

DOI:10.13475/j.fzxb.20201008705

转杯纺纱器气流场形成机制的数值分析

史倩倩¹, 王 姜¹, 张玉泽¹, 林惠婷², 汪 军^{1,3}

(1. 东华大学 纺织学院, 上海 201620; 2. 泉州师范学院 纺织与服装学院, 福建 泉州 362000; 3. 东华大学 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620)

摘 要 转杯纺纱机在正常工作时纺纱器中的气流场主要受气泵抽气机制和转杯旋转机制影响,为研究这2种机制对纺纱器中气流场形成的作用,设计了3种对应不同作用机制的工况,且基于计算流体动力学方法对这3种工况中的流体域进行了数值模拟,并对其气流场的速度分布和压力分布特征进行了分析。数值计算结果表明:转杯纺纱器中的气流场是由抽气机制和旋转机制共同决定的;抽气机制为纤维输送提供了必要的气流速度和负压条件,旋转机制有利于纤维向转杯滑移面的顺利转移和纤维的有序排列,以及其向凝聚槽的凝聚;在这2种机制的共同作用下形成了转杯纺独特的气流纺纱环境。

关键词 转杯纺; 气流场; 数值模拟; 抽气机制; 旋转机制; 流场分布

中图分类号:TS 111.8 文献标志码:A

Numerical analysis on formation mechanism of airflow field in rotor spinning unit

SHI Qianqian¹, WANG Jiang¹, ZHANG Yuze¹, LIN Huiting², WANG Jun^{1,3}

(1. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. College of Textile and Apparel, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362000, China; 3. Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education, Shanghai 201620, China)

Abstract The airflow field in a rotor spinning unit under a normal working condition is mainly affected by the air suction mechanism and rotor rotation mechanism. In order to investigate the contribution of the two mechanisms to the formation of airflow field in the rotor spinning unit, three cases corresponding to different operating conditions were established for investigation, and the fluid domain in the three cases based on the computational fluid dynamics were numerically simulated. The velocity distribution and air pressure distribution of the airflow field in three cases were also analyzed and discussed. Numerical simulation results show that the airflow field in the rotor spinning unit is determined by the air suction at rotor outlet and the high-speed rotor rotation. The air suction mechanism provides the necessary air velocity and negative pressure environment for fiber's transportation. The rotation mechanism assists in smooth transfer of the fibers to the rotor slide wall, the ordered arrangement of fibers, and the accumulation of the fibers to rotor groove. It is under the joint action of the two mechanisms that a unique spinning environment where fibers are driven using air for rotor spinning is formed.

Keywords rotor spinning; airflow field; numerical simulation; air suction mechanism; rotor rotation mechanism; airflow distribution

转杯纺^[1]是一种利用气流来驱动纤维进而加捻成纱的纺纱技术,其凭借生产流程短、成本低、产

量高以及自动化程度高等优势发展成为目前应用面较为广泛的新型纺纱技术之一^[2-4]。气流作为转杯

收稿日期:2020-10-30 修回日期:2020-11-07

基金项目:国家自然科学基金项目(11802161);福建省自然科学基金青年创新基金项目(2020J05160)

第一作者:史倩倩(1992—),女,博士生。研究方向为转杯纺气流流动和纤维运动。

通信作者:汪军(1973—),男,教授,博士。研究方向为新型纺纱技术、纤维制品加工过程数值模拟。E-mail: junwang@dhu.edu.cn。

纺纱中纤维输送的媒介,其对纤维形态以及纤维运动的影响至关重要,基于此,相关学者借助流体力学对转杯纺纱器中的气流特征进行了研究。Kong等^[5]通过建立转杯纺输纤通道的二维计算模型模拟了输纤通道中的气流特征,发现气流特征随输纤通道几何结构以及分梳辊转速的改变而变化,从而影响纤维的形态。Yang等^[6]对输纤通道和旋转转杯中的三维气流特征进行模拟发现,旋转转杯中会生成涡流,且气流速度在滑移面上会降低,同时在滑移面上以及转杯凝聚槽上分布有高压区。

