固化度。正如预期，固化度曲线呈现出与温度相同的变化趋势。由于节点相对于反应放热峰的位置不同，靠近中心线的节点（节点 2、5、7）预计比距离中心较远的节点（节点 1、3、4、6）固化得更快，因为

它们相对于反应放热峰的位置不同。表 4 也体现了这一观察结果，其中汇总了各节点达到完全固化所需的时间 $\phi = 1$ （用于表示修复时间）。节点 5 在 153 分钟内达到完全固化，而节点 2 最后达到完全固化，用时 168 分钟。预计最靠近放热峰的节点 9 在 144 分钟内达到完全固化。尽管如此，层压板内的所有节点均在推荐固化周期结束前很久就已达到完全固化。



(a) Temperature versus time

(b) Degree of cure versus time

图8：（ （a）叶片修复模拟中所有节点的温度和（b）固化度曲线 .

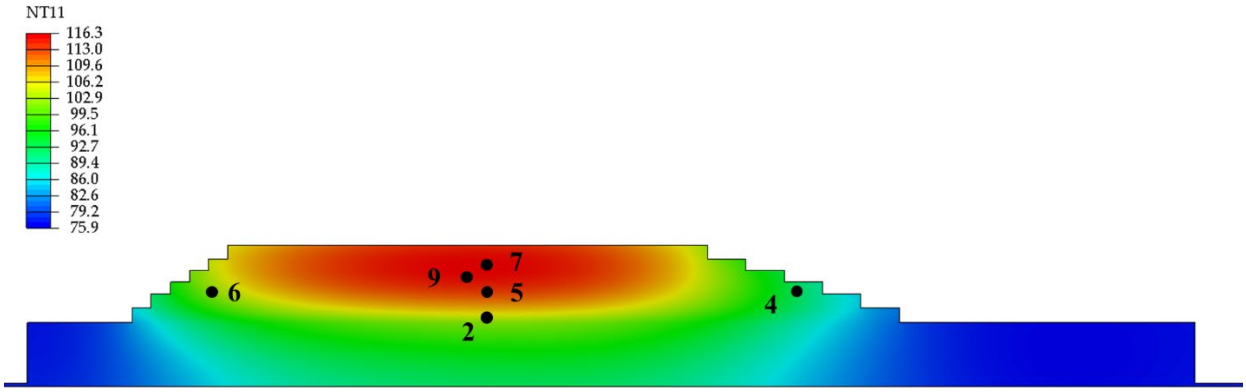


图9：修复补片的节点温度云图，显示热电偶节点2、4、5、6和7，以及在固化66分钟时达到最大放热的节点9。

