

http://pmse.scu.edu.cn

碳纳米管改性聚丙烯腈纳米纤维膜制备工艺及性能

胡和丰, 陶金, 俞鸣明, 方琳, 谢旺, 任慕苏, 陶银萍

(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 聚丙烯腈(PAN)纳米纤维纸具有高孔隙率、三维连通等特点,其炭化后形成的碳纤维纸可应用于燃料电池质子交换膜中。提升PAN纳米纤维性能,有利于获得高质量碳纤维纸。文中采用碳纳米管(CNT)增强改性聚丙烯腈,通过静电纺丝制备CNT/PAN纳米纤维膜,研究了CNT的加入对纤维膜微观结构、热稳定性、导电性的影响。对纤维膜的扫描电镜照片、热稳定性等进行分析,结果表明CNT质量分数为2%时,纤维膜的孔隙率为86%、比表面积为21.1 m²/g;相较未加CNT的纤维膜的电阻下降40%,最大热分解温度提升了6℃。为后期制备电池用高性能碳纤维纸前驱体提供了支撑。

关键词: 静电纺丝;聚丙烯腈;碳纳米管;微观结构;热稳定性

中图分类号: TM912 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2023)12-0001-07

随着低碳经济的发展,氢能已成为最有前景的绿色能源之一,质子交换膜燃料电池(PEMFC)作为一种重要的氢能转换装置备受关注^[1]。PEMFC是以氢、氧为原料在电池电极发生氧化还原反应的一种供电装置,广泛应用于汽车、移动电源等领域^[2]。气体扩散层是PEMFC的关键部件,起着支撑催化层、为电极反应提供气体和排水通道的作用。碳纤维纸具备高孔隙率、良好的导电性、耐高温和耐腐蚀性,是目前主流的气体扩散层基底材料^[3]。目前,PEMFC用碳纤维纸的生产主要采用湿法工艺。湿法工艺是以水为介质,将一定长度的碳纤维均匀分散在水中^[4],通过抄纸机制成碳纤维纸前驱体,经树脂浸渍、固化及炭化等工艺制备而成,所得碳纸有良好的均匀性和致密的结构。目前,国内还没有企业能够工业化生产高性能碳纤维纸,我国主要从日本Toray公司、德国SGL公司和加拿大Ballard公司进口。因此,研究开发具有自主知识产权的碳纤维纸具有重要意义。

通过静电纺丝制备树脂基纳米纤维膜,之后将树脂纳米纤维膜高温炭化,是获得质子交换膜燃料

电池用碳纤维纸的另一种重要方法。与湿法制备碳纸相比,上述方法具有工艺简单、性能可控等优势,已成为近年来碳纤维纸制备技术的研究热点。常用的纳米纤维膜前驱体有聚丙烯腈(PAN)纤维、沥青纤维和纤维素纤维,其中PAN基碳纤维性能较高、产量大、品种丰富,但其热稳定性、力学强度、导电性等性能还有待进一步提升。目前,将碳纳米管、石墨烯等纳米材料添加到树脂中,是增强改性树脂纤维膜的一种有效手段^[5,6]。碳纳米管(CNT)具有高强度、高弹性模量及纳米级尺寸,用于复合材料的增强填料时表现出良好的强度、弹性,从而能有效提高复合材料的力学性能。Asiri等将CNT掺入到聚己内酯(PCL)中,通过静电纺丝法制备了具有优异力学强度的CNT/PCL纳米纤维膜^[7]。King等将CNT掺入到聚氧乙烯(PEO)中,用静电纺制备出复合纤维膜,当CNT质量分数为3.9%时,复合纤维膜的拉伸强度提高了3倍,弹性模量高达260 MPa^[8]。Renz等通过静电纺丝和热压制备了良好机械柔性的聚酰亚胺/碳纳米管(PI/CNT)复合纤维膜,当CNT含量在20%时,复合材料介电常数为

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2023.0237

收稿日期:2023-02-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(52203095)

