

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80356

真空高压脉动技术对咸鸭蛋腌制速率及品质的影响

耿亚慧¹ 苗欢¹ 侯丽媛¹ 刘鑫汉¹ 邹燕子¹ 张卫鹏² 巨浩羽¹

(1. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061; 2. 北京工商大学计算机与人工智能学院, 北京 100048)

摘要: [目的] 提升鸭蛋腌制速率与品质。[方法] 应用真空高压脉动技术腌制鸭蛋, 并与常压浸泡腌制(对照组)进行比较, 探究腌制时间、高压幅值、真空保持时间和高压保持时间对咸鸭蛋含盐量、蛋黄指数和蛋黄出油率的影响。[结果] 在真空度 90 kPa、腌制液为饱和食盐水(NaCl 质量分数 $\geq 25\%$) 条件下, 最优工艺参数为脉动比(真空保持时间/高压保持时间) 6 min/20 min、高压幅值 110 kPa、腌制时间 72 h, 该条件下咸鸭蛋破损少且感官评价最佳, 蛋清含盐量、蛋黄含盐量、 h^* 、蛋黄指数和蛋黄出油率分别为 5.05%、2.14%、79.42、0.89 和 17.27%, 腌制速率较常压浸泡腌制提高近 10 倍。[结论] 相较于传统的常压浸泡腌制, 真空高压脉动技术腌制能在缩短腌制时间的同时, 显著提升咸鸭蛋品质($P < 0.05$)。

关键词: 咸鸭蛋; 真空高压脉动技术; 腌制; 含盐量; 品质

Effect of vacuum high pressure pulsation technology on pickling speed and quality of salted duck eggs

GENG Yahui¹ MIAO Huan¹ HOU Liyuan¹ LIU Xinhan¹ ZOU Yanzi¹ ZHANG Weipeng² JU Haoyu¹

(1. College of Bioscience and Engineering, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] This study aims to enhance the pickling speed and quality of salted duck eggs. [Methods] The vacuum high pressure pulsation technology is applied to salted duck eggs pickling. The effects of various parameters, including pickling duration, high pressure amplitude, vacuum holding time, and high pressure holding time on the salt content in duck eggs, yolk index, and yolk oiling rate are investigated by comparing with normal pressure soaking pickling (control group). [Results] Under a vacuum of 90 kPa and saturated brine conditions (NaCl mass fraction $\geq 25\%$), the optimal process involves a high-pressure amplitude at 110 kPa, a pulsation ratio (vacuum holding time/high pressure holding time) of 6/20 min, along with a total pickling duration of 72 hours. Under these conditions, the salted duck eggs are less damaged and have the best sensory evaluation. The salt content in egg white and yolk is 5.05% and 2.14%, respectively. The h^* value is recorded at 79.42, while the yolk index and the yolk oiling rate are 0.89 and 17.27%, respectively. Notably, the pickling speed is nearly 10 times shorter than that of normal pressure soaking pickling. [Conclusion] The vacuum high pressure pulsation technology can significantly reduce the pickling duration while improving the quality of salted eggs when compared to normal pressure soaking pickling ($P < 0.05$).

Keywords: salted duck eggs; vacuum high pressure pulsation technology; pickling; salt content; quality

咸鸭蛋, 亦称青皮、青蛋, 是中国独具特色的传统蛋制品, 其加工历史悠久, 具有风味独特、食用便捷、营养丰富且易于贮藏等特点^[1-3]。传统咸鸭蛋腌制方法主要有草灰法、盐泥涂布法和盐水浸渍法 3 种^[4-5]。传统腌制方

基金项目: 国家自然科学基金(编号:32202233, 32102141); 河北省高等学校科学技术研究项目(编号:BJK2023047); 河北经贸大学校级研究生创新资助项目(编号:XJCX202583, XJCX202586)

通信作者: 巨浩羽(1989—), 男, 河北经贸大学副教授, 博士。E-mail: ju56238@163.com

收稿日期: 2025-04-16 **改回日期:** 2025-10-27

引用格式: 耿亚慧, 苗欢, 侯丽媛, 等. 真空高压脉动技术对咸鸭蛋腌制速率及品质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 192-197.

Citation: GENG Yahui, MIAO Huan, HOU Liyuan, et al. Effect of vacuum high pressure pulsation technology on pickling speed and quality of salted duck eggs[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 192-197.

