

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.05.002

喷孔锥度对喷气织机辅助喷嘴喷射性能的影响

陈永当^{1,2}, 程云飞^{1,2}, 殷俊清^{1,2}, 赵诚诚^{1,2}, 顾金芋^{1,2}

(1. 西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048;
2. 西安工程大学西安市现代智能纺织装备重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要:为探究喷孔锥度对喷气织机多圆孔辅助喷嘴喷射性能的影响规律,课题组设计了3类等大中心环形分布喷孔辅助喷嘴,研究其流场特性。分别建立了不同喷孔锥度时3类辅助喷嘴的流场模型;利用FLUENT软件对上述流场模型进行数值模拟,得到供气压力0.3 MPa时各辅助喷嘴对称面上速度云图、出口流速中心线上速度衰减曲线图及距喷嘴出口不同距离处截面速度分布图;提取截面上速度分布数据点得到了3类多圆孔辅助喷嘴0°和10°时距出口不同距离处截面速度径向分布图。结果表明:随喷孔锥度增大,各多圆孔辅助喷嘴的喷射性能明显增强;喷孔锥度大于0°时,喷孔锥度越大各型喷嘴出口处射流速度也随之增大。课题组既分析了喷孔锥度和孔心距各自单一因素对喷嘴喷射性能的影响,又考虑了喷孔锥度和孔心距双因素对喷嘴喷射性能的影响,结果表明喷孔锥度对辅助喷嘴整体喷射性能的影响较孔心距的影响更为显著。

关 键 词:喷气织机;辅助喷嘴;喷孔锥度;流场数值模拟;FLUENT

中图分类号:TS103.3;TH6

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)05-0006-07

Influence of Nozzle Taper on Comprehensive Performance of Air Jet Loom Auxiliary Nozzle

CHEN Yongdang^{1,2}, CHENG Yunfei^{1,2}, YIN Junqing^{1,2}, ZHAO Chengcheng^{1,2}, GU Jinyu^{1,2}

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Key Laboratory of Modern Intelligent Textile Equipment, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to explore the influence of nozzle taper on the jetting performance of the multi-hole auxiliary nozzle of air jet loom, three types of equal-center circular distribution auxiliary nozzles were designed to study the characteristics of the flow field. The flow field models of three types of auxiliary nozzles with different nozzle taper were established respectively and numerically simulated by FLUENT software. The velocity cloud map on the symmetry plane of each auxiliary nozzle, the velocity attenuation curve on the outlet velocity centerline and the velocity profile of the cross section at different distances from the nozzle outlet were obtained at the supply pressure of 0.3 MPa. The velocity distribution data points on the cross section were extracted to obtain the radial distribution of the cross section velocity of the three types of multi-hole auxiliary nozzles at different distances from the outlet at 0° and 10°. The results show that the jetting performance of each multi-hole auxiliary nozzle is obviously enhanced with the increase of the nozzle taper; When the nozzle taper is greater than 0°, the jet velocity at the outlet of each nozzle increases as the taper increases. Furthermore, the influences of single variable of nozzle taper or center distance and double variables of nozzle taper and hole center distance on the jetting performance of the multi-hole auxiliary nozzle were studied. The results show that the influence of

收稿日期:2020-05-30;修回日期:2020-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(61701384);西安工程大学研究生创新基金项目(chx2019091);陕西省科技厅重点产业链项目(2018TSCXL-GY-03-02);西安市科技计划项目(201805030YD8CG14-16);西安市现代智能纺织装备重点实验室建设项目(2019220614SYS021CG043);西安工程大学青年学术骨干支持计划;中国纺织工业联合会科技项目:电磁/气复合引纬技术研究(2019061);西安市科技计划科技创新人才服务企业项目:基于电磁效应的复合引纬技术研究(2020KJRC0017)。

第一作者简介:陈永当(1972),男,陕西潼关人,博士,教授,主要研究方向为先进制造技术。**通信作者:**程云飞(1990),男,山西阳高人,硕士研究生,主要研究方向为机电控制及自动化。E-mail:1149631125@qq.com

the nozzle taper on the overall jetting performance of the auxiliary nozzle is more significant than the hole center distance.

