

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2023.06.008

Elum 热塑性树脂固化温度场分布研究

韩 宁¹, 赵 聪², 安鲁陵², 张 伟¹, 樊龙欣¹

(1. 常州大学 机械与轨道交通学院, 江苏 常州 213164; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为了准确地预测 Elum 树脂的放热性能, 基于瞬态非线性热传导方程的树脂固化模型, 利用 Abaqus 仿真软件, 建立了 Elum 树脂固化有限元模型, 并对不同厚度 Elum 树脂的固化过程进行模拟和实验验证。结果表明固化温度的模拟计算结果与实验结果一致, 固化峰值温度随着树脂厚度的增加呈现非线性增加趋势, 当固化峰值温度接近 100 °C 时, 树脂中产生气泡, 为优化 Elum 复合材料成形工艺提供了理论依据。

关键词: 热塑性树脂; 真空辅助注入成型 (VARTM); 热化学模型; 温度场

中图分类号: V 258

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2023)06-0058-07

Research of curing temperature field distribution on Elum thermoplastic resin

HAN Ning¹, ZHAO Cong², AN Luling², ZHANG Wei¹, FAN Longxin¹

(1. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, the curing process of Elum resin of various thicknesses was simulated and experimentally verified using Abaqus simulation software. This was done in order to accurately predict the exothermic behavior of Elum resin. A finite element model of Elum resin curing was developed based on the transient non-linear heat transfer equation of the resin curing model. The findings demonstrate that the simulation results for the curing temperature agree with the experimental findings, and the peak curing temperature exhibits a non-linear increasing trend as resin thickness increases. When the peak curing temperature approaches 100 °C, resin bubbles are produced, providing a theoretical foundation for optimising the Elum composite curing process.

Key words: thermoplastic resin; vacuum assisted resin transfer molding (VARTM); thermochemical modeling; temperature field

收稿日期: 2023-04-19。

基金项目: 韩宁(1987—), 女, 山西宁武人, 博士, 讲师。E-mail: hanning@cczu.edu.cn

引用本文: 韩宁, 赵聪, 安鲁陵, 等. Elum 热塑性树脂固化温度场分布研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2023, 35(6): 58-64.

纤维增强热塑性复合材料 (Fiber reinforced thermoplastic composites, FRTPC) 以其显著的材料性能优势, 如可回收和重复使用、高拉伸强度和模量、优异的韧性、抗冲击和可焊接性等, 在航空航天、汽车、新能源等领域得到了广泛应用。与热固性复合材料相比, 热塑性复合材料的固化速度相对较快。一般来说, 熔融工艺被用于制造 FRTPC 构件, 其过程包括热塑性树脂熔化、成形和固化。这种工艺的主要缺点是需要较高的加工温度和压力, 并且因为热塑性树脂的黏度相对较高, 限制了 FRTPC 零件的制造尺寸和厚度^[1]。FRTPC 零件熔融制造方法可通过单体或低聚热塑性树脂的原位聚合工艺替代。其中反应性热塑性树脂有热塑性聚氨酯 (TPU)、聚酰胺 (PA)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)、聚对苯二甲酸丁二醇酯 (PBT) 和聚碳酸酯 (PC) 等^[1]。此外, 还有近年来研发的 Elum 树脂, 主要由 2-丙烯酸、2-甲基甲酯、甲基丙烯酸甲酯单体 (MMA) 和丙烯酸共聚物组成, 其中 MMA 通过自由基聚合形成聚合物 PMMA^[2-3]。Elum 树脂的研发为环保复合材料的生产提供了新的来源。这种树脂不仅可回收和可重复使用, 还具有固化时间短、固化成本低、制造效益高等特性^[4-8]。在固化过程中, 既不需要加热, 也不需要长时间固化, 通常情况下固化时间为 5~60 min^[9]。

