

# 细菌纤维素特性及其应用

吕鸿皓<sup>1</sup>, 夏秀芳<sup>1\*</sup>, 党苗苗<sup>1</sup>, 费楠<sup>1</sup>, 王英男<sup>2</sup>, 吴磊<sup>3</sup>

(1.东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030; 2.哈尔滨天拓生物科技有限公司, 哈尔滨 150030;  
3. 黑龙江省科学技术情报研究所, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 细菌纤维素(Bacterial Cellulose, BC), 是由细菌产生的胞外产物, 因由细菌产生, 故其命名为细菌纤维素。细菌纤维素因其具有高持水性、高结晶度、超细纳米纤维网络、高弹性模量和抗拉强度等独特的性质, 而被广泛地应用在食品及医学中。本文综述了细菌纤维素在食品、新型伤口敷料、人体组织材料、人工角膜和心脏瓣膜、药物结合或释放以及医用产品开发新兴领域的应用和发展前景。细菌纤维素生产出的产品不仅口感美味, 而且作为健康食品, 可降低人体胆固醇而拥有保健价值。医学方面期望细菌纤维素能够依据其独特的性质在更广泛的领域得到长足发展。相信在不久的将来, 日益完善的生产技术能让细菌纤维素更好地为人类服务。

**关键词:** 细菌纤维素; 食品; 医用材料; 应用

## Properties and application of bacterial cellulose

LV Hong-Hao<sup>1</sup>, XIA Xiu-Fang<sup>1\*</sup>, DANG Miao-Miao<sup>1</sup>, FEI Nan<sup>1</sup>, WANG Ying-Nan<sup>2</sup>, WU Lei<sup>3</sup>

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Techcooper Biological Technology Co., Ltd., Harbin 150030, China; 3. Institute of Scientific and Technical Information of Heilongjiang, Harbin 150030, China)

**ABSTRACT:** Bacterial Cellulose (BC for short), is a product produced by bacteria extracellularly, so named Bacterial Cellulose. Bacterial Cellulose is widely used in food and medicine because of its unique properties, such as high water holding capacity, high crystallinity, nanofibre-network structure, high elastic modulus and tensile strength. This article briefly summarizes the recent developments and applications of bacterial cellulose in the food, emerging field of novel wound dressing, human tissue materials, artificial cornea and heart valves, the drug combination or release, and medical products. Products of BC is not only delicious, but also as a health food, have lower cholesterol levels and health care value. Medicine of bacterial cellulose is expected in the broader field to get a long-term development according to its unique properties. In the near future, the increasingly perfect production technology can make bacterial cellulose serve humans better.

**KEY WORDS:** bacterial cellulose; food; medical materials; applications

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAD16B00)、科技型中小企业技术创新基金无偿资助项目(13C26212301421)

**Fund:** Supported by National Key Technology Research and Development (2015BAD16B00), Innovation Fund for Technology Based Firms (13C26212301421)

\*通讯作者: 夏秀芳, 副教授, 博士, 主要研究方向为食品科学。E-mail: xxfang524@163.com

\*Corresponding author: XIA Xiu-Fang, Assistant Professor, College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China. E-mail: xxfang524@163.com

## 1 引言

细菌纤维素(Bacterial Cellulose, BC), 是由细菌产生的胞外产物, 因由细菌产生, 故其命名为细菌纤维素。细菌纤维素作为一种新型纳米材料, 因其具有良好的持水性、乳化性、凝胶性以及良好的组织相容性等性质, 已广泛应用于纺织、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食品及医学应用的研究进展综述如下。

## 2 细菌纤维素的来源与特性

细菌纤维素于 1886 年 Brown 首次报道的, 他发现醋杆菌属菌株在培养基表面形成白色凝胶状的薄膜<sup>[1]</sup>。直到 1970 年, 随着电子显微镜在诸多领域使用的更加普及, 细菌纤维形成的过程才逐步被发现、了解。在适宜条件下, 用电子显微镜可观察到木醋杆菌从小孔分泌葡聚糖从而形成纤维素微纤丝。细菌纤维素是利用醋酸杆菌、假单胞杆菌、土壤杆菌、无色杆菌、八叠球菌等菌属合成出一种天然高分子。而在这些菌种中, 醋酸杆菌属合成细菌纤维素的效果最好, 而且不会对环境损害, 受天气自然等条件制约较小, 因此得到了科研工作者的广泛关注。

