

循环再生纤维在转杯纺成纱器内的运动模拟与分析

邵秋, 龚新霞, 杨瑞华*

(江南大学纺织科学与工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要:循环再生纤维长度短、整齐度差,在其转杯纺成纱过程中经常出现断头或难以接头的现象。为研究循环再生纤维成纱困难的原因,探究其在转杯纺成纱器关键部件中的运动规律,借助数值模拟软件 Rocky DEM 2022R1 和 ANSYS Fluent 2022R1 模拟两种不同长度(9.5 和 16.0 mm)的循环再生纤维多根连续进入凝聚槽后的运动规律,并与原棉纤维(28.0 mm)在转杯凝聚槽内的运动规律进行对比。结果表明:循环再生纤维和原棉纤维的纤维流在转杯纺成纱器内具有相同的运动趋势。相较于 16.0 和 28.0 mm 的纤维,9.5 mm 的循环再生纤维最易受到高速纤维流的影响;从输纤通道进入转杯,9.5 mm 单根纤维和纤维流均拥有最快的运动速度。纤维在凝聚槽中会形成纤维环,环上的大部分纤维呈伸直状态,部分弯钩纤维会形成圈结;其中 28.0 mm 原棉纤维形成纤维环上的圈结数量最少、圈结集聚程度最低、单根纤维运动最均匀。

关键词:循环再生纤维;转杯纺;纤维运动;流固耦合;纤维模型

中图分类号:TS 104.7 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2025)01-0009-07

Simulation and Analysis of the Motion of Recycled Fibers in Rotor Spinning Machine

SHAO Qiu, GONG Xinxia, YANG Ruihua*

(College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract:The recycled fiber is short in length and poor in uniformity, and it is often broken or difficult to join during the spinning process. In order to investigate the reasons for the difficulty in spinning recycled fibers and explore their motion patterns in key components of the rotor spinning machine, this paper used numerical simulation software Rocky DEM 2022R1 and ANSYS Fluent 2022R1 to simulate the motion patterns of two kinds of recycled fibers of different lengths (9.5 and 16.0 mm) after multiple fibers entered the coagulation tank continuously, compared them with those of raw cotton fibers (28.0 mm) in rotor coagulation tank. The results indicate that both recycled fibers and raw cotton fibers exhibit the same movement trend in rotor spinning machine. Compared to 16.0 and 28.0 mm fibers, 9.5 mm recycled fibers are more susceptible to high-speed fiber flow. Upon entering the rotor through the fiber transport channel, both individual 9.5 mm recycled fibers and their collective flow demonstrate highest movement speed. These fibers tend to form rings in the condensing groove, while most fibers remain straight, some hooked fibers may form loops. Among them, the fiber ring formed by 28.0 mm raw cotton fiber has the least number of loops, the lowest degree of loop aggregation, and the most smooth movement of a single fiber.

Key words:recycled fibers, rotor spinning, fiber movement, fluid structure coupling, fiber model

循环再生是指将已使用或已加工过的产品转化为新的原材料的过程。根据其原料的质量、耐用

性,以及循环工艺的基本要求,循环再生的过程会经历一次或多次的循环周期(原料—产品—原

收稿日期:2024-06-21; 修订日期:2024-09-14。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52273034);江苏省自然科学基金面上项目(BK20181350)。

作者简介:邵秋(1999—),女,硕士研究生。

*通信作者:杨瑞华(1981—),女,教授,博士生导师。主要研究方向为新型纺纱方法、再循环纺织品回收利用。

Email:yangrh@jiangnan.edu.cn

料)^[1]。循环再生纤维存在长度短、整齐度差等缺点,而转杯纺原料适应性广,具有生产流程短、效率高优点^[2-3],因此以循环再生纤维为原料生产转杯纺纱线是可行的。

转杯纺成纱过程中,由分梳辊对纤维须条进行开松梳理,纤维随转杯纺成纱器内负压形成的气流经过输棉通道进入转杯,在凝聚槽内汇集并合形成纤维条,经过加捻形成纱线,从引纱管引出^[4]。

高速旋转的转杯内部气流运动及分布极其复杂,但直接研究气流分布的规律难度很大。当前,计算机仿真技术的应用越来越广泛,基于计算流体动力学的数值计算方法多应用于纺织领域,以探究改进纺纱工艺的新方法^[5-7]。转杯纺在封闭空间的高速强负压气流场中完成成纱过程,因此研究成纱过程中的气流场特征和纤维运动形态是分析纱线结构和改进成纱工艺的重要手段。但目前针对转杯纺成纱器内纤维运动的研究主要集中在输纤通道^[8-10]方面,且多针对单根纤维的运动^[11-13],尚未有关于多根纤维在转杯内运动的研究。

