

# 闪蒸纺丝减压式喷头结构优化数值模拟

刘帅飞<sup>1a</sup> 夏磊<sup>1a</sup> 杨友强<sup>2</sup> 西鹏<sup>1b</sup> 魏金刚<sup>2</sup> 黄赞义<sup>2</sup>

1. 天津工业大学 a. 纺织科学与工程学院, b. 材料科学与工程学院, 天津 300387;
2. 金发科技股份有限公司 塑料改性与加工国家工程实验室, 广东 广州 510520

**摘要:**为优化闪蒸纺丝减压式喷头结构,以公开的闪蒸减压式喷头结构为基础,构建多种结构参数的几何模型,然后利用 Fluent 软件模拟计算闪蒸纺丝液在不同结构参数喷头内的流动状态与运动轨迹,分析纺丝液的速度及压力的分布与变化趋势,并结合闪蒸纺丝过程中的相分离原理、气泡成核原理等,得到不同减压式喷头结构对纺丝液速度、压力及涡量的影响。结果表明:喷头结构不变,改变纺丝液的初始压力,减压率不变;减压孔内径与喷丝孔内径之比决定了闪蒸纺丝液的降压幅度,内径比相同,减压率也相同。在初始压力 12 MPa 的纺丝条件下,为减少能量损耗,保持纺丝液的均匀流动性及提高纺丝液成核质量,减压孔内径与喷丝孔内径之比以 1.2 为最佳,减压孔出射角度与喷丝孔入射角度分别以 90° 和 100° 为最佳,减压室内径和长度分别以 30 mm 和 70 mm 为最佳。研究结果可从理论角度指导优化闪蒸纺丝工艺,为闪蒸纺丝减压式喷头结构优化提供参考。

**关键词:** 闪蒸纺丝;减压式喷头;结构优化;数值模拟;减压室;纺丝液;速度;压力;涡量

中图分类号:TS 174. 8

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2025)01-0022-13

## Numerical simulation of structural optimization for flash spinning decompression nozzles

Liu Shuai<sup>1a</sup>, Xia Lei<sup>1a</sup>, Yang Youqiang<sup>2</sup>, Xi Peng<sup>1b</sup>, Wei Jingang<sup>2</sup>, Huang Zanyi<sup>2</sup>

1. a. School of Textile Science and Engineering, b. School of Material Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;
2. National Engineering Laboratory for Plastic Modification and Processing, Kingfa Science and Technology Co., Ltd., Guangzhou 510520, Guangdong, China

**Abstract:** In order to optimize the structure of flash spinning decompression nozzles, based on the structure of disclosed flash spinning decompression nozzle, the geometrical models with various structural parameters were constructed, and then the flow states and movement trajectories of flash spinning solutions in the nozzles with different structural parameters were simulated and calculated by using the Fluent software, to analyze the distribution and change trends of the velocity and pressure of the spinning solutions. And combining with the principle of phase separation and bubble nucleation in the flash spinning process, the effects of different decompression nozzle structures on

收稿日期:2024-10-11

作者简介:刘帅飞,男,1999年生,在读硕士研究生,主要研究方向为闪蒸非织造布制备工艺及其有限元分析,lsf19990922@163.com  
通信作者:夏磊,副教授,研究方向为微纳米纤维及其功能化,xialei@tiangong.edu.cn

the velocity, pressure and vorticity of spinning solutions were obtained. The results showed that, with the nozzle structure remaining unchanged, changing the initial pressure of the spinning solution, the decompression rate remained unchanged. The ratio of the inner diameter of decompression orifice to the inner diameter of spinneret orifice determined the magnitude of flash spinning solution pressure reduction. When the inner diameter ratio was the same, the decompression rate was also the same. Under the spinning condition with an initial pressure of 12 MPa, in order to reduce the energy loss, maintain the uniform flow of the spinning solution and improve the nucleation quality of the spinning solution, the optimal ratio of the inner diameter of decompression orifice to the inner diameter of spinneret orifice was 1.2. And the optimal injection angle of decompression orifice and the incidence angle of spinneret orifice were  $90^\circ$  and  $100^\circ$ , respectively. Additionally, the optimal inner diameter and length of decompression chamber were 30 mm and 70 mm, respectively. The research results can guide the optimization of flash spinning process from theoretical point of view, and provide references for the structural optimization of decompression nozzles for flash spinning.

**Keywords:** flash spinning; decompression nozzle; structural optimization; numerical simulation; decompression chamber; spinning solution; velocity; pressure; vorticity

闪蒸纺丝 (flash spinning) 法是一种结合了熔融纺丝技术和溶液纺丝技术的超细纤维制造方法。基于闪蒸纺丝法, 高密度聚乙烯与溶剂先在高温、高压、高剪切力的条件下形成均相纺丝液, 再经管道输送至减压孔初步减压后到达喷丝孔喷出, 此时过热的溶剂因压力瞬间降低而急剧蒸发, 产生高速气流, 聚合物被牵伸成网络状超细纤维<sup>[1]</sup>。随后, 这些纤维经分丝、铺网、固网等工艺形成闪蒸非织造布。闪蒸非织造布具有轻质高强<sup>[2]</sup>、表面光滑、防水透气<sup>[3]</sup>、印刷性好等独特的性能优势, 已广泛应用于医疗防护<sup>[4]</sup>、产品包装<sup>[5]</sup>、建筑<sup>[6]</sup>及印刷<sup>[7]</sup>等诸多领域。

闪蒸纺丝过程中, 减压式喷头是核心部件之一, 其具有调控纺丝液压力, 促进纺丝液相分离, 为纺丝提供有效剪切速率等作用。减压式喷头主要包括减压孔、减压室、喷丝孔及纺丝甬道等结构。其中, 不同形状的喷丝孔, 如圆柱形、倒锥形<sup>[8]</sup>等, 只要能形成足够的剪切速率, 便可满足使用需求<sup>[9]</sup>。喷丝孔形状优选闪蒸前能立即赋予纺丝液有效剪切速率, 并能改善纤维取向的形状。产业用减压式喷头普遍采用圆柱形喷丝孔, 其易于加工且精度较高, 本文选取圆柱形喷丝孔展开探究。美国杜邦公司于 1963 年首次公开并介绍了多种减压式喷头的结构及其工作原理<sup>[10-11]</sup>。纺丝过程中, 纺丝液进入减压室, 当减

压室内压力降低到浊点压力以下时, 纺丝液即开始发生相分离形成两相分散体, 即一相为富聚合物相、另一相为富溶剂相。接着, 富溶剂相的微小液滴被带入富聚物相, 微小液滴在纺丝过程中发挥着气泡核的作用, 极大程度地改善了闪蒸超细纤维的质量<sup>[12-13]</sup>。但若减压室内的压力远高于浊点压力, 则纺丝液相分离不充分, 纤维直径和分丝宽度增加; 若减压室内的压力远低于浊点压力, 则纺丝液相分离严重, 出现聚合物沉降与溶剂蒸发等现象, 溶剂气化速度降低, 纤维力学性能下降, 闪蒸非织造布质量受影响<sup>[14-15]</sup>。

近年来, 随着计算技术的进步, 数值模拟已成为一种填补试验测量空白的重要手段。众多学者通过数值模拟分析喷头结构参数变化对纺丝液运动状态的影响, 进而优化喷头结构。如 Xia 等<sup>[16]</sup>采用数值模拟的方法, 研究了干喷湿纺法中喷头的出口长度、角度和直径对纺丝液在喷丝孔处速度、压力和剪切速率的影响。Tung 等<sup>[17]</sup>基于计算流体动力学, 模拟研究了纺丝过程中喷头内部溶液的流动状态和壁面剪切速率分布状况。王贝等<sup>[18]</sup>通过建立三维喷丝组件模型, 探讨了喷丝组件结构参数对喷头内部溶液剪切流动和拉伸流动的影响。Cao 等<sup>[19]</sup>研究了因喷头几何形状引起的纺丝液剪切速率和纤维伸长率变化对聚醚砜中空纤维膜气体分离性能的影响。

