

文章编号: 0253-9721(2008)05-0019-04

解析法评价旋转气流对喷气涡流纱的加捻强度

邹专勇, 俞建勇, 薛文良, 程隆棣

(东华大学 纺织面料技术教育部重点实验室, 上海 201620)

摘要 在对喷嘴内部流场数值模拟的基础上通过解析法研究旋转气流对喷气涡流纱加捻的强度。研究结果表明: 旋转气流对喷气涡流纱的加捻强度是喷孔数目、喷孔倾角、喷孔直径、喷嘴直径、空心锭外径、喷孔出口速度(即喷嘴气压)、空心锭入口与喷嘴入口间距、尾端自由端纤维倒伏空心锭上部的高度、纱线直径等的函数。喷孔出口速度增加, 旋转气流加捻强度增强; 加捻喷嘴直径减小, 旋转气流加捻强度增大; 空心锭入口与喷嘴入口间距增加, 旋转气流加捻强度减小; 空心锭外径增加, 旋转气流加捻强度增加。数值计算结果表明解析模型的有效性。

关键词 喷气涡流纺; 旋转气流; 加捻; 数值模拟; 解析模型

中图分类号: TS 101.2 文献标识码: A

Evaluating the strength of the vortex twist acting on the yarn in air jet vortex spinning

ZOU Zhuanyong, YU Jianyong, XUE Wenliang, CHENG Longdi

(Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract The strength of the vortex twist acting on the air jet vortex yarn was investigated by analytical model based on simulating the flow field inside the nozzle. The result shows that the strength of the vortex twist acting on the air jet vortex yarn is regarded as a function of the number of jet orifices, jet orifice angle, diameter of the jet orifice, inner diameter of the nozzle, outer diameter of the hollow spindle, velocity at the entrance of the jet orifice (namely nozzle pressure), distance between the entrance of the hollow spindle and the entrance of the nozzle, the projecting height of open-trail-end fibers twined over the top exterior of the hollow spindle and yarn diameter. Increasing the velocity at exit of the jet orifice increases the strength twisted by the whirled airflow. The strength twisted by the whirled airflow increases with decreasing the inlet diameter of the nozzle block and becomes weaker with increasing the distance from the inlet of the nozzle block to the inlet of the hollow spindle. The strength twisted by the whirled airflow enhances with increasing the outer diameter of the hollow spindle. The numerical results show the effectiveness of analytical model.

Key words air jet vortex spinning; whirled airflow; twist; numerical simulation; analytical model

气流被广泛应用于纺织加工领域^[1-2]。喷气涡流纺是利用高速旋转气流加捻尾端自由端纤维成纱^[3]。Guldemet 和 Tyagi 等人通过实验研究了喷气涡流纺工艺参数对纱线结构与性能的影响^[4-5]; Zeng 等人应用解析法探讨了喷气纺中气流对纱线的加捻强度^[6]; 文献[7]将 Zeng 等人建立的解析模型用于讨论喷气涡流纺中气流对纱线捻度的控制, 但未能准确描述喷气涡流纺的成纱区域, 忽略了高速旋转气流对倒伏在空心锭上部表面自由端纤维的

加捻。本文充分考虑高速气流对自由端纤维加捻的区域, 基于喷嘴内部流场特征建立解析模型, 讨论旋转气流对喷气涡流纱的加捻强度。

1 喷嘴内部三维流场表征

喷嘴内部气流流动属亚音速流动, 根据雷诺数定义可知喷嘴内部流动属湍流。结合喷嘴结构参数, 确定流场模拟区域(如图 1 所示)。

收稿日期: 2007-05-13 修回日期: 2007-10-09

作者简介: 邹专勇(1982-), 男, 博士生。主要研究方向为纺纱工艺与纱线性能。程隆棣, 通讯作者, E-mail: ldch@dhu.edu.cn.