Elum 复合材料是一种高性能, 制造成本低新型材料, 被应用于风电、汽车、轮船、航天等领域, 国内外一些学者对这种材料的基本性能进行了研究^[10-12]。BARBOSA 等^[13]对 Elum 复合材料和热固性复合材料吸水后的力学性能做了对比, 将它们分别放入相同条件下的蒸馏水中浸泡, 对比这两种材料在浸泡前后的拉伸强度和平面剪切强度及变化。CHILALI 等^[14]对 Elum 复合材料在水中的老化性能做了研究, 并与热固性复合材料的老化性能进行对比, 实验结果表明在自来水中浸泡 30 d 后的两种材料的力学性能相近。BHUDOLIA 等^[15]研究了 Elum 树脂焊接特性, 研究结果表明, 超声焊接复合材料接头的剪切强度比胶接接头高 23%, 超声焊接接头的最佳焊接时间为 1.5 s 远远小于 10 min 的胶接连接时间, 此外还研究了采用树脂传递模塑 (RTM) 技术制造的集成能量控制器 (ED) 聚合物基复合材料面板结构, 分析了不同厚度 Elum 薄膜试样的焊接特性, 并优化了焊接时间^[16]。COUSINS 等^[17]对回收利用 Elum 热塑性树脂制造风力涡轮机叶片组件的可行性进行了研究, 研究表明通过热降解、研磨和聚合物基质的溶解回收的玻璃纤维的刚度和强度分别为 190 N/(mm·g) 和 160 N/g, 因此回收 Elum 复合材料制备的风力涡轮机叶片组件是有商业价值的。

BARBOSA 等^[18]通过端部开口弯曲 (ENF) 实验测得 Elum 150 和传统的环氧树脂基体复合材料的 II 型层间断裂韧性, 实验结果表明 Elum 复合材料的 II 型层间断裂韧性比环氧树脂基体复合材料高出 40%。PINI 等^[19]研究了两种类型的热塑性聚合物基 (Elum 和 Elum impact) 复合材料的 I 型断裂韧性, 研究结果表明复合材料零件韧性可以通过提高树脂韧性来提高, 添加增韧纳米颗粒的 Elum impact 复合材料的断裂韧性高于 Elum 复合材料的断裂韧性。SHANMUGAM 等^[20]研究了应用于防弹衣制造的超高分子量聚乙烯纤维织物 (UHMWPE) 与 Elum 树脂结合的复合材料的 I 型断裂韧性, 并将它与另外两种添加不同增韧材料的 Elum/UHMWPE 复合材料的 I 型断裂韧性进行对比, 对比结果发现添加了功能化多壁碳纳米管 (MWCNT) 和聚多巴胺 (PDA) 的复合材料断裂韧性大于只添加 MWCNT 的复合材料零件, 且添加 MWCNT 的复合材料断裂韧性大于原始 UHMWPE/Elum 复合材料的断裂韧性。

尽管国内外学者对 Elum 复合材料性能与应用做了广泛研究, 然而很少有研究关注 Elum 树脂固化放热反应。文献 [20] 指出, 在制造 12 mm 或更厚的 Elum 复合材料时, Elum 树脂的高放热反应可能导致复合材料构件的峰值温度高于 100 °C, 这可能造成成形工艺不稳定和不必要的单体损失及气孔的产生。为了制备高性能的 Elum 复合材料, 研究 Elum 树脂的放热特性及温度场分布是十分必要的。首先对不同厚度 Elum 树脂固化过程温度变化进行监测, 其次建立了与实验对应的 Elum 树脂固化有限元模型, 通过 Abaqus 平台, 对 Elum 热塑性树脂固化放热过程进行有限元模拟, 最后对比

分析了模拟结果与实验结果, 并对 Elium 树脂的厚度对其固化过程温度场的影响进行分析。

1 实验

实验所用的试样为添加了 2% 催化剂的 Elium 混合溶液。将配置好的树脂分别倒入 3 个塑料试杯中, 其中 3 个试杯中 Elium 树脂厚度 h_i ($i=0, 1, 2$) 分别为 4.4, 10.3, 16.5 mm, 并设置一个空杯子测量杯中空气温度作为对照组, 如图 1 所示。应用热电偶测量 Elium 树脂固化过程中温度变化, 实验所用热电偶类型为 J 型热电偶, 将其连接到具有 4 个通道的热电偶输入端 (NI 9211), 使用 USB 数

