

细菌纤维素性质及应用的研究进展

汪丽粉¹ 李政^{1*} 贾士儒² 张健飞^{1*}

(1. 天津工业大学 纺织学院 先进纺织复合材料教育部重点实验室 天津 300387)

(2. 天津科技大学 生物工程学院 教育部工业微生物重点实验室 天津 300457)

摘要: 细菌纤维素是由微生物合成的多孔性网状纳米级生物高分子材料, 由于它具备高持水性、高透气性、良好生物相容性、高机械强度、三维网络结构等独特性质, 因此在纺织、医用敷料、组织工程、食品、导电材料等行业具有广阔的应用前景。本文主要从性质和应用两方面对其近年来的研究进展做了综述, 并对未来的发展做了展望。

关键词: 细菌纤维素, 性质, 应用, 纺织, 医用敷料

The research progress in characteristics and applications of bacterial cellulose

WANG Li-Fen¹ LI Zheng^{1*} JIA Shi-Ru² ZHANG Jian-Fei^{1*}

(1. Key Laboratory of Advanced Textile Composites, Ministry of Education, Textile Division, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

(2. Key Laboratory of Industry Microbiology, Ministry of Education, College of Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Bacterial cellulose is a porous, mesh, nanoscale and biological polymer, which synthesizes by microbial fermentation. Due to its special properties of high ability of hydrophile and ventilate, good biocompatibility, high mechanical strength and three-dimensional net structure etc. It will have broad applications in textile industry, the medical dressings, tissue engineering, food and conductive material etc. In this paper, the latest research progress in recent years is reviewed and its future development is also discussed.

Keywords: Bacterial cellulose, Characteristics, Applications, Textile, Medical dressings

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 31200719, 21006072); 天津市应用基础及前沿技术研究计划(No. 14JCQNJC14200, 11JCYBJC04400); 应用化学与生态染整工程浙江省重中之重学科开放基金项目(No. YR2012014); 天津市高等学校国家级大学生创新创业训练计划项目(No. 201210058036)

*通讯作者: 李政: Tel: 86-22-83955287; 邮箱: lizheng_nx@163.com

张健飞: Tel: 86-22-83955628; 邮箱: zhangjianfei1960@126.com

收稿日期: 2013-10-14; 接受日期: 2014-02-11; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2014-02-20

细菌纤维素(Bacterial cellulose, 简称 BC)是由微生物发酵合成的多孔性网状纳米级生物高分子聚合物。它是由 β -D-葡萄糖通过 β -1,4-糖苷键结合成的直链分子^[1], 因此又称为 β -1,4-葡聚糖。因其由细菌合成而命名为细菌纤维素, 它最早是由英国科学家 Brown 发现, 经物理和化学方法分析确定为纤维素类物质, 对该物质进行水解, 水解液主要成分是葡萄糖^[2]。它由独特的丝状纤维组成, 纤维直径在 0.01–0.10 μm 之间, 比植物纤维素(10 μm)小 2–3 个数量级(图 1), 每一丝状纤维由一定数量的超微纤维组成网状结构^[3]。它与植物纤维素的主要差别在于前者不含有半纤维素、木质素等。

产生细菌纤维素的菌属有醋酸杆菌属、根瘤菌属、八叠球菌属、假单胞菌属、固氮菌属、气杆菌

属和产碱菌属等。其中木醋杆菌是最早发现, 也是研究较为透彻的纤维素产生菌株, 该菌可以利用多种底物生长, 是目前已知合成纤维素能力最强的微生物菌株。

细菌纤维素作为一种新型纳米材料, 已应用于纺织、医用材料、食品等各个领域, 现已成为国际的研究热点。本文就细菌纤维素的性能及在各重要领域应用的研究进展综述如下。

1 细菌纤维素的性质

1.1 高持水性和高透气性

细菌纤维素为三维网状结构, 中间形成很多“孔道”, 并且分子内存有大量的亲水基团^[4], 因此具有良好的透气、透水和持水性能。这些性能决定了其在医用敷料行业的优势。根据外界条件的不同, 它能吸收比自身干重大 60–700 倍的水分, 未经干燥的细菌纤维素膜持水性能值高达 1 000%, 冷冻干燥后的持水能力仍超过 600%, 该独特性质是植物纤维素所无法比拟的。

1.2 良好的生物相容性和生物可降解性

由于细菌纤维素是由微生物代谢产生的, 因此其具有良好的生物相容性和生物可降解性。生物相容性是任何医用敷料首先要考虑的问题, 至今为止国内外已对大鼠、绵羊等动物进行了深入的研究, 并且目前 Biofill、Gengiflex 和 BASYC 已经成为外科及齿科的商业化产品。

将细菌纤维素膜贴于成年健康大鼠伤口处^[5], 于手术后 4、7、14、21 和 28 d 观察伤口愈合情况。结果表明: 28 d 后伤口愈合率达到 100%, 无死亡大鼠。组织病理学检查显示: 成纤维细胞和新生毛细血管增殖明显, 后期表皮细胞分化明显, 只有局部有炎症但反应较轻。Andrade F. K. 等(2013 年)^[6]将孔径小的细菌纤维素植入到绵羊的皮下 1–32 周, 观察到其对皮下组织无肉眼可见的炎症, 并用荧光显微镜观察到内皮细胞在细菌纤维素上有良好的黏附形态和良好的增殖行为。杨光等^[7]以类似的方法得到了同样的结论。国内外对这一性能研究颇