文中对比分析多根循环再生纤维和原棉纤维在转杯纺成纱器内的运动特性,利用 Fluent 软件对转杯纺成纱通道内和转杯内的气流分布进行模拟计算;再将气流特征导入 Rocky DEM 2022R1 软件,建立柔性可弯折的纤维模型,探索转杯纺成纱过程中循环再生纤维的运动规律,并与原棉纤维运动进行对比,为解决循环再生纤维成纱困难提供思路 and 理论依据。

1 转杯纺成纱器模型的建立

1.1 几何模型与网格划分

文中采用 SolidWorks 软件建立转杯纺关键纺纱部件的三维几何模型,包括输纤通道、转杯和引纱管,具体如图 1 所示。

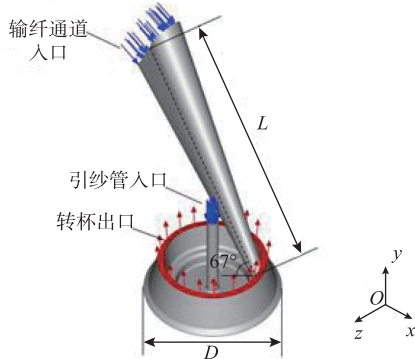


图 1 转杯纺成纱器三维模型

Fig. 1 Three dimensional model and of rotor spinning machine

图 1 中,蓝色箭头指向处分别为输纤通道入口和引纱管入口,红色箭头指向处为转杯负压出口;输纤通道中轴线长(L)为 65 mm,其与水平面的夹角为 67° ,转杯为 T 型凝聚槽,直径(D)为 34 mm。在 ICEM 软件中将文中使用的转杯纺成纱器模型划分为 994 135 个网格,具体如图 2 所示。

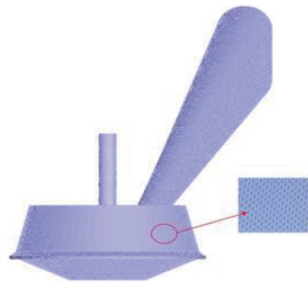


图 2 转杯纺成纱器模型网格划分

Fig. 2 Grid division of rotor spinning machine model

1.2 边界条件

输纤通道入口设置为速度入口,设定值为 10 m/s;引纱管入口设置为压力入口,设定值为标准大气压(101.325 kPa);转杯出口设置为压力出口,设定值为 -7 000 Pa,转杯自转为逆时针旋转,速度设定为 65 000 r/min。气流场选择 Standard k-epsilon 湍流模型,固体壁面附近流场模拟方法选择标准壁面函数(scalable wall functions, SWF),求解方法选择 SIMPLE 压力速度耦合方法,能量、湍动能、湍流耗散率均选择二阶迎风格式。

1.3 纤维模型的建立

在 Rocky DEM 中选择杆链纤维模型,纤维由一定数量的球形圆柱形杆组成,相邻的杆元件通过一个具有黏弹性的关节连接,具体如图 3 所示。

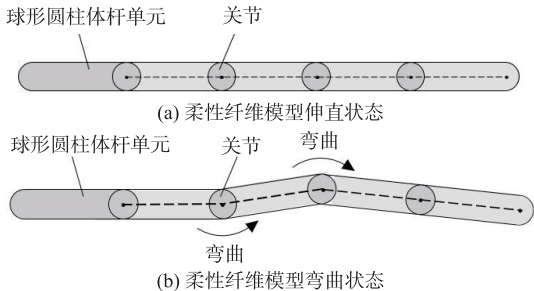


图 3 柔性纤维模型示意

Fig. 3 Schematic diagrams of flexible straight fibers

1.4 纤维运动方程

在 Rocky DEM 框架中,将纤维模型离散化,以拉格朗日方式跟踪计算域中的所有纤维。纤维运动的控制方程为

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_c + F_{fp} + F_f + m_p g; \quad (1)$$

$$\boldsymbol{J}_p = \frac{d\boldsymbol{\omega}_p}{dt} = \boldsymbol{M}_c + \boldsymbol{M}_{fp}。$$

(2)

式中: m_p 为纤维质量; v_p 为纤维速度; F_c 为纤维与成纱器壁面相互作用的接触力; F_{fp} 为纤维与流体相互作用的附加力; F_f 为浮力;矢量 \boldsymbol{g} 为重力加速度; t 为纤维运动时间;张量 \boldsymbol{J}_p 为转动惯量;矢量 $\boldsymbol{\omega}_p$ 为角速度; \boldsymbol{M}_c 为引起纤维旋转的切向力产生的净转矩; \boldsymbol{M}_{fp} 为由于流体相速度梯度引起的附加转矩。