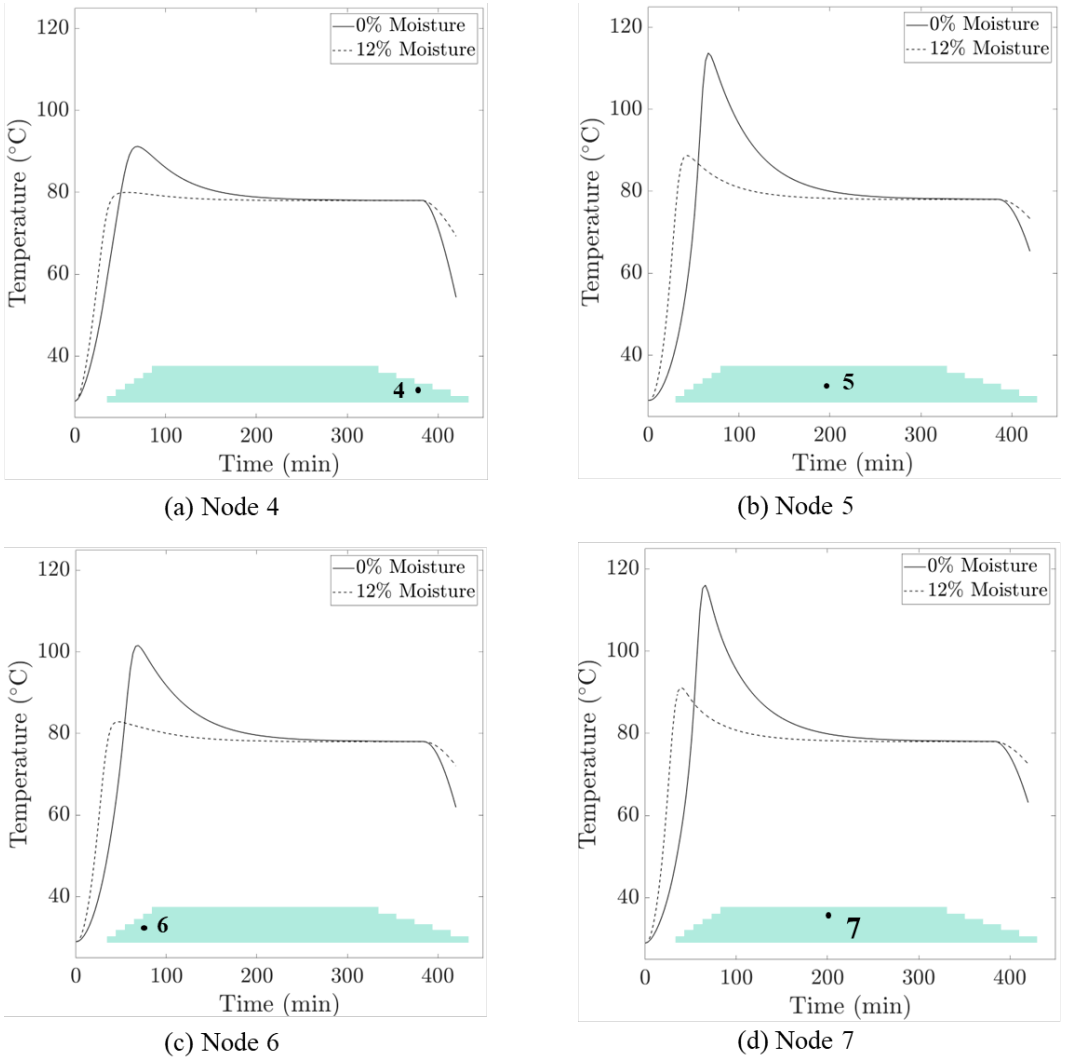
表 *4*：未考虑水分时，热电偶节点 *2*、*4*、*5*、*6*、*7* 和 *9* 的数值（实验）放热峰值温度、达到峰值放热温度的时间、固化结束时的温度，以及固化度达到 *0.99* 的时间。

节点	放热峰值 (°C)	达到峰值的时间 放热（分钟）	固化结束 温度 (°C)	达到 $\phi = 0.99$ 所需时间 (分钟)
2	109.1 (113.1)	69 (85)	65.4 (67.45)	168 (224)
4	91.2 (96.2)	69 (73.7)	54.4 (60.2)	237 (244)
5	113.7 (122.2)	66 (78.3)	65.4 (66.4)	153 (132)
6	101.5 (109.5)	69 (74.3)	61.9 (66)	198 (192)
7	116.1 (111.6)	66 (77.3)	63.2 (64.9)	147 (180)
9	116.3 (-)	66 (-)	64.1 (-)	144 (-)