Keywords: air jet loom; auxiliary nozzle; nozzle taper; flow field numerical simulation; FLUENT

喷气织机作为目前重要的织造机械,国内外相关科研人员对其进行了大量研究。喷气织机在织造中具有宽幅、高效和高产等优点。在实际引纬过程中,纬纱由主喷嘴喷出进入引纬通道再由辅助喷嘴提供持续的引纬气流将其输送到终点。辅助喷嘴的耗气量在正常引纬时占整机耗气量的70%~80%^[1]。为提高生产率,降低能耗,提高引纬质量,辅助喷嘴流场特性的研究对于优化辅助喷嘴的结构参数具有重要参考价值^[2-3]。

喷嘴结构研究是辅助喷嘴的研究重点之一,相关学者对不同孔目喷嘴的喷孔形状^[4-5]、单圆孔孔径^[6]及其锥度值^[7]、矩形喷孔不同长宽比^[8]以及射流出口截面积大小等进行了研究,得到了不同孔目下喷孔形状、单圆孔孔径及锥度值对于辅助喷嘴的喷射性能影响规律、矩形孔最优长宽比以及单圆孔辅助喷嘴不同孔径时对应最佳锥度值等。广少博等^[9]研究了延伸喷嘴的不同结构参数对导纱管内气流速度和气流场稳定性的影响并对延伸喷嘴结构及其参数进行优化。张凤君^[10]将气流与纬纱的相互作用模型简化为一类变长度纤维束的流固耦合动力学问题,研究了其简化模型在流场中的动态响应特性。陈巧兰等^[11]利用FLUENT软件对比分析了不同喷孔直径辅助喷嘴的喷射性能,对辅助喷嘴的相关结构参数进行了优化。张敏等^[12]对喷气织机辅助喷嘴流场进行数值模拟,得到了辅助喷嘴在不同模拟参数下的纬纱飞行中心线上气流速度分布情况。孔双祥^[13]对辅助喷嘴的不同结构参数对喷射性能和耗气量的影响进行了较为详细的数值分析,以射流中心线上速度衰减曲线积分值作为辅助喷嘴综合性能评价指标并对不同类型的辅助喷嘴进行了性能评价。胥光申等^[14]通过对不同类型辅助喷嘴数值计算结果对比分析,得出了中心环形分布多圆孔结构辅助喷嘴具有较好综合性能的结论。

课题组在文献[14]的研究基础上设计了3类中心环形喷孔形式的辅助喷嘴并对其流场特性展开研究。以数值模拟计算的方法,进一步分析多孔结构形式下,喷孔锥度及孔心距对辅助喷嘴喷射性能的影响,获得其影响规律。

1 多圆孔辅助喷嘴结构模型

课题组以图1所示生产中常用的喷孔直径1.5 mm单圆孔辅助喷嘴为基础,依据喷射出口面积等效原则(出口总面积 $1.766\ 25\text{ mm}^2$),采用等大、均布及递增式喷孔数量,设计了4孔、5孔及6孔3类中心环

形喷孔结构的辅助喷嘴,如图2所示。由于受到辅助喷嘴壁厚限制(0.4 mm),为保证各喷孔结构完整性,限定喷孔最大锥度值为 10° ,最小孔心距为0.70 mm。

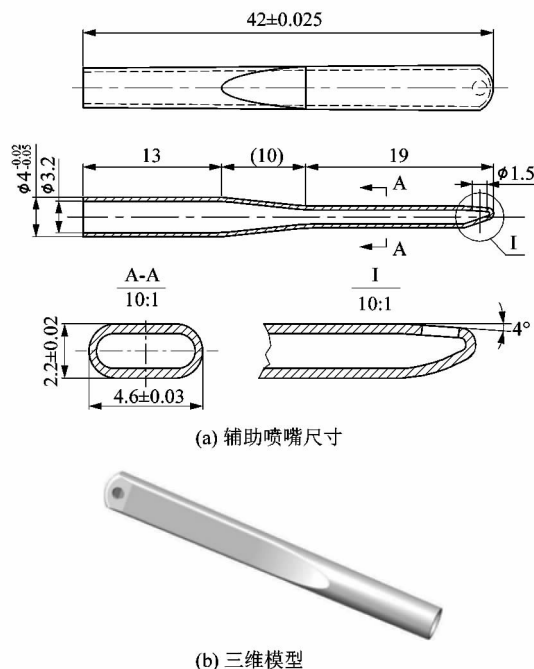


图1 单圆孔辅助喷嘴详细结构参数值及其三维模型
Figure 1 Detailed structural parameters of single-hole auxiliary nozzle and its three-dimensional model

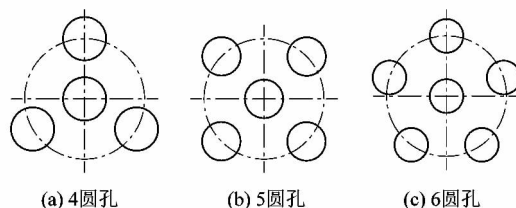


图2 多圆孔辅助喷嘴喷孔排布示意
Figure 2 Layout diagram of multi-hole auxiliary nozzle orifice

多圆孔辅助喷嘴喷孔三维特征示意如图3所示。



图3 多圆孔辅助喷嘴喷孔三维特征示意
Figure 3 Three-dimensional feature diagram of multi-hole auxiliary nozzle orifice

