

纤维复合材料预制件渗透率及其结构相关性的研究进展

Research Progress on Permeability of Fiber Composite Preforms with Structural Dependence

董抒华^{1,2}, 王成国¹, 贾玉玺¹, 焦学健³

(1 山东大学 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061;

2 山东理工大学 材料科学与工程学院, 山东 淄博 255049;

3 山东理工大学 交通与车辆工程学院, 山东 淄博 255049)

DONG Shu-hua^{1,2}, WANG Cheng-guo¹, JIA Yu-xi¹, JIAO Xue-jian³

(1 Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution & Processing of Materials

(Ministry of Education), Shandong University, Jinan 250061, China; 2 School of

Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology,

Zibo 255049, Shandong, China; 3 School of Transportation and Vehicle Engineering,

Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China)

摘要: 纤维复合材料预制件的渗透率是影响液体模塑成型过程中树脂流动的一个重要参数, 由于它与预制件多层次结构的复杂相关性而使得渗透率的预测一直面临着挑战。本文从预制件的微观、细观及宏观层次分别介绍了渗透率与其结构相关性的研究进展, 综述了预制件渗透率的数学模型及其影响因素, 展望了渗透率研究的发展趋势, 这将有助于揭示复合材料结构件的缺陷形成机理, 进而优化设计复合材料结构件及其成型工艺。

关键词: 纤维复合材料; 液体模塑成型; 渗透率; 结构相关性; 数学建模

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.05.019

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)05-0094-07

Abstract: The permeability of fiber composite preforms, which is dependent on the multi-level structures of the preforms, is an important parameter influencing the resin flow during liquid composite molding. The research progress on the relationship between the permeability and the structure of the preforms was introduced from the viewpoint of the micro-level, meso-level and macro-level, respectively. The influence of various factors on the permeability of the preforms and the mathematical model were reviewed. The development tendency of the permeability research is prospected, which will help to reveal the defect formation mechanism of the composite products and further design the composite products and molding processes.

Key words: fiber composite; liquid composite molding; permeability; structural dependence; mathematical modeling

复合材料液体模塑成型(Liquid Composite Molding, LCM)是指将液态树脂注入铺有纤维复合材料预制件的闭合模腔中, 或加热熔化预先放入模腔内的树脂膜, 液态树脂在流动充模的同时完成对纤维的浸润并固化成型为制品的一类制备技术。目前, LCM 以其高性能、低成本的制备优势已成为航空航天构件制备的主要工艺技术之一^[1,2]。

渗透率是影响树脂在纤维复合材料预制件中流动

的一个重要参数, 它描述了预制件对树脂流动的阻碍作用。渗透率的不均匀性使得树脂在局部高渗透率区域内快速流动, 进而引起空隙及/或干斑的产生, 因而准确获得预制件的渗透率大小及其分布是非常重要的^[3,4]。作为预制件的关键性能之一, 渗透率与其结构密切相关。探讨渗透率与其结构参数的相关性并对其精确预报是 LCM 工艺过程数值模拟亟待解决的关键问题。

大多数增强材料是由纤维集成束再经缝制或编织而成的纤维织物或预制件,成型时树脂胶液在纤维束间流道和束内纤维单丝间孔隙里流动,进而填充整个预制件。整个预制件的结构尺度跨越几个数量级:纤维束内纤维之间的距离以及纤维直径通常是微米级,这种结构可视为微观层次(micro-level);束间区域(纤维束之间距离)一般在毫米级,可视为细观层次(meso-level),也有文献[5]将束间区域称为宏观层次;而对于整体织物,通常被称为宏观层次(macro-level)[6]。

精确描述预制件的多层次结构进而建立渗透率与其多层次结构相关性的数学模型一直是研究者面临的难题。本文从预制件微观、细观及宏观层次分别介绍了纤维复合材料预制件渗透率与其结构相关性的研究进展,综述了纤维复合材料预制件渗透率的数学模型及其影响因素,展望了纤维复合材料预制件渗透率研究的发展趋势。

1 预制件渗透率与其微观层次结构参数的相关性

早期 Darcy 对流体通过各向同性多孔介质过程进行了研究,他提出的 Darcy 定律将流体速度与驱动压力梯度、渗透率和液体黏度关联起来[7]:

$$u = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (1)$$

式中: u 是流体流速; K 是渗透率张量; μ 是液体黏度; ∇P 是压力梯度。Darcy 定律通常用于描述树脂在增强物中的稳态饱和流动。

随后意识到渗透率与孔的结构之间具有关联性的是 Kozeny,他提出了用具有一定长度的不同截面的流道来表征多孔介质,并得到了简化的数学模型。在此基础上 Carman 提出了著名的 Kozeny-Carman 公式[8]:

$$K = \frac{R^2}{4k_s} \cdot \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (2)$$

