

复合材料增强纤维渗透率测量及 VARI 成型工艺仿真计算研究

成天健 鲁先孝 张兴刚

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 洛阳 471039)

摘要 针对纤维增强树脂基复合材料真空辅助成型(VARI)工艺仿真计算,根据 Darcy 定律推导出了增强纤维渗透率的常用计算公式,并根据该公式完成了渗透率值的测量,在此基础上,针对某复杂结构模型的 VARI 工艺分别完成了仿真计算和验证试验,最后对计算结果与验证试验结果进行了比较,结果表明二者基本吻合,验证了工艺仿真计算的有效性。

关键词 纤维增强树脂基复合材料 真空辅助成型工艺 渗透率 工艺仿真

纤维增强树脂基复合材料目前已在航空、舰船、风电等领域获得了广泛的应用,真空辅助成型(VARI)工艺作为一种新兴的大型复杂结构低成本成型技术^[1-3],是当前复合材料重要的成型手段之一^[4-5]。复合材料 VARI 工艺成型过程主要包括 3 个阶段:增强材料预成型、树脂注射及浸润、制品固化。其中在树脂注射与浸润阶段,树脂通过在增强纤维束间流动完成对纤维的浸润,如图 1 所示。该阶段是 VARI 工艺的关键,同时有一定的风险性,如控制不当将形成干斑等缺陷。要降低 VARI 工艺的风险,需要开展合理的工艺设计,而工艺仿真计算是工艺设计重要的手段之一。笔者针对复合材料 VARI 工艺仿真计算,在 Darcy 定律的基础上推导了 VARI 工艺纤维渗透率常用计算公式,并根据该公式完成了渗透率值的测量,然后针对某复杂结构模型,分别完成了 VARI 工艺仿真计算和验证试验,最后对试验结果与计算结果进行了分析、比较。

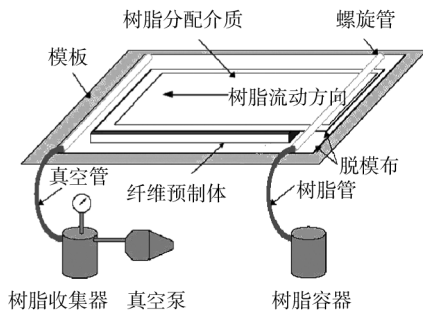


图 1 VARI 工艺结构示意图

1 VARI 工艺仿真计算的一般流程及渗透率测量

VARI 工艺仿真的一般流程为:首先测量增强材料渗透率、树脂黏温/黏时曲线等原材料参数;然后采用 UG、Patran、Hypermesh 等软件建立有限元模型,在专用工艺仿真软件中赋予材料属性,定义流道设计等边界条件,完成工艺的仿真计算;最后对计算

结果进行后处理,结合验证试验,完成仿真计算的优化与修正,形成最终的仿真计算结论。

要完成 VARI 工艺仿真,首先需要解决原材料参数的测量,其中树脂黏温/黏时曲线可采用旋转黏度计测量,而渗透率作为增强材料固有的特性参数,可根据 Darcy 定律通过专用设备进行准确测量,也可根据已有纤维的渗透率值采用比较法进行估算。

1.1 VARI 工艺下渗透率计算公式推导

树脂在纤维中的流动过程可以看作液体在多孔介质中的渗流过程,可用 Darcy 定律进行描述:

$$Q = K \frac{A \Delta P}{\eta L} \quad (1)$$

式中: Q ——通过恒定截面积内树脂的体积流量;

K ——增强材料渗透率;

A ——试样横截面积;

ΔP ——相应于流动长度 L 的压力差;

η ——黏度;

L ——流动长度。

若将式(1)中 Q 转化成用树脂流动前峰流动速度 v 表示,则式(1)可转化为:

$$v = K \frac{\Delta P}{\varepsilon \eta L} \quad (2)$$

式中: ε ——纤维孔隙率。

针对 VARI 成型工艺,由于采用螺旋管、单向高渗透率导流布等工艺耗材实现了树脂的线形注入和单向流动,因此树脂的流动和浸润只在一个方向上进行,即 $\bar{v} = \frac{\partial L}{\partial t}$,将其代入式(2),转化成积分形式,结合 $t=0$ 时 $L=0$ 的边界条件,对式(2)进行积分,可得 VARI 工艺下的纤维渗透率计算公式如式(3):

$$K = \frac{L^2 \varepsilon \eta}{2t \Delta P} \tag{3}$$

1.2 VARI 增强材料渗透率测量

采用前面推导的 VARI 工艺下渗透率理论计算公式,测试如下增强材料的渗透率:26 层 450 mm × 450 mm 玻璃纤维布正交铺敷,并敷设一层导流布 Breatherflow60,按照图 1 所示结构成型复合材料平板,记录树脂在纤维中的流动前锋和对应的时间,结果如表 1 所示。

