

郑梅霞, 肖荣凤, 陈梅春, 等. 不同干燥方式对细菌纤维素复水性能的影响 [J]. 福建农业学报, 2021, 36 (12): 1499–1505.

ZHENG M X, XIAO R F, CHEN M C, et al. Effect of Drying Methods on Rehydration of Bacterial Cellulose [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (12): 1499–1505.

不同干燥方式对细菌纤维素复水性能的影响

郑梅霞, 肖荣凤, 陈梅春, 陈燕萍, 朱育菁*

(福建省农业科学院农业生物资源研究所, 福建 福州 350003)

摘要:【目的】探究干燥方式对细菌纤维素 (Bacterial cellulose, BC) 复水性能的影响。【方法】采用热风干燥、微波真空干燥和真空冷冻干燥 3 种干燥方式干燥 BC, 比较不同干燥方式对 BC 的溶胀率和复水量的影响, 并对 BC 微观结构进行表征。【结果】不同干燥方式会影响 BC 结构, 引起复水性能变化。与未干燥的 BC 相比, 冷冻干燥的 BC 复水率达 44.79%, 复水性能较其他干燥方式好; 热风干燥的 BC 的复水性能次之; 微波真空干燥的 BC 的复水性能最差。电子扫描电镜结果分析表明, 冷冻干燥的 BC 纤维丝排列疏松, 较好地保持了 BC 的表面结构, 热风干燥和微波真空干燥的 BC 纤维排列致密。从复水性能来看, 冷冻干燥方法优于 2 种干燥方法, 且在 -80 ℃ 冷冻后进行冷冻干燥的细菌纤维素的复水性能最好。动力学分析表明, 细菌纤维素复水过程遵循 Fickian 扩散定律, BC 的网络结构保持的越完整, 材料的扩散系数越高, 对应的复水性能也越好。【结论】冷冻干燥的复水性能最好。

关键词: 细菌纤维素; 热风干燥; 微波真空干燥; 真空冷冻干燥; 复水

中图分类号: TS 201.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2021) 12-1499-07

Effect of Drying Methods on Rehydration of Bacterial Cellulose

ZHENG Meixia, XIAO Rongfeng, CHEN Meichun, CHEN Yanping, ZHU Yujing*

(Institute of Agricultural Bio-resources Research, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: 【Objective】Effects of drying methods on rehydration property of bacterial cellulose (BC) were investigated.

【Method】BC samples dried by means of hot air, microwave under vacuum, and freeze-drying were compared on the swelling and reconstitution rates upon rehydration. A scanning electron microscope (SEM) was used to observe and characterize the BC microstructure. 【Result】The varied dehydration processes affected the microstructure and rehydration of the dried BC. Among the untreated control and treated samples, the freeze-dried BC displayed the highest rehydration rate of 44.79%. It was followed by the hot air and the microwave-vacuum dried specimens. The SEM images showed the freeze-drying rendered BC with a loose but well-defined fibrous network, while the other two methods produced a tight structure with clusters. Insofar as hygroscopic property is concerned, freeze-drying BC at -80 ℃ was superior to all other methods. The dynamics of the water adsorption and swelling of BC followed the Fickian diffusion law. A better maintained 3D structure would have greater diffusion coefficient, and therefore, more efficient water absorption for the dried BC when water was added. 【Conclusion】The freeze-dried BC could be rehydrated most desirably among all tested samples. The processing technology was recommended for the dehydration.

Key words: Bacterial cellulose; hot air drying; microwave-vacuum drying; freeze drying; rehydration

0 引言

【研究意义】细菌纤维素 (Bacterial cellulose, BC) 是一种具有三维网络结构的新型生物材料, 以其良好的生物相容性、生物可降解性、生物适应性

以及高持水性、高结晶度、高弹性模量和高拉伸强度等独特的理化性能 (尤其是优异的持水性能和吸水性能) 广泛应用于食品、医药和工业等领域^[1-3]。

【前人研究进展】产细菌纤维素的细菌常见的有醋酸菌属^[4-5]、根瘤菌属^[6]和土壤杆菌属^[7]等。其中,

收稿日期: 2021-04-21 初稿; 2021-08-09 修改稿

作者简介: 郑梅霞 (1986-), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 农业生物资源保护与利用 (E-mail: zhengmeixia2005@163.com)

* 通信作者: 朱育菁 (1972-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农业生物资源保护与利用 (E-mail: zyjingfz@163.com)

基金项目: 福建省科技计划公益类专项 (2019R1034-7)