如表 1 所示,中心环形 4 圆孔的孔径为 0.75 mm,其中一喷孔位于喷嘴出口中心处,其余 3 喷孔均匀分布于直径为 1.8 mm 的圆周上,单个喷孔面积为 $0.441\ 5\ \text{mm}^2$,出口总面积为 $4 \times 0.441\ 5\ \text{mm}^2$,即 $1.766\ 25\ \text{mm}^2$ 。以此类推,中心环形分布 5 圆孔、6 圆孔的孔径分别为 0.670 8 和 0.612 4 mm,除中心圆孔外其余喷孔分别均布于直径为 1.7 和 1.5 mm 的圆周上,单个喷孔出口面积分别为 $0.353\ 2$ 和 $0.294\ 3\ \text{mm}^2$ 。辅助喷嘴喷孔实际加工中通常采用电火花方法^[15],目前电火花加工机精度普遍在 $\pm 0.005\ \text{mm}$,一些高端机型精度可达 $\pm 0.002\ \text{mm}$ 。文中 3 类辅助喷嘴喷孔参数尺寸均大于 0.1 mm,因此符合实际生产加工要求。

表 1 3 类多圆孔辅助喷嘴喷孔结构参数

Table 1 Structure parameters of three types of multi-hole auxiliary nozzle orifice

类型	圆孔直径/mm	孔数目	喷孔总面积/ mm^2	孔心距/mm
4 圆孔	0.750 0	4	1.766 25	0.70
5 圆孔	0.670 8	5	1.766 25	0.85
6 圆孔	0.612 4	6	1.766 25	0.76

2 多圆孔辅助喷嘴三维流场建模

笔者仅以中心环形 4 圆孔辅助喷嘴为例说明流场三维模型的建立及其求解过程,其余各类辅助喷嘴处理方式与此类似。

2.1 辅助喷嘴流场三维模型建立

课题组首先利用三维建模软件建立了不同喷孔锥度时 3 类辅助喷嘴的半流场模型,图 4 所示为划分网格并设置边界后辅助喷嘴的三维半流场模型,为全面展现流场速度云图,外部远扬流场的长度取 110 mm,半径取 15 mm。

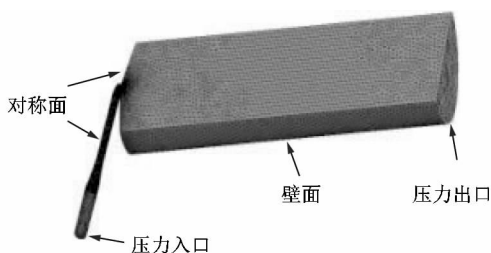


图 4 辅助喷嘴三维流场模型网格划分及边界设定

Figure 4 Three-dimensional flow field model meshing and boundary setting of auxiliary nozzle

2.2 模型网格的划分及边界条件设定

课题组利用 Mesh 对辅助喷嘴三维流场模型进行网格划分,其中网格密度最大取为 100,划分后生成的自由四面体网格数量约为五十万个左右;网格生成后分别设置其压力入口、壁面、对称面及压力出口等边界

条件。将定义好边界条件的网格文件导入 FLUENT 中检查是否可以被求解,其中 FLUENT 中入口供气压力设定为 0.3 MPa,温度设定为 293 K,湍动能 κ 为 $5.019\ 2\ \text{m}^2/\text{s}^2$,入口处湍动耗散率 ε 为 $8\ 428.8\ \text{m}^2/\text{s}^3$,压力出口总压 101 325 Pa,静压 297 510 Pa。

2.3 求解器设置

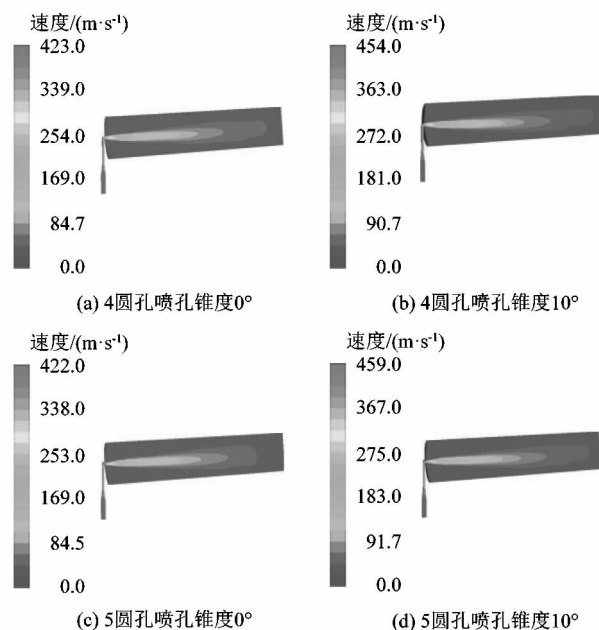
辅助喷嘴射流为高速、可压的黏性流体,且流动弯曲程度大,应变率及 Re 值高,湍流模型选用 RNG κ - ε 双方程模型时效果较好,流体介质选用理想气体,混合初始化后迭代次数设置为 500 次进行数值计算。

