

# 基于微波固化工艺的碳纤维 T800/环氧树脂 复合材料固化反应动力学

李自强<sup>1</sup>, 湛利华<sup>\*1, 2</sup>, 常腾飞<sup>2</sup>, 刘桂铭<sup>1</sup>, 李树健<sup>3</sup>

(1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083; 2. 中南大学 轻合金研究院, 长沙 410083;

3. 湖南科技大学 机电工程学院, 湘潭 411201)

**摘要:** 针对微波固化工艺下的碳纤维(T800)/环氧树脂复合材料的固化反应行为, 运用非等温差示扫描量热(DSC)法, 研究了 T800/环氧树脂复合材料的固化反应放热过程。基于 Kamal 动力学模型, 采用粒子群全局优化算法, 拟合得到了纯微波固化工艺及高压微波固化工艺的 T800/环氧树脂复合材料固化反应动力学方程, 通过实验验证, 该方程能够很好地描述 T800/环氧树脂复合材料微波固化反应动力学行为。并系统对比研究了不同固化工艺方法对 T800/环氧树脂复合材料固化反应动力学的影响。结果表明: 相比传统热固化工艺, 微波固化工艺能够有效提高 T800/环氧树脂复合材料的固化反应速率并降低其固化反应的活化能, 同时固化压力的引入对 T800/环氧树脂复合材料的固化反应有一定的促进作用。

**关键词:** 碳纤维; 环氧树脂; 复合材料; 差示扫描量热法; Kamal 模型; 粒子群算法; 微波固化动力学

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)09-2458-07

## Kinetics modeling of carbon fiber T800/epoxy resin composites based on microwave curing process

LI Ziqiang<sup>1</sup>, ZHAN Lihua<sup>\*1, 2</sup>, CHANG Tengfei<sup>2</sup>, LIU Guiming<sup>1</sup>, LI Shujian<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Institute of Light Alloy, Central South University, Changsha 410083, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to investigate the curing behavior of carbon fiber (T800)/epoxy matrix composites under microwave curing process, the exothermal process of curing reaction of T800/epoxy resin matrix composites was studied by nonisothermal differential scanning calorimetry (DSC). Based on Kamal dynamics model, T800/epoxy resin composite reaction kinetics equation of microwave curing technology and high-pressure microwave curing process was obtained by fitting the particle swarm optimization algorithm. And the effect of different curing methods on the curing kinetics of T800/epoxy resin composite was systematically compared. The experimental results show that the equation can well describe the microwave curing behavior of T800/epoxy resin composites. The results show that compared with the traditional thermal curing process, the microwave curing process can effectively improve the curing rate of T800/epoxy resin composite and reduce the activation energy of the curing reaction, while the introduction of curing pressure to the curing reaction of T800/epoxy resin composite have a certain role in promoting.

**Keywords:** carbon fibers; epoxy resin; composites; differential scanning calorimetry; Kamal model; particle swarm optimization; microwave curing kinetics

收稿日期: 2017-09-07; 录用日期: 2017-11-20; 网络出版时间: 2017-12-08 16:50

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171207.001>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB046502)

通讯作者: 湛利华, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为树脂基复合材料构件成形制造 E-mail: yjs-cast@csu.edu.cn

引用格式: 李自强, 湛利华, 常腾飞, 等. 基于微波固化工艺的碳纤维 T800/环氧树脂复合材料固化反应动力学[J]. 复合材料学报, 2018, 35(9): 2458-2464.

LI Ziqiang, ZHAN Lihua, CHANG Tengfei, et al. Kinetics modeling of carbon fiber T800/epoxy resin composites based on microwave curing process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(9): 2458-2464 (in Chinese).

碳纤维/环氧树脂复合材料以比强度高、比模量高、耐腐蚀、抗疲劳、阻尼减振性好、力学性能可设计性强等优点<sup>[1-2]</sup>,在航空航天、交通运输、风力发电等工业领域应用广泛。碳纤维增强环氧树脂复合材料制件一般采用热压罐成型工艺、树脂传递模塑(RTM)成型工艺等传统热固化工艺进行固化。传统热固化工艺往往是通过外部热源由表及里的热传导方式对复合材料制件进行加热,因此容易在材料内部形成过大温度梯度,造成树脂固化不均匀,制件内部产生较大内应力,导致复合材料制件脱模变形严重,乃至产生分层、孔隙等制造缺陷。同时,传统热固化工艺还因固化效率低、周期长等制造特点,造成能源浪费严重<sup>[3]</sup>。微波固化工艺是一种始于 20 世纪 80 年代中期,近 30 年正迅速发展的一种新型固化技术。微波固化通过电磁场与物质分子的相互作用,由介电损耗或磁损耗直接将微波能转化为热能,从而实现材料的整体同步加热<sup>[4]</sup>。与传统热固化相比,微波固化具有传热均匀、加热效率高、耗能低、制造周期短等特点<sup>[5]</sup>。

