



天津科技大学学报

Journal of Tianjin University of Science & Technology

ISSN 1672-6510, CN 12-1355/N

《天津科技大学学报》网络首发论文

题目：面膜用细菌纤维素膜的关键制备参数优化与性能评价
作者：杨艺璇，李忻嵘，王娅楠，谢燕燕，钟成
DOI：10.13364/j.issn.1672-6510.20250167
收稿日期：2025-11-03
网络首发日期：2026-09-02
引用格式：杨艺璇，李忻嵘，王娅楠，谢燕燕，钟成. 面膜用细菌纤维素膜的关键制备参数优化与性能评价[J/OL]. 天津科技大学学报.
<https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250167>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



面膜用细菌纤维素膜的关键制备参数优化与性能评价

杨艺璇, 李忻嵘, 王娅楠, 谢燕燕, 钟 成
(天津科技大学生物工程学院, 天津 300457)

摘 要: 通过木葡糖酸醋杆菌 (*Komagataeibacter xylinus*) 发酵生产细菌纤维素 (BC) 膜, 探究其作为面膜基材的最适初始厚度及含水量, 将其与市售面膜进行比较以及膜的不同位置、不同失水方式对其性能的影响, 结果表明: 初始厚度为 2mm, 含水量为 20% 的 BC 膜载液量是蚕丝和无纺织物的 2 倍以上, 保水率为 63%、水蒸气透过率为 1215 g/(m² d)、剥离强度为 2.33N/m、空气透过率为 1231cm³/(m² d 0.1MPa)、弯曲硬挺度为 0.66mN cm; 不同位置的 BC 膜在性能上均可满足面膜基材的需求, 可作为合格的面膜基材使用; 不同失水方式的 BC 膜的性能为真空失水 > 热风失水 > 挤压失水, 但挤压失水方式的效率高、能耗低, 更适合生产。

关键词: 木葡糖酸醋杆菌; 面膜; 初始厚度; 含水量; 失水方式

中图分类号: TQ352.79 文献标志码: A 文章编号: 1672-6510 (0000)00-0000-00

Determination of Key Process Parameters and Advantages of Bacterial Cellulose-Based Facial Masks

Yang Yixuan, Li Xinrong, Wang Yanan, Xie Yanyan, Zhong Cheng
(Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Bacterial cellulose (BC) membranes were produced by fermentation of *Komagataeibacter xylinus*. The study investigated the optimal initial thickness and moisture content of BC membranes as a base material for face masks, and compared their properties with those of commercial mask substrates. In addition, the effects of membrane position and different dehydration methods on their performance were investigated. The results showed that BC membranes with an initial thickness of 2 mm and a moisture content of 20% had a liquid carrying capacity more than twice that of silk and non-woven fabric. The water retention rate was 63%, the water vapor transmission performance was 1215 g/(m² d), the peel force at 90 ° was 2.33 N/m, the air permeability was 1231 cm³/(m² d 0.1 MPa), and the bending stiffness was 0.66 mN cm. BC membranes from different positions all met the requirements for face mask base materials, indicating their suitability for use as qualified mask substrates. Among the dehydration methods, the performance of BC membranes followed the order: vacuum dehydration > hot air dehydration > extrusion dehydration. However, extrusion dehydration is more efficient and energy-saving, making it more suitable for large-scale production.

Key words: *Komagataeibacter xylinus*; face mask; initial thickness; water content; water loss method

在美容护肤领域, 面膜类产品以其便携性和高效性受到广大消费者的青睐^[1]。面膜一般分为贴片式和涂抹式两大类, 其中贴片式面膜由面膜基材和精

华液共同组成。面膜基材作为精华液的载体直接接触皮肤, 其性能极大的影响着面膜的使用效果^[2]。理想的面膜基材应具备良好的载液能力、优异的贴膜

收稿日期: 2025-11-03; 修回日期: 2026-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(U24A20478)

作者简介: 杨艺璇(2001—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生; 通信作者: 钟成, 教授, czhong@tust.edu.cn

性、良好的生物相容性、良好的力学性能、可降解性^[3]。目前市面上常用的面膜基材有无纺布、蚕丝、天丝、细菌纤维素(bacterial cellulose, BC)等,其中BC是由微生物发酵产生的,通过 β -1, 4-糖苷键 β -D吡喃葡萄糖连接起来的葡萄糖聚合物^[4]。

目前BC已成为面膜基材中的研究热点。唐静^[5]利用丝胶蛋白和透明质酸对BC进行原位修饰和后修饰,得到的BC具有更精细的网状结构以及良好的拉伸性能和保湿性能。Paola等^[6]通过实验证明了BC面膜能将一些植物提取物中的活性成分有效传递到皮肤中。王蕾等^[3]通过原位添加透明质酸,制备出HA-BC面膜,与无纺布面膜相比,该面膜更加亲肤柔软,持水性能更好,锁水能力更优,拉伸模量、弹性模量更强,拉扯不易变形。这些研究证明了BC膜与其他基材相比具有很大优势,非常适合作为面膜基材。然而,当前BC膜在面膜基材领域的应用仍面临诸多问题。面膜初始厚度及含水量对面膜性能是否有影响,纵向切割得到的面膜基材的性能是否均一,失水方式对面膜性能是否有影响,这些问题亟待解决,确定最优工艺,旨在实现产品商业化应用。因此,本文通过木葡糖酸醋杆菌(*Komagataeibacter xylinus*)发酵生产BC膜,从BC膜的最适初始厚度及含水量、不同位置和失水方式这三方面探究BC面膜基材在工业化生产中的合适条件。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

木葡糖酸醋杆菌(*Komagataeibacter xylinus*) CGMCC 2955,工业发酵微生物教育部重点实验室筛选,中国普通微生物菌种保藏管理中心保藏。

酵母浸出粉、蛋白胨,英国OXOID公司;十二水磷酸氢二钠、无水葡萄糖,天津市北方天医化学试剂厂;氢氧化钠,天津市化学试剂一厂;纤维素酶,上海麦克林生化科技有限公司;氯化钠、磷酸氢二钾,天津市北方天医化学试剂厂;氯化钾,天津博天胜达科技发展公司。

W-B-61E-H型水蒸气透过率测试仪,广州西唐机电科技有限公司;EMS-9A型磁力搅拌器,天津市欧诺仪器仪表有限公司;LRH-250S型恒温恒湿培养箱,天津亿诺科学仪器有限公司;SpectraMaxM2型多功能酶标仪,美谷分子仪器(上海)有限公司;IS-

RDS3型恒温摇床,上海珂淮仪器有限公司;RBX-916型皮肤水分测试仪,宁波市瑞尔芭比医疗设备有限公司;FD-1型真空冷冻干燥机,上海田枫实业有限公司;PHSJ-4A型pH计、ME204型分析天平,梅特勒-托利多仪器有限公司;42HZ60-1704D6型切膜机,天津弘治电机有限公司;11-3型万能材料试验机,瑞典L&W公司;快SU1510型速纸页成型机,Rapid-Köhen。

1.2 BC膜的制备

HS液体培养基:酵母提取物7.5 g/L,蛋白胨10 g/L,葡萄糖25 g/L,十二水合磷酸氢二钠10 g/L。用冰乙酸调节pH至6.0,115℃灭菌30 min。

