

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170802906

玻璃纤维织物在剪切变形作用下的渗透率

杨文权^{1,2}, 蒋金华^{1,2}, 陈南梁^{1,2}

(1. 东华大学 产业用纺织品教育部工程研究中心, 上海 201620; 2. 东华大学 纺织学院, 上海 201620)

摘要 为研究织物剪切变形对纤维增强材料渗透行为的影响,采用真空导入模塑工艺测试玻璃纤维织物预成型体的表观渗透率。结果表明:剪切变形降低了预成型体的渗透率;对于斜纹织物,不同的剪切方向使纤维增强材料的渗透率呈现一定的差异,在剪切角为 10° 时,异向剪切的渗透率较同向剪切高出约26%;对于不同织物组织,剪切变形下的渗透率差异显著;一般情况下,随着剪切角的增大纤维增强材料的渗透率逐渐下降,当织物剪切 30° 后,其渗透率平均下降约50%,但平纹织物在剪切角为 10° 时,渗透率却略有上升;剪切变形引起了织物整体渗透行为的改变,流动前峰的形状由一条平行于纬纱的直线逐渐变化成倾斜的直线。

关键词 玻璃纤维织物;真空导入模塑工艺;渗透率;剪切变形;织物组织;流动前峰

中图分类号:TB 332; TQ 327 文献标志码:A

Permeability of glass fiber fabrics under shear deformation

YANG Wenquan^{1,2}, JIANG Jinhua^{1,2}, CHEN Nanliang^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Technical Textiles, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract In order to study the influence of shear deformation of the fabric on the permeability of fiber reinforced material, the apparent permeability of glass fiber fabric preform was tested by vacuum infusion molding process. The results indicated that shear deformation reduces the permeability of preform. For twill fabric, different shear directions make the permeability of fiber reinforced material different. When the shear direction does not coincide with the twill line direction, the permeability of fabrics sheared by 10° is about 26% higher. Different fabric weave differs significantly in permeability. In general, the permeability of fiber reinforced material decreases as shearing angle increases. The permeability of fabric declines about 50% on average as its shearing angle goes up to 30° . However, for plain weave fabric, the permeability of fabric being sheared by 10° rises slightly. The shear deformation causes change of the overall permeability of fabric, and the shape of the flow front varies gradually from a straight line parallel to the weft yarn to an inclined straight line.

Keywords glass fiber fabric; vacuum infusion molding process; permeability; shear deformation; fabric weave; resin flow front

真空导入模塑工艺(VIMP)是从树脂传递模塑成型(RTM)工艺中衍生出的一种高效复合材料成型技术,其利用真空负压将树脂吸入模腔并完成对纤维增强体的浸润,具有环保、易操作、低成本、可设计性强等优点,广泛应用于航天航空、汽车制造、建筑工程和风电叶片等领域^[1-2]。与传统的RTM工

艺相比,VIMP没有上模,不能控制增强材料的厚度,但可依靠真空袋膜在大气作用下将织物压紧,达到较高的纤维体积分数^[3]。此外,VIMP更易排出纤维增强体中的空气,从而减少干斑和疵点的产生;VIMP不受构件尺寸的限制,尤其适合制备大尺寸构件。在VIMP、RTM等各类成型过程中,渗透率是

收稿日期:2017-08-15 修回日期:2017-12-05

基金项目:国家自然科学基金项目(11472077);国家重点研发计划项目(2016YFB0303300);中央高校基本科研业务专项资金资助项目(2232018G-06)

