

微纳米气泡在食品工业中的应用与前景

张智宏¹, 张凌志¹, 高献礼¹, 王博¹, 王满生^{2*}, 马海乐^{1*}

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013) (2. 中国农业科学院麻类研究所, 湖南长沙 410205)

摘要:微纳米气泡是将气体分散在溶液中,形成的直径在几十纳米到几十微米之间的微小气泡颗粒。相比于普通气泡($\geq 600\ \mu\text{m}$),由于微纳米气泡尺寸小易受到溶液分子布朗运动影响,具有稳定性强、溶液中存在时间长、气-液界面富含负电荷、气泡崩塌过程中能形成自由基等理化特性被广泛应用于环境污染治理、农业种植、材料科学以及医学等领域。然而,微纳米气泡技术在食品工业中应用仍处于研究阶段。该研究将主要从微纳米气泡的形成过程、制备方法、气泡特性以及目前该技术在食品工业中的应用进行阐述,并对其在食品领域的发展方向以及应用前景进行展望,以期促进微纳米气泡技术在食品工业中的研究和开发应用。

关键词: 微纳米气泡; 理化特性; 制备方法; 食品工业

文章编号: 1673-9078(2023)02-325-331

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.2.0380

Applications and Prospects of Micro-Nano Gas Bubbles in the Food Industry

ZHANG Zhihong¹, ZHANG Lingzhi¹, GAO Xianli¹, WANG Bo¹, WANG Mansheng^{2*}, MA Haile^{1*}

(1.School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(2.Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410205, China)

Abstract: Micro-nano gas bubbles are micro-bubble particles with diameters ranging from tens of nanometers to tens of micrometers, formed through dispersing gas in a solution. Compared with ordinary bubbles ($\geq 600\ \mu\text{m}$), micro-nano gas bubbles, owing to their smaller size, are more readily affected by the Brownian motion of aqueous molecules. They are characterized by physicochemical properties, such as strong stability, long presence in solution, rich negative charges at the gas-liquid interface, and free radical formation during bubble collapse. Therefore, micro-nano gas bubbles are widely used in environmental pollution control, agricultural planting, material science, and medicine. However, the application of micro-nano gas bubbles in the food industry remains at the explorative stage. Here, the formation process, preparation method, bubble characteristics, and current applications of this technology in the food industry are described, and the development direction and application prospects of micro-nano gas bubbles in food are explored to promote further research and development of their applications in the food industry.

Key words: micro-nano gas bubbles, physicochemical properties, preparation method, food industry

引文格式:

张智宏,张凌志,高献礼,等.微纳米气泡在食品工业中的应用与前景[J].现代食品科技,2023,39(2):325-331

ZHANG Zhihong, ZHANG Lingzhi, GAO Xianli, et al. Applications and prospects of micro-nano gas bubbles in the food industry [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 325-331

收稿日期: 2022-04-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(32101893); 中国博士后面上基金资助(2018M642184); 湖南省自然科学基金青年基金项目(2020JJ5640); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610242021005)

作者简介: 张智宏(1986-),男,博士,讲师,研究方向: 新型食品加工技术, E-mail: zhihong1942@ujs.edu.cn

通讯作者: 王满生(1987-),男,博士,助理研究员,研究方向: 饲料及绿色食品加工, E-mail: wms198704@163.com; 共同通讯作者: 马海乐(1963-),男,博士,教授,研究方向: 物理加工技术与农产品初加工, E-mail: mhl@ujs.edu.cn

微纳米气泡(Micro-Nano Gas Bubbles, MNBs)是将气体分散在溶液中,形成的直径在几十纳米到几十微米之间的微小气泡颗粒。与普通气泡($\geq 600\ \mu\text{m}$)相比,微纳米气泡具有较高的比表面积和内部压力,有助于气-液两相界面之间的物质传输,从而增加了化学反应和物理吸附效率。另外,由于微纳米气泡气-液界面处分布的阴阳离子浓度不同,导致其界面 Zeta 电位呈现负值,有利于微纳米气泡之间的相互排斥而延长溶液中的稳定时间。此外,由于微纳米气泡在液相中所受浮力和液体分子的布朗运动的共同作用力,导

