

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.08.011

航空复合材料 RTM 工艺用环氧树脂的流变模型

陈鹏群, 谢小林, 徐迪

(南昌航空大学材料科学与工程学院, 南昌 330063)

摘要: 航空高纤维体含量复合材料树脂传递模塑成型 (RTM) 工艺要求树脂体系有较低的黏度, 因此分别采用双阿累尼乌斯黏度模型和联合工程黏度模型对所配制环氧树脂体系的黏度变化进行预测。结果表明, 联合工程黏度模型由于考虑了固化过程中温度变化的累积效应对树脂体系黏度的影响, 所以相对于双阿累尼乌斯黏度模型, 不管是反应初期还是后期更能准确预测所配制环氧树脂体系黏度的变化。通过联合工程黏度模型确定了该环氧树脂体系的最佳注射温度为 35~45℃, 该温度范围内树脂的初始黏度大于 80 mPa·s, 且树脂从配制到黏度增加到 200 mPa·s 的时间大于 29 min, 增加到 500 mPa·s 的时间大于 97 min, 满足航空高纤维体含量复合材料 RTM 工艺的充模要求。

关键词: 树脂传递模塑成型; 环氧树脂; 黏度; 流变模型

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)08-0058-05

Rheological Model of Epoxy Resin for RTM Process of Aerospace Composites

Chen Pengqun, Xie Xiaolin, Xu Di

(College of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The requirement of resin transfer molding (RTM) process for aviation composites with high fiber volume content is that the viscosity of resin system is lower, so the double Arrhenius viscosity models and the combined engineering viscosity models were used to predict the viscosity change of the epoxy resin system. The results show that the combined engineering viscosity model takes into account the cumulative effects of temperature change during resin system curing on the viscosity of the resin system, so compared with the double Arrhenius viscosity model, it is more accurate to predict the change of the viscosity of the epoxy resin system whether it is in the early or late reaction period. The best injection temperature of the epoxy resin system is 35–45℃. In this temperature range, the initial viscosity of the epoxy resin system is more than 80 mPa·s, and the time from the preparation to the increase of the viscosity to 200 mPa·s is greater than 29 min, and the time to increase the viscosity to 500 mPa·s is greater than 97 min, which meets the filling requirements of RTM process for high fiber volume content composites.

Keywords: resin transfer molding process; epoxy resin; viscosity; rheological model

树脂传递模塑成型 (RTM) 工艺具有成型制品表面质量好、尺寸精度高、能大批量生产以及环保等优点, 因此广泛用于航空航天、汽车、船舶、电子工业等领域^[1-3]。树脂黏度是 RTM 成型工艺中最主要的影响因素之一, 黏度过高或者过低都会导致成型制品产生大量的缺陷, 一般 RTM 成型工艺要求树脂黏度在 80~800 mPa·s 之间^[4], 对于航空高纤维体含量复合材料要求树脂黏度低于 500 mPa·s。因此对树脂体系黏度随时间和温度的变化规律进行

预测, 从而确定最佳工艺参数, 成为 RTM 工艺的一个重要研究方向。

RTM 工艺中树脂体系的黏度变化主要与温度和时间有关。目前对树脂黏度变化的研究主要是建立相应的树脂黏度模型, 包括理论模型、经验模型和半经验模型, 其中对于 RTM 工艺具有指导意义的流变模型主要是经验模型^[5], 包括双阿累尼乌斯黏度模型^[6-8]、工程黏度模型^[9]、Williams-Landel-Ferry (WLF) 方程^[10]以及联合工程黏度模型^[11]等。由于

通讯作者: 谢小林, 副教授, 博士, 主要研究方向为聚合物基复合材料 E-mail: xxl0810@sohu.com

收稿日期: 2018-05-15

引用格式: 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): 58–62, 74.

Chen Pengqun, Xie Xiaolin, Xu Di. Rheological model of epoxy resin for RTM process of aerospace composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(8): 58–62, 74.

