

高压静电场辅助牛肉湿腌过程传质动力学分析

沙坤¹ 李思源^{2,3} 张松山⁴ 张泽俊² 刘海杰²

(1. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670; 2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;
3. 河北旅游职业学院现代农业与园林学院, 承德 067000; 4. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193)

摘要: 为明确高压静电场(High voltage electrostatic field, HVEF)辅助牛肉腌制过程中的传质动力学规律, 将 HVEF 与传统湿腌法结合, 分析比较了 1.5 kV HVEF 和 3.0 kV HVEF 对腌制过程中牛肉的总质量、含水率、NaCl 含量变化量的影响, 并通过扫描电镜对不同腌制处理牛肉的微观结构进行观察。结果表明: 与传统湿腌比较, HVEF 辅助处理可显著提高腌制牛肉含水率、总质量以及 NaCl 扩散速率($P < 0.05$), 且 3.0 kV 处理组效率更高, 传统湿腌、1.5 kV HVEF 辅助湿腌、3.0 kV HVEF 辅助湿腌的 NaCl 表观扩散系数分别为 5.593×10^{-10} 、 6.284×10^{-10} 、 1.142×10^{-9} ; HVEF 辅助腌制的牛肉肌原纤维束膜被破坏, 肌原纤维之间更松散, 有利于 NaCl 和水分在肌肉中扩散。

关键词: 牛肉; 湿腌; 高压静电场; 传质动力学; 微观结构

中图分类号: TS251.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0421-06 OSID: 

Mass Transfer Kinetics Analysis of Beef Wet Salted Process Assisted by High Voltage Electrostatic Field

SHA Kun¹ LI Siyuan^{2,3} ZHANG Songshan⁴ ZHANG Zejun² LIU Haijie²

(1. Department of Yantai Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China
2. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Department of Modern Agriculture and Landscape Architecture, Hebei Tourism College, Chengde 067000, China
4. Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to clarify the law of mass transfer kinetics in the process of beef salting assisted by high voltage electrostatic field (HVEF), the HVEF was combined as a new technology with the traditional wet salting method. The effects of 1.5 kV HVEF and 3.0 kV HVEF treatments on the total weight, water content and NaCl content of beef during salting were analyzed and compared, and the microstructure of beef with different salting treatments was observed by scanning electron microscopy. Treatment significantly ($P < 0.05$) increased the water content, total weight and NaCl diffusion rate of beef during wet curing, and 3.0 kV HVEF treatment group had a higher effect. The apparent diffusion coefficients of NaCl in traditional wet salting, 1.5 kV HVEF assisted-wet salting and 3.0 kV HVEF assisted-wet salting were $5.593 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $6.284 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and $1.142 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively. Scanning electron microscope results showed that compared with traditional wet salting group, the myofibrillar bundle membrane of beef under HVEF assisted-wet salting was destroyed and the myofibrils were looser, which was conducive to the diffusion of NaCl and water in muscles. As a new electric field technology, HVEF has a good application prospect in meat curing.

Key words: beef; wet salting; HVEF; mass transfer kinetics; microstructure

0 引言

腌制是发酵、酱卤肉制品生产过程中的重要环节。加盐腌制可以有效控制腐败和致病微生物的生

长,还能促使肉制品形成独特风味和质地^[1]。传统腌制依赖于高盐度的渗透,腌制速度缓慢且不均匀,而且较长的腌制时间会造成营养成分损失,还易引起微生物污染^[2]。为提高腌制速率、缩短生产周

期、提高肉品品质 and 安全性,真空滚揉、超声波、静态变压、超高压等现代腌制技术逐渐应用于肉品加工中^[3-5]。

静电场腌制是一种新型腌制技术,主要应用形式有脉冲电场和高压静电(High voltage electrostatic field, HVEF)。脉冲电场可以提高腌制速率,改善腌制肉制品的嫩度,控制有害微生物生长^[6-7]。目前,HVEF 主要应用研究于食品解冻和保鲜方面^[8-10],在肉品腌制方面应用较少。HVEF 可以使肉中的 Cl^- 和 Na^+ 发生迁移,使肉样内部产生热量^[11],文献[12]利用 HVEF 解冻微盐冻猪里脊肉,研究发现,在相同电压条件下,腌制猪里脊肉样品的解冻速率显著高于未腌制样品,且经过 -15 kV 解冻后的猪里脊肉肉块上下不同位置电导率差异显著,说明 HVEF 可能促进 NaCl 在肉中的扩散。

本文以牛肉为研究对象,将 HVEF 用于牛肉湿腌过程,通过测定腌制过程中肉样的总质量、含水率、 NaCl 含量变化规律,研究 NaCl 在牛肉水相中的扩散系数,探索 HVEF 对牛肉腌制速率的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

