

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.01.003

静电纺PVDF/PAN/左氧氟沙星复合纤维膜的制备及性能

宋路平, 闵尔君, 王英沅, 王旭

(安徽工程大学, 纺织服装学院, 安徽芜湖 241000)

摘要: 采用静电纺丝技术以聚偏氟乙烯(PVDF)为底物, 添加一定质量分数的左氧氟沙星以及聚丙烯腈(PAN)制备出一种质地柔软、轻薄、透气的复合纤维膜类伤口敷料。通过场发射扫描电镜、X射线衍射仪、红外光谱分析仪及亲水性、抗菌性能测试和体外释药表征对制得的纤维膜进行了分析。结果表明当纺丝液中PVDF质量含量为10%时, 制备出的纤维膜粗细均匀、形貌良好, 经静电纺丝PVDF结构由 α 晶型转变为压电效应最强的 β 晶型, 使纤维膜具有一定压电性能; 当复合纺丝液中PAN质量分数为2.5%时, 添加PAN制备的纤维膜较PVDF/左氧氟沙星纤维膜在相同时间内接触角大幅度下降, 显著提高了复合纤维膜亲水性能; 当复合纺丝液中含药量为3.5%时, 制备的纤维膜释药迅速、最终释药率可达80%且抗菌性能优异适用于作伤口敷料。

关键词: 静电纺丝; 伤口敷料; 接触角; 抗菌; 压电

中图分类号: TQ325.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)01-0011-06

Preparation and Properties of PVDF/PAN/Levofloxacin Wound Dressing based on Electrospinning

Song Luping, Min Erjun, Wang Yingfeng, Wang Xu

(College of Textile and Garment, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract : With polyvinylidene fluoride (PVDF) as the substrate, levofloxacin and polyacrylonitrile (PAN) were added by electrospinning technology to prepare a soft, light and breathable composite fiber membrane wound dressing. The prepared fiber membrane was analyzed by field emission scanning electron microscope, X-ray diffraction, infrared spectrum analyzer, hydrophilicity, antibacterial property test and in vitro drug release characterization. The results show that when the mass content of PVDF in spinning solution is 10%, the prepared fiber film has uniform thickness and good appearance. After electrostatic spinning, the PVDF structure changes from α crystal form to β crystal form with the strongest piezoelectric effect, which makes the fiber film have certain piezoelectric properties. When the content of PAN in the composite spinning solution is 2.5%, the contact angle of the fiber membrane prepared by adding PAN decreases greatly in the same time as that of PVDF/levofloxacin fiber membrane, which significantly improves the hydrophilic property of the composite fiber membrane. When the drug content in the composite spinning solution is 3.5%, the prepared fiber membrane releases the drug quickly, the final drug release rate can reach 80%, and the antibacterial property is excellent, so it is suitable for wound dressing.

Keywords : electrostatic spinning ; wound dressing ; contact angle ; antibiosis ; piezoelectricity

医用敷料在人体创伤组织愈合过程中起到保护创口、吸收渗透液、防止外界细菌感染、促进伤口愈合等作用^[1]。目前, 市场上大部分敷料仍以传统纱布、脱脂棉、绷带为主, 这使得在更换敷料时易出现纱布与伤口皮肤黏连, 造成伤口撕扯, 进而增加患者痛苦^[2]。因此, 开发新型伤口敷料受到国内外

研究者重视。近几年, 国内外新型敷料主要有液体类敷料、泡沫类敷料、水凝胶敷料、薄膜类敷料等^[3], 其中, 以静电纺丝技术制备的纤维膜类伤口敷料, 因其超高比表面积、孔隙率以及类细胞外基质结构能有效促进伤口愈合, 受到学者们的广泛关注^[4]。

笔者基于静电纺丝技术制备聚偏氟乙烯

基金项目: 高校优秀青年骨干人才国内外访学研修项目(gxfx2017045), 安徽省纺织工程技术研究中心和“纺织面料”安徽省高校重点实验室联合开放基金项目(2021AETKL14)

通信作者: 王旭, 副教授, 博士, 主要研究方向为纺织新材料

收稿日期: 2022-10-02

引用格式: 宋路平, 闵尔君, 王英沅, 等. 静电纺PVDF/PAN/左氧氟沙星复合纤维膜的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(1): 11-16.