响,模拟了不同喷头内部纺丝液的流动和应力分布状况。

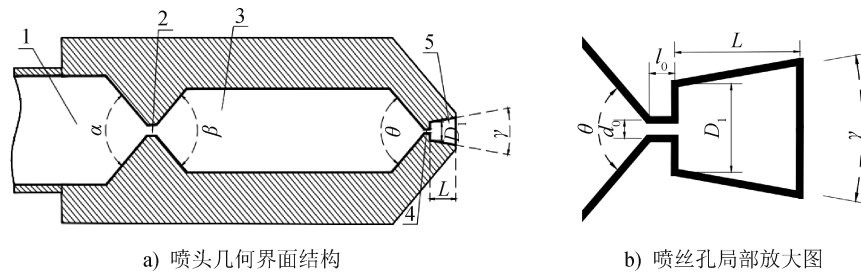
众多学者围绕喷头结构的优化展开了大量的模拟研究,探讨了喷头结构参数变化对纺丝液运动状态的影响,但有关闪蒸纺丝减压式喷头结构优化的研究较少。

根据闪蒸纺丝工艺参数合理设计与之匹配的减压式喷头,调控纺丝液在减压室内的压力及运动轨迹,可使纺丝液相分离更加充分,闪蒸纺丝过程中气泡生成质量更高,能量损耗更少,这对于闪蒸超细纤维及其非织造布的性能调控具有重要的意义。本文将利用 Fluent 模拟软件对不同结构的闪蒸纺丝减压式喷头进行数值模拟分析,探究纺丝液在减压孔处、减压室内及喷丝孔处的流动状态和运动轨迹,分析减

压式喷头结构变化对纺丝液速度、压力及涡量的影响,并通过理论与试验相结合的方式,验证闪蒸纺丝减压式喷头结构的优化,以期为闪蒸纺丝工艺的优化提供参考。

## 1 减压式喷头结构几何模型的设计

以专利 CN201821501901.9<sup>[20]</sup>中公开的减压式喷头为基础,建立标准结构参数模型,并根据标准结构参数模型对单一结构参数进行调整,再通过数值模拟的方法探究单一结构参数的变化对纺丝液运动状态的影响。减压式喷头几何截面结构示意图 1 所示,减压式喷头的标准结构参数与模拟结构参数如表 1 所示。



1—溶液管道;2—减压孔;3—减压室;4—喷丝孔;5—纺丝甬道; $d_0$ —喷丝孔内径; $l_0$ —喷丝孔长度; $D_1$ —纺丝甬道扩散内径; $L$ —纺丝甬道扩散长度; $\alpha$ —减压孔入射角度; $\beta$ —减压孔出射角度; $\theta$ —喷丝孔入射角度; $\gamma$ —纺丝甬道出射角度。

图 1 减压式喷头几何截面结构示意图

Fig. 1 Schematic of geometric cross-sectional structure of the decompression nozzle

表 1 减压式喷头结构参数

Tab. 1 Structure parameters of decompression nozzles

减压式 喷头	减压孔			减压室			喷丝孔		纺丝甬道			
	$\alpha/(^\circ)$	内径/ mm	长度/ mm	$\beta/(^\circ)$	内径/ mm	长度/ mm	$\theta/(^\circ)$	内径/ mm	长度/ mm	$D_1$ /mm	$\gamma/(^\circ)$	$L$ /mm
标准结构	100	1.0	1.0	100	30	70	100	0.8	1.2	6	20	6
模拟结构	100	0.6~ 1.4	0.6~ 1.4	60~ 180	10~ 50	40~ 100	60~ 180	0.4~ 1.2	0.6~ 1.8	6	20	6

## 2 减压式喷头结构网格划分及参数设置

### 2.1 网格划分及无关性验证

利用 Ansys Meshing 软件对减压式喷头结构进行网格划分和边界划分(图 2)。由于减压式喷头结构呈轴对称分布,为提高模拟效率,图 2 中的模拟区域为实际喷头模型的一半。计算域边界设置:AD 为

喷头入口,BC 为喷头出口,AB 为对称轴,其他边界为壁面。网格数量对数值模拟结果有重要影响。本文在确保高模拟精确度的同时为提高模拟效率,对标准结构模型进行了 6 种网格数量的划分,并进行无关性验证,最后采用求解模型进行计算。图 2 中,未加密区域采用尺寸约 0.10 mm×0.10 mm 的网格,加密区域如减压孔及喷丝孔等位置采用尺寸约 0.04 mm×0.04 mm 的网格,计算区域共计 133 833 个网格。

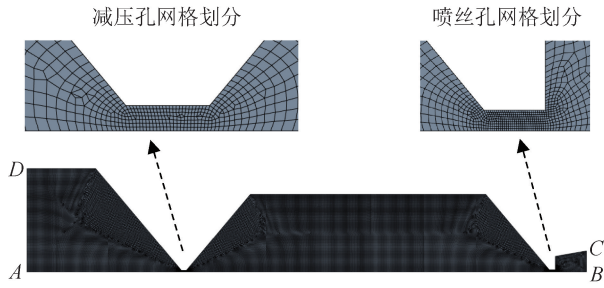
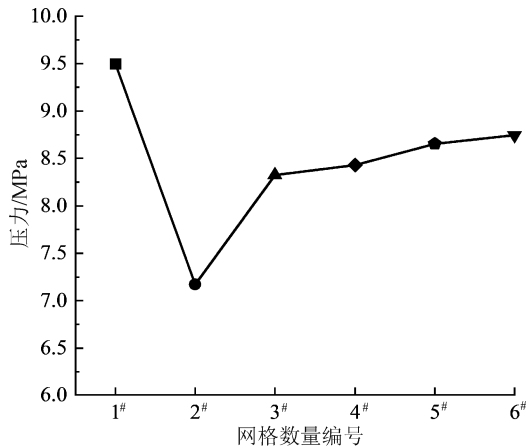


图 2 减压式喷头几何模型的网格划分及边界划分  
Fig. 2 Grid division and boundary division of geometric model of the decompression nozzle

在初始压力为 12 MPa 的条件下进行网格无关性验证。根据划分的网格,计算纺丝液在减压室正中心位置的的压力,结果如图 3 所示,可以看出:约 13 万个网格(编号 5<sup>#</sup>)的模拟结果与约 53 万个网格(编号 6<sup>#</sup>)的模拟结果仅相差约 1%,可知约 13 万个网格(编号 5<sup>#</sup>)的划分方式,既可以确保较高的模拟精确度,又能提高模拟效率。



1<sup>#</sup>—1 382 个;2<sup>#</sup>—5 664 个;3<sup>#</sup>—87 944 个;4<sup>#</sup>—33 523 个;  
5—133 833 个;6—535 303 个。

图 3 不同网格数量划分的纺丝液压力计算结果

Fig. 3 Calculation results of spinning solution pressure for different mesh numbers

## 2.2 参数设置

本文主要探究纺丝液在减压孔处、减压室内及喷丝孔处的流动状态和运动轨迹,分析研究减压式喷头结构变化对纺丝液速度、压力及涡量的影响。纺丝液被视为均匀的单相状态,且模型中不含其他物质。经计算,纺丝液在喷头内部的雷诺数  $Re$  小于 2 300,处于层流状态。采用层流模型,启用能量方程,设置纺丝液的密度为  $1\ 500\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,黏度为  $0.3\ \text{Pa}\cdot\text{s}$ 。入口边界条件为压力入口,压力值为 12 MPa,温度为

493.15 K;出口边界条件为压力出口,压力值为 0 MPa,温度为 293.15 K;其余边界条件默认为无滑移壁面。模型计算方法选择适用于稳态分析模型的 Coupled 算法。时间步长控制方式为 Automatic(自动调整),时间比例因子为 1,迭代次数为 10 000,残差为  $10^{-5}$ 。

