

静电纺丝制备瓜尔胶超细纳米纤维及其性能

张一航, 郭 静, 管福成, 张 欣, 李 政, 张 森

(1. 大连工业大学 纺织与材料工程学院, 辽宁 大连 116034; 2. 辽宁省功能纤维及复合材料工程技术中心, 辽宁 大连 116034)

摘要:为制备直径小于100 nm的瓜尔胶(GG)狭义纳米纤维, 解决其难以静电纺丝的问题, 以十六烷基二甲基乙基溴化铵(EHDAB)为表面活性剂、氯化钙(CaCl_2)为强电解质, 静电纺制备了GG纳米纤维。通过接触角测量仪悬滴法、电导率仪和旋转流变仪考察了EHDAB和 CaCl_2 质量分数对纺丝液表面张力、电导率和黏度的影响; 采用扫描电子显微镜、接触角测量仪座滴法和琼脂平皿扩散法分别表征了纳米纤维的形貌、水接触角和抗菌性。结果表明, CaCl_2 可以显著增大溶液电导率、强化电场力、提高纺丝效率; 随EHDAB和 CaCl_2 质量分数增加, 表面张力和黏度整体呈降低趋势; GG, EHDAB和 CaCl_2 质量比为0.9:0.2:0时, 纤维平均直径最小, 为40 nm; 纳米纤维膜的最大拉伸强度为9 MPa, 最小接触角为 23° , 亲水性好且具有抗菌性。

关键词: 瓜尔胶; 静电纺丝; 阳离子表面活性剂; 超细; 抗菌

中图分类号:

文献标识码: A

文章编号: 1000-7555(2022)07-000

静电纺丝(电纺)纤维细化会显著改变其孔隙结构、表面功能和力学性能^[1], 在超级电容器^[2]、高性能器件^[3]、催化^[4]、组织工程^[5]和药物输送^[6]等应用领域均起到积极的作用, 基于此, 电纺超细化的狭义纳米纤维(纤维直径小于100 nm)已成为改善材料性能的重要方法之一。大量研究表明, 通过溶液性质、电纺工艺参数、环境条件等因素可以影响纤维的直径及其分布, 但直径仍多为亚微米级, 细化效果并不理想, 因此, 空气辅助、离心辅助和纤维后处理成为电纺狭义纳米纤维的主要策略。龙云泽等^[7]采用高压气流辅助电纺纤维平均直径可达68 nm, 常规电纺纤维则为263 nm。Müller等^[8]采用离心与气流辅助电纺聚乳酸纤维, 纤维直径从常规电纺的 (525 ± 76) nm降为 (66 ± 27) nm。陈俊太等^[9]对电纺聚苯乙烯纤维毡在玻璃化转变温度进行单轴热拉伸, 拉伸倍率为2.67, 纤维直径由1220 nm降为550 nm。当前, 耦合场辅助电纺和纤维后处理能够提高纤维细化程度, 但其模型和机理尚未健全, 且技术难度大, 使电纺狭义纳米纤维仍是一个巨大的

挑战^[10]。电纺的溶液性质有一个值得关注的现象, 低浓度聚合物溶液分子链间纠缠更容易被切断, 成纤后直径会降低, 但黏度也相应降低, 出现珠状纳米纤维, 导致成纤效果变差。此外, 纺丝溶液中加入盐可以显著提高溶液的导电性, 使纤维在电场中受到强拉伸而进一步细化^[11]。综上所述, 采用低浓度、高黏度和高电导率的电纺溶液是获得非珠状狭义纳米纤维的新思路。瓜尔胶(GG)是由D-甘露糖为主链、D-半乳糖为支链的中性水溶大分子多糖, 由于良好的生物相容性和低抗原性, 在生物医用领域得到了广泛的应用。GG分子量高、水溶解性好, 低浓度即可达到静电纺丝所需的链缠结, 单位体积分子链数目小更利于减小纤维直径^[12], 有望通过电纺制备小于100 nm的狭义纳米纤维, 但GG是非离子型多糖, 水溶液表面张力大、电导率低, 导致静电纺丝困难。因此, 瓜尔胶还只能作为改性剂用于静电纺丝, Yang等^[13]采用单宁酸和GG质量比为5:1静电纺制备食品级抗氧化材料, 但以GG为主体进行静电纺丝制备纤维膜尚未见报道。本文提出“强化

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0142

收稿日期: 2021-12-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51773024); 国家先进纤维创新中心(2021-fx0100207); 辽宁省教育厅科学研究项目(J2020047)(CCFA-LVYU-9-02)

通讯联系人: 郭静, 主要从事高分子材料改性与成型加工技术研究, E-mail: guojing8161@163.com; 管福成, 主要从事高分子材料改性与成型加工技术研究, E-mail: gfc6322577@163.com

电场力弱化内聚力”的方法,通过加入阳离子表面活性剂降低溶液表面张力和无机盐增加溶液电导率,实现了GG的静电纺丝。考察了CaCl₂和十六烷基二甲基乙基溴化铵(EHDAB)质量分数对GG溶液表面张力、电导率、黏度和Zeta电位的影响,并对GG纳米纤维膜的表面形貌、力学性能、接触角和抗菌性进行表征,为今后静电纺非离子型多糖和制备狭义纳米纤维提供理论和实践参考。

