

# 不同打发状态蛋清泡沫及其凝胶特性的比较

李正雯<sup>1</sup>, 阮征<sup>1</sup>, 李汴生<sup>1\*</sup>, 李丹丹<sup>1</sup>, 黎来凤<sup>2</sup>, 吴文静<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 东东蛋业(广东)有限公司, 广东茂名 525347)

**摘要:** 蛋清具有良好的起泡性和凝胶性, 其在充气食品中具有难以取代的地位。为研究不同状态蛋清泡沫凝胶的理化性质, 该文在室温条件下以恒定搅拌速率(980 r/min)制备了不同打发状态(打发时间为0、50、70和90 s)的蛋清泡沫, 并测定了蛋清泡沫的理化特性。随后将不同打发时间的蛋清泡沫加热固化, 制备了蛋清泡沫凝胶, 通过显微观察、色度、质构和流变分析考察了蛋清泡沫凝胶的特性。实验结果表明, 在恒定的搅拌速率下蛋清泡沫的气泡状态会随打发时间的变化而变化。适当延长打发时间, 有利于形成比重较低的(0.16~0.17)、具有高起泡性和泡沫稳定性的固态泡沫。打发70 s的蛋清泡沫(蛋清泡沫呈小弯钩状, 比重为0.165)稳定性最佳, 且经加热固化后, 该蛋清泡沫凝胶的亮度( $L^*=90.28$ )显著升高, 硬度(27.69 g)和弹性(0.78 mm)显著降低( $P<0.05$ ), 凝胶性质优良。结果揭示了蛋清泡沫的流变学性能显著影响蛋清泡沫及其凝胶的性能, 为蛋清泡沫在充气食品中的应用提供了理论参考。

**关键词:** 蛋清泡沫; 泡沫凝胶; 结构; 性质

文章编号: 1673-9078(2024)03-219-228

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.3.0320

## Comparison of Egg White Foams in Different Whipping States and Their Gel Properties

LI Zhengwen<sup>1</sup>, RUAN Zheng<sup>1</sup>, LI Biansheng<sup>1\*</sup>, LI Dandan<sup>1</sup>, LI Laifeng<sup>2</sup>, WU Wenjing<sup>2</sup>

(1. College of Food Sciences and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. Dongdong Egg Industry (Guangdong) Co. Ltd., Maoming 525347, China)

**Abstract:** Egg white has good foaming and gelling properties, thus plays an irreplaceable role in aerated foods. In order to study the physico-chemical properties of egg white foam gels in different states, egg white foams in different whipping states (whipping time: 0, 50, 70 or 90 s) were prepared at room temperature and a constant stirring rate (980 r/min). The physico-chemical properties of the egg white foams were determined. Then, the egg white foams with different whipping times were heated for solidification to prepare egg white foam gels. The properties of the egg white foam gels were investigated through microscopic observation, color measurements, texture analysis and rheological analysis. The experimental results showed that at a constant stirring rate, the bubble state of the egg white foam changed with the whipping time. Prolonging the whipping time appropriately could benefit the formation of solid foam with low specific gravity (0.16~0.17), high foaming ability and foam stability. The egg white foam after being whipped for 70 s (foam in small hook-like shape, with a specific gravity of 0.165) had the highest stability. After being heated for solidification, the lightness of such an egg white foam gel ( $L^*=90.28$ )

引文格式:

李正雯,阮征,李汴生,等.不同打发状态蛋清泡沫及其凝胶特性的比较[J].现代食品科技,2024,40(3):219-228.

LI Zhengwen, RUAN Zheng, LI Biansheng, et al. Comparison of egg white foams in different whipping states and their gel properties [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 219-228.

收稿日期: 2023-03-15

基金项目: 广东省重点领域研发项目(2019B020219002)

作者简介: 李正雯(1997-),女,硕士研究生,研究方向:食品加工与保藏, E-mail: 449785007@qq.com

通讯作者: 李汴生(1962-),男,博士,教授,研究方向:食品加工与保藏, E-mail: febsli@scut.edu.cn

increased significantly, whilst the hardness (27.69 g) and elasticity (0.78 mm) decreased significantly ( $P<0.05$ ), exhibiting excellent gel properties. The results revealed that the rheological properties of egg white foam influenced significantly the properties of egg white foam and its gel, which provides a theoretical reference for the application of egg white foam in aerated foods.

**Key words:** egg white foam; foam gel; structure; properties

鸡蛋是一种常见的食物,在日常饮食中占有重要地位。鸡蛋清是优质的蛋白质来源,占鸡蛋总重的 57.0%~58.5%<sup>[1]</sup>。许多食品的加工都利用了蛋清的起泡性和凝胶性,以达到改善食品质地的目的。蛋清是充气食品中最常使用的食品发泡剂之一<sup>[2]</sup>。在食品工业中,机械搅拌是形成蛋清泡沫的常见方法。在搅拌作用下,蛋清蛋白分子由于具有两亲性而迅速吸附至气-液界面并展开,暴露其内部疏水区域。随后蛋白质分子在气泡周围聚合重排,其表面张力不断降低,最终形成稳定且有粘弹性的蛋白膜<sup>[3]</sup>。

在实际工业操作过程中需要判断蛋清的打发状态。常见的方法是肉眼观察搅拌头上蛋白霜尖峰的形态并以“软”、“硬”,或“湿性发泡”、“中性发泡”和“干性发泡”等表示蛋清打发状态。然而,这些较为主观的判断可能会导致状态的名词定义存在歧义<sup>[4]</sup>。且蛋清泡沫状态的改变往往发生迅速,使该判断方法缺乏准确性。在大部分文献报道中,对于蛋清打发状态的描述也依然模糊<sup>[5-7]</sup>。

蛋清泡沫形成之后,进一步加工可能会使泡沫结构受损,进而影响成品的结构特性<sup>[7,8]</sup>。现有研究大多集中于向蛋清中添加其他物质对其进行改性,从而提高蛋清泡沫的稳定性<sup>[9-11]</sup>,然而对于单一的蛋清体系而言,蛋清泡沫的结构性质及泡沫结构对其凝胶特性的影响还尚未见系统的研究。本文通过机械搅打方式,在恒定搅拌速率下制备了蛋清泡沫。探究了不同打发时间的蛋清泡沫及其凝胶在结构和性质上的差异,以期阐明蛋清泡沫结构变化的机理,为蛋清泡沫在充气食品中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