致其上升速率较慢,从而提高了过饱和溶液中微纳米气泡的溶解度,而研究表明半径在150~200 nm之间的微纳米气泡能够在溶液中稳定保持几个小时至数天之久^[1-3]。另外,当微纳米气泡受到外界刺激导致稳态消失,气泡收缩破灭时能释放大量能量,导致溶液中形成一定量的羟自由基($\cdot\text{OH}$)等自由基以及冲击波,具有杀菌消毒、降解有机物的作用^[4-6]。基于微纳米气泡的以上理化特性,目前微纳米气泡技术已经被广泛应用于环境污染治理、农业种植、水产养殖、材料科学以及医学等诸多领域。然而,该技术在食品工业当中的研究和应用还较少。因此,本文将围绕微纳米气泡形成过程、制备方法、理化特性以及该技术目前在食品工业方面的应用研究进行概述,以期为微纳米气泡技术在食品工业中的应用提供参考,促进其在食品工业加工中的研究和应用。

1 微纳米气泡形成过程

微纳米气泡的形成是利用表面张力和能量沉积来降低溶液中气体所受压力,从而达到气体的过饱和和形成了不同尺度的气泡,而大的气泡可以通过能量输出作用分散成为微小的气泡($\leq 100 \mu\text{m}$)。当微纳米气泡形成之后则经历了气泡聚集合并上升至表面破灭的一个动态过程。该过程可以通过图1所表示。

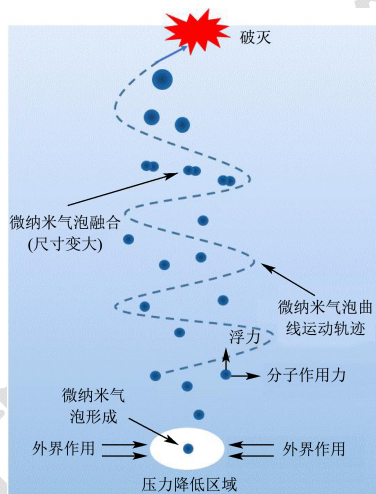


图1 微纳米气泡形成过程

Fig.1 The formation process of micro-nano gas bubbles

2 微纳米气泡制备方法

微纳米气泡制备方法主要包括两类,一类是通过机械剪切、压力差等方式将外源气体分散到溶液中而达到过饱和后,进而气体被机械力分散成为微小的气泡。另一类是未有外加气体加入,通过超声、电化学反应以及溶剂互溶等方式导致溶液中气体达到过饱和而形成。

2.1 气体分散法

利用高速的机械搅拌或者涡旋将溶液与环境中的气体进行机械混合,从而导致溶液中气体迅速达到过饱和,进而通过微孔喷头、微孔膜组件等附属元件将含气泡溶液分散成为微纳米尺度。研究表明,在去离子水溶液中采用高速涡旋将空气分散得到的微纳米气泡的尺寸在230~280 nm之间,数量可达每毫升 6.4×10^8 个。采用相同的方法将臭氧(4 L/min)分散至去离子水(270 L/min)中所形成的微纳米气泡的尺寸分布在32~460 nm之间,数量达到每毫升 4.55×10^7 个,并且在停止制备3 h后微纳米气泡数量仍然能够保持基本不变^[7]。

2.2 加压溶气释放法

在加压的情况下,将气体溶解于溶液中形成气体的过饱和状态,然后压力突然降低导致气体以微小气泡形式释放于溶液中形成了微纳米气泡。研究表明,在一定压力下(414 kPa),通过加压溶气释放法将不同气体(空气、氧气、氮气)溶解于去离子水溶液中处理1 h后获得的微纳米气泡的尺寸分别为340、150、300 nm,并且溶液的Zeta电位分别为-28、-38和-45 mV,其均小于25 mV说明形成的微纳米气泡稳定性较好^[8]。此外,通过加压溶气释放法将空气(200 kPa)分散到油溶液中,其形成的微纳米气泡的尺寸分布范围为100~200 nm之间,数量达到每毫升 1.07×10^8 个^[9]。

2.3 电化学法

采用电解水的方法形成微纳米气泡。将正负电极插入到溶液中,通过向电极施加一定的电压而导致正电极表面形成氧纳米气泡,而负电极表面形成氢纳米气泡。研究表明,采用钛电极制备的电极在电解水过程中,能够在阳极表面形成30 nm的氧气微纳米气泡。而电极界面所产生的微纳米气泡的数量和尺寸则与电压大小、电解时间、电极表面性质和溶液特性等因素相关,一般微纳米气泡的浓度随着电解电压、电解时间、溶液中离子浓度的增加而提高,而随着溶液温度的降低而增加^[10]。此外,有研究同时表明,电解过程中,不仅微纳米气泡的浓度随着电解液离子浓度增加而升高,而且形成其氢气和氧气微纳米气泡的尺寸也会随着离子浓度的增加而增大^[11]。