转杯纺纱机在正常工作时,其纺纱器中的气流场主要由2种作用机制控制,即气泵的抽气机制和转杯的旋转机制。正是基于这2个作用机制在转杯纺纱器中才能形成合适的气流场,从而实现纤维的输送、转移和凝聚。目前已有关于这2种作用机制对转杯纺纱器中气流场影响的研究:Xiao等^[7]研究了转杯速度对气流的影响,发现气流特征会随转杯速度的改变而变化;Lin等^[8-9]发现较低的转杯速度会在杯中产生较多的涡流,而较高的转杯速度则会造成较多的纱线断裂,且对转杯出口压力的研究表明适当降低转杯出口压力有利于纱线的成形。上述研究虽已探索了转杯出口压力和转杯旋转速度对转杯纺纱器中气流场的影响,但并未探索抽气机制和旋转机制对转杯纺纱器中气流场形成的作用。

基于转杯纺纱器工作时所需的2种外界作用机制,本文设计了3种工况,并借助计算流体动力学方法对3种工况下转杯纺纱器中的流体域进行数值模拟,从而分析转杯纺纱器中气流场的形成机制,为后续转杯纺纱参数的设计和优化提供理论参考。

1 工况设计

图1示出抽气式转杯纺纱器示意图。实际工作时,转杯纺纱器的抽气孔会连接气泵,从而将纺纱器中的空气抽出,而转杯中的气体也会由杯口排气口流出,同时新的气体会由输纤通道入口和引纱通道入口补入,从而实现纺纱器中气体的持续流动。与此同时,转杯在轴承和电机的带动下高速旋转,从而形成转杯纺纱器中特定的气流场以及加捻环境。

由上述转杯纺纱器工作机制可知,转杯纺纱器在工作时主要受2种外界作用机制控制:一是气泵的抽气机制,其会在转杯口产生抽气作用从而将转杯内部气体抽出;另一个是旋转机制,即在轴承和电动机带动下转杯会高速旋转。为探索这2种外界作用机制对转杯纺纱器气流场形成的作用,本文设计了3种工况,如表1所示。其中工况1和3中的气

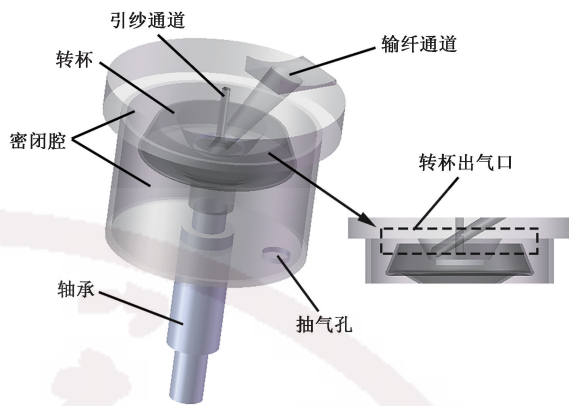


图1 转杯纺纱器示意图

Fig.1 Schematic diagram of rotor spinning unit

泵工况功率相同,且转杯出口负压是利用电子负压表在对应的实际工况下测量得出。

表1 工况设计

Tab.1 Operating conditions design

工况编号	作用机制	转杯出口负压/Pa	转杯旋转速度/($r \cdot \min^{-1}$)
1	只抽不转	-5 500	-
2	只转不抽	-	30 080
3	既抽又转	-5 700	30 080

2 模型建立与数值求解

2.1 模型建立

图2示出转杯纺纱器计算域的几何模型图。图中转杯出口高度 h 为2 mm,引纱通道直径 d_1 为3 mm,转杯直径 D 为54 mm,滑移角 θ 为 68° ,其余结构参数: H_1 为16 mm; H_2 为11 mm; d_2 为10 mm。