## 3 模拟结果

对减压式喷头模型进行数值模拟计算。图 4 为纺丝液在标准结构参数减压式喷头模型内部的速度、压力及涡量云图,图 5 为标准结构参数减压室内速度矢量图。

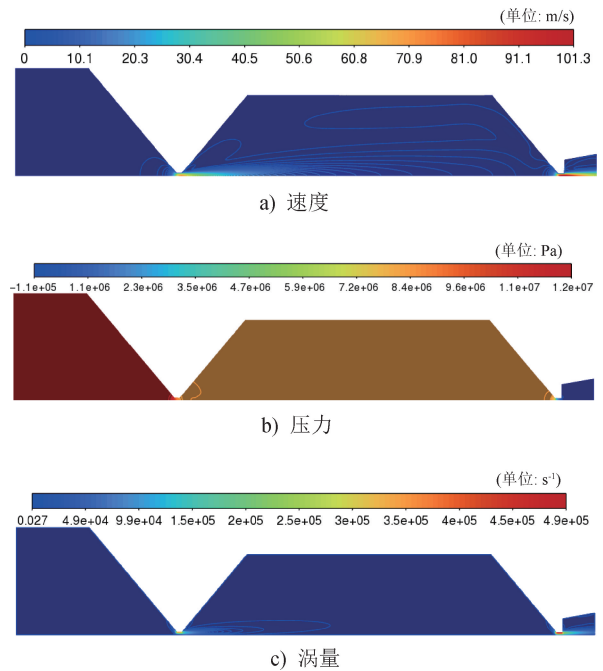


图 4 标准结构参数减压式喷头模型内部速度、压力及涡量云图

Fig. 4 Velocity, pressure and vorticity cloud images inside the decompression nozzle model with standard structural parameters

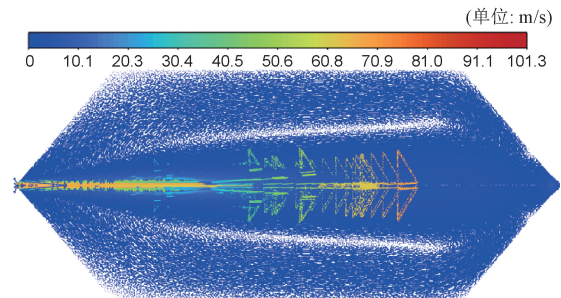


图 5 标准结构参数减压室内速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector diagram inside the decompression chamber with standard structural parameters

由图 4 可知: 纺丝液经减压孔后压力骤降, 速度与涡量骤增; 纺丝液在减压室内压力几乎不变, 速度与涡量缓慢减小; 经喷丝孔喷出时, 纺丝液压力骤降为常压, 速度与涡量再次骤增。由图 5 可知: 纺丝液在减压室轴向中心区域高速流动, 在减压室近壁面区域低速流动; 纺丝液沿腔室壁形成了明显的涡流。而涡流会导致纺丝液在减压室内的停留时间有差异。当停留时间过长时, 纺丝液会发生严重的相分离, 进而出现聚合物沉降与溶剂蒸发的现象, 溶剂气化速度降低, 纤维力学性能下降, 最终产品质量受影响。

### 3.1 减压孔

#### 3.1.1 减压孔内径

图 6 为不同减压孔内径时纺丝液在减压式喷头内部的速度云图。图 7 为不同减压孔内径时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度与压力分布曲线, 其横坐标负值表示该位置位于减压孔中心位置左侧即溶液管道侧, 正值表示该位置位于减压孔中心位置右侧即减压室侧 (本文同类图形横坐标定义均同图 7)。图 8 为不同减压孔内径时纺丝液在减压式喷头内部的涡量云图。

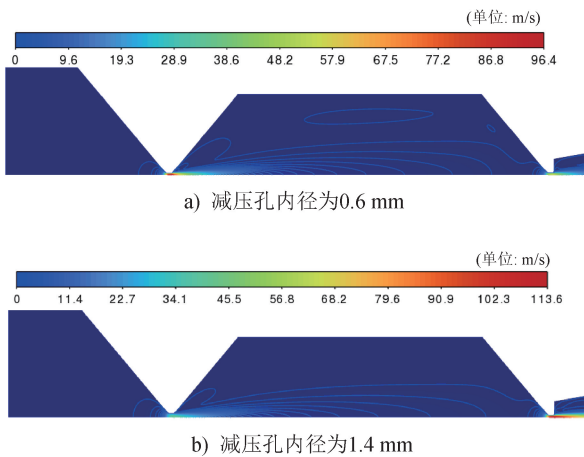


图 6 不同减压孔内径的减压式喷头内部纺丝液速度云图  
Fig. 6 Velocity cloud images of spinning solutions inside decomposition nozzles with different decomposition orifice inner diameters

从图 4 及图 6~图 8 可以看出, 减压孔内径对纺丝液压力降幅度及速度有很大的影响。随着减压孔内径的增大, 减压孔的减压效果逐渐减弱, 纺丝液在减压室内的压力逐渐增大。经减压孔减压后, 若纺丝液速度增幅和涡量增幅越小, 则纺丝液进入减压室后

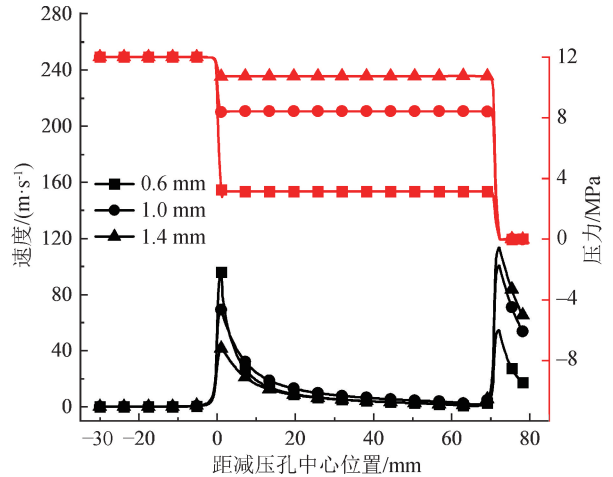


图 7 不同减压孔内径时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布

Fig. 7 Velocity and pressure distribution of spinning solutions along the axis of decomposition nozzles with different decomposition orifice inner diameters

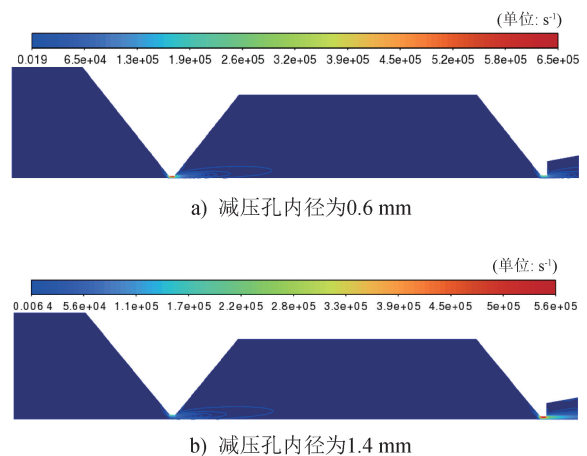


图 8 不同减压孔内径的减压式喷头内部纺丝液涡量云图  
Fig. 8 Vorticity cloud images of spinning solutions inside decomposition nozzles with different decomposition orifice inner diameters

速度衰减越慢, 经喷丝孔喷出时速度越高、涡量越大、能量损耗越小。因此, 为了使纺丝液在减压式喷头内部均匀稳定且能量损耗较小, 应合理控制减压孔内径大小。本文发现, 在初始压力为 12 MPa 及其他结构参数不变的情况下, 减压孔内径应大于 1.0 mm。

#### 3.1.2 减压孔长度

图 9 为不同减压孔长度时纺丝液在减压式喷头内部的速度云图, 图 10 为不同减压孔长度时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布曲线, 图 11 为不同减压孔长度时减压式喷头内部纺丝液涡量云图。

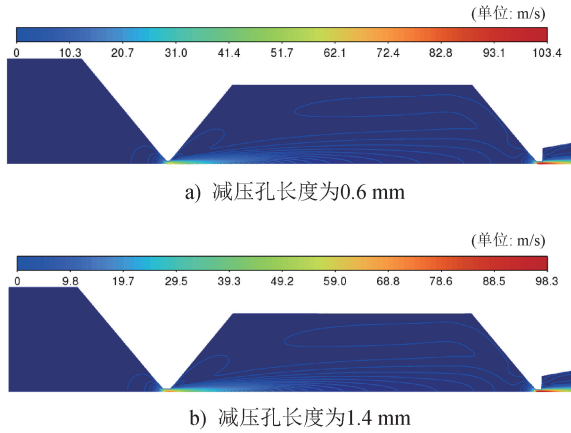


图 9 不同减压孔长度的减压式喷头内部纺丝液速度云图  
Fig. 9 Velocity cloud images of spinning solutions inside decompression nozzles with different decompression orifice lengths