2 纤维模拟初始条件

2.1 纤维流量

在公定回潮率 8.5% 条件下,纺制较常见、应用较广的中支纱线(36.44 tex 纯棉纱),计算其纤维流量^[14-15]。

以棉纤维为原型,根据 FZ/T 01101—2008^[16]取纤维密度为 1.54 g/cm³,棉纤维直径平均值为 20 μm,细度(t'_{tex})为 2.04 dtex,杨氏模量为 5 000 MPa,棉条定重(T'_{tex})为 3.6 g/m(3 600 tex)。

设定分梳辊直径(D_1)为 65 mm,分梳辊转速(V_1)为 7 000 r/min,转杯直径(D_2)为 34 mm,转杯转速(V_2)为 65 000 r/min。所纺棉纱线密度(T_{tex})为 36.44 tex。根据《棉纺手册》^[17]中的转杯纺纱线推荐捻系数,取设计捻系数(α_t)为 450。设计捻度计算公式为

$$t_{\text{tex}} = \frac{\alpha_t}{\sqrt{T_{\text{tex}}}}。$$

(3)

式中: t_{tex} 为设计捻度; α_t 为捻系数; T_{tex} 为纱线线密度。计算得到纱线捻度为 745.5 捻/m。

条子与纱线间牵伸倍数的计算公式为

$$n_1 = \eta \times \frac{T'_{\text{tex}}}{T_{\text{tex}}}。$$

(4)

式中: n_1 为条子与纱线间的牵伸倍数; η 为牵伸效率(根据文献[18],取 $\eta = 0.97$); T'_{tex} 为条子线密度。计算得到 $n_1 = 95.8$ 。

引纱速度与喂给速度计算公式为

$$V_3 = \frac{V_2}{t_{\text{tex}}};$$

(5)

$$V_4 = \frac{V_3}{n_1}。$$

(6)

式中: V_3 为引纱速度; V_4 为喂给速度。计算得到 $V_3 = 87.2$ m/min, $V_4 = 0.91$ m/min。

计算给棉罗拉握持下的纤维根数(N_1),公式为

$$N_1 = \frac{T'_{\text{tex}}}{t'_{\text{tex}}}。$$

(7)

计算得到棉纤维 $N_1 = 17\ 647$ 根。

计算分梳辊线速度、分梳辊与喂给罗拉之间的牵伸倍数、分梳辊截面内纤维的根数,公式为

$$V_5 = V_1 \times D_1 \times \pi;$$

(8)

$$n_2 = \frac{V_5}{V_4};$$

(9)

$$N_2 = \frac{V_5}{n_2}。$$

(10)

式中: V_5 为分梳辊线速度; n_2 为分梳辊与喂给罗拉之间的牵伸倍数; N_2 为分梳辊截面内纤维的根数。计算得到棉纤维 $N_2 = 11.24$ 根。

计算转杯凝聚槽线速度、转杯凝聚槽与分梳辊的牵伸倍数、转杯凝聚槽的纤维根数,公式为

$$V_6 = V_2 \times D_2 \times \pi;$$

(11)

$$n_3 = \frac{V_6}{V_5};$$

(12)

$$N_3 = \frac{N_2}{n_3}。$$

(13)

式中: V_6 为转杯凝聚槽线速度; n_3 为转杯凝聚槽与分梳辊的牵伸倍数; N_3 为转杯凝聚槽的纤维根数。计算得到棉纤维 $N_3 = 2.31$ 根,即转杯每旋转一圈,有 2.31 根棉纤维进入转杯内。

2.2 纤维初始形状

转杯纺喂入纤维条内的纤维形态一般分为前弯钩纤维、后弯钩纤维、伸直型纤维、两端弯钩纤维、其他型纤维等,且不同形状的纤维含量不同,具体见表 1。

表 1 纤维条内纤维形态与占比

Tab. 1 Fiber morphology and proportion within the fiber strips

纤维形态	实际形态	纤维模型	纤维占比/%	纤维数/根
前弯钩纤维			13	6
后弯钩纤维			48	22
两端弯钩纤维			9	4
伸直型纤维			25	12
其他类型纤维			5	2

根据参考文献[19],文中实验在输纤通道入口生成不同根数的前弯钩纤维、后弯钩纤维、伸直型纤维、两端弯钩纤维及其他类型纤维,且纤维伸直度均为 0.625。

纤维长度是重要的纤维属性,因此需要考虑不同长度纤维的运动行为。文中选择棉纤维作为研究对象,考虑到不同种类纤维的纤维长度存在差异,选择 9.5、16.0、28.0 mm 3 种长度分别建立纤维模型,具体见表 2。

表 2 纤维属性参数
Tab.2 Fiber attribute parameters

名称	长度/mm	直径/ μm	长径比	纤维段数
循环再生纤维 1	9.5	20	475	200
循环再生纤维 2	16.0	20	800	200
棉纤维	28.0	20	1400	200