木葡糖酸醋杆菌因其较高的 BC 产量而被广泛应用于研究生产, 并作为模式菌株^[8]。目前的干燥方法有很多, 其中, 热风干燥方式具有操作简便、设备成熟、不受气候条件影响、成本低、适合大规模批量生产的优点^[9]。真空冷冻干燥方式是目前较好的食品加工干燥方式之一, 能最大限度地保留农产品营养成分及可有效保持农产品的色香味形, 几乎可以对所有的农产品进行加工^[10]。微波真空干燥方式综合了微波干燥方式和真空干燥方式的优点, 使物料在低温条件下均匀快速地干燥, 干燥速度快、品质高, 具有高效节能、加热均匀、易控、产品质量好、经济效益好等优点^[11]。不同培养方式、菌株、培养基和干燥方法等对细菌纤维素的网络结构影响较大, 结构差异必将引起其性能和应用开发的差异^[12-14]。冯劲等^[2]用葡糖醋杆菌属 *Gluconacetobacter intermedius* 所产的细菌纤维素比较了 60 ℃ 烘箱干燥、-20 ℃ 冷冻结实后冷冻干燥、液氮冷冻结实后冷冻干燥这 3 种干燥方式, 发现第 3 种的干燥方法获得的 BC 复水性能最好。罗仓学等^[14]研究表明木醋杆菌 *Acetobacter xylinum* 所产的细菌纤维素经过热风干燥、微波干燥、梯度升温冷冻干燥和真空冷冻升华干燥等 4 种干燥方式干燥后, 经梯度升温冷冻干燥的 BC 复水性能最好。高含水量的细菌纤维素为其储存、运输和使用带来极大的不便, 而经干燥后的细菌纤维素吸水性大幅下降, 有利于推广应用于食品行业^[14]。研究者们为了获得溶胀性能好的 BC, Lin 等^[15]通过添加明胶增大 BC 的溶胀性, Chen 等^[16]通过添加凝胶肽改善 BC 的溶胀性。【本研究切入点】不同的干燥方法会影响 BC 的结构, 改变 BC 的物理性质^[2], 引起复水性能差异^[14]。不同干燥方法应避免 BC 微纤维间氢键缔合作用以提高其复水性能^[17]。本研究将对本实验室获得的木葡糖酸醋杆菌 *Komagataeibacter xylinus* FM883 所产的细菌纤维素进行研究。【拟解决的关键问题】本文研究采用热风干燥、微波真空干燥和真空冷冻干燥等几种不同的干燥方式对菌株 FM883 所产的细菌纤维素进行干燥, 并测试分析不同干燥方式的细菌纤维素样品的吸水性能, 为后续对 BC 的产品研发提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

菌株 FM883 为木葡糖酸醋杆菌 *K. xylinus*, 由本实验室筛选, 保藏在中国典型培养物保藏中心, 保藏号为 CCTCC M 2019127, 基因登录号是 MW757206。葡萄糖为分析纯, 购自国药集团化学试剂有限公司; 硫酸镁、磷酸氢二钾和乙醇为分析纯, 购自西

陇科学股份有限公司; 酵母膏和琼脂购自北京奥博星生物技术有限责任公司。

固体培养基: 葡萄糖 2%, 酵母膏 0.5%, K_2HPO_4 0.1%, $MgSO_4$ 1.5%, 乙醇 2%, 琼脂 2%, pH 值自然。种子培养基和发酵培养基: 葡萄糖 2%, 酵母膏 0.5%, K_2HPO_4 0.1%, $MgSO_4$ 1.5%, 乙醇 2%, pH 值自然。

1.2 仪器设备

JSM-6380LV 扫描电子显微镜 (日本 JEOL 公司), Panasonic MDF-DU102VXL-PC 超低温保存箱 (日本松下健康医疗器械株式会社), STIK 低温生物培养箱 [施都凯仪器设备 (上海) 有限公司], 海尔冰箱 (型号为 BCD-532WDPT), VirTis 6KBTEL-85 冷冻干燥机 (美国 VirTis 公司), 电热恒温隔水式培养箱 GSKP-01BII (湖北省黄石市医疗器械厂), 自组装微波干燥机 (由福建省农业科学院农业工程技术研究所提供)。

1.3 试验方法

1.3.1 细菌纤维素的制备与纯化 取一环在固体培养基上活化好的 FM883 菌株接种入种子培养基中, $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 30 ℃ 振荡培养 12 h。再以 10% 的接种量接入 1000 mL 的发酵培养基中, 30 ℃ 静置培养 7 d。取出细菌纤维素, 用去离子水多次淋洗, 再用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液煮至呈乳白色半透明状, 去除残留的菌体和培养基。然后用去离子水反复淋洗后, 用 0.5% 醋酸中和使细菌纤维素 pH 值为 7.0。