鸡蛋:衡阳鲜盛农产品有限公司,购于广州市盒马鲜生超市。鸡蛋生产日期皆为使用时的前三天内。鸡蛋水分含量:87.6%±0.44%;哈夫单位:84.68±1.22;蛋清 pH 值:8.53±0.03;蛋清液粘度:(4.57±0.03) mPa·s;蛋清比例:58.76%±0.60%(蛋清占鸡蛋质量的比例,  $m/m$ )。鸡蛋储存于 4 °C 冰箱

备用,使用前恢复到室温(25 °C)。

### 1.2 主要仪器设备

手提式打蛋器:DDQ-B02L1型,广东小熊电器股份有限公司;数码光学显微镜:CX31RTSF型,奥林巴斯中国有限公司;流变仪:Anton PaarMCR-302型,奥地利Anton Paar公司;色彩色差计:CR-400型,日本柯尼卡美能达株式会社;质构仪:TA-XT plus型,英国 Stable Micro Systems 公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 蛋清泡沫的制备

将鸡蛋的蛋黄与蛋清分离,取蛋清部分,置于磁力搅拌器上 400 r/min 搅拌 30 min,撇去蛋清上的泡沫部分。用手提式打蛋器 1 挡(转速:980 r/min)对蛋清分别打发 0、30、50、70、90 和 110 s,每个不同处理的蛋清量都为 20 mL。打发蛋清时温度为 21.5 °C。

#### 1.3.2 蛋清泡沫的表征

##### 1.3.2.1 蛋清泡沫的宏观及微观观测

宏观:竖直提起打蛋器,观察并拍摄打蛋器头上和打蛋盆内蛋清的状态。

微观:取 1.3.1 中制备的蛋清泡沫(0、50、70 和 90 s)置于载玻片上,样品大小制备为 1.0 cm×1.0 cm 的正方形,样品应尽可能薄。用光学显微镜对样品进行观察并拍摄,目镜倍数 10×,物镜倍数 4×。

##### 1.3.2.2 蛋清泡沫感官评分

将 1.3.1 中新鲜制备的蛋清泡沫用裱花袋挤在透明玻璃板上,保证每个蛋清泡沫的形态和大小尽可能一致。将样品按照三位数随机编号,并按照随机的顺序分配给感官评定员。评定小组由 6 名经培训的感官评定人员(男女各半)组成,取 6 人的平均值作为样品的感官得分。感官评定内容的制定参照 GB/T 12315-2008 感官分析方法学排序法和 GB/T 39501-2020 感官分析定量响应标度使用导则,以光泽、泡沫峰形态、体积、流动性、粘弹性、室温静置 30 min 的泡沫稳定性为评价指标,对蛋清泡沫进行感官评价,具体评分标准见表 1。

表 1 蛋清泡沫感官评分标准

项目	评定标准	分值/分
光泽度 (10分)	无光泽	0~2
	较黯淡, 略有光泽	3~5
	湿润有光泽	6~8
	明亮有光泽	9~10
泡沫峰形态 (10分)	无泡沫峰形成, 或呈棉絮团状	0~2
	有大弯钩形成, 无法直立, 易下垂或滴落	3~5
	形成坚硬的小弯钩	6~8
	形成直立的小尖角	9~10
体积(10分)	非常小, 几乎不膨胀	0~2
	体积小且干瘪	3~5
	较蓬松	6~8
	非常蓬松	9~10
流动性 (10分)	流动性强, 呈液态	0~2
	有一定流动性	3~5
	几乎无流动性	6~8
	完全无流动性	9~10
泡沫稳定性 (10分)	几乎无泡沫保持, 全部消泡为液体	0~2
	泡沫底部出现大量液体, 少部分泡沫保留	3~5
	泡沫底部出现少量液体, 大部分泡沫保留	6~8
	泡沫底部几乎无液体出现, 仍保持较好的泡沫形态	9~10

### 1.3.2.3 蛋清的起泡性和泡沫稳定性

参考 Abu-Ghoush 等<sup>[12]</sup>的方法并进行适当修改。取 20 mL 磁力搅拌均匀后的蛋清, 用手提式打蛋器一档 (980 r/min) 分别搅拌 50、70 和 90 s, 记录打发后蛋清的体积  $V'$ 。将打发后的蛋清静置 0、5、10、15、20、25、30、50 min, 记录静置后烧杯底部液体的体积  $V_i$ 。

用蛋清起泡性来衡量蛋清的打发性, 打发后蛋清的失液率来衡量其泡沫稳定性。蛋清起泡性和失液率的计算见公式 (1) (2):

$$B = \frac{V'}{20} \times 100\% \quad (1)$$

$$E = \frac{V_i}{V'} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$B$ ——蛋清起泡性, %;

$E$ ——失液率, %;

$V'$ ——打发后蛋清的体积, mL;

$V_i$ ——静置  $i$ min 后烧杯底部液体的体积, mL。

### 1.3.2.4 蛋清泡沫的比重测定

参照孙金晶<sup>[13]</sup>的方法, 采用简易测定法测定蛋清泡沫的比重。根据公式 (3) 计算样品比重:

$$d = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \quad (3)$$

式中:

$d$ ——比重, 无量纲;

$m_0$ ——空容器质量, g;

$m_1$ ——蒸馏水与容器总重, g;

$m_2$ ——样品与容器总重, g。

### 1.3.2.5 蛋清泡沫的动态流变学测试

参照唐婷婷<sup>[14]</sup>的方法并适当修改。在初步试验中, 首先以固定频率 1 Hz 的应变扫描 (0.01%~100%) 确定了样品的线性粘弹性范围 (LVR)。在流变仪的动态温度扫描模式下, 使用直径 50 mm 的上平板, 蛋清泡沫样品在制备后立即加在下平板上。在线性粘弹范围内, 以恒定的应变幅度 (0.02%) 对泡沫样品进行频率扫描, 频率范围为 0.1~10 Hz, 间隙为 3 mm, 测定蛋清泡沫的动态粘弹性模量 (储能模量  $G'$  和损耗模量  $G''$ ), 实验均在室温 (25 °C) 条件下进行。

### 1.3.3 蛋清泡沫凝胶的制备

取磁力搅拌均匀后的蛋清 50 g, 用手提式打蛋器一档 (980 r/min) 分别搅拌 0、50、70 和 90 s, 将不同处理的蛋清全部装入烧杯中, 加盖保鲜膜, 置于 90 °C 恒温水浴加热 30 min, 加热完毕后立即坐冰水浴冷却 30 min, 再放入 4 °C 冰箱冷藏 24 h 备用。