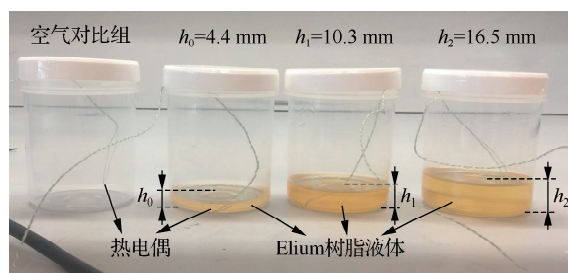


图 1 固化实验示意图

Fig.1 Schematic diagram of Elium resin curing experiment

据记录器 (NI cDAQ-9171) 收集数据。图 2 为 Elium 树脂固化实验的二维几何示意图。由图 2 可知, 杯子的直径为 59.2 mm, 杯中 Elium 混合溶液的厚度分别为 h_i ($i=0, 1, 2$)。热电偶分别处在 3 个杯子的中下部、靠近侧壁、距底面约 1 mm 处。

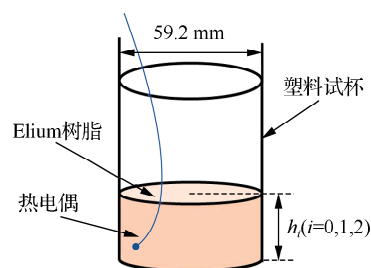


图 2 固化实验二维几何示意图

Fig.2 2D geometry of the resin curing experiment

2 Elium 树脂固化过程数值模拟

2.1 热化学方程

Elium 树脂固化放热方程是由傅里叶热传导方程耦合 Elium 固化动力学方程而成, Elium 树脂固化过程中热传导方程为

$$\rho_r C_{pr} \frac{\partial T}{\partial t} = k_r \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

式中: x, y, z 为笛卡尔坐标系中的空间坐标; ρ_r 为 Elium 树脂密度, kg/m^3 ; C_{pr} 为 Elium 树脂密度比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k_r 为 Elium 树脂热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; t 为时间, s ; Q 为热传导方程中的放热量, W/m^3 。

Q 的计算公式为

$$Q = \rho_r H_{\text{tot}} \frac{da}{dt} \quad (2)$$

式中: H_{tot} 为单位质量 Elium 完全固化的放热量, 241 J/g ; a 为固化度; da/dt 为固化速率。

da/dt 是固化度和温度的函数^[21], 为

$$\frac{da}{dt} = 2.87 \times 10^5 \exp\left(\frac{-5.37 \times 10^4}{RT}\right) (1-a)^{9.53} + 1.97 \exp\left(\frac{-7.49 \times 10^3}{RT}\right) a^{3.02} (a_{\text{max}} - a)^{1.43} \quad (3)$$

式中: R 为通用气体常数, $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; a_{max} 为树脂最终固化度。

2.2 有限元模型

根据 Elium 树脂固化实验和 Elium 树脂固化热化学方程, 应用 Abaqus 软件建立 4.4, 10.3, 16.5 mm 3 种厚度的 Elium 树脂固化三维有限元模型。文中的有限元模型做如下假设: ① 试样是均匀的、各向同性的、混合良好的反应体系; ② 密度、比热容和导热系数在整个固化过程是常数^[21-23],

其中密度为 $1\,183\text{ kg/m}^3$, 比热容为 $1\,550\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 热传导系数为 $0.18\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

Elium 树脂固化有限元模型的边界条件如图 3 (a) 所示。考虑到空气的自由对流, 假定树脂的上表面暴露于环境温度 ($T=297\text{ K}$) 中的对流换热系数 H_t 为 $5\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, 树脂侧面的对流换热系数 H_s 为 $15\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, 树脂底部的对流换热系数 H_b 为 $50\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ [24-26]。Elium 树脂固化有限元模型的单元类型为 8 节点线性传热 (DC3D8) 单元。图 3 (b) 为 16.5 mm 厚的 Elium 树脂有限元网格示意图, 单元尺寸约为 1.1 mm , 单元总数为 $52\,860$ 个。 $4.4, 10.3\text{ mm}$ 厚的 Elium 树脂有限元网格单元尺寸分别约为 $1.1, 1.3\text{ mm}$, 单元总数分别为 $14\,096, 28\,192$ 个; 在此基础上减小网格单元尺寸为 $1.0, 0.8\text{ mm}$, 用来验证文中模型的网格无关性。

