



# 离心纺丝法制备 PTFE/PVA 复合微/纳米纤维膜

陈慕荣<sup>1</sup>, 刘雪强<sup>2</sup>, 张华鹏<sup>1</sup>, 杨 斌<sup>1</sup>, 王 峰<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 军事科学院系统工程研究院军需工程技术研究所, 北京 100000)

**摘 要:** 以聚四氟乙烯(PTFE)乳液和聚乙烯醇(PVA)为原料, 用离心纺丝法制备出 PTFE/PVA 复合纤维膜前驱体, 再通过高温烧结成形, 制得一系列 PTFE/PVA 复合微/纳米纤维膜。研究了共混纺丝液中 PVA 的质量分数对纺丝效果的影响以及烧结温度、烧结时间的变化对复合纤维膜的结构和性能的影响, 对纤维膜的微观形貌和结构进行了表征, 并测试了纤维膜的水接触角、孔径、力学性能。结果表明: 当纺丝液中 PVA 的质量分数为 7% 时, 离心纺丝制得的纤维膜形态最好, 粗细较为均匀, 且直径分布范围较窄; 经过高温烧结, 复合纤维膜表面粗糙度均提高, 疏水性增强, 平均孔径和力学性能随着处理温度和处理时间的变化而波动; 当烧结温度为 370 °C, 烧结时间为 20 min 时, 所得膜拉伸强度较高, 且断裂伸长率也保持了相对较高的水平。

**关键词:** 聚四氟乙烯; 聚乙烯醇; 离心纺丝法; 复合微/纳米纤维膜; 高温烧结

中图分类号: TQ342+.71

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2020) 05-0625-07

## Preparation of PTFE / PVA composite micro/nano fiber membrane by centrifugal spinning

CHEN Murong<sup>1</sup>, LIU Xueqiang<sup>2</sup>, ZHANG Huapeng<sup>1</sup>, YANG Bin<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Fiber Materials and Manufacturing Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Institute of Quartermaster engineering and Technology, Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100000, China)

**Abstract:** The polytetrafluoroethylene (PTFE) emulsion and polyvinyl alcohol (PVA) were used as raw materials to prepare PTFE / PVA composite membrane precursor by a centrifugal spinning method. Then, a series of PTFE / PVA composite micro/nano fiber membranes were prepared by high-temperature sintering. The effects of the mass fraction of PVA in the blend spinning solution on the spinning effect and the effects of changes in sintering temperature and sintering time on the structure and properties of the fiber membrane were studied. The micromorphology and structure of the fiber membrane were characterized. Besides, the water contact angle, pore size, and mechanical properties of the fiber membrane were tested. The results show that when the mass fraction of PVA in the blended spinning solution was 7%, the fiber membrane obtained by the centrifugal spinning had the best morphology. Meanwhile, the thickness of the fiber was more uniform and the diameter distribution range was narrower. After high temperature sintering, the surface roughness of the composite fiber membrane was increased; the hydrophobicity was enhanced; the average pore size and mechanical properties fluctuate changed with the change of processing temperature and processing time. When the sintering temperature was 370 °C and

收稿日期: 2020-03-17 网络出版日期: 2020-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(21706238)

作者简介: 陈慕荣(1995-), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事纤维材料制备方面的研究。

通信作者: 张华鹏, E-mail: roczhp@163.com

the sintering time was 20 min, the tensile strength of the prepared film was high, and the elongation at break also maintained a relatively high level.

**Key words:** polytetrafluoroethylene; polyvinyl alcohol; centrifugal spinning method; composite micro/nano fiber membrane; high temperature sintering

## 0 引言

聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, PTFE)是一种以氟为主要成分的聚合物<sup>[1]</sup>,由完全被氟原子饱和的碳原子链组成<sup>[2]</sup>,这种特殊的分子结构使PTFE具有优良的化学稳定性,能耐强酸、强碱和多种化学产品的腐蚀,且可以在低温-184℃到高温260℃范围内长期使用<sup>[3]</sup>。PTFE优异的化学和物理性能是其他高分子材料难以达到的,因此PTFE在产业界有“塑料王”之称<sup>[4]</sup>。将PTFE制成纤维是近年来的研究热点,PTFE纤维在过滤、纺织、医用等众多领域都有广阔的应用前景。但由于结构和性能方面的特殊性,PTFE的熔融黏度极高,也难溶于常见的溶剂,一般的纺丝方法,如溶液纺和熔融纺,并不适用于PTFE纤维的生产和制备。目前,PTFE纤维常用的生产方法有乳液纺丝法、糊料挤出纺丝法和膜裂纺丝法<sup>[5]</sup>。其中,乳液纺丝法(又称载体纺丝法)<sup>[6]</sup>是生产PTFE纤维最成熟的一种方法,是将黏胶<sup>[7]</sup>或聚乙烯醇(PVA)<sup>[8]</sup>或其他易成纤的聚合物水溶液作为载体,然后以常规方式进行纺制得到PTFE含量较高的长丝,再经过高温加热处理以除去载体部分,经过后续加工得到PTFE纤维。