目前,国内外众多学者针对环氧树脂体系的微波固化进行了大量的理论和实验研究。Boey 等<sup>[6]</sup>研究了以间苯二胺(mPDA)为固化剂的双酚 A 型环氧树脂(DGEBA)的微波固化,结果表明,微波固化能增大固化反应速率。Wei 等<sup>[7]</sup>以二氨基二苯砜(DDS)为固化剂进行了 DGEBA/DDS 体系的微波固化研究,结果表明微波固化的反应速率显著增加,固化产物的玻璃化转变温度  $T_g$  高于热固化。刘学清等<sup>[8]</sup>研究了环氧 E44/二胺基二苯甲烷(DDM)体系的微波固化,结果表明,与热固化相比微波能显著提高 E44/DDM 的固化速度,缩短凝胶化时间。陈明华等<sup>[9]</sup>针对碳纤维增强环氧树脂基复合材料的微波固化研究结果表明,采用微波固化碳纤维/环氧树脂复合材料能够明显缩短固化时间,同时微波固化有利于提高碳纤维与环氧树脂的界面结合强度。因此,微波对环氧树脂及其复合材料的固化反应有明显的促进作用,对提高复合材料制件的成型质量有积极作用。但是目前碳纤维/环氧树脂体系复合材料微波固化的机制尚不清楚,特别是针对环氧树脂体系微波固化反应动力学的研究还很鲜见。此外,人们在研究环氧树脂固化反应过程中,往往忽略了制件成型过程中固化工艺压力对其固化反应的影响。因此有必要开展碳纤维/环氧树脂复合材料微波固化动力学及其高压微波固化动力

学的研究。

本文针对碳纤维(T800)/环氧树脂复合材料运用非等温差示扫描量热(DSC)法,研究了该种材料在微波固化工艺下的固化反应放热过程。基于环氧树脂固化反应的 Kamal 动力学模型建立了该复合材料的微波固化及高压微波固化动力学方程,同时对比分析了微波固化、高压微波固化及传统热固化工艺对 T800/环氧树脂复合材料固化动力学行为的影响规律。这为 T800/环氧树脂复合材料微波固化成型工艺的制定及优化提供了理论和实验依据。

## 1 固化反应动力学理论基础

环氧树脂的固化动力学模型主要有两种:基于宏观尺度的唯像模型和基于微观尺度的机制模型。唯像模型着眼于总体反应,用速率方程描述整个动力学反应过程。机制模型考虑整个反应过程的各反应物的化学平衡,准确性更高但是难以建模和计算。而唯像模型由于其简单易用,被广泛应用于固化过程的动力学分析和数值计算。唯像模型的一般形式如下<sup>[10]</sup>:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (1)$$

式中: $\alpha$  是固化度; $d\alpha/dt$  是固化反应速率; $k(T)$  是反应速率函数; $f(\alpha)$  是固化反应模型。 $k(T)$  是温度的函数,并且服从以下阿伦尼乌斯定律:

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

式中: $A$  为频率因子; $E$  是化学反应活化能; $R$  是自然气体常数; $T$  为反应温度。

根据反应机制的不同可以将固化反应模型  $f(\alpha)$  分为  $n$  级反应模型和自催化模型, $n$  级反应模型的反应特点是反应开始时反应速率达到最大值,而自催化模型反应存在诱导期,反应开始一段时间后反应速率达到最大。Kamal 动力学模型既考虑自催化行为又考虑  $n$  级反应行为,从实验结果来看,T800/环氧树脂复合材料更符合 Kamal 动力学模型的反应特点<sup>[11]</sup>。在 Kamal 动力学模型中:

$$f(\alpha) = \alpha^m(1-\alpha)^n \quad (3)$$

式中, $m$  和  $n$  为反应级数。

将式(2)和式(3)代入式(1),由此可得基于 Kamal 动力学模型的 T800/环氧树脂复合材料固化动力学方程基本形式如下:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \alpha^m(1-\alpha)^n \quad (4)$$