3.2 水分对叶片修复的影响

前文各节通过实验结果验证了修复斜接层合板的工艺建模，并评估了修复几何形状的影响。采用第2节所述的相同几何形状和工艺建模方法，评估了树脂含水量对补片内温度演变和固化度演变的影响。研究了表1所汇总的不同含水量。使用表2中的相应动力学建模参数 预测不同含水量下修复补片的温度演变和固化度。图10展示了若干关注节点的温度演变叠加图，并比较了最低和最高含水量下的情况。图10展示了水分对节点4、5、6和7温度演变的影响；表5还汇总了峰值温度、达峰时间和固化结束温度。例如，图11(a)展示了节点5在不同含水量下的温度曲线。在无水分情况下，放热峰出现在66分钟；而在含水量为12%的情况下，放热峰提前至42分钟，表明随着含水量增加，固化反应加快。如前所述，加入水分会促进分子扩散，并大幅降低反应的活化能，从而使固化反应更早开始。同时，放热峰值温度随含水量增加而降低。在未考虑水分的情况下，节点5的峰值温度为113。7°C。

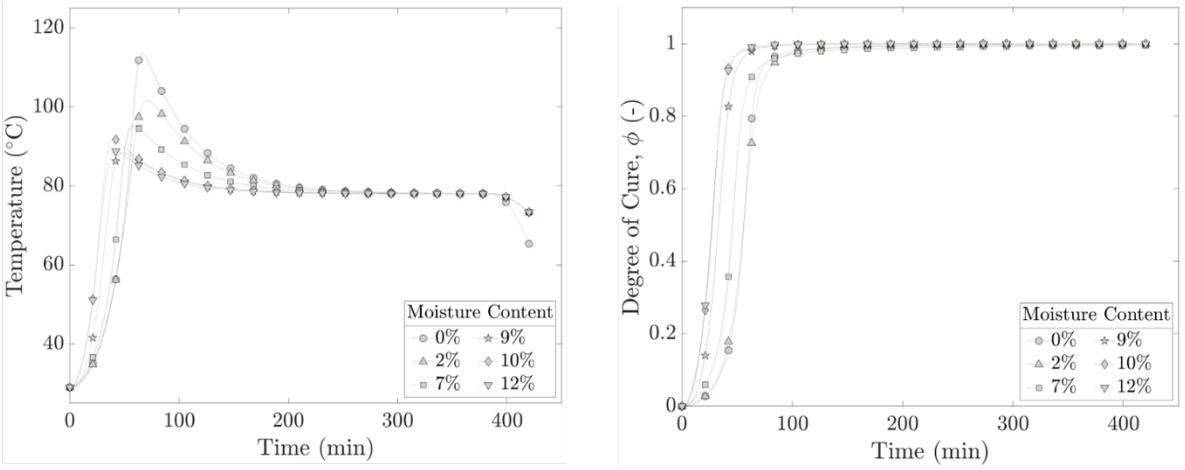
然而，在含水量为12%的情况下，该值降至88.8°C。表2报告的总反应热随含水量增加而降低，这被认为是峰值温度下降的原因。图10所示所有节点均呈现出含水量增加时固化加速、峰值温度降低的趋势（见表5）。未观察到水分对固化结束时的节点温度有显著影响。



(a) Node 4　(b) Node 5

(c) Node 6　(d) Node 7

图*10*：修复补片中温度演变随时间和含水量变化的曲线，分别对应 *(a)* 节点 *4*、*(b)* 节点*5*、*(c)* 节点 *6* 和 *(d)* 节点 *7*。



(a) Temperature versus time

(b) Degree of cure versus time

图*11*：（*a*）六种不同吸湿情况下节点*5*的温度曲线；（*b*）固化度曲线。

图12展示了所有关注节点的计算固化度随含水量的变化情况。结果也汇总于表5。固化度曲线呈现出与温度曲线相似且一致的趋势：随着含水量增加，固化速率显著提高。以节点5为例，在未考虑水分的情况下，固化39分钟后，固化度开始呈指数增长。相比之下，含水量为12%的情况下，12分钟后固化速率便开始呈指数增长。较快的固化反应归因于添加水分后分子扩散增强[26]。然而，当固化度接近约0.89时，由于交联环氧树脂的自由体积内形成了水分囊[26]，所有含水量条件下的固化反应均趋于平缓。此时，水分囊阻碍了进一步的分子扩散，并显著降低了反应速率。不过，环氧树脂仍继续固化，直至完全固化。未添加水分时，节点5在153分钟后达到完全固化；相比之下，含水量为12%的情况下，仅需63分钟即可完全固化。其他关注节点达到完全固化所需的时间也与此相近，具体汇总于表5。