通讯联系人:方琳,主要从事树脂基复合材料研究,E-mail: lfang@shu.edu.cn

217, 是纯 PI 的 57.5 倍^[9]。CNT 具有优异的导热性能, 通过物理共混能增加纤维膜的导热性。Du 等采用静电纺丝制备了 CNT/PVA 纳米纤维薄膜, 发现 CNT 质量分数在 8% 时的薄膜样品热导率为 2.59 W/(m·K), 是纯 PVA 纤维薄膜的 3.7 倍且纤维排列取向良好^[10]。

由于 CNT 在树脂中分散良好, 能够有效提升树脂纳米纤维膜的热稳定性、导电和力学等性能, 本文将 CNT 引入到 PAN 纳米纤维纸中。通过静电纺丝制备了 CNT/PAN 基纳米纤维纸, 研究了 CNT 的添加量对纤维纸形貌、热稳定性和导电性的影响, 以及 CNT 在其中的具体作用机理。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

聚丙烯腈树脂粉末: 相对分子质量 1.5×10^5 , 牌号 181315, Sigma-Aldrich 公司; N,N-二甲基甲酰胺: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 羧基化多壁碳纳米管: 外径 10~30 nm、长度 10~20 μm , 中科时代纳米有限公司。

静电纺丝机: NS Lab(Elmacro Ltd); 超声波发生器: HC-2000, 杭州嘉振超声波科技有限公司。

1.2 样品制备

配置质量分数为 10% 的 PAN/DMF 溶液, 室温磁力搅拌 10 h; 随后在 PAN/DMF 溶液里添加一定质量的 CNT, 超声处理 2 h、常温磁力搅拌 5 h, 制成均一

分散的混合溶液。CNT 质量分数分别为 0%, 1.0%, 2.0% 和 3.0%, 相应溶液编号为 S1, S2, S3 和 S4。设置纺丝接受距离为 15 cm、环境相对湿度为 30%、温度为 25 $^{\circ}\text{C}$, 调整纺丝电压和聚合物浓度, 持续纺丝 3 h, 最终获得不同 CNT 含量的复合纳米纤维膜, 编号分别为 M1, M2, M3 和 M4。

1.3 测试与表征

1.3.1 扫描电子显微镜表征: 加速电压 10 kV, 试样经真空镀金后采用荷兰 Phenon 公司 Phenon ProX 型场发射扫描电子显微镜观察不同质量分数的 CNT 在纳米纤维上的微观形貌和分散情况。

1.3.2 孔径及化学吸附分析: 采用美国 Quantachrome Corporation 公司生产的 Autosorb-IQ2 型全自动气体吸附仪对纤维膜进行分析, 研究 CNT 的引入对纳米纤维膜的比表面积和孔径分布的影响。

1.3.3 透气性测试: 采用美国 Zehntner 公司生产的 Gurley 4340 型自动透气度测试仪测定纳米纤维膜的透气性。

1.3.4 差示扫描量热分析: 在坩埚中放 5~10 mg 样品, 在氮气氛围下以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 从 25 $^{\circ}\text{C}$ 升温至 500 $^{\circ}\text{C}$, 用德国 NETZSCH 公司 NETZSCH DSC214 Polyma 仪器测量纤维膜的放热情况和出现放热峰的位置。

1.3.5 热重分析: 在坩埚中放 5~10 mg 样品, 在氮气氛围下以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 从 25 $^{\circ}\text{C}$ 升温至 950 $^{\circ}\text{C}$, 用德国