树脂的黏度变化受多种因素影响,因此很难找到适合所有树脂体系的黏度模型,对于环氧树脂,目前使用最多且适用性最广的还是双阿累尼乌斯黏度模型。兰志峰等^[12]用双阿累尼乌斯黏度模型对海因树脂的黏度变化进行预测,结果表明,双阿累尼乌斯黏度模型能准确预测海因树脂的黏度变化。武佳男等^[13]分别用双阿累尼乌斯黏度模型、工程黏度模型及联合工程黏度模型对真空辅助成型工艺专用环氧树脂(2511-1A)的黏度变化进行预测,结果表明,联合工程黏度模型能更准确预测该树脂的黏度变化。

E-51 环氧树脂具有力学性能优异、耐腐蚀、能室温固化等优点^[14],但由于其室温黏度较大,限制了其在 RTM 工艺中的应用。笔者对所配制的 E-51 低黏度环氧树脂的黏度变化分别用双阿累尼乌斯黏度模型和联合工程黏度模型进行预测比较,确定哪种黏度模型更能准确预测树脂黏度变化,通过该黏度模型对树脂体系的低黏度窗口进行预测,确定 RTM 工艺中该树脂体系最佳的注射温度及注射时间,从而证明所配制的树脂体系对航空高纤维体积含量复合材料 RTM 工艺的有效性。

1 实验部分

1.1 主要原材料

环氧树脂: E-51, 福建省南平双龙化工有限公司;

三羟甲基丙烷三缩水甘油醚: VT636, 深圳市汇特化工有限公司;

聚醚胺: D230, 深圳市南山区大东复合材料厂。

1.2 主要仪器与设备

旋转黏度仪: NDJ-79A 型, 上海昌吉地质仪器有限公司;

超级恒温水浴锅: HH-501 型, 上海鹰迪仪器设备有限公司。

1.3 试样制备

将环氧树脂、稀释剂三羟甲基丙烷三缩水甘油醚和固化剂聚醚胺按质量比 1 : 0.162 : 0.33 均匀混合, 制得环氧树脂体系测试试样。

1.4 性能测试

通过超级恒温水浴锅控制树脂体系温度, 用旋转黏度仪测量加入固化剂后的树脂体系分别在 30, 40, 50, 55℃ 恒温条件下的黏度随时间的变化数据。

2 结果与讨论

2.1 恒温黏度变化

图 1 为环氧树脂体系在 30, 40, 50, 55℃ 恒温条

件下其黏度随时间变化的曲线。从图 1 可以看出, 恒温条件下, 环氧树脂的黏度随时间的延长呈指数形式增加, 即反应初期环氧树脂的黏度变化比较平缓, 反应后期环氧树脂的黏度迅速增加。另外温度越高, 环氧树脂体系的初始低黏度越低, 同时温度越高, 环氧树脂的固化反应速率也越快, 即环氧树脂体系低黏度平台保持时间变短。

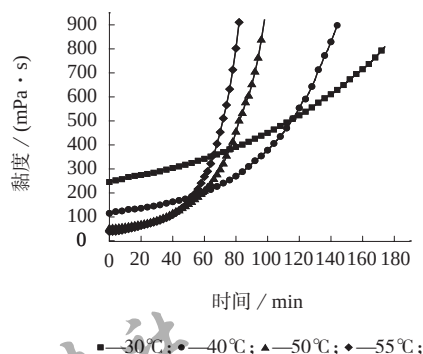


图 1 恒温条件下环氧树脂体系黏度随时间变化的曲线

2.2 双阿累尼乌斯黏度模型

双阿累尼乌斯黏度模型是适用性最广的黏度模型。假设树脂黏度变化符合阿累尼乌斯方程, 对此, Roller^[15]提出了四个参数(分别为 η_∞ , E_η , K_∞ , E_k)的模型即黏度与时间和温度的关系, 该方程表示为:

$$\ln \eta = \ln \eta_\infty + \frac{E_\eta}{RT} + K_\infty t \exp\left(\frac{E_k}{RT}\right) \quad (1)$$

式中: η ——树脂的黏度;

