http://pmse.scu.edu.cn

吸油纤维电纺过程影响因素的研究进展

李 佳[1,2]，刘可心[1,2,3]，郭子轩[1,2]

（1. 哈尔滨理工大学 材料科学与化学工程学院，黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 哈尔滨理工大学 黑龙江省绿色化工技术重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 特变电工山东鲁能泰山电缆有限公司，山东 新泰 271200）

摘要：近年来，石油漏油事故和大量工业及生活污水的排放，导致油类污染持续加剧，对生态环境造成了严重危害，研究和制备高效吸油材料，去除水中油类污染物，减少对环境的危害，已成为当务之急。文中综述了高吸油树脂的吸油机理，比较了天然与合成吸油材料，重点探讨了电纺纤维的多孔、中空及串珠结构对吸油效果的影响，并对影响纤维结构的因素进行了论述，最后展望了电纺吸油纤维的发展方向。

关键词：吸油纤维；静电纺丝；影响因素；纤维结构

中图分类号：X703 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-7555（2024）09-0156-08

近年来，石油的意外泄漏导致了一些重大的环境问题。所形成的油膜阻碍氧气进入水体，使水中缺氧，对海洋生物造成了严重伤害，使海上生物群结构发生变化。同时，由于部分鱼类游离漏油处，导致鱼量下降。如果与鱼类产卵发生在同一时间，对鱼卵的危害则是毁灭性的[1]。人们最初使用天然多孔材料吸油，但由于其油水选择性不好，受到挤压易漏油，吸油量不高等限制了其使用[2]。与其他材料相比，静电纺丝制备的纤维材料具有比表面积高、吸附速率快等特点，通过改变纺丝条件以及对纤维表面进行处理，可以获得高效油水分离材料。

1 高吸油树脂的吸附机理

高吸油树脂材料是一种具有超强吸油保油能力的轻度交联高分子[3]，由亲油单体作为基本单元组成[4]。其吸附行为第1步主要由分子扩散控制。油品部分进入树脂，油分子和亲油基链段之间相互吸引，过少的油分子导致大分子链段很难完全展开，处于纠缠状态；第2步为热力学控制。油分子大量进入，与亲油基链段间的作用加强，大分子链段逐渐伸展，在热力学推动力作用下，油分子渗入高分子相中，直到达到平衡；第3步，当树脂充分溶胀，树脂中的大分子链被拉伸到一定程度后，在弹性收缩力的作用下慢慢收缩，最终达到动力学平衡状态。

高吸油树脂的吸油机理与吸水树脂的机理类似，主要依靠范德华力吸油，还有氢键和内外渗透压差的作用。Flory提出吸水树脂在水中的膨胀公式[5]，如式(1)所示

$$Q^{3/5} \approx [(\frac{i}{2} V_n S^{0.5})^2 + \frac{0.5 - X_1}{V_1}] / \frac{V_E}{V_0} \quad (1)$$

式中：Q——吸水倍率；$(i/2)V_n$——固定在树脂上的电荷浓度；$(0.5-X_1)/V_1$——对水的亲和力；V_E/V_0——交联密度；S——外部溶液的电解质的离子强度。

当放入油品中时没有渗透压的作用，中括号内的第1项（表示渗透压）为0。公式简化如式(2)[6]：

$$Q^{3/5} \approx (\frac{0.5 - X_1}{V_1}) / \frac{V_E}{V_0} \quad (2)$$

式中：Q——吸油倍率；$(0.5-X_1)/V_1$——对油的亲和力。

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0170
收稿日期：2023-09-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目（21706043）
通讯联系人：李佳，主要从事高分子材料研究，E-mail: lijia@hrbust.edu.cn

林润雄等[7]利用弹性自由能理论与溶液热力学理论推导出式(3)

$$Q^{3/5} \approx \frac{M_c(0.5 - X_1)}{\rho_2 V_1} \quad (3)$$

式中:M_c——聚合物交联网络的大小;X_1——聚合物与溶剂之间的相互作用参数;ρ_2——聚合物的密度;V_1——溶剂的摩尔体积。

通过式(2)和式(3)可知,高吸油树脂是通过分子网状结构间的拉伸与回缩进行吸油和保油。有研究表明,高吸油树脂对有相似结构的油品有较高的吸附能力;当树脂与被吸附油品的溶解度参数接近时,也会有较好的吸附效果[8]。