式中: K 为沿纤维方向的渗透率; R 为纤维半径; k_s 为 Kozeny 常数; ϕ 为纤维孔隙率。

式(2)推动了渗透率模型的重要发展,但它并不适用于描述流体垂直于纤维方向流动的低孔隙率预制件,而实际预制件的纤维体积分数往往较高。Rodriguez 等[9]证实该公式与实验值有较大偏差,并进一步提出了改进的 Kozeny-Carman 经验公式:

$$K = \frac{\phi^{n+1}}{C(1-\phi)^n} \quad (3)$$

式中 n 和 C 分别是经验参数。

Gebart 在 Kozeny-Carman 公式基础上假设纤维

束按四方排列和六方排列,得到了如下渗透率公式[10]:

$$K_{\parallel} = \frac{8R^2}{C_{\parallel}} \frac{(1-V_f)^3}{V_f^2} \quad (4)$$

$$K_{\perp} = C_{\perp} \left(\sqrt{\frac{V_{fmax}}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} R^2 \quad (5)$$

式中: K_{\parallel} 和 K_{\perp} 分别为单向预制件在平行于纤维方向(轴向)和垂直于纤维方向(横向)的渗透率; R 为纤维单丝半径; V_f 是纤维体积分数; C_{\parallel} , C_{\perp} 和 V_{fmax} 分别表示两种不同纤维排列方式下的常数,对于四方排列:

$$C_{\parallel} = 57, C_{\perp} = \frac{16}{9\pi\sqrt{2}}, V_{fmax} = \frac{\pi}{4};$$

$$\text{对于六方排列: } C_{\parallel} = 53, C_{\perp} = \frac{16}{9\pi\sqrt{6}}, V_{fmax} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}.$$

式(4)~(5)的前提是柱体紧密堆积,适用于孔隙率较低的情况,通常在孔隙率低于 40% 时适用[8]。式(2)~(5)将渗透率 K 与纤维体积分数 V_f (或孔隙率 ϕ) 及纤维半径 R 等关键参数关联起来并建立了相应数学模型。对于无序排列的纤维预制件,渗透率计算较为复杂。Chen 等[11]对单向无序排列的纤维预制件的横向渗透率进行了研究,以平均最近纤维间距 $\bar{\delta}_1$ 为微观结构参数来描述纤维分布的不均匀性,并提出一个将渗透率 K 与 $\bar{\delta}_1$ 关联起来的经验模型。Nabovati 等[12]证实了在具有相同束内孔隙率的情况下,纤维无序排列的多孔介质渗透率要低于纤维规则排列的束内渗透率;Nabovati 等[13]还发现纤维长径比也是影响渗透率的一个重要参数,当纤维长径比 $\alpha < 6$ 时渗透率随 α 的增大而增大,而当 $\alpha > 6$ 时渗透率与 α 关系不大。

渗透率的上述数学模型是建立在纤维之间孔隙即微观层次之上,它们为预制件渗透率与结构相关性的建模奠定了重要基础。然而,大多数纤维复合材料预制件通常是由纤维束缝制或编织而成,仅仅建立微观层次的渗透率模型不能反映流体在纤维束内与束间耦合流动的特点。

2 预制件渗透率与其细观层次结构参数的相关性

2.1 未考虑纤维变形情况

针对未变形预制件,对于束内束间双尺度孔隙结构,当预制件的纤维体积分数较低时,束内渗透率可忽略不计,纤维束被视为不可渗透的固体,束间流道是影响渗透率的关键结构参数之一[7,14];而具有较高的纤维体积分数的织物,束内渗透率对整体树脂流动的影响不容忽视[15],若仅考虑束间渗透率,虽简化了计算但并不利于精确计算织物渗透率和模拟树脂浸润过

程,微细观流动的相互关系对于产品空隙缺陷的形成至关重要,因此,双尺度耦合流动是精确预测渗透率的基础。但当同时考虑束间和束内孔隙时,研究者们也面临着一个无法回避的问题,即详细描述束内与束间形状和尺寸与有限的计算机能力之间的不相容性。为了尽量满足两者的需求,提取包含束内和束间的最小重复排列单元作为单胞是行之有效的办法。一些学者建立了织物结构单胞,分别采用 Stokes 方程和 Brinkman 方程描述流体在纤维束间和束内孔隙的饱和流动,采用 Darcy 定律预测出纤维织物的等效渗透率^[16,17]。为了进一步提高计算效率,Verleye 等^[18]采用细观尺度 3D Stokes 和 Grid2D 求解器成功快速预测了织物渗透率。

