

# 气体过滤用熔喷材料过滤性能的优化探讨

邹萌萌 刘德铭 周朝钢  
山东希瑞新材料有限公司, 山东 淄博 255000

**摘要:**为实现气体过滤用熔喷材料兼具高过滤效率与低过滤阻力的目的,从材料的纤维平均直径及空间结构两方面入手,分析它们对熔喷材料过滤性能的影响,发现赋予材料更小的纤维平均直径可以提高过滤效率,赋予材料蓬松的空间结构可降低过滤阻力。研究结果可为生产兼具高效低阻特性的气体过滤用熔喷材料提供参考。

**关键词:** 纤维平均直径; 蓬松性; 过滤效率; 过滤阻力; 高效低阻; 气体过滤; 熔喷材料

中图分类号: TS 174.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2024)09-0009-06

## Optimization of filtration performance of melt-blown nonwovens for gas filtration

Zou Mengmeng, Liu Deming, Zhou Chaogang

Unicorn Nonwovens Co., Ltd., Zibo 255000, Shandong, China

**Abstract:** In order to realize the purpose of combining high filtration efficiency and low filtration resistance of melt-blown nonwovens for gas filtration, the effects of average fiber diameter and spatial structure of the materials on the filtration performance were analyzed. It was found that giving the materials smaller average fiber diameter could improve the filtration efficiency, and giving the materials fluffy spatial structure could reduce the filtration resistance. The research results can provide references for the production of melt-blown nonwovens for gas filtration with high efficiency and low resistance.

**Keywords:** average fiber diameter; fluffiness; filtration efficiency; filtration resistance; high efficiency and low resistance; gas filtration; melt-blown nonwoven

空气过滤技术依托过滤材料的特殊结构,有效拦截并滞留气体内的杂质于材料一侧或内部,实现气体的净化处理<sup>[1]</sup>。过滤材料良好的过滤性能是获得较好过滤效果的关键。过滤材料的分类及所用非织造材料在过滤中的作用见表 1<sup>[2]</sup>。

气体过滤用熔喷材料是聚合物熔融后经模头挤出,再经高速热气流牵伸形成超细纤维(包括长丝和短纤),最后在成型装置上完成材料成型而制得的<sup>[3]</sup>。由于这种材料的纤维平均直径小、比表面积大,因而具备很好的过滤性能,常作为重要的组成部

收稿日期: 2024-07-23

作者简介: 邹萌萌,男,1984 年生,高级工程师,主要从事纺织产品的设计开发及生产管理, zmm@unicorn-nonwoven.com

表 1 过滤材料的分类及所用非织造材料在过滤中的作用

Tab. 1 Classification of filtration materials and the role of nonwovens used in filtration

过滤分类	过滤直径/ $\mu\text{m}$	过滤材料	非织造材料的作用	备注
粗滤	>10	纤维	滤材	主要用于直径大于 10 $\mu\text{m}$ 颗粒的过滤。过滤时间越长,滤材过滤性能越差
微滤	0.1~10	纤维、微滤膜	滤材、支撑体	主要用于过滤悬浮固体、细菌等。非织造布通过改性、复合等可达到微滤要求
超滤	0.01~0.1	超滤膜	支撑体	主要用于过滤大分子有机物,如蛋白质、多糖、腐殖酸等。过滤时,膜起主要过滤作用,非织造布作为支撑体起部分过滤作用
纳滤	<0.01	纳滤膜	支撑体	主要用于过滤小分子有机物、染料、重金属离子等。过滤时,膜起主要过滤作用,非织造布作为支撑体用于增加滤料力学强度

分应用于复合过滤材料中。熔喷材料内部纤维分布十分杂乱,具有独特的三维立体网状结构及多孔结构。气体在通过这种结构的材料时,所含杂质能被有效地分散,且杂质与熔喷纤维频繁碰撞,被黏附的概率增加,材料拦截效率增强<sup>[4-5]</sup>。另外,与机织材料相比,非织造材料具备产量高、生产流程短的特点,可在实现良好过滤效果的同时降低原材料成本<sup>[6-7]</sup>。

