

http://pmse.scu.edu.cn

空气加速器结构对熔喷气流场的影响

王玉栋¹, 李彦青¹, 姬长春¹, 张威^{2,3}

(1. 广西科技大学 生物与化学工程学院, 广西 柳州 545026; 2. 河北科技大学 纺织服装学院, 河北 石家庄 050018;
3. 河北省纺织服装技术创新中心, 河北 石家庄 050018)

摘要:为降低熔喷纤维的直径,设计了带有空气加速器的新型模头,考察了空气加速器结构对其下方流场的影响。借助Fluent软件对新型模头的气流场进行了数值计算,分析了流场中空气速度和空气温度的分布规律。研究表明,空气加速器结构对流场性能有很大的影响。当空气加速器间距减小、空气加速器高度增加、空气加速器倾角减小、空气加速器侧面为内圆弧状时,纺丝线上的空气速度峰值增大、空气温度提高。综合对比,在空气加速器间距为20 mm、空气加速器高度为30 mm、空气加速器倾角为60°、空气加速器侧面为内圆弧状条件下,新型模头下方流场中的气流速度极值最大、气流温度更高。

关键词:熔喷模头;空气加速器;数值计算;气流牵伸

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1000-7555(2022)12-000

熔喷工艺是一种一步法非织造加工技术,可将高聚物切片直接制备成超细纤维网。相比其他非织造工艺,其具有效率高、产量大和流程短等优势。熔喷纤维直径普遍在1~4 μm之间,其细度最小可达几百纳米^[1]。较普通纤维,熔喷纤维的直径小、比表面积大,更具应用潜力和发展前景。熔喷非织造产品被广泛用作隔音材料、医疗卫生材料、保温材料、吸油材料、家用及工业揩布材料和电池隔膜材料等^[2,3]。

如图1所示,普通双槽形熔喷模头是制备熔喷纤维的最核心部件,熔喷纤维在其提供的高速射流作用下快速牵伸、细化和成型。模头下方的高速流场决定了熔喷纤维的直径、强度和结晶度等参数^[4]。对熔喷模头下方高速流场的实验测量和数值分析是研究纤维成型机理的基础,国内外众多科研工作者对其开展了相关研究。借助毕托管等工具,Harpham等^[5]较早地测量了熔喷模头下方的气流场,并对空气速度和温度分布规律进行了总结。杨颖

等^[6]和谢胜等^[7]借助更为先进的热线风速仪对模头流场的速度数据进行了采集。Krutka等^[8]首次应用流体力学计算软件对模头流场进行了数值模拟。同时,他们验证了模拟数据的有效性。借鉴Krutka等^[8]的数值研究工作,陈廷等^[9]考察了气孔宽度和气孔倾角等对流场速度分布的影响。孙亚峰等^[10]使用Fluent软件和单目标遗传算法对熔喷流场进行了优化。

熔喷工艺目前存在2个主要问题——生产能耗高和纤维细度难以细化,而这些与熔喷模头的结构及下方气流场分布密切相关^[8, 11-13]。模头的纺丝线上牵伸气流的速度及温度快速衰减,不利于聚合物熔体的细化,而且造成熔喷非织造产品的生产能耗过大和生产成本较高。为降低熔喷纤维生产过程中的动能损耗和热能损耗以及减小纤维的细度,本工作设计了带有空气加速器的新型模头,并借助数值计算方法考察了空气加速器结构对熔喷气流场分布的影响。

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0216

收稿日期: 2022-04-29

基金项目: 广西科技基地和人才专项(2021AC19425); 广西科技大学博士基金(21Z47); 河北省重点研发计划(202071202D); 国家自然科学基金资助项目(51776034)

通讯联系人: 姬长春, 主要从事多相流数值模拟研究, E-mail: chuangchun_ji@163.com;