2　吸油材料简介

吸油材料按来源可分为天然和合成2类。对玉米秸秆[9,10]进行表面改性,可提高秸秆表面与水的润湿角,使其表现出良好的吸油性能。利用热化学改性木质纤维素生物质技术对枣种子进行酸碱改性,可使其具有去除水中油的能力[11]。Shang等[12]采用单宁酸和蓖麻油基硅氧烷,在纤维素纳米纤维表面共沉淀获得疏水性、亲油性优异的生物质气凝胶。但未经化学修饰的天然材料可降解,油水分离效果不好。化学修饰后的天然材料力学性能较差,保油能力不高,受压易泄漏,吸油倍率低。目前对天然吸附材料的研究重点在于如何提高其力学性能,可以在吸附后的运输中减少二次漏油的现象发生。合成材料在吸油能力上高于天然材料。Zhang等[13]以纤维素纸为基材,用丹宁辅助银纳米颗粒沉积,通过表面喷涂聚二甲基硅氧烷和一步水热法合成团簇微球,制备了超疏水表面。Góes等[14]合成的聚氨酯/醋酸纤维素/磁性氧化铁纳米粒子复合材料可用于吸附矿物油,在均质介质中合成的材料比在非均质介质中具有更高的吸油能力。魏徵等[15]合成了聚甲基丙烯酸十二酯(PLMA),吸油率随时间延长不断增大,最后达到最大吸油率。为了解决漏油事故造成的危害,上述吸油材料的性能还远远不够。因此,制备具有超高接触角的快速吸油材料引起人们更多的关注。Zhan等[16]利用静电纺丝技术(Fig.1)制备吸油纤维,经氧等离子体蚀刻处理制备了一种具有纺锤结构的超润湿聚偏二氟乙烯(PVDF)纤维,其对油水分离具有很好的效果,特殊的润湿性能和纺锤结构的协同作用可促使乳化油滴在纤维表面快速聚集。Moon等[17]在壳聚糖基纤维中加入油酰胺制备了可降解吸油材料,提高了可纺性和疏水性。

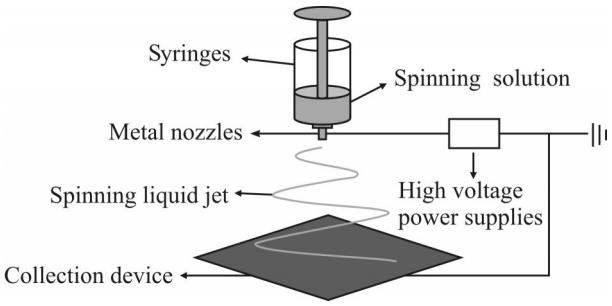


Fig. 1 Schematic diagram of the electrospinning device

3　静电纺丝纤维的结构

3.1　常规多孔结构

环境湿度以及溶剂的挥发性是电纺纤维形成孔

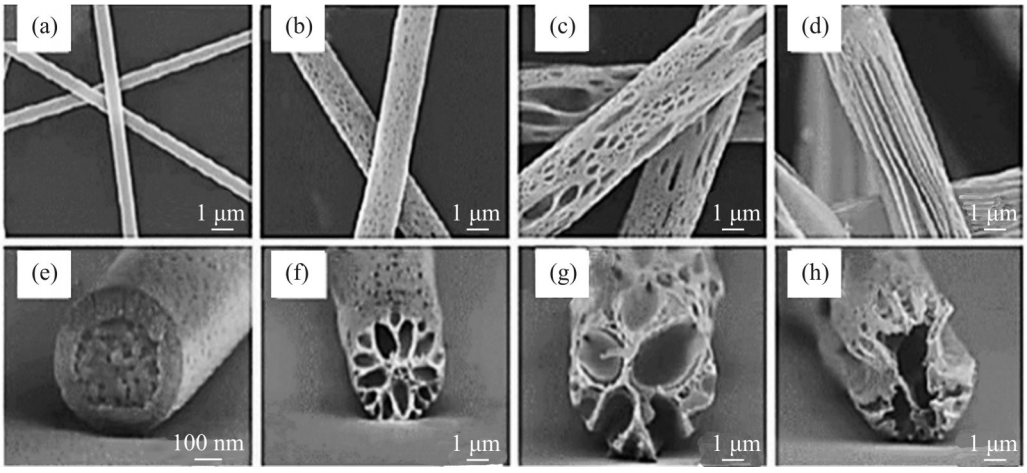


Fig. 2 SEM images of (a~d) surface and (e~h) cross section of PS fiber[22]

