

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.04.028

真空辅助树脂传递模塑成型工艺研究进展

雷蕊英, 季三飞, 谭王景, 齐锴亮

(陕西工业职业技术学院电气工程学院, 陕西咸阳, 712000)

摘要:对近年来真空辅助树脂传递模塑成型(VARTM)工艺的树脂体系、成型工艺改进、树脂流动模拟以及国内外应用现状进行了综述。VARTM工艺具有成本低、污染小、效率高等优点,在大型复杂结构的整体成型中得到广泛应用。随着VARTM工艺的不断优化,配套技术的升级发展,将提升大尺寸制件的力学性能,VARTM工艺低成本的优势将尤其显著,发展VARTM工艺对于扩大复合材料的应用范围具有重要的意义。

关键词:真空辅助树脂传递模塑成型工艺;液体成型技术;复合材料

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)04-0159-05

Research Progress on VARTM Process

Lei Ruiying, Ji Sanfei, Tan Wangjing, Qi Kailiang

(School of Electrical Engineering, Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China)

Abstract: The resin system, improvement of the molding technology, simulation of resin distribution and its application at home and abroad of vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) in recent years were summarized. VARTM has advantages of low cost, less pollution and high efficiency, which has been widely used to cast the integral production of large-scale complex structures. The mechanical properties of large-scale structures will be improved with the optimization of VARTM process and the development of supporting technologies, then, the cost-effective advantage of the process will be particularly significant. The development of VARTM has positive effect on the application of composites.

Keywords: vacuum assisted resin transfer molding; liquid molding process; composite

碳纤维增强复合材料作为轻型结构材料在航空航天、海洋和民用工业等领域得到应用^[1],目前,在航空航天工业中应用的碳纤维增强复合材料主要使用高压釜工艺制备,以确保碳纤维增强复合材料结构具有高质量和优异的力学性能,然而高压釜制备碳纤维增强复合材料的制造成本高,需要大量的惰性气体、电力和高压设备。近年来,非高压釜工艺被广泛应用于开发低成本的制造工艺。其中真空辅助树脂传递模塑(VARTM)工艺具有明显降低成本,可一步浸渗成型带有夹芯、加筋或预埋件的大型构件,模具质量轻、成本低,环保友好等显著优点^[2]。

近年来,VARTM工艺广泛应用于大型复杂形状的复合材料结构的制造,如船壳、风力涡轮机叶片和各种航空零部件^[3-4]。它是在简单光滑的刚性模板上铺放纤维增强体,在真空压力下推动树脂流入模具中并完全浸润纤维进行成型,同时在充填过程中将模具型腔中的气体排出,然后将模具放

在一定的温度下固化成型。然而,VARTM工艺有多种缺点,比如:(1)充型过程中浸渍速度低,导致循环时间长;(2)成品零件中可能存在高孔隙率;(3)纤维压实压力不均匀且有限,导致层压板空间性能变化;(4)纤维体积含量较树脂传递模塑成型(RTM)和高压釜成型低;(5)在真空袋面有较高的表面粗糙度。

高质量的VARTM工艺复合材料层压板具有较高的力学性能和较低的孔隙率^[5],关于该工艺的研究越来越成为研究的热点。笔者介绍了近几年对于VARTM工艺的最新研究进展及应用情况。

1 VARTM工艺用树脂

在VARTM工艺中,对于树脂基体有较高的要求:低黏度,在室温下黏度长时间保持不变,固化时不需要额外加压,具有良好的韧性和可加工性。目前国内外针对VARTM工艺开发了一系列树脂基体。

基金项目: 陕西工业职业技术学院科研项目(ZK19-15)

通讯作者: 雷蕊英,主要从事树脂基复合材料及光伏电池材料的改性加工 E-mail: Lruiying097@126.com

收稿日期: 2020-02-11

引用格式: 雷蕊英,季三飞,谭王景,等.真空辅助树脂传递模塑成型工艺研究进展[J].工程塑料应用,2020,48(4):159-163.