将木葡糖酸醋杆菌菌种活化后,接种于赫斯特林-施拉姆(Hestrin-Schramm, HS)培养基中,30℃、180 r/min摇床振荡培养24 h,再按1%接种量转接至新的HS培养基中,并加入1%纤维素酶,继续培养24 h。然后,将菌液以8000 r/min的速度离心5 min弃上清,使用PBS缓冲液重悬菌体,继续离心洗涤3次后,使用紫外分光光度计调节菌体600 nm处吸光度(A_{600})为0.50左右,根据具体浓度确定接种量,使培养基内 $A_{600}=0.02$,培养基与菌体混匀后放入30℃细菌培养箱中培养。将培养一定时间后的BC膜取出,加入0.1 mol/L NaOH溶液,80℃水浴加热,去除培养基和细胞残骸,待BC膜变为白色时,将其浸入蒸馏水中,浸泡至中性^[7-8]。

1.3 BC膜的性能测试

面密度:参照GB/T 24218.1—2009《纺织品非织造布测试方法第1部分:单位面积质量的测定》^[9],将面积为50 cm²的BC膜完全干燥,使用万分之一天平称量。面密度按照式(1)计算,单位为。

$$M = \frac{m}{A} \times 10^6 \quad (1)$$

式中: M 为面密度, g/m²; m 为质量, g; A 为面积, mm²。

微观形貌:使用扫描电子显微镜(SEM)观察BC膜的形貌。先将BC膜放入液氮中冷冻20 min后,立即放入真空冷冻干燥机内冷冻干燥12 h以上。撕取一层大小适宜且完全干燥后的BC膜,用导电胶粘贴在SEM载物台上,喷金处理20 s后,放入真空室观察。SEM的加速电压为5~30 kV。

孔隙率:利用ImageJ软件对BC膜的SEM图进行孔洞面积统计,孔隙率按照式(2)计算。

$$P = \frac{\sum A_i}{\sum A_{\text{image}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P 为孔隙率, %; A_i 为第 i 个孔洞的面积, μm^2 ; A_{image} 为整张 SEM 图片的测量面积, μm^2 。

拉伸性能: 利用热压失水的方法使 BC 膜完全干燥, 裁成 $60\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的矩形, 并测量厚度。使用万能材料试验机进行测试, 设置初始标距为 40 mm , 初始拉力为 0 N , 拉伸速率为 $5\text{ mm/min}^{[10]}$, 每组试样做 3 个平行。参考 GB/T13022—1991《塑料薄膜拉伸性能试验方法》^[11] 进行检测, 计算拉伸强度和断裂伸长率。

透明度: 将 BC 膜裁成 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 大小, 平铺在印有天津科技大学校徽的白纸上, 观察 BC 膜的透明效果, 并拍照记录, 每组实验取 3 个平行。

载液量: 根据标准 GB/T 24218.6—2010《纺织品非织造布试验方法第 6 部分: 吸收性的测定》^[12] 进行测试。预实验显示吸水 240 min 后, BC 膜的质量几乎不再增加。实验前 30 min 内, 每浸泡 10 min , 取出悬挂沥水 5 min 后称量, 并用游标卡尺测量厚度; 实验 $30 \sim 240\text{ min}$ 内, 每浸泡 30 min , 取出悬挂沥水 5 min 后称量, 并用游标卡尺测量厚度。实验用水为蒸馏水, 试样面积为 50 cm^2 。

保水率: 称量 BC 膜的初始质量 (m_1), 随后放入 25°C 、湿度为 65% 的恒温恒湿培养箱中, 每隔 10 min 将样品取出称量 (m_2), BC 膜的干质量记为 m_3 , 每组实验取 3 个平行, 保水率 (W_R) 按照式 (3) 计算。

$$W_R = \frac{m_3 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

透湿性: 将 BC 膜裁剪至合适大小, 放入 23°C 、湿度 65% 的恒温恒湿培养箱, 测试 24 h 。膜的透湿性以水蒸气透过率表示, 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》^[13] 进行测定。

保湿性: 将面积为 50 cm^2 的 BC 膜敷在手背上, 每隔 15 min 取下称重并记录, 并用 Real Bube 皮肤水分测试仪测试敷用后不同位置的皮肤水分、油分以及弹性, 每组实验取 3 个平行。

透气性: 根据标准 GB/T 1038—2000《薄膜和薄片气体透过性试验方法压差法》^[14], 在温度 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 (49 ± 1) % 的环境下, 采用气体渗透仪测试, 测试面积为 50 cm^2 , 每组实验取 3 个平行。

贴服性: 将样品裁成 $20\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 测试样条,

采用电子万能材料试验机对样品进行 90° 剥离试验, 剥离速率为 300 mm/min 。每种样品测试 3 次^[10]。

柔软性: 将试样裁成 $150\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的长条, 用织物硬挺度仪测试, 斜面角度 41.5° , 移动速度 10 mm/s , 每组实验取 3 个平行^[2]。

1.4 BC 膜与常见市售面膜膜布的性能对比

将市售无纺布膜布和蚕丝膜布裁成面积为 50 cm^2 的圆形, 进行性能测试, 结果与已确定的最适厚度及含水量的 BC 膜比较。

1.5 BC 膜不同部位的性能差别比较

使用 HS 液体培养基培养活化后的木葡糖酸醋杆菌菌种, 30°C 静置培养 10 d , 得到厚度约 $9 \sim 10\text{ mm}$ 的 BC 膜, 将纯化后的 BC 膜用切膜机从最上层开始切割出 2.0 mm 的 BC 膜, 切割 3 次, 分别记为上层、中层和下层, 测试膜的性能, 剩下的 BC 膜舍弃。

1.6 失水方式对 BC 膜性能的影响

挤压失水: 湿纸页压榨机可通过持续重力挤压实现 BC 膜的高效脱水, 其工作原理基于对纤维素纤维网络结构的物理压实作用。将 BC 膜平铺于吸水性能良好的报纸上, 放入设备后调节压力至 0.018 kPa , 根据 BC 膜初始厚度及目标含水量 (本研究为 $10\% \sim 50\%$) 设定脱水时间 ($15 \sim 90\text{ s}$)。取出后测定含水量, 若含水量高于目标值, 需重复脱水; 若低于目标值, 则需重新制膜。需注意: 若 BC 膜出现肉眼可见的纤维断裂或孔隙结构塌陷, 则表明脱水压力过高, 需降低参数重新操作。

热风失水: 将 BC 膜放置在平皿内, 置于鼓风烘箱 (60°C) 中, 根据 BC 膜不同的初始厚度和含水量要求, 计时 $0.5 \sim 2\text{ h}$, 需注意避免高温 ($> 80^\circ\text{C}$) 导致结晶度下降。BC 膜取出后测定其含水量。若含水量高于目标值, 需延长失水时间; 若含水量低于目标值, 则需重新制膜。

真空失水: 将 BC 膜放置在平皿内, 置于真空干燥箱 (60°C) 中, 真空度在 -0.04 MPa 以下, 根据 BC 膜的不同初始厚度和含水量要求, 计时 $0.5 \sim 3\text{ h}$ 。取出后 BC 膜后测定含水量。若含水量高于目标值, 需延长失水时间; 若含水量低于目标值, 则需重新制膜。