## 2 实验材料与方法

### 2.1 原材料

碳纤维 T800/环氧树脂单向预浸料, 由美国 Cytec 公司生产, 树脂含量为 35wt%, 单层厚度为 0.185 mm, 面密度为 190 g/m<sup>2</sup>。

### 2.2 实验方法

针对环氧树脂体系传统热固化过程及其动力学研究已经很多<sup>[12-14]</sup>, 大多直接采用等温或非等温 DSC 法在差示扫描量热仪中以一定的升温速率测出待测物的放热曲线, 然后基于 Kinsinger 法计算出固化反应的活化能, 拟合得出固化动力方程<sup>[15-16]</sup>。本文中传统热固化环氧树脂基复合材料的固化动力学是基于非等温 DSC 法用 Netzsch DSC STA449 测试并计算得出。测试全程采用 N<sub>2</sub> 作为保护气体, N<sub>2</sub> 流速为 100 mL/min。但是微波固化的树脂基复合材料的放热过程无法直接通过 DSC 测量得出, 只能通过间接测量的方法得出。具体方法为: 将裁剪好的预浸料样品置于微波固化炉中以 10 K/min 的升温速率加热到几个特定的温度点, 然后取出用 DSC 测试样品的剩余反应热  $H_{re}$ , 总反应热  $H_{total}$  减去剩余反应热  $H_{re}$  可得出加热到此温度点时样品的反应热  $\Delta H$ 。因为待测样品的固化反应起始温度为 403 K, 所以微波固化样品的测量范围为 403~553 K。样品的固化度可由下式计算:

$$\alpha = \frac{\Delta H}{H_{total}} \quad (5)$$

微波固化炉的频率为 2.45 GHz, 功率在 50~6 000 W 之间连续可调节。采用预埋布拉格光栅 (FBG) 的方法进行温度测量和记录。由于本文中使用的预浸料的标准热固化工艺压力为 0.6 MPa, 故在进行高压微波固化动力学研究时, 对真空袋封装的预浸料样品加压 0.6 MPa, 其它实验条件与微波固化工艺相同。

## 3 结果与讨论

### 3.1 T800/环氧树脂微波固化反应动力学方程的建立与验证

对于传统热固化样品, 反应热可以使用 2.2 节所述的 DSC 设备直接测量得到, 因此可以直接获得固化度随时间的变化关系。而对于微波固化的样品, 要通过测量样品在几个特定温度点的剩余反应热, 然后根据式 (5) 获得其固化度。微波固化 T800/环氧树脂复合材料反应余热的 DSC 曲线如图 1 所示。从 418~548 K 分别选取了温度点

418 K、438 K、458 K、488 K、508 K、548 K 进行测试, 其中  $T=273$  K 是未经微波加热的复合材料样品的 DSC 曲线。根据式 (5) 计算可以得到如图 2 所示的复合材料微波固化的温度-时间 ( $T-t$ ) 和固化度-时间 ( $\alpha-t$ ) 曲线。固化反应动力学模型是一个多变量耦合的微分方程, 将温度  $T$  解耦合得

$$T = \frac{1}{6}t + 298.15 \quad (6)$$

代入函数  $T(t)$ , 运用粒子群优化算法对式 (4) 进行拟合即可得出方程的各项系数, 进而得到 T800/环氧树脂复合材料微波固化动力学方程。

图 3 为微波固化 T800/环氧树脂复合材料固化度-时间拟合曲线。可以看出, 运用该方程计算得出的固化度值与实验值较为接近, 拟合优度  $R^2$  接近于 1, 故该拟合方程能很好的描述 T800/环氧树脂复合材料的微波固化特性。同理, 可以得出

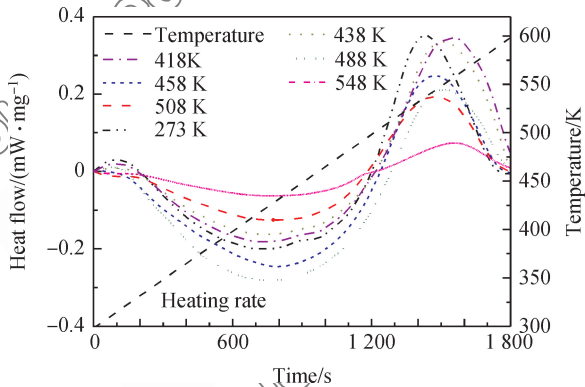


图 1 10 K/min 升温速率下微波固化碳纤维(T800)/环氧树脂 DSC 曲线

Fig. 1 DSC curves for the microwave curing carbon fiber (T800)/epoxy resin samples at 10 K/min

