

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.09.028

RTM 工艺纤维预制体渗透率研究进展

刘昊鑫,贺鹏飞,李文晓,金世奇

(同济大学航空航天与力学学院,上海 200092)

摘要: 纤维预制体的渗透率是影响树脂模塑成型过程中树脂流动的重要控制参数,预制体变形将会导致渗透率发生变化,从而对树脂流动产生影响。简述了树脂传递模塑成型(RTM)工艺中的三种渗透率预测方法,并对预制体变形后渗透率的研究进行了文献回顾,主要介绍了预制体剪切变形和横向压实两种变形形式对织物渗透率的影响研究,其研究方法以实验测量法和数值模拟法为主,为 RTM 工艺中预制体变形后渗透率的预测提供参考,最后对预制体渗透率预测的发展前景进行了展望。

关键词: 纤维预制体;树脂传递模塑成型工艺;渗透率;预制体变形

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)09-0149-04

Research Progress on the Permeability of Fabric Preforms in RTM

Liu Haoxin, He Pengfei, Li Wenxiao, Jin Shiqi

(School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract : The permeability of the fabric preform was a key parameter affecting the resin flow during the resin transfer molding(RTM) process. The deformation of the preform changed the permeability, which affected the resin flow. Research on the permeability of the preform after deformation was reviewed. The shear deformation and transverse compaction of the preform and the influence of these two deformations on the permeability were mainly introduced, which provided a reference for the prediction of the preform permeability after deformation in RTM process. Finally, an outlook of the permeability prediction of fabric preform was presented.

Keywords : fabric preform ; resin transfer molding process ; permeability ; preform deformation

树脂传递模塑成型(RTM)技术是立体织物复合材料的最佳成型方法。为避免成型时产生缺陷,通常采用数值模拟的方法预测缺陷,辅助优化模具设计和成型工艺参数^[1]。预制体渗透率是 RTM 成型中树脂流动的重要控制参数,对于双曲率等复杂结构的复合材料制件,在 RTM 成型过程中,预制体发生压缩、剪切、弯曲等多种变形,一旦因变形过大导致局部渗透率过小,就会影响到树脂在纤维中的流动,容易造成干斑、孔隙等缺陷。因此,探索预制体变形对渗透率的影响,对提高充模模拟结果的准确性、避免产生制造缺陷具有重要意义。

渗透率的获取方法主要有三种:理论分析法、实验测量法和数值预测法。实验测量法使用已知黏度的树脂浸润预

制体织物,通过记录树脂浸润过程中的压力、流量、树脂流动前锋等信息,结合达西定律,计算出渗透率。现阶段,实验测量法主要集中于树脂流动前锋监测技术的研究。理论分析法和数值模拟法都是针对多孔介质固有属性,建立数学模型,应用流体力学原理建立求解方程,设置边界条件后利用计算软件进行求解获得渗透率预测值^[2]。理论分析法一般基于流体在多孔介质中的流动而来的半经验模型进行计算。其中,对于简单织物如单向平纹织物等结构,渗透率预测值与实验值一致性较好,但复杂织物的渗透率预测值与实验值存在较大偏差,目前缺少适用于各种预制件渗透率的通用预测模型^[3]。实际生产中,纤维预制体结构复杂,理论分析法中各模型的运用受到限制,而数值模拟法能够较好地解决这

通讯作者: 李文晓,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为复合材料在航空航天、土木、高速轨道交通、汽车等领域中的应用

E-mail : wenxiaoli@tongji.edu.cn

收稿日期: 2019-06-27

引用格式: 刘昊鑫,贺鹏飞,李文晓,等. RTM 工艺纤维预制体渗透率研究进展[J]. 工程塑料应用,2019,47(9): 149-152.

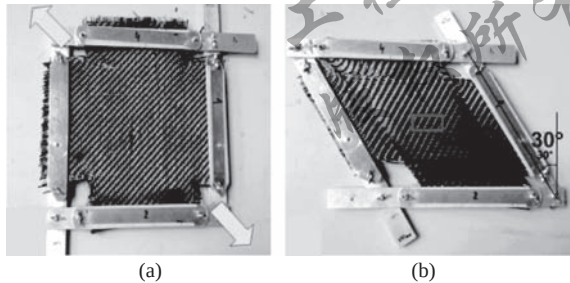
Liu Haoxin, He Pengfei, Li Wenxiao, et al. Research progress on the permeability of fabric preforms in RTM[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9): 149-152.