张威, 主要从事纺织材料研究, E-mail: zhwei69@126.com

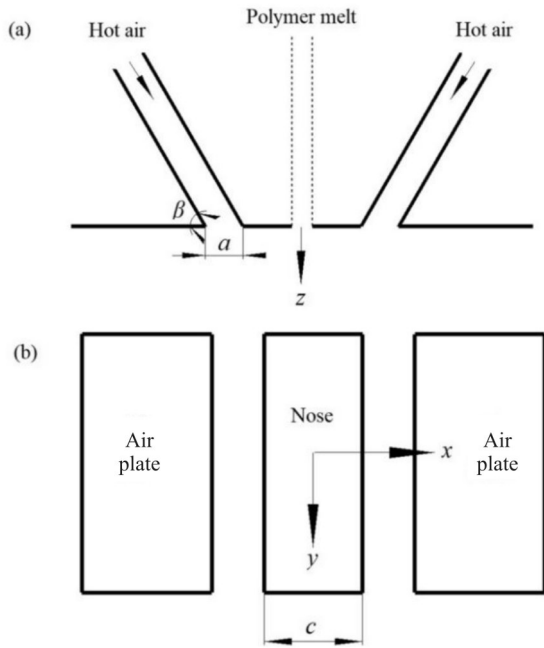


Fig.1 Common slot die

(a): cross section view; (b): view of the nose piece

1 数值计算

1.1 新型模头的设计

Fig.1 中的普通熔喷模头在工厂中应用最为广泛,将其记作 Die1。两股热空气从 Die1 中气板与头端之间的气孔中喷射而出,在模头喷丝孔轴线(纺丝线)周围融合为单股高速射流^[8]。融合后的单股射流向周围发生径向扩散,与两侧的空气进行动能和质量交换。在此过程中,纺丝线周围的气流动能和热能不断降低。而聚合物熔体主要在纺丝线四周向下运动,这就造成了熔喷纤维的气流牵伸力减小。

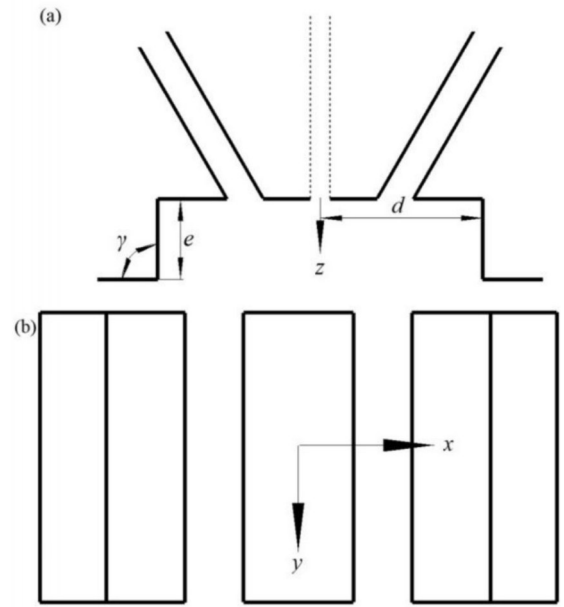


Fig.2 New die with air accelerators

(a): cross section view; (b): view of the nose piece

如 Fig.2 所示,为细化熔喷纤维,本研究工作在 Die1 的结构基础上设计了带有空气加速器的新型模头。新型模头的 2 个气板各带有 1 个空气加速器。空气加速器为长方体状物,其侧面可为圆弧面或平面,其余面皆为平面。空气加速器的设计旨在减小融合后的单股高速气流向两侧扩散,达到降低动能损失和热能损失的目的。

如 Tab.1 所示,为了研究空气加速器对熔喷模头下方气流场分布的影响,本文设计了 9 个具有不同结构和尺寸的空气加速器。其对应的新型模头分别记作 Die2, Die3, Die4, Die5, Die6, Die7, Die8, Die9 和 Die10。Die2~6 的空气加速器结构如 Fig.2 所示,其横截面为长方形,其倾角(γ)为侧面与底面之间的

Tab.1 Parameters of air accelerators

Parameter	Die 2	Die 3	Die 4	Die 5	Die 6	Die 7	Die 8	Die 9	Die 10
d/mm	10	20	30	10	10	10	10	10	10
e/mm	20	20	20	10	30	20	20	20	20
$\gamma/(\text{°})$	90	90	90	90	90	60	75	90	90

夹角, Die2~6 空气加速器倾角都为 90° 。空气加速器半间距(d)为侧面与气板交线和喷气孔轴线之间的距离,其数值等于空气加速器 2 个侧面顶端距离的 1/2; 空气加速器高度(e)为其底面到气板的距离。在 Die2~4 中, e 都为 20 mm, d 分别为 10 mm, 20 mm 和 30 mm。Die5, Die2 和 Die6 具有相同的半间

