

DOI:10.11918/202008011

RTM 用低黏度树脂体系的工艺窗口预测

高堂铃^{1,3},付 刚^{1,3},王先杰²,王 冠^{1,3},何影翠¹,匡 弘^{1,3}

(1. 黑龙江省科学院 石油化学研究院,哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学 物理学院,哈尔滨 150001;
3. 黑龙江省科学院 高技术研究院,哈尔滨 150020)

摘 要: 为有效预测低黏度环氧树脂体系 TQ-50 的流变黏度变化规律并确定其在树脂传递模塑(RTM)工艺中的适宜工艺窗口,本文采用差示扫描量热仪(DSC)、黏度计、流变仪和凝胶时间测试仪对 TQ-50 树脂体系的固化反应特性、静态黏度、动态黏度和凝胶时间等性能进行了系统的研究.在实验结果的基础上,利用双阿累尼乌斯方程(Arrhenius)建立该树脂体系的静态流变模型,该流变模型与实验结果具有良好的拟合一致性,能够准确地描述 TQ-50 环氧树脂在较低黏度范围内的化学流变行为.利用该流变模型建立温度、时间和黏度三维预测图谱和温度、时间等黏度曲线,并对工艺窗口进行预测,为工艺参数的优化提供科学依据.研究结果表明:TQ-50 低黏度环氧树脂体系的黏度低于 500 mPa·s 时,工艺窗口的温度可选范围为 50~70 ℃,保持时间约为 150~180 min,黏度低于 200 mPa·s 时,工艺窗口温度的可选范围为 55~70 ℃,保持时间约为 56~96 min,该树脂体系具有较宽的适宜注射温度范围和较长的注射时间,满足 RTM 工艺成型的基本要求.

关键词: 树脂传递模塑(RTM);环氧树脂;流变模型;工艺窗口;低黏度;复合材料

中图分类号: TU398+.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)02-0162-06

Prediction of processing windows for low viscosity epoxy resin system used in RTM

GAO Tangling^{1,3}, FU Gang^{1,3}, WANG Xianjie², WANG Guan^{1,3}, HE Yingcui¹, KUANG Hong^{1,3}

(1. Institute of Petrochemistry, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150040, China;

2. School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

3. Institute for Advanced Technology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150020, China)

Abstract: In order to efficiently predict the rheological viscosity of low viscosity epoxy resin TQ-50 and determine suitable processing window in resin transfer molding (RTM) process, the properties of TQ-50 resin system including curing reaction characteristics, static viscosity, dynamic viscosity, and gel time were systematically investigated by using differential scanning calorimetry (DSC), viscometer, rheometer, and gel time tester. Based on the experimental results, the static rheological model of TQ-50 was established by using Arrhenius equation. It was found that the rheological model was well consistent with the experimental results and could accurately describe the chemical rheological behavior of TQ-50 in low viscosity range. On the basis of the rheological model, three-dimensional prediction maps of temperature, time, and viscosity as well as viscosity curves of temperature and time were established, and the processing window was predicted, which provided guidance for the optimization of process parameters. Results show that when the viscosity was lower than 500 mPa·s, the optional processing window temperature was 50~70 ℃, and the holding time was about 150~180 min. When the viscosity was lower than 200 mPa·s, the optional range window temperature was 55~70 ℃, and the holding time was about 56~96 min. The resin system has a wider range of suitable injection temperature and longer injection time, which can meet the basic requirements of RTM processing.

Keywords: resin transfer molding (RTM); epoxy resin; rheological model; processing window; low viscosity; composite material

树脂传递模塑(RTM)成型工艺具有操作自由度大、制件尺寸控制精准以及设计制造成本低等优点,适合制造复杂几何形状及大尺寸的复合材料制件^[1],目前已经广泛应用于航空航天、汽车、船舶等

领域^[2-5].近年来,随着新型树脂和先进纤维预成型体的出现,RTM 复合材料部件已经在 F-22“猛禽”战斗机和 V-22 倾转旋翼机“鱼鹰”上得到了应用.其中,F-22战斗机中采用 RTM 成型的复合材料部件至少有 300 个以上.RTM 工艺还被成功应用于空客 A330/340 型宽体客机的垂尾翼盒连接耳片和水平尾翼的悬臂梁,该工艺在国内外先进复合材料制备领域具有良好的发展前景.