纳米纤维因具有较大的比表面积,同时其制品具有较高的孔隙率而备受关注,在生化、分离和催化等领域得到了广泛应用。制备纳米纤维的方法主要包括自组装法、相分离法、静电纺丝法<sup>[9]</sup>,其中静电纺丝法又最为常见。Xiong等<sup>[10]</sup>将PVA和PTFE乳液混合的纺丝溶液通过静电纺丝制成复合纳米纤维,并对其进行了烧结成型,结果发现:在烧结后的膜中,PTFE颗粒熔合形成了相互连接的微米和纳米级的多孔纤维网络,成功制得了多孔纳米纤维膜,并说明了其作为过滤介质具有潜在的应用价值;Zhou等<sup>[11]</sup>通过烧结静电纺丝制得的PTFE/PVA复合膜前驱体来制备纳米纤维膜,所得纤维直径在420~570 nm,水接触角可达150°,孔隙率约为80%,用于膜蒸馏时表现出稳定的截盐率,运行10 h后截盐率仍高于98.5%;Wang等<sup>[12]</sup>采用静电纺丝法制备了一种驻极PVDF/PTFE复合纳米纤维膜,研究结果表明:随着PTFE纳米颗粒的浓度增加,膜表面电

势可从0.42 kV提高到3.63 kV,纤维膜的空气过滤效率高达99.97%。

虽然静电纺丝法的制备工艺和设备相对简单,但纺丝效率低,存在溶剂污染问题且对纺丝液有极性要求,较难达到规模化生产。越来越多的研究者们将注意力转移到离心纺丝技术上,期望利用离心纺来弥补静电纺的不足。Zhang等<sup>[13]</sup>通过离心纺丝工艺制备了铟锡氧化物(ITO)纳米纤维,并将其应用在光纤上面;Hou等<sup>[14]</sup>通过离心纺丝制造具有微孔和纳米孔结构的乙基纤维素(EC)/聚乙烯吡咯烷酮(PVP)纤维,研究结果表明多孔EC/PVP纤维显示出很高的比表面积和接触角,并说明了离心纺技术对于快速大规模制造多孔纤维是具有推动作用的。

本文以PTFE乳液和PVA为原料,结合乳液纺丝法和离心纺丝技术来制备PTFE/PVA复合微/纳米纤维膜,并通过高温烧结成型,热解其中的PVA成分,制备PTFE微纳米纤维膜,研究纺丝液组分和烧结条件对纤维直径及分布及纤维膜形貌、孔径、疏水性和力学性能的影响。研究将为PTFE纤维微纳米膜材料在油水分离、气体过滤等方面的应用提供实践基础。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

去离子水,电导率为20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,实验室自制;聚乙烯醇2488型(PVA),分析纯,购自上海麦克林试剂有限公司;聚四氟乙烯乳液(PTFE,固含量60%),购自中昊晨光化工研究院有限公司;聚酯窗纱网,购自上海乐在奇中塑料制品有限公司。

### 1.2 实验仪器

离心纺丝机(自制),KSL-1200X型高温箱式炉(合肥科晶材料技术有限公司),EDS/EBSD-ULTRA55型热场发射扫描电子显微镜(德国ZEISS公司),DHG-9140 A型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司),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),JM-A型电子天平(诸暨市超泽衡器设备有限公司),PMI气液法孔径分析仪(美国PMI公司),KSM-bx5450ST型双向拉伸仪(日本Kato-Tech公司)。

### 1.3 PTFE/PVA 膜的制备

#### 1.3.1 纺丝液的配制

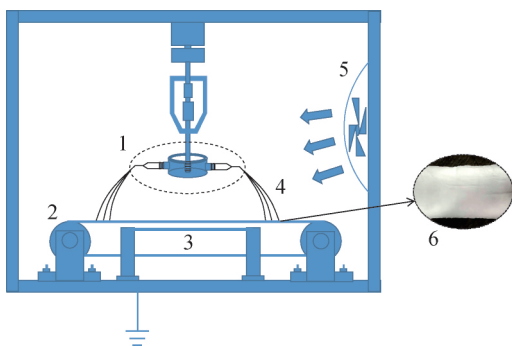
将一定量的 PVA 加入去离子水中,加热并搅拌至 PVA 完全溶解后静置脱泡,然后将一定量的 PTFE 乳液加入配制好的 PVA 溶液中,常温下进行充分搅拌,使之均匀混合,静置脱泡,留待使用。按表 1 所示的纺丝液组分,改变 PVA 在纺丝液中的含量,配制不同浓度的纺丝液。