法加工原理简单,易操作,但存在加工周期长、食用不方便、咸蛋质量不易控制等弊端^[6-7]。杨哪等^[8]采用磁电辅助技术腌制鸭蛋,该技术在缩短腌制时间的同时,对鸭蛋盐分与蛋黄出油率有显著增效作用;Cheng等^[9]研究表明,经电压脉冲电场(PEF)处理的鸭蛋腌制周期可缩短到20 d内,且鸭蛋的盐含量与蛋黄出油率显著增加。但这两种技术所需设备能耗大、造价高,尚不适用于禽蛋制品的大规模工业化生产。

此外,有学者对减压腌制^[10-11]、压力脉动腌制^[12-13]等新型腌制技术进行了逐步探索,这些技术主要通过调节膜内外渗透压差,增强盐分在物料中的扩散速率,从而实现快速腌制。季玲等^[11]研究表明,在温度23℃,真空度0.01 MPa下,每天维持真空度时间24 h,制得的松花蛋腌制时间较传统腌制方法的缩短了74%。压力脉动技术包括真空脉动和高压脉动两种,真空脉动是指压力容器内压力在真空和常压之间交替,高压脉动是指高压和常压之间交替变化。袁诺等^[12]研究表明,在高压/常压时间比4 min/8 min、高压幅值50 kPa条件下,该技术能提高腌制品质,加快腌制速率且较常压腌制时间缩短了62.5%。邹燕子等^[13]采用真空脉动技术腌制鸡蛋,在饱和食盐水、脉动比(真空/常压)12 min/15 min、真空度维持90 kPa下,咸鸡蛋品质佳且腌制速率为常压腌制的16倍。Wang等^[14]采用脉冲真空腌制羊肉,在真空-70 kPa持续15 min,大气压101 kPa持续15 min,然后再次真空-70 kPa持续15 min,循环3,6,9次条件下,可提高腌制效率。综上,真空脉动和高压脉动均是通过与常压进行周期性交替循环改变膜内外渗透压差来实现物料的快速腌制。在真空脉动和高压脉动的基础之上,若进一步增大压力梯度,采用真空与高压交替循环即真空高压脉动技术,有望在禽蛋腌制方面达到更高效、可控的腌制过程。目前,有关真空高压脉动技术在鸭蛋腌制领域的研究尚未见报道。

试验拟采用真空高压脉动(VHPP)技术腌制鸭蛋,探究高压幅值(HPA)、真空保持时间(VHT)、高压保持时间(HPHT)、腌制时间(PT)对鸭蛋蛋清盐含量、蛋黄盐含量及腌制品质的影响,以实现咸鸭蛋品质的提升,为该技术在咸鸭蛋产业化加工中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料

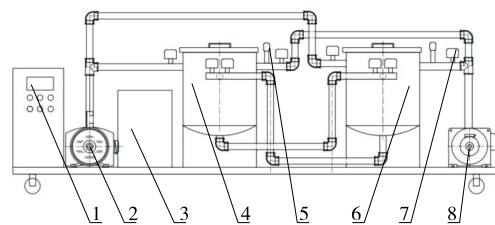
鲜鸭蛋:大小均匀,单个重约70 g,市售;
精制食盐:中国盐业股份有限公司。

1.2 仪器与设备

色差仪:SC-10型,广东三恩时科技有限公司;
电子数显盐度计:SSM 1000型,广州广电计量检测股份有限公司;
电子天平:BS 223S型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;
电动打蛋器:S-LD150型,九阳股份有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:101-4FD型,上海沪粤明科学仪器有限公司;

真空高压脉动试验装置(见图1):河北经贸大学食品加工工程实验室自制。



1. 控制系统 2. 真空泵 3. 水箱 4. 腌制罐 A 5. 压力传感器 6. 腌制罐 B 7. 电磁阀 8. 空气压缩机

图1 真空高压脉动试验装置结构简图

Figure 1 Structure of vacuum high pressure pulsation device

1.3 方法

1.3.1 样品制备

(1) 常压浸渍腌制(对照组):选取大小相近、无破损的鲜鸭蛋,清洗干净,干燥后浸泡在盐水溶液中(NaCl质量分数 $\geq 25\%$),密封,25~27℃下腌制一定时间,定期取样测定,以对照组鸭蛋腌制成熟确定腌制时间。