牛肉,购买于河北燕城食品有限公司,pH 值为 5.2~5.3;腌制用中性大粒盐,广东省盐业集团广州有限公司。

1.2 仪器与设备

BS 200S-WEI 型电子天平,北京赛多利斯天平有限公司;博美特 BMT-DEMF(3.0 kV)、博美特 BMT-Z1L(1.5 kV)型静电解冻冰箱,山东博美特厨业有限公司;DGG-9240A 型电热恒温鼓风干燥箱,上海森信实验仪器有限公司;DSM-25 型手持数显盐度计,力辰科技有限公司;BCD-528WDPF 型药品保存箱,海尔集团股份有限公司;Quanta200FEG 型场发射环境扫描电子显微镜,日本日立公司。

1.3 方法

1.3.1 腌制及取样

牛肉在 4°C 条件下解冻后,剔除筋膜,切块(约 $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}\times 3\text{ cm}$),进行湿腌处理。根据预实验结果,5%的盐水溶液可获得较大产率,且达到腌制平衡时间较短,因此,按照 1:3 的肉水质量比,将肉块放入 5% 的盐水溶液中进行腌制处理。随后将湿腌肉块平均分成 3 组,分别置于普通冰箱、1.5 kV 静电解冻冰箱和 3.0 kV 静电解冻冰箱中腌制。腌制温度为 4°C ,腌制时间为 24 h,腌制过程用保鲜膜将容器密封,以减少水分蒸发。腌制 0、1、2、3、6、12、18、24 h 后,测定牛肉的质量、含水率和 NaCl 含量,

每个指标平行测定 3 次。

1.3.2 测定指标

(1)含水率测定:参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》。

(2) NaCl 含量测定:采用手持数显盐度计,测定时将盐度计探测头插入肉块中间部位,重复测定 3 次。

(3)总质量测定:取出样品将表面水分用滤纸吸干,用天平称质量。

(4)肌肉组织微观结构扫描电镜观察:参照文献[13]的方法,将待测牛肉样品沿肌纤维方向切成 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 7\text{ mm}$ 的长方体,戊二醛溶液(2.5%)室温(20°C)固定 48 h 后,用磷酸盐缓冲液(浓度 0.1 mol/L 、pH 值 7.3)冲洗,氢氧化钠溶液(浓度 2 mol/L)浸泡 5 d,室温放置 2 h。用蒸馏水冲洗样品,分别采用体积分数为 25%、50%、70%、95%、100% 的乙醇梯度洗脱,每次 1 h。脱水后的样品用叔丁醇冻干,将样品横切面向上贴在扫描电镜样品台上,用离子溅射镀膜仪溅射喷金,在加速电压 10 kV 的扫描电镜下观察并拍照(放大倍数 300、1 000)。

1.3.3 牛肉总质量、含水率、 NaCl 含量变化量计算
牛肉总质量变化量 ΔM_t 、含水率变化量 $\Delta M_t^{(w)}$ 、 NaCl 含量变化量 ΔM_t^{NaCl} 计算公式为

$$\Delta M_t = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100\% \tag{1}$$

$$\Delta M_t^{(w)} = \frac{M_t X_t^{(w)} - M_0 X_0^{(w)}}{M_0} \times 100\% \tag{2}$$

$$\Delta M_t^{\text{NaCl}} = \frac{M_t X_t^{\text{NaCl}} - M_0 X_0^{\text{NaCl}}}{M_0} \times 100\% \tag{3}$$

式中 M_t ——腌制 t 时刻牛肉质量,g
 M_0 ——腌制 0 时刻牛肉质量,g
 $X_t^{(w)}$ ——腌制 t 时刻牛肉含水率,%
 $X_0^{(w)}$ ——腌制 0 时刻牛肉含水率,%
 X_t^{NaCl} ——腌制 t 时刻牛肉 NaCl 质量分数,%
 X_0^{NaCl} ——腌制 0 时刻牛肉 NaCl 质量分数,%

1.3.4 牛肉水相中 NaCl 含量计算

水相中 NaCl 质量分数计算公式为

$$Z^{\text{NaCl}} = \frac{X^{\text{NaCl}}}{X^{(w)} + X^{\text{NaCl}}} \times 100\% \tag{4}$$

式中 $X^{(w)}$ ——牛肉含水率,%
 X^{NaCl} ——牛肉 NaCl 质量分数,%

1.3.5 物质传质动力学模型

腌制质量变化随时间而变化的数学模型为
$$\Delta M_{t,i} = 1 + k_1 + k_2 t^{0.5} \tag{5}$$

式中 $\Delta M_{t,i}$ ——总质量、含水率和 NaCl 含量变化量, %
 k_1 、 k_2 ——总质量、含水率和 NaCl 含量变化的动力学参数