表 1 纺丝液的组成

序号	PTFE/wt%	PVA/wt%
1	33	3
2	33	5
3	33	7
4	33	9
5	33	11

#### 1.3.2 离心纺丝工艺

将配制好的纺丝液用离心纺丝机进行纺丝,离心纺丝过程如图 1 所示。实验过程中纺丝针头为 26G(针头内径为 0.23 mm),转速为 2000 r/min,纺丝液注入量为 4 mL/次,实验环境条件为温度(50±3)℃,湿度为 15%±3%,每种浓度下的纺丝时间相同,并用聚酯软网帘收集不同浓度纺丝液下所纺得的纤维膜,整理好,备用。



1.喷丝器;2.输网帘;3.铝板;4.纤维;5.风机;6.纤维膜

图 1 离心纺丝装置示意图

#### 1.3.3 PTFE/PVA 复合纤维膜的烧结

将最佳浓度参数下的 PTFE/PVA 初纺纤维膜在 70℃ 下干燥 360 min,然后分别在 330、350、370、380、390℃ 下进行烧结,设定加热速率为 1℃/min,在各温度下分别处理 5、10、20、30 min,即得到一系列膜样品。

#### 1.4 测试与表征

##### 1.4.1 膜的微观形貌

将膜样品干燥后,进行镀金处理,采用扫描电子显微镜(SEM)观察膜的表面形貌。

##### 1.4.2 膜表面亲疏水性能

使用视频接触角测试仪对膜表面的亲水性能进行测试,每个样进行 3 次平行检测,然后取平均值。

##### 1.4.3 膜的孔径

使用美国 PMI 气液法孔径分析仪(孔隙仪)对烧结后的膜进行孔径测试和分析。

##### 1.4.4 膜的力学性能

将膜样品制成 25 mm×5 mm 的测试条样,在室温下使用拉伸测试仪测试膜在烧结前后的力学性能。测试前先测出条样的厚度,然后将测试结果按照式(1)和式(2)进行计算:

$$\epsilon/\% = \frac{CH_1 \times 10}{l_0} \times 100 \quad (1)$$

$$F = \frac{CH_2 \times R \times 10^{-3} \times 0.98}{b \times d} \quad (2)$$

其中:CH<sub>1</sub> 和 CH<sub>2</sub> 均为测试直接所得值,CH<sub>1</sub> 记录的数据为拉伸过程中试样的增长量,m,CH<sub>2</sub> 记录的数据为测试过程中的电压,V;ε 为样品的断裂伸长率,%;l<sub>0</sub> 为样品的原长,m;R 为测试过程中仪器设置的量程,它表示每 10 V 的对应值,g/10 V,本测试中的量程为 1000 g/10 V;F 为样品的断裂强力,MPa;b 为样品的宽度,m;d 为样品的厚度,m。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PVA 含量对复合纤维形态的影响

在纺丝液中添加不同质量分数的 PVA,对纺丝效果的影响结果分别如图 2—图 4 所示。结合图 2 所示的表面形貌,图 3 中的纤维直径分布及图 4 中纤维的平均直径,可以发现:当 PVA 含量为 3% 时,能够收集到较多纤维,纤维直径分布在 50~400 nm,平均直径为 0.14 μm,但是纤维形貌较差,纤维上出现大量的串珠,这是因为纺丝液的浓度较低,分子之间的缠结较弱,在离心力作用下分子链断裂从而形成串珠<sup>[15]</sup>;当 PVA 含量为 5% 时,开始收集到大量纤维,纤维上的串珠消失,纤维直径增大,这是因为共混纺丝液浓度增加使分子间缠结比例增加<sup>[16]</sup>,可纺性提高,但是纤维粗细非常不均匀,纤维直径分布较宽,直径分布在 0.25~2.50 μm,平均直径为 1.00 μm,标准偏差为 0.5;当 PVA 含量为 7% 时,纤维形貌变好,粗细较为均匀,PVA 组分将 PTFE 粒子包覆,纤维直径分布范围相对集中,分布在 0.50~2.90 μm,平均直径为 1.47 μm,标准偏差为 0.59;当 PVA 含量提高到 9% 时,所制得的纤维更加粗糙,但是纤维开始出现黏连现象,纤维直径分布