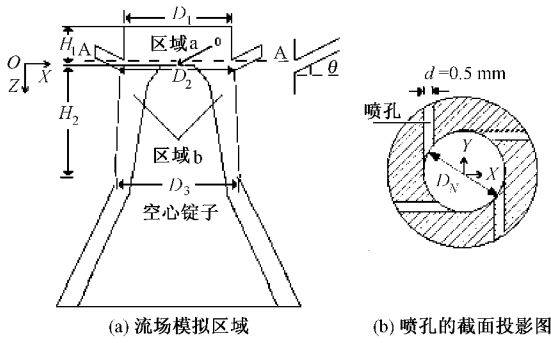


图 1 流场模拟区域及喷嘴截面投影图

Fig. 1 Schematic model of the computational zone (a) and projection of jet orifices at section (b)

采用标准 $\kappa - \epsilon$ 湍流模型对喷嘴内部流场流动进行数值计算。计算模型假定：喷嘴内部气流属黏性、不可压缩、等焓流动；喷嘴入口及空心锭入口设定为对称边界，喷嘴出口设定速度进口边界，喷嘴出口速度 u_0 由等焓流动确定^[8]；喷嘴出口设定为出流边界；壁面采用无滑移边界。计算模型控制方程组如下。

连续性方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j'} \right) + S_i \quad (2)$$

与 k, ϵ 相对应的输运方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon} \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中： ρ 为旋转气流密度； $u_i, u_j (i, j = 1, 2, 3)$ 为速度分量； $\rho \overline{u_i u_j'}$ ($i, j = 1, 2, 3$) 为雷诺应力； p 为气压； S_i 为源项； $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项； $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 为湍动能黏度； $C_{1\epsilon} = 1.44; C_{2\epsilon} = 1.92; C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.0; \sigma_\epsilon = 1.3$ 。

数值计算需给定进口边界上 κ, ϵ 的估计值。 κ 为流动能的 0.4%， $\epsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} k^{\frac{3}{2}} / l$ (l 为喷嘴入口当量

尺寸的 1/10)^[9]。给定速度进口初值 $u_0 = 260 \text{ m/s}$ ，数值计算结果表明喷嘴内部切向气流符合旋转气流理论^[10]。A - A 截面切向速度沿喷嘴半径分布见图 2。

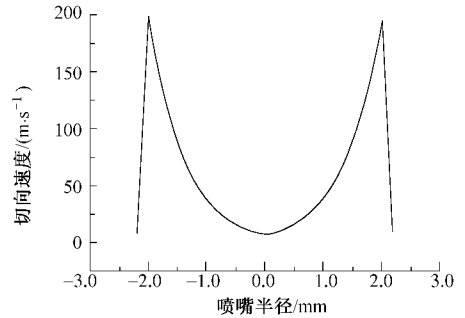


图 2 A - A 截面切向速度沿喷嘴半径的分布

Fig. 2 Tangential velocity distribution along the nozzle at section A - A

2 解析模型

2.1 模型假设

1) 纤维束在切向气流膨胀作用下，有大量的尾端自由端纤维倒伏在空心锭的上部外表面，然后旋转气流对自由端纤维加捻，因此假定切向气流对自由端纤维的加捻发生在区域 a(喷嘴入口与空心锭入口之间)及区域 b(空心锭上部外表面与喷嘴内表面构成的区域)，喷嘴区域 a 与区域 b 的半径差异较小，可简化为 $D_1 = D_2 = D_3 = D_N$ 。