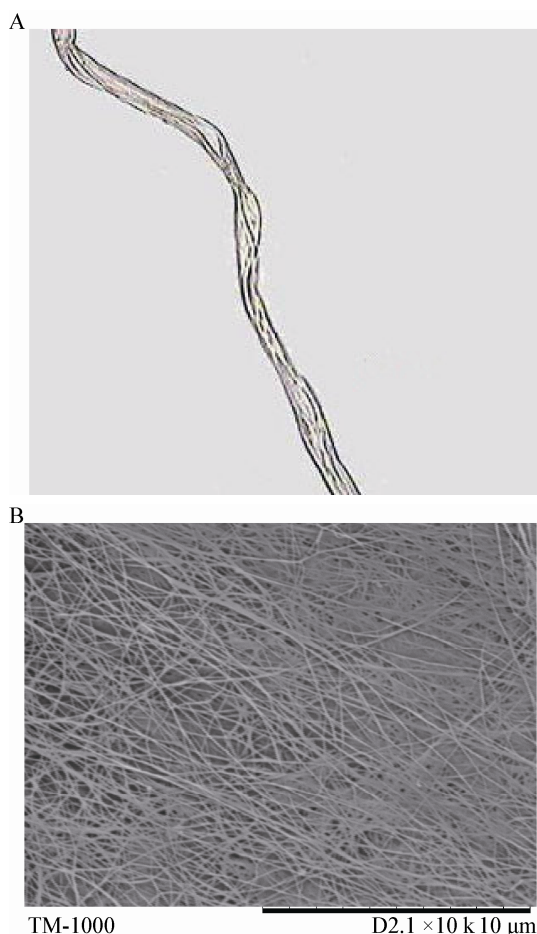


图 1 显微镜下棉纤维截面(A)和细菌纤维素电镜照片(B)
Figure 1 Cotton fiber image under the microscope (A) and bacterial cellulose image of SEM (B)

多, 均证明了细菌纤维素具有良好的生物相容性, 对其作为医用敷料及医用组织器官打下基础。此外, 因为细菌纤维素是一种纯度较高的纤维素, 更易与纤维素降解酶发生作用^[8], 同时在酸性及微生物存在的自然条件下也可以直接降解, 不污染环境, 所以具有良好的生物可降解性。

1.3 高化学纯度和高结晶度

细菌纤维素是一种纯度较高的纤维素, 与植物纤维素相比不含木质素、果胶、半纤维素和其他细胞壁成分, 纤维素含量高达95%以上, 提纯过程简单。细菌纤维素的结晶度高达95%以上, 高于天然植物纤维^[9]。

1.4 高抗张强度和弹性模量

细菌纤维素杨氏模量测量值高达15 GPa, 但理论值是其10倍, 这一性能满足了其作为医用组织器官、医用敷料及其他产品的基本要求。Yamanaka S.等^[10]证明细菌纤维素的高杨氏模量是由于其分子结构中存在大量的氢键。抗撕拉能力是同样厚度的聚乙烯和聚氯乙烯膜的6倍。Andrade F. K.等^[6]证明了细菌纤维素膜比人类的动脉和静脉更有弹性。

1.5 生物合成时具有可调控性

生物合成细菌纤维素时具有可调控性。因为在细菌纤维素形成过程中纤维素微纤丝可以被迁移的细菌推到一边, 所以可以改变菌体的生长空间, 改变微纤丝的分布进而得到理想的模型形状。因此, 改变细菌的运动途径, 控制细菌纤维素膜的孔径大小满足不同用途, 为以后满足商业发展开辟一条新道路。同时, 当采用不同培养条件时, 可以制备出形状、大小、厚度和性质各不相同的细菌纤维素。例如改变发酵条件, 如培养时间和接种量, 得到了不同厚度和孔隙度的细菌纤维素膜, 同时改进了其物理性能^[11]。通过采用不同大小的培养容器^[12], 培养得到不同产量的细菌纤维素膜, 其结构性能也有差异。研究人员已经成功制得人耳、人手(图2)等形状, 这一性能的优点在于利用模具可以得到理想的形状, 扩大其应用范围。

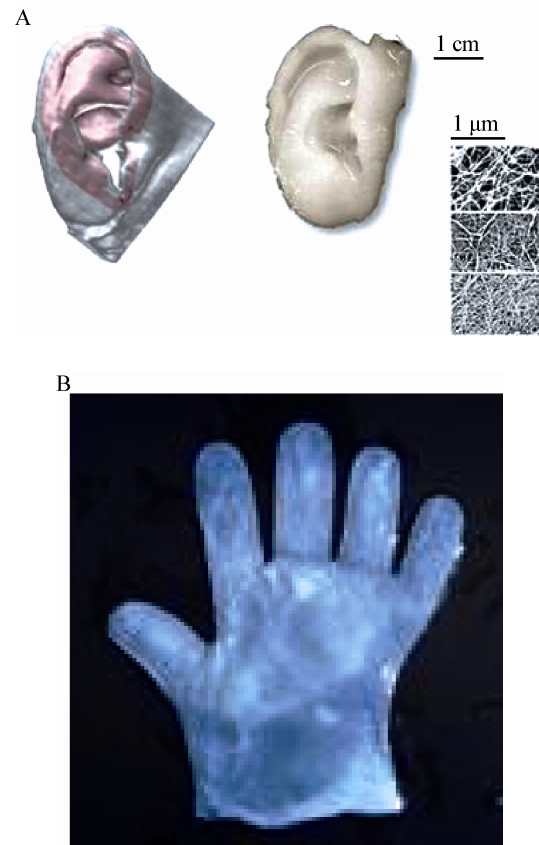


图2 细菌纤维素人耳模型(A)^[13]和人手模型(B)^[14]
Figure 2 Ear model (A)^[13] and hand model (B)^[14] made by bacterial cellulose