表*5*：所有含水量条件下，热电偶节点*1–7*及节点*9*的放热峰值温度、达到峰值放热温度的时间、固化结束温度，以及固化度达到*0.99*的时间。

水分含量	节点	放热峰值 (°C)	达到峰值的时间 放热（分钟）	固化结束温度（°C）	达到 ϕ = 的时间 0.99（分钟）
0 %	2	109.1（113.1）	69 (85)	65.4 (67.45)	168 (224)
	4	91.2 (96.2)	69 (73.7)	54.4 (60.2)	237 (244)
	5	113.7 (122.2)	66 (78.3)	65.4 (66.4)	153 (132)
	6	101.5 (109.5)	69 (74.3)	61.9 (66)	198 (192)
	7	116.1 (111.6)	66 (77.3)	63.2 (64.9)	147 (180)
	9	116.3 (-)	66 (-)	64.1 (-)	144 (-)
2 %	2	99.1	75	73.4	147
	4	87.0	72	69.3	174
	5	101.7	72	73.4	141
	6	93.7	72	72.1	159
	7	103.0	69	72.6	138
	9	103.2	69.0	72.9	138
7 %	2	92.7	63	73.4	240
	4	83.5	66	69.3	276
	5	95.3	57	73.4	228
	6	88.5	60	72.1	258
	7	97.2	57	72.6	225
	9	97.2	57	72.9	225
9 %	2	86.5	54	73.3	78
	4	80.3	60	69.3	84
	5	88.4	48	73.3	75
	6	83.2	51	72.1	81
	7	90.5	45	72.5	72
	9	90.3	45	72.9	72
10 %	2	89.0	45	73.4	75
	4	81.2	51	69.3	87
	5	91.9	39	73.3	69
	6	85.2	45	72.1	81
	7	94.7	39	72.5	66
	9	94.5	39	72.9	66
12 %	2	86.6	48	73.3	66
	4	80.0	57	69.3	72
	5	88.8	42	73.3	63
	6	82.9	48	72.1	69
	7	91.2	39	72.5	60
	9	90.9	39	72.9	60