距, e 分别为 10 mm, 20 mm 和 30 mm。在 Fig.3 中, Die7~8 的空气加速器横截面呈梯形, γ 分别为 60° 和 75° , 其余参数和 Die2 完全相同。如 Fig.4 所示, 在 Die9~10 中空气加速器的侧面分别为内圆弧状和外圆弧状, 弧面弦长(e)都为 10 mm, 弧面弦长与底面夹角(γ)都为 90° , 喷丝孔轴线到弧面弦长的半间

距都为 10 mm, 弧面的半径都为 14.5 mm。Die2~10 和 Die1 的气孔倾角(β)、气孔宽度(a)及头端宽度(c)完全相同, 其尺寸分别为 60° , 0.65 mm 和 1.28 mm。在 Die2~10 中, 空气加速器与模头气孔沿 y 轴方向的长度完全相同, 其尺寸满足两维数值计算的要求^[8], 其余尺寸如 Tab.1 所示。

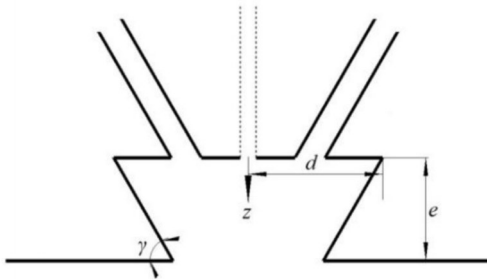


Fig.3 Diagram of Die 7 and Die 8

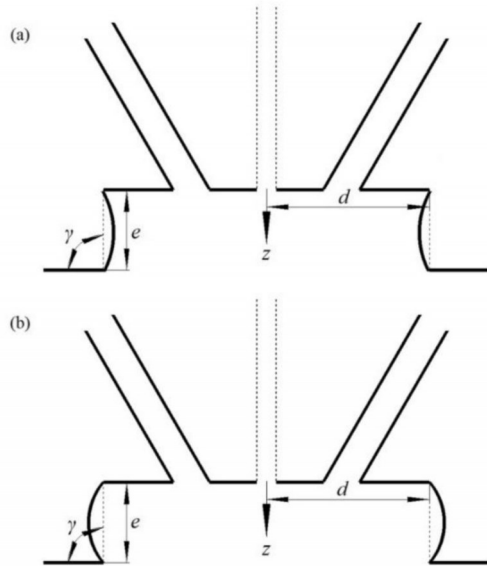


Fig.4 Diagram of (a) die 9 and (b) die 10

1.2 两维流场计算域

由于双槽形模头下方的流场具有二维分布特征^[8], 所以对 Die1~10 采用二维流场建模。相比三维流场模型, 二维流场模型降低了对计算机的性能要求, 可在保证计算结果的情况下缩短计算时间。另外, 双槽形模头两维流场关于 z 轴对称, 计算域只取一半即可。

Fig.5 为 Die1 的流场计算域, 其坐标系与 Fig.1 完全相同。原点 O 为头端的中心点处; 线段 OE 与 z 轴重合, 并与喷丝孔轴心线平行; 线段 OC 与 x 轴共线, 位于气板和头端所在的平面上。Die1 的两维流场计算域取值借鉴了 Shambaugh 等的工作^[8], 气孔入口 AB 到气板的距离为 5 mm; OE 和 CD 的长度均为

100 mm; OC 和 ED 的长度均为 30 mm。新型模头计算域的建立均与 Die1 一致。

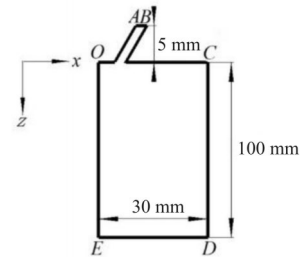


Fig.5 Computational domain of the flow field

1.3 网格划分

对于 Die1~10 的计算域, 采用“Map”方式生成尺寸为 0.1 mm 的四边形初始结构网格。在 Fluent 软件中, 采用“Region Adaption”方式对流场进行加密, 气孔部分和模头下方沿 x 轴方向 6 mm 及沿 z 轴方向 30 mm 的区域的网格边长为 0.5 mm。

