

超声波协同真空卤煮牛肉过程中的传质动力学分析

高飞^{1,2}, 武运^{1*}, 蔡华珍^{2*}, 胡莹², 戴泓宇², 王妍凌¹, 吕泽¹

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

(2. 滁州学院生物与食品工程学院, 安徽滁州 239000)

摘要: 以牛腱子肉为研究对象, 通过不同真空卤煮、不同超声功率协同真空卤煮、不同超声频率协同真空卤煮 3 种卤煮方式卤制牛肉, 测定卤煮过程中卤牛肉的食盐、水分和质量变化, 研究超声波协同真空卤煮牛肉的传质规律。结果表明: 食盐含量变化随着真空度、超声波功率和频率的增加而增大, 水分含量变化与质量变化随着真空度、超声波功率和频率的增加而减小。卤煮过程中卤牛肉食盐含量变化的动力学参数 k_1 、 k_2 与真空度、超声功率和频率的大小有关; 真空度-0.043 MPa、超声波频率 28 kHz、功率 1 000 W 下, 食盐含量变化的有效扩散系数 De 值最大, 为 $1.42 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, 3 种卤煮方式的传质驱动力与 $t^{0.5}/l$ 具有很好的线性关系。真空卤煮与超声协同真空卤煮对卤牛肉的微观结构有显著影响。因此, 超声协同真空卤煮对卤牛肉中的传质有显著影响, 能促进传质进程, 超声波协同真空卤煮最佳传质条件为真空度-0.043 MPa, 超声频率 28 kHz, 超声功率 1 000 W, 超声时间 30 min。

关键词: 超声波; 真空; 传质动力; 卤牛肉

文章编号: 1673-9078(2022)10-205-216

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.10.1306

Analysis of Mass Transfer Kinetics during Braising Beef Using Ultrasonic in Synergy with Vacuum

GAO Fei^{1,2}, WU Yun^{1*}, CAI Huazhen^{2*}, HU Ying², DAI Hongyu², WANG Yanling¹, LYU Ze¹

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(2. School of Biology and Food Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

Abstract: Beef tendon meat was taken as the research object, and the beef was braised by three methods, namely braising under different vacuums, braising under different ultrasonic powers in synergy with vacuum, and braising under different ultrasonic frequencies in synergy with vacuum. The changes in the salt content, moisture content and weight of the braised beef during the braising processes were measured to examine the mass transfer patterns of the ultrasonic-vacuum braised beef. The results show that the changes in the salt content increased with the increases of vacuum degree, ultrasonic power and ultrasonic frequency, whilst the changes in the moisture content and weight decreased with the increases of vacuum degree, ultrasonic power and ultrasonic frequency. The kinetic parameters associated with the salt content changes of braised beef during braising process, k_1 and k_2 , of variation are related to the vacuum degree, ultrasonic power and ultrasonic frequency. Under the conditions of vacuum degree of -0.043 MPa, ultrasonic frequency of 28 kHz and ultrasonic power of 1 000 W, the maximum effective diffusion coefficient De for the salt content change was $1.42 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. The mass transfer driving force of the three braising methods had a good positive linear relationship with $t^{0.5}/l$. Vacuum braising and ultrasonic in synergy with vacuum braising had significant effects on the microstructure of the braised beef. Therefore, ultrasonic in synergy with vacuum braising had a significant effect on the mass transfer in the braised beef and could promote the mass transfer process. The optimal mass transfer conditions for the braising under ultrasonic in synergy with

引文格式:

高飞,武运,蔡华珍,等.超声波协同真空卤煮牛肉过程中的传质动力学分析[J].现代食品科技,2022,38(10):205-216

GAO Fei, WU Yun, CAI Huazhen, et al. Analysis of mass transfer kinetics during braising beef using ultrasonic in synergy with vacuum [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 205-216

收稿日期: 2021-11-22

基金项目: 安徽省科技厅科技重大专项 (18030701165); 企业横向项目 (20201100288); 国家级大学生创新项目 (202110377032)

作者简介: 高飞 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: gfliuxing@126.com

通讯作者: 武运 (1965-), 女, 教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: wuyunster@sina.com; 共同通讯作者: 蔡华珍 (1964-), 女, 教授, 研究方向: 畜

产食品加工与质量控制, E-mail: chz229@126.com

vacuum were: vacuum degree, -0.043 MPa; ultrasonic frequency, 28 kHz; ultrasonic power, 1 000 W; ultrasonic time, 30 min.