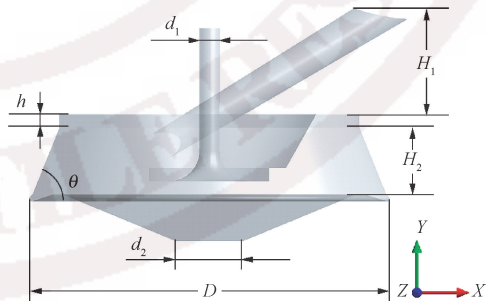


图2 计算域几何模型图

Fig.2 Dimensions of computational domain

2.2 控制方程

转杯纺纱器中的气流流动可视为不产生热交换且不可压缩的黏性湍流流动^[5, 8, 10],故该系统的控制方程仅需考虑质量守恒方程(1)和动量守恒方程(2),具体表述如下:

$$\text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} u_i) = \text{div}(\mu \text{grad} u_i) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (2)$$

式中:div 表示散度运算; ρ 为气流密度, kg/m^3 ; \mathbf{u} 为气流速度矢量, m/s ; u_i 为 \mathbf{u} 在 x_i 方向上的分量, m/s ; t 为时间, s ; μ 为空气动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; grad 表示梯度运算; p 为气流静压, Pa ; S_i 为 x_i 方向上的广义源项。考虑到转杯纺纱器中的湍流流动雷诺数较大,本文中采用 Realizable $k - \epsilon$ 模型^[11]来进行湍流的数值运算,并在近壁面处采用壁面函数进行处理。

2.3 网格划分和网格独立性验证

本文通过 ICEM CFD 15.0 对计算域几何模型进行网格划分,采用非结构化四面体单元,并对计算域中流体变化较大的区域进行网格细化。网格划分对数值计算精度和计算效率也有影响。为消除该影响,本文划分了 3 种网格,网格单元分别为 833 936(网格 1), 1 180 164(网格 2), 1 640 370(网格 3),并进行了网格独立性检验,其结果如图 3 所示。由图可知,基于这 3 种网格得到的速度分布规律及数值较为接近,综合考虑计算精度和计算效率,本文采用网格 2 进一步模拟计算,所划分的计算域网格如图 4 所示。

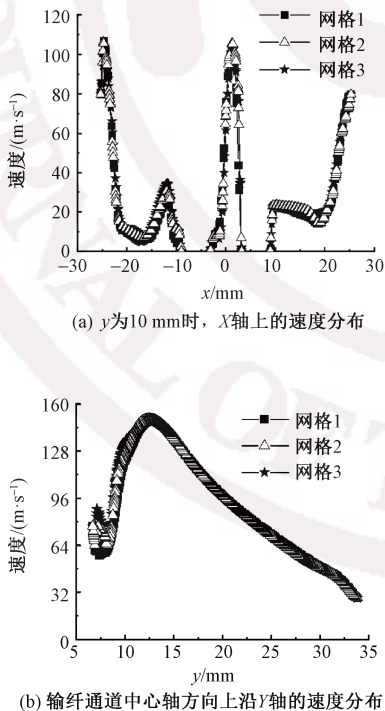


图 3 3 种网格的独立性验证

Fig.3 Mesh independency test for three different grid schemes: velocity magnitude. (a) Along X-axis at $y = 10 \text{ mm}$; (b) Along Y-axis in direction of center axis of transfer channel

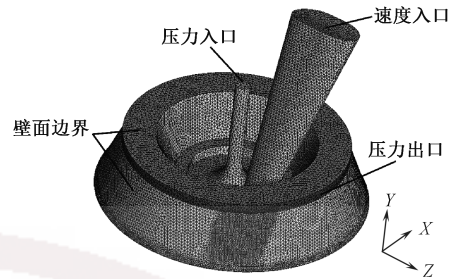


图 4 计算域网格划分及边界条件示意图

Fig.4 Meshed model and boundary conditions of computational domain

2.4 边界条件和数值求解

因转杯纺纱器在工作时由分梳辊向输纤通道输送纤维,在该过程中气流亦由分梳辊流入,故将输纤通道入口设为速度入口边界,3 种工况下该入口速度分别为 27.50、3.90、28.10 m/s 。因引纱通道口与外界大气相通,故引纱通道口设为压力入口,其值为标准大气压($1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$)。由上述内容可知,转杯出口处的间隙即为压力出口,3 种工况下该值与表 1 相同,并且计算域模型中的固体壁面均采用无滑移边界条件,工况 2 和 3 中的转杯壁面为旋转壁面,旋转速度即为转杯转速。