2 结果与分析

2.1 不同初始厚度及含水量的 BC 膜的结构与性能

BC 膜的初始厚度控制是其生产中的关键工艺参数, 其合理性直接影响产品使用体验与生产效益。若

厚度过厚,会导致面膜质地厚重、透明度下降,降低消费者使用体验感;若过薄,则可能因吸液能力不足或机械强度较差,造成精华液负载量不足、易破损等问题。在控制 BC 膜厚度的同时,其含水量调控是另一项关键工艺参数。BC 膜初始含水量通常高达 99%,需通过脱水处理将含水量降低至适宜范围以实现载液功能。含水量也会影响 BC 膜的厚度、机械性能等,因此在制备 BC 膜时,初始厚度要与含水量协同控制,以最大化其性能优势。

2.1.1 载液量

面膜主要通过其精华液的作用来达到护肤效果,而精华液需要膜布作为载体才能作用于皮肤。若基材吸附的精华液量不足,敷用期间面膜容易干燥,导致有效成分不能充分渗透,护肤大打折扣;反之,基材承载的精华液越多,在相同时间内挥发性成分流

失的越少,精华液的作用时间得到延长,因此面膜基材的载液性能直接影响护肤效果^[15]。分别测试面积为 50cm²,含水量为 10%、20%、30%、40%、50%的不同厚度 BC 膜的载液量,结果如图 1 所示。由图 1 可知,BC 膜在 30 min 内迅速吸液体,并能持续吸收。在测试的 4 h 内,含水量为 20%的 BC 膜载液量最大,2 mm 厚的 BC 膜载液量达到 5 g 以上,3 mm 厚的 BC 膜载液量达到 6 g 以上,4 mm 厚的 BC 膜载液量达到 10 g 以上。市面上普通面膜的面积为 380~400 cm²,每片面膜精华液含量为 25~30 g,而相同面积下 2 mm 的 BC 膜载液量可达 28~40 g,3 mm 和 4 mm 的 BC 膜载液量分别可达 45.6~48 g 和 76~80 g。由此可见,不同厚度的 BC 膜均能满足面膜的载液量需求。

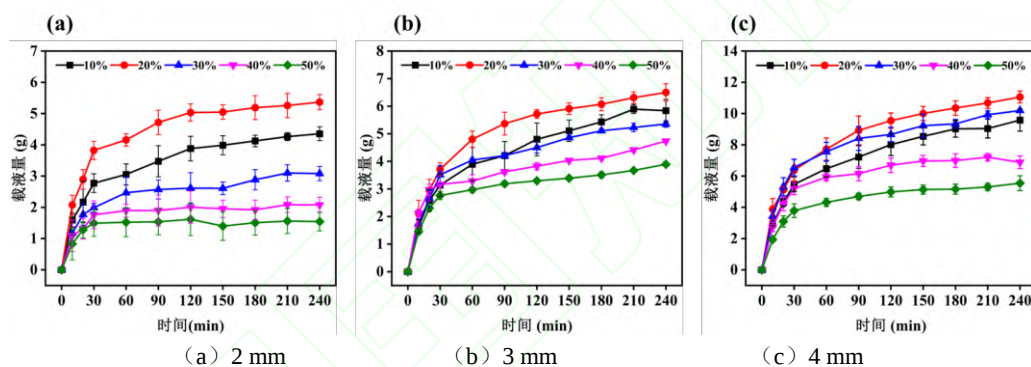


图 1 不同初始含水量下 2 mm、3 mm 和 4 mm BC 膜的载液量

Fig. 1 Liquid carrying capacity of BC membranes with thicknesses of 2 mm, 3 mm, and 4 mm under different initial water contents

分析时间-载液量曲线斜率评估不同厚度的 BC 膜在不同含水量下的吸收速率,分析其载液量数值评估其载液效果。结果表明,不同厚度 BC 膜都在含水量为 20%时液体吸收速率最高,载液效果最好,而含水量为 40%和 50%的 BC 膜载液效果较差。这可能是过量水分会使 BC 膜过度溶胀,纤维网络被撑开,孔隙变大,但毛细作用力显著减弱,液体容易从大孔隙中流失,反而导致载液稳定性下降。含水量越高,厚度越厚,在使用过程中,厚度过大会影响使用感受,后续实验将 BC 膜的含水量范围缩小为 10%、20%和 30%进行测试。

2.1.2 保水率

一般面膜的使用时间为 15~20 min,如果膜布的保水性太差,会使精华液水分蒸发过快,面膜会很快变干,护肤效果将大打折扣,甚至会造成反吸现象,使皮肤更加干燥^[16]。不同含水量下 2 mm、3 mm 和 4 mm 的 BC 膜的保水率如图 2 所示。由图 2 可知,BC 膜越厚,保水效果越好。20 min 时,除含水量为 10%的 2 mm BC 膜外,其他 BC 膜的保水率都在 80%以上。1 h 后,除含水量为 10%的 2 mm BC 膜外,其他 BC 膜的保水率仍然在 50%以上,表明 BC 膜具有很好的保水性能。

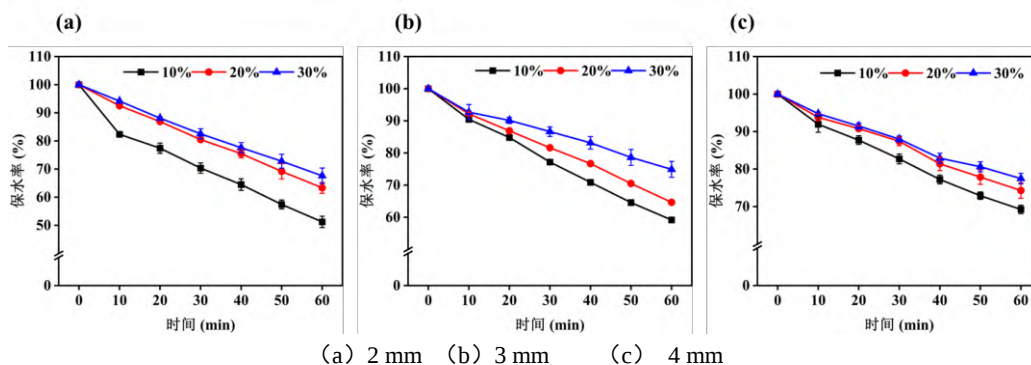


图2 不同含水量下 2 mm、3 mm 和 4 mm BC 膜的保水率

Fig.2 Water retention rates of BC membranes with thicknesses of 2 mm, 3 mm and 4 mm under different initial water contents

2.1.3 保湿性

面膜应具有一定的保湿性, 以保证在使用过程中不会变干。在进行保湿性测试的同时, 结合膜布质量变化和皮肤水分含量, 分析面膜的保湿效果, 结果如图 3 所示。由图 3 可知: 当 BC 膜的初始厚度为 2

mm 时, 含水量 10% 的 BC 膜的保湿效果能持续 60 min, 含水量 20% 和 30% 的保湿效果能持续 90 min; 初始厚度为 3 mm 和 4 mm 的 BC 膜的保湿效果能持续 120 min。由图 3 可以看出, BC 膜的质量下降呈平行趋势, 说明含水量多少几乎不影响保湿效果。