在  $1.43 \sim 6.10 \mu\text{m}$ , 纤维直径有所增大, 平均直径增加到  $2.41 \mu\text{m}$ , 标准偏差为  $0.73$ ; 当 PVA 含量继续提高到  $11\%$  时, 由于共混纺丝液的浓度较大, 分子运动阻力大, 纺丝液流动性差, 使收集到的纤维出现

大面积的黏连现象, 且有块状出现, 纤维粗细不均, 纤维直径有所减小, 纤维直径分布比较分散, 分布范围为  $0.51 \sim 4.59 \mu\text{m}$ , 平均直径为  $1.74 \mu\text{m}$ , 标准偏差为  $0.92$ 。

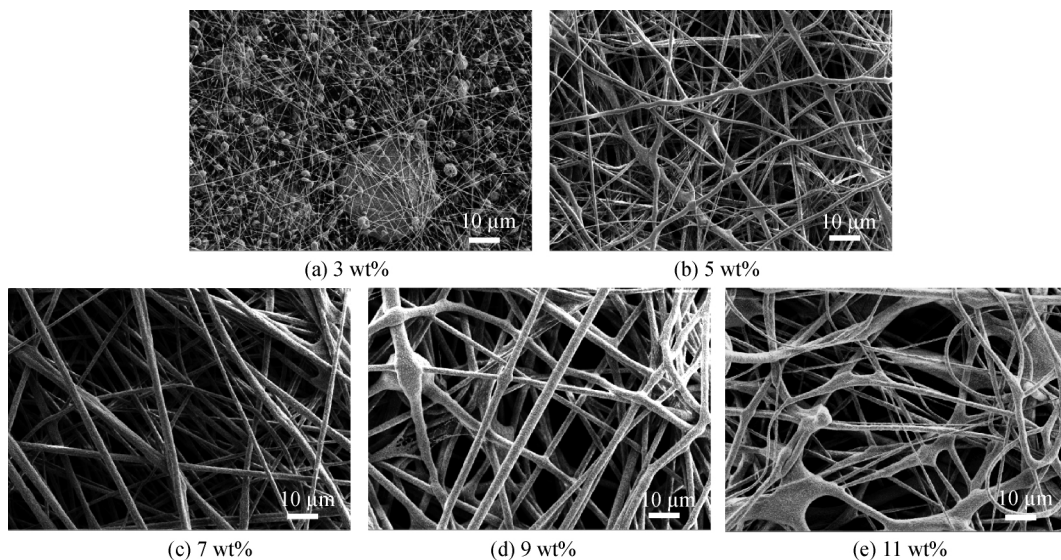


图2 不同 PVA 含量的纺丝液所纺得的纤维膜的表面形貌

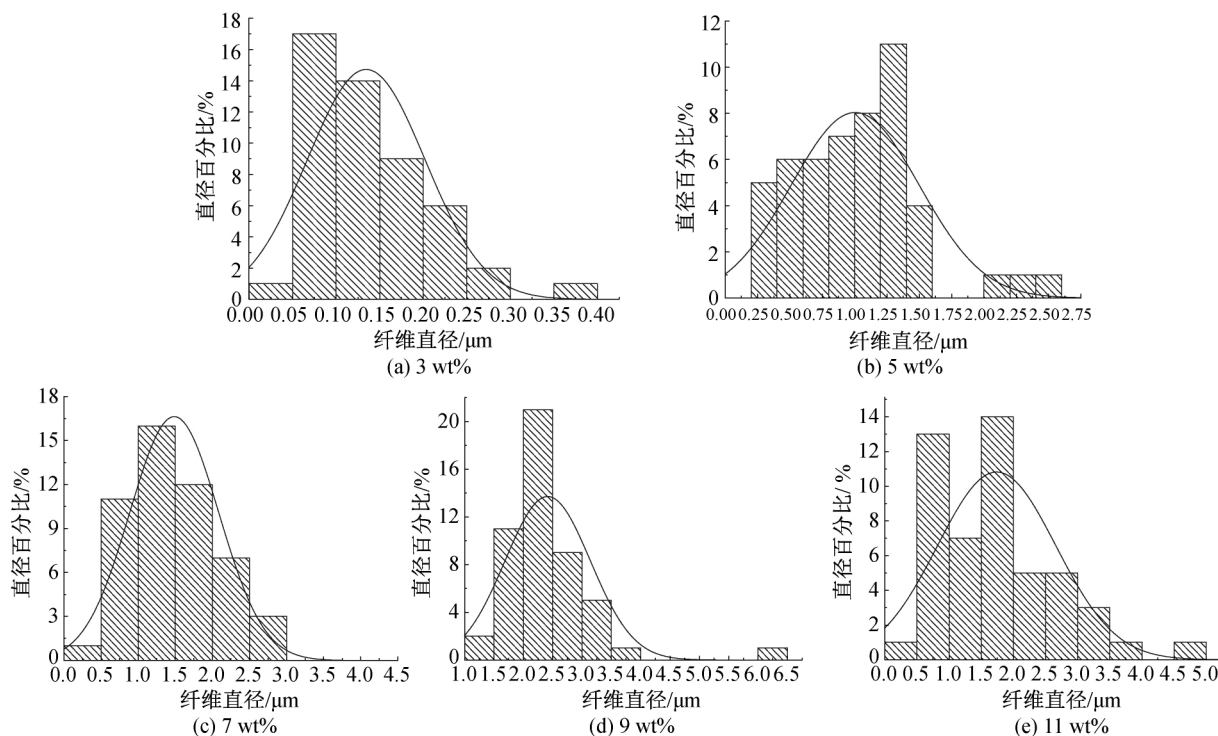


图3 不同 PVA 含量的纺丝液所纺得的纤维的直径分布

由上分析可知, 当 PVA 含量较小时, 共混纺丝液浓度小, 离心纺丝所得的纤维形态较差; 增加 PVA 含量, 通过离心纺丝得到的纤维形态变好, 但是当 PVA 的含量增加到一定程度时, 纤维膜中的纤维黏连比较严重。综合比较, PVA 含量为  $7\%$  是最佳的浓度参数。

## 2.2 烧结条件对纤维膜结构和性能的影响

### 2.2.1 纤维膜表面形貌分析

将 PVA 最佳浓度下配制的共混纺丝液纺得的膜进行高温烧结处理, 不同温度下烧结  $5 \text{ min}$  所得到的复合纤维膜的表面形貌如图 5 所示。在未烧结的纤维膜表面上, 可以看到 PTFE 颗粒大部分被包

