

水驻极熔喷非织造材料的制备与性能研究

陈苗苗, 曾泳春, 卢 晨, 刘 力, 王 洪*

(纺织面料技术教育部重点实验室, 东华大学, 上海 201620)

摘要:口罩的核心功能层是熔喷非织造材料, 为了满足高效低阻要求, 需要对其进行电晕驻极和水驻极处理, 但有关驻极机理方面的研究却鲜见报道, 特别是水驻极。本文对比测试了电晕驻极和水驻极熔喷非织造材料的过滤效率和表面电荷分布, 模拟了水驻极实验, 并对水驻极机理进行了探索。结果发现, 相对于电晕驻极, 水驻极能显著提高熔喷非织造材料的过滤效率, 尤其是低面密度熔喷材料; 水的电导率越小, 所得熔喷非织造材料的过滤效率越高; 水驻极、电晕驻极熔喷非织造材料表面都能产生正负电荷, 且呈随机分布。

关键词:电晕驻极; 水驻极; 表面电荷; 熔喷非织造材料

引言

口罩的核心功能层是位于芯层的熔喷非织造材料, 为了提高其过滤效率并保持较低的阻力, 通常需要对其进行驻极处理并带上静电, 进一步基于静电吸附机理, 滤除空气中的细颗粒物^[1]。在熔喷非织造材料的产业化生产中, 驻极技术尤为重要。实际上, 驻极技术方法较多, 其中电晕驻极技术在熔喷非织造材料上的应用较为常见^[2,3]。由于新冠肺炎疫情的强大需求, 近期国内许多企业纷纷引进了水驻极生产线。

通过电晕驻极使熔喷非织造材料带上静电荷的工艺技术已经得到了较好的产业化应用和较为深入的理论研究^[4,5]。但是, 电晕驻极只能使熔喷非织造材料带上空间电荷, 存在电荷密度横向均匀性差、容易受环境影响等缺点, 在长期储存过程中, 其所带电荷会逐渐消失, 从而引起口罩过滤效率的下降^[6]。随着国家医疗卫生水平的提高^[7], 对熔喷非织造材料的过滤效率提出了越来越高的要求。而一些国外标准^[8~11], 则要求在 95L/min 的流量下, 熔喷非织造材料的油性过滤效率稳定保持在 95% 以上, 甚至 99%, 这是常规电晕驻极难以达到的。

水驻极熔喷非织造材料具有过滤效率高、电荷稳定性好等优点, 但目前对其理论方面的研究却鲜有报道。因此, 本文在实验室建立了模拟水驻极实验设备, 并通过对商业水驻极和电晕驻极熔喷非织造材料表面电荷的测试研究, 探索熔喷非织造材料水驻极机理。

1 实验与测试

1.1 实验原料

面密度为 25g/m² 和 40g/m² 的未添加驻极母粒和添加 2.5% 驻极母粒的聚丙烯熔喷非织造材料, 由上海振浦医疗设备有限公司制备, 其中驻极母粒由青岛方达化工有限公司提供。电晕驻极处理在上海振浦医疗设备有限公司完成, 水驻极处理由江苏坤泰机械有限公司完成。

1.2 水驻极模拟实验

水驻极就是将经过特殊处理的水溶液从喷雾装置中喷出, 形成高压水射流, 对托网帘上的熔喷非织造材料进行连续喷射, 在水射流的冲击和托网帘下方的负压抽吸双重作用下, 水雾和空气与熔喷非织造

材料中的纤维进行相互摩擦,由此产生的电荷沉积在纤维表面^[12]。

本实验室将高压喷水枪用来模拟水驻极实验,将一定尺寸的未驻极熔喷非织造材料平铺在以一定速度运动的托网帘上,手持喷水枪沿着熔喷布幅宽方向往复移动,负压抽吸的窄缝紧贴着拖网帘,其喷水头产生的高压水射流对熔喷布进行穿刺,得到水驻极熔喷非织造材料样品。模拟实验装置如图 1 所示。

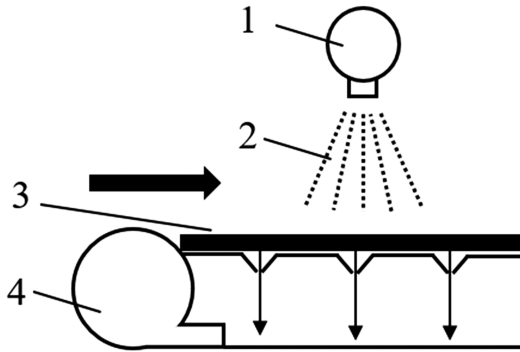


图 1 水驻极实验装置(1-水射流发生器,2-高压水射流,3-熔喷非织造材料,4-真空泵)