收稿日期:2020-08-04

基金项目:国家自然科学基金(51902091)

作者简介:高堂铃(1981—),女,副研究员;

王先杰(1979—),男,教授,博士生导师

通信作者:付 刚,fugang2000cn@163.com

树脂作为 RTM 成型工艺重要的材料之一,其特性直接决定着 RTM 制件的工艺,其中,树脂的化学流变特性(包括黏度特性和固化特性)是合理选择和优化工艺参数的重要依据^[6-7]. 为了确保树脂的浸润质量,树脂需要在注射温度下具有较低的黏度和足够长的注射工艺期,否则容易在制件表面形成气孔、干斑或富树脂等多种缺陷^[8-10]. 因此,适用于 RTM 的树脂黏度范围一般为 100 ~ 500 mPa · s,以 100 ~ 200 mPa · s 为佳^[11],但也有要求树脂在注射温度下黏度不超过 800 mPa · s^[3]. 除了树脂本身的固有黏度之外,调整树脂体系黏度的另一个途径是调整注射温度,该方法能够决定树脂的初始黏度和注射过程中黏度的变化速率. 因此,注射温度的选择和精确控制对制造合格制件也是至关重要的.

由于各种工艺参数的组合方式众多,使得 RTM 工艺的优化变得复杂. 采用流变模型对树脂的黏度流变特性进行理论预测,优化 RTM 的工艺条件,是一个有效的解决途径. 目前,常见的适用于反应型热固性树脂体系的化学流变模型有双阿累尼乌斯模型、凝胶模型和工程黏度模型等,其中双阿累尼乌斯模型是适用性最广的模型之一^[12-14].

本文以 RTM 工艺用低黏度环氧树脂 TQ-50 为研究对象,在实验上系统研究了其化学流变特性,在理论上采用双阿累尼乌斯方程建立了树脂体系的静态流变模型,为预测和优化该树脂体系的工艺窗口,提供了科学理论依据.

1 静态流变模型的建立

根据 Roller 模型^[15],热固性树脂的黏度受温度和固化度变化的协同作用,是化学反应和物理反应的累积效应. 树脂体系流变模型的建立依据为适用于热固性反应树脂体系的双阿累尼乌斯(Arrhenius)方程

$$\eta(t) = \eta_0 \exp(kt). \quad (1)$$

式中: η_0 为树脂的初始黏度, η 为树脂 t 时刻的黏度,单位为 mPa · s; k 为反应速率参数,单位为 min^{-1} ; t 为保温时间,单位为 min; η_0 和 k 同样遵循 Arrhenius 定律.

$$\eta_0 = \eta_{\infty} \exp\left(\frac{E_{\eta}}{RT}\right). \quad (2)$$

$$k = k_{\infty} \exp\left(\frac{E_k}{RT}\right). \quad (3)$$

式(2)中, η_{∞} 为 $T \rightarrow \infty$ 时的黏度,单位为 mPa · s; E_{η} 为黏度的活化能,单位为 kJ/mol. 式(3)中: k_{∞} 为 η_{∞} 的模拟量,单位为 min^{-1} ; E_k 为固化反应活化能,单位为 kJ/mol; T 为热力学温度,单位为 K; R 为理想

气体常数,单位为 8.314 J/(mol · K).

综合式(1)~(3),黏度模型的最终表达式为

$$\eta = \eta_{\infty} \times \exp\left(\frac{E_{\eta}}{RT}\right) \times \exp\left[tk_{\infty} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right)\right] \text{ 或}$$

$$\ln \eta = \ln \eta_{\infty} + \frac{E_{\eta}}{RT} + tk_{\infty} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right). \quad (4)$$

2 试验材料与方法

2.1 试验材料及制备工艺

制备低黏度环氧树脂 TQ-50 的原材料为:AG-80(多官能度环氧树脂),工业级;MY 0510(低黏度多官能度环氧树脂),工业级;DER 354(双酚 F 型环氧树脂),工业级;E51(双酚 A 型环氧树脂),工业级;固化剂:二乙基甲苯二胺(DETDA),化学纯;促进剂,自制. 按特定比例称量树脂,加热至 130 ~ 145 °C,高速搅拌约 40 ~ 60 min 至均相,将树脂体系降温至 40 ~ 45 °C,加入固化剂和促进剂,充分搅拌 20 ~ 30 min 至均相,得到低黏度环氧树脂 TQ-50.