(2) 真空高压脉动(VHPP)技术腌制:选取大小相近、无破损的鸭蛋,清洗干净,干燥后放入腌制罐中,倒入腌料(NaCl质量分数 $\geq 25\%$ 的饱和食盐水溶液),密封,设定腌制参数。在真空度(90 \pm 2) kPa、温度25~27℃下,参照文献[14-15]的方法进行单因素试验,固定HPA为165 kPa,VHT为6 min,HPHT为20 min,PT为72 h,每组试验重复3次,每隔12 h随机取样。分别考察HPA(110, 125, 140, 155, 165 kPa)、VHT(6, 10, 14, 17, 20 min)、HPHT(6, 10, 14, 17, 20 min)和PT(12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96 h)对咸鸭蛋含盐量的影响。以接近对照组含盐量为依据,选择较好的腌制条件,进一步考察真空高压脉动腌制对咸鸭蛋品质(色泽、蛋黄指数、蛋黄出油率)的影响。

1.3.2 指标测定

(1) 蛋黄指数:蛋黄高度与直径比值^[16]。

(2) 蛋清含盐量和蛋黄含盐量:参照文献[13]的方法并修改。取咸鸭蛋样品破壳后,分离蛋清和蛋黄,分别充分搅拌均匀后各取5 g,按料液比1:10(g/mL)用去离子水进行稀释,混匀,采用电子数显盐度计测定盐度,记录测量结果后扩大10倍作为该样品的实际含盐量。

(3) 蛋黄色泽:参照文献[12-13],按式(1)计算色调角。

$$h^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \times \frac{180}{\pi}, \quad (1)$$

式中:

h^* ——色调角;

a^* ——绿/红值;

b^* ——蓝/黄值。

(4) 蛋黄出油率:参照文献[17],按式(2)计算蛋黄出油率。

$$C_{oil} = \frac{M_2 - M_1}{M_1 - M_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

C_{oil} ——蛋黄出油率,%;

M_0 ——试验前定性滤纸恒质量,g;

M_1 ——蛋黄及定性滤纸质量,g;

M_2 ——蛋黄取下后定性滤纸恒质量,g。

(5) 感官评价:参照文献[17-19]的方法并修改。由 15 人组成评价小组,按表 1 对品质较好的咸鸭蛋进行感官评价。

表 1 感官评价评分细则表

Table 1 Sensory evaluation scoring rules

指标	评分标准	满分
蛋壳	蛋壳完整洁净,无斑点,无霉变	1.5
蛋白	蛋白白净,细嫩	1.5
	咸度适中	1.0
蛋黄	蛋黄松沙含油,较结实	1.0
	咸度适中	1.0
风味	咸度适中,蛋白细嫩,蛋黄松沙可口,有咸鸭蛋固有的香味和滋味	4.0

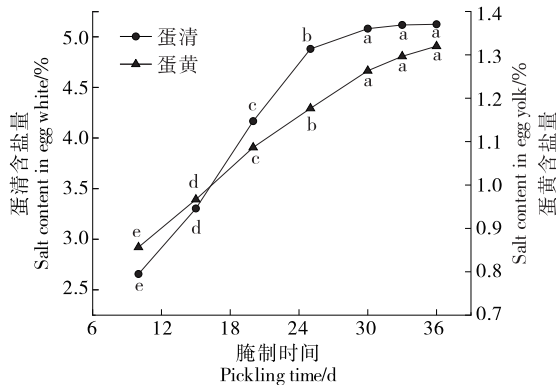
1.4 数据分析

利用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行数据处理,结果以平均值±标准差表示, $P < 0.05$ 为差异显著;利用 Origin 2025 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 常压盐水浸渍法 PT 对鸭蛋含盐量的影响

由图 2 可知,腌制初期,随着 PT 的延长,蛋清和蛋黄的含盐量逐渐升高。腌制至 30 d 后,盐分的生长趋于缓



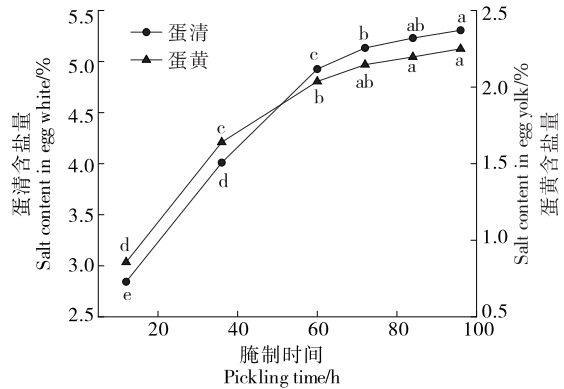
小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 常压盐水浸渍法腌制鸭蛋含盐量随时间的变化
Figure 2 Change of salt content in duck eggs pickled by normal pressure brine dipping method over time