3 结果分析

现行辅助喷嘴主要以辅助喷嘴最大出口风速,辅助喷嘴射流中心线上速度衰减趋势,辅助喷嘴的耗气量等作为评价标准。笔者在已有评价标准基础上对比了 3 类多圆孔辅助喷嘴不同锥度下距喷嘴出口不同距离处截面速度,并提取数据绘制了其距出口不同距离处截面速度径向分布图,以此作为判断依据对各类辅助喷嘴进行比较分析。

3.1 对称面上速度云图

图 5 所示为供气压力 0.3 MPa,喷嘴出口总面积 $1.766\ 25\ \text{mm}^2$ 时,3 类多圆孔辅助喷嘴喷孔锥度 0° 和最大锥度 10° 时对称面上速度分布云图。图中可以看出最小和最大锥度下 3 类多圆孔辅助喷嘴的自由射流速度分布情况,3 类辅助喷嘴在喷孔锥度为 0° 时的出口处最大速度值分别为:423,422 和 429 m/s;喷孔锥度为 10° 时的出口处最大速度值分别为:454,459 和 471 m/s。



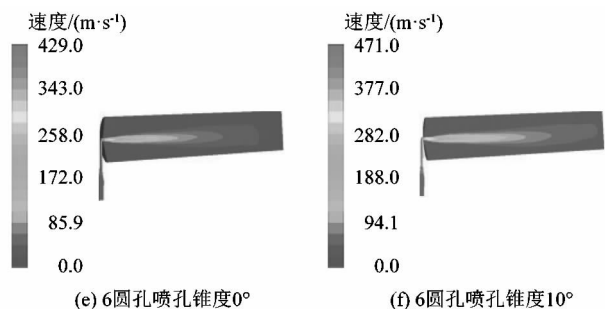


图5 不同锥度下3类多圆孔辅助喷嘴
对称面上速度分布云图

Figure 5 Flow distribution of three types of auxiliary
nozzles on different planes under different taper

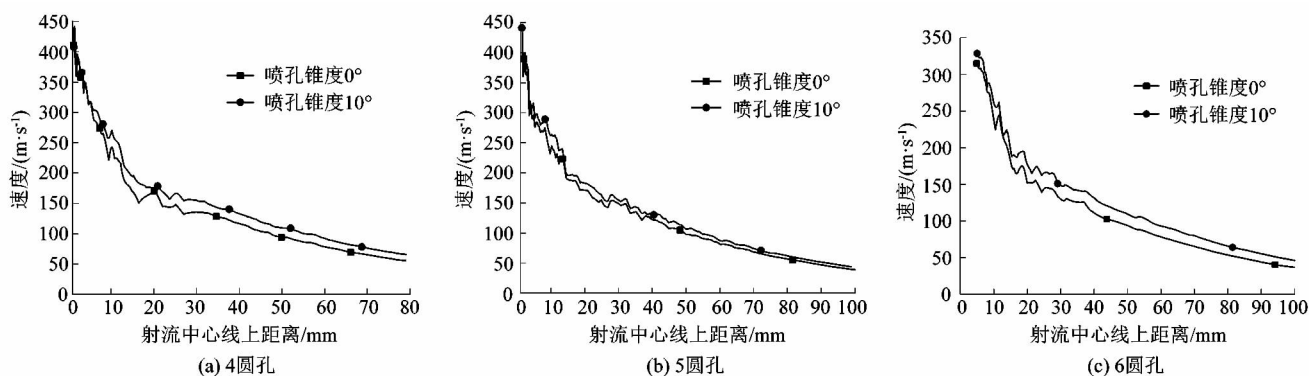


图6 3类多圆孔辅助喷嘴喷孔锥度0°和10°时射流中心线上速度衰减曲线

Figure 6 Velocity attenuation curve of jet centerline at nozzle taper of 0° and 10° for three types of auxiliary nozzles

由图6~7可知:①3类多圆孔辅助喷嘴的速度衰减曲线较为相似,表明其喷射性能类似,射流速度均在喷嘴出口处达到最大,在5~15 mm范围内曲线斜率较大,说明该区域内气流速度衰减较快。②3类多圆孔辅助喷嘴无锥度时的速度衰减曲线均位于喷孔锥度10°时曲线下方,且无锥度时速度衰减更快,这说明给不同类型多圆孔辅助喷嘴喷孔增加一定锥度后其喷射性能均得到了一定程度的提升。③增加喷孔锥度取值数来探究其对辅助喷嘴喷射性能的影响规律,当喷孔锥度为0°,3°,6°,9°和10°时,3类多圆孔辅助喷嘴的速度衰减曲线呈梯次分布且逐级递增。由于其规律类似,文中仅给出了中心环形4圆孔辅助喷嘴不同锥度下射流中心线上速度衰减曲线图(图7)。