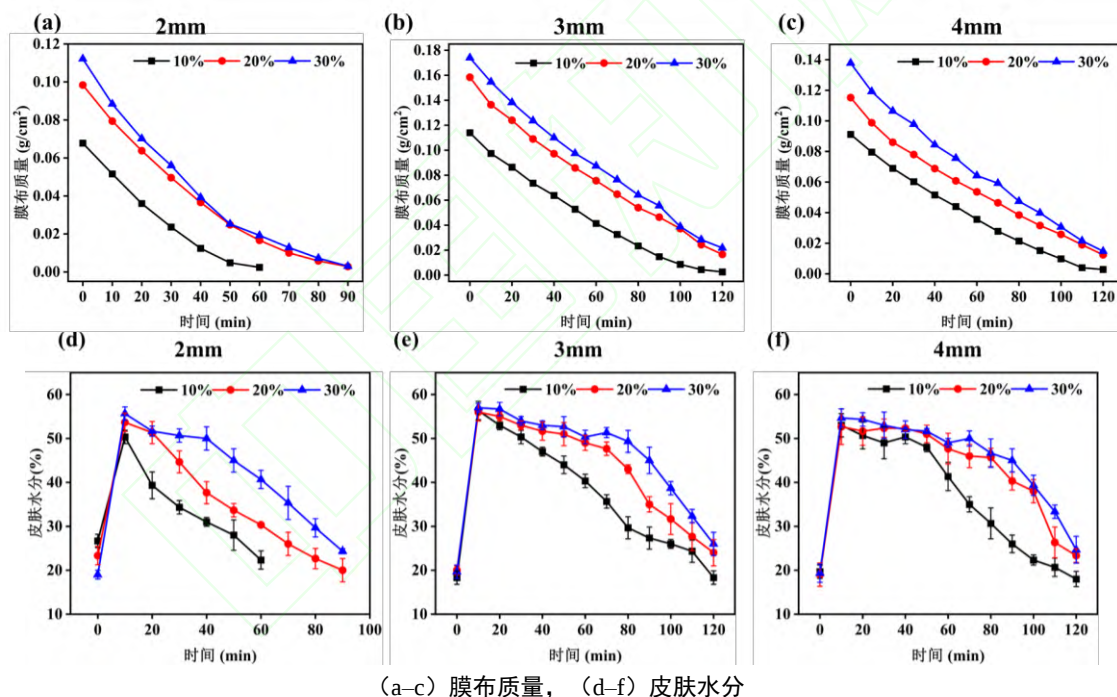
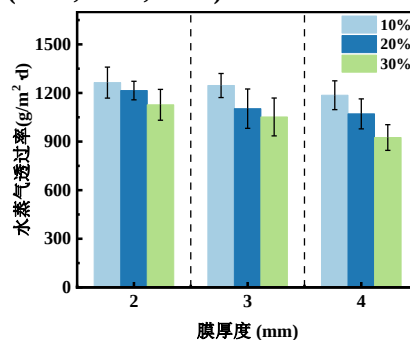


图3 不同含水量下 2 mm、3 mm 和 4 mm BC 膜的保湿性测试结果

Fig.3 Moisturizing performance of BC membranes with different thicknesses (2 mm, 3 mm, 4 mm) at various water contents

2.1.4 透湿性、贴服性、透明度与结构表征

BC 膜的透湿性、贴服性、透明度与结构表征如图 4 所示。



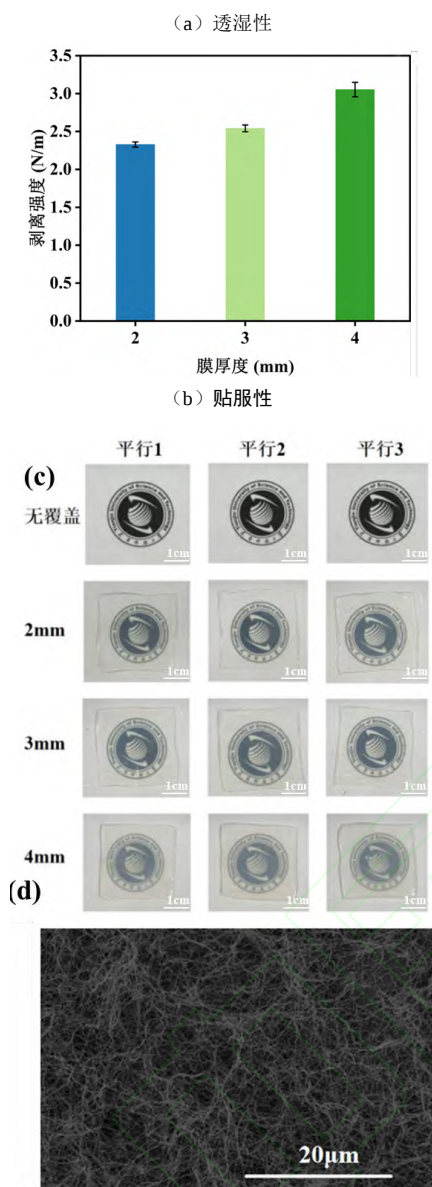


图4 BC膜的透湿性、贴服性、透明度与结构表征

Fig. 4 Water vapor permeability, conformability, transparency and structural characterization of BC membranes

水蒸气透过率的参数定义为标准环境条件下, 即温度 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度 $(60 \pm 5)\%$, 单位时间内透过基布单位面积的水蒸气质量^[17]。在面膜的常规使用时长 (15~20 min) 内, 如果基材透湿性过高, 将加速精华液蒸发, 导致基材过快干燥。因此, 面膜基布需具备较低的水蒸气透过性以优化消费者使用体验。如图 4 (a) 所示, 不同厚度的 BC 膜的水蒸气透过率都在 $900 \sim 1250 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ d})$ 之间, 符合标准。

采用处理后的猪皮模拟人皮肤, 测试 90° 剥离

强度, 结果可间接反映 BC 膜在人脸上的服帖程度, 剥离强度越高, 表明 BC 膜与皮肤的贴合效果越优异。由图 4 (b) 可知, 在含水量同为 20% 时, 2、3、4 mm 的 BC 膜剥离强度分别为 2.33、2.54、3.05 N/m, 说明研究中的 BC 膜具有很好的亲肤效果。

目前消费者更青睐于具有隐形效果的超薄膜布, 这类材质在确保活性组分高效渗透的同时, 还具有美观性^[17]。由图 4 (c) 可知, 2 mm BC 膜的透明度最高, 随着厚度的升高, 透明度越来越低。

以上测试结果分析表明, 含水量为 20% 的 2 mm BC 膜最适合作为面膜基材使用。因此, 进一步对其微观结构进行表征, 结果如图 4 (d) 所示。BC 膜内部呈 3D 网状结构, 孔隙率为 49%, 纤维直径约为 50 nm, 非常细小。

2.1.5 含水量为 20% BC 膜的其他性能测试

对含水量为 20% 的 2 mm BC 膜的其他性能进行进一步评估, 结果见表 1。BC 膜的空气透过率为 $1231 \text{ cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d } 0.1 \text{ MPa})$, 具有显著的气体渗透性, 允许水蒸气和气体交换。弯曲硬挺度可表征材料的柔软性, 硬挺度越小, 材料越柔软。干态 BC 膜的弯曲硬挺度为 0.66 mN cm , 干态试样的弯曲刚度会高于湿态试样, 其机理在于纤维基材吸液后发生溶胀作用, 纤维会变柔软。对湿态下的 BC 膜的拉伸强度为 1.28 MPa , 表明 BC 膜不会被轻易扯破; 断裂伸长率为 32.55%, 表明 BC 膜具有一定的韧性, 在承受外力时可缓慢发生形变, 避免迅速断裂而产生破损。