Key words: ultrasonic; vacuum; mass transfer kinetics; stewed beef in seasoning

酱卤肉制品在我国已经有几千年的发展历史,深受大众喜爱,其工厂化生产普遍采用夹层锅进行较长时间高温(99~100℃)卤煮,这种方法易造成卤煮环境恶劣、卤煮温度分布不均匀,香气外溢,水分和营养流失较多,并产生有毒有害物质^[1-3],因此,绿色低温加工取代高温加工是食品加工的发展方向。真空低温煮制是一种良好的低温加工方式,可以减少煮制食品营养成分和水分的流失^[4,5],提高食品品质,压力降低有利于食品物料分子热运动,利于低温下卤汁的对流,促进物料中成分交换与渗入,从而达到均匀卤制的效果。彭子宁等^[6]使用真空低温烹煮酱牛肉,发现在工艺为4℃长时间腌制后,低温63℃煮制8h得到的酱牛肉感官评分很高,嫩度和质构特性最佳;闫寒等^[7]使用真空低温烹饪牛肉,发现在56℃下煮制175min、油煎30s后牛肉的剪切力和烹饪损失均小于传统油煎牛肉,且色泽更优;顾思远^[8]发现低温慢煮卤牛肉提升了卤牛肉内水分含量,减少了蛋白质的流失;Alejandra等^[9]利用真空浸渍无须鲟鱼片发现颜色无明显变化,且加速了盐和水分的扩散;François等^[10]利用真空腌制增加了火鸡肉的盐分含量,减少了水分损失。可见低温真空煮制对肉制品良好品质的保持有其独特优势。

超声波技术在肉类工业中的应用一直是国内外研究热点,有着巨大的发展潜力和空间,利用超声波改善肉品品质,提高加工效率,包括改善肉的嫩度、促进腌制等^[11],取得了很大进展。Zou等^[12]利用超声波辅助煮制卤牛肉,发现增大超声波功率可以有效促进食盐的传质,在800W煮制80min时即可达到传统煮制100min时的食盐含量,并且提高了卤牛肉保水能力;赵旭彤^[13]研究牛肉腌制中NaCl的扩散过程,建立传质动力学模型,得到超声波处理食盐的传质扩散有积极作用。此外,有学者表明,超声真空预处理样品的水分和溶质扩散率最高^[14],黄月等^[15]利用真空和超声波交替处理鸡翅80min,鸡翅含盐量与常规盐水浸泡鸡翅12h相比,极大缩短了渗盐时间,且处理后的鸡翅色泽良好、肉质鲜嫩。超声波与真空联合煮制卤牛肉的传质研究尚未见报道。

与高温加热相比,真空低温蒸煮需要时间较长^[16],难以有效地应用于工厂实际生产,超声波与真空联合煮制卤牛肉可提高煮制效率,提高产品品质。本研究以牛前腱子肉为研究对象,采用超声波协同真空卤煮牛肉,通过测定卤煮过程中卤牛肉的食盐含量、

水分含量和质量变化量等,获得卤煮过程中卤牛肉的传质动力学数据,为酱卤肉制品的绿色加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料

1.1.1 实验材料与试剂

牛前腱子肉,安徽徽食食品有限公司提供;食盐、香辛料(陈皮、八角、砂仁等),购于本地大润发超市;铬酸钾、氢氧化钠、酚酞、硝酸银、 $\rho=95\%$ 乙醇、无水乙醇,均购于亚泰化工有限公司;0.1 mol/L磷酸盐缓冲液(pH值7.3)、 $\rho=2.5\%$ 戊二醛(电泳专用),上海麦克林生化科技有限公司;盐酸,南京化学试剂有限公司。以上试剂无特殊说明均为分析纯。

1.1.2 主要仪器设备

M-20B 卤素水分含量测量仪,杭州科博有限公司;CPA124S 电子天平,赛多利斯(上海)贸易有限公司;超声波协同真空蒸煮锅,自行设计制造;DK-98-II 马沸炉,天津市泰斯特仪器有限公司;HCP-A6 组织碎肉机,中山市小马熊电器有限公司;JSM-6510LV 型扫描电子显微镜,日本电子株式会社;SCIENTZ-10N 真空冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备

