



基于二氧化硅溶胶的聚丙烯非织造布亲水后整理

张向阳, 李成才, 朱海霖, 赫雨萍, 刘国金

(浙江理工大学浙江省纤维材料和加工技术研究重点实验室, 杭州 310018)

摘要: 为获得亲水性良好的聚丙烯非织造布, 选用纳米二氧化硅溶胶为亲水成分, 以聚丙烯酸酯乳液为胶黏剂, 以异丙醇和去离子水为稀释剂配置亲水整理剂, 然后将所得整理剂用于聚丙烯非织造布的亲水后整理。优化亲水整理剂中各组分的含量, 探究后整理焙烘温度和时间, 表征整理所得聚丙烯非织造布的亲水性能。结果表明: 当二氧化硅溶胶质量分数为 0.8%, 聚丙烯酸酯质量分数为 4.0%, 异丙醇质量分数为 24.0%, 余量为水时, 可获得性能良好的亲水整理剂; 当烘干温度为 60 °C, 烘干时间为 300 s 时, 经亲水整理剂整理后的聚丙烯非织造布的水接触角为 0°; 相比未整理布样, 整理后的非织造布的纤维表面出现胶黏剂和二氧化硅微球层组成的膜状物, 断裂强力和断裂伸长几乎无变化, 纯水通量明显增大; 经 60 °C 的水和乙醇分别处理 3 h 后, 整理所得聚丙烯非织造布的接触角仅为 23° 和 32°, 证明制得的聚丙烯非织造布具有良好的亲水耐久性。

关键词: 聚丙烯; 非织造布; 亲水整理; 二氧化硅; 耐久性

中图分类号: TS174.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2020)07-0457-07

Hydrophilic post-finishing of polypropylene nonwovens based on silica sol

ZHANG Xiangyang, LI Chengcai, ZHU Hailin, HE Yuping, LIU Guojin

(Zhejiang Key Laboratory of Fiber Materials and Manufacturing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to obtain hydrophilic polypropylene nonwovens, a hydrophilic finishing agent was prepared by using nano-silica gel as hydrophilic ingredient, polyacrylate emulsion as the adhesive, isopropanol and deionized water as the diluent. Then, the finishing agent was applied for hydrophilic post-finishing of polypropylene nonwovens. The content of each component in the agent was optimized, and the baking temperature and time of the post-finishing were explored, respectively. The hydrophilic properties of the finished PP nonwovens were characterized. The results showed that: when the content of silica sol, the polyacrylate dose and the isopropanol dose were 0.8%, 4.0% and 24.0% respectively, and the residue was water, a hydrophilic finishing agent with good performance could be obtained. When the drying temperature was 60 °C, and the drying time was 300 s, the water contact angle of polypropylene nonwoven finished by the agent was 0°. Compared with the unfinished fabrics, a film-like structure composed of adhesives and silica microsphere layers appeared on the fiber surface of the finished nonwovens; the breaking strength and elongation were almost unchanged, and the pure water flux increased. After being cooked in water and ethanol at 60 °C for 3 hours, the contact angles of the finished polypropylene nonwovens were only 23° and 32°, proving that the obtained polypropylene nonwovens have good hydrophilic durability.

Key words: polypropylene; nonwovens; hydrophilic finishing; silica; durability

收稿日期: 2020-01-09 网络出版日期: 2020-04-07

作者简介: 张向阳(1996—), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事非织造布亲水后整理方面的研究。