表 1 含水量为 20% 的 2 mm BC 膜其他性能测试结果

Tab. 1 Other performance test results of the 2 mm BC membranes with 20% moisture content

测试项目	测试结果
空气透过率/ $[\text{cm}^3/(\text{m}^2 \text{ d } 0.1 \text{ MPa})]$	1231
弯曲硬挺度/ (mN cm)	0.66
拉伸强度/ MPa	1.28
断裂伸长率/%	32.55

2.2 BC 膜与市售面膜基材性能比较

BC 膜、蚕丝和无纺织的结构和性能对比如图 5 所示。蚕丝基材呈现非定向排列的纤维束, 未观察到三维立体网络结构; 无纺布基材则表现为粗直径纤维的无序堆积, 孔径分布不均匀, 且无纺布面膜和蚕丝面膜的直径为微米级别。相比之下, BC 膜的直径为纳米级别, 远小于蚕丝和无纺织基材, 组成 BC 膜精细三维网络结构的纳米纤维与人类皮肤约为

2026 年 杨艺璇, 等: 面膜用细菌纤维素膜的关键制备参数优化与性能评价
50~60nm 的皮沟宽度^[5]匹配, 可紧密贴合, 减少掉落 发挥作用。
的可能, 确保营养成分有效渗透肌肤深层, 从而有效

• 7 •

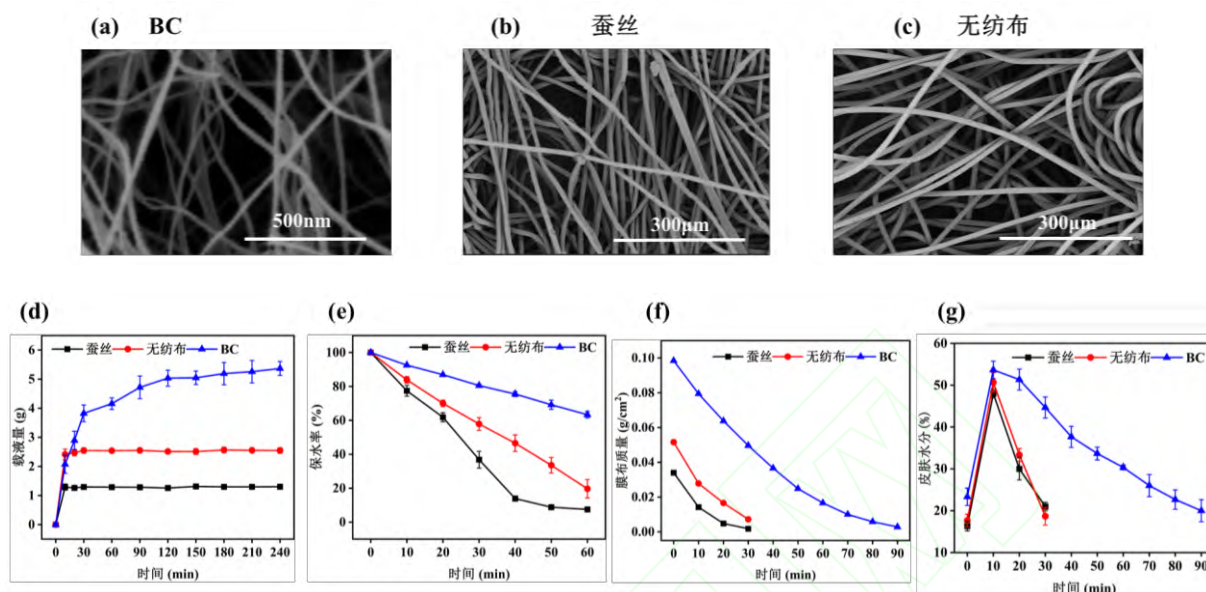


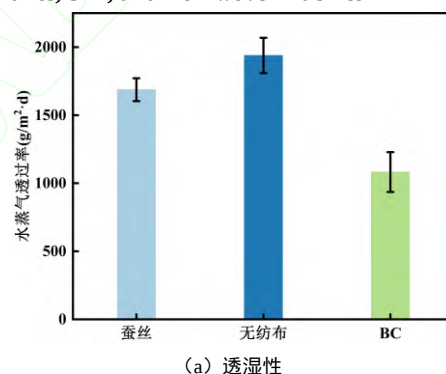
图 5BC 膜、蚕丝和无纺布的结构和性能对比

Fig. 5 Structural and Property Comparison of BC Membranes, Silk, and Non-woven Fabrics

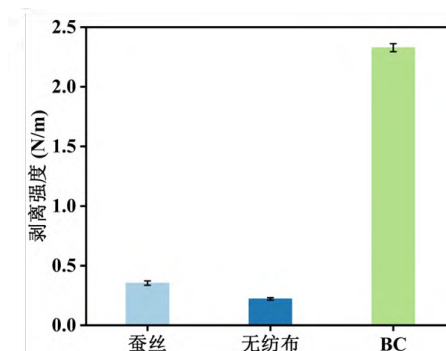
由图 5 可知,BC 膜的载液量高于蚕丝和无纺布,是蚕丝和无纺布的 2 倍以上。这是因为 BC 膜上含有大量的羟基,能够通过氢键作用与水分子结合,固定较多的水分子^[18]。BC 膜的保水率为 63%,远远高于蚕丝和无纺布。BC 膜具有纳米级三维网络结构,可有效截留水分子,其三维网络结构与氢键协同作用显著降低水分蒸发速率。此外,BC 的吸湿特性有助于提高其保水性,这对保持皮肤水分也至关重要^[19]。相比之下,蚕丝和无纺布的二维层状结构仅依赖物理吸附作用,无法形成有效保水屏障。

BC 膜、蚕丝和无纺布保湿性的比较结果如图 5 (f 和 g) 所示,刚开始敷用时,3 种基材都能使皮肤水分提高 50%以上。随后,蚕丝组和无纺布组皮肤水分开始下降,敷用 20 min 后,蚕丝组和无纺布组的皮肤水分基本下降至最初状态,而敷用 BC 膜组皮肤水分还保持在 50%。在敷用 30 min 后,蚕丝和无纺布基本完全变干,而 BC 膜还可继续敷用。

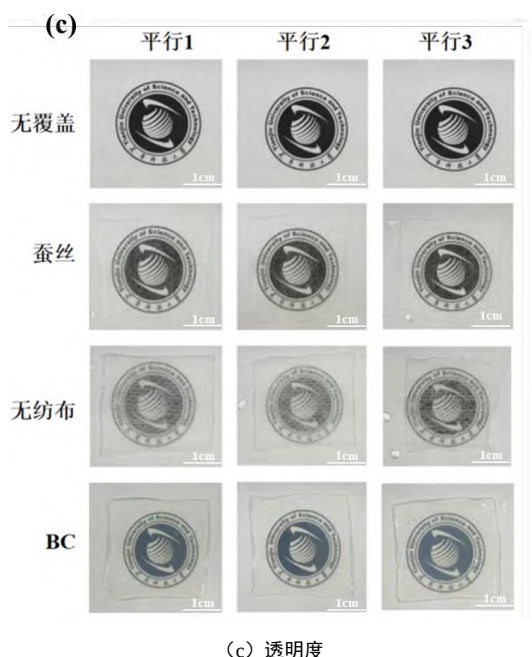
BC 膜、蚕丝和无纺布的水蒸气透过率、剥离强度和透明度如图 6 所示。



(a) 透湿性



(b) 剥离强度



(c) 透明度

图6 BC膜、蚕丝和无纺布的透湿性、剥离强度和透明度

Fig. 6 Water vapor transmission rate, peel strength and transparency of silks and non-woven fabrics and BC membranes