取冷冻的牛前腿腱子肉,于密封袋中自来水浸泡解冻,将解冻后的牛前腱子肉去掉表面的脂肪及筋膜,清水洗净表面血水,沥干水分,切成长×宽×高约40mm×40mm×40mm大小、重约60g肉块,各肉块组织结构、结缔组织含量相似,称量计重后,将肉块置于含盐量2.5%卤汤(冷却至室温)里进行卤制,肉液比1:4,按照试验设计条件制备卤牛肉样品。

1.2.2 卤煮试验设计

取处理好的肉块及卤汤置于超声波真空卤煮锅中,设定真空度分别为-0.054、-0.043、-0.031、-0.016 MPa,对应卤煮温度分别设定为80、85、90、95℃,升温速率4.75℃/min,各真空度下分不同批次、不同卤煮时间卤煮,卤煮取样时间分别为:20、40、60、80、100、120min,以卤牛肉中食盐含量、水分含量、卤肉的质量以及卤汤的食盐含量为指标,研究不同真空度卤煮牛肉的传质规律。

取前面研究得出的最佳真空度及其对应的温度,于卤制开始时开启超声波并开始加热,升温速率4.75 °C/min,超声波频率为40 kHz、处理时间为30 min,功率分别为400、600、800、1 000、1 200 W,取样测定;取得出的最佳功率,超声波频率分别为22、28、40 kHz,处理时间30 min,升温速率4.75 °C/min,分批次卤煮,取样测定。所有卤煮的取样时间分别为:20、40、60、80、100、120 min,以卤牛肉中食盐含量、水分含量、卤肉的质量以及卤汤的食盐含量为指标,研究不同超声功率协同真空和不同超声频率协同真空下的传质规律。所有实验重复测定三次,取平均值。以无超声常压卤煮为对照。

1.3 分析测定

1.3.1 指标测定

(1) 食盐含量的测定

采用GB 5009.44-2016《食品安全国家标准 食品中氯化物的测定》中银量法测定。

(2) 水分含量的测定

均匀取样,组织捣碎机捣碎后,称取约1.20 g捣碎后的样品,采用水分测定仪于(105±1) °C下测定。

(3) 质量变化的测定

参考文献^[17]方法,略作修改,初始牛肉块重记为 M_0 ,煮制过程中质量变化记为 ΔM_t^0 ,各时间下牛肉的质量记为 M_t ,通过下列公式计算质量变化。

$$\Delta M_t^0 = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.2 卤牛肉中食盐含量变化和水分含量变化计算公式

计算牛肉在卤制过程中各个不同时刻的食盐含量变化(ΔM_t^{Cl})和水分含量变化(ΔM_t^w),判断变化情况,计算公式^[18]如下:

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

$$\Delta M_t^{Cl} = \frac{M_t \times X_t^{Cl} - M_0 \times X_0^{Cl}}{M_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

X_t^w 、 X_0^w ——分别为 t 和 0 时刻的肉块水分含量, %;

M_t 、 M_0 ——分别为 t 和 0 时刻的肉块质量, g;

X_t^{Cl} 、 X_0^{Cl} ——分别为 t 和 0 时刻的肉块盐含量, %。

1.3.3 卤牛肉中水相中的食盐含量计算

卤牛肉水相中的食盐含量(Z^{NaCl})按如下公式计算^[18]。

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

式中:

X^{NaCl} 、 X^w ——分别为卤牛肉的食盐含量和水分含量, %。

1.3.4 传质动力学模型

通过下列公式(5)^[18]建立物质传质动力学模型:

$$\Delta M_t^i = 1 + k_1 + k_2 \times t^{0.5} \quad (5)$$

式中:

ΔM_t^i ——分别表示质量变化(ΔM_t^e)、水分含量变化(ΔM_t^w)、食盐含量变化(ΔM_t^{Cl}), %;

k_1 ——描述传质开始阶段发生的情况;

k_2 ——与扩散机制动力学有关。

1.3.5 传质平衡方程

根据公式(6)^[18]计算平衡时肉水相和渗透液中的食盐含量。

$$Z_e^{Cl} = y_e^{Cl} = \frac{\frac{M_0^{SD}}{M_0^{SS}} x_0^{Cl} + y_0^{Cl}}{\frac{M_0^{SD}}{M_0^{SS}} (x_0^w + x_0^{Cl}) + (y_0^w + y_0^{Cl})} \quad (6)$$