细菌纤维素是由葡萄糖分子以  $\beta$ -1, 4 糖苷键聚合而成的没有分支的高分子, 这些线性葡萄糖链通过分子内和分子间氢键形成网状结构。在形成纤维的过程中, 这些分子发生了特征性的聚合和结晶, 并形成了细菌纤维素超细的结构, 从而造就了细菌纤维素良好的机械性能(主要体现为较强的吸水性和亲水性等)。静态培养制得的细菌纤维素膜的弹性模量为一般纤维的数倍至十倍以上, 抗撕裂能力是同样厚度的聚乙烯和聚氯乙烯的六倍, 纯木葡糖酸醋杆菌制成干膜的弹性模量高达  $15 \times 10^9$  Pa, 这是普通平面定向或非定向有机聚合物膜片的弹性模量 3 倍以上<sup>[2]</sup>。

## 3 细菌纤维素的生实现状

与其他植物纤维素相比, 微生物发酵纤维素具有以下几个优势: (1) 微生物产生的纤维素不含木质素和其他污染物, 这样可避免一些环保的问题。(2) 采用微生物发酵的方法不受地区和气候的限制。(3) 可根据微生物的生长代谢情况控制生产细菌纤维素的数量和时间。(4) 农工业的废物可作为细菌纤维素生长的培养基, 以确保更高的产量和更低的成本。(5) 可以利用转基因微生物的手段来生产工业上所需的细菌纤维素, 以满足更广泛的行业领域需要。

虽然利用微生物发酵的方法来产生细菌纤维素已经有很悠久的历史, 但随着新能源的开发和利用, 将细菌纤维素工业化生产仅仅是近二十年的事情, 且国内外的存在存在着一定的差异。国外关于细菌纤维素的研究主要集中在运用诱变、基因工程重组的方法改变菌株的 DNA 结

构, 从而获得高产的菌株以提高细菌纤维素的产量。我国的细菌纤维素发展主要面临的技术问题是发酵水平不够, 不能很好地实现现代化。因此, 这不仅需要选育一种更高效的菌株, 而且菌株所生长的培养条件也需要不断地优化, 才能进一步提高细菌纤维素的发酵产量。周胜虎<sup>[3]</sup>从自然腐烂的水果中筛选出 6 株产细菌纤维素菌株, 实验发现其中从芒果中筛选出的 M7 菌株纤维素产量最高且产量稳定。为了高产高效获得 BC, 研究人员还尝试用各种诱变方法或通过基因工程技术, 导入功能基因从而对菌株进行改造, BC 产量可提升到原始菌株的 4 倍<sup>[4]</sup>。

目前, 细菌纤维素的合成有静置培养和动态培养两种方式。采用静置培养得到的细菌纤维素产量较高, 并且表面光滑、质地均匀, 能较好地保持其常规形状和良好形态, 但这种方法发酵周期长, 占地面积大, 不利于工业化生产及产品开发; 动态培养供氧充足, 发酵周期短, 生产效率, 但是产量较低<sup>[5]</sup>。为了提高产量, 在培养基成分方面, 张朝正<sup>[6]</sup>使用传统培养基并将其优化, 使产量与之前相比提高了约 15 倍, 实验获得的纤维素进行性质测定, 其含水率为 95% 到 98% 之间, 纤维素干膜拉伸强度可达到 1.91 MPa。李艳<sup>[7]</sup>利用菠萝酒发酵细菌纤维素并结合响应面分析方法对其培养基进行优化, 为细菌纤维素工业上的连续化生产提供了参考。兰水<sup>[8]</sup>分别以相同还原糖浓度的木薯酶解液和糖蜜处理液作为发酵碳源, 结果发现木薯水解液的发酵性能优于糖蜜, 使得 BC 产量约高出 5%, 而且实验还发现, 为了降低机械搅拌的剪切力, 添加琼脂可以改善木醋杆菌的生长, 显著提高细菌纤维素的产量。鲁敏<sup>[9]</sup>以玉米浆干粉为氮源, 发酵培养基 pH 可维持在木葡糖酸醋杆菌 Gyll 的适宜生长范围内, 有助于提高 BC 的产量。李俊<sup>[10]</sup>发现添加 0.15% 的马铃薯淀粉, 不仅能够提高球形 BC 的产量及球形颗粒的均匀度, 且对球形 BC 的微观结构有一定的修饰作用。李斌<sup>[11]</sup>通过椰子水与菠萝水对比的方法发酵生产细菌纤维素, 结果表明虽然菠萝水能加快细菌纤维素的分泌速度而减少发酵周期, 但产出的纤维素密度却次于椰子水产出的纤维素。邓毛程<sup>[12]</sup>以自然发酵的椰子水为材料进行筛选, 采用平板分离、静态发酵等方法, 细菌纤维素产量可达到 10.8 g/L, 从而获得细菌纤维素又一高产菌株。综上所述, 在发酵培养基方面, 用椰子水能达到较高的产量, 在此基础上补充的添加物可优化培养基并且对其微观结构起到一定的修饰作用, 达到更好的效果。现如今, 在菲律宾、越南等东南亚国家以及我国的海南地区, 生产企业通常选择资源充足的椰子水作为细菌纤维素的天然培养液。