通信作者: 刘国金, E-mail: guojin900618@163.com

0 引言

液体过滤一般采用逐级过滤,非织造布常用作第一层过滤材料。在非织造布的选材上,常常需要考虑液体中颗粒物的性能^[1-2]。若液体中的颗粒物较少且尺寸较小,那么可选用孔径更小的非织造布,直接进行一次“精细”过滤;若液体中的颗粒物较多且尺寸较大,或者液体中的颗粒物发生了明显的团聚,形成了尺寸较大的聚集体或悬浮物,那么此时应选用孔径相对颗粒物尺寸较小但本身孔径不必过小的非织造布,相当于先进行一次“粗糙”过滤。以聚丙烯(PP)为主要原料的非织造布,因其具有生产成本、加工方式、产品性能等多方面的优势,是非织造布行业中发展最快的品种之一,近年来在液体过滤领域得到了大量的应用^[1,3]。但是,聚丙烯具有很高的分子结晶度,分子排列较为紧密且本身不含有亲水基团,表面润湿性和亲水性能很差^[4-5],这大大限制了其在液体过滤领域中的应用。因此,对聚丙烯非织造布进行改性,使其获得良好的亲水性能,具有一定的现实意义。

聚丙烯非织造布的亲水改性方法主要有两种^[6]:一种是在纺丝过程中对纤维进行改性,再通过织造获得亲水非织造布。如程春祖等^[7]在聚丙烯纺丝过程中共混少量助剂来改进聚丙烯纤维的亲水性,并采用热失重法评价亲水助剂的热稳定性。另一种是对非织造布上进行后整理。如刘娴等^[8]以阴离子表面活性剂(表面活性剂 OASE 和快速渗透剂 T)与非离子型的高分子表面活性剂(聚醚改性硅油)复配制备亲水整理剂,然后对聚丙烯非织造布进行后整理,所得聚丙烯织物的静态接触角几乎为 0° 。相对于第一种改性方法,后整理法具有设备要求低、操作简便、方便快捷等优势,备受研究者的青睐。

目前,在采用后整理法对聚丙烯非织造布进行亲水改性时,大多数研究者选择的亲水整理剂为表面活性剂。采用表面活性剂进行亲水整理,可以获得良好的亲水效果^[9]。然而,表面活性剂存在泡沫大、亲水性不能持久等问题,且部分表面活性剂合成工艺复杂,往往还有一些刺激性的味道,会造成能源消耗和环境污染。因此,开发一种制备工艺简单、无泡沫且亲水性持久的亲水整理剂,对于获得亲水性聚丙烯非织造材料颇具现实意义。纳米二氧化硅是一种应用范围极广的无机粒子,其表面具有丰富的羟基基团,可呈现出良好的亲水性^[10-12],在涂料、化妆品、纺织品等众多领域都有重要应用。由此,若将

二氧化硅粒子应用于聚丙烯非织造的后整理,有望获得亲水性良好的聚丙烯非织造布。目前,关于亲水性二氧化硅纳米粒子对非织造布亲水性能影响的研究报道还寥寥无几。

本文以纳米二氧化硅溶胶为亲水物质,以聚丙烯酸酯为胶黏剂,以异丙醇和去离子水为稀释剂配制亲水整理剂,然后对聚丙烯非织造布进行亲水后整理。通过分析整理后所得聚丙烯非织造布的水接触角,优化亲水整理剂体系中各组分的含量,并优选适宜的整理工艺。最后对整理后聚丙烯非织造布的表面形貌、元素分布、力学性能、水通量和亲水耐久性等系统进行表征。采用本文所研制亲水整理剂制备的亲水非织造布有望在水过滤领域进行推广和应用。

1 实验部分

1.1 实验材料与仪器

二氧化硅溶胶(平均粒径 20 nm,固含量为 30%,实验室自制);聚丙烯酸酯胶黏剂(实验室自制,主要由丙烯酸、丙烯酸甲酯和丙烯酸丁酯聚合而成,固含量为 20%);聚丙烯非织造布(62 g/m²,杭州临安天福非织造布有限公司);异丙醇(分析纯,杭州高晶精细化工有限公司);无水乙醇(分析纯,杭州高晶精细化工有限公司);去离子水(实验室自制,电导率 18.2 M Ω ·cm)。

P-A0 型轧车(佛山市亚诺精密机械制造有限公司);DHG 9015 A 型电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司);JY-82B 型视频接触角测定仪(承德鼎盛试验机检测设备有限公司);ULTRA55 型场发射扫描电子显微镜(德国 ZEISS 公司);3342 系列电子万能材料试验机(INSTRON 公司);水通量测试仪(实验室自制)。