Song Luping, Min Erjun, Wang Yingfeng, et al. Preparation and properties of PVDF/PAN/levofloxacin wound dressing based on electrospinning[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(1): 11-16.

(PVDF)/聚丙烯腈(PAN)/左氧氟沙星伤口敷料。PVDF是一种具有柔性且质轻的多晶型聚合物,主要包含 α 、 β 、 γ 三种晶型,其中 β 晶型为全反式构象的极性结构,表现出极强的压电效应^[5-6]。静电纺PVDF纤维膜不仅具有轻薄、柔软的特质,且静电纺丝有利于 α 晶型向 β 晶型发生转变,从而增强纤维膜的压电性能。已有研究表明给予伤口处一定电刺激,可有效促进伤口愈合^[7]。但考虑到PVDF具有疏水性,在纺丝液中增加具有抗菌作用的抗生素类药物左氧氟沙星,同时并添加改善PVDF亲水性的PAN,以提高伤口敷料的综合性能。通过对三种组分不同配比的探讨,分析其可纺性、外观形貌、晶型分析、亲水性、体外释药性、抗菌性等,为该类药物敷料的制备提供有价值的参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PVDF:相对分子量15万,上海三爱富新材料股份有限公司上海华谊公司;

PAN:相对分子量8万,上海巴斯夫化工有限公司;

左氧氟沙星:纯度 $\geq 98\%$,上海麦克林试剂有限公司;

二氯甲烷(DCM):分析纯,纯度 $\geq 99.5\%$,上海泰坦科技股份有限公司;

N,N-二甲基甲酰胺(DMF):分析纯,纯度 $\geq 99.5\%$,上海泰坦科技股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

集热式恒温加热磁力搅拌器:DF-101S型,河南省予华仪器有限公司;

静电纺丝机:TL-01型,深圳市通力微纳科技有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):S-4800型,日本日立公司;

红外光谱分析仪:IRPrestige-21型,日本岛津公司;

X射线衍射(XRD)仪:D8型,德国Bruker公司;
恒温振荡器:BSI-3型,上海一恒仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-5500PC型,上海元析仪器有限公司。

1.3 试样制备

(1) 纯PVDF纺丝液配备。

将不同质量(1.6, 2.0, 2.4 g)的聚偏氟乙烯粉末

分别加入锥形瓶中,再往锥形瓶中滴加DMF与DCM(质量比7:1)的混合溶剂,直至溶液总质量为20 g,再将锥形瓶放入恒温磁力搅拌器中搅拌12 h后得到PVDF质量含量为8%, 10%, 12%的纺丝液。

(2) PVDF/左氧氟沙星复合纺丝液配备。

将2.0 g PVDF粉末和不同质量(0.3, 0.5, 0.7 g)的左氧氟沙星粉末溶于DMF与DCM(质量比7:1)的混合溶剂中,与上述方法相同,配成左氧氟沙星质量含量分别为1.5%, 2.5%, 3.5%的复合纺丝液。

(3) PVDF/PAN/左氧氟沙星复合纺丝液配备。

将2.0 g PVDF粉末和不同质量(0.3, 0.5, 0.7 g)的左氧氟沙星粉末溶于DMF与DCM(质量比7:1)的混合溶剂中,再往纺丝液中添加0.5 g PAN,与上述方法相同,制成左氧氟沙星含量分别为1.5%, 2.5%, 3.5%的复合纺丝液。将2.0 g PVDF粉末和0.3 g左氧氟沙星粉末溶于DMF与DCM(质量比7:1)的混合溶剂中,再往纺丝液中添加不同质量(0.1, 0.3, 0.5 g)的PAN,与上述方法相同,制得PAN含量为0.5%, 1.5%, 2.5%的复合纺丝液。

(4) 静电纺复合纤维膜纳米纤维膜的制备。

将配置好的纺丝液置于注射器中在高压静电纺丝机上纺丝。设置纺丝参数为接收距离18 cm、纺丝速率0.9 mL/h、纺丝电压17 kV;静电纺丝机内部温度设置35℃、相对湿度60% rh。在此条件下进行纺丝,制备出不同成分及比例的复合纤维膜,探索最佳含药及PAN的质量分数,将制得的纤维膜放于50℃的烘箱烘干待用。

