双分子层液膜法制备纤维素水基泡沫及其稳定性的研究

张凯^a, 阴文博^a, 秦晨妮^a, 杨毓洁^a, 刘杨^{a,b}, 赵辉^{a,b}

(广西大学 a.轻工与食品工程学院 b.广西清洁化制浆造纸与污染控制重点实验室,南宁 530004)

摘要:目的 解决纤维素基泡沫制备过程烦琐、湿泡沫的稳定性差的问题。方法 通过单因素试验,考察 了十四醇(TDA)、阿拉伯胶(GAC)质量浓度对双膜气泡的稳定性的影响,在此基础上,采用泡沫成 形法制备纤维素水基湿泡沫,通过探究合适的十二烷基硫酸钠(SDS)质量浓度、蔗渣原纤浆质量浓度 和搅拌速率进一步提高纤维素水基湿泡沫的稳定性。结果 TDA 和 GAC 质量浓度分别为 0.015 g/mL 和 0.010 g/mL 时是制备双膜气泡的最佳条件。当 SDS 质量浓度为 0.015 g/mL、蔗渣原纤浆(BF)质量分 数为 1.8%、搅拌速率为 2 000 r/min 时,纤维素水基湿泡沫稳定性达到最佳。结论 构建了稳定的纤维素 水基泡沫,为纤维素基泡沫提供了一种简单、可行的方法。

关键词:纤维素水基湿泡沫;蔗渣原纤浆;双分子层液膜;泡沫成形法 中图分类号:TB484 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)07-0054-09 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.007

Cellulose-based Aqueous Foam by Bilayer Liquid Films and Its Stability

ZHANG Kai^a, YIN Wen-bo^a, QIN Chen-ni^a, YANG Yu-jie^a, LIU Yang^{a,b}, ZHAO Hui^{a,b}

(a. College of Light Industry and Food Engineering b. Guangxi Key Laboratory of Clean Pulp and Paper and Pollution Control, Guangxi University, Nanning 530004, China)

ABSTRACT: The works aims to solve the problem of complicated preparation process and poor stability of aqueous foam. By single factor test, the effects of concentrations of tetradecyl alcohol (TDA) and gum arabic (GAC) on the stability of double film bubbles were investigated. On this basis, cellulose-based aqueous foam was prepared by foam forming method. The stability of cellulose-based aqueous foam was further improved by exploring appropriate concentration of sodium dodecyl sulfate (SDS), concentration of bagasse fibrillated fiber and stirring rate. The result was that TDA and GAC concentrations of 0.015 g/mL and 0.010 g/mL were the best conditions for preparation of double film bubbles. When the SDS concentration was 0.015 g/mL, the bagasse fibrillated fiber (BF) concentration was 1.8 wt.%, and the stirring rate was 2 000 r/min, the cellulose-based aqueous foam achieved the best stability. The stable cellulose-based aqueous foam is constructed, which provides a simple and feasible method for cellulose-based foam.

KEY WORDS: cellulose-based aqueous foam; bagasse fibrillated fiber; bilayer liquid film; foam forming method

泡沫塑料制品造成的污染非常严重,需要一种新 型的可生物降解泡沫材料来替代传统泡沫塑料。目 前,国内外学者针对可降解泡沫材料进行了大量研 究,包括淀粉基可降解泡沫、纤维素基可降解泡沫

收稿日期: 2022-10-14

基金项目:国家自然科学基金(22068004);广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA159023)

作者简介:张凯(2002—),男,本科生,主攻纤维素基轻质多孔材料。

通信作者:刘杨(1979—),女,教授,硕导,主要研究方向为纤维素基功能型先进材料。

和聚酯型可降解泡沫等^[1-2],探究了其在生物医疗、 隔热材料、废水处理等领域的应用,具有巨大应用 前景^[3-7]。纤维素具有资源丰富、价格低廉、无毒无 害^[8-9]、可生物降解等优点^[10]。纤维素基泡沫是一种 前景广阔的可完全降解材料,但存在泡沫稳定性差的 问题,在干燥初期极不稳定,气泡较易破裂坍塌。目 前,国内外学者对纤维素基泡沫材料的水基湿泡沫稳 定性的研究较少。