1.2 实验方法

1.2.1 整理剂的配置

在室温条件下,将纳米二氧化硅溶胶与聚丙烯酸酯胶黏剂复配,搅拌均匀后用异丙醇和去离子水进行稀释,经混合均匀后获得亲水整理剂。

1.2.2 亲水整理工艺

采用浸轧-焙烘方式对聚丙烯非织造布进行亲水整理。在室温(25 $^\circ$ C)下,将聚丙烯非织造布浸渍在亲水整理剂中,然后取出进行压轧,压轧后置于烘箱中进行烘燥处理。

1.3 测试与表征

1.3.1 静态接触角测试

以去离子水为介质,将体积大小为 3 μ L 的水滴

通过针管直接滴在聚丙烯非织造布的表面,通过视频接触角测定仪的显微成像系统拍照,然后测量水滴的接触角。

1.3.2 表面形貌测试

将经过亲水整理后的聚丙烯非织造布制成 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的样品,然后粘贴在贴有导电胶的样品台上,接着对样品进行喷金处理,然后利用场发射扫描电子显微镜观察样品的表面形貌。测试时,扫描电子显微镜的工作电压为 2.0 kV 。

1.3.3 断裂强力表征

参照《非织造布断裂强力及断裂伸长的测定》(FZ/T 60005-1991)对非织造布的断裂强力进行测定。各取3块未处理的聚丙烯非织造布和亲水整理后的聚丙烯非织造布,设定每块试样的宽度为 60 mm ,长度为 30 mm ,加持距离为 200 mm ,移动速度为 100 mm/min ,测定试样的断裂强力,测试3次取平均值。

1.3.4 纯水通量测试

采用实验室自制的错流微滤装置(图1)测试聚丙烯非织造布的纯水通量。将聚丙烯非织造布原样和整理后的亲水样品装在错流微滤装置上,将跨膜压力差控制为 1 kPa ,按式(1)计算纯水通量。

$$J_w = \frac{V}{A \times t} \quad (1)$$

其中: J_w 为渗透通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; V 为透过液体体积, L ; A 为非织造布有效面积, m^2 ; t 为过滤时间, h 。

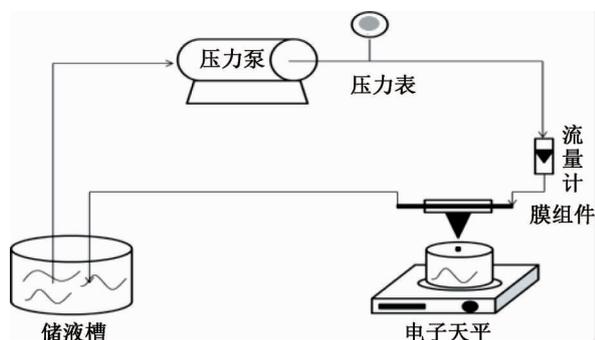


图1 错流微滤装置示意

1.3.5 亲水耐久性测试

借鉴企业中对过滤用非织造布亲水耐久性的测试方法。一般亲水非织造布经 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的液体作用较长时间后,仍能保持良好的亲水性,将认为其可在常温/低温水过滤中能保持持久的亲水性。取两块亲水整理后的聚丙烯非织造布,分别在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 的去离子水和无水乙醇中处理不同时间,然后通过测量接触角来考察非织造布的亲水性。

2 结果与讨论

2.1 亲水整理剂体系的构建

2.1.1 二氧化硅含量优化

纳米二氧化硅溶胶是亲水整理剂的主体组份,其含量将直接决定羟基数量的多少,进而会影响整理后非织造布的亲水性能。在保持轧余率、烘干温度和烘干时间等因素不变的条件下,研究亲水整理剂中二氧化硅含量对聚丙烯非织造布静态接触角的影响,结果如图2所示。