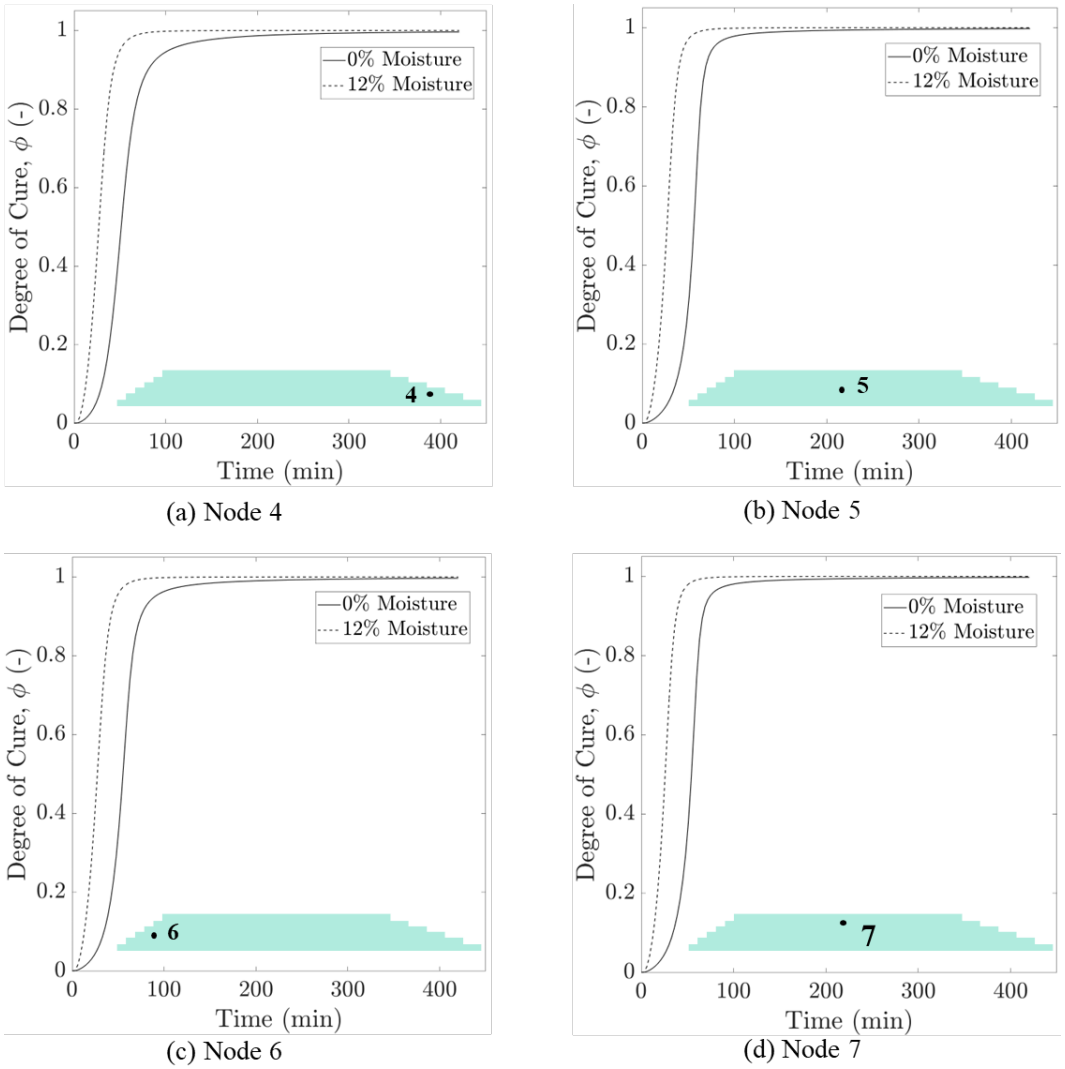


图 *12*：修复补片中固化度演变随时间和含水量变化的曲线：*(a)* 节点 *4*、*(b)* 节点*5*、*(c)* 节点 *6* 和 *(d)* 节点 *7*。

本研究的结果表明，环氧树脂在修复过程中会吸收大量水分，这可能显著改变其固化动力学，并影响修复补片内部温度和固化度的演变。此外，研究发现，斜接角也会影响修复过程中温度和固化演化的空间变化，斜面越陡，固化越快。数值模型（如本研究提出的模型）能够深入揭示此类几何变量和环境变量对修补质量的影响。通过改变工艺条件（如升温速率、保温温度和多阶段固化周期），可以分析这些条件对温度和固化空间变化的影响。

利用本研究提出的数值方法，可以综合考虑多个参数，确定适用于特定修复的优化固化周期，从而确保在最短时间内实现均匀固化。

4. 结论

本研究探讨了结构修复过程中环境水分对风力涡轮机叶片固化的影响。首先，通过分别将聚合物和固化剂暴露于水分中，量化了修复条件下的吸湿量。研究表明，双组分树脂体系中的固化剂在高温和高相对湿度条件下，吸收的水分最多可达其重量的 12%。随后，通过差示扫描量热测试确定了水分对固化动力学的影响。测试表明，吸收水分显著加快了固化反应。研究还通过基于有限元的工艺建模，对固化动力学变化和修复几何形状对修复时间的影响进行了数值分析。数值模型预测通过实验室制造的小规模修复件进行了验证，验证指标包括温度、固化度以及完成修复所需的时间。本研究清楚表明，环境因素、修复的尺寸和类型，以及所用树脂体系，都会对修复过程中的固化和温度演变产生重要影响，因此每项修复都各不相同。