Figure 1 The equipment structure for hydro charging(1-Water jet generator, 2-High pressure water jet, 3-Meltblown nonwoven materials, 4-Vacuum pump)

1.3 过滤效率测试

参照标准 GB 2626-2019,采用 TSI8130 型自动滤料测试设备,DOP 颗粒物浓度为 50mg/m³~200mg/m³,质量中值直径(MMD)<0.3μm,计数中位径(CMD)<0.075μm,流量为 95L/min。

1.4 滤料表面静电势测试

将一块尺寸为 12cm×12cm 的熔喷非织造材料放置到贴有绝缘胶的平台上,采用 Electrostatic Voltmeter Model 542(美国 TREK 公司)静电测试仪,将金属探头放置在距离熔喷非织造材料表面 2mm 的上方位置,手握探头匀速移动,逐个读取仪器的显示值,样品的每个表面获得 50 个测试值,通过计算得出平均静电势,并画出表面静电势的分布图。

1.5 水的电导率测试

采用 FiveEasy Plus 电导仪(梅特勒 FE30K),接通电导率仪电源预热 30min,用电导率小于 0.5μS/cm 的蒸馏水冲洗电极探头两次,用温度计测试待测溶液温度,并将该温度输入电导率。将电极探头浸入待测溶液中,带仪器示数稳定后,即为待测液体在该温度下的电导率值,并按照公式(1)换算至 25℃的电导率。

$$K_{25} = \frac{K_t}{1 + a(t - 25)}$$

(1)

其中:K₂₅ 为溶液在 25℃时的电导率(μS/cm);K_t 为溶液在测试温度下的电导率(μS/cm);a 为各种离子电导率的平均温度系数,取值为 0.022;t 为测试时待测溶液的温度(℃)。

1.6 孔径大小及分布测试

采用 CFP-1100AI 型孔径分析仪(美国 PMI),并采用气体渗透法也称泡点发或毛细管流动法,对熔喷非织造材料进行孔径测试。通过测试气体的压力和流量的变化关系,可以得出试样的最大、最小孔径、平均孔径以及孔径分布等数据。

1.7 纤维直径及其分布测试

采用 TM3000 型场发射扫描电子显微镜观察样品,利用直径测量软件对扫描图像进行分析,计算纤维平均直径及其分布,每个样品随机取 5 张图,每张图内各取 10 根纤维进行测量,共 50 根纤维,放大倍数为 2000 倍。

2 结果讨论与分析

2.1 水驻极和电晕驻极熔喷非织造材料过滤性能对比分析

将添加有 2.5%驻极母粒、克重为 25g/m² 和 40g/m² 的熔喷非织造材料分别进行电晕驻极和水驻极,然后进行过滤性能测试,见图 1 所示。

从图 2 可以看出,克重为 25g/m² 的熔喷非织造材料,经过电晕驻极和水驻极后,其过滤效率分别为 73.4%和 95.0%,过滤阻力分别为 64.4Pa 和 71.1Pa,效果差别很大。当熔喷非织造材料的克重为 40g/m² 时,水驻极和电晕驻极处理后,其过滤效率的差距缩小。因此,从高效低阻的需求出发,水驻极比电晕驻极具有更好的效果,尤其是处理低克重的薄型熔喷非织造材料。

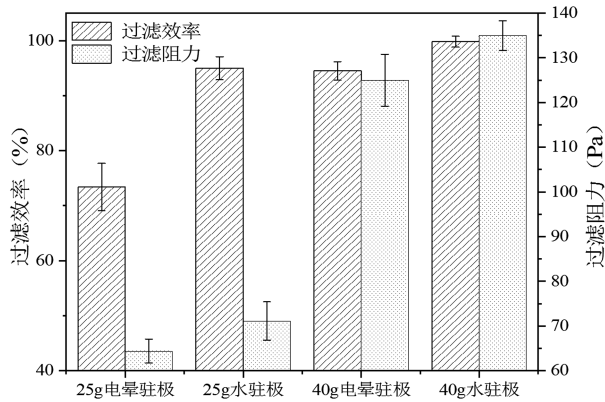


图 2 电晕驻极和水驻极熔喷非织造材料的过滤性能对比

Figure 2 Comparison of the filtration performance of corona charging and hydro charging meltblown nonwovens