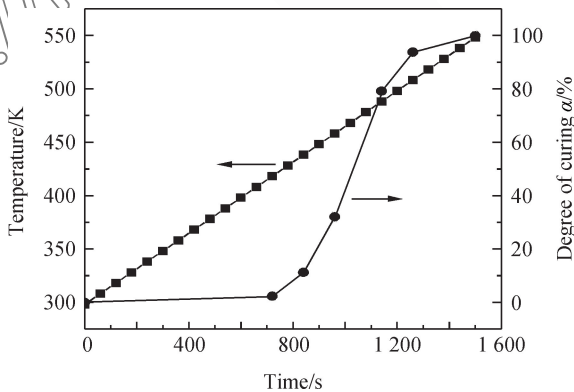


图 2 微波固化 T800/环氧树脂预浸料温度-固化度-时间实验结果

Fig. 2 Experimental data of curing degree-temperature-time of T800/epoxy resin prepreg by microwave curing



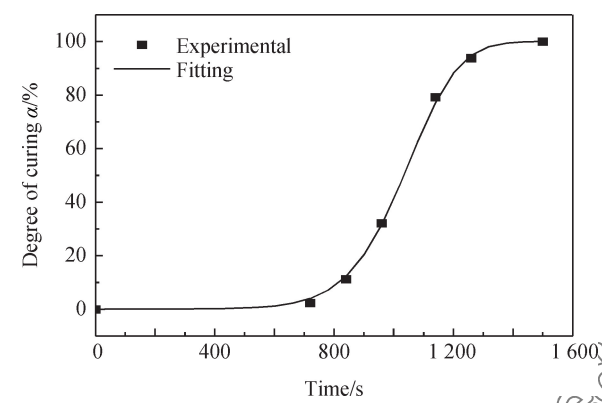


图3 微波固化 T800/环氧树脂复合材料固化度-时间拟合曲线  
Fig.3 Experimental data and fitting data of curing degree vs. time of T800/epoxy resin prepreg by microwave curing

T800/环氧树脂复合材料的高压(0.6 MPa)微波固化动力学方程。不同固化工艺下 T800/环氧树脂复合材料固化动力学方程的各项系数如表 1 所示。为了验证所得固化动力学方程的正确性,在微波固化炉中用恒定功率对预浸料样品加热得出固化度变化曲线,与方程计算值进行对比,结果如图 4 所示。

基于最小二乘法(LSM)计算不同固化工艺下 T800/环氧树脂固化度与实验测得固化度的误差如表 2 所示,该误差可由下式计算得到<sup>[17]</sup>:

$$\Delta\alpha = \frac{1}{n} \sum_n (\alpha_{\text{cal}} - \alpha_{\text{exp}})^2 \quad (7)$$

式中:  $\alpha_{\text{cal}}$  为固化度的计算值;  $\alpha_{\text{exp}}$  为固化度的实验

值;  $n$  为反应周期内所取的计算点数;  $\Delta\alpha$  为计算值与实验值差方的均值。从图 4 可以看出,通过固化动力学方程计算得出的曲线与实验结果吻合度较好,说明该固化动力学方程能较好地描述 T800/环氧树脂的微波固化特性,可靠性较强。

### 3.2 不同固化工艺对 T800/环氧树脂固化反应动力学的影响

图 5 为 T800/环氧树脂复合材料不同升温速率下不同固化工艺的固化度。可以看出,升温速率从 2 K/min 增大到 8 K/min,微波固化与热固化的固化特性都有明显不同,同一时刻微波固化的固化度始终高于热固化。从固化工艺上分析,可能是由于微波固化与热固化对预浸料加热方式的不同所致。碳纤维/环氧树脂预浸料在传统热固化中,热量是由表及里的传导式加热。与热固化不同的是,微波固化是通过电磁场与预浸料中极化分子的相互作用,其在电磁场中的电磁损耗直接将微波能转化为热能,从而实现内外同步的整体加热,使环氧树脂的固化反应更快、更均匀。另外,碳纤维/环氧树脂预浸料中具有导电性的碳纤维与微波存在电磁耦合,可以吸收微波能,被加热的纤维与周围的树脂存在热传导,使预浸料的升温更加均匀,进一步加快了预浸料的固化反应。从固化动力学方程中分析可以看出,微波固化的活化能  $E$  较热固化小,在一定的升温过程中微波固化的环氧树脂预浸料更早达

