

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.01.003

喷气涡流纺喷嘴参数对内流场特性的影响

梁高翔, 王青*, 吕绪山, 党帅, 李佐超

(西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:为探究高速气流在喷气涡流纺内流道的流场特性规律,课题组基于 FLUENT 建立喷嘴的参数化模型,采用单一变量法分别研究喷孔数量、喷孔倾角和供气压力对喷嘴内流场的影响。结果表明:受引导部件的影响,内流场气流特性分别存在不规则性,且有较多的回流和涡流现象的存在;随着喷孔数量的增加,喷孔出口气流速度略有增大,内流场涡流现象减少,气流旋转性能显著增强;随着喷孔倾角的增大,气流速度峰值先增大后减小,导引部件螺旋面两侧的轴向速度和切向速度分布有明显不同,而当喷孔倾角超过 70°后角度对速度的影响逐渐减弱;随供气压力的增加,气流速度增大,气流旋转特性增强,纱线加捻效果有所提高。该研究对于喷气涡流纺喷嘴的结构设计具有参考价值。

关键词:喷气涡流纺;喷嘴;导引针;流场特性;FLUENT

中图分类号:TS103.2;TH164 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)01-0016-08

Influence of Nozzle Parameters on Internal Flow Field Characteristics of Air-Jet Vortex Spinning

LIANG Gaoxiang, WANG Qing*, LÜ Xushan, DANG Shuai, LI Zuochao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to explore the flow field characteristics of high-speed airflow in the flow channel of air-jet vortex spinning, a parametric model of nozzle based on FLUENT was established, and the single variable method was used to study the effects of the number of nozzle holes, nozzle inclination angle and air supply pressure on the flow field in the nozzle. The results show that under the influence of the guiding components, the air flow characteristics in the internal flow field are irregular, and there are more reflux and eddy current phenomena. With the increase of the number of orifices, the airflow velocity at the outlet of the orifice slightly increases, the eddy current phenomenon in the internal flow field decreases, and the airflow rotation performance is significantly enhanced. With the increase of nozzle angle, the peak airflow velocity first increases and then decreases, and the axial velocity and tangential velocity distribution on both sides of the helical surface of the guiding components are obviously different. When the nozzle angle exceeds 70°, the influence of the angle on the velocity gradually weakens. With the increase of air supply pressure, the air flow velocity increases, the air flow rotation characteristics are enhanced, and the yarn twisting effect is improved. The research has reference value for the structure design of air-jet vortex spinning nozzles.

Keywords: air-jet vortex spinning; nozzle; guiding needle; flow field characteristics; FLUENT

喷气涡流纺是一种利用高速气流对进入到加捻腔内的纤维自由端旋转加捻的新型纺纱技术。与传统环锭纺纱相比,其在纺纱工序、自动化程度、纺纱速度和

能源消耗等方面都有较大优势,且成纱条干的均匀性、毛羽指数等性能均有所改善,是目前市场上较具发展前景的纺纱技术^[1-3]。因此,国内外学者们对喷气涡流

收稿日期:2022-07-12;修回日期:2022-11-10

基金项目:中国纺织工业联合会科技指导性项目(2021019)。

第一作者简介:梁高翔(1996),男,河南驻马店人,硕士研究生,主要研究方向为喷气涡流纺流场-纤维耦合运动分析。通信作者:王青(1985),女,陕西咸阳市人,博士,硕士生导师,主要研究方向为气流场特性分析、机器视觉及轨迹规划。E-mail: qingkong1123@163.com

