

# 液体模塑成型工艺用纤维织物厚度方向饱和 渗透率的预测模型

李香林<sup>1</sup>, 王继辉<sup>1</sup>, 倪爱清<sup>\*2</sup>, 杨斌<sup>1</sup>, 张浩<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070;

2. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 树脂在复合材料预成型体厚度方向的渗透能力对复合材料液体模塑成型工艺(LCM)的成功实施至关重要。本文采用连续加载的方式, 研究了玻璃纤维增强树脂基复合材料液体成型过程中多轴向无屈曲织物(NCF)和斜纹织物(WF)的压缩响应行为, 并建立描述该行为的数学模型。采用自制测试装置对预成型体在重力等不同注射压力驱动下的厚度方向渗透率进行测试, 考察了预成型体纤维体积分数、测试流体注射压力等对预成型体厚度方向渗透率  $K_z$  的影响。基于预成型体压缩响应数学模型和厚度方向渗透率与注射压力的关系, 对 Kozeny-Carman 公式进行修正, 提出了变注射压力条件下的厚度方向渗透率预测模型。结果表明, 预成型体厚度方向渗透率随着纤维体积分数的增大而减小, 与 Kozeny-Carman 方程结果相符合。当纤维体积分数为  $0.42 \leq V_f \leq 0.58$  时, 注射压力对厚度方向渗透率影响较大, 实验结果验证了本文提出的预测模型, 当纤维体积分数  $V_f \geq 0.58$  时, 注射压力对厚度方向渗透率影响较小, 厚度方向渗透率趋于恒定。

**关键词:** 饱和渗透率; 厚度方向; 注射压力; 纤维体积分数; 织物预成型体

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2019)06-1428-10

## Prediction model of through-thickness saturated permeability of fabric for liquid composite molding

LI Xianglin<sup>1</sup>, WANG Jihui<sup>1</sup>, NI Aiqing<sup>\*2</sup>, YANG Bin<sup>1</sup>, ZHANG Hao<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The penetration of resin along thickness is one of the most crucial factors in liquid composite molding (LCM). The method of continuous loading was used to study the compressive behaviors of non-crimp fabric(NCF) and woven fabrics(WF) during the liquid molding of glass fiber reinforced resin matrix composite respectively and a mathematical model was established to describe this behavior. The through-thickness permeability  $K_z$  of the preform under gravity and different injection pressures was tested by a self-made through-thickness permeability testing device. The influence of the preform fiber volume fraction and injection pressure on  $K_z$  of the preform was studied. Based on the preform compressive behavior model and the dependence of  $K_z$  on injection pressure, the Kozeny-Carman formula was modified and a through-thickness permeability prediction model was presented. The results show that the through-thickness permeability decreases with the increase of the fiber volume fraction of the perform  $V_f$ , which agrees with the Kozeny-Carman equation. As the fiber volume fraction varies in the region from 0.42 to 0.58, injection pressure has significant influence on the permeability, and the accuracy of the prediction model presented

收稿日期: 2018-06-19; 录用日期: 2018-08-15; 网络出版时间: 2018-09-04 9:21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20180902.1725.002.html>

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2018-zy-001)

通讯作者: 倪爱清, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为树脂基复合材料性能及模拟仿真 E-mail: ani@whut.edu.cn

引用格式: 李香林, 王继辉, 倪爱清, 等. 液体模塑成型工艺用纤维织物厚度方向饱和渗透率的预测模型[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1428-1437.

LI X L, WANG J H, YANG B, et al. Prediction model of through-thickness saturated permeability of fabric for liquid composite molding[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1428-1437 (in Chinese).

here is validated experimentally. However, when the fiber volume fraction is higher than 0.58, the injection pressure has little effect on  $K_z$  and  $K_z$  tends to be constant as  $V_f$  increases.

**Keywords:** saturated permeability; through-thickness direction; injection pressure; fiber volume fraction; fabric preforms

复合材料液体模塑成型技术(Liquid composite molding, LCM)作为一种先进复合材料制造技术, 具有可批量化生产大型、复杂构件的优势, 近年来, 在汽车工业、风能、航空航天、船舶等领域得到广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。LCM 工艺中最关键的过程是树脂在增强材料中的浸渍流动, 渗透率是表征树脂在预成型体中流动时所受到阻力的关键参数, 精确测试增强材料渗透率, 对优化模具设计、模拟充模过程、提高生产效率、保证产品质量至关重要。随着复合材料构件的大型化, 复合材料的铺层越来越厚, 例如, 风机叶片根部铺层高达 100 多层, 甚至更厚, 在吸注时极易产生干斑等缺陷, 对叶片质量产生明显的不利影响。因此, 厚度方向的渗透特性成为一个不可忽略的因素, 对树脂充模起到至关重要的作用<sup>[5-7]</sup>。

国内外对纤维增强树脂复合材料预成型体厚度方向渗透率性能做了广泛的研究。张娜等<sup>[8]</sup>测试了面内和厚度方向的饱和渗透率, 得出面内渗透率是厚度方向渗透率的 3~7 倍。邓育文等<sup>[9]</sup>发现横向渗透率随着纤维体积分数的升高而下降, 纤维排布越规整厚度方向渗透率越大。张盛等<sup>[10]</sup>用真空灌注工艺(VIMP)测试沿厚度方向的渗透率, 得出真空压力对 Z 向渗透率影响不大, 织物的堆积结构不同, 渗透率差异较大。李永静等<sup>[11]</sup>通过控制体/有限单元法结合沉浸函数实现了 LCM 中非饱和填充浸润的数值模拟, 并与恒压下的实验结果对比, 验证了其可靠性。倪爱清等<sup>[12]</sup>结合均匀化理论和计算流体动力学方法, 实现了对 LCM 工艺中预成型体渗透率张量的预测。Ahn 等<sup>[13]</sup>将光纤嵌入预成型体的内部, 监测预成型体内部椭球状流动前锋的位置, 得到了三个方向的渗透率。Kluker 等<sup>[14]</sup>采用数值仿真方法发现在一定的注射压力下沿厚度方向渗透率呈梯度分布。Comas-Cardona 等<sup>[15]</sup>用动态加载方法测试面内渗透率和沿厚度方向的渗透率, 用迭代函数法对渗透率进行预测, 获得纤维体积分数与渗透率的函数关系。Endruweit 等<sup>[16]</sup>研究了不同空隙率的纤维预成型体在 0.1 MPa 到 0.5 MPa 注射压力下循环 5 次沿厚度方向渗透率变化, 通过结果分析, 得出与注射压力相关的预测方程。Xiao 等<sup>[17]</sup>基于泊肃叶定律提出了沿厚度方

