

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.014

发动机叶片用碳纤维/环氧树脂预浸料 固化动力学模型

钟竹瑞, 郭聪聪, 尹国强, 张晋
(江苏恒神股份有限公司, 江苏丹阳 212300)

摘要: 碳纤维增强聚合物发动机叶片具有高比强度、高比刚度的优势,但由于其大厚度结构在固化过程中散热困难,易因固化放热引起局部过热,从而影响制件质量。为研究材料固化过程中温度、固化度和固化速率之间的关系,采用差示扫描量热法对叶片用碳纤维/环氧树脂预浸料开展变温实验和间断固化实验。分别运用 n 级反应模型和自催化反应模型对预浸料的固化过程进行动力学模拟。其中,自催化反应模型包括经逻辑校正的 Sesták-Berggren 模型和改进的 Kamal 模型。结果表明, n 级反应模型随升温速率提高拟合优度明显下降,模型拟合不佳;逻辑校正的 Sesták-Berggren 模型虽能捕捉数据的基本规律,但预测值与实测值之间存在可见差异;具有双重反应机制的改进 Kamal 模型模拟曲线与实验数据点高度重合,不仅整体变化趋势一致,在关键特征点上也表现出高度一致性,能准确地描述该预浸料的固化行为。固化速率模型拟合值和实验观测值的残差平方和为 2.51×10^{-4} 。通过实验验证,所建立的固化动力学模型具有较高的准确性,为碳纤维/环氧树脂预浸料固化工艺的制定提供了理论依据和数据支持。

关键词: 固化动力学; 固化模型; 差示扫描量热法; 碳纤维/环氧树脂预浸料; 发动机叶片

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0113-09

Curing kinetics model of carbon fiber/epoxy resin prepreg for aeroengine blades

ZHONG Zhurui, GUO Congcong, YIN Guoqiang, ZHANG Jin
(Jiangsu Hengshen Co., Ltd., Danyang 212300, China)

Abstract: Engine blades made of carbon fiber reinforced polymer possess advantages of high specific strength and specific stiffness. However, due to their thick structure, it is difficult to dissipate heat during the curing process, and the heat released during curing can lead to local temperature rise, thereby affecting the quality of the fabricated parts. To investigate the relationship between temperature, curing degree, and curing rate, variable-temperature and intermittent curing experiments were conducted on carbon fiber/epoxy resin prepreg for blades using differential scanning calorimetry. Curing process was kinetically simulated using the n -th order reaction model and self-catalytic reaction models, and the latter includes the logically corrected Sesták-Berggren model and the improved Kamal model. Results show that the fitting goodness of n -th order reaction model significantly decreases as the heating rate increases, leading to poor model fitting; Although the logically corrected Sesták-Berggren model can capture the basic laws of the data, there are visible differences between the predicted values and the measured values; The simulation curve of the improved Kamal model with a dual reaction mechanism closely coincides with the experimental data points. Not only showing a consistent overall trend but also exhibiting high consistency at key characteristic points, and can more accurately describe the curing behavior of the prepreg. A residual sum of squares between model calculated and experimental curing rate is 2.51×10^{-4} . Experimental verification confirms the high accuracy of the established curing kinetics model, providing a theoretical basis and data support for formulating the curing process of this carbon fiber/epoxy resin prepreg.

Keywords: curing kinetics ; curing models ; differential scanning calorimetry ; carbon fiber/epoxy resin prepreg ; engine blade

基金项目: 江苏省重点研发计划项目(BE2023014)

通信作者: 钟竹瑞, 硕士, 工程师, 主要研究碳纤维增强树脂基复合材料

收稿日期: 2025-12-27

引用格式: 钟竹瑞, 郭聪聪, 尹国强, 等. 发动机叶片用碳纤维/环氧树脂预浸料固化动力学模型[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 113-121.

ZHONG Zhurui, GUO Congcong, YIN Guoqiang, et al. Curing kinetics model of carbon fiber/epoxy resin prepreg for aeroengine blades[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 113-121.

航空发动机设计制造是航空业的核心挑战,为提升推力、降低油耗与噪声,并提高可靠性,全球致力于研发新一代大旁通比涡扇发动机^[1]。其中,碳纤维增强聚合物(CFRP)风扇叶片是关键突破,因其具有高比强度、高比刚度及可设计性等优势,相比传统钛合金叶片能显著减重并改善抗疲劳性能^[2]。叶片减重1 kg,更能引发发动机及飞机结构的连锁减重效应,因此CFRP叶片已成为高性能商用涡扇发动机的重要研究方向^[3]。

CFRP发动机叶片由数百层预浸料铺贴而成,榫头厚度高达几十至100 mm,由于热固性材料的导热系数低,在大厚度制件中,固化过程释放的热量不能有效消散,局部温度升高,反应速率和发热率增加,这通常会带来不可接受的冲温风险^[4-7],使用江苏恒神股份有限公司研发的叶片用碳纤维/环氧树脂预浸料铺贴一块50 mm厚层合板,按标准固化制度180 °C/2 h进行固化,测得最高温度239 °C,冲温59 °C。温度梯度的形成导致固化不均匀、形态不均匀,甚至基质降解和分层^[8-9]。

固化动力学分析是探究树脂固化行为的关键方法之一。通过差示扫描量热(DSC)法,对树脂或预浸料进行等温及非等温固化测试,得到材料玻璃化转变温度及固化度随温度变化的曲线^[10-14]。基于所测得的固化速率、温度与时间等参数,对复合材料成型期间的固化变形进行预测与控制,有助于提升构件成型合格率,保障产品质量的一致性,并显著优化生产流程效率^[15]。

国内外学者广泛采用DSC研究环氧树脂及其预浸料的固化动力学。Mphahlele等^[16]通过Ozawa和Kissinger法测定环氧预浸料活化能,证实固化度具显著时间依赖性。Garschke等^[17]针对改性环氧体系,采用自催化扩散模型准确描述了固化后期动力学。高腾飞等^[18]发现改进的Kamal模型能精确表征碳纤维/环氧体系的双重子反应过程。李婷婷等^[19]通过峰分离技术建立了热塑增韧环氧树脂的两阶段反应动力学模型。此外,Zhang等^[20]运用 n 阶动力学方程成功优化了阶梯固化工艺。