1.4 测试与表征

微观形貌观察:将制备好的复合纤维膜用双面导电胶固定于样品台上喷金处理20 s后,置于扫描电子显微镜中进行微观形貌观察。

复合纤维膜化学成分测试:采用红外光谱分析仪对复合纤维膜在4 000~500 cm^{-1} 内进行扫描,观察其波峰。

复合纤维膜晶型测试:采用XRD粉末衍射仪对复合纤维的晶体结构进行表征。设置测试电压为40 kV,测试电流40 mA,扫描速度5(°)/s,扫描角度5°~60°。

亲水性能测试:采用接触角仪器对含有不同质量分数PAN的复合纤维膜进行测试。

体外释药测试:取复合纤维膜(3.4 mg)浸入100 mL磷酸盐缓冲液中,置于恒温振荡器(参数:37℃,

130 r/min),前两小时每隔20 min取出4 mL溶液在293 nm处测其吸光度(OD)值,测完后立即将取出的溶液倒回,后6 h每隔3 h测其OD值。

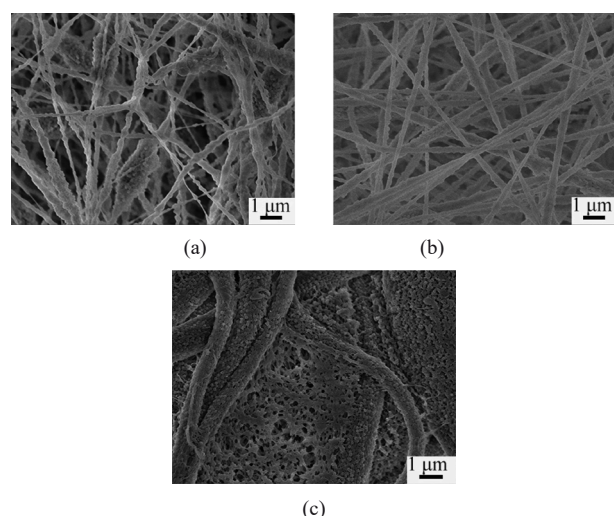
抗菌性能测试:分别选取大肠杆菌和金黄色葡萄球菌作为菌种,选取无水乙醇为阳性对照组,生理盐水为阴性对照组,将菌液与培养皿上的营养肉汤混匀,将纤维膜贴在培养皿上,置于37 °C恒温培养箱中培养。观察抑菌圈大小,计算抑菌圈直径。该组实验设置三个平行样品。

2 结果与讨论

2.1 微观形貌分析

(1) PVDF质量分数对纤维微观形貌的影响。

图1为单纺PVDF在8 kV下的SEM图,当纺丝液中PVDF质量含量为8%时,纤维出现大量串珠结构,粗细极度不均匀,考虑PVDF浓度过低,导致纺丝液整体黏度不够,表面张力过小而不易成丝。当纺丝液中PVDF质量含量为10%时,射流在电场力的牵引下平稳拉伸成粗细均匀的纤维^[8],纺丝效果好,纤维成形性高。当纺丝液中PVDF质量含量为12%时,纺丝液黏度过大,射流到达针头时不能及时牵引拉伸,易形成黏连,针头容易堵塞,不易纺丝。综合考虑,采取10%的PVDF进行混合纺丝。



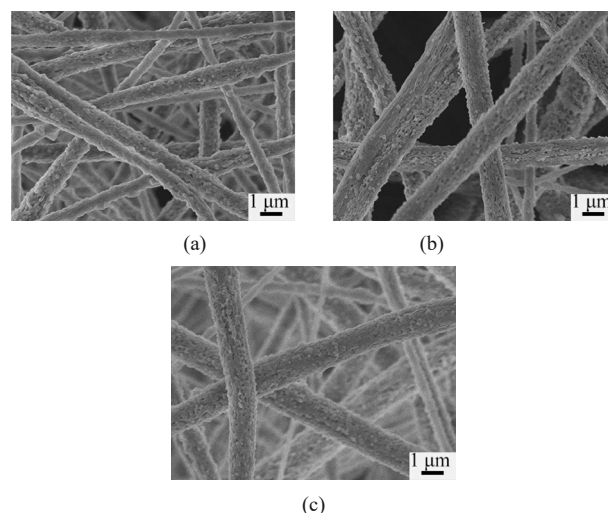
PVDF质量分数:a—8%;b—10%;c—12%

图1 不同质量分数PVDF的纺丝液制备的纯纤维膜

(2) 不同质量分数的药物对纤维形态的影响。

当固定纺丝液中PVDF质量含量为10%时,依次添加梯度质量的左氧氟沙星及相同含量PAN,使复合纺丝液中左氧氟沙星质量含量达到1.5%,2.5%,3.5%,4.5%,并将纺丝液置于静电纺丝机上进行纺丝。当左氧氟沙星含量为4.5%时,纺丝液出现