第一作者简介:杨文权(1992—),男,硕士生。主要研究方向为复合材料渗透率。

通信作者:蒋金华, E-mail: jiangjinhua@dhu.edu.cn。

表征树脂在织物或预成型体中流动快慢的物理参数。

渗透率的大小主要由纤维体积分数、纤维取向、织物组织等因素决定, 不仅直接决定了复合材料的成型周期, 而且对纤维增强体的浸润效果有很大的影响^[4-5], 因此, 充分了解织物的渗透率意义重大。然而, 由于构件形状复杂多样, 纤维增强体在某些部位不可避免地受到剪切作用, 特别是在预成型体存在球面或曲面的情形中, 此时, 剪切变形可导致局部纤维或织物重新排列和分布, 增加了树脂浸润的复杂程度。田正刚等^[6]研究了不同剪切角度下编织纤维毡的主轴渗透比和主轴方向, 并建立了理论预测模型。杨波等^[7]通过建立正交单胞几何模型, 构造了数值求解树脂流动控制方程的高分辨 TVD 格式。Demaría 等^[8]通过研究表明, 织物发生剪切变形后的渗透率变化不仅可由纤维体积分数的改变而引起, 织物几何结构的改变也是一个重要的影响因素。Endruweit 等^[9]将纱线看作圆柱体构建织物几何模型, 并推算出主渗透率和各参数之间的等式关系。这些研究大都以建模为主, 未考虑剪切变形后纱线形态的变化, 通常和实际情况存在一定的差异。本文采用单向法测试了同种织物在不同剪切角度下的渗透率, 并比较了不同织物组织对纤维预成型体渗透率的影响规律, 揭示了纤维增强材料在剪切作用下树脂流动前峰的形状变化, 以为复合材料的成型及其工艺设计提供理论参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

所用增强材料为玻璃纤维平纹布、玻璃纤维斜纹布, 斜纹布为 2 上 2 下斜纹组织。除组织不同外, 2 种织物的其他参数均相同: 经纬密为 5 根/cm, 经纬纱线密度为 312 tex, 面密度为 300 g/m²。每次实验均采用同种织物按同一方向铺层堆叠, 实验设置层数为 6 层。为方便测量织物厚度, 实验时在织物与真空袋之间加上 1 块厚度为 2 mm 的硬质聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 薄板, 避免实验过程中真空袋随着织物表面变得凹凸不平而影响织物厚度测量的准确性。图 1 示出渗透率测试原理示意图。

1.2 可视化流动实验

实验装置为自行设计的玻璃平板模具, 如图 2 所示。根据实验要求选择不同织物组织, 将其剪切一定的角度 α 、12 cm × 40 cm 的标准试样, 所有实验均铺放 6 层试样, 铺放织物时需小心谨慎以防止织物自动剪切。树脂的流动方向均垂直于纬纱方向,

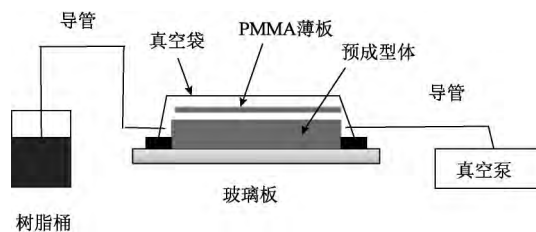


图 1 渗透率测试原理示意图

Fig. 1 Schematic principle of permeability test

如图 3 所示。实验选用透明的真空袋密封织物, 以便观察腔内树脂的流动情况。织物密封后进行抽真空处理, 检查气密性后方可继续实验。



图 2 实验装置图

Fig. 2 Test device

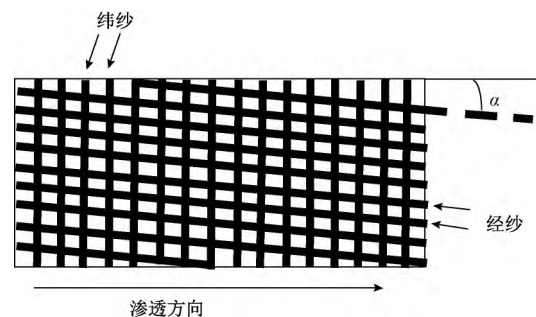


图 3 单向流动实验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of unidirectional flow test

实验采用黏度稳定的进口硅油代替树脂, 在常温下硅油黏度稳定在 350 mPa·s 左右, 避免了环境温度对实验的干扰, 且易于清洗。实验在常温下进行, 温度为 (25 ± 5) °C, 每隔 3 min 记录硅油流动前峰的位置, 每次实验共记录 10 个位置。

