

# 医用多功能水凝胶纤维基非织造布的制备与性能

董金铎, 胡慧景, 邓炳耀, 李大伟\*  
(江南大学纺织科学与工程学院, 江苏无锡 214122)

**摘要:**以天然多糖羧甲基壳聚糖与羧甲基纤维素钠为纺丝原料, 槲皮素作为功能因子, 结合水动力牵伸纺丝技术与湿法成网制备柔软亲水、抗氧化、快速止血的多功能水凝胶纤维基非织造布(HFN), 探讨HFN的微观形貌、水蒸气透过率、抗氧化活性、体外止血性能。研究得出, HFN的水蒸气透过率为 $2\,975.91\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 且具有良好的超亲水性, 能够在 $0.05\text{ s}$ 内完全吸收 $10\ \mu\text{L}$ 水滴; HFN对1,1-二苯基-2-苦基肼自由基的清除率为82.63%, 表明其具有优异的抗氧化活性; 该材料具有良好的血液相容性, 体外凝血指数为30.07%, 血液凝固时间为 $7.92\text{ s}$ , 明显优于棉纱布对照组。结果表明, HFN具有优异的抗氧化活性与快速止血性能。该研究为医用服装面料的开发提供了新的思路。

**关键词:** 水凝胶纤维; 抗氧化; 快速止血; 多功能敷料; 医用服装面料

中图分类号: TS 171 文献标志码: A 文章编号: 2096-1928(2025)05-0384-05

## Preparation and Performance of Medical Multifunctional Hydrogel Fiber Based Nonwoven Fabrics

DONG Jinhua, HU Huijing, DENG Bingyao, LI Dawei\*  
(College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** Utilizing natural polysaccharides carboxymethyl chitosan and sodium carboxymethyl cellulose as spinning raw materials, and quercetin as the functional factor, multifunctional hydrogel fiber-based nonwoven fabric (HFN) with softness, hydrophilicity, antioxidant activity, and rapid hemostatic performance was fabricated by combining hydrodynamic drafting spinning platform with wet-laid web formation. The study investigated the microscopic morphology, water vapor transmission rate, antioxidant activity, and in vitro hemostatic performance of HFN. The results showed that the water vapor transmission rate of HFN was  $2\,975.91\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , and it exhibited excellent superhydrophilicity, capable of completely absorbing a  $10\ \mu\text{L}$  water droplet within  $0.05\text{ s}$ . The scavenging rate of HFN against 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl free radicals reached 82.63%, demonstrating outstanding antioxidant activity. The material also displayed good blood compatibility, with an in vitro blood clotting index of 30.07% and a blood coagulation time of  $7.92\text{ s}$ , which were significantly superior to those of the cotton gauze control group. The results indicate that HFN possesses excellent antioxidant activity and rapid hemostatic performance. This study provides new research insights for the development of medical clothing fabrics.

**Key words:** hydrogel fiber, antioxidant, rapid hemostasis, multifunctional dressings, medical clothing fabrics

皮肤由表皮、真皮和皮下组织组成, 是保护机体免受环境刺激与微生物入侵的重要屏障<sup>[1-3]</sup>。皮

肤创伤容易导致蛋白质和水分流失, 进而引发新陈代谢紊乱、免疫及内分泌系统失调, 为患者带来生

收稿日期: 2024-01-29; 修订日期: 2025-07-10。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51908246)。

作者简介: 董金铎(1998—), 男, 博士研究生。

\*通信作者: 李大伟(1989—), 男, 副研究员, 硕士生导师。主要研究方向为生物医用纺织品、功能纤维和非织造材料。

Email: ldw@jiangnan.edu.cn

理与心理上的痛苦<sup>[4]</sup>。伤口愈合是一个复杂而动态的生理过程,包括止血阶段(血小板聚集与血栓形成)、炎症阶段(中性粒细胞清除渗出物)、增殖阶段(上皮化)、重塑阶段(成熟)<sup>[5]</sup>,这4个阶段的有序进行保证了伤口成功愈合<sup>[6]</sup>。然而,在炎症阶段活性氧的持续产生可能会导致过度氧化应激,诱导细胞凋亡与组织损伤,阻碍伤口愈合过程。此外,充足的氧气供应能促进细胞增殖与组织重塑,是加速伤口愈合的重要条件<sup>[7]</sup>。因此,理想的伤口敷料应具有多种生物活性,在伤口愈合的不同阶段协同作用,促进伤口愈合。