向渗透率预测模型, 该模型适用于四种 3D 织物和三种 2D 机织物, 预测模型与试验结果吻合良好。Li 等<sup>[18]</sup>采用实验方法得到饱和状态下沿厚度方向渗透率与纤维体积分数之间的函数关系。Ouagne 等<sup>[19]</sup>发现当注射流体流量较高时, 厚度方向渗透率减小。Alhussein 等<sup>[20]</sup>研究了循环压实对渗透率的影响, 随着纤维体积分数的增大, 面内渗透率下降的幅度小于沿厚度方向渗透率。

在大厚度复合材料成型过程中, 通常采用增大流体注射压力的方法来提高生产效率, 注射压力对预成型体厚度方向产生压缩变形, 造成预成型体对流体的阻力增大, 沿厚度方向渗透率减小。在以往的文献中, 大多忽略了流体注射压力对渗透率的影响<sup>[21-23]</sup>, 这与实际应用条件不相符, 造成模拟计算结果与试验结果存在较大的偏差<sup>[14, 16]</sup>。因此, 本文基于实际工艺条件, 测试流体在一定注射压力下厚度方向的渗透率, 分析注射压力对厚度方向渗透率的影响, 提出变注射压力条件下厚度方向渗透率预测模型。

本文选取玻璃纤维增强树脂复合材料多轴向无屈曲织物(Non-crimp fabric, NCF)和斜纹织物(Woven fabric, WF)作为研究对象, 对织物的压缩响应行为和重力、变注射压力驱动下预成型体的渗透特性进行探究。首先对两种纤维预成型体的压缩响应行为进行了实验研究, 并建立描述该行为的数学模型。其次, 测试在重力驱动下、变注射压力下纤维预成型体厚度方向的渗透率  $K_z$ 。最后, 基于预成型体压缩响应数学模型、厚度方向渗透率与注射压力的关系, 对 Kozeny-Carman 公式进行修正, 提出了变注射压力条件下的  $K_z$  预测模型, 并与实验结果进行对比。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 原材料

**增强材料:** 玻璃纤维多轴向无屈曲织物(NCF), 织物的结构形式如图 1(a)所示, 玻璃纤维斜纹机织物(WF)织物的结构形式如图 1(b)所示。

**测试流体:** 环氧树脂、玉米糖浆和硅油三种流体粘度随温度变化曲线如图 2 所示, 考虑到硅油黏度随温度变化较小, 最终决定选择硅油为测试流体。

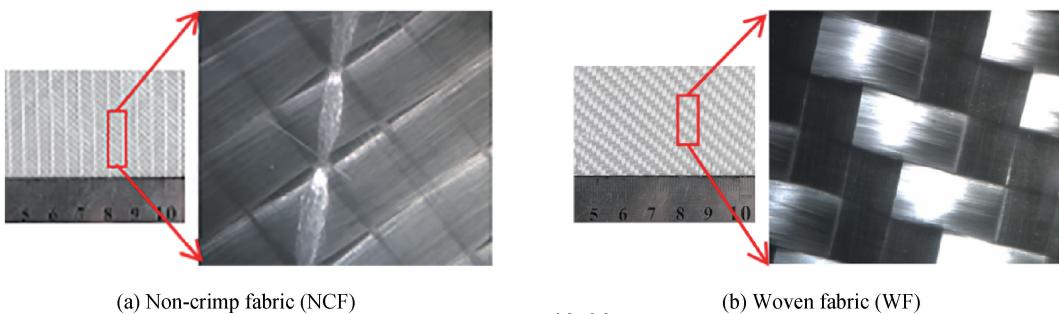


图 1 玻璃纤维多轴向无屈曲织物(NCF)与玻璃纤维斜纹机织物(WF)外观图及局部放大图

Fig. 1 Appearance and partial enlargement of non-crimp fabric (NCF) and woven fabric (WF)

表 1 多轴向无屈曲织物(NCF)和斜纹机织物(WF)渗透率测试的相关参数

Table 1 Related parameters of non-crimp fabric(NCF) and woven fabric(WF) in permeability test

Name	Type	Areal density/(g·m <sup>-2</sup> )	Volume density/(kg·m <sup>-3</sup> )	Manufacturer
NCF	[45°/90°/0°/45°]	444	2 550	Saertex
WF	2/2 Twill	295	2 550	Hexcel
Silicone oil	PMX-200, 0.1 Pa·s	—	960	Dow corning corporation

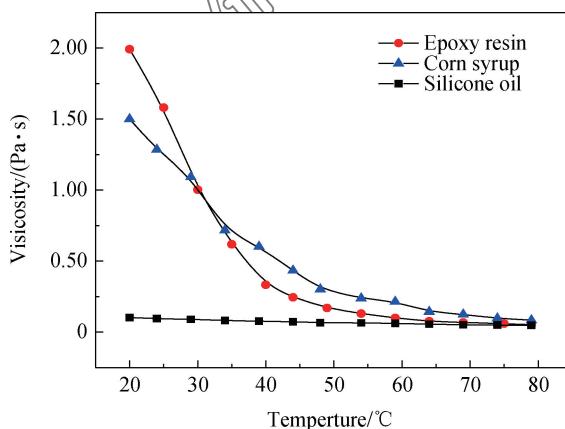


图 2 环氧树脂、玉米糖浆和硅油随温度变化的动态黏度曲线

Fig. 2 Dynamic viscosity curves of epoxy resin, corn syrup and silicone oil at different temperatures

## 1.2 压缩实验

纤维机织物和非编织物的压缩行为已经得到广泛的研究,许多研究表明,纤维的压缩行为与纤维织物的结构密切相关。Cai 和 Gutowsk<sup>[24]</sup>将纤维看作密实排布的非线弹性纤维网络,其中纤维与纤维之间看作多点接触的弯曲梁。根据弯曲梁理论进行建模,纤维的几何结构受到压实作用,得出如下半解析式数学表达式:

$$\sigma = A_s \frac{\sqrt{\frac{V_f}{V_0}} - 1}{\left[ \sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right]^4} \quad (1)$$