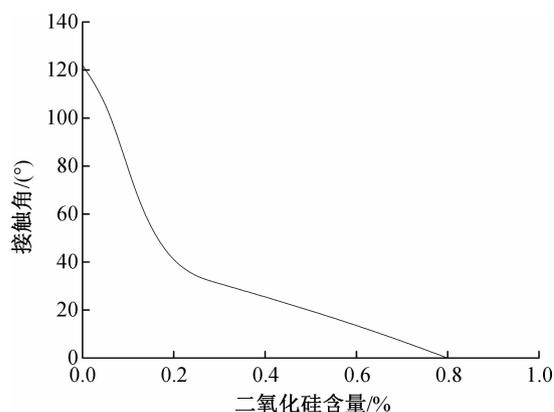


图2 整理所得聚丙烯非织造布的接触角随整理剂中二氧化硅含量变化的曲线

从图2中可以看出,随整理剂中二氧化硅含量的增加,整理所得聚丙烯非织造布的水接触角不断减小。当二氧化硅含量为 0.8% 时,聚丙烯非织造布的接触角已变为 0° ,这说明此时非织造布的亲水性优异,水滴在非织造布上的渗透性很强。进一步增大二氧化硅的含量(如 0.9% 或 1.0%),非织造布的静态接触角依然为 0° ,且水滴在布面上的渗透性也与二氧化硅含量为 0.8% 时整理所得布面的渗透性相差无几,这说明当二氧化硅含量超过一定含量后,其表面羟基对于亲水性的贡献已趋于饱和,再增加二氧化硅的含量,非织造布的亲水性也不会明显提升。因此,当亲水整理剂中二氧化硅的含量为 0.8% 时,经后整理有利于得到亲水性很强的聚丙烯非织造布。

2.1.2 胶黏剂含量优化

除了二氧化硅溶胶外,本文还选用聚丙烯酸酯胶黏剂来构建整理剂体系,旨在通过胶黏剂的粘接性将二氧化硅粒子固定于非织造布的纤维上,以此提升聚丙烯的亲水耐久性。本文中所采用的聚丙烯酸酯胶黏剂主要由丙烯酸、丙烯酸甲酯和丙烯酸丁酯经聚合反应制备得到。从单体组成上来看,由于丙烯酸的存在,聚丙烯酸酯胶黏剂本身会具备一定

的亲水性能。此外,在本文研究之前,分别采用成膜后水接触角为 80° 、 110° 和 130° 的聚丙烯酸酯来配制亲水整理剂,然后将其应用于聚丙烯非织造布的亲水后整理,结果发现:聚丙烯酸酯胶黏剂的亲水性对非织造布的亲水性有重要影响。聚丙烯酸酯亲水性越强,非织造布越亲水,反之则越疏水。基于粘合性对亲水整理剂中二氧化硅粒子在纤维上的固着有重要影响,本文选取了粘合剂最佳的、水接触角为 110° 的聚丙烯酸酯。

在保持二氧化硅含量、烘干温度和烘干时间不变的前提下,研究聚丙烯酸酯胶黏剂含量对非织造布亲水性的影响,结果如图3和表1所示。图3展示了整理剂中聚丙烯酸酯胶黏剂含量对整理所得聚丙烯非织造布水接触角的影响。从图3中发现,随聚丙烯酸酯量的增大,非织造布的水接触角总体呈现逐步增大的趋势。具体而言,当聚丙烯酸酯的含量为 4.0% 时,聚丙烯非织造布的接触角依然为 0° ;当聚丙烯酸酯含量从 4.0% 提高到 5.0% 时,聚丙烯非织造布的接触角从 0° 增大到 25° 。这是因为聚丙烯酸酯胶黏剂所形成的粘结性膜具有一定的疏水性,在一定程度上削弱了二氧化硅的亲水性,从而导致非织造布的亲水性下降。