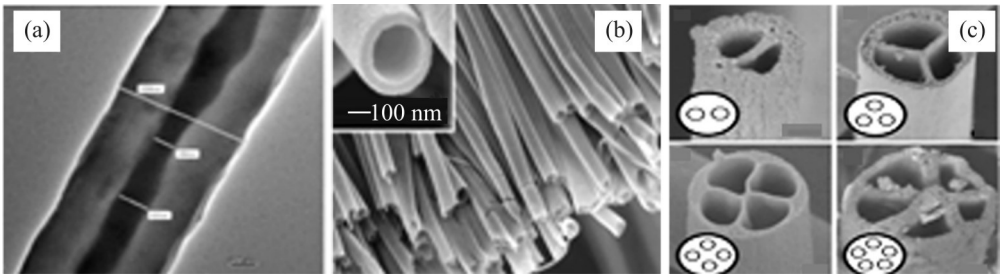


Fig. 3 (a) Core/shell structure fiber; (b) hollow nanotubes; (c) porous nanofibers[24–26]

隙的主要原因。Liang等[18]制备的多孔电纺聚乳酸(PLA)膜对真空泵油的吸附量为42.38 g/g。Prasad等[19]制备了高度多孔的纤维状PVDF膜。纤维表面粗糙形态的存在使纤维表面的水接触角达到135°，吸油倍率为265.22%。通过吸油机理研究发现，具有多孔、大孔结构的纤维比表面积较大，是获得高吸附倍率的关键。Yang等[20]将聚(L-乳酸)(PLLA)电纺后泡在丙酮中，得到高度多孔的吸油纳米纤维材料。未处理的PLLA纤维膜对硅油的吸油倍率为30.86 g/g，处理后吸油效果提高1倍，保油率可达到80%以上。Zhang等[21]以PLA/氯仿溶液为原料，制备了具有均匀纳米孔的PLA电纺微纤维。PLA微纤维的吸油能力高达27 g/g。Chen等[22]制备了大孔PS纤维（Fig.2），对不同油品进行吸附测试，吸油倍率可达850 g/g以上，具有很好的吸附性能。

3.2 中空纤维

中空纤维因在细胞培养、药物输送、生物反应器、气体分离和水净化等领域的潜在应用而受到越来越多的关注。Loscertales等[23]利用同轴电纺法制备核/壳结构；随后，研究人员分别用该方法成功制备出具有核壳结构的纤维(Fig.3(a))、中空纳米管(Fig.3(b))和多孔道纳米纤维(Fig.3(c))[24~26]。