BC膜通过纳米网络结构与亲水性羟基协同作用,形成动态水合层,阻碍了水分子的扩散^[5],因而水蒸气透过率较低(图6(a))。BC膜通过纳米级纤维与皮肤的精准匹配,借助范德华力与氢键协同作用,提供更强的贴合性,如(图6(b))所示,BC膜的剥离强度是蚕丝和无纺布的5倍以上,贴服性远远大于蚕丝和无纺布。由于BC膜的贴服性比蚕丝和无纺布好,能够与皮肤充分接触,并且BC膜具有高保水率和低透湿性,可以减少水分的蒸发,所以可以源源不断的将水分递送至皮肤。蚕丝和无纺布不仅不能减少水分的流失,而且与皮肤的贴合性也较差,导致即使基材中还含有一部分水,也不能递送至皮肤中。在湿态下,蚕丝和BC膜的透明度都较好,无纺布的较差(图6(c))。这是由于蚕丝表面光滑,摩擦系数低,减少了光线反射和散射。BC膜的微观多孔结构允许光线穿透,形成透明或半透明效果,而无

纺织由化学纤维或天然纤维通过粘合剂结合而成,纤维排列松散但缺乏蚕丝的精细空心结构,导致光线散射较多,透明度较低。

2.3 BC膜沿厚度方向的分层性能

BC膜的厚度可以通过培养基含量和发酵时间控制,通常培养1周可获得厚度约为6~8 mm的BC膜。然而,前期研究发现厚度为2 mm的BC膜就能满足面膜基材的基本要求。因此对于过厚的BC膜,可以采用切割的方式得到需要的厚度,但是BC膜具有上层致密、下层疏松的纵向不对称结构,有必要对切割所得的上层、中层和下层进行性能测试,以评估其是否均能满足面膜基材的要求,从而保障生产过程中膜布性能的稳定性和一致性。

纵向切割的BC膜上层、中层和下层的面密度分别为 $(20.76 \pm 0.8) \text{ g/m}^2$ 、 $(21.90 \pm 0.8) \text{ g/m}^2$ 和 $(19.83 \pm 0.9) \text{ g/m}^2$,比自然生长至2 mm的BC膜较大,但没有蚕丝和无纺布高。纵向切割后BC膜上层、中层和下层的结构和性能对比如图7所示。从BC膜的平面及截面SEM图可以看出,沿厚度方向的分层结构之间没有明显差异。上层BC膜的拉伸强度和断裂伸长率均略低于中层和下层BC膜,但都能满足面膜基材的需求。切割成2 mm的BC膜的拉伸强度比自然生长至2 mm的BC膜的拉伸强度高,这是由于切除了最下层结构疏松的部分,剩余部分的结构更致密。下层BC膜的载液量比上层和中层的稍差,但也能满足面膜基材的需求,上层、中层和下层的BC膜无较大差别,都具有很好的保水效果和保湿性,无显著性差异。

纵向切割后BC膜上层、中层和下层的透湿性、贴服性、透明度如图8所示。中层和下层的BC膜的水蒸气透过率略高于上层BC膜,但都比蚕丝和无纺布低,能够有效防止水分蒸发流失,纵向切割的BC膜上层、中层和下层的剥离强度都在3 N/m以上,具有良好的贴服性。纵向切割的BC膜上层、中层和下层的透明度几乎没有差别,都可以看见覆盖图案。

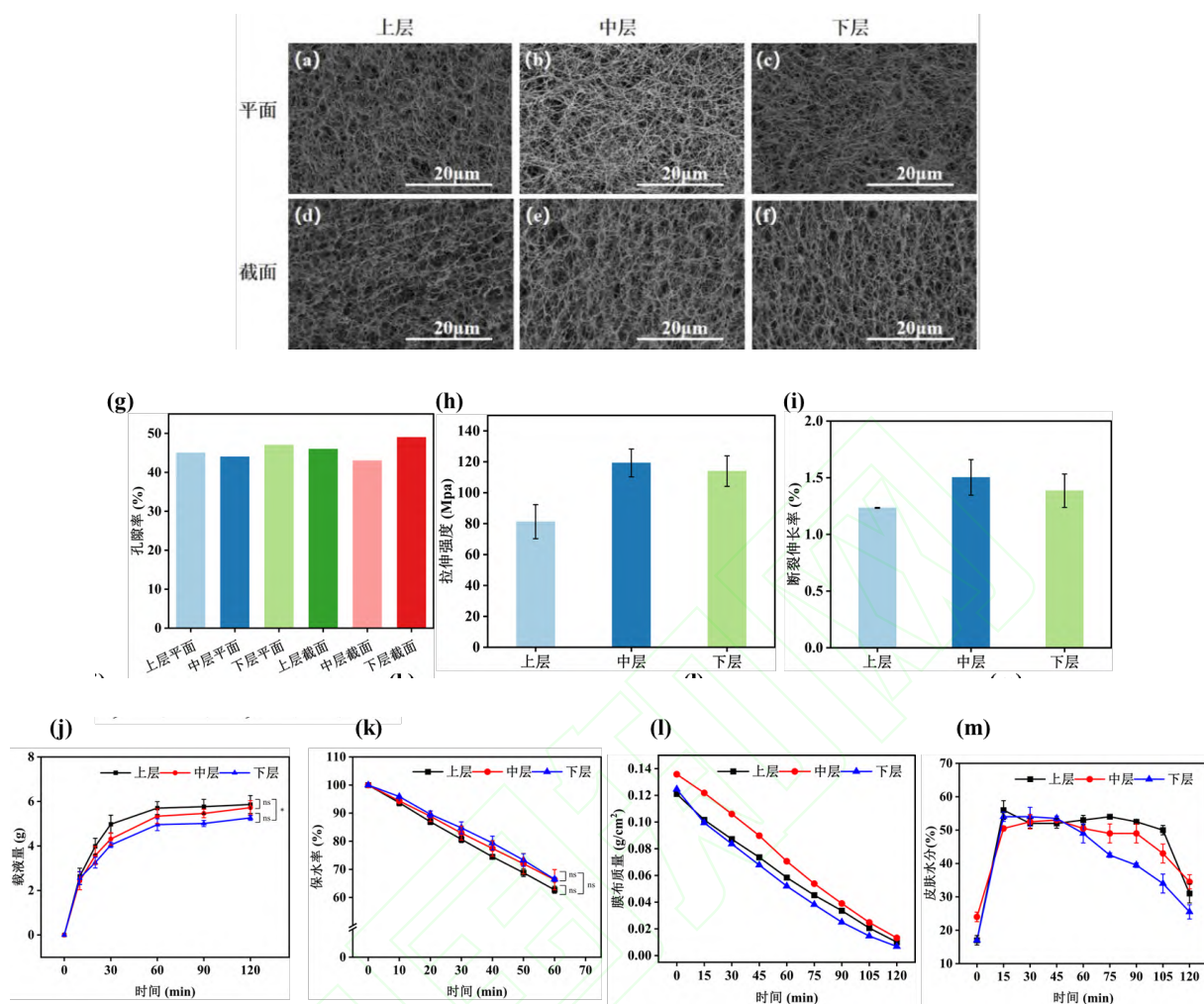
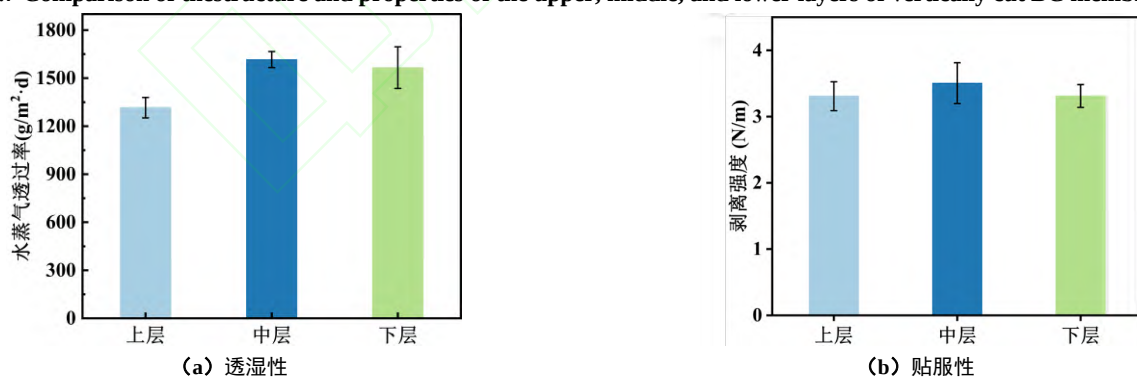
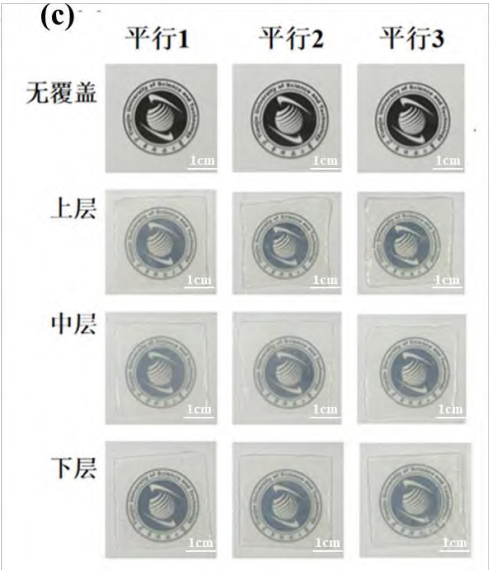