1.3.2 细菌纤维素的干燥

(1) 热风干燥: 电热恒温鼓风干燥箱预热 70 ℃, 将 BC 放在箱内干燥, 每隔 30 min 取出 BC 称重, 直至恒重, 所得样品为 BC-DD70。

(2) 热风干燥: 电热恒温鼓风干燥箱预热 50 ℃, 将 BC 放在箱内干燥, 每隔 30 min 取出 BC 称重, 直至恒重, 所得样品为 BC-DD50。

(3) 微波真空干燥: 微波炉炉内温度设置为 40 ℃, 真空度为 -0.08 MPa, 微波功率 2 KW, 将 BC 置于微波炉中干燥, 每隔 15 min 取出 BC 称重, 直至恒重, 所得样品为 BC-MVD。

(4) 真空冷冻干燥: BC 先于 -20 ℃ 冻结后, 置于真空冷冻干燥机中, 温度 -85 ℃, 真空度 16 Pa, 干燥时间 48 h, 所得样品为 BC-FD20。

(5) 真空冷冻干燥: BC 先于 -80 ℃ 冻结后, 置于真空冷冻干燥机中, 温度 -85 ℃, 真空度 16 Pa, 干燥时间 48 h, 所得样品为 BC-FD80。

1.3.3 形态观察 观察不同干燥方法获得的细菌纤维素的外观形态; 通过电子扫描电镜 (SEM, JSM-6380LV, JEOL) 检测微观结构, 在 15.0 kV 的低真空下用二次电子操作, SEM 检查之前用 Au 涂覆样品。

1.3.4 细菌纤维素复水性能 将 1 g 不同方法干燥所得细菌纤维素置于去离子水中 37 ℃ 浸泡一定时间（1、2、4、6、8、26、28、32、48、50、51、53、55、103、144、150 和 156 h），用滤纸擦干表面水分后称重，记为细菌纤维素吸水后的湿重。根据公式（1）和（2）计算细菌纤维素的溶胀率 Q_t （%）和每克干细菌纤维素的复水量 M （g）。

$$Q_t = (M_e - M_0) / M_0 \times 100\% \tag{1}$$

$$M = M_e / M_0 \tag{2}$$

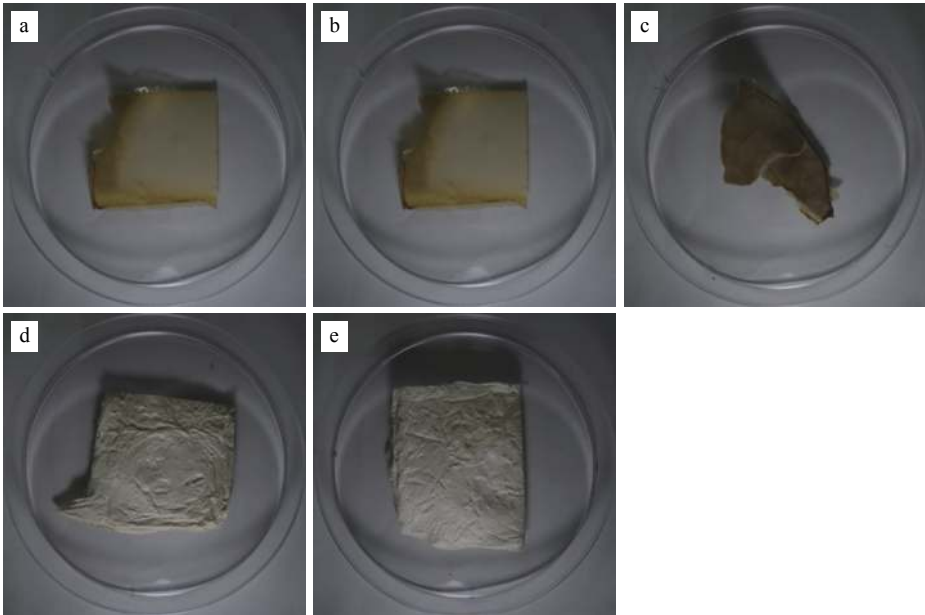
式中： M_e 是细菌纤维素吸水平衡时的质量（g）； M_0 是细菌纤维素干样品的质量（g）； Q_t 是细菌纤维

素在 t 时间的溶胀率（%）。

2 结果与分析

2.1 不同干燥方式细菌纤维素的外观形态和微观结构观察

不同干燥方式处理的细菌纤维素的外观差异很大，如图 1 所示。BC-DD70（图 1-a）和 BC-DD50（图 1-b）细菌纤维素干燥收缩成表面平滑的纸片状，具有一定的透光性。BC-MVD（图 1-c）细菌纤维素干燥后变为褐色纸片状。BC-FD20（图 1-d）和 BC-FD80（图 1-e）细菌纤维素干燥后呈白色海绵状，较为松软。