对于每层由平行纤维束排列而成的非弯曲织物(Non-Crimped Fabrics, NCF)预制件,如果假设纤维束截面形状是矩形,层间纤维束 $0^\circ/90^\circ$ 交替铺覆,则平行和垂直于纤维方向流动的预制件的单层织物渗透率 K_{along} 和 K_{perp} 分别为^[19]:

$$K_{\text{along}} = \frac{\sum_{n=1}^m K_c^n A_c^n + \sum_{n=1}^m K_b^n A_b^n}{\sum_{n=1}^m A_c^n + \sum_{n=1}^m A_b^n} \quad (6)$$

$$K_{\text{perp}} = \frac{L}{\sum_{n=1}^m \frac{\omega_c^n}{K_c^n} + \sum_{n=1}^m \frac{\omega_b^n}{K_b^n}} \approx \frac{L}{\sum_{n=1}^m \frac{\omega_b^n}{K_b^n}} \quad (7)$$

式中: A 是流体流过的截面积;指数 m 指纤维束和束间流道的数量; n 是指第 n 束或第 n 个流道; c 是指流道(channel); b 是指纤维束(bundle); L 是指流动方向的长度; ω 是流动方向上纤维束和流道的宽度。式(7)右边近似表达式是假设束内渗透率远低于束间渗透率情况。

然而,该模型与实验值相比存在较大偏差,这主要归于该模型不能反映实际纤维束的几何形状,也未考虑缝线的影响。为此,Lekakou 等^[20]将纤维束截面视为椭圆形,提出了垂直于纤维束流动的 NCF 的渗透率 $K_{\text{Li,T}}$ 为:

$$K_{\text{Li,T}} = \left[\frac{1}{L_{\text{Tot}}} \left(\sum \frac{L_{\text{mes},i}}{K_{\text{mes},i}} + \sum \frac{L_{\text{micro},i}}{K_{\text{mit}}} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

式中: L_{Tot} 是总的流动长度; $L_{\text{mes},i}$ 是第 i 层流道的宽度; $L_{\text{micro},i}$ 是纤维束的宽度; $L_{\text{Tot}} = \sum L_{\text{mes},i} + \sum L_{\text{micro},i}$; K_{mit} 是纤维束的横向渗透率;细观流道的渗透率 $K_{\text{mes},i} = b^2/3$, b 是第 i 层细观流道高度的一半。

为了更加详细揭示非弯曲织物预制件的几何形状对渗透率的影响,Nordlund 等^[21]采用数值模拟方法研究了树脂的细观流动行为,应用 Darcy 定律计算了

单胞的面内等效渗透率,结果证实非弯曲纤维织物中的缝线、交叉线、束间流道的宽度和高度对局部渗透率均有极大影响,这为精确预测非弯曲纤维织物预制件渗透率提供了重要指导作用,但并未给出包含所有几何参数的数学模型。为了进一步揭示 NCF 预制件几何形状对面内渗透率的影响,何海东等^[22]研究了单胞面内等效渗透率 K 与纤维束间距离 b 和纤维束高度 h 的相关性,发现 $\ln(1/K)$ 与 $\ln(1/b)$ 及 $\ln(1/h)$ 之间均存在正的线性关系,但该模型并未考虑缝线对其渗透率的影响。对于编织织物预制件,Endruweit 等^[23]将其单胞分成不同纤维排列区域,建立了面内渗透率与纤维束几何参数的数学模型:

$$K_y = \frac{x_a - \omega_a}{x_a} K_y^3 + \frac{\omega_a}{x_a} K_y^6 \quad (9)$$

$$K_x = \frac{x_a K_x^3 K_x^6}{\omega_a K_x^3 + (x_a - \omega_a) K_x^6} \quad (10)$$

式中: K_x 和 K_y 分别是沿 x 和 y 方向的渗透率; x_a 是相邻的 0° 纤维束之间的距离; ω_a 是束的宽度。这种将复杂的 3D 结构简化为 2D 模型的方法明显提高了计算效率。

LCM 预制件渗透率的计算过程大多是将树脂对纤维复合材料预制件的浸润过程视为流体在多孔介质中的完全饱和理想流动状态,所有区域是以相同速度填充的,在恒流量注射条件下注入口压力与时间呈线性关系,即严格遵从 Darcy 定律^[24]。对于双尺度织物,当束间孔隙尺度是毫米数量级而束内纤维间距离是微米数量级时,注射的流体先流向束间大的孔隙,而后逐渐渗透到束内小孔隙,结果对应的入口压力与时间曲线偏离线性关系,流动前锋后面产生了明显的饱和区域和延迟浸润的非饱和区域,如图 1 所示^[25]。通常引入沉浸项或汇项 q (sink term) 来描述非饱和和流动方程^[24]:

$$\nabla \left(\frac{K}{\mu} \cdot \nabla P \right) = q(P, s) \quad (11)$$

其中 q 大小取决于纤维束周围的压力和树脂填充的束内孔隙率,也可能取决于纤维束的截面积,若纤维束内完全饱和,则 $q=0$,沉浸项消失。

半饱和区域的存在对经典的假设树脂流过区域为饱和态的充模理论和模拟方法提出了挑战。针对宏微观双尺度耦合流动和浸润存在的半饱和区域,一些学者提出了非饱和渗透率(unsaturated permeability)的概念,采用宏观饱和渗透率和非饱和渗透率两个不同参数来描述这种双尺度织物浸润过程^[26,27]。戴洪福等^[28]建立了双尺度织物的细观结构模型,利用有限元/控制体积法求解包含汇项的非饱和和流动方程,结果发现纤维束渗透率对非饱和区影响较大。然而,目前