过饱和状态,考虑药物不能溶解完全,无法制备复合纤维膜。图2a~图2c依次为含药量为1.5%,2.5%,3.5%的复合纤维膜电镜图。由图可知,通过静电纺丝技术可成功将PVDF、左氧氟沙星和PAN制备成复合纤维膜且纤维形貌均良好,平均直径依次可达 $(1\ 125\pm105)$, $(1\ 405\pm85)$, $(1\ 568\pm90)$ nm。



左氧氟沙星质量分数:a—1.5%;b—2.5%;c—3.5%

图2 不同质量分数左氧氟沙星纺丝液制备的复合纤维膜图

2.2 纤维膜晶型测试分析

图3为左氧氟沙星粉末、PVDF粉末及不同纤维膜红外光谱图。由图3可知,PVDF粉末在1 189, 871 cm^{-1} 处显示明显特征峰是C—F伸缩振动,也是 α 晶型主要特征峰^[9]。纯PVDF纤维膜在854, 1 238 cm^{-1} 处显示出 β 晶型主要特征峰^[10]。PVDF/PAN/左氧氟沙星复合纤维膜红外仍显示出PVDF纤维膜主峰,表明PVDF粉末经静电纺丝技术纺丝成纤维膜,由 α 晶型转变为 β 晶型,且在加入PAN和左氧氟沙星后并未影响PVDF晶型。在纯PAN纤维膜的红外光谱中,1 454 cm^{-1} 显示出明显特征峰是—CH₂变形振动,1 732, 2 242 cm^{-1} 处分别对应羰基、氰基特征峰^[11]。在左氧氟沙星粉末红外图谱中,1 618, 1 726 cm^{-1} 处分别对应左氧氟沙星羰基的振动拉伸、

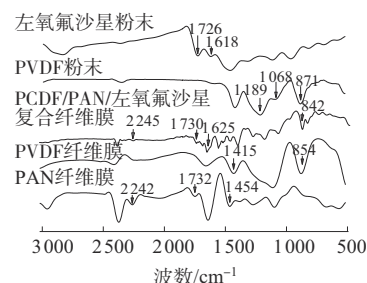


图3 左氧氟沙星粉末、PVDF粉末及不同纤维膜红外光谱图

羧基中的C=O伸展^[12]。在复合纤维膜中左氧氟沙星和PAN的主要特征峰虽略有偏移,但仍能观察到,表明三种物质在复合纺丝时,物质本身结构都未遭到破坏,仍稳定存在于复合纤维膜中。

2.3 纤维膜化学成分测试

图4为不同纤维膜及PVDF粉末的XRD图。从图4可以看出,PVDF粉末在 2θ 为 18.2° , 20.1° , 26.6° 处显示出明显特征峰对应 α 晶型^[13]。经静电纺丝技术加工后,纯PVDF纤维膜中可明显观察到 α 晶型特征峰全部消失,在 $2\theta=22.4^\circ$ 处产生一个新峰,是 β 晶型特征峰^[14]。分析原因,静电纺丝过程中纺丝液在电场力下牵引拉伸成纤维过程中发生了极化,诱导PVDF结构由 α 晶型转变为 β 晶型^[15]。在复合纤维膜中仍显示出与纯PVDF膜相同的晶型特征峰,表明在加入PAN和左氧氟沙星后并未对PVDF晶型结构产生影响,PVDF仍以 β 晶型结构形式稳定存在于复合纤维膜中,与前文红外中的结果一致。 β 晶型具有很强压电效应,故含有 β 晶型的纤维膜能对皮肤产生一定电刺激进而促进伤口愈合。