本文将聚丙烯为主要原料,制备不同纤维直径及不同空间结构的气体过滤用熔喷材料,分析材料中纤维直径与空间结构对过滤性能的影响,探讨工艺条件对纤维直径与空间结构的影响,以期制备兼具高效低阻特性的气体过滤用熔喷材料提供参考。

## 1 试验方法与设备

### 1.1 纤维平均直径的测试

采用 Phenom-Pure 型扫描电镜对过滤材料表面进行图像采集,并利用复纳公司开发的 Automated Image Mapping 软件进行自动扫描和计算。每个样品随机取样 5 次,每次扫描区域 0.40 mm × 0.25 mm,结果取平均值。

### 1.2 过滤效率的测试

使用 SC-FT-1802D-Plus 型自动滤料测试仪,对样品的过滤效率进行测试。测试有效面积为 100 cm<sup>2</sup>,气体流量为 32 L/min,每个样品测试 5 次,结果取平均值。

## 2 纤维平均直径对气体过滤用熔喷材料过滤效率的影响

为研究过滤材料纤维平均直径对过滤效率的影

响,本研究采用单一变量方法(即在确保其他工艺参数均保持不变的前提下,仅改变影响材料纤维直径的工艺参数),制备面密度和厚度相同但纤维平均直径不同的 10 块熔喷材料样品,并对制备的样品进行去除静电处理,避免因静电吸附作用影响样品测试结果。测试结果如表 2 所示,并根据表 2 绘制了样品的纤维平均直径与过滤效率的趋势线(图 1)。

表 2 样品的纤维平均直径与过滤效率

Tab. 2 Average fiber diameter and filtration efficiency of samples

样品编号	纤维平均直径/ $\mu\text{m}$	过滤效率/%
1	2.24	81.2
2	2.78	81.3
3	3.76	76.4
4	3.92	76.1
5	4.56	70.8
6	5.01	61.4
7	5.73	59.9
8	6.32	59.2
9	7.26	50.5
10	8.98	47.3

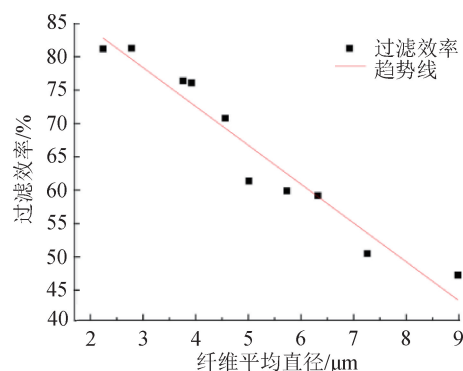


图 1 样品的纤维平均直径与过滤效率关系

Fig. 1 The relationship between average fiber diameter and filtration efficiency of samples

由表 2 及图 1 可以看出,随着纤维平均直径的增加,过滤效率呈逐渐降低的趋势。结合过滤机理<sup>[8-10]</sup>分析可知,在粒子流量稳定的状态下,材料的过滤效率主要由纤维之间的孔隙尺寸大小决定。由于纤维平均直径的减小将直接导致材料孔隙尺寸的减小,进而对提升过滤效率起到积极作用,因而可通过减小纤维平均直径的方式提升熔喷材料的过滤效率。

### 3 熔喷工艺条件对纤维平均直径的影响

为探究不同熔喷工艺条件对所制备过滤材料纤维平均直径的影响,采用单一变量方法制备试验所需样品,并在每个样品下机后进行去除静电处理,以有效排除多变量之间的互相干扰,提升试验结果的准确性。