η_∞ ——温度无穷大时树脂的黏度;

E_η ——黏流活化能;

R ——理想气体常数;

T ——反应温度;

K_∞ ——指前因子;

t ——反应时间;

E_k ——树脂的固化活化能。

为了简化模型并得到模型参数, 将式 (1) 进行化简得:

$$\eta = \eta_\infty \exp\left(\frac{E_\eta}{RT}\right) \exp[K_\infty t \exp\left(\frac{E_k}{RT}\right)] \quad (2)$$

$$\eta_t = \frac{\eta}{\eta_0} = a \exp(bt) \quad (3)$$

其中:

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

$$b = K_\infty \exp\left(\frac{E_k}{RT}\right)$$

式中: η_r ——相对黏度;

η_0 ——树脂体系的初始反应黏度;

a, b ——模型参数。

η_0 遵循阿累尼乌斯方程,所以可以表示为:

$$\eta_0 = m \exp\left(\frac{n}{T}\right) \quad (4)$$

式中: m, n ——与温度无关的常数。

对式(4)两边取对数可得:

$$\ln \eta_0 = \ln m + \frac{n}{T} \quad (5)$$

不同温度下环氧树脂体系初始黏度测试数据列于表1。

表1 环氧树脂体系初始反应黏度的测试数据

项目	时间/min			
	30	40	50	55
$\eta_0 / (\text{mPa} \cdot \text{s})$	245.0	115.0	51.5	38.4

根据式(5)和表1中的数据对 $\ln \eta_0$ 与 $1/T$ 进行线性拟合,线性拟合曲线如图2所示。

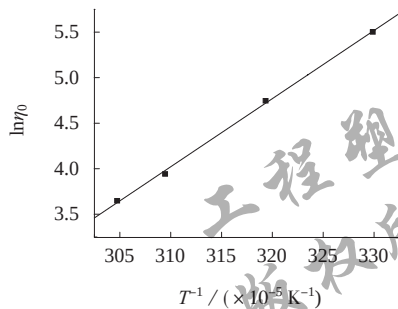


图2 $\ln \eta_0$ 与 $1/T$ 的线性拟合曲线

从图2可以看出, $\ln \eta_0$ 与 $1/T$ 线性关系较好,由拟合结果得到环氧树脂体系初始反应黏度随温度变化的方程如式(6)所示:

$$\ln \eta_0 = -19.1798 + (7484.20 / T) \quad (6)$$

经变换后可得任何温度下所配制环氧树脂体系的初始反应黏度方程如式(7)所示:

$$\eta_0 = 4.68 \times 10^{-9} \exp(7484.20 / T) \quad (7)$$

根据式(3)对 30, 40, 50, 55℃ 恒温条件下环氧树脂体系的黏度曲线进行非线性最小方差拟合,得到不同温度下的拟合模型参数 a 和 b 列于表2。

表2 环氧树脂体系双阿累尼乌斯黏度模型参数拟合结果

温度/℃	a	b
30	0.95094	0.00692
40	0.62021	0.01724
50	0.44599	0.03733
55	0.35831	0.05049

由于参数 a, b 均遵循阿累尼乌斯方程,所以这里分别对 $\ln a$ 与 $1/T$ 和 $\ln b$ 与 $1/T$ 进行线性拟合,拟合曲线如图3所示。

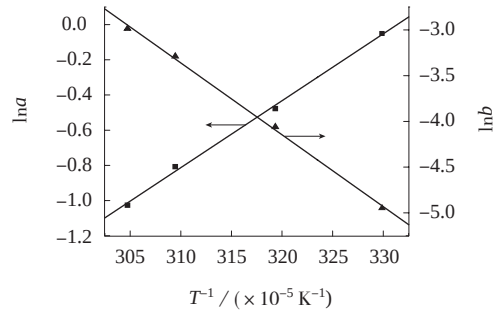


图3 $\ln a$ 与 $1/T$ 和 $\ln b$ 与 $1/T$ 的线性拟合曲线

从图3可以发现, $\ln a, \ln b$ 与 $1/T$ 的线性关系均良好,因此可求出任何温度下模型参数 a, b 的方程,如式(8)、式(9)所示:

$$\ln a = (3805.032 / T) - 12.6086 \quad (8)$$

$$\ln b = (-7856.47 / T) + 20.9946 \quad (9)$$

对式(8)和式(9)进行变换同式(7)一同带入式(3)中,可求出双阿累尼乌斯黏度方程,即任何温度下环氧树脂体系黏度随时间变化的方程,如式(10)所示:

$$\eta = 1.5646 \times 10^{-14} \exp[(11289.2318 / T) + 1.3117 \times 10^9 \exp(-7856.47 / T)t] \quad (10)$$

图4为在 30, 40, 50, 55℃ 下通过式(10)得到的环氧树脂体系的黏度曲线和实验数据对比结果。

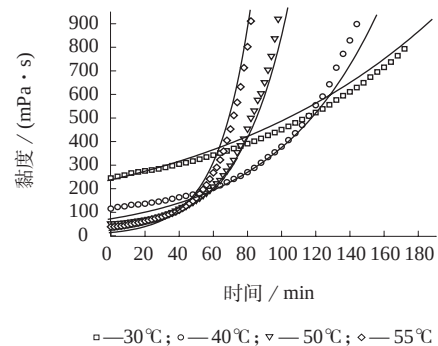


图4 环氧树脂体系双阿累尼乌斯黏度模型预测曲线与实验数据对比结果

从图4可以看出,预测曲线整体上符合环氧树脂体系黏度的变化规律,但在反应初期以及较低温度时预测曲线与实验数据存在较大偏差。这是由于双阿累尼乌斯黏度模型只考虑了化学变化对树脂黏度的影响,忽略了固化过程中的温度累积效应对树脂黏度产生的影响,导致初始阶段预测结果误差较大。

2.3 联合工程黏度模型

联合工程黏度模型^[4]假设树脂的黏度变化是由化学变化和物理累积效应共同决定的,即:

$$\eta = \eta_p + \eta_c = \eta_{p0} \exp(k_2 t) + \eta_{c0} \exp(k_4 t) \quad (11)$$

$$\eta_r = \eta / \eta_0 = k_1 \exp(k_2 t) + k_3 \exp(k_4 t) \quad (12)$$

式中: η_p, η_c ——分别为物理累积效应和化学变化引起的黏度变化;

k_1, k_2, k_3, k_4 ——模型参数,均遵循阿累尼乌斯定律;

η_{p0}, η_{c0} ——分别为物理累积效应和化学变化的初始黏度。

由于 $\eta_{p0} + \eta_{c0} = \eta_0$, $k_1 = \eta_{p0} / \eta_0$, $k_3 = \eta_{c0} / \eta_0$, 所以 $k_1 + k_3 = 1$ 。

通过式 (12) 对环氧树脂体系在 30, 40, 50, 55℃ 下的黏度数据进行非线性最小方差拟合, 拟合结果列于表 3。

表 3 环氧树脂体系联合工程黏度模型参数拟合结果

温度 / °C	k_1	k_2	k_3	k_4
30	0.897 68	0.004 58	0.094 38	0.015 27
40	0.801 34	0.003 08	0.187 80	0.024 91
50	0.714 60	0.002 10	0.270 19	0.041 96
55	0.675 82	0.001 75	0.308 01	0.052 53

由表 3 可以看出, $k_1 + k_3 \approx 1$, 符合前面的假设, 所以这里只需对 $\ln k_1$ 与 $1/T$, $\ln k_2$ 与 $1/T$ 和 $\ln k_4$ 与 $1/T$ 进行线性拟合, 拟合结果如图 5 和图 6 所示。