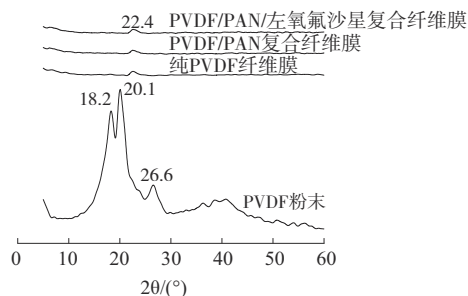


图4 不同纤维膜及PVDF粉末XRD图

2.4 亲水性能测试

图5和表1为制得的PVDF/左氧氟沙星和PVDF/PAN/左氧氟沙星复合纳米纤维膜接触角测试图和取相同秒数间隔时测得的接触角数据。由图5和表1可知,在30 s时PVDF/左氧氟沙星复合纤维膜接触角为 128.6° ,而在PVDF/左氧氟沙星纺丝液中添加梯度质量PAN,得到PAN质量含量为0.5%,1.5%,2.5%的复合纺丝液制备出的纤维膜在30 s时接触角依次为 114.8° , 82.9° , 36.5° 。表明在相同时间内,添加PAN的复合纤维膜较PVDF/左氧氟沙星复合纤维膜的接触角具有明显的下降趋势,且随着PAN含量的增加,接触角下降幅度逐渐增大。分析原因,PVDF材料中无亲水基团,PVDF分子内部形成的氢键太强^[16],水中的电负性不足以使其氢键分离,故PVDF具有疏水性,PAN因含有氰基亲水基团而具备亲水性^[17],因此,添加PAN进行纺丝能

有效提高复合纤维膜的亲水性能。因此,可促进伤口表面气液交换,维持伤口湿润度,使纤维膜与皮肤更加贴合,给伤口处提供柔软舒适的环境。

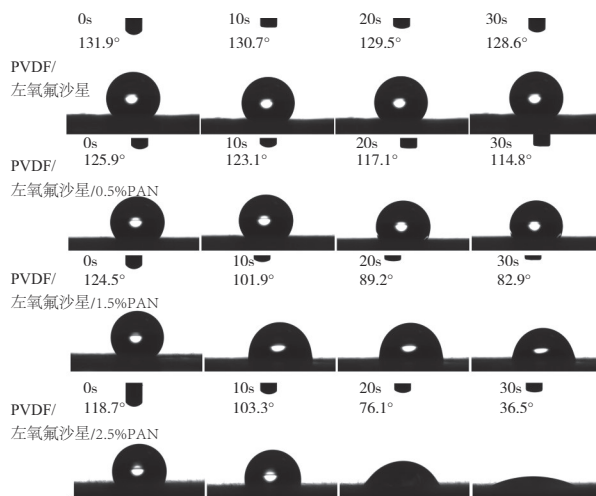


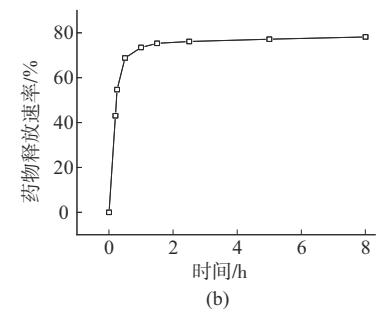
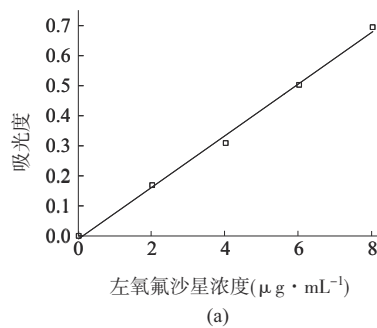
图5 相同时间间隔下的不同纤维膜接触角图

表1 相同时间间隔下不同纤维膜的接触角 (°)

纤维膜样品	时间间隔			
	0 s	10 s	20 s	30 s
PVDF/左氧氟沙星	131.9	130.7	129.5	128.6
PVDF/左氧氟沙星/0.5%PAN	125.9	123.1	117.1	114.8
PVDF/左氧氟沙星/1.5%PAN	124.5	101.9	89.2	82.9
PVDF/左氧氟沙星/2.5%PAN	118.7	103.3	76.1	36.5

2.5 体外释药测试

图6为左氧氟沙星标准曲线及释放曲线图,经线性拟合,得到左氧氟沙星的标准曲线方程 $Y=0.0862X-0.0096$ 。根据标准曲线方程可由测出的吸



a—左氧氟沙星标准曲线;b—药物释放曲线

图6 药物标准曲线及释放曲线图

光度推算出释放体系中左氧氟沙星浓度。

图6b为左氧氟沙星体外释药累计释放率,可以看出左氧氟沙星在前两个小时内快速释放,释放累计速率达到70%,后四个小时内药物缓慢释放,最终释药率可达约80%。表明该药物作为伤口敷料释药性能优异,根据释放时长可应用于半日次敷料。

