医用细菌纤维素材料:从抗菌到组织工程

吕茂朴　孔　超　陈双盈　魏取福　吕鹏飞
江南大学 纺织科学与工程学院,江苏 无锡 214122

摘　要:细菌纤维素(BC)是一种由微生物合成的纳米纤维材料,具有可再生、碳中性、高纯度、良好生物相容性、优异力学性能及可控三维网络结构,在医疗卫生领域具有广阔的应用前景。综述了 BC 在抗菌复合材料、组织工程支架以及伤口敷料中的研究进展,探讨了 BC 的结构特征与功能化改性策略,包括有机/无机抗菌复合、多孔化处理、表面接枝及三维构建等技术手段。最后,针对 BC 基医用材料在多功能集成、智能响应及规模化制备等方面面临的挑战进行了总结,并对其发展方向进行了展望。

关键词:细菌纤维素;抗菌;组织工程;伤口敷料
中图分类号:R318.08　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-7093(2026)06-0001-11

Medical bacterial cellulose materials: from antibacterial to tissue engineering

Lü Maopu, Kong Chao, Chen Shuangying, Wei Qufu, Lü Pengfei
College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China

Abstract: Bacterial cellulose (BC) is a nanofibrous material biosynthesized by microorganisms, featuring renewability and carbon neutrality, high purity, excellent biocompatibility, outstanding mechanical properties, and a controllable three-dimensional network structure, which endows it with great potential for applications in the medical and healthcare fields. The research progress of BC in antibacterial composite materials, tissue engineering scaffolds and wound dressings has been reviewed. The structural characteristics and functional modification strategies of BC were investigated, including organic/inorganic antibacterial compounding, porosity treatment, surface grafting, and three-dimensional construction techniques. Finally, the challenges associated with multifunctional integration, intelligent responsiveness, and large-scale fabrication of BC-based medical materials were summarized, and future development directions were proposed.

Keywords: bacterial cellulose; antibacterial; tissue engineering scaffold; wound dressing

细菌纤维素(BC)是由木醋杆菌、汉氏葡糖酸醋杆菌等微生物经过发酵后合成的一种纳米级纤维材料[1]。BC 的独特优势在于其自身的高纯度和结构均一性。与植物纤维素相比,BC 不含木质素、果胶

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 52473275,No. 52473178)
收稿日期:2025-12-26
作者简介:吕茂朴,男,2003 年生,在读硕士研究生,主要研究方向为功能纤维的设计制备与应用,6253017095@stu.jiangnan.edu.cn
通信作者:吕鹏飞,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为纺织纤维材料功能化与智能化,pengfeilv@jiangnan.edu.cn

和半纤维素等杂质，因而具有更高的生物相容性和更好的组织适配性[2-5]。此外，BC 的三维网状结构赋予了其出色的力学性能，包括较高的杨氏模量和拉伸强度，能够有效抵抗外界应力，为伤口提供更好的保护，减少细菌感染并促进伤口愈合，是开发各类医用敷料和组织工程材料的理想基材[6]。同时，BC 的纳米多孔结构不仅有助于气体交换，为伤口提供良好的有氧环境，还能提供丰富的表面空间，适用于抗菌剂或其他药物的附着与释放[7-10]。

近年，BC 在医疗领域中的应用研究逐渐深入，本研究综述了 BC 在抗菌复合材料、组织工程支架和伤口敷料方面的研究进展，探讨了 BC 的结构特征和功能化改性策略，总结了 BC 基医用材料在多功能集成、智能响应及规模化制备等方面存在的问题，并展望了 BC 未来的发展方向，以期为相关研究人员提供参考。

1 BC 的基本性质

1.1 BC 的合成

BC 的制备主要分为静态培养与动态培养 2 种模式。静态培养时，木醋杆菌等菌种在气液界面利用培养基养分分泌 BC 并逐渐形成凝胶状膜。调控培养容器形状或分批补加营养，不仅可以提升产率，还可制备管状、膜状等特定形态的 BC 及其复合膜材料[11-13]。动态培养则通过振荡增加细菌与氧气的接触，BC 产率更高，产物多呈球状或颗粒状。合成 BC 需经历细菌活化、种子液培养及底物发酵等阶段，培养基碳源以葡萄糖为主，调控接种浓度、温度、营养成分等条件可优化 BC 的形貌、结晶度及力学性能，其生物合成具有产物纯度高、生产周期短、环境友好等优势[14-16]。

1.2 BC 的结构

BC 是一种由木醋杆菌等微生物合成的天然多糖，具有独特的分子结构。BC 由 *D*-葡萄糖通过 *β*-1,4 糖苷键连接而成，为线性聚合物，其分子结构呈六元环状，含有反应活性的伯羟基和仲羟基[14]。与植物纤维素相比，BC 在结晶性上更为显著，BC 主要由Ⅰ型纤维素晶体和无定形结构域交替组成，这种结构赋予其较高的结晶度。在 BC 的超分子结构中，由少量纤维素分子链通过氢键平行排列形成的最基本纳米级纤维单元宽度约为 1.5 nm，它们经过自组装可形成更为紧密的三维网状结构，且该结构通过大量氢键维持其稳定性[17-19]。

2 医用功能 BC 材料的改性与应用

2.1 医用 BC 基抗菌复合材料

BC 具有高度一致的分子取向，以单一纤维的形式存在，并且具有天然三维网络结构。作为一种生物医用材料，BC 具有优异的性能，但是其本身不具备抗菌性，因此无法直接应用于抗菌领域。目前，一般以 BC 为基体，通过复合无机抗菌材料或有机抗菌材料制备具有抗菌性的复合材料。

2.1.1 有机抗菌材料改性 BC 功能材料

有机抗菌材料大多数无毒且易与 BC 复合。以 BC 为基体，结合有机抗菌材料是一种有效制备 BC 抗菌剂的方式。

Deng 等[20]通过席夫碱反应构建了一种基于醛基化细菌纤维素（DBC）与季铵化壳聚糖（QCS）的水凝胶，可促进伤口愈合。该水凝胶具有优异的再水合能力，干燥后可恢复初始水凝胶状态，便于储存与运输，且对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率分别达 80.8% 和 81.3%，展现出显著的抗菌活性。如图 1 所示，BC 先经高碘酸钠（$NaIO_4$）氧化引入醛基形成 DBC，后 DBC 作为骨架与 QCS 中的氨基发生席夫碱反应，形成动态共价交联网络。该交联结构不仅能赋予水凝胶可调控的再水合性能，还能通过静电作用破坏细菌膜结构。