1.3.6 腌制平衡方程

研究表明,腌制达到平衡时,肉水相中的 NaCl 含量与腌制液中的 NaCl 含量非常接近^[14],即

$$Z_e^{\text{NaCl}} = y_e^{\text{NaCl}} = \frac{\frac{M_0^{(\text{SD})}}{M_0^{(\text{SS})}} X_0^{\text{NaCl}} + X_0^{\text{NaCl}}}{\frac{M_0^{(\text{SD})}}{M_0^{(\text{SS})}} (X_0^{(w)} + X_0^{\text{NaCl}}) + y_0^{(w)} + y_0^{\text{NaCl}}} \times 100\%$$

(6)

式中 Z_e^{NaCl} ——腌制平衡时牛肉水相中 NaCl 质量分数, %
 y_e^{NaCl} ——腌制液水相中 NaCl 质量分数, %
 $\frac{M_0^{(\text{SD})}}{M_0^{(\text{SS})}}$ ——腌制初始牛肉与腌制液的质量比
 $y_0^{(w)}$ ——腌制初始腌制液中含水率, %
 y_0^{NaCl} ——腌制初始腌制液中 NaCl 质量分数, %

1.3.7 表观扩散系数

腌制过程中牛肉中 NaCl 的表观扩散系数满足

$$1 - Y_t^{\text{NaCl}} = 1 - \frac{Z_t^{\text{NaCl}} - y_t^{\text{NaCl}}}{Z_0^{\text{NaCl}} - Z_e^{\text{NaCl}}} = 2 \left(\frac{D_e t}{\pi l^2} \right)^{0.5} + K \quad (7)$$

式中 Y_t^{NaCl} ——牛肉水相和 NaCl 溶液之间传质驱动力
 l ——牛肉块一半的厚度, m
 D_e ——表观扩散系数, m^2/s
 Z_t^{NaCl} ——牛肉水相在腌制 t 时刻 NaCl 质量分数, %
 Z_0^{NaCl} ——牛肉水相在腌制 0 时刻 NaCl 质量分数, %
 y_t^{NaCl} ——腌制液水相在腌制 t 时刻 NaCl 质量分数, %
 K ——校正系数

1.3.8 数据处理与分析

实验数据用 IBM SPSS Statistics 20 进行方差分析,用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 湿腌过程中牛肉总质量、含水率、NaCl 含量变化量

如图 1(图中相同大写字母代表同一时间内不同处理无显著差异($P > 0.05$),相同小写字母代表同一处理在不同腌制时间无显著差异($P > 0.05$),

下同)所示,随着腌制过程的进行,3 组牛肉样品质量均增加,腌制 3 ~ 6 h,HVEF 处理组总质量变化量(ΔM_t)增加速率最快,对照组无显著变化;腌制 6 ~ 12 h,HVEF 处理组 ΔM_t 增加速度减缓,对照组增加速度达到最大;腌制 12 ~ 18 h,1.5 kV HVEF 处理组和对照组样品的 ΔM_t 降低,3.0 kV 组继续增加;腌制 18 ~ 24 h,1.5 kV 组和对照组 ΔM_t 有所上升,3.0 kV 组无明显变化,这可能是由于 3.0 kV HVEF 能够促进水分和 NaCl 等在肉中的扩散,加速腌制平衡过程。湿腌时,腌制液的水和盐因为渗透压作用渗入肉样中,肉样质量增大,因此产品产率高,且肉质松软^[15-16]。 ΔM_t 是加工过程中衡量产率的重要指标, ΔM_t 越大,产率越高,腌制结束时,对照组、1.5 kV 组、3.0 kV 组 ΔM_t 分别为 15.16%、20.57%、25.63%,说明 HVEF 可以提高牛肉湿腌的产率,而且在较高电压下产率更高。