Lei Ruiying, Ji Sanfei, Tan Wangjing, et al. Research progress on VARTM process[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(4): 159-163.

G. Ben 等^[6]以可原位聚合的 ϵ -己内酰胺为基体,分别采用 VARTM 工艺和热压成型方法制备碳纤维增强复合材料,结果表明,相比热压工艺,在 VARTM 工艺中直接使用 ϵ -己内酰胺,由于没有冷却过程,节省了加工时间和能源,同时制备的碳纤维增强热塑性复合材料的弯曲强度较大。

玻璃纤维增强聚氨酯复合材料通常采用拉挤成型工艺制造,然而拉挤工艺仅限于制造等截面的复合材料零件。在 VARTM 工艺中使用聚氨酯树脂面临新的挑战,要求聚氨酯树脂长时间保持一个相对稳定的低黏度,此外,聚氨酯树脂体系中的异氰酸酯对水分敏感,容易起泡。M. Mohamed 等^[7]制备了玻璃纤维增强聚氨酯复合材料,使用新型热固性单组分聚氨酯树脂体系,省去了树脂制备过程中各组分的混合过程,从而降低了 VARTM 成型过程中气泡的产生机会,减少了脱气时间,通过拉伸、弯曲和低速冲击试验对聚氨酯复合材料的性能进行测试,其拉伸强度为 309.06 MPa,拉伸弹性模量为 21.43 GPa,弯曲强度为 618.88 MPa,弯曲弹性模量为 17.1 GPa,在 10 J 的低速冲击下,层合板在冲击一侧有轻微的可见损伤,在 20 J 的冲击下,层合板的背面出现裂纹。

Dai Jinyue 等^[8]合成了一系列适用于 VARTM 的苯并噁嗪类低聚物,通过差示扫描量热法、傅立叶红外光谱和流变性能测试对其性能进行研究。结果表明,低聚物在 60~190℃ 范围内黏度稳定在 1 Pa·s 以下,即使在 120℃ 等温加热 2 h 后,其黏度仍保持在 1 Pa·s 左右。表明其优异的加工性和 VARTM 技术的适用性。固化后的树脂具有良好的热力学性能,疏水性好,吸湿性极低,基于低聚物的综合性能,可作为传统 VARTM 树脂的稀释剂或增韧剂。

在 VARTM 工艺中,黏度是选用树脂的一个重要指标,必须确保树脂在真空负压的作用下以合适的速度流动并浸润纤维。传统酚醛树脂的黏度较高,通常需要加入溶剂以降低黏度,会导致固化成型时释放大量小分子,因此不适宜直接用 VARTM 成型。田谋锋等^[9]采用双阿累尼乌斯模型,研究了牌号为 Z615101 酚醛树脂的非等温黏度特性和等温黏度特性,并建立了等温黏度模型,结果表明,在 75℃ 下,树脂黏度为 500 mPa·s,适用期为 2 h,适用于 VARTM 工艺。王宝春等^[10]研究了乙烯基酯树脂 (SW905-N) 体系中温度、稀释剂对树脂黏度的影响,通过对树脂流动性的研究表明,该树脂体系在玻纤织物中具有较好的流动速率,能够有效浸润纤维织物。

2 VARTM 工艺改进研究

M. A. Yalcinkaya 等^[11]对传统的 VARTM 工艺进行了改进,用螺栓在模具顶部固定一个压力室,通过外部加压增加真空袋的压实压力,制得高质量的复合材料层合板,其孔隙率小于 1%,纤维的体积分数提高了 25%,层合板的弯曲

强度提高了 13%。实验结果表明,通过在加热模具的外面施加压力提高了纤维的体积分数,同时提高了层合板的力学性能,说明加压 VARTM 在制造高质量复合材料方面具有很大的潜力。