2 细菌纤维素的应用

2.1 医用敷料行业的应用

良好的医用敷料要求具有高持水性、透气性好、良好的生物相容性及较好的力学性能, 而细菌纤维素具有这些特性, 因此其在医用敷料产业具有广阔的应用前景。研究显示: 其做绷带、纱布和创可贴等, 可减少对伤口的刺激, 有效缓解疼痛, 加快伤口愈合等优良性质。由于其本身无抗菌效果, 目前大量研究者通过复合技术对细菌纤维素进行修饰, 赋予其良好的抗菌性能, 使其在医用敷料方面有更好的应用前景。

银或者二氧化钛等纳米粒子是一种高效的抗菌、杀菌剂, 当引入到细菌纤维素中后, 可以赋予细菌纤维素抗菌性能, 使其在医用敷料方面有更好

的应用性能。用还原法将制备好的细菌纤维素水凝胶膜浸渍于硝酸银溶液中 30 min, 再浸渍于硼氢化钠溶液中 30 min, 取出后用去离子水反复冲洗, 最后用冷冻干燥机在 -40°C 进行干燥, 制得细菌纤维素/银纳米粒子复合多孔支架^[15-16]。研究证明这种支架具有较好的抗菌性能。另外, 用细菌纤维素原位负载 TiO_2 制得复合材料是将细菌纤维素膜放入钛酸异丙酯和三氯甲烷的混合溶液中浸泡 12 h, 加入稀硝酸搅拌水解 6 h 即得 TiO_2/BC 复合膜^[17], 抗菌效果显著, 且其光催化降解性能大幅度提高。Liu Chuang 等^[18]将制得的细菌纤维素膜浸泡在 100 mL AgNO_3 溶液中 48–72 h, 得到 BC-Ag/AgCl 纳米复合材料, 其对抗炎症和伤口愈合有很好作用。

贾士儒等^[19]将 BC 湿膜在 ϵ -PL 溶液中浸泡过夜, 然后干燥。经过对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌进行抑菌实验后发现, BC 干膜经质量分数为 3% 的 ϵ -PL 溶液处理后抑菌效果最佳, 但随着质量分数的增加 BC 膜颜色变深, 其透光性下降。Ul-Islam M. 等^[20]将细菌纤维素膜分别浸渍在 2% 和 4% 蒙脱土(MMT)、Na-MMT、Ca-MMT 和 Cu-MMT 悬浮液中, 在温度为 50°C 转速为 150 r/min 条件下浸泡 24 h, 在 -40°C 条件下冷冻干燥 2 d 制得复合膜, 经过抑菌实验证明所有复合膜都有抑菌性能, 尤其是 BC-Cu-MMT 出现明显的抑菌圈。并且随着蒙脱土浓度的增加抑菌性增强。

这些具有抗菌性、具有伤口愈合能力、无副作用的复合材料在生物医用领域必将起到重要的作用, 这些制备方法也将成为合成生物材料的新方法。但是这些复合材料还在试验阶段并未用到临床医学上, 其安全及成本, 仍是制约工业化生产的关键因素。

2.2 医用组织工程

由于细菌纤维素具有独特的纤维网状结构、高孔隙率、高机械强度和高弹性模量等性质, 其也是上皮细胞生长的理想支架和人造皮肤、动脉静脉血管、骨组织支架的理想替代材料。作为理想的组织支架, 不仅要求细菌纤维素有上述优点, 而且为了满足细胞的结合、移动、增殖和在支架上的生长,

细菌纤维素必须被加工成一个多孔材料。

1991 年 Yamanaka 等首次成功以细菌纤维素制备出人工血管; 2001 年 Klemm D. 等^[21]首次成功以细菌纤维素研制成小直径人工血管, 并表征了其超细网络体系、高亲水性和可塑性。近年来, 有研究者将细菌纤维素压碎和重量/体积百分比为 1% 或者 2% 的琼脂糖溶液混合, 在 -30°C 环境下凝固 1 d, 最后在 -50°C 的冷冻干燥机中干燥 2 d 制得三维细菌纤维素/琼脂糖支架^[22]。通过扫描显微镜观察, 发现细菌纤维素/琼脂糖复合支架具有大的比表面积、高孔隙率和空隙保持圆形形态等优点, 有利于细胞的迁移和生长。其优良的纳米性能能够支持上皮细胞依附和增殖到支架内, 显示出了引导骨组织再生的能力。其抗压强度和杨氏模量也得到改善, 赋予其做组织工程和组织修复支架的性能。