#### 3.1 聚合物单孔流量

选择熔融指数为 1 500 g/(10 min) 的聚丙烯颗粒为原料,设定生产参数:聚合物熔体温度 255 °C、牵伸气流温度 245 °C、冷却风温度 15 °C、单孔牵伸气流流量 0.352 m<sup>3</sup>/h、网帘接收距离 235 mm。分别在聚合物单孔流量为 0.147、0.172、0.348、0.372 和 0.417 g/min 的条件下纺丝成网,并分别测试纤维平均直径及 CV 值,结果如图 2 所示。

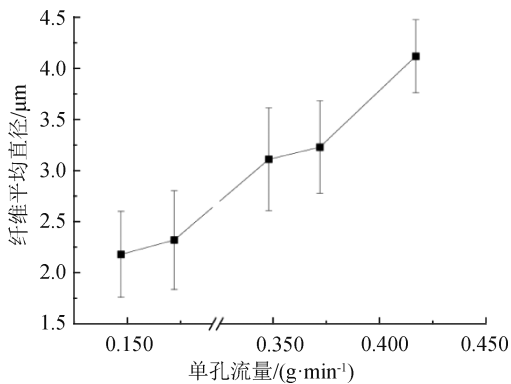


图 2 不同聚合物单孔流量对纤维平均直径的影响  
Fig. 2 The influence of different polymer single-pore flow rates on the average fiber diameter

从图 2 可以得出:随着聚合物单孔流量的增加,纤维平均直径有一定程度的增大。这与牵伸气流流量不变的前提下,纤维所受的力基本不会发生变化,但单位时间内聚合物单孔流量增加,微观层面均匀

分配到聚合物分子链上的力减小有关。但聚合物单孔流量过高,则挤出胀大效应会比较明显,易出现并丝缠结现象,导致过滤效率衰减加剧。

#### 3.2 聚合物熔融指数

设定生产参数:聚合物熔体温度 210 °C,牵伸气流温度 210 °C,冷却风温度 15 °C,单孔牵伸气流流量 0.352 m<sup>3</sup>/h,网帘接收距离 180 mm,聚合物单孔流量 0.348 g/min。分别将熔融指数为 1 500、1 200、800 及 500 g/(10 min) 的聚丙烯颗粒原料纺丝成网,并分别测试纤维平均直径及 CV 值,结果如图 3 所示。

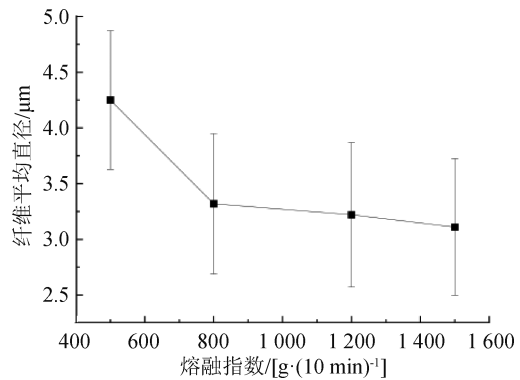


图 3 不同聚合物熔融指数对纤维平均直径的影响  
Fig. 3 The influence of different polymer melt indices on the average fiber diameter

从图 3 可以看出:随着聚合物熔融指数的增加,纤维平均直径减小,只是聚合物熔融指数在从 800 g/(10 min) 增加至 1 500 g/(10 min) 的过程中,纤维平均直径减小程度放缓。这与相同的熔体温度及牵伸气流流量前提下,聚合物熔融指数越高,则分子链越短,链段之间越易产生滑移,故越易被牵伸拉细有关。

#### 3.3 熔体温度

选择熔融指数为 1 500 g/(10 min) 的聚丙烯颗粒为原料,设定生产参数:聚合物单孔流量 0.348 g/min,牵伸气流温度 245 °C,单孔牵伸气流流量 0.352 m<sup>3</sup>/h,冷却风温度 15 °C,网帘接收距离 220 mm。分别在熔体温度为 210、230、240 和 255 °C 的条件下纺丝成网,并测试纤维平均直径及 CV 值,结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出:熔体温度对纤维平均直径的影响基本与熔融指数对纤维平均直径的影响规律一致,即随着熔体温度的升高,纤维平均直径减小。