Ou 等[21]通过化学共价接枝策略将聚阳离子抗菌组分引入 BC 骨架中，构建了一种兼具抗菌性与抗细胞黏附性的复合材料。具体为：首先，采用木醋杆菌在 30 ℃条件下静置培养制备 BC，经碱处理和充分洗涤后获得纯化的 BC。随后，利用 2-溴异丁酰溴对 BC 表面进行改性，引入溴引发基团，制得溴引发基团修饰的 BC。在此基础上，采用表面引发电子转移再生催化剂原子转移自由基聚合（SI-ARGET ATRP）技术，在溴化细菌纤维素表面引发甲基丙烯酸二甲氨基乙酯（DMAEMA）单体的可控聚合反应，制备聚甲基丙烯酸二甲基氨乙酯（PDMAEMA，简称 PD）/BC 复合材料。最后，用溴代二苯甲烷对 PD/BC 复合材料进行改性，得到季铵化 PD/BC（QPD/

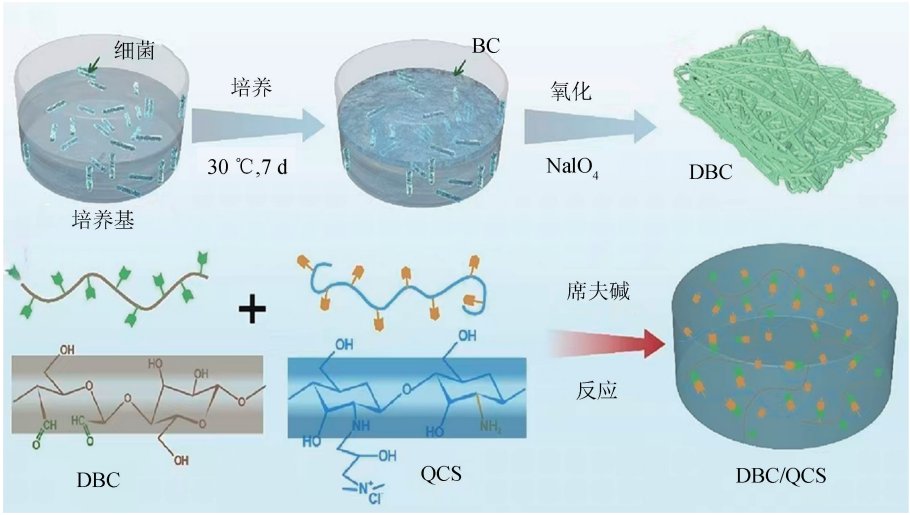


图 1　DBC/QCS 水凝胶的制备
Fig. 1　Preparation of DBC/QCS hydrogel

BC)抗菌水凝胶。

刘梦佳等[22]采用微胶囊技术将柠檬精油(LEO)包封于海藻酸钠(SA)中,并进一步负载于BC 增强的聚丙烯酸(PAA)水凝胶网络中,构建了LEO@ SA/BC-PAA 复合敷料。该策略显著改善了传统 PAA 水凝胶力学性能不足的问题,复合敷料拉伸强度可达 0.06 MPa,断裂伸长率可达 72.56%;且微胶囊的核壳结构实现了 LEO 的缓释,复合敷料在 pH 值为 4.5 的皮肤弱酸环境下对金黄色葡萄球菌的抑菌率达 98%以上。该复合敷料兼具优异的生物相容性、黏附性、透湿性及 pH 响应抗菌性,为开发舒适、抗菌的新型医用防护材料提供了有效方案。

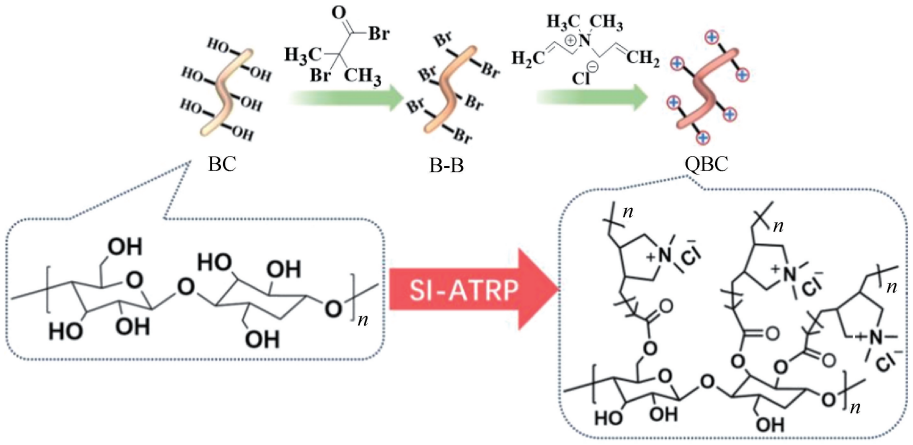
卢成帅等[23]采用表面引发原子转移自由基聚合(SI-ATRP)技术,制备了具有高效抗菌性能的季铵化细菌纤维素(QBC)。如图 2a)所示,采用 2-溴异丁酰溴对 BC 进行溴化,在 BC 表面引入活性引发位点,制备溴化细菌纤维素(B-B);随后采用 SI-ATRP 技术接枝二甲基二烯丙基氯化铵(DMDAAC),在纤维表面构建季铵盐聚合物链,得到 QBC 抗菌材料。如图 2b)所示,与未经改性的 BC 相比,QBC 系列材料对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌均表现出显著抑制效果,其中接枝反应 24 h 得到的季铵化细菌纤维素(QBC24)抗菌性能最强,菌落几乎完全消失。结果表明,采用 SI-ATRP 技术引入的季铵盐基团能有效增强细菌纤维素的抗菌活性,且其抗菌效果随季铵盐负载量的增加而进一步提升。该研究为开发可持续的纤维素基功能材料提供了新的技术路径。

2.1.2　无机抗菌材料复合 BC 材料

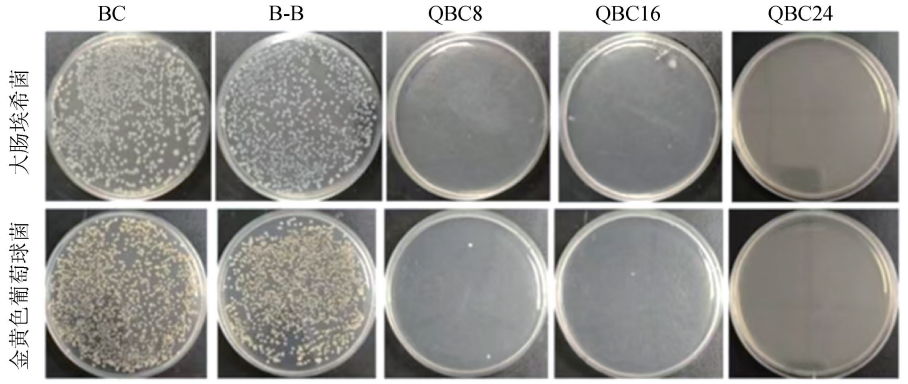
无机抗菌材料是一种较新的抗菌材料,具有广谱抑菌且抑菌持久、耐高温性能优良的特点,不会产生耐药性。这类材料涵盖了多种类型,主要包括金属纳米颗粒、金属氧化物以及非金属纳米颗粒等[24]。