2.2 驻极工艺对熔喷非织造材料表面形貌的影响

材料表面的紧密结构和纤维尺寸对材料的结构性能起决定性作用,进而影响由静电效应和非静电效应产生的过滤性能,为了排除驻极工艺对纤维结构的影响,因此有必要先对驻极前后熔喷材料的表面形态和纤维直径及其分布进行分析。

如图 3 所示,水驻极和电晕驻极前后,材料的表面形态并未发生明显变化,两种驻极工艺不会破坏熔喷纤维成网的结构。水驻极工艺的喷头压强范围为 1MPa~3MPa,与高压水刺非织造工艺(压力范围为 3MPa~30MPa)相比,水驻极之后的熔喷材料未见水针穿透后的网孔状,纤网结构仍和驻极前保持不变。由于熔喷工艺的特殊性,熔喷纤网中的纤维形成多层纵横向交错的网状结构,呈随机杂乱排列^[13]。如表 1 所示,纤维的直径分布也比较宽,均匀性都不好,但驻极前与水驻极、电晕驻极后的纤维细度可以认为是相等的。一般来说,纤维直径减小,比表面积变大,纤维之间的接触面积变大,结构变紧密,纤维的毛细作用和纤维集合体之间产生的微细孔隙越少,机械过滤效率提高,过滤阻力也会相应增大^[14],另一方面,紧密的结构有利于捕获电荷,可存储更多的空间电荷^[15]。从表面形态来看,水驻极和电晕驻极材料的表面形态并无明显差异,因此机械性能不是影响材料过滤性能的主因素。

表 1 熔喷材料纤维细度及其分布

Table 1 Meltblown material fiber fineness and its distribution

样品编号	平均直径(μm)	直径 CV 值(%)
未驻极	2.37	52.9
水驻极	2.34	40.3
电晕驻极	2.40	55.7

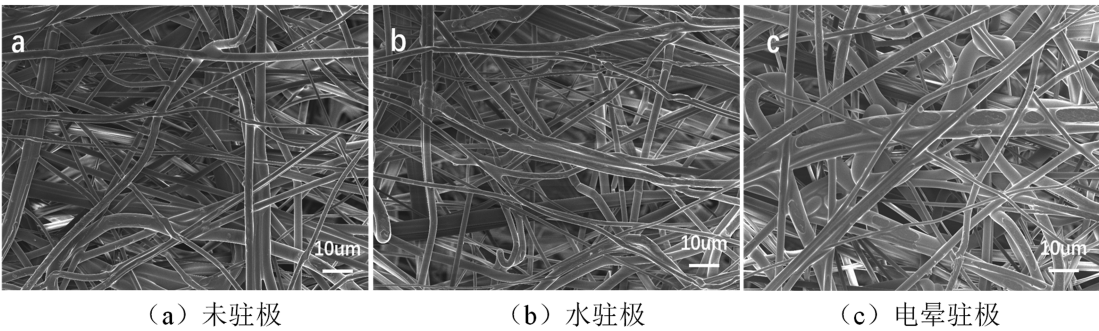


图 3 驻极工艺对熔喷非织造材料表面形貌的影响

Figure 3 The influence of electret process on the surface morphology of meltblown nonwovens

2.3 驻极工艺对样品孔径大小的影响

除了静电吸附,过滤材料主要依靠直接捕获、惯性沉积、扩散效应和重力效应等机械过滤机理实现过滤吸附功能^[16]。一般来说,材料的孔径大小对其机械过滤效率和阻力影响较大。为进一步了解电晕驻极和水驻极提高熔喷非织造材料过滤效率的原因,本文测试了克重为 25g/m² 的熔喷非织造材料经驻极后的孔径变化,结果如表 2 所示。

表 2 电晕驻极和水驻极对熔喷非织造材料孔径的影响

Table 2 The influence of corona electret and water electret on the pore diameter of meltblown nonwovens			
样品编号	驻极方式	平均孔径(μm)	最大孔径(μm)
1	原始基布	10.1	19.6
2	水驻极	9.5	18.3
3	电晕驻极	11.4	21.7