1.4 参数设置

在 Fig.5 中, 气孔入口 AB 的空气压强为 126.65625 kPa、空气温度为 400 K、湍流强度 10%。 OE 被设为对称线, 可降低计算量。 CD 和 DE 处的空气压强、空气温度、湍流尺度和湍流强度分别为 101.325 kPa, 300 K, 10 mm 和 10%。计算域中的其余线段设为无滑移壁面, 温度被加热至 500 K。陈挺等^[9]和孙亚峰等^[11]在实验验证中发现采用标准 $k-\epsilon$ 模型^[14] 计算时, 流场中速度的模拟结果与实验数据较为吻合。因此, 在数值模拟中湍流模型选用标准 $k-\epsilon$ 模型。标准 $k-\epsilon$ 模型中 $C_{1\epsilon}$ 取值 1.24、 $C_{2\epsilon}$ 取 2.05, 其余参数为默认值^[10,11]。

2 结果与讨论

2.1 空气加速器间距对流场的影响

熔喷纤维的主要细化过程是在模头下方 15 mm 的范围完成的^[15], 因此, 本文考察了该范围内纺丝线上的速度分布和温度分布。

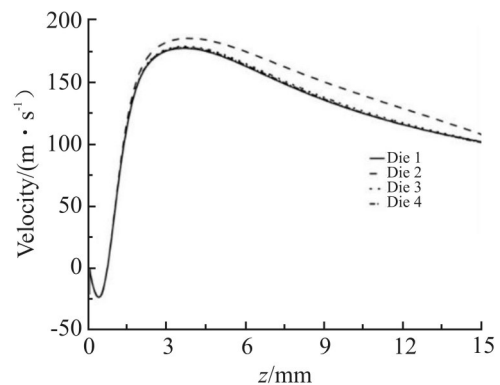


Fig.6 Velocity distribution of Die 1-4

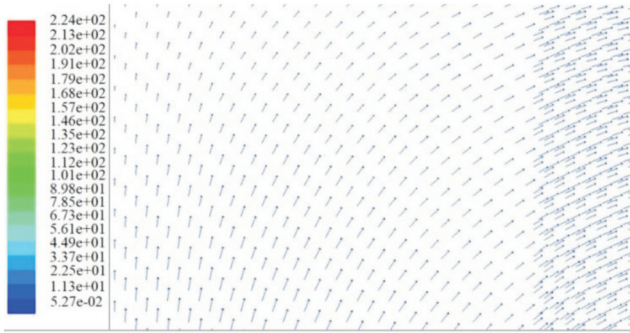


Fig.7 Velocity vector of Die 2

Fig.6 显示的是 Die1~4 流场纺丝线上平均速度的分布。从中可以看出,与 Die1 相比,在 Die2 流场纺丝线上的速度在大部分区间内具有优势。如图.7 所示,扩散的气流受到空气加速器侧面的反弹作用后运动方向发生改变,最终流向流场中心处。这使得新型模头流场纺丝线上的空气速度得到提高。Die3~4 与 Die1 的空气速度曲线基本完全重合。这说明间距过大不会增加空气牵伸速度。当空气加速器间距增加后,对气流的反弹作用减弱;同时,空气加速器的附壁效应导致流场核心区域内的流向两侧扩散。2 种作用的综合结果是 Die3 和 Die4 纺丝线上的速度几乎没有增加。

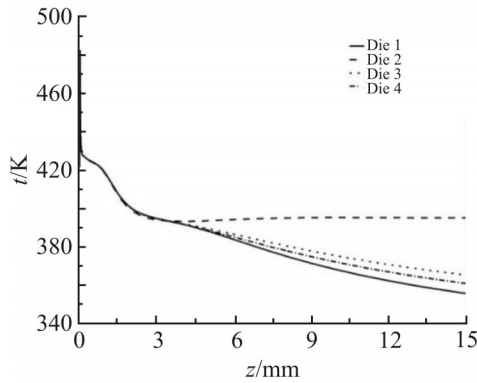


Fig.8 Temperature distribution of Die 1~4

Fig.8 为 Die1~4 流场中的温度曲线。新型模头流场的温度衰减速率较普通模头低,其中 Die2 的温度在 [5 mm, 15 mm] 内较其它模头高得多。Fig.8 示出,随着空气加速器间距的增加,新型模头纺丝线上的空气温度逐渐降低。当扩散后的气流被反弹后以对流传热的方式将空气加速器上的热能携带至流场中心处。同时,空气加速器可以通过热传导和热辐射 2 种方式向纺丝线上传递能量。因此,新型模头流场中温度衰减速率较普通模头下降。当 2 个空气加速器间距增大时,其对射流的反弹作用下降,热传递效果减弱。所以 Die3 和 Die4 纺丝线上的