### 1.3.4 蛋清泡沫凝胶的表征

#### 1.3.4.1 蛋清泡沫凝胶的微观观测

取 1.3.3 中制备的蛋清泡沫凝胶置于载玻片上, 样品的制备和观测方法同 1.3.2.1。

#### 1.3.4.2 蛋清泡沫凝胶的质构测定

参照何立等<sup>[15]</sup>的方法并适当修改。采用 TA-XT plus 型质构仪测定蛋清泡沫凝胶的质构特性。将蛋清泡沫凝胶样品切成 1.0 cm×1.0 cm×1.0 cm 的立方体。参数设定: 探头型号 P36/R, 测前速度 2 mm/s, 测试速度 1 mm/s, 测后速度 2 mm/s, 两次下压间隔时间 5 s, 触发力为 5 g, 压缩程度 40%。实验测定结果选取硬度和弹性两个指标。每组样品平行测定 10 次, 去掉最大值和最小值后取平均值。

### 1.3.4.3 蛋清凝胶的色度测定

使用校准后的色彩色差计测定 1.3.3 中制备的蛋清泡沫凝胶样品表面的颜色, 用  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  对样品的颜色进行表征。重复测试 3 次取平均值。整个测定过程在同一光线环境下进行。

### 1.3.4.4 动态流变学测试

参考 Li 等<sup>[6]</sup>的方法并适当修改。在流变仪的动态温度扫描模式下, 使用直径 50 mm 的上平板, 测试间隙为 3 mm。蛋清泡沫样品制备后立即加到下平板上, 调整好平板间的间隙。程序设定为: 样品从 25 °C 以 5 °C/min 的速度上升到 90 °C 后, 在 90 °C 下保持 10 min, 最后以 10 °C/min 的速度从 90 °C 下降到 25 °C, 整个过程中保持频率为 1 Hz, 应变幅度为 1% (在线性粘弹范围内), 记录整个过程中样品  $G'$  和  $G''$  随时间和温度的变化情况。

### 1.3.5 数据处理及分析

采用 SPSS 23.0 对多组数据进行分析, 结果用“平均值 ± 标准差 ( $\bar{X} \pm SD$ )”表示, 多组数据差异性分析采用单因素 ANOVA 检验的邓肯比较模型,  $P < 0.05$  表示具有显著性差异。采用 Adobe Illustrator 2021 和 ImageJ V1.8.0 处理实验图片, 采用 GraphPad Prism 8 绘制图片。

## 2 结果与讨论

### 2.1 蛋清泡沫的表征结果

#### 2.1.1 蛋清泡沫的宏观图像及感官评分

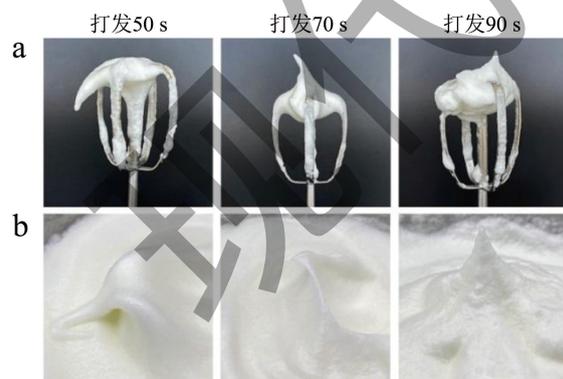


图 1 不同打发时间蛋清泡沫的宏观图像

Fig.1 Macroscopic images of egg white foam at different whipping time

注: (a) 不同打发时间蛋清泡沫在搅拌头上的状态; (b) 不同打发时间蛋清泡沫在打蛋盆内的状态。

通过机械搅拌, 蛋清由透明有流动性的液体逐渐成为白色无流动性的固态蛋清泡沫。在预实验中

发现, 打发 30 s 之前体系中以蛋清液为主, 打发 30~50 s 时为泡沫与蛋清液共存状态。泡沫形态的变化主要发生在 50~90 s 之间。打发 120 s 之后, 蛋清泡沫因过度打发而变得絮凝破碎、无光泽。因此本文以打发时间 50、70 和 90 s 的蛋清泡沫作为研究对象。在恒定功率下, 不同打发时间制备的不同形态的蛋清泡沫见图 1。由图 1 可知打发 50 s 时, 搅拌头上蛋清泡沫尾端最初呈大弯钩状但不滴落, 泡沫细腻有光泽; 70 s 时蛋清泡沫尾端变为小弯钩状态, 最终在 90 s 时呈稳定直立的小尖角状。盆中蛋清泡沫的纹路逐渐清晰, 变得富有光泽, 泡沫整体流动性降低。Foegeding 等<sup>[17]</sup>发现蛋清泡沫的硬度和弹性可能与充气量成正比, 这与本研究结果相符。

排序法可以用来评估样品间的差异, 如样品某一种或多种感官特性的强度, 其评分结果可以将样品分为不同组群<sup>[18]</sup>。对于蛋清泡沫而言, 其感官评分直接反映了蛋清泡沫的形貌特点。对不同打发时间的蛋清泡沫的感官属性分别进行了评分 (图 2)。由图 2 所示, 不同打发时间的蛋清泡沫具有不同强度的特性。感官评分结果说明, 根据样品的外观形貌可以区分出三种不同状态的蛋清泡沫, 但评分不代表样品的好坏。打发 70 s 的蛋清泡沫具有最高的感官评分, 这可能与其较好的起泡性和泡沫稳定性相关。

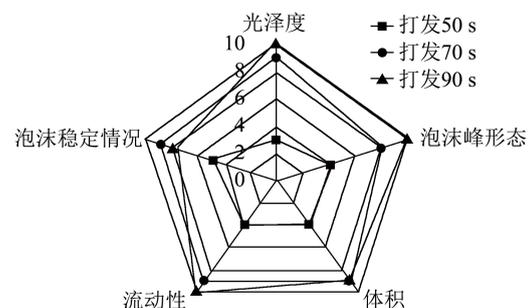


图 2 不同打发时间蛋清泡沫的感官评分结果

Fig.2 Sensory score results of egg white foam at different whipping time

#### 2.1.2 蛋清泡沫的显微图像及描述

用光学显微镜观测了不同打发时间蛋清泡沫的微观状态, 见图 3。由图 3 可以发现, 蛋清泡沫为典型的多面体泡沫<sup>[19]</sup>, 在 40 倍显微镜下, 蛋清泡沫无序堆积挤压, 呈蜂窝状。随打发时间延长, 蛋清泡沫直径和泡沫壁厚都逐渐减小, 单位面积内气泡数量逐渐增多。用 ImageJ 对显微图像进一步分析, 得到不同打发时间蛋清泡沫的平均气泡直径和气泡