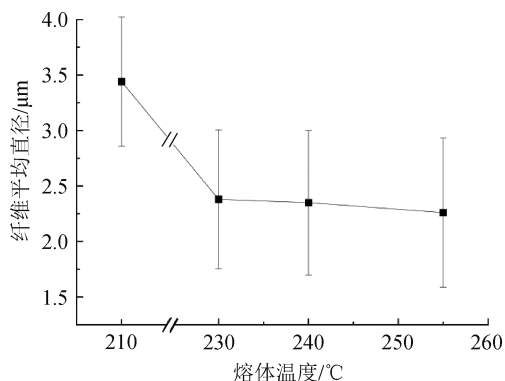


图4 不同熔体温度对纤维平均直径的影响  
Fig. 4 The influence of different melt temperatures on the average fiber diameter

### 3.4 牵伸气流流量

选择熔融指数为 1 500 g/(10 min) 的聚丙烯颗粒为原料, 设定生产参数: 聚合物单孔流量 0.348 g/min, 熔体温度 255 °C, 牵伸气流温度 245 °C, 冷却风温度 15 °C, 网帘接收距离 220 mm。分别在单孔牵伸气流流量为 0.364、0.416、0.468 和 0.494 m<sup>3</sup>/h 的条件下纺丝成网, 并测试纤维平均直径及 CV 值, 结果如图 5 所示。

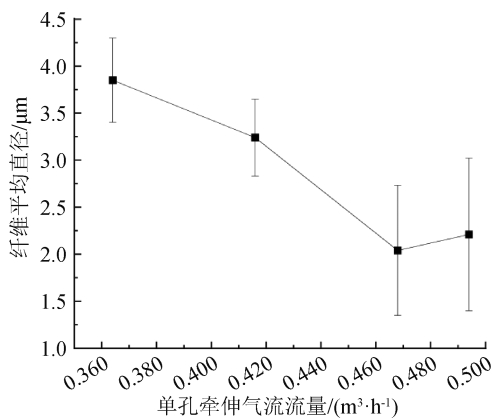


图5 不同单孔牵伸气流流量对纤维平均直径的影响  
Fig. 5 The influence of different single-pore draft airflow on the average fiber diameter

从图 5 可以看出: 单孔牵伸气流流量增加, 纤维平均直径呈减小趋势, 但离散程度有所增加, 即纤维直径 CV 值增加。这是因为牵伸气流流量增加, 则牵伸力变大, 所以一定范围内纤维分子链取向度和分子链间滑移增大, 纤维被拉得更细。但若牵伸气流流量过大, 则会发生飞丝或飞花现象, 产品质量受影响。

## 4 空间结构对气体过滤用熔喷材料过滤性能的影响

如图 6 所示, 当需要过滤的气体通过多层熔喷材料时, 尺寸大于材料孔隙的颗粒被拦截在材料的表面, 尺寸小于材料孔隙的颗粒则在通过过滤路径的过程中, 因拦截、惯性、扩散及沉降等原因被吸附在材料内部, 且由于容尘量及吸附力方面的原因, 部分颗粒被冲刷到下一层材料处继续过滤, 并在多次过滤后最终得到相对洁净的气体<sup>[11]</sup>。因此, 气体过滤用熔喷材料的空间结构对产品的过滤性能至关重要。

