

真空辅助 RTM 工艺中孔隙的形成机理及实时控制研究^{*}

郑 澎 张彦飞 赵贵哲 刘亚青 杜瑞奎

(中北大学山西省高分子复合材料工程技术研究中心,太原 030051)

摘要 根据国内外的研究成果对真空辅助树脂传递成型(RTM)工艺过程中气泡的形成机理进行了分析总结,同时介绍了几种真空辅助 RTM 实时过程控制方法。研究结果表明,实时过程控制能够减少孔隙形成的几率,改善流动前沿均匀性,缩短注胶时间,是提高复合材料产品质量的重要方法。

关键词 真空辅助树脂传递成型 孔隙 浸润

真空辅助树脂传递成型(RTM)工艺是一种新型的大型复合材料制件的低成本液体模塑成型技术,它主要利用真空负压排出纤维中的气体及实现树脂对纤维的浸润。在真空辅助 RTM 中孔隙的形成是一个重要的问题。孔隙的存在不仅对层间剪切强度有显著影响,而且也影响材料的压缩强度和横向弯曲强度。实验研究表明,孔隙含量每增加 1%,弯曲和层间强度降低 10%,其中弯曲弹性模量下降 5% 左右^[1-2],因而提高成型过程中树脂对纤维的浸润性和降低孔隙率非常重要。真空辅助 RTM 制品的孔隙量变化取决于很多因素,如纤维预成型体的渗透性,树脂体系中最初的气泡量,注射过程中形成的孔隙,固化过程中孔隙的增加或减小,由于树脂和固化剂化学反应而生成的空气等^[3]。虽然由于技术原因以及基体树脂和增强材料本身的缺陷,使得制备无孔隙复合材料非常困难,但研究孔隙的形成机理及排除措施,使其在复合材料中的含量降低到最低限度,对提高复合材料的质量是非常重要的。笔者现就真空辅助 RTM 工艺中孔隙形成的机理及实时控制作一介绍。

1 孔隙理论的研究

在 RTM 充模过程中,可以将纤维增强材料看成是多孔介质。孔隙有两种:一是在纤维单丝之间形成的孔隙及在纤维单丝表面的宏观或微观裂纹形成的孔隙,为微观孔隙,微孔的尺寸在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 数量级(cm^2);二是在相邻纤维束之间所形成的孔隙,为宏观孔隙,宏观孔隙的尺寸在 $10^{-3} \sim 10^{-1}$ 数量级(cm^2)^[4]。这两种孔隙在充模过程中同时出现且相互竞争,从而导致了气泡的卷裹。

要解决 RTM 成型工艺中气泡缺陷的问题,必须对流体在多孔介质中的流动行为进行系统深入的研究。过去研究人员认为,宏观/微观孔隙的比例接近于流动速率的对数函数。宏观和微观孔隙可以被认

为是注射速率的两个相反的对数函数,而不是流动速率与孔隙包埋百分比的直接关系,研究人员利用一个无量纲参数,称为毛细作用数(C_a)^[5]来研究粘性力和表面张力作用。如式(1):

$$C_a = \frac{\eta v}{\gamma} \quad (1)$$

式中: η 为液体表面粘度; v 为液体表面流动速度; γ 为液体表面自由能。

RTM 充模过程中,流体在纤维预成型体中的流动受到两个驱动力的作用:动压力和毛细作用力。纤维增强材料中,一束纤维内含有大量的纤维单丝,纤维束内的孔隙(相当于毛细管)远远小于纤维束间的孔隙,因此,纤维束内的毛细作用力远大于纤维束间的毛细作用力,也就是说,纤维束间的流动取决于施加的动压力,而纤维束内的流动主要受毛细作用力的控制。在纤维预成型体的任一位置,如果两种驱动力的大小不一致,流体流动方式也就有所差别,流动前沿的形态也就改变了^[6]。