目前,已有多种不同功能、不同形状的敷料投入市场和临床应用,例如纱布、膜、水凝胶、气凝胶、海绵、静电纺支架等。水凝胶由于其优异的生物相容性和吸湿保湿性能,逐渐成为临床医用伤口敷料的重要选择<sup>[8-9]</sup>。水凝胶能吸收伤口表面代谢物,并为伤口提供湿态环境;柔软的质地能紧密贴敷伤口,屏蔽外界微生物入侵。此外,水凝胶独特的多孔结构载药平台能负载多种药物、生长因子和细胞因子,为伤口愈合提供活性物质<sup>[10-11]</sup>。然而,目前开发的水凝胶多以片状或薄膜的形式在临床中使用,该结构较为致密,不利于气体的流动交换,无法为伤口愈合提供充足的氧气。传统医用纱布的透气性和高孔隙率则能为伤口愈合供应充足的氧气,促进细胞增殖与组织重塑。因此,将水凝胶材料加工为纤维状,并在此基础上构建非织造布的策略是极具潜力的解决方案<sup>[12]</sup>,而水凝胶纤维构建的织物和非织造布在医疗服装开发中具有极大的应用前景。

文中以羧甲基壳聚糖、羧甲基纤维素钠为原料,并添加天然黄酮类多酚药物槲皮素作为抗氧化剂<sup>[13]</sup>,结合水动力牵伸纺丝技术制备水凝胶纤维。制备的水凝胶纤维通过湿法成网技术被加工成水凝胶纤维基非织造布(hydrogel fiber-based nonwoven fabric, HFN)用于伤口敷料;进一步探究 HFN 的微观结构、透湿性、亲水性、抗氧化活性及体外止血性能。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 原料** 羧甲基壳聚糖,上海沃凯化学试剂有限公司提供;羧甲基纤维素钠、无水乙醇、戊二醛,均由国药集团化学试剂有限公司提供;槲皮素,上海麦克林生化科技股份有限公司提供;磷酸盐缓冲液(phosphate buffer saline, PBS)、氯化钙

(CaCl<sub>2</sub>),均由北京沃凯生物科技有限公司提供。

**1.1.2 仪器** SU8100 型场发射扫描电子显微镜,日本日立公司制造;Nicolet is 10 傅里叶变换红外光谱仪,美国赛默飞世尔科技有限公司制造;DSA25 接触角测量仪,德国克吕士公司制造;FM200 高剪切分散乳化机,上海弗鲁克流体机械制造有限公司制造;HWS-80L 恒温恒湿培养箱,绍兴华脉仪器制造有限公司制造;Multiskan Go 酶标仪,美国赛默飞世尔有限公司制造;TG16-WS 高速台式离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司制造。

### 1.2 方法

**1.2.1 HFN 的制备** 采用实验室自制的水动力牵伸纺丝装置制备水凝胶纤维,所用针头内径为 0.26 mm,推进速度为 0.6 mL/min,磁力搅拌器转速为 1 000 r/min。纺丝液中含有体积分数为 2% 的羧甲基壳聚糖与羧甲基纤维素钠(质量比为 7:3),槲皮素质量浓度为 0.5 mg/mL,凝固浴为体积分数 3% 的 CaCl<sub>2</sub> 溶液。使用高剪切分散乳化机将得到的水凝胶纤维剪切为短纤维,通过湿法成网技术得到均匀的水凝胶纤维网,冷冻(-20 ℃冷冻 12 h)、干燥(20 Pa 真空度下干燥 24 h),得到 HFN。