本文基于计算流体动力学软件 Fluent 用有限体积法来求解控制方程,并用商业 CFD 软件 ANSYS 15.0 运行模拟,采用 SIMPLE 计算方法以及二阶迎风格式求解守恒方程。

3 结果与讨论

3.1 气流场速度分布

图 5 为 3 种工况下转杯纺纱器中的气流场速度矢量分布图。由图可看出,在工况 1(只抽不转)中,气流进入输纤通道后不断加速,最大速度出现在输纤通道出口处,之后气流继续沿输纤通道方向前进,并直接与转杯壁面发生碰撞,且碰撞后,气流自碰撞壁面处一分为二,分别以顺时针和逆时针方向沿转杯壁面继续流动,但在流动过程中速度不断降低。在工况 2(只转不抽)中,气流进入输纤通道后并无大幅度加速,由输纤通道出口出来的气流先是沿转杯旋转方向流动,并不断加速,在到达转杯壁面时速度达到最大,且转杯壁面外径越大处的速度值越大。同时在转杯高速旋转产生的离心力以及气流和壁面的摩擦力作用下,越靠近转杯壁面的气流流动越明显且气流速度越大。而靠近转杯中心轴的气流较少且气流速度较低,而在工况 3(既抽又转)中,气流在输纤通道中的流动特征同工况 1 相同,即气流一进

入输纤通道后就开始不断加速,从而实现纤维的输送,同时在输纤通道出口处速度达到最大值。由输纤通道流出后,气流并未与转杯壁面直接发生碰撞,而是沿转杯旋转方向向转杯壁面流动,且该处气流并没有产生分支。此气流流动特征有利于纤维向

转杯滑移面的转移以及纤维的有序排列。同时在转杯高速旋转产生的离心力以及气流和壁面的摩擦力作用下,气流有向壁面流动的趋势,该特征有利于悬浮在转杯中的纤维向转杯滑移面转移并向凝聚槽集聚。