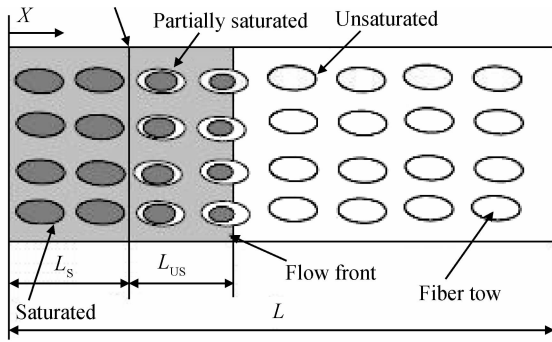


图1 饱和和非饱和流动示意图

Fig. 1 Diagram for saturated and unsaturated flow

非饱和和渗透率的获得通常是采用实验测量方法,尚缺少数值分析和理论分析模型来进一步精确预测^[29]。在求解渗透率过程中,毛细驱动和结构不均匀性等物理现象引起的动态行为在 Darcy 定律中还需要进一步考虑,非饱和渗透率的预测仍需大量探索工作。

2.2 变形引起的预制件微观结构的变化对渗透率的影响

在实际纤维复合材料预制件铺覆过程中,由于模腔形状的复杂性及织物本身的铺敷性会导致纤维增强材料局部变形,其中纤维束的剪切变形最为常见,而压缩变形研究相对较少。剪切变形使织物的局部纤维体积分数较低或较高从而使得渗透率分布不均,进而改变了树脂预期的流动充模模式,形成干斑和固化不均等一系列缺陷^[30],因此,很多学者对剪切变形后的预制件渗透率进行了研究。Lai 和 Young^[31]建立了剪切预制件主轴方向角 β 与剪切角 θ 的相关数学模型:

$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{m \sin(2\theta)}{1 - \alpha - 2m \sin^2 \theta} \right) \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{\sin^2(\beta - \theta) - \alpha \cos^2 \beta}{\alpha \sin^2 \beta - \cos^2(\beta - \theta)} \quad (13)$$

式中: α 表示未变形织物的主渗透率比值; m 是在经线方向阻碍流动作用的参数。

该公式假设变形预制件的经纬流速保持不变,在经线方向流动前沿的切线平行于纬线方向。Verleye 等^[15]采用数值模拟验证了 Lai-Young 公式,两者吻合良好。然而, Lai-Young 经典模型只能用于主流动方向和纤维对齐的情况,即沿着纬线和经线方向,这就限制了该模型的进一步应用,为此必须引进修正因子进行修正。Demaria 等^[32]在研究剪切变形对面内预制件渗透率影响时引进了两个修正因子 $F_{vf}(\alpha)$ 和 $F_{geo}(\alpha)$, $F_{vf}(\alpha)$ 表示由于剪切角度 α 所引起的纤维体积分数的变化, $F_{geo}(\alpha)$ 表示纤维重新定位的影响,则两个主方向的剪切渗透率可以表示为:

$$K_{1,2}(\alpha) = K_{1,2}^{vf}(\alpha) F_{geo}(\alpha) =$$

$$K_{1,2}(\alpha = 0^\circ) F_{vf}(\alpha) (F_{geo}(\alpha)) \quad (14)$$

式中 $K_{1,2}(\alpha = 0^\circ)$ 表示预制件未被剪切时主渗透率方向的渗透率。

通过式(14)得到剪切变形预制件椭圆长短轴的渗透率 $K_1(\alpha)$ 和 $K_2(\alpha)$:

$$K_1(\alpha) = \frac{K_1(\alpha = 0^\circ)}{\cos \alpha} \left(\frac{\cos \alpha - V_{f0}}{1 - V_{f0}} \right)^3 \left(\frac{1 - \Delta r_2}{1 + \Delta r_1} \right)^2 \quad (15)$$

$$K_2(\alpha) = \frac{K_2(\alpha = 0^\circ)}{\cos \alpha} \left(\frac{\cos \alpha - V_{f0}}{1 - V_{f0}} \right)^3 \left(\frac{1 - \Delta r_2}{1 + \Delta r_1} \right)^4 \quad (16)$$

式中: Δr_1 和 Δr_2 分别是由于剪切变形引起的长短轴变化因子; V_{f0} 表示未剪切变形的纤维体积分数; α 表示剪切角。随后这个渗透率预测模型成功地应用于 PAM-RTM 有限元模拟软件中,为树脂在预制件中流动模拟提供了精确的预测数据。田正刚等^[30]采用径向流动法研究了不同剪切角度下编织纤维毡的面内渗透特性,建立了理论预测模型,发现随着剪切角的增加,主渗透率方向角增加,但总比相应剪切角大,而主渗透率值和主渗透率比随之降低,经证实这个关键参数的实验值与理论预测值吻合较好。对于织物变形引起的局部渗透率的变化模型仍有待进一步深入研究。