2.2 试验方法

凝胶时间的测定使用 GT-II 型胶固化时间测定仪,取约 1 g 树脂放置于已预热的试样槽中. 开始计时,每隔一段时间用试样棒尖拉取少量树脂,观察树脂拉丝状态,记录树脂不能拉丝的时间. DSC 曲线测定使用美国 TA 公司 Q20 差示扫描量热仪,试样质量约为 5 mg,在氮气保护下进行升温,氮气流量为 50 mL/min,升温速率为 2、5、10、15 和 20 °C/min. 50、60 和 70 °C 下等温黏度曲线的测定依据 GB/T 2794—2013《胶黏剂黏度测定法》,使用美国博勒飞公司的 DV2TL 黏度计. 流变曲线的测试采用英国马尔文公司的 Gemini 200 流变仪,采用振荡模式,升温速率为 2 °C/min,频率为 1 Hz,平板直径为 25 mm,平板距离 300 μm.

3 结果与讨论

3.1 DSC 分析

选择 RTM 树脂时要综合考虑树脂黏度和适用期两个主要工艺参数^[16-17],采用 DSC 方法测定树脂在等速升温状态下的固化反应放热行为,进而确定该体系的成型温度和固化温度,本文分别采用 2、5、10、15 和 20 °C/min 的升温速率,测定树脂体系的 DSC 曲线,结果见图 1,曲线的特征值见表 1.

图 2 所示为温度与升温速率 β 的线性拟合,在不考虑升温速率影响的情况下,可以推断得到当 $\beta = 0$ °C/min 时, $T'_g = 78.6$ °C(凝胶温度), $T'_p = 142.3$ °C(固化温度), $T'_c = 223.0$ °C(后处理温度).

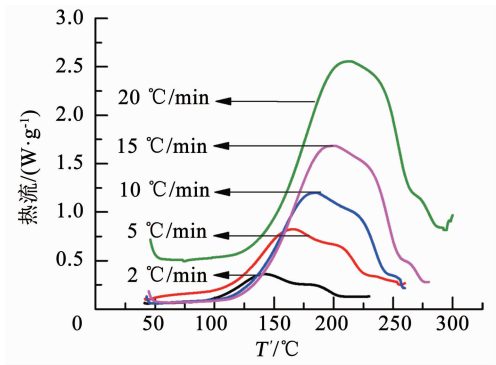


图 1 TQ-50 树脂在不同升温速率的 DSC 曲线
Fig. 1 DSC curves of TQ-50 resin at different heating rates

表 1 不同升温速率的 DSC 曲线特征值

Tab. 1 DSC data collected at different heating rates				
$\beta/$ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)	$T_i/$ $^{\circ}\text{C}$	$T_p/$ $^{\circ}\text{C}$	$T_e/$ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta H/$ ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$)
2	80.6	141.8	216.0	480.4
5	90.1	165.5	256.1	566.9
10	97.4	184.1	262.2	497.5
15	100.3	198.9	276.3	496.4
20	116.0	210.0	291.4	480.3

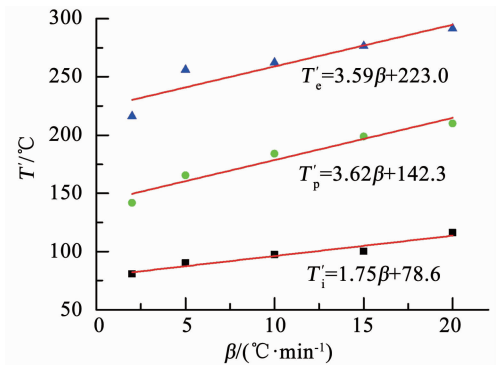


图 2 温度与升温速率的线性拟合

Fig. 2 Linear fitting of temperature and heating rates

3.2 凝胶时间分析

树脂在某温度下的反应过程中,随着反应程度的增加,交联成三维网状结构的高分子聚合物将由液态转变为不可逆的凝胶状态. 因此,在 RTM 工艺中,需要考虑树脂在注射温度下的凝胶时间. 图 3 所示为 TQ-50 树脂在不同温度下的凝胶时间.

根据 Flory 凝胶化理论^[18],热固化树脂在凝胶点时的化学转化程度是一定的,与反应温度和实验条件无关,凝胶时间长短与反应温度有关.

$$\ln t_{\text{gel}} = C + \frac{E}{RT}.$$

(5)

式中: T 为固化反应热力学温度,单位为 K ; R 为理想气体常数,单位为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; C 为指前因子; E 为研究温度范围内的活化能,单位为 J/mol .