表 1 树脂在 26 层玻璃纤维布增强材料内的流动状况

时间/s	流动前锋位置/mm	时间/s	流动前锋位置/mm
10	24	200	330
50	52	300	410
100	240	335	440

根据式(3),令 $F = L^2 \varepsilon \eta, T = 2t \Delta P$, 可作拟合曲线如图 2 所示。

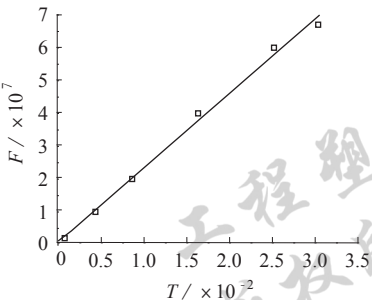


图 2 渗透率拟合曲线

图 2 中直线的斜率即为增强材料与导流介质的一维表观渗透率,计算出 26 层玻璃纤维在敷设了导流布后的表观渗透率为 $4.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。

为获得 22 层同种玻璃纤维在敷设了导流布 Breatherflow60 后的渗透率,成型了相同条件下 22 层纤维复合材料平板,记录了充模时间。根据前面已完成的 26 层增强纤维的渗透率,按照比较法测试渗透率原理,在相同条件下两种铺层结构的渗透率与充模时间成反比例关系,可计算出的 22 层玻璃纤维在敷设了导流布后的渗透率为 $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 。

2 复杂结构模型 VARI 工艺仿真

按照 VARI 工艺仿真计算的一般流程,针对图 3 所示的复杂结构模型,开展了 VARI 工艺仿真计算,

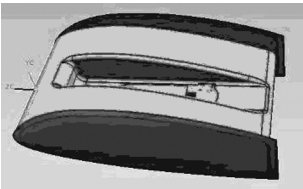


图 3 模型结构示意图

其中模型外部被厚度 4 mm 的复合材料壳体完全包覆,壳体增强纤维为 22 层玻璃纤维布,其敷设导流布后的渗透率根据前面的计算为 $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2$,树脂采用乙烯基酯类树脂,采用旋转黏度计测量出其黏度为 $0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

为完成该结构的 VARI 工艺仿真,首先采用 UG 或 Solid - Work 建立了几何模型,然后导入有限元软件 Patran 中完成网格划分,建立有限元模型,其中网格类型为二维面网格;然后将所得到的有限元模型导入工艺仿真专用软件 PAM - RTM 中,赋予材料属性、设置边界条件,其中树脂注口和真空口的位置分别如图 4 所示;最后完成壳体 VARI 计算,对计算结果进行后处理,结果如图 5、图 6 所示。

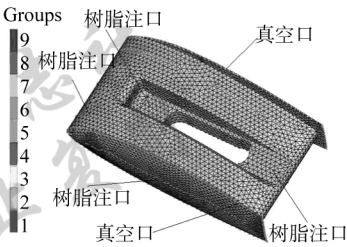


图 4 复杂结构树脂注口和真空口位置设置

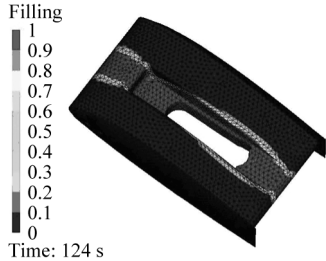


图 5 复杂结构 VARI 工艺仿真充模过程



图 6 复杂结构 VARI 工艺仿真充模时间

根据图 5 与图 6 所示的计算结果,该复合材料壳体的树脂充模时间约为 1740 s,采用该流道设计,不会出现干斑等缺陷。

3 复杂结构模型 VARI 工艺验证试验

针对该复杂结构模型的成型,进行了 VARI 工艺验证试验,其中材料种类、树脂流道设计、树脂注口和真空口设置等均与仿真计算中的设置相同,成

型过程如图 7 所示。



图 7 复杂结构 VARI 工艺验证试验过程

试验结果表明,成型出的复合材料壳体质量良好,未出现干斑等缺陷,这与仿真计算结果基本吻合,但实际充模时间为 2050 s,与仿真计算结果 1740 s 相比略长,这可能是在仿真计算过程中有以下几个因素未予考虑造成的:(1)模型增强纤维在敷设过程中为保证服帖性,采用了定型喷胶,这将使实际纤维的渗透率发生变化;(2)制品结构复杂,存在明显的边沿效应,使局部纤维的渗透率发生变化;(3)树脂黏度采用固定值,未考虑黏度随时间的变化。这些因素具有不确定性和复杂性,要在仿真计算中完成这些因素的模拟还需要开展大量的研究。尽管如此,充模时间的仿真计算结果和实际试验结果相比,误差小于 15%,处于可信范围之内,仿真计算能