YIN N. 等^[23]将细菌纤维素经羟基磷灰石矿物化处理, 得到羟基磷灰石/细菌纤维素纳米复合材料制得仿生骨支架。研究证明: 经处理后制得的复合材料含有碳酸矿物质, 从而有类似于天然骨组织的性质。类似地, 将钙质不足的羟基磷灰石沉淀到细菌纤维素上, 然后用酶促降解法或者热降解法处理细菌纤维素, 得出的结论是其结构和性能符合骨修复系统中的填充物^[24](图 3)。

这些新方法制得的仿生组织支架为未来医学发展推动了前进的一步。如果用于医学领域可能存在如下缺陷: 一是复合材料的力学强度还不够, 二是复合材料理想的孔径还不好调控, 三是降解时间的调控及降解物质的选择, 未来还需攻克这些难题。

2.3 纺织工业

植物纤维中的棉、麻在纺织行业占有重要地位, 并且人造纤维素纤维也是由植物纤维加工而成的纺织原材料。细菌纤维素的分子结构类似于植物纤维素, 并且细菌纤维素具有优于植物纤维素的高拉伸强度、高的孔隙率和纳米纤维状结构等独特性质, 因此可改善原产品的不足或者制备出性能更优的纺织品。

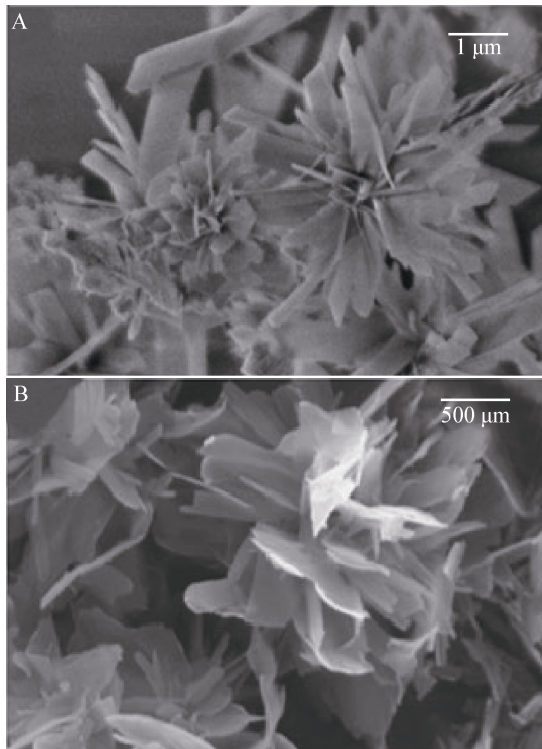


图 3 热降解法得到的 BC/HA (A)和酶促降解法得到的 BC/HA (B)

Figure 3 The BC/HA after thermally treated (A) and the BC/HA after enzymatic degradation (B)

将 NMMO 溶解的细菌纤维素处理到涤纶织物上,处理后织物的亲水性能和抗静电性能有很大改善,并且得到的处理效果具有一定的耐洗涤性。同时对涤纶织物的物理机械性能,如断裂强力、撕破强力影响不大^[25],这对改善涤纶织物的抗静电性是个不错的发展方向,减少了使用抗静电整理剂对环境的污染。最近, Ashjara A.^[26]提出新的发酵工艺,用较低的成本和用水量工业生产细菌纤维素无纺布,其产量是普通工艺的 3 倍。Wu S. Q.等^[27]将细菌纤维素加入到历史悠久的丝绸面料中,被用作可降解的修复材料,代替传统合成的聚合物,用 SEM、ATR-FTIR、XRD、TG 和抗拉试验证明经细菌纤维素修复过的丝绸样品的结晶度、热稳定性和抗张强度大大改善并且对丝纤维的损伤小,便于历史丝绸织物的储存和展览。

利用细菌纤维素代替植物纤维素具有巨大的

经济价值,不仅可以充分利用工业废弃物,减少污染,而且可以缩短纤维素的生长周期,提高纤维素产量,实现纤维素的工业化生产。另外,由于细菌纤维素的优异性质,为开发功能纺织品及新产品、新用途提供了新思路。

2.4 食品

在传统食品行业,细菌纤维素可生产含有丰富纤维素的发酵食品,如纳塔(Nata)和红茶菌,用紫红曲霉发酵方法染色得到 *Monascus-nata* 复合物,改善其外观,作为一种新型食品原料有很大的应用潜力。红茶菌能促进胃肠消化,还可降血脂等。作为食品添加剂,细菌纤维素应用在肉肠、香肠的加工中改善食品的口感,作为膳食纤维的来源。应用在酸奶和冰淇淋中作为添加剂,利用其保水性、增粘性使食品的凝固状态得到很大改善。扩大细菌纤维素在食品业的用途也是近年来研究的热点,贾士儒等^[28]将 BC 管浸泡在生物防腐剂 ϵ -PL 溶液中使用 ϵ -PL 嵌入到细菌纤维素膜上制得抑菌肠衣(图 4)。通过表征结果表明, ϵ -PL 分子嵌入到细菌纤维素纳米网络结构中,经过 1×10^5 Pa 灭菌 30 min 后抗菌能力没有减弱,氧气渗透能力远低于聚乙烯和聚乙烯醇膜;抗拉强力仍能达到 51.8 MPa;这种 ϵ -PL/BC 复合膜不仅能够抑制革兰氏阳性菌,而且对革兰氏阴性菌同样有抑制作用,可以延长产品的货架期。这种绿色、环保、环境友好型的复合膜必