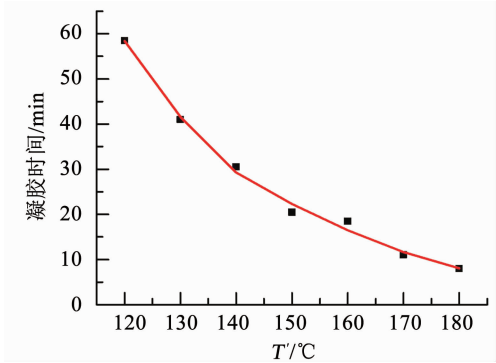


图 3 TQ-50 树脂在不同温度下的凝胶时间
Fig. 3 Gel time of TQ-50 resin at different temperatures

对 $\ln t_{\text{gel}}$ 和 T^{-1} 进行线性拟合(如图 4 所示),代入式(5),可以得到 $\ln t_{\text{gel}} = -10.61 + \frac{5\,728}{T}$,利用该式可以推算 TQ-50 树脂在其他温度下的凝胶时间,如:50 °C 的凝胶时间 $t_{\text{gel}} \approx 1\,234 \text{ min}$,60 °C 的凝胶时间 $t_{\text{gel}} \approx 725 \text{ min}$,70 °C 的凝胶时间 $t_{\text{gel}} \approx 439 \text{ min}$.

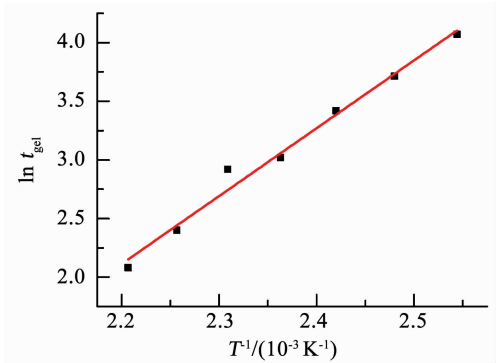


图 4 $\ln t_{\text{gel}}$ 和 T^{-1} 的线性拟合
Fig. 4 Linear fitting of $\ln t_{\text{gel}}$ and T^{-1}

3.3 流变行为分析

3.3.1 非等温黏度分析

图 5 所示为 TQ-50 树脂的非等温动态流变黏度曲线($\beta = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$),树脂在 23 °C 时,黏度约为 $3\,877 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,随着温度的升高,黏度呈现出逐渐下降的趋势,物理反应占主导. 当温度为 35.7 °C 时,黏度降低至约 $800 \text{ mPa}\cdot\text{s}$;在 41 ~ 150 °C 范围内,黏度始终小于 $500 \text{ mPa}\cdot\text{s}$;当温度继续升高时,化学反应逐渐占主导,黏度呈现出逐渐升高的趋势^[19]. 图 6 所示为 TQ-50 树脂的 DSC 曲线,从图中可以看出树脂的反应速率从 80 °C 附近开始增加,同时伴随着的反应放热量也快速增长.

3.3.2 等温黏度分析

树脂的注射温度直接影响着树脂的初始黏度、黏度和温度随时间变化的关系以及固化放热速率等参数. 为了确保在特定温度下树脂体系具有足够长的注射时间,结合图 6,选取 50 °C、60 °C 和 70 °C 3 个

温度点对树脂体系进行恒温黏度测试,见图 7. 研究发现树脂的初始黏度主要受温度影响,70 ℃ 时树脂的初始黏度最低,黏度随时间增长最快.

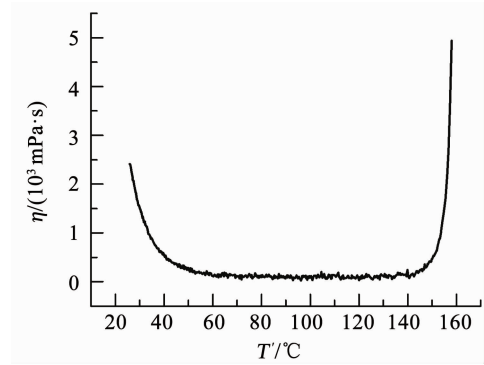


图 5 TQ-50 树脂的非等温动态流变曲线
Fig. 5 Non-isothermal viscosity curve of TQ-50 resin system