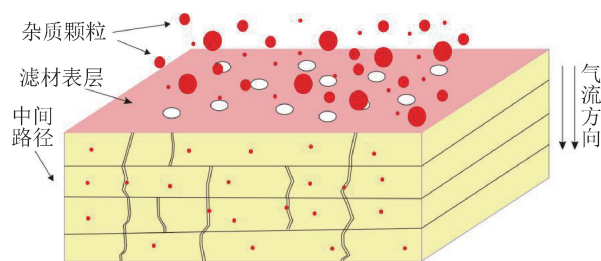


图6 多层熔喷材料的过滤过程  
Fig. 6 Filtration process of multi-layer melt-blown nonwovens

### 4.1 材料层数

为减小其他工艺参数对试验结果的影响, 选择在同一工艺条件下制备的面密度为 10 g/m<sup>2</sup> 的熔喷材料作为测试样, 并在去除静电处理后, 采用叠层的方式探究材料层数对过滤性能的影响, 结果如表 3 和图 7 所示。

表3 不同层数熔喷材料的性能

Tab. 3 Properties of melt-blown nonwovens with different layers

层数	面密度/(g·m <sup>-2</sup> )	厚度/mm	过滤效率/%	过滤阻力/Pa
1	10.3	0.12	30.3	8
2	21.4	0.27	39.2	14
3	30.2	0.38	48.6	21
4	41.8	0.49	69.3	29
5	51.3	0.63	80.9	37

从表 3 和图 7 可以看出: 随材料层数的增加, 过滤阻力基本呈线性增加, 过滤效率增幅也逐渐加大。这与多层熔喷非织造材料独特的空间结构使得过滤拦截作用得到增益, 杂质被充分过滤有关。而仅单

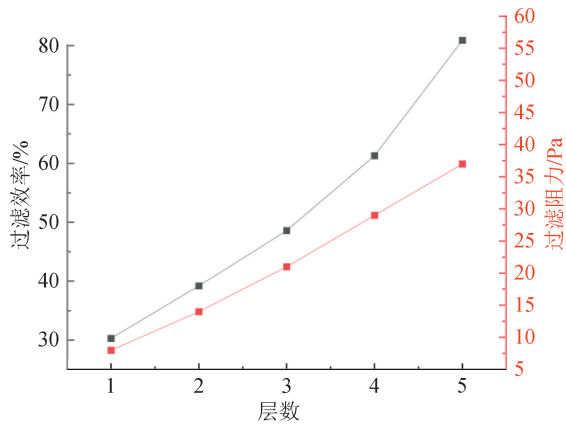


图 7 不同层数熔喷材料的过滤性能

Fig. 7 Filtration properties of melt-blown nonwovens with different layers

层熔喷材料是很难达到高效低阻效果的。

#### 4.2 材料蓬松性

影响材料蓬松性的因素主要有原料黏结性、网帘接收距离、冷却风温度等。后文将研究这些因素对单层熔喷材料过滤性能的影响,进而深入了解蓬松性是如何影响材料过滤性能的。

##### 4.2.1 原料黏结性

生产过程中,关闭静电驻极设备。原料选择熔融指数为 1 500 g/(10 min) 的聚丙烯颗粒,并分别搭配功能性母粒 JE002、ES002、NC001、BL001,其中功能性母粒添加质量分数皆为 1%。基于主要成分含量,功能性母粒的黏结性由大到小依次为 BL001、NC001、ES002、JE002。设定生产参数:聚合物单孔流量 0.348 g/min,基础面密度 25 g/m<sup>2</sup>,熔体温度 255 ℃,牵伸气流温度 245 ℃,单孔牵伸气流流量 0.416 m<sup>3</sup>/h,冷却风温度 15 ℃,网帘接收距离 240 mm。并在纺丝成网后分别测试材料的过滤效率和过滤阻力,结果如图 8 所示。

图 8 中,原料黏结性从左到右依次减小,原料黏结性与过滤阻力呈正相关。这是因为,相同的工艺条件下,所用功能性母粒黏结性越大,混合原料熔体的黏结性越大,则熔喷得到的纤维间黏合点越多,材料的蓬松度越低,材料内部孔隙数量越少,过滤阻力越大。