泡沫是一个复杂的亚稳定体系,其衰败与液膜厚度、溶液黏度和气泡大小^[11-12]有关。国内外学者对此 有一定的研究,例如相关学者^[13]研究了表面活性剂与 黏土颗粒分散体系制备的泡沫的稳定性和流变性能, 证明溶液黏度的提高能增强泡沫的稳定性。同时,基 于泡沫的失稳机制^[14]得知构建双分子层液膜是用于 提高两相水基泡沫稳定性的有效途径,其作用机制主 要是通过增加液膜黏弹性和强度,降低泡沫的液体排 水率和气体渗透率,从而成功地将气泡稳定地分散于 水溶液中^[15],解决了单层液膜因为排水容易变薄破裂 的问题,使泡沫寿命增加,稳定性增强。

纤维分散性是纤维素水基泡沫的稳定性的重要 影响因素之一。泡沫成形法则是将纤维分散在水基泡 沫^[16]中,其中泡沫充当纤维的载体^[17],能够有效防 止纤维之间的絮聚,使纤维分散的更均匀,具有快速 成型、操作简单等优点,是制备纤维素水基湿泡沫的 有效方法。为增强纤维素水基泡沫的稳定性,还应确 定适宜的发泡剂浓度、纤维浓度和搅拌速率^[14,18-20]。

基于此,本文深入探究构建双分子层膜的条件, 采用带有两亲基团的表面活性剂、泡沫稳定剂和助剂 来构造独特的双层液膜结构,使得泡沫的稳定性得到 显著增强。以十二烷基硫酸钠(Sodium Dodecyl Sulfate, SDS)为发泡剂、十四醇(Tetradecyl Alcohol, TDA)为助剂、阿拉伯胶(Gum Arabic, GAC)为稳 定剂,通过构建双分子层液膜将气泡均匀且稳定地分 布于水溶液中,获得制备双层液膜的最佳条件。在此 基础上,以蔗渣原纤浆(Bagasse Fibrillated Fiber, BF) 为原料采用泡沫成形法制备纤维素水基湿泡沫,探究 SDS质量浓度、BF质量分数和搅拌速率对泡沫稳定 性的影响,并通过响应曲面法进行工艺优化,确定制 备稳定的纤维素水基湿泡沫的最佳工艺条件。

1 试验

1.1 材料与仪器

主要原料:漂白蔗渣浆板取自广西贵糖集团,通 过人工将浆板撕碎,并用水浸泡过夜,平衡水分后转 移至疏解器中分散成纤维状,不得留有浆块,然后经 过机械盘磨机机械研磨 5~6次得到蔗渣原纤浆,统 称为 BF,并置于4℃冰箱备用。

主要化学试剂: SDS, 分析纯, 上海阿拉丁生化

科技股份有限公司;十四醇,分析纯,上海阿拉丁生 化科技股份有限公司;阿拉伯胶,分析纯,天津市大 茂化学试剂厂。

主要仪器: DM1000 LED 光学显微镜,德国徕卡 仪器有限公司; Ultra-Turrax 高速分散机,德国艾卡 公司; DF-101S 恒温水浴锅,邦赛仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 双分子层液膜的构建

双分子层液膜的结构如图 1 所示,针对 TDA 和 GAC 2 个主要影响因素进行单因素试验,试验方案 如表 1 所示。具体操作如下:将 SDS (质量浓度为 0.020 g/mL)、GAC (质量浓度为 0.020 g/mL)和 TDA (质量浓度为 0.020 g/mL)的混合溶液在 60 ℃条件 下水浴加热 5 min,待溶液由浑浊变为澄清浅蓝色溶 液时取出,待溶液冷却至室温时以 2 000 r/min 高速 机械搅拌发泡 15 min。空白样和对照组均按同样的方 法制备得到。