式中:

Z_e^{Cl} ——平衡时肉水相中的食盐含量;

y_e^{Cl} ——平衡时渗透液中的食盐含量;

$\frac{M_0^{SD}}{M_0^{SS}}$ ——传质初始时牛肉与渗透液的质量比;

x_0^w 、 x_0^{Cl} 、 y_0^w 、 y_0^{Cl} ——牛肉和渗透液的初始水分以及食盐含量。

1.3.6 有效扩散系数

通过下列公式(7)^[18]计算传质过程中的有效扩散系数。

$$1 - Y_t^{Cl} = 1 - \left(\frac{Z_t^{Cl} - y_t^{Cl}}{Z_0^{Cl} - Z_e^{Cl}} \right) = 2 \left(\frac{De \times t}{\pi \times l^2} \right) + K \quad (7)$$

式中:

Y_t^{Cl} ——肌肉水相与渗透液之间的传质驱动力;

l ——肉块厚度的一半, m;

De ——有效扩散系数, m²/s;

Z_0^{Cl} 、 Z_t^{Cl} 、 Z_e^{Cl} ——肌肉水相在传质的 0 、 t 时刻以及平衡点的食盐含量, %;

K ——校正传质刚刚开始时候的任何热力学机制或其他传质现象的效应。

1.3.7 微观结构

样品预处理:参考Paika^[19]的方法略作修改,取最佳真空卤煮、超声波协同真空卤煮条件下不同批次的样品,分别距表面2~3 mm处向内切取约8×4×2 mm大小的切片,浸泡于 $\varphi=2.5\%$ 戊二醛溶液中,4 °C下固定24 h。使用0.1 mol/L的磷酸盐缓冲液(pH值7.3)清洗3次,每次10 min,在27 °C环境中放置2 h后用

蒸馏水冲洗,再分别使用25%、50%、70%、96%(体积分)乙醇溶液及无水乙醇梯度脱水2次,乙醇溶液每次15 min,无水乙醇每次1 h。冷冻干燥,镀金,置于扫描电镜下观察样品微观结构的变化。以无真空常压煮制为对照。电镜扫描:将冻干卤牛肉块用导电胶带粘到样品处理台上,抽真空后镀上金膜,于扫描电子显微镜上进行扫描。扫描条件:工作电压20 kV,工作距离13 mm,放大倍数200倍。

1.3.8 数据统计分析

用Excel表格对所得数据进行平均值方差计算,运用SPSS 26软件一般线性模型进行方差分析, t 检验和相关回归分析,差异显著性水平($p < 0.05$),并用Origin-9.1软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同真空度卤煮对卤牛肉传质的影响

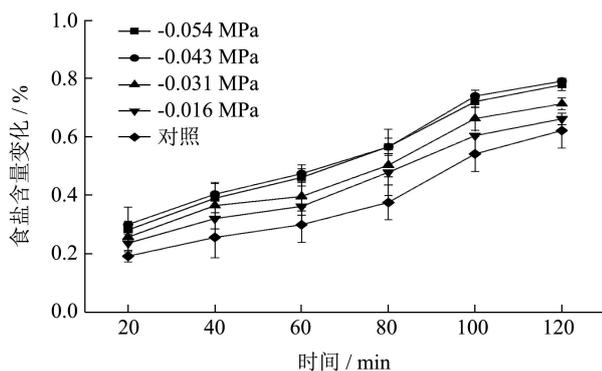


图1 不同真空度下卤牛肉食盐含量变化

Fig.1 Changes in salt content of stewed beef in seasoning under different vacuums