其中:  $A_s$  为表征纤维弹性性质的常数;  $V_a$  为理论

最大纤维体积分数;  $V_0$  为初始纤维体积分数,并且假定当时  $V_f = V_0$ ,  $\sigma = 0$ 。

纤维体积分数的数学表达式为

$$V_f = \frac{n\epsilon}{\rho h} \quad (2)$$

式中:  $n$  为纤维织物的层数;  $\epsilon$  为玻璃纤维织物的面密度( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $\rho$  为纤维织物的体积密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $h$  为纤维预成型体厚度( $\text{m}$ )。

压缩实验装置为自制钢制平板夹具,如图 3 所示。纤维织物裁成  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  正方形试样,其中 NCF 的铺层数为 11 层, WF 铺层数为 16 层,每种纤维织物压缩试样各 5 个。首先将压缩试样在道康宁 PMX-200 0.1 Pa·s 硅油中浸渍 15 min,随后把试样放置在刚性滤网上静置 5 min 排出过多的硅油。将试样放在压缩夹具中间,上压盘以 2 mm/min 下降,直至初始压力为 5 N,再以 1 mm/min 的速度下降,将试样压缩到目标厚度 3 mm 后停止加载。

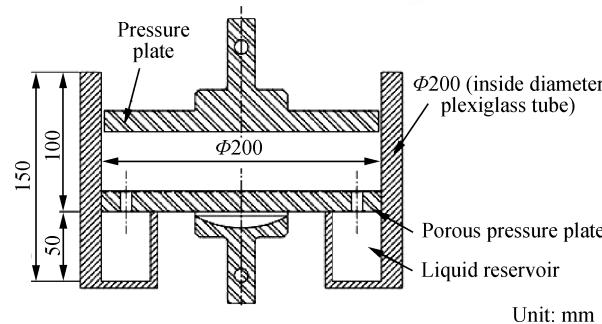


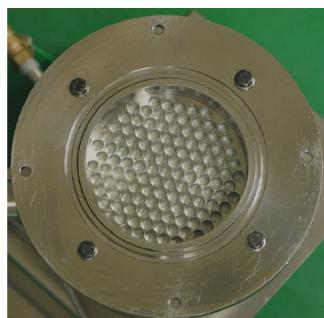
图 3 压缩实验装置

Fig. 3 Compression experiment device

通过记录万能试验机(RGM-4030, 深圳瑞格尔技术服务有限公司)横梁对试样施加压力来考察纤维预成型体在湿态下的可压缩性。压缩实验过程中, 记录压盘下降的位移变化  $\Delta H$ , 以及载荷值  $P_f = \sigma$ 。计算得出随着压缩强度的增大, 2 种织物湿态下的纤维体积分数变化。当压缩厚度为 3 mm 时, 理论纤维体积分数为 62%。

### 1.3 渗透率实验

一维 Darcy 定律的数学表达式为



(a) Internal structure of equipment

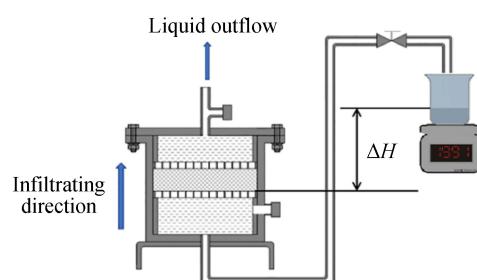
$$\mu = \frac{Q}{A} = \frac{K}{\eta} \frac{\Delta P}{L} \quad (3)$$

进一步变换得出渗透率  $K$ :

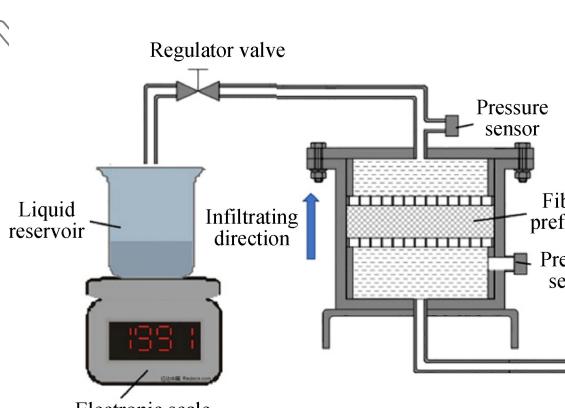
$$K = \frac{\eta}{A} \frac{QL}{\Delta P} \quad (4)$$

式中:  $\mu$  为流体流速 (m/s);  $Q$  为体积流速 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $A$  为模腔横截面积 ( $\text{m}^2$ );  $K$  为渗透率张量 ( $\text{m}^2$ );  $\eta$  为流体黏度 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );  $\Delta P$  为流体流过预成型体厚度方向的压力差 (Pa);  $L$  为预成型体厚度 (m)。

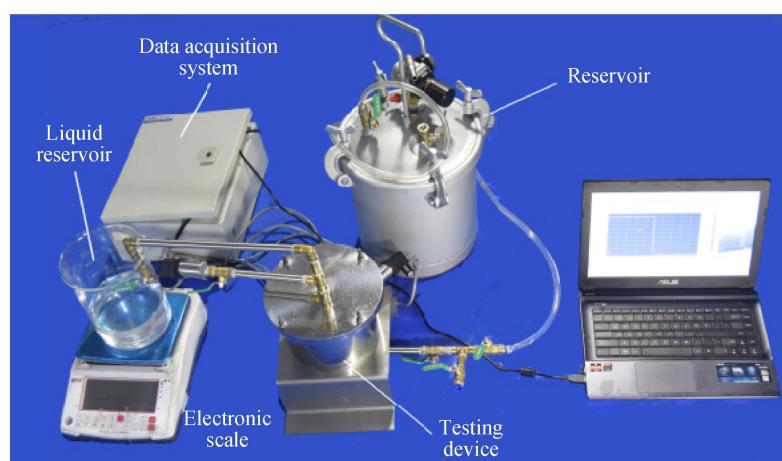
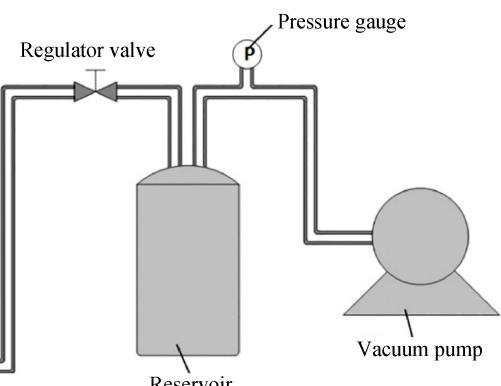
厚度方向渗透率测试装置和装置模腔内部结构