够对实际的试验提供指导作用。

4 结论

(1)增强纤维渗透率是 VARI 工艺仿真计算的基础,该材料参数可通过推导出的 VARI 工艺渗透率计算公式采用试验实测法和比较法获得;

(2)复杂结构的工艺仿真结果和试验结果基本吻合,表明工艺仿真计算能较好地预测 VARI 工艺充模过程,可为试验提供指导,具有有效性和实用性。

参考文献

- [1] Seemann W H. Plastic transfer molding techniques for the production of fiber reinforced plastic structure; US, 4902215 [P]. 1990-02-20.
- [2] 陈强,郭泓. SCRIMP 成型工艺及其在船舶和基础工程领域的应用[J]. 玻璃钢/复合材料,2001(6):46-49
- [3] 孟季茹,赵磊,梁国正. 先进复合材料低成本制造技术的研究进展[J]. 航空工程与维修,2001,46(5):15-17.
- [4] 赵渠森,赵攀峰. 真空辅助成型工艺(VARI)研究[J]. 纤维复合材料,2002,31(1):42-46.
- [5] 张锐,郑威,袁秀梅,等. 复合材料的真空辅助成型工艺研究[J]. 工程塑料应用,2005,33(6):33-35.

RESEARCH ON COMPOSITE REINFORCED FIBER PERMEABILITY MEASURING AND VARI PROCESS SIMULATE

Cheng Tianjian, Lu Xianxiao, Zhang Xinggang

(Luoyang Ship Material Research Institute, CSIC, Luoyang 471039, China)

ABSTRACT For fiber reinforced resin matrix composite vacuum assisted resin infusion(VARI) process simulate, the formula of computation of the fiber permeability is presented on the base of Darcy's law, then the fiber permeability is measured by the formula. The process simulate results and testing experiment results are completed to produce a complex model by VARI process, finally the good agreement is found between the simulate results and the experiment results, and the availability of VARI process simulate is proved.

KEYWORDS fiber reinforced resin matrix composite, vacuum assisted resin infusion, permeability, process simulating

巴斯夫推出生物降解塑料

巴斯夫日前携两款可完全生物降解的塑料产品——EcoflexR 和 EcovioR 亮相 2011 国际橡塑展,展示了未来塑料发展的新趋势和新理念。

巴斯夫一直关注并致力于对可再生原料的研究和开发,并于 2006 年推出了新型生物降解塑料——EcovioR,可通过微生物及其生物酶的作用转化为二氧化碳、水、热量以及生物物质,从而实现可完全生物降解。

据巴斯夫特种塑料亚太区业务管理负责人 TioasHaber 介绍,名为 EcoflexR 的生物降解性脂肪族-芳香族共聚酯在堆肥等特定条件下,仅需数周即可完全降解,不会产生任何有害残留物质。目前,它是用于生产生物降解农业复合薄膜的重要原料。经过在德国、泰国以及加拿大部分城市的实验

证明,EcoflexR 已达到不同地区的标准要求。这种地膜在农作物收割后,可以直接犁入土地,同剩余作物一起在土壤中完成生物降解,转化为腐殖质并向植物提供营养,同时还提升了土壤的蓄肥、蓄水能力,特别是节省了因使用传统聚乙烯薄膜而带来的剥除碎片工作。

EcovioR 主要应用于生产生物垃圾袋、购物袋以及纸张涂层、泡沫、保鲜膜等包装制品,从而实现与有机垃圾一并堆肥的目的。一方面,EcovioR 制作的塑料袋能够耐受油脂、潮湿和温度的变化,并具有抗撕裂性,满足了消费者在坚固耐用和食品保鲜上的要求。另一方面,消费者可以直接把它作为盛放餐厨垃圾的收纳袋,不用担心垃圾分类和清洁厨房的难题。目前,这种产品已经在欧洲、北美、日本以及澳大利亚等国家得到了广泛应用。

(中聚网)