一问题,数值模拟法主要有三种:均匀化法、Boltzmann 网格法和单胞法。其中,单胞法被广泛应用^[4-6,7-10],它是将纤维增强材料结构中的最小周期性特征单元提取出来进行研究。在单胞的建模方法方面,众多学者采用通过图像处理方法获得重复单元的实际截面特征尺寸,建立接近真实织物结构的单胞模型,随后进行渗透率计算^[11-13]。针对各类纤维预制体的渗透率预测结果与实验测量结果偏差较小,通过对织物结构模型的改进,可以更准确地预测渗透率。

RTM 成型时,立体织物预制体放入成型模具,当模具型面为曲面时,合模后织物会受到模具的压力发生变形,渗透率发生变化,影响树脂流动。一般的,对树脂流动影响较大的变形主要为两种:面内剪切变形和横向压实。

1 剪切变形及对渗透率的影响

近些年来,专家学者对剪切变形对织物渗透率的影响进行了大量实验研究,典型的剪切变形形式如图1所示^[14],其中保持经纱方向不变,纬纱方向发生了偏转。A. Hammami 等^[15]针对不同剪切变形下的非弯折织物进行了渗透率测量实验,实验发现剪切角的变化范围为 $0\sim 30^\circ$,且随着剪切角的增加,椭圆长轴方向的主渗透率 K_1 呈线性增加趋势,而椭圆短轴方向的主渗透率 K_2 则逐渐减小。J. Slade 等^[16]对机织织物和缝合织物进行了渗透率研究,发现剪切角的变化范围在 $0\sim 35^\circ$,与上述结果相似。



a—剪切变形前的织物形态;b—剪切变形后的织物形态

图1 典型剪切变形形式

A. Endruweit 等^[17]通过径向流动法测试了不同玻璃纤维织物的面内渗透率和主渗透率方向。结果表明,不同规格的织物对渗透率影响不大,且大部分织物未变形时渗透率呈现各向异性;纤维方向的渗透率随着剪切角的增加而增加,横向渗透率随着剪切角的增加而降低,该结论与 E. Heardman 等^[18]的研究结果相吻合。S. Aranda 等^[19]控制模具模腔高度和纤维体积含量,使用实验法研究了剪切变形对非弯折织物渗透率的影响。结果表明,当模腔高度一定时,在一定角度范围内,随着织物剪切角的增大, K_1 呈线性增加, K_2 呈线性减小,该结果与 A. Hammami 等^[15]研究结果一致。田正刚等^[20]采用径向流动实验法研究了编织纤维毡在不同剪切角度下的面内渗透率,发现主渗透率方向角随着剪切角的增加而增加,但总比相应剪切角大,而主渗透率比和主渗

透率值相应降低。对于横向渗透率与剪切角的研究,邓育文等^[21]的研究结果也与 A. Endruweit 等^[17]相似。邓育文等通过实验测量了方格布在剪切变形后的横向渗透率。结果表明,方格布的横向渗透率随剪切角的增加而下降,且下降的速率越来越慢。

在预制体剪切变形后的渗透率数值模拟方面, A. Endruweit 等^[17]建立了各向同性织物剪切变形的面内渗透率预测模型,数值模拟结果与实验结果一致,纤维方向的渗透率随着剪切角的增加而增加,横向渗透率随着剪切角的增加而降低。F. Loix 等^[22]通过对剪切变形后的机织织物建立单胞模型并进行渗透率预测得出了相似的结果,发现随着剪切角的增加,横向主渗透率呈下降趋势。M. Grujicic 等^[23]建立了正交织物剪切变形后的渗透率预测模型,预测结果与实验结果相符,随着剪切角从 0° 增加至 25° ,主渗透率 K_1 逐渐增大, K_2 逐渐减小。C. L. Lai 等^[24]建立了剪切后的双向纤维织物主轴方向角与剪切角的经典数学模型。在此基础上, B. Verleye 等^[25]针对平纹织物建立了细观几何模型,采用有限差分法求解 Stokes 方程预测单胞渗透率,研究了剪切变形的影响,研究结果与 C. L. Lai 建立的模型求解结果相吻合。然而, C. L. Lai 建立的模型只用于主流动方向和纤维平行的情况,即沿着经、纬线方向,导致模型的应用受限,为此需要对模型进行修正。C. Demaria 等^[26]在研究剪切变形对预制体面内渗透率的影响时引进了修正因子,并将该渗透率预测模型成功地应用于 PAM-RTM 有限元模拟软件中。杨波等^[27]建立了正交织物剪切变形后的单胞模型,考虑纱线的可渗透性对树脂流动的影响建立了流动控制方程,采用贴体坐标法完成了单胞剪切变形后流动控制方程从物理域到计算域的转换,进而实现了剪切单胞渗透率的数值预测,预测结果与已有研究结果一致。