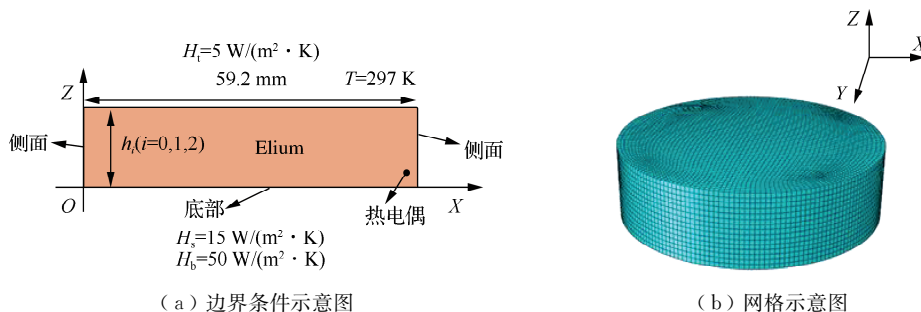


图 3 Elium 树脂有限元模型示意图

Fig.3 Schematic view of Elium resin finite element model

应用 Fortran 编写了 Elium 固化放热子程序, 将一般传热方程与固化动力学模型进行耦合计算。其中, 式 (2) 中的固化度采用 Abaqus 软件中的 USDFLD 子程序计算, 为

$$a^{n+1} = a^n + \frac{da^n}{dt} \Delta t \quad n=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: a^{n+1} 是当前时间步的固化度; a^n 表示上一个时间步的固化度。计算时需初始化变量, 将初始值设置为 $0.000\,1$ 。树脂固化过程中放出的热量及温度场计算采用 HETVAL 子程序。在有限元计算中, 通过解耦热传导和固化动力学方程可输出温度和固化度值, 预测 Elium 树脂固化过程中的温度和固化度变化。

3 结果和分析

3.1 仿真结果与实验结果对比分析

图 4 为不同厚度 ($4.4, 10.3, 16.5\text{ mm}$) 的 Elium 树脂在室温下固化放热达到温度峰值时, 树脂中心横截面上的温度场分布示意图。当固化时间分别为 $2\,366, 2\,101, 1\,841\text{ s}$ 时, 不同厚度 ($4.4, 10.3, 16.5\text{ mm}$) 的 Elium 树脂固化反应的峰值温度分别为 $73.2, 132.5, 145.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。由图 4 可知, 在温度峰值时刻, 固化温度较高的区域位于 Elium 树脂内部及上表面, 原因是底部和侧面的热量传递速度比顶部快, 所以热量更多地积聚在内部及上表面附近。

图 5 为不同厚度 ($4.4, 10.3, 16.5\text{ mm}$) 的 Elium 树脂固化实验结果图。如图 5 可知, 4.4 mm 的 Elium 树脂由固化开始时的浅黄色液体变成结束后的黄色固体, 没有气泡产生。 10.3 mm 和 16.5 mm 的 Elium 树脂固化结束后由原来的液态变为固态, 根据实验过程观察可知, 当监测温度接近 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 可见 Elium 树脂中产生气泡, 随着温度增加, 气泡数量不断增多。产生上述现象的原因是随着树脂厚度增加, 其固化放热量增大, 温度升高, 当温度接近 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时才产生气泡。 10.3 mm