3.3 距喷嘴出口不同距离处截面速度对比

图8~9分别为中心环形4圆孔辅助喷嘴喷孔锥度0°和10°时距出口不同距离处截面速度云图。距喷嘴出口较远处整体气流速度较高且气流波动较为剧烈不利于引纬,故笔者从距喷嘴出口20 mm处开始以步长30 mm为间隔截取了3个截面,得到20,50和80

3.2 气流中心线上速度分布

图6为3类多圆孔辅助喷嘴在供气压力0.3 MPa,喷孔无锥度和最大锥度时气流中心线上速度衰减曲线对比图。由于距离喷嘴出口较远处(0~10 mm)的气流速度较高且气流波动较为剧烈,速度衰减急剧,不利于引纬,而距离出口较远处气流速度又不足以支撑纱线飞行。为更好说明喷孔锥度对辅助喷嘴喷射性能影响,课题组提取了3类辅助喷嘴射流中心线上距喷嘴出口处5~100 mm之间数据并绘制了其速度衰减曲线图。

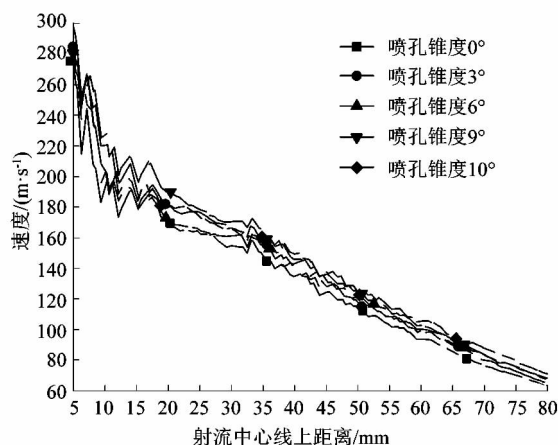
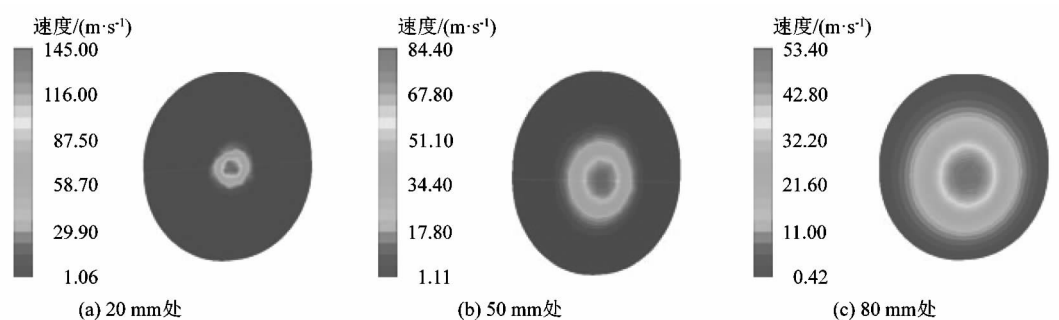
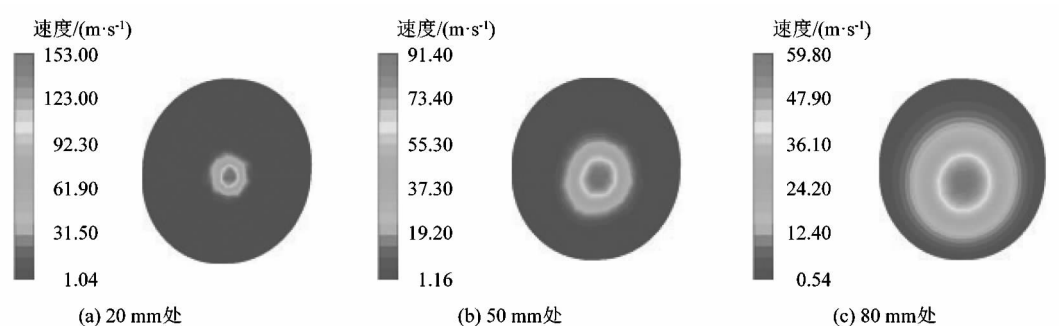


图7 4圆孔辅助喷嘴不同锥度下射流中心线上
速度衰减曲线

Figure 7 Velocity attenuation curve of the jet centerline
under different taper of 4 hole auxiliary nozzle

mm处截面速度分布云图;由图可见在距喷嘴出口越远处其核心区域气流速度越小,同时距离出口越远处气流扩散速度越快导致其气流速度等效圆直径也越大。

图8 4圆孔辅助喷嘴喷孔锥度 0° 时距出口不同距离处截面速度云图Figure 8 Cross section velocity cloud map at different distances from nozzle outlet of 4 hole auxiliary nozzle at taper = 0° 图9 4圆孔辅助喷嘴喷孔锥度 10° 时距出口不同距离处截面速度云图Figure 9 Cross section velocity cloud map at different distances from nozzle outlet of 4 hole auxiliary nozzle at taper = 10°