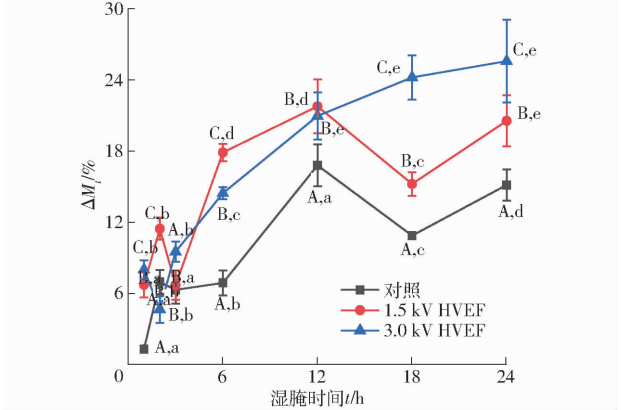


图 1 湿腌过程牛肉总质量含量变化量
Fig.1 Total weight changes of beef during wet salting

图 2 为腌制过程中牛肉含水率变化情况。腌制 12 h 时,不同处理组肉样的含水率均增加;腌制 12 h 后,1.5 kV HVEF 处理组和对照组含水率变化不显著趋于平衡,3.0 kV HVEF 处理组含水率继续增加,与总质量变化趋势一致,说明腌制液中的水分进入肉中是使样品总质量增加的重要原因。肌肉肌原纤维蛋白的变化是促使肉中水分增加的重要原因,在低质量分数 NaCl 溶液中,会有大量 Cl^- 被束缚在肌原纤维间,负电荷引起的静电力增加,导致肌原纤维蛋白膨胀,含水量增加^[17-18]。腌制结束时,对照组、1.5 kV 组、3.0 kV 组的 $\Delta M_t^{(w)}$ 分别为 18.86%、20.66%、29.33%,3.0 kV 组含水率变化量显著高于其他两组($P < 0.05$),这可能是由于 3.0 kV HVEF 可以使更多的 Cl^- 进入肌纤维间,加剧肌原纤维蛋白膨胀,还可能是由于 HVEF 有助于肉类持水力的保持^[19]。

图 3 为腌制过程中牛肉 NaCl 含量变化情况。腌制 6 h 后,3 组样品中的 NaCl 含量显著增加,且腌

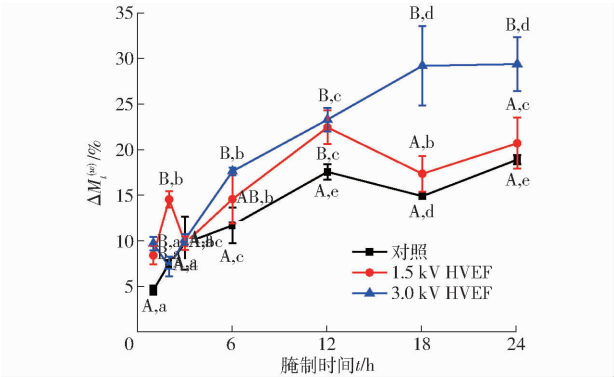


图2 湿腌过程中牛肉含水率变化

Fig. 2 Changes of water content in beef during wet salting

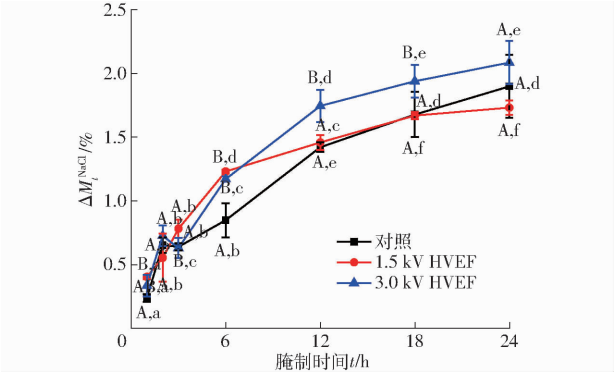


图3 湿腌过程中牛肉 NaCl 含量变化

Fig. 3 Changes of salt content in beef during wet salting

制 3 ~ 6 h, HVEF 处理组样品中的 NaCl 含量增加速度显著高于对照组; 腌制 6 ~ 18 h, 样品中 NaCl 含量增加速度减缓; 腌制 18 h 后, 样品中的 NaCl 含量无显著变化, 说明腌制 18 h 已基本达到腌制平衡状态。腌制平衡状态, 3.0 kV HVEF 处理组牛肉的 NaCl 含量变化量为 1.94%, 显著高于其他两组 ($P < 0.05$), 说明 3.0 kV HVEF 可以提高腌制平衡时样品中的 NaCl 含量。

静电场可以加速离子运动, 产生电晕风, 电晕风使流体向样品表面移动, 在样品边界处产生湍流, 从而增加传热系数^[20], 腌制 3 ~ 6 h, HVEF 处理组样品中的 NaCl 含量增加速率高于对照组, 可能是由于 HVEF 产生的电晕风, 促进了传热及传质过程。文献[21]研究发现, 随着电压的增大, 产生的电流增大, 电晕风风速也随之增大, 这可能是腌制平衡时 3.0 kV HVEF 处理组肉样 NaCl 含量高于 1.5 kV 组的原因。

图 4 为腌制过程中牛肉含水率和 NaCl 含量变化量之和与总质量含量变化量的回归曲线, 数据点比较均匀地分布在对角线附近, 说明含水率和 NaCl 含量变化量之和近似等于总质量含量变化量, 并没有完全重合可能是由于腌制过程中有少量脂肪和蛋白质发生了溶解, 与文献[22]研究结果相似。如图 4 所示, HVEF 处理组比对照组的数据点更加聚集在对角线

附近, 可能是 HVEF 减少了腌制过程中肉中蛋白质和脂肪的分解, 从而减少了产品质量损失。文献[23]研究发现, -10 kV HVEF 解冻猪里脊肉中的总巯基含量和 Ca^{2+} -ATP 酶含量显著高于对照组, 可以减少猪里脊肉中蛋白质的降解。