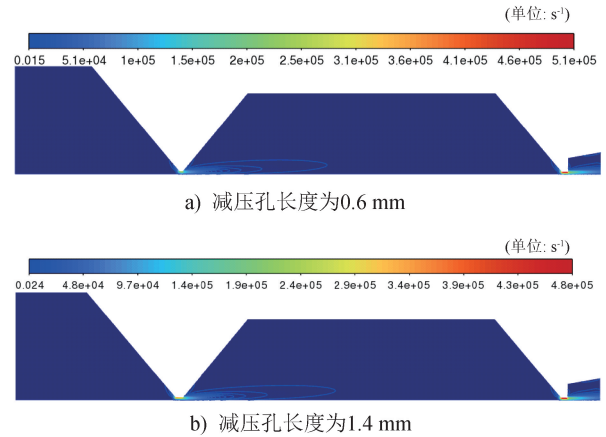


图 11 不同减压孔长度的减压式喷头内部纺丝液涡量云图  
Fig. 11 Vorticity cloud images of spinning solutions inside decompression nozzles with different decompression orifice lengths

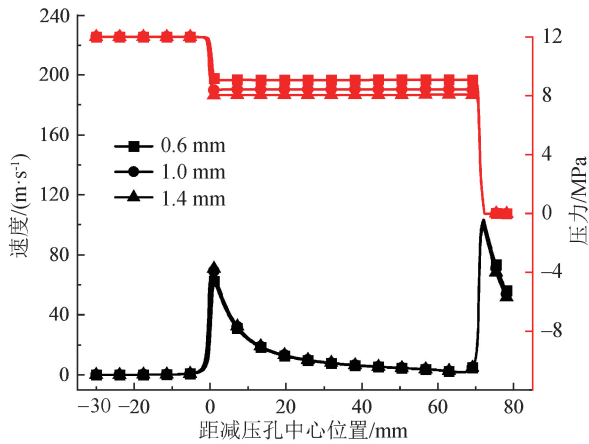


图 10 不同减压孔长度时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布  
Fig. 10 Velocity and pressure distribution of spinning solutions along the axis of decompression nozzles with different decompression orifice lengths

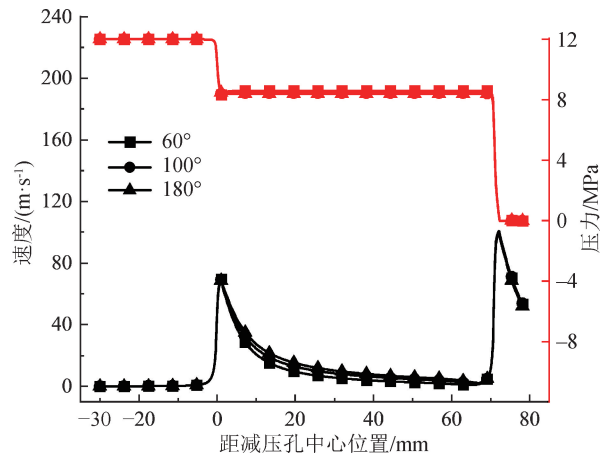


图 12 不同减压孔出射角度时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度与压力分布  
Fig. 12 Velocity and pressure distribution of spinning solutions along the axis of decompression nozzles with different decompression orifice exit angles

由图 4 及图 9~图 11 可知,减压孔长度对压降幅度、速度及涡量略有影响。随着减压孔长度的增加,纺丝液压降幅度略有增大,在减压孔处的速度与涡量略有增加,经喷丝孔喷出的速度与涡量略有减小。

### 3.2 减压室

#### 3.2.1 减压孔出射角度

图 12 为不同减压孔出射角度时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布曲线,图 13 为不同减压孔出射角度时纺丝液在减压室内部的压力及出喷丝孔速度状况,图 14 为不同减压孔出射角度时减压室内部纺丝液速度矢量图。

由图 12 和图 13 可知,随着减压孔出射角度的

增大,纺丝液在减压室内的压力呈微小波动变化,经减压孔减压后纺丝液速度骤增幅度无明显变化,且减压室内速度衰减变缓,出喷丝孔速度无明显变化。

由图 5 及图 14 可知:当减压孔出射角度为  $60^\circ$  时,纺丝液速度矢量线在减压室前端较密集;当减压孔出射角度为  $100^\circ$  时,纺丝液在减压室内的速度矢量线相对均匀;当减压孔出射角度为  $180^\circ$  时,减压室内回流明显。可见,随着减压孔出射角度的增加,纺丝液经喷丝孔喷出的速度先增大后减小。因此,为提高纺丝液的均匀稳定性,减小流动过程中能量损耗,减压孔出射角度不宜过大或过小。再结合

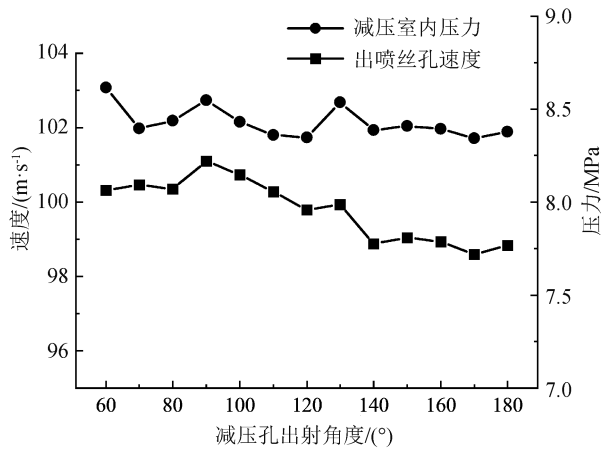


图 13 不同减压孔出射角度时纺丝液在减压室内部的压力及出喷丝孔速度

Fig. 13 Pressures in decompression chambers with different decompression orifice exit angles and velocities at spinneret orifice exits

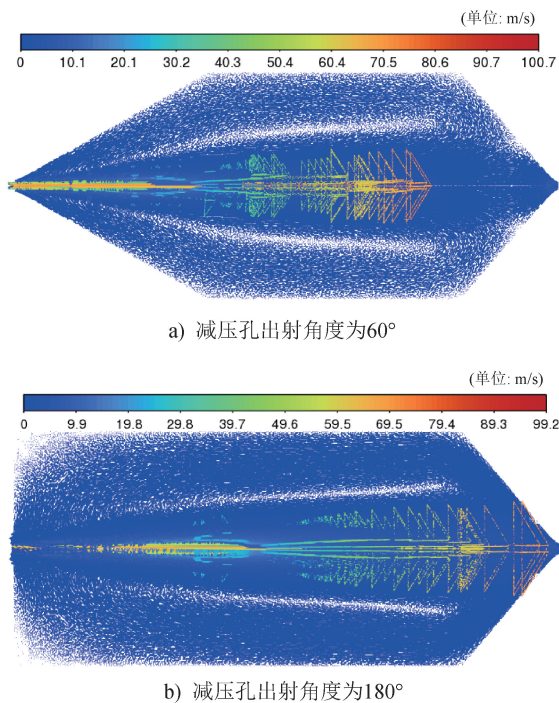


图 14 不同减压孔出射角度时减压室内部纺丝液速度矢量图  
Fig. 14 Velocity vector diagrams of spinning solutions inside decompression chambers with different decompression orifice exit angles

图 13 的数据确定,本文中,在初始压力为 12 MPa 及其他结构参数不变的情况下,减压孔出射角度以 90° 为最佳。

### 3.2.2 减压室内径

图 15 为不同减压室内径时纺丝液在减压式喷

头轴线上的速度和压力分布曲线,图 16 为不同减压室内径时纺丝液在减压室内部的速度矢量图。

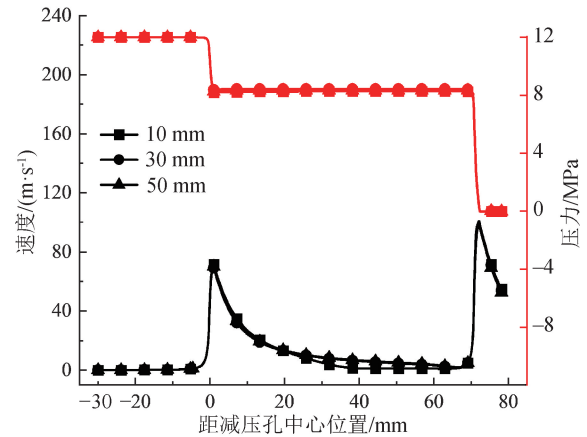


图 15 不同减压室内径时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布

Fig. 15 Velocity and pressure distribution of spinning solutions along the axis of decompression nozzles with different decompression chamber inner diameters