Deng 等[25]制备了 BC/聚多巴胺(PDA)/沸石咪唑酯骨架材料-8(ZIF-8)/银(Ag)(BPZA)水凝胶。该水凝胶展现出优异的力学强度、高溶胀率及近红外光热响应性能,对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率分别可达 99.15%和 99.61%。BPZA 水凝胶的制备过程如图 3a)所示,以 BC 的三维网络为基底,利用 PDA 的自聚合与黏附特性,将负载银纳米颗粒(AgNPs)的 ZIF-8 原位复合到 BC 网络中。图 3b)展示了 BPZA 水凝胶促进伤口愈合的协同作用机制,其结合光热效应与金属离子 Ag^+、Zn^{2+}的缓释,实现了协同杀菌,显著提升了伤口愈合效率。

Wahid 等[26]先将 BC 膜浸入硝酸锌溶液,随后用氢氧化钠处理,在 BC 膜的三维网络结构中原位生成 ZnO 纳米颗粒,最后通过片状成型仪快速干燥获得了 BC/ZnO 纳米复合膜。BC 膜独特的三维网格结构提供了丰富的纳米级孔隙,为 ZnO 纳米颗粒的原位生长与均匀分散创造了有利条件,从而实现了抗菌组分的高效负载。该复合膜具有优异的热稳



a) QBC合成示意



QBC8—接枝反应8 h得到的季铵化细菌纤维素；QBC16—接枝反应16 h得到的季铵化细菌纤维素。

b) BC及QBC系列纤维对大肠埃希菌和金黄色葡萄球菌的抗菌对比

图 2　QBC 的制备及其抗菌性

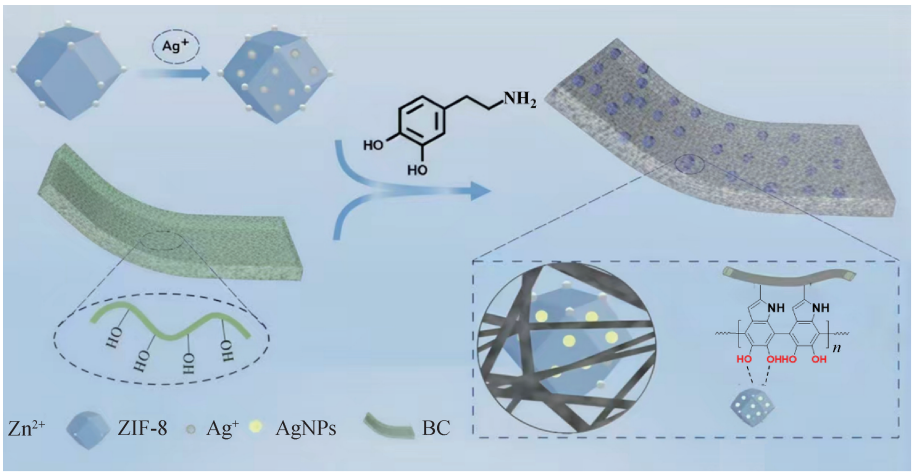
Fig. 2　Preparation of QBC and its antibacterial activity

定性、紫外屏蔽性能及显著的光催化活性。BC/ZnO 纳米复合膜对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌均具有明显抑制作用，且抗菌效果随 ZnO 质量分数增加而增强。

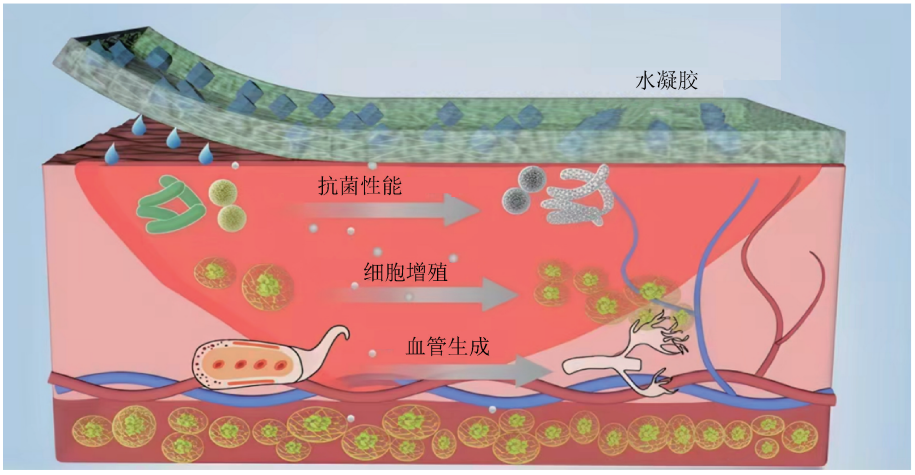
Yang 等[27]通过仿生多巴胺自聚反应在 BC 膜表面原位构建 PDA 涂层，并进一步利用 PDA 中丰富的邻苯二酚和胺基对 Cu^{2+} 的强络合能力，制备了 Cu^{2+}@PDA/BC 复合抗菌材料（图 4）。BC 膜中的纳米级纤维极大地增加了比表面积，为 PDA 络合的 Cu^{2+} 提供了大量的活性位点。当硫酸铜浓度为 10 mmol/L 时，该复合材料对金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌均表现出优异的抗菌性能，且无明显的细胞毒性。体内试验进一步证实，Cu^{2+}@PDA/BC 复合抗菌材料能有效控制金黄色葡萄球菌对创面的感染，抑制炎症反应，并促进胶原沉积、毛细血管新生及毛囊生长，显著加速全层皮肤缺损的愈合。

Liu 等[28]开发了一种基于 BC 膜的新型多功能绷带，兼具电刺激治疗与 AI 智能监测功能，并展现出优异的力学性能、抗菌活性和生物相容性。如图 5 所示，研究人员先通过静态培养木醋杆菌获得湿态 BC 膜。随后，经非织造布双面夹压并干燥制成 BC 绷带，可有效阻隔细菌。采用真空过滤法将银纳米线（AgNWs）沉积于湿态 BC 膜两面，得到湿态 BC/AgNWs 膜，最后再经非织造布双面夹压并干燥，形成了三明治结构的超薄、透气、透明且高导电的 BC/AgNWs 导电绷带。在大鼠全层皮肤缺损模型中，对 BC/AgNWs 导电绷带施加直流电刺激，可促进血管内皮生长因子释放，加速愈合。