**1.2.2 结构表征** 使用场发射扫描电子显微镜观察水凝胶纤维与 HFN 的微观形貌,并通过能谱分析其表面元素分布情况,采用傅里叶变换红外光谱仪分析 HFN 的化学结构。

**1.2.3 水蒸气透过率** HFN 与棉纱布的水蒸气透过率参考 YY/T 0471.2—2004《接触性创面敷料试验方法 第 2 部分:透气膜敷料水蒸气透过率》<sup>[14]</sup>测定,并略作调整。将 HFN 与棉纱布裁剪成直径为 11 mm 的圆形,覆盖于装有 2 mL 去离子水的瓶口并密封边缘;再将样品置于温度为 37 ℃、湿度为 75% 的环境中,每种样品测试 3 次,取平均值。水蒸气透过率计算公式为

$$W = \frac{24 \times (w_F - w_1)}{A \times t} \quad (1)$$

式中:W 为样品的水蒸气透过率[g/(m<sup>2</sup>·d)];w<sub>F</sub> 为测试前装有水的瓶子质量(g);w<sub>1</sub> 为测试后装有水的瓶子质量(g);A 为瓶口面积(m<sup>2</sup>);t 为测试时间(h)。

**1.2.4 抗氧化活性** 将 1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, DPPH)溶于无水乙醇中,配置浓度为 100 μmol/L 的 DPPH 溶液。分别称取 5 mg 的 HFN 与棉纱布置于离心管中,并使用少量 PBS 充分浸润,随后在离心管中加入 1 mL DPPH 溶液,在避光室温环境中孵育 12 h。使用酶

标仪测试其上清液在 517 nm 处的吸光度<sup>[15]</sup>。每种样品测试 3 次,取平均值。DPPH 自由基清除率的计算公式为

$$D = \frac{D_B - D_S}{D_B} \quad (2)$$

式中: $D$  为试样的 DPPH 自由基清除率; $D_B$  为未加样品 DPPH 溶液的吸光度; $D_S$  为加入样品 DPPH 溶液的吸光度。

**1.2.5 体外溶血率** 通过体外溶血实验评估材料的血液相容性<sup>[16]</sup>。使用 PBS 对兔抗凝全血进行多次离心洗涤,得到沉淀的红细胞。称取 2 mg 试样置于离心管中,随后加入 4 mL PBS、1 mL 富含红细胞的溶液(体积分数为 5%)。混合溶液在 37 °C 下孵育 1 h 后,在 5 000 r/min 条件下离心 5 min,通过酶标仪测量上清液在 540 nm 处的吸光度。每种样品测试 3 次,取平均值。溶血率的计算公式为

$$H = \frac{H_S - H_{NC}}{H_{PC} - H_{NC}} \quad (3)$$

式中: $H$  为试样的体外溶血率; $H_S$  为试样溶液上清液的吸光度; $H_{PC}$  为 4 mL 去离子水与 1 mL 富含红细胞溶液上清液的吸光度; $H_{NC}$  为 4 mL PBS 与 1 mL 富含红细胞溶液上清液的吸光度。

**1.2.6 血液凝固时间** 将 HFN 与棉纱布裁剪为 1 cm × 1 cm 的方形并置于 5 mL 离心管中,离心管浸没在 37 °C 的水浴锅中预热。在离心管中加入 1 mL 抗凝兔全血和 0.1 mL CaCl<sub>2</sub> 溶液(浓度为 0.2 mol/L)。离心管倾斜一定角度,通过不同时间的血液流动状态记录血液凝固时间。每种样品测试 3 次,取平均值。