表1 T800/环氧树脂复合材料固化动力学方程拟合参数

Table 1 Kinetic equation fitting parameters of T800/epoxy resin composite by microwave curing

Process parameter	$A/\text{min}^{-1}$	$E/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$	$m$	$n$	$R^2$
Thermal	17392.14	62178.45	0.31	1.21	0.98
Microwave curing	31375.49	59453.60	0.32	1.20	0.99
Microwave curing (0.6 MPa)	45546.31	60000.80	0.34	1.21	0.97

Notes:  $A$ —Frequency factor;  $E$ —Activation energy;  $m$ ,  $n$ —Reaction order;  $R^2$ —Goodness of fit.

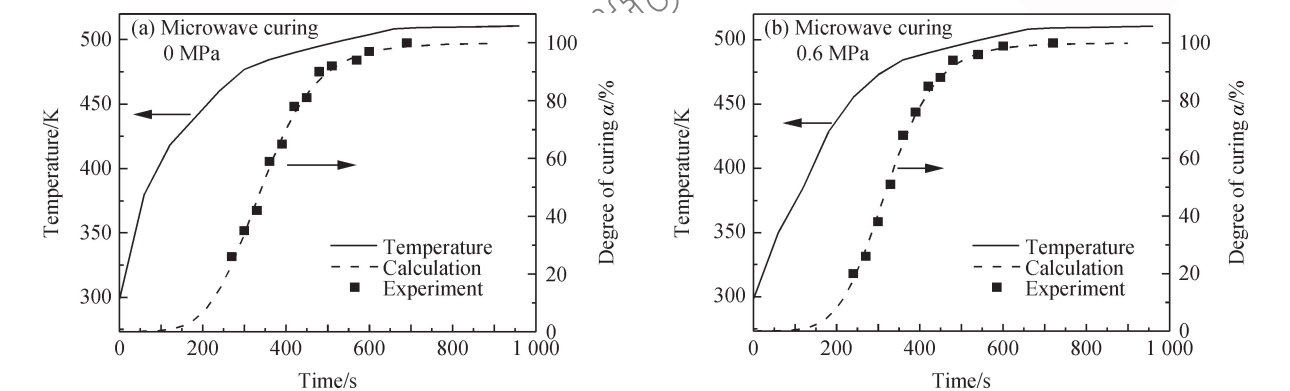


图4 恒功率下微波固化 T800/环氧树脂固化度计算值和实验值

Fig.4 Calculation value and experimental value of curing degree of constant power heating T800/epoxy resin by microwave curing