对于几何形状为曲面的纤维制件,纤维预制体沿模具表面铺覆时将会导致织物内部的纤维结构变化,包括剪切角度,纤维丝束几何形状等。剪切变形引起纤维体积分量的增加,从而导致渗透率的变化,而渗透率的变化与织物结构相关。当剪切变形导致纤维排列更加整齐时,该区域的渗透率增大。同时,渗透率的变化将会对充模时间产生影响,过低的渗透率会导致树脂无法填充织物^[28],而通过建立变形后预制体的渗透率预测模型,有助于减少实验,降低成本,并提供较为准确的渗透率预测值。

2 横向压实及对渗透率的影响

RTM 成型过程中出现的横向压实减小了织物预制体的厚度,导致织物结构的改变,其中最主要的变化是各织物层界面相互啮合形成嵌套。嵌套通常会导致织物厚度降低,同时增加纤维体积分量,并改变织物内部的孔隙率,引起织物

渗透率变化,对树脂流动产生影响。因此,RTM 成型时必须考虑嵌套效应的影响。单向布的三种嵌套形式如图 2 所示^[38]。

对于纤维织物的横向压实研究表明,一定的压力下,随着纤维材料层数的增加,层与层之间的纤维束发生嵌套导致每层织物的厚度减小^[29-31]。R. A. Saunders 等^[32]对平纹织物的压缩性进行了研究,发现上下层织物纱束嵌套、纱束的波形和纱束截面形状都会对层间距离产生影响,且平纹织物层数越多越容易被压缩。B. Chen 等^[33]建立了三维压实模型,研究了嵌套对织物压缩性的影响,研究发现嵌套会导致纱束间孔隙和间距减小。蒋建军等^[34]研究了嵌套效应对单向织物压缩性的影响,研究发现多层织物压缩后,层与层之间的纤维会发生嵌套,织物层厚度减小。然而,N. Pearce 等^[35]发现了相反的织物厚度变化规律。在进行压缩实验时发现,每层织物的厚度随着层数的增加而增加,并没有因为嵌套的发生导致每层的厚度减小。N. Pearce 等认为这是由于相邻两层织物之间的摩擦力要比模具与织物之间的摩擦力大,抑制了嵌套的产生,从而得出了相反的结论。

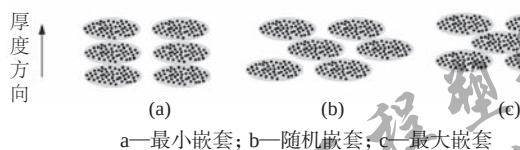


图2 单向布的三种嵌套形式

除了压缩之外,剪切变形、纱束紧密程度和间距都会对嵌套产生影响。S. V. Lomov 等^[29]通过实验发现剪切变形会影响机织织物的嵌套,当织物密实程度增加时会限制嵌套的发生。纱束的间距也会对嵌套产生影响,随着纱束间距的增加,织物的密实度降低,有利于嵌套的发生。剪切状态下正交织物嵌套形式如图 3 所示。Z. Yousaf 等^[36]对平纹织物研究发现,当平纹织物的原始厚度较小时,压缩后织物厚度减少程度较小,原因是织物中纱束更为紧密,抑制了嵌套的产生。