3 模拟结果分析

3.1 转杯纺成纱器内气流运动

转杯纺成纱器气流云图如图 4 所示。由图 4 可知,在输纤通道内,随着横截面积不断减小,气流在管道中的运动速度不断加快,出口处气流速度达到最大值 140 m/s。气流的加速不仅有利于纤维输送管中弯钩纤维的伸直,也有利于纤维向转杯内输送。在转杯内,转杯与纤维输送管直接相连,连接处存在带状高速气流区域,带状高速区的尾端存在低速气流区域,气流速度从凝聚槽往旋转中心呈梯度下降,且下降梯度逐渐减小。

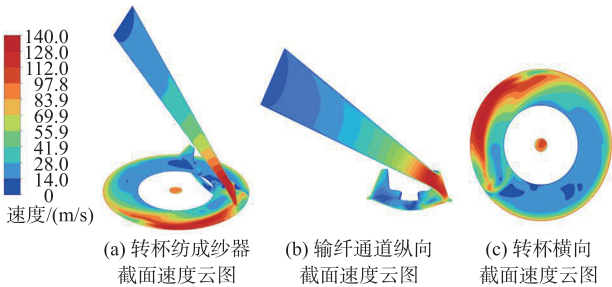


图 4 转杯纺成纱器气流云图

Fig.4 Airflow cloud diagrams of rotor spinning machine

3.2 连续进入多根不同长度纤维时的运动速度对比

纤维流整体平均速度即任意时刻转杯纺成纱器内所有纤维速度的平均值,计算公式为

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2 + \cdots + v_n}{n} \quad (14)$$

式中: \bar{v} 为纤维流整体平均速度; v_n 为第 n 根纤维在任意时刻的运动速度。

图 5 为任意时刻纤维流整体平均速度。由图 5 可以看出,3 种不同长度纤维流的整体平均速度呈相同的变化趋势。纤维流整体平均速度可以细分为 4 个阶段,具体如图 6 所示。

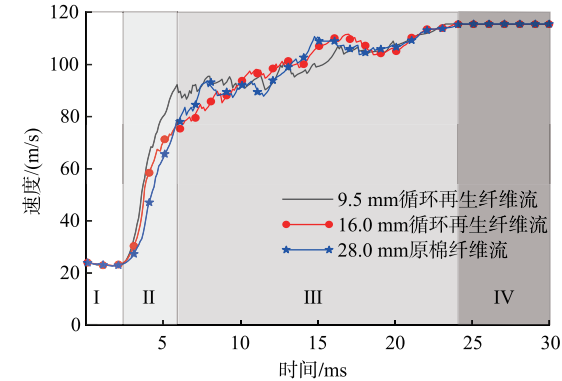


图 5 任意时刻纤维流整体平均速度

Fig.5 Overall average speed of fiber flow at any moment

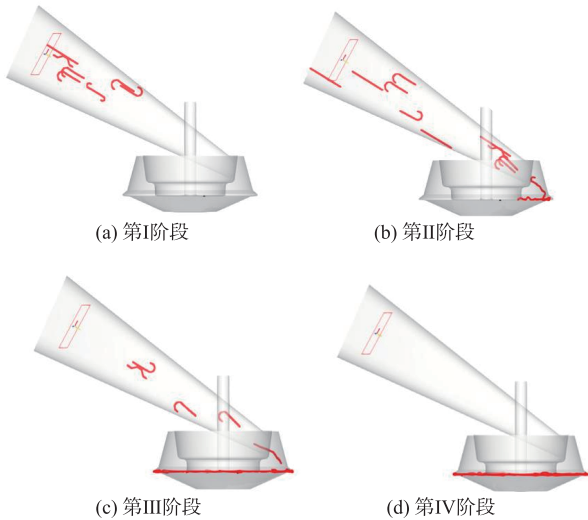


图 6 9.5 mm 纤维不同阶段的纤维运动形态

Fig.6 Fiber motion morphologies at different stages of 9.5 mm fiber

由图 6 可以看出,第 I 阶段(即纤维运动时间为 $0 \sim < 2.4$ ms),纤维只在输纤通道内运动,纤维流在输纤通道内的运动速度增加幅度有限,且纤维不断生成,输纤通道入口新生成纤维的运动速度较慢,纤维流整体的平均速度呈现微弱下降的趋势,循环再生纤维(9.5、16.0 mm)和原棉纤维(28.0 mm)纤维流的速度在输纤通道内无太大差异。第 II 阶段(即纤维运动时间为 $2.4 \sim < 6.0$ ms),纤维流从输纤通道进入转杯,纤维开始在凝聚槽运动,纤维流头端纤维到达转杯滑移面,并开始在转杯凝聚槽内运动,该阶段纤维流整体平均速度快速增加。9.5 mm 纤维流整体平均速度最快,28.0 mm 纤维流最慢,说明长度更短的循环再生纤维在滑移面和凝聚槽拥有更快的速度和加速度。第 III 阶段(即纤维运动时间为 $6.0 \sim < 24.0$ ms),纤维连续不断进入转杯,纤维流大多在凝聚槽运动,新生成的弯钩纤维不断从输纤通道进入凝聚槽,此时由于输纤通道和转杯内纤维存在较大的速度差异,