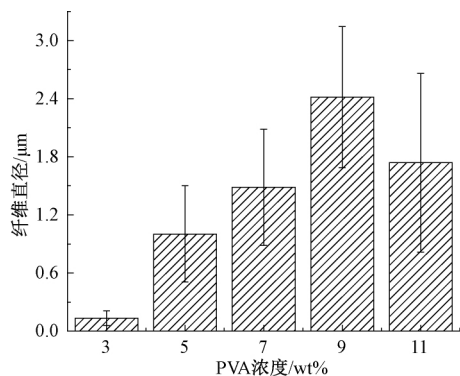


图 4 不同 PVA 含量下纤维的平均直径

覆在 PVA 中,如图 5(a)所示。而在进行高温烧结时,PVA 组分则会进行分解。如图 5(b)所示,在 330 °C 的烧结温度下,PVA 已发生部分分解,表面可以看到较为明显的 PTFE 粒子,纤维表面粗糙度有所增加。尽管此时的烧结温度是在 PTFE 熔点之上 (PTFE 熔点约为 327 °C),但在 330 °C 下

PTFE 颗粒并未明显熔融,这可能是由于 PVA 和 PTFE 两种不同组成相之间的界面热阻引起的<sup>[11, 17]</sup>。当温度升至 350 °C 时,PTFE 颗粒开始熔化,但仍然可以看到清晰的 PTFE 颗粒,如图 5(c)所示。进一步地,在 370 °C 下处理纤维膜时,可以看到在纤维交叉点上,纤维趋于融合在一起并形成相互连接的纤维网络,如图 5(d)所示。而在 380 °C 下处理膜时,可以更为明显的看出 PTFE 颗粒发生了熔融,如图 5(e)所示。此外,此时在纤维表面上还可以观察到一些横向分布的沟槽,这是由于 PVA 的分解形成了纤维间的空隙,PTFE 熔融并熔入空隙而形成的,这些独特的结构将有助于提升纤维的粗糙度。当膜在 390 °C 下烧结时,PTFE 进一步熔化,此时的纤维膜上,PTFE 颗粒熔融后黏结到一起,呈现出没有规则形状的块状物,并沿着纤维方向堆积,此时已经看不到短棒状的 PTFE 颗粒,纤维表面的沟槽较多,粗糙度变得更大,如图 5(f)所示。