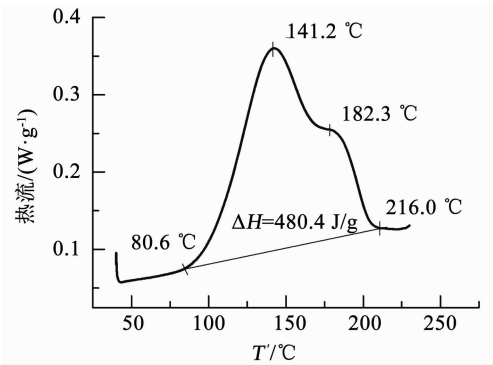


图 6 TQ-50 树脂的 DSC 曲线(β = 2 °C/min)
Fig. 6 DSC curve of TQ-50 resin(β = 2 °C/min)

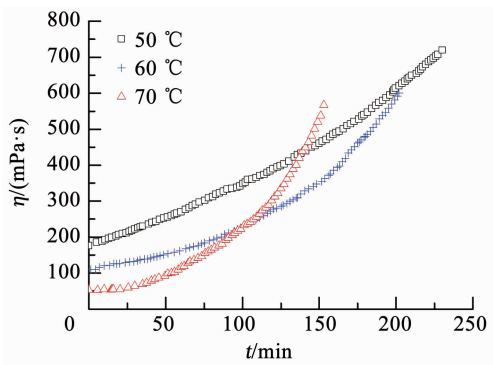


图 7 TQ-50 树脂在不同温度下的黏度-时间曲线
Fig. 7 Viscosity-time curves of TQ-50 resin at different temperatures

3.3.3 等温静态流变模型

依据双阿累尼乌斯公式(式(1)),对不同恒定温度下的 $\ln \eta$ 和时间 t 做线性拟合,如图 8 所示. 根据公式推导得到的 η_0 和 k 值,见表 2.

依据式(2),得到 $\ln \eta_0$ 和 T^{-1} 的拟合直线(如图 9 所示),即 $\ln \eta_0 = -21.133\,4 + \frac{8\,540.155\,2}{T}$, $\ln \eta_\infty$ 为 $-21.133\,4$,可以得到 $\eta_\infty = \exp(-21.133\,4) = 6.64 \times 10^{-10}$.

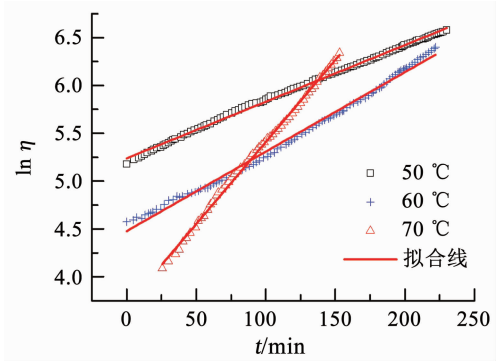


图 8 不同恒定温度下的 $\ln \eta$ 和时间 t 的线性拟合
Fig. 8 Linear fitting of $\ln \eta$ and t at different constant temperatures

表 2 不同恒定温度下的 η_0 和 k 值			
Tab. 2 Values of η_0 and k at different constant temperatures			
$T'/^\circ\text{C}$	T/K	k/min^{-1}	$\eta_0/(\text{mPa} \cdot \text{s})$
50	323.15	0.005 9	188.359 0
60	333.15	0.008 5	101.169 8
70	343.15	0.017 2	40.228 3

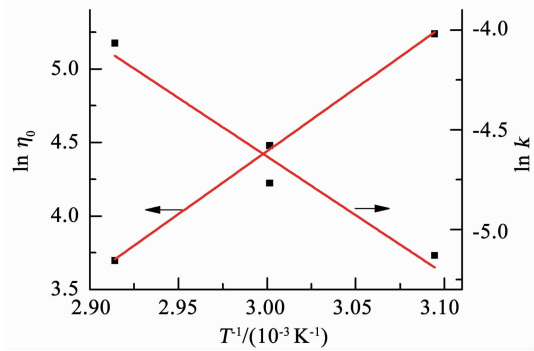


图 9 $\ln \eta_0, \ln k$ 对 T^{-1} 的线性拟合
Fig. 9 Linear fitting of $\ln \eta_0$ and $\ln k$ versus T^{-1}

同理,依据式(3),得到 $\ln k$ 和 T^{-1} 的拟合直线(如图 9 所示),即 $\ln k = 12.996\,4 - \frac{5\,876.777\,4}{T}$,

$\ln k_\infty = 12.996\,4, k_\infty = \exp(12.996\,4) = 4.41 \times 10^5$.