Mantripragada等[27]采用双组分同轴电纺法制备了3种具有多孔和/或中空碳纳米纤维：内部多孔结

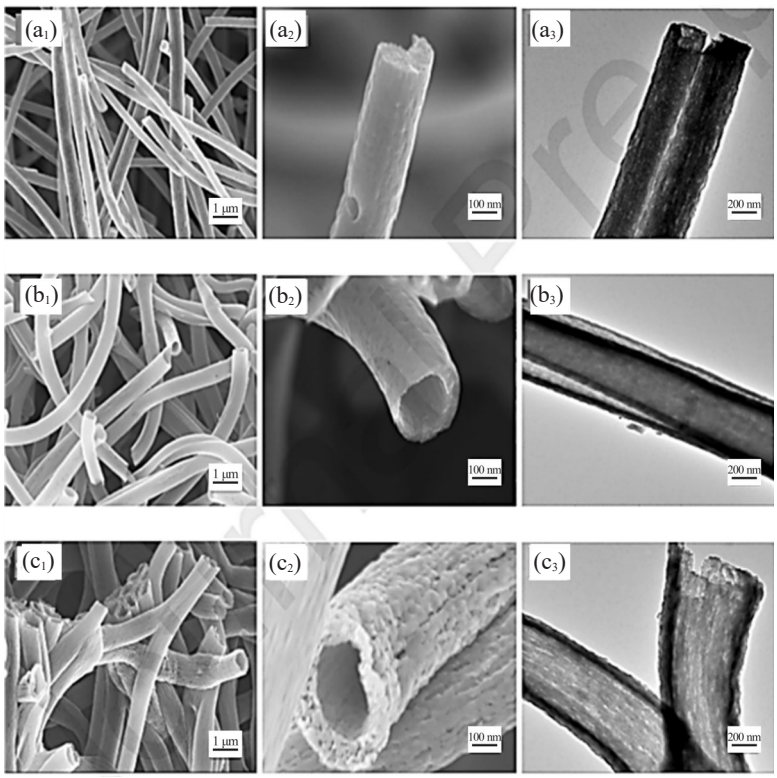


Fig. 4 Morphology and surface properties of ECNF membrane: (a) ECNF-P; (b) ECNF-H; (c) ECNF-HP. 1 and 2 are low-magnified and high-magnified SEM plots, respectively; 3 is the TEM diagram[27]

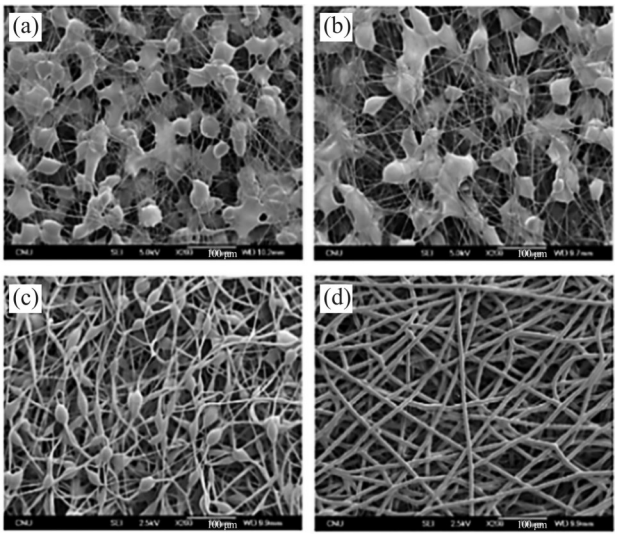


Fig. 5 SEM images of electrospun PHBV fibers at different solution mass fractions: (a) 16%; (b) 22%; (c) 26%; (d) 28%[30]

构的碳纳米纤维(ECNF-P)、中空碳纳米纤维(ECNF-H)和多孔壁中空碳纳米纤维(ECNF-HP)(Fig.4)。在所有ECNF膜中,ECNF-P吸油能力最高,矿物油吸油量约为ECNF-H的3倍、ECNF-HP的5倍。ECNF-H的孔隙结构成为油流失的通道,降低了其吸油能力。ECNF-HP比ECNF-H表现出更强的脆性,这会导致内部孔隙坍塌和堵塞,降低其重复使用性能。Ryu等[28]制备了PLA多孔中空纤维,纤维内部中空结构以及纤维的毛细作用使纤维的表面积增大,因此可以吸收更多的油。同轴电纺后壳层包裹在核层的外部,增大了纤维的粗糙度。

3.3 串珠结构

串珠结构常用于空气过滤、光子元件、药物递送及超疏水材料。随着喷射速度和电压的增加,串珠的数量减少,形貌呈现出从球形到纺锤状的转变。一般来说,串珠被认为是不可取的或有缺陷的产品。然而有研究表明,具有串珠结构的纤维有更好的吸油性能[29],特别是多孔串珠具有超疏水性能。Yoon等[30]用电纺法制备了具有不同串珠结构的聚3-羟基丁酸-*co*-3-羟基戊酸酯(PHBV)纤维(Fig.5),增加纺丝液浓度,串珠由圆形变为椭圆形,继续增加浓度,串珠消失(Fig.5(d))。当纤维中有串珠时接触角为140°左右;串珠全部消失时的质量分数为28%,水接触角降到128°,表明具有孔隙结构的串珠有很好的疏水性。Zheng等[31]分别制备了PS串珠和光滑结构。光滑结构的水接触角在135°~145°之间;而含有串珠结构的表面水接触角约150°。

总体来看,具有多孔结构的纤维具有较高的吸油倍率,吸附油品时能够使油品完全浸入到纤维中,空气阻力的作用较小。串珠结构的优点是保油性能较好,纤维之间相互堆积的串珠使得纤维具有凹凸不平的表面,当油品分子进入后,纤维之间复杂的孔隙结构使油品分子难以泄漏出去,如果纤维过厚,在吸油过程中会有空气阻力的影响,导致相同材料的纤维在吸收同一个油品时,具有串珠结构的纤维吸油量没有多孔纤维高。中空结构的纤维由于纤维间的毛细作用及中空结构使其可以快速吸附,但中空结构会变成油流失的通道,导致其保油性能较差。