3 预制件渗透率与其宏观层次结构参数的相关性

3.1 铺层方式及厚度对渗透率的影响

LCM 成型一般为薄壁件,所以很多渗透率的研究均以单铺层为主,但对于大型厚壁件则需要考虑厚度方向渗透率的大小及分布,不同铺层数、铺层角度及方式对渗透率大小与分布均有影响。目前,预制件的宏观层次结构参数对渗透率的影响主要以实验研究为主,数值模拟和理论分析模型却较少。

在实验方面,梁晓宁等^[33]通过径向实验法对厚铺层结构预制件进行研究,结果发现渗透率随铺层厚度的增加逐渐减小,当铺层达到一定厚度,层数的变化对渗透率的影响不大。为了进一步研究不同铺层方式对渗透率和主轴方向的影响,陈萍等^[34]通过实验证实随着铺层方式的改变,整个铺层渗透率大小和主轴方向均发生变化。高娟娟等^[35]通过实验研究表明预制件的铺层角度对预制件厚度方向渗透率具有较大影响。

在数值模拟和理论分析方面, Nabovati 等^[36]采用格子玻尔兹曼方法研究了三维预制件厚度方向的渗透率,提出了一个关于预制件渗透率与纤维束关系的半经验公式,进而预测了三维预制件厚度方向的渗透率。Song 等^[37]建立了一个有关铺层层数、相邻层间相变

和渗透率的解析模型,统计分析了厚度方向渗透率。Merotte 等^[38]通过构建本构方程来描述厚度方向因受压而变形的渗透率。Simkek 等^[39]研究了机织预制件面内渗透率和厚度方向渗透率,两层预制件渗透率模型的流动几何特征如图 2 所示(y 的方向是垂直纸面向外)。流体通过通道可描述成二维(x - y 面)流动,横向(z 向)流动问题可简化成二维椭圆偏微分方程,每一条通道都是一个方程,并与相邻的方程结合^[40],方程如下:

$$\frac{K_{zz}}{\eta h_{f1}}(p_B - p_A) - \frac{1}{6\eta} \nabla (h_A^3 \nabla p_A) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{K_{zz}}{\eta h_{f2}}(p_C - p_B) - \frac{K_{zz}}{\eta h_{f1}}(p_B - p_A) - \frac{1}{6\eta} \nabla (h_B^3 \nabla p_B) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{K_{zz}}{\eta h_{f2}}(p_C - p_B) - \frac{1}{6\eta} \nabla (h_C^3 \nabla p_C) = 0 \quad (19)$$

式中: ∇ 是 x - y 面内的梯度算子; K_{zz} 是增强体横向渗透率; η 是树脂黏度; p_A 、 p_B 和 p_C 分别是通道 A、B 和 C 的压力; h_{f1} 和 h_{f2} 是预制件层 1 和 2 的厚度; h_A 、 h_B 和 h_C 是通道 A、B 和 C 的厚度。式(17)~(19)中的未知量为各通道内部的压力,压力场计算出来后可以得到渗透率。

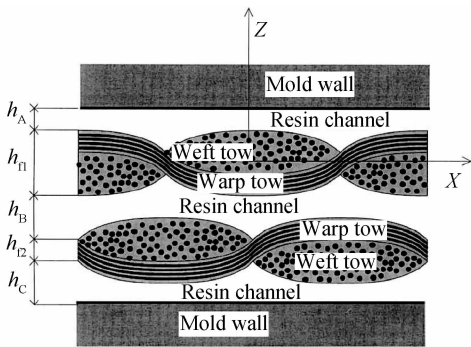


图 2 两层织物渗透率模型的流动区域几何特征

Fig. 2 Geometric feature of flow regions of the permeability model of a two-layer plain weave

纤维复合材料预制件可能由多层不同结构织物组成,非均匀的厚度方向结构导致了渗透率在各层的变化,这为渗透率的预测带来了一定困难。另外,合模产生的横向压实是影响厚度方向渗透率的一个重要因素,如何建立相关性模型并通过实验进行合理验证仍需进一步探索^[41]。

3.2 纤维织物种类对渗透率的影响

Golestanian 等^[42,43]发现短切纤维毡是各向同性的,而编织碳纤维毡和编织玻璃纤维毡都是各向异性的。Rodriguez 等^[9]研究了玻璃纤维和天然纤维毡的渗透率与孔隙率的相关性,结果发现天然纤维(剑麻和