1 实验部分

1.1 材料

GG: 多糖含量不少于80%,天津市光复精细化工研究所; EHDAB: 纯度为98%,阿拉丁生化科技股份有限公司; CaCl₂, 分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司; 大肠杆菌、金黄色葡萄球菌: 广东省微生物保藏中心。

1.2 制备过程

室温条件下,按照 Tab.1 将 EHDAB, CaCl₂ 和 GG 依次加入 100 mL 水中,搅拌溶解 2 h,再将溶液倒入离心管中,转速 6000 r/min 离心脱泡 5 min,得到纺丝液,最后静电纺制备 GG 超细纳米纤维膜。静电纺丝条件为: 环境温度为(40±5) °C、相对湿度为(10±5) %、静电压为 28 kV、接收板距离为 15 cm、流量为 2.0 mL/h。

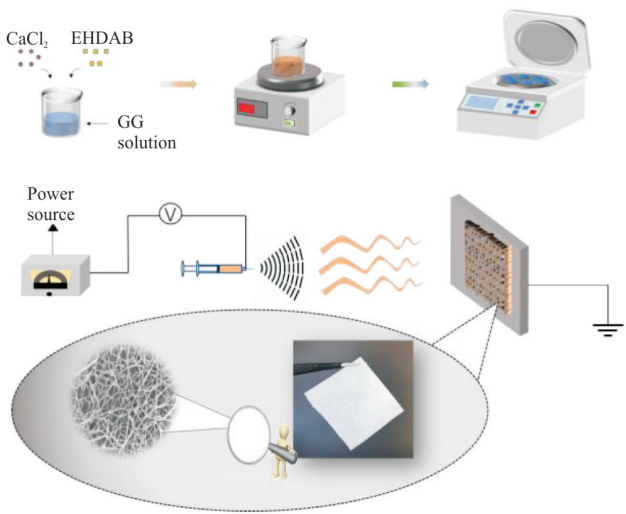


Fig.1 Flowchart of the preparation of GG narrow nanofiber membrane

1.3 GG 溶液性质测试与表征

1.3.1 表面张力测试: 采用 DSA25 型接触角测量仪(克吕士科学仪器有限公司)悬滴法测量溶液的表面张力。

1.3.2 电导率测试: 采用雷磁 DDB-303A 便携式电导率仪(上海仪电科学股份有限公司)测量溶液的电导率。

1.3.3 Zeta 电位测试: 采用 Zetasizer 3000HSA 激光粒度仪(英国 Malvern 仪器公司)测量溶液的 Zeta 电位。

Tab. 1 Proportions of GG/EHDAB/CaCl₂ solution

NO.	w(GG)/%	w(EHDAB)/%	w(CaCl ₂)/%	Zeta potential/mV	Spinnability
1	0.9	0	0	0.5	No
2	0.9	0.2	0	2.4	Good
3	0.9	0.2	0.1	3.9	Good
4	0.9	0.2	0.2	2.8	Bad
5	0.9	0.2	0.3	2.5	Bad
6	0.9	0.2	0.4	2.5	Bad
7	0.9	0	0.1	1.7	No
8	0.9	0.1	0.1	2.4	Good
9	0.9	0.3	0.1	2.6	Bad
10	0.9	0.4	0.1	2.4	Bad

1.3.4 黏度测试:采用 DHR-2 旋转流变仪(美国 TA 公司)测量溶液黏度,剪切速率为 $0.2 \sim 1000 \text{ s}^{-1}$,温度为室温。

1.4 GG 纳米纤维膜结构表征和性能测试

1.4.1 表面形貌观测:采用 JSM-7800F 型扫描电子显微镜(日本电子)观察纤维膜的表面形貌。观察前纤维膜需要进行喷金处理,加速电压为 10 kV ,放大倍数为 1×10^4 倍。

1.4.2 红外(FT-IR)分析:采用 Spectrum-OneB 型红外光谱仪(美国 PE 公司)KBr 方法测试,扫描波数范围为 $400 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$,分辨率为 1 cm^{-1} 。

1.4.3 接触角测试:采用 DSA25 型接触角测量仪(克吕士科学仪器有限公司)测量纤维膜的接触角。

1.4.4 力学性能测试:采用电子单纤强力机(常州市第一纺织设备有限公司)测试纤维膜的拉伸强度和断裂伸长率,将样品裁剪成 $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 长条,拉伸速度为 10 mm/min ,测量 10 次取平均值。

$$\sigma = \frac{F}{M\delta} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{L}{L_0} \quad (2)$$

式中: σ ——断裂强度, MPa; F ——断裂强力, N; M ——样品宽度, mm; δ ——样品厚度, mm; ϵ ——断裂伸长率, %; L_0 ——初始长度, mm; L ——断裂长度, mm。

1.4.5 抑菌性能测试:将 GG 纳米纤维膜裁剪成半径 10 mm 的圆形,放置于涂有金黄色葡萄球菌、大肠杆菌的琼脂培养基表面,在 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ 恒温培养箱中培养 24 h 后,观察培养皿中纳米纤维膜周围的抑菌圈大小,比较纳米纤维膜的抑菌性能。