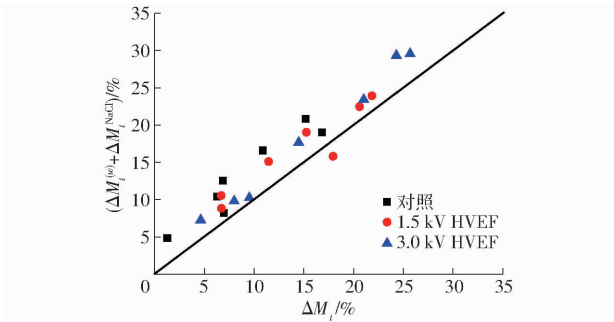


图4 含水率和 NaCl 含量变化量之和与总质量含量变化量的回归曲线

Fig. 4 Mass balance of sample during wet salting

2.2 表观扩散系数计算

由式(6)计算得出 5% NaCl 溶液腌制的 Z_e^{NaCl} 为 4.06%, 而实际腌制 24 h 后, 对照组、1.5 kV、3.0 kV HVEF 处理组的 Z^{NaCl} 实际值分别为 2.17%、2.17%、2.19%, 与理论值相差较大, 文献[24]也得到了相似的结果, 这可能是由于腌制过程中肉中的蛋白质、脂肪等物质渗出, 使腌制液形成一个复杂的体系, 影响了水分和 NaCl 的扩散, 降低了腌制液的传质驱动力^[25-26]。

在湿腌过程中各物质的传质主要是依靠腌制液和肌肉之间的浓度差产生的驱动力而进行的。图 5 和表 1 描述了腌制过程中传质驱动力及其动力学参数。3 组的 R^2 均较高, 表观扩散系数从大到小依次为 3.0 kV HVEF 处理组 ($1.142 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$)、1.5 kV HVEF 处理组 ($6.284 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)、对照组 ($5.593 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), 说明由式(7)得到的方程有很好的线性相关性。从 NaCl 的 D_e 值来看, 说明 HVEF 处理提高了 NaCl 的扩散速率。这可能是由于 HVEF 提高样品的电导率, 从而增加了肌肉组织对 NaCl 的吸收速率。文献[27]研究发现, 脉冲电

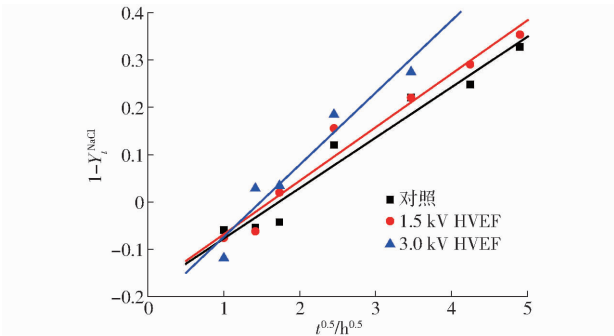


图5 传质驱动力与 $t^{0.5}$ 的回归曲线

Fig. 5 Driving force ($1 - Y_t^{\text{NaCl}}$) vs $t^{0.5}$

场预处理可以增加马铃薯片的电导率,从而促进 NaCl 在马铃薯片中的扩散。

表 1 由式(7)得到的理论动力学参数值
Tab.1 Kinetic parameters (D_e and K values) obtained from Eq. (7) and fitting correlation coefficients

组别	$D_e/(m^2 \cdot s^{-1})$	K	R^2
对照	5.593×10^{-10}	-0.183 9	0.952 6
1.5 kV HVEF	6.284×10^{-10}	-0.181 2	0.960 0
3.0 kV HVEF	1.142×10^{-9}	-0.226 1	0.918 0

2.3 腌制时牛肉动力学参数随时间的变化

表 2 描述了总质量、含水率和 NaCl 含量变化量的动力学参数(k_1 、 k_2)及决定系数, k_1 主要与腌制初始时 NaCl 浓度、含水率梯度、渗透压梯度有关, k_2 主要与扩散传质动力学、NaCl 浓度、肉质量有关^[24,28]。 ΔM_t 、 $\Delta M_t^{(w)}$ 、 ΔM_t^{NaCl} 与 k_2 呈正相关, k_2 越大, ΔM_t 、 $\Delta M_t^{(w)}$ 、 ΔM_t^{NaCl} 的增加幅度越大。3.0 kV HVEF 处理组含水率变化的 k_2 显著高于另外两组,说明3.0 kV HVEF 可以促进水分在牛肉中的扩散,这可能是由于 HVEF 使肉样肌肉结构破坏,加速水分在肉样的扩散。3 组样品 $\Delta M_t^{(w)}$ 、 ΔM_t^{NaCl} 的模型拟合决定系数 R^2 均大于 0.9,说明可利用此传质动力学模型预测腌制过程中牛肉含水率和 NaCl 含量变化。

表 2 肉总质量、含水率、NaCl 含量变化量的动力学参数及其决定系数
Tab.2 Kinetic parameters for changes in total weight, water contents and NaCl contents and fitting correlation coefficients