黄麻)的渗透率要高于玻璃纤维毡的渗透率,渗透率与孔隙率的关系符合 Carman-Kozeny 公式,但剑麻和黄麻的渗透率相差无几。Shih 等^[44]发现不同结构(单向纤维毡,连续随机纤维毡和四线编织纤维毡)玻璃纤维毡的面内渗透率相差不大,即使是纤维束半径和结构不同。Verleye 等^[15]采用数值模拟方法分别计算了非弯曲织物(双轴和四轴织物)、平纹织物、单丝纤维织物及无规纤维织物的渗透率,并对其进行了实验验证,但由于这些织物的孔隙率及纤维体积分数的不一致性,并没有指明织物类型对渗透率影响程度如何。同时还可看出,即使在相同纤维体积分数条件下,不同织物的渗透率可能会相差很大。因此,一个能预测多孔介质渗透率的模型不仅需要知道纤维体积分数,还得考虑织物的结构。目前,渗透率模型缺少适用于各种织物渗透率的通用模型,纤维织物的种类及结构对渗透率的影响程度仍需进一步研究。

影响纤维复合材料预制件渗透率的因素很多,但建立一个能真实反映各种类型预制件的渗透率模型仍存在很大困难。如何将预制体的渗透率与不同纤维材料、纤维分布方式、纤维束形状结构参数、流道的结构、缝线及压缩、剪切变形大小及分布等建立起函数关系仍是一项极具挑战性的课题。

4 结束语

LCM 以其低成本高质量产品特点而越来越受到航空航天领域的青睐。近年来,随着对 LCM 产品质量的苛刻要求,预制件渗透率的精确预报已成为当前亟待解决的关键问题。本文从预制件微观、细观及宏观层次分别介绍了纤维复合材料预制件渗透率与其结构相关性的研究进展,综述了预制件渗透率的数学模型及其影响因素。

预制件渗透率的预测目前还存在很多难题,如何将预制体渗透率与不同纤维材料、纤维分布方式、纤维束形状结构参数、流道形状结构以及缝线等建立起函数关系仍是一项极具挑战性的课题;预制件的压缩和剪切变形引起的局部渗透率的变化模型有待进一步深入研究;双尺度孔隙织物的非饱和渗透率目前尚缺少数值模拟和理论分析预测模型;由多层不同结构组成的预制件渗透率与结构相关性建模还需大量工作;缺少适用于各种预制件渗透率的通用模型和数据库;复杂的三维机织和编织织物等的渗透率模型研究仍需强化。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24