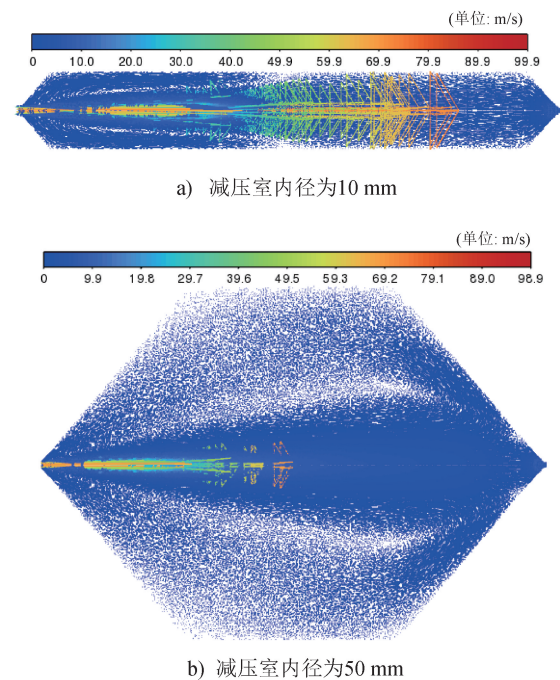


图 16 不同减压室内径时减压室内部纺丝液速度矢量图  
Fig. 16 Velocity vector diagrams of spinning solutions inside decompression chambers with different decompression chamber inner diameters

由图 15 可知,减压室内径的变化对纺丝液压力降幅度几乎无影响。减压室内径过小,纺丝液在减压室内的速度衰减明显。随着减压室内径的增加,纺丝液速度衰减变得稳定。由图 5 及图 16 可知,减压室内径对纺丝液流动状态影响很大。当减压室内径

为 10 mm 时,减压室入口端纺丝液流动呈涡流状、出口端纺丝液流动呈平流状。随着减压室内径的增大,涡流区域逐渐扩大、平流区域逐渐消失,纺丝液流经喷丝孔的速度由小变大再变小。因此,为了提高纺丝液的均匀稳定性,减小流动过程中的能量损耗,减压室内径不宜过大或过小。本文中,在初始压力为 12 MPa 及其他结构参数不变的情况下,减压室内径以 30 mm 为最佳。

### 3.2.3 减压室长度

图 17 为不同减压室长度时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布曲线,图 18 为不同减压室长度时纺丝液在减压室内部的速度矢量图。

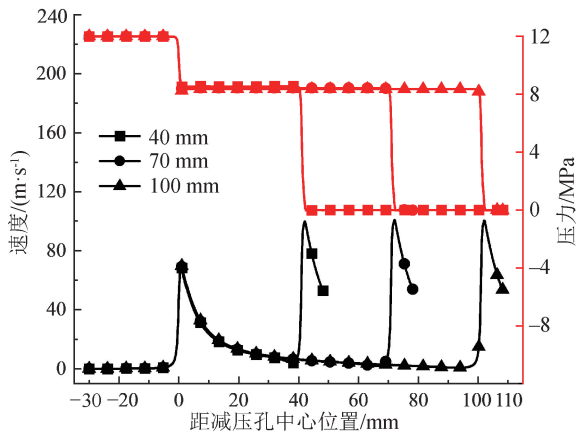


图 17 不同减压室长度时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布

Fig. 17 Velocity and pressure distribution of spinning solutions along the axis of decompression nozzles with different decompression chamber lengths

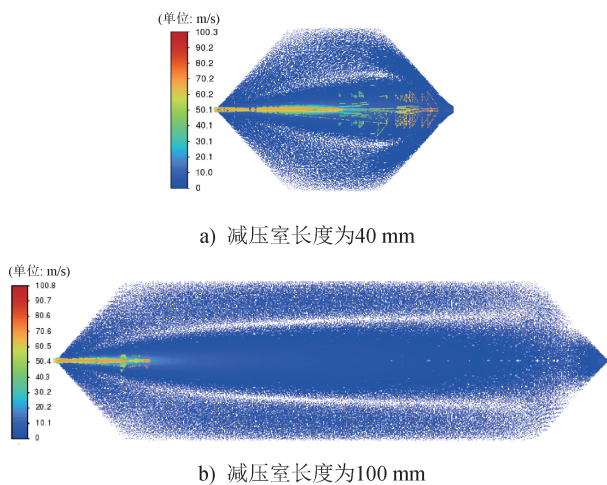


图 18 不同减压室长度时减压室内部分丝液速度矢量图

Fig. 18 Velocity vector diagrams of spinning solutions inside decompression chambers with different decompression chamber lengths

由图 17 可知,减压室长度变化对纺丝液的降压幅度几乎没有影响。纺丝液在减压室内速度逐渐减小,经喷丝孔喷出时速度骤增。减压室长度越小,则纺丝液经喷丝孔喷出前的初始速度越大,经喷丝孔喷出的速度也越大。由图 5 及图 18 可知:当减压室长度为 40 mm 时,纺丝液速度矢量线在减压室末端较密集,减压室内回流明显;当减压室长度为 70 mm 时,纺丝液速度矢量线相对均匀,减压室内回流略微减弱;当减压室长度为 100 mm 时,减压室内速度矢量线变稀疏,回流现象明显减弱。可见,随着减压室长度的增加,纺丝液在减压室内的速度逐渐降低,回流现象减弱。因此,为了减小纺丝液流动过程中的能量损耗,提高纺丝液在减压室内的成核质量,减压室内径不宜过大或过小。本文中,在初始压力为 12 MPa 及其他结构参数不变的条件下,减压室长度以 70 mm 为最佳。

### 3.2.4 喷丝孔入射角度

图 19 为不同喷丝孔入射角度时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布曲线,图 20 为不同喷丝孔入射角度时纺丝液在减压室内部的压力及出喷丝孔速度状况,图 21 为不同喷丝孔入射角度时纺丝液在减压室内部的速度矢量图。

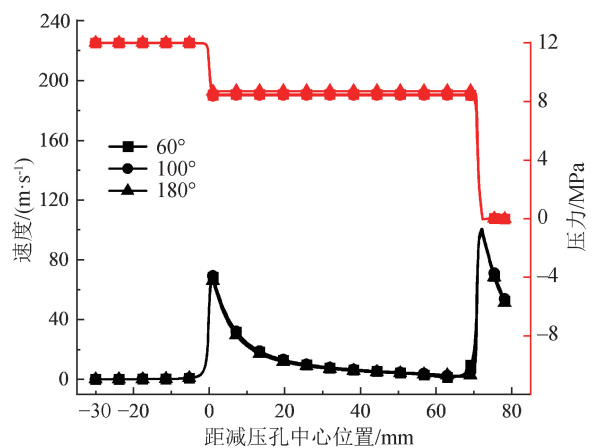


图 19 不同喷丝孔入射角度时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度与压力分布

Fig. 19 Velocity and pressure distribution of spinning solutions along the axis of decompression nozzles with different spinneret orifice incident angles

由图 19 和图 20 可知,随着喷丝孔入射角度的增大,纺丝液在减压室内的速度几乎不变,压力呈波动变化,纺丝液在喷丝孔处的速度与减压室内的压力呈正比。由图 5 和图 21 可知:当喷丝孔入射角度