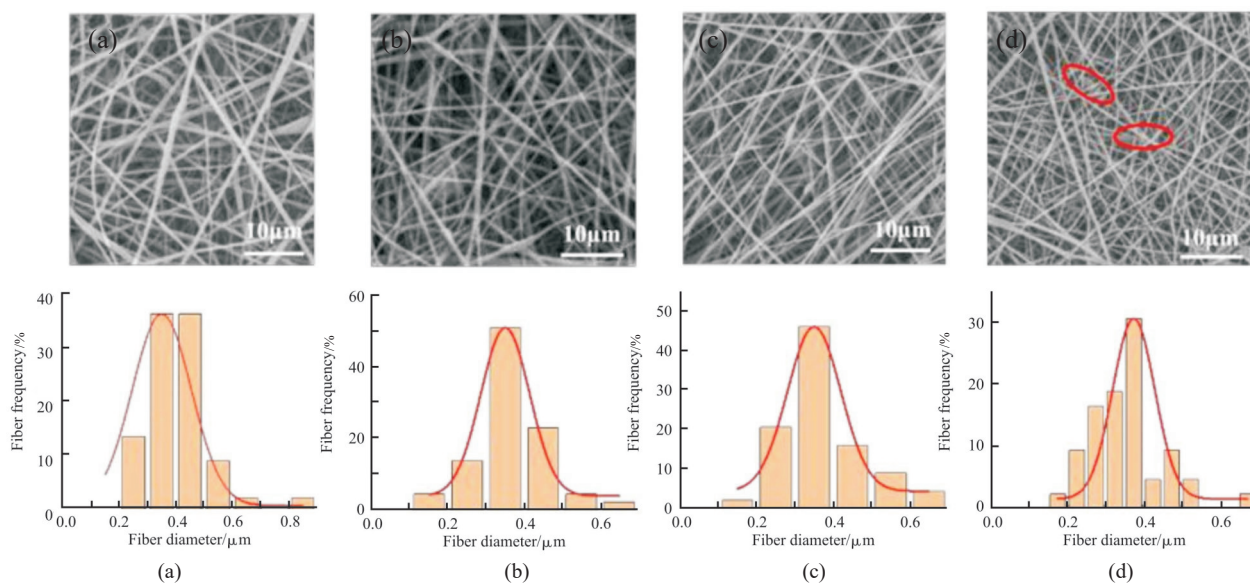


Fig. 1 Diameter distribution and SEM of PAN fiber of different CNT mass fractions
(a): 0%; (b): 1.0%; (c): 2.0%; (d): 3.0%

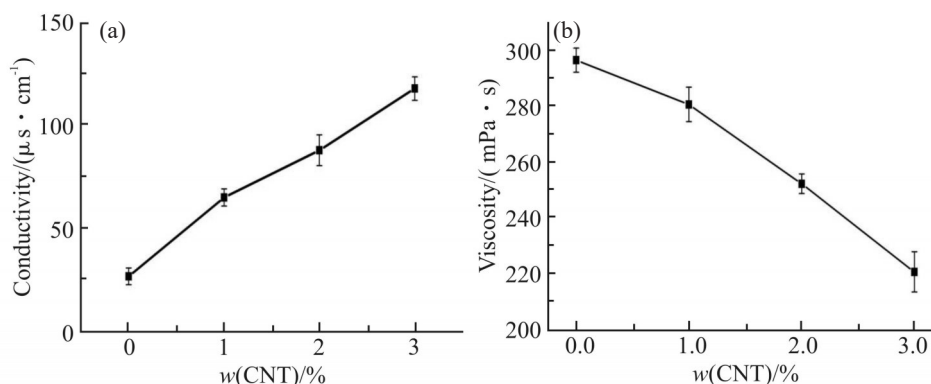


Fig. 2 (a)Conductivity and (b)viscosity of different CNT mass fractions

Tab. 1 Relevant parameters of different spinning samples

w(CNT)/%	Conductivity/($\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Viscosity/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	Fiber diameter/nm	Fiber diameter standard deviation
0	29.5	297.5	411	0.121
1	66.4	280.1	390	0.111
2	88.5	252.9	383	0.109
3	118.5	220.6	357	0.093

NETZSCH 公司 NETZSCH STA2500 Regulus 仪器进行热重分析,观察纤维膜在 950 °C 的质量损失率。

1.3.6 电阻测试:由苏州晶格 STA2588 型四探针测试仪测量纳米纤维膜的电阻。

2 结果与讨论

2.1 CNT 改性对 PAN 复合纳米纤维膜微观结构影响及机理

利用扫描电镜观察复合纳米纤维膜的微观形貌,结果如图 1 所示。随着 CNT 含量的增加,纤维直径逐渐变细,纤维粗细分布不均,纤维相交形成的孔隙变得致密。由 Fig.1(a) 可观察到纯 PAN 纳米纤维表面光滑无明显串珠,纤维随机分布构成三维网络结构,纤维膜孔隙相互连通。由 Fig.1(d) 发现,当 CNT 添加至 3% 时,其易在 PAN 纤维表面团聚,很少沿纤维轴有序排列。由于静电纺溶液本身的性质(如黏度、电导率,表面张力等)和实验过程的工艺参数(如电压、接收距离、溶液流量等)都会影响纤维的形貌^[10],因此对加入 CNT 后溶液的黏度和电导率进行了统计。由 Fig.2 和 Tab.1 可看到,随着 CNT 的加入,溶液的导电性由 30 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 提