(b) Saturated flow driven by gravity



(c) Saturated injection at constant pressure



(d) Diagram of the experimental process

图 4 厚度方向渗透率测试装置

Fig. 4 Through-thickness permeability testing device

如图 4 所示。图 4(a) 为渗透率测试设备内部结构, 两块多孔板将模腔分为 3 个分配室, 多孔板孔径为 7.5 mm, 远大于预成型体内空隙的尺寸, 因此认为多孔板对流体没有阻碍作用。首先将纤维织物裁剪成直径为 114 mm(设备模腔内径  $D=114$  mm) 的圆形片, 然后将预成型体铺放置在两个多孔板中间, 使用定厚环确定厚度, 达到目标纤维体积分数, 密闭模腔准备测试。

本文选用两种类型的织物, 分别对不同纤维体积分数下预成型体厚度方向饱和渗透率  $K_z$  进行测试。为了研究注射压力对厚度方向渗透率的影响, 首先测试较小注射压力(忽略注射压力的影响)条件下  $K_z$  值。由于设备难以持续稳定的提供较小的注射压力, 因此, 实验选用重力驱动的方法进行微小注射压力下的  $K_z$  测试, 方法如图 4(b) 所示, 将储液罐置于目标高度  $\Delta H$ , 使流体在重力的驱动下从预成型体的下表面向上表面浸渍。高度差  $\Delta H$  设定为 0.4 m, 理论上浸渍预成型体的入口注射压力为 3 800 Pa, 出口压力为 0 Pa, 远小于纤维预成型体的压实力, 因此, 认为重力驱动下产生的注射压力可忽略不计。记录预成型体上下表面的压力差, 称量该时间段渗透率测试装置上端排出的硅油质量, 计算平均体积流速, 根据 Darcy 定律计算得到  $K_z$ 。重复测试 3 次, 取平均值。在图 4(c) 中, 恒压气源与压力罐相连, 提供稳定的注射压力。同理, 测试注射压力为 0.05 MPa、0.1 MPa、0.15 MPa、0.3 MPa 下的  $K_z$ 。图 4(d) 为实验测试过程图, 通过数据采集器采集预成型体上下表面的压力差, 电脑采集同一时间段的流体质量, 代入公式得出  $K_z$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纤维织物压实行为

不同种类的纤维织物物理性能不同, 在压缩载荷下会造成纤维的堆积状态和变形方式的不同。图 5(a)、5(b) 分别为 NCF 织物和 WF 织物预成型体的饱和(湿态)压缩性能测试结果与拟合结果。实验结果与式(1)建立的模型吻合良好。可以看出, NCF 织物和 WF 织物分别在外加载荷为 671 kPa 和 139 kPa 纤维体积分数达到 62%, 表明 WF 织物比 NCF 织物更容易被压缩, 原因是 WF 织物的堆积密度高于 NCF 织物, 使在压缩过程中 WF 织物纤维间的滑移贴合更为紧密, 最终在较小的外加载荷下获得较高的纤维体积分数。

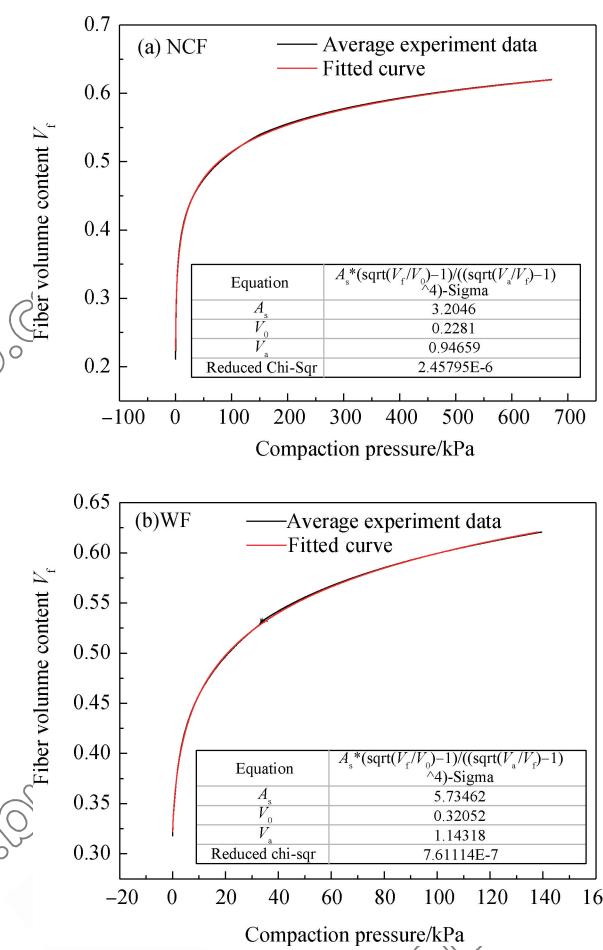


图 5 无屈曲织物(NCF)和斜纹织物(WF)预成型体

在饱和状态下的压缩响应曲线与拟合曲线

Fig. 5 Compression response and fitting curves of non-crimp fabric(NCF) and woven fabric(WF) preforms at saturation state

如图 5(a) 所示, 压缩前期在较小的压力下, 纤维体积分数迅速增加, 后期则增加缓慢。NCF 织物预成型体在压缩过程中, 层间间隙最先被压实, 因此纤维体积分数在较小的压力下迅速增加。当纤维体积分数高于 45% 时, 主要通过层与层之间的纤维嵌套提高纤维体积分数。NCF 织物的子铺层为  $[45^\circ/90^\circ/0^\circ/45^\circ]$ , 在压缩过程中各个子层的层与层之间接触面的纤维束同为  $45^\circ$  方向, 当存在法向压力时, 纤维束之间发生滑移, 并在临近的纤维束间间隙发生嵌套。随着进一步压缩, 位于子层中间的  $90^\circ/0^\circ$  与相邻的  $45^\circ$  层存在一定的角度, 层与层之间纤维可以看作相互接触的弯曲梁, 在法向压实用下纤维束交叉点首先被压实, 使纤维滑移嵌套难以发生, 因此, 随着压力的增大, 纤维体积分数增加缓慢。