2.6 抗菌性能测试

图7、图8分别为不同左氧氟沙星含量的复合纺丝液制备出的纤维膜对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制效果图。由图可知,当复合纺丝液中左氧氟沙星质量含量分别为1.5%,2.5%,3.5%时,制备出的纤维膜对大肠杆菌抑菌圈直径依次为2.8,3,3.5 cm,对金黄色葡萄球菌抑菌圈直径依次为2.6,3.1,3.6 cm。表明左氧氟沙星对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均有明显的抑制作用,且随左氧氟沙星含量的增加,抑菌圈直径明显增大,抑制效果逐步增强。因此该复合纤维膜具有很好的抗菌性能,适合用作伤口敷料。

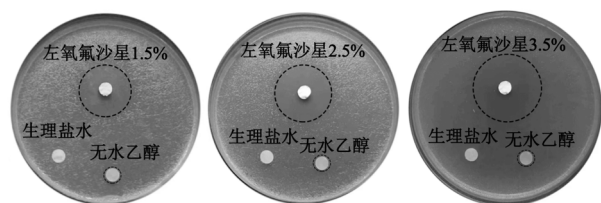


图7 药物对大肠杆菌抗菌性能测试图

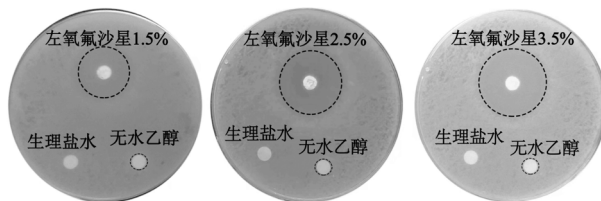


图8 药物对金黄色葡萄球菌抗菌性能测试图

3 结论

通过静电纺丝技术制备了PVDF/PAN/左氧氟沙星复合纤维膜,并对其微观形貌、化学成分、晶型结构、亲水性能、抗菌性能进行分析得到以下结论:

(1)当复合纺丝液中PVDF质量含量为10%,PAN质量含量为2.5%时,制备出的复合纤维膜的纤维粗细均匀、形貌良好,且在一定范围内纤维直径随复合纺丝液中左氧氟沙星含量增加而逐渐增大。

(2)红外和XRD测试表明纺丝过程中三种物质的化学结构均未遭到破坏,仍稳定存在于复合纤维膜中,且PVDF由 α 晶型转变为 β 晶型,因此具备一

定压电效应。

(3)接触角测试表明添加PAN能有效提高复合纤维膜的亲水性能。抗菌测试和体外释药表征说明复合纤维膜具有快速释药和优异的抗菌性能,适用于作伤口敷料。

参考文献

- [1] 杨冬,贾彤彤,雷蕾,等.静电纺丝技术制备医用敷料的研究进展[J].高分子通报,2022(9):1-7.
Yang Dong, Jia Tongtong, Lei Lei, et al. The development of electrospinning technology in medical dressing[J]. Polymer Bulletin, 2022(9):1-7.
- [2] 吴知仁,曾子都,熊含春,等.创伤敷料的分类及其治疗糖尿病足的研究进展[J].实用临床医学,2021,22(4):93-98.
Wu Zhiren, Zeng Zidou, Xiong Hanchun, et al. Classification of world dressing and the research progress in treatment of diabetes foot ulcer[J]. Practical Clinical Medicine, 2021, 22(4):93-98.
- [3] 吴倩倩,李珂,杨立双,等.载药聚偏氟乙烯伤口敷料的制备及其性能[J].纺织学报,2020,41(1):26-31.
Wu Qianqian, Li Ke, Yang Lishuang, et al. Preparation and properties of drug-loaded polyvinylidene fluoride wound dressing[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(1):26-31.
- [4] Chen Z, Song Y, Zhang J, et al. Laminated electrospun nHA/PHB-composite scaffolds mimicking bone extracellular matrix for bone tissue engineering[J]. Materials Science and Engineering: C, 2017, 72:341-351.
- [5] 陈雨晴,周峻,吴楷,等.聚偏二氟乙烯(PVDF)多晶型特征的研究进展[J].绝缘材料,2022,55(4):1-12.
Chen Yuning, Zhou Jun, Wu Kai, et al. Research progress in polyvinylidene fluoride (PVDF) polycrystalline characteristics[J]. Insulation Materials, 2022, 55(4):1-12.
- [6] 夏毓霜,李阳,胡国华,等.静电纺PVDF/铌酸钠复合纤维膜制备及压电性能[J].工程塑料应用,2020,48(7):17-21,32.
Xia Yushuang, Li Yang, Hu Guohua, et al. Preparation and piezoelectric properties of electrospun PVDF/sodium niobate composite fiber membrane[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(7):17-21,32.
- [7] 姜涛,徐阳,张耀铭.盆底生物反馈联合电刺激治疗痔疮、肛裂及便失禁的临床疗效观察[J].中国实用医药,2022,17(7):88-91.
Jiang Tao, Xu Yang, Zhang Yaoming. Clinical effect of pelvic floor biofeedback combined with electrical stimulation on hemorrhoids, anal fissure and fecal incontinence[J]. China Practical Medicine, 2022, 17(7):88-91.
- [8] 高原,付少举,张佩华. PPDO纳米纤维膜的静电纺丝制备及其降解性能[J].东华大学学报:自然科学版,2022,48(4):8-12,60.
Gao Yuan, Fu Shaoju, Zhang Peihua. Preparation and degradation properties of PPDO nanofiber membranes by electrospinning[J]. Journal of Donghua University: Natural Science, 2022, 48(4):8-12,60.