注：a：70 ℃ 热风干燥；b：50 ℃ 热风干燥；c：微波真空干燥；d：-20 ℃ 预冷真空冷冻干燥；e：-80 ℃ 预冷真空冷冻干燥。图 2 同。
Note: a: BC-DD70: BC dehydrated by 70 ℃ hot air drying; b: BC-DD50: BC dehydrated by 50 ℃ hot air drying; c: BC-MVD: BC dehydrated by microwave-vacuum drying; d: BC-FD20: BC dehydrated by -20 ℃ freeze-drying; e: BC-FD80: BC dehydrated by -80 ℃ freeze-drying. The same as Fig.2.

图 1 不同烘干方式烘干后的细菌纤维素的外观形态
Fig. 1 Appearances of dried BC samples

不同干燥方式处理的细菌纤维素表面的微观结构如图 2 所示，BC-DD70 和 BC-DD50 细菌纤维素的纤维排列较致密，形成大小各异的孔洞，而 BC-DD70 细菌纤维素的孔隙较 BC-DD50 的更少。BC-MVD 细菌纤维素的纤维排列最为致密，基本上没有孔洞，因为微波场使极性水分子产生热效应，水分子能够渗透到纤维素非晶区及晶区表面，造成纤维分子链间氢键的断裂，并与纤维素分子形成新的氢键，且微波可能会造成内部纤维素链的断裂^[11]。BC-FD20 和 BC-FD80 细菌纤维素形成层状的三维空间纤维网络结构，真空冷冻干燥是细菌纤维素在冻结状态下干燥，水分透过 BC 结构缝隙升华逸出，使干燥

后的 BC 仍能保持原有结构，但 BC-FD20 和 BC-FD80 在局部纤维结构上略有不同，BC-FD20 的纤维带宽度更宽。

2.2 不同干燥方式细菌纤维素的复水性能比较

BC-DD70、BC-DD50、BC-MVD、BC-FD20 和 BC-FD80 每克干细菌纤维素的吸水量分别为（18.12±0.18）、（33.74±0.24）、（8.05±0.15）、（42.63±0.13）和（43.79±0.19）g，而没有干燥的细菌纤维素含水量达（75.11±0.11）g。BC-FD80 每克吸水的量达到还没干燥的细菌纤维素的 58.30%。而 BC-DD70 和 BC-MVD 的吸水能力分别只达到 2.41% 和 10.72%。BC-DD70、BC-DD50、BC-MVD、BC-FD20

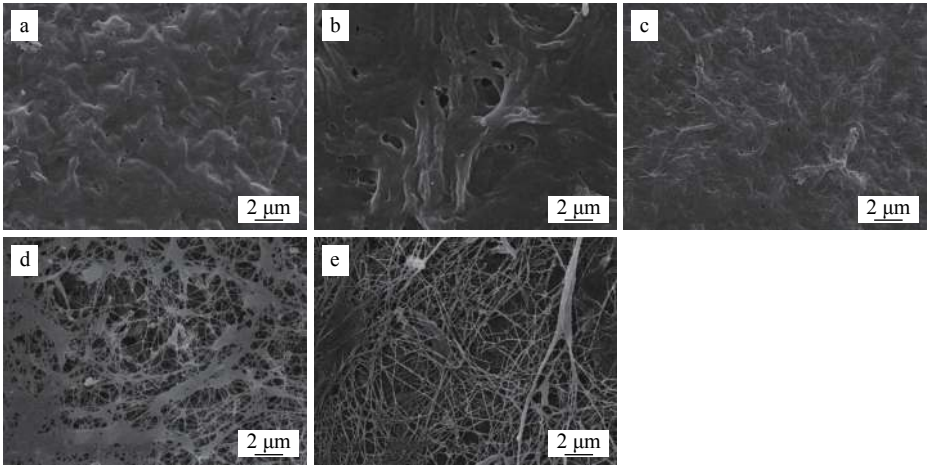


图 2 扫描电子显微镜下的细菌纤维素

Fig. 2 SEM micrographs of dried BC samples by various dehydration methods

和 BC-FD80 的复水量如表 1 所示, 复水量为 BC-FD80>BC-FD20>BC-DD50>BC-DD70>BC-MVD, 造成复水量差异的原因是不同干燥方式引起的细菌纤维素结构变化, 如图 2 所示。不同干燥方式细菌纤维素的复水量存在显著性差异, 说明各种干燥方式对细菌纤维素的结构影响很大。不同干燥方式获得细菌纤维素的溶胀率与复水量的变化趋势一样, 也存在显著性差异。