温度逐渐减小。

熔喷纤维受到的牵伸作用力与气流速度和纤维运动速度之差的平方成线性关系^[4]。纺丝线的气流速度更高,得到的纤维直径更小。另外,更高的温度可以降低聚合物熔体的黏度和延缓其固化。因此当空气加速器间距减小时,新型模头更有利于制备直径更小的纤维。

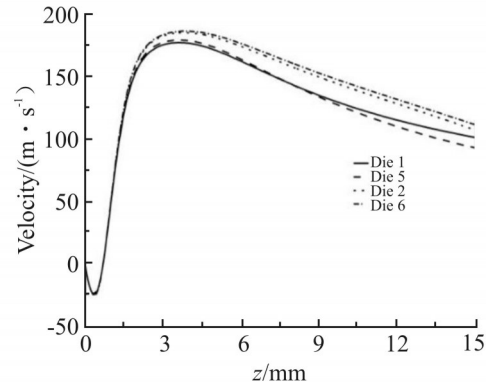


Fig.9 Velocity distribution of Die 1, Die 5, Die 2 and Die 6

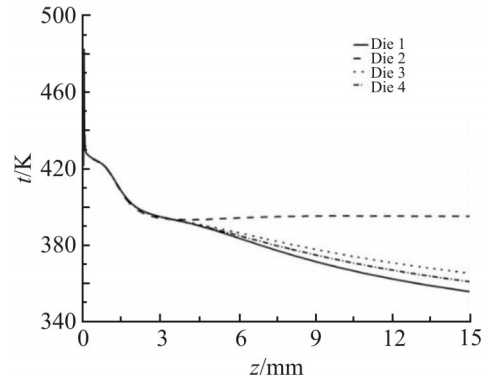


Fig.10 Temperature distribution of Die 1, Die 5, Die 2 and Die 6

2.2 空气加速器高度对流场的影响

如图.9 所示, Die6, Die2 和 Die5 的纺丝线上空气速度依次下降; Die1 和 Die5 的流场速度差别很小,尤其在 [0 mm, 10 mm] 范围内几乎完全相同。这是由于 Die5 的空气加速器高度较小,对气流的反弹效果较差,且空气加速器的附壁效应易使气流向侧面靠拢。空气加速器的高度增加后,其侧面可反弹更多的气流。因此,随着空气加速器高度的增加,流场中的速度逐渐提高。

Fig.10 显示为 Die1, Die2, Die5 和 Die6 流场纺丝线的温度变化趋势。从中可以看出,当空气加速器高度减小时,新型模头下方的空气温度也随之减小,但均高于普通模头的流场温度。原因是空气加速器高度的降低导致传热效果减弱。

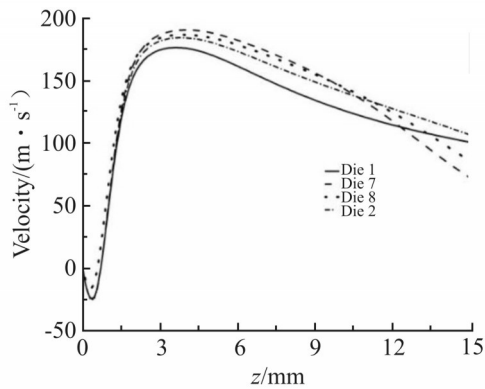


Fig.11 Velocity distribution of Die 1, Die 7, Die 8 and Die 2

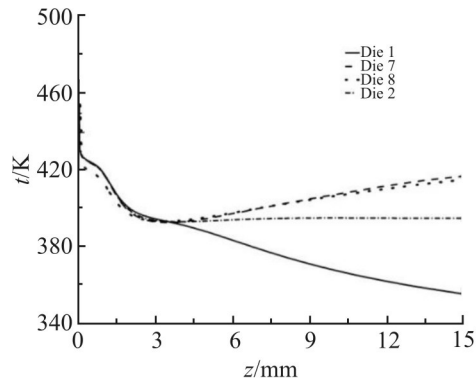


Fig.12 Temperature distribution of Die 1, Die 7, Die 8 and Die 2

2.3 空气加速器倾角对流场的影响

由 Fig.11 可见,当空气加速器倾角减小时,新型模头流场纺丝线上的速度峰值逐渐提高,但在[10 mm, 15 mm]内曲线下降的趋势加快。空气加速器倾角减小后,其侧面间的平均距离缩短,对气流的反弹作用增强,流场中的速度峰值提高。当倾角为 60° 时,空气加速器侧面下端距离最小,反弹后的射流撞击更剧烈,对应区域内纺丝线上的速度最低。