壁厚,结果见图4。图4结果表明,蛋清泡沫打发50 s时的平均气泡直径为1 266.12  $\mu\text{m}$ ,气泡壁厚度为72.38  $\mu\text{m}$ ,其平均气泡直径分别是打发时间70 s (858.56  $\mu\text{m}$ )和90 s (473.05  $\mu\text{m}$ )蛋清泡沫的1.5倍和3倍,气泡壁厚度也分别减小了2.3倍和3.6倍。说明除了从外观形貌方面,还可从微观结构中对不同状态的泡沫进行区分。该结果证明了蛋清泡沫的平均气泡大小和气泡壁的厚度与打发时间呈反比。Lau等<sup>[20]</sup>也发现了类似的现象,这可能是由于在机械应力下,大气泡不断被破坏和分割,蛋白质分子在分割后的气泡周围展开、聚集和重排,从而形成了更多更小的气泡。

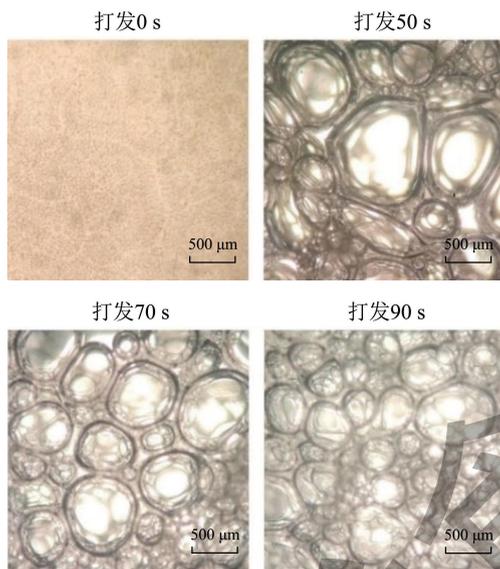


图3 不同打发时间蛋清泡沫的微观图像

Fig.3 Microscopic images of egg white foam at different whipping time

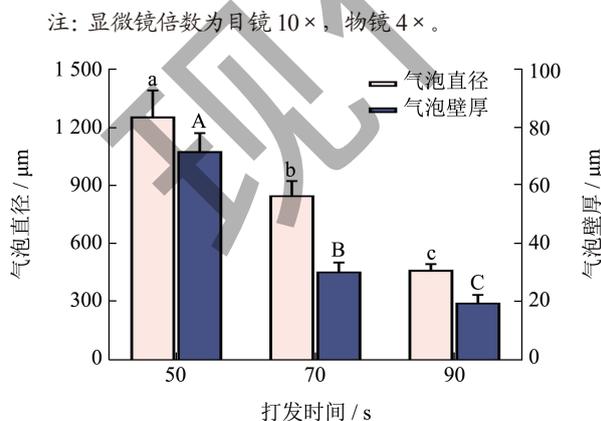


图4 不同打发时间蛋清泡沫的平均气泡直径和气泡壁厚

Fig.4 Average bubble diameter and bubble wall thickness of egg white foam at different whipping time

注:字母不同代表具有显著性差异( $P < 0.05$ )。图5、9同。

### 2.1.3 蛋清的起泡性和比重结果

蛋清的起泡性是指蛋清蛋白形成具有支撑力的蛋清泡沫的能力<sup>[9]</sup>。比重代表泡沫的相对密度,反映了泡沫的气体保持率<sup>[13]</sup>。二者都能被用于评估蛋清的搅打性能。不同打发时间对蛋清起泡性和比重的影响见图5。从图5可以得知,蛋清起泡性随打发时间的变化趋势与比重的恰好相反。对于起泡性,在70 s之前,空气被不断搅打入蛋清泡沫中,泡沫体积可以增加至原蛋清液体积的5~6倍(蛋清打发70 s的起泡性:570.83%);而搅打时间为70~110 s时,泡沫体积不再发生显著变化(蛋清打发110 s的起泡性:606.05%) ( $P > 0.05$ )。上述结果表明,在搅拌器材、打发速率和打发温度等外部条件都一定的情况下,蛋清起泡性随打发时间延长而先增大后趋于平衡。适当延长打发时间可以提高蛋清的起泡性。已有研究表明,蛋清起泡性通常与蛋白质的溶解度、表面活性有关,也由搅打时间、搅拌功率决定<sup>[9]</sup>。这可能是更多蛋清蛋白分子展开并扩散至气-液界面,在界面发生了聚集和分子间聚合所导致的<sup>[21]</sup>。而对于比重,在最初50 s内,空气大量进入蛋清体系,使得比重急剧下降(0.9962 $\rightarrow$ 0.1901);50~110 s时,比重趋于平稳(0.1901 $\rightarrow$ 0.1655),其他研究中也曾报导过引入空气后体系相对密度降低的结果<sup>[20,22]</sup>。

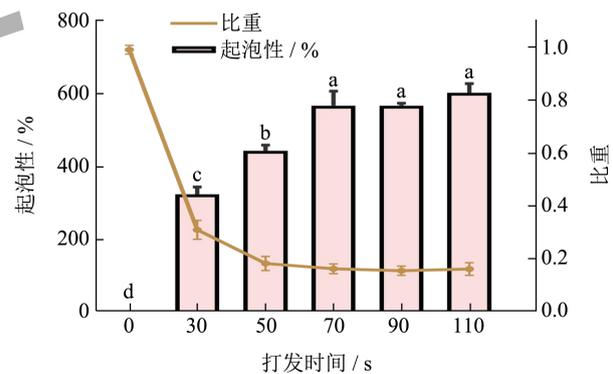


图5 不同打发时间蛋清起泡性和比重结果

Fig.5 Results of foam expansion and specific gravity of egg white foam at different whipping time

### 2.1.4 蛋清的泡沫稳定性结果

泡沫是热力学高不稳定的体系,因此泡沫稳定性对充气食品的外观和质地至关重要<sup>[3,9,20]</sup>。本研究利用失液率来衡量蛋清打发后的泡沫稳定性,结果见图6。失液率越高,表示蛋清的泡沫稳定性越差。如图6所示,静置时间与蛋清泡沫的失液率呈正比关系,在其他研究中也得到了类似的结果<sup>[23]</sup>。静置50 min后,打发50 s的蛋清泡沫失液率最高

(9.56%)，失液速率最快，其泡沫稳定性最差；而打发 70 s 的蛋清失液速率最慢，其泡沫稳定性略优于打发时间 90 s 的蛋清（失液率：5.31% vs 6.77%）。产生上述现象的原因可能是当搅打时间为 90 s 时，蛋白分子链的延展性已达到极限，无法再容纳更多的空气。继续延长打发时间则会破坏处于相对稳定状态的蛋白膜，导致失液率上升。