1.3 实验方法及原理

相关研究结果^[10]表明, 单向法测试渗透率较径向法更准确, 其测试结果离散度较小, 而径向法则适合用来确定主渗透率的方向, 因此, 本文实验选择用单向法测定纤维增强材料的表观渗透率, 即树脂从纤维铺层的左端线性注入, 在纤维铺层的右端抽真空排除空气。VIMP 中假设树脂为不可压缩流体, 预成型体为多孔介质, 则树脂在预成型体中的流动过程服从 Darcy 定律。只考虑一维流动情形, 由 Darcy 定律可推出树脂单向流动方程:

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

$$\frac{dl}{dt} = -\frac{K\Delta P}{\mu L\varphi} \quad (2)$$

式中: ∇P 为流体在长度 l (m) 上的压强降, MPa; μ 为流体黏度, Pa·s; l 为 t 时刻树脂流动前峰位置, m; ΔP 为 2 注射口和流动前峰的压强差; φ 为预成型体的孔隙率, %; K 为渗透率, m^2 , 反映流体在多孔介质中流动的难易程度。

假设 ΔP 恒定, 在 $t = 0, l = 0$ 时对式 (2) 积分可得:

$$l^2 = \frac{2K\Delta P}{\mu\varphi} t \quad (3)$$

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (4)$$

式中: P_{in} 为注入口压力, MPa; P_{out} 为排气出口压力, MPa。本文条件下压强差为 0.1 MPa。

通过记录的 t 时刻与其所对应的流动前峰位置 l , 以 l^2 为纵坐标、 t 为横坐标作图, 再通过线性拟合得出直线的斜率 k , 最后计算出渗透率:

$$K = \frac{k\mu\varphi}{2\Delta P} \quad (5)$$

从式 (5) 可看出, 预成型体的孔隙率 φ 直接影响 K 值的大小, 而其又直接由增强材料的纤维体积分数决定:

$$\varphi = 1 - \frac{V_f}{V} \quad (6)$$

式中: V_f 为纤维的体积, m^3 ; V 为模腔的体积, m^3 。

纤维的体积和模腔的体积可分别写为:

$$V_f = \frac{n\rho S}{\rho_f \sin\alpha} \quad (7)$$

$$V = Sh \quad (8)$$

式中: n 为铺层层数; ρ 为织物面密度, g/cm^2 ; S 为织物的表面积, m^2 ; ρ_f 为纤维的密度, g/cm^3 ; h 为真空状态下预成型体的厚度, m; α 为织物剪切角, $^\circ$ 。

综合式 (6) ~ (8) 可得:

$$\varphi = 1 - \frac{n\rho}{\rho_f h \sin\alpha} \quad (9)$$

2 结果与讨论

2.1 剪切角度对渗透率的影响

在已有的关于预成型体剪切变形作用下的渗透率研究中, 大多数的测试方式局限在平板铺层的径向流动测试。为方便对异形结构渗透率的模拟和生产工艺的优化, 本文选用斜纹织物并设置了 0° 、 10° 、 20° 和 30° 共 4 种剪切角度, 考察剪切作用对增强体渗透率的影响。斜纹织物为左斜纹,

剪切方向也向左, 即同向剪切。图 4 示出流动前峰位置 l 与时刻 t 的关系曲线。当 $t = 30$ min 时, 对应上述 3 种情况, 树脂分别流动至 31.8、27.0、24.1、18.6 cm 处。由此可见, 剪切变形的确阻碍了树脂在织物中的渗透流动。剪切角越大, 这种阻碍作用也越明显。

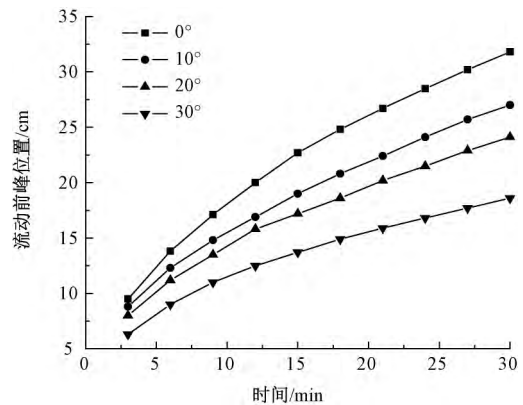


图 4 树脂流动距离与时间关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between position and time of resin flow