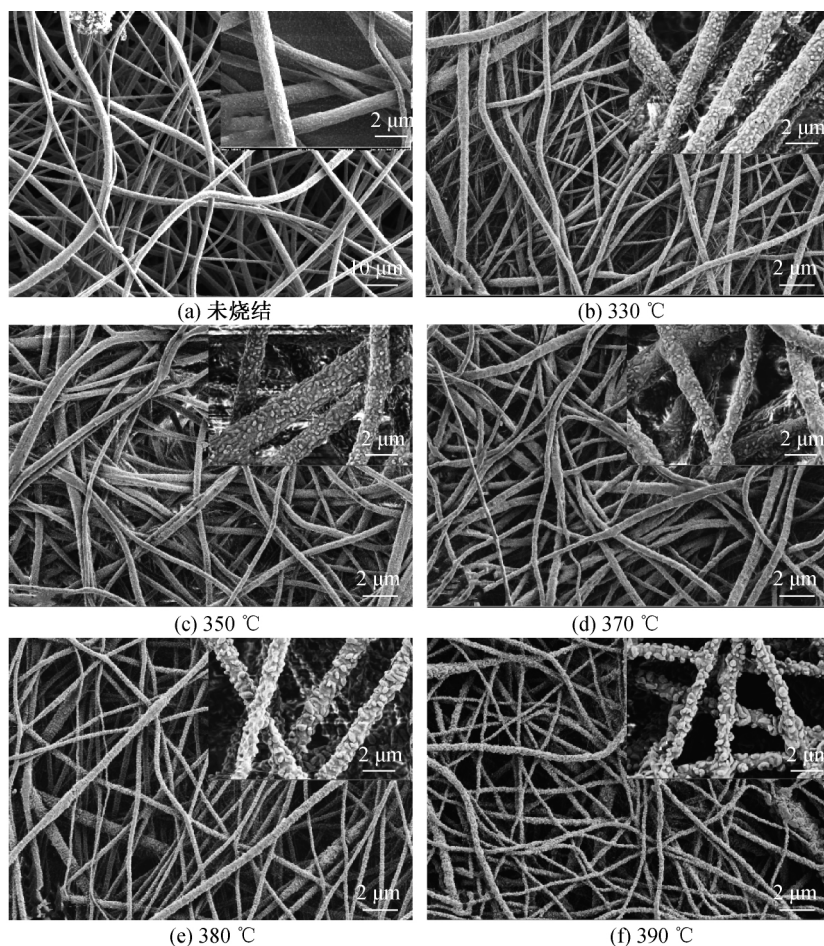


图 5 未烧结及不同烧结温度下纤维膜的表面形貌

纤维直径的统计数据如图 6 所示。从图 6 中可以看到,由于 PVA 分解和 PTFE 颗粒的熔融使纤维组分减少,通过高温处理后的复合纤维膜纤维平

均直径均有所减小,且纤维直径在 1.23~1.50 μm 的范围内波动,变化范围较小。

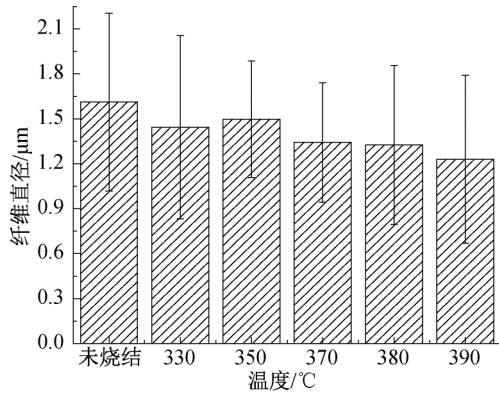


图 6 未烧结及不同烧结温度下纤维膜中的纤维平均直径及其分布

2.2.2 水接触角分析

亲疏水性是膜材料一个重要的性能。不同烧结条件下所得到的纤维膜的水接触角如表 2 所示。未进行高温处理的原始膜水接触角约为 31.23°,表现出良好的亲水性。这是因为原始膜中 PVA 的含量为 7 wt%, PVA 具有一定的亲水性,从而使膜显现出很高的亲水性。经过烧结后的膜具有明显的疏水性,水接触角随烧结温度的升高和烧结时间的增加而变化,在特定烧结时间或温度下,膜的水接触角最高可达 150°以上,表明此时的复合膜具有超疏水性。疏水表面可能是因为烧结使 PVA 分解,疏水性的 PTFE 组分暴露在纤维表面,并进一步增加了纤维的粗糙度,使膜具有低表面能而产生的。