## 4 细菌纤维素的应用

### 4.1 细菌纤维素在食品中的作用及应用

#### 4.1.1 细菌纤维素的乳化作用及在肉类食品中的作用

细菌纤维素是经美国食品药品监督管理局(food and

drug administration, FDA)认证的安全食品添加物<sup>[13]</sup>。在肉制品中,乳化剂是必不可少的添加物之一。贾原媛<sup>[14]</sup>将细菌纤维素应用到乳化液体系制备中,将其作为一种生物来源的安全纳米纤维,证明了BC可作为制备食品、医药和生物可降解乳液的乳化剂。邵伟<sup>[15]</sup>将其加入到发酵香肠中,使香肠具有更加丰厚滑润的口感,这对香肠的开发打开了一个新思路。薛璐<sup>[16]</sup>将木醋杆菌在大豆乳清中发酵得到的细菌纤维素作为脂肪模拟物和乳化剂加入到低脂肪肉中,在外观、风味、口感上和对照组相比没有明显差别的基础上,可减少28%~56%的热量。之后,詹传宝<sup>[17]</sup>以椰子水为主要原料,将木醋杆菌发酵制得细菌纤维素加入到火腿肠中,并采取新型工艺技术,为火腿肠的研发开拓了新方向。作为一种新型的乳化剂并作为脂肪替代物加到发酵香肠中,虽然能起到一定的乳化作用,但考虑到成本与工艺是否适合实际生产需要,还需要进一步的研究和探索。

#### 4.1.2 细菌纤维素的凝胶和保健作用及在肉类食品中的应用

由于细菌纤维素较高持水性以及高纤维素含量,经过漂水、脱酸以及调味加工后,口感耐嚼爽滑,质地与鲍鱼、鱿鱼、墨鱼类似,弹性则类似魔芋,作为膳食纤维食品、增稠剂、脂肪替代物、分散剂、乳化剂、稳定剂以及质地改良剂等广泛应用于食品加工行业<sup>[18]</sup>。保水性通常状况下可达到1:50,从而在肉类食品中能起到理想的凝胶效果。利用细菌纤维素极强的吸水性,能够开发出更多、更好的功能性保健食品。细菌纤维素作为一种新型功能性食品添加物,正广泛应用到各种食品中,而且细菌纤维素可增强人体胃肠的消化功能,是人体内的清道夫。马霞<sup>[19]</sup>将细菌纤维素可作为鱼丸、肉丸及香肠类制品的胶体添加剂,生产出的产品不仅口感美味,而且作为健康纤维食品,可降低人体胆固醇。钟春燕<sup>[20]</sup>依据细菌纤维素的保健功能,将中性的细菌纤维素湿膜制成良好的代餐食品而具有减肥功效。细菌纤维素产量及成本仍是制约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<sup>[21]</sup>。

#### 4.1.3 细菌纤维素在食品包材上的应用

卫生安全问题是食品包装材料的主要问题,比如材质是否含有重金属等有害物质会对人体健康造成威胁等等。一定条件下,传统的包装材料本身的化学成分会向食品中发生迁移,如果迁移的量超过一定界限,就会影响到食品的安全卫生<sup>[22]</sup>。细菌纤维素材料由于自身成分单一且纯度较高,不仅不会污染包装材料中的食品,还能起到一定的抗菌和抑菌功能,从而保证食品的安全性。依据这一理念,贾士儒<sup>[23]</sup>将细菌纤维素应用到肠衣的制作中,制得的抑菌肠衣不仅具有良好的机械性能,而且可以依靠抑菌独特的性能延长食用肠的货架期。细菌纤维素作为一种新型包装材料可逐步替代非降解材料,这对于缓解白色污染