4 电纺纤维结构的影响因素

4.1 电压

电压过小,溶液的表面张力起主导作用。纺丝电压过大,起主导作用的是电场力。当表面张力大于电场力时,纤维中呈较多串珠结构;当电场力逐渐高于表面张力时,对溶液的拉伸作用慢慢增强,串珠数量减少,逐渐变为纺锤形。随电压继续增大,串珠逐渐消失,纤维粗细均匀。如电压继续增大,拉伸力过大,射流会不稳定,在空气中的挥发时间缩短。未挥发的溶剂随着溶质喷射在接收装置上,使纤维不连续[32],从而再次出现串珠结构。增加电压可以实现超细纤维的制备[33]。纤维直径分布窄可更好地控制纤维膜中的孔隙,这在分离领域尤其是水过滤中

至关重要[34]。Ranjbar等[35]制备黄芪胶/聚乙烯醇复合纳米纤维，将电压从10 kV增加到20 kV，纤维直径从153 nm降低到98 nm。这不仅是电场力与溶液表面张力的作用，还有电场中同种电荷相斥的作用。纤维形貌的变化不仅与电压有关，还与材料组成有关，不同材料在相同电压下不一定具有相同直径。

4.2 接收距离

接收距离会影响纤维的直径。这主要是静电场力和溶液射流的挥发相互竞争的结果。电压一定时，接收距离小使挥发时间短，导致溶剂不能完全挥发，纤维直径变粗且不均匀、产生黏连，同时，作用在纺丝溶液之间的静电排斥力和拉伸力的减小，使纤维的均匀拉伸性变差，导致纤维变粗。当接收距离增大到一定值时，静电场力与溶液射流挥发的影响达到平衡，纤维直径均匀。接收距离继续增大，静电场力降低，导致溶液射流在空气中的稳定性变差，不仅导致纤维直径不均匀、可纺性降低，还使纤维在接收装置上的取向排列变差[36]。Jin等[37]研究发现，当接收距离较小时，射流运动不稳定，膜上出现串珠，而较大的接收距离适合制备直径较小的纤维。

接收距离的改变不仅会影响纤维直径，还会影响纤维的结构。接收距离过大过小都会产生串珠结构，可能是溶液在空气中不能充分地挥发或者是静电场力不足以支撑溶液射流的稳定运动，导致接收板上会接收到不连续的纤维以及串珠结构的纤维。

4.3 喷射速度

电压一定时，随喷射速度的变化，可获得不同形貌的纤维。喷射速度较低时，纤维直径分布较集中。喷射速度较高时，在同一时间内牵伸的纺丝液量变大，牵伸和分化不稳定，溶液不能完全分散。随喷射速度不断增加，纤维直径也在增大（Fig.6）。因为相同电压下，当从针尖挤出更多聚合物溶液时，聚合物的固含量也会增加，并在同一时间（距离相同）内固化[38]。

在电纺过程中，通过控制单一参数来调控纤维直径及形貌具有片面性。不同材料在进行电纺时需要提前进行实验设计，对纺丝电压、接收距离以及溶液射流的喷射速度进行筛选，得到想要制备的纤维结构以及合适直径的最佳条件，使制备的纤维在油水分离领域具有较高的吸油倍率。

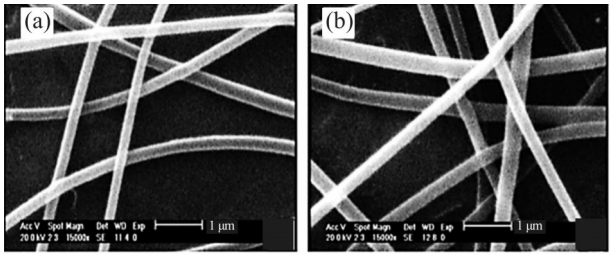


Fig. 6 SEM images of fibers with different flow rates at a constant voltage of 15 kV: (a) flow rate of 0.5 mL/h; (b) flow rate of 1.5 mL/h[38]