实验测得预成型体的厚度如表 1 所示。假设玻璃纤维的体积密度为 $2.6 \text{ g}/\text{cm}^3$, 结合式 (5)、(9) 可计算出预成型体的渗透率。与未发生剪切情形相比, 织物以 10° 剪切后渗透率下降了近 43%。随着剪切角的增大, 预成型体的渗透率逐渐下降, 当剪切角为 30° 时, 垂直纬纱方向的渗透率不到原来的 30%。

表 1 织物剪切角度对纤维预成型体渗透率的影响

Tab. 1 Effect of fabric shearing angle on permeability of fiber preforms

剪切角度/ ($^\circ$)	织物厚度/ mm	拟合斜率 k	渗透率/ (10^{-11} m^2)
0	1.25	34.4	4.40
10	1.10	24.0	2.50
20	1.20	18.9	2.25
30	1.35	11.1	1.31

首先, 织物剪切变形会使织物的面密度有所增加, 从而增大了预成型体的纤维体积分数。根据 Kozney-Carman 方程^[11]可知, 预成型体渗透率与纤维体积分数成反比。从表 1 可看出, 剪切变形后织物的厚度发生了变化, 当织物 10° 剪切后其厚度有所降低。厚度降低使纤维体积分数进一步增加, 所以织物 10° 剪切后渗透率明显下降。其次, 纬纱与流体的渗透方向垂直, 是流体前进的主要障碍, 当单位长度内纬纱根数越多, 树脂需绕过的障碍也就越多。织物的剪切作用增大了纬密, 所以剪切角越大, 这种阻碍作用也就越明显。

2.2 剪切方向对渗透率的影响

斜纹织物根据纹路斜向的不同,分为左斜纹和右斜纹。当织物纹路斜向与剪切方向相同时,称为同向剪切;反之,称为异向剪切。在 2.1 节实验的基础上增加 1 组对照实验,即在其他条件不变的情况下,只改变织物的剪切方向,使织物向右发生剪切变形,即异向剪切。

表 2 示出 2 种情形下的渗透率测试结果。可看出,当剪切角为 10° 时,异向剪切比同向剪切更有利于树脂的流动。造成这种结果的原因在于剪切方向改变了织物纹路的倾斜角。有文献^[12]表明,织物纹路具有一定的引流作用。异向剪切减小了织物纹路和树脂流向的夹角,从而在一定程度上有利于树脂的浸润。而当剪切角为 20° 和 30° 时,剪切方向对预成型体的渗透率几乎没有影响。这可解释为当剪切角较大时,纬密的增加占阻碍树脂流动的主导因素。

表 2 不同剪切方向下预成型体的渗透率
Tab.2 Permeability of preform under different shear directions

剪切角/(°)	渗透率/(10 ⁻¹¹ m ²)	
	同向剪切	异向剪切
0	4.40	4.40
10	2.50	3.60
20	2.25	2.18
30	1.31	1.28

2.3 不同织物组织剪切变形后的渗透率

设计上述 4 种剪切角度,测试平纹织物和斜纹织物剪切变形后的渗透率。斜纹织物剪切方向与纹路斜向相同。不同织物组织在剪切变形作用下的渗透率如表 3 所示。

表 3 不同织物组织剪切变形后的渗透率
Tab.3 Permeability of fabric with different weave after shear deformation

织物组织	剪切角/(°)	渗透率/(10 ⁻¹¹ m ²)	渗透率变化率/%
平纹	0	2.74	
	10	2.89	5.47
	20	2.28	-16.80
	30	1.64	-40.10
斜纹	0	4.40	
	10	2.50	-43.18
	20	2.25	-48.86
	30	1.31	-70.32