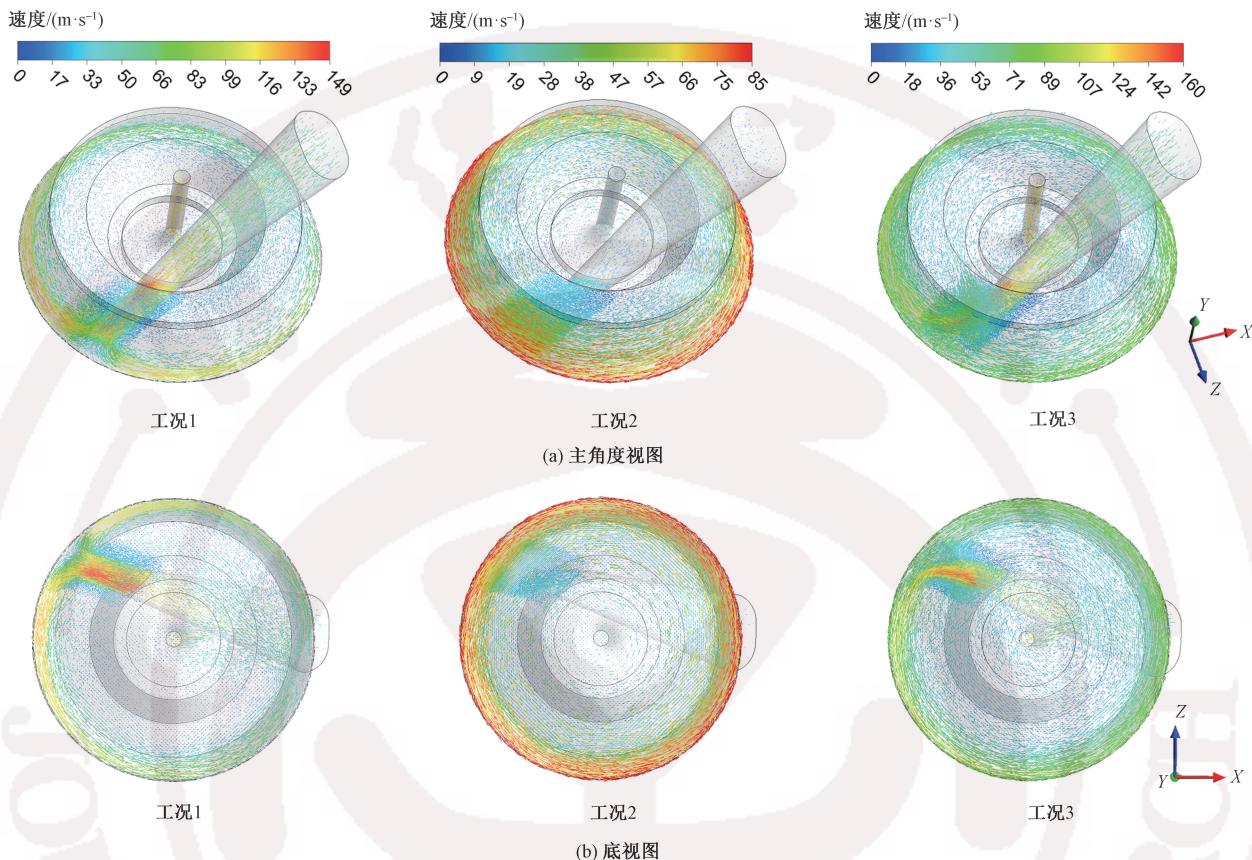


图 5 3 种工况下气流场速度矢量分布图

Fig.5 Velocity vector distribution of airflow field in master view (a) and bottom view (b)

由上述 3 种工况下气流速度矢量的分布特征可看出,工况 3 的输纤通道中气流流动特征主要由转杯口的抽气作用决定,但其气流最高速度 (160 m/s) 大于抽气作用机制单独运作时的气流最高速度 (149 m/s), 说明工况 3 的最大气流速度是由转杯口的抽气作用和转杯高速旋转作用叠加产生的。出输纤通道后,气流沿转杯旋转方向流动也表明该处的气流流动明显受到转杯的旋转作用的影响。综上所述可以看出,转杯纺纱器在正常工作时其内部气流场速度分布特征是由这 2 种外界作用机制共同决定的。

3.2 气流场静压分布

图 6 示出 3 种工况下转杯纺纱器中的气流场静压分布图。由图可知,工况 1 中的转杯内负压环境相对较为均匀,但在输纤通道出口所对的转杯壁面上出现明显的局部高压区,这是由于在转杯出口抽气作用下,气流与转杯壁面发生碰撞而形成的。工

况 2 中的气压分布明显与工况 1 不同,转杯内部的气压几乎成均匀环状分布,未在转杯壁面上形成明显的局部高压区,说明由输纤通道进入转杯的气流未与转杯壁面发生碰撞,且气流由转杯出口均匀流出。工况 3 的气压分布特征同工况 1 相似,但输纤通道出口所对转杯壁面上的局部高压区梯度相较工况 1 中的局部高压区梯度偏少,说明工况 3 中气流与转杯壁面的碰撞相较工况 1 中的碰撞作用偏弱,与上述该处气流沿转杯旋转方向流向壁面相符;工况 3 中的最大负压绝对值为 13 300 Pa,大于工况 1 中的最大负压绝对值 12 200 Pa,说明工况 3 中的气压分布也受转杯旋转机制的作用。