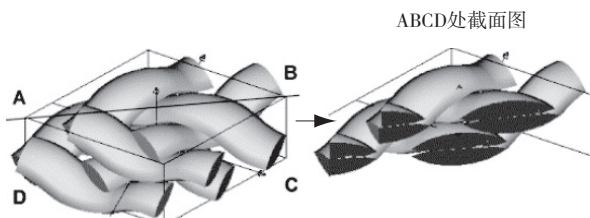


图3 剪切状态下正交织物嵌套形式

大量的研究表明,织物内部嵌套会对渗透率产生影响。M. Grujicic 等^[23]通过建立织物嵌套后的三维模型对渗透率进行预测,发现嵌套的产生使得预制体的孔隙率降低,导致渗透率下降。K. Hoes 等^[37]通过实验测量也发现了嵌套会

对渗透率产生影响,并且是渗透率变化的主要来源,随着嵌套程度的增大,渗透率逐渐下降。方良超^[38]通过对横向压实后的单向玻璃纤维织物的渗透率实验研究获得了相同的结果。B. Chen 等^[33]通过建立 3 维单胞模型对横向压实后织物的渗透率进行了预测,研究发现嵌套的产生使得预制体的孔隙率降低,导致渗透率下降。F. D. Dungan 等^[39]建立了织物的 3 维模型,研究了嵌套对渗透率的影响,研究发现存在嵌套的织物渗透率要小于不存在嵌套的织物,甚至相差一个数量级。方良超^[38]建立了单向布及 0°/90° 织物压缩后的等效渗透率预测模型,对任意嵌套状态下的渗透率进行表征,研究发现嵌套导致渗透率下降,且对纤维轴向及厚度方向渗透率的影响更为明显。因此,嵌套程度的增加将导致纤维体积含量增加,孔隙率降低,渗透率下降,不利于 RTM 成型过程中树脂的流动。

3 结语

综上所述,渗透率预测方法的研究是一个从简单到复杂的过程,理论分析法由于对实际织物模型简化过多,渗透率预测偏差较大。现阶段以实验法和数值模拟法为主要预测方法,其中提高数值模拟法预测的准确性是今后首先要解决的问题。预制体变形及变形对渗透率的影响研究多集中于剪切变形和横向压实两种形式,剪切变形对渗透率的影响与织物本身结构相关,随剪切角的增大,织物面内主渗透率的变化趋势会有所不同。横向压实主要导致织物内部嵌套的产生,导致纤维体积含量变化从而对渗透率产生影响。对于剪切和压缩共同作用下的预制体及渗透率的研究将是今后的主要发展方向,明确变形对渗透率的影响机理,建立准确的预制体渗透率预测模型,同时辅以实验测量的形式将更好地获得渗透率信息,对后续成型工艺及模具设计提供指导。

参考文献

- [1] 宋超. 航空发动机复合材料叶片设计及成形技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
Song Chao. Research on design and manufacture for composites blade in aircraft turbin [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [2] 李嘉禄, 等. 复合材料学报, 2006, 23(6): 1-8.
Li Jialu, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 1-8.
- [3] 董抒华, 等. 材料工程, 2013(5): 94-100.
Dong Shuhua, et al. Journal of Materials Engineering, 2013(5): 94-100.
- [4] Gokce A, Advani S. Permeability Estimation with the Method of Cells[J]. Journal of Composite Materials, 2001, 35(8): 713-728.
- [5] 吴炎, 等. 固体力学学报, 2008, 29(S): 80-84.
Wu Yan, et al. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(S): 80-