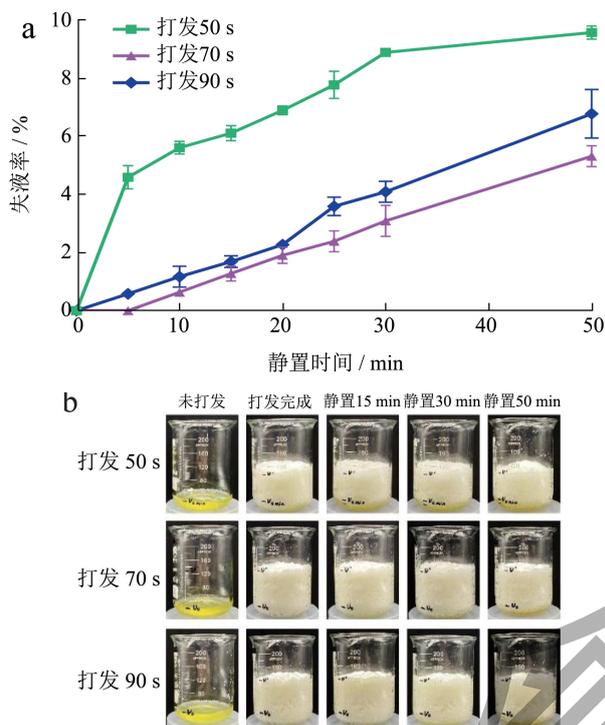


图 6 (a) 不同打发时间蛋清泡沫的失液率曲线；  
(b) 不同打发时间蛋清泡沫静置 50 min 的图像

Fig.6 (a) Liquid drainage curves of egg white foam at different whipping time; (b) Images of egg white foam standing for 50 min after whipping

### 2.1.5 蛋清泡沫动态流变结果

打发蛋清可以改变蛋清液的流动性并形成蛋清泡沫。蛋清泡沫可以通过膨胀和压缩区域来应对压力<sup>[24]</sup>。通过动态流变仪测定蛋清泡沫  $G'$  和  $G''$  的改变，可以把握蛋清泡沫在加工过程中的结构变化。在流变仪的动态频率扫描模式下，不同打发时间蛋清泡沫  $G'$  和  $G''$  的变化结果见图 7。

由图 7，在恒定的应变幅度条件下，蛋清液（打发 0 s）的  $G'$  一直小于  $G''$ ，表明蛋清液呈现液体的性能；对于三种蛋清泡沫样品，其  $G'$  和  $G''$  都随频率的增加而显著增加，且  $G'$  都一直大于  $G''$ ，说明三种蛋清泡沫都具有较强的弹性行为，呈现出高弹性固体的特性。打发时间与蛋清泡沫的  $G'$  和  $G''$  都呈正相关，打发 90 s 的蛋清泡沫具有最大的  $G'$  和

$G''$ 。Audebert 等<sup>[25]</sup>的研究发现，当界面膜的  $G'$  升高时，泡沫的  $G'$  和  $G''$  也会相应提高，且界面膜的  $G'$  与泡沫的老化速率存在联系。这提示打发时间延长提高了蛋清泡沫膜的  $G'$ ，从而提高了蛋清泡沫的  $G'$  和  $G''$ 。此外还有研究表明，充气量会影响泡沫的弹性和固体性能<sup>[26]</sup>，这也解释了蛋清泡沫的  $G'$  和  $G''$  随打发时间增加的原因。

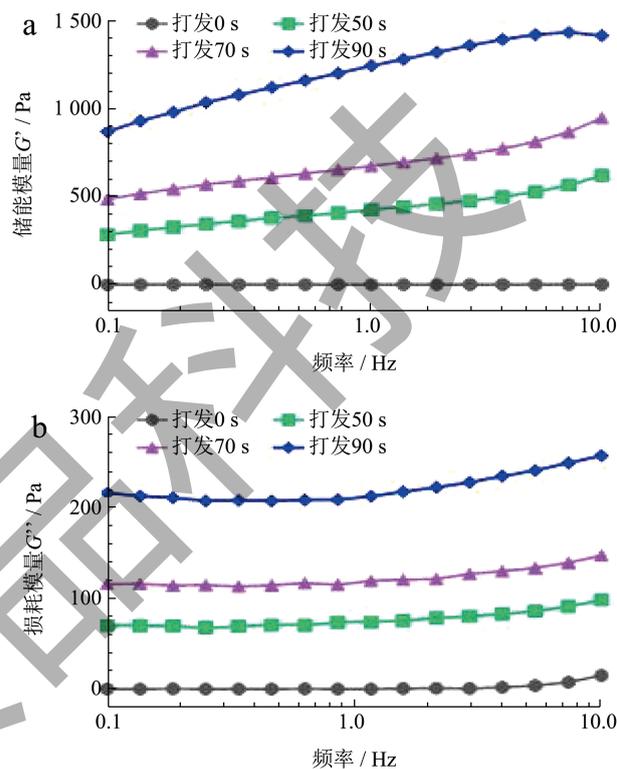


图 7 不同打发时间蛋清泡沫储存模量 ( $G'$ ) (a) 和损耗模量 ( $G''$ ) (b) 的变化

Fig.7 Changes of storage modulus ( $G'$ ) (a) and loss modulus ( $G''$ ) (b) of egg white foam at different whipping time

## 2.2 蛋清泡沫凝胶的表征结果

### 2.2.1 蛋清泡沫凝胶的色度

鸡蛋清的凝胶性是其最重要的功能特性之一，蛋清泡沫同样具有凝胶性<sup>[27]</sup>。在实际生产中，我们不仅要了解蛋清泡沫的性质，还需要了解蛋清泡沫加热固化后的特性。

食品的色泽是直接影响消费者喜好的重要因素之一。不同打发时间的蛋清泡沫凝胶的色度结果见表 2。 $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值分别表示明暗度、红绿色和黄蓝色。较高的  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值分别表示颜色更浅、更红和更黄， $a^*$  负值代表偏绿， $b^*$  负值代表偏蓝<sup>[27]</sup>。由表 2，打发后的蛋清泡沫凝胶的亮度比未打发的蛋清凝胶显著性高 ( $P < 0.05$ )，说明打发蛋清有利于成品亮