图 7 纵向切割后 BC 膜上层、中层和下层的结构和性能对比

Fig.7 Comparison of the structure and properties of the upper, middle, and lower layers of vertically cut BC membranes





(c) 透明度

图 8 纵向切割后 BC 膜上层、中层和下层的透湿性、贴服性和透明度

Fig.8 Water vapor permeability, conformability and transparency of different layers of BC membranes after longitudinal cutting.

2.4 不同失水方式对膜布性能的影响

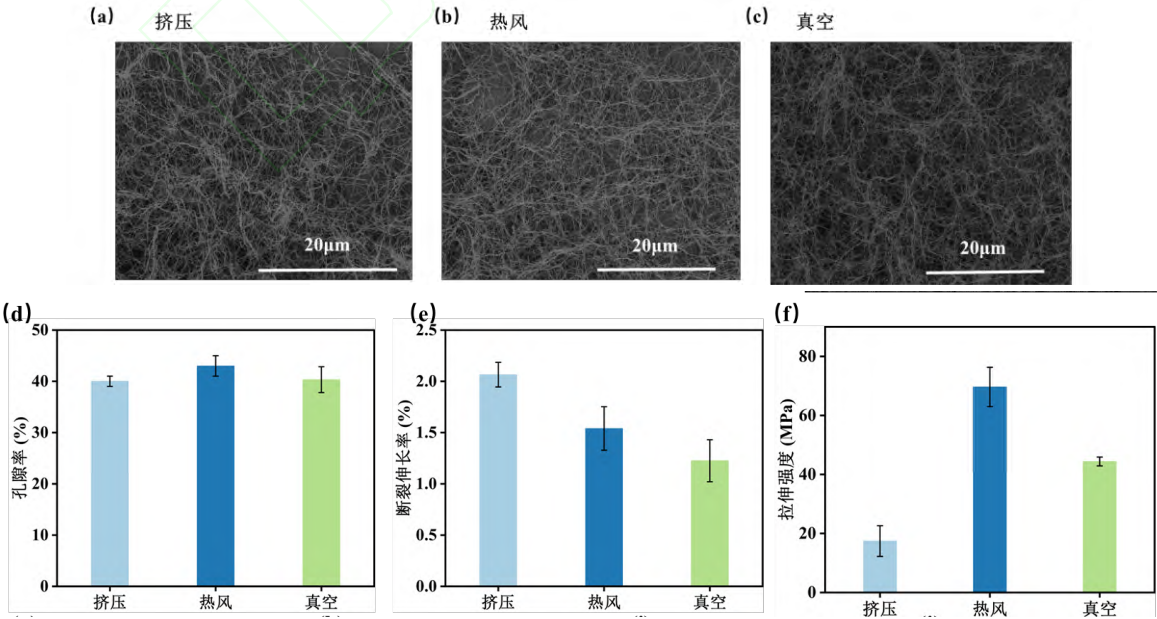
挤压失水、热风失水和真空失水后 BC 膜的结构和性能对比如图 9 所示。挤压失水、热风失水和真空失水后 BC 膜的结构变得致密，但仍然具有 3D 网络结构。为了使含水量保持一致，不同失水方式所用的时间不一样，但达到的效果一样，其微观形态和孔隙

率几乎没有差别。热风失水后拉伸强度最大，真空失水次之，挤压失水最低。热空气通过强制对流直接接触 BC 膜，形成跨膜湿度梯度，使 BC 膜内部的自由水快速蒸发。水分蒸发导致原始水占据的孔隙被纤维素纳米纤维占据，形成致密堆积结构，从而实现拉伸强度的提升^[20]。

如图 9 (g-h) 所示，不同失水方式下 BC 膜的载液量都能达到 4 g 以上，保水率都在 50% 以上，说明任何一种失水方式下的保水效果都非常好。在测试保湿性时，同时记录了 BC 的质量，由图 9 (i-j) 可以看出，质量下降呈平行趋势，说明不同失水方式不影响 BC 向皮肤传递水分的速度。无论哪种失水方式都能使皮肤水分由 20% 左右快速升高到 50% 以上，说明无论哪种失水方式下的 BC 膜都可以有效地将水分传递至皮肤。

挤压失水、热风失水和真空失水后 BC 膜的透湿性、贴服性、透明度对比如图 10 所示。不同失水方式的 BC 膜的水蒸气透过率都在 1000~1200 g/(m² d) 之间，处于较低水平。不同失水方式下的 BC 膜的剥离强度都在 2 N/m 以上，肉眼观察不同失水方式下的 BC 的透明度几乎没有差别。