慢,蛋清与蛋黄的含盐量逐步趋于平衡,变化不明显。此时,样品的含盐量与蒲跃进等^[20]在静态水下腌制成熟的鸭蛋含盐量相近,表明传统常压腌制 30 d 的鸭蛋已基本成熟。这主要是因为腌制初期鸭蛋与腌制液之间存在一定的盐浓度差,促进了盐分的快速渗透。随着腌制的进行,浓度差逐渐缩小,质量传递速率随之降低,最终趋于动态平衡^[21]。此外,腌制过程中蛋清的含盐量始终高于蛋黄,这是由于盐分在扩散过程中需先通过蛋壳与蛋白层,逐层向内渗透,进入蛋黄较为缓慢;另一方面,蛋黄中脂肪含量较高,可能对盐分的进一步渗透与扩散形成阻碍,其含盐量相对较低。因此,选择腌制 30 d 作为传统常压浸泡腌制(对照组)的参照时间。该条件下,咸鸭蛋蛋清和蛋黄的含盐量分别为 5.08% 和 1.26%,以此值作为鸭蛋含盐量标准。

2.2 VHPP 技术腌制对鸭蛋含盐量的影响

2.2.1 PT 对鸭蛋含盐量的影响 由图 3 可知,腌制前 72 h,蛋清和蛋黄的含盐量迅速上升,渗透速度较快。当腌制时间 > 72 h 时,含盐量的增长速率减缓,趋于稳定,说明此时鸭蛋与腌制液之间的盐分迁移接近动态平衡,盐分渗透速率变慢。因此,选择腌制 72 h 作为真空高压脉动腌制的最佳时长。该条件下,蛋清和蛋黄的含盐量分别为 5.13% 和 2.15%,与对照组相比,采用 VHPP 技术腌制样品的蛋清含盐量已接近对照组,而蛋黄的含盐量明显高于对照组。综上,VHPP 技术不仅显著缩短了 PT(约为对照组的 1/10),还有效促进了盐分向蛋黄内部渗透。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 腌制时间对鸭蛋含盐量的影响

Figure 3 Effect of pickling duration on salt content of duck eggs

2.2.2 HPA 对鸭蛋含盐量的影响 由图 4 可知,咸鸭蛋蛋清含盐量和蛋黄含盐量随 HPA 的增加无显著性变化,不同 HPA 下蛋清含盐量与对照组(5.08%)接近,而蛋黄含盐量显著高于对照组 ($P < 0.05$)。随着压力的升高,165 kPa 下的蛋清与蛋黄含盐量略高于 110 kPa 下的,表明适当的 HPA 能有效促进盐分向鸭蛋内部渗透,而过高的 HPA 对提高咸鸭蛋蛋清与蛋黄的含盐量的作用有限。其原因可能是外加压力

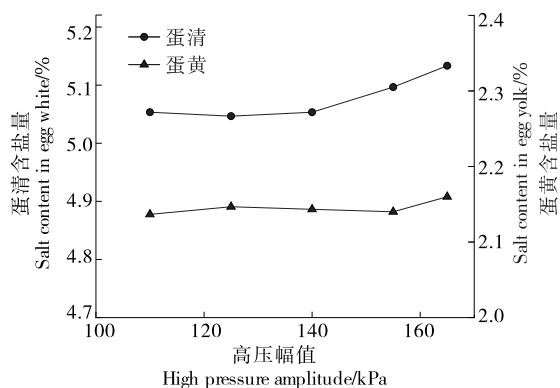


图4 高压幅值对鸭蛋含盐量的影响

Figure 4 Effect of high pressure amplitude on salt content of duck eggs

到达一定水平后,咸鸭蛋蛋清中的蛋白质发生变性,使其组织结构趋于致密,阻碍了盐分的进一步渗透与扩散。

2.2.3 VHT对鸭蛋含盐量的影响 由图5可知,当VHT为6 min时,蛋清的含盐量最高为5.13%。随着VHT的增加,蛋清的含盐量逐渐降低,达到4.47%(10 min)、1.24%(14 min)和1.22%(17 min)。当VHT为20 min时,蛋清的含盐量上升至4.73%。当VHT为6 min时,蛋黄的含盐量为2.15%,明显高于其他时间段。当VHT为10 min时,蛋黄的含盐量降至1.62%。当VHT为14,17 min时,蛋黄的含盐量进一步下降至1.04%和1.07%。当VHT为20 min时,蛋黄的含盐量回升至1.70%,但仍低于6 min时的。这可能是在VHPP腌制过程中,随着VHT的增加,腌制液中的盐分逐渐渗透到蛋内,但VHT较长可能导致一部分盐分被排出,影响盐分的吸收。在较长的VHT下,蛋清蛋白质的结构变化可能影响盐的吸收和保持,使含盐量发生变化,故VHT为20 min时含盐量虽有回升但仍低于6 min时的;而14,17 min时蛋清的含盐量较低,可能是鸭蛋内外渗透压达到平衡,盐分主要依赖蛋壳及蛋壳膜进行缓