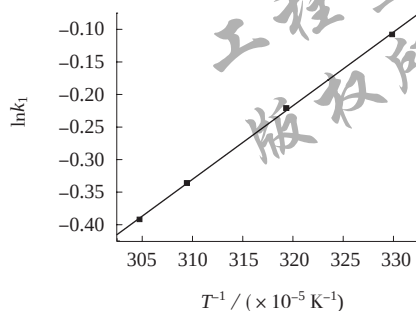


图 5 $\ln k_1$ 与 $1/T$ 的线性拟合曲线

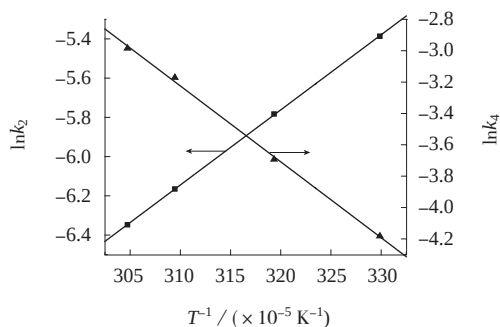


图 6 $\ln k_2$ 与 $1/T$ 和 $\ln k_4$ 与 $1/T$ 的线性拟合曲线

从图 5、图 6 可以看出, $\ln k_1, \ln k_2$ 和 $\ln k_4$ 与 $1/T$ 的线性关系均较好, 从而得到联合工程黏度模型参数的线性拟合方程为:

$$\ln k_1 = -3.836 + 1130.904 / T \quad (13)$$

$$\ln k_2 = -18.021 + 3830.941 / T \quad (14)$$

$$\ln k_4 = 11.777 - 4839.250 / T \quad (15)$$

将以上线性拟合方程经进行变换后得到任何温度下的模型参数方程, 将得到的 $k_1, k_2, k_3 = 1 - k_1$ 和 k_4 同式 (7) 一同带入式 (12) 中, 可得环氧树脂体系联合工程黏度模型为:

$$\begin{aligned} \eta = & 1.010 \times 10^{-10} \exp[(8615.104 / T) + \\ & 1.492 \times 10^{-8} \exp(3830.941 / T) t] + \\ & 4.680 \times 10^{-9} \exp[(7484.2 / T) + \\ & 1.302 \times 10^5 \exp(-4839.25 / T) t] - \\ & 1.010 \times 10^{-10} \exp[8615.104 / T + \\ & 1.302 \times 10^5 \exp(-4839.25 / T) t] \end{aligned} \quad (16)$$

图 7 为环氧树脂体系联合工程黏度模型预测曲线与实验数据对比结果。

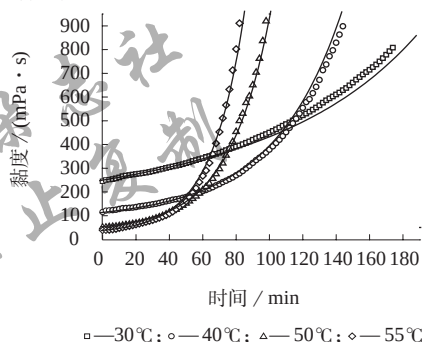


图 7 环氧树脂体系联合工程黏度模型预测曲线与实验数据对比结果

由图 7 可以看出, 相对于图 4 的双阿累尼乌斯黏度模型预测结果, 图 7 的联合工程黏度模型在较高温度 50℃ 和 55℃ 的整个反应阶段的预测曲线与实验数据的吻合度都较高, 在 30℃ 和 35℃ 且反应时间低于 80 min 时的预测曲线与实验数据的吻合程度也都比图 4 的双阿累尼乌斯黏度模型预测曲线的吻合程度高。在 30℃ 和 35℃ 反应后期预测曲线与实验数据稍有误差, 可能是因为在相对较低温度时固化反应放热比较缓慢, 减弱了由温度累积效应引起的黏度降低, 使模型预测结果与实验数据之间存在一定的误差, 但该误差仍比双阿累尼乌斯黏度模型预测结果的误差低。因此相对来说, 联合工程黏度模型比双阿累尼乌斯黏度模型更能准确预测所配制环氧树脂体系的黏度变化。