2.4 超声法

当超声功率足够大时,超声波在液体介质传输过程中会导致液体介质受到空化压力,引起溶液中存在的气体因空化压力而达到过饱和状态形成尺寸在微纳

米级的空化气泡。研究表明,当超声频率为 40 kHz,功率为 300 W,处理温度为 25 °C 条件下处理纯水 1 min,能够得到尺寸为 100 nm 左右的微纳米气泡,而当超声处理时间延长,则微纳米气泡的数量则会急剧减少,而尺寸会随之增大^[12]。此外,研究表明,纳米气泡浓度随着超声波功率的增加和频率的降低而增加^[13]。

2.5 溶剂交换法

当气体溶解度高的溶液中混合气体溶解度低的溶剂时,导致两种溶液界面处气体达到过饱和状态,由于溶解气体来不及逸散而以微纳米气泡的形式析出。研究表明,当乙醇与纯水以 10:100 的体积比进行混合时,能够形成数量达每毫升 2×10^9 个的平均尺寸为 86 nm 的微纳米气泡,并且随着乙醇-水体积比的增加,纳米气泡的尺寸趋向于更小。一般都是利用有机溶液来交换纯水溶液来实现微纳米气泡的产生。然而,有研究表明采用一定浓度的氯化钠溶液来替换纯水也可以形成稳定的微纳米气泡,当氯化钠浓度超过 0.15 mol/L 开始形成微纳米气泡,并且随着氯化钠的浓度 (0.15~2.0 mol/L) 升高,形成纳米气泡的数量会增加,尺寸会随之降低^[14]。

3 微纳米气泡的特性

3.1 稳定性高

根据 Young-Laplace 方程,气泡内部所受压力能够通过公式 (1) 计算。根据该公式,能够分析出纳米气泡内部所受压力 P 要比大气压力 (P_0) 大,这势必会引起微纳米气泡中气体向溶液中扩散,导致微纳米气泡的消失,根据纳米气泡尺寸为 100 nm,计算得到的微纳米气泡存在的时间仅为 80 ms。但是目前研究表明,微纳米气泡在合适的条件下可以在液体中具有较高的稳定性能够在溶液中存在长达数小时、几天、甚至更长时间。研究者提出微纳米气泡的稳定性的可能原因取决于阴离子在界面上的选择性吸附。在纳米尺度上,吸附在微纳米气泡界面上的离子会产生静电斥力,从而平衡表面张力产生的压缩力,即静电斥力模型。气泡带负电荷表面的静电斥力可以与表面张力引起的拉普拉斯压力相平衡,导致微纳米气泡的相对稳定^[15],该过程可以根据公式 (2) 所表示。已有研究表明,在纯水中 (pH 值 7.0) 微纳米气泡的 Zeta 电位 (ZP) 大约为 -40 mV。此外,ZP 值不仅阻止了微纳米气泡的聚集和聚结,还通过降低表面张力降低了每个气泡内的内部压力。异常的稳定性和寿命是微纳米气泡的显著特征,使其能够随水流迁移,并在溶解阶段提供连

续的气体供应。由于直径较小,微纳米气泡比相同体积的大气泡具有更大的比表面积和更高的传质效率,从而显著提高了气体的溶解性^[16]。

$$P = P_0 + \frac{2\gamma}{R} \quad (1)$$

式中:

P ——纳米气泡内部所受压力, Pa;

P_0 ——大气压力, Pa;

γ ——气-液界面张力, N/m;

R ——纳米气泡半径, m;

$$P = P_0 + \frac{2\sigma}{R} - \frac{\epsilon\zeta^2}{R^2} \quad (2)$$

式中:

P ——纳米气泡内部所受压力, Pa;

P_0 ——气泡外液体压力, Pa;

σ ——表面张力, N/m;

R ——气泡半径, m;

ϵ ——介电常数, F/m;