由于涉及的变量众多，迫切需要定性和定量预测工具，以评估每项修复的优化固化周期。本研究提出的数值模型可用于优化固化周期，确保修复区域各处快速且均匀地达到所需固化度。这种经过实验验证的计算方法将纳入用于预测固化诱导残余应力的集成计算材料工程框架，最终实现材料、反应动力学与力学性能之间的完整关联。

致谢

本文所述工作部分获得美国国家科学基金会资助，资助编号为 1362022、1362023、1916715 和 1916776（风能、科学、技术与研究产业/大学合作研究中心），并得到 WindSTAR 产业/大学合作研究中心成员的支持。本文中表达的任何意见、研究结果、结论或建议均属于作者观点，不一定反映美国国家科学基金会或资助方的意见。作者还要感谢 WindSTAR 工业顾问委员会成员 Steve Nolet 和 Amir Salimi（TPI Composites）；Nathan Bruno、Mirna Robles 和 Paul Ubrich（Westlake Epoxy）；Ben Rice（Pattern Energy）；以及 Jian Lahir（EDPR）提供技术建议与支持，并为实验研究提供树脂。

作者声明不存在利益冲突。

参考文献

[1] K. B. Katnam、A. J. Comer、D. Roy、L. F. M. da Silva 和 T. M. Young，“风力涡轮机叶片的复合材料修复：综述”，《粘接学报》，第 91 卷，第 1–2 期，第 113–139 页，2015年1月，doi：10.1080/00218464.2014.900449。[2] L. Mishnaevsky、K. Branner、H. Petersen、J. Beauson、M. McGugan 和 B. Sørensen，“风力涡轮机叶片材料：综述”，《材料》，第 10 卷，第 11 期，第 1285 页，2017 年 11 月，doi：10.3390/ma10111285。[3] L. Mishnaevsky 、 N. Frost-Jensen Johansen、A. Fraisse、S. Fæster、T. Jensen 和 B. Bendixen，“风力涡轮机叶片修复技术：实践比较”，《能源》，第 15 卷，第 5 期，文章编号 5，2022年1月，doi：10.3390/en15051767。[4] M. Li，“风力涡轮机叶片复合材料的温度和湿度效应”，蒙大拿州立大学博兹曼分校，蒙大拿州博兹曼，2000年。[5] A. Candela Garolera、S. F. Madsen、M. Nissim、J. D. Myers 和 J. Holboell，“美国风电场风力涡轮机叶片的雷击损伤”，《*IEEE*电力输送汇刊》，第 31 卷，第 3 期，第 1043–1049 页，2016 年 6 月，doi：10.1109/TPWRD.2014.2370682。[6] M. N. Olaya、J. Mcdonald、S. Shah、C. J. Hansen、S. E. Stapleton 和 M. Maiaru，“风电叶片修复优化”，载于美国复合材料学会第三十五届技术会议论文集，2020年9月。doi：10.12783/asc35/34979。[7] L. Mischnaewski 和 L. Mishnaevsky，“风力涡轮机叶片的结构修复：用于评估胶黏剂性能影响的计算模型”，《风能》，第 24 卷，第 4 期，第 402–408 页，2021年4月，doi：10.1002/we.2575。[8] L. Mishnaevsky，“风力涡轮机叶片修复：方法综述及相关计算力学问题”，《可再生能源》，第 140 卷，第 828–839 页，2019年9月，doi：10.1016/j.renene.2019.03.113。[9] S. P. Shah、S. U. Patil、C. J. Hansen、G. M. Odegard 和 M. Maiarù，“用于残余应力预测的热固性复合材料工艺建模与表征”，《*MAMS*》，第 1–12 页，2021年12月，doi：10.1080/15376494.2021.2017527。[10] S. Anandan、G. S. Dhaliwal、Z. Huo、K. Chandrashekhara、N. Apetre 和 N. Iyyer，“厚热固性复合材料层合板的固化：多物理场建模与实验”，《应用复合材料》，第 25 卷，第 5 期，第 1155–1168 页，2018年10月，doi：10.1007/s10443-017-9658-9。[11] K. Bujun，“复合材料结构原位粘接斜接修复的加工研究”，麦吉尔大学，蒙特利尔，魁北克，2004年。[12] A. G. Cassano、S. Dev、M. Maiaru、C. J. Hansen 和 S. E. Stapleton，“风能应用中厚胶黏剂粘接层的固化模拟”，《应用高分子科学杂志》，第 138 卷，第 10 期，第 49989 页，2021年，doi：10.1002/app.49989。[13] C. Heinrich，“固化过程对纺织复合材料响应的影响”，密歇根大学，安娜堡，2011年。[14] X. Li、J. Wang、S. Li 和 A. Ding，“层合复合材料板中的固化诱导温度梯度：数值模拟与实验测量”，《复合材料结构》，第 253 卷，第 112822 页，2020 年 12 月，doi：10.1016/j.compstruct.2020.112822。[15] A. Loos 和 G. Springer，“石墨/环氧复合材料固化过程变量的计算”，载于《复合材料：质量保证与加工》，C. Browning 编，100