纺纱技术和喷气涡流纺内流场的特性规律开展了大量研究。王青等^[4]和 Eldeed 等^[5]采用数值方法对喷嘴内流场进行了分析,并对喷嘴结构和工况参数的选择和设计提出了建议。Ortlek 等^[6]提出更大的空心锭子内径会产生更多的毛羽指数,Kuthalam 等^[7-8]认为空心锭子内径过大会使包缠纤维更松弛,纤维束可以自由移动,会给粗支和中支纱带来包缠损失、包缠松弛和毛羽增加的问题,Basal 等^[9]也指出较小的空心锭子直径会降低毛羽指数。Ortlek 等^[10]分析了喷气压力和纺纱速度等工艺变化对纱线性能的影响。陈彩红等^[11]和任玉斌^[12]分别采用数值方法和实验方法分析了喷孔参数对喷嘴内流场的影响;邹专勇等^[13]、Sun 等^[14]和 Pei 等^[15]研究了喷孔数量和喷孔倾角等结构参数对涡流场流动特征的影响,揭示了喷孔参数对气流特性及流场内纱线加捻的作用规律。此外,邹专勇等^[16]还研究了喷气涡流纺喷嘴中气流状态和成纱的相关性。Li 等^[17]研究了导引针至空心锭子的距离对纺纱质量的影响,认为 1.5 mm 的最佳距离能使纱线获得较好的强力和较少的毛羽指数。尚珊珊等^[18]研究了纺纱开始时刻、以及正常纺纱过程中内流场的气流特性,并在流场分析中考虑了纱线的存在,分析了纱线的运动规律^[19]。韩晨晨等^[20]采用有限元方法分析了纤维在流场中的运动轨迹,且提出了一种自捻型喷气涡流纺的创新技术^[21]。郭臻等^[22]建立纤维的三维运动模型,分析了纤维在流场中的运动和变形情况。袁龙超等^[23]对近年来喷气涡流纺的研究进展做了总结,并认为考虑纤维和气流耦合影响关系的纤维-气流流固耦合分析、提高喷气涡流纺纱机适纺性的研究是今后主要研究方向。

综上,大多数研究在分析时考虑的结构和工艺参数较为单一,且为了简化模型,大都忽略了导引部件的影响,导致研究结果与真实情况有所偏差。鉴于此,课题组在考虑导引部件的基础上,详细探究喷孔数量、喷孔倾角和供气压力等参数对喷气涡流纺内流场的影响规律。

1 模型建立

1.1 喷嘴结构建模

喷气涡流纺喷嘴的作用是让高压气流通过喷孔进

入加捻腔形成高速旋转气流,以实现纤维自由端的加捻,其主要结构图 1 所示。喷嘴包括导引部件、喷孔、空心锭子、涡流管和引纱管。以迪卡尔坐标系定义:空心锭子入口面中心点为坐标原点, X 轴为轴向(纱体输出方向),如图 1(c)所示坐标系。文中主要研究喷孔数量、倾角和供气压力等参数对流体域内的压力、速度矢量、速度流线及湍流旋涡等的影响。为方便对比分析,在流体域各方向上建立了多个截面,包括 XY 平面(记为 R_1)和涡流管中的 $S1, S2, S3$ 和 $S4$ 截面。

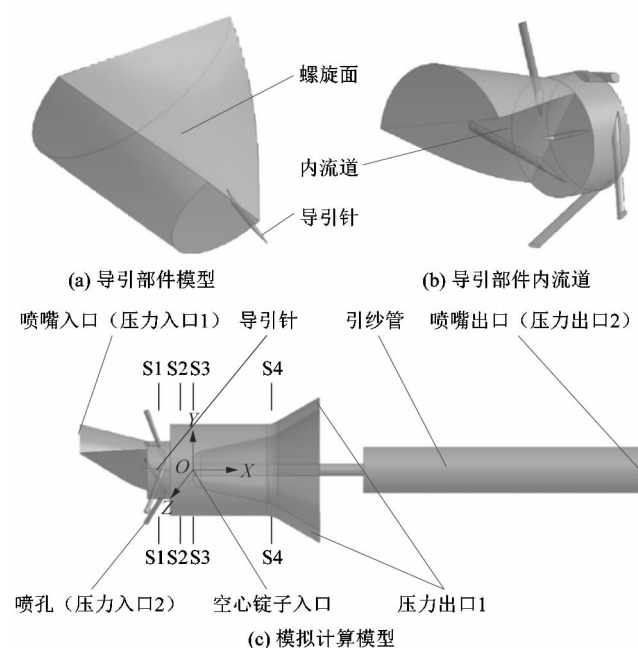


图 1 喷嘴结构建模

Figure 1 Nozzle structure modeling

1.2 网格划分

采用数值方法求解控制方程时,需要将空间连续的计算区域离散化,然后求解所有离散区域的流体计算方程,因此首先要在计算区域上进行网格划分。网格包括结构网格(六面体网格)和非结构网格(四面体网格)。考虑到模型结构复杂度较高,课题组采用对复杂区域具有较好适应性的非结构网格,网格划分情况如图 2 所示。为了更精确地捕捉气流的流动细节特性,对喷孔和涡流管等小尺寸结构和流场变化激烈的区域进行网格加密。