在 Fig.12 中, Die7 和 Die8 的流场温度曲线几何重叠,均高于 Die2 下方的气流温度。由于在 Die7 和 Die8 中,空气加速器侧面的平均间距较 Die2 的小,可以通过热对流等将更多的热能带入到流场中,因此它们的流场纺丝线温度更高。

2.4 空气加速器侧面形状对流场的影响

如 Fig.13 所示, Die9 下方的气流速度峰值略高于其他模头的速度峰值;同时,其在中后区的速度也最低。Die10 和 Die2 的流场速度几乎相同。Die9 的空气加速器侧面平均间距最小,结果是其纺丝线上的速度极大值最高。由于 Die9, Die2 和 Die10 的空气加速器平均间距相差很小,所以它们的速度峰值差距也很小。

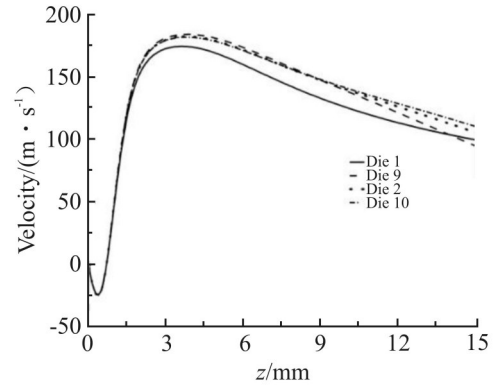


Fig.13 Velocity distribution of Die 1, Die 9, Die 2 and Die 10

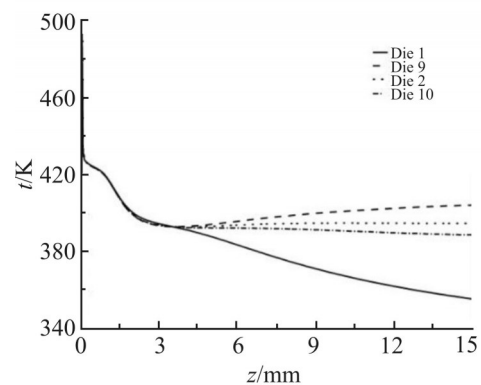


Fig.14 Temperature distribution of Die 1, Die 9, Die 2 and Die 10

在 Fig.14 中, Die9, Die2, Die10 和 Die1 的流场温度曲线逐渐下降。原因是 Die9, Die2 和 Die10 的空气加速器侧面平均间距逐渐增大,传递到流场中心线上的热能也逐渐下降。

3 结论

本文设计了带有空气加速器的一系列新型模头,并借助 Fluent 软件对其流场进行了数值模拟,考察了空气加速器结构对流场分布的影响。结论如下:

(1) 当空气加速器侧面间距较小时,新型模头下方流场纺丝线上的气流速度和温度更高。空气加速器间距过大时,对流场内的速度和温度改善作用很小。

(2) 空气加速器高度增加后,流场中的气流速度和温度都随之升高。

(3) 空气加速器倾角较小时,新型模头流场中的气流峰值和温度较高。

(4) 侧面为内圆弧状空气加速器有助于提高牵伸气流的速度最高值和牵伸气流的温度。

(5)综合对比,当 $d=10\text{ mm}$, $e=30\text{ mm}$, $\gamma=60^\circ$,且空气加速器侧面为内圆弧状时,流场中的速度峰值和温度最高。

带有空气加速器的新型熔喷模头如能应用于超细纤维的制备将有助于减小纤维细度和降低生产能耗,这将为提升熔喷非织造产品质量和市场竞争能力提供助力。同时,将为提高国产熔喷设备设计水平及促进碳达峰碳中和战略目标的达成做出贡献。

参考文献:

- [1] Hassan M A, Yeom B, Wilkie A, *et al.* Fabrication of nanofiber meltblown membranes and their filtration properties[J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 427: 336-344.
- [2] 彭慧敏, 钱建华, 徐凯杨, 等. 制备参数对聚醚砜/非织造布复合膜空气过滤性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(2): 7-14.
Peng H M, Qian J P, Xu K Y, *et al.* Effect of preparation parameters on air filtration performance of polyethersulfone/nonwoven composite membranes[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2021, 37(2): 7-14.
- [3] 来宇超, 孙辉, 朱斐超, 等. 银/还原氧化石墨烯负载聚丙烯熔喷非织造材料的制备及抗菌抗静电性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(5): 56-63.
Lai Y C, Sun H, Zhu F C, *et al.* Antibacterial and antistatic properties and preparation of silver/reduced graphene oxide-coated polypropylene meltblown nonwovens[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(5): 56-63.
- [4] Sun Y F, Zeng Y C, Wang X H. Three-dimensional model of whipping motion in the processing of microfibers[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50: 1099-1109.
- [5] Harphama A S, Shambaugh R L. Velocity and temperature fields of dual rectangular jets[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1997, 36: 3937-3943.
- [6] Yang Y, Zeng Y C. Simultaneous measurement in non-isothermal melt-blowing airflow field: time-averaged and turbulent characteristics[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59: 10664-10672.
- [7] Xie S, Han W L, Jiang G J, *et al.* Turbulent air flow field in slot-die melt blowing for manufacturing microfibrinous nonwoven materials[J]. *Journal of Materials Science*, 2018, 53: 6991-7003.
- [8] Krutka H M, Shambaugh R L, Papavassiliou D V. Analysis of a melt-blowing die: comparison of CFD and experiments[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41: 5125-5138.
- [9] Chen T, Wang X H, Huang X B. Modeling the air-jet flow field of a dual slot die in the melt-blowing nonwoven process[J]. *Textile Research Journal*, 2004, 74:1018-1024.
- [10] Sun Y F, Wang X H. Optimization of air flow field of the melt blowing slot die via numerical simulation and genetic algorithm [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 115: 1540-1545.
- [11] 孙亚峰. 微纳米纤维纺丝拉伸机理的研究[D]. 上海: 东华大学, 2010.
Sun Y F. Investigation of macro nano fiber formation[D]. Shanghai: Donghua University, 2010.
- [12] Wang Y D, Wang X H. Numerical analysis of new modified melt-blowing dies for dual rectangular jets[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2014, 54: 110-116.
- [13] 姬长春, 张开源, 王玉栋, 等. 熔喷三维气流场的数值计算与分析[J]. *纺织学报*, 2019, 40(8): 175-180.
Ji C C, Zhang K Y, Wang Y D, *et al.* Numerical calculation and analysis of three-dimensional flow field in melt-blown process[J]. *Journal of Textile Research*, 2019, 40(8): 175-180.
- [14] Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972: 55.
- [15] Bansal V, Shambaugh R.L. On-line determination of diameter and temperature during melt blowing of polypropylene[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, 37: 1799-1806.

Effect of Air Accelerator Structure on Airflow Field Under Meltblowing Die

Yudong Wang¹, Yanqing Li¹, Changchun Ji¹, Wei Zhang^{2,3}

(1. *College of Biological and Chemical Engineering; Guangxi University of Science & Technology, Liuzhou 545026, China*; 2. *College of Textiles and Garments, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050018, China*; 3. *Hebei Textile and Garment Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050018, China*)

ABSTRACT: In order to reduce the diameter of meltblowing fibers, a new type of die head with an air accelerator was designed, and the influence of the structure of the air accelerator on the flow field below it was investigated. With the aid of Fluent software, the air flow field of the new die head was numerically calculated, and the air velocity and air temperature distribution law in the flow field were analyzed. The research results show that the structure of the air accelerator has a great effect on the performance of the flow field. When the distance between two air accelerators diminishes, the air accelerator height increases, the air accelerator inclination reduces, and the side of the air accelerator becomes an inner arc, the peak air velocity and the air temperature on the spinning line rise. By comprehensive comparison, under the conditions that the air accelerator spacing is 20 mm, the air accelerator height is 30 mm, the air accelerator inclination is 60°, and the side of the air accelerator is inner circular arc, the extreme value of air velocity and air temperature in the flow field under the new die are the largest.

Keywords: meltblowing die; air accelerator; numeral calculations; airflow drafting