**1.2.7 体外凝血指数** 通过体外凝血实验评价 HFN 的体外止血性能。简言之,将 HFN 与棉纱布裁剪为 1 cm × 1 cm 的方形置于培养板上,并在 37 °C 培养箱中预热 5 min。将 100 μL 兔抗凝全血滴到试样表面,同时滴加 10 μL CaCl<sub>2</sub> 溶液(浓度为 0.2 mol/L),并在 37 °C 下孵育 10 min。缓慢加入 10 mL 去离子水,并在 50 r/min 条件下振荡 5 min,以重悬未凝固的血液。通过酶标仪测量上清液在 540 nm 处的吸光度。每种样品测试 3 次,取平均值。血液凝固指数的计算公式为

$$B = \frac{B_S}{B_{NC}} \quad (4)$$

式中: $B$  为血液凝固指数; $B_S$  为样品上清液的吸光度; $B_{NC}$  为未加样品组上清液的吸光度。

**1.2.8 血细胞黏附** 将 HFN 与棉纱布裁剪为 1 cm × 1 cm 的方形,随后滴加 100 μL 抗凝兔全血,

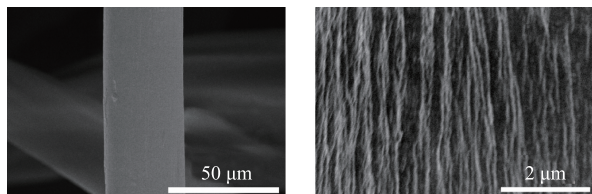
并立即滴加 10 μL CaCl<sub>2</sub> 溶液(浓度为 0.2 mol/L)。在 37 °C 下孵育 10 min,使用 PBS 多次冲洗除去未黏附的血细胞。用质量分数为 2.5% 的戊二醛溶液固定过夜后,依次使用体积分数为 30%,50%,70%,90%,100% 的乙醇溶液进行脱水处理。通过场发射扫描电子显微镜观察试样表面黏附的血细胞形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 HFN 的结构

文中研究受水涡启发,搭建了水动力牵伸纺丝装置,用于制备直径可控的水凝胶纤维。高速旋转的磁力转子使凝固浴溶液形成稳定的涡流。当纺丝液与凝固浴溶液接触时,快速交联形成水凝胶,同时涡流中的剪切拉伸力为水凝胶纤维提供柔性牵伸。这种牵伸方式不会破坏水凝胶纤维的内部结构与表面形貌,能连续制备直径可控的水凝胶纤维。经过计算,该装置单通道 1 h 消耗 36 mL 纺丝液,能生产约 2 110 m 的水凝胶纤维(直径约 50 μm)。文中研究通过集成多通道装置,为规模化制备连续、均匀的水凝胶纤维提供了可行的解决方案。

文中结合水动力牵伸纺丝装置与湿法成网技术,成功制备 HFN 作为伤口敷料。羧甲基纤维素钠和羧甲基壳聚糖会与钙离子络合形成水凝胶,并在水涡流的牵伸力作用下形成连续、均匀的纤维。水凝胶纤维的微观形貌及红外光谱如图 1 所示。该纤维直径约 36 μm[见图 1(a)],表面呈具有取向排列的沟壑状[见图 1(b)],这归因于纺丝过程中高速旋转的凝固浴溶液对纤维的剪切拉伸力。水凝胶纤维的微观形貌及红外光谱如图 1(c)所示,羧甲基纤维素钠与羧甲基壳聚糖中丰富的羟基形成大量氢键,纤维中—OH 的红外特征峰变宽且略有偏移。HFN 的微观形貌及其钙元素分布如图 2 所示。丰富的氢键使得纤维之间相互粘连,从而构建出结构稳定的非织造布[见图 2(a)],而钙离子作为交联剂在非织造布中均匀分布[见图 2(b)]。将高效的水动力牵伸纺丝装置与湿法成网技术结合,能够实现规模化制造水凝胶纤维基非织造材料。