巴尔港大道，邮政信箱 C700，西康舍霍肯，宾夕法尼亚州 19428-2959：ASTM国际，1983年，第110–110–9页。doi: 10.1520/STP28542S.[16] S. Nakouzi、J. Pancrace、F. M. Schmidt、Y. Le Maoult 和 F. Berthet，“红外加热耦合复合材料固化模拟”，国际材料成形期刊，第3卷，S1期，第587–590页，2010年4月，doi: 10.1007/s12289-010-0838-5。[17] F. H. Darwish 和 K. N. Shivakumar，“斜接修复复合材料板的实验与分析建模”，《先进材料与结构力学》，第21卷，第3期，第207–212页，2014年3月，doi: 10.1080/15376494.2013.834096。[18] C. H. Wang、V. Venugopal 和 L. Peng，“主承力复合材料结构的阶梯式齐平修复”，《粘接学报》，第91卷，第1–2期，第95–112页，2015年1月，doi: 10.1080/00218464.2014.896212。[19] C. H. Wang 和 A. J. Gunnion，“复合材料层合板斜接修复的设计方法”，《复合材料科学与技术》，第68卷，第1期，第35–46页，2008年1月，doi: 10.1016/j.compscitech.2007.05.045。[20] C. Soutis 和 F. Z. Hu，“压缩载荷下斜接补片修复碳纤维/环氧树脂层合板的失效分析”，《*AIAA*期刊》，第38卷，第4期，第737–740页，2000年4月，doi: 10.2514/2.1027。[21] S. P. Shah 和 M. Maiarù，“制造对聚合物基复合材料横向响应的影响”，《聚合物》，第13卷，第15期，文章编号15，2021年1月，doi: 10.3390/polym13152491。[22] M. Maiaru，“基体断裂性能的不确定性对纤维增强聚合物基复合材料横向强度的影响”，载于*2018*年*AIAA/ASCE/AHS/ASC*结构、结构动力学与材料会议，美国航空航天学会，2018年。doi: 10.2514/6.2018-1901。[23] M. Maiarù、R. J. D’Mello 和 A. M. Waas，“虚拟固化聚合物基复合材料层内强度的表征”，《复合材料*B*辑：工程》，第149卷，第285–295页，2018年9月，doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.018。[24] L. Aktas、Y. Hamidi 和 M. C. Altan，“吸湿对树脂传递模塑复合材料力学性能的影响”，载于材料：新型纳米工程与表面工程材料的加工、表征与建模，美国路易斯安那州新奥尔良：ASMEDC，2002年1月，第173–181页。doi: 10.1115/IMECE2002-39223。[25] S. Choi、A. P. Janisse、C. Liu 和 E. P. Douglas，“加水对环氧-胺热固性树脂固化动力学的影响”，《聚合物科学杂志*A*辑：聚合物化学》，第49卷，第21期，第4650–4659页，2011年，doi: 10.1002/pola.24909。[26] N. Sharp、C. Li、A. Strachan、D. Adams 和 R. B. Pipes，“利用分子动力学模拟研究水对环氧树脂固化动力学和玻璃化转变温度的影响”，《聚合物科学杂志*B*辑：聚合物物理》，第55卷，第15期，第1150–1159页，2017年，doi: 10.1002/polb.24357。[27] C.-H. Shen 和 G. S. Springer，“复合材料的水分吸收与解吸”，《复合材料杂志》，第10卷，1976年。[28] J. M. Kropka、D. B. Adolf、S. Spangler、K. Austin 和 R. S. Chambers，“胶接接头强度劣化机制：潮湿环境中的玻璃态聚合物热固性粘接”，《国际粘接与胶粘剂杂志》，第63卷，第14–25页，2015年12月，doi: 10.1016/j.ijadhadh.2015.07.014。[29] S. Patil 等，“预测环氧体系固化诱导残余应力的多尺度方法”，载于美国复合材料学会第*35*届技术（线上）会议论文集，美国复合材料学会，2020年9月。