He 等[29]报道了一种 BC/相变溶菌酶（PTL）/Cu 复合膜，用于感染性伤口愈合。PTL 纳米颗粒通过氢键作用在 BC 纳米纤维表面自组装成致密涂层；随后，溶液中的 Cu^{2+} 通过静电作用与 PTL 纳米颗粒中带负电荷的羧基结合，牢固地被锚定在复合材料中，构建了功能性 BC/PTL/Cu 复合膜。依托



a) BPZA水凝胶制备示意



b) BPZA水凝胶促进伤口愈合的协同作用机制

图 3　BPZA 水凝胶的合成和作用机制

Fig. 3　Synthesis and mechanism of action of BPZA hydrogel

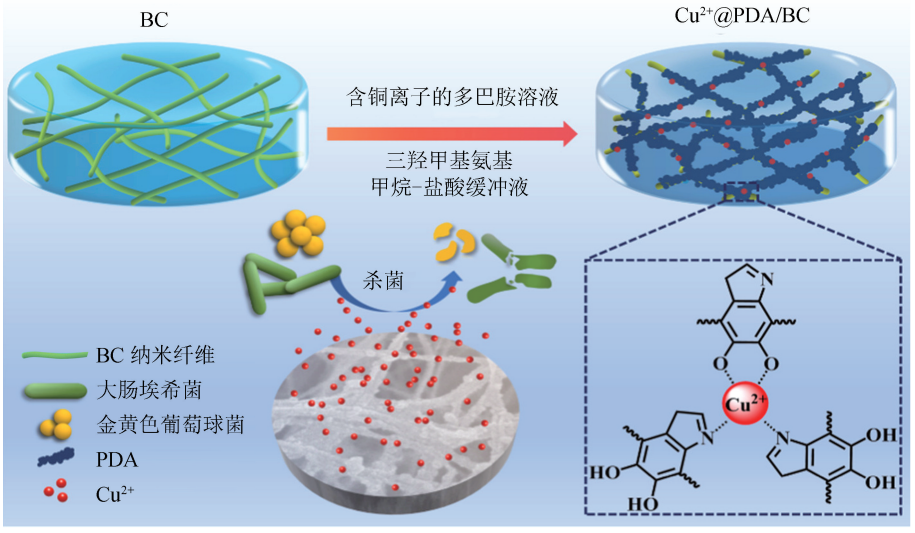


图 4　Cu^{2+}@PDA/BC 复合材料的制备示意

Fig. 4　Schematic illustration of the preparation of Cu^{2+}@PDA/BC composite material

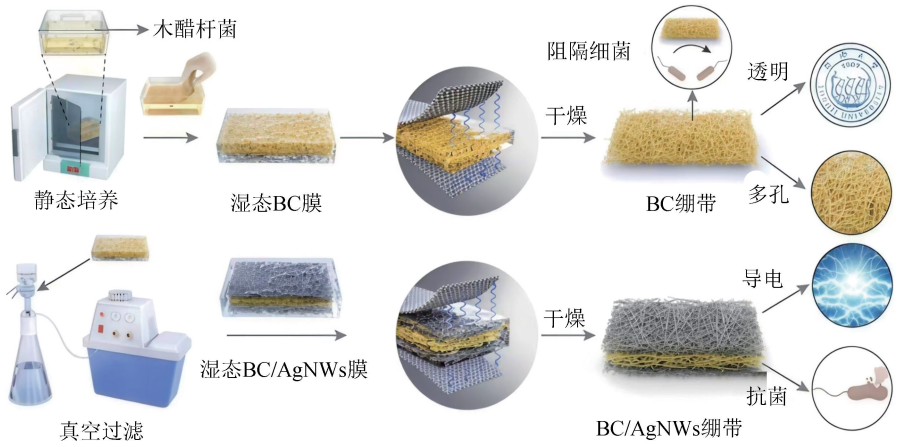


图 5　BC 绷带和 BC/AgNWs 绷带的制备

Fig. 5　Preparation of BC bandage and BC/AgNWs bandage

BC 的三维多孔网络和纳米膜的均匀覆盖作用，该复合膜能在抑制细菌感染的同时，表现出显著的抗感染和促血管生成能力，可有效促进感染创面的愈合。

Mao 等[30]制备了一种基于再生细菌纤维素（rBC）与 MXene（$Ti_3C_2T_x$）的可生物降解的电活性水凝胶。图 6a）展示了 rBC/MXene 水凝胶的制备流程，其中对 BC 进行溶解再生，形成具有三维网络结构的 rBC 水凝胶，为后续功能化提供了柔性支架。图 6b）进一步说明了 rBC/MXene 水凝胶的形成机制，即二维 MXene 纳米片在 rBC 的三维网络结构中均匀分散，并通过氢键作用、静电作用等物理交联方式与 rBC 纤维链连接，构建了稳定的导电复合网络。该结构既保持了水凝胶的柔软性和高含水性，又赋予了材料良好的电活性和力学性能。研究表明，该水凝胶在外加电刺激条件下可有效调控成纤维细胞行为，促进血管生成和胶原沉积，加速感染皮肤伤口的愈合。

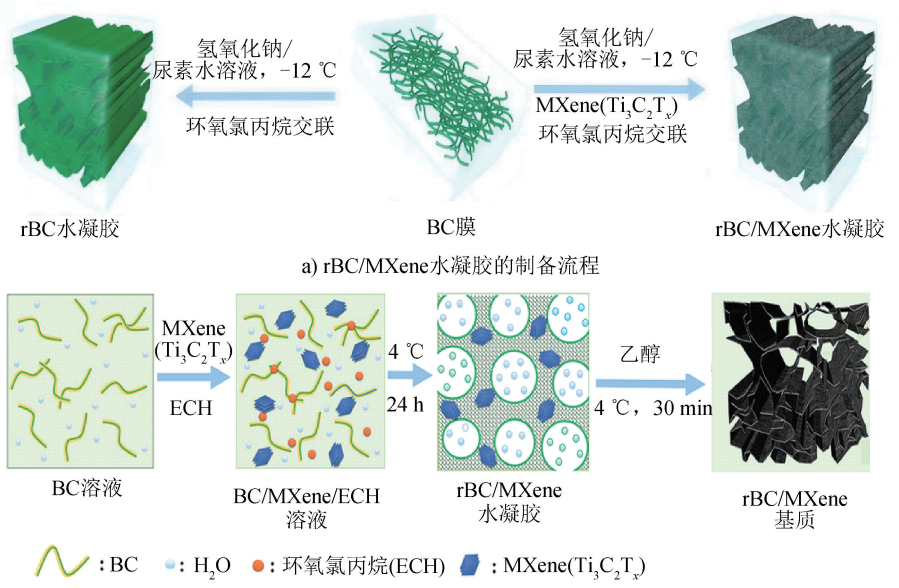


图 6　rBC/MXene 水凝胶的制备

Fig. 6　Preparation of rBC/MXene hydrogel

BC 基抗菌复合材料有多种制备技术路径，可结合有机抗菌材料或无机抗菌材料。季铵盐、壳聚糖等有机抗菌 BC 材料通常具有良好的生物相容性和可加工性，适用于对安全性要求较高的慢性伤口护