图 1 双分子层液膜结构 Fig.1 Structure of bilayer liquid films

表 1 试验方案 Tab.1 Test scheme

试验方案	SDS 质量浓 度/(g·mL ⁻¹)	TDA 质量浓 度/(g·mL ⁻¹)	GAC 质量浓 度/(g·mL ⁻¹)
空白样	0.020	0	0
GAC 单 因素试验	0.020	0.020	0.010
	0.020	0.020	0.015
	0.020	0.020	0.020
TDA 单 因素试验	0.020	0.010	0.010
	0.020	0.015	0.010
	0.020	0.020	0.010

1.2.2 纤维素水基湿泡沫的制备

双分子层液膜的制备如图 2 所示,通过构建双分子层液膜将气泡均匀且稳定地分布于水溶液中,然后

加入 BF 制备纤维素水基湿泡沫,采用 Box-Behnken Design 响应曲面设计方法进行三因素三水平试验,考察 SDS 质量浓度、BF 质量浓度、搅拌速率 3 个变化 因素对纤维素水基湿泡沫的空气含量和排水率的影响,并利用 Design Expert 10 响应面设计软件对其工 艺条件进行优化,得到制备纤维素水基湿泡沫的最佳 工艺条件,试验因素水平和编码设计为(-1,0,1), SDS 质量浓度分别为 0.010、0.015、0.020 g/mL, BF 浆质量分数分别为 1.0%、1.5%、2.0%,搅拌速率分 别为 1 000、1 500、2 000 r/min。



图 2 双分子层液膜制备流程 Fig.2 Flow chart for preparation of bilayer liquid films

1.3 纤维素水基湿泡沫的表征

1.3.1 泡沫的微观形貌

使用光学显微镜观察纤维素水基湿泡沫的微观 形貌,泡沫制备完成后采用一次性滴管取少量泡沫滴 落于载玻片上并覆上盖玻片。使用显微镜观察并结合 Image J.统计气泡尺寸大小,分析时保证每张图片中 的气泡数目在 100 以上(其中空白样由于单张气泡数 目较少且为多面体形状,均采用多张图片进行统计, 测量方法为顶点到对边的直线距离)。

1.3.2 泡沫的稳定性

泡沫的空气含量和排水率均在发泡结束后由式 (1)和(2)计算^[21],其中短期排液率指泡沫在发泡 后静置2h之内的排出液体体积占发泡后初始体积的 百分比,长期排液率指泡沫在发泡后静置1周内的排 液体积占发泡后初始体积的百分比。将制得的泡沫置 入100 mL 具塞量筒中静置,观察不同时间段泡沫的 排水情况。

$$\varphi = \frac{v_1 - v_0}{v_1} \times 100\% \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{v}{v_1} \times 100\% \tag{2}$$

式中: φ 为空气含量; ε 为排水率; v_1 为泡沫体积; v_0 为浆料体积;v为排液体积。

针对 GAC 浓度和 TDA 浓度对气泡的稳定性进行了探究,分别从泡沫的空气含量(搅拌 15 min 内)、 泡沫的短期稳定性(发泡后静置 2 h)和长期稳定性 (发泡后 1 周之内)、气泡的形貌尺寸 3 个方面进行 考察。

2 结果与分析

2.1 泡沫的表观形貌及尺寸分析

图 3 和图 4 中 S 表示只加入 0.020 g/mL 的 SDS。 图 3a—d 和图 4a—d 中,S+T+G 表示固定 SDS 和 TDA 质量浓度分别为 0.020 g/mL 和 0.020 g/mL,改变 GAC 质量浓度分别为 0.010、0.015 和 0.020 g/mL;图 3e—h 和图 4e—h 中,S+G+T 表示固定 SDS 和 GAC 质量浓 度分别为 0.020 g/mL 和 0.010 g/mL,改变 TDA 质量 浓度分别为 0.010、0.015 和 0.020 g/mL。图 5 和图 6 的图例均表达相同的意思。





泡沫的形貌如图 3 中 S 列所示,当只加入表面活 性剂时,气泡在高倍率下呈现多面体单层液膜结构, 为典型"干泡沫"的形貌特征。当加入 TDA 和 GAC 后, 此时气泡在高倍率下呈现出清晰的双层液膜结构。由 图 3e—h 可知,随着 TDA 质量浓度的增加,气泡形 貌变化明显,逐渐呈现圆球形,相邻气泡之间表现为 点接触。