- (1):1—12.
- DU Shan-yi. Advanced composite materials and aerospace engineering [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(1):1—12.
- [2] 沈军, 谢怀勤. 先进复合材料在航空航天领域的研发与应用[J]. *材料科学与工艺*, 2008, 16(5): 737—740.
- SHEN Jun, XIE Huai-qin. Development of research and application of the advanced composite materials in the aerospace engineering [J]. *Materials Science & Technology*, 2008, 16(5): 737—740.
- [3] LEE D H, LEE W I, KANG M K. Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process [J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(16): 3281—3289.
- [4] HAMIDI Y K, DHARMAVARAM S, AKTAS L, et al. Effect of fiber content on void morphology in resin transfer molded E-glass/epoxy composites [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2009, 131: 021014-1—021014-11.
- [5] TAN H, PILLAI K M. Multiscale modeling of unsaturated flow in dual-scale fiber preforms of liquid composite molding I: isothermal flows [J]. *Composites: Part A*, 2012, 43(1): 1—13.
- [6] LOENDERSLOOT R. The structure-permeability relation of textile reinforcements [D]. Enschede: University of Twente, 2006.
- [7] CHEN Z R, YE L, LU M. Permeability predictions for woven fabric preforms [J]. *Journal of Composite Materials*, 2010, 44(13): 1569—1586.
- [8] 李嘉禄, 吴晓青, 冯驰. RTM 中纤维渗透率预测的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(6): 1—8.
- LI Jia-lu, WU Xiao-qing, FENG Chi. Research progress on the permeability prediction of fiber in RTM [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(6): 1—8.
- [9] RODRIGUEZ E, GIACOMELLI F, VAZQUEZ A. Permeability-porosity relationship in RTM for different fiberglass and natural reinforcements [J]. *Journal of Composite Materials*, 2004, 38(3): 259—268.
- [10] GEBART B R. Permeability of unidirectional reinforcements for RTM [J]. *Journal of Composite Materials*, 1992, 26(8): 1100—1133.
- [11] CHEN X M, PAPATHANASIOU T D. The transverse permeability of disordered fiber arrays: a statistical correlation in terms of the mean nearest interfiber spacing [J]. *Transport in Porous Media*, 2008, 71(2): 233—251.
- [12] NABOVATI A, SOUSA A C M. Fluid flow simulation in random porous media at pore level using the lattice Boltzmann method [J]. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2007, 2(3): 226—237.
- [13] NABOVATI A, LLEWELLIN E W, SOUSA A C M. A general model for the permeability of fibrous porous media based on fluid flow simulations using the lattice Boltzmann method [J]. *Composites: Part A*, 2009, 40(6—7): 860—869.
- [14] SONG Y S, CHUNG K, KANG T J, et al. Prediction of permeability tensor for three dimensional circular braided preform by applying a finite volume method to a unit cell [J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(10—11): 1629—1636.
- [15] VERLEYE B, CROCE R, GRIEBEL M, et al. Permeability of textile reinforcements: simulation, influence of shear and validation [J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(13): 2804—2810.
- [16] NGO N D, TAMMA K K. Microscale permeability predictions of porous fibrous media [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(16): 3135—3145.
- [17] 吴炎, 晏石林, 谭华. 具有空隙尺寸双尺度特性的纤维织物渗透率的预测[J]. *固体力学学报*, 2008, 29(增刊1): 80—84.
- WU Yan, YAN Shi-lin, TAN Hua. Predication of permeability in a glass-fiber mat with dual-scale pore-size [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2008, 29(S1): 80—84.
- [18] VERLEYE B, LOMOV S V, LONG A, et al. Permeability prediction for the meso-macro coupling in the simulation of the impregnation stage of resin transfer moulding [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010, 41(1): 29—35.
- [19] LUNDSTROM T S. The permeability of non-crimp stitched fabrics [J]. *Composites: Part A*, 2000, 31(12): 1345—1353.
- [20] LEKAKOU C, EDWARDS S, BELL G, et al. Computer modelling for the prediction of the in-plane permeability of non-crimp stitch bonded fabrics [J]. *Composites: Part A*, 2006, 37(6): 820—825.
- [21] NORDLUND M, LUNDSTROM T S. Numerical study of the local permeability of noncrimp fabrics [J]. *Journal of Composite Materials*, 2005, 39(10): 929—947.
- [22] 何海东, 贾玉玺, 丁妍羽, 等. 无弯曲纤维织物面内渗透率的结构相关性[J]. *复合材料学报*, 2011, 28(5): 70—76.
- HE Hai-dong, JIA Yu-xi, DING Yan-yu, et al. Structure-relationship of the in-plane permeability of non-crimped fabrics [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(5): 70—76.
- [23] ENDRUWEIT A, LONG A C. A model for the in-plane permeability of triaxially braided reinforcements [J]. *Composites: Part A*, 2011, 42(2): 165—172.
- [24] SIMACEK P, ADVANI S G. A numerical model to predict fiber tow saturation during liquid composite molding [J]. *Composites Science and Technology*, 2003, 63(12): 1725—1736.
- [25] ZHOU F P, KUENTZER N, SIMACEK P, et al. Analytic characterization of the permeability of dual-scale fibrous porous media [J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(15): 2795—2803.
- [26] ZHOU F P, ALMS J, ADVANI S G. A closed form solution for flow in dual scale fibrous porous media under constant injection pressure conditions [J]. *Composites Science and Technology*, 2008, 68(3—4): 699—708.
- [27] KUENTZER N, SIMACEK P, ADVANI S G, et al. Permeability characterization of dual scale fibrous porous media [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(11): 2057—2068.
- [28] 戴福洪, 卢守舟, 杜善义. 树脂传递模塑工艺中的非饱和流动过程模拟与实验研究[J]. *复合材料学报*, 2010, 27(2): 84—89.
- DAI Fu-hong, LU Shou-zhou, DU Shan-yi. Simulations and experiments of unsaturated flow in resin transfer molding process [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(2): 84—89.

- [29] FRANCUCCI G, RODRÍGUEZ E S, VÁZQUEZ A. Study of saturated and unsaturated permeability in natural fiber fabrics [J]. *Composites: Part A*, 2010, 41(1): 16–21.
- [30] 田正刚, 祝颖丹, 张垣, 等. 剪切效应对纤维增强材料渗透率的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(2): 4–6.
TIAN Zheng-gang, ZHU Ying-dan, ZHANG Yuan, et al. Influence of shearing effects on the permeability of fiber reinforcement [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2005, 27(2): 4–6.
- [31] LAI C L, YOUNG W B. Model resin permeation of fiber reinforcements after shear deformation [J]. *Polymer Composites*, 1997, 18(5): 642–648.
- [32] DEMARIA C, RUIZ E, TROCHU F. In-plane anisotropic permeability characterization of deformed woven fabrics by unidirectional injection. Part II: prediction model and numerical simulations [J]. *Polymer Composites*, 2007, 28(6): 812–827.
- [33] 梁晓宁, 李炜, 罗永康, 等. 厚铺层结构纤维增强体渗透性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010, (1): 46–52.
LIANG Xiao-ning, LI Wei, LUO Yong-kang, et al. Study of permeable property of thick-section reinforcement [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2010, (1): 46–52.
- [34] 陈萍, 李宏运, 陈祥宝. 铺层方式对织物渗透率的影响[J]. 复合材料学报, 2001, 18(1): 30–33.
CHEN Ping, LI Hong-yun, CHEN Xiang-bao. Effect of layers on permeability [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2001, 18(1): 30–33.
- [35] 高娟娟, 张佐光, 梁子青, 等. 织物预成型体厚度方向渗透特性研究[J]. 材料工程, 2006, (9): 20–22.
GAO Juan-juan, ZHANG Zuo-guang, LIANG Zi-qing, et al. Research on vertical permeability of fabric preforms [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2006, (9): 20–22.
- [36] NABOVATI A, LLEWELLIN E W, SOUSA A C M. Through-thickness permeability prediction of three-dimensional multifilament woven fabrics [J]. *Composites: Part A*, 2010, 41(4): 453–463.
- [37] SONG Y S, HEIDER D, YOUNG J R. Statistical characteristics