严重的环境问题也具有一定的积极意义<sup>[24]</sup>。

## 4.2 细菌纤维素在医学领域的应用

### 4.2.1 细菌纤维素作为皮肤、创伤敷料的应用

常见的人造敷料是由胶原、壳聚糖、透明质酸等材料制备而成的,目前美国、英国、日本等国已经有商品化生产的猪皮敷料供应。但寻求一种理想的皮肤替代物一直在持续进行中,细菌纤维素由于其生产工艺简单,生产费用相对低廉,不含毒性物质,具有良好的生物相容性,况且湿润状态时具有较高的机械强度,良好的液体和气体透过性并能有效地抑制微生物侵入造成的皮肤感染,同时,细菌纤维素膜的高柔软性保证了其制得的敷料可根据伤口形状和位置进行任意的形态设计,因此细菌纤维素是一种可用于伤口临时包扎的理想材料。国内外将细菌纤维素作为皮肤、创伤敷料的研究已有很多, Yang<sup>[25]</sup>模拟了人体血浆成分,并对细菌纤维素材料进行了性能测试,论证其用于伤口护理的可行性。Sanchavanakit<sup>[26]</sup>指出细菌纤维素具有治疗皮肤伤口的作用,尤其适合损失较厚皮肤的伤口。Clark<sup>[27]</sup>指出细菌纤维素可缩短伤口的愈合时间并减少外界细菌的污染。马霞<sup>[28]</sup>利用小白鼠进行了临床实验,通过细菌纤维素膜治疗组和对照组的比较,说明了细菌纤维素膜对于皮肤创伤性损伤有促进愈合和抗感染的作用。而温晓晓<sup>[29]</sup>制备了纳米银/氧化细菌纤维素复合抗菌材料,不仅能抑制细菌的生长,同时不影响表皮细胞的正常增殖和分化,也充分证实了此复合材料是一种潜在的创伤修复材料。作为一种皮肤替代物的伤口修复材料,细菌纤维素展现了强大潜力,也正越来越引起国内外专家的持续关注。

### 4.2.2 细菌纤维素作为血管、组织工程材料的应用

在医学上,尽管国内外科学家一直都在寻找适合制备动脉的材料,但由于外材制备的动脉充满着血液,因此材料必须能适应血液环境、具备能承受血压的机械强度,并且非但不能破坏血细胞的成分,还要对血液成分起保护作用,目前为止还没有发现非常理想的材料。虽然细菌纤维素管在血管和神经手术方面的应用尚未达到人体临床试验的标准,但在动物实验中已经有了可观的成果, Johan<sup>[30]</sup>已经将细菌纤维素应用到13个月大的羊颈动脉血管的重建上; Zahedmanesh<sup>[31]</sup>也将细菌纤维素用到动物血管的重建上,这些研究结果证明了细菌纤维素是一种可用于制备人造血管的原料。同时 Fink<sup>[32]</sup>、wang<sup>[33]</sup>证明细菌纤维素不仅能做为血管移植的原料,还在实验过程中发现细菌纤维素未造成血浆的凝固现象,通过比较细菌纤维素管(内径分别为4 mm和6 mm)与其他材料制成的管引起的应激反应,结果显示细菌纤维素管中补体(sC3a和sC5b-9)明显高于其他组,补体不仅是机体非特异防御机制中的重要成分,还广泛参与一系列特异性免疫应答。补体的增多对于抗感染免疫和清除免疫复合物过程具有重要意义,从而证明了细菌纤维素材料在血管移植应用方面具有更显著的优越性

[34]。陈艳梅 [35]研究的细菌纤维素新型纳米支架较其他材料与细胞外间质的结构更为相似, 并具有良好的渗透性, 使得该材料更加有利于营养物质扩散及血管的植入。此外, Paul [36]把医用聚酯纤维经过等离子体亲水改性后, 再在其表面涂一层细菌纤维素制成血管修复装置, 研究表明细菌纤维素制得的修复装置优于聚酯和其他涂层剂制成的修复装置。

近年来, 随着医学、材料科学、生物化学等学科的发展, 组织工程学成为新兴的一门学科, 主要致力于组织、器官的形成和再生。组织工程中所需要的支架材料必须具有独特的性质, 如足够的组织相容性, 优良的力学、机械性能等, 而细菌纤维素正因具备这些优良特性而在组织工程应用中激起了一部分人的科研探索, 目前成为医学上的研究热点。Martínez [37]的研究结果中表明带有小孔超微结构的细菌纤维素可引导组织的生长。Novotna [38]研究了细菌纤维素用于作为组织工程中的支架, 结果表明细菌纤维素表面光滑管腔是一个很好的内皮细胞基板, 以形成材料与细胞的汇合层。此外, Bodin [39]还将其应用到尿路管道的组织重建中, 将制备的支架移植到无胸腺小鼠体内, 结果充分证明了该支架的良好的组织相容性。

#### 4.2.3 细菌纤维素在人工角膜及心脏瓣膜等方面的应用

##### 4.2.3.1 细菌纤维素用于制备人工角膜

随着组织工程学及角膜组织病理学的不断发展, 角膜移植技术愈来愈成为针对治疗角膜眼疾的一种重要疗法之一, 用于角膜的复合材料自然地也成为了医学界的研究热点。天津工业微生物实验室与吉林大学实验研究结果表明 [40], 在光学显微镜下, 可观察到以细菌纤维素湿膜作为支架生长的角膜基质细胞随着时间的延长, 数量明显增加, 在支架上培养 7 d 的角膜基质细胞以表面生长为主, 具有极性; 角膜细胞在支架上生长 10 d, 排列紧密, 胞体呈现梭形, 这说明细菌纤维素可作为角膜细胞生长的良好支架。目前, 贾卉 [41]应用细菌纤维素良好的相容性, 先将兔的角膜与细菌纤维素膜材料进行体外离体培养形成复合膜, 再将复合膜移植入实验兔体内, 并依据角膜组织病理学, 证明了细菌纤维素材料应用于角膜基质重建的可行性。