如图 5(b) 所示, 与 NCF 织物不同, WF 织物

更容易在较小的压力下得到更高的纤维体积分数。这是由于 WF 织物本身面密度较小, 纤维束没有经纱束缚, 织物刚性比 NCF 织物小很多, 在浸渍饱和状态下层间空隙较小, 起始纤维体积分数较高, 随着进一步压缩, 消除层间空隙, 极易达到较高的纤维体积分数。

## 2.2 织物预成型体沿厚度方向渗透特性

### 2.2.1 纤维体积分数对渗透率的影响

流体在预成型体中的流动主要包括纤维束间流动和纤维束内流动。在纤维体积分数较小时, 纤维束间空隙较大, 大部分流体通过束间渗透, 阻力较小。随着纤维分数增大, 层与层间隙减小, 纤维束之间发生滑移嵌套, 束间空隙减小, 纤维束间流动减小, 阻力增大。根据 Kozeny-Carman<sup>[25]</sup>公式, 预成型体沿厚度方向的渗透率可以表示为

$$K_z = C \cdot \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2} \quad (5)$$

其中:  $C$  为常数,  $V_f$  为纤维体积分数;  $K_z$  为沿厚度方向渗透率。

如图 6 所示为重力驱动下  $K_z$  的实验数据, 实验结果与 Kozeny-Carman 公式具有较高的拟合精度。随着纤维体积分数的增大,  $K_z$  呈下降趋势。由于  $V_f$  增大, 纤维束间空隙减小, 纤维排布密实, 对流体的渗流阻力增大。

对比 NCF 织物和 WF 织物在相同条件下的  $K_z$  值, 发现相同纤维体积分数下 NCF 织物的  $K_z$  值远大于 WF 织物。如图 1 所示的织物形貌, NCF 的束间空隙较大, 不如 WF 纤维穿插排布密实, 因此造成在相同纤维体积分数条件下, 流体更容易在 NCF 织物中渗透。

不同织物纤维体积分数  $V_f$  对  $K_z$  的影响如图 7 所示。可见, 当  $V_f$  小于 50% 时, WF 织物的  $K_z$  值降低幅度小于 NCF 织物, 当  $V_f$  大于 54% 时, 两者的降低幅度基本一致。这是由于随着  $V_f$  的增大, NCF 织物纤维束之间发生滑移和嵌套, 层间间隙和束内间隙明显减小, 导致  $K_z$  大幅降低。WF 织物初始厚度方向层间间隙较小, 并且  $K_z$  的初值较小, 因此在归一化曲线上表现为  $K_z$  降低幅度较小。在  $V_f$  较高时, 预成型体中束内间隙和层间间隙变化较小, 主要发生纤维束的压缩和重新排布,  $K_z$  下降幅度减小, 因此两者的下降幅度基本一致。

### 2.2.2 注射压力对纤维预成型体渗透率的影响

LCM 工艺中, 直接在模具中铺放纤维预成型

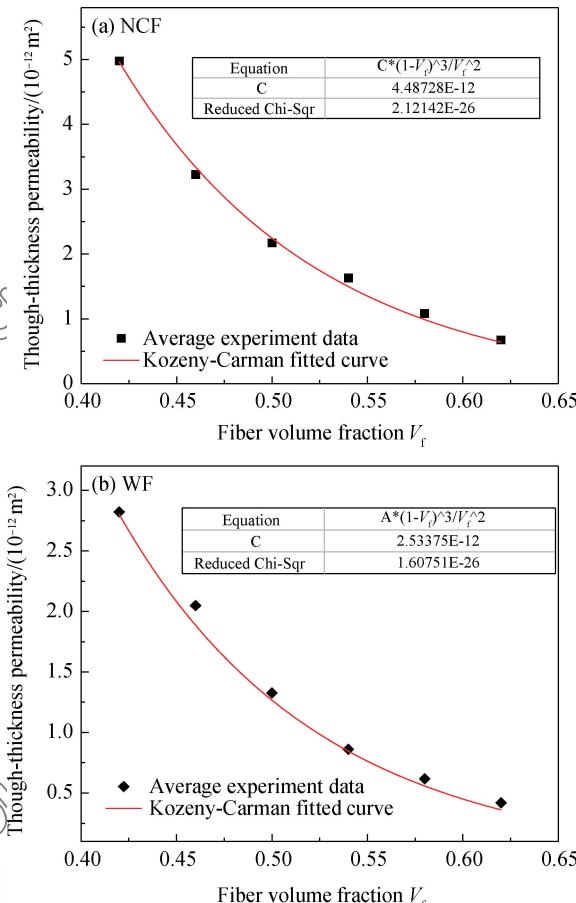


图 6 不同纤维体积分数的 NCF 和 WF 预成型体在重力驱动下沿厚度方向的渗透率  $K_z$  与拟合曲线

Fig. 6 Through-thickness permeability  $K_z$  and fitting curves of NCF and WF preforms with different fiber volume fractions under the action of gravity

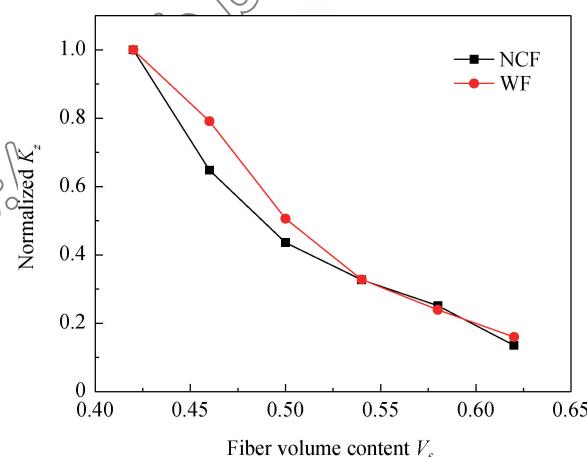


图 7 重力驱动下纤维体积分数对 NCF 和 WF 预成型体厚度方向渗透率  $K_z$  的影响

Fig. 7 Influence of  $V_f$  on through-thickness permeability  $K_z$  of NCF and WF preforms under the action of gravity