表 1 不同干燥方法的细菌纤维素的吸水性能
Table 1 Water absorption of dried BC samples

样品 Samples	每克干细菌纤维素的复水量 Rehydration mass of per gram of dry bacterial cellulose/g	溶胀率 Swelling ratio/%
对照 Contrast	75.11±0.11 a	7411.54±11.00 a
70℃热风干燥 BC-DD70	18.12±0.18 e	1711.93±18.07 e
50℃热风干燥 BC-DD50	33.74±0.24 d	3274.10±24.10 d
微波真空干燥 BC-MVD	8.05±0.15 f	704.49±15.23 f
-20℃预冷真空冷冻干燥 BC-FD20	42.63±0.13 c	4162.74±12.74 c
-80℃预冷真空冷冻干燥 BC-FD80	43.79±0.19 b	4279.34±19.34 b

注: 表中同列数据后不同小写字母表示差异达显著水平 ($P<0.05$)。
Note: The same column of data in the table followed by lowercase letters are significantly different ($P<0.05$).

BC-DD70、BC-DD50、BC-MVD、BC-FD20 和 BC-FD80 在时间 t 时的溶胀率 Q_t 如图 3 所示, 细菌纤维素溶胀到平衡的时间较长, 溶胀的速率快慢可分为 0~10 h、10~60 h 和 60~160 h 几个阶段。测试时, 采取溶胀速度快时加密测试点; 而当溶胀速率降低时, 则加大测试时间间隔, 以便增加次数间的质量

差; 临近溶胀平衡时, 加密测试几个点, 以质量基本稳定为测试终点。BC-FD20 和 BC-FD80 的溶胀速率最高且变化幅度较大, 在前 60 h 复水过程中急剧增加, 后趋于平缓, 说明经过冷冻干燥的细菌纤维素吸水膨胀能力较强, 复水较快。

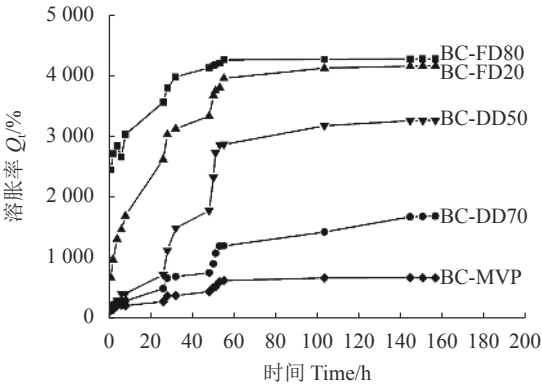


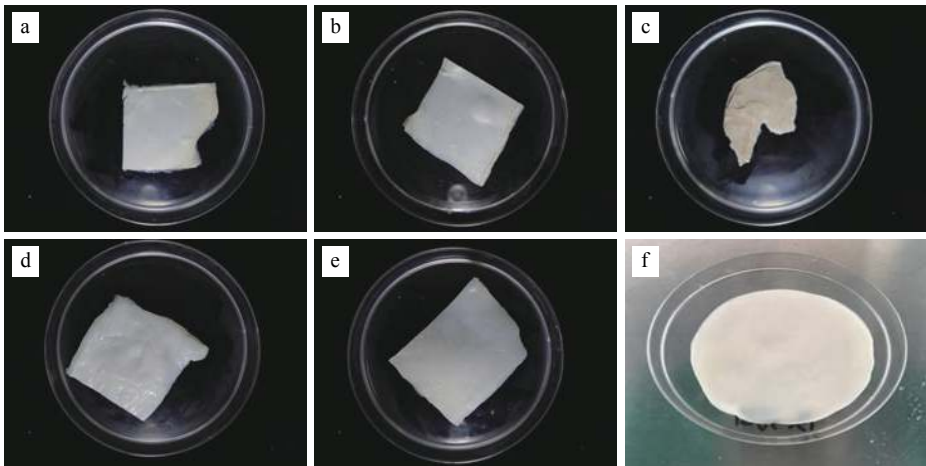
图 3 细菌纤维素的溶胀率

Fig. 3 Swelling rate of dried BC samples

未干燥 (对照) 和吸水后的细菌纤维素的外观形态如图 4 所示。BC-FD80 和 BC-FD20 吸水后能恢复一定厚度, 形态与对照差别不大。BC-DD70 和 BC-DD50 吸水后能恢复一点厚度, 而 BC-MVD 吸水后几乎不能恢复厚度。其中, BC-DD70、BC-DD50 和 BC-MVD 内部的纤维紧密排列, 空洞的空间较小, 容纳较少的水分子; BC-FD20 和 BC-FD80 内部纤维松散, 可容纳大量水分子, 也说明其内部纤维形成较少氢键, 水分子易进入纤维内部, 使 BC-FD20 和 BC-FD80 吸水后几乎恢复到没被干燥的细菌纤维素的状态, 与冯劲等^[2]的研究结果相一致。