4.4 聚合物溶液性质

聚合物溶液的性质是影响电纺过程中纤维形成的重要因素，会影响纤维的形态、直径、表面、降解动力学，还会影响它们的热性能和力学性能。

Sánchez-Cid等[39]采用不同浓度的纤维素衍生物溶液和不同比例的溶剂分析其对纤维结构性质的影响。结果表明，以10%的乙酸/水、15%的丙酮/N-二甲基甲酰胺和5%的丙酮/N-二甲基甲酰胺为溶剂的溶液在溶液状态和纳米结构状态下都表现出最好的性能。Wu等[40]探究了不同浓度的聚乙烯氧化物(PEO)的性能与具有蜂窝结构PEO性能之间的关系。结果表明，电纺溶液的表面张力、黏度和电导率都随着PEO浓度的增加而增加。Christian等[41]通过改变聚合物溶液浓度，将乙醇(EtOH)和二甲基甲酰胺(DMF)的混合物作为溶剂来制备电纺聚乙烯吡咯烷酮(PVP)纤维，探究了溶剂组成对结构的影响。结果表明，PVP质量分数低于6%，可以获得典型的串珠结构或串珠纤维结构的组合。PVP质量分数超过12%时，纤维中的串珠结构逐渐消失，变为直径均匀的纤维状形态。

4.5 环境条件

在设计电纺工艺时，还需要考虑环境因素的影响，如温度及相对湿度的影响。温度的升高加速了溶剂的蒸发，使射流凝固速度加快，这不利于纤维直径的缩小和射流中的分子迁移。环境湿度会影响溶剂的蒸发速率，从而影响纳米纤维的拉伸和凝固。Qu等[42]探究了在不同温度条件下制备的聚甲基丙烯酸甲酯/聚苯胺电纺纤维，发现温度降低可使溶液表面张力升高，导致射流不能完全分裂和散射，形成多射流堆积形态。纤维平均直径在20~28 ℃之间时逐渐减小，但在30 ℃时变化趋势相反，说明在较高温度下溶剂蒸发的加速更为显著。Halabi等[43]通过电

纺技术制备纳米纤维,调整电纺过程中的相对湿度,获得了具有不同形态的纳米纤维。当相对湿度为40%时,纤维直径分布受到显著影响。在此值以上,相对湿度对纤维直径分布的影响不明显。

5 结语与展望

利用静电纺丝法可以获得不同的纤维结构,例如中空结构、串珠结构、多孔结构等,提高纤维的比表面积。因而,电纺纤维具有超高的疏水性和吸油性能,且吸油速度快。本文重点总结了电纺纤维不同结构对吸油效果的影响以及在电纺中形成不同结构的原因。由于纤维吸油后力学性能下降,导致重复使用率降低,因此,如何通过调控制备条件来改善纤维吸油后的力学性能是行业发展亟待解决的主要问题。另外,如何实现吸油纤维的工业化生产也是目前需要研究的问题。

参考文献:

[1] Yi A, Zhang H. Oil spill collection boom of ship based on negative pressure principle[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 446: 052106.

[2] Liu S, Dong C, Yuan C, *et al*. Friction reduction behavior of oil-infused natural wood[J]. Friction, 2022, 10: 14.

[3] 何紫莹, 郭三维, 高慧敏, 等. 高吸油树脂材料研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(3): 179-184.
He Z Y, Guo S W, Gao H M, *et al*. Progress in super oil absorbent polymer[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 31 (3): 179-184.

[4] 耿孝岭. 功能性高吸油树脂的制备及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
Geng X L. Preparation and application research of functional superabsorbent resin[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.

[5] Flory P J. Principle of polymer chemistry[M]. New York: Cornell University Press, 1953: 589.

[6] 胡静璇. 高吸油树脂的制备与性能研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
Hu J X. Preparation and properties of high oil absorption resins [D]. Wuhan: Wuhan University of Engineering, 2017.

[7] 林润雄,姜斌,黄毓礼. 高吸水性树脂吸水机理的探讨[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 1998(3): 22-27.
Lin R X, Jiang B, Huang Y L. Discussion on water absorption mechanism of super absorbent resin[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 1998(3): 22-27.

[8] 李建颖. 高吸水与高吸油性树脂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 13-15.

[9] 任俊鹏, 汤婷, 董翠鸽, 等. 表面硅烷化改性秸秆吸油材料的制备及性能[J]. 环境化学, 2021, 40(7): 2246-2254.
Ren J P, Tang T, Dong C G, *et al*. Preparation and properties of straw oil absorbent material modified by surface silanization[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(7): 2246-2254.