在磁铁辅助复合材料制造 (MACM) 工艺中,复合材料放置于磁性工具模具和一组能够产生足够高的固结压力的磁铁之间。M. Amirkhosravi^[12]等结合 MACM 工艺,研究了永磁体在 VARTM 工艺中的有效性。采用 VARTM 制备层合板时,树脂灌注前后分别在真空袋上放置永磁体。结果表明,这种永磁体具有相当好的优点,显著改善了表面质量,减少了层合板厚度,并将纤维体积分数提高到 50% 以上。制备的 6 层、12 层环氧树脂 / e-玻璃复合材料层合板的弯曲强度分别提高了 28% 和 23%,弯曲弹性模量也分别提高了 41% 和 34%。由于织物的渗透性降低,在注射前使用磁铁会增加填充时间,制得的层合板孔隙率降到 1% 以下。

M. A. Yalcinkaya 等^[13]利用加热 VARTM 工艺,采用施加外压和树脂冲洗相结合的方法,制备的层合板孔隙率可由最初的 2.4% 降到 0.86%,孔隙空间分布更均匀,外压压实程度越高,纤维含量可高达 62%。研究表明,施加外部压力可减小层合板的孔洞尺寸,而树脂冲洗有助于去除层合板中的孔洞,此外,采用冲洗法和外压法制备的层合板的弯曲强度和弯曲弹性模量均有较大提高。因此,将树脂冲洗与外部加压相结合是提高层合板质量较为有效的方法之一。

T. Yokozeki 等^[14]将一种具有定型和真空功能的多孔模塑工艺 (PMP) 与 VARTM 工艺相结合,提出了一种碳纤维增强热塑性复合材料制备中树脂含量的控制方法,树脂从入口进入,不流出,这意味着注入的树脂含量与从入口供应的树脂含量相同,很容易控制。研究的目的是通过树脂注射过程中厚度的变化来控制树脂含量,从而控制固化复合材料的性能。通过控制厚度变化比 (真空下无树脂的纤维叠层厚度与树脂浸渍的纤维叠层厚度比值) 得到不同厚度的制件,对制件的性能研究结果表明,纤维体积分数随厚度变化比的减小而增大。在全树脂灌注实验中,注射后没有关闭入口,最终的纤维体积分数被限制在 50% 左右,在本实验中体积分数可以提高到 60%,随着厚度变化比的减小,弯曲弹性模量略有增加。说明通过树脂注射控制方法可以对材料的性能进行预先控制。

传统 VARTM 工艺不使用覆盖模具,Chen Dingding 等^[15]对使用不同刚性覆盖模具的工艺进行了探索,以提高产品中的纤维体积分数。结果表明,使用盖板有三个优点:首先,在充填阶段,刚性盖板可以防止树脂流动前沿部位的收缩,使树脂更容易流动,从而缩短完成注射所需的时间;其次,盖板可以限制过量的树脂留在已完全浸润树脂的部位;最后,在

充填后期,盖板可以加速挤出多余的树脂。由于这些影响,改进的 VARTM 工艺可以得到更高纤维体积分数的产品。

P. Ghabezi 等^[16]以玻璃纤维和环氧树脂为原料,采用不同比例的纳米氧化铝颗粒制备复合材料制品,研究了不同粒度纳米颗粒的加入对 VARTM 成型填充时间的影响。结果表明,纳米颗粒的增加会延长充填时间,而充填时间的延长是由流体黏度的增加引起的。添加纳米粒子存在一个最佳质量分数,防止填充时间显著增加,该最佳质量分数为 3%。

Chang Chih-Yuan^[17]采用有限差分法对 VARTM 充填过程进行分析,通过数值计算,为优化 VARTM 工艺提供了依据,减少了 VARTM 工艺制备复合材料制件的填充时间,同时减少了树脂的浪费。他们将稍过量的树脂注入到预成型体中,在将树脂灌注完之后密封入口,直到树脂完全填满预成型体,最后,将进口变成真空出口,过量的树脂通过出口被除去。与传统方案相比,这一方案的总填充时间减少了 60.6%,树脂的浪费减少了 67.4%。