- 84.
- [6] 董抒华. 纤维预制品渗透率的预测及其浸润过程有限元模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
Dong Shuhua. Permeability prediction of fiber preform and infiltration process simulation by finite element method[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [7] 康宁, 等. 塑料工业, 2016, 44(1):44-47.
Kang Ning, et al. China Plastics Industry, 2016, 44(1):44-47.
- [8] 金天国, 等. 复合材料学报, 2015, 32(3):840-847.
Jin Tianguo, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(3):840-847.
- [9] Ngo N D, et al. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2001, 44(16):3 135-3 145.
- [10] 王燕辉, 等. 纤维复合材料, 2014(3):14-16.
Wang Yanhui, et al. Fiber Composites, 2014(3):14-16.
- [11] Isart N, et al. Composite Structures, 2015, 119:787-798.
- [12] Zeng X, et al. Composites:Part A, 2014, 56(1):150-160.
- [13] 关留祥, 等. 复合材料学报, 2018, 35(4):748-759.
Guan Liuxiang, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4):748-759.
- [14] Barburski M, et al. Composites Part A:Applied Science & Manufacturing, 2015, 73:45-54.
- [15] Hammami A, et al. J Reinf Plast Compos, 1996, 15:552-562.
- [16] Slade J, et al. J Reinf Plast Compos, 2000, 19(7):552-568.
- [17] Endruweit A, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(4):439-451.
- [18] Heardman E, et al. Composites Part A:Applied Science & Manufacturing, 2001, 32(7):933-940.
- [19] Aranda S, et al. Composites Part B:Engineering, 2014, 65:158-163.
- [20] 田正刚, 等. 武汉理工大学学报, 2005, 27(2):4-6.
Tian Zhenggang, et al. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(2):4-6.
- [21] 邓育文, 等. 武汉理工大学学报, 2006, 28(1):15-17.
Deng Yuwen, et al. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(1):15-17.
- [22] Loix F, et al. Composites Science & Technology, 2008, 68(7-8):1 624-1 630.
- [23] Grujicic M, et al. Materials Chemistry and Physics, 2004(86):358-369.
- [24] Lai C L, et al. Polymer Composites, 1997, 18(5):642-648.
- [25] Verleye B, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(1):30-35.
- [26] Demaria C, et al. Polymer Composites, 2007, 28(6):812-827.
- [27] 杨波, 等. 材料工程, 2014(11):7-14.
Yang Bo, et al. Journal of Materials Engineering, 2014(11):7-14.
- [28] 邱婧婧, 等. 复合材料学报, 2004, 21(6):70-74.
Qiu Jingjing, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(6):70-74.
- [29] Lomov S V, et al. Composites Science & Technology, 2003, 63(7):993-1 007.
- [30] Ivanov D S, et al. Composites Part A:Applied Science & Manufacturing, 2014, 64(21):167-176.
- [31] Lomov S V, et al. Composites Science & Technology, 2011, 71(3):315-325.
- [32] Saunders R A, et al. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 1998, 29(4):443-454.
- [33] Chen B, et al. Composites Science & Technology, 2000, 60(12-13):2 223-2 231.
- [34] 蒋建军, 等. 复合材料学报, 2017, 34(11):2 463-2 472.
Jiang Jianjun, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(11):2 463-2 472.
- [35] Pearce N, et al. Composites Manufacturing, 1995, 6(1):10-21.
- [36] Yousaf Z, et al. Applied Composite Materials, 2017, 24(2):337-350.
- [37] Hoes K, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(12):1 410-1 418.
- [38] 方良超. 嵌套效应对织物压缩性及渗透性的影响研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
Fang Liangchao. Effect of nesting on compaction and permeability properties of fabrics[D]. Xi' an:Northwestern Polytechnical University, 2016.
- [39] Dungan F D, et al. Journal of Composite Materials, 2001, 35(14):1 250-1 284.

具有自愈性和阻燃性的聚氨酯薄膜

科学家们最近生产出一种由可逆化学和环三磷腈带来的可持续、坚韧的阻燃聚氨酯薄膜 (PUR-DA-x)。

下游应用领域对聚氨酯薄膜提出了能自动愈合、阻燃、可回收、经过机械增强等要求。但将这些理想的性能集成到单个系统中是一个巨大的挑战。科学家们在可逆 (DA) 反应和环三磷腈基础上, 制备了一系列新型自愈合、阻燃、可回收和强度高的 PUR-DA-x。

由于含有侧链咪唑的线性聚氨酯链通过 DA 共价键被马来酰亚胺封端的环三磷腈有效交联, 断裂拉伸应力和拉伸弹性模量分别增加了 293% 和 732%。

聚氨酯薄膜的优异自愈能力在基于可逆 DA 反应的情况下被定性和定量地研究。由于添加了环三磷腈, 合成聚氨酯弹性体表现出非凡的阻燃性。

此外, 由于回复 -DA/DA 工艺, PUR-DA-x 薄膜具有良好的可回收性。
(环球聚氨酯网)