(上接第 93 页)
- [44] NI Shi-bing, WANG Xing-hui, ZHOU Guo, et al. Designed synthesis of wide range microwave absorption Fe_3O_4 -carbon sphere composite[J]. *J Alloys Compd*, 2010, 489(1): 252–256.
- [45] 王晨, 康飞宇, 顾家琳. 铁钴镍合金粒子/石墨薄片复合材料的制备与吸波性能研究[J]. 无机材料学报, 2010, 25(4): 406–410.
WANG C, KANG F Y, GU J L. Synthesis and microwave absorbing properties of FeCoNi alloy particles/graphite flaky composites [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2010, 25(4): 406–410.
- [46] DIONNE G F. *Magnetic Oxides*[M]. New York: Springer Science+Business Media, 2009.
- [47] DU A J, NG Y H, BELL N J, et al. Hybrid graphene/titania nanocomposite: interface charge transfer, hole doping, and sensitization for visible light response [J]. *J Phys Chem Lett*,
of out-of-plane permeability for plain-woven structure [J]. *Polymer Composites*, 2009, 30(10): 1465–1472.
- [38] MEROTTE J, SIMACEK P, ADVANI S G. Resin flow analysis with fiber preform deformation in through thickness direction during compression resin transfer molding [J]. *Composites: Part A*, 2010, 41(7): 881–887.
- [39] SIMACEK P, ADVANI S G. Permeability model for a woven fabric [J]. *Polymer Composites*, 1996, 17(6): 887–899.
- [40] 克鲁肯巴赫, 佩顿. 航空航天复合材料结构件树脂传递模塑成型技术[M]. 李宏运, 译. 北京: 航空工业出版社, 2009.
- [41] NGO N D, TAMMA K K. Complex three-dimensional microstructural permeability prediction of porous fibrous media with and without compaction [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2004, 60(10): 1741–1757.
- [42] GOLESTANIAN H, POURSIANA M. Neural network analysis application to permeability determination of fiberglass and carbon preforms [J]. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2009, 27(2): 221–229.
- [43] GOLESTANIAN H. Preform permeability variation with porosity of fiberglass and carbon mats [J]. *Journal of Materials Science*, 2008, 43(20): 6676–6681.
- [44] SHIH C H, LEE L J. Effect of fiber architecture on permeability in liquid composite molding [J]. *Polymer Composites*, 1998, 19(5): 626–639.
-
- 基金项目:** 国家 973 计划资助项目(2010CB631102); 国家自然科学基金资助项目(50973056, 51173100); 山东省自然科学基金杰出青年基金项目(JQ201016)
- 收稿日期:** 2012-03-12; **修订日期:** 2012-11-12
- 作者简介:** 董抒华(1975—), 女, 副教授, 主要研究方向为复合材料液态模塑成型的建模与仿真, E-mail: dongshuhua@sdu.edu.cn
- 通讯作者:** 贾玉玺(1970—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为高分子及其复合材料加工过程数值模拟与优化设计, 联系地址: 山东省济南市山东大学(千佛山校区)材料科学与工程学院(250061), E-mail: jia_yuxi@sdu.edu.cn
-
- 2011, 2(8): 894–899.
- [48] DU A J, SMITH S C. Electronic functionality in graphene-based nanoarchitectures: discovery and design via first-principles modeling[J]. *J Phys Chem Lett*, 2011, 2(2): 73–80.
- [49] LIU Yi-lun, XIE Bo, XU Zhi-ping. Mechanics of coordinative crosslinks in graphene nanocomposites: a first-principles study [J]. *J Mater Chem*, 2011, 21(18): 6707–6712.
-
- 收稿日期:** 2012-04-06; **修订日期:** 2013-02-21
- 作者简介:** 贾海鹏(1984—), 男, 博士研究生, 从事石墨烯纳米复合材料制备与微波吸收性能研究工作, 联系地址: 陕西省西安市第二炮兵工程大学 501 教研室(710025), E-mail: plaepjhp@163.com
- 通讯作者:** 苏勋家(1965—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事军用新材料技术研究, 联系地址: 陕西省西安市第二炮兵工程大学 501 教研室(710025), E-mail: suxunjia@163.com