[10] Tan X F, Wang D, Zang D, *et al*. Superhydrophobic/superoleophilic corn straw as an eco-friendly oil sorbent for the removal of spilled oil[J]. Clean Techn Environ Policy, 2021, 23: 145-152.

[11] Ai-hamadani A, Yeneneh A M, Aimi M A, *et al*. Removal of oil from contaminated wastewater using thermo- chemically modified lignocellulosic biomass[J]. Materials Science Forum, 2022, 1059: 157-170.

[12] Shang Q, Cheng J, Hu L, *et al*. Bio-inspired castor oil modified cellulose aerogels for oil recovery and emulsion separation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 636: 128043.

[13] Zhang L, Tong C L, Dong L, *et al*. Developing a superhydrophobic absorption- dominated electromagnetic shielding material by building clustered Fe_3O_4 nanoparticles on the copper-coated cellulose paper[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021, 9: 11-13.

[14] Gόes M M, Garcia J C, Rosa S L F, *et al*. New magnetic polyurethane hybrid composite for oil sorption[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2020, 49: 10-17.

[15] 魏徵,刘鹏宇,王源升,等. 聚甲基丙烯酸十二酯的合成及吸油性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(2): 5-8.
Wei H, Liu P Y, Wang Y S, *et al*. Preparation and oil-absorbting properties of poly(lauryl methacrylate) [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2013, 29(2): 5-8.

[16] Zhan B, Maryam A, Wang G Y, *et al*. Underwater oleophobic electrospun membrane with spindle-knotted structured fibers for oil- in- water emulsion separation[J]. Langmuir, 2023, 39: 2301-

2311.

[17] Moon E, Kang E, Song W, *et al*. Chitosan/oleamide blended electrospun nanofiber with enhanced spinnability and moderate hydrophobicity[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2023, 40: 405-411.

[18] Liang J W, Prasad G, Wang S C, *et al*. Enhancement of the oil absorption capacity of poly(lactic acid) nano porous fibrous membranes derived via a facile electrospinning method[J]. Applied Sciences, 2019, 9: 1014.

[19] Prasad G, Lin X, Liang J, *et al*. Fabrication of intra porous PVDF fibers and their applications for heavy metal removal, oil absorption and piezoelectric sensors[J]. Journal of Inorganic Materials Science, 2023, 9: 9.

[20] Yang J, Li F, Lu G, *et al*. Electrospun biodegradable poly(L-lactic acid) nanofiber membranes as highly porous oil sorbent nanomaterials[J]. Nanomaterials, 2022, 12: 2670.

[21] Zhang L, Narita C, Himeda Y, *et al*. Development of highly oil-absorbent polylactic- acid microfibers with a nanoporous structure via simple one-step centrifugal spinning[J]. Separation and Purification Technology, 2022, 282: 120156.

[22] Chen P Y, Tung S H. One- step electrospinning to produce nonsolvent- induced macroporous fibers with ultrahigh oil adsorption capability[J]. Macromolecules, 2017, 50: 2528-2534.

[23] Loscertales I G, Barrero A, Gurerrero I, *et al*. Micro/nano encapsulation via electrified coaxial liquid jets[J]. Science, 2002, 295: 1695-1698.

[24] Sun Z, Zussman E, Yarin A L, *et al*. Compound core- shell polymer nanofibers by co- electrospinning[J]. Advanced Materials, 2003, 15: 1929-1932.

[25] Li D, Xia Y. Direct fabrication of composite and ceramic hollow nanofibers by electrospinning[J]. Nano Letters, 2004, 4: 933-938.

[26] Zhao Y, Cao X, Jiang L. Bio-mimic multichannel microtubes by a facile method[J]. Journal of the American Chemical Society, 2007, 129: 764-765.

[27] Mantripragada S, Gbewonyo S, Deng D, *et al*. Oil absorption capability of electrospun carbon nanofibrous membranes having porous and hollow nanostructures[J]. Materials Letters, 2020, 262: 127069.

[28] Ryu Y S, Kim S H. Research of polylactide porous hollow nanofiber membrane with high selective absorption characteristics[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137: 49132.

[29] Tuazon M, Aquino R R, Ang M, *et al*. Effect of lithium chloride on the fabrication of polyvinylidene fluoride nanocomposite membrane for the separation of oil- water emulsions[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 894: 012005.