现有研究多集中于单一模型的建立与验证,或仅对两类模型进行简单对比,缺乏对 n 级反应模型与多种自催化模型的系统对比分析,难以明确不同模型的

适用边界与误差来源。本文通过系统对比三类固化动力学模型的适配性,优选出能够精准表征航空发动机叶片用环氧/碳纤维预浸料温度-固化度-固化速率关联规律的最优模型,弥补了现有研究对特定体系模型优选系统性不足的缺陷,并通过与固化试验数据进行对比验证了所建立固化动力学模型在大厚度制件实际固化过程中预测的准确性,也为发动机叶片用预浸料的固化制度的确定提供理论依据与数据支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

碳纤维/环氧树脂预浸料:EH920/HF40C,预浸料树脂质量分数名义值为34%,树脂体系由多官能团环氧树脂、胺类固化剂和热塑性增韧剂组成,纤维面密度名义值为194 g/m²,江苏恒神股份公司。

1.2 主要仪器及设备

DSC仪:DSC25,美国TA仪器公司;

分析天平:QUINTIX65-1CN,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司。

1.3 试样制备

使用精度为0.01 mg的分析天平精确称取(20±2) mg预浸料置于耐高压的密封坩埚中,确保各实验制样过程一致以避免误差。

1.4 测试与表征

按照ASTM E1356-08-2014对EH920/HF40C预浸料开展变温实验和间断固化实验,研究材料固化过程中温度、固化度和固化速率之间的关联性。测试时,将样品坩埚与参比坩埚置于DSC炉体中,在氮气气氛下(流速50 mL/min)进行测试。变温试验分别以1、2、3、4、5、6 °C/min的升温速率升温至310 °C,间断固化实验以1 °C/min升温速率分别升温至138、150、162、166 °C以及170 °C,降温至50 °C平衡,后以1 °C/min升温速率测量残余放热。不同时间固化度计算见式(1)。

$$\alpha = \frac{\Delta H - \Delta H_t}{\Delta H} \quad (1)$$

式中: α 为固化度; ΔH 为总反应焓; ΔH_t 为反应的残余焓。

2 结果与分析

2.1 DSC测试结果

EH920/HF40C预浸料中热塑性材料在升温过程

中熔融,为实现复杂热现象的有效分离,将样品中的可逆热流和非可逆热流进行分离,使用mDSC模式进行测试,测得的不同升温速率的DSC曲线如图1所示。软件提供的基线选择有直线和反曲线两大类,其中反曲线根据基线的起始点和终点引出方式不同又分为水平引出和切线引出两种类型。不同基线选择方法下,各升温速率对应的 ΔH 及其平均值、标准差和变异系数见表1。对比所有基线选择方法发现,在不同基线下的平均 ΔH 中,反曲线-两侧水平引出的值较大,而反曲线-两侧切线引出的值较小,其余方法的值较为接近。所有基线选择方法中,反曲线-左侧切线右侧水平引出方法的变异系数最小,所

以其求得的不同升温速率下放热焓最稳定,即可认为此基线在上述方法中是最优的选择,取该方法测得的平均值为预浸料的 ΔH ,为136.56 J/g。

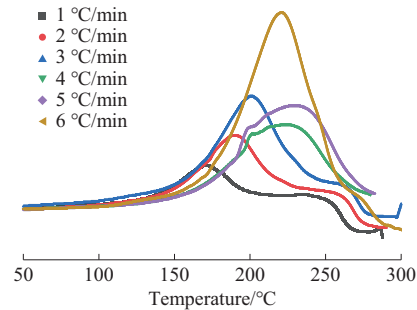


图1 不同升温速率下EH920/HF40C预浸料的DSC曲线
Fig. 1 DSC curves of EH920/HF40C prepreg under different heating rates

表1 不同基线选择方法下各升温速率的 ΔH 及其平均值、标准差和变异系数

Tab. 1 ΔH at different heating rates under various baseline selection methods and their averages, standard deviations, coefficients of variation

Baseline selection	ΔH at different heating rates/(J·g ⁻¹)						Average ΔH /(J·g ⁻¹)	Standard deviation	Coefficient of variation
	1 °C/min	2 °C/min	3 °C/min	4 °C/min	5 °C/min	6 °C/min			
Linear	122.27	131.92	142.81	138.43	135.29	143.61	135.71	7.94	0.059
Sigmoidal(both sides horizontal)	130.68	140.14	153.46	151.14	150.06	149.53	146.84	6.75	0.046
Sigmoidal(left tangent, right horizontal)	140.55	134.49	135.00	134.61	135.68	139.41	136.56	2.69	0.020
Sigmoidal(left horizontal, right tangent)	136.22	122.78	138.68	134.61	133.34	122.66	131.38	6.94	0.05
Sigmoidal(both sides tangent)	139.54	97.47	117.99	118.08	116.82	113.04	117.16	13.47	0.114

Note: ΔH is total enthalpy of reaction

此外,补充固化度 $\neq 0$ 的固化动力学数据,分别以1 °C/min的升温速率升温至目标温度后,使用DSC测量残余放热,得到不同固化度的动力学数据,具体数据见表2。

表2 间断固化实验数据

Tab. 2 Intermittent curing experimental data

Cure degree	Target temperature/°C	Residual heat release/(J·g ⁻¹)
0.146	138	116.67
0.222	150	106.34
0.384	162	84.15
0.463	166	73.41
0.636	170	49.34

2.2 固化动力学模型的建立

目前,多采用唯象模型描述热固性材料的固化动力学,常用的唯象模型通常包括 n 级反应模型,见式(2),和自催化反应模型。其中 n 级反应模型适合描述单一主反应过程,适合用来描述不饱和聚酯树脂、某些简单的酚醛树脂等^[21],自催化模型能反映自催化特征,适合大多数环氧树脂,比如环氧/胺体系、酚醛树脂等。自催化模型中有两个最重要且经常被引用的模型:Kamal模型和Sesták-Berggren模型,分别见式(3)、式(4),Kamal模型适用于具有显著自