体, 厚度方向不存在增强作用, 在受到外力时, 相

对于织物的经纬方向更易于压缩, 属于可压缩性多孔介质。因此, 采用外压注射液体成型时, 会导致纤维预成型体被压缩变形, 预成型体纤维体积分数增大, 从而使树脂在其流动时需要克服更大的阻力。由于注射压力对预成型体的纤维体积分数影响无法用实验直接测试, 因此采取注射压力对  $K_z$  的间接影响进行表征。

本文通过对 NCF 织物、WF 织物在 0.05 MPa、0.1 MPa、0.15 MPa、0.3 MPa 不同注射压力下的厚度方向表观渗透率进行实验测试, 验证上述结论, 结果如图 8 所示。可知, 随着注射压力的增大,  $K_z$  呈下降趋势。注射压力对纤维体积分数为 42%、46%、50% 的  $K_z$  影响较大, 对纤维体积分数为 54%、58%、62% 的  $K_z$  影响较小。

由 2.1 节预成型体的压实响应曲线可知, 纤维体积分数  $V_f$  越大, 纤维织物越难以被压缩。在  $V_f$  较小时, 纤维排布疏松, 流体对预成型体的压缩较

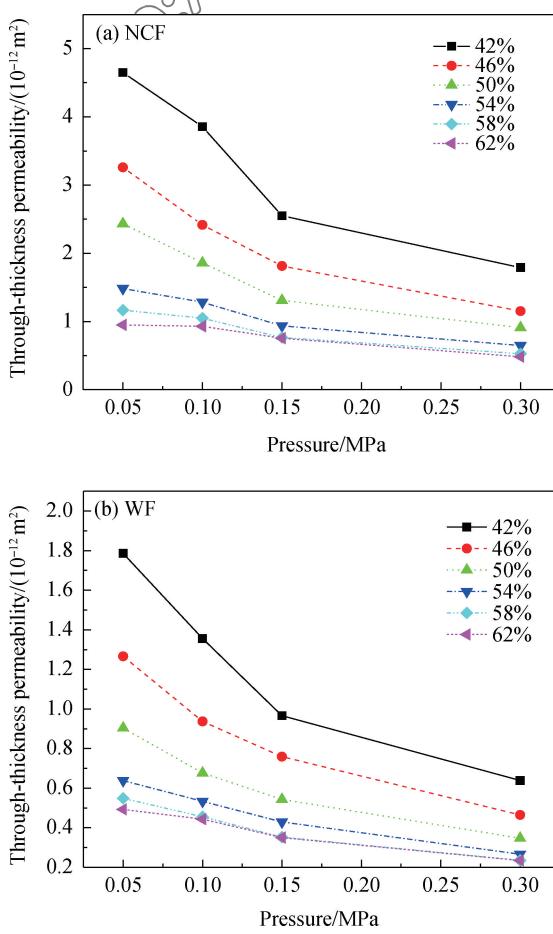


图 8 NCF 和 WF 预成型体厚度方向表观渗透率  $K_z$  随注射压力的变化

Fig. 8 Change of through-thickness permeability  $K_z$  of NCF and WF preforms with injection pressure

为容易, 因此, 流体作用下预成型体  $V_f$  增加幅度较大,  $K_z$  进一步显著降低。在高纤维体积分数时, 预成型体排布紧密, 本身难以被压缩, 流体对预成型体的压缩对  $V_f$  影响较小, 因此, 高纤维体积分数下,  $K_z$  减小缓慢。

图 9 为注射压力对 NCF、WF 预成型体  $K_z$  的影响。可知, 当预成型体  $V_f$  为 42% 时, 随着注射压力增大, 对预成型体的压缩作用增大, 纤维体积分数增大, 孔隙率降低, 因此, NCF 织物和 WF 织物  $K_z$  减小。但是随注射压力的增大, NCF 织物的  $K_z$  值降低幅度小于 WF 织物, 显示出 NCF 织物具有较大的刚度, 更难压缩, 与 2.1 中的结论一致。

本文对 0.05 MPa、0.1 MPa、0.15 MPa、0.3 MPa 注射压力下的  $K_z$  值进行推导。在重力驱动下渗透率(认为注射压力  $P=0$  MPa)满足 Kozeny-Carman 公式, 在注射压力条件下, 流体对预成型体压缩, 进一步降低纤维体积分数。因此, 根据注射压力对  $V_f$  的影响对 Kozeny-Carman 公式进行修正, 建立注射压力条件下的厚度方向渗透率模型。根据 Kozeny-Carman 公式(5)可知, 当注射压力  $P=0$  MPa 时, 公式中 C 为常量。在注射压力条件下, 将注射导致纤维体积分数的增大因素考虑到模型中。流体在注射压力的条件下, 预成型体的受力情况如图 10 所示, 预成型体受到多孔板的压力  $\sigma$ 、流体压力  $P$ 。由 2.1 节预成型体的压实行行为可知, 压力  $\sigma$  与纤维体积分数  $V_f$  满足 Gutowski 的半经验表达式。因此, 可以认为厚度方向渗透率的计算公式是与流体压力  $P$ 、纤维体积分数  $V_f$ 、Kozeny-Carman 公式相关的函数关系式。因此,

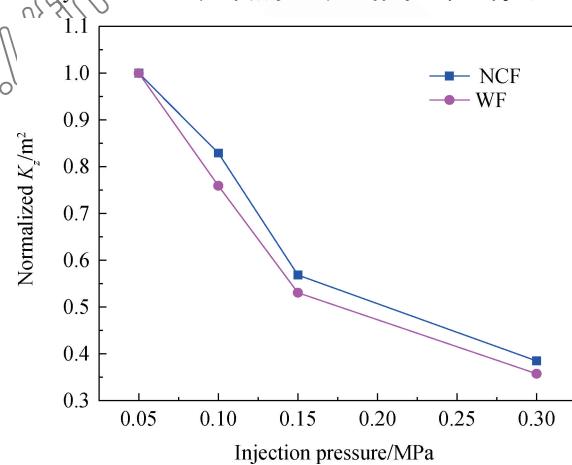


图 9 注射压力对 NCF 和 WF 预成型体  $K_z$  的影响( $V_f=42\%$ )

Fig. 9 Influence of injection pressure on  $K_z$  of NCF and WF preforms ( $V_f=42\%$ )