2 结果与讨论

2.1 溶液表面张力分析

由 Fig.2(a)可知,随 EHDAB 质量分数提高,溶液表面张力整体呈下降趋势。但在 EHDAB 加入量为

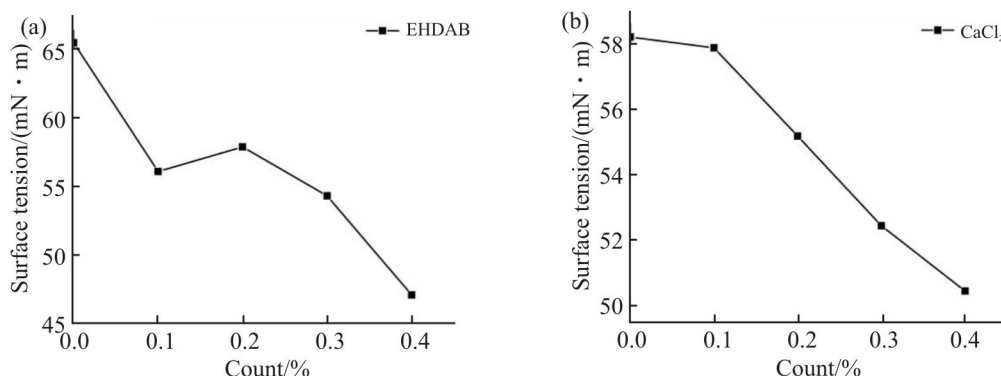


Fig.2 Surface tension diagram of GG solution

0.2%时,表面张力略有增加,溶液表面张力下降的原因是 EHDAB 分子具有两亲性,其极性基一端受到水分子的拉力,使其在溶液表面做定向排列,而非极性基一端与气相亲和,表面张力很小,所以溶液表面张力降低;EHDAB 为 0.2%时,表面张力的反弹与 EHDAB 与 GG 分子间的相互作用有关,这种相互作用限制了 EHDAB 在溶液表面的定向排列,使得表面张力上升,继续增加 EHDAB,这种影响弱化,溶液表面张力减小,这与文献^[14]结果一致。

由 Fig.2(b)可知, CaCl_2 质量分数提高,溶液表面张力下降。这是因为 CaCl_2 与水分子之间存在较弱的络合作用,其存在有弱化水分子和水分子与 GG

氢键的作用,导致溶液表面张力下降。

纯 GG 溶液表面张力为 67.01 mN/m , $\text{CaCl}_2/\text{EHDAB}$ 为 $0/0.2\%$ 与 $\text{CaCl}_2/\text{EHDAB}$ 为 $0.2/0\%$ 时, GG 溶液表面张力分别为 58.21 mN/m 和 60.92 mN/m ,说明 EHDAB 对降低溶液表面张力较 CaCl_2 更有效。

2.2 电导率分析

由 Fig.3 可知,随着 CaCl_2 和 EHDAB 质量分数增加,GG 纺丝溶液的电导率均增加,但相比 EHDAB, CaCl_2 提升电导率的效率更高,效果更明显。这是因为 EHDAB 在水溶液中电离程度较小,是弱电解质,而 CaCl_2 则是强电解质,电离程度相对较大,但相较纯 GG 水溶液(电导率 0.12 ms/cm)均有所增加。电