##### 4.2.3.2 细菌纤维素用于制备心脏瓣膜

人体内的循环系统是由心脏与静脉及动脉组成, 为了保持血液的单向流动, 心脏瓣膜是必不可少的单向阀门。然而若有先天性功能异常或受到疾病的侵害时, 我们人类自身心脏瓣膜开关就会失灵, 有威胁生命的危险, 此时就需要置换体内的心脏瓣膜。Millon 和 Wan [42]在其研究中表明可用于更换的标准阀有两种: 一种是猪的心脏瓣膜, 但其使用寿命有限; 另一种是机械的心脏阀门, 虽然使用寿命相对较长, 但容易造成贫血。相比于以上的两种材料, 细菌纤维素复合材料被证明是一种非常理想的、可用来替代心脏瓣膜的最佳材料。最近, 万怡灶等人 [43]将细菌纤维素与肝素复合, 制得的复合材料具有良好的抗凝血能力, 可

用于人造心脏瓣膜和脉管结构的支架。

#### 4.2.4 细菌纤维素在药物结合、释放等方面的应用

近两年, 细菌纤维素在药物的结合与释放方面的应用有了突破性的进展。Gumah [44]利用细菌纤维素无毒可食用的性质, 以及其良好的生物相容性, 将其制成薄膜包衣并与药物结合, 此研究证明了细菌纤维素具有控制药物释放的强大潜力。Ahmad [45]在实验中通过控制辐照使细菌纤维素与丙烯酸结合, 并调节复合物的密度、孔隙度和肿胀等参数, 结果表明此复合物可应用在药物释放领域。郑奕 [46]将 BC 膜应用到微胶囊的开发研制中, 产品对 X 射线具有良好的防护作用。

在其他的医用器材方面, 细菌纤维素还可以生产手术用品, 如手术用的手套, 因其良好的吸水性还可以用作小孩的一次性尿布。目前还有细菌纤维素应用于隐形眼镜开发的专利等 [47]。

## 5 发展趋势与展望

由于细菌纤维素具有良好的机械性能, 较高的持水性, 相比于其他聚合物具有更高的弹性模量, 以及本身良好的透明度和生物相容性, 使得其在医学领域得到了广泛应用, 成为一种蕴藏着巨大潜力的新材料。目前, 细菌纤维素制备医用敷料的研究已经比较成熟, 但用于制备人造血管及人造骨骼的研究还仅限于物理性能的测试及相关的生物体试验, 对于其临床应用的研究仍处于初期, 还需进一步探索与研究 [48]。

期望细菌纤维素能够依据其独特的性质在更广泛的领域得到长足发展, 如作为应用于西药、中药、中成药的缓释剂, 或者与生物芯片结合拓展其在肿瘤、癌症诸多方面的检测和治疗作用 [49]。虽然黄芳 [50]采用细菌纤维素为药物载体, 与市售芬必得药品相比具明显减缓药物释放, 但在整个缓释剂研究领域中还需要进一步完善。相信在不久的将来, 日益完善的生产技术能让细菌纤维素更好地为人类服务。

## 参考文献

- [1] Brown AJ. On an acetic ferment which forms cellulose [J]. J Chem Soc, 1886, 49: 432-439.
- [2] 谭勇, 刘四新, 李从发. 细菌纤维素在医学方面的应用 [J]. 现代生物医学进展, 2008, 8(12): 2344-2346.  
Tan Y, Liu SX, Li CF. Bacterial cellulose in medical applications [J]. Mod Biomed Prog, 2008, 8(12): 2344-2346.
- [3] 周胜虎, 薛齐佳, 刘传凤. 细菌纤维素高产菌株的筛选和初步鉴定 [J]. 湖北农业科学, 2013, 52(15): 3514-3517.  
Zhou SH, Xue QJ, Liu CF. Bacterial cellulose high yield strain screening and preliminary identification [J]. J Hubei Agric Sci, 2013, 52(15): 3514-3517.
- [4] 陈竟, 冯蕾, 杨新平. 细菌纤维素的制备和应用研究进展 [J]. 纤维素科学与技术, 2014, 22(2): 58-63.