由表 3 可以看出,这 2 种织物组织在渗透率方面表现出一定的差异:在织物不发生剪切变形时,斜纹织物的渗透率明显大于平纹织物,虽然二者具有

相同的经纬密和面密度,但不同的纱线交织规律使树脂的流动通道发生了变化;与平纹织物相比,斜纹织物交织次数少,整体结构较为稀松,另一方面斜纹浮长线较长,这都有利于树脂对纤维增强体的浸润,因此,织物组织是影响纤维增强材料渗透率的另一个重要因素。

从整体上看,随着剪切角度的增大,预成型体的渗透率逐渐减小。对于平纹织物,10° 剪切反而使织物的渗透率略有增加。原因可能是小幅度的剪切变形使纤维束间的流动通道变得狭长,狭窄的通道引起了毛细效应,增加了树脂流动的驱动力。而当剪切角较大时,纤维束逐渐靠拢,流动通道几乎消失,因此,在剪切角为 30° 时纤维预成型体的渗透率下降幅度较大。

预成型体剪切变形后的渗透率变化可用渗透率变化率来表示,即预成型体剪切前后渗透率差值与剪切前的渗透率的比值。由表 3 比较发现,斜纹织物的渗透率对剪切变形较平纹织物更为敏感。值得注意的是,平纹在 10° 剪切时渗透率不降反升,这对优化工艺参数和缩短生产周期具有一定的意义。

2.4 剪切作用对树脂流动前峰形状的影响

对于同种织物组织,在垂直于树脂流动方向上的不同部位可认为大体一致,但是织物疵点、织物铺层方式以及导流管长度等外在因素会对实验结果造成一定的干扰,导致树脂的流动前峰为非直线型。剪切作为一种特殊变形,改变了树脂流动通道的形状和分布,对树脂的渗透行为产生了影响。为探究织物剪切变形对树脂流动前峰形状的影响,选用斜纹织物作为纤维增强材料进行实验,织物剪切角为 30°,采用异向剪切,实验结果如图 5 所示。

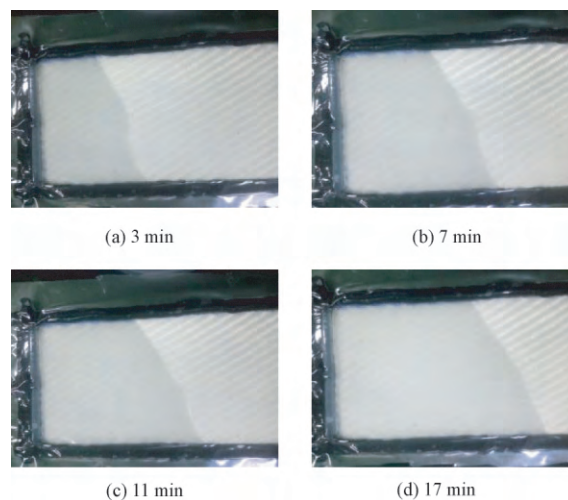


图 5 不同时刻树脂的流动前峰

Fig.5 Shape of resin flow front at different moments

通过对比 4 个不同时刻的流动前峰形状可以发现,剪切变形使树脂的流动前峰逐渐发生倾斜,并最终趋于稳定。而当织物不发生剪切变形时,树脂的流动前峰近似一条直线,且与纬纱平行(见图 2)。导致这一现象的主要原因是:树脂在预成型体中的流动分为宏观流动和微观流动^[13],宏观流动是指树脂在纱线间的流动,微观流动则是指树脂在纱线内的浸润;在一般情况下,宏观流动速度较快,但微观流动也能对预成型体的渗透率产生影响。

图 6 为树脂流动微观示意图。假设树脂流经织物某一单胞,树脂的速度为 v ,速度方向与经纱平行。当树脂遇到纬纱这一阻碍时,可将流动速度分解为竖直速度 v_2 和水平速度 v_1 。竖直速度 v_2 使部分树脂绕过纬纱,其余树脂会渗透至纬纱内部发生微观流动;水平速度 v_1 使部分树脂沿纬纱这一桥梁向右运动。从总体上看,树脂既向前流动,又向右集聚,因此,织物剪切变形后树脂的流动前峰向右上方倾斜,并且随着时间的增加,树脂的流动前峰越接近一条直线。从图中还可看出,织物向右剪切使树脂遇到纬纱阻碍时产生一个向右的水平速度,所以树脂流动前峰的倾斜方向由剪切方向决定,与织物本身纹路的倾斜方向无关。