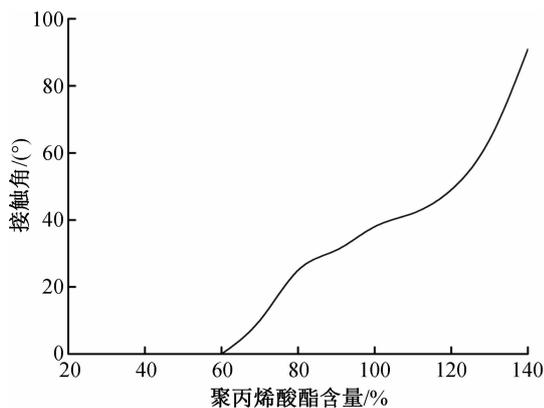


图3 整理所得聚丙烯非织造布接触角随整理剂中聚丙烯酸酯含量变化的曲线

为了进一步优化聚丙烯酸酯胶黏剂的含量,固定聚丙烯酸酯胶黏剂含量为 3.0% 和 4.0% ,测试整理所得聚丙烯非织造布在用洗衣机水洗(40°C 水, 20 min)5次前后的接触角,结果如表1所示。从表1中发现,当聚丙烯酸酯含量为 3.0% 和 4.0% 时,水洗前的聚丙烯非织造布的接触角均为 0° ,但水洗后非织造布的水接触分别变为 53° 和 7° 。由此可直接说明,当聚丙烯酸酯含量为 4.0% 时,二氧化硅粒子在聚丙烯非织造布上有更好的粘附性,因而保持了更小的接触角。基于以上分析,当亲水整理剂中聚丙烯

酸酯胶黏剂的含量为 4.0% 时,整理后将有利于得到亲水性能良好且耐久性较好的聚丙烯非织造布。

表1 不同聚丙烯酸酯含量下非织造布水洗5次前后的接触角

聚丙烯酸酯含量/%	水洗情况	接触角/(°)
3.0	未水洗	0
	水洗5次后	53
4.0	未水洗	0
	水洗5次后	7

2.2 亲水整理工艺优化

在制备得到适宜的亲水整理剂后,通过浸轧-焙烘的工艺对聚丙烯非织造布进行亲水整理。通常,整理条件和工艺,如烘干温度、烘干时间等,将对非织造布的亲水性能有直接影响。因此,本研究通过控制变量法研究整理工艺对聚丙烯非织造布亲水性能的影响。

2.2.1 烘干温度

在保持整理剂浓度、轧液率和烘干时间不变的情况下,研究不同烘干温度对聚丙烯非织造布亲水性能的影响。图3展示了不同烘干温度下整理所得聚丙烯非织造布的水接触角的变化。从图3中发现,当烘干温度为 40°C 时,整理后的非织造布在特定烘干时间内还处于润湿状态;当烘干温度为 60°C 时,在特定烘干时间内聚丙烯非织造布已被烘干,且其水接触角为 0° ;而当烘干温度超过 60°C 后(如 80°C 、 100°C 和 120°C),虽非织造布均在特定烘干时间内被烘干,但随烘干温度的升高,水接触角却不断增大。这可能是由于高温可使聚丙烯非织造布发生一定的皱缩现象,使得聚丙烯纤维间的空隙变小,引起水滴难以下漏,从而直接造成接触角变小。对比而言,为获得良好的亲水后整理效果,烘干温度优选为 60°C 。