进一步地,提取各截面上径向速度分布数据点并绘制其不同截面上速度径向分布对比图,得到3类多圆孔辅助喷嘴 0° 和 10° 时距喷嘴出口不同距离处截面速度径向分布,如图10所示。图中可以清晰看出3类多圆孔辅助喷嘴在给辅助喷嘴增加锥度(10°)后其不同距离截面上核心区域速度均高于无锥度时的速度;同时可知锥度孔辅助喷嘴不同截面上速度大于 30 m/s (TT-800喷气织机运行时纱线飞行最高速度要大于 30 m/s)的等效圆直径也更大。以图10(a)为例,在距喷嘴出口 80 mm 处、射流速度大于 30 m/s 时喷孔锥度为 0° 时的等效圆直径约为 10.1 mm ,而喷孔锥度为 10° 时的等效圆直径约为 11.3 mm 。

综上所述中心环形多圆孔辅助喷嘴的锥度增加后其整体喷射性能有显著提升。以中心环形6圆孔辅助喷嘴为例,喷孔锥度 10° 时其出口处射流速度较 0° 时提升了约 9.5% 以上,其余2类多圆孔辅助喷嘴在喷孔锥度大于 0° 时出口处射流速度也均有不同程度提升;以中心环形5圆孔辅助喷嘴为例,喷孔锥度 0° 和 10° 时距喷嘴出口 60 mm 处时射流速度分别衰减了约 74.51% 和 70.94% ,但是喷孔锥度 10° 的整体射流速

度较喷孔锥度 0° 时提升了 3.57% 左右,这表明中心环形孔辅助喷嘴在给喷孔增加锥度后可以进一步提高射流集束性抑制气流扩散,延缓射流速度的衰减进而提升其整体喷射性能。

4 多圆孔辅助喷嘴喷射性能单/双因素分析

本节在前文研究基础上,仍以前文所述相同孔心距时中心环形5圆孔辅助喷嘴为例对各影响因素进行进一步研究。

从表1可知中心环形5圆孔辅助喷嘴孔心距 0.85 mm ,初步选取可优化喷孔锥度区间为 $6^\circ \sim 10^\circ$ 。以步长 0.1° 计可得到40组不同锥度数据,分别建立其不同锥度下流场模型并进行数值模拟,对结果进行分析得到该型辅助喷嘴最优锥度区间为 $8.4^\circ \sim 9.9^\circ$;在最优锥度区间范围内喷嘴出口处射流速度区间为 $445 \sim 459\text{ m/s}$;喷孔锥度为 9.8° 时出口处射流速度最大达到 459 m/s 。选取喷孔无锥度时的流场数据及最优锥度区间内的4组流场数据,得到其气流中心线上速度衰减曲线图并进行分析比较。图11(a)可见该型辅助喷嘴在喷孔无锥度时与最优锥度区间范围内各喷嘴中心线上速度衰减曲线图差异明显。最优锥度区间