ζ ——Zeta 电位, V。

3.2 Zeta 电位

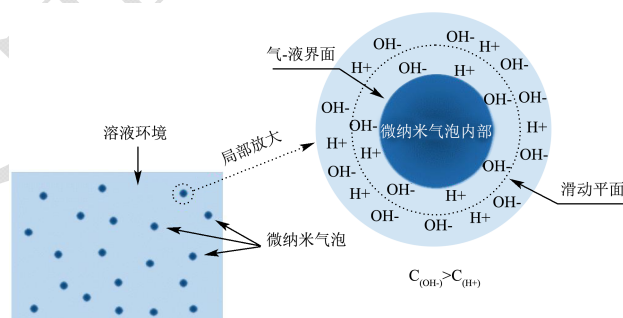


图 2 微纳米气泡微观结构示意图

Fig.2 Schematic of microstructure of micro-nano gas bubbles

Zeta 电位的测定是纳米分散特性表征的基本测量方法之一。悬浮态的微纳米气泡的 Zeta 电位被认为是边界层 (称为滑动面) 的物理特性,该边界层将气泡界面上的反离子与本体溶液之间形成的双层分隔开。Zeta 是通过测定气泡与其他液滴或颗粒之间的电势或相互作用来预测水溶液中的稳定性的重要指标。如果悬浮系统中的所有气泡或颗粒的 Zeta 电位绝对值越高,则表明其稳定性越好^[17]。研究表明在溶液 pH 值为 2~12 时,微纳米气泡的 Zeta 通常为负值,这可能是由于过量的羟基离子在气-液界面,而氢离子的水化能比羟基离子的高,氢离子很可能停留在液相,而羟基离子将暴露于气相,其微观结构示意图如图 2 所示。表面活性剂在微纳米气泡界面上的吸附和表面电离是 Zeta 值变化的典型机理^[18]。研究表明,阳离子表面活

性剂能产生带正电荷的气泡，而阴离子和非离子表面活性剂能促进带负电荷气泡的产生^[19]。

3.3 自由基的形成

自由基是由超声诱导的空化气泡在动态刺激下被强行压缩而产生的。剧烈崩塌过程中绝热压缩引起的极高温度导致自由基生成。一般认为，产生这种自由基需要极端条件。然而，研究已经证明，在没有强烈动力刺激的情况下，微纳米气泡（直径小于 50 μm ）崩塌也能产生自由基。与超声诱导的空化气泡相比，微气泡在几微秒后剧烈坍塌，几分钟后在水下坍塌。电子自旋共振光谱证实了塌陷的微气泡产生自由基。在微泡崩塌过程中测量到的微泡表面电荷（Zeta 电位）

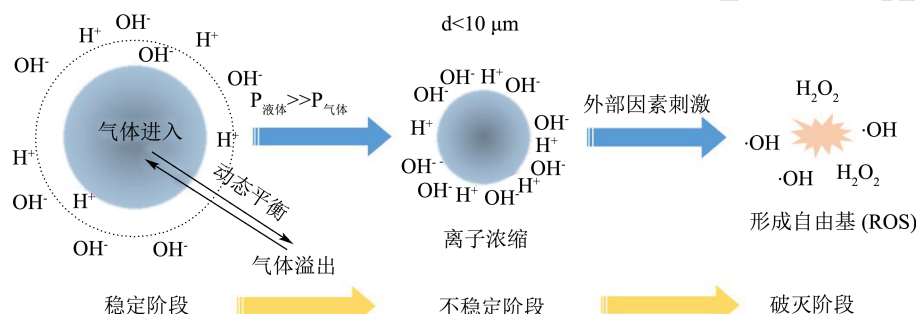


图3 微纳米气泡形成自由基过程示意图

Fig.3 Schematic diagram of the formation of free radicals by micro-nano gas bubbles

4 食品工业中的应用

由于其独特的理化性质和简单的制备方法，微纳米气泡可以在许多领域得到应用。例如，微纳米气泡有很大的表面积，气液界面有较高负 Zeta 电位，并且会因破裂而形成自由基。由于这些特性，微纳米气泡可以通过吸附水中的微生物、重金属离子（阳离子）以及氧化降解有机化合物（如农药和真菌毒素）来应用于饮用水消毒和果蔬清洗等食品加工等过程中。

4.1 降低黏度改善食品加工性能

微纳米气泡可以减少摩擦并影响液体的物理性质，从而增加其分子的流动性。因此，微纳米气泡的存在可能会降低液体的体积粘度。在通过食品加工系统（包括蒸发、膜过滤和喷雾干燥）之前，将平均直径在 100~5 000 nm 范围内的微纳米气泡注入液体乳制品中，可以实现降低液体流量粘度的益处。当微纳米尺度的微小气泡被引入水溶液中时，尤其是含有乳蛋白等带电粒子的液态乳制品，它们会与悬浮蛋白质的带电表面结合，这种相互作用被认为有助于降低液体粘度。这些超细气泡在牛奶蛋白质颗粒之间起到缓冲作用，导致其分离，并防止蛋白质聚集。除了可能降