将上述求得的数值代入式(4),得到该低黏度环氧树脂体系 TQ-50 最终的静态流变模型公式为

$$\eta = 6.64 \times 10^{-10} \times \exp\left(\frac{8\,540.155\,2}{T}\right) \times \exp\left[4.41 \times 10^5 \times \exp\left(\frac{-5\,876.777\,4}{T}\right) \times t\right].$$

(6)

依据式(6),分别代入 50 ℃、60 ℃ 和 70 ℃ 的时间数据进行黏度曲线的拟合,拟合曲线和实际测试曲线对比见图 10. 从图中可以看到,流变模型的拟合值与试验值匹配度较好,因此可以使用式(6)的流变模型公式预测树脂体系在特定温度和特定时间范围内的黏度值.

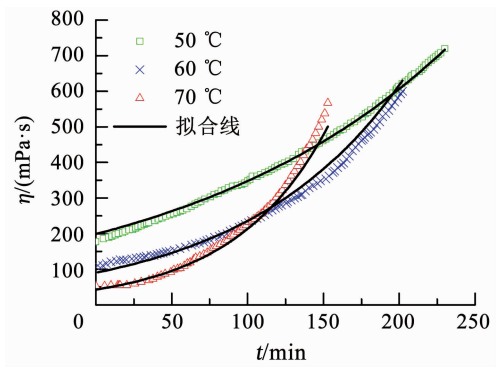


图 10 流变模型拟合曲线和实际黏度曲线对比

Fig. 10 Comparison of rheological fitting curves and experimental curves

3.3.4 工艺窗口预报

树脂黏度对树脂浸润复合材料预成型体所需时间的影响可通过如下 Darcy 定律^[20-21]描述

$$v = -\frac{K \nabla P}{\eta}.$$

(7)

式中: v 为树脂流动速度, K 为渗透率, ∇P 为压力降, η 为树脂黏度. 其中,流动速度与树脂黏度成反比关系,需要同时考虑树脂黏度、注射温度和注射工艺期 3 者之间的制约关系. 本文根据拟实施的注射温度范围内的流变模型(式(6)),做出黏度-时间-温度三维曲面图(如图 11 所示). 根据航空复合材料结构件对 RTM 工艺的要求,为了保证树脂对纤维材料的浸润性和制品的质量,要求树脂黏度最好低于 500 mPa·s^[22]. 采用三维曲面图可以更加便捷地预测符合该黏度要求的注射温度和注射时间范围^[23]. 从理论上来说,在图 11 中黏度低于 800 mPa·s 的曲面范围内,任何一个温度点都可以成为树脂的注射温度.

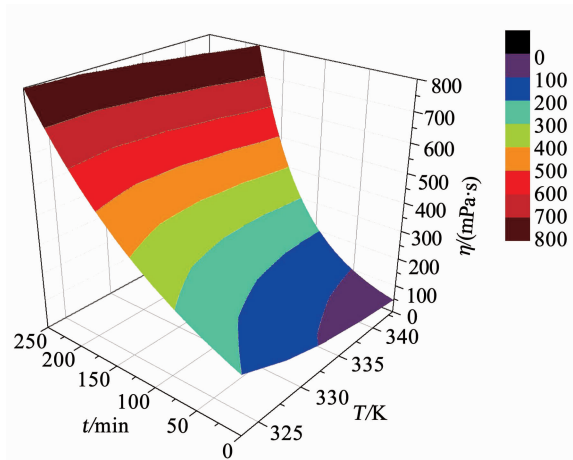


图 11 树脂体系温度-时间-黏度三维预测图谱

Fig. 11 Three-dimensional model of viscosity - temperature - time of resin system

为了更加直观地表明黏度、温度、时间 3 者之间的关系,对图 11 做了相应的等黏度曲线(如图 12 所

示),曲线上数值代表对应的黏度. 利用图 12 预测出 TQ-50 树脂的典型的工艺窗口参数见表 3,该树脂体系的可选注射温度范围为 50 ~ 70 °C,黏度 ≤ 500 mPa·s 时,注射工艺期为 150 ~ 180 min,黏度 ≤ 800 mPa·s 时,注射工艺期为 183 ~ 249 min. 当黏度 ≤ 200 mPa·s 时,工艺窗口温度的可选范围为 55 ~ 70 °C,注射工艺期约为 56 ~ 96 min.