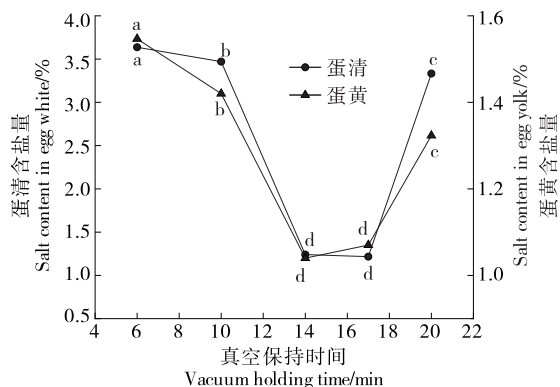
小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图5 真空保持时间对鸭蛋含盐量的影响

Figure 5 Effect of vacuum holding time on salt content of duck eggs

慢扩散,影响了盐分的渗透效率。综上,VHT选择6 min更有利于加快腌制速率。

2.2.4 HPHT对鸭蛋含盐量的影响 由图6可知,当HPHT为6 min时,蛋清蛋黄的含盐量最低分别为3.64%和1.55%。随着HPHT的增加,蛋清蛋黄含盐量逐渐增加,分别为3.92%(10 min)、4.27%(14 min)、4.65%(17 min)、5.13%(20 min)和1.66%(10 min)、1.85%(14 min)、2.04%(17 min)和2.15%(20 min)。HPHT对蛋清蛋黄含盐量有显著影响($P < 0.05$),随着HPHT的增加,腌制液中的盐分逐步向蛋清蛋黄中渗透,含盐量逐渐升高。因此,选择HPHT为20 min可使咸鸭蛋的含盐量达到较高水平。

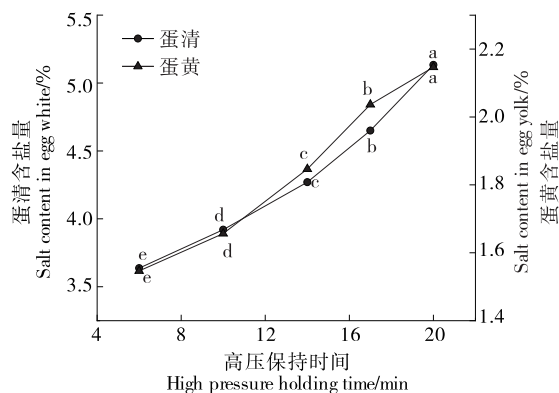
小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图6 高压保持时间对鸭蛋含盐量的影响

Figure 6 Effect of high pressure holding time on salt content of duck eggs

综上,PT为72 h,HPA为110~165 kPa下,VHPP腌制咸鸭蛋蛋清的含盐量与对照组的接近,在此条件下,进一步考察VHPP腌制对咸鸭蛋品质的影响。

2.3 VHPP腌制对鸭蛋品质的影响

2.3.1 对鸭蛋黄色泽的影响 由表2可知,与对照组相比,VHPP腌制的 L^* 值和 b^* 值差异显著($P < 0.05$),说明VHPP腌制对蛋黄的亮度影响较大,且有利于蛋黄橘黄色的产生,使蛋黄产生出油现象^[22];VHPP腌制的 a^* 值有所

表2 不同加工条件下鸭蛋黄的色泽[†]

Table 2 Color of duck egg yolk under different processing conditions

HPA/kPa	L^*	a^*	b^*	h^*
对照组	23.96 ± 0.18 ^c	16.77 ± 0.46 ^a	39.26 ± 0.37 ^f	66.87 ± 0.73 ^f
110	55.07 ± 1.21 ^b	11.18 ± 0.63 ^{de}	59.84 ± 0.26 ^b	79.42 ± 0.54 ^b
125	54.89 ± 0.75 ^b	11.83 ± 0.15 ^d	57.15 ± 0.80 ^c	78.30 ± 0.29 ^c
140	52.63 ± 1.38 ^c	13.09 ± 0.47 ^c	54.24 ± 0.38 ^d	76.44 ± 0.39 ^d
155	50.94 ± 0.44 ^d	14.91 ± 0.96 ^b	50.80 ± 0.50 ^e	73.65 ± 0.85 ^c
165	57.31 ± 0.44 ^a	10.24 ± 0.41 ^e	62.87 ± 0.23 ^a	80.75 ± 0.39 ^a