1.1 宏观孔隙的形成

当动压力小于毛细作用力时,纤维束内的流动较之纤维束间的流动要快,这是大气泡形成的主要原因。在一定温度下,注塑压力较低时,纤维束内的毛细作用力起重要作用,流体的流动前沿形态如图 1 所示,纤维束内的流体将向纤维束间的孔隙流动,此时在纤维束之间就会裹入空气而形成大气泡。在一定注塑压力下,温度较高时,也容易导致大气泡的形成。主要原因是温度升高,树脂流体的流动性得到改善,在注塑压力及毛细作用力下小孔隙内的流动超前于大孔隙内的流动。气泡形成机理与压力较低时的机理相似。在纤维织物层间也会形成大气泡,这是纤维织物平面渗透率和横向渗透率的差异

^{*} 山西省科技创新计划项目(2009101004)

收稿日期:2010-07-11

所致,树脂流体沿纤维方向和垂直纤维方向的流动速率不一致。一般来说,平面渗透率要比横向渗透率大。充模开始时树脂沿纤维方向和横向流动是同时进行的,只是沿纤维方向流动速率较快,横向渗透较慢,也就是说下部纤维铺层中树脂流动较之上部纤维铺层中的树脂流动要超前一点,超前的这段距离中的树脂流体也同时做横向渗透流动,因此很可能在层与层之间裹入空气,其原理与纤维束间大气泡的形成是类似的。

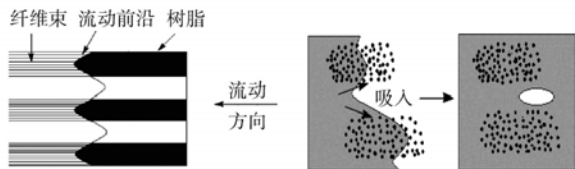


图1 较低的注塑压力对流动前沿形态的影响

1.2 微观孔隙的形成

当动压力大于毛细作用力时,纤维束间的流动较之纤维束内的流动要快,这是小气泡或微小气泡形成的主要原因。在一定温度下,注塑压力较高时,纤维束内的毛细作用力相对于动压力作用较弱,动压力对纤维束间的流动起主要作用,因此流动前沿的形态如图2所示,纤维束间超前的流体将向纤维束内部渗透,如果纤维束内滞后的流动前沿在纤维束间流体渗入之前还未到达渗透发生的位置,则此处纤维束内部的空气将被包裹在里面而形成小气泡。图3比较直观地示出纤维束内小(微小)气泡的形成^[7]。

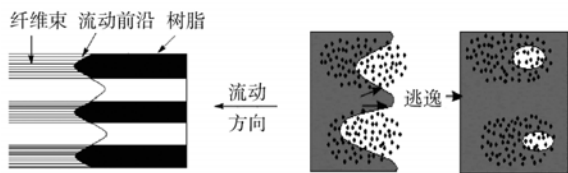


图2 较高的注塑压力对流动前沿形态的影响

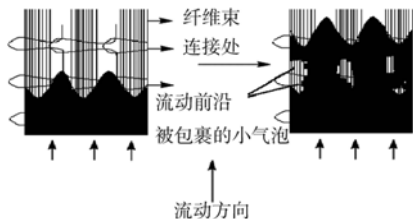


图3 纤维束内小气泡的形成

毛细作用数反映了液体表面粘度、液体表面流动速度和液体表面自由能的参数,从而很好地反映

了树脂在增强材料中的流动,成为充模过程中树脂流动模式的判断标准和判定在某种树脂胶液及加工条件下气泡是否产生的判断标准^[8]。

2 真空辅助 RTM 的实时控制

要消除孔隙,必须找到孔隙的诱因后有针对性地制定措施。预成型体的渗透率、流体粘度、纤维的体积分数和真空压力等参数从根本上影响树脂在预成型体里的流动。预成型体的渗透性是纤维预成型体微观结构的函数,因此很大程度上造成局部区域形成或高或低的流动阻力,造成局部区域树脂不能完全渗透纤维,也导致流动前沿的不均匀性,不仅增加了孔隙形成的几率,而且也延长了树脂的注胶时间。实施真空辅助 RTM 实时控制能够改善预成型体的渗透性和流动前沿的均匀性,减少孔隙形成的几率,缩短注胶时间,提高产品的质量。