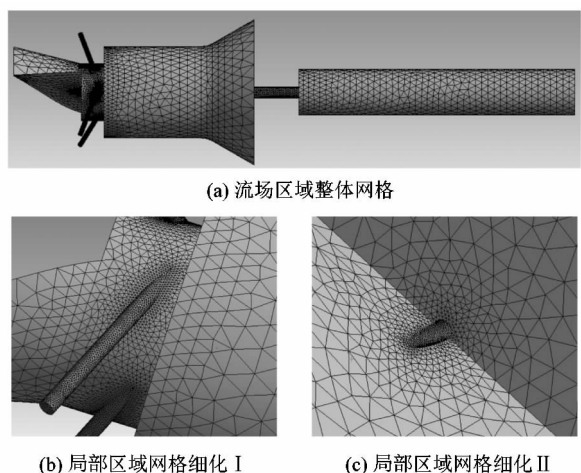


图2 喷嘴内气流场区域的网格划分

Figure 2 Meshing of flow field in nozzle

1.3 边界条件设置

如图1所示,根据喷气涡流纺喷嘴的实际工作状态,将喷嘴入口和喷孔入口分别设置为压力入口1和压力入口2,涡流管出口和引纱管出口分别设置为压力出口1和压力出口2。其中,只有喷孔(压力入口2)的压力根据供气压力大小进行设置,其余压力入口和

出口的压力设置均为大气压。

课题组采用单一变量法分别研究喷孔数量、喷孔倾角和供气压力3个参数对喷嘴内流场的影响情况。设基准构型参数为:喷孔数量5、喷孔倾角 70° 和供气压力0.5 MPa,研究方案如表1所示。根据表1中的3种方案,针对共7个状态分别进行结构建模、网格划分及数值模拟仿真。

表1 研究方案

Table 1 Research programme

方案序号	喷孔数 n	喷孔倾角 $\theta/^\circ$	供气压力 p/MPa
I	4,5,6	70	0.5
II	5	65,70,75	0.5
III	5	70	0.3,0.4,0.5

2 流场数值模拟及结果分析

2.1 基准构型内流场特性

首先对基准构型进行内流场分析,以明确流动规律。基于 FLUENT 软件进行数值模拟,得到仿真结果如图3和图4所示。

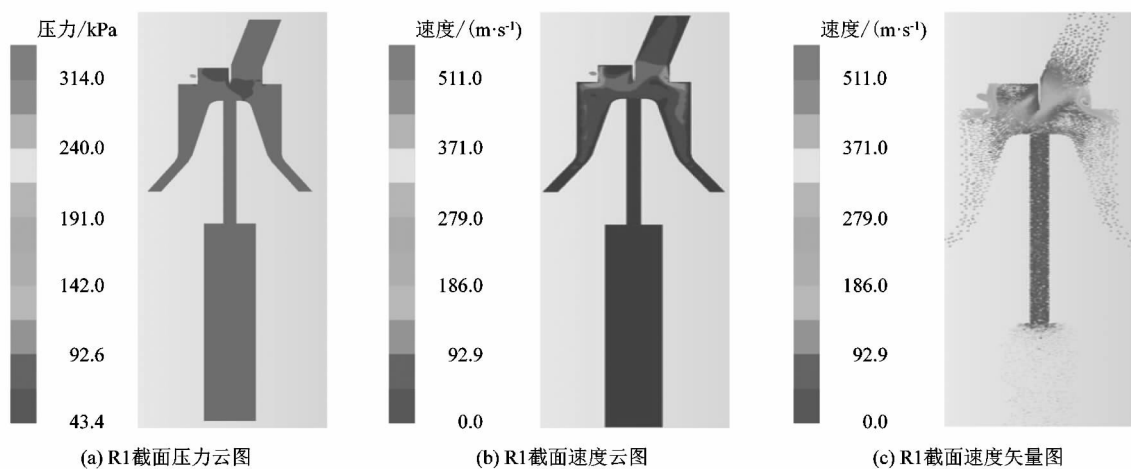


图3 基准构型流场速度和压力特性

Figure 3 Flow field velocity and pressure characteristics of reference configuration

图3(a)~(b)分别为R1横截面处的压力云图和速度云图,由图中可以明显看出:导引部件的存在对加捻腔内的压力分布和速度分布产生较大影响。受导引部件的影响,加捻腔内形成的低压区并不规则,空心锭子入口面中心处附近的压力分布不均匀,喷孔出口处气流量大,气流速度快,压力值较低。从导引通道流入