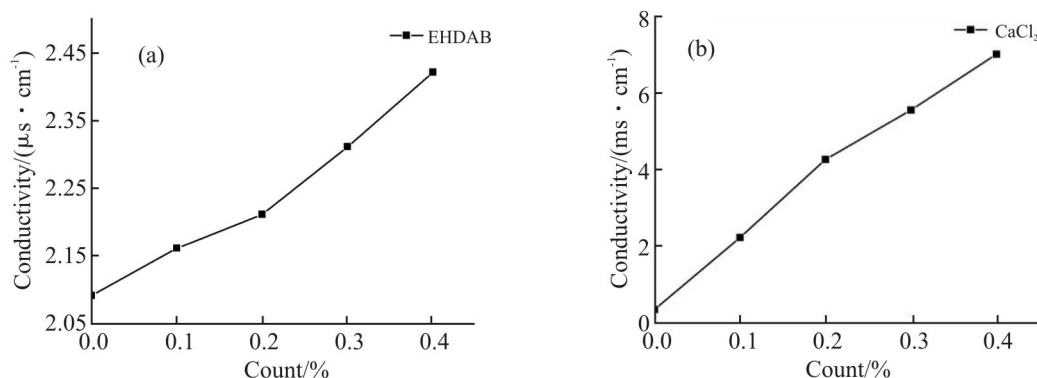


Fig.3 Conductivity diagram of GG solution

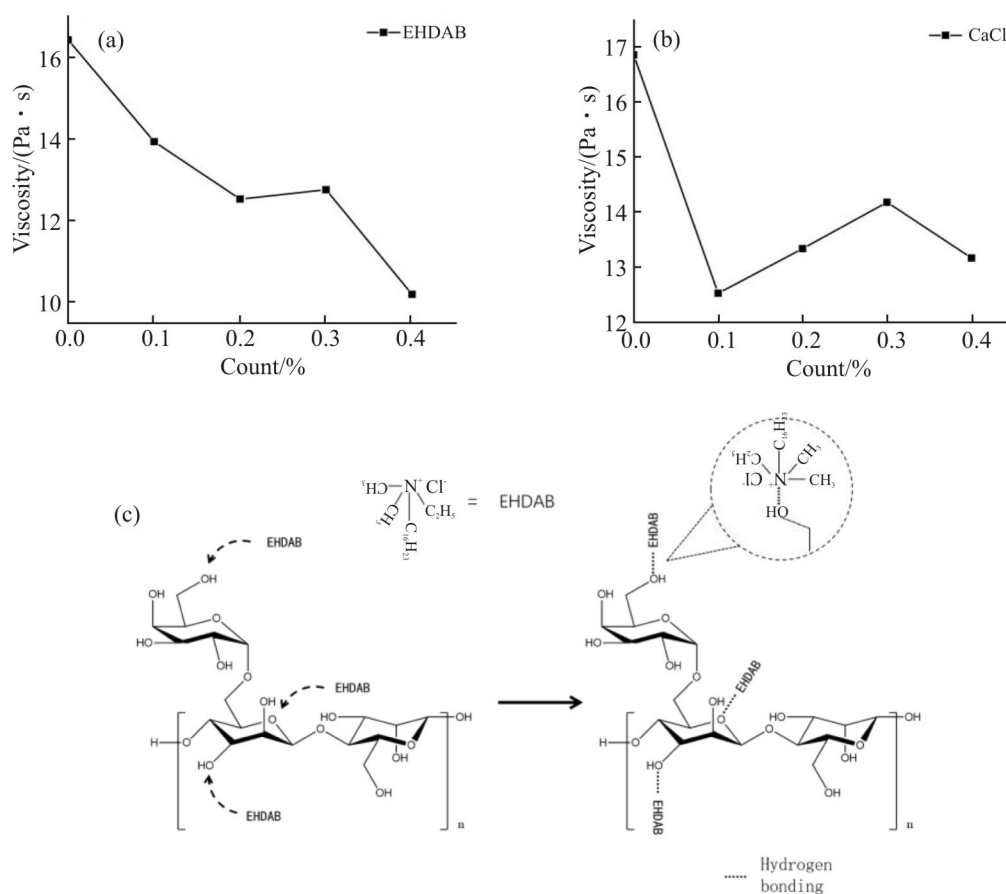


Fig.4 (a,b)GG solution viscosity and (c)interaction between EHDAB and GG

导率增加使GG溶液在静电场中表面电荷密度得到提升^[15],从而受到足够的电场力能够克服溶液表面张力束缚,形成有效射流,实现静电纺丝。EHDAB的引入对溶液电导率影响较弱,溶液电导率的增加是 $CaCl_2$ 起主要作用。

2.3 溶液黏度分析

由Fig.4(a)可知,EHDAB质量分数提高,溶液黏度整体呈下降趋势。因为EHDAB分子中带正电

的氮原子可以与GG分子中处于 sp^3 杂化的烷氧基、羟基、糖苷键上的氧原子形成氢键,将GG分子包裹起来^[16],破坏了GG分子之间原有的氢键,使得GG分子之间的相互作用减弱,缠结几率降低,溶液黏度降低。

由Fig.4(b)可知, $CaCl_2$ 对溶液黏度的影响是先增大再减小,在 $CaCl_2$ 质量分数为0.3%时有最大值14 Pa·s,小于不加 $CaCl_2$ 时的16.7 Pa·s,说明 $CaCl_2$ 有

降低 GG 溶液黏度的作用。降低黏度的原因是 CaCl_2 为电解质,其存在会导致 GG 有效尺寸减小,分子间缠结几率降低,黏度下降; CaCl_2 的加入量从 0.1 增加到 0.3 时,溶液黏度增加的原因是钙离子与 GG 分子链中活泼的羟基形成较弱的络合作用,此外, CaCl_2 溶于水后形成正负离子,对 GG 具有挤压作用,使其溶解度减小、溶液黏度升高,因此从整体上看, CaCl_2 和 EHDAB 可降低 GG 溶液黏度,溶液流动性提高,同时,相较于 CaCl_2 ,EHDAB 对溶液黏度的影响更大。

2.4 表面形貌分析

由 Fig.5 可知,GG 纳米纤维膜无明显的串珠和缺陷存在,具备较好的微观形貌,平均直径均小于 100 nm,是真正意义上的纳米纤维。不加 CaCl_2 ,纤维最大直径为 80 nm;最小直径为 20 nm,加入 CaCl_2 后,GG 纤维最大直径提高到 170 nm;最小直径提高到 40 nm,平均直径从 40 nm 提升到 80 nm。这是因为 CaCl_2 电离出阴阳离子,挤压 EHDAB 离子使溶液黏度增加,溶液拉伸变形难度增加,其次电导率迅