变量	组别	k_1	k_2	R^2
ΔM_t	对照	-0.292 5	3.091 3	0.661 3
	1.5 kV HVEF	4.296 7	3.298 6	0.546 9
	3.0 kV HVEF	-0.616 2	5.458 8	0.934 9
$\Delta M_t^{(w)}$	对照	1.975 5	3.133 2	0.930 3
	1.5 kV HVEF	4.440 5	3.030 4	0.938 7
	3.0 kV HVEF	0.169 2	6.148 2	0.941 8
ΔM_t^{NaCl}	对照	-1.069 1	0.410 4	0.974 3
	1.5 kV HVEF	-0.847 6	0.353 4	0.934 3
	3.0 kV HVEF	-1.029 6	0.461 6	0.960 2

2.4 HVEF 对湿腌牛肉微观结构的影响

图 6 和图 7 为腌制 24 h 不同腌制条件下牛肉的扫描电镜图。如图所示,HVEF 处理组牛肉的肌束膜受到一定的破坏,与对照组相比,肌纤维间较松散,肌纤维断面裂痕多,3.0 kV HVEF 处理组被破坏程度更高。肌束膜的适度破坏有利于水分和 NaCl 快速均匀地进入肌肉组织,表明 HVEF 会对肉样的微观结构产生影响,从而影响腌制效果。另外,HVEF 对牛肉微观结构的影响,也可能对腌制后产品的保水性能和质构特性产生影响^[29],从而改善最终产品品质。

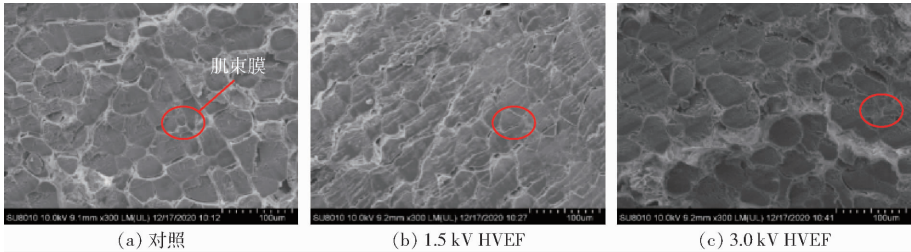


图 6 腌制 24 h 不同腌制条件牛肉扫描电镜图 (300 倍)
Fig.6 Scanning electron micrographs of beef under different curing treatments at 24 h (300 ×)

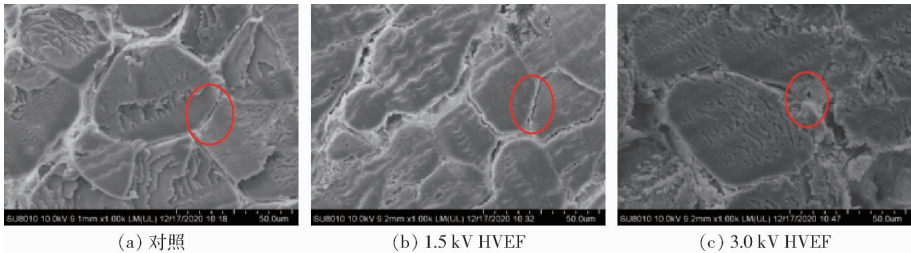


图 7 腌制 24 h 不同腌制条件牛肉扫描电镜图 (1 000 倍)
Fig.7 Scanning electron micrographs of beef under different curing treatments at 24 h (1 000 ×)

3 结束语

湿腌法通过 NaCl 扩散和水分渗透的作用,使腌制液扩散到肉内部,所得产品 NaCl 和水分分布均匀、产率高。将 HVEF 与传统湿腌方法结合,采用 1.5 kV 和 3.0 kV HVEF 辅助腌制牛肉可以显著

提高腌制完成后产品的产率,促进水分和 NaCl 在肉样中的扩散,提高 NaCl 的表观扩散系数,且 3.0 kV 处理组的产率和腌制速率更高。HVEF 作为一种新型电场技术,应用于肉品腌制,可提高腌制肉品产率、加快腌制速率,具有较好的发展前景。

参 考 文 献

[1] 康大成. 超声波辅助腌制对牛肉品质的影响及其机理研究[D]. 南京:南京农业大学, 2017.
KANG Dacheng. Effects and mechanism of uijtrasound-assited curing on the quality of beef [D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[2] 张建梅, 厉建军, 孙晓红, 等. 超声波辅助腌制对肉制品的影响[J]. 农产品加工, 2019(15):11–14.
ZHANG Jianmei, LI Jianjun, SUN Xiaohong, et al. Effect of ultrasonic assisted pickling on meat products[J]. Farm Products Processing, 2019(15):11–14. (in Chinese)