纤维流的整体平均速度存在无规则波动,随着凝聚槽内纤维的不断增多,维持在凝聚槽的高速运动纤维的比例增加,因此转杯纺成纱器内纤维的整体速度不断加快。第Ⅳ阶段(即纤维运动时间 ≥ 24.0 ms),纤维流完全进入凝聚槽,生成的弯钩纤维全部进入转杯内,此阶段弯钩纤维流在离心力的作用下均匀分布在转杯凝聚槽内,并加速至最大速度,与转杯凝聚槽保持相对静止状态,纤维在运动过程中会受到转杯表面接触力及气流作用力的双重影响,两种力在运动过程中达到力学平衡状态。经过第Ⅱ、第Ⅲ阶段后,弯钩纤维的形态发生巨大变化,纤维伸直或紧密交叠形成圈结,并在第Ⅳ阶段的纤维环内以 115 m/s 的整体平均速度进行圆周运动。

在不同长度纤维形成的纤维流中,单根纤维的运动速度存在差异,转杯纺成纱器内任意时刻单根纤维的最大速度、最小速度如图 7 所示。在 2.4 ~ 4.5 ms,纤维大多在转杯滑移面与凝聚槽运动,转杯纺成纱器内单根纤维的最大速度快速上升,其中 9.5 mm 纤维最大速度的增长速率最快,28.0 mm 的增长速率最慢(见图 7 紫色方框)。在 4.5 ~ 24.0 ms,纤维大多在凝聚槽运动,当 $t = 6.9$ ms 时,9.5 mm 纤维最大运动速度出现峰值 119 m/s,此时 16.0 和 28.0 mm 纤维的最大运动速度维持在 115 m/s,无波动(见图 7 绿色方框)。随后 9.5 mm 纤维在凝聚槽内继续运动,在 $t = 7.0$ ms 时,纤维离开高速气流带,其运动速度恢复至 115 m/s。

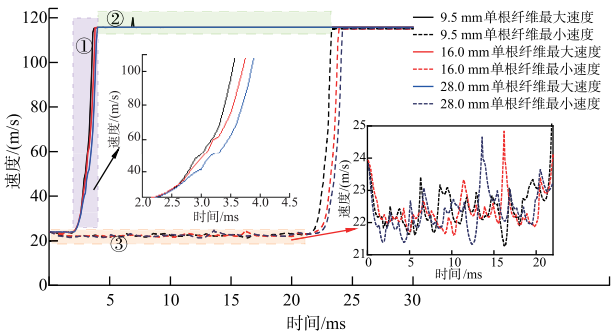


图 7 任意时刻转杯纺成纱器内单根纤维的最大、最小速度

Fig. 7 Maximum and minimum speed of a single fiber in the rotor spinning machine at any time

9.5 mm 纤维出现速度峰值的原因为:相较于 16.0 和 28.0 mm 纤维,9.5 mm 纤维长度短,质量轻,更易受到高速气流的影响,纤维运动稳定性差。

单根纤维的最小速度在 0 ~ 22.0 ms 呈无规则波动(见图 7 橙色方框),这是因为输纤通道入口新生成纤维的速度最慢,而新生成纤维的形态、位置

不一样,导致其初始速度(即纤维最小运动速度)波动。

综合对比发现,在纤维运动未达到稳定状态前,相同时刻 9.5 mm 的循环再生纤维在转杯滑移面和凝聚槽拥有最快的运动速度,其次为 16.0 mm 循环再生纤维,28.0 mm 原棉纤维的速度最慢。主要原因是随着纤维长度变短,单根纤维质量减小,所以 9.5 mm 循环再生纤维更易受到高速气流运动的影响,运动稳定性较差。

3.3 连续进入多根不同长度纤维时的运动形态对比

在 Rocky DEM 中将输纤通道的入口处设置为纤维生成输入端,在入口喂入不同形状的弯钩纤维,使弯钩纤维沿着输纤通道进入转杯。图 8 为不同长度纤维在 $t = 2.8$ ms 时从输纤通道进入转杯的示意。由于输纤通道为减缩型,纤维与纤维之间呈现分散—集中的运动趋势,因此输纤通道的出口处出现纤维堆叠现象[见图 8(c)]。相同伸直度下,28.0 mm 原棉纤维在输纤通道内最密集,其容易在出口处发生堆叠,导致出口处纤维密度最大;气流对 28.0 mm 原棉纤维运动的影响最小,因此 28.0 mm 原棉纤维在输纤通道入口处的速度最慢。