表 2 不同条件下处理的膜的水接触角 (°)

烧结时间/min	烧结温度/°C				
	330	350	370	380	390
5	145.55	145.87	144.01	144.90	150.83
10	146.42	150.80	146.69	149.65	147.22
20	149.16	148.64	150.56	153.08	152.13
30	146.60	149.18	149.65	154.64	154.43

2.2.3 膜孔径分析

不同烧结条件下所得到的膜的孔径如图 7 所示。从图 7 中可以看到,随着烧结处理温度的升高和处理时间的增加,纤维膜的孔径值出现波动变化。在相同的处理时间下,膜孔径随着处理温度的升高逐渐减小,而在同一温度下,膜孔径随着处理时间的增加而增大。在孔径测试中,由于未经烧结的原始纤维膜非常亲水,使用润湿液润湿时纤维膜会整个溶掉,故无法测得原始孔径。

2.2.4 膜力学性能分析

不同烧结条件下所得纤维膜的力学性能如图 8(a)和图 8(b)所示。未经高温烧结(即处理时间为

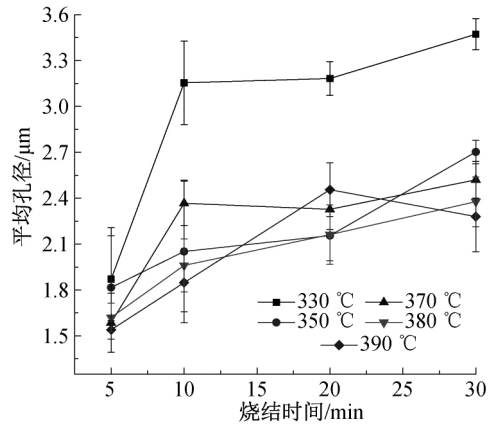
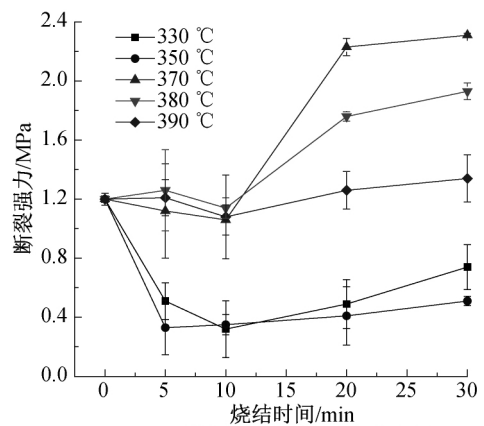


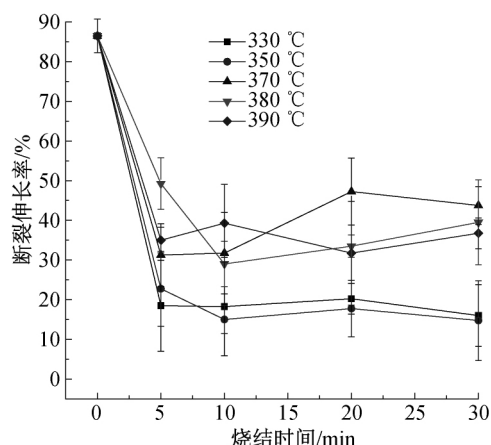
图 7 不同烧结温度下膜的平均孔径

0 min)的膜的断裂强力为 1.2 MPa,断裂伸长率值为 86.5%。在 330 °C 和 350 °C 下烧结时,膜的力学性能都比较差,这是因为在此温度下,纤维膜中 PVA 部分分解而 PTFE 颗粒并没有明显熔融,使得纤维中缺少 PVA 的支持,同时 PTFE 组分无法提供膜所需强度,造成此时的纤维膜比较脆弱,力学性能较低。当在 370 °C 及以下的温度处理纤维膜时,烧结前 10 min,膜的断裂强力和未烧结膜的断裂强力基本接近,而当超过 10 min 后,膜的断裂强力开始增大;而在不同的烧结时间下,烧结后所得膜的断裂伸长率则比未烧结膜均明显减小。这是因为未烧结的膜中纤维是无规取向的,纤维之间并没有交联,在施加载荷时纤维有足够的自由度来调整其取向并由 PVA 组分提供膜的强度,经过高温烧结后,膜中 PVA 组分大部分被分解,此时膜材的强度则主要靠 PTFE 组分提供,而 PTFE 材料具有刚性,所以烧结后膜的断裂伸长率均大大地降低。相比之下,当烧结温度为 370 °C,时间为 20 min 时,所得膜的拉伸强度较高,且断裂伸长率也保持了相对较高的水平。因此,优选 370 °C 下处理 20 min 的烧结条件。