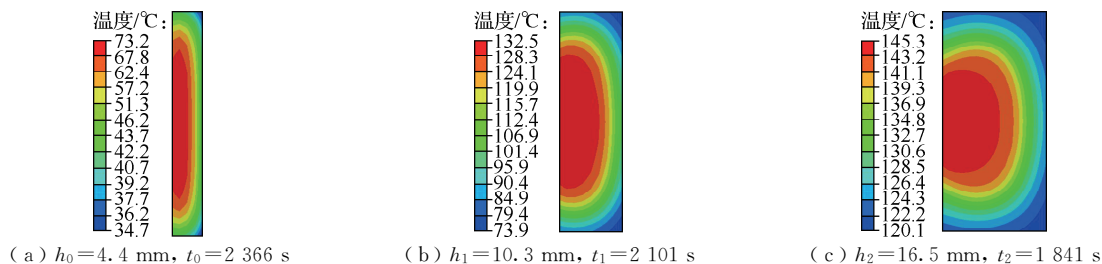


图 4 不同厚度 Elium 树脂到达峰值温度时的 3D 模型中心横截面温度场分布云图

Fig.4 Cloud map of the temperature field distribution in the center cross-section of the 3D model when Elium resin reaches its peak temperature at different heights

的 Elium 树脂中上部固化峰值温度超过 100 °C，因此只见其上部产生气泡，而底部温度小于 100 °C，因此其底部无气泡产生。对于 16.5 mm 的 Elium 树脂，其峰值温度均超过 100 °C，因此可见 16.5 mm 的 Elium 树脂整体产生气泡。由上述分析可知预测结果与实验结果一致，且控制温度在 100 °C 以下可抑制气泡的产生。

图 6 为 4.4, 10.3, 16.5 mm 厚度的 Elium 树脂中热电偶位置处的固化温度随时间变化的实验和仿真数据对比图。由图 6 可知，固化温度的仿真值与实验值随时间变化的趋势基本一致。其中，4.4, 10.3, 16.5 mm 厚度的 Elium 树脂实验峰值温度分别为 43.5, 116.6, 124.3 °C，与预测值分别相差 0.3, 1.5, 1.6 °C，图 6 实验中到达峰值温度时间比预测时间分别长 285, 93, 119 s，产生误差的原因可能是模型中密度、比热容和导热系数在整个固化过程被设定为常数，然而，图 6 中 3 组曲线基本吻合，相对误差较小，因此建立的 Elium 树脂固化反应有限元模型能够准确预测 Elium 树脂固化过程中的放热趋势以及放热量^[27-29]。

3.2 树脂厚度对固化温度影响分析

通过文章建立的有限元模型，预测了不同厚度（4.4, 8, 13, 16.3, 20 mm）树脂在 Elium 树脂固化过程中的峰值温度，对比研究了树脂厚度对峰值温度的影响，结果如图 7 所示。从图 7 可以看出，峰值温度随着树脂厚度的增加呈现非线性增加趋势，20 mm 厚的 Elium 树脂峰值温度低于 150 °C。随着 Elium 树脂厚度的增加，温度峰值的增加变得缓慢，即对于较厚的 Elium 树脂，厚度对峰值温度的影响减小。

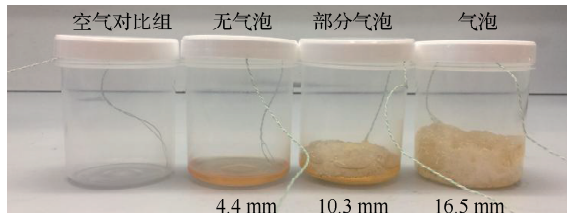


图 5 Elium 树脂在室温下固化后的状态

Fig.5 State of Elium resin after curing

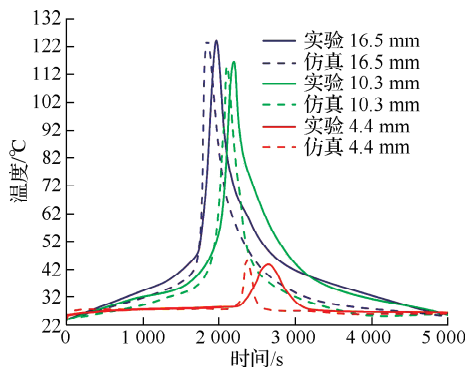


图 6 不同厚度固化实验的 Elium 树脂热电偶处温度模拟与实验测量结果对比曲线图

Fig.6 Comparison of Elium resin temperature simulation and experimental measurement results for different resin heights curing experiments