2.3 不同干燥方式细菌纤维素的吸水速率和动力学分析

细菌纤维素的复水溶胀是一个极为复杂的过程, 其吸附动力学过程可以用公式 (3) 和 (4) 进行描述^[3]。



注：a：70 ℃ 热风干燥；b：50 ℃ 热风干燥；c：微波真空干燥；d：-20 ℃ 预冷真空冷冻干燥；e：-80 ℃ 预冷真空冷冻干燥；f：未干燥（对照）。
Note: a: BC-DD70: BC dehydrated by 70 ℃ hot air drying; b: BC-DD50: BC dehydrated by 50 ℃ hot air drying; c: BC-MVD: BC dehydrated by microwave-vacuum drying; d: BC-FD20: BC dehydrated by -20 ℃ freeze-drying; e: BC-FD80: BC dehydrated by -80 ℃ freeze-drying; f: untreated (CK).

图 4 细菌纤维素吸水后外观效果

Fig. 4 Morphology of rehydrated BC samples

$$(M_t - M_0)/(M_e - M_0) = Kt^n \tag{3}$$

$$\ln((M_t - M_0)/(M_e - M_0)) = \ln K + n \ln t \tag{4}$$

$$Q_t = 4(Dt/h^2)^{0.5} \tag{5}$$

$$D = \pi k^2 h^2 / 16 \tag{6}$$

式中， M_t 和 M_e 是 t 时和吸水平衡时细菌纤维的质量 (g)； M_0 是细菌纤维素干样品的质量 (g)； K 是网络结构参数， t 是吸水时间； n 是溶胀特征指数。 $n \leq 0.5$ ，水的扩散属于 Fickian 扩散； $0.5 < n < 1.0$ ，水的扩散属于 non-Fickian 扩散； $n \geq 1.0$ ，水的扩散属于大分子链松弛扩散。 D 是水在细菌纤维素中的扩

散系数； h 是样品的厚度。
不同干燥方式细菌纤维素的吸水溶胀过程的溶胀特征指数 n 如表 2 所示。 n 值 < 0.5 ，说明水在细菌纤维素中的扩散属于 Fickian 扩散^[3]，其扩散行为通过公式 (5) 进行考察， Q_t 与 $t^{0.5}$ 呈线性关系，如图 5 所示。拟合直线的斜率 k ，根据公式 (6) 计算出水在细菌纤维素中的扩散系数，如表 3 所示，扩散系数为 $BC-FD20 > BC-FD80 > BC-DD50 > BC-DD70 > BC-MVD$ ，与复水性能结果一致，冷冻干燥方法优于其他 2 种干燥方法。

表 2 不同干燥方式细菌纤维素的吸水溶胀过程的溶胀特征指数
Table 2 Rehydration indices of BC samples dried by different methods

不同干燥方式 Different drying species	70 ℃ 热风干燥 BC-DD70	50 ℃ 热风干燥 BC-DD50	微波真空干燥 BC-MVD	-20 ℃ 预冷真空冷冻干燥 BC-FD20	-80 ℃ 预冷真空冷冻干燥 BC-FD80
溶胀特征指数 n	0.4400	0.4942	0.3173	0.3610	0.1245

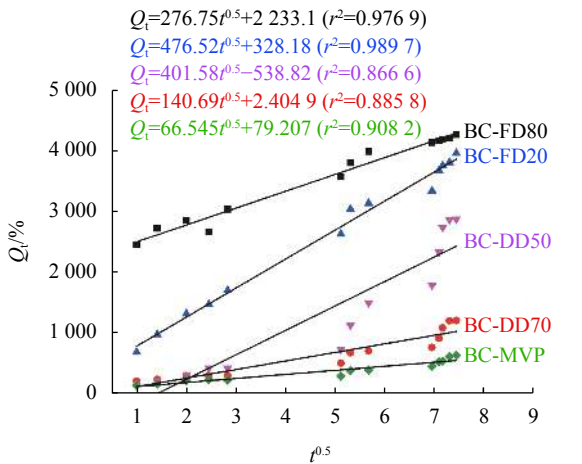


图 5 拟合的斜率

Fig. 5 Water absorption rate after fitting

3 讨论与结论

由细菌纤维素表面的微观结构分析可知，不同干燥方式使 BC 的三维网络结构产生差异，其中真空冷冻干燥的样品保持了原有的三维网络结构。真空冷冻干燥中冻结过程是影响细菌纤维素形态的关键因素^[18]。文中 -20 ℃ 与 -80 ℃ 的预冻结温度相比，冻结速度较慢，BC 表面形成大块的冰晶，体积增大挤压 BC 内部的纤维，使 BC 内部的纤维排列更紧密。预冷温度越低，可迅速将 BC 的水冻结成小冰晶，对内部结构影响小，这与冯劲等^[2]的研究结果相一致，所以 BC-FD80 能保持原来的结构，复水性能最好。热风干燥是 BC 直接与热空气接触，使 BC 内外