2.4 环氧树脂体系低黏度保持时间预测

根据所建立的联合工程黏度模型可以对环氧树脂体系在任何温度下的黏度变化进行预测, 基于式 (16) 可以得到环氧树脂体系在不同温度下的黏度保持时间, 结果列于表 4。由表 4 可知, 环氧树

脂体系的最佳注射温度为 35 ~ 45 ℃,在该温度范围内环氧树脂体系的初始黏度大于 80 mPa · s,且树脂从配制到黏度增加到 200 mPa · s 的时间大于 29 min,增加到 500 mPa · s 的时间大于 97 min。低于该温度范围时树脂的初始黏度整体偏高,高于该温度范围时树脂的初始黏度太低,低于 80 mPa · s,这都会影响成型过程中树脂对纤维的浸润。所以对于 RTM 成型航空高纤维体积含量复合材料,所配制的环氧树脂体系的最佳注射温度为 35 ~ 45 ℃,在该温度范围内树脂的注射时间能达到 97 min。

表 4 不同温度下环氧树脂体系的黏度 - 时间预测结果

黏度 / (mPa · s)	时间 / min						
	25℃	30℃	35℃	40℃	45℃	50℃	55℃
600	94	146	139	121	104	88	75
500	61	122	127	112	97	83	72
400	12	86	107	100	89	77	67
300	-	37	81	85	78	69	61
200	-	-	29	58	61	58	52
80	-	-	-	-	-	26	32

3 结论

针对 RTM 工艺航空高纤维体积含量复合材料需要树脂体系有较低的黏度并保持一定的时间,研究了所配制环氧树脂体系的流变性能,结果表明:

(1) 联合工程黏度模型由于同时考虑了化学反应和温度累积效应对环氧树脂体系黏度的影响,所以相对于双阿累尼乌斯黏度模型,联合工程黏度模型更能准确预测环氧树脂体系的实际黏度变化。

(2) 通过联合工程黏度模型对环氧树脂体系不同温度下的黏度时间窗口进行预测,结果表明,所配制环氧树脂体系的最佳注射温度为 35 ~ 45 ℃,在该温度范围内环氧树脂体系的初始黏度大于 80 mPa · s,且树脂黏度从开始配制到增加到 200 mPa · s 的时间大于 29 min,增加到 500 mPa · s 的时间大于 97 min,说明所配制的树脂体系能满足高纤维体积含量复合材料 RTM 工艺的充模要求。

参考文献

- [1] 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):83-86.
Xu Zhu. Development and application of composite liquid forming process[J]. Synthetic Materials Aging & Application, 2016, 45(2):83-86.
- [2] 朱秀迪, 王力杰, 孙超明, 等. RTM 用环氧树脂流变性能与固化性能分析[J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2017, 34(8):97-101.
Zhu Xiudi, Wang Lijie, Sun Chaoming, et al. Research on rheological properties and curing performance of epoxy resin by RTM[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2017, 34 (8):97-101.
- [3] Pupin C, Ross A, Dubois C, et al. Formation and suppression of

volatile-induced porosities in an RTM epoxy resin[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2016, 94:146-157.