为进一步了解 3 种工况下转杯内部静压分布情况,本文对 $y = 10 \text{ mm}$ 处 X 轴上的静压值进行了提取和分析,结果如图 7 所示。可看出,工况 3 所对应 X 轴上的压力值分布趋势同工况 1 中相应的压力值分布趋势相似,而工况 2 中的压力绝对值明显小于

另 2 种工况,说明由转杯旋转机制产生的负压较小,但工况 3 中的压力绝对值基本均大于工况 1 中的对

应值,再次表明工况 3 中的气压分布也受转杯旋转机制的叠加作用。

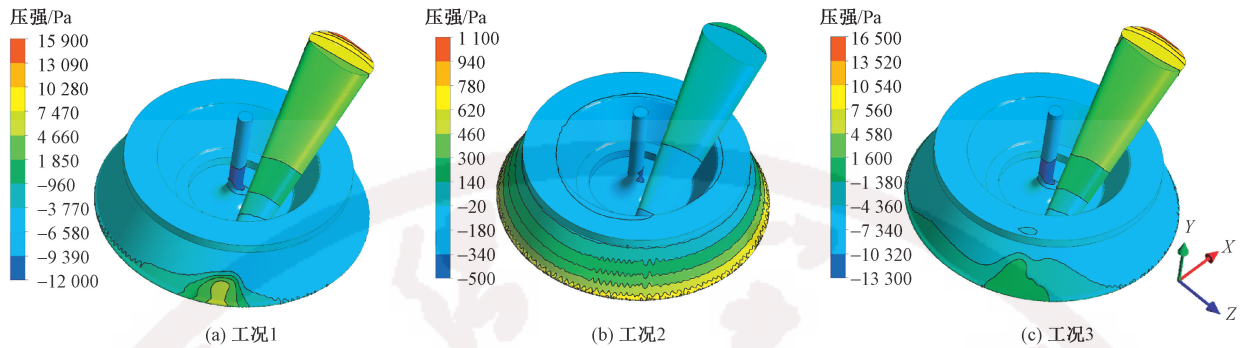


图 6 3 种工况下气流场静压分布图

Fig.6 Air pressure distribution of airflow field in case 1(a), case 2 (b) and case 3 (c)

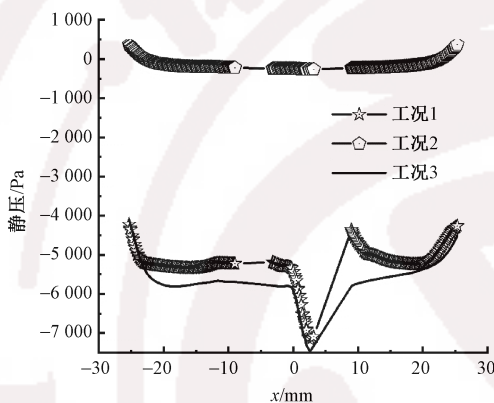


图 7 3 种工况下 $y = 10 \text{ mm}$ 处 X 轴上气压分布

Fig.7 Air pressure distribution of airflow field along X at $y = 10 \text{ mm}$ in 3 cases

4 结 论

本文通过数值模拟的方法对 3 种工况下转杯纺纱器的气流场速度分布和压力分布特征进行了分析,探究了转杯纺纱器中抽气机制和旋转机制对纺纱器中气流场形成的作用。得出如下结论:

1) 转杯纺纱器在正常工作时的气流场是在其抽气机制和旋转机制共同作用下形成的。在转杯口的抽气作用主导下,气流自输纤通道流入后不断加速,在输纤通道出口处速度值最大。随后在转杯的旋转作用下,气流顺转杯旋转方向流向转杯壁面。转杯中的负压环境整体分布较为均匀,但在输纤通道出口所对的转杯滑移面上存在局部高压区。

2) 转杯口的抽气作用为纤维在纺纱器中的输送提供了必要的气流速度和负压条件,转杯的旋转作用为纤维向转杯滑移面的顺利转移和纤维在滑移面上的有序排列以及向凝聚槽的凝聚提供了保障。

参考文献:

[1] LAWRENCE C A, CHEN K Z. Rotor-spinning [J]. Textile Progress, 1984, 13(4) : 1-73.