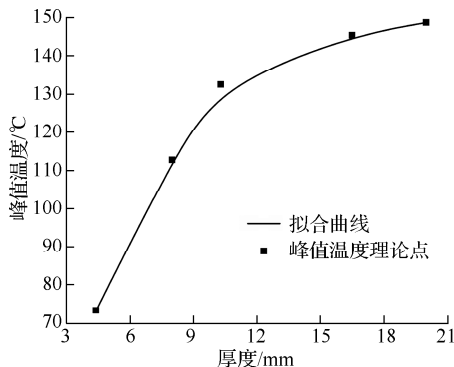


图 7 树脂厚度与树脂固化峰值温度的关系图

Fig.7 Resin curing peak temperature for different resin heights

4 结 论

建立了 Elum 树脂固化成形过程的有限元模型,针对 Elum 树脂固化放热原理,计算获得了 Elum 树脂整个固化过程中任意位置、任意时刻的温度分布和变化规律,分析了树脂厚度对固化过程中热电偶位置温度峰值影响,并通过实验进行验证。文章主要结论为:

- 1) 模拟结果与实验结果基本一致,验证了 Elum 树脂固化过程数值模型的有效性。
- 2) 当树脂厚度为 4.4, 10.3, 16.5 mm 时, Elum 树脂固化反应的峰值温度分别为 73.2, 132.5, 145.3 °C, Elum 树脂固化峰值温度随厚度增加而增大。
- 3) 当 Elum 树脂固化峰值温度接近 100 °C 时,树脂中会产生气泡。

文章对 Elum 树脂固化过程中如何控制温度及气泡产生的原因研究还不够深入,今后还需对温度与气泡之间的关系及如何通过降低温度来抑制气泡产生做持续研究。

参考文献:

- [1] DE ANDRADE R O, BARBOSA L C M, DE SOUZA B R, et al. Study of the influence of initiator content in the polymerization reaction of a thermoplastic liquid resin for advanced composite manufacturing[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2018, 37(8): 3579-3587.
- [2] DE ANDRADE R O, DE SOUZA B R, MIRANDA B L C, et al. Thermal, rheological, and dielectric analyses of the polymerization reaction of a liquid thermoplastic resin for infusion manufacturing of composite materials[J]. *Polymer Testing*, 2018, 71: 32-37.
- [3] BHUDOLIA S K, PERROTE Y P, JOSHI S C. Optimizing polymer infusion process for thin ply textile composites with novel matrix system[J]. *Materials*, 2017, 10(3): 293-298.
- [4] MURRAY R E, PENUMADU D, COUSINS D, et al. Manufacturing and flexural characterization of infusion-reacted thermoplastic wind turbine blade subcomponents[J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 26(3): 945-961.
- [5] MURDY P, HUGHES S. Investigating core gaps and the development of subcomponent validation methods for wind turbine blades[C]//*Proceedings of the AIAA Scitech 2020 Forum*. Virginia: AIAA, 2020.
- [6] MURRAY R E, JENNE S, SNOWBERG D, et al. Techno-economic analysis of a megawatt-scale thermoplastic resin wind turbine blade[J]. *Renewable Energy*, 2019, 131: 111-119.
- [7] NASH N, SIREROL C B, MANOLAKIS I, et al. Thermoplastic infusible resin systems: candidates for the marine sector[J]. *Composite Materials*, 2018, 1(6): 11-19.
- [8] NASH N H, PORTELA A, BACHOUR-SIREROL C I, et al. Effect of environmental conditioning on the properties of thermosetting- and thermoplastic-matrix composite materials by resin infusion for marine applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 177: 107271.
- [9] ARKEMA F. Elum 150 Technical Datasheet[EB/OL]. (2018-3-20)[2022-03-20]. <https://www.arkema-americas.com/en/products/product-portal/range-viewer/Elum-resins-for-composites>.
- [10] KINVI-DOSSOU G, MATADI B R, BONFOH N, et al. Innovative acrylic thermoplastic composites versus conventional composites: improving the impact performances[J]. *Composite Structures*, 2019, 217: 1-13.
- [11] KINVI-DOSSOU G, MATADI B R, BONFOH N, et al. A numerical homogenization of e-glass/acrylic woven composite laminates: application to low velocity impact[J]. *Composite Structures*, 2018, 200: 540-554.
- [12] BHUDOLIA S K, JOSHI S C, BERT A, et al. Energy characteristics and failure mechanisms for textile spreadtow thin ply thermoplastic composites under low-velocity impact[J]. *Fibers and Polymers*, 2019, 20(8): 1716-1725.
- [13] BARBOSA L C M, SANTOS M, OLIVEIRA T L, et al. Effects of moisture absorption on mechanical and viscoelas-