度的提高。已有研究表明,食品泡沫体系的亮度会随着体系中气体含量的增加而增加<sup>[28]</sup>。未打发的蛋清凝胶  $a^*$  值最小,  $b^*$  值最大,表明其更偏黄绿。随打发时间延长,未打发的蛋清凝胶与蛋清泡沫凝胶的  $a^*$  值和  $b^*$  值都具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ),蛋清泡沫凝胶的  $a^*$  值呈逐渐增大的趋势,而  $b^*$  值逐渐降低。

表 2 不同打发时间蛋清泡沫凝胶的色度

Table 2 Color characteristics of egg white foam gels at different whipping time

打发时间/s	$L^*$	$a^*$	$b^*$
0	88.14 ± 0.39 <sup>b</sup>	-5.15 ± 0.52 <sup>a</sup>	8.28 ± 0.37 <sup>a</sup>
50	90.81 ± 0.39 <sup>a</sup>	-2.69 ± 0.08 <sup>b</sup>	6.02 ± 0.30 <sup>b</sup>
70	90.28 ± 0.70 <sup>a</sup>	-1.60 ± 0.03 <sup>c</sup>	4.93 ± 0.17 <sup>c</sup>
90	90.23 ± 1.00 <sup>a</sup>	-2.43 ± 0.28 <sup>b</sup>	4.81 ± 0.97 <sup>c</sup>

注: 同列右肩上字母不同者代表有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2.2 蛋清泡沫凝胶的质构特性

在质构分析中,硬度指压缩样品所需要的最大的力,表示食品的坚硬程度,是最直接反应食品口感的指标之一。弹性是指样品在第一次压缩变形后回弹的距离。打发时间对蛋清泡沫凝胶的质构特性影响结果见表 3。由表 3,相比未打发蛋清凝胶,蛋清泡沫凝胶的硬度降低了约 11 倍,弹性降低了约 1.3 倍 ( $P < 0.05$ ),表明泡沫结构能极大的改善蛋清凝胶的柔软程度。对于蛋清泡沫凝胶,其硬度随打发时间呈缓慢降低趋势,弹性呈先略微增加后减小的趋势。导致硬度略微降低的原因可能是,打发 90 s 时蛋清蛋白的分子链展开程度较高,形成的蛋清泡沫膜更薄、更脆,较易受热破裂;而弹性与打发时间无关可能是由于单一的蛋清泡沫结构稳定性较差,在加热作用下难以保持的缘故。Singh 等<sup>[27]</sup>的研究中也得到了相似的结果。已有研究表明,对蛋清进行糖基化、磷酸化<sup>[9,29,30]</sup>改性,有利于增强蛋清泡沫的稳定性,进而可能改善泡沫凝胶的质构特性。

表 3 不同打发时间蛋清泡沫凝胶的质构特性

Table 3 Textural characteristics of egg white foam gels at different whipping time

打发时间/s	硬度/g	弹性/mm
0	340.87 ± 9.91 <sup>a</sup>	0.96 ± 0.02 <sup>a</sup>
50	29.89 ± 2.64 <sup>b</sup>	0.75 ± 0.05 <sup>b</sup>
70	27.69 ± 1.93 <sup>b</sup>	0.78 ± 0.06 <sup>b</sup>
90	25.13 ± 2.50 <sup>b</sup>	0.75 ± 0.02 <sup>b</sup>

注: 同列右肩上字母不同者代表有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

### 2.2.3 蛋清泡沫凝胶的显微图像及描述

当蛋清泡沫受热膨胀时,高弹性的泡沫膜能防止蛋清泡沫过早破裂<sup>[31]</sup>。图 8 为蛋清泡沫凝胶的微观图像。图 9 中对不同打发时间蛋清泡沫凝胶的平均气泡直径和气泡壁厚进行了分析。由图 8,未打发蛋清凝胶结构致密,几乎未见气泡;打发 50 s 和 90 s 蛋清泡沫凝胶中的气泡都发生了不同程度的变形和破裂,气泡膜较薄;打发 70 s 的凝胶中气泡直径较大,气泡膜较厚,气泡结构完整。与加热固化前的泡沫直径相比,凝胶中的泡沫直径都有所增大,气泡壁厚显著减小。凝胶中的气泡平均直径随打发时间的延长而减小,后又略微增加。图 9 证明了打发 50 s (1 876.19  $\mu\text{m}$ ) 和 90 s (1 159.06  $\mu\text{m}$ ) 的蛋清泡沫凝胶中的气泡直径比 70 s (892.91  $\mu\text{m}$ ) 的大,且二者的气泡壁厚仅为打发 70 s 的气泡壁厚的一半 ( $P < 0.05$ )。综合 2.1.5 和本节结果,产生上述结果的原因可能是打发时间 50 s 时形成的蛋白膜具有较小的  $G'$ ,其界面的弹性不足以抵抗受热膨胀的应力,导致气泡极易发生变形和破裂。打发 70 s 蛋清泡沫膜的  $G'$  较高,因此其凝胶能较好地保留气泡结构。已有研究证明,气泡膜越厚,泡沫越稳定,发生排水、歧化和聚结现象的速率越慢<sup>[32]</sup>。这可能解释了打发 90 s 的蛋清泡沫在凝胶中难以维持的原因。且搅拌 90 s 时,单位面积内的泡沫数量最多,最密集,小气泡间容易发生合并现象,合并过程中也可能引起气泡破裂<sup>[33]</sup>。

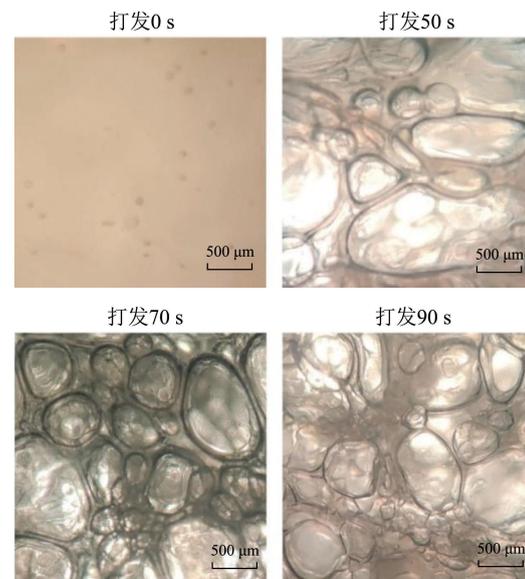


图 8 不同打发时间蛋清泡沫凝胶的微观图像

Fig.8 Microscopic images of egg white foam gels at different whipping time

注: 显微镜倍数为目镜 10 $\times$ , 物镜 4 $\times$ 。

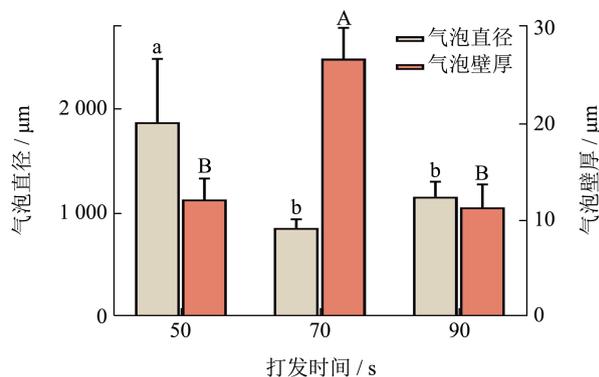


图9 不同打发时间蛋清泡沫凝胶的平均气泡直径和气泡壁厚

Fig.9 Average bubble diameter and bubble wall thickness of egg white foam gelat different whipping time