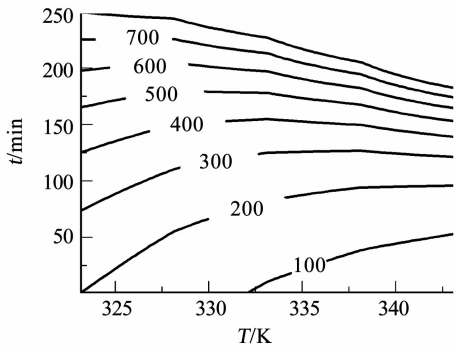


图 12 树脂体系温度-时间-等黏度曲线

Fig. 12 Temperature - time - viscosity curves of resin system

表 3 树脂 TQ-50 工艺窗口预测

$\eta / (\text{mPa} \cdot \text{s})$	不同温度下的低黏度平台时间/min				
	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	70 °C
≤800	249	243	227	206	183
≤500	166	180	178	168	153
≤400	126	150	155	150	139
≤300	74	110	125	126	121
≤200	1	56	83	94	96
≤100	—	—	11	38	53

4 结 论

- 1) 制备了适用于 RTM 工艺的低黏度环氧树脂体系 TQ-50,采用不同的升温速率,测定了树脂在等速升温状态下的固化反应放热行为,确定了该体系的成型温度和固化温度.
- 2) 结合 DSC、凝胶时间、等温黏度和非等温流变测试结果,依据双阿累尼乌斯定律建立了 TQ-50 树脂体系的静态流变模型,模型的分析结果与试验结果具有较好的匹配度,可以有效推测较低黏度范围内树脂的化学流变行为.
- 3) 利用模型建立了温度、时间和黏度三维预测图谱及平面等黏度曲线,可以对工艺窗口进行快速预测,为该树脂体系在实际的 RTM 工艺操作中提供有效的科学依据.

4) TQ-50 树脂的可选注射温度区间为 50 ~ 70 °C 之间,黏度低于 800 mPa·s 的注射工艺期约为 183 ~ 249 min,黏度低于 500 mPa·s 的注射工艺期约为 150 ~ 180 min,满足航空航天复合材料结构件 RTM 成型工艺的要求.