的增加支持了这一假设，即收缩的气-水界面周围离子浓度的显著增加提供了自由基生成的机制^[20]。该过程中自由基形成机理如图 3 所示。当微纳米气泡的直径小于 10 μm 时，双层膜的电荷密度迅速增加，并在爆炸瞬间达到最高浓度。因此，积累的巨大能量会立即释放出来，产生某种类型的自由基。由于微纳米气泡使用不同的生成方法和气体（ O_2 、 N_2 、 CO_2 和空气），活性氧自由基（ROS）浓度可能会有所不同。这种现象可能与微纳米气泡的外部刺激以及气体和水分子之间的相互作用有关。此外，超声波产生的微纳米气泡比机械搅拌产生的微纳米气泡更有效，因为超声波释放能量来诱导热解反应，并增加 ROS 的浓度^[21]。

低液体通量的粘度，从而潜在地提高许多食品加工的效率外，极小气泡的高传质能力^[22]。当然了考虑到食品特殊性（高营养物质以及某些化学物质稳定性不佳），在使用微纳米气泡时候可以考虑采用一些惰性气体并且控制微纳米气泡的尺寸防止形成 ROS 而影响加工后的食品品质。此外还可以对加工后产品进行脱气处理降低微纳米气泡的数量。

4.2 促进食品浸渍效率

使用平均直径从几百纳米到小于 10 μm 的空气微纳米气泡具有比表面积大、提高气体在液体中的溶解度和高传质能力等独特特性，可以提高液体调味品在食品中的渗透性。与通常需要数小时才能完成的腌制食品的传统方法相比，通过在调味液中加入微纳米气泡，可以在更短的加工时间内实现均匀浸渍。例如，在传统的制作调味煮蛋（无壳）的方法中，液体调味剂只渗透到煮蛋的蛋表面大约需要 3 d。液体调味料中的多溴联苯有助于在 5 h 内实现煮蛋所需的颜色和味道。同样，将煮熟的大豆浸泡在调味料溶液中需要 12 d 或更长时间才能完成正常渗透过程。然而，通过将微纳米气泡加入液体调味料，完全渗透大豆的浸泡时间显著缩短了 80%^[23]。

4.3 提升食物感官特性

在食品中加入足量的空气,即所谓的食品通气,可以提供许多积极影响,如质地变化、风味改变、消化率改善和食品感官属性强化。含气饮料如碳酸饮料以及香槟等都是常见的充气食品。从感官角度来看,已知尺寸小于 10 μm 的颗粒无法单独感知,且气泡的分散会降低每单位体积食物所含能量,因此,添加小气泡有助于获得更健康的产品,消耗的热量更少,味道也相似。此外,由于能够增强含气饮料中二氧化碳等气体的质量传输,接触舌头的小气泡可能会增加饮料的“刺痛”感觉,这种感觉是二氧化碳在碳酸酐酶存在下转化为碳酸形成的,从而提升产品的感官品质。此外由于微纳米气泡在溶液中稳定性高,从而能够延长碳酸饮料开瓶后的产品品质^[24]。因此,在这些食品系统中以微纳米气泡的形式应用不同的食品级气体以增强食品的感官特性。

4.4 增强食品的功能特性

对于微纳米气泡的健康相关应用,近年来,氢气的显著医学特性,如抗氧化、抗凋亡和抗炎能力等引起了人们的广泛关注。由于氢气作为一种具有还原性的小分子气体,能够与机体内的氧化性物质发生反应成为治疗疾病的化学基础。氢气饮品、医用含氢溶液等产品已经成为了氢气医学的热点^[25]。然而,氢气在水中的溶解度并不高。微纳米气泡可以提高气体在水溶液中的溶解度,因此,微纳米氢气在水中的存在量可能比正常情况下要大,在饱和汽水中形成氢-微纳米气泡的可能性很高。