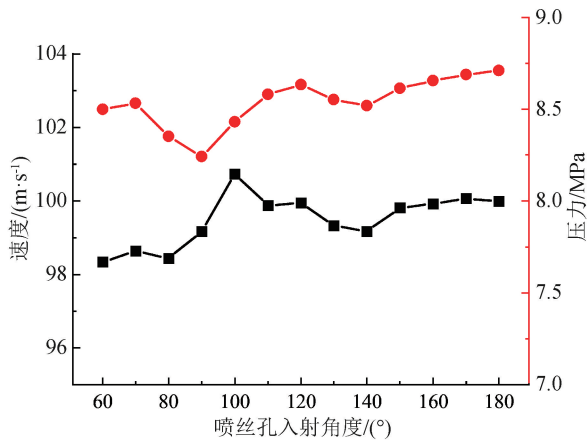


图 20 不同喷丝孔入射角度时纺丝液在减压室内部的压力及出喷丝孔速度

Fig. 20 Pressure in decompression chambers with different spinneret orifice incident angles and velocities at spinneret orifices

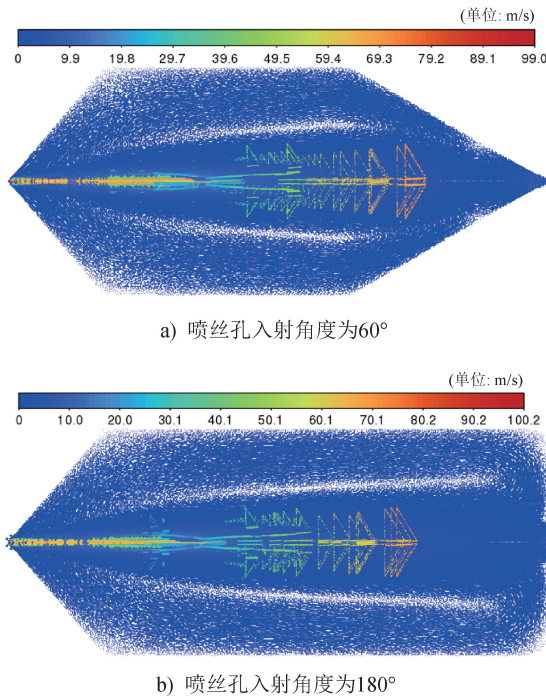


图 21 不同喷丝孔入射角度时减压室内部纺丝液速度矢量图  
Fig. 21 Velocity vector diagrams of spinning solutions inside decompression chambers with different spinneret orifice incident angles

为  $60^\circ$  时,减压室末端速度矢量线较密集,近喷丝孔端无涡流现象;当喷丝孔入射角度为  $100^\circ$  时,减压室末端速度矢量线稀疏,减压室内速度矢量线相对均匀;当喷丝孔入射角度为  $180^\circ$  时,减压室末端近壁面区域速度矢量线较稀疏。可见,喷丝孔入射角度过小时,纺丝液受到的汇聚作用极强,减压室内纺

丝液均匀流动性受影响;喷丝孔入射角度过大时,纺丝液几乎没有受到汇聚作用。因此,喷丝孔入射角度不宜过小,也不宜过大。本文中,在初始压力为 12 MPa 及其他结构参数不变的情况下,喷丝孔入射角度以  $100^\circ$  为最佳,这既可保证纺丝液的均匀流动性,又能确保喷丝孔发挥汇聚作用。

### 3.3 喷丝孔

#### 3.3.1 喷丝孔内径

图 22 为不同喷丝孔内径时纺丝液在减压式喷头内部的速度云图,图 23 为不同喷丝孔内径时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布曲线,图 24 为不同喷丝孔内径时纺丝液在减压式喷头内部的涡量云图。

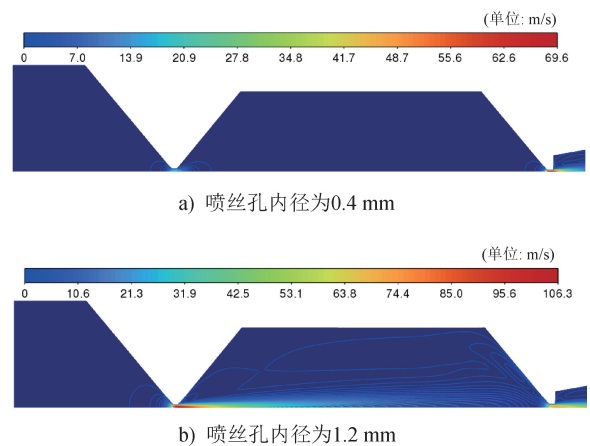


图 22 不同喷丝孔内径时减压式喷头内部纺丝液速度云图  
Fig. 22 Velocity cloud images of spinning solutions inside decompression nozzles with different spinneret orifice inner diameters

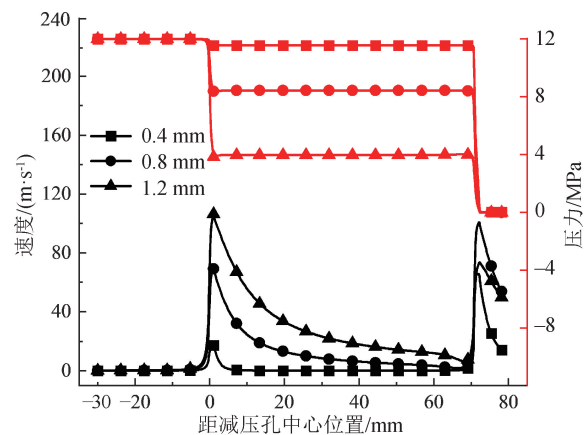


图 23 不同喷丝孔内径时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布  
Fig. 23 Velocity and pressure distribution of spinning solutions along the axis of decompression nozzles with different spinneret orifice inner diameters

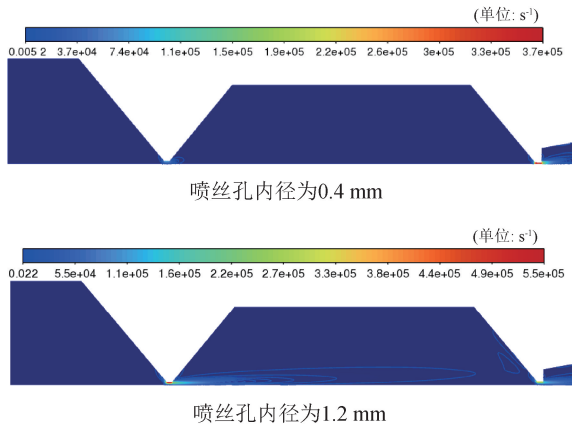


图 24 不同喷丝孔内径时减压式喷头内部纺丝液涡量云图  
Fig. 24 Vorticity cloud images of spinning solutions inside decompression nozzles with different spinneret orifice inner diameters

由图 4 及图 22~图 24 可知,喷丝孔内径对纺丝液的压降幅度、速度及涡量有较大影响。喷丝孔内径越大,压降越明显,纺丝液出减压孔时的速度越快、涡量越大,出喷丝孔时速度越慢、涡量越小、能量损耗越多。但喷丝孔内径也不宜过小,因为过小的喷丝孔内径会导致纺丝液在减压室内速度过低,没有充足的动力从喷丝孔喷出。

### 3.3.2 喷丝孔长度

图 25 为不同喷丝孔长度时纺丝液在减压式喷头内部的速度云图,图 26 为不同喷丝孔长度时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布曲线,图 27 为不同喷丝孔长度时纺丝液在减压式喷头内部的涡量云图。

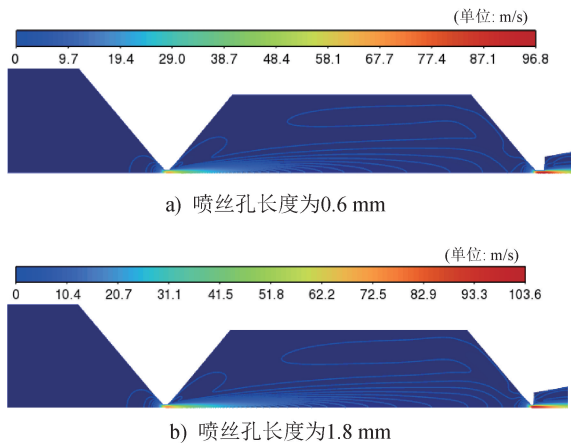


图 25 不同喷丝孔长度时减压式喷头内部纺丝液速度云图  
Fig. 25 Velocity cloud images of spinning solutions inside decompression nozzles with different spinneret orifice lengths