- Chen J, Feng L, Yang XP. Research progress of preparation and application of bacterial cellulose [J]. Cell Sci Technol, 2014, 22(2): 58–63.
- [5] 周伶俐, 孙东平, 吴清杭, 等. 不同培养方式对细菌纤维素产量和结构性质的影响 [J]. 微生物学报, 2007, 47(5): 914–917.
- Zhou LL, Sun DP, Wu QH, *et al.* Different cultivation methods on bacterial cellulose production and structural quality [J]. J Microbiol, 2007, 47(5): 914–917.
- [6] 张朝正, 张云泽, 李玉涛, 等. 木醋杆菌生产细菌纤维素发酵条件优化 [J]. 河北工业大学学报, 2013, 42(2): 49–54.
- Zhang CZ, Zhang YZ, Li YT, *et al.* Fermentation condition optimization of bacterial cellulose produced by *Acetobacter xylinus* [J]. J Hebei Univ Technol, 2013, 42(2): 49–54.
- [7] 李艳, 张俊娜, 李志西, 等. 利用菠萝酒合成细菌纤维素的发酵培养基优化 [J]. 西北农业学报, 2013, 22(7): 84–89.
- Li Y, Zhang JN, Li ZX, *et al.* Use of pineapple wine synthesis of bacterial cellulose fermentation medium optimization [J]. J Northwest Agric, 2013, 22(7): 84–89.
- [8] 兰水, 唐晓燕, 陈琳, 等. 添加琼脂改善木薯和糖蜜机械搅拌发酵制备细菌纤维素的研究 [J]. 纤维素科学与技术, 2014, 22(3): 32–39.
- Lan S, Tang XY, Chen L, *et al.* Adding AGAR to improve cassava and molasses mechanical mixing preparation of bacterial cellulose fermentation research [J]. Cell Sci Technol, 2014, 22 (3): 32–39.
- [9] 鲁敏, 吕璇, 关晓辉. 玉米浆干粉缓冲能力对发酵生产细菌纤维素的影响 [J]. 食品研究与开发, 2014, 35(1): 84–87.
- Lu M, Lv X, Guan XH. Corn starch powder buffering capacity to produce bacterial cellulose fermentation [J]. Food Res Dev, 2014, 35(1): 84–87.
- [10] 李俊, 刘四新, 毕继才, 等. 马铃薯淀粉对 *Komagataeibacter nataicola* Y19 动态发酵产球形细菌纤维素的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2014, 9: 17–22.
- Li J, Liu SX, Bi JC, *et al.* Potato starch to *Komagataeibacter nataicola* Y19 dynamic fermentation to produce the effect of spherical bacteria cellulose [J]. J Food Ferment Ind, 2014, 9: 17–22.
- [11] 李斌, 钟春燕, 王锡彬, 等. 椰子水与菠萝汁生产细菌纤维素的对比研究 [J]. 中国酿造, 2014, 33(6): 27–30.
- Li B, Zhong CY, Wang XB, *et al.* Coconut water and pineapple juice in the production of bacterial cellulose contrast research [J]. China Brewing, 2014, (6): 27–30.
- [12] 邓毛程, 王瑶, 李静, 等. 细菌纤维素产生菌的筛选、鉴定及其产物分析 [J]. 河南工业大学学报, 2014, 35(5): 88–92.
- Deng MC, Wang Y, Li J, *et al.* Bacterial cellulose producing bacteria screening, identification and product analysis [J]. J Henan Univ Technol, 2014, 35(5): 88–92.
- [13] Kent RA, Stephens RS, Westland JA. Bacterial cellulose fiber provides an alternative for thickening and coating [J]. Food Technol, 1991, 45(6): 108–111.
- [14] 贾原媛, 万同, 霍明明, 等. 细菌纤维素纳米纤维稳定乳液的性能 [J]. 高等学校化学学报, 2013, 34(6): 1475–1482.
- Jia YY, Wan T, Huo MM, *et al.* Bacterial cellulose nanofibers stable emulsion performance [J]. J High School Chem, 2013, (6): 1475–1482.
- [15] 邵伟, 黄斌, 胡潘. 细菌纤维素在发酵香肠中的应用 [J]. 肉类工业, 2002, (6): 10–12.
- Shao W, Huang B, Hu P. Bacterial cellulose used in fermented sausage [J]. Meat Ind, 2002, (6): 10–12.