4.5 增强食品冷冻效率

冷冻是食品工业中最常用的工艺之一,并通过超声波和高压变换冷冻等各种新兴技术进行了改进,以提高冷冻食品的质量。这些先进的技术可以制造更小的冰晶尺寸,并减少冷冻所需的时间,提高了冷冻效率。空化气泡的崩溃会产生瞬间高压和微湍流,通过产生大量的核来促进一次和二次成核。在食品相关系统中,已经证明空化的存在可以有效地提高冷冻速率。在蔗糖和麦芽糊精溶液中分散微纳米气泡会显著降低过冷度和冷冻时间^[26,27]。在冷冻过程中引入适当的二氧化碳微纳米气泡 ($2\ 000\times 10^{-6}$) 下,可缩短相变时间和总冷冻时间^[28]。二氧化碳气体可溶于乳脂等疏水性食品系统,也有助于减少无水乳脂的晶体尺寸、增加脂肪晶体数量和硬度^[29]。

4.6 提升蛋白质的分离

微纳米气泡在食品相关应用中的另一个作用是提高蛋白质的分离纯过程。蛋白质作为一种结构灵活的生物大分子在食品成型剂、胶囊剂和制药工业中有着广泛的应用前景^[30]。蛋白质分离纯化过程中可以通过改变溶液的 pH 值、离子强度温度等可以促进蛋白质疏水结构外露,促进蛋白质分子之间的疏水作用力而凝聚而得到分离。而研究表明在蛋白质提纯过程中向非极性系统被注入直径约为 100 nm 的二氧化碳微纳米气泡,获得的疏水蛋白在液体表面的纯度显著提高了 2.8 倍,疏水蛋白会与二氧化碳分子相互作用,在纳米尺度上产生稳定的超细气泡,气泡被疏水蛋白壳包围,由于密度低微纳米气泡会迁移到界面,导致疏水蛋白转移到液体系统的上层,从而提高了蛋白质的纯度^[31,32]。因此,疏水蛋白会在含有大多数微纳米气泡的表面上相富集。

4.7 杀菌消毒

在果蔬生长期间,微生物可通过土壤、水和种植操作诱发感染。此外,采摘、运输和食品加工很容易受到微生物感染,尤其是大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、鼠伤寒沙门氏菌和黄曲霉缩短果蔬的保质期,并带来食品安全问题^[33-35]。研究表明,利用微酸性次氯酸微纳米气泡(有效氯含量为 22.4 mg/L)处理上海青 9 min,对大肠杆菌(8099)、金黄色葡萄球菌(ATCC 6538)和沙门氏菌(CMCC(B) 50040)的杀灭率依次为 99.96%、98.00%和 98.13%,对葡萄表面的相应微生物杀菌率也高于 97%以上^[36]。此外,有研究表面光臭氧微纳米气泡处理(4 mg/L, 5 min)菠菜,能够降低贮藏期间(20 $^{\circ}\text{C}$, 8 d)细胞膜损伤和丙二醛的积累,延缓蔬菜中叶绿素和维生素 C 的损失,降低菠菜感官性质和营养品质的劣变^[37]。另外,研究表明微纳米气泡处理能够降解农残,从而降低果蔬加工过程中农残对人体健康的影响^[38-40]。因此该技术在提高采后果蔬食用安全性方面,尤其是净菜加工以及果蔬清洗加工后污水处理方面表现出巨大的潜力。

4.8 促进种子萌发

微纳米气泡的另一个应用是促进种子发芽生长。微纳米气泡可以促进大麦种子萌发过程中产生羟基自由基,并通过促进细胞伸长促进种子生长。在平均粒径约为 110 nm 的空气和氮气微纳米气泡中培养 17 h 后,大麦种子的发芽率(58%)高于同期在蒸馏水中培

养的发芽率(28%)。而在番茄、胡萝卜、蚕豆和莴苣等不同植物的种子在含有微纳米气泡的水中的发芽率比在自来水中的发芽率高 6%~25%^[41]。因此,微纳米气泡技术能够用于提高发芽类食品的加工过程,例如啤酒发酵过程中大麦芽的制备以及芽菜生产过程中。