### 2.2.4 蛋清泡沫凝胶的动态流变结果

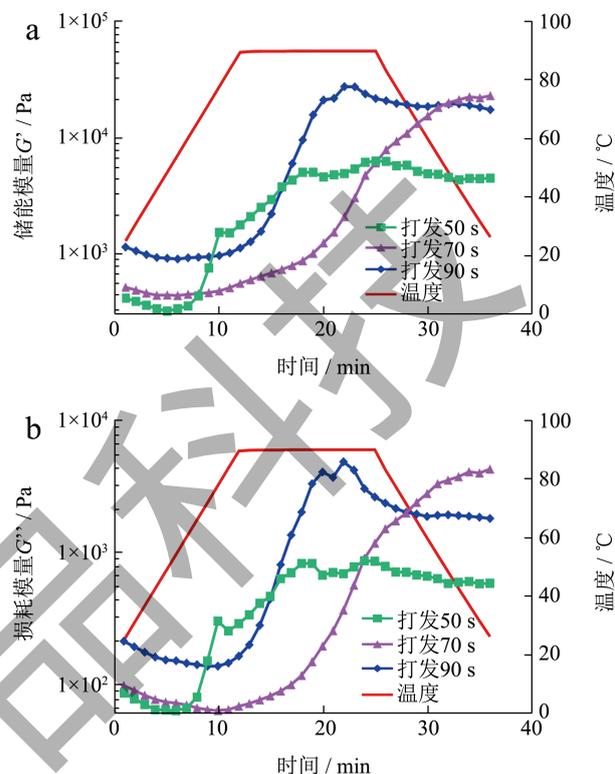
在动态振荡温度扫描模式下测得了蛋清泡沫凝胶  $G'$  和  $G''$  的变化情况,研究了蛋清泡沫性能随温度变化的响应,结果见图10。实验温度设置了升温、保温和降温三个阶段。在整个温度变化过程中,所有蛋清泡沫样品的  $G'$  始终大于  $G''$ ,表明蛋清泡沫凝胶始终呈现固体的特性。

由图10a,在升温阶段,蛋清泡沫体系的  $G'$  都是随温度升高而上升。其中,打发50s的蛋清泡沫凝胶的  $G'$  在65℃左右迅速上升,标志蛋清蛋白开始变性<sup>[34]</sup>。在85℃时卵清蛋白发生变性,此时蛋清泡沫凝胶的  $G'$  在升温阶段达到最大值,其值可代表凝胶的硬度<sup>[35]</sup>, $G'$  的大小排序为:50s>90s>70s,与2.2.2中硬度结果相似。在保温阶段,蛋清泡沫凝胶的  $G'$  仍呈现上升趋势,表明随加热时间的延长,蛋清泡沫凝胶的弹性也有所增强;在降温阶段,蛋清泡沫凝胶的  $G'$  逐渐达到稳定。

值得注意的是,在升温阶段  $G'$  的变化速率由快到慢排序为:50s>90s>70s,说明打发50s的蛋清泡沫结构对温度变化更敏感,易受温度影响而迅速发生改变。在最终加热程序结束时,打发70s的蛋清泡沫凝胶  $G'$  最大 ( $2.3 \times 10^4$  Pa),此时的气泡结构保持较好。这都与蛋清泡沫凝胶的微观形态一致。上述结果表明蛋清泡沫凝胶的  $G'$  可能与体系充气量、凝胶中的气泡膜的厚度有关,体系充气量越大,气泡膜越厚,则蛋清泡沫凝胶的  $G'$  越大。

由图10b,所有蛋清泡沫的  $G''$  的变化趋势都与  $G'$  的类似。然而在降温阶段,与另外两个样品的  $G''$  缓慢下降的趋势不同的是,打发70s的蛋清泡沫凝胶的  $G''$  缓慢上升并达到了最高的粘性模量。这说明打发70s的蛋清泡沫膜可能具有最佳的粘弹

性来保留气泡,防止气泡结构在降温过程中因冷而迅速坍塌。Talansier等<sup>[36]</sup>的研究表明,气泡膜的界面流变性是影响起泡性、泡沫稳定性和泡沫结构的重要因素。粘弹性更高的界面膜的更有助于保护气泡结构,泡沫稳定性也更好。

图10 不同打发时间蛋清泡沫的储能模量 ( $G'$ ) (a) 和损耗模量 ( $G''$ ) (b) 随温度的变化Fig.10 Changes of storage modulus ( $G'$ ) (a) and loss modulus ( $G''$ ) (b) of egg white foam at different whipping time with temperature

### 3 结论

本研究表明,在室温条件下以恒定速率980 r/min打发新鲜蛋清液,蛋清随打发时间延长逐渐由具有流动性的液态变为高粘弹性的固态泡沫。蛋清泡沫的比重逐渐降低,气泡的直径减小但数量增多,气泡壁变薄,  $G'$  和  $G''$  都增加。打发70s(蛋清泡沫呈小弯钩状,比重0.165)可以得到充气量最大、泡沫稳定性最好的蛋清泡沫。将其加热固化后,得到的蛋清泡沫凝胶能较好地保留气泡结构。打发时间通过改变蛋清蛋白分子的展开程度和体系中充气量的多少来影响蛋清泡沫结构,最终影响其凝胶的结构与性质。这些性质也与气泡膜的粘弹性、蛋清泡沫的流变学特性是息息相关的。之后可探究打发时间对蛋清蛋白分子的疏水基团、表面张力和表面

电荷的影响,进一步阐明打发时间对分子层面的影响机制,或从界面膜流变性方向来阐述蛋清泡沫的性质。此外,后续可针对不同食品工业的需求选择不同状态的蛋清泡沫。本文为蛋清泡沫的应用提供了科学基础。