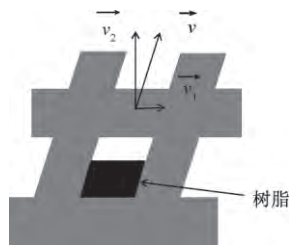


图 6 树脂流动微观示意图

Fig. 6 Microscopic sketch of resin flow

3 结 论

剪切变形改变了织物的内部结构,给实际生产中的工艺参数设计和模拟预测带来了困难。本文将纤维增强材料视作多孔介质,符合达西定律,采用单向法测试了 2 种不同的织物组织在不同剪切角度下的渗透率,结合织物内部纱线的几何结构和排列,分析了剪切角度及方向对其渗透率的影响。在大多数情况下,剪切变形增大了纤维体积分数,使纤维增强材料的渗透率明显减小;对于斜纹织物而言,织物的剪切方向不同,渗透率也有一定的差异,因为织物的纹路倾斜角度随剪切方向发生变化,具体差异表现在剪切角为 10° 时,同向剪切较异向剪切对树脂渗透的阻碍更大;对比 2 种织物组织剪切变形后的渗透率发现,在相同剪切角度下,斜纹织物的渗透率下

降较为明显,而平纹织物渗透率在剪切角小于 10° 时略有上升,随后逐渐变小;剪切变形改变了树脂在织物内部的流动通道,从而影响了纤维增强材料的渗透特性,具体表现为树脂的流动前峰随着渗透时间的增加渐渐倾斜,最终趋于稳定,与纬纱形成一定的夹角。

FZXB

参考文献:

- [1] JIANG J, SU Y, ZHOU L, et al. Effect of nesting on the permeability of multilayer unidirectional fabrics [J]. Applied Composite Materials, 2016(24): 1-18.
- [2] LI M, WANG S, GU Y, et al. Dynamic capillary impact on longitudinal micro-flow in vacuum assisted impregnation and the unsaturated permeability of inner fiber tows [J]. Composites Science & Technology, 2010, 70(11): 1628-1636.
- [3] 杨金水,肖加余,曾竟成,等. 真空导入模塑工艺树脂流动规律研究[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(5): 22-26.
YANG Jinshui, XIAO Jiayu, ZENG Jingcheng, et al. Study on resin flow in vacuum infusion molding process [J]. Aerospace Materials and Technology, 2007, 37(5): 22-26.
- [4] 高彦涛,李炜,罗永康. VARTM 工艺中多层玻纤织物渗透规律研究与工艺优化[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(6): 54-57.
GAO Yantao, LI Wei, LUO Yongkang. Study on infiltration law and process optimization of multilayer glass fiber fabric in VARTM process [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(6): 54-57.
- [5] 李永静,晏石林,李德权,等. 液体模塑成型工艺中纤维束横向渗透率的细观数值模拟[J]. 纺织学报, 2015, 36(8): 22-27.
LI Yongjing, YAN Shilin, LI Dequan, et al. Meso scale numerical simulation of transverse permeability of fiber bundle in liquid forming process [J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(8): 22-27.
- [6] 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 Zhenggang, ZHU Yingdan, ZHANG Yuan, et al. Effect of shear on permeability of fiber reinforced material [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(2): 4-6.
- [7] 杨波,金天国,毕凤阳,等. 预成型体渗透率预测及剪切变形的影响[J]. 材料工程, 2014(11): 7-14.
YANG Bo, JIN Tianguo, BI Fengyang, et al. Prediction of preform permeability and influence of shear deformation [J]. Journal of Materials Engineering, 2014(11): 7-14.