5 结论和展望

本文介绍了微纳米气泡产生的技术原理、制备方法、特性以及在食品工业中的应用。相比于普通气泡,微纳米气泡表现出了较高的稳定性、气体溶解性、物质交换性。此外,当微纳米气泡破灭时,其能够形成活性氧自由基,包括羟自由基和双氧水等。而这些特性对于其应用于不同的食品领域具有潜在的应用价值,例如提升食品加工特性、食品感官品质、食品原料安全性等方面。但不同微纳米气泡制备方法对于微纳米气泡形成的性质具有明显的影响,而微纳米气泡的尺寸、Zeta 电位以及形成自由基的能力都与其应用密切相关。因此,对于微纳米气泡的发展则需要关注精准的微纳米气泡制备方法,即能够形成微纳米气泡尺寸和数量恒定的方法。此外,需要开发能够在线快速检测到微纳米气泡尺寸和数量等检测方法,例如能够采用可见分光光度法等快速检测技术。另外,有必要进一步探索微纳米气泡在食品工业的用途,并深入了解作用机理以及微纳米气泡参数与应用效果之间的关系。最后,随着食品碳排放监管和重视力度的不断加大,需要分析微纳米气泡在食品工业中应用的能量消耗的情况,为其未来的应用提供碳经济数据支撑。随着对微纳米气泡机理以及精准制备方法的深入探索,微纳米气泡技术在食品工业将具有广阔的应用空间。

参考文献

[1] Hamamoto S, Takemura T, Suzuki K, et al. Effects of pH on nano-bubble stability and transport in saturated porous media [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, 208: 61-67

[2] Hu L, Xia Z. Application of ozone micro-nano-bubbles to groundwater remediation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 342: 446-453

[3] Nirmalkar N, Pacek A W, Barigou M. Interpreting the interfacial and colloidal stability of bulk nanobubbles [J]. *Soft Matter*, 2018, 14(47): 9643-9656

[4] 潘溪,孙舶洋,魏炜,等.微纳米曝气-生态浮岛联合技术处理氮磷污染水体[J].*环境工程*,2020,38(5):49-53

[5] 张溪,蓝蔚青,迪丽菲拉·库尔班,等.不同减菌预处理对鲜南美白对虾虾仁冷藏期间品质变化的影响[J].*食品与发酵工业*,2020,46(12):158-165

[6] Fan W, Li Y, Wang C, et al. Enhanced photocatalytic water decontamination by micro-nano bubbles: measurements and mechanisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(10): 7025-7033

[7] Ikeura H, Kobayashi F, Tamaki M. Removal of residual pesticide, fenitrothion, in vegetables by using ozone microbubbles generated by different methods [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 103(3): 345-349

[8] Nakatake Y, Kisu S, Shigyo K, et al. Effect of nano air-bubbles mixed into gas oil on common-rail diesel engine [J]. *Energy*, 2013, 59: 233-239

[9] Ushikubo F Y, Enari M, Furukawa T, et al. Zeta-potential of micro- and/or nano-bubbles in water produced by some kinds of gases [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2010, 43(26): 283-288

[10] Chen Q, Wiedenroth H S, German S R, et al. Electrochemical nucleation of stable N₂ nanobubbles at Pt nanoelectrodes [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137: 12064-12069

[11] Postnikov A V, Uvarov I V, Lokhanin M V, et al. Electrically controlled cloud of bulk nanobubbles in water solutions [J]. *Plos One*, 2017, 12: e0181727

[12] Canavese G, Ancona A, Racca L, et al. Nanoparticle-assisted ultrasound: A special focus on sonodynamic therapy against cancer [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 340: 155-172

[13] Yamashita T, Ando K. Low-intensity ultrasound induced cavitation and streaming in oxygen-supersaturated water: Role of cavitation bubbles as physical cleaning agents [J]. *Ultrasonics-Sonochemistry*, 2019, 52: 268-279

[14] Qiu J, Zou Z L, Wang S, et al. Formation and stability of bulk nanobubbles generated by ethanol-water exchange [J]. *Chemphyschem*, 2019 18(10): 1345-1350

[15] Ulatowski K, Sobieszuk P. Gas nanobubble dispersions as the important agent in environmental processes - generation methods review [J]. *Water and Environment Journal*, 2020, 34: 772-790

[16] Sun Y J, Xie G Y, Peng Y L, et al. Stability theories of nanobubbles at solid-liquid interface: A review [J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 495: 176-186