从表 2、图 4 可以看出,总体来说,水驻极和电晕驻极后,熔喷非织造材料的平均孔径和最大孔径略有变化。水驻极处理有使样品孔径变小的表现,这可能是因为水驻极样品经过干燥后收缩所致。而电晕驻极有使样品孔径变大的表现,而且电晕驻极后孔径分布范围变宽。而电晕驻极则是将熔喷非织造材料暴露在几千甚至数万伏的高压电场中的处理方法,由于纤维间的静电排斥作用,一定程度上加大了熔喷非织造材料的孔径。另外,样品的不匀性对电晕驻极样品的孔径变化也有很大影响。考虑到熔喷非织造材料样品的孔径变化,认为无论是水驻极还是电晕驻极,都不是通过进一步提高样品的机械过滤性能来提高其过滤效率的。

2.4 水驻极模拟实验及水质对水驻极效果的影响

为了探明水驻极提高熔喷非织造材料过滤性能的原因,作者在实验室搭建了水驻极模式实验装置。由于水质可能会对水驻极效果有影响,因此,本研究采用不同电导率的纯化水,在相同的条件下进行水驻极实验,处理后熔喷非织造材料的过滤效果如表 3 所示。

表 3 水质对水驻极熔喷非织造材料过滤效果的影响

Table 3 The influence of water quality on the filtering effect of water electret melt-blown non-woven materials			
序号	电导率(μS/cm)	过滤效率(%)	过滤阻力(Pa)
1	1.1	96.8	116.3
2	6.9	82.5	87.9
3	18.0	86.0	86.7
4	72.9	47.8	110.0

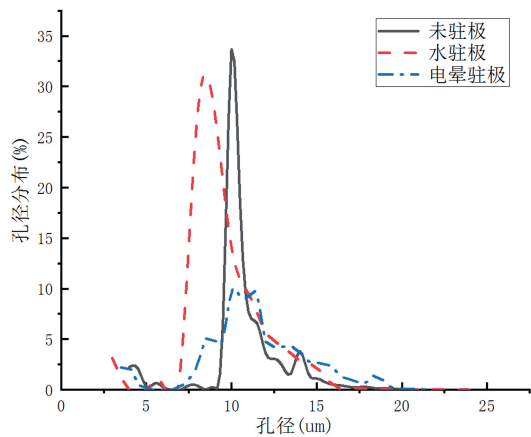


图 4 电晕驻极和水驻极熔喷非织造材料的孔径分布

Figure 4 Pore size distribution of corona charging and hydro charging meltblown nonwovens

从表 3 可以看出,水的电导率越小,水驻极处理后熔喷非织造材料的过滤效率越高,过滤阻力则同步增大,说明水质对水驻极处理效果有明显影响。同样地,研究者^[17]研究了水与聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜的接触摩擦带电,发现水质对其发电量影响较大,并认为水中的电解质使薄膜上残留更多的电荷,屏蔽了 PDMS 薄膜上的部分摩擦电荷,从而降低水滴分离过程中摩擦电荷密度。因此,用去离子水接触摩擦可以获得更大的电荷量。在本论文的水驻极过程中,水的电导率越低,所含电解质越少,摩擦所产生的电荷越高,因而熔喷非织造材料通过静电吸附实现的过滤效率越高。

2.5 水驻极和电晕驻极熔喷非织造材料表面电荷分布

为了进一步证实上述模拟水驻极提高熔喷非织造材料过滤效率的原因,本文进一步采用静电仪测试了样品的表面带电情况。为了进行对比,也测试了静电驻极熔喷非织造材料的表面带电情况,结果如图 5 和图 6 所示。

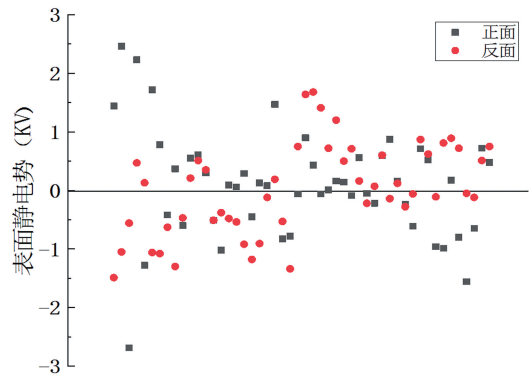


图 5 电晕驻极熔喷非织造材料的表面电荷分布

Figure 5 Surface charge distribution of corona charging meltblown nonwoven material