图 4 以 ϵ -PL/BC 为材料制作的香肠包装

Figure 4 Sausage packaged with ϵ -PL/BC casing

将在包装材料方面有好的应用。在培养方案中,研究出了一种最优培养基配方和参数,采用 *Gluconacetobacter hansenii* NCIM 2529 菌株选用动态培养生产细菌纤维素,产量是不优化的 1.66 倍^[29];在原料来源方面,用氯代 1-烯丙基-3-甲基咪唑([AMIM]Cl)离子液水解小麦秸秆可以提高可发酵糖的产量^[30],糖的含量可达到 71.2%,用发酵液代替培养基中的葡萄糖得到的细菌纤维素的产量比以葡萄糖为基础的产量要高。另外,用果汁培养基来培养细菌纤维素,降低了生产细菌纤维素的成本^[31]。

目前,虽然食品行业已经实现了工业化生产,但生产品种单一,附加值不高。产量及成本仍是制约细菌纤维素在食品业发展的关键因素,因此寻求稳定高产菌株提高其产量、丰富原料来源、降低生产成本以及作为食品包装材料等是其在食品行业的研究重点。

2.5 电磁性材料

因纤维素高反射率、弹性和尺寸稳定性使其适合作为信息显示的媒介,这是它的一个新的发展方向。Shah J.等^[32]用细菌纤维素制作“电子纸”并详细说明了制作电子液晶屏的过程。首先用木醋杆菌获得细菌纤维素,在微纤维网络上沉淀离子提供导电通路使其具有导电性,并将集成电子染料加入到纳米膜上,构成一个以细菌纤维素为基质的高分辨率的显示设备。另外,通过在不同条件下原位合成 Fe_3O_4 纳米粒子制得以细菌纤维素膜为基础的柔性磁膜^[33]。结果证明:聚乙二醇可以将 Fe_3O_4 纳米粒子均匀涂层到细菌纤维素膜上。这是一种绿色并且方便的方法,在不改变复合材料性能的前提下抑制磁纳米粒子聚合。这种膜可以潜在的用于电子传感器、信息储存、电子屏蔽涂层及防伪等。

细菌纤维素的纳米结构、高孔隙率使其适合作为基质制备吸附和运输性能的质子导电膜和有机发光二极管。Ummartyotin S.等一直研究以细菌纤维素为基质制备有机发光二极管。一种方法是用细菌纤维素和聚氨基甲酸乙酯复合制得纳米复合材

料薄膜^[34]作为有机发光二极管,另一种是用细菌纤维素膜代替传统刚性和脆性玻璃衬底^[35]作为有机发光二极管,后者用湿化学方法合成铁磁流体溶液,作为纳米磨蚀物质增强细菌纤维素膜的表面光洁度,在磨蚀过程中制得的复合流体溶液在磁场和细菌纤维素复合材料下有很好的兼容性,并通过磁场控制其流体力学性能。用原子力显微镜观察到复合材料的光洁度小于 5 nm,提高了发光的亮度,很适合做有机发光二极管,并且达到最大限度的减少使用和生产危险材料。Chen C. C.等^[36]用细菌纤维素和聚甲基丙烯酸甲酯制得纳米复合材料,用扫描显微镜观察到其光滑、致密、均匀的表面结构,其光传输能力达到 89.4%。

针对目前能源短缺这一问题,寻求新能源是人类解决这一问题的途径。由于燃料电池具有高能量转换效率、高比功率、环境友好等优点,国内外研究者都把它视为解决能源短缺和环境问题的良好出路。Lin C. W.等^[37]将 AMPS 加入到细菌纤维素聚合物上,此过程苯甲醇释放氢原子作为自由基形成光引发剂;在辐射过程中,细菌纤维素膜浸泡在苯甲酮甲醇溶液中 3 h,然后在氮气环境中用紫外灯照射 60 s,此过程 AMPS 开始和细菌纤维素膜发生接枝聚合反应,制得 AMPS-g-BC 复合膜。这种膜的传导性质是由它们自身的扩散系数及甲醇渗透率表示,使用脉冲场梯度核磁共振技术可以得到水和甲醇的自由扩散系数。甲醇的渗透率为 $5.64 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$,结果证明,这种 AMPS-g-BC 复合膜可有效的屏蔽甲醇,将来可以作为固体电解质用在甲醇直接燃料电池中。

Evans B. R.等^[38]将钨沉淀到细菌纤维素膜上,使膜具有导电性,将膜制成膜电极。实验证明其有很好的导电性,可作为燃料电池用于发电。石墨烯和细菌纤维素结合不需要任何溶剂,并且石墨烯在细菌纤维素膜上的分布是均匀的,随着石墨烯的增加,细菌纤维素/石墨烯复合材料的导电率增加而材料的网状结构和结晶度没有改变。Liu L. Z.等^[39]利用声波降解法,15 min 使氧化石墨烯分散于水