升至 118 $\mu\text{s}/\text{cm}$,溶液黏度由 297 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 下降到 220 $\text{mPa} \cdot \text{s}$,经 Image J 软件统计,纤维直径由 (411 ± 15) nm 下降至 (357 ± 9) nm,离散度由 0.121 下降至 0.093,这说明 CNT 的添加有利于液滴在静电场中拉伸形成更均匀的纤维。CNT 加入后,溶液的导电性能增加,更多的电荷聚集在喷射线上,更大的电荷排斥力克服了表面张力,溶液黏度的下降也说明 CNT 的引入降低了大分子间的作用力,最后导致了纤维直径减小。因此经 CNT 改性后纤维直径变细,纤维拉伸得更均匀。

为了研究 CNT 的加入对复合纤维膜孔结构的影响,对纤维膜进行了氮气吸/脱附测试,其结果如图 3 所示。由 Fig.3(a) 可知,几组曲线均处于封闭状态,且曲线为 H3 型回滞环吸附等温线,没有明显的饱和和吸附平台,表明孔结构不完整。由 Fig.3(b) 所示,纳米纤维膜的比表面积随着 CNT 含量逐渐增加呈现先增大后减小的趋势,在 CNT 质量分数为 2% 时达到峰值,为 21.5 m^2/g ,这与 Fig.4 的孔容趋势一致。这说明 CNT 的加入使得纤维直径变细,纤维间交织形成的孔变大、孔容增大;而 CNT 质量分数为 3% 时,CNT 发生部分团聚,不利于在静电场中拉伸成纤维。

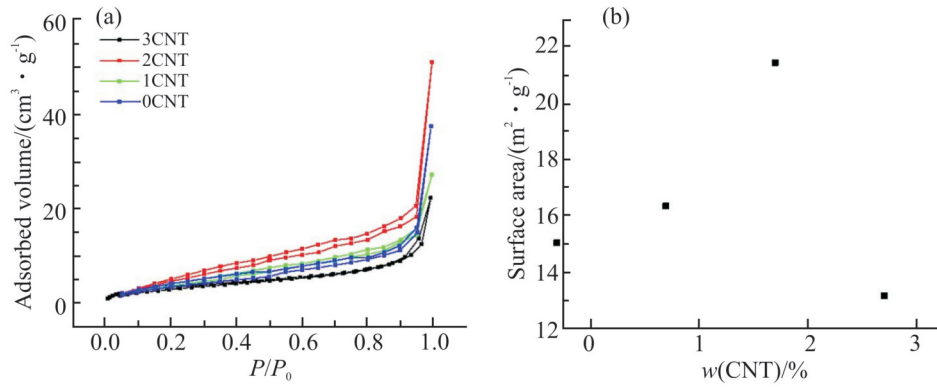


Fig. 3 (a)Pore volumes and (b)surface areas of different CNT mass fractions

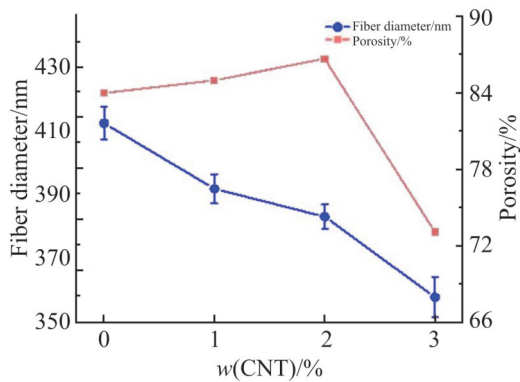


Fig. 4 Porosity and fiber diameter with different CNT mass fractions

由 Fig.3(a)可知,4组曲线均处于封闭状态,物理吸附机理表现为毛细凝结和多分子层吸附共同作用,不规则的孔结构与SEM形貌表征一致。Fig.3(a)显示的复合纤维膜的氮气吸附量与 Fig.3(b)中纤维膜的 BET 比表面积趋势一致,在 CNT 质量分数为 2%时,比表面积和总孔容都达到峰值。BET 的比表