表 3 不同干燥方式细菌纤维素的吸水溶胀过程的扩散系数
Table 3 Diffusion coefficients of dried BC samples upon rehydration

不同干燥方式 Different drying species	70 ℃ 热风干燥 BC-DD70	50 ℃ 热风干燥 BC-DD50	微波真空干燥 BC-MVD	-20 ℃ 预冷真空冷冻干燥 BC-FD20	-80 ℃ 预冷真空冷冻干燥 BC-FD80
扩散系数 D ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	0.0512	0.2977	0.0013	1.5490	0.5749

产生湿分差，发生皱缩，纤维不断堆积层叠，占据原始水所占的空隙^[19]，所以使 BC 的三维结构发生变化。本研究获得 BC-MVD 样品的三维网络结构破坏最大，可能与影响微波真空干燥效果的物料大小、微波功率、真空度和微波工作模式等因素有关^[20]。李瑜等^[21]研究结果表明微波真空干燥可以缩短大蒜的干燥时间，但干燥后的大蒜的质构紧密，不如冷冻干燥的疏松，这与本研究的结果冷冻干燥的细菌纤维素的结构疏松相一致。

BC 的复水溶胀过程属于 Fickian 扩散，与微观结构的结果一致。Wan 等^[22]也证明了 BC 复水溶胀过程属于 Fickian 扩散。Hadi 等^[23]研究表明 BC 的脱水动力学的主要机理是 Fickian 扩散定律。Pavaloiu 等^[24]研究表明 BC-明胶的溶胀机制也属于 Fickian 扩散。BC 的网络结构影响 BC 的复水溶胀过程，BC 的网络结构保持越完整，材料的扩散系数越高，对应的复水性能越好^[3]。真空冷冻干燥获得的 BC 的网络结构保持的最完整，所以获得的 BC 的复水性能最好，为细菌纤维素的开发应用提供理论支持。在实际生产中，可选择 Fickian 扩散定律来预测并控制细菌纤维素干燥过程的水分变化规律，为细菌纤维素干燥过程的节能降耗、设备选型和品质提升提供理论支持。

参考文献：

[1] YANG Y, JIA J J, XING J R, et al. Isolation and characteristics analysis of a novel high bacterial cellulose producing strain *Gluconacetobacter intermedius* Cls26 [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 92 (2) : 2012–2017.

[2] 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, 2101.

FENG J, SHI Q S, FENG J, et al. Effects of different drying processes on physical properties of bacterial cellulose membranes [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29 (9) : 2225–2229, 2101. (in Chinese)

[3] 杨晨, 崔秋艳, 郑裕东, 等. 纳米细菌纤维素的不同脱水过程对结构性能的影响及再吸水动力学[J]. 高分子材料科学与工程, 2013, 29(10): 50-54.

YANG C, CUI Q Y, ZHENG Y D, et al. Effect of different dehydration methods on structure and property of nano bacterial cellulose and dynamics analysis of their water reabsorption[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2013, 29(10): 50-54.

(in Chinese)

[4] MIKKELSEN D, FLANAGAN B M, DYKES G A, et al. Influence of different carbon sources on bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus* strain ATCC 53524 [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, 107 (2) : 576–583.

[5] MACHADO R T A, GUTIERREZ J, TERCIAK A, et al. *Komagataeibacter rhaeticus* as an alternative bacteria for cellulose production [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 152: 841–849.

[6] LAUS M C, VAN BRUSSEL A A N, KIJNE J W. Role of cellulose fibrils and exopolysaccharides of *Rhizobium leguminosarum* in attachment to and infection of *Vicia sativa* root hairs [J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*®, 2005, 18 (6) : 533–538.

[7] MATTHYSSE A G, THOMAS D L, WHITE A R. Mechanism of cellulose synthesis in *Agrobacterium tumefaciens* [J]. *Journal of Bacteriology*, 1995, 177 (4) : 1076–1081.

[8] LIN D H, LIU Z, SHEN R, et al. Bacterial cellulose in food industry: Current research and future prospects [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 158: 1007–1019.

[9] 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 L L, SUN D P, WU Q H, et al. Influence of culture mode on bacterial cellulose production and its structure and property [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2007, 47 (5) : 914–917. (in Chinese)

[10] 张少端, 陈琳, 钟春燕, 等. 木葡糖酸醋杆菌菌株型对细菌纤维素产量与性能的影响 [J]. 生物过程, 2016, 6 (1) : 8–16.