盐分及水分等小分子物质的扩散是卤牛肉中传质的主要表现^[20]。由图1可知,真空度大于-0.031 MPa各组的食盐含量变化显著高于对照组($p < 0.05$),但是较小真空度(-0.016 MPa)下,真空卤煮的食盐含量变化在前40 min内与对照无差异($p > 0.05$),40 min后差异显现;真空度增加到-0.043 MPa时,食盐含量变化最大,120 min时达0.79%,此后增加真空度,差异不显著($p > 0.05$)。分析认为,这种现象的出现可能源自:在真空密闭环境下,压力降低,物料分子运动速率加快,增加了食盐的渗透,同时真空下牛肉的组织结构有膨胀增大趋势,利于食盐的渗透^[21];二是在温度的协同下,活化食盐分子数量增加,介质间的流动性增加,从而增加传质^[22],当真空度增加到-0.043 MPa时,活化的食盐分子数量达到最大。各真空度下,随着煮制时间的延长,食盐变化量均逐渐增加,在真空度小于-0.031 MPa条件下,煮制40~60 min食盐含量变

化无差异,大于真空-0.031 MPa时差异显著,说明在煮制前期,真空度增加有助于食盐的渗透,当煮制到100 min后各组无差异($p > 0.05$);从增幅来看,随着时间的增加,各真空度下食盐含量变化增幅整体呈先下降再上升趋势,且随着真空度的升高,增幅程度提高,在100 min后逐渐趋于平缓。出现这种现象的原因可能是卤煮前期在20 min内温度即达到蛋白质变性温度,导致牛肉结构收缩,增大了传质阻力,随着卤煮时间的增加,肌纤维蛋白完全变性,牛肉结构变得松散,促进了卤汤的渗入,从而增加了食盐含量。

水分变化方面,从图2可知,卤煮过程中,真空度的改变对卤牛肉中水分含量变化量有显著影响。真空组的水分含量变化显著小于对照组($p < 0.05$),真空度小于-0.043 MPa时,水分含量变化随着真空度的增大而减小,在真空度达-0.043 MPa后,水分含量变化最小,120 min时为37.80%,随后增加真空度差异不显著($p > 0.05$)。分析认为,真空度增加,温度逐渐减小,煮制过程中卤牛肉的肌原纤维结构变性较小,从而保留更多水分;二是在加热条件下,致肌原纤维蛋白和肌浆蛋白部分发生解离,蛋白质亲水基团增加,系水力提高,从而水分含量变化减小^[23]。李艳红等^[24]研究真空低温加热处理牦牛肉发现,随着温度从55℃上升到85℃时,牦牛肉的水分含量逐渐降低,这与本试验研究结果类似。卤牛肉中水分含量与时间呈负相关,各真空度下,随着卤煮时间的增加,水分含量变化显著增加($p < 0.05$),20~40 min时间段水分含量变化增加趋势显著,原因是温度升高至蛋白质变性温度时,牛肉肌纤维结构收缩,体积变小,将牛肉内部水分挤出^[25,26],从而导致水分含量变化增大,40 min后水分含量增加趋势随时间的增加逐渐趋于平稳。

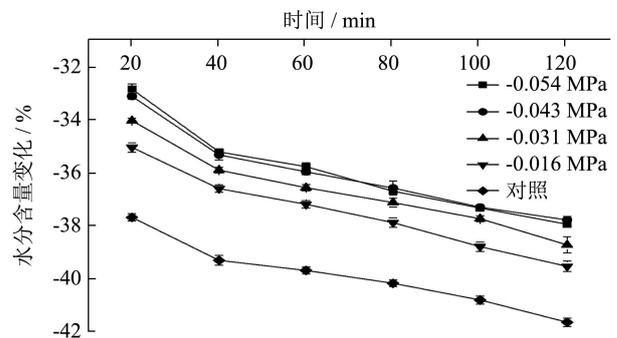


图2 不同真空度下卤牛肉水分含量变化

Fig.2 The moisture content of stewed beef in seasoning under different vacuum

质量变化与水分含量变化的趋势基本相同,质量变化的主要原因是牛肉中水分的流失^[27]。质量变化可以一定程度上反映卤牛肉的品质,质量变化越大,蒸

煮损失越大, 卤牛肉的出品率越低, 口感也会随之变化。从图 3 可以看出, 真空组的质量变化显著低于对照组, 随着真空度的升高质量变化逐渐减小, 在真空度达-0.043 MPa 后, 质量变化达到最小, 120 min 时为 41.28%, 随后增加真空度差异不显著 ($p>0.05$), 各真空度下随卤煮时间的增加, 质量变化逐渐增加。陈美玉^[28]发现, 真空低温加热牛肉, 牛肉的蒸煮损失率随温度的升高 (45~85) °C 和时间的延长 (0~120) min 显著增加, 85 °C 下最大蒸煮损失达 30.2%, 120 min 最大蒸煮损失率达 28.6%, 与本文研究结果类似。综合来看, -0.043 MPa 真空度下的卤牛肉的传质效果最好。