中。用同样方法 2 h 将细菌纤维素加入到溶液中。将混合液磁搅拌 15 min, 在 98 °C 条件下用 1 h 加入水合肼减少氧化石墨烯, 随后加入蒸馏水去除还原剂, 然后经过真空过滤和冷冻干燥得到细菌纤维素/石墨烯复合材料, 实验证明复合膜是极好的导电材料。Kim Y. H. 等^[40]制备细菌纤维素-碳纳米管复合导电膜, 通过用细菌纤维素过滤碳纳米管并真空干燥含有碳纳米管的细菌纤维素膜, 固定葡萄糖氧化酶于复合薄膜上。结果表明: 细菌纤维素-碳纳米管和葡萄糖氧化酶之间发生电子转移, 复合膜是有良好的生物相容性的导电膜。可应用于生物传感器、生物燃料电池等。

国内对细菌纤维素用于燃料电池中研究较前沿的是东华大学, 蒋高鹏^[41]将干燥后的细菌纤维素膜置于不同的无机酸和有机酸溶液中浸泡 3 d。再通过不同的方法干燥, 对质子传导率进行测定。结果表明: $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{BC}$ 的电导率随磷酸浓度的升高而增大, 电导率最高可达到 0.15 S/cm, 材料的导电性较高, 提高了能量的转换效率。除此方法之外, 还可以将 BC 浸渍在含有锂盐的有机溶剂中, 温度从室温逐渐升高, 最终制得 BC 凝胶聚合物电解质膜^[42]。结果表明: 经过 30 d 后, 室温离子电导率由 8.69×10^{-3} S/cm 下降到 8.13×10^{-3} S/cm, 锂电池的传导能力与初始值比较仍保持在 90% 以上, 说明这种电解质体系对电解液的保持能力优异, 并用线性扫描伏安法测试证明其电化学稳定性良好。这种方法解决了传统的凝胶聚合物电解质材料加入较多增塑剂导致机械性能降低这一问题。

这些新方法减少了材料来源的成本、节约了资源、减小了环境的污染并且赋予了它更高的附加值。对于这一方面的研究大多还在实验阶段, 技术水平不成熟, 没有投入生产, 未来细菌纤维素复合膜在能源方面有着巨大的潜力。

2.6 其他

目前, 人们对细菌纤维素的研究除了在高附加值的医用材料、多功能纺织品、功能性食品和电磁性材料有诸多研究外, 在环境工业领域, 如应用细

菌纤维素膜吸附或者过滤去除废水中的诸多重金属离子也取得显著成效。将细菌纤维素改性得到吸附力更强的 EABC^[43]和 CM-BC^[44], 对废水的治理多了一种绿色环保的方法; 应用到造纸工业可得到不同用途的、不同性能的纸品, 利于废纸的处理和环保; 由于其高杨氏模量及形状维持能力, 将来可以用在建材方面, 增加稳定性。

3 展望

细菌纤维素是一种性能优良的生物材料, 有关细菌纤维素的应用研究几乎涉及了每一工业领域, 表现出广阔的应用前景。细菌纤维素是由微生物合成的多孔性网状纳米级生物高分子材料, 由于它具备高机械强度、良好生物相容性、纳米级网状结构、生物合成的可控性等优点, 因此在医用、食品、纺织、导电材料等方面具有广阔的应用前景。近年来在医用敷料、医用组织工程、导电材料等方面成为研究的热点, 但有以下两点制约着它的发展: (1) 细菌纤维素具有的性能还比较单一, 不能满足产品的需求; (2) 目前商业化的产品还不多, 大多产品不能实现工业化生产。要解决上述两种问题, 今后的研究侧重点为: (1) 从基因方面获得稳定高产菌株。(2) 由于其可以和多种官能团发生反应, 开展从分子生物学角度以及其作为基质来发展纳米复合材料, 改善其结构、优化细菌纤维素的性能或赋予其新的性能, 提高附加值, 扩大产品应用范围。(3) 尽管发酵过程相对简单, 探索一种新型的工业化生产方法, 如设计新型培养方式、旋转圆盘生物膜培养器或耦合分离的方法。

参 考 文 献

- [1] Ross P, Mayer R, Benziman M. Cellulose biosynthesis and function in bacteria[J]. Microbiological Reviews, 1991, 55(1): 35-58.
- [2] 贾士儒, 欧竑宇, 马霞, 等. 细菌纤维素结构与性质的初步研究[J]. 纤维素科学与技术, 2002(3): 25-30.
- [3] Iguchi M, Yamanaka S, Budhiono A. Bacterial cellulose—a masterpiece of nature's arts[J]. Journal of Materials Science, 2000, 35(2): 261-270.
- [4] 李喆, 王华平, 陈仕艳. 一种潜在的组织工程支架材