催化特性的热固性树脂体系,其中最典型的就是胺类固化剂固化的环氧树脂体系,Sesták-Berggren模型则是一个“全能型”的经验方程,可以拟合非常广泛的固化行为^[22]。

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha)^n \quad (2)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_1(1 - \alpha)^n + k_2\alpha^m(1 - \alpha)^n \quad (3)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = k\alpha^m(1 - \alpha)^n \quad (4)$$

式(2)至式(4)中: t 为时间; k_1 、 k_2 为固化反应速率常数; m 、 n 为反应级数。

k 遵循Arrhenius方程,见式(5)。

$$k = Ae^{\frac{-E}{RT}} \quad (5)$$

式中: A 为指前因子; E 为表观活化能; R 是气体常数,取值8.314 J/(mol·K); T 为绝对温度,单位K。

2.2.1 n 级反应模型

采用 n 级反应模型对EH920/HF40C预浸料的固化行为进行拟合。该模型是固化动力学研究中常用的简单模型,适合描述单一反应控制的固化过程,尤其在温度变化对反应速率有显著影响时,适用于简单树脂体系或作为初步研究的参考模型。

基于DSC变温试验和间断固化试验数据,采用matlab中fit函数进行非线性最小二乘法拟合,拟合结果如图2所示,固化动力学参数见表3,决定系数

(R^2)=0.999 9。图3为不同升温速率下 n 级反应模型固化反应速率和固化度与实验结果的对比,基于 n 级反应动力学模型的拟合结果表明,在较低升温速率下,固化反应速率及固化度随温度变化的模拟曲线与实验数据的趋势基本一致,但存在显著的偏差,重合度较低。当升温速率升高时,模拟曲线与实验数据的偏离加剧,拟合优度显著下降,该模型拟合情况不佳。

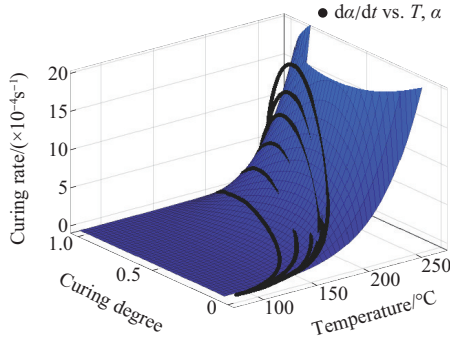


图2 n 级反应模型拟合结果

Fig. 2 Fitting results of n -th order reaction model

表3 n 级反应模型固化动力学参数

Tab. 3 Kinetic parameters of n -th order reaction model

Items	Value	Lower limit	Upper limit
k	3.26×10^{-3}	3.259×10^{-3}	3.26×10^{-3}
n	1.105	1.105	1.105

Notes: k is curing rate constant; n is reaction order

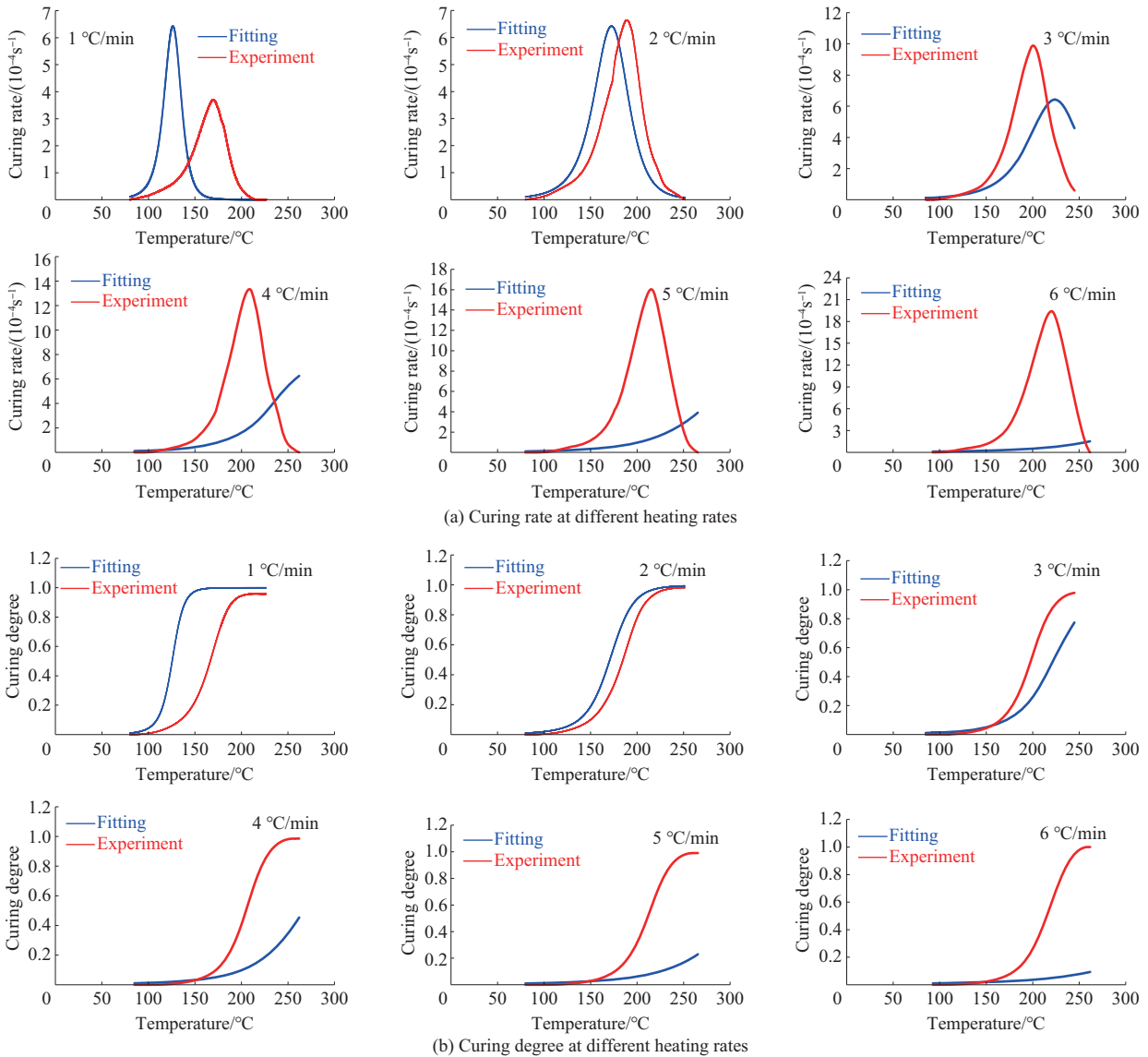


图3 n 级反应模型固化反应速率和固化度拟合曲线与实验数据的对比

Fig. 3 Comparison of fitting curves of curing reaction rate and curing degree of the n -th order reaction model with experimental data