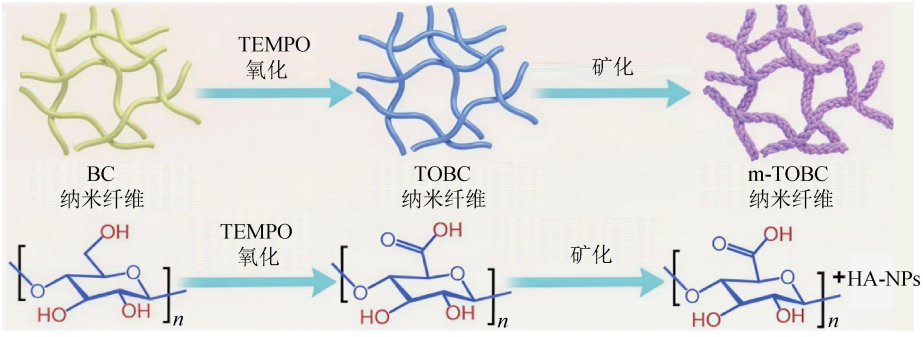
理及皮肤敷料,但其抗菌持久性和环境稳定性仍有待提升。相比之下,无机抗菌 BC 体系依赖 Ag^{+}、Zn^{2+}、Cu^{2+}等金属离子的释放,具备强效且持久的广谱抗菌能力,但需重点关注潜在的细胞毒性和离子释放可控性。

2.2 医用 BC 基组织工程支架

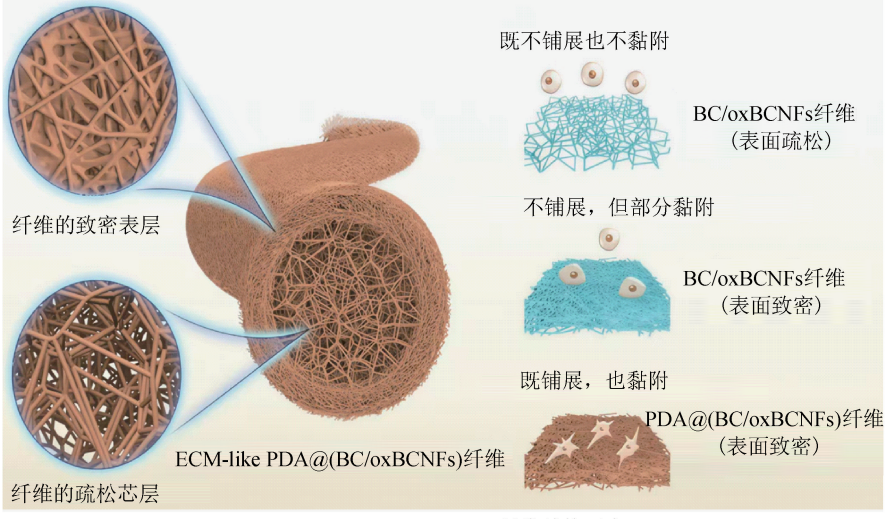
BC 因高纯度、良好的生物相容性、可调控的孔隙结构以及优异的力学性能,成为极具潜力的组织工程支架材料。BC 的三维网络结构能够模拟细胞外基质(ECM)的微观结构,为细胞黏附、增殖和分化提供适宜的微环境。此外,BC 可通过原位或异位功能化手段,与多种生物活性分子复合,进一步增强其在软骨、皮肤、血管等软组织工程中的应用潜力[31-33]。

Liu 等[34]通过 3D 打印技术,构建了一种用于骨软骨缺损修复的异质仿生支架。该支架以光交联甲基丙烯酰化明胶为基质,上层软骨层引入 2,2,6,6-四甲基哌啶氧化物(TEMPO)氧化细菌纤维素得到 TEMPO 氧化细菌纤维素(TOBC)纳米纤维,以模拟软骨微环境,下层骨层使用酶促矿化的 TOBC(m-TOBC)纳米纤维,以提供力学支撑并促进骨生成。图 7a)展示了纳米纤维的制备流程:首先,采用 TEMPO 氧化法将 BC 转化为富含羧基的 TOBC 纳米纤维,提高其分散性以模拟天然软骨的胶原网络。随后,利用碱性磷酸酶(ALP)介导的生物矿化反应,在 TOBC 纳米纤维表面沉积羟基磷灰石纳米颗粒(HA-NPs),从而制备出仿生骨组织有机-无机复合结构的 m-TOBC 纳米纤维。

Wu 等[35]通过低转速旋转凝固纺丝技术,结合溶剂蒸发调控与 PDA 涂层修饰,成功构筑了具有致密表层和疏松芯层的类细胞外基质(ECM-like)聚多巴胺修饰的细菌纤维素/氧化细菌纤维素[PDA@(BC/oxBCNFs)]纤维[图 7b)]。该策略为纤维表面提供了优异的细胞黏附位点,保留了内部类似细胞外基质的纳米纤维网络,确保了养分传输与结构



a) TOBC 与 m-TOBC 纳米纤维的制备



b) ECM-like PDA@(BC/oxBCNFs)纤维结构示意

图 7 医用组织工程支架

Fig. 7 Medical tissue engineering scaffold

支持。此外,该类纤维展现出良好的力学性能、抗溶胀性及生物相容性,能引导平滑肌细胞形成独特的螺旋排列模式,在血管组织工程支架领域具备良好的应用潜力。

2.3 伤口敷料

理想的伤口敷料应同时具备保湿、透气、抗菌及促愈合等功能。BC 凭借高保水性、良好的柔韧性和优异的生物相容性,在慢性伤口和感染性创面治疗中展现出显著优势。引入止血基团、抗菌结构或刺激响应单元,可进一步实现快速止血、长效抗菌和药物可控释放等功能[36-39]。