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

下降,有利于降低咸蛋蛋黄的绿/红值,减少色泽的劣变;而 VHPP 腌制的 h^* 值高于对照组,有利于咸鸭蛋喜人橘黄色的产生。随着 HPA 的增加,蛋黄的 L^* 值和 b^* 值呈下降趋势,但在 165 kPa 时有所回升,可能是 HPA 对蛋壳结构冲击过大,造成蛋黄内部盐水分扩散速率加快^[23]。

2.3.2 对咸鸭蛋蛋黄出油率、蛋黄指数及感官评价的影响 由表 3 可知,与对照组相比,采用 VHPP 技术腌制的鸭蛋,其蛋黄出油率显著增加 ($P < 0.05$),表明采用 VHPP 技术腌制有利于脂类物质的释放。随着 HPA 从 110 kPa 升至 150 kPa,蛋黄出油率呈下降趋势,表明脂类物质的释放在一定程度上受到抑制。这可能是由于高压作用破坏了蛋黄的微观结构,使脂肪包裹在蛋黄颗粒内部难以释放,与 Cao 等^[24]的研究结果一致。当 HPA 为 165 kPa 时,

蛋黄出油率出现回升,可能是在超高压作用下,鸭蛋黄内部结构进行了适应性重组,形成了有利于脂肪扩散的微通道,有利于脂类的释放,与 Yuan 等^[25]的研究结论类似。VHPP 技术腌制的鸭蛋蛋黄指数整体高于对照组,表明采用 VHPP 技术腌制可增强蛋黄的凝聚性和结构完整性。这与 Ding 等^[26]的研究结果一致。但随着高压值的升高,蛋黄指数呈下降趋势,表明高压可能破坏了蛋黄结构。当 HPA 为 165 kPa 时,蛋黄指数出现回升,可能与超高压导致结构重组效应有关,与 Wu 等^[27]的研究结论类似。

综上,采用 VHPP 技术在 110, 165 kPa 下腌制均有利于提高蛋黄的出油率和蛋黄指数。但综合考虑蛋壳破损率和感官评价结果,110 kPa 下腌制的咸鸭蛋的蛋壳完整度更高、感官品质更佳,因此,选定 110 kPa 作为最优加工参数。

表 3 不同加工条件下鸭蛋的蛋黄出油率、蛋黄指数及感官评价[†]

Table 3 Yolke oiling rate, yolke index, and sensory evaluation of duck eggs under different processing conditions

HPA/kPa	蛋黄出油率/%	蛋黄指数	感官评价				
			蛋壳	蛋白	蛋黄	风味	总分
对照组	11.80±0.46 ^c	0.827±0.012 ^{bc}	1.35±0.13 ^{ab}	1.97±0.05 ^d	1.47±0.04 ^d	1.60±0.07 ^c	6.39±0.07 ^f
110	17.27±0.22 ^b	0.887±0.012 ^a	1.41±0.04 ^a	2.40±0.05 ^a	1.83±0.07 ^a	3.86±0.08 ^a	9.50±0.10 ^a
125	16.11±0.19 ^c	0.863±0.025 ^{ab}	1.41±0.05 ^a	2.25±0.04 ^{bc}	1.82±0.04 ^a	3.30±0.25 ^b	8.78±0.25 ^c
140	15.84±0.12 ^c	0.843±0.021 ^{bc}	1.34±0.03 ^{ab}	2.19±0.05 ^c	1.73±0.04 ^b	2.93±0.17 ^c	8.19±0.20 ^d
155	13.66±0.92 ^d	0.823±0.015 ^c	1.26±0.09 ^{ab}	2.18±0.04 ^c	1.60±0.05 ^c	2.61±0.14 ^d	7.65±0.07 ^c
165	18.83±0.56 ^a	0.860±0.026 ^{abc}	1.24±0.10 ^b	2.31±0.05 ^b	1.88±0.03 ^a	3.71±0.03 ^a	9.13±0.13 ^b