S. Yoon 等^[18]采用 VARTM 工艺,分别采用普通装置(OS)和压实装置(CS)制备碳纤维增强复合材料并对其力学性能进行了研究。结果表明,OS 试样的树脂层较厚,树脂含量较高,平均断裂韧性较大,失效过程中发生层间断裂,裂纹沿树脂层生长蔓延,纤维拉出量少。而 CS 试样中在树脂浸渍阶段纤维束周围宏观尺度孔洞的形成增强,试样容易发生层间断裂,裂纹扩展和纤维拉出比较明显,但是由于纤维含量的增加,弯曲强度相比 OS 试样提高了 16.31 MPa。

采用 VARTM 工艺很难制造出尺寸公差小的复合材料,T. Gajjar 等^[19]用非接触式 3D 扫描技术确定了不同厚度层合板的翘曲度,同时确定了不同厚度层合板的厚度、压力和体积分数随长度的变化。结果表明,翘曲值随着层合板厚度的增加而减小。随着树脂入口到树脂出口位置距离的增加,厚度偏差随长度的增大而减小。压实压力在树脂进口处最小,在树脂出口处最大。体积分数随着构件厚度的减小和构件长度的增加而增大。Wang Changchun 等^[20]设计了一种测试装置用于检测 VARTM 过程中预成型体的树脂流动效应和厚度变化,结果表明,随着层数的增加,层间渗透率降低,20 层的渗透率约为 1 层的 62%,预成型体厚度受液体黏度和最终填充时间的影响。

纤维预成型材料的压实压力是 VARTM 中最关键的参数之一,它对预成型材料的渗透性、充型时间和最终复合材料的厚度有重要影响。M. Yalcinkaya 等^[21]通过控制真空袋在充型过程中及充型后的压实压力,实现快速压实,提高了层合板的纤维体积分数。结果表明,动态压力控制有以下作用:(1)能够控制织物渗透率和树脂的分布速度,减少模具填充时间;(2)通过减小层合板的厚度变化,改善层合板尺寸的

一致性;(3)通过外部压力去除多余树脂,对预成型体进一步定型,从而提高了纤维体积分数。该工艺最突出的特点是通过施加外部压力将树脂从进气道中去除,从而使层合板的厚度变化从 15% 降到 1%。与传统 VARTM 相比,模具填充时间减少 48%,同时纤维体积分数高达 64%,孔隙率低于 1%。

于然等^[22]在 VARTM 工艺基础上,通过在真空袋上方附加真空室,这种真空室通常由一块平板和泡沫橡胶组成,其中平板上加工两个开口,用于放置真空传感器和真空源。结果表明,在真空室的作用下树脂流动更快,对纤维的渗透率更好,而且成型试样的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度均有明显提高,当附加真空室的压力为 40 kPa 时,拉伸强度达到 456.12 MPa,相比无真空室同等工艺成型下的强度提高了 146.19 MPa;当真空室压力为 30 kPa 时,弯曲强度为 737.45 MPa,提高了 105.28 MPa;当真空室压力为 100 kPa 时,冲击强度为 312.34 kJ/m²,增加了 45.28 kJ/m²。

3 VARTM 工艺树脂流动模拟

VARTM 工艺具备很多优势,但同时对其工艺充模方案的设计、工艺参数的选取难度较大,为了缩短研发周期,降低研发成本,国内外许多学者采用模拟的方法来优化 VARTM 工艺,从而提高了产品质量。

R. Matsuzaki 等^[23]采用目视观测和随机数值模拟相结合的方法,研究了 VARTM 中树脂流动数值模拟问题。通过对线性流场的综合实验研究发现,与传统的异步集成平方根滤波器相比,采用四维异步集成平方根滤波器和随机数值模拟方法对树脂浸渍行为的估计精度有所提高,同时预估了渗透率。

Geng Yi 等^[24]研究了 VARTM 工艺中树脂在曲面板上的浸渍行为。由于预成型变形和弯曲板中空气通道的相互作用,模具中的弯曲区域会使树脂填充时间增加 15%~30%。他们提出了一种计算压力损失系数和整体渗透率变化的分析方法,该分析方法无需对织物变形进行表征,而能够有效预测树脂在弯曲模具中的流动过程。此外,利用液体注射成型模拟(LIMS)对不同弯曲角度的弯曲板上树脂的流动过程进行了一系列数值模拟,仿真结果与实验结果基本一致。