面积实际是测定吸附质分子所能到达颗粒外表面和内部通孔总表面积之和,氮气吸附量反映了纤维膜的孔容,这些都与纤维膜的纤维直径相关。纤维直径变细后,通孔会变大,其总表面积之和及孔容都会变大,因此呈相同的变化趋势。结合 SEM 图发现,CNT 质量分数为 2%时,纤维间排布均匀,相互交织,层与层间堆叠有序,能形成较大的孔容和比表面积。

2.2 CNT 改性对 PAN 复合纳米纤维膜热稳定性的影响

为进一步研究 CNT 和 PAN 组分间受热情况时的相互作用,对其进行了热重和 DSC 分析。由 TG 图(Fig.5(a))可以将整个热失重阶段划分为 3 个阶段。第 1 阶段为微失重阶段(室温至 300 $^{\circ}\text{C}$),主要是样品中的水分和试剂挥发,小分子量低聚物的分解。当进入第 2 阶段(300~600 $^{\circ}\text{C}$)时,可以看到添加了 CNT 的复合纳米纤维膜的最大热分解温度升高。当添加 3%的 CNT 后,最大热分解温度从

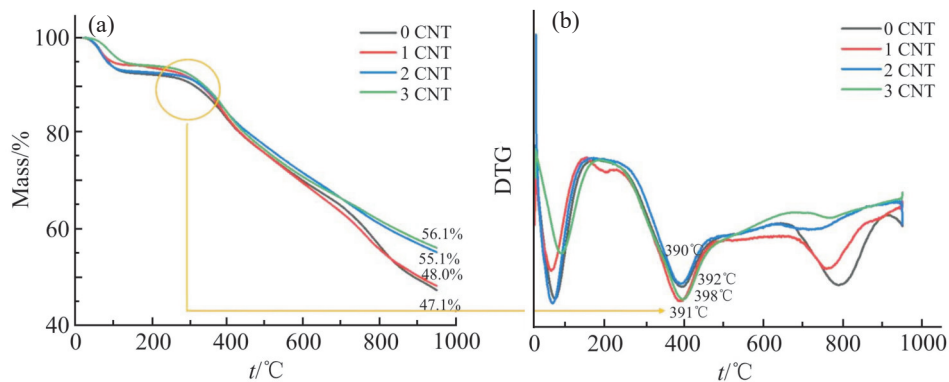


Fig. 5 (a)TG and (b)DTG curves with different CNT mass fractions

392 °C提升至398 °C。纳米纤维膜分解10%的温度随CNT含量的增加呈上升趋势,未加CNT分解10%的温度是311 °C;当CNT质量分数为1%时,分解温度上升为329 °C,进一步表明CNT的引入延缓了PAN的分解,纤维的热稳定性提高。由Fig.5(b)比较发现,CNT质量分数为1%和3%时,300~400 °C内的最大热分解速率可达1% min⁻¹;CNT质量分数为2%时,最大热分解速率为0.8% min⁻¹,这说明CNT质量分数为2%时,能延缓PAN的分解速率,进一步表明加入CNT后纤维膜的热稳定性提升。第3阶段(600~950 °C)主要是碳稳定阶段,可以看到添加CNT后的样品在950 °C时质量损失率降低,下降趋势平缓。以终止温度950 °C为界限,发现PAN基纤维膜的残碳率随着CNT含量的增加而增加,当CNT质量分数为2%和3%时,残碳率分别为55.1%和56.1%;当CNT质量分数为1%时,残碳率为48%。CNT质量分数为3%时,其在DMF中分散效果变差,与CNT质量分数为2%时,在PAN纳米纤维上的吸附量接近,因此在950 °C时,纤维膜的残碳率接近。CNT质量分数为1%时,CNT吸附在PAN上量少,经高温处理后纤维膜的残碳率提升不明显。这是因为CNT的加入会与PAN分子链发生缠绕,不利于PAN在高温下发生反应。同时,添加CNT的过程中会取代部分PAN分子的质量,使得纤维膜的残碳率上升。在整个升温阶段,聚丙烯腈的强吸电子基团—CN逐步反应为C=N基团,与原有的一C=C键形成共轭的五元环结构^[12],CNT吸附在PAN分子链上,阻碍了聚丙烯腈在高温环境下的热分解行为。在氮气氛围中,聚丙烯腈在高温时主要生成氨气、二氧化碳、氢氰酸、水等产物^[13,14]。