2.1 多分段注射线控制流速

常规真空辅助 RTM 制造通常采用一次性聚合物欧米茄管注射线。树脂储罐连接欧米茄管的一端,然后应用真空将树脂吸进管子。树脂沿着整个管子流入预成型体,不能调节树脂流向,直到树脂注射完。此外,控制树脂流向模具的不同区域只有使用几种注射线才能实现。一个典型的真空辅助 RTM 模具将包括几个不同的注射和真空线,每个都是欧米茄管。由于在注射前必须先安装这些注射线,所以事先了解树脂在模具里的流动行为是非常重要的。然而,在注射过程中实际的树脂分布非常依赖于模具里渗透性的分布。

为了改善在真空辅助 RTM 过程中的可控性,A. R. Nalla 等^[9]开发了一套新的树脂注射线。注射线包括多个分段,并可独立运行,每个分段可以单独开启或关闭,把树脂输送到预成型体的不同位置,如图4所示,分段注射线可以启动(或终止)输送树脂到注射线与真空袋之间的任何区域。

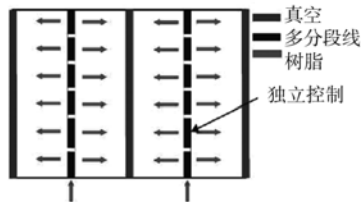


图4 多分段注射线注射树脂

多分段注射线真空控制如图5所示。在树脂管上方沿着长度方向穿孔,然后放在预成型体的上方,这些孔作为树脂流到预成型体里的出口。树脂管放

到合适的位置后,真空袋铺在整个模具的上面,遮盖这些孔。然后在树脂管上方放置刚性真空室密封真空袋。这样在这些孔的上方就可以形成一个密封的空间,通过开启和关闭这些孔来调节树脂的流动。当出现流动前沿滞后或纤维不能渗透某一部区域时,可以开启对应方向上的孔,加大树脂的流动,使树脂能够渗透局部区域的纤维,降低孔隙的形成,保持流动前沿的均匀性。

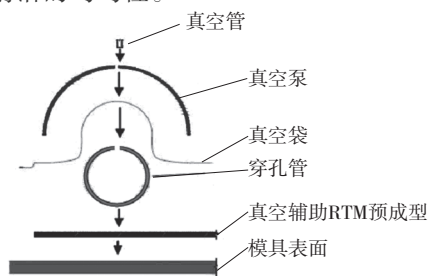


图5 真空驱动分段注射线的横截面

研究表明,使用分段注射线和相对简单的控制器设计可以明显减小孔隙的形成。此外,自适应控制算法以及使用有限元模型对注射线结构实时更新,可以进一步提高分段线的性能,特别适用于渗透性变化和复杂模具中。

2.2 感应加热主动控制流速

由 Darcy 定律可以推断出,在恒定的压力梯度和恒定的温度下,流动将最先沿着流动阻力最小的方向或最高渗透区流动。模具填充的这一特点可导致流动滞后和形成孔隙,需要通过主动控制来改善。

R. J. Johnson 等^[10]实施主动流量控制,使用感应线圈加热进而降低在低渗透区域的树脂粘度,抵消预成型体渗透性不均匀的影响,改善流动前沿的均匀性。当电流通过感应线圈,并创建一个磁场由毕奥-萨伐尔定律控制,感应加热开始。这个磁场穿透模具在碳织物基座层产生电流;碳材料抵制电流,从而产生了欧姆加热。在真空辅助 RTM 工艺中使用局部感应加热主动控制流量主要有两个要求:功率控制和运动控制。感应线圈功率必须实时变化使树脂粘度降低,流动渗透到低渗透区域,同时确保材料的温度限制在规定范围内,以防止树脂在填充过程中过早凝胶。