[3] 陈星, 沈清武, 王燕, 等. 新型腌制技术在肉制品中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020,41(2):345–351.
CHEN Xing, SHEN Qingwu, WANG Yan, et al. Research progress in new curing technology of meat products[J]. Scienceec and Technology of Food Industry, 2020,41(2):345–351. (in Chinese)

[4] 赵旭彤. 牛肉腌制中氯化钠扩散过程及其模拟研究[D]. 长春:吉林大学, 2020.
ZHAO Xutong. Study on diffusion process and simulation of NaCl in beef brining[D]. Changchun:Jilin University, 2020. (in Chinese)

[5] 刘瑞, 李雅洁, 陆欣怡, 等. 超声波技术在肉制品腌制加工中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24):445–453.
LIU Rui, LI Yajie, LU Xinyi, et al. Recent advances in the application of ultrasonic technology in the curing of meat products [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(24):445–453. (in Chinese)

[6] WANG Q, LI Y, SUN D, et al. Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: principles and applications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018,58(13):2285–2298.

[7] MCDONNELL C K, ALLEN P, CHARDONNEREAU F S, et al. The use of pulsed electric fields for accelerating the salting of pork[J]. LWT—Food Science and Technology, 2014,59(21):1054–1060.

[8] HE X, LIU R, TATSUMI E, et al. Factors affecting the thawing characteristics and energy consumption of frozen pork tenderloin meat using high-voltage electrostatic field[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014,22:110–115.

[9] 赵良. 高压静电场对罗非鱼片品质的影响及作用机理研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2016.
ZHAO Liang. Research on the effect of high-voltage electrostatic field on the quality of *Tilapia fillets* [D]. Shanghai:Shanghai Ocean University, 2016. (in Chinese)

[10] ZHANG Y, DING C, NI J, et al. Effects of high-voltage electric field process parameters on the water-holding capacity of frozen beef during thawing process[J]. Journal of Food Quality, 2019, 4: 9140179

[11] COSTA N R, CAPPATO L P, FERREIRA M V S, et al. Ohmic heating: a potential technology for sweet whey processing[J]. Food Research International, 2018,106(4):771–779.

[12] JIA G, SHA K, MENG J, et al. Effect of high voltage electrostatic field treatment on thawing characteristics and post-thawing quality of lightly salted, frozen pork tenderloin[J]. LWT—Food Science and Technology, 2019,99:268–275.

[13] 胡斐斐, 钱书意, 李侠, 等. 低压静电场辅助冷藏对牛肉品质的影响[J]. 食品科学, 2021,42(1):132–138.
HU Feifei, QIAN Shuyi, LI Xia, et al. Effect of low-voltage electrostatic field-assisted chilling storage on quality of beef[J]. Food Science, 2021,42(1):132–138. (in Chinese)

[14] BARAT J M, BAIGTS D, ALIÑO M, et al. Kinetics studies during NaCl and KCl pork meat brining[J]. Journal of Food Engineering, 2011,106(1):102–110.

[15] 姜晶丹, 杨明远, 许长华, 等. 湿腌时盐质量浓度对草鱼肌肉组织结构和品质的影响[J]. 食品科学, 2021,42(8):40–45.
JIANG Jingdan, YANG Mingyuan, XU Changhua, et al. Effects of salt concentration on muscle tissue structure and quality of grass carp during wet pickling[J]. Food Science, 2021,42(8):40–45. (in Chinese)

[16] 高凯日, 林琳, 陆剑锋, 等. 不同腌制处理对草鱼肉理化性质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020,41(18):21–28.
GAO Kairi, LIN Lin, LU Jianfeng, et al. Effects of different curing treatments on physical and chemical properties of grass carp meat[J]. Food Research and Development, 2020,41(18):21–28. (in Chinese)

[17] 匡威, 安亮, 徐军, 等. 鸭腿减盐滚揉腌制过程中的传质动力学[J]. 食品科学, 2019,40(23):1–7.
KUANG Wei, AN Liang, XU Jun, et al. Influence of partial sodium chloride replacement with potassium chloride on the mass transfer kinetics of duck thigh meat during salting with vacuum tumbling [J]. Food Science, 2019,40(23):1–7. (in Chinese)

[18] 郭丽媛, 刘登勇, 徐幸莲, 等. 猪肉腌制过程中的传质动力学研究[J]. 食品科学, 2015,36(1):31–36.
GUO Liyuan, LIU Dengyong, XU Xinglian, et al. Mass transfer dynamics during wet-curing of pork[J]. Food Science, 2015, 36(1):31–36. (in Chinese)

[19] JIA G, LIU H, NIRASAWA S, et al. Effects of high-voltage electrostatic field treatment on the thawing rate and post-thawing quality of frozen rabbit meat[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017,41(3):348–356.

[20] XIE Y, ZHOU K, CHEN B, et al. Applying low voltage electrostatic field in the freezing process of beef steak reduced the loss of juiciness and textural properties[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021,68:102600.