结合Fig.6的DSC数据发现,随着CNT添加量增加,曲线放热峰稍变宽,放热量减少,放热速率减

缓,这在一定程度上减小了后续预氧化过程中集中环化放热的可能。如果放热过于集中,就会造成预氧化过程中纤维膜温度骤升,使局部的大分子断裂,造成熔断。当在聚合物中添加了CNT后,具有特殊长径比结构的CNT在混合过程中与聚丙烯腈分子链相互缠绕,相互作用增强,形成强物理交联结构,聚丙烯腈分子链环化变难,放热量减少,预氧化进程缓解,最终提高了复合材料的热稳定性能。由Tab.3还能发现,随着CNT含量的增加,放热焓逐渐减小,环化的最大放热温度变化不明显,添加CNT后PAN基纤维膜的热稳定性提高。

Tab. 2 Relevant thermal parameters of different samples

Sample	$T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_p/^{\circ}\text{C}$	Carbon yield/%
M ₁	311	392	47.1
M ₂	329	391	48.0
M ₃	331	390	55.1
M ₄	338	398	56.1

T_p : quickest thermal decomposition temperature;
 $T_{10\%}$: temperature at which the substance decomposes 10%

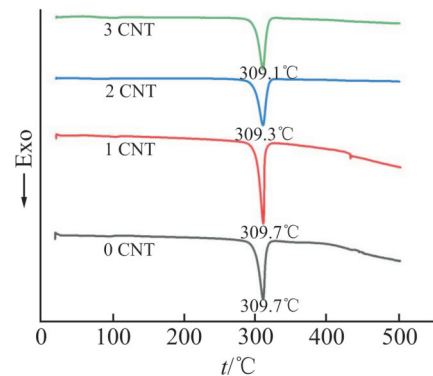


Fig. 6 DSC curves with different CNT mass fractions

2.3 CNT改性对PAN纳米纤维膜透气性的影响

Tab. 3 Thermal properties for different samples

Sample	$T_i/^{\circ}\text{C}$	$T_p/^{\circ}\text{C}$	$T_f/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$(\Delta H/\Delta T)/((\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}))$
M ₁	282.0	309.5	316.6	567.3	16.4
M ₂	286.5	309.8	318.5	558.1	17.4
M ₃	286.3	309.3	318.4	484.2	15.1
M ₄	287.6	309.1	320.0	461.2	14.2

T_c : peak of cyclization temperature; ΔH : enthalpy; T_i : starting temperature; T_f : termination temperature