稳态压缩、流体压力造成  $K_z$  的变化可以用以下模型评估:

$$K_z = C(P, V_f) \cdot \frac{(1-V_f)^3}{V_f^2} \quad (6)$$

其中: 系数  $C(P, V_f)$  是与流体压力导致纤维体积分数变化的相关函数;  $V_f$  为纤维体积分数。在流体压力下, 预成型体受多孔板的压缩和流体压力两方面的作用力(见图 10), 因此, 可以认为  $C(P, V_f)$  是两者的叠加。由于注射压力  $P$  与  $K_z$  呈负相关, 因此,  $C(P, V_f)$  可以用以下函数关系表示:

$$C(P, V_f) = \frac{1}{a\sigma(V_f) + bP} \quad (7)$$

因此, 纤维织物在一定注射压力下沿厚度方向渗透率值, 能够被表达为与注射压力、纤维体积分数相关的预测模型:

$$K_z = \frac{1}{a\sigma(V_f) + bP} \cdot \frac{(1-V_f)^3}{V_f^2} \quad (8)$$

将式(8)与实验数据进行拟合(见图 11), 发现在纤维体积分数小于 58% 时,  $K_z$  预测模型能够准确预测实验结果。当纤维体积分数大于 58% 时,  $K_z$  趋于恒定。预测模型曲线出现较大偏差, 与实验结果不相符。因此, 预测模型能够准确预测 NCF 织物、WF 织物  $V_f$  小于 58% 的  $K_z$  值, 对于  $V_f$  大于 58%,  $K_z$  趋于恒定, 该模型则不适用。

研究了玻璃纤维增强树脂基复合材料液体成型过程中多轴向无屈曲织物(NCF), 玻璃纤维斜纹机织物(WF)的压实响应行为, 在重力驱动下、变注射压力下厚度方向的渗透率, 并提出变注射压力下厚度方向渗透率预测模型。

### 3 结 论

研究了玻璃纤维增强树脂基复合材料液体成型过程中多轴向无屈曲织物(NCF), 玻璃纤维斜纹机织物(WF)的压实响应行为, 在重力驱动下、变注射压力下厚度方向的渗透率, 并提出变注射压力下厚度方向渗透率预测模型。

(1) 纤维增强树脂复合材料预成型体在压缩载荷下的响应方式与织物种类密切相关。WF 织物编织紧密, 易于滑移贴合, 在较低的压缩载荷下可获得较高的压缩纤维体积分数, 而 NCF 表现出较高的刚度, 相对难以压缩。实验结果与 Gutowski 的半经验解析式结果吻合较好。

(2) 在重力驱动下, 预成型体厚度方向渗透率随着纤维体积分数的增大而减小, 实验结果与 Kozeny-Carman 公式吻合。相同纤维体积分数下, NCF 织物的渗透率显著大于 WF 织物的渗透率。

(3) 在一定注射压力条件下, 流体对预成型体厚度方向产生压缩作用。随着注射压力增大, 厚度方向渗透率降低。当预成型体纤维体积分数低时, 注射压力使纤维体积分数增大幅度较大, 从而对厚度方向渗透率影响较大, 反之对纤维体积分数影响较小, 厚度方向渗透率影响较小。对厚度方向渗透率影响较大, 反之则较小。通过对预成型体的压缩受力分析, 本文提出了与注射压力、纤维体积分数相关的厚度方向渗透率预测模型, 与实验结果的比较发现, 当纤维体积分数小于 58% 时, 该

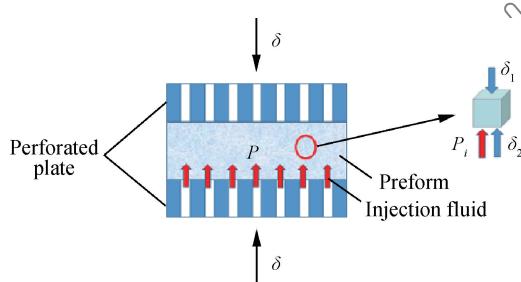


图 10 纤维预成型体在装置中的受力分析

Fig. 10 Force analysis of fiber preform in the device

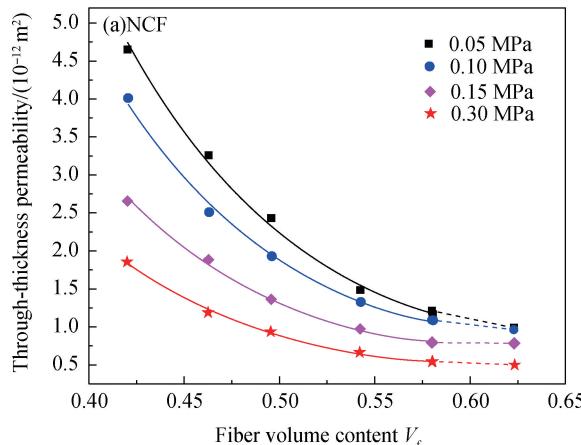


图 11 NCF 和 WF 预成型体  $K_z$  实验数据与公式(8)拟合结果

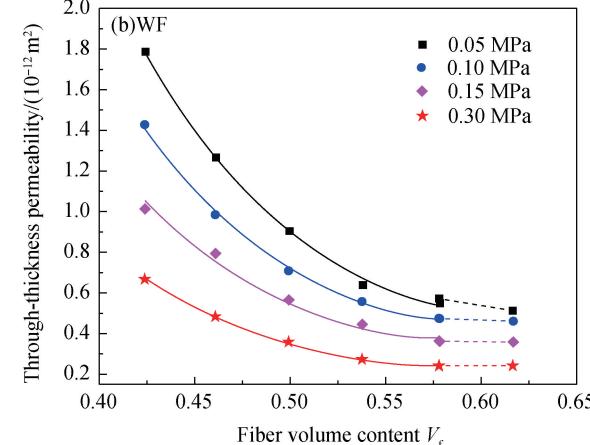


Fig. 11 Experimental and fitted results by formula (8) of  $K_z$  for NCF and WF preforms