随着绿色能源的日益重视,风力发电机组的叶片尺寸不断增大,由于在这种大尺寸复合材料制品的生产过程中,不可能对注射过程进行可视化检查,因此需要一种检测过程的传感器系统,M. Nauheimer 等^[25]提出了一种基于随机微分方程的灰盒模型,将其用来模拟 VARTM 成型过程中树脂流场前沿的动力学,近似估计环氧树脂的流动前沿变化过程,对于设计用于控制 VARTM 过程中模具内环氧树脂流动的监测系统有很大帮助。

由于 VARTM 工艺中涉及到大量的物理现象,特别是树脂流动与预成型压缩系数之间的强耦合,即液压耦合,使得该过程的模拟十分复杂。此外,分布介质的使用涉及两种类型的流动:平面流动和横向流动,这类流动的模拟过程不能采用二维模型,三维模型需要大量的计算时间。R. Loudad 等^[26]提出了多层预成型注射过程的数值模拟方法,提出了一种考虑液压耦合以及流体沿平面和厚度方向流动共存的 VARTM 建模方法。通过具体试验对此模型进行了验证,得到了满意的结果。对渗透率的研究表明,分布介质平面渗透率对流场前沿速率的确定起着最主要的作用,预制体的横向渗透率决定了分布介质中流动前沿位置与预制体中流动前沿位置之间的间隙。

在 VARTM 中,通常使用柔性袋作为上半部分模具,在这种情况下,织物在浸渍过程中会发生变形,因为预成型体内部的树脂压力发生了变化,导致加固厚度、孔隙率和渗透率不断变化,据此, F. Rubino 等^[27]提出了一种合适的方法来模拟树脂流动,该方法将模拟纤维预成型压实的分析模型与树脂流动的数值模型相结合。结果表明,预成型压实对树脂流动和填充时间有显著影响,特别是预成型体的可塑性越高,完成浸渍所需的时间就越长。

叶乔丹^[28]设计了复合材料风电叶片中主梁帽的 VARTM 工艺,并对其树脂填充进行实验验证,研究表明, VARTM 成型过程中的注胶管道可以设置在表面中间,从而提高充模效率。王科等^[29]研究了 VARTM 工艺制备缝合泡沫夹芯复合材料过程中树脂在预成型体中的流动浸润,利用“条状模型”对缝合泡沫夹芯结构预成型体整体建模,并建立了流动可视化实验装置进行验证,结果表明,数值模拟与实验结果吻合度较好,比较准确地模拟出树脂的流动行为。

余松标^[30]通过有限元法,依据 Fluent 对 VARTM 工艺中树脂固化过程进行模拟,得到不同固化时间下层合板的温度分布图,通过对比温度变化,得到温度相差最大位置是层合板的中心和四周的位置。这是因为内部树脂发生反应,放出的热量不能及时散去,致使内部温度升高。

4 VARTM 工艺的应用

Yu Qiyong 等^[31]设计了一种简单的 VARTM 过程,并将其用于制备多孔聚苯乙烯 (EPS) 填充的蜂窝状复合泡沫塑料。该方法成功地避免了由于原料密度的不同而对 EPS 微球产生浮力的影响。在没有任何特殊处理的情况下,空心玻璃微珠 (HGMs) 和 EPS 在高体积分数的复合泡沫中成功地均匀分布。复合泡沫塑料中 EPS 微球收缩后形成的球形空心结构既能有效地降低泡沫塑料的密度,又能防止裂纹的扩展,平均压缩强度由 3.6 MPa 提高到 9.3 MPa。为低密度复合泡沫塑料的制备提供了一种优化方法。