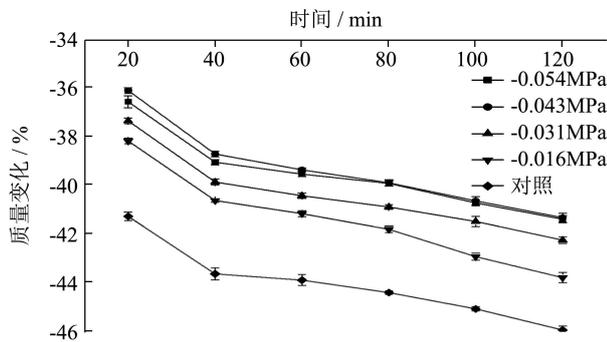


图 3 不同真空度下卤牛肉质量变化

Fig.3 Weight change of stewed beef in seasoning under different vacuum

2.2 不同超声功率协同真空卤煮对卤牛肉的传质的影响

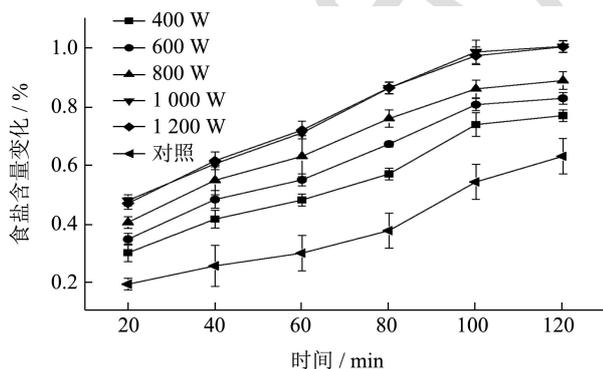


图 4 不同功率协同真空下卤牛肉食盐含量变化

Fig.4 The salt content of stewed beef in seasoning under different power and vacuum

功率超声在肉品加工中能加速传质和增强肉制品的保水性^[29]。由图 4 可知, 不同功率超声波处理各组的食盐含量变化显著大于对照组 ($p<0.05$); 超声波功率越高, 食盐含量变化越大, 在功率 400~1000 W 时, 各组间同一时间段下食盐含量变化逐渐增大且差异显

著 ($p<0.05$), 120 min 时由 0.77% 上升至 1.01%, 根据贾娜等^[30]研究发现, 超声波功率增加 (100、400、500 W), 牛肉中 NaCl 含量从 2.85% 升至 3.98%, 与本试验研究结果相似, 原因是机械效应增强, 使牛肉肌纤维断裂, 从而减少了传质的阻力, 促进了食盐的传质; 在超声功率为 1000 W 时达到最大, 120 min 时值为 1.01%, 继续增加功率, 食盐含量变化不显著 ($p>0.05$), 可能是在功率 1000 W 时超声波的机械效应达到饱和所致^[31]; 与真空度-0.043 MPa 卤煮结果相比, 功率 400 W 时, 食盐含量变化与其无显著差异, 增大功率食盐含量变化大于真空卤煮, 说明超声功率较低时与真空的协同传质作用较低; 各功率下, 随着卤煮时间的增加, 食盐含量变化均逐渐增加, 20~60 min 增加趋势有所下降, 随后逐渐上升, 100 min 后趋于平缓, 这是由于卤煮前期, 随时间的增加温度逐渐升高, 使肌纤维产生热收缩, 导致食盐渗透速率下降; 随着卤煮时间延长, 且在超声功率和真空的协同下, 卤牛肉的肌纤维断裂, 间隙变大, 物料食盐分子活化数目增加, 增大了食盐的渗透性^[22,32]。