研究表明,在低渗透区域流动前沿前面加热可能会导致熔体沿着流动阻力最小的方向流动,完全绕过低渗透区域,从而有可能形成干斑;在流动前沿后面加热能减少此问题的出现。改善流动的均匀性只是主动控制的一个目标,局部加热填充,并减

少流动粘度将加快流动速率,总体上,低流动粘度比高流动粘度填充得快,从而主动控制还可以降低整体填充时间。试验结果表明,与没有控制的情况相比,在不同类型的预成型体中使用感应加热控制将大幅度减小填充时间。这种方法不仅可以有效地排除气泡、降低制品的孔隙率,还可以提高浸渍速率,而且效果明显。

2.3 流动速率控制器控制流速

模具的尺寸和复杂性及先进纤维预成型体表现出的低渗透性,使得在真空压力下填充模具变得更加困难。这会导致干斑的形成甚至产品的报废。因此,在提高产品质量和改进工艺过程中,树脂流动控制显得尤为重要。

D. Bender 等^[11]提出实施流动速率控制器控制可以准确控制流速,使增强纤维能够更好地浸渍。模糊逻辑控制器根据流动前沿位置传感器的反馈和注入树脂质量来调整压力差。真空辅助 RTM 过程控制中三个信号误差分别是负误差、零误差和正误差;对应的控制策略是减少压力、不加压、增加压力。通过重心作用变化计算出压力变化,提供给压力调节器。压力控制调整注射口和出口的压力差,通过模糊逻辑控制器调整树脂罐的压力和树脂的流动速率,计算每一个周期的压力变化,通过流动进程和反馈系统获得流动前沿的具体位置和树脂罐中树脂质量变化。基于传感器的反馈和注射系统预定的设置点计算偏差,向模糊逻辑控制器传输偏差,并周期重复直到增强纤维完全浸润。研究表明,流动速率控制器可以很好地验证任意增强纤维和不同的流体粘度,并能很好地控制树脂流速。采用流动速率控制器,可以很好地控制树脂流速,减少孔隙含量,提高树脂和增强纤维的浸润,提高产品的性能。

3 结语

随着科学技术的发展和国内外各科研单位和生产厂家对真空辅助 RTM 工艺的重视程度及认识程度不断加深,近十几年来,国内外许多学者对真空辅助 RTM 成型工艺中缺陷的形成及消除进行了深入细致的研究。随着计算机技术的发展,计算机已经介入真空辅助 RTM 的研究领域,真空辅助 RTM 的研究也越来越趋向于数值模拟和实时仿真研究,而且数值模拟也将从一维、二维模拟向多维发展,由静态向动态发展,由部分模拟走向全程模拟;理论模型也将由单一参数、理想状态向更复杂的多参数、更接近实际的方向发展,从而彻底、全面地解决真空辅助

RTM 中的气泡问题。

参考文献

- [1] Ghiorse S R. Effect of void content on the mechanical properties of carbon/epoxy laminates[J]. SAMPE Quarterly, 1993, 24(2): 54 - 59.
- [2] Bowies K J, Frimpong S J. Void effects on the interlaminar shear strength of unidirectional graphite-fiber-reinforced composites[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(10): 1487 - 1509.
- [3] Kas Y O, Kaynak C. Ultrasonic(C-scan) and microscopic evaluation of resin transfer molded epoxy composite plates[J]. Polymer Testing, 2005, 24: 114 - 120.
- [4] 齐燕燕,刘亚青,张艳君. RTM 主要缺陷的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2006, 34(12): 72 - 75.
- [5] Leclerc J S, Ruiz E. Porosity reduction using optimized flow velocity in resin transfer molding[J]. Composites: Part A, 2008, 39: 1859 - 1868.
- [6] 李萍. RTM 制品缺陷分析与表征[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [7] 邱桂杰. RTM 成型工艺中缺陷形成机理的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.
- [8] 张彦飞, 刘亚青, 杜瑞奎. RTM 工艺过程中气泡形成机理及排除方法研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2006(5): 7 - 11.
- [9] Nalla A R, Fuqua M, Glancey J. A multi-segment injection line and real-time adaptive, model-based controller for vacuum assisted resin transfer molding[J]. Composites: Part A, 2007, 38: 1058 - 1069.
- [10] Johnson R J, Pitchumani R. Flow control using localized induction heating in a VARTM process[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67: 669 - 684.
- [11] Bender D, Schuster J, Heider D. Flow rate control during vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) processing[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66: 2265 - 2271.