为改善聚氯乙烯泡沫芯与玻纤复合材料板的界面结合,提高夹芯结构的力学性能,可以通过在面-芯界面上插入短切纤维,然而无法直接制备出具有短切纤维增韧界面的夹芯板,也难以控制稳定性。Chen Qihui 等^[32]采用 VARTM 技术,制备了短切纤维界面增强的复合夹层结构。将短切纤维加到聚氯乙烯夹芯泡沫结构中, VARTM 工艺可以稳定控制夹芯板的纤维含量,减少局部缺陷。在浇注过程中,压力将短切纤维压入泡沫表面的空腔中,保证短切纤维足够润湿,在面板与聚氯乙烯泡沫芯之间形成牢固的桥接结构。

波兰的基础设施承包商 Mostostal Warszawa 公司提出了典型纤维增强复合材料人行桥组合梁-桥面结构体系的创新思路。T. Siwowski 等^[33]对现有纤维增强复合材料人行桥进行综合调研的基础上,采用 VARTM 工艺制备了纤维增强复合材料主梁结构,并对大型原型梁的实际刚度、极限强度和破坏模式进行了室内综合静力试验研究,为纤维增强复合材料主梁在人行桥中的应用提供了很好的前景。

在航空航天领域^[34-35],美国先进战斗机 F-22 首次使用 VARTM 工艺制备零件,每架飞机上所用 VARTM 工艺的零件不低于 360 件。空客公司 A400M 大型运输机的货舱门蒙皮内表面,采用 16 根长桁对其进行加强,使得货舱门减重效果明显,空客对这种工艺申请了真空辅助工艺 (VAP) 技术专利,实际上与 VARTM 工艺类似。中航复材公司应用 VARTM 工艺完成了民机襟翼典型结构件的整体成型。

VARTM 工艺现在也是船舶运输和风能叶片行业的研究热点^[36-38],英国 VT 公司利用 VARTM 工艺生产出救生艇船体,以及扫雷舰艇的上层建筑用结构制件。美国 DD21 驱逐舰通过 VARTM 工艺实现对泡沫夹芯结构的树脂浸润,并将这种夹芯结构作为舰船壳体。中复连众制造公司通过技术创新,利用 VARTM 技术成功生产高性能的兆瓦级风电叶片,宝达船舶公司利用 VARTM 技术制造出高速水翼船,在提高性能的同时降低了成本。

5 结语

VARTM 工艺作为一种低成本生产大型复合材料的成型技术,已得到广泛应用,但是它也有诸多局限,对于力学性能要求高、尺寸公差小、孔隙率低的制件, VARTM 技术很少被使用。但随着 VARTM 工艺通过施加外压、加热等工艺的不断改进优化,制件预成型技术、浇注仿真技术、智能监测系统等配套技术的升级发展,纤维体积含量、层压板尺寸的一致性、制件力学性能等指标将进一步提升,使得 VARTM 工艺在大尺寸承力结构件的应用具有良好的前景。

参考文献

- [1] Shimamoto D, et al. Advanced Composite Materials, 2016, 25(S1):71-79.