[2] KWASNIAK J. An investigation of a new method to produce fancy yarns by rotor spinning [J]. Journal of the Textile Institute Proceedings & Abstracts, 1996, 87(2) : 321-334.

[3] MATSUMOTO Y I, FUSHIMI S, SAITO H, et al. Twisting mechanisms of open-end rotor spun hybrid yarns [J]. Textile Research Journal, 2002, 72 (8) : 735-740.

[4] CHENG K B, MURRAY R. Effects of spinning conditions on structure and properties of open-end cover-spun yarns [J]. Textile Research Journal, 2000, 70(8) : 690-695.

[5] KONG L X, PLATFOOT R A. Two-dimensional simulation of air flow in the transfer channel of open-end rotor spinning machines [J]. Textile Research Journal, 1996, 66(10) : 641-650.

[6] YANG X W, CHEN H L, WU Z Y, et al. Numerical simulation of 3D flow in rotation cup of rotor spinning [J]. Applied Mechanics & Materials, 2011, 80/81: 1145-1149.

[7] 肖美娜, 窦华书, 武传宇, 等. 纺纱转杯内气流流动特性的数值分析 [J]. 纺织学报, 2014, 35(12) : 136-141. XIAO Meina, DOU Huashu, WU Chuanyu, et al. Numerical simulations of air flow behavior in spinning rotor [J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(12) : 136-141.

[8] LIN H, ZENG Y, WANG J. Computational simulation of air flow in the rotor spinning unit [J]. Textile Research Journal, 2016, 86(2) : 115-126.

[9] LIN H, BERGADA J M, ZENG Y, et al. Rotor

147-155.

[15] RUFFATTO D, PARNES A, SPENKO M. Improving controllable adhesion on both rough and smooth surfaces with a hybrid electrostatic/gecko-like adhesive [J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2014. DOI: 10.1098/rsif.2013.1089.

[16] 吴周镜, 宋晖, 李柏岩, 等. 纬编针织物在计算机中的三维仿真[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2011, 37(2):210-214.
WU Zhoujing, SONG Hui, LI Baiyan, et al. Three-dimensional simulation of weft knitted fabrics in computer [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2011, 37(2):210-214.

[17] 丛洪莲, 葛明桥, 蒋高明, 等. 基于 NURBS 曲面的经编针织物三维模型[J]. *纺织学报*, 2008, 29(11):

132-136.

CONG Honglian, GE Mingqiao, JIANG Gaoming, et al. Three-dimensional model of warp knitted fabric based on NURBS surface [J]. *Journal of Textile Research*, 2008, 29(11):132-136.

[18] 刘子玉. 关于国际单位制(SI)中真空介电常数的商榷[J]. *西安交通大学学报*, 1980(2):141-145.
LIU Ziyu. Discussion on vacuum dielectric constant in international system of units (SI) [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1980(2):141-145.

[19] 汝欣, 彭来湖, 吕明来, 等. 纬编针织物几何建模及其算法[J]. *纺织学报*, 2018, 39(9):44-49.
RU Xin, PENG Laihu, LÜ Minglai, et al. Geometric modeling and algorithm of weft knitted fabrics [J]. *Journal of Textiles Research*, 2018, 39(9):44-49.

(上接第 184 页)

spinning transfer channel design optimization via computational fluid dynamics [J]. *Textile Research Journal*, 2018, 88(11):1244-1262.

[10] AKANKWASA N T, LIN H, ZHANG Y, et al. Numerical simulation of three-dimensional airflow in a novel dual-feed rotor spinning box[J]. *Textile Research*

Journal, 2018, 88(3):237-253.

[11] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004: 120-137.
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis: CFD software principles and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 120-137.