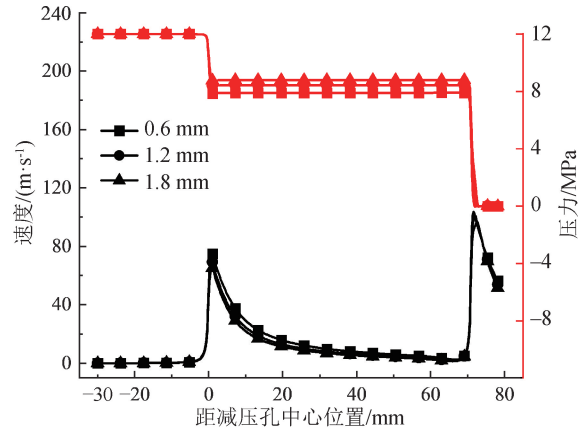


图 26 不同喷丝孔长度时纺丝液在减压式喷头轴线上的速度和压力分布  
Fig. 26 Velocity and pressure distribution of spinning solutions along the axis of decompression nozzles with different spinneret orifice lengths

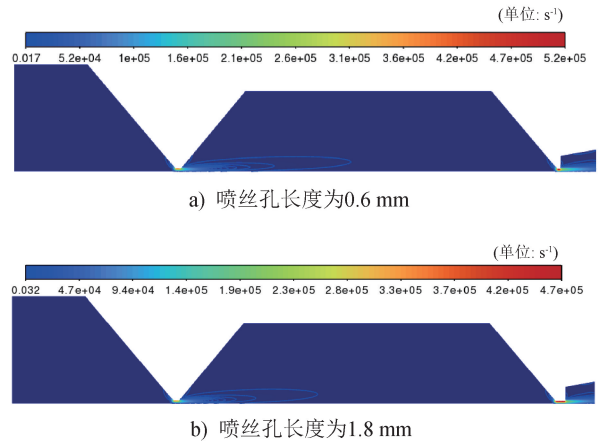


图 27 不同喷丝孔长度时减压式喷头内部纺丝液涡量云图  
Fig. 27 Vorticity cloud images of spinning solutions inside decompression nozzles with different spinneret orifice lengths

由图 4 及图 25~图 27 可知,随着喷丝孔长度的增加,减压孔处纺丝液压降幅度略有降低,纺丝液进入减压室的速度与涡量略微增大,能量损耗减小,喷丝孔喷出速度与涡量略微增大。

### 3.4 初始压力

对不同初始压力条件下的标准结构参数减压式喷头进行数值模拟,得到不同初始压力时纺丝液在减压式喷头轴线上的压力分布曲线(图 28),表 2 也归纳了不同初始压力时减压室内剩余压力及减压式喷头减压率。

由图 28 和表 2 可知,在减压式喷头结构不变的条件改变初始压力,减压率几乎不变。因此,可根

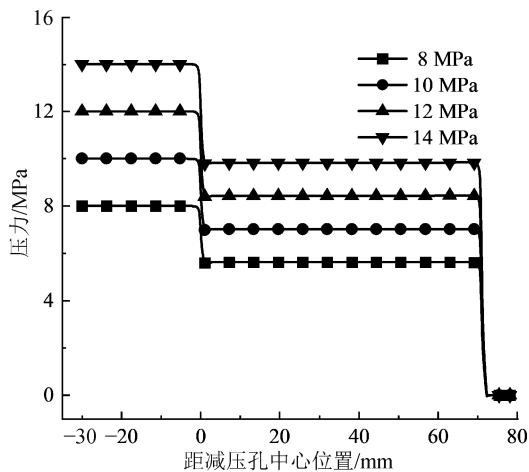


图 28 不同初始压力时纺丝液在减压式喷头轴线上的压力分布

Fig. 28 Pressure distribution of spinning solutions along the axis of decompression nozzles under different initial pressures

表 2 不同初始压力时减压室内剩余压力及减压式喷头减压率

Tab. 2 Residual pressures in decompression chambers and decompression rates of decompression nozzles under different initial pressures

初始压力/MPa	剩余压力/MPa	减压率/%
8	5.63	29.63
10	7.03	29.70
12	8.44	29.67
14	9.84	29.71

据纺丝液的浊点压力调节初始压力,再选择与减压率匹配的减压式喷头进行纺丝,严格控制纺丝液的成核质量,提高纤维质量。

### 3.5 减压孔内径与喷丝孔内径之比

减压孔内径与喷丝孔内径对闪蒸纺丝液的压降幅度有很大影响。为探究减压孔内径与喷丝孔内径之比和压降幅度的关系,本文在标准结构参数减压式喷头其他结构参数不变的情况下,分别将喷丝孔内径设定为 0.8、1.0、1.2 和 1.4 mm,并通过改变减压孔内径的大小,得到不同减压孔内径与喷丝孔内径之比条件下的减压率变化情况,具体如图 29 所示。

由图 29 可知,4 条曲线的重合度极高。可见,若同时改变减压孔内径与喷丝孔内径的大小并保持减压孔内径与喷丝孔内径之比不变,则减压率几乎不变。减压孔内径与喷丝孔内径之比决定了纺丝液的压降幅度。减压孔内径与喷丝孔内径之比不变,

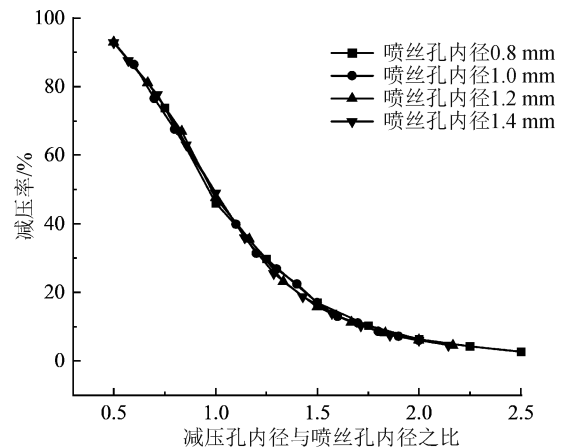


图 29 减压孔内径与喷丝孔内径之比对减压率的影响

Fig. 29 Influence of ratio of the decompression orifice inner diameter to the spinneret orifice inner diameter on the decompression rates

孔径增大,纺丝液流量增加,则纺制的纤维线密度增加。因此,为赋予纺丝液有效剪切速率并改善纤维形貌,应根据纺丝工艺条件调节减压孔内径与喷丝孔内径的大小。本文中,在初始压力为 12 MPa 及其他结构参数不变的情况下,为提高纺丝液的成核质量,减压孔内径与喷丝孔内径之比以 1.2 为最佳。

## 4 试验验证

为验证模拟结果,本文在初始压力为 12 MPa 的条件下,选取减压式喷头减压孔内径分别为 0.8、1.0、1.2 mm,其他结构参数皆为标准结构参数,进行闪蒸纺丝试验,得到的纤维形貌及扫描电镜 (SEM) 照片如图 30 所示。Fluent 模拟软件得出,3 种减压孔内径的减压式喷头纺丝过程中,减压室内部的压力分别为 6.47、8.43、9.63 MPa。

由图 30 可以看出,相同初始压力条件下,3 种减压式喷头纺出的纤维形态差异非常大,分丝宽度分别为 2.4、9.0、14.8  $\mu\text{m}$ 。减压孔内径为 0.8 mm 时,减压室内部压力为 6.47 MPa,远低于浊点压力 (8.50 MPa),气泡在减压室内破裂,纺丝液能量损耗大,纺丝动力不足,纺出的纤维细软,绒毛感强,分丝宽度较小,纤网整体呈条状;减压孔内径为 1.0 mm 时,减压室内部压力为 8.43 MPa,略低于浊点压力,纺出的纤维较细,分丝宽度正常且并丝较少;减压孔内径为 1.2 mm 时,减压室内部压力为 9.63 MPa,远高于浊点压力,溶剂在喷丝孔出口处