- 料——细菌纤维素[J]. 组织工程与重建外科杂志, 2009, 5(2): 111-113.
- [5] 马霞, 陈世文, 王瑞明, 等. 纳米材料细菌纤维素对大鼠皮肤创伤的促愈作用[J]. 中国临床康复, 2006, 10(37): 45-47.
- [6] Andrade FK, Alexandre N, Amorim I, et al. Studies on the biocompatibility of bacterial cellulose[J]. Journal of Bioactive and Compatible Polymers, 2013, 28(1): 97-112.
- [7] 杨光, 王彩霞, 杨雪霞. 细菌纤维素纳米纤维的细胞相容性评价[J]. 纤维素科学与技术, 2012, 20(4): 1-4.
- [8] 王宗良, 贾原媛, 石毅, 等. 纳米细菌纤维素膜的表征与生物相容性研究[J]. 高等学校化学学报, 2009, 30(8): 1553-1558.
- [9] Yamanaka S, Watanabe K, Kitamura N, et al. The structure and mechanical properties of sheets prepared from bacterial cellulose[J]. Journal of Materials Science, 1989, 24(9): 3141-3145.
- [10] Yamanaka S, Kitamura N, Mitsuhashi S, et al. The structure and mechanical properties of sheets prepared from bacterial cellulose[J]. Journal of Materials Science, 1989, 24(9): 3141-3145.
- [11] Tang WH, Jia SR, Jia YY, et al. The influence of fermentation conditions and post-treatment methods on porosity of bacterial cellulose membrane[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2010, 26(1): 125-131.
- [12] 付丽娜. 基于细菌纤维素的皮肤组织修复材料的制备和评价[D]. 武汉: 华中科技大学博士学位论文, 2012.
- [13] 细菌编出仿真耳 减患者痛苦解外科难题, 2013-6-6[N/OL]. http://www.menet.com.cn/Articles/yixie/201306/201306060946334633_95739.shtml
- [14] 挑战杯全国大学生课外学术科技作品竞赛[N/OL]. <http://www.tiaozhanbei.net/project/5207/>.
- [15] Cai ZJ, Yang G. Preparation of bacterial cellulose nanofiber with silver nanoparticles by in situ method[C]. Proceedings of the Second International Conference on Advanced Textile Materials & Manufacturing Technology, 2010: 140-143.
- [16] 蔡志江, 张睿晗, 樊亚男. 细菌纤维素/银纳米粒子复合多孔支架材料的制备与表征[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(1): 144-148.
- [17] 张秀菊, 陈文彬, 林志丹, 等. 细菌纤维素负载稀土掺杂二氧化钛复合膜的制备和光催化性能[J]. 材料研究学报, 2010, 24(5): 540-546.
- [18] Liu C, Yang D, Wang YG, et al. Fabrication of antimicrobial bacterial cellulose-Ag/AgCl nanocomposite using bacteria as versatile biofactory[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2012, 14: 1084-1095.
- [19] 贾原媛, 汤卫华, 李飞, 等. 细菌纤维素生物医学材料的性能改进[J]. 天津科技大学学报, 2009, 24(6): 16-19.
- [20] Ul-Islam M, Khan T, Khattak WA, et al. Bacterial cellulose-MMTs nanoreinforced composite films: novel wound dressing material with antibacterial properties[J]. Cellulose, 2013, 20(2): 589-596.
- [21] Klemm D, Udhardt U. Bacterial synthesized cellulose——artificial blood vessels for microsurgery[J]. Progress in Polymer Science, 2001, 26(9): 1561-1603.
- [22] Yang CX, Gao C, Wan YZ, et al. Preparation and characterization of three-dimensional nanostructured macroporous bacterial cellulose/agarose scaffold for tissue engineering[J]. Journal of Porous Materials, 2011, 18(5): 545-552.
- [23] Yin N, Chen SY, Ouyang Y, et al. Biomimetic mineralization synthesis of hydroxyapatite bacterial cellulose nanocomposites[J]. Progress in Natural Science-Materials International, 2011, 21(6): 472-477.
- [24] Hammonds RL, Harrison MS, Cravanas TC, et al. Biomimetic hydroxyapatite powder from a bacterial cellulose scaffold[J]. Cellulose, 2012, 19(6): 1923-1932.
- [25] 赵晓霞. 细菌纤维素纤维的制备与性能研究[D]. 青岛: 青岛大学博士学位论文, 2010.
- [26] Ashjara A. Properties and applications of bacterial cellulose as a biological non-woven fabric[J]. Asian Journal of Chemistry, 2013, 25(2): 783-788.
- [27] Wu SQ, Li MY, Fang BS, et al. Reinforcement of vulnerable historic silk fabrics with bacterial cellulose film and its light aging behavior[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 88(2): 496-501.
- [28] Zhu HX, Jia SR, Yang HJ, et al. Characterization of bacteriostatic sausage casing: a composite of bacterial cellulose embedded with epsilon-polylysine[J]. Food Science and Biotechnology, 2010, 19(6): 1479-1484.
- [29] Mohite BV, Salunke BK, Patil SV. Enhanced production of bacterial cellulose by using *Gluconacetobacter hansenii* NCIM 2529 strain under shaking conditions[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2013, 169(5): 1497-1511.
- [30] Chen L, Hong F, Yang XX, et al. Biotransformation of wheat straw to bacterial cellulose and its mechanism[J]. Bioresource Technology, 2013, 135: 464-468.
- [31] 张俊娜. 果汁培养基生产细菌纤维素研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2012.
- [32] Shah J, Brown RM Jr. Towards electronic paper displays made from microbial cellulose[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2005, 66(4): 352-355.
- [33] Zheng YZ, Yang JX, Zheng WL, et al. Synthesis of flexible magnetic nanohybrid based on bacterial cellulose under ultrasonic irradiation[J]. Materials Science & Engineering C, Biomimetic and Supramolecular Systems, 2013, 33(4): 2407-2412.
- [34] Ummartyotin S, Juntaro J, Sain M, et al. Development of transparent bacterial cellulose nanocomposite film as substrate for flexible organic light emitting diode (OLED) display[J]. Industrial Crops and Products, 2012, 35(1): 92-97.
- [35] Ummartyotin S, Juntaro J, Sain M, et al. The role of ferrofluid on surface smoothness of bacterial cellulose nanocomposite flexible display[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 193/194: 16-20.