虽然利用挤压失水的 BC 膜在各项性能上比其他失水方式略差，但是都能满足面膜性能的要求，并且效率高、能耗小。综合考虑，挤压失水的方式更适合应用于生产。



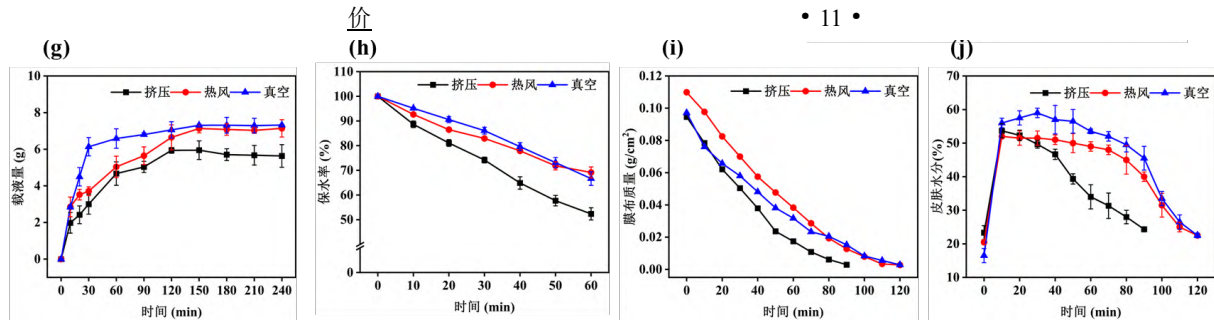
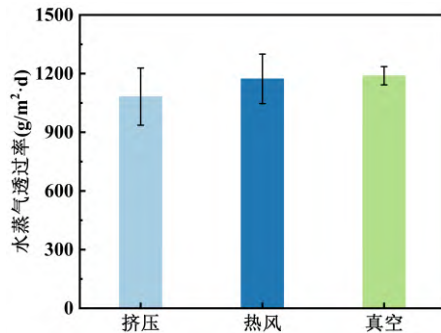
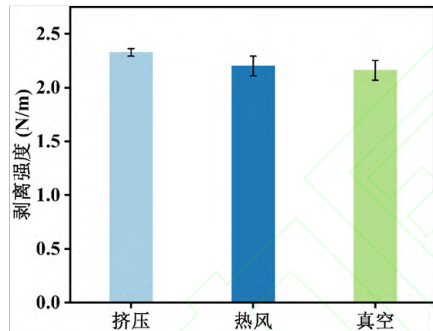


图9 挤压失水、热风失水和真空失水后 BC 膜的结构和性能对比

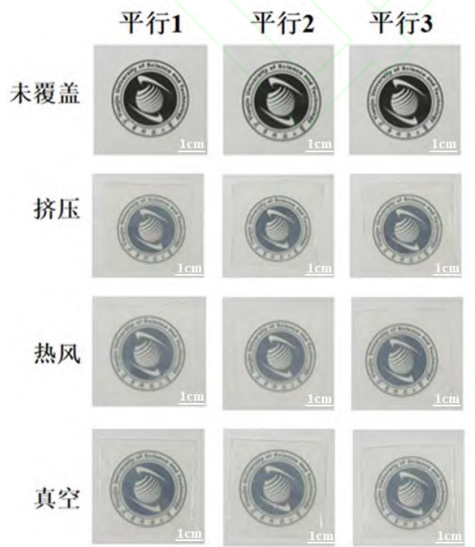
Fig.9 Comparison of the structure and properties of BC membranes after extrusion, hot - air drying, and vacuum dehydration



(a) 透气性



(b) 贴服性



(c) 透明度

图 10 挤压、热风和真空失水后 BC 膜的透气性、贴服性、透明度的对比

Fig.10 Properties of BC membranes after extrusion, hot - air drying, and vacuum dehydration: water vapor transmission rate, peel strength and transparency

3 结论

本研究以木葡糖酸醋杆菌 (CGMCC 2955) 发酵生产 BC 膜, 探究其作为面膜基材的适宜条件, 结果表明: 初始厚度 2mm、含水量 20% 的 BC 膜综合性能最优, 载液量是市售蚕丝和无纺织的 2 倍以上, 保水率 63%、水蒸气透过率 $1215\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 等指标均符合要求, 且透明度高; 对厚 BC 膜切割得到的上层、中层 (舍弃最下层) 性能无显著差异, 均满足面膜基材需求。相较于蚕丝、无纺布, BC 膜因纳米级纤维与三维网状结构, 在贴服性、载液量、保水率上优势显著。在 3 种失水方式中, 挤压失水虽然性能略逊于真空失水和热风失水, 但是效率高、能耗低, 更适合工业化生产。本研究为 BC 膜在面膜领域的工业化应用提供了数据支撑。

参考文献:

- [1] 张子薇, 张淑洁, 羌培华, 等. 贴式面膜基布的研究进展及发展趋势[J]. 国际纺织导报, 2021, 49(5): 17-25.
- [2] 沈慧敏. 面膜基布性能指标及评价方法研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- [3] 王蕾, 吴旭君, 陈仕艳, 等. 原位添加静态发酵制备透明质酸-细菌纤维素生物面膜[J]. 材料导报, 2015, 29(12): 43-47.
- [4] 钟春燕. 细菌纤维素凝胶面膜: 200610075040.8[P]. 2006-12-06.

- [5] 唐静. 细菌纤维素的制备、修饰及在面膜中的应用[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019.
- [6] Paola P, Mariella B, Renato R, et al. In vivo evaluation of the effectiveness of biocellulose facial masks as active delivery systems to skin[J]. *Journal of cosmetic dermatology*, 2020, 19(3): 725-735.
- [7] Anelise C V L, Tayane R B, Debora O D, et al. Application of non-thermal plasma as an alternative for purification of bacterial cellulose membranes[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2022, 29: 100800.
- [8] Dibyajit L, Moupriya N, Bandita D, et al. Bacterial Cellulose: Production, Characterization, and Application as Antimicrobial Agent[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(23): 12984-12984.
- [9] GB/T 9073-1-1989 纺织品非织造布试验方法[S].
- [10] 吴旭君. 生物纤维素面膜的制备及其功能化产品开发[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [11] GB/T 13022-1991 塑料薄膜拉伸性能试验方法[S].
- [12] GB/T 24218.6-2010 纺织品非织造布试验方法[S].
- [13] YY/T 0471.2-2004 接触性创面敷料试验方法[S].
- [14] GB/T 1038-2000 塑料薄膜和薄片气体透过性试验方法[S].
- [15] 刘亚, 武辉, 翟艳. 壳聚糖/粘胶纤维共混水刺面膜基布的开发及其性能[J]. *天津工业大学学报*, 2017, 36(5): 32-37.
- [16] 李祖安. 新型竹莱赛尔纤维在水刺面膜产品上的应用[J]. *纺织导报*, 2017, 2017(12): 76-78.
- [17] 旭化成. “Bemliese”作为面膜材料受青睐[J]. *纺织服装周刊*, 2017(15): 53-58.
- [18] 贾红军, 王琼, 张佳涛, 等. 基于细菌纤维素纳米纤维构建的高吸水性凝胶的研究[J]. *纤维素科学与技术*, 2022, 30(4): 16-23.
- [19] Mbituyimana B, Liu Li, Ye Weiliang, et al. Bacterial cellulose-based composites for biomedical and cosmetic applications: research progress and existing products[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 2731: 18565.
- [20] 冯劲, 施庆珊, 冯静, 等. 不同干燥方式对细菌纤维素物理性能的影响[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(9): 2225-2229.