2.2.2 Sesták-Berggren 模型

采用逻辑矫正的 Sesták-Berggren 模型对 EH920/HF40C 预浸料的固化行为进行拟合,见式(6)。模型中引入了固化度(α)和温度(T)的影响,参数 C 、 α_{c0} 、 α_{cT} 用于描述温度和固化度之间的关系。该模型适合描述在中低温下的固化过程,特别是扩散效应较弱、化学反应占主导的阶段,固化速率主要由反应动力学决定。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{k\alpha^m(1-\alpha)^n}{1 + e^{C(\alpha - \alpha_{c0} + \alpha_{cT}T)}} \quad (6)$$

式中: n 为动力学模型中的反应级数,反映了反应速率对未反应部分的依赖程度; m 为动力学模型中的反应级数,反映了反应速率对已反应部分的依赖程度; C 控制分母中指数函数的陡峭程度,决定固化度或温度接近临界值时速率下降的敏感性; α_{c0} 为临界固化度阈值; α_{cT} 为温度对临界固化度的调节系数,体现温度升高或降低对抑制效应阈值的影响,当实际固化度 α 超过 $\alpha_{cT}T$ 时,分母迅速增大,导致固化速率显著降低。

基于 DSC 升温试验数据,采用 matlab 非线性最小二乘法来拟合模型,选择最小绝对残差(LAR)和信赖域算法(Trust-Region)提高拟合的稳健性和准确性,拟合结果如图4所示,固化动力学参数见表4, $R^2=0.9999$ 。

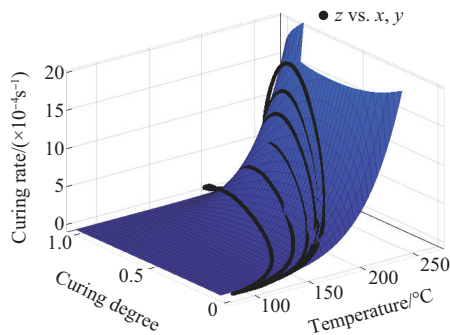


图4 逻辑矫正的 Sesták-Berggren 模型拟合结果

Fig. 4 Fitting results of the logically corrected Sesták-Berggren model

图5为不同升温速率下逻辑矫正的 Sesták-Berggren 模型固化反应速率和固化度与实验结果的对比,拟合结果和实验数据的大致走向相符,然而两者并未实现高度吻合,当前模型虽能捕捉数据的基本规律,但预测值与实测值之间存在可见差异。按式(7)计算固化速率模型拟合值和实验观测值的残差平方和(Q_e),其值为0.00249。

$$Q_e = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

表4 逻辑矫正的 Sesták-Berggren 模型固化动力学参数

Tab. 4 Kinetic parameter of the logically corrected Sesták-Berggren model

Items	Value	Lower limit	Upper limit
C	3.263 5	3.262 3	3.264 7
k	$1.000 7 \times 10^3$	$-3.299 2 \times 10^4$	$3.499 4 \times 10^4$
m	1.499 8	1.499 5	1.500 0
n	1.000 0	0.999 9	1.000 2
α_{c0}	-7.901 0	-18.311 5	2.509 6
α_{cT}	0.010 0	0.010 0	0.010 0

Notes: C is parameter controlling the steepness of the exponential function in the denominator; k is curing rate constant; m, n are reaction orders; α_{c0} is critical curing degree threshold α_{cT} is temperature adjustment coefficient for the critical curing degree

式中: n 为样本总数量; y_i 为第 i 个样本的实测值; \hat{y}_i 为第 i 个样本的模拟值。

2.2.3 改进后的 Kamal 模型

常见的 Kamal 模型结合了自催化与 n 级反应模型,两项模型共享相同的反应级数 n ,这限制了模型对复杂固化体系的描述精度。因此提出了一个修正模型,见式(8)。该模型是一个双重反应机制模型,通常用于描述复杂的固化过程,其中可能涉及两个主要的反应阶段。第一项通常对应于初始反应阶段,可能是环氧基团与固化剂之间的主要反应,第二项通常对应于后续的反应阶段,可能是二次交联或副反应。

$$\frac{d\alpha}{dt} = A_1 e^{-\frac{E_1}{RT}} (1-\alpha)^{n_1} + A_2 e^{-\frac{E_2}{RT}} \alpha^m (1-\alpha)^{n_2} \quad (8)$$

式中: A_1, A_2 为指前因子,分别对应两个反应阶段的反应速率常数,单位 s^{-1} ; E_1, E_2 分别为两个反应阶段的活化能,单位 kJ/mol ,反映了化学反应对温度的敏感程度; n_1, n_2 为动力学模型中的反应级数,分别对应两个阶段的反应级数,均反映了反应速率对未反应部分的依赖程度; m 为动力学模型中的反应级数,反映了反应速率对已反应部分的依赖程度。

基于 DSC 升温试验数据,使用 matlab 软件,采用非线性最小二乘法来拟合模型,选择 LAR 和 Trust-Region 提高拟合的稳健性和准确性。拟合结果如图6所示,固化动力学参数见表5。