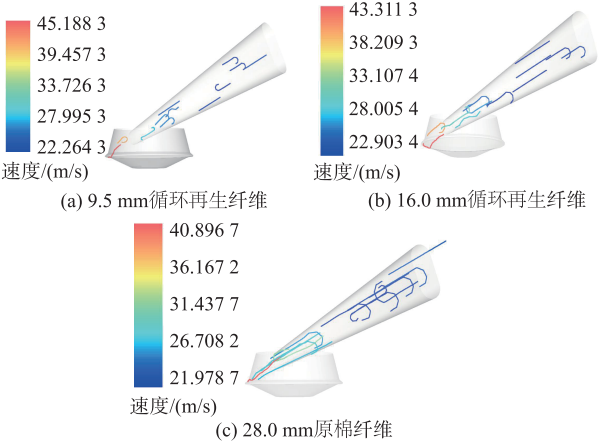


图 8 纤维在输纤通道内运动示意

Fig. 8 Schematic diagrams of fiber movement in the fiber transport channels

由于转杯始终维持 65 000 r/min 高速运转,不同形状的弯钩纤维进入转杯后在离心力的作用下进入凝聚槽,并与转杯壁面发生接触。在模拟软件中设定转杯为光滑壁面,因此纤维与转杯接触的摩擦力较小,可忽略不计。在离心力的作用下,新进入转杯的纤维与输纤通道出口处凝聚槽内的运动纤维发生接触与碰撞,在转杯内气流的作用下,新进入的纤维在凝聚槽内做加速运动,并逐渐与凝聚槽内的纤维贴合在一起,形成纤维环。纤维环的平整度和运动速度的均匀性对后续母纱接头和引纱

的顺利实施具有重要意义。

图 9 为 9.5 mm 循环再生纤维在转杯旋转 20 圈后于凝聚槽生成的纤维环。由图 9 可以看出,生成纤维环内的多数纤维以伸直形态紧贴转杯凝聚槽;但由于纤维初始形态的不同以及受到转杯离心力与内部高速气流运动的影响^[20],弯钩纤维的弯钩部分在纤维环上形成了纤维圈结。

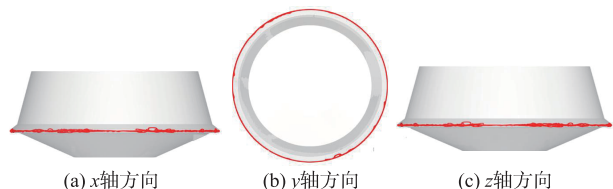


图 9 9.5 mm 纤维在转杯凝聚槽形成的纤维环

Fig. 9 Fiber rings formed by 9.5 mm fibers in the rotor condensation tank

当多根弯钩纤维连续进入转杯内时,不同单根弯钩纤维的头端从转杯滑移面进入转杯凝聚槽的时间、速度、初始位置、弯钩形态等存在差异。速度更快的单根弯钩纤维会逐渐从纤维流中抽离出来,在离心力的作用下进入并紧贴凝聚槽;单根弯钩纤维弯钩部分的形态在离心力的作用下逐渐紧贴凝聚槽壁面,弯钩部分开始交叠。在此过程中,在转杯内气流的影响下,前弯钩纤维的弯钩部分先于主体部分拥有更快的速度,高速气流带内的气流对弯钩部分持续施加向前的作用力,弯钩部分与主体部分在一定时间内存在位移,在速度差、作用力和延续时间三者的联合作用下,前弯钩纤维在凝聚槽内逐渐被拉直。在转杯内气流的影响下,后弯钩纤维的主体部分先于弯钩部分产生变速,二者之间存在速度差,转杯内的高速气流对弯钩部分持续施加向前的作用力,弯钩部分的速度增加,与主体部分的速度差减小;较小的速度差无法令主体部分与弯钩部分产生使弯钩部分伸直的相对位移,后弯钩纤维难以伸直,最后形成圈结。此时的纤维环内存在多种纤维圈结形态,主要包括同向圈结、异向圈结和两者皆有的圈结群(见图 10)。由于纤维源源不断地进入转杯,新进入转杯滑移面的纤维与凝聚槽内的纤维发生接触,在离心力和高速气流的作用下,新进入纤维的弯钩部分易与凝聚槽内的圈结发生接触,使更多圈结集聚,形成圈结群。