[30] P. P. Deshpande 等，“利用集成计算材料工程对热固性聚合物固化过程进行多尺度建模”，载于美国复合材料学会第三十五届技术会议论文集，2020年。doi: 10.12783/asc35/34889。[31] G. M. Odegard 等，“利用反应性界面力场对环氧树脂进行分子动力学建模”，《大分子》，第54卷，第21期，第9815–9824页，2021年11月，doi: 10.1021/acs.macromol.1c01813。[32] S. Shah 等，“热固性复合材料虚拟制造的多尺度建模”，载于*AIAA Scitech 2020*论坛，收录于AIAA SciTech论坛。美国航空航天学会，2020年1月。doi: 10.2514/6.2020-0882。[33] S. U. Patil、S. P. Shah、M. Olaya、P. P. Deshpande、M. Maiaru 和 G. M. Odegard，“环氧树脂完全交联过程的反应性分子动力学模拟”，《*ACS*应用高分子材料》，2021年10月，doi: 10.1021/acsapm.1c01024。[34] P. S. Gaikwad 等，“通过计算模拟理解聚苯并噁嗪树脂低固化收缩率的成因”，《*ACS*应用高分子材料》，第3卷，第12期，第6407–6415页，2021年12月，doi: 10.1021/acsapm.1c01164。[35] R. J. D’Mello、M. Maiarù 和 A. M. Waas，“利用微观力学计算研究固化过程对纤维增强聚合物基复合材料单层板横向拉伸强度的影响”，《集成材料》，第4卷，第1期，第119–136页，2015年12月，doi: 10.1186/s40192-015-0035-y。[36] S. Shah 和 M. Maiaru，“制造过程中考虑基体性能不确定性的虚拟固化聚合物基复合材料微观尺度分析”，载于美国复合材料学会*2018*年会议，DEStech Publications, Inc.，2018年11月。doi: 10.12783/asc33/25958。[37] R. J. D’Mello、A. M. Waas、M. Maiaru 和 R. Koon，“面向复合材料航空航天结构高效材料与工艺设计的集成计算建模”，载于*AIAA Scitech 2020*论坛，美国航空航天学会。doi: 10.2514/6.2020-0655。[38] M. N. Olaya 和 M. Maiaru，“聚合物基复合材料工艺建模的多尺度方法”，载于*AIAA SCITECH 2022*论坛，美国航空航天学会。doi: 10.2514/6.2022-0379。