ZHANG S R, CHEN L, ZHONG C Y, et al. Effects of different *Gluconacetobacter xylinus* strains on yield and properties of bacterial cellulose [J]. *Bioprocess*, 2016, 6 (1) : 8–16. (in Chinese)

[11] 罗仓学, 张尚薇, 丁勇. 干燥方法对细菌纤维素复水性能的影响[J]. 陕西科技大学学报, 2017, 35(6): 120-124, 139.

LUO C X, ZHANG K W, DING Y. Influence of drying methods on rehydration quality of bacterial cellulose[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2017, 35(6): 120-124, 139. (in Chinese)

[12] 陈建福, 汪少芸, 林梅西. 海鲜菇热风干燥特性及其动力学研究 [J]. 食品工业科技, 2020, 41 (3) : 69–73.

CHEN J F, WANG S Y, LIN M X. Hot air drying characteristics and kinetics of *Hypsizygus marmoreus* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41 (3) : 69–73. (in Chinese)

[13] 张增帅, 张宝善, 罗喻红, 等. 食品微波真空干燥研究进展 [J]. 食品工业科技, 2012, 33 (23) : 393–397.

ZHANG Z S, ZHANG B S, LUO Y H, et al. Research progress of microwave vacuum drying of food [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33 (23) : 393–397. (in Chinese)

- [14] 郭雷. 真空冷冻干燥技术在我国农产品加工中的应用 [J]. *现代农业科技*, 2020 (3): 219–220.
- GUO L. Application of vacuum freeze drying technology in agricultural products processing in China [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020 (3): 219–220. (in Chinese)
- [15] LIN S B, HSU C P, CHEN L C, et al. Adding enzymatically modified gelatin to enhance the rehydration abilities and mechanical properties of bacterial cellulose [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23 (8): 2195–2203.
- [16] CHEN H H, LIN S B, HSU C P, et al. Modifying bacterial cellulose with gelatin peptides for improved rehydration [J]. *Cellulose*, 2013, 20 (4): 1967–1977.
- [17] 丁勇, 邵明亮, 罗仓学, 等. 热风-冷冻复式干燥细菌纤维素工艺研究 [J]. *食品科技*, 2016, 41 (10): 228–233.
- DING Y, SHAO M L, LUO C X, et al. Drying processes of bacteria cellulose by combined with hot air and freezing [J]. *Food Science and Technology*, 2016, 41 (10): 228–233. (in Chinese)
- [18] 章斌, 丁心, 侯小桢, 等. 柠檬片的低温冻结与真空冷冻干燥工艺研究 [J]. *食品研究与开发*, 2015, 36 (22): 86–90.
- ZHANG B, DING X, HOU X Z, et al. Research on the processing technology of freezing and vacuum drying of lemon slices [J]. *Food Research and Development*, 2015, 36 (22): 86–90. (in Chinese)
- [19] GEORGE J, SAJEEVKUMAR V A, KUMAR R, et al. Enhancement of thermal stability associated with the chemical treatment of bacterial (*Gluconacetobacter xylinus*) cellulose [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, 108 (3): 1845–1851.
- [20] 赵莹婷, 王为为, 庄玮婧, 等. 莲子微波真空干燥特性及其微观结构的分形特征 [J]. *现代食品科技*, 2016, 32 (8): 213–218.
- ZHAO Y T, WANG W W, ZHUANG W J, et al. Microwave vacuum drying characteristics of *Lotus* seeds and the fractal characteristics of their microstructures [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32 (8): 213–218. (in Chinese)
- [21] 李瑜, 许时婴. 大蒜干燥工艺的研究 [J]. *食品与发酵工业*, 2004, 30 (6): 54–58.
- LI Y, XU S Y. Study on the technology of drying garlic [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2004, 30 (6): 54–58. (in Chinese)
- [22] WAN Y Z, LUO H L, HE F, et al. Mechanical, moisture absorption, and biodegradation behaviours of bacterial cellulose fibre-reinforced starch biocomposites [J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69 (7/8): 1212–1217.
- [23] HOSSEINI H, KOKABI M, MOUSAVI S M. Dynamic mechanical properties of bacterial cellulose nanofibres [J]. *Iranian Polymer Journal*, 2018, 27 (6): 433–443.
- [24] PAVALOIU R D, STOICA-GUZUN A, DOBRE T. Swelling studies of composite hydrogels based on bacterial cellulose and gelatin [J]. *U. P. B. Sci. Bull., Series B*, 2015, 77 (1): 53–62.

(责任编辑：吴宇琳)