Zhang 等[40]开发了一种基于多孔细菌纤维素(MBC)的抗菌止血伤口敷料。如图 8a)所示,BC 经过多孔化处理形成 MBC,随后利用乙烯基三乙氧基硅烷(TEVS)进行表面接枝改性,并与 N-异丙基丙烯酰胺(NIPAM)聚合,最终经次氯酸钠氯化,得到多孔细菌纤维素接枝聚 N-异丙基丙烯酰胺氯化衍生物(MBC-*g*-NIPAM-Cl)膜。适宜的孔径是细胞迁移和营养物质交换的基础。高度多孔且呈层状结构的 MBC 具有优异的吸水和保水能力,能为伤口愈合创造湿润环境。该膜可快速释放有效氯,实现高效灭菌,并能维持长效抗菌活性。MBC-*g*-NIPAM-Cl 膜的凝血指数显著低于其他样品,在体外展现出良好的凝血性能与生物相容性,可快速吸收创面渗出液并促进血液凝固,在兼具抗菌与止血功能的伤口敷料领域具有广阔的应用前景。

Nguyen 等[41]采用简单的浸涂法,将壳寡糖(COS)负载至经纯化的 BC 膜上,制备了一种用于创伤止血的复合敷料。体内止血性能测试结果表明,当 COS 负载量为 0.02 g/mL 时,材料(BC-COS2 膜)表现出最优的止血性能,其体外凝血指数达 86.25%,凝血时间仅为 190 s,并能显著促进血小板聚集与红细胞黏附。如图 8b)和 c)所示,在小鼠股动脉及肝损伤凝血试验中,BC-COS2 膜处理组相较于未处理组,止血时间明显缩短,失血量显著减少。图 8d)主要对比了 BC-COS 膜在止血试验前后的形貌与状态变化。试验前 BC-COS 膜结构完整、表面均一;在止血过程中与血液充分接触后,膜表面迅速吸附大量血液,形成致密的血凝块。该结果表明,BC-COS 膜具有良好的吸血性和促凝血能力,能够在创面处快速形成稳定的物理屏障,从而有效封堵出血部位并实现快速止血。BC-COS 膜作为一种简便、有效且生物相容性良好的止血材料,在创伤急救中具有广阔的应用潜力。

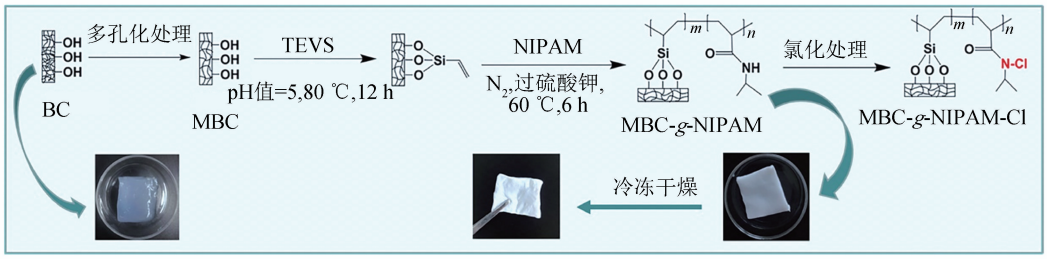
在伤口敷料领域,BC 通过结构调控与功能化改性,已发展为集止血和抗菌于一体的多功能敷料体系。经过多孔化处理和表面接枝,BC 敷料的吸液性与止血效率得到显著提升;引入 N-卤胺、壳寡糖以及金属离子,可进一步增强其抗菌和感染控制能力。然而,不同功能的叠加也对材料的结构稳定性、加工复杂度和成本控制提出了更高要求。未来,BC 基伤口敷料的研究应更加注重临床需求导向,以实现安全性和有效性的协同优化。

3 结论

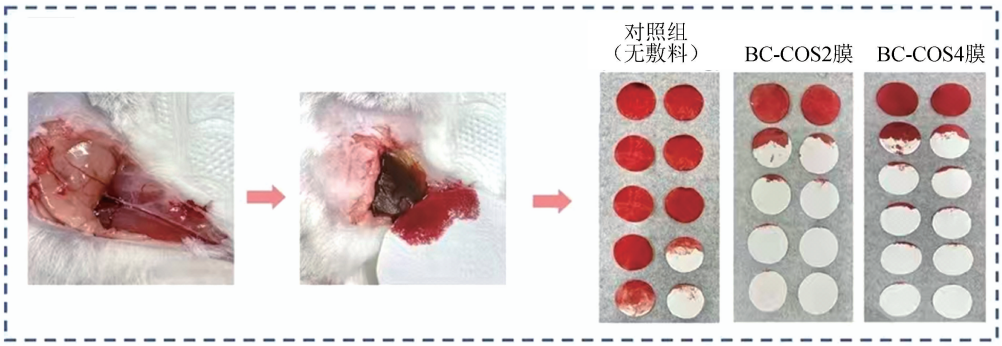
BC 作为一种由微生物合成的天然纳米纤维材料,因其具有碳中性、可再生、高纯度、高结晶度、三维纳米网络结构以及优异的生物相容性,在抗菌复合材料、组织工程支架和伤口敷料等方面展现出显著的研究价值与应用潜力。近年,大量研究围绕 BC 的结构调控与功能化改性展开,系统探索了其在抑制细菌感染、促进组织再生及伤口愈合等方面的性能表现,推动了 BC 从单一结构材料向多功能生物材料的转变。

目前,BC 智能敷料多依赖 pH 值、温度、电刺激或光热等外界信号触发抗菌效应或药物释放,其响应过程通常受限于 BC 致密三维纳米网络中的扩散阻力,导致刺激-响应存在明显滞后,在面对急性感染或创面微环境快速变化时,难以实现及时、有效的调控。此外,现有研究多通过物理吸附或弱相互作用引入金属离子、抗菌剂,这些方法在短期内可赋予材料多重功能,但在长期湿润环境或反复刺激下,金属离子、抗菌剂容易流失,会出现功能衰减等问题。另一方面,当前 BC 智能敷料大多为“单一刺激-单一响应”模式,这种相对简单的响应模式在复杂创面环境中的适应性仍然有限。

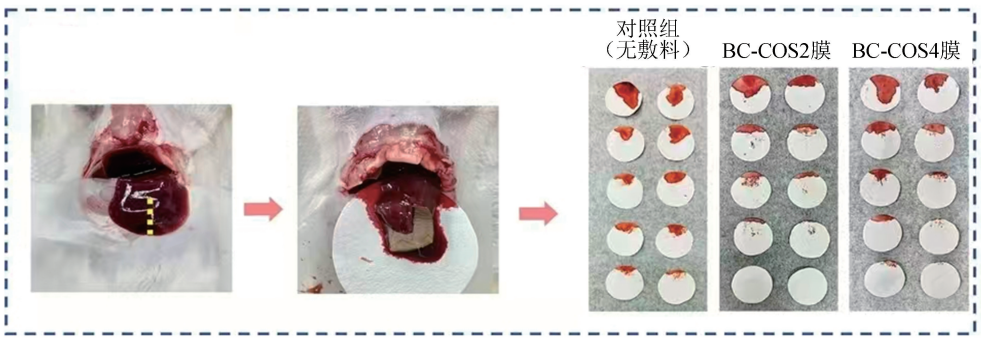
面向未来,BC 基医用功能材料的发展仍需在以下几个关键方向实现突破。首先,应着力开发具有多重响应协同能力的 BC 智能敷料,以提升其在复杂环境中的适应性与调控精度;同时发展绿色的培