WANG Chuanli, LI Cheng, HE Tao, et al. Design calculation and performance analysis of elliptical corner-filletted hybrid flexure hinges[J]. China Mechanical Engineering,2021,32(9):1017 – 1026. (in Chinese)

[18] TIAN Y, SHIRINZADEH B, ZHANG D, et al. Three flexure hinges for compliant mechanism designs based on dimensionless graph analysis[J]. Precision Engineering,2010,34(1):92 – 100.

[19] YONG Y K, LU T, HANDLEY D C. Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations [J]. Precision Engineering,2008,32(2):63 – 70.

[20] BI S, YAO Y, ZHAO S, et al. Modeling of cross-spring pivots subjected to generalized planar loads[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2012,25(6):1075 – 1085.

[21] 吴昊,李宗轩,张德福,等. 交叉簧片柔性铰链设计[J]. 中国机械工程,2022,33(10):1203 – 1209.

WU Hao, LI Zongxuan, ZHANG Defu, et al. Design of cross-spring flexure hinges[J]. China Mechanical Engineering,2022, 33(10):1203 – 1209. (in Chinese)

[22] LOBONTIU N. Compliance-based matrix method for modeling the quasi-static response of planar serial flexure-hinge mechanisms[J]. Precision Engineering,2014,38(3):639 – 650.

[23] 林超,沈忠磊,李坪洋,等. 垂直型多级位移放大机构设计与力学解析建模[J]. 中国机械工程,2021,32(8):908 – 915,937.

LIN Chao, SHEN Zhonglei, LI Pingyang, et al. Design and mechanics analytical modeling of vertical multistage displacement amplification mechanisms[J]. China Mechanical Engineering,2021,32(8):908 – 915,937. (in Chinese)

[24] 马金玉,余胜东,康升征,等. 基于压电作动器驱动的微操作机构设计与运动控制[J]. 农业机械学报,2021,52(9):417 – 426.

MA Jinyu, YU Shengdong, KANG Shengzheng, et al. Design and motion control of piezo-driven puncture micromanipulation mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(9):417 – 426. (in Chinese)

[25] 何忠波,荣策,杨朝舒,等. 柔性铰链放大的叠堆式超磁致伸缩致动器建模与实验[J]. 农业机械学报,2017,48(12):421 – 428.

HE Zhongbo, RONG Ce, YANG Chaoshu, et al. Modeling and experimental analysis of stack giant magnetostrictive actuator amplified by flexure hinge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):421 – 428. (in Chinese)



(上接第 426 页)

[21] HE X, JIA G, TATSUMI E, et al. Effect of corona wind, current, electric field and energy consumption on the reduction of the thawing time during the high-voltage electrostatic-field (HVEF) treatment process [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016,34(5):135 – 140.

[22] 张晨曦,贺稚非,韩辉,等. 木瓜蛋白酶对鸡肉湿腌过程中传质动力学的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018,44(10):65 – 70.

ZHANG Chenxi, HE Zhifei, HAN Hui, et al. Effect of papain on mass transfer kinetics of chicken during wet-curing[J]. Food and Fermentation Industries, 2018,44(10):65 – 70. (in Chinese)

[23] JIA G, NIRASAWA S, JI X, et al. Physicochemical changes in myofibrillar proteins extracted from pork tenderloin thawed by a high-voltage electrostatic field[J]. Food Chemistry, 2018,240(1):910 – 916.

[24] VAN NGUYEN M, ARASON S, THORARINSDOTTIR K A, et al. Influence of salt concentration on the salting kinetics of cod loin (*Gadus morhua*) during brine salting[J]. Journal of Food Engineering, 2010,100(2):225 – 231.

[25] 瞿丞,贺稚非,王兆明,等. 鸡肉湿腌过程中的传质动力学研究[J]. 食品与发酵工业, 2019,45(11):106 – 112.

QU Cheng, HE Zhifei, WANG Zhaoming, et al. Mass transfer dynamics during wet-curing of chicken [J]. Food and Fermentation Industries, 2019,45(11):106 – 112. (in Chinese)

[26] DU L, ZHOU G, XU X, et al. Study on kinetics of mass transfer in water-boiled salted duck during wet-curing[J]. Journal of Food Engineering, 2010,100(4):578 – 584.

[27] JANOSITZ A, NOACK A K, KNORR D. Pulsed electric fields and their impact on the diffusion characteristics of potato slices [J]. LWT—Food Science and Technology, 2011,44(9):1939 – 1945.

[28] LORENTZEN G, AGEeva T N, HEIA K. Desalting of dried salt-cured cod (*Gadus morhua* L.) without water renewal-3D imaging of volume change[J]. Food Control, 2021,121(1):107613.

[29] FARIDNIA F, MA Q L, BREMER P J, et al. Effect of freezing as pre-treatment prior to pulsed electric field processing on quality traits of beef muscles[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2015,29(5):31 – 40.