[30] Yoon Y I, Moon H S, Lyoo W S, *et al*. Super hydrophobicity of PHBV fibrous surface with bead- on- string structure[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2008, 320: 91-95.

[31] Zheng J, He A, Li J, *et al*. Studies on the controlled morphology and wettability of polystyrene surfaces by electrospinning or electrospraying[J]. Polymer, 2006, 47: 7095-7102.

[32] Topuz F, Abdulhamid M A, Holtzl T, *et al*. Nanofiber engineering of microporous polyimides through electrospinning: influence of electrospinning parameters and salt addition[J]. Materials & Design, 2021, 198: 109280.

[33] Hameddani Y, Balan M, Pal S, *et al*. The role of polymer carrier and process parameters for small molecule drug delivery via blended electrospinning[J]. Nano Life, 2021, 11: 21.

[34] Agueda J, Madrid J, Mondragon J M, *et al*. Synthesis and characterization of electrospun polyvinylidene fluoride- based (PVDF) scaffolds for renal bioengineering[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 14: 1742-6596.

[35] Ranjbar- Mohammadi M, Mahrami S H, Joghataei M T. Fabrication of novel nanofiber scaffolds from gum tragacanth/ poly(vinyl alcohol) for wound dressing application: in vitro evaluation and antibacterial properties[J]. Materials Science and Engineering: C, 2013, 33: 4935-4943.

[36] Arifin Z, Hadi S, Jati H N, *et al*. Effect of electrospinning distance to fabricate ZnO nanofiber as photoanode of dye-sensitized solar cells[J]. AIP Conference Proceedings, 2020, 2217: 030095.

[37] Jin S, Yu J, Zheng Y, *et al*. Preparation and characterization of electrospun PAN/PSA carbonized nanofibers: experiment and simulation study[J]. Nanomaterials, 2018, 8: 821.

[38] Singh R K, Sun W L, Miao J. Holistic investigation of the electrospinning parameters for high percentage of β- phase in PVDF nanofibers[J]. Polymer, 2020, 214: 123366.

[39] Sánchez-Cid P, Rubio-Valle J F, Jiménez-Rosado M, *et al*. Effect

of solution properties in the development of cellulose derivative nanostructures processed via electrospinning[J]. Polymers, 2022, 14: 665.

[40] Wu L, Zhang Y F, Yu H, *et al*. Self-assembly of polyethylene oxide and its composite nanofibrous membranes with cellular network structure[J]. Composites Communications, 2021, 27: 100759.

[41] Christian N M, Diego F D S, Luis M C M, *et al*. Impact of the solvent composition on the structural and mechanical properties of customizable electrospun poly(vinylpyrrolidone) fiber mats [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2021, 40: 22923-22935.

[42] Qu C, Zhao P, Ren Y, *et al*. Increase the surface PANI occupancy of electrospun PMMA/PANI fibers: effect of the electrospinning parameters on surface segregation[J]. Polymers, 2022, 14: 3401.

[43] Halabi M, Mann-Lahav M, Beilin V, *et al*. Electrospun anion-conducting ionomer fibers-effect of humidity on final properties [J]. Polymers, 2020, 12: 1020.

Progress on Research of the Influencing Factors of Electrospinning Process of Oil-Absorbing Fibers

Jia Li[1,2], Kexin Liu[1,2,3], Zixuan Guo[1,2]

(*1, School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Green Chemical Engineering and Technology of College of Heilongjiang Province, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 3. TBEA Shandong Luneng Mount Taishan Cable Co., Ltd, Xintai 271200, China*)

ABSTRACT: In recent years, as a result of the oil spillage accidents and large amounts of industrial and domestic wastewater discharge, oil pollution continues to intensify, causing serious impact on the ecological environment. It has become an urgent task to study and prepare efficient oil absorbing materials to remove oil pollutants from water and reduce the harm to the environment. The oil-absorbing mechanism of high oil-absorbing resins was discussed in this paper, and natural oil absorption materials were compared with synthetic oil absorption materials. The porous, hollow and beaded structures of electrospun fibers and the effect of different structures on oil absorption were focused on. Factors affecting fiber structure were also discussed. Finally, the future development of oil absorbing electrospun fiber was prospected.

Keywords: oil absorbing materials; electrospinning; influencing factors; fiber structure