- [16] 薛璐, 杨谦, 李晓东. 细菌纤维素在低脂肉肠中的应用 [J]. 食品科学, 2005, 26(3): 272–274.
- Xue L, Yang Q, Li XD. Bacterial cellulose application in low fat sausages [J]. J Food Sci, 2005, 26(3): 272–274.
- [17] 詹传保, 彭庆. 新型椰果火腿加工工艺 [J]. 农村新技术, 2011, (2): 52–53.
- Zhan CB, Peng Q. New coconut ham processing technology [J]. New Rural Technol, 2011, (2): 52–53.
- [18] 杨敬轩, 陈仕艳, 王华平. 细菌纤维素制备技术与应用 [J]. 高分子通报, 2013, (10): 115–127.
- Yang JX, Chen SY, Wang HP. Bacterial cellulose preparation technology and application [J]. Polym Bull, 2013, (10): 115–127.
- [19] 马霞, 王瑞明, 贾士儒. 细菌纤维素在食品工业中的应用 [J]. 食品研究与开发, 2002, 23(5): 11–12.
- Ma X, Wang RM, Jia SR. Application of bacterial cellulose in food industry [J]. J Food Res Dev, 2002, 23(5): 11–12.
- [20] 钟春燕. 一种细菌纤维素减肥代餐食品 [P]. 中国专利: CN 102309010 A, 2011.
- Zhong CY. A bacterial cellulose meal food reducing weight [P]. China patent: CN 102309010 A, 2011
- [21] 汪丽粉, 李政, 贾士儒, 等. 细菌纤维素性质及应用的研究进展 [J]. 微生物学通报, 2014, 41(8): 1675–1683.
- Wang LF, Li Z, Jia SR, *et al.* The research progress of properties and application of bacterial cellulose [J]. J Microbiol Bull, 2014, 41(8): 1675–1683.
- [22] 黄莉, 王英男, 夏秀芳. 细菌纤维素的基本特性与其应用 [J]. 包装与食品机械, 2013, 31(5): 60–62.
- Huang L, Wang YN, Xia XF. The basic characteristic of the bacterial cellulose and its application [J]. J Packag Food Mach, 2013, 31(5): 60–62.
- [23] Zhu HX, Jia SR, Yang HJ, *et al.* Characterization of bacteriostatic sausage casing: a composite of bacterial cellulose embedded with epsilon-polylysine [J]. Food Sci Biotechnol, 2010, 19(6): 1479–1484.
- [24] 叶文斌, 樊亮, 王都留, 等. 苦豆子半乳甘露聚糖与中草药复合膜的包装性能研究 [J]. 包装与食品机械, 2012, 30(6): 10–14.
- Ye WB, Fan L, Wang DL, *et al.* The king is saved galactomannan sophora alopecuroides and Chinese herbal medicine composite film packaging performance study [J]. J Packag Food Mach, 2012, 30(6): 10–14.
- [25] Hu Y, Catchmark JM. *In vitro* biodegradability and mechanical properties of bioabsorbable bacterial cellulose incorporating cellulases [J]. Acta Biomater, 2011, 7(7): 2835–2845.
- [26] Sanchavanakit N, Sangrungrangroj W, Kaomongkolit R, *et al.* Growth of human keratinocytes and fibroblasts on Biosynthesized Cellulose Film [J]. Biotechnol Progr, 2006, 22(4): 1194–1199.
- [27] Solway Douglas R, Clark William A, Levinson Dennis J. A parallel open-label trial to evaluate microbial cellulose wound dressing in the treatment of diabetic foot ulcers [J]. Inter Wound J, 2011, 8(1): 69–73.
- [28] 马霞. 发酵生产细菌纤维素及其作为医学材料的应用研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2003.
- Ma X. Fermentation to produce bacterial cellulose and its application as a medical material research [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2003.
- [29] 温晓晓, 郑裕东, 吴健, 等. 纳米银/氧化细菌纤维素复合抑菌材料的制备和表征 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43: 220–224.