- tic properties in liquid thermoplastic resin/carbon fiber composites[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2019, 59(11): 2185-2194.
- [14] CHILALI A, ZOUARI W, ASSARAR M, et al. Effect of water ageing on the load-unload cyclic behaviour of flax fibre-reinforced thermoplastic and thermosetting composites[J]. *Composite Structures*, 2018, 183: 309-319.
- [15] BHUDOLIA S K, GOHEL G, FAI L K, et al. Investigation on ultrasonic welding attributes of novel carbon/elium[®] composites[J]. *Materials*, 2020, 13(5): 1117.
- [16] BHUDOLIA S K, GOHEL G, KANTIPUDI J, et al. Ultrasonic welding of novel carbon/elium[®] thermoplastic composites with flat and integrated energy directors: lap shear characterisation and fractographic investigation[J]. *Materials*, 2020, 13(7): 1634.
- [17] COUSINS D S, SUZUKI Y, MURRAY R E, et al. Recycling glassfiber thermoplastic composites from wind turbine blades[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 1252-1263.
- [18] BARBOSA L C M, BORTOLUZZI D B, ANCELOTTI A C. Analysis of fracture toughness in mode II and fractographic study of composites based on Elixir[®] 150 thermoplastic matrix[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 175: 107082.
- [19] PINI T, CAIMMI F, BRIATICO-VANGOSA F, et al. Fracture initiation and propagation in unidirectional CF composites based on thermoplastic acrylic resins[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 184: 51-58.
- [20] SHANMUGAM L, KAZEMI M E, RAO Z Q, et al. Enhanced Mode I fracture toughness of UHMWPE fabric/thermoplastic laminates with combined surface treatments of polydopamine and functionalized carbon nanotubes[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 178: 107450.
- [21] HAN N, BARAN I, ZANJANI J S M, et al. Experimental and computational analysis of the polymerization overheating in thick glass/Elixir[®] acrylic thermoplastic resin composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 202: 108430.
- [22] SUZUKI Y, COUSINS D, WASSGREN J, et al. Kinetics and temperature evolution during the bulk polymerization of methyl methacrylate for vacuum-assisted resin transfer molding[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 104: 60-67.
- [23] MUTHURAJ R, GROHENS Y, SEANTIER B. Mechanical and thermal insulation properties of elium acrylic resin/cellulose nanofiber based composite aerogels[J]. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 2017, 12: 68-76.
- [24] 杜志龙, 高振江, 张世湘. 气体射流冲击对流换热系数试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(S2): 1-4.
- [25] NIELSEN M. Prediction of process induced shape distortions and residual stresses in large fibre reinforced composite laminates: with application to wind turbine blades[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2013.
- [26] REN W W, SHU C, YANG W M. An efficient immersed boundary method for thermal flow problems with heat flux boundary conditions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 64: 694-705.
- [27] 陈祥宝, 邢丽英, 周正刚. 树脂基复合材料制造过程温度变化模拟研究[J]. *航空材料学报*, 2009, 29(2): 61-65.
- [28] 蔡晋, 董如林, 何越江, 等. 凹凸棒土的表面改性及其在不饱和聚酯树脂中的应用[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2014, 26(2): 14-17.
- [29] 李君, 姚学锋, 刘应华, 等. 复合材料固化过程中温度及应变场分布的解析解[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2009, 49(5): 767-771.

(责任编辑:李艳)