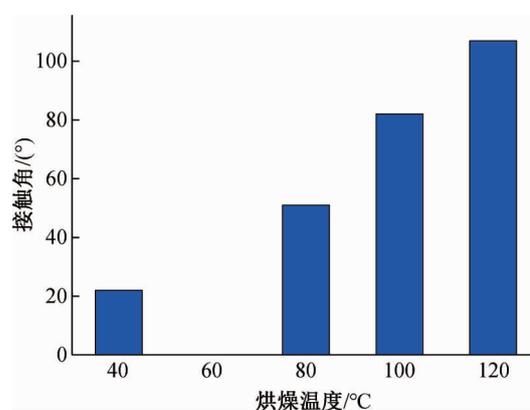


图4 亲水整理所得聚丙烯非织造布的接触角随烘干温度变化的直方图

2.2.2 烘干时间

在保持整理剂浓度、轧液率和烘干温度不变的

情况下,研究不同干燥时间对聚丙烯非织造布亲水性能的影响。图5展示了聚丙烯非织造布接触角随干燥时间变化的直方图。从图5可以看出,当干燥时间为3 min和4 min时,聚丙烯非织造布的接触角分别为 67° 和 26° 。这是因为干燥时间较短,非织造布上的水分可能没有完全蒸发干,影响了聚丙烯酸酯胶黏剂在非织造布上的成膜状态和二氧化硅粒子的附着状态,从而影响了后整理效果。当干燥时间为5 min时,整理所得聚丙烯非织造布亲水性能最好。而当干燥时间超过5 min时,非织造布的接触角逐渐变大,表明非织造布的亲水性能下降。

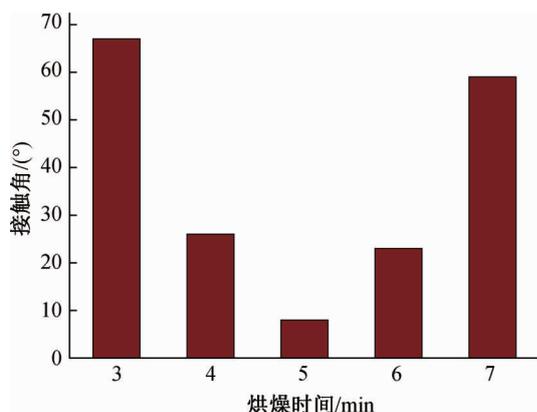


图5 亲水整理所得聚丙烯非织造布的接触角随干燥时间变化的直方图

综上所述,适用于对聚丙烯非织造布进行亲水后整理的整理剂中,二氧化硅含量为0.8%,聚丙烯酸酯胶黏剂含量为4.0%。同时,通过控制变量的方法,所得到的最佳整理工艺条件为:干燥温度为 60°C ,干燥时间为5 min。

2.3 亲水整理后聚丙烯非织造布的性能分析

2.3.1 表面形貌

图6展现了整理前后聚丙烯非织造布的表面形

貌。从图6(a)—(b)中可以看出,原非织造布表面较为光滑,且纤维之间存在空洞和空隙。但在图6(c)—(d)中却发现,经过亲水整理后,非织造布内的纤维表面可明显观测到一层由粘合剂和二氧化硅微球组成的膜状物,且这层膜状物包裹了原先光滑的纤维。在这种情况下,当水滴先与此亲水性膜状物接触时,水滴与微球间的界面张力会被减小,由此水滴的渗透性被加强,进而聚丙烯非织造布的亲水性也被显著提升。

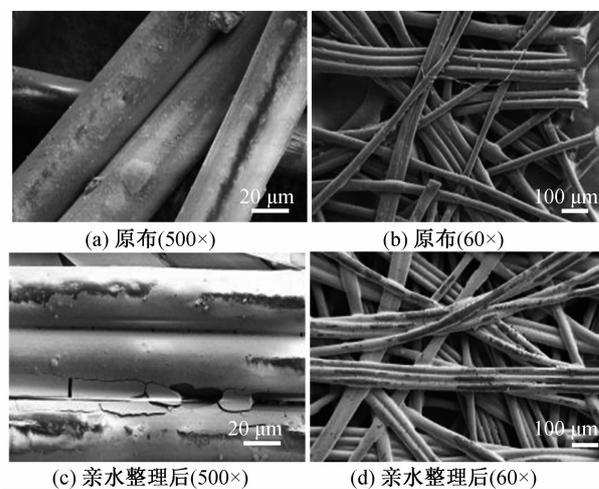


图6 亲水整理前后非织造布的 FESEM 图

2.3.2 表面元素

图7为亲水整理所得聚丙烯非织造布表面的元素分布图。如图7所示,亲水整理后聚丙烯非织造布表面上出现了Si元素,这是原聚丙烯非织造布所不具备的,直接证明了纳米二氧化硅溶胶已经粘附在了非织造布的表面。此外,整理所得聚丙烯非织造布表面上的C、O和Si元素分布都较为均匀,也从侧面反映了亲水整理剂在聚丙烯非织造布面上具有均匀的分布,避免了整理所得非织造的布面出现亲水性不均的现象。