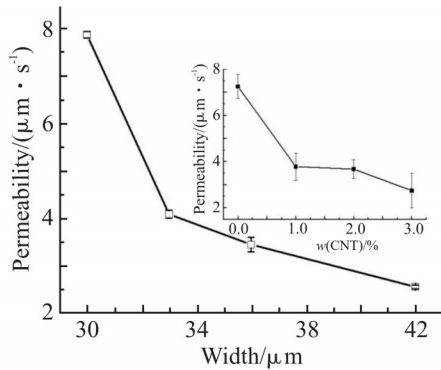


Fig. 7 Permeability of fiber membranes

用透气仪测量纤维膜的透气性,研究CNT加入后纤维膜透气性的变化。如图7所示,当膜厚从30 μm 到32 μm ,透气率从7.85 $\mu\text{m}/\text{s}$ 下降到4.03 $\mu\text{m}/\text{s}$,之后随着厚度的增加、CNT含量的增加,透气率下降逐渐趋于缓和。由SEM图观察到,CNT加入后纤维直径变细,纤维间形成的孔隙变窄变密,孔隙率呈现先变大后减小的趋势也逐渐势,最大可达86%。随着纺丝时间的延长,纤维相互黏结的几率增大,纤维膜容易堆叠促使纳米纤维膜的屈曲状孔增多,而直接连通状的孔径减少,导致膜的透气性随着厚度的增加而下降。随着CNT浓度的增加,纤维膜的透气性也有所提升,这是因为CNT增加后,纤维直径变细,使得纤维膜中的贯通孔变大,增大了纤维膜的透气性。

2.4 CNT改性对PAN纳米纤维膜导电性的影响

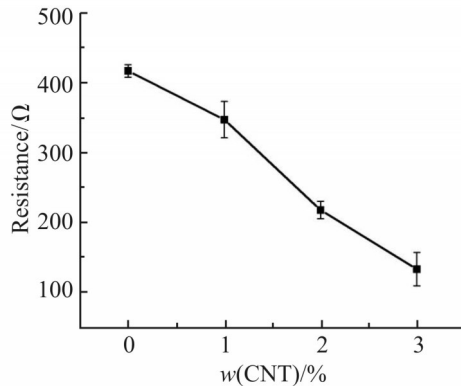


Fig. 8 Resistance of different CNT concentrations

用四探针仪测定了纤维膜的电阻,研究了CNT加入量对复合材料导电性的影响以及导电机理。鉴于CNT增强聚合物基质出现的渗流行为,即CNT含量达到一定阈值后其导电性会突增,故设置了4个CNT质量分数值(0%,1%,2%和3%),研究其对复合纤维膜的导电性影响。目前,常用2种导电机理来解释这种渗流行为^[15],一种是纳米尺度的电子

跃迁,另一种是微观尺度上导电网络的构建。如图8所示,当CNT含量较低,CNT间距离相隔较远,在DMF中分散较好,材料导电性的提高一般为电子跃迁,材料电阻仍比较大。CNT添加至2%时,CNT间距离变小,出现了流变阈值,相邻的CNT间接触点增加形成了较好的微尺度导电网络,导电网络决定了复合材料的导电性,载流子通过CNT间具有最低接触电阻和最短长度的导电路径移动,复合材料的电阻由346 Ω 骤降到201 Ω 。而当CNT质量分数添加到3%时,CNT在DMF中分散性变差,造成了部分CNT与原形成的导电路径存在间隙,不利于导电网络的构建,电阻下降减缓。

3 结论

本文采用静电纺丝的方法制备了不同CNT浓度的PAN纳米纤维膜,研究CNT的引入对纳米纤维膜微观结构、导电性、热稳定性、透气性和孔隙率的影响,为静电纺丝法制备碳纤维纸提供可行性。

(1)随着CNT质量分数的增加,溶液的电导率提升,经相同电压的电场拉伸后,纳米纤维膜的纤维直径减小、纤维分布更加均匀;复合纳米纤维膜的放热焓减小,热稳定性提升。

(2)复合纳米纤维膜的透气性随厚度的增加而减小;纤维膜的孔隙率随着CNT质量分数的增加呈现先增大后减小的趋势,CNT质量分数为2%时,孔隙率最高可达86%。

(3)用静电纺丝法制备经CNT改性的碳纤维纸前驱体,提升了原有纤维纸的热稳定性和导电性,实现了碳纤维纸性能的调控,与湿法造纸的工艺相比甚为简化,为碳纤维纸国产化提供了可行性。

参考文献:

- [1] Yang Y G, Zhou X Y, Li B. Recent progress of the gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells[J].International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46: 4259-4282.
- [2] Gao Y, Jin T, Wu X Y, *et al.* The effect of fiber orientation on stochastic reconstruction and permeability of a carbon fiber paper gas diffusion layer[J]. Energies, 2019, 12: 2808.
- [3] Ozden A, Shangaldi S, Li X G. A review of gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells with a focus on characteristics materials and designs[J].Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 74: 50-102.
- [4] 尹绍峰. 质子交换膜燃料电池用碳纸制备工艺改进研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2017.