- [2] Arulappan C, et al. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2014, 34(1):3–18.
- [3] Asadi A, et al. *eXPRESS Polymer Letters*, 2018, 12(9):781–789.
- [4] 李培旭,等. 玻璃钢 / 复合材料, 2016(8):99–104.
Li Peixu, et al. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2016(8):99–104.
- [5] 徐竹. 合成材料老化与应用, 2016, 45(2):83–86.
Xu Zhu. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2016, 45(2):83–86.
- [6] Ben G, et al. *Science and Engineering of Composite Materials*, 2015, 22(6):633–641.
- [7] Mohamed M, et al. *Advanced Composite Materials*, 2015, 24(S1):13–31.
- [8] Dai Jinyue, et al. *Ind Eng Chem Res*, 2018, 57:3 091–3 102.
- [9] 田谋锋,等. 玻璃钢 / 复合材料, 2016, (11):46–50.
Tian Moufeng, et al. *FRP / CM*, 2016, (11):46–50.
- [10] 王宝春,等. 玻璃钢 / 复合材料, 2015(5):71–75.
Wang Baochun, et al. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2015(5):71–75.
- [11] Yalcinkaya M A, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2017, 102:336–346.
- [12] Amirkhosravi M, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2018, 114:398–406.
- [13] Yalcinkaya M A, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2019, 121:353–364.
- [14] Yokozeki T, et al. *Advanced Composite Materials*, 2015, 24(6):495–507.
- [15] Chen Dingding, et al. *Polymer Composites*, 2016, 37(5):1 435–1 442.
- [16] Ghabezi P, et al. *J Fundam Appl Sci*, 2016, 8:925–940.
- [17] Chang Chih-Yuan. *J Polym Eng*, 2015, 35(5):493–501.
- [18] Yoon S, et al. *Polymer Composites*, 2017, 38(2):217–226.
- [19] Gajjar T, et al. *Fiber and Polymer*, 2020, 21(2):384–391.
- [20] Wang Changchun, et al. *Measurement*, 2016, 90:357–364.
- [21] Yalcinkaya M A, et al. *Polymer Composites*, 2019, 40(6):2 482–2 494.
- [22] 于然,等. 工程塑料应用, 2015, 43(6):58–61.
Yu Ran, et al. *Engineering Plastics Application*, 2015, 43(6):58–61.
- [23] Matsuzaki R, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2016, 84:43–52.
- [24] Geng Yi, et al. *Composite Structures*, 2019, 208:517–524.
- [25] Nauheimer M, et al. *IFAC PapersOnline*, 2018, 51(15):383–388.
- [26] Loudad R, et al. *Journal of Composite Materials*, 2017, 51(24):3 441–3 452.
- [27] Rubino F, et al. *Polymers*, 2019, 11(1):doi:10.3390/polym11010020.
- [28] 叶乔丹. 真空灌注复合材料风电叶片工艺的模拟研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
Ye Qiaodan. *Study on the simulation of wind turbine blade composites by VARTM process*[D]. Tianjin:Tianjin Polytechnic University, 2018.
- [29] 王科,等. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(11):124–129.
Wang Ke, et al. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2015, 31(11):124–129.
- [30] 余松标. 纤维增强复合材料 VARTM 工艺树脂固化过程中温度场的研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
Yu Songbiao. *Study on temperature field in resin curing stage for fiber reinforced composites by VARTM process*[D]. Nanchang:Nanchang University, 2016.
- [31] Yu Qiyong, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2018, 136:126–134.
- [32] Chen Qihui, et al. *Composites Science and Technology*, 2017, 114:202–207.
- [33] Siwowski T, et al. *Composite Structures*, 2018, 206:814–827.
- [34] 赵安安,等. 工程塑料应用, 2018, 46(4):145–149.
Zhao Anan, et al. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(4):145–149.
- [35] 包建文,等. 科技导报, 2018, 36(19):52–63.
Bao Jianwen, et al. *Science & Technology Review*, 2018, 36(19):52–63.
- [36] 梅启林,等. 玻璃钢 / 复合材料, 2014(9):52–62.
Mei Qilin, et al. *Fiber Reinforced Plastics / Composites*, 2014(9):52–62.
- [37] 陈卢松. 塑料, 2018, 47(2):93–96.
Chen Lusong. *Plastics*, 2018, 47(2):93–96.
- [38] 张曼曼. 真空辅助树脂注射成型技术的实验与模拟研究 [D]. 上海: 东华大学, 2014.
Zhang Manman. *Experimental and simulation study on vacuum assisted resin infusion process*[D]. Shanghai:Donghua University, 2014.

(上接第 158 页)

- polymer hydrogels[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2014.
- [33] Kavitha A A, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2009, 1:1 427–1 436.
- [34] Keefe A J, et al. *Biomacromolecules*, 2012, 13(5):1 683–1 687.
- [35] Kajtna J, et al. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009, 29(5):543–550.
- [36] He Hongkun, et al. *Polym Chem*, 2014, 5:2 824–2 835.
- [37] Zhang Jing, et al. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 225:doi:10.1016/j.carbpol.2019.115160.
- [38] Wu Gang, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, doi:10.1002/app.44111.
- [39] Ye Bihua, et al. *Acta Polymerica Sinica*, 2016 (2):134–148.