的气流与部分喷孔流入的气流在加捻腔内一侧交汇,交汇气流对由喷孔形成的旋转气流有一定程度的扰乱,同时也造成了加捻腔内的压力分布不规则。图3(c)为R1截面上的速度矢量图。该矢量图显示:喷孔出口处气流速度最大,从喷孔喷入的高速气流与从导引通道流入气体和部分引纱通道回流气体在加捻腔内

汇集混合,使得该处的湍流扰动较大,气流流动方向混乱。此外,由于加捻腔内低压区的存在,会导致引纱通道部分气体回流,并在加捻腔内与从喷孔流出的高速气体混合产生涡流,涡流的大小和位置取决于汇聚时不同气流的速度大小和方向。

图4(a)~(b)分别为涡流管内S1,S2,S3和S4截面处的速度云图与速度矢量图。由图4可知,混合在加捻腔内的气流可分为内部和外部2个部分。外部气流主要受喷孔流入的高速气流影响,在加捻腔回转内壁结构的作用下形成高速旋转气流,并沿着纱体输出

方向(X 轴正向)流动并逐渐扩散,最后从涡流管出口处流出;内部旋转气流则是从导引部件内流道吸入的回流,经螺旋型纤维导引通道结构作用,并在外部气流的高速旋转带动下产生的,主要用于为纤维自由端的旋转加捻过程提供作用力。此外图4(a)的S4截面云图还表明:由于横截面积减小,外部旋转气流的速度值在一些位置还会增大。此外,由图4(a)截面的速度云图和图4(b)的S1,S2截面处的速度矢量图还可看出加捻腔内气流交汇处的速度分布差异及混合涡流的形成,其分布受导引部件位置影响。

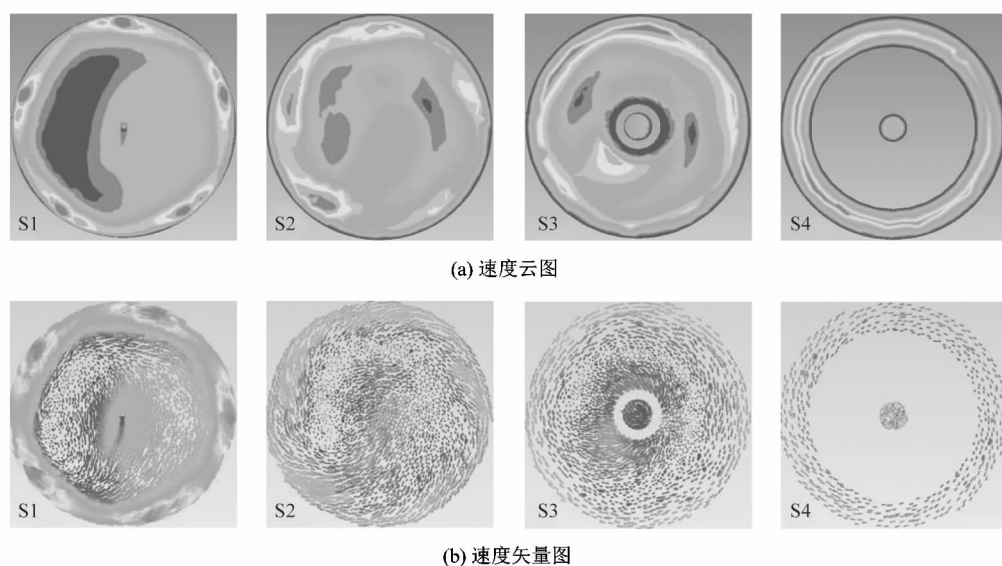


图4 基准构型各截面速度分布

Figure 4 Velocity distribution of each section of reference configuration

2.2 喷孔数量对喷嘴内流场的影响

由气流静压、动压与速度之间的关系可知:气流速度高时,气流静压低,即由气流速度分布可以间接得到静压分布,因此从本节开始,后续仅对气流速度进行分析。

图5为在基准构型基础上,不同喷孔数量 n 下流场仿真得到的速度矢量图。由图5可知:①由于喷孔管道内部和加捻腔之间存在压力差,高压气体在流经喷孔时不断加速,并在喷孔出口处达到速度峰值,约为500 m/s左右;②随着喷孔数量的提升,速度峰值略有提升但提升幅度很小,原因是喷孔的结构尺寸和供压条件相同,导致气流在喷孔通道内的加速性能基本相当;③随着喷孔数量的增加,从喷孔和导引部件内流道