- [4] 樊虎, 杜瑞奎, 王智, 等. RTM 工艺室温可固化环氧树脂体系性能研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(4):35-38.
Fan Hu, Du Ruikui, Wang Zhi, et al. Study on properties of room temperature-curable epoxy resins[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(4):35-38.
- [5] 杨金水. 厚截面碳纤维复合材料 VIMP 工艺制备与性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
Yang Jinshui. Study on VIMP manufacturing and performance for thick-section carbon fiber composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [6] 谈娟娟, 杨凯, 胡良全. PSN / AP 混合树脂体系的固化特性与流变特性[J]. 功能材料, 2014, 45(15):15 118-15 123.
Tan Juanjuan, Yang Kai, Hu Liangquan. Curing and rheological behaviors of PSN / AP resin blends[J]. Journal of Functional Materials, 2014, 45(15):15 118-15 123.
- [7] 孙付宇, 李慧, 张彦飞, 等. 风电叶片 VIMP 用环氧树脂体系流变性能研究[J]. 工程塑料应用, 2011, 39(7):56-59.
Sun Fuyu, Li Hui, Zhang Yanfei, et al. Study on rheological behavior of epoxy system for vimp wind blades[J]. Engineering Plastics Application, 2011, 39(7):56-59.
- [8] 吴海, 肖加余, 邢素丽, 等. 耐高温缩水甘油胺型环氧树脂的化学流变特性[J]. 复合材料学报, 2016, 33(4):741-748.
Wu Hai, Xiao Jiayu, Xing Suli, et al. Chemorheological characteristics of high-temperature resistant glycidylamine epoxy[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(4):741-748.
- [9] Zhou Zhou, Jiang Bingyan, Chen Xingkai, et al. Rheological behavior and process prediction of low viscosity epoxy resin for RTM[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2014, 29(5):1 078-1 082.
- [10] Kiuna N, Lawrence C J, Fontana Q P V, et al. A model for resin viscosity during cure in the resin transfer moulding process[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2002, 33(11):1 497-1 503.
- [11] Yang Jinshui, Xiao Jiayu, Zeng Jingcheng, et al. An empirical model for resin viscosity during Cure in vacuum infusion molding process[J]. Applied Composite Materials, 2012, 19(3-4):573-582.
- [12] 兰志峰, 赵斌, 王明丽. 海因树脂体系化学流变特性研究[J]. 材料开发与应用, 2014, 29(1):66-70.
Lan Zhifeng, Zhao Bin, Wang Mingli. Rheological behavior of a hydantoin epoxy resin system[J]. Development & Application of Materials, 2014, 29(1):66-70.
- [13] 武佳男, 倪爱清, 张盛, 等. 真空辅助成型工艺环氧树脂体系化学流变特性研究[J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2016, 33(11):32-38.
Wu Jianan, Ni Aiqing, Zhang Sheng, et al. Study on rheological properties of expoxy in VARI process[J]. Fiber Reinforced Plastics /

(下转第 74 页)

(2) 基于 FDM 工艺,采用恒温室加热方式打印的水平向试件和侧向试件的拉伸强度与断裂伸长率相比于底板加热有一定程度改善;但两种加热方式对竖向试件拉伸强度与断裂伸长率的影响较大,采用恒温室加热方式打印的竖向试件的拉伸强度和断裂伸长率相比于底板加热,增幅达到 60.5% 和 66.7%。