(a) 低倍数

(b) 高倍数

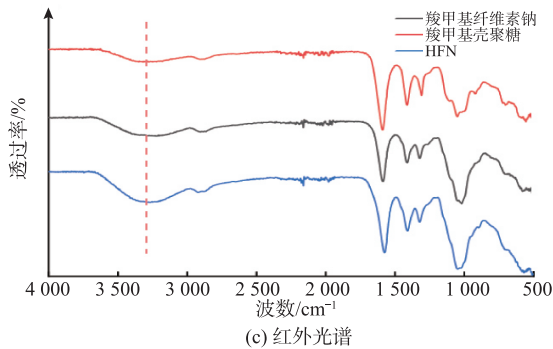


图1 水凝胶纤维的微观形貌及其红外光谱

Fig.1 Micromorphology and infrared spectra of hydrogel fiber

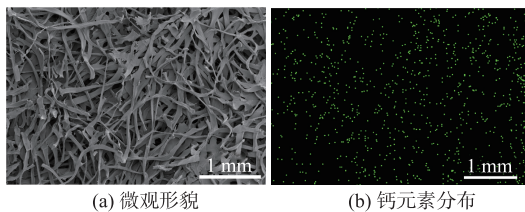


图2 HFN的微观形貌及其钙元素分布

Fig.2 Micromorphology and calcium element distribution of HFN

## 2.2 水蒸气透过率与亲水性

理想的伤口敷料应具有良好的湿度管理能力。当伤口过于干燥时,不利于伤口愈合,而伤口过于潮湿时,容易滋生细菌,阻碍伤口愈合<sup>[17-19]</sup>。通过水蒸气透过率测试评价 HFN 的湿度管理能力,结果如图 3 所示。由图 3 可见, HFN 的水蒸气透过率为  $2\,975.91\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,接近于棉纱布 [ $2\,842.55\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ],远低于空白组 [ $7\,376.61\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ]。HFN 优异的水蒸气传输能力归因于其丰富的亲水基团。此外, HFN 的高孔隙率为水蒸气传输提供了有效通道。HFN 能在  $0.050\text{ s}$  内完全吸收  $10\ \mu\text{L}$  水滴,而多层棉纱布需要  $0.300\text{ s}$  才能完全吸收  $10\ \mu\text{L}$  水滴(见图 4)。结果表明, HFN 能快速吸收伤口渗出液,具有良好的湿度管理能力,作为伤口敷料具有极大的应用前景。

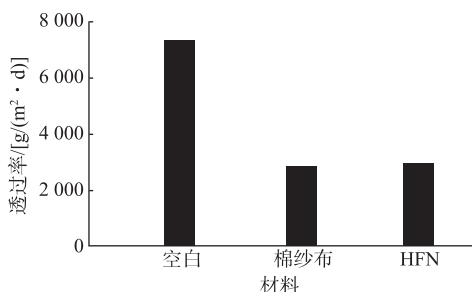


图3 棉纱布与 HFN 的水蒸气透过率

Fig.3 Water vapor permeability of cotton gauze and HFN

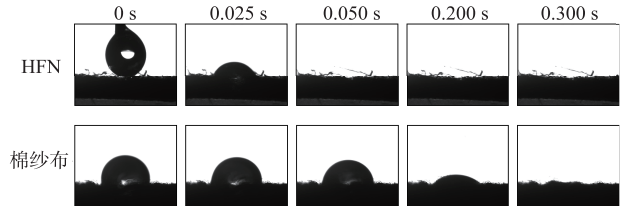


图4 棉纱布与 HFN 的亲水性

Fig.4 Hydrophilicity of cotton gauze and HFN

## 2.3 抗氧化活性

在伤口愈合过程中,自由基通过酶失活、脂质氧化和 DNA 损伤来阻碍伤口愈合。因此,理想的伤口敷料应具有良好的自由基清除能力。槲皮素作为天然黄酮类多酚药物,其 B 环上的邻苯二酚基团, A 环或 C 环上的游离羟基能有效清除自由基,具有优异的抗氧化活性<sup>[20]</sup>。通过 DPPH 自由基清除实验来评价 HFN 的抗氧化活性,结果如图 5 所示。由图 5 可见, HFN 的自由基清除率为  $82.63\%$ ,远高于棉纱布的  $40.64\%$ 。结果表明, HFN 具有优异的抗氧化活性,验证了 HFN 能有效负载与释放槲皮素药物分子,在预防伤口炎症中表现出优异的生物活性。