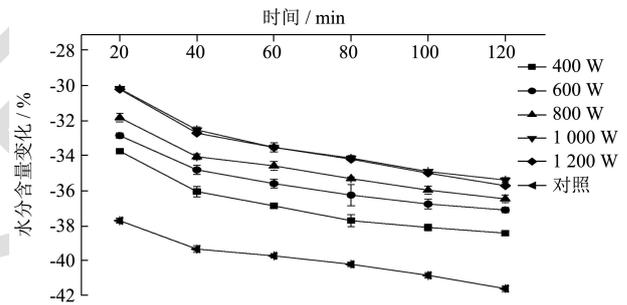


图 5 不同功率协同真空下卤牛肉水分含量变化

Fig.5 The moisture content of stewed beef in seasoning under different power and vacuum

从图 5 可以得知, 超声波协同真空卤煮下, 改变功率能增加卤牛肉中的水分含量。超声波协同真空组水分含量变化显著小于对照组 ($p<0.05$), 随着功率的增加, 水分含量变化显著降低 ($p<0.05$), 功率 400~1000 W 时, 各功率组间同一时间段下水分含量变化呈显著减少的趋势, 120 min 时由 42.00% 降低至 39.27%, 邹鹤鹤^[32]研究发现, 超声波功率增加 (0~1000 W) 可以降低酱卤牛肉的蒸煮损失, 120 min 时由 40.03% 减少至 39.24%, 差异不显著, 这与本试验结果略有不同, 可能是处理方法不同造成。与真空-0.043 MPa 卤煮结果相比, 超声功率 400 W 时, 水分含量变化显著大于真空卤煮, 当功率大于 600 W 水分含量变化显著小于真空卤煮, 说明超声功率增加, 可以减少牛肉水分损失。各超声功率下, 随着卤煮时间的延长, 水分含量

变化均显著增加 ($p < 0.05$), 40 min 前, 水分含量变化趋势显著变大, 这是因为短时间内温度升高, 蛋白质变性, 空间结构变小, 导致牛肉内部水分流失较大^[26,30], 随着加热时间的延长, 水分含量变化增加的趋势逐渐趋于平稳。

图6中质量变化的趋势与水分含量变化趋势基本一致, 超声协同真空卤煮质量变化显著小于对照组 ($p < 0.05$), 超声功率增加, 质量变化逐渐减小, 功率升到 1 000 W, 煮制时间 120 min 时, 质量变化从 42.00%减小到 39.27%, 继续增加功率质量变化无显著变化 ($p > 0.05$)。贾娜等^[30]发现, 增大超声功率 (100、400、500 W) 可以增加牛肉的保水性, 蒸煮损失由 48.51%减少到 45.55%, 与本试验研究结果相似, Turantas 等^[33]也认为, 增加超声功率能增加牛肉的保水性, 主要是超声波空化作用的影响, 而超声波功率超过 1 000 W 时, 可能是此时产生的空化作用达到最大, 因此质量变化不显著。各功率下, 随着煮制时间的延长, 质量变化均逐渐增大。超声波功率 1 000 W 时, 卤牛肉中食盐含量变化最大、水分含量变化和质量变化最小。

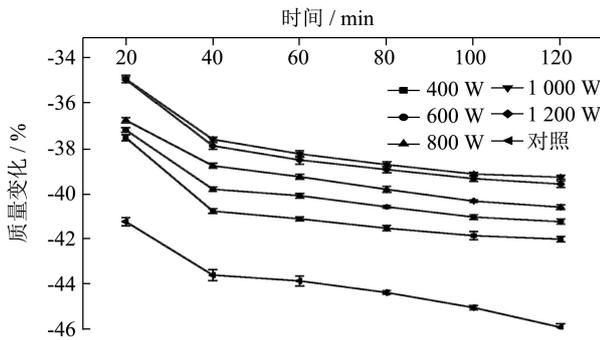


图6 不同功率协同真空下卤牛肉质量变化

Fig.6 Weight change of stewed beef in seasoning under different power and vacuum

2.3 不同超声频率协同真空卤煮对卤牛肉的传质影响

与真空-0.043 MPa 卤煮结果相比, 改变超声频率显著增加了食盐含量变化。由图7可知, 与对照组相比, 不同超声频率真空卤煮下的食盐含量变化显著大于对照组 ($p < 0.05$)。各频率组间前 20 min 食盐含量变化无显著差异, 20 min 后差异显现, 其中, 40 kHz 食盐含量变化显著小于其余两组, 22、28 kHz 组食盐含量变化随频率增加显著增加, 22、28、40 kHz 时最大变化量分别为 1.04%、1.17%、0.97%。根据贾娜^[30]的认为, 是由于低频率超声波产生的机械效应和空化