- [9] 赵勇,陈晔,杨德才.聚偏氟乙烯取向膜在拉伸过程中的晶相变化[J].应用化学,1993,10(2):115–116.
- Zhao Yong, Chen Ye, Yang Decai. Phase transition of oriented poly(vinylidene fluoride) films upon stretching[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 1993, 10(2):115–116.
- [10] 彭建邦,吴昆裕,周艺峰. γ 晶型转变为 β 晶型的聚偏氟乙烯(PVDF)的压电性[J].中国科学技术大学学报,1985(2):157–163.
- Peng Jianbang, Wu Kunyu, Zhou Yifeng. Piezoelectricity of polyvinylidene fluoride (PVDF) with crystalline changed from γ -Phase into β -Phase[J]. Journal of China University of Science and Technology, 1985(2):157–163.
- [11] 吴倩倩,倪瑞燕,安琪,等. PVDF/PAN 微电流伤口敷料的制备及其性能[J].纺织导报,2018(11):75–78.
- Wu Qianqian, Ni Ruiyan, An Qi, et al. Preparation and properties of PVDF/PAN micro-current wound dressing[J]. Fiber Technology, 2018(11):75–78.
- [12] Mpelane S, Mketi N, Bingwa N, et al. Synthesis of mesoporous iron oxide nanoparticles for adsorptive removal of levofloxacin from aqueous solutions; Kinetics, isotherms, thermodynamics and mechanism[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(11): 8457–8468.
- [13] 蒋洁,陈胜,李静静,等.静电纺钛酸钡/聚偏氟乙烯纳米复合柔性压电纤维膜[J].纺织学报,2018,39(2):14–19.
- Jiang Jie, Chen Sheng, Li Jingjing, et al. Electrospun barium titanate/poly(vinylidene fluoride) nano-composite flexible piezoelectric fibrous membranes[J]. Journal of Textile Research, 2018, 39(2):14–19.
- [14] Erdtman E, Satyanarayana K C, Bolton K. Simulation of α - and β -PVDF melting mechanisms[J]. Polymer, 2012, 53(14): 2919–2926.
- [15] Martins P, Lopes A C, Lanceros-Mendez S. Electroactive phases of poly(vinylidene fluoride): Determination, processing and applications[J]. Progress in polymer science, 2014, 39(4):683–706.
- [16] Park M J, Gonzales R R, Abdel-Wahab A, et al. Hydrophilic polyvinyl alcohol coating on hydrophobic electrospun nanofiber membrane for high performance thin film composite forward osmosis membrane[J]. Desalination, 2018, 426:50–59.
- [17] 李俊,伍文静,孙金玺,等.电纺制备聚丙烯腈/聚偏氟乙烯复合纤维膜及其空气过滤性能[J].复合材料学报,2021,38(3):741–748.
- Li Jun, Wu Wenjing, Sun Jinxi, et al. Preparation of polyacrylonitrile/polyvinylidene fluoride composite fiber membrane by electrospinning and its air filtration performance[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2021, 38(3):741–748.