2) 高速旋转气流加捻自由端纤维，消耗大量动能，为此假定接近喷嘴出口段的切向气流流速较小，建立解析模型时可忽略该部分水平方向的动量。

3) 切向气流符合旋转气流理论，由图 2 可知势流旋转区域远小于似固旋转区域，则忽略势流旋转区域，认为切向速度 u_r 在水平面上分布可由式(5)表示。

$$u_r = kR^n \quad (5)$$

式中： k, n 是常数，可由实验求得，也可通过解析方法求得； R 为喷嘴半径。

2.2 解析模型的建立

由 2.1 模型的假设条件可知，喷嘴出口处的水平动量矩等于区域 a 与区域 b 水平动量距之和，结合图 3 可得：

$$N\rho\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 u_0^2 \cos^2 \theta \frac{D_N - d}{2} = \int_0^{H_1} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{D_N}{2}} \rho u_r R^2 dR d\alpha dh +$$

$$\int_0^{H_2} \int_0^{2\pi} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D_N}{2}} \rho u_r R^2 dR d\alpha dh \quad (6)$$

式中: N 为喷孔数目; θ 为喷孔倾角; d 、 D_N 分别为喷孔直径、喷嘴直径; D_H 为空心锭外径; H_1 为空心锭入口与喷嘴入口间距; H_2 为纤维倒伏在空心锭上部外表面的高度; u_0 为喷孔出口的初速。

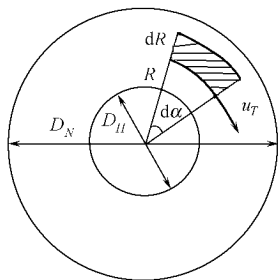


图 3 喷嘴横截面微元的动量

Fig.3 Momentum of an infinitesimal area on a section of the nozzle

假定流体为不可压缩,则式(6)可简化为

$$N \frac{D_N - d}{16} d^2 u_0^2 \cos^2 \theta = \frac{k}{n+3} \left[(H_1 + H_2) \left(\frac{D_N}{2} \right)^{n+3} - H_2 \left(\frac{D_H}{2} \right)^{n+3} \right] \quad (7)$$

由式(7)可求得 k 的表达式:

$$k = \frac{N(n+3)(D_N - d)d^2 u_0^2 \cos^2 \theta}{16 \left[(H_1 + H_2) \left(\frac{D_N}{2} \right)^{n+3} - H_2 \left(\frac{D_H}{2} \right)^{n+3} \right]} \quad (8)$$

假定喷孔出口处的水平速度与喷嘴半径 ($R = (D_N - d)/2$) 处的切向速度相等,则有:

$$u_r(R) \Big|_{R=\frac{D_N-d}{2}} = u_0 \cos \theta \quad (9)$$

联立式(5)与式(9)得:

$$k \left(\frac{D_N - d}{2} \right)^n = u_0 \cos \theta \quad (10)$$

化简式(10)得 n 的解析表达式:

$$n = \frac{\log \frac{D_N - d}{2} \frac{u_0 \cos \theta}{k}}{\log \frac{D_N - d}{2}} \quad (11)$$

用 Zeng-He 计算方法可知,旋转气流作用在喷气涡流纱上的理论加捻力 T 可用式(12)表示:

$$T = \mu d_y \frac{\partial u}{\partial R} \Big|_{R=\frac{D_N}{2}} = \mu k n d_y \left(\frac{D_N}{2} \right)^{n-1} = \frac{\mu d_y N n (n+3) (D_N - d) d^2 u_0^2 \cos^2 \theta D_N^{n-1}}{(H_1 + H_2) D_N^{n+3} - H_2 D_H^{n+3}} \quad (12)$$

式中: μ 为旋转气流的黏性系数; d_y 为纱线直径。

2.3 解析模型的分析与验证

分析式(12)可知:喷气涡流纺的成纱强力受到

喷孔数目、喷孔倾角、喷孔直径、喷嘴直径、空心锭外径、喷孔出口速度(即喷嘴气压)、空心锭入口与喷嘴入口间距、尾端自由端纤维倒伏在空心锭上部高度、纱线直径等因素的影响。旋转气流对喷气涡流纱的加捻强度是喷孔数目、喷孔倾角、喷孔直径、喷嘴直径、空心锭外径、喷孔出口速度(即喷嘴气压)、空心锭入口与喷嘴入口间距、尾端自由端纤维倒伏空心锭上部的高度、纱线直径等的函数。