模型的预测结果与实验结果吻合,而当纤维分数大于58%时,厚度方向渗透率趋于恒定,该模型则不适用。

## 参考文献:

- [1] 邢丽英,蒋诗才,周正刚.先进树脂基复合材料制造技术进展[J].复合材料学报,2013,30(2):1-9.
- XING Liying, JIANG Shicai, ZHOU Zhenggang. Progress in manufacturing technology of advanced resin matrix composites[J]. Journal of Composites, 2013, 30 (2): 1-9 (in Chinese).
- [2] VERNET N, RUIZ E, ADVANI S, et al. Experimental determination of the permeability of engineering textiles; Benchmark II[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2014, 61(7): 172-184.
- [3] IMBERT M, COMAS CARDONA S, ABISSET-CHAVANNE E, et al. Experimental investigation of intra-tow fluid storage mechanisms in dual-scale fiber reinforcements [J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2014, 107: 70-82.
- [4] NAIK N K, SIRISHA M, INANI A. Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 65(5): 22-40.
- [5] YUN M, CARELLA T, SIMACEK P, et al. Stochastic modeling of through the thickness permeability variation in a fabric and its effect on void formation during vacuum assisted resin transfer molding[J]. Composites Science & Technology, 2017, 149: 100-107.
- [6] XIAO X, ENDRUWEIT A, ZENG X, et al. Through-thickness permeability study of orthogonal and angle-interlock woven fabrics[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50 (3): 1257-1266.
- [7] 李伟东,刘刚,安学锋,等.  $z$ 向流动RTM工艺树脂的流动浸润行为[J].复合材料学报,2013,30(6):82-89.
- LI Weidong, LIU Gang, AN Xuefeng, et al. Flow impregnation behavior of resin in  $Z$  direction for RTM[J]. Journal of Composites, 2013, 30(6): 82-89 (in Chinese).
- [8] 张娜,赵子为,刘春太,等.风力发电机叶片用玻璃纤维织物的渗透率[J].复合材料学报,2013,30(4):245-249.
- ZHANG Na, ZHAO Ziwei, LIU Chuntai, et al. Permeability of glass fabric for wind turbine blades[J]. Journal of Composites, 2013, 30 (4): 245-249 (in Chinese).
- [9] 邓育文,王继辉,高国强,等. LCM工艺增强材料横向渗透率测量研究[J].武汉理工大学学报,2006,28(1):15-17.
- DENG Yuwen, WANG Jihui, GAO Guoqiang, et al. Transverse permeability measurement of reinforcement in LCM process[J]. Journal of Wuhan University of Technolog. 2006, 28(1): 15-17 (in Chinese).
- [10] 张盛,祖磊,王继辉,等. VIMP工艺中纤维增强体  $Z$  向渗透性分析[C]//玻璃钢/复合材料学术交流会,2014.
- ZHANG Sheng, ZU Lei, WANG Jihui, et al.  $Z$ -direction permeability of fiber reinforcement in VIMP process[C]//GRP/Composite Academic Exchanges, 2014 (in Chinese).
- [11] 李永静,晏石林,严飞,等.注射条件对LCM工艺非饱和流动特性影响[J].复合材料学报,2016,33(11):2688-2697.
- LI Yongjing, YAN Shilin, YAN Fei, et al. Influence of injection conditions on the unsaturated flow characteristics of LCM process[J]. Journal of Composites, 2016, 33 (11): 2688-2697 (in Chinese).
- [12] 倪爱清,王继辉,朱以文.复合材料液体模塑成型工艺中预成型体渗透率张量的数值预测[J].复合材料学报,2007,24 (6): 50-56.
- NI Aiqing, WANG Jihui, ZHU Yiwen. Numerical prediction of permeability of preformed body in liquid composite molding [J]. Composite Journal, 2007, 24 (6): 50-56 (in Chinese).
- [13] AHN S H, LEE W I, SPRINGER G S. Measurement of the three-dimensional permeability of fiber preforms using embedded fiber optic sensors[J]. Journal of Composite Materials, 1995, 29(6): 714-733.
- [14] KLUNKER F, DANZI M, ERMANNI P. Fiber deformation as a result of fluid injection: Modeling and validation in the case of saturated permeability measurements in through thickness direction[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 49(8): 1091-1105.
- [15] COMAS CARDONA S, BINETRUY C, KRAWCZAK P. Unidirectional compression of fibre reinforcements: Part 2: A continuous permeability tensor measurement[J]. Composites Science & Technology, 2014, 67(3): 638-645.
- [16] ENDRUWEIT A, LUTHY T, ERMANNI P. Investigation of the influence of textile compression on the out-of-plane permeability of a bidirectional glass fiber fabric[J]. Polymer Composites, 2002, 23(4): 538-554.
- [17] XIAO X, ENDRUWEIT A, ZENG X, et al. Through-thickness permeability study of orthogonal and angle-interlock woven fabrics[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50 (3): 1257-1266.
- [18] LI M, GU Y, ZHANG Z, et al. A simple method for the measurement of compaction and corresponding transverse permeability of composite prepgres[J]. Polymer Composites, 2007, 28(1): 61-70.

- [19] OUAGNE P, BRÉARD J. Continuous transverse permeability of fibrous media[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2010, 41(1): 22-28.
- [20] ALHUSSEIN H, UMER R, SWERY E, et al. In-plane and through thickness permeability characterization of 3D woven reinforcementsendruweit[C]//The 20th Internation Conference on Composite Materials. Copenhogen, Elinor Swery, 2015.
- [21] 刘刚, 张朋, 李伟东, 等. 结构化增韧层增韧 RTM 复合材料预成型体的渗透特性[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 586-593.
- LIU Gang, ZHANG Peng, LI Weidong, et al. Permeability characteristics of RTM composites preform with structural toughening[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 32 (2): 586-593 (in Chinese).
- [22] 钟勇, 肖加余, 尹笃林, 等. VIMP 中结构拐角对纤维预成型体渗透特性的影响 [J]. 复合材料学报, 2015, 32(1): 217-226.
- ZHONG Yong, XIAO Jiayu, YIN Dulin, et al. Effect of structural corner on permeability of fiber preform in VIMP [J]. Journal of Composites, 2015, 32 (1): 217-226 (in Chinese).
- [23] 金天国, 魏雅君, 杨波, 等. 预成型体渗透率预测及其受压缩变形的影响[J]. 复合材料学报, 2015, 32(3): 840-847.
- JIN Tianguo, WEI Yajun, YANG Bo, et al. Prediction of permeability of preform and its effect on compression deformation[J]. Journal of Composites, 2015, 32 (3): 840-847 (in Chinese).
- [24] CAI Z, GUTOWSKI T, ALLEN S. Winding and consolidation analysis for cylindrical composite structures[J]. Journal of Composite Materials, 1992, 26(9): 1374-1399.
- [25] SCHOLZ S, JR J W G, HEIDER D. Measurement of transverse permeability using gaseous and liquid flow[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2007, 38 (9): 2034-2040.