† 同列小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

3 结论

采用真空高压脉动技术腌制咸鸭蛋替代传统常压盐水浸渍,在真空保持时间为 6 min,高压保持时间为 20 min,腌制时间为 72 h,高压幅值分别为 110, 125, 140, 155, 165 kPa 时,所得咸鸭蛋蛋清的含盐量与对照组腌制 30 d 后成熟样品的相接近。说明应用真空高压脉动技术腌制咸鸭蛋在 72 h 内即可实现与传统盐水浸渍 30 d 相当的效果,腌制周期缩短至 1/10,有效提高了腌制效率。不同高压幅值下腌制的咸鸭蛋品质皆高于对照组,相比于 165 kPa, 110 kPa 下鸭蛋破损较少且感官总评为 9.5,显著高于 165 kPa 下的 ($P < 0.05$)。与传统常压浸泡腌制相比,应用真空高压脉动技术腌制能显著提高咸鸭蛋蛋黄含盐量、蛋黄 h^* 值、蛋黄出油率和感官品质 ($P < 0.05$)。当高压幅值为 110 kPa,腌制时间为 72 h 时,蛋黄含盐量为 2.14%,蛋黄 h^* 值为 79.42,感官评分为 9.5,蛋黄指数为 0.89,蛋黄出油率为 17.27%,均显著高于对照组的 ($P < 0.05$)。说明真空高压脉动能在短时间内实现优质的腌制效果,大幅提升咸蛋品质 and 咸鸭蛋口感。

综上,在真空度为 90 kPa、腌制液为饱和食盐水 (NaCl 质量分数 $\geq 25\%$) 的条件下,选定高压幅值为 110 kPa、脉动比 (真空保持时间/高压保持时间) 为 6 min/20 min、腌制时间为 72 h 作为真空高压脉动技术腌

制咸鸭蛋的最优工艺。

与传统工艺相比,该工艺虽提升了咸鸭蛋腌制速率并改善了腌制品质,但未能解决咸鸭蛋存在腌制不均匀、腌制液浓度过高等问题。后续可通过引入腌制液循环结合真空高压脉动技术实现咸鸭蛋腌制均匀或尝试引入渗透促进剂 (如氯化钾、乳酸钠或小分子多肽) 并降低 NaCl 浓度,以在低盐条件下实现与高盐腌制相似的腌制效果。

参考文献

[1] 孙静, 杨晓培, 彭旭, 等. 咸鸭蛋品质劣化分析与调控技术的研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(8): 383-391.
SUN J, YANG X P, PENG X, et al. Research progress on quality deterioration mechanism and control technology of salted duck egg yolk[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 383-391.

[2] 汪前, 邱静, 邹礼根. 鸭蛋腌制前后蛋清蛋白特性差异分析[J]. 食品科技, 2023, 48(4): 70-74.
WANG Q, QIU J, ZOU L G. Difference analysis of egg white protein characteristics of duck eggs before and after curing[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(4): 70-74.

[3] YAO X J, XU J C, ADHIKARI B, et al. Mooncake production waste: nutritional value and comprehensive utilization of salted duck egg white[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(8): e16772.