通过比较图 4 中单膜气泡和双膜气泡的尺寸分 布,发现在单膜气泡中气泡直径出现多峰,且平均直 径高达 761.52 μm,而双膜气泡直径均呈单峰分布, 且平均直径缩小 1/3,表明双层液膜的形成会减小气 泡的分散性,增加气泡在水中的稳定性。通过比较图 4 中不同 GAC 质量浓度(0、0.010、0.015、0.020 g/mL) 下的气泡尺寸差异可知,当GAC质量浓度为0.010 g/mL 时,气泡最小平均直径为211.82 μm,分散程度最低。 综合比较图 4a—d 可知,随着GAC质量浓度的增加, 气泡尺寸变大,在GAC质量浓度分别为0.015 g/mL 和 0.020 g/mL条件下,其平均直径分别为242.07 μm 和 231.37 μm。通过比较图 4 中不同 TDA质量浓度(0、 0.010、0.015、0.020 g/mL)下的气泡尺寸分布,当TDA 质量浓度为0.015 g/mL时,气泡尺寸达到最小平均直 径113 μm;当TDA质量浓度分别为0.010 g/mL和 0.020 g/mL时,平均直径分别为180 μm和147 μm。 结果表明,TDA质量浓度的变化对气泡的形态产生 显著的影响,由原本的多面体形态向圆球形态转 变,并且当TDA质量浓度为0.015 g/mL时,气泡 直径达到最小。



图 4 气泡尺寸分布 Fig.4 Distribution of bubble size

综上可得,当 GAC 质量浓度为 0.010 g/mL、TDA 质量浓度为 0.015 g/mL 时, 气泡能够稳定且均匀地分 布于水溶液中,这是制备双层液膜的最佳条件。

2.2 泡沫的空气含量、短期稳定性和长期稳 定性

由式(1)和式(2)分别计算泡沫的空气含量和 排水率并绘制表 2 和图 4。其中, S 表示只加入 SDS。 组别1中S+G+T表示分别固定SDS和TDA质量浓 度,改变 GAC 质量浓度;组别 2 中 S+G+T 表示固定 SDS 和 GAC 质量浓度,改变 TDA 质量浓度。

表 2 不同质量浓度 GAC 和 TDA 对空气含量的影响 Tab.2 Effects of different concentrations of GAC and TDA on air content

(41 11 1	GAC 质量浓	空气	4日 町 う	TDA 浓度质量	/ 空气
组加I	度/(g·mL ⁻¹)	含量/%	组加 2	$(g \cdot mL^{-1})$	含量/%
S	0.020	90	S	0.020	90
S+G+T	0.010	86.05	S+T+G	0.010	86.05
S+G+T	0.015	85.88	S+T+G	0.015	85.88
S+G+T	0.020	84.62	S+T+G	0.020	84.62

表 2 表明, 当只加入表面活性剂时, 泡沫的空气 含量最大达到了 90%,此时被称为"干泡沫"。TDA 和 GAC 的加入后,泡沫的空气含量由于双层液膜的 形成均降低至 85%左右, GAC 和 TDA 质量浓度的变 化对双膜气泡的空气含量影响不大。

GAC 试验见图 5a—c。由图 5a 可知,泡沫均在 前 200 s 内呈现线性增长之后达到平衡, 单膜气泡由

于空气含量过高导致液膜较薄容易破裂,液膜保水能 力较差,因此气泡会迅速发生失稳现象。如图 5b 所 示,只含有 SDS 的泡沫的排水量在前 20 min 内急剧 增加,并在24h后,泡沫完全消失。如图5c所示, 加入 TDA 和 GAC 后,泡沫在前 20 min 内排水速率 大大降低, 表明双分子层液膜的形成明显增强了泡 沫的稳定性。通过对比图 5b 中在不同 GAC 质量浓 度下双膜泡沫的短期排水率,发现 GAC 浓度的变化 对泡沫的短期稳定性具有明显的影响。当 GAC 质量 浓度为 0.010 g/mL 时,泡沫不仅排液速度最慢,且 排水率达到最低。由图 5c 所示,当 GAC 质量浓度 为 0.010 g/mL 时,泡沫在 1 周内的排水率达到最小。 GAC 质量浓度对双膜泡沫的稳定性影响显著,无论 从短期稳定性(图 5b)还是长期稳定性(图 5c)来 看,在GAC质量浓度为0.010g/mL时泡沫排水率达 到最小,泡沫最为稳定。