图7显示不同升温速率下改进的 Kamal 模型固化反应速率和固化度与实验结果的对比,模型计算值与实验数据吻合良好。如图所示,固化反应速率及固化度随温度变化的模拟曲线与实验数据点高度重合,不仅整体变化趋势一致,在关键特征点上也表现出高度一致性,表明该模型能够准确地描述

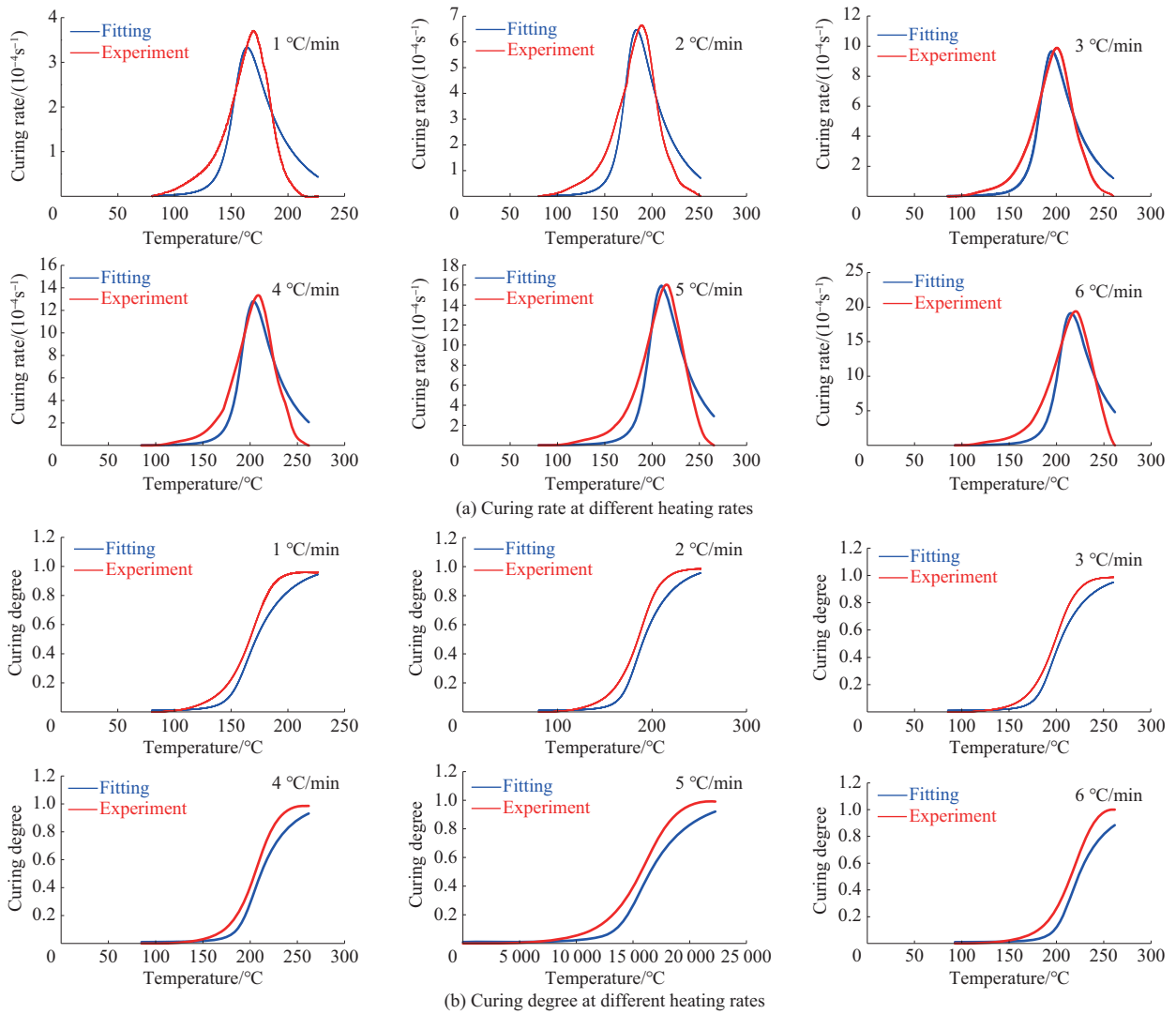


图5 逻辑矫正的Sesták-Berggren模型固化反应速率和固化度拟合曲线与实验数据的对比

Fig. 5 Comparison of fitting curves of curing reaction rate and curing degree of the logically corrected Sesták-Berggren model with experimental data

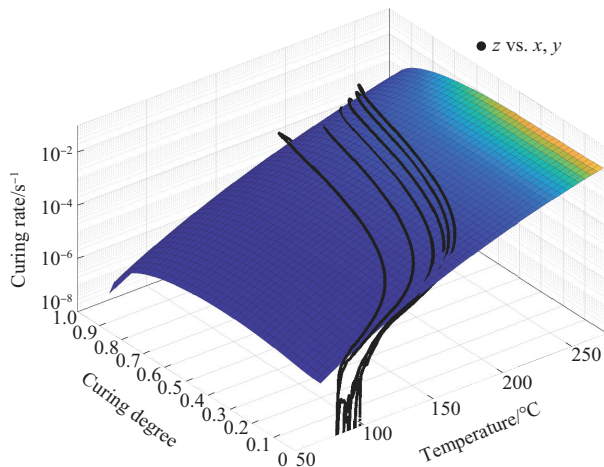


图6 改进的Kamal模型拟合结果

Fig. 6 Fitting results of improved Kamal model

该固化体系的动力学行为。固化速率模型拟合值和实验观测值的 Q_c 为0.000 251。

表5 改进的Kamal模型固化动力学参数

Tab. 5 Kinetic parameter of improved Kamal model

Items	Value	Lower limit	Upper limit
A_1	1.49×10^4	$1.423 5 \times 10^4$	$1.556 5 \times 10^4$
A_2	$5.788 1 \times 10^4$	$5.268 7 \times 10^4$	$6.037 6 \times 10^4$
E_1	$6.554 3 \times 10^4$	$6.538 9 \times 10^4$	$6.569 7 \times 10^4$
E_2	$6.393 8 \times 10^4$	$6.375 4 \times 10^4$	$6.412 3 \times 10^4$
m	1.206 5	1.186 2	1.226 8
n_1	1.498 4	1.193 7	1.803 2
n_2	1.454 3	1.420 6	1.488 0

Notes: A_1, A_2 are pre-exponential factors; E_1, E_2 are activation energies; m, n_1, n_2 are reaction orders.