参考文献

- [1] 赵安安, 杨文凯, 于飞, 等. 大型高性能复合材料构件 RTM 工艺进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 39
ZHAO An'an, YANG Wenkai, YU Fei, et al. RTM process for large-scale and high-performance composite components[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 39. DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.01.004
- [2] 艾伦·哈伯. 树脂传递模塑技术[M]. 董雨达, 译. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003
HARPER A. Resin transfer moulding technology[M]. DONG Yuda, trans. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003
- [3] 克鲁肯巴赫, 佩顿. 航空航天复合材料结构件树脂传递模塑成型技术[M]. 李宏运, 译. 北京: 航空工业出版社, 2009
KRUCKENBERG T, PATON R. Resin transfer moulding for aerospace structures[M]. LI Hongyun, trans. Beijing: Aviation Industry Press, 2009
- [4] 益小苏, 张明, 安学锋, 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
YI Xiaosu, ZHANG Ming, AN Xuefeng, et al. Development and application of advanced aeronautical polymer matrix composites[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(10): 72. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3539.2009.10.019
- [5] 宋燕利, 杨龙, 郭巍, 等. 面向汽车轻量化应用的碳纤维复合材料关键技术[J]. 材料导报 A: 综述篇, 2016, 30(9): 16
SONG Yanli, YANG Long, GUO Wei, et al. A survey on key technologies for carbon fiber-reinforced plastics with applications to automobile lightening[J]. Materials Reports A: Review, 2016, 30(9): 16. DOI:10.11896/j.issn.1005-023X.2016.017.003
- [6] 李培旭, 陈萍, 苏佳智, 等. 复合材料先进液体成型技术的航空应用与最新发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(8): 99
LI Peixu, CHEN Ping, SU Jiazhì, et al. The recent development of advanced liquid composite molding technique and its application in aviation[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(8): 99. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2016.08.018
- [7] 徐竹. 复合材料液体成型工艺的发展及应用[J]. 合成材料老化与应用, 2016, 45(2): 83
XU Zhu. Development and application of composite liquid forming process[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2016, 45(2): 83. DOI: 10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2016.02.019
- [8] 朱怡臻, 王瑛, 陈鸣亮, 等. 先进树脂基复合材料 RTM 成型工艺研究及应用进展[J]. 塑料工业, 2020, 48(5): 18
ZHU Yizhen, WANG Ying, CHEN Mingliang, et al. Research progress and application of RTM for advanced resin matrix composite[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(5): 18. DOI:10.3969/j.issn.1005-5770.2020.05.002
- [9] 孟祥福, 陈美玉, 明璐. RTM 工艺参数对复合材料缺陷控制的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 123
MENG Xiangfu, CHEN Meiyu, MING Lu. Influence of RTM process parameters on defects of composites[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(20): 123. DOI:10.14158/j.cnki.1001-3814.2018.20.030
- [10] 李江洪, 郑亚萍, 张曦, 等. RTM 用环氧树脂体系的浸润性及化学流变特性研究[J]. 中国塑料, 2012, 26(1): 71
LI Jianghong, ZHENG Yaping, ZHANG Xi, et al. Study on infiltrating performance and chemo-rheological behavior of epoxy resin used for resin transfer molding[J]. China Plastic, 2012, 26(1): 71
- [11] 陈鹏群, 谢小林, 徐迪. 航空复合材料 RTM 工艺用环氧树脂的流变模型[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(8): 58
CHEN Pengqun, XIE Xiaolin, XU Di. Rheological model of epoxy resin for RTM process of aerospace composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(8): 58. DOI:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.08.011
- [12] GEISSBERGER R, MALDONADO J, BAHAMONDE N, et al. Rheological modelling of thermoset composite processing[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 124: 182. DOI:10.1016/j.compositesb.2017.05.040
- [13] KIUNA N, LAWRENCE C J, FONTANA Q P V, et al. A model for resin viscosity during cure in the resin transfer molding process[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2002, 33(11): 1497. DOI:10.1016/s.1359-835x(02)00177-x
- [14] ZHANG Dandan, WANG Rumin, FARHAN S, et al. Chemorheological behaviors of TDE-85 toughened by low viscosity liquid epoxy for RTM process[J]. Polymer Testing, 2018, 70: 310. DOI: 10.1016/j.polymeresting.2018.07.016
- [15] ROLLER M B. Characterization of the time-temperature-viscosity behavior of curing B-staged epoxy resin[J]. Polymer Engineering and Science, 1975, 15(6): 406. DOI:10.1002/pen.760150603
- [16] YANG Wenkai, LU Shihong, LIU Wenhao. Optimization method to select temperature based on chemorheological and exothermal reaction of RTM[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(46): 48245. DOI: 10.1002/app.48245
- [17] CAMPBELL F C. Manufacturing processes for advanced composites[M]. [S.l.]: Elsevier, 2004. DOI: 10.1016/b978-1-85617-415-2.x5000-x
- [18] 潘祖仁. 高分子化学[M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2011
PAN Zuren. Polymer chemistry[M]. 5th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011
- [19] 陈幸开. 树脂黏度变化对 RTM 成型工艺的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(9): 1312
CHEN Xing kai. Influence of the viscosity change of resin on the RTM process[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(9): 1312. DOI: 10.13374/j.issn2095-9389.2016.09.017
- [20] WANG M L, CHANG R Y, HSU C H. Molding simulation: theory and practice[M]. Munich: Hanser Publications, 2018:441. DOI: 10.3139/9781569906200
- [21] KIM J I, HWANG Y T, CHOI K H, et al. Prediction of the vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process considering the directional permeability of sheared woven fabric[J]. Composite Structures, 2019, 211: 236. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.12.043
- [22] KELLER A, DRANSFELD C, MASANIA K. Flow and heat transfer during compression resin transfer moulding of highly reactive epoxies[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 153: 167. DOI:10.1016/j.compositesb.2018.07.041
- [23] 亓淑源, 李波, 李刚, 等. RTM 快速成型环氧树脂时间-温度-转变图的构建及其碳纤维/环氧树脂复合材料评价[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1804
QI Shuyuan, LI Bo, LI Gang, et al. Establishment of time-temperature-transfer diagram of epoxy resin for rapid RTM process and evaluation of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1804. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20180925.002