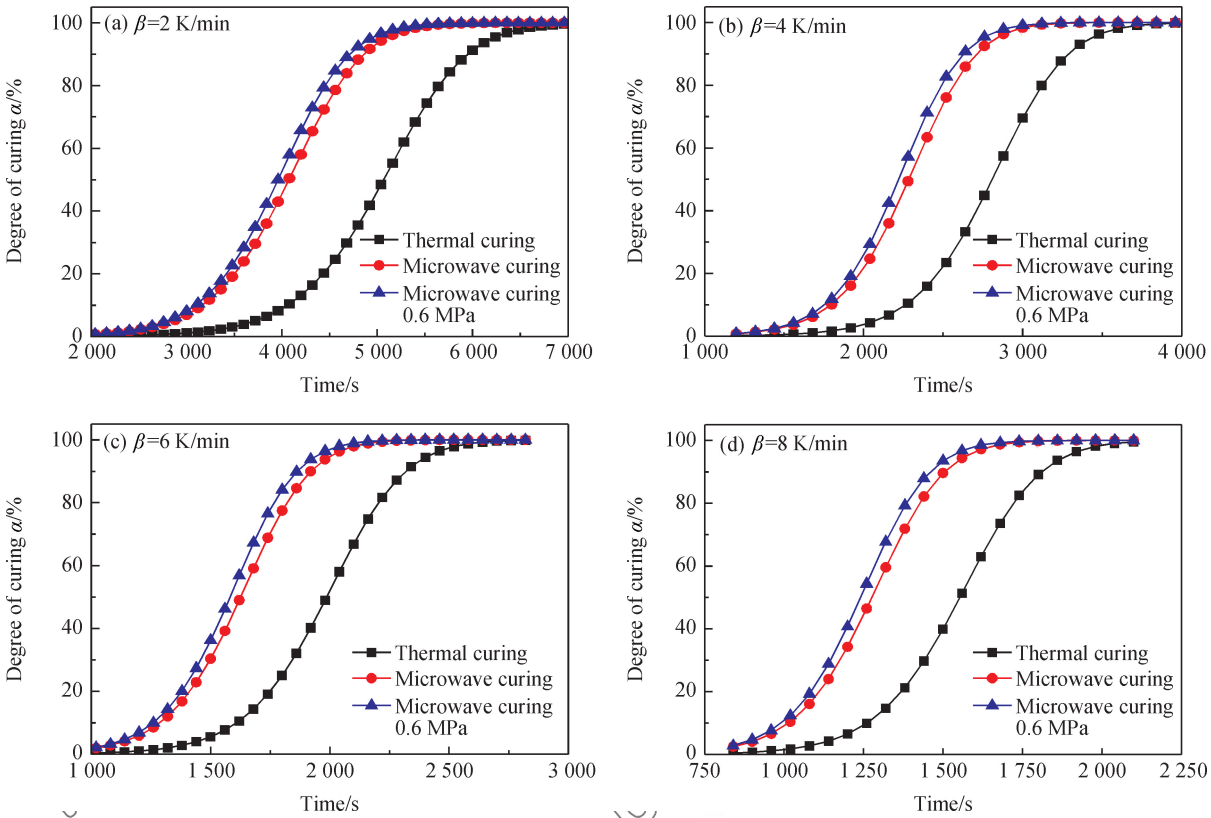


图 5 不同升温速率  $\beta$  下的 T800/环氧树脂预浸料热固化、微波固化和高压微波固化的固化度  
Fig. 5 Degree of curing of T800/epoxy resin prepreg under thermal curing, microwave curing and high-pressure microwave curing at different heating rates  $\beta$

到反应的临界点并开始固化反应。因此微波固化完成所需的时间更短。同时实验结果表明：不同的升温速率在加压 0.6 MPa 下，高压微波固化的预浸料固化度高于不加压时预浸料的固化度。可见，加压对碳纤维/环氧树脂预浸料的固化具有一定的促进作用。

表 2 不同固化工艺下 T800/环氧树脂复合材料固化度的计算值与实验值的偏差 ( $\Delta\alpha$ )

Table 2 Deviation value ( $\Delta\alpha$ ) between model predicted and experimental curing degree for T800/epoxy resin composites under different curing processes	
Curing process	Deviation value $\Delta\alpha/(\times 10^{-4})$
Microwave curing	4.74
Microwave curing (0.6 MPa)	3.72

在固化动力学中，T800/环氧树脂复合材料的固化速率可以由式(4)计算得出。固化度相同时，固化速率  $d\alpha/dt$  只跟速率常数  $k$  有关。由式(2)可得速率常数  $k$  是温度相关的函数：

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

因此，影响固化速率的因素主要有指前因子  $A$ 、反应活化能  $E$  及该时刻的温度  $T$ 。同时根据相转变理论<sup>[18]</sup>，压力对固化反应速率常数的影响如下式：

$$\frac{d\ln(k)}{dp} = \frac{\Delta v^*}{RT} \tag{8}$$

式中： $k$  为速率常数； $p$  为压力； $\Delta v^*$  为自由体积大小； $R$  为气体常数； $T$  为绝对温度。

图 6 为三种固化工艺下 T800/环氧树脂预浸料在不同升温速率下的固化度与固化速率的关系。可以看出，同一升温速率下微波固化的固化速率高于热固化，微波加压固化的固化速率高于微波固化。从固化动力学方程各项参数来看，这是由于微波固化增大了反应的指前因子同时降低了固化反应的活化能，因此在达到同一固化度时，微波固化的速率常数高于热固化。同时压力的引入也在一定程度上增大了碳纤维/环氧树脂预浸料的固化反应速率，根据相转变理论，预浸料反应的压力增加时， $\Delta v^*$  是一个负值，因此反应速率跟反应压力是正相关的，增大压力会增大反应速率常数。从固化速率和