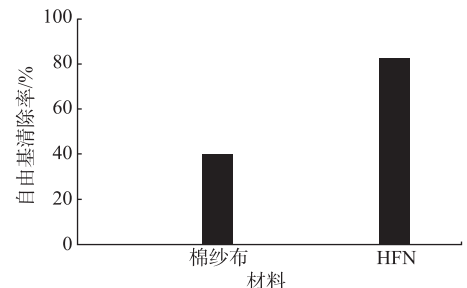


图5 棉纱布与 HFN 的 DPPH 自由基清除率

Fig.5 DPPH radical scavenging rate of cotton gauze and HFN

## 2.4 体外止血性能

理想的伤口敷料应具有良好的血液相容性。一般通过溶血率来评价 HFN 的血液相容性,溶血率低于  $5\%$  表明材料具有优异的血液相容性<sup>[21]</sup>。棉纱布与 HFN 的体外溶血率与血液凝固时间如图 6 所示。体外血液凝固指数与血细胞黏附形貌如图 7 所示。由图 6(a)可见, HFN 的溶血率为  $0.47\%$ ,接近棉纱布的溶血率  $0.43\%$ ,表明 HFN 具有优异的血液相容性,作为多功能伤口敷料具有极大的应用前景。此外,理想的伤口敷料还应具有快速止血的能力,促进伤口愈合。血液凝固时间测试表明, HFN 的血液凝固时间为  $7.92\text{ s}$ ,远低于空白组的  $13.92\text{ s}$ ,并明显低于多层棉纱布的  $8.83\text{ s}$ [见图 6(b)]。这与体外凝血指数测试的结果一致, HFN 的体外凝血指数为  $30.07\%$ ,远低于多层棉纱布的

56.29% [见图 7(a)]。体外凝血指数越低,代表试样凝血速度越快<sup>[22]</sup>。血液凝固时间与体外凝血指数结果共同验证了 HFN 具有快速止血的潜力。HFN 优异的止血能力主要归因于其有着优异的亲水能力与丰富的钙离子。优异的亲水能力使得 HFN 与血液接触时能快速吸收血清,聚集血细胞与血小板 [见图 7(c)], 激活凝血因子。此外,钙离子作为凝血因子 IV 能同时参与内源性凝血途径与外源性凝血途径,从而实现快速止血。

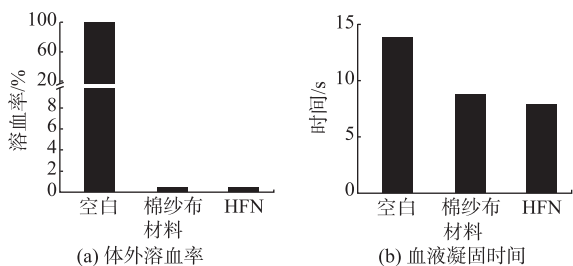


图 6 棉纱布与 HFN 的体外溶血率与血液凝固时间

Fig. 6 In vitro hemolysis rate and blood coagulation time of cotton gauze and HFN

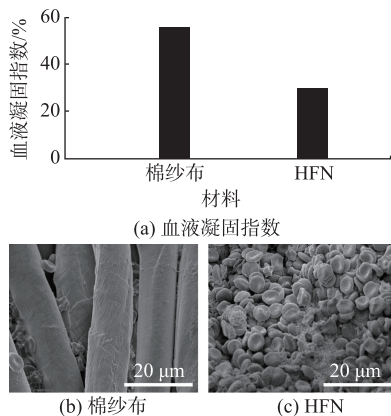


图 7 棉纱布与 HFN 的体外血液凝固指数与血细胞黏附形貌

Fig. 7 In vitro blood coagulation index and blood cell adhesion morphology of cotton gauze and HFN