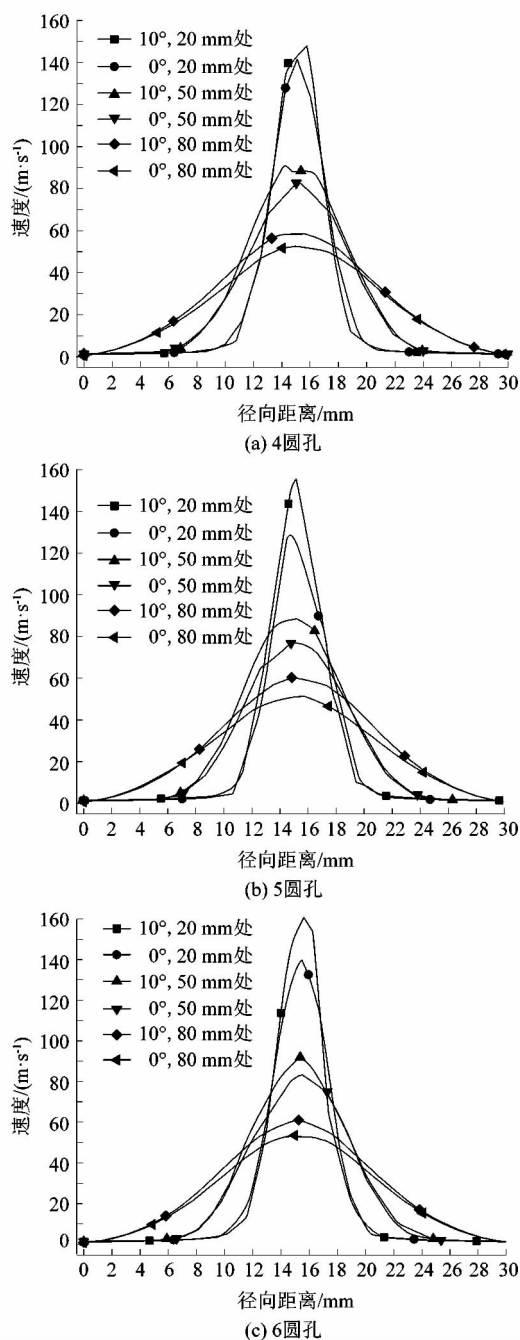


图10 3类多圆孔辅助喷嘴0°和10°时距出口不同距离处截面速度径向分布对比

Figure 10 Comparison of cross section velocity radial distribution of 3 types of multi-hole auxiliary nozzles at different distances from outlet at 0° and 10°

范围内4条曲线重合度极高且均位于无锥度曲线上方,说明在该区间内喷嘴的整体喷射性能类似且明显优于无锥度喷孔辅助喷嘴。

同理,以中心环形5圆孔喷孔锥度8.5°时辅助喷嘴为研究对象,探究其不同孔心距下的喷射性能。因

其孔心距可取区间范围为0.80~1.05 mm,以步长0.01 mm计可得25组不同孔心距数据。建立三维模型数值模拟并对结果进行分析,可知其它参数不变时,随孔心距的增大喷嘴出口处速度略有下降;孔心距取值区间内以不同间距选取5组孔心距参数(含最小值、中间值及最大值)流场数据可得如图11(b)所示气流中心线上速度衰减曲线,图中曲线整体较为相似且在40 mm之后曲线的整体重合度较高,表明孔心距的变化对于辅助喷嘴喷射性能的影响并不显著。

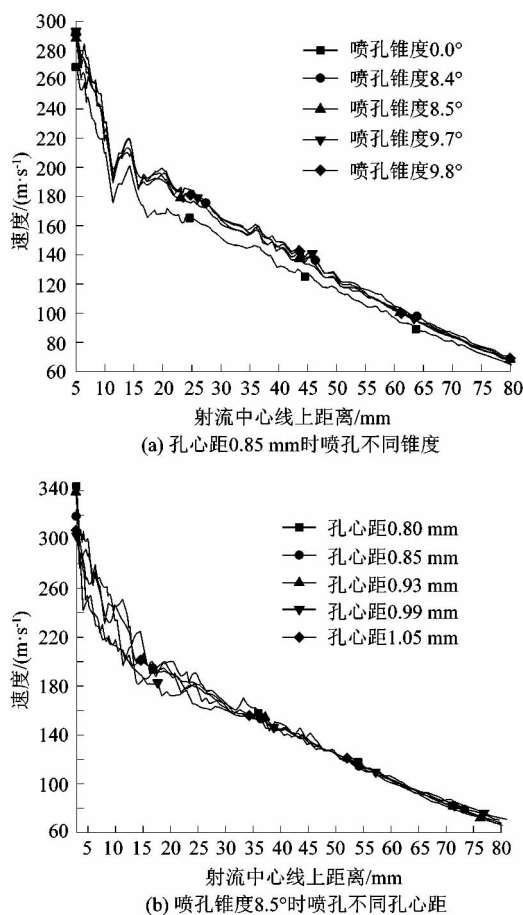


图11 5圆孔辅助喷嘴不同参数下气流中心线上速度衰减曲线

Figure 11 Velocity attenuation curve on centerline of airflow under different parameters of 5 hole auxiliary nozzle

进一步地,采用2因素非重复实验方差分析法来探究喷孔锥度 A 和孔心距 B 对中心环形5圆孔辅助喷嘴喷射性能的影响显著性。其中因素 A 取4种水平,因素 B 取5种水平,在组合水平 (A_i, B_j) ($i=1,2,3,4; j=1,2,3,4,5$)条件下建立流场三维模型并利用FLUENT进行数值模拟得到其计算结果并提取其出口

处速度值,如表2~3所示。

表2 组合因素水平

Table 2 Mixing levels and factors

水平	因素	
	喷孔锥度 $A/(^\circ)$	孔心距 B/mm
1	0	0.80
2	3	0.85
3	6	0.90
4	9	0.95
5		1.00

表3 5圆孔辅助喷嘴双变量下出口速度值

Table 3 Outlet velocity value of 5 hole auxiliary nozzle under two variables

因素	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)				
	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5
A_1	417	416	416	418	415
A_2	438	434	437	435	433
A_3	442	443	444	444	442
A_4	447	445	446	443	444