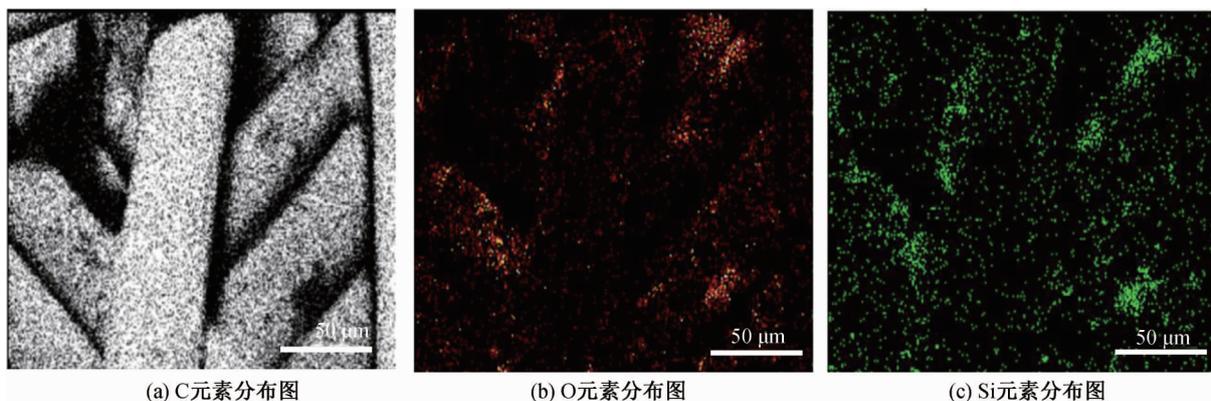


图7 亲水整理所得聚丙烯非织造布表面的元素分布图

2.3.3 力学性能

表2展现了亲水整理前后聚丙烯非织造布的断

裂强力、断裂伸长和断裂拉伸应变等力学性能。从表2中可以看出,整理前后,聚丙烯非织造布的断裂

强力、断裂伸长和断裂拉伸应变均无明显变化,这说明亲水整理对聚丙烯非织造布力学性能的影响较小。

表2 亲水整理前后聚丙烯非织造布的力学性能

样品	力学性能		
	断裂强力/ (N·cm ⁻¹)	断裂伸 长/mm	断裂拉 伸应变/%
原非织造布	14.72	138.80	19.90
整理后的非织造布	13.98	143.40	20.45

2.3.4 纯水通量

图8为亲水整理前后聚丙烯非织造布的纯水通量。从图8中发现,整理前聚丙烯非织造布的纯水通量为79 kg/(m²·h),而经过亲水整理后,聚丙烯非织造布的纯水通量已明显高于原布。由此可直接证明:经整理后,聚丙烯非织造布的亲水性明显提升。

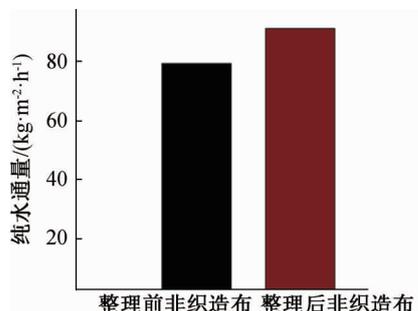


图8 亲水整理前后聚丙烯非织造布的纯水通量

2.3.5 亲水耐久性

将亲水整理后的聚丙烯非织造布分别在60℃的去离子水和无水乙醇中处理不同的时间以测试其亲水耐久性。表3显示了不同煮练时间下聚丙烯非织造布的接触角。从表3中可以看出,经60℃去离子水煮练1h后,聚丙烯非织造布的接触角由煮练前的0°增大至10°;而经60℃无水乙醇煮练1h后,聚丙烯非织造布的接触角则由煮练前的0°增大至12°。这说明经过1h的煮练,聚丙烯非织造布的亲水性有所下降,但下降幅度较小,仍保持了良好的亲水性。进一步地,经60℃去离子水和无水乙醇煮练3h后,聚丙烯非织造布的接触角分别变为23°和33°,这证明此时聚丙烯非织造布的接触角又有所下降,但如此大小的接触角仍可证明聚丙烯非织造布保持有非常良好的亲水性。综上所述,不同的煮练时间内,整理后聚丙烯非织造布始终表现出较小的接触角和良好的亲水性,这足以证明本文以二氧化硅溶胶和聚丙烯酸酯胶黏剂为主要组份配制的亲水整理剂有良好的整理效果。