- Wen XX, Zheng YD, Wu J, *et al.* Preparation and characterization of nano silver/oxidizing bacterial cellulose composite antibacterial materials [J]. *Rare Metal Mat Eng*, 2014, 43: 220–224.
- [30] Malm CJ, Risberg B, Bodin A, *et al.* Small calibre biosynthetic bacterial cellulose blood vessels: 13-months patency in a sheep model [J]. *Scand Cardiovasc J*, 2012, 46(1): 57–62.
- [31] Zahedmanesh H, Mackle JN, Sellborn A, *et al.* Bacterial cellulose as a potential vascular graft: Mechanical characterization and constitutive model development [J]. *J Biomed Mater Res B*, 2011, 97 B(1): 105–113.
- [32] Fink H, Faxalv L, Gabor FM, *et al.* Real-time measurements of coagulation on bacterial cellulose and conventional vascular graft materials [J]. *Acta Biomater*, 2010, 6(3): 1125–1130.
- [33] Wang J, Wan Y, Huang Y. Immobilisation of heparin on bacterial cellulose chitosan nano-fibres surfaces via the cross-linking technique [J]. *Nanobiotechnol, IET*, 2012, 6(2): 52–57.
- [34] Fink H, Hong J, Drotz K, *et al.* An in vitro study of blood compatibility of vascular grafts made of bacterial cellulose in comparison with conventionally-used graft materials [J]. *J Biome Mater Res A*, 2011, 97(1): 52–58.
- [35] 陈艳梅, 奚廷斐, 郑裕东. 骨组织工程支架材料及其相关的研究进展 [J]. *北京生物医学工程*, 2008, 27(5): 541–546.  
Chen YM, Xi TF, Zheng YD. The research progress of bone tissue engineering scaffold material and its related [J]. *J Biomedl Eng Beijing*, 2008, 27(5): 541–546.
- [36] Petersen N, Gatenholm P. Bacterial cellulose-based materials and medical devices: current state and perspectives [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2011, 91(5): 1277–1286.
- [37] Martínez H, Brackmann C, Enejder A, *et al.* Mechanical stimulation of fibroblasts in micro-channeled bacterial cellulose scaffolds enhances production of oriented collagen fibers [J]. *J Biome Mater Res A*, 2012, 100(4): 948–957.
- [38] Novotna K, Havelka P, Sopuch T, *et al.* Cellulose-based materials as scaffolds for tissue engineering [J]. *Original paper*, 2013, 20(5): 2263–2278.
- [39] Bodin A, Bharadwaj S, Wu S, *et al.* Tissue-engineered conduit using urine-derived stem cells seeded bacterial cellulose polymer in urinary reconstruction and diversion [J]. *Biomaterials*, 2010, 31(34): 8889–8901.
- [40] 李飞, 贾原媛, 汤卫华, 等. 新型纳米生物材料细菌纤维素的研究现状与前景 [J]. *中国造纸*, 2009, 28(3): 56–61.  
Li F, Jia YY, Tang WH, *et al.* New research present situation and prospect of nanometer biomaterial bacterial cellulose [J]. *J China Papermaking*, 2009, 28(3): 56–61.
- [41] 贾卉, 贾原媛, 王娇, 等. 细菌纤维素构建组织工程角膜基质的办法及其评价 [N]. *吉林大学学报(医学版)*, 2010, 36(2): 303–307.  
Jia H, Jia YY, Wang J, *et al.* Bacterial cellulose way to construct tissue engineering cornea stroma and evaluation [N]. *J Jilin University (Med Edit)*, 2010, 4(2): 303–307.
- [42] Millon LE, Wan WK. The polyvinyl alcohol-bacterial cellulose system as a new nanocomposite for biomedical applications [J]. *J Biomed Mater Res*, 2006, 79B(2): 245–253.
- [43] 万怡灶, 李园园, 何芳. 细菌纤维素与肝素复合材料及制备方法 [P]. 中国专利: CN 101461967 B, 2012.  
Wan YZ, Li YY, He F. Bacterial cellulose composites with heparin and preparation [P]. *China patent*: CN 101461967 B, 2012
- [44] Gumah A, Ahmad N, Katas H, *et al.* Bacterial cellulose film coating as drug delivery system: physicochemical, thermal and drug release properties [J]. *Sains Malays*, 2012, 41(5): 561–568.
- [45] Ahmad N, Halib N, Ahmad I. Synthesis and characterization of thermo- and pH-responsive bacterial cellulose/acrylic acid hydrogels for drug delivery [J]. *Carbohydr Polym*, 2012, 88(2): 465–473.
- [46] 郑弈. 微胶囊/细菌纤维素 X 射线屏蔽复合膜的制备与表征 [D]. 上海: 东华大学, 2014.  
Zheng Y. Preparation and characterization of microcapsules/bacterial cellulose X-ray shielding composite membrane [D]. *Shanghai: Donghua university*, 2014.
- [47] Levinson DJ, Glonek T. Microbial cellulose contact lens [P]. *US patent* 7, 832, 857, 2010.
- [48] 蔡锐波, 陈海宏, 陈向标. 细菌纤维素制备生物医用材料的研究进展 [J]. *合成纤维*, 2012, 41(12): 9–12.  
Cai RB, Chen HH, Chen XB. Bacterial cellulose preparation research progress of biomedical materials [J]. *Synthetic Fiber*, 2012, 41(12): 9–12.
- [49] Mangalam AP, Simonsen J, Benight AS. Cellulose/DNA hybrid nanomaterials [J]. *Biomacromolecules*, 2009, 10(3): 497–504.
- [50] 黄芳. 一种新型布洛芬细菌纤维素膜透皮缓释系统 [J]. *武汉大学学报*, 2014, 61(1): 99–102.  
Huang F. A new type of ibuprofen bacterial cellulose membrane transdermal controlled-release system [J]. *J Wuhan Univ*, 2014, 21(1): 99–102.

(责任编辑: 白洪健)

## 作者简介



吕鸿皓, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品加工及贮藏。  
E-mail: 1057840979@qq.com



夏秀芳, 副教授, 博士, 主要研究方向为食品科学。  
E-mail: xxfang524@163.com