流入的气流混合产生的涡流会逐渐减小,且加捻腔内气流的旋转性能显著增强。因此在喷嘴设计时,可在满足结构强度的前提下适度增加喷孔的数量,以有效提升对纤维自由端的加捻效果。

2.3 喷孔倾角对喷嘴内流场的影响

图6为喷孔数量5个,供气压力0.5 MPa条件下,不同喷孔倾角时的速度矢量仿真结果。分析图6可知:①3种倾角状态下的速度峰值非常接近,均在520 m/s左右。②随着倾角从65°增加到70°,轴向气流速度峰值从415 m/s增加到484 m/s左右,轴向速度显著增大,而当倾角从70°到75°时轴向速度略有减小。③切向速度随倾角的增加而显著增大,且在喷嘴倾角65°到70°之间增长较为迅速,在70°到75°之间增

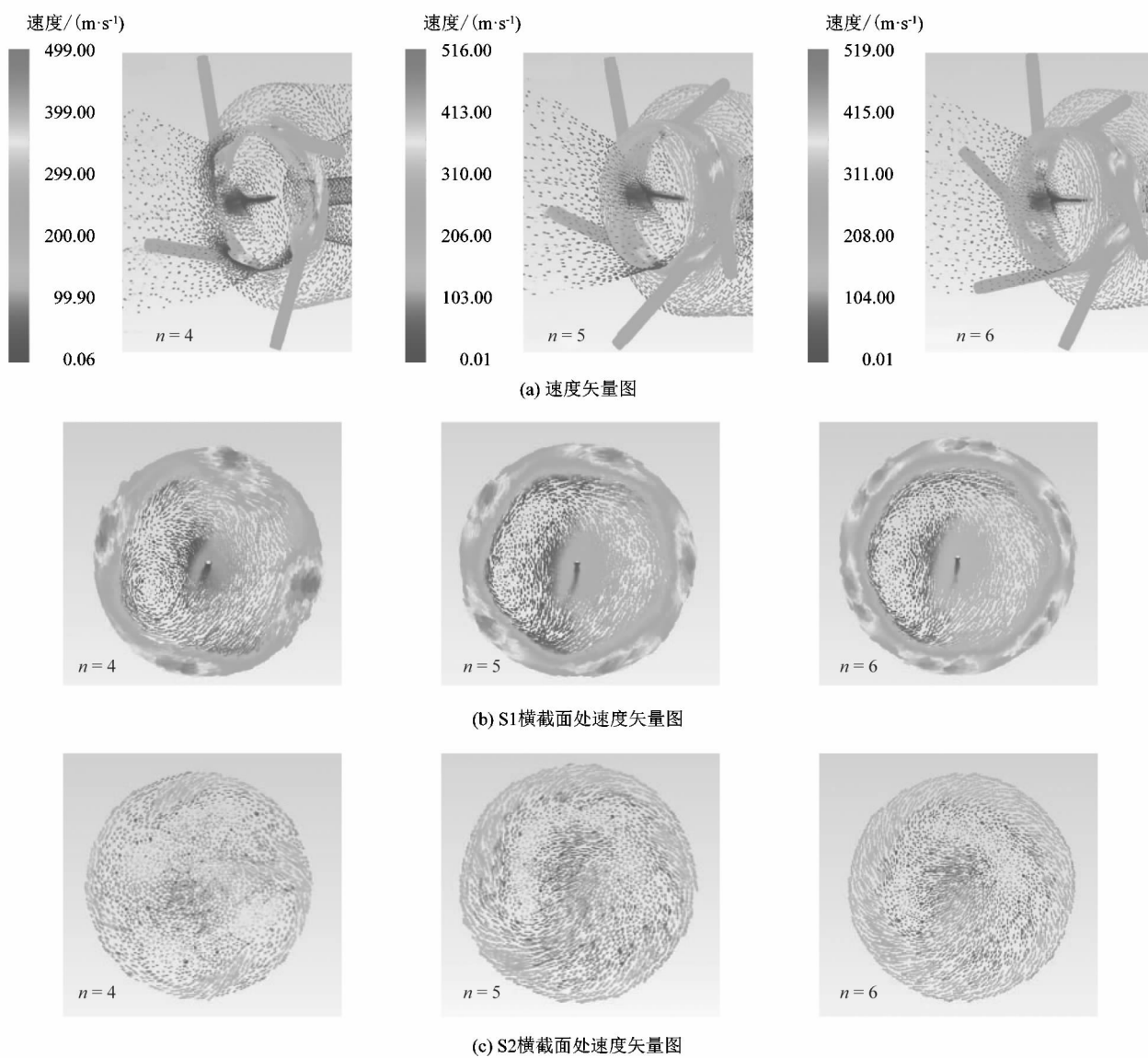
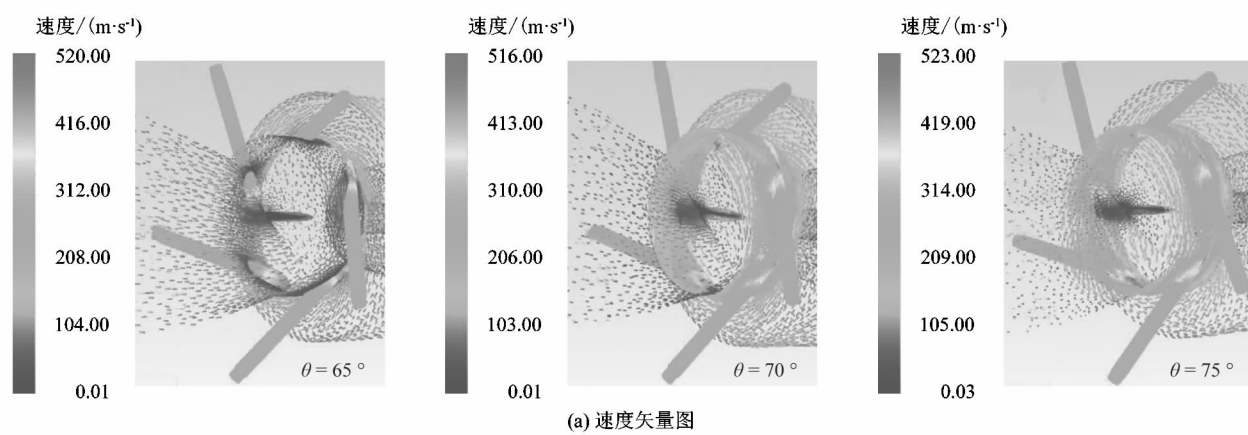