### 参考文献

- [1] 常心雨,王晶,张海军,等.鸡蛋蛋清形成过程及品质调控研究进展[J].中国家禽,2021,43(12):93-101.
- [2] YUCEER M, CANER C. Effectiveness of enzymes on structural, functional and creep-recovery behavior of freshly prepared meringue's batter using liquid egg albumen [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(3): 927-934.
- [3] LOMAKINA K, MIKOVA K. A study of the factors affecting the foaming properties of egg white-A review [J]. Czech Journal of Food Sciences, 2006, 24(3): 110-118.
- [4] VEGA C, SANGHVI A. Cooking literacy: Meringues as culinary scaffoldings [J]. Food Biophysics, 2012, 7(2): 103-113.
- [5] 唐梦琦.三种功能糖对戚风蛋糕的品质特性及抗老化机制的影响[D].武汉:武汉轻工大学,2021.
- [6] HESSO N, GARNIER C, LOISEL C, et al. Formulation effect study on batter and cake microstructure: Correlation with rheology and texture [J]. Food Structure, 2015, 5: 31-41.
- [7] PERNELL C W, LUCK P J, FOEGEDING E A, et al. Heat-induced changes in angel food cakes containing egg-white protein or whey protein isolate [J]. Journal of Food Science, 2002, 67(8): 2945-2951.
- [8] JIN H, JIN Y, PAN J, et al. Comprehensive identification and hydrophobic analysis of key proteins affecting foam capacity and stability during the evolution of egg white foam [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108033.
- [9] SUN J, CHANG C, SU Y, et al. Impact of saccharides on the foam properties of egg white: Correlation between rheological, interfacial properties and foam properties [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107088.
- [10] HO H, CIOU J, QIU Y, et al. Improvement of foaming characteristics and stability of sterilized liquid egg with egg white hydrolysate (EWH) [J]. Foods, 2021, 10(6): 1326.
- [11] GHARBI N, LABBAFI M. Influence of treatment-induced modification of egg white proteins on foaming properties [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 72-81.
- [12] ABU-GHOUSH M, HERALD T J, ARAMOUNI F M. Comparative study of egg white protein and egg alternatives used in an angel food cake system [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2010, 34(s2): 411-425.
- [13] 孙金晶.基于界面特征解析糖对蛋清蛋白泡沫性能的影响规律和作用机制[D].无锡:江南大学,2022.
- [14] 唐婷婷.小分子肽改善蛋清粉起泡性能及改性蛋清粉在天使蛋糕中的应用[D].南昌:江西农业大学,2022.
- [15] 何立,李细毛,胡冰悦,等.3种鱼糜蛋白质特性及油炸特性比较[J].食品与机械,2022,38(6):40-44.
- [16] LI J, ZHANG W, TANG T, et al. Thermal gelation and digestion properties of hen egg white: Study on the effect of neutral and alkaline salts addition [J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135263.
- [17] FOEGEDING E A, LUCK P J, DAVIS J P. Factors determining the physical properties of protein foams [J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(2-3): 284-292.
- [18] GB/T 12315-2008.感官分析方法学排序法[S].
- [19] RAZI S M, FAHIM H, AMIRABADI S, et al. An overview of the functional properties of egg white proteins and their application in the food industry [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108183.
- [20] LAU K, DICKINSON E. Structural and rheological properties of aerated high sugar systems containing egg albumen [J]. Journal of Food Science, 2006, 69(5): E232-E239.
- [21] 王伟.鸡蛋蛋白改性及其打发性能研究[D].天津:天津科技大学,2009.
- [22] MIZU T, NAGAO K. Thermal conduction in egg albumen foam (meringue) during heating [J]. Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology-Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi, 2010, 57(1): 20-25.
- [23] CHEN Y, SHENG L, GOUDA M, et al. Impact of ultrasound treatment on the foaming and physicochemical properties of egg white during cold storage [J]. LWT, 2019, 113: 108303.
- [24] CAMPBELL G M, MOUGEOT E. Creation and characterisation of aerated food products [J]. Trends in Food Science & Technology, 1999, 10(9): 283-296.
- [25] AUDEBERT A, SAINT-JALMES A, BEAUFILS S, et al. Interfacial properties, film dynamics and bulk rheology: A multi-scale approach to dairy protein foams [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 542: 222-232.
- [26] THAKUR R K, VIAL C, DJELVEH G. Effect of composition and process parameters on elasticity and solidity of foamed food [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2008, 47(3): 474-483.
- [27] SINGH A, GEVEKE D J, JONES D R, et al. Can acceptable quality angel food cakes be made using pasteurized shell eggs? The effects of mixing factors on functional properties of angel food cakes [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(3): 987-996.
- [28] STANKOV S S, FIDAN H N, HRISTOV T G, et al. Physical and sensory characteristics of edible foams obtained with nitrous oxide [C]// Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bulgaria: IOP

- Publishing, 2021: 012115.
- [29] SADAHIRA M S, RODRIGUES M I, AKHTAR M, et al. Effect of egg white protein-pectin electrostatic interactions in a high sugar content system on foaming and foam rheological properties [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 58: 1-10.
- [30] MURRAY B S. Recent developments in food foams [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2020, 50: 101394.
- [31] TANG T, WU S, TANG S, et al. Effect of modified egg white powder on the properties of angel cakes [J]. Journal of Food Engineering, 2022, 326: 111012.
- [32] RIO E, DRENCKHAN W, SALONEN A, et al. Unusually stable liquid foams [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2014, 205: 74-86.
- [33] SAINT-JALMES A. Physical chemistry in foam drainage and coarsening [J]. Soft Matter, 2006, 2(10): 836-849.
- [34] LV Y, XU L, TANG T, et al. Gel properties of soy protein isolate-potato protein-egg white composite gel: Study on rheological properties, microstructure, and digestibility [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108223.
- [35] LIU Y, YU Y, LIU C, et al. Rheological and mechanical behavior of milk protein composite gel for extrusion-based 3D food printing [J]. LWT, 2019, 102: 338-346.
- [36] TALANSIER E, LOISEL C, DELLAVALLE D, et al. Optimization of dry heat treatment of egg white in relation to foam and interfacial properties [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(2): 496-503.

## 勘 误

因画图失误，本刊特对 2024 年第 40 卷第 2 期文章《耐热型罗伊氏乳杆菌液态微胶囊的制备及其体外模拟消化特性》中的图 5 进行勘误，正确的图见下：