- Yin S F. Research on improvement of carbon paper preparation process for proton exchange membrane fuel cells [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2017.
- [5] Teresa M, Marta B, Izabella P. Effect of spinning conditions on the structure and properties of PAN fibers containing nano-hydroxyapatite[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 100: 2881-2889.
- [6] Zhang D W, Huang Y, Chia L. Effects of carbon nanotube(CNT) geometries on the dispersion characterization and adhesion properties of CNT reinforced epoxy composites[J]. *Composite Structure*, 2022, 296, 115942.
- [7] Beenish, Inamuddin, Asiri A M. Electrospun polyaniline/polyvinyl alcohol/multiwalled carbon nanotubes as promising bio anode material for biofuel cells[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017, 789: 181-187.
- [8] King S G, Terrill N J, Goodwin A J. Probing of polymer to carbon nanotube surface interactions within highly aligned electrospun nanofibers for advanced composites[J]. *Carbon*, 2018, 138: 207-214.
- [9] Renz F, Ali A B, Slawig D. Mechanical flexible PI/MWCNTs nanocomposites with high dielectric permittivity by electrospinning[J]. *European Polymer Journal*, 2014, 59: 129-135.
- [10] Du F P, Ye E Z, Yang W, *et al.* Electroactive shape memory polymer based on optimized multi-walled carbon nanotubes/polyvinyl alcohol nanocomposites[J]. *Composites*, 2018, 68: 170-175.
- [11] Theron S A, Zussman E, Yarin A L. Experimental investigation of the governing parameters in the electrospinning of polymer solutions[J]. *Polymer*, 2004, 45: 2017-2030.
- [12] 王春华, 樊亚玲, 陈肖寒, 等. 聚丙烯腈纳米纤维膜连续预氧化炭化过程中的结构性能演变[J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38(2): 101-108.
- Wang C H, Fan Y L, Chen X H, *et al.* Evolution of structural properties during continuous pre-oxidation and carbonization of polyacrylonitrile nanofiber membranes[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2022, 38(2): 101-108.
- [13] Szepcsik B, Pukanszky B. The mechanism of thermal stabilization of polyacrylonitrile[J]. *Thermochemica Acta*, 2019, 671: 200-208.
- [14] Arbab S, Teimoury A, Mirbaha H, *et al.* Optimum stabilization processing parameters for polyacrylonitrile based carbon nanofibers and their difference with carbon fibers[J]. *Polymer Degradation & Stability*, 2017, 142: 198-208.
- [15] Wang L S, Peng W X, Sarafbidabad M, *et al.* Explanation of main tunneling mechanism in electrical conductivity of polymer/carbon nanotubes nanocomposites by interphase percolation[J]. *Polymer Bulletin*, 2019, 76: 5717-5731.

Preparation and Characterization of Carbon Nanotube-Modified Polyacrylonitrile Nanofiber Membrane

Hefeng Hu, Jin Tao, Mingming Yu, Lin Fang, Wang Xie, Musu Ren, Yinping Tao
(School of Material Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

ABSTRACT: Polyacrylonitrile (PAN) nanofiber paper has the characteristics of high porosity and three-dimensional connectivity. After carbonization, carbon fiber paper can be used in fuel cell proton exchange membrane. Improving the performance of PAN nanofibers helps to obtain high-quality carbon fiber paper. In this paper, carbon nanotube (CNT) was used to reinforce polyacrylonitrile and CNT/PAN nanofiber membranes were prepared by electrospinning. The effects of CNT on the microstructure, thermal stability and conductivity of the fiber membranes were studied. The SEM images and thermal stability of the fiber membranes were analyzed. The results show that when the mass fraction of CNT is 2%, the porosity and specific surface area of the fiber membrane are 86% and 21.1 m²/g, respectively. Compared with the fiber membrane without CNT, the resistance of the fiber membrane is decreased by 40%, and the maximum thermal decomposition temperature increases by 6 °C. This study laid a foundation for the preparation of high-performance carbon fiber paper precursors for batteries.

Keywords: electrospinning; polyacrylonitrile; carbon nanotube; microstructure; thermal stability