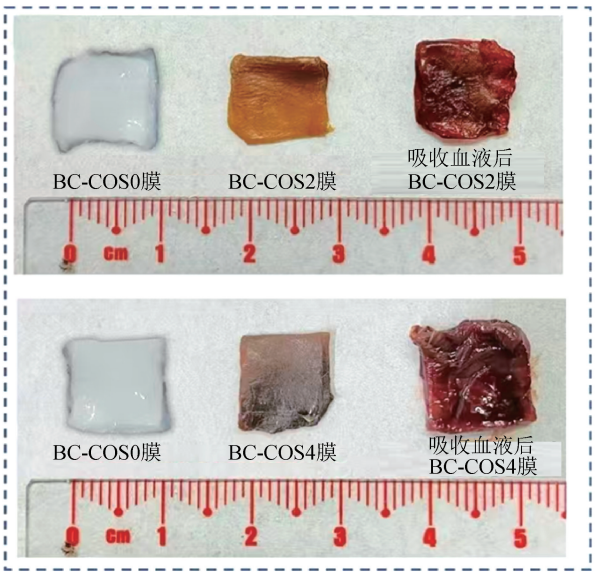
a) MBC-*g*-NIPAM-Cl膜的制备



b) 股动脉损伤模型



c) 肝损伤模型



d) 止血试验前后BC-COS膜的对比

图 8　抗菌止血伤口敷料的制备与应用

Fig. 8　Preparation and application of antibacterial hemostatic wound dressing

养与改性策略,降低生产成本,推动 BC 材料从实验室制备向临床应用及规模化生产转化;此外,未来 BC 材料的设计应以具体临床应用场景为导向,实现抗菌、止血、抗感染与组织再生等功能的平衡与整合。随着生物材料工程与临床需求的深度融合,BC 有望在新一代功能性医用材料体系中发挥更加重要的作用。

期刊采编平台 中国知网下载

参考文献

[1] NAEEM M A, ALFRED M, LV P F, et al. Three-dimensional bacterial cellulose-electrospun membrane hybrid structures fabricated through *in-situ* self-assembly [J]. Cellulose, 2018, 25(12): 6823-6830.

[2] GREGORY D A, TRIPATHI L, FRICKER A T R, et al. Bacterial cellulose: a smart biomaterial with diverse applications [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2021, 145: 100623.

[3] WU Z T, CHEN S Y, LI J, et al. Insights into hierarchical structure-property-application relationships of advanced bacterial cellulose materials[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(12): 2214327.

[4] XU Y L, LU X, JIN C C, et al. Bacterial cellulose-based functional yarns: from design to applications[J]. Materials Horizons, 2025, 12(17): 6622-6649.

[5] 李辉芹. 微生物生产的纤维素:细菌纤维素[J]. 产业用纺织品, 2005, 23(2): 42-44.

[6] LV P F, LU X M, WANG L, et al. Nanocellulose-based functional materials: from chiral photonics to soft actuator and energy storage[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(45): 2104991.

[7] 程浩南, 李芳. 纺织材料在医学领域的应用和发展[J]. 产业用纺织品, 2017, 35(9): 28-31.

[8] YAN Y, LIU L, WANG F, et al. Bacterial cellulose as a promising biodegradable bioplastic for sustainability [J]. Nature Communications, 2026, 17(1): 4387.

[9] MBITUYIMANA B, LIU L, YE W L, et al. Bacterial cellulose-based composites for biomedical and cosmetic applications: research progress and existing products [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 273: 118565.

[10] BULKINA A, PRILEPSKII A. Bacterial cellulose: is it really a promising biomedical material? [J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 357: 123427.

[11] REINIATI I, HRYMAK A N, MARGARITIS A. Recent developments in the production and applications of bacterial cellulose fibers and nanocrystals[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2017, 37(4): 510-524.

[12] DE ANDRADE ARRUDA FERNANDES I, PEDRO A C, RIBEIRO V R, et al. Bacterial cellulose: from production optimization to new applications [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 2598-2611.

[13] KUMARAVEL A, LIN S P, SANTOSO S P, et al. Unlocking the potential of bacterial cellulose: synthesis, functionalization, and industrial impact [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 311: 143951.

[14] BLANCO PARTE F G, SANTOSO S P, CHOU C C, et al. Current progress on the production, modification, and applications of bacterial cellulose [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2020, 40(3): 397-414.

[15] AVCIOGLU N H. Bacterial cellulose: recent progress in production and industrial applications [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2022, 38(5): 86.

[16] NAVYA P V, GAYATHRI V, SAMANTA D, et al. Bacterial cellulose: a promising biopolymer with interesting properties and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 220: 435-461.

[17] AHMED J, GULTEKINOGLU M, EDIRISINGHE M. Bacterial cellulose micro-nano fibres for wound healing applications[J]. Biotechnology Advances, 2020, 41: 107549.

[18] CHEN C T, DING W X, ZHANG H, et al. Bacterial cellulose-based biomaterials: from fabrication to application[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 278: 118995.

[19] MIKAEELI KANGARSHAHI B, NAGHIB S M, YOUNESIAN D, et al. Unlocking the rhythmic power of bacterial cellulose: a comprehensive review on green energy harvesting and sustainable applications [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(3): 2413760.

[20] DENG L L, LI F Z, HAN Z L, et al. Bacterial

cellulose-based hydrogel with regulated rehydration and enhanced antibacterial activity for wound healing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267: 131291.

[21] OU K K, LIU Y, DENG L L, et al. Covalently grafting polycation to bacterial cellulose for antibacterial and anti-cell adhesive wound dressings[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 269: 132157.

[22] 刘梦佳, 张良, 何志仙. 柠檬精油/细菌纤维素-聚丙烯酸基水凝胶口罩敷料的制备及其性能测试[J/OL]. 复合材料学报, 1-13[2025-11-28]. https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250520.001.

[23] 卢成帅, 戎旭辉, 秦柯, 等. 季铵化细菌纤维素的制备与抗菌性能研究[J]. 中国造纸, 2025, 44(10): 24-32.

[24] GOLD K, SLAY B, KNACKSTEDT M, et al. Antimicrobial activity of metal and metal-oxide based nanoparticles[J]. Advanced Therapeutics, 2018, 1(3): 1700033.

[25] DENG L L, HUANG Y J, CHEN S Y, et al. Bacterial cellulose-based hydrogel with antibacterial activity and vascularization for wound healing[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 308: 120647.