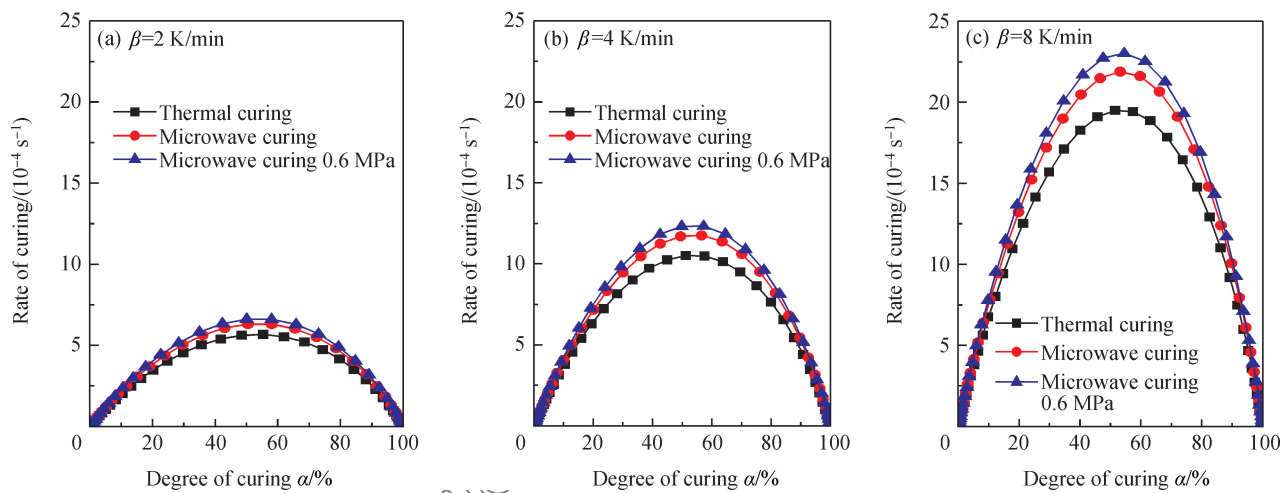


图 6 三种固化工艺下 T800/环氧树脂预浸料在不同升温速率下的固化度与固化速率的关系

Fig. 6 Relationship between the rate of curing and degree of curing of T800/epoxy resin prepreg at different heating rates  $\beta$  under three curing conditions

固化度两方面分析。预浸料固化过程中微波本身产生的促进作用大于压力产生的促进作用。

图 7 为 T800/环氧树脂基预浸料的标准固化工艺计算的理论固化度曲线。可知,微波固化比热固化提前大约 90 min 完成,在同样的工艺温度曲线下微波固化比热固化节约了 50% 的时间。微波固化比热固化更加高效节能。

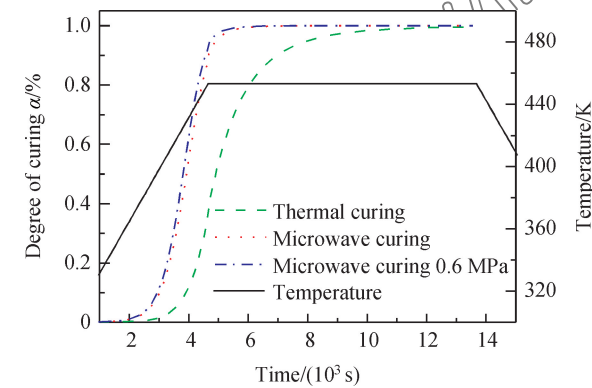


图 7 标准热固化工艺下 T800/环氧树脂预浸料微波固化与热固化的固化度

Fig. 7 Curing degree of microwave curing and thermal curing of T800/epoxy resin prepreg

## 4 结 论

(1) 基于非等温差示扫描量热(DSC)法设计了一种测试复合材料微波固化反应动力学的实验方法。并采用粒子群全局优化算法建立了碳纤维(T800)/环氧树脂复合材料的微波固化反应动力学方程并验证了该方程的准确性。