(3) 对于竖向高度较大的试件,采用恒温室加热方式可以明显提高试件的拉伸强度和断裂伸长率。

参考文献

- [1] 高士友,黎宇航,周野飞,等. 熔融沉积 (FDM) 3D 打印成形件的力学性能实验研究 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24(1):200-206.
Gao Shiyu, Li Yuhang, Zhou Yefei, et al. Mechanical properties experiment of 3D printing forming specimens with fused deposition modeling (FDM)[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24(1):200-206.
- [2] 王雪莹. 3D 打印技术与产业的发展及前景分析 [J]. 中国高新技术企业, 2012(9):3-5.
Wang Xueying. The development and prospect analysis of 3D printing technology and industry[J]. China High Technology Enterprises, 2012(9):3-5.
- [3] 卢秉恒,李涤尘. 增材制造 (3D 打印) 技术发展 [J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4):1-4.
Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the additive manufacturing (3d printing) technology[J]. Mechanical Building and Automation, 2013, 42(4):1-4.
- [4] 李涤尘,田小永,王永信,等. 增材制造技术的发展 [J]. 电加工与模具, 2012(S1):20-22.
Li Dichen, Tian Xiaoyong, Wang Yongxin, et al. Developments of additive manufacturing technology[J]. Electromachining & Mould, 2012(S1):20-22.
- [5] 程巧军. 基于 FDM 技术金属零件翘曲变形问题分析与优化 [J]. 世界有色金属. 2017(9):88,90.
Cheng Qiaojun. Analysis and optimization of warpage of metal parts based on FDM Technology[J]. World Nonferrous Metal, 2017(9):88,90.
- [6] 张辉,张志永,潘爱琼. 基于 FDM 的 3D 打印 PLA 层间黏结机制及质量分析 [J]. 先进制造技术, 2017, 34(3):43-46.
Zhang Hui, Zhang Zhiyong, Pan Aiqiong. Adhesion mechanism and quality analysis among PLA of 3D printing based on FDM[J]. Group Technology & Production Modernization, 2017, 34(3):43-46.
- [7] 刘新宇,张乔石,赵凌峰,等. 3D 打印精度影响及翘曲成因的分析与优化 [J]. 科技创业月刊, 2016(11):114-115, 118.
Liu Xinyu, Zhang Qiaoshi, Zhao Lingfeng, et al. Analysis and optimization of the influence of 3D printing accuracy and causes of warpage[J]. Pioneering with Science & Technology Monthly, 2016, (11):114-115, 118.
- [8] Bayraktar Ö, Uzun G, Çakiroğlu R, et al. Experimental study on the 3D-printed plastic parts and predicting the mechanical properties using artificial neural networks[J]. Polymers Advanced Technologies, 2017, 28:1 044-1 051.
- [9] 曹师增,宋发成,刘元义,等. 基于 FDM 的 3D 打印翘曲变形优化研究 [J]. 塑料工业, 2017, 45(10):51-54.
Cao Shizeng, Song Facheng, Liu Yuanyi, et al. Research on optimization of warpage deformation of 3D printing based on FDM[J]. China Plastics Industry, 2017, 45(10):51-54.
- [10] 张捷,顾海,李彬,等. FDM 工艺零件翘曲变形分析及实验研究 [J]. 制造业自动化, 2017, 39(8):52-54.
Zhang Jie, Gu Hai, Li Bin, et al. The analysis and experimental research for warp deformation in FDM process[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(8):52-54.
- [11] 信丽华,徐滕岗. 应用 DOE 方法分析和优化 3D 打印零件的翘曲变形量 [J]. 东华大学学报:自然科学版, 2017, 43(4):579-584.
Xin Lihua, Xu Tenggang. Analysis and optimization of the warpage deformation of three dimensional printing parts by DOE method[J]. Journal of Donghua University:Natural Science Edition, 2017, 43(4):579-584.
- [12] Galeta T, Raos P, Stojić J, et al. Influence of structure on mechanical properties of 3D printed objects[J]. Procedia Engineering, 2016, 149:100-104.
- [13] 张泽磊,张伟,傅骏,等. 基础参数对 FDM 工艺过程的影响 [J]. 现代制造技术与装备, 2017(7):80-82.
Zhang Zelei, Zhang Wei, Fu Jun, et al. Influence of basic parameter on FDM process[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017(7):80-82.
- [14] 文成,徐少华,安芬菊,等. FDM 三维成型样品缺陷的工艺分析与研究工艺与检测 [J]. 制造技术与机床, 2017(5):116-120.
Wen Cheng, Xu Shaohua, An Fenju, et al. Process analysis and research on defects of the samples in FDM 3D molding[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(5):116-120.
- [15] 胡碧康,周丽红. FDM 3D 打印件缺陷产生原因及处理方法的研究 [J]. 理论探究, 2017(6):37-38.
Hu Bikang, Zhou Lihong. Study on the causes and treatments of defects in FDM 3D printed parts[J]. Theoretical Research, 2017(6):37-38.
- [16] 徐淑权,蔡建,秦旭峰,等. 液晶环氧树脂改性 E-51 树脂体系流变特性研究 [J]. 热固性树脂, 2015, 30(2):1-6.
Xu Shuquan, Cai Jian, Qin Xufeng, et al. Study on the rheological properties of liquid-crystalline epoxy resin modified E-51 resin system[J]. Thermosetting Resin, 2015, 30(2):1-6.
- [17] Roller M B. Characterization of the time-temperature-viscosity behavior of curing B-staged epoxy resin[J]. Polymer Engineering & Science, 2010, 15(6):406-414.

(上接第 62 页)