##### 4.2.2 网帘接收距离

原料选择熔融指数为 1 500 g/(10 min) 的聚丙烯颗粒,并设定生产参数:聚合物单孔流量 0.348 g/min,基础面密度 25 g/m<sup>2</sup>,熔体温度 255 ℃,

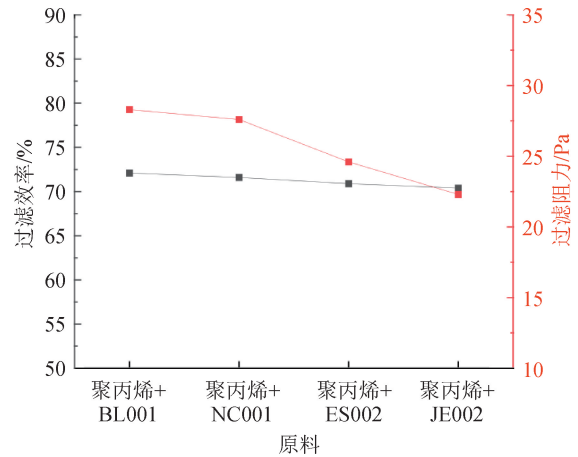


图 8 不同黏结性的原料对过滤性能的影响

Fig. 8 The influence of raw material with different adhesion on filtration performance

牵伸气流温度 245 ℃,单孔牵伸气流流量 0.416 m<sup>3</sup>/h,冷却风温度 15 ℃。分别在网帘接收距离为 200、220、240、260、280 和 300 mm 的条件下纺丝成网,并测试材料的过滤效率和过滤阻力,结果如图 9 所示。

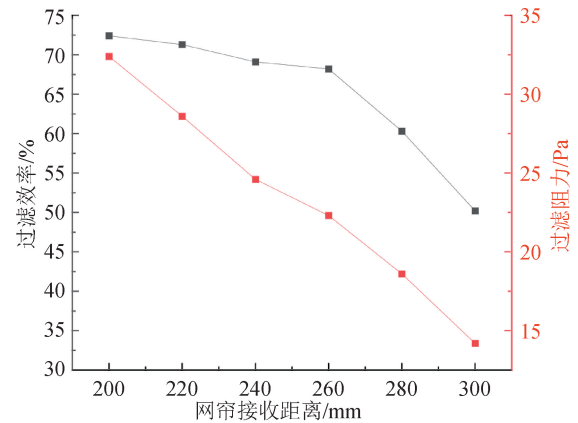


图 9 网帘接收距离对过滤性能的影响

Fig. 9 Effect of die-to-collector distance on filtration performance

从图 9 可以看出:随着网帘接收距离的增大,材料的过滤阻力逐渐减小,这与接收距离的增大令纤维冷却更加充分,纤维间黏合点变少,材料蓬松性更好,孔隙数量增加,材料透气性变好有关。

此外,从图 9 还可看出:网帘接收距离在一定范围内变化时,过滤效率变化较小。这是由于熔喷纤维受热空气拉伸变细的过程基本上发生在距离喷丝孔 5 cm 的范围内<sup>[12]</sup>,因而增大网帘接收距离对纤维平均直径的影响较小,又因为过滤效率与纤维平

均直径紧密相关,所以增大网帘接收距离对过滤效率的影响较小。过滤效率小幅下降与蓬松性变好、孔隙数量增多有关。但接收距离过大会导致材料的空间结构过于蓬松,进而造成过滤效率大幅度下降。

#### 4.2.3 冷却风温度

原料选择熔融指数为 1 500 g/(10 min) 的聚丙烯颗粒,设定生产参数:聚合物单孔流量 0.348 g/min,基础面密度 25 g/m<sup>2</sup>,熔体温度 255 ℃,牵伸气流温度 245 ℃,单孔牵伸气流流量 0.416 m<sup>3</sup>/h,网帘接收距离 220 mm。分别在冷却风温度为 15、18、20 和 25 ℃ 的条件下纺丝成网,并测试材料的过滤效率和过滤阻力,结果如图 10 所示。