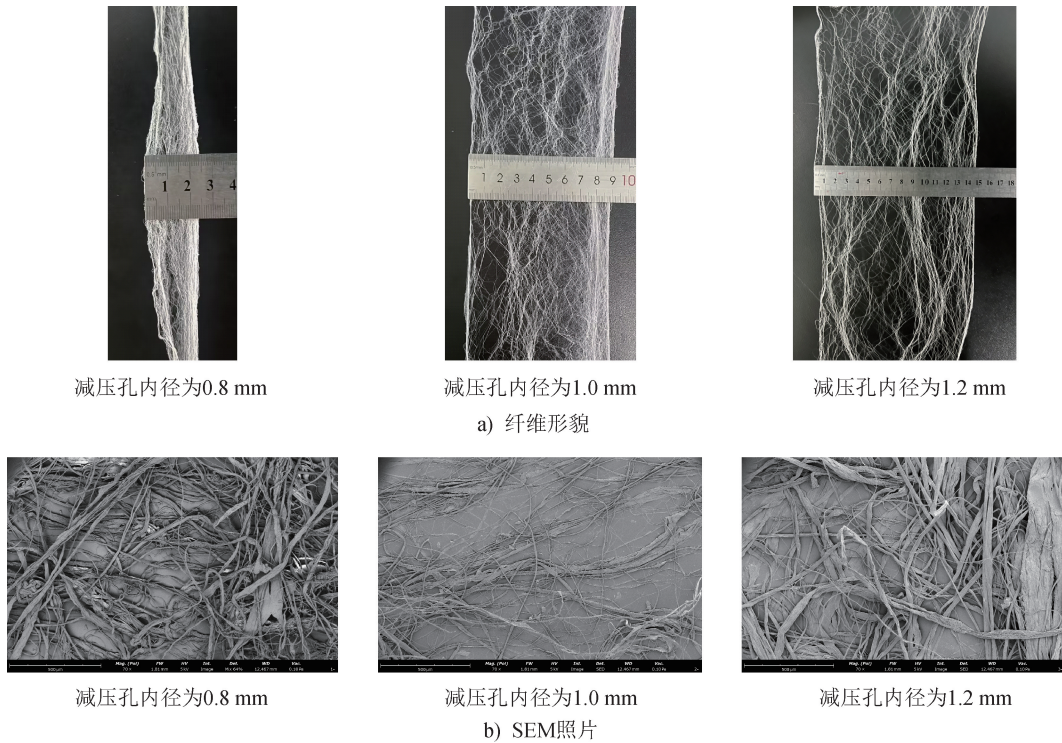


图 30 不同减压孔内径所得纤维形貌及 SEM 照片

Fig. 30 Morphology and SEM images of fibers obtained with different decompression orifice internal diameters

剧烈蒸发,气体膨胀不均匀,纤网均匀性下降,纺出的纤维较粗且并丝、破洞较多,分丝宽度较大。

综上,试验验证结果与模拟结果吻合。减压孔结构的微小变化会导致减压室内纺丝液压力变化,进而影响纺丝液的成核质量,最终影响闪蒸超细纤维质量。因此,根据纺丝液的浊点压力,在不同的初始压力下选择与之匹配的减压式喷头,对于调控闪蒸超细纤维性能具有重要意义。

## 5 结论

本文构建了多种结构参数的减压式喷头几何模型,并利用 Fluent 数值模拟软件,分析闪蒸纺丝液在不同结构参数的减压式喷头内部的流动状态与运动轨迹,重点考察纺丝液速度、压力和涡量的变化,揭示不同结构参数的减压式喷头对纺丝液的影响,主要结论如下。

(1)减压孔内径与喷丝孔内径之比主要决定闪蒸纺丝液的压降幅度,减压孔长度与喷丝孔长度对压降幅度有轻微影响,减压孔出射角度、喷丝孔入射角度、减压室内径及长度对压降幅度几乎无影响。

(2)纺丝液在减压室内部的压力几乎不变,其在减压室轴向中心区域高速流动,在减压室近壁面区域沿腔室壁形成回流,腔室内存在环形涡流。

(3)在初始压力为 12 MPa、纺丝液浊点压力为 8.50 MPa 的条件下,为减少能量损耗,保持纺丝液均匀流动,提高纺丝液成核质量,减压孔内径与喷丝孔内径之比以 1.2 为最佳、减压孔出射角度以  $90^\circ$  为最佳、喷丝孔入射角度以  $100^\circ$  为最佳、减压室内径以 30 mm 为最佳、减压室长度以 70 mm 为最佳。

(4)减压式喷头在结构参数不变条件下改变初始压力,减压率几乎不变。因此,合理搭配减压孔与喷丝孔结构,确保闪蒸纺丝液压力略低于浊点压力,并在减压室内保持纺丝液均匀稳定,有助于提高纤维质量。



期刊采编平台



中国知网下载

## 参考文献

[1] XIA L, XI P, CHENG B W. High efficiency fabrication

- of ultrahigh molecular weight polyethylene submicron filaments/sheets by flash-spinning [J]. Journal of Polymer Engineering, 2016, 36(1): 97-102.
- [ 2 ] XIA L, XI P, CHENG B W. A comparative study of UHMWPE fibers prepared by flash-spinning and gel-spinning[J]. Materials Letters, 2015, 147:79-81.
- [ 3 ] 梁越,刘春玲,洗启华,等. 闪蒸纺超细纤维非织造布研究及其应用[J]. 福建轻纺, 2010(7):29-31.
- [ 4 ] 夏磊,程博闻,西鹏,等. 闪蒸纺纳米纤维非织造技术的研究进展[J]. 纺织学报, 2020, 41(8):166-171.
- [ 5 ] 孙晓慧,郭秉臣. 闪蒸法非织造布的生产与应用前景[J]. 非织造布, 2006, 14(6):8-11.
- [ 6 ] 姜瑞明,钱竞芳. 非织造布在建筑领域的应用[J]. 聚酯工业, 2017, 30(4):15-19.
- [ 7 ] 张万虎,黄秀宝,赵书经. 闪蒸法非织造布及其应用[J]. 北京纺织, 1996(2):7-8.
- [ 8 ] 高橋浩晴,藤井忠広. フラッシュ紡糸用紡口: JPH05209306A[P]. 1993-08-20.
- [ 9 ] 上野郁雄,伊藤浩三. フィブリル化繊維の製造方法: JPS6233816A[P]. 1987-02-13.
- [ 10 ] HERBERT B, JAMES R. Fibrillated strand: US3081519A [P]. 1963-03-19.
- [ 11 ] 阚泓,王国建. 闪蒸法非织造布专利技术分析[J]. 纺织科技进展, 2019(9):28-33.
- [ 12 ] RONALD D A, JOHN E R. Process and apparatus for flash spinning of fibrillated plexifilamentary material: US3227794A[P]. 1966-01-04.
- [ 13 ] 罗章生,徐俊勇,朱倩沁,等. 甬道结构设计对闪蒸纺丝性能的影响[J]. 产业用纺织品, 2022, 40(8):13-18.
- [ 14 ] ANDERSON R, WOODRILL R. Flash spinning process: US3756441A[P]. 1972-08-14.
- [ 15 ] MARIN R A, MARSHALL L R, O'ROURKE B K. Flash-spun sheet material: US7744989[P]. 2010-06-29.
- [ 16 ] XIA X L, WANG J N, WANG H P, et al. Numerical investigation of spinneret geometric effect on spinning dynamics of dry-jet wet-spinning of cellulose/[BMIM]Cl solution [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133(38):43962.
- [ 17 ] TUNG K L, LI Y L, HU C C, et al. Power-law polymer solution flow in a converging annular spinneret: analytical approximation and numerical computation [J]. AIChE Journal, 2012, 58(1):122-131.
- [ 18 ] 王贝,邓启帆,沈春银,等. 干喷湿纺制备中空纤维膜的喷丝头结构优化模拟[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(5):72-80.
- [ 19 ] CAO C, CHUNG T S, CHEN S B, et al. The study of elongation and shear rates in spinning process and its effect on gas separation performance of poly(ether sulfone)(PES) hollow fiber membranes [J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(5):1053-1062.
- [ 20 ] 罗章生,徐俊勇,罗铮. 一种喷嘴及设有该喷嘴的闪蒸法纺丝设备:CN201821501901.9[P]. 2019-07-26.

有限的资源 无限的循环

爱护环境 人人有责