TDA 试验见图 5d—f。泡沫体积如图 5d 所示, 先呈直线式增长后趋于平衡,并且双膜气泡的空气含 量均保持在 85%左右,与 GAC 试验结果相似,TDA 质量浓度的变化对双膜气泡的空气含量影响不大。从 图 5e 中的泡沫短期稳定性来看,当 TDA 质量浓度分别 为 0.010、0.015 和 0.020 g/mL 时,相较于单膜气泡, 双膜气泡排液速率大大降低,但三者之间差异并不显 著。 从图 5f 中的泡沫长期稳定性来看,当 TDA 质量浓 度分别为 0.010 g/mL 和 0.015 g/mL 时, 泡沫最为稳定, 排液最少。结果表明, TDA 质量浓度的变化对泡沫的 稳定性影响不是十分显著,其中 TDA 质量浓度为 0.010 g/mL 和 0.015 g/mL 时,泡沫稳定性最好。

96 120 144 168



Fig.5 Stability of bilayer liquid films

• 59 •

2.3 泡沫成形法工艺条件优化

通过构建双分子层液膜将气泡均匀且稳定地分 布于水溶液中,然后加入 BF 制备纤维素水基湿泡沫。 由 2.1 节和 2.2 节中单因素试验发现泡沫的快速排水 主要发生在前 20 min 内。为了探究各个因素对纤维 素水基湿泡沫稳定性的影响,确定制备纤维素水基湿 泡沫的最佳工艺条件,故采用响应面中心组合试验以 SDS 质量浓度、BF 质量分数和搅拌速率为影响因素, 泡沫的空气含量、排水率(20 min 内)为响应值对试 验工艺条件进行优化。共设计 17 组试验,试验点分 为 2 类,分别是 12 个分析因点和 5 个零点,进行中 心组合试验设计。

2.3.1 各影响因素对纤维素水基湿泡沫空气含量的 影响

通过对上述试验数据进行多元方程拟合,得到 了空气含量关于 SDS 质量浓度、BF 质量分数和搅 拌速率的二次多项回归方程。并由回归模型方差结 果(表3)可得出,以BF 质量分数影响为主,搅拌 速率次之,SDS 质量浓度影响程度最小,并且可以 得出 BF 质量分数与搅拌速率之间的交互作用极其 显著。

此外,等高线的形状可以直接反映交互效应强 弱,其中圆形表示两因素交互作用不显著,椭圆形 则表示两因素交互作用显著,从而判断 2 个因素之间是否存在交互作用。在三维响应面图中,曲面的倾斜程度越高、坡度越陡,说明因素之间的交互作用越强^[22]。

从图 6 可以看出,对空气含量而言,三者之间 的交互作用不明显。当 SDS 质量浓度或者搅拌速率 不变时,空气含量随着 BF 质量分数的增加而减小; 当 SDS 质量浓度或者 BF 质量分数不变时,空气含 量随搅拌速率的增加而增加;当搅拌速率不变时, 空气含量随着 SDS 质量浓度呈现先减小后增大的趋 势;当 BF 质量分数不变时,在空气含量大于 70% 的范围内随着 SDS 质量浓度呈现逐渐增大的趋势; 在空气含量小于 50%时,随着 SDS 质量浓度呈现先 减小后趋于平衡的趋势。采用回归方程对纤维泡沫 空气含量和排水率进行分析,当 SDS 质量浓度为 0.015 g/mL、BF 质量分数为 1.799%(为了方便计算 本文中选取 1.8%)、搅拌速率为 2 000 r/min 时,泡 沫达到最佳状态,空气含量和排水率理论值分别为 55%和 3.173%。

2.3.2 重复验证试验

为了验证试验结果的可靠性,对该条件下进行3次重复验证试验,如图7所示,经验证在此条件下实际空气含量平均值为56%,排水率平均值为3.5%,与计算的理论值相差不大。