[26] WAHID F, DUAN Y X, HU X H, et al. A facile construction of bacterial cellulose/ZnO nanocomposite films and their photocatalytic and antibacterial properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 692-700.

[27] YANG Z F, FENG F F, JIANG W W, et al. Designment of polydopamine/bacterial cellulose incorporating copper (Ⅱ) sulfate as an antibacterial wound dressing[J]. Biomaterials Advances, 2022, 134: 112591.

[28] LIU X H, CAI Z Y, PEI M M, et al. Bacterial cellulose-based bandages with integrated antibacteria and electrical stimulation for advanced wound management[J]. Advanced Healthcare Materials, 2024, 13(7): 2302893.

[29] HE W, WANG X D, HANG T, et al. Fabrication of Cu^{2+}-loaded phase-transited lysozyme nanofilm on bacterial cellulose: antibacterial, anti-inflammatory, and pro-angiogenesis for bacteria-infected wound healing[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 309: 120681.

[30] MAO L, HU S M, GAO Y H, et al. Biodegradable and electroactive regenerated bacterial cellulose/MXene ($Ti_3C_2T_x$) composite hydrogel as wound dressing for accelerating skin wound healing under electrical stimulation[J]. Advanced Healthcare Materials, 2020, 9(19): 2000872.

[31] KHAN S, UL-ISLAM M, ULLAH M W, et al. Fabrication strategies and biomedical applications of three-dimensional bacterial cellulose-based scaffolds: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209: 9-30.

[32] RAUT M P, ASARE E, SYED MOHAMED S M D, et al. Bacterial cellulose-based blends and composites: versatile biomaterials for tissue engineering applications[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(2): 986.

[33] SALEH A K, RAY J B, EL-SAYED M H, et al. Functionalization of bacterial cellulose: exploring diverse applications and biomedical innovations: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 264: 130454.

[34] LIU X K, WANG B X, MA J H, et al. 3D-printed heterogeneous biomimetic scaffold utilizing TEMPO-oxidized and mineralized bacterial cellulose nanofibers for osteochondral regeneration[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 370: 124366.

[35] WU N H, MENG S, LI Z, et al. Tailoring the heterogeneous structure of macro-fibers assembled by bacterial cellulose nanofibrils for tissue engineering scaffolds[J]. Small, 2024, 20(23): 2307603.

[36] LIU W, DU H S, ZHANG M M, et al. Bacterial cellulose-based composite scaffolds for biomedical applications: a review[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(20): 7536-7562.

[37] WAHID F, HUANG L H, ZHAO X Q, et al. Bacterial cellulose and its potential for biomedical applications[J]. Biotechnology Advances, 2021, 53: 107856.

[38] HORUE M, SILVA J M, BERTI I R, et al. Bacterial cellulose-based materials as dressings for wound healing[J]. Pharmaceutics, 2023, 15(2): 424.

[39] LIU Y Y, LIU H Y, GUO S S, et al. A review of carbon nanomaterials/bacterial cellulose composites for nanomedicine applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 323: 121445.

(下转第 22 页)

京生物医学工程，2025，44(6)：648-654.

[50] MAUFA F，AL-KAWAS F H. Role of self-expandable metal stents in acute variceal bleeding[J]. International Journal of Hepatology，2012，2012：418369.

[51] KUWAI T，TAMARU Y，KUSUNOKI R，et al. Long-term outcomes of standardized colonic stenting using WallFlex as a bridge to surgery：multicenter prospective cohort study[J]. Digestive Endoscopy，2022，34(4)：840-849.

[52] FANELLI F，ORGERA G，BEZZI M，et al. Management of malignant biliary obstruction：technical and clinical results using an expanded polytetrafluoroethylene fluorinated ethylene propylene (ePTFE/FEP)-covered metallic stent after 6-year experience[J]. European Radiology，2008，18(5)：911-919.

[53] DANIEL P，RANA S S. Biodegradable pancreatic and biliary stents：still searching for disappearing wonder?[J]. Journal of Digestive Endoscopy，2020，11(2)：173-176.

[54] BAHOUTH Z，MOSKOVITZ B，HALACHMI S，et al. Allium stents：a novel solution for the management of upper and lower urinary tract strictures[J]. Rambam Maimonides Medical Journal，2017，8(4)：e0043.

[55] DEMACHKIE O，EHSAN E，SAUCEDO A，et al. Undocumented UroLume stent presenting years later with acute urinary retention and infection in a patient with dementia[J]. Cureus，2025，17(6)：e85351.

[56] HU K，HOU Z P，HUANG Y B，et al. Recent development and future application of biodegradable ureteral stents[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology，2024，12：1373130.

[57] BREITENBÜCHER A，CHHAJED P N，BRUTSCHE M H，et al. Long-term follow-up and survival after Ultraflex™ stent insertion in the management of complex malignant airway stenoses[J]. Respiration，2008，75(4)：443-449.

[58] BARTHWAL S，UNIYAL S，BARTHWAL S. Nature-inspired superhydrophobic coating materials：drawing inspiration from nature for enhanced functionality[J]. Micromachines，2024，15(3)：391.

[59] GREIN-IANKOVSKI A，DE OLIVEIRA BRAGA K A，LEGENDRE D F，et al. Bio-inspired magnetically responsive silicone cilia：fabrication strategy and interaction with biological mucus[J]. Bioengineering，2024，11(3)：261.

[60] FITZGERALD C S. Characterization of degrading bioabsorbable polymeric knitted scaffolds *in vitro*[D]. Boston：Boston University，2025.

[61] 刘熊伟，蒋婉娟，张志宏，等. 耐蚀涂层失效监测方法及失效机制研究进展[J]. 腐蚀与防护，2024，45(7)：50-60.

[62] AGARWAL T，HANN S Y，CHIESA I，et al. 4D printing in biomedical applications：emerging trends and technologies[J]. Journal of Materials Chemistry B，2021，9(37)：7608-7632.

[63] 崔鹏宇，王东炜，赵家豪，等. 可穿戴器械用于体内生理信号分子检测的研究进展[J]. 产业用纺织品，2025，43(8)：1-10.

[64] ZHOU Y J，LIU C H，HUANG Y C. Wireless power transfer for implanted medical application：a review[J]. Energies，2020，13(11)：2837.

(上接第 11 页)

[40] ZHANG S M，LI L，REN X H，et al. N-halamine modified multiporous bacterial cellulose with enhanced antibacterial and hemostatic properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2020，161：1070-1078.

[41] NGUYEN N T，NGUYEN H H，DOAN H N，et al. Chitosan oligosaccharide-loaded bacterial cellulose membrane for hemostatic dressing[J]. Cellulose，2023，30(18)：11649-11664.

爱护环境　人人有责