计算因素 A 和因素 B 的离差平方和得:

$$Q_A = 5 \sum_{i=1}^4 (\bar{X}_i - \bar{X})^2 = 2\,040.41; \quad (1)$$

$$Q_B = 4 \sum_{j=1}^5 (\bar{X}_j - \bar{X})^2 = 16.20. \quad (2)$$

式中 Q_A 和 Q_B 分别为因素 A 和因素 B 对应的离差平方和。进一步计算可得因素 A 和因素 B 的 F 值分别为: $F_A = 5.13$; $F_B = 0.03$ 。 F 值大小代表了不同水平取值对于试验结果的显著性影响,由计算结果可知 F_A 远大于 F_B ,即 A 因素对结果的影响要远大于 B 因素,说明喷孔锥度对于该型辅助喷嘴喷射性能的影响比孔心距显著。

5 结论

课题组通过分析多圆孔辅助喷嘴在相同供气压力、相同出口面积等条件下不同喷孔数目、孔心距和喷孔锥度等条件对辅助喷嘴流场的影响规律,得到结论如下:

1) 辅助喷嘴的喷孔增加锥度后喷嘴的整体喷射性得到提升,随喷孔锥度的增大,各型喷嘴的出口速度随之增大,气流中心线上射流衰减速度较无锥度时减慢。中心环形5圆孔辅助喷嘴喷孔锥度 10° 时较 0° 时达到相同射程(60 mm)时其整体射流速度提升了约3.57%左右,表明中心环形孔辅助喷嘴在给喷孔增加锥度后,进一步提高了射流的集束性,抑制了气流扩散,延缓了射流速度的衰减,提升了辅助喷嘴的整体喷射性能。

2) 喷孔锥度大于 0° 时,随喷孔数目的增加,各型喷嘴出口处射流速度也随之增大。其中中心环形6圆孔辅助喷嘴在喷孔锥度 10° 时的出口速度最大达到了471 m/s。

3) 中心环形5圆孔的最优锥度区间为 $8.4^\circ \sim 9.9^\circ$;在最优锥度区间内喷嘴出口处射流速度区间为445~459 m/s;最优锥度区间范围内其气流中心线上速度衰减曲线重合度极高,说明在该区间内喷嘴的整体喷射性能类似。喷孔锥度为 9.8° 时该型喷嘴出口处射流速度最大达到459 m/s。

4) 考虑喷孔锥度和孔心距双因素情况时,通过计算2者的 F 值得出喷孔锥度对辅助喷嘴整体喷射性能的影响较孔心距的影响更为显著。

参考文献:

- [1] 严鹤群,戴继光. 喷气织机原理与使用:第2版[M]. 北京:中国纺织出版社,2006:37.
- [2] GKTEPE O,BOZKAN O. Study on reduction of air consumption on air-jet weaving machines[J]. Textile Research Journal,2008,78(9): 816-824.
- [3] BELFORTE G, MATTIAZZO G, TESTORE F, et al. Experimental investigation on air-jet loom sub-nozzles for weft yarn insertion[J]. Textile Research Journal,2011,81(8):791-797.
- [4] 孔双祥,胥光申. 基于 FLUENT 喷气织机不同单孔辅助喷嘴的结构优化[J]. 西安工程大学学报,2017,31(1):87.
- [5] 陈永当,程云飞,殷俊清,等. 喷气织机异形孔辅助喷嘴的结构及其喷射性能[J]. 西安工程大学学报,2020,34(1):13.
- [6] 陈巧兰,王鸿博,高卫东,等. 喷气织机单圆孔辅助喷嘴结构优化[J]. 纺织学报,2016,37(1):142-146.
- [7] 陈巧兰. 喷气织机单孔辅助喷嘴流场模拟及结构优化[D]. 无锡:江南大学,2015:26.
- [8] 张亮. 喷气织机辅助流场研究及喷孔结构优化[D]. 苏州:苏州大学,2016:52.
- [9] 广少博,金玉珍,祝晓晨. 喷气织机延伸喷嘴内气流场特性分析[J]. 纺织学报,2019,40(4):135-139.
- [10] 张凤君. 流体牵引轴向运动纤维束的动态特性研究[D]. 苏州:苏州大学,2018:52.
- [11] 陈巧兰. 喷气织机单孔辅助喷嘴流场模拟及结构优化[D]. 无锡:江南大学,2015:22-26.
- [12] 张敏,王鸿博,高卫东,等. 喷气织机辅助喷嘴流场特性与耗气量分析[J]. 纺织学报,2016,37(12):123-128.
- [13] 孔双祥. 基于3D打印技术的喷气织机辅助喷嘴结构优化研究[D]. 西安:西安工程大学,2017:52.
- [14] 胥光申,孔双祥,刘洋,等. 基于 FLUENT 的喷气织机辅助喷嘴综合性能[J]. 纺织学报,2018,39(8):128.
- [15] 张亮,冯志华,刘帅,等. 喷气织机辅助喷孔结构优化[J]. 纺织学报,2016,37(6):112-117.