不同长度纤维形成的纤维环如图 11 所示。对比图 11(a)~图 11(c),发现 3 种长度纤维形成的纤维环均存在圈结纤维,但其中 28.0 mm 原棉纤维形成的纤维环上无论是圈结数量还是圈结的集聚程度均最低,且不存在纤维缺失现象,平整度最高。

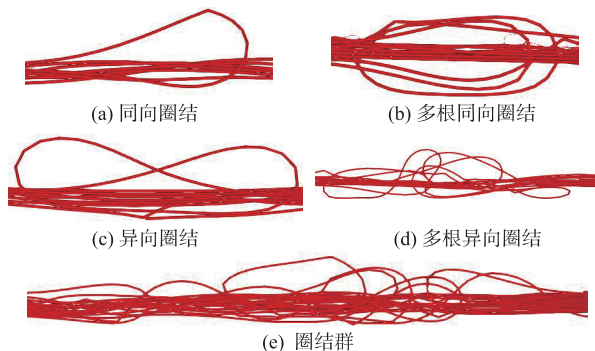


图 10 纤维环上的圈结纤维

Fig. 10 Circular fibers on the fiber ring

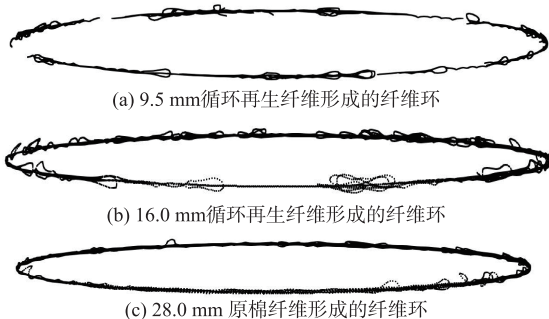


图 11 不同长度纤维形成的纤维环

Fig. 11 Fiber rings formed by fibers of different lengths

圈结纤维的存在,不仅会影响纤维环内纤维的形态,还会影响纤维的运动速度。不同长度纤维在转杯凝聚槽形成的纤维环速度云图如图 12 所示。

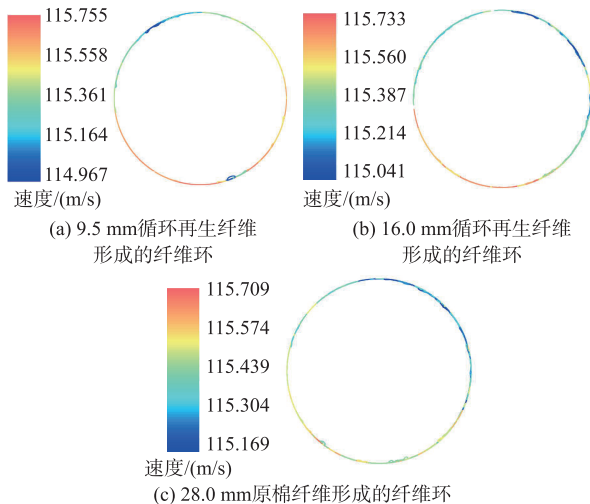


图 12 不同长度纤维在转杯凝聚槽形成的纤维环速度云图

Fig. 12 Velocity cloud charts of fiber ring formed by fibers of different lengths in the rotor coagulation tank

由图 12 可以看出,不同长度纤维形成纤维环的速度基本与转杯线速度一致,但纤维环内单根纤维的速度存在差异。9.5 mm 循环再生纤维形成纤维环内的单根纤维间速度差异最大,28.0 mm 原棉纤维

维纤维环内的单根纤维间速度差异最小。以 9.5 mm 循环再生纤维形成的纤维环为例,该纤维环中以最大速度(115.755 m/s)运动的纤维多为伸直纤维,在两处圈结纤维处的单根纤维以最小速度(114.967 m/s)运动。纤维环中单根纤维的最小运动速度出现在圈结纤维处,这一现象在 16.0 mm 循环再生纤维和 28.0 mm 原棉纤维形成的纤维环中均得到验证。

随着纤维长度的增加,纤维环内纤维运动速度分布更均匀。圈结纤维处由于纤维的缠绕、堆积,其密度和质量相对较大,运动速度较小,构成圈结纤维的纤维伸直部分受圈结的影响,整体运动速度降低。此外,纤维长度越长,纤维的接触面越大,因此 28.0 mm 原棉纤维所形成环内的圈结纤维接触的正常运动的伸直纤维更多。另一方面,更多正常运动的纤维与圈结纤维接触,传递动能给圈结纤维,带动其运动。在接触力与动能传递两者的相互作用下,28.0 mm 原棉纤维的纤维环内单根纤维运动的差异最小,纤维环运动均匀性最好。

综合对比不同长度纤维形成的纤维环,28.0 mm原棉纤维形成的纤维环无论平整度还是环内纤维运动均匀性,均优于 9.5 和 16.0 mm 循环再生纤维形成的纤维环。