图 5 是经过电晕处理后熔喷非织造材料两个表面的带电情况。在每个面测试的 50 个点中,其中正面显示为正电势的为 29 个点,负电势则为 21 个点;同样地,反面测试的 50 点中,其中显示正电势为 25 个点,负电势为 25 个点。因此,可以认为经过电晕驻极处理的熔喷非织造材料的正面和反面的正负电荷数量相当,即电晕驻极熔喷非织造材料表面的正负电荷呈随机分布趋势。聚丙烯熔喷非织造材料是一种同时含有 α 、 β 和 γ 晶相以及非晶相的材料,微观结构上并不均匀,当在高压电场中产生 Max-Wagner 效应时,正负电荷随机分布^[18]。

图 6 是水驻极处理后样品正反两面的表面静电势,其中正面为水驻极时熔喷非织造材料的迎水面,

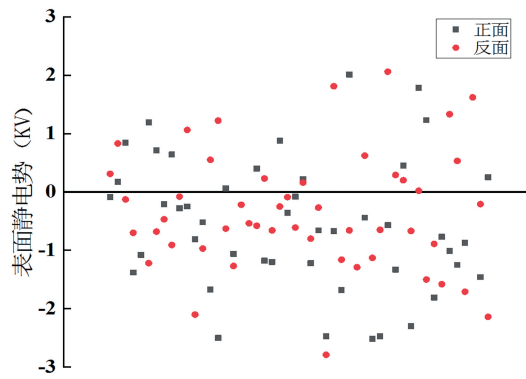


图 6 水驻极熔喷非织造材料的表面电荷分布

Figure 6 Surface charge distribution of hydro charging meltblown nonwoven material

反面为与托网帘接触的一面。在每个面测试的 50 个点中,其中正面显示为正电势的为 16 个点,负电势则为 34 个点。同样地,在反面测试的 50 点中,显示为正电势为 15 个点,负电势则为 35 个点。因此,可以认为经过水驻极处理的熔喷非织造材料虽然正面和反面的正负电荷数量不相当,但也可以认为经过水驻极处理后,熔喷非织造材料的表面的正负电荷呈随机分布趋势。通过宏观表面静电势测试,证明了水驻极技术通过纯水和含有水驻极母粒的熔喷材料摩擦,同时产生了正电荷和负电荷。

2.6 电晕驻极-水驻极熔喷非织造材料的过滤效率

为了探究电晕驻极和水驻极的驻极效果能否叠加,水驻极工艺能否进一步提高电晕驻极熔喷材料的过滤效率,采用同 2.1 所述的克重为 40g/m² 的熔喷材料先做电晕驻极后,再做水驻处理,测试了电晕驻极-水驻极熔喷非织造材料的过滤效率,并进行比较,结果如图 7 所示。

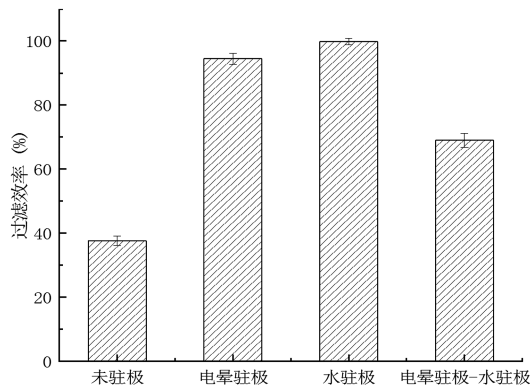


图 7 经过不同的驻极工艺熔喷非织造材料过滤效率对比

Figure 7 Comparison of filtration efficiency of meltblown nonwoven materials after different electret processes

如图 7 所示,电晕驻极-水驻极熔喷材料的过滤效率为 69%,明显低于电晕驻极熔喷材料过滤效率 94.5%,水驻极 99.8%。因此很多企业用电晕驻极后的熔喷材料再水驻极,试图进一步提高过滤效率,这样适得其反。

为了进一步探究电晕驻极-水驻极熔喷材料过滤效率降低的原因,同 2.5 的方法测试了电晕驻极-水驻极熔喷材料的表面电荷,结果如图 8 所示。

如图 8 所示,电晕驻极-水驻极熔喷非织造材料的表面电势大幅度降低,若考虑静电测试仪本身的测量误差,可以近似认为经过电晕驻极-水驻极的熔喷材料表面几乎不带电,因此其过滤效率大大降低。