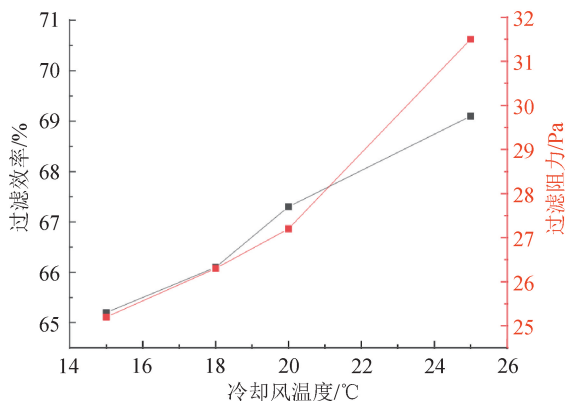


图 10 冷却风温度对材料过滤性能的影响  
Fig. 10 Effect of cooling air temperature on filtration performance

从图 10 可以看出:随着冷却风温度的升高,材料的过滤阻力明显上升。这是由于冷却风温度的升高使得熔喷纤维喷射到成网帘后仍具有较高的温度,再加上受网底吸风及各接触辊的影响,黏合会进一步发生,进而导致孔隙数量减少,材料蓬松性变差,过滤阻力升高。

## 5 结论

本文以聚丙烯为原材料,利用熔喷工艺实现了气体过滤用熔喷材料的制备,并从材料的纤维平均直径及空间结构两方面对材料的过滤性能进行分析,得到如下结论:

(1) 对于单层熔喷材料,其过滤效率主要受构成的纤维直径影响。纤维直径越小,则材料的过滤效率越高。过滤阻力主要由材料的蓬松性所决定。

蓬松性越好,则材料的孔隙数量越多,透气性能越好,过滤阻力越低。

(2) 通过改善聚丙烯熔体的流动性能以及喷出后所受的牵伸力,可以减小纤维平均直径,进而提高材料的过滤效率,具体实现方式有升高熔体温度,使用熔融指数更高的聚丙烯原料,减小聚合物单孔流量,增大牵伸气流流量等。

(3) 将低阻力熔喷材料进行多层复合,可获得兼具高过滤效率和低过滤阻力的气体用熔喷材料,这是单层熔喷材料难以企及的。

(4) 增加熔喷材料的蓬松性可使材料具备更低的过滤阻力,具体可通过使用黏结性小的生产原料,以及降低冷却风温度、增大网帘接收距离等方式实现。



期刊采编平台



中国知网下载

## 参考文献

- [1] 朱传龙,陈运,吴曦桐,等. 简析非织造液体过滤材料[J]. 山东纺织科技, 2015, 56(1): 39-41.
- [2] 陈浩,赵明良,杨靖,等. 医用非织造过滤材料的发展与应用[J]. 国际纺织导报, 2016, 44(10): 44-46.
- [3] 李龙飞. 真丝口罩防护性及舒适性研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- [4] 赵倩,陈锦苗,邱长玉,等. 口罩用抗菌空气过滤材料的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(2): 1-8.
- [5] 王瑜,栾一鸣,赵洋,等. 非织造布在液体过滤中的应用进展[J]. 产业用纺织品, 2023, 41(5): 1-7.
- [6] 程思. 聚丙烯熔喷非织造布结构和过滤性能的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- [7] 赵明良,任晓川,邢明杰,等. 面膜用非织造布的结构与性能[J]. 国际纺织导报, 2023, 51(1): 23-26.
- [8] 胡永,刘宏刚,李娟,等. 空气净化用角蛋白非织造材料的制备及性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 54-59.
- [9] 王超,张宇菲,丁彬,等. 聚丙烯非织造土工布的研究进展及应用前景[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(1): 1-7.

(下转第 20 页)