	Table variance analysis of regression moder								
方差来源	自由度	偏差平方和	均方和	F 值	P 值	显著度			
模型	9	2 363.400	262.600	55.450	< 0.000 1	**			
X_1	1	0.004	0.004	0.001	0.977 5				
X_2	1	2 051.200	2 051.200	433.120	< 0.000 1	**			
X_3	1	279.660	279.660	59.050	0.000 1	**			
X_1X_2	1	10.240	10.240	2.160	0.184 9				
X_1X_3	1	1.170	1.170	0.250	0.634 9				
$X_{2}X_{3}$	1	17.390	17.390	3.670	0.096 9				
X_{1}^{2}	1	1.740	1.740	0.370	0.564 1				
X_{2}^{2}	1	1.240	1.240	0.260	0.625 0				
X_{3}^{2}	1	0.830	0.830	0.170	0.688 7				
残差	7	33.150	4.740						
失拟项	3	22.050	7.350	2 (50	0.185 0				
纯误差	4	11.100	2.770	2.650					
总误差	16	2 396.550							

表 3 回归模型方差分析 Tab 3 Variance analysis of regression model

注: *P<0.05 表示显著; **P <0.01 表示极其显著。





图 6 不同因素交互作用对泡沫空气含量影响的等高线和三维响应面图 Fig.6 Contour and three-dimensional response surface diagram for interaction of different factors on air content of foam



图 7 重复验证试验结果 Fig.7 Result of repeated verification test

3 结语

双分子层液膜的形成显著增强了气泡在水溶液中的稳定性, 气泡的分散性减小并且由最初的多面体形态变为圆球形。通过对泡沫的空气含量、排液率、形貌观测和尺寸分析表明, 当 TDA 和 GAC 质量浓度分别为 0.015 g/mL 和 0.010 g/mL 时, 气泡能够稳定且均匀地分布于水溶液中, 排液率达到最低, 平均直径达到最小为 113.62 µm, 为制备双分子层液膜的最佳条件。同时, 根据响应面优化结果并加以验证表明, 当 SDS 质量浓度为 0.015 g/mL, BF 质量分数为 1.8%, 搅拌速率为 2 000 r/min 时, 纤维素水基湿泡沫综合性能最好, 空气含量平均值为 56%, 处于最佳范围内, 排水率达到最小, 平均值为 3.5%, 故该条件为制备纤维素水基湿泡沫的最佳条件。

参考文献:

- 刘强. 纳米纤维素基泡沫材料孔结构调控技术的研究
 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2017: 1-2.
 LIU Qiang. Study on Pore Structure Control Technology of Nano-Cellulose-Based Foam Materials[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2017: 1-2.
- [2] 林振. 水玻璃凝胶复合植物纤维发泡材料力学性能的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 1-2.
 LIN Zhen. Study on Mechanical Properties of Plant Fiber Foamed Material composite with Sodium Silicate Gel[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013: 1-2.
- [3] CAI Hong-li, SHARMA S, LIU Wen-ying, et al. Aerogel Microspheres from Natural Cellulose Nanofibrils and Their Application as Cell Culture Scaffold[J]. Bioma-

cromolecules, 2014, 15(7): 2540-2547.