[17] 田立平,鞠玲,王晓波,等.微纳米气泡制备技术及应用研究[J].*能源与环境*,2020,4:69-73

[18] 刘玉德,吴刚,张浩,等.微纳米气泡的特性及其在果蔬中的应用[J].*食品科学技术学报*,2017,35(3):83-88

[19] Calgaroto S, Wilberg K Q, Rubio J. On the nanobubbles

- interfacial properties and future applications in flotation [J]. Minerals Engineering, 2014, 60(6): 33-40
- [20] 孙乐,张锋华,杨卫民.微纳米气泡形成羟基自由基的研究进展[J].净水技术,2021,40(2):37-41
- [21] Xu Q Y, Nakajima M, Ichikawa S, et al. A comparative study of microbubble generation by mechanical agitation and sonication [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2008, 9: 489-494
- [22] Zhang Z H, Wang S, Cheng L N, et al. Micro-nano-bubble technology and its applications in food industry: A critical review [J]. Food Reviews International, 2022. DOI: 10.1080/87559129.2021.2023172
- [23] Thi Phan K K, Truong T, Wang Y, et al. Nanobubbles: Fundamental characteristics and applications in food processing [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 95: 118-130
- [24] Saint-Eve A, Déléris I, Feron G, et al. How trigeminal, taste and aroma perceptions are affected in mint-flavored carbonated beverages [J]. Food Quality & Preference, 2010, 21(8): 1026-1033
- [25] Liu S, Oshita S, Thuyet D Q, et al. Antioxidant activity of hydrogen nanobubbles in water with different reactive oxygen species both *in vivo* and *in vitro* [J]. Langmuir, 2018, 34(39): 11878-11885
- [26] Adhikari B M, Tung P V, Truong T, et al. Water crystallisation of model sugar solutions with nanobubbles produced from dissolved carbon dioxide [J]. Food Biophysics, 2019, 14: 403-414
- [27] Zhu Z, Sun D W, Zhang Z, et al. Effects of micro-nano bubbles on the nucleation and crystal growth of sucrose and maltodextrin solutions during ultrasound-assisted freezing process [J]. LWT, 2018, 92: 404-411
- [28] Adhikari B M, Tung V P, Truong T, et al. Impact of in-situ CO₂ nano-bubbles generation on freezing parameters of selected liquid foods [J]. Food Biophysics, 2020, 15(1): 97-112
- [29] Adhikari B M, Truong T, Prakash S, et al. Impact of incorporation of CO₂ on the melting, texture and sensory attributes of soft-serve ice cream [J]. International Dairy Journal, 2020, 109: 104789
- [30] Kurz F, Reitberger V, Hengst C, et al. Correlation between physico-chemical characteristics of particulated β -lactoglobulin and its behavior at air/water and oil/water interfaces [J]. Foods, 2021, 10(6): 1426
- [31] Liao C W, Yeh Y W, El-Shall H, et al. Biotechnology approach to mineral separation via phase flotation collectors [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(7): 9795-9806
- [32] Zhu J, An H, Alheshibri M, et al. Cleaning with bulk nanobubbles [J]. Langmuir, 2016, 32(43): 11203-11211
- [33] De Corato U. Improving the shelf-life and quality of fresh and minimally-processed fruits and vegetables for a modern food industry: A comprehensive critical review from the traditional technologies into the most promising advancements [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(6): 940-975
- [34] Odeyemi O A, Alegbeleye O O, Strateva M, et al. Understanding spoilage microbial community and spoilage mechanisms in foods of animal origin [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(2): 311-331
- [35] Ayofemi Olalekan Adeyeye S. Aflatoxigenic fungi and mycotoxins in food: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(5): 709-721
- [36] 张思琦,刘颖,林秋霞,等.微酸性次氯酸微纳米气泡净化机对食品和物品的消毒效果研究[J].中国消毒学杂志,2020,37(10):741-743,747
- [37] 张慧娟,薛晓莉,吴娜,等.微纳米臭氧气泡水在果蔬清洗上的应用[J].农村科技,2017,10:54-56
- [38] 绳以健,沈灿铎,耿占辉,等.新型果蔬深度清洁处理技术研究[J].食品科学技术学报,2015,33(1):75-78
- [39] Wang C, Lin C Y, Liao G Y. Feasibility study of tetracycline removal by ozonation equipped with an ultrafine-bubble compressor [J]. Water, 2021, 13(8): 1058
- [40] Ikeura H, Hamasaki S, Tamaki M. Effects of ozone microbubble treatment on removal of residual pesticides and quality of persimmon leaves [J]. Food Chemistry, 2013, 138(1): 366-371
- [41] Ahmed A K A, Shi X, Hua L, et al. Influences of air, oxygen, nitrogen, and carbon dioxide nanobubbles on seed germination and plant growth [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66: 5117-5124