速升高,使溶液表面电荷增加过多,从针头出来的溶液喷射量增加,导致纤维直径增大^[17]。

2.5 FT-IR 分析

由 Fig.6 可知,GG 曲线在 3410 cm^{-1} 对应—OH 的伸缩振动、 2930 cm^{-1} 对应—CH 的伸缩振动、 1020 cm^{-1} 对应—O—的伸缩振动^[18]; GG/EHDAB/ CaCl_2 曲线的特征吸收峰是 GG 和 EHDAB 的叠加,没有新峰出现说明二者没有发生化学反应;在 $3000\sim 3800\text{ cm}^{-1}$ 处波段的吸收峰强度略有变化,这是因为 GG 羟基的氢原子与 EHDAB 的氮原子产生氢键作用。在 Origin9.1 中,采用 Savitzky-Golay 方法将 $3000\sim 3800\text{ cm}^{-1}$ 处的峰进行红外分峰拟合,通过二阶导数光谱确定了不同类型的氢键,结果如图 Fig.6 和 Tab.2 所示。其中峰面积即不同类型氢键的含量,如 Tab.2 最后 2 列所示,GG 与 GG 纤维膜中,GG 的分子间氢键含量更低。同时,游离羟基的数量几乎没有变化。结果表明,EHDAB, CaCl_2 与 GG 分子相互作用影响了 GG 分子与水分子间氢键数量^[19]。

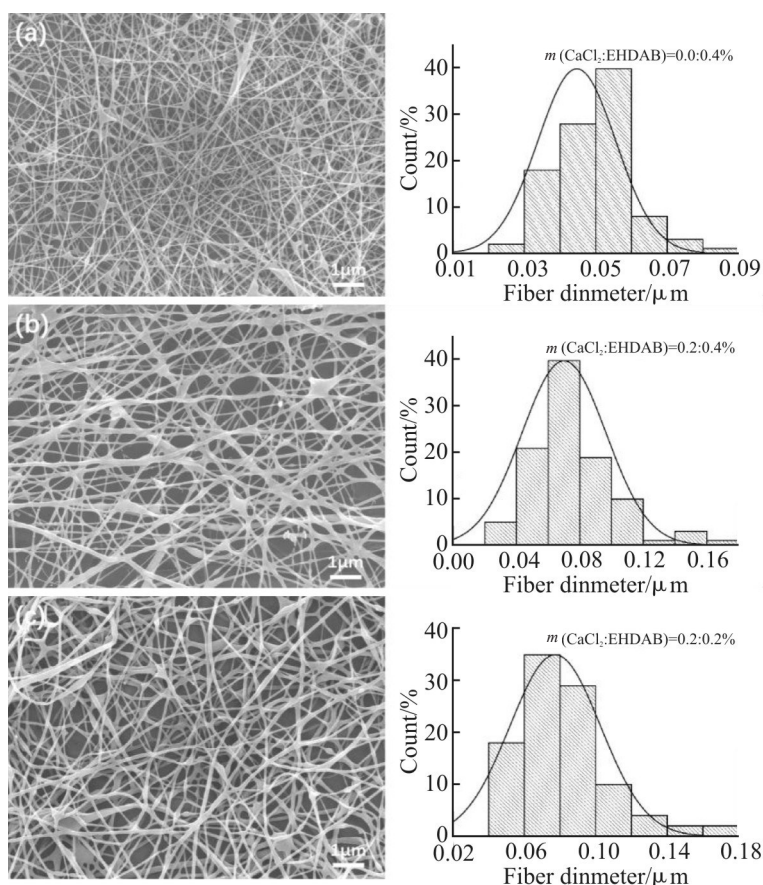


Fig.5 Scanning electron microscopy and diameter distribution of GG nanofiber membrane