### 3 结 语

文中以实验室自制的水动力牵伸纺丝装置连续制备了直径约  $36\ \mu\text{m}$  的水凝胶纤维,在此基础上开发了水凝胶纤维基非织造材料。该技术为构建新型多功能水凝胶敷料提供了新的路径。研究表明, HFN 的湿度管理能力较好, 相比棉纱布具有更加优异的亲水性。在伤口敷料应用中, 能快速吸收伤口渗出液, 维持伤口湿态平衡, 促进伤口愈合。同时, HFN 的 DPPH 自由基清除率为 82.63%, 在预防伤口炎症中表现出优异的抗氧化活性。此外, 其在体外凝血实验中同样展现出快速止血的能力, 表明 HFN 具有多种生物活性, 能在伤口愈合的不同阶

段协同作用, 促进伤口愈合。水凝胶纤维具有水凝胶的功能特性和纤维的结构优势, 在再生医学、医用敷料、组织工程等生物医学领域具有广阔的应用前景。同时, 这种多功能水凝胶纤维基敷料的设计, 为烫伤压力服、急救快速止血服等服装面料的开发提供了新的研究思路。

### 参考文献:

- [1] WANG K, WANG J H, LI L, et al. Synthesis of a novel anti-freezing, non-drying antibacterial hydrogel dressing by one-pot method[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 372: 216-225.
- [2] YU R, YANG Y T, HE J H, et al. Novel supramolecular self-healing silk fibroin-based hydrogel via host-guest interaction as wound dressing to enhance wound healing[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 417: 128278.
- [3] WANG W Z, JIA B, XU H R, et al. Multiple bonds crosslinked antibacterial, conductive and antioxidant hydrogel adhesives with high stretchability and rapid self-healing for MRSA infected motion skin wound healing [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 468: 143362.
- [4] LIU G H, WANG L, HE Y, et al. Polydopamine nanosheets doped injectable hydrogel with nitric oxide release and photothermal effects for bacterial ablation and wound healing [J]. Advanced Healthcare Materials, 2021, 10(23): 2101476.
- [5] LIU P, JIN K, WONG W, et al. Ionic liquid functionalized non-releasing antibacterial hydrogel dressing coupled with electrical stimulation for the promotion of diabetic wound healing [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 415: 129025.
- [6] CHENG W, WANG M, CHEN M, et al. Injectable antibacterial anti-inflammatory molecular hybrid hydrogel dressing for rapid MDRB-infected wound repair and therapy[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 409: 128140.
- [7] LI Y, FU R Z, DUAN Z G, et al. Artificial nonenzymatic antioxidant MXene nanosheet-anchored injectable hydrogel as a mild photothermal-controlled oxygen release platform for diabetic wound healing[J]. ACS Nano, 2022, 16(5): 7486-7502.
- [8] LI Z Y, ZHANG X J, GAO Y M, et al. Photo-responsive hydrogel for contactless dressing change to attenuate secondary damage and promote diabetic wound healing [J]. Advanced Healthcare Materials, 2023, 12(17): 2202770.
- [9] 苏宪浩, 薛浩, 宋晓璐. 智能水凝胶敷料促进慢性伤口愈合的研究进展[J]. 化工新型材料, 2023, 51(增2): 150-154. SU Xianhao, XUE Hao, SONG Xiaolu. Research progress of intelligent hydrogel dressing in promoting chronic wound healing[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(Sup. 2): 150-154.
- [10] ALIZADEHGIASHI M, NEMR C R, CHEKINI M, et al. Multifunctional 3D-printed wound dressings[J]. ACS Nano, 2021, 15(7): 12375-12387.
- [11] ZHAO P, ZHANG Y, CHEN X A, et al. Versatile hydrogel dressing with skin adaptiveness and mild photothermal antibacterial activity for methicillin-resistant staphylococcus aureus-infected dynamic wound healing [J]. Advanced Science, 2023, 10(11): 2206585.
- [12] JIANG S H, DENG J J, JIN Y H, et al. Breathable, antifreezing, mechanically skin-like hydrogel textile wound dressings with dual antibacterial mechanisms [J]. Bioactive Materials, 2023, 21: 313-323.