综上所述,改进的Kamal模型能够更为准确地表征该预浸料在整个固化度范围内的反应速率变化,故采用该模型作为EH920/HF40C预浸料的固化动力学模型,固化反应动力学方程见式(9)。

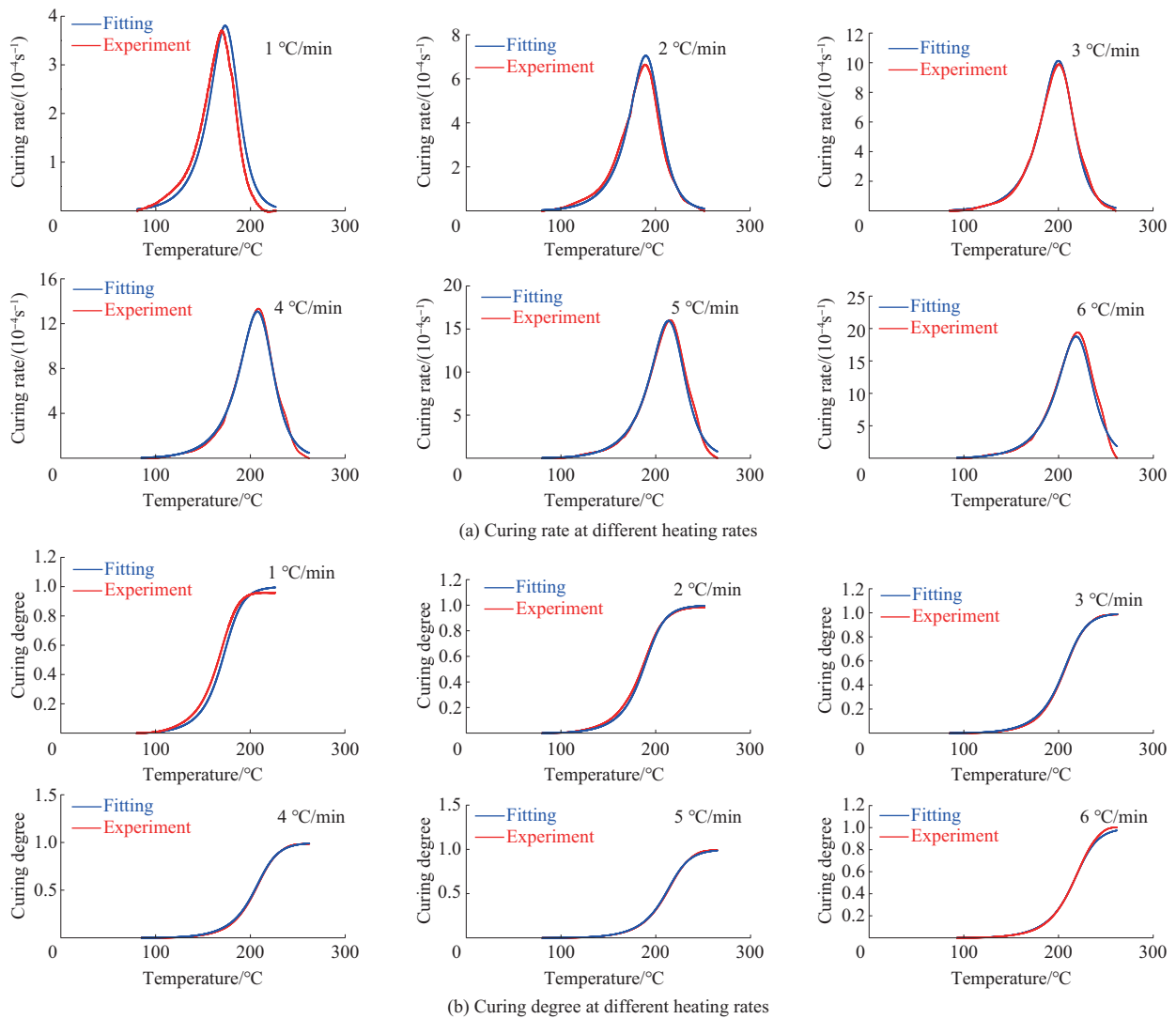


图7 改进的Kamal模型固化反应速率和固化度拟合曲线与实验数据的对比

Fig. 7 Comparison of fitted curves of improved Kamal model for curing reaction rate and curing degree with experimental data

$$d\alpha/dt = 14\,900 \exp(-65\,543/RT) (1-\alpha)^{1.4984} + 57\,881 \exp(-63\,938/RT) \alpha^{1.2065} (1-\alpha)^{1.4543} \quad (9)$$

2.3 固化动力学模型的验证

固化动力学模型为固化制度的制定提供了定量的理论依据。通过模型可以预测不同温度程序下的固化度发展历程,确定达到目标固化度所需的最短时间。对三个不同固化制度的固化度以及固化反应速率进行模拟,并制备3块50 mm厚板分别按照三个固化制度进行固化,在10 mm厚贴有脱模布的玻璃

板上固化,并用黄胶封边,测量厚度方向1/4、1/2和3/4处中间位置的冲温情况,如图8所示。三个固化制度均在热压罐中固化,压力为0.6 MPa,降温速率为2 °C/min,固化制度1#为标准固化制度,固化制度2#为慢升温固化制度,固化制度3#为加保温平台固化制度,具体固化制度及其冲温情况见表6。