(2) 通过与传统热固化进行对比发现,微波固化明显提高了 T800/环氧树脂复合材料的固化反应速率并降低了反应活化能,大大缩短了固化反应周期。

(3) 选取标准热固化工艺压力为 0.6 MPa,结果表明,压力的存在对 T800/环氧树脂复合材料的固化反应进程有一定促进作用。

## 参考文献:

[1] 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 S Y. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12 (in Chinese).  
[2] 孟小苏, 张明, 安学峰, 等. 先进航空树脂基复合材料研究与应用进展[J]. 工程塑料应用, 2009, 37(10): 72-78.  
YI X S, ZHANG M, AN X F, et al. Development and application of advanced aeronautical polymer matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(10): 72-78 (in Chinese).  
[3] 初琳, 赵晓莉, 王丽娟. 树脂基复合材料固化技术发展现状[J]. 化工装备技术, 2013, 34(1): 43-48.  
CHU L, ZHAO X L, WANG L J. Current status of curing technology for polymer matrix composites[J]. Chemical Equipment Technology, 2013, 34(1): 43-48 (in Chinese).  
[4] THOSTENSON E T, CHOU T W. Microwave processing fundamentals and applications[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1999, 30(9): 1055-1071.  
[5] 徐学宏, 王小群, 闫超, 等. 环氧树脂及其复合材料微波固化研究进展[J]. 材料工程, 2016, 44(8): 111-120.

- XU X H, WANG X Q, YAN C, et al. Research progress on microwave curing of epoxy resin and its composites [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44 (8): 111-120 (in Chinese).
- [6] BOEY F Y C, YAP B H. Microwave curing of an epoxy-amine system: Effect of curing agent on the glass-transition temperature[J]. *Polymer Testing*, 2001, 20(8): 837-845.
- [7] WEI J H, HAWLEY M C, DELONG J D, et al. Comparison of microwave and thermal cure of epoxy resins[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1993, 33(17): 1132-1140.
- [8] 刘学清, 王源升. 微波固化环氧树脂(E44/DDM)的热性能及膨胀性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2004, 20(3): 111-113.
- LIU X Q, WANG Y S. Microwave cure of epoxy resin (E44/DDM) and study on properties of thermal and expansion[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2004, 20(3): 111-113 (in Chinese).
- [9] 陈明华, 姚武文, 王新坤, 等. 微波固化碳纤维/环氧树脂胶的研究[J]. *粘接*, 2005, 26(6): 13-15.
- CHEN M H, YAO W W, WANG X K, et al. Study on microwave curing of epoxy resin adhesive[J]. *Adhesion in China*, 2005, 26(6): 13-15 (in Chinese).
- [10] 王遵, 邢素丽, 曾竞成, 等. 热固性树脂固化反应动力学模型研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2007, 23(4): 11-14.
- WANG Z, XING S L, ZHENG J C, et al. Cure kinetic models of thermosetting resins and the state of the art[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2007, 23(4): 11-14 (in Chinese).
- [11] KAMAL M R, SOUROUR S. Kinetics and thermal characterization of thermoset cure [J]. *Polymer Engineering & Science*, 1973, 13(1): 59-64.
- [12] 张明, 安学峰, 唐邦铭, 等. 高性能双组份环氧树脂固化动力学研究和 TTT 图绘制[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(1): 17-25.
- ZHANG M, AN X F, TANG B M, et al. Curing kinetics and TTT-diagram of a bicomponent high performance epoxy resin for advanced composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(1): 17-25 (in Chinese).
- [13] HAYATY M, BEHESHTY M H, ESFANDEH M. Cure kinetics of scanning calorimetry[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 120(1): 62-69.
- [14] TRIPATHI G, SRIVASTAVA D. Cure kinetics of ternary blends of epoxy resins studied by nonisothermal DSC data [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 112(5): 3119-3126.
- [15] 曾秀妮, 段跃新. 840S 环氧树脂体系固化反应特性[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(3): 100-104.
- ZENG X N, DUAN Y X. Curing reaction characteristics of 840S epoxy resin [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(3): 100-104 (in Chinese).
- [16] 于佳, 张博明, 王殿富, 等. 典型双马来酞亚胺树脂固化动力学模型的研究[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(1): 78-83.
- YU J, ZHANG B M, WANG D F, et al. Study of cure kinetic model of typical bismaleimide[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(1): 78-83 (in Chinese).
- [17] 杨帆. 复合材料树脂固化过程的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- YANG F. Simulation on the cure process of resin in composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006 (in Chinese).
- [18] HUANG Y J, LU T J, HU W. Curing of unsaturated polymer resins: Effects of pressure[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1993, 33(1): 1-17.