(下转第 70 页)

参考文献:

- [1] CHOI W , POWELL N B. Three dimensional seamless garment knitting on V-bed flat knitting machines [J]. Journal of Textile & Apparel Technology & Management , 2005(3) : 1 - 33.
- [2] CHOI W , KIM Y , POWELL N B. An investigation of seam strength and elongation of knitted-neck edges on complete garments by binding-off processes [J]. Journal of the Textile Institute , 2014 , 106(3) : 334 - 341.
- [3] 祝细. 电脑横机织可穿针织服装的编织工艺及其性能研究[D]. 天津: 天津工业大学 2011: 5 - 6
ZHU Xi. Research of the knitting process and performance for knit & wear clothes on the domestic computerized flat knitting [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University , 2011: 5 - 6.
- [4] 黄林初. 国产电脑横机织可穿产品的编织研究[D]. 天津: 天津工业大学 2013: 137 - 138.
HUANG Linchu. Researches on the knit & wear technology on the domestic computerized flat knitting machine [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University , 2013: 137 - 138.
- [5] LEE Insuk , CHO Kyuhwa , KIM Jiyong. The production process of whole garments and the development case of knitwear-focused on the SWG-X machine [J]. Journal of Fashion Business , 2013(17) : 83 - 96.
- [6] 朱文俊. 电脑横机编织技术[M]. 北京: 中国纺织出版社 , 2011: 16 - 19.
ZHU Wenjun. Knitting Technique of Computerized Flat Knitting Machine [M]. Beijing: China Textile & Apparel Press , 2011: 16 - 19.
- [7] 张卫红. 在电脑横机上编织整件毛衫的原理及工艺[J]. 针织工业 2004(5) : 48 - 50.
ZHANG Weihong. Theory and process of the whole knitted wear on the computer computerized flat knitting machine [J]. Knitting Industries , 2004(5) : 48 - 50.
- [8] 王敏. 四针床电脑横机的全成形工艺[J]. 纺织学报 , 2017 38(4) : 61 - 67.
WANG Min. Whole garment knitting process on four-bed computerized flat knitting machine [J]. Journal of Textile Research , 2017 38(4) : 61 - 67
- [9] 中泽愈. 人体与服装[M]. 袁观洛. 译. 北京: 中国纺织出版社 2001: 162 - 198.
NAKA Zawayu. Human and Garment [M]. YUAN Guanlu , Translating. Beijing: China Textile & Apparel Press 2001: 162 - 198.
- [10] 杨苏梅, 毛莉莉. 引返编织在羊毛衫设计中的应用[J]. 毛纺科技 2009 37(1) : 44 - 48.
YANG Sumei , MAO Lili. Application of returning knit in woolen sweater design [J]. Wool Textile Journal , 2009 , 37(1) : 44 - 48.

(上接第 62 页)

- [8] DEMARÍA C , RUIZ E , TROCHU F. In-plane anisotropic permeability characterization of deformed woven fabrics by unidirectional injection: part I: experimental results [J]. Polymer Composites , 2010 , 28(6) : 797 - 811.
- [9] ENDRUWEIT A , ERMANNI P. The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model [J]. Composites Part A , 2004 , 35(4) : 439 - 451.
- [10] ARBTER R , BERAUD J M , BINETRUY C , et al. Experimental determination of the permeability of textiles: a benchmark exercise [J]. Composites Part A , Applied Science & Manufacturing , 2011 , 42 (9) : 1157 - 1168.
- [11] GEBART B R. Permeability of unidirectional reinforcements for RTM [J]. Journal of Composite Materials , 1992 , 26(8) : 1100 - 1133.
- [12] PARNAS R S , SALEM A J. A comparison of the unidirectional and radial in-plane flow of fluids through woven composite reinforcements [J]. Polymer Composites , 1993 , 14(5) : 383 - 394.
- [13] 邱中琦. 玻璃纤维织物一维面内渗透率的实验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学 , 2010: 5 - 6.
QIU Zhongqi. Experimental study on one-dimensional permeability of glass fabric [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology , 2010: 5 - 6.