- [4] ZHANG Chun-mei, ZHAI Tian-liang, TURNG L S. Aerogel Microspheres Based on Cellulose Nanofibrils as Potential Cell Culture Scaffolds[J]. Cellulose, 2017, 24(7): 2791-2799.
- [5] YILDIRIM N, SHALER S M, GARDNER D J, et al. Cellulose Nanofibril (CNF) Reinforced Starch Insulating Foams[J]. Cellulose, 2014, 21(6): 4337-4347.
- [6] ZHANG X X, LIU R, WANG L, et al. Study on the Construction and Properties of Bacterial Cellulose-Based Cathode for Flexible Zn-Ion Batteries[J]. Acta Chimica Sinica, 2021, 79(5): 671-678.
- [7] YANG Xuan, CRANSTON E D. Chemically Cross-Linked Cellulose Nanocrystal Aerogels with Shape Recovery and Superabsorbent Properties[J]. Chemistry of Materials, 2014, 26(20): 6016-6025.
- [8] TEIXEIRA R S S, SILVA A S A, JANG J H, et al. Combining Biomass Wet Disk Milling and Endoglucanase/β-Glucosidase Hydrolysis for the Production of Cellulose Nanocrystals[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 128: 75-81.
- [9] 陆永璋. 废棉花生产甲基纤维素[J]. 化工之友, 1995, 2(35): 53.
 LU Yong-zhang. Production of Methyl Cellulose From Waste Cotton[J]. Friends of Chemical Industry, 1995, 2(35): 53.
- [10] RAMESHA M, PALANIKUMARB K, HEMACHANDRA REDDYC K. Plant Fibre Based Bio-Composites: Sustainable and Renewable Green Materials[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 558.
- [11] XIANG Wen-chao, PREISIG N, KETOLA A, et al. How Cellulose Nanofibrils Affect Bulk, Surface, and Foam Properties of Anionic Surfactant Solutions[J]. Bioma-

cromolecules, 2019, 20(12): 4361-4369.

- [12] CHEN Xing, CHEN Yan, ZOU Li-qiang, et al. Plant-Based Nanoparticles Prepared from Proteins and Phospholipids Consisting of a Core-Multilayer-Shell Structure: Fabrication, Stability, and Foamability[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(23): 6574-6584.
- [13] CHEN Shu-yan, LIU Hong-juan, YANG Jing-jing, et al. Bulk Foam Stability and Rheological Behavior of Aqueous Foams Prepared by Clay Particles and Alpha Olefin Sulfonate[J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 291: 1-10.
- [14] KOPONEN A I, TIMOFEEV O, JASBERG A, et al. Drainage of High-Consistency Fiber-Laden Aqueous Foams[J]. Cellulose, 2020, 27(16): 9637-9652.
- [15] DU Xing, ZHAO Lei, XIAO He-lin, et al. Stability and Shear Thixotropy of Multilayered Film Foam[J]. Colloid and Polymer Science, 2014, 292(10): 2745-2751.
- [16] 赵俊, 徐卡秋, 叶静. 高稳定性水基泡沫液的研究[J]. 日用化学工业, 2008, 38(6): 363-365.
 ZHAO Jun, XU Ka-qiu, YE Jing. Study of High Stability Aqueous Base Foam[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2008, 38(6): 363-365.
- [17] XIANG Wen-chao, FILPPONEN I, SAHARINEN E, et al. Foam Processing of Fibers As a Sustainable Alternative to Wet-Laying: Fiber Web Properties and Cause-Effect Relations[J]. Acs Sustainable Chemistry & Engi-

neering, 2018, 6(11): 14423-14431.

- [18] AL-QARARAH A M, HJELT T, KOPONEN A, et al. Bubble size and air content of wet fibre foams in axial mixing with macro-instabilities[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 2013, 436: 1130-1139.
- [19] LAPPALAINEN L, LEHMONEN J. Determinations of bubble Size Distribution of Foam-Fibre Mixture Using Circular Hough Transform[J]. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 2012, 27(5): 930-939.
- [20] 李昊. 纳米纤维素强化泡沫体系构建及流动行为研究
 [D]. 成都:西南石油大学, 2018: 15-19.
 LI Hao Study on the Construction and Flow Behavior of Nano Cellulose Reinforced Foam System[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018: 15-19.
- [21] 刘杨. 蔗渣纤维素基多孔泡沫材料的制备及其微纤丝 增强机理的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017: 78.
 LIU Yang. Preparation of Bagasse Cellulose-Based Porous Foam and Enhanced by Microfibrillated Cellulose[D]. Nanning: Guangxi University, 2017: 78.
- [22] 宋亭,张丽媛,于润众.玉米秸秆纳米纤维素制备的 工艺优化[J].现代食品科技,2022,38(1):264-270.
 SONG Ting, ZHANG Li-yuan, YU Run-zhong. Optimization of Preparation Process of Corn Stalk Nanofibrillated Cellulose[J]. Modern Food Science & Technology, 2022, 38(1): 264-270.

责任编辑:曾钰婵