- [4] LI X Y, CHEN S P, YAO Y, et al. The quality characteristics formation and control of salted eggs: a review[J]. *Foods*, 2022, 11(19): 2 949.
- [5] 王一亭, 庞敏. 咸鸭蛋腌制机理与方法的研究[J]. *现代食品*, 2020, 26(22): 52-54.
WANG Y T, PANG M. Study on salting mechanism and method of salted duck eggs[J]. *Modern Food*, 2020, 26(22): 52-54.
- [6] 陈颜红, 王修俊, 于沛, 等. 咸鸭蛋腌制过程中蛋黄凝聚变化分析[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(4): 377-389.
CHEN Y H, WANG X J, YU P, et al. Analysis of the changes of egg yolk coagulation in the salting process of salted egg[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(4): 377-389.
- [7] 管沛清, 程裕东, 金银哲. 咸鸭蛋快速腌制工艺及咸蛋清综合利用研究进展[J]. *食品与机械*, 2020, 36(10): 210-214.
ZAN P Q, CHENG Y D, JIN J Z. Research progress on rapid pickling process of salted duck eggs and comprehensive utilization of salted duck eggs white[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(10): 210-214.
- [8] 杨哪, 金亚美, 徐悦, 等. 磁电辅助快速腌制咸鸭蛋的工艺[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 295-300.
YANG N, JIN Y M, XU Y, et al. Processing of rapid salting on duck eggs by using magneto-electric-assisted method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21): 295-300.
- [9] CHENG J L, WANG A L, QIU W Q, et al. Enhancing the quality of duck egg protein during the pickling process using machine learning and voltage-pulsed electric field[J]. *Journal of Food Engineering*, 2025, 397: 112578.
- [10] 张晓维, 刘旭辉, 高洁, 等. 真空减压加速皮蛋蛋清凝胶形成的机理[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(6): 172-180.
ZHANG X W, LIU X H, GAO J, et al. Mechanism of accelerating the formation of preserved egg white gel by vacuum decompression[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(6): 172-180.
- [11] 季玲, 刘会平, 杨晓兴, 等. 减压技术快速腌制松花蛋工艺条件的优化[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(5): 1 029-1 035.
JI L, LIU H P, YANG X X, et al. Fast preparation of preserved eggs by low-pressure technology[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(5): 1 029-1 035.
- [12] 袁诺, 张清, 白洁, 等. 脉动压力技术对卤蛋腌制效率和品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(15): 164-170.
YUAN N, ZHANG Q, BAI J, et al. Effect of pulsed pressure on pickling efficiency and quality attributes of marinated eggs [J]. *Food Science*, 2020, 41(15): 164-170.
- [13] 邹燕子, 巨浩羽, 耿亚慧, 等. 真空脉动技术对鸡蛋腌制效率及品质的影响[J]. *食品与机械*, 2025, 41(1): 219-224.
ZOU Y Z, JU H Y, GENG Y H, et al. Effect of vacuum pulsation technology on egg pickling efficiency and quality[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(1): 219-224.
- [14] WANG Z Y, XU W W, KANG N, et al. Microstructural, protein denaturation and water holding properties of lamb under pulse vacuum brining[J]. *Meat Science*, 2016, 113: 132-138.
- [15] XIAO C G, ZHANG Y, GONG T, et al. A comparative study of pickled salted eggs by positive and negative pressure-ultrasonic method[J]. *Foods*, 2023, 12(7): 1 477.
- [16] 刘蒙佳, 周强, 刘禹. 腌制条件对咸鸭蛋品质的影响及熟化工艺研究[J]. *中国调味品*, 2019, 44(1): 50-53.
LIU M J, ZHOU Q, LIU Y. Effect of curing conditions on quality of salted duck eggs and research on the maturation process[J]. *China Condiment*, 2019, 44(1): 50-53.
- [17] 崔楠, 鲍志杰, 林松毅, 等. 咸蛋黄快速腌制过程中理化性质变化规律[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 280-287.
CUI N, BAO Z J, LIN S Y, et al. Changes of physicochemical properties of salted egg yolk during rapid curing development [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(23): 280-287.
- [18] 李萌, 迟美龄, 全其根. 咸蛋黄品质定量分析标准化研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(3): 254-259.
LI M, CHI M L, TONG Q G. Study on standardization of salted egg yolk quality quantitative analysis[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(3): 254-259.
- [19] SOUZA C J F, GARCIA-ROJAS E E. Effects of salt and protein concentrations on the association and dissociation of ovalbumin-pectin complexes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 47: 124-129.
- [20] 蒲跃进, 杜金平, 梁振华, 等. 循环水腌制咸蛋工艺研究[J]. *中国家禽*, 2010, 32(16): 25-27, 31.
PU Y J, DU J P, LIANG Z H, et al. Study on processing of salted egg with circulating water[J]. *China Poultry*, 2010, 32 (16): 25-27, 31.
- [21] REN L Y, MA J, XU W L, et al. Stability of low density lipoprotein particles affect the formation of off-flavor in thermal egg yolk[J]. *Food Research International*, 2022, 154: 111029.
- [22] 杨海燕, 金永国, 孙秀秀, 等. 添加不同水平NaCl对蛋黄浆质凝胶性的影响研究[J]. *现代食品科技*, 2018, 34(8): 165-171.
YANG H Y, JIN Y G, SUN X X, et al. Effects of different NaCl addition levels on the gel properties of egg yolk plasma[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2018, 34(8): 165-171.
- [23] LIU Y T, MA Y Q, CHI Y J, et al. Change in rapid salting kinetics and characteristics of hen egg yolks[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 329: 111090.
- [24] CAO D H, FENG F, XIONG C H, et al. Changes in lipid properties of duck egg yolks under extreme processing conditions[J]. *Poultry Science*, 2021, 100(7): 101140.
- [25] YUAN L, ZHANG J, WU J, et al. The effect on quality of pickled salted duck eggs using the novel method of pulsed pressure osmotic dehydration[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(4): e13581.
- [26] DING Y W, ZHANG C, JIN C L, et al. Hard yolk characteristics and mechanism of salted duck eggs[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2024, 212: 116916.
- [27] WU Y Y, XIANG X L, LI X F, et al. Study on the mechanism of improving the quality of salted egg yolks by ultrasonic synergistic NaCl dry-curing[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, 102: 106746.