本文也对未添加驻极母粒的熔喷非织造材料进行了水驻极处理,结果发现其过滤效率并未有明显提高,因此驻极母粒也是达到驻极效果必不可少的条件之一。

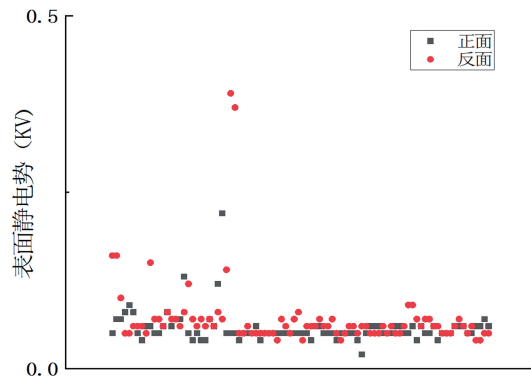


图 8 电晕驻极-水驻极熔喷非织造材料的表面电荷分布

Figure 8 The surface charge distribution of corona charging and hydro charging meltblown nonwovens

3 结论

本文分别测试了电晕驻极和水驻极熔喷非织造材料的过滤效率、表面静电势和孔径,并通过水驻极模拟实验,对水驻极机理进行了研究,得出以下结论:(1)经电晕驻极和水驻极处理后,克重为 25g/m² 的熔喷非织造材料的过滤效率分别为 73.4%和 95.0%,相比于电晕驻极,水驻极可以显著提高低克重熔喷非织造材料的过滤效率;(2)水驻极是一种摩擦起电驻极方法,在满足要求的水质、驻极母粒和管道设备条件下,通过水射流与纤维之间的摩擦带电,使熔喷材料同时产生正负电荷,实现更高的过滤效率。

参考文献:

[1] 柯勤飞,靳向煜,非织造学,上海:东华大学出版社,2016:303~304.

[2] Zhang S, Liu H, Zuo F. Small, 2017, 13(10):3~4.

[3] Zhao X, Li Y, Hua T. Small, 2017, 13(11):1603306.

[4] 杜琳,张有忱,杨卫民,丁玉梅,谭晶,李好义. 纺织学报,2018,39(10):12~17.

[5] Peter P. Tsai, Heidi Schreuder-Gibson, Phillip Gibson, 2002, 54:333~341.

[6] 陈曦. 熔喷聚丙烯驻极体空气净化材料应用过程中几个关键问题研究. 杭州:杭州电子科技大学,2016.

[7] GB 2626-2019. 呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器.

[8] ASTM F2100-2019. A STM International, 2019.

[9] JIS T 8151-2018. Japanese Standards Association, 2018.

[10] EN 14683-2019. European Committee for Standardization(CEN), 2019.

[11] KS M 6673-2008. Korean Standards Association, 2018.

[12] 张星,刘金鑫,张海峰,王玉晓,靳向煜. 纺织学报,2020, 41(3):168~173.

[13] 卢晨,刘力,王洪. 纺织科学与工程学报,2021,38(1):17~22.

[14] 姚翠娥,王荣武. 山东纺织科技,2014,55(1):1~4.

[15] 侯冠一,武文杰,万海肖,张至宇. 高分子通报,2020,8:1~22.

[16] 王洪,刘明奇,吴海波. 产业用纺织品, 2014,9:17~21.

[17] Lin Z H, Cheng G, Lin L. Angew Chem, 2013, 125(48): 12777~12781.

[18] 周晨,靳向煜. 过滤与分离, 2011, 21(1):16~19.

Exploration of Hydro-charging Mechanism of Melt Blown Nonwoven Materials

CHEN Miao-miao, ZENG Yong-chun, LU Chen, LIU Li, WANG Hong*
(Key Laboratory of Textile Science & Technology, Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The functional layer of protective mask is melt blown nonwoven fabrics. In order to meet the requirements of high efficiency and low resistance, it needs to be treated with corona charging and hydro charging. However, there are few reports on electret mechanism, especially hydro charging. In this paper, the filtration efficiency and surface charge distribution of corona charging and hydro charging nonwoven fabrics were compared at first. Then the hydro charging experiment was simulated and the influences of the conductivity of water was explored. The results showed that compared with corona charging, hydro charging can significantly improve the filtration efficiency of the melt blown nonwoven material, especially low areal density melt blown materials. The filtration efficiency of meltblown nonwoven fabric decreased with the increase of the conductivity of water significantly. It is believed that meltblown nonwoven fabrics can be negatively and positively charged simultaneously by the hydro charging process according to the surface charge potential measurement. The review also indicated that the surface of hydro charging and corona electret melt blown nonwoven materials can generate positive and negative charges, and they are randomly distributed.

Key words: Corona charging; Hydro charging; Surface charge; Melt blown nonwoven fabric