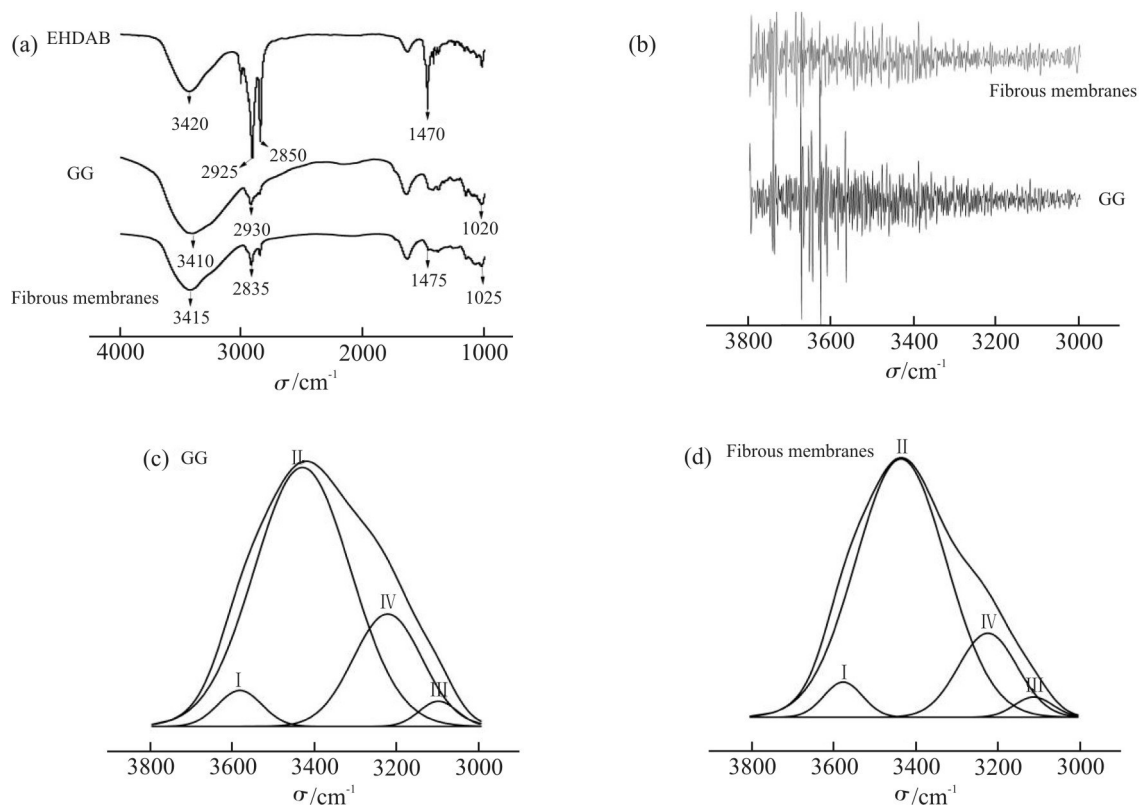


Fig.6 Infrared spectra of the samples

Tab.2 Hydrogen bond fitting results of GG/fibrous members

Sample	Hydrogen bond types		Abbreviations	Wave number/cm ⁻¹	Average peak area	Relative strength/%	
GG	Free hydroxyl	I	—OH	3586	4.82	4.51	4.51
	Intramolecular	II	OH···OH	3434	75.75	70.87	73.56
	Hydrogen bond	III	Annular polymer	3103	2.88	2.69	
	Hydrogen bond	IV	OH···ether O	3226	23.43	21.92	21.92
Fibrous members	Free hydroxyl	I	—OH	3573	2.92	4.46	4.46
	Intramolecular	II	OH···OH	3431	50.3	76.83	79.34
	Hydrogen bond	II	Annular polymer	3107	1.65	2.51	
	Hydrogen bond	IV	OH···ether O	3219	10.59	16.18	16.18

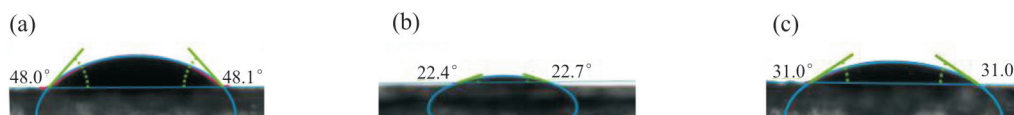


Fig.7 Photograph of water contact Angle of GG nanofiber membrane

(a): $m(\text{CaCl}_2):m(\text{EHDAB})=0:0.4\%$; (b): $m(\text{CaCl}_2):m(\text{EHDAB})=0.2:0.4\%$; (c): $m(\text{CaCl}_2):m(\text{EHDAB})=0.2:0.2\%$

2.6 接触角分析

Fig.7 示出 3 种 GG 纳米纤维膜的水接触角分别为 48° , 22.4° 和 31° , 说明其具有良好的亲水性。对比 Fig.7 与 Fig.5 可知, 随着纤维直径、孔径上升, GG 纤维膜比表面积降低、接触角随之降低^[20], 同时, 与