三种固化制度的固化度和固化反应速率的改进的Kamal模型的模拟情况如图9所示,固化试验冲温情况如图10所示。由模拟结果可见,降低升温

表6 不同固化制度冲温情况对比

Tab. 6 Comparison of heating conditions of different curing systems

Curing systems	Process parameters	Temperature at 1/4 thickness/°C	Temperature at 1/2 thickness/°C	Temperature at 3/4 thickness/°C
1#	Heat up to 180 °C at 2 °C/min and hold for 2 h	232.7	239	213.4
2#	Heat up to 180 °C at 0.5 °C/min and hold for 2 h	201	205.8	193.8
3#	Heat up to 120 °C at 2 °C/min and hold for 2 h, then heat up to 180 °C at 2 °C/min and hold for 2 h	203.6	207.9	199.3

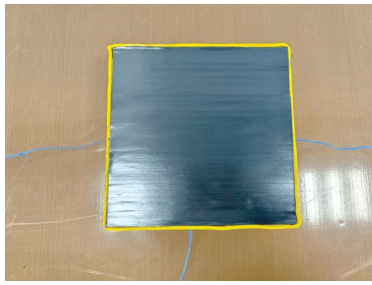
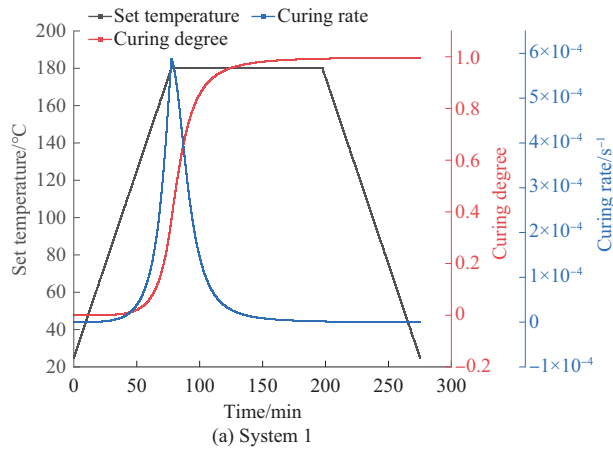
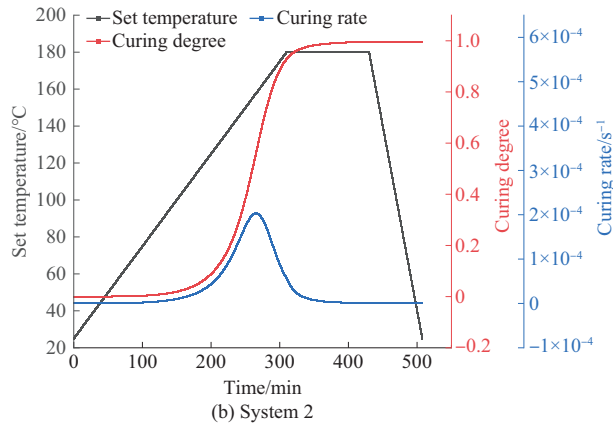


图8 厚板铺贴图

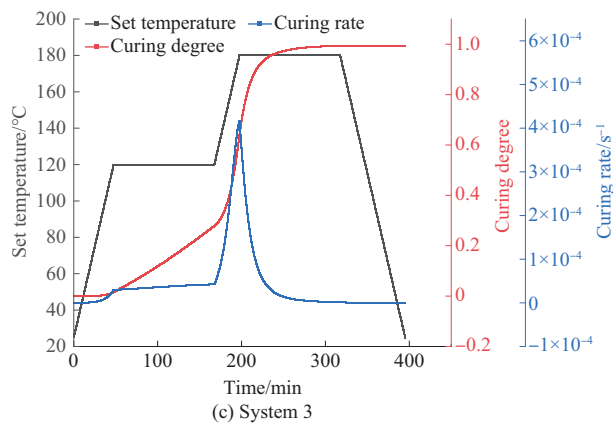
Fig. 8 Thick plate laying pattern



(a) System 1



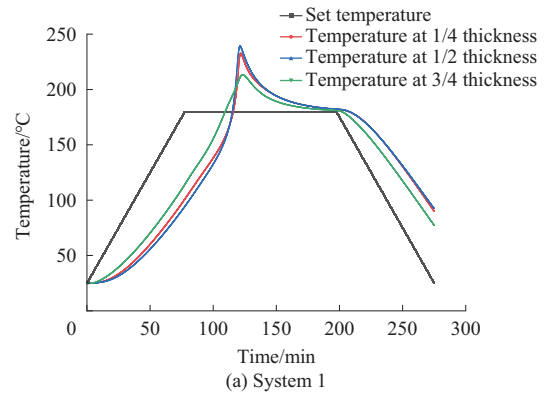
(b) System 2



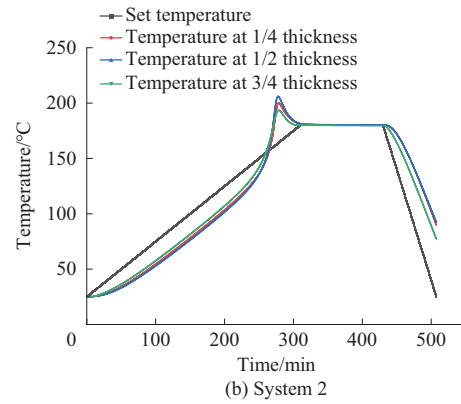
(c) System 3

图9 改进的Kamal模型对不同固化制度下固化度和固化速率的模拟结果

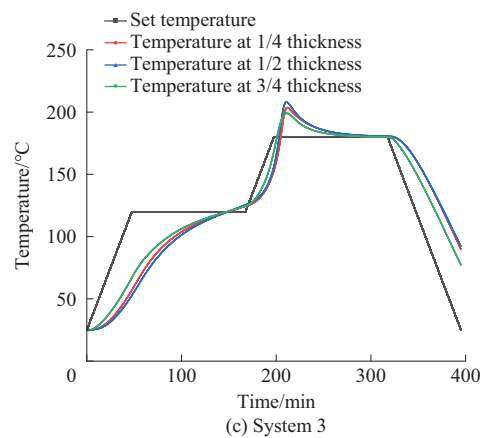
Fig. 9 Simulation results of the improved Kamal model for curing degree and curing rate under different curing systems