- [36] Chen CC, Li DG, Deng QY, et al. Preparation and characterization of regenerated nanocomposite made from bacterial cellulose/PMMA[J]. Advanced Materials Research, 2012, 535/537: 255-258.
- [37] Lin CW, Liang SS, Chen SW, et al. Sorption and transport properties of 2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid-grafted bacterial cellulose membranes for fuel cell application[J]. Journal of Power Sources, 2013, 232: 297-305.
- [38] Evans BR, O'Neill HM, Malyvanh VP, et al. Palladium-bacterial cellulose membranes for fuel cells[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2003, 18(7): 917-923.
- [39] Liu LZ, Zhu CL, Liu GM, et al. Preparation and properties of bacterial cellulose/graphene composite[C]. Proceedings of 2011 World Congress on Engineering and Technology, 2011.
- [40] Kim YH, Park S, Won K, et al. Bacterial cellulose/carbon nanotube composite as a biocompatible electrode for the direct electron transfer of glucose oxidase[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2013, 88(6): 1067-1070.
- [41] 蒋高鹏. 基于细菌纤维素的质子交换膜的制备、表征及其在燃料电池中的应用研究[D]. 上海: 东华大学硕士学位论文, 2012.
- [42] 尹璐. 锂电池用细菌纤维素凝胶聚合物电解质膜的研究[D]. 上海: 东华大学硕士学位论文, 2012.
- [43] Shen W, Chen SY, Shi SK, et al. Adsorption of Cu(II) and Pb(II) onto diethylenetriamine-bacterial cellulose[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(1): 110-114.
- [44] Chen SY, Zou Y, Yan ZY, et al. Carboxymethylated-bacterial cellulose for copper and lead ion removal[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 161(2/3): 1355-1359.

(上接 p.1573)

征 稿 简 则

3.3 摘要写作注意事项

3.3.1 英文摘要: 1) 建议使用第一人称, 以此可区分研究结果是引用文献还是作者得出的; 2) 建议用主动语态, 被动语态表达拖拉模糊, 尽量不用, 这样可以避免长句, 以求简单清晰; 3) 建议使用过去时态, 要求语法正确, 句子通顺; 4) 英文摘要的内容应与中文摘要一致, 但可比中文摘要更详尽, 写完后务必请英文较好且专业知识强的专家审阅定稿后再返回编辑部。5) 摘要中不要使用缩写语, 除非是人人皆知的, 如: DNA, ATP 等; 6) 在英文摘要中, 不要使用中文字体标点符号。

3.3.2 关键词: 应明确、具体, 一些模糊、笼统的词语最好不用, 如基因、表达……

4 特别说明

4.1 关于测序类论文

凡涉及测定 DNA、RNA 或蛋白质序列的论文, 请先通过国际基因库 EMBL (欧洲) 或 GenBank (美国) 或 DDBJ (日本), 申请得到国际基因库登录号 (Accession No.) 后再投来。

4.2 关于版权

4.2.1 本刊只接受未公开发表的文章, 请勿一稿两投。

4.2.2 凡在本刊通过审稿、同意刊出的文章, 所有形式的 (即各种文字、各种介质的) 版权均属本刊编辑部所有。作者如有异议, 敬请事先声明。

4.2.3 对录用的稿件编辑部有权进行文字加工, 但如涉及内容的大量改动, 将请作者过目同意。

4.2.4 文责自负。作者必须保证论文的真实性, 因抄袭剽窃、弄虚作假等行为引发的一切后果, 由作者自负。

4.3 审稿程序及提前发表

4.3.1 来稿刊登与否由编委会最后审定。对不录用的稿件, 一般在收稿 2 个月之内通过 E-mail 说明原因, 作者登陆我刊系统也可查看。稿件经过初审、终审通过后, 作者根据编辑部返回的退修意见进行修改补充, 然后以投稿时的用户名和密码登陆我刊系统上传修改稿, 待编辑部复审后将给作者发稿件录用通知单, 稿件按照投稿先后排队发表。

4.3.2 对投稿的个人和单位一视同仁。坚持文稿质量为唯一标准, 对稿件采取择优先登的原则。如作者要求提前发表, 请在投稿的同时提出书面报告, 说明该研究成果的重要性、创新性、竞争性和提前发表的必要性, 经过我刊的严格审查并通过后, 可予提前刊出。

5 发表费及稿费

论文一经录用, 将在发表前根据版面收取一定的发表费并酌付稿酬、赠送样刊。

6 联系方式

地址: 北京市朝阳区北辰西路 1 号院 3 号中国科学院微生物研究所《微生物学通报》编辑部(100101)

Tel: 010-64807511

E-mail: tongbao@im.ac.cn

网址: <http://journals.im.ac.cn/wswxtbcn>