不添加 CaCl_2 的 GG 纤维膜相比, CaCl_2 具有良好的吸湿性, 使得纤维膜接触角进一步降低。

2.7 力学性能分析

Tab.3 示出 3 种 GG 纳米纤维膜的拉伸强度分别为 9.0 MPa , 2.7 MPa 和 4.3 MPa , 断裂伸长率分别为

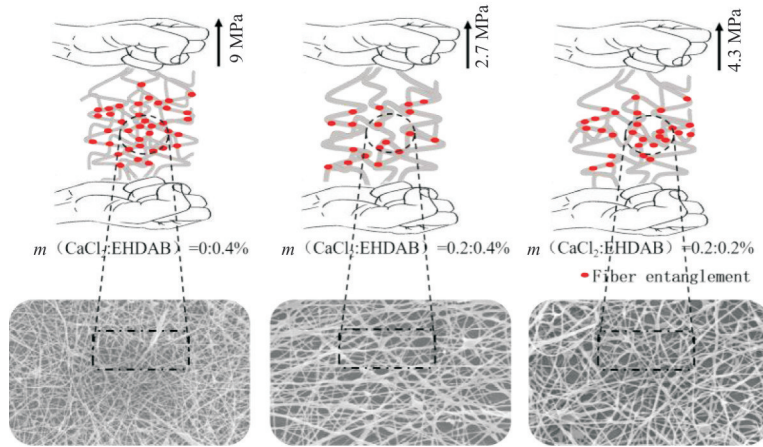


Fig.8 Mechanism of GG nanofiber membrane strength

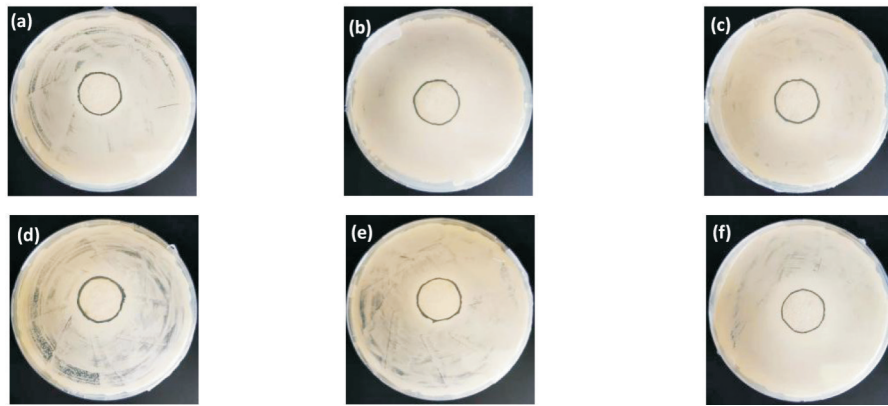


Fig.9 Inhibitory ability of GG nanofiber membranes against (a,b,c) *E. coli* and (d,e,f) *Staphylococcus aureus*
(a),(d): $m(\text{CaCl}_2):m(\text{EHDAB}) = 0.0:0.4$; (b),(e): $m(\text{CaCl}_2):m(\text{EHDAB}) = 0.2:0.4$; (c),(f): $m(\text{CaCl}_2):m(\text{EHDAB}) = 0.2:0.2$

9.01%, 17.85%和14.8%。说明 CaCl_2 质量分数增加会导致纳米纤维膜拉伸强度下降、断裂伸长率增加,因为 CaCl_2 质量分数增加,纳米纤维直径增加,单位面积纤维缠结度下降,有效承力纤维数减少,拉伸强度下降。其断裂机理如图8,此结果与SEM结果一致。

Tab.3 Breakage strength and elongation at break of GG nanofiber membrane

$m(\text{CaCl}_2):$ $m(\text{EHDAB})$	Tensile strength/ MPa	Elongation at break/%
0.0:0.4	9.0	9.01
0.2:0.4	2.7	17.85
0.2:0.2	4.3	14.80

2.8 抑菌性能测试

Fig.9(a~c)为GG纳米纤维膜对大肠杆菌的抑制效果, Fig.9(d~f)为GG纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌的抑制效果。可以看出,每个试样周围均具有

抑菌圈,说明各GG纳米纤维膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均有一定的抑制能力,这是因为携带正电荷的EHDAB可以与携带负电荷的细菌细胞壁相互吸引,正负电荷分布不均匀而造成细胞壁破裂,细菌因细胞质流出逐渐萎缩,直至死亡。

3 结论

(1) CaCl_2 可以增加溶液电导率使溶液表面电荷密度增加进而强化了电场力,EHDAB可以降低溶液表面张力使溶液内聚力减小,即通过“强化电场力弱化内聚力”的方法实现了GG静电纺丝。

(2)GG纤维平均直径均小于100 nm是狭义纳米纤维,GG、EHDAB和 CaCl_2 质量比为0.9:0.2:0.4时,接触角最小为23°,说明其具有优异的亲水性和吸湿性。

(3)GG纤维膜具备优良的抗菌性能,将会在医

用敷料、抗菌纱布和单向导湿医用纺织品等领域有着广泛的应用。

参考文献:

- [1] Chaudhuri S, Wu C M, Chiu Y C, *et al.* Highly sensitive electrospun poly (HEMA-co-NMA)/BPDO nanofiber membranes for sensing metal ions in aqueous media[J]. *eXPRESS Polymer Letters*, 2021, 15: 515.
- [2] 肖迎波, 何佳城, 袁凯, 等. 基于静电纺丝碳纳米纤维的超级电容器电极材料研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2021, 37(1): 317-326.
Xiao Y B, He J C, Yuan K, *et al.* Research progress on electrode materials for supercapacitors based on electrospun carbon nanofibers[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2021, 37(1): 317-326.
- [3] Xue B, Zhang F F, Zheng J M, *et al.* Flexible piezoelectric device directly assembled through the continuous electrospinning method[J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30: 045006.
- [4] Li C L, Wu M C, Liu R. High-performance bifunctional oxygen electrocatalysts for zinc-air batteries over mesoporous Fe/Co - N - C nanofibers with embedding FeCo alloy nanoparticles[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2019, 244: 150-158.
- [5] Zhang C, Wang X R, Liu A H, *et al.* Reduced graphene oxide/titanium dioxide hybrid nanofiber-reinforced electrospun silk fibroin scaffolds for tissue engineering[J]. *Materials Letters*, 2021, 291: 129563.
- [6] Davani F, Alishahi M, Sabzi M, *et al.* Dual drug delivery of vancomycin and imipenem/cilastatin by coaxial nanofibers for treatment of diabetic foot ulcer infections[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2021, 123: 111975.
- [7] Zhang Q, Wang X, Fu J, *et al.* Electrospinning of ultrafine conducting polymer composite nanofibers with diameter less than 70 nm as high sensitive gas sensor[J]. *Materials*, 2018, 11: 1744.
- [8] Valipouri A, Ravandi S A H, Pischevar A, *et al.* Experimental and numerical study on isolated and non-isolated jet behavior through centrifuge spinning system[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 69: 93-101.
- [9] Hsu H H, Chiu Y J, Li J W, *et al.* Alignment - improved and diameter - reduced electrospun polymer fibers via the hot - stretching process[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020, 305: 1900637.
- [10] Wen X, Xiong J, Lei S, *et al.* Diameter refinement of electrospun nanofibers: from mechanism, strategies to applications[J]. *Advanced Fiber Materials*, 2021: 1-17.
- [11] Qin X H, Yang E L, Li N, *et al.* Effect of different salts on electrospinning of polyacrylonitrile (PAN) polymer solution[J]. *Journal of applied polymer science*, 2007, 103: 3865-3870.
- [12] Shenoy S L, Douglas Bates W, Frisch H L, *et al.* Role of chain entanglements on fiber formation during electrospinning of polymer solutions: good solvent, non-specific polymer - polymer interaction limit[J]. *Polymer*, 2005, 446: 3372-3384.
- [13] Yang W, Zhang M, Li X, *et al.* Incorporation of tannic acid in food-grade guar gum fibrous mats by electrospinning technique[J]. *Polymers*, 2019, 11: 141.
- [14] Jia L, Qin X. The effect of different surfactants on the electrospinning poly (vinyl alcohol) (PVA) nanofibers[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2013, 112: 595-605.
- [15] Fallahi D, Rafizadeh M, Mohammadi N, *et al.* Effect of LiCl and non-ionic surfactant on morphology of polystyrene electrospun nanofibers[J]. *e-Polymers*, 2008, 8: 644.
- [16] 唐珊, 樊炜炜, 刘传桂, 等. 不同表面活性剂对静电纺丝超细纳米纤维的性能影响[J]. *轻工机械*, 2018, 36(3): 1-7.
Tang S, Fan W W, Liu C J, *et al.* Effects of different surfactants on the properties of electrospun ultrafine nanofibers [J]. *Light Industry Machinery*, 2018, 36(3): 1-7.
- [17] Tripatanasuwan S, Zhong Z, Reneker D H. Effect of evaporation and solidification of the charged jet in electrospinning of poly (ethylene oxide) aqueous solution[J]. *Polymer*, 2008, 48: 5742-5746.
- [18] 丁瑜, 伍才辉, 辜思曼. AM/AMPS Na-瓜尔胶接枝共聚物的合成及其在压裂液中的应用[J]. *石油化工*, 2020, 49(10): 985-991.
Ding Y, Wu C H, Gu S M. Synthesis of AM/AMPS Na-guar graft copolymers and their applications in fracturing fluids[J]. *Petrochemical*, 2020, 49(10): 985-991.
- [19] Qi R, Guo J, Liu Y, *et al.* Effects of salt content on secondary structure of protein in sodium alginate/antarctic krill protein composite system and characterization of fiber properties[J]. *Dyes and Pigments*, 2019, 171: 107686.
- [20] 李国滨, 刘海峰, 李金辉, 等. 超疏水材料的研究进展[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(12): 80-81.
Li G B, Liu H F, Li J H, *et al.* Research progress on superhydrophobic materials[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(12): 80-81.

Preparation and Characterization of Guar Gum Ultrafine Nanofibers by Electrospinning

Yihang Zhang, Jing Guo, Fucheng Guan, Xin Zhang, Zheng Li, Sen Zhang

(1.School of Textile and Material Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 2.

Functional Fiber and Its Composite Materials Engineering Technology Research Center of Liaoning

Province, Dalian 116034, China)

ABSTRACT: In order to prepare guar gum (GG) nanofibers with the diameter less than 100 nm and solve the difficulty in electrospinning. Cetyl dimethyl ethyl ammonium bromide (EHDAB) was used as surfactant, calcium chloride (CaCl_2) was used as strong electrolyte, and GG nanofibers were prepared by electrospinning. The effects of EHDAB and CaCl_2 mass fraction on the surface tension, conductivity and viscosity of spinning fluid were investigated by contact angle measuring instrument suspension method, conductivity meter and rotational rheometer. Scanning electron microscopy, contact angle measuring instrument seat dropping method and agar flat dish diffusion method were applied to characterize the morphology, water contact angle and antibacterial properties of nanofibers. The results show that solution conductivity, electric field force, and spinning efficiency can be significantly increased by CaCl_2 ; when the mass ratio of GG, EHDAB and CaCl_2 is 0.9:0.2:0, the average diameter of the fibers is the smallest of 40 nm; the maximum tensile strength of the nanofiber film is 9 MPa, the minimum contact angle is 23° , and the hydrophilicity is good, and the fibers show good hydrophilicity and antibacterial properties.

Keywords: guar gum; electrospinning; cationic surfactant; ultrafine; antibacteria