(a) System 1



(b) System 2



(c) System 3

图10 不同固化制度下50 mm板冲温情况

Fig. 10 Temperature overshoot of 50 mm plates under different curing systems

速率或加保温平台可以减缓固化初期的反应速率, 固化度增长减缓。由表6可见, 固化过程中层合板固化制度1#、2#、3#的最高固化温度分别为239、205.8 °C和207.9 °C, 慢升温固化制度和加保温平台固化制度较标准固化制度最高温度分别降低33.2 °C和31.1 °C。实验结果表明, 三种固化制度最高冲温温度的排序与通过动力学分析所确定的固化反应速率的排序呈现出高度的一致性, 冲温现象减弱可归因于固化反应速率的降低, 该结果印证了所选固化动力学模型的准确性, 模型所展现出的较高

模拟精度,不仅能够准确描述该预浸料的固化行为,更对优化实际生产工艺参数具有重要的指导意义。

3 结论

采用DSC法对江苏恒神股份有限公司研发的叶片用环氧/碳纤维预浸料开展变温实验和间断固化实验,研究材料固化过程中温度、固化度和固化速率之间的关联性。

(1)运用 n 级反应模型对EH920/HF40C预浸料固化过程进行动力学拟合,升温速率较低时模拟与实验趋势相近但偏差显著,随升温速率提高拟合度明显下降,模型拟合不佳。

(2)运用自催化反应模型(包括经逻辑校正的Sesták-Berggren模型和改进的Kamal模型)对EH920/HF40C预浸料的固化过程进行动力学拟合。逻辑校正的Sesták-Berggren模型虽能捕捉数据的基本规律,但预测值与实测值之间存在可见差异。改进的Kamal模型能够更为完备地表征该预浸料在整个固化度范围内的反应速率变化,故采用该模型作为EH920/HF40C预浸料的固化动力学模型,固化反应动力学方程为 $d\alpha/dt=14\ 900\exp(-65\ 543/RT)(1-\alpha)^{1.4984}+57881\exp(-63\ 938/RT)\alpha^{1.2065}(1-\alpha)^{1.4543}$ 。

(3)通过验证,改进的Kamal模型展现出较高模拟精度,不仅能够准确描述该预浸料的固化行为,更对优化实际生产工艺参数具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] ZHOU H, LI X Q, SHAO C J, et al. Review on the automated fiber placement process for the aero-engine composite fan blade and its feasibility in element level[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 193. DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.108875.
- [2] MARSH G. Aero engines lose weight thanks to composites[J]. *Reinforced Plastics*, 2012, 56(6):32-35.
- [3] WEI J H, ZHANG Y F, LIU Y F, et al. Advances in resin matrix composite fan blades for aircraft engines: A review[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 202. DOI:10.1016/j.tws.2024.112058.
- [4] FARJAS J, SANCHEZ-RODRIGUEZ D, ZAIDI S, et al. Analytical prediction of the thermal overheating in curing thick layers of fibre-reinforced thermosets[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 193. DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.108815.
- [5] FARJAS J, GONZÁLEZ J A, SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ D, et al. Analytical criterion to prevent thermal overshoot during dynamic curing of thick composite laminates[J]. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2025, 10. DOI: 10.1016/j.aime.2024.100156.
- [6] TIFKITSIS K I, WINISTOERFER A, SKORDOS A A. Online optimisation and active control of the cure process of thick composite laminates[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 87: 221-230.
- [7] HOJJATI M, HOA S V. Curing simulation of thick thermosetting composites[J]. *Composites Manufacturing*, 1994, 5(3):159-169.
- [8] PROTZ R, KUNZE E, LUPLOW T, et al. Manufacture, process simulation, modelling and testing of thick-walled thermoset fibre-polymer composite laminates-a review[J]. *Composite Structures*, 2025, 373. DOI:10.1016/j.compstruct.2025.119678.
- [9] TADDEI F, STRUZZIERO G, MICHAUD V. A numerical study of a tow-by-tow curing approach for residual stress mitigation in thick composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2026, 200. DOI: 10.1016/j.compositesa.2025.109283.
- [10] 冯敏, 田铁兵, 王晋, 等. 高性能航空复合材料用环氧树脂的固化反应动力学[J]. *高科技纤维与应用*, 2024, 49(3):20-23. FENG Min, TIAN Tiebing, WANG Jin, et al. Curing reaction kinetics of epoxy resins for high performance aerospace composites[J]. *Hi-Tech Fiber & Application*, 2024, 49(3):20-23.
- [11] 卢康逸, 陈安, 赵洪宝, 等. 国产T800级航空预浸料固化动力学研究及TTT图绘制[J]. *化工新型材料*, 2024, 52(12): 190-196, 202. LU Kangyi, CHEN An, ZHAO Hongbao, et al. Study on curing kinetics and time-temperature-transition(TTT) diagram of domestic T800 aerospace prepregs[J]. *New Chemical Materials*, 2024, 52(12):190-196, 202.
- [12] VOTO G, SEQUEIRA L, SKORDOS A A. Formulation based predictive cure kinetics modelling of epoxy resins[J]. *Polymer*, 2021, 236. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124304.
- [13] BAO C W, WANG Y N, MUSHTAQ R T, et al. Preparation, characterization, and curing kinetics of elevated and cryogenic temperature-resistant epoxy resin composites[J]. *Polymer Testing*, 2022, 116. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107783.
- [14] 张藕生, 唐建华, 罗子堃. 环氧树脂/DDS耐高温树脂体系的固化动力学研究及性能调控[J]. *热固性树脂*, 2024, 39(4):41-46. ZHANG Ousheng, TANG Jianhua, LUO Zikun. Curing kinetics and properties tuning of epoxy resin/DDS high heat-resistant resin system[J]. *Thermosetting Resin*, 2024, 39(4):41-46.
- [15] 唐闻远, 许英杰, 孙勇毅, 等. 基于温度曲线优化的复合材料热压罐固化时间与固化质量协同控制[J]. *材料工程*, 2021, 49(9): 142-150. TANG Wenyan, XU Yingjie, SUN Yongyi, et al. Simultaneous control of curing time and curing quality of auto-clave processed composite based on optimization of temperature profile[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(9):142-150.