表3 不同溶剂下处理前后聚丙烯非织造布的接触角

溶剂	接触角/(°)		
	处理前	处理1h后	处理3h后
60℃去离子	0	10	23
60℃无水乙醇	0	12	32

3 结论

本文以二氧化硅为亲水物质,以聚丙烯酸酯乳液为胶黏剂,以异丙醇和去离子水为稀释剂,通过优化亲水整理剂中二氧化硅和聚丙烯酸酯的含量来配置亲水整理剂,采用浸轧-焙烘方式整理聚丙烯非织造布,并系统表征了整理所得非织造布的表面形貌、化学元素组成、力学性能、纯水通量和亲水耐久性,所得主要结论如下:

a) 用二氧化硅溶液、聚丙烯酸酯乳液、异丙醇和去离子水配制成聚丙烯非织造布用亲水整理剂,当二氧化硅的含量为0.8%,聚丙烯酸酯乳液含量为4.0%,在烘燥温度为60℃,烘燥时间为5min的工艺条件下进行整理,可获得水接触角为0°的聚丙烯非织造布。

b) 经亲水整理剂整理后,聚丙烯非织造布的纤维表面包裹有一层粘结剂和二氧化硅微球组成的膜状物;与未整理布相比较,亲水整理后的聚丙烯非织造布力学性能基本维持不变,纯水通量有明显提升;经60℃的水和乙醇分别处理3h后,整理所得聚丙烯非织造布的接触角仅为23°和32°,表明制得的聚丙烯非织造布具有良好的亲水耐久性。

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] 李瑞欣, 彭景洋, 刘亚, 等. 非织造布在过滤中的应用[J]. 非织造布, 2011, 19(6):56-59.
- [3] Zhang C H, Yang F L, Wang W J, et al. Preparation and characterization of hydrophilic modification of polypropylene non-woven fabric by dip-coating PVA (polyvinyl alcohol) [J]. Separation and Purification Technology, 2008, 61(3): 276-286.
- [4] Wang K L, Wang W C, Yang D Z, et al. Surface modification of polypropylene non-woven fabric using atmospheric nitrogen dielectric barrier discharge plasma [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(22): 6859-6864.
- [5] 王楷, 任强, 陈凯. 聚丙烯纤维非织造布亲水整理研究进展[J]. 福建轻纺, 2009(7):46-48.

- [6] 江移. 聚丙烯非织造布亲水改性的研究[J]. 非织造布, 2008, 16(3):20-22.
- [7] 程春祖, 李鑫, 李健, 等. 聚丙烯亲水改性纤维的表征[J]. 纺织学报, 2009, 30(3):19-23.
- [8] 刘娴, 吴明华. 聚丙烯非织造布亲水整理工艺研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2009, 26(2):160-164.
- [9] 彭丽. ES无纺布多次亲水性 with 表面活性剂配伍的关系[D]. 杭州:浙江理工大学, 2018:1-3.
- [10] 关凯书, 姜秋鹏, 尹衍升. $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{CeO}_2$ 复合纳米薄膜超亲水性能的研究[J]. 中国稀土学报, 2003, 21(3): 291-294.
- [11] 水玲玲, 刘晓纯, 龚颖欣. 二氧化硅材料的表面润湿性改性研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2018, 50(5):39-44.
- [12] 张密林, 丁立国, 景晓燕, 等. 纳米二氧化硅的制备、改性与应用[J]. 化学工程师, 2003, 17(6):13-16.

(责任编辑:唐志荣)