(a) 纤维膜的断裂强力变化曲线





(b) 纤维膜断裂伸长率变化曲线

图8 不同烧结条件下所得纤维膜的力学性能

### 3 结 论

本文以 PTFE 乳液和 PVA 为原料,通过离心纺丝法制备出 PTFE/PVA 复合纤维膜,并探究了共混纺丝液中 PVA 的含量对所纺纤维形态的影响和烧结条件对纤维膜结构和性能的影响,所得主要研究结论如下:

a) PVA 的含量对 PTFE/PVA 复合纤维膜纤维的形成和形态具有较大影响,随着纺丝液中 PVA 含量的增加至 7% 时,纤维上的串珠消失,纤维粗细变得均匀,纤维直径分布较为集中,而当 PVA 的含量超过 7 wt% 时,纤维间开始出现黏连,纤维的粗细均匀度变差,直径分布范围变宽。

b) 纤维膜经高温烧结后,纤维的粗糙度增加,纤维膜由亲水性转为疏水性;在相同的处理时间下,膜孔径随着处理温度的升高逐渐减小,而在同一温度下,膜孔径随着处理时间的增加而增大;当烧结温度为 370 °C,时间为 20 min 时,所得膜的拉伸强度较高,且断裂伸长率也保持了相对较高的水平。

#### 参考文献:

- [1] 申建鸣. 特氟纶纤维的特性与应用[J]. 国外纺织技术(材料), 2001(1): 8-10.
- [2] 鲍萍, 王秋美. 特氟纶纤维的制造、性能与应用[J]. 产业用纺织品, 2003, 21(4): 35-37.
- [3] Schick W, 申建鸣, 葛怡. 碳氟化合物基纤维和纱线[J]. 国外纺织技术(产品), 2001(2): 21-23.
- [4] 钱知勉编. 塑料性能应用手册[M]. 上海: 上海科技技术文献出版社, 1988: 285-286.

- [5] 陶丽琴. 聚四氟乙烯超细纤维负载二氧化钛光催化剂制备与性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2015: 15-18.
- [6] 郭志洪, 林佩洁, 王燕萍, 等. 聚四氟乙烯纤维的成型方法[J]. 合成技术及应用, 2011, 26(2): 28-32.
- [7] Ochoa I, Hatzikiriakos S G. Paste extrusion of polytetrafluoroethylene (PTFE): Surface tension and viscosity effects [J]. Powder Technology, 2005, 153(2): 108-118.
- [8] Ochoa I, Hatzikiriakos S G. Polytetrafluoroethylene paste preforming: Viscosity and surface tension effects [J]. Powder Technology, 2004, 146(1/2): 73-83.
- [9] 侯腾. 离心纺乙基纤维素微/纳米纤维的制备及研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016: 8-9.
- [10] Xiong J, Huo P F, Ko F K. Fabrication of ultrafine fibrous polytetrafluoroethylene porous membranes by electrospinning [J]. Journal of Materials Research, 2009, 24(9): 2755-2761.
- [11] Zhou T, Yao Y Y, Xiang R L, et al. Formation and characterization of polytetrafluoroethylene nanofiber membranes for vacuum membrane distillation [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 453: 402-408.
- [12] Wang S, Zhao X L, Yin X, et al. Electret polyvinylidene fluoride nanofibers hybridized by polytetrafluoroethylene nanoparticles for high-efficiency air filtration[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(36): 23985-23994.
- [13] Zhang Q, Wu X, Chen H H, et al. Preparation and photoelectric properties of indium tin oxide depositional optical fiber by centrifugal spinning [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2015, 26(11): 9031-9036.
- [14] Hou T, Li X L, Lu Y S, et al. Highly porous fibers prepared by centrifugal spinning [J]. Materials & Design, 2017, 114: 303-311.
- [15] 郭颖林, 柳静献, 毛宁, 等. PTFE/PVA 纳米纤维膜复合滤料的制备[C]//中国环境保护产业协会袋式除尘委员会. 全国袋式除尘技术研讨会论文集. 武汉: 中国环境保护产业协会袋式除尘委员会, 2018: 503-508.
- [16] 马训明. PTFE 乳液的凝胶纺丝及其性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2008: 15-16.
- [17] Nan C W, Birringer R, Clarke D R, et al. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance [J]. Journal of Applied Physics, 1997, 81(10): 6692-6699.

(责任编辑:唐志荣)