FORMATION MECHANISM AND REAL-TIME PROCESS-CONTROL OF VOID IN VACUUM-ASSISTED RTM PROCESS

Zheng Peng, Zhang Yanfei, Zhao Guizhe, Liu Yaqing, Du Ruikui

(Polymer Composites Engineering Research Center, North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT According to the research at home and abroad, the formation mechanism of void in the resin transfer moulding (RTM) process was analyzed and summarized. In the mean time, several real-time process-control methods of vacuum-assisted RTM were summarized. Research results indicated that real-time process-control could reduce the probability of void formation, improve the uniformity on the resin flowing, reduce the filling time, and it was the important way to improve the quality of composite products.

KEYWORDS vacuum-assisted resin transfer moulding, void, saturation

目前塑料真空包装机四大发展趋势

塑料真空包装应用日益广泛, 推动了塑料真空包装机的发展, 也对其提出了更高的要求。目前国际上真空包装技术与装备发展趋势主要体现在以下几个方面。

(1) 生产自动化: 真空包装机的自动化不仅提高了生产效率, 而且具有安全卫生的优点。日本公司生产的 typ - b 系列旋转真空室式包装机, 是一种自动化程度相当高的多工位包装机。该机有充填和抽真空 2 个转台, 充填转台有 6 个工位, 完成供袋、投料、注液预封口, 并将包装件送至抽真空转台; 抽真空转台有 12 个工位(真空室), 完成抽真空和封口、成品输出等工序, 生产效率可达 40 袋/ min, 主要用于包装软罐头类食品。

(2) 采用新技术: 在包装方法上, 大量采用充气包装取代真空包装, 将充气成分, 包装材料与充气包装机三方面的研究紧密结合起来; 在控制技术上, 更多地应用计算机技术和微电子技术; 在封口方面, 应用热管和冷封口技术; 将先进的装置直接安装在真空包装机上, 如装上计算机控制的粗粒物高精度组合秤; 在旋转或真空包装机上, 应用先进高速的圆弧面凸轮分度机械等。所有这些新技术的采用, 使得真空包装机更加高效和智能化。

(3) 单机多功能: 在单机上实现多功能, 可方便地扩大

使用范围。单机的多功能化是采用模块化设计来完成的。通过不同功能模块的变换和组合, 生产出适用于不同包装材料、包装物口、包装要求的真空包装机。代表性的产品有德国 bosch 公司所属的 hesser 厂生产的多工位制袋真空包装机, 可集制袋、称重、充填、抽真空、封口等多种功能于一体, 方便快捷。

(4) 组配生产线: 当需要的功能越来越多时, 所有的功能集中在一个单机上会使结构变得非常复杂, 操作维修也不方便。这时可把功能不同、效率相匹配的机器组合成功能较齐全的生产线来完成更为复杂的包装工序。(中聚网)

天华院研发单轴聚丙烯粉末加热器

由天华化工机械及自动化研究设计院承担的单轴聚丙烯粉末加热器研发项目日前在兰州通过中石化集团组织的技术鉴定。单轴聚丙烯粉末加热器已申请 3 项实用新型专利。项目组对进口加热器热轴疲劳损坏导致泄漏和热轴内蒸汽冷凝液排不净等问题, 通过建立干燥模型, 优化了热轴设计结构, 减少了密封点, 提高了设备的使用可靠性。单轴聚丙烯粉末加热器于 2009 年 5 月在中石化广州分公司聚丙烯装置中投用, 工业运行稳定可靠, 物料干燥质量合格, 蒸汽耗量比原设备降低 5%, 设备价格仅为进口产品的 1/2, 各项技术指标均达到或优于进口设备。(中化报)