4 结 语

文中采用数值模拟软件 Rocky DEM 2022R1 和 ANSYS Fluent 2022R1,模拟多根纤维在转杯纺成纱器内的运动。为贴近转杯纺生产实际,创建不同形态的纤维模型,研究纤维长度对纤维运动和形态的影响。得出以下结论:

1)循环再生纤维(9.5,16.0 mm)和原棉纤维(28.0 mm)纤维流的整体平均速度在转杯纺成纱器内呈现相同的运动趋势,可被细分为 4 个阶段。相较于 16.0 和 28.0 mm 长度的纤维,9.5 mm 的循环再生纤维在第Ⅱ阶段更易受高速气流影响,拥有更快的速度。

2)在不同长度纤维(9.5,16.0,28.0 mm)形成的纤维流中,单根纤维运动速度存在差异,相同时刻 9.5 mm 的循环再生纤维在转杯滑移面和凝聚槽的运动速度均最大;16.0 mm 循环再生纤维次之,28.0 mm原棉纤维的速度最小。主要原因是随着纤维长度的缩短,单根纤维质量减少,所以9.5 mm循环再生纤维更易受到高速气流运动的影响,运动稳定性较差。

3)不断进入的纤维在凝聚槽并合凝聚,形成纤维环;纤维环内多数纤维以伸直的形态紧贴转杯凝

聚槽。但由于纤维初始形态不同以及受到转杯内离心力与高速气流运动的影响,一些弯钩纤维的弯钩部分在纤维环上形成不同形状的圈结纤维,且圈结纤维在循环再生纤维(9.5,16.0 mm)和原棉纤维(28.0 mm)的纤维环上均存在。相较于 9.5 和 16.0 mm的纤维,28.0 mm 原棉纤维的纤维环上所形成圈结的数量和集聚程度均最低。

4)不同长度纤维(9.5,16.0,28.0 mm)形成纤维环的整体速度基本与转杯线速度一致,但纤维环内单根纤维的运动速度存在差异。其中,9.5 mm 循环再生纤维形成纤维环内单根纤维的速度差异最大;28.0 mm 原棉纤维纤维环内单根纤维的速度差异最小,且纤维运动均匀性最佳。

参考文献:

[1] YURTASLAN O, KURTOGLU S A, YILMAZ D. Closed-loop mechanical recycling opportunities in industrial cotton wastes[J]. Journal of Natural Fibers,2019, 19(15): 10802-10817.

[2] 吴琦萍,范海芳,刘倩丽. 循环再生棉纱生产技术及其产品适应性研究[J]. 棉纺织技术, 2020, 48(8): 51-54.
WU Qiping, FAN Haifang, LIU Qianli. Research on production technology and product adaptability of recycled regenerated cotton yarn[J]. Cotton Textile Technology, 2020, 48(8): 51-54. (in Chinese)

[3] 杨瑞华,邵秋,张欣,等. 废旧涤棉纺织品的回收循环再利用技术[J]. 服装学报, 2022, 7(4): 283-290.
YANG Ruihua, SHAO Qiu, ZHANG Xin, et al. Recycling and reuse technology of waste polyester and cotton textiles[J]. Journal of Clothing Research, 2022, 7(4): 283-290. (in Chinese)

[4] 杨瑞华,王卓. 基于 Friele 模型的转杯纺黏胶混色针织物测配色系统[J]. 服装学报,2023,8(1):31-36.
YANG Ruihua, WANG Zhuo. Color matching model of viscose color blended fabric based on Friele model[J]. Journal of Clothing Research, 2023, 8(1): 31-36. (in Chinese)

[5] SCHMID C F, SWITZER L H, KLINGENBERG D J. Simulations of fiber flocculation: effects of fiber properties and interfiber friction[J]. Journal of Rheology, 2000, 44(4): 781-809.

[6] KARIMI H, MOLAEI DEHKORDI A. Prediction of equilibrium mixing state in binary particle spouted beds: effects of solids density and diameter differences, gas velocity, and bed aspect ratio [J]. Advanced Powder Technology, 2015, 26 (5): 1371-1382.

[7] MARHEINEKE N, WEGENER R. Modeling and application of a stochastic drag for fibers in turbulent flows [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(2): 136-148.

[8] 杨瑞华,何闯. 纤维在转杯和输纤通道中的运动模拟[J]. 丝绸, 2022, 59(7): 40-48.
YANG Ruihua, HE Chuang. Simulation of fiber movement in the rotor and fiber transport channel[J]. Journal of Silk, 2022, 59(7): 40-48. (in Chinese)

[9] PEI Z G, ZHANG Y, ZHOU J. A model for the particle-level simulation of multiple flexible fibers moving in a wall-bounded fluid flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 80: 37-58.