喷孔出口速度(喷嘴气压)增加,旋转气流加捻强度 T 增强,对自由端纤维加捻程度越大。喷嘴加捻腔直径越小, T 越大。数值计算结果表明喷嘴入口直径越小,切向流速增加,对尾端自由端纤维加捻程度增大,成纱强力提高,这与解析模型得出的结论一致^[11]。空心锭入口与喷嘴入口间距 H_1 增加, T 减小,这也可通过数值计算得到验证。数值计算结果表明 H_1 增加,切向速度减小,导致旋转气流对尾端自由端的加捻作用力减少,从而使得包缠纤维加捻程度减弱^[11],但是 H_1 过大,纤维束进入加捻腔时易受气流干扰,造成落纤量增大,成纱强力减弱,细节较多,条干恶化;相反 H_1 过小,纤维束受到的控制加强,会导致包缠纤维数量大大减少。空心锭外径 D_H 增加, T 增加,有利于提高成纱强力。这主要是因为喷嘴截面空间减小,气流流速增大,但空心锭外径增加应尽量不防碍对自由端纤维的加捻。

3 结 论

1) 旋转气流对喷气涡流纱的加捻强度是喷孔数目、喷孔倾角、喷孔直径、喷嘴直径、空心锭外径、喷嘴入口直径、喷孔出口速度(即喷嘴气压)、空心锭入口与喷嘴入口间距、尾端自由端纤维倒伏在空心锭上部的高度、纱线直径等的函数。

2) 旋转气流加捻强度随喷孔出口速度的增加而增强,随喷嘴加捻腔直径的减小而增大,随空心锭入口与喷嘴入口间距增加而减小,随空心锭外径的增加而增加;数值计算结果验证了解析模型的有效性,该解析模型可为建立纺纱工艺与纱线结构模型提供参考。

3) 解析模型的提出对设计及优化喷嘴结构参数提供了理论支持。 FZXB

参考文献:

[1] Oxenham W, Grosberg P, Ilias M. The insertion of 'Twist' (下转第 30 页)

(上接第 21 页)

- into yarns by means of air-jets: part I – an experimental study of air-jet spinning [J]. *J Text Inst*, 1987, 78: 189 – 203.
- [2] Oxenham W, Acar M, Basu A, et al. Fiber motion and yarn forming in high speed air flows [C]//National Textile Center Annual Report.[s.n.], 2001: F99 – S06.
- [3] Gray W M. How MVS makes yarns [C]//12th Annual Engineer Fiber Selection.[s.n.], 1999: 1 – 7.
- [4] Guldemet Basal, William Oxenham. Effects of some process parameters on the structure and properties of vortex spun yarn [J]. *Textile Research Journal*, 2006, 76(6): 492 – 499.
- [5] Tyagi G K, Dhirendra Sharma, Salhotra K R. Process-structure-property relationship of polyester-cotton MVS yarns: part I – influence of processing variables on yarn structural parameters[J]. *Indian Journal of Fiber & Textile Research*, 2004, 29: 419 – 428.
- [6] Zeng Y C, Wan Yuqin, Yu C W, et al. Controlling the air vortex twist in air-jet spinning [J]. *Textile Research Journal*, 2005, 75(2): 175 – 177.
- [7] Liu Yong, Xu Lan. Controlling air vortex in air-vortex spinning by Zeng-He model [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2006, 7(4): 389 – 392.
- [8] 郁崇文, 张文赓. 喷气纺喷嘴中气流场的分布规律[J]. *中国纺织大学学报*, 1996, 22(4): 47 – 57.
- [9] 刘应中, 缪国平. 高等流体力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [10] 张文赓. 纺织气流问题[M]. 北京: 纺织工业出版社, 1989.
- [11] 邹专勇, 程隆棣, 薛文良, 等. 喷气涡流纺工艺参数对气流场影响的数值计算[J]. *纺织学报*, 2008, 29(4): 32 – 36.