图5 不同喷孔数量时的速度矢量图

Figure 5 Velocity vector diagram with different numbers of jet orifice



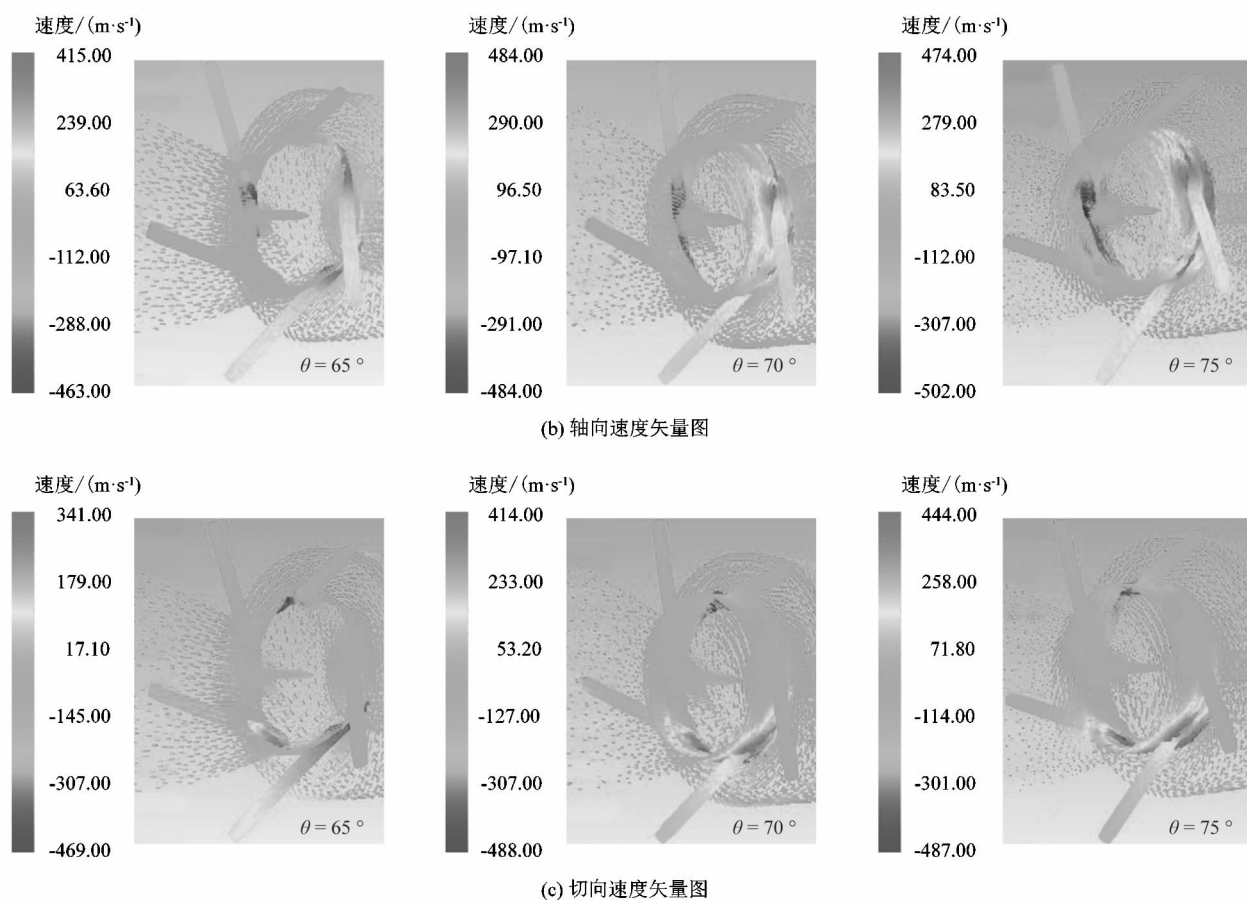


图6 不同喷孔倾角时的速度矢量图

Figure 6 Velocity vector diagram at different angle of orifices

速减小。轴向和切向速度分布特点都说明在喷嘴角度超过 70° 后,角度对速度的影响逐渐减弱。④处于导引部件螺旋面两侧的速度分布有明显不同(仿真结果的速度正负差异是由喷孔位置方向所引起),出现这种速度差异分布现象的原因主要与导引部件的存在有关,从导引部件内流道进入的气流与喷孔流入的气流交汇后对螺旋面一侧的速度分布产生了较大影响。

由此可见,当喷嘴倾角增大时,从喷孔进入到涡流管内的气流切向速度分量会随之增大,这有利于提高加捻腔内气流的旋转特性,使纱线包缠得更紧密,纱线强度更高。喷嘴倾角的持续增大会使气流的轴向分量先增大后减小(X 轴正方向速度分量),而轴向气流速度的减小会让纱线包缠更加紧密,使纱线较硬,断裂伸长率降低,纱线易断裂。所以喷嘴倾角的选择应综合考虑喷孔数量、供气压力等参数的影响,并结合仿真或实验结果以确定最佳数值。

2.4 供气压力对喷嘴内流场的影响

图7为在相同喷孔数量和喷孔倾角时,不同供气压力下仿真得到的速度矢量图。分析图7可知:①随着供气压力的增加,经过喷孔管道加速的气流速度也随之增大。这是因为供气压力越大,喷孔内部和涡流管之间压差越大,喷孔中气流加速性越好。②供气压力越大,涡流管内气流速度越高,气流旋转运动也越强,对纱线的加捻效果提高,因此供气压力对喷嘴内部的流场特性影响显著,应该在考虑耗气量的前提下尽可能提高供气压力。

3 结论

基于CFD数值研究方法,考虑导引部件的作用,课题组分析了喷气涡流纺内流场的特性,并在此基础上,采用单一变量法依次研究了喷孔数量、喷孔倾角和供气压力对喷气涡流纺内流场的影响规律,得出以下结论:

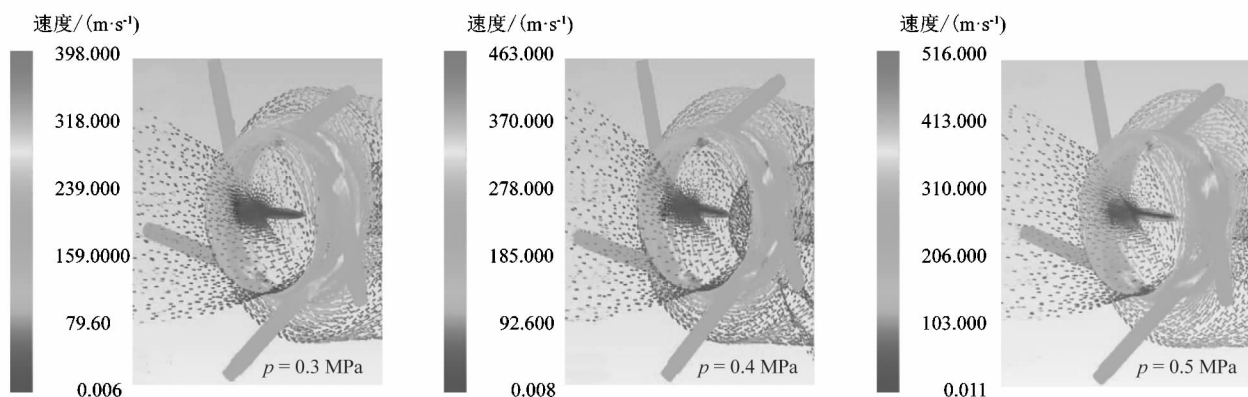


图7 不同供气压力时的速度矢量图

Figure 7 Velocity vector diagram at different air supply pressures

1) 由仿真结果分析可知,导引部件对加捻腔内流场的速度、压力分布、湍流扰动、涡流的大小及位置、气流旋转特性和气流轴向及切向速度分量大小都有影响,因此流场特性分析时不应忽视导引部件的存在。

2) 由喷孔进入的高压气流在加捻腔内形成低压区,但受导引部件的影响,加捻腔内形成的低压区并不规则,空心锭子入口面中心附近的压力分布不均匀;且由于该低压区的产生,喷管通道和加捻腔之间出现较大的压力差,使得气流在喷孔通道内的流动速度持续增大,并在喷孔出口处达到最大值。

3) 加捻腔与外界的压力差会导致引纱通道部分气体回流,并在加捻腔内与从喷孔流出的高速气体混合产生涡流,涡流的大小和位置取决于汇聚时不同气流的速度大小和方向。而从喷孔流入的高速气流与来自导引部件内流道的气流混合后也可能形成涡流,该处涡流的分布与导引部件的位置有关。

4) 混合在加捻腔内的气流可分为内部和外部2个部分,外部气流在加捻腔回转内壁结构的作用下形成高速旋转气流,并沿着纱体输出方向(X 轴正向)流动并逐渐扩散,最后从涡流管出口处流出;内部的旋转气流则是从导引部件内流道吸入的回流,经螺旋型纤维导引通道结构作用,并在在外部气流的高速旋转带动下产生的,主要用于为纤维自由端的旋转加捻过程提供作用力。

5) 随着喷孔数量的提升,内流道速度峰值略有提升但提升幅度很小,从喷孔和导引部件内流道流入的气流混合产生的涡流会逐渐减小,加捻腔内气流的旋

转性能则显著增强。

6) 轴向气流速度分量和切向气流速度分量峰值的变化均较为平稳,但处于导引部件螺旋面两侧的速度分布却有明显不同,除却由喷气孔位置方向导致的影响外,出现这种速度差异分布现象的原因可能与导引部件的存在有关系,从导引部件内流道进入的气流可能对螺旋面一侧的速度分布产生了较大的影响。此外,当喷嘴角度超过 70° 后,角度对速度的影响逐渐减弱。

7) 随着供气压力的增加,经过喷孔管道加速的气流速度也随之增大,气流旋转运动特性随之增强,纱线加捻效果会有所提高。

参考文献:

- [1] 景慎全,章友鹤,周建迪,等. 喷气涡流纺产品的结构调整及其应用领域拓展[J]. 纺织导报,2017,36(11):68.
- [2] 胡革明,江玲,陈美玉,等. 喷气涡流纺织物与传统环锭纺织物性能对比[J]. 棉纺织技术,2017,45(1):30.
- [3] 吕林军,赵连英,赵沉沉,等. 新型喷气涡流纺纱线的技术创新和发展趋势[J]. 纺织导报,2018(8):55. DOI:10.16481/j.cnki.citl.2018.08.012.
- [4] 王青,叶明露,梁高翔,等. 喷嘴参数对喷气涡流纺内流场特性的影响研究[J]. 丝绸,2022,59(4):39-44.
- [5] ELDEEB M, MOUCKOVA E. Numerical simulation of the yarn formation process in Rieter air jet spinning[J]. The Journal of the Textile Institute,2017,108(7):1219-1226.
- [6] ORTLEK H G, NAIR F, KILIK R, et al. Effect of spindle diameter and spindle working period on the properties of 100% viscose MVS[J]. Fibers and Textiles in Eastern Europe,2008,16(3):20.

(下转第29页)