作用更强, 对肌纤维结构进行更加有效的破坏, 使肌原纤维蛋白结构松弛, 促进传质, 在 28 kHz 频率食盐含量变化最大, 可能是因为在在此频率下超声机械效应达到了最大效果所致^[31]。随着煮制时间的增加, 各频率下, 食盐含量变化逐渐增加, 卤煮 20~60 min 时, 食盐含量变化趋势逐渐减小, 60 min 后逐渐增大并在 100 min 逐渐趋于平稳。这可能是因为卤煮前期牛肉受热, 牛肉蛋白质结构发生改变, 导致食盐渗透阻力增大, 随着时间的增加, 肌肉蛋白完全变性, 肌肉在热作用下变得更加松弛, 卤汤渗透增加, 从而食盐含量增加。

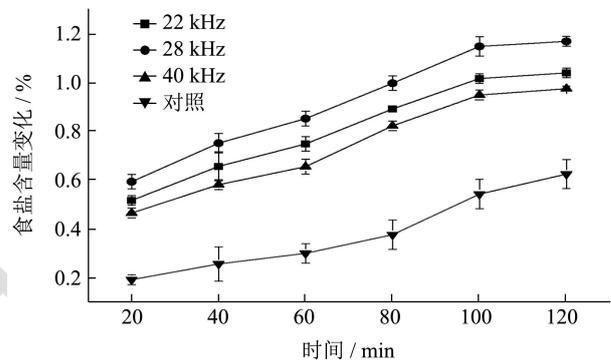


图7 不同频率协同真空下卤牛肉食盐含量变化

Fig.7 Changes in salt content of stewed beef in seasoning under different frequencies in a coordinated vacuum

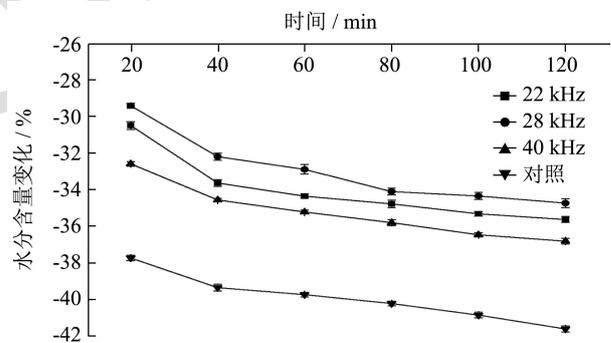


图8 不同频率协同真空下卤牛肉水分含量变化

Fig.8 The moisture content of stewed beef in seasoning under different frequencies in a coordinated vacuum

从图8可看出, 超声频率对水分变化有显著的影响, 当频率上升到 28 kHz, 120 min 时水分含量变化最小为 34.70%, 显著低于 22 kHz、120 min 时的水分含量变化 35.60% ($p < 0.05$), 频率为 40 kHz 时各时间段的水分含量变化均大于低频率组 (22、28 kHz)。这是由于一定的低频率下超声波的空穴作用更强, 在负压下的协同作用下肌纤维结构膨胀松弛, 从而提高了卤牛肉的水分含量, 这一结果与邵建航^[31]使用不同超声频率 (0、25、33、40、59 kHz) 处理牛肉, 在 33 kHz 时牛肉的蒸煮损失最低为 20.64%, 持水性显著提高相

类似；各频率下，随着卤煮时间的增加，水分含量变化量逐渐增大，前 40 min 水分含量变化的变化趋势较大，随着卤煮时间的延长逐渐减小，在 100 min 后水分含量变化无显著差异 ($p>0.05$)。

由图 9 可知，对照组的质量变化量最大，120 min 时为 45.90%，随着超声频率（22、28、40 kHz）的增加，同一时间段下质量变化先减小后增加，在 120 min 时质量变化分别为 39.45%、38.03%、40.45%。其中超声波频率增加到 28 kHz 时质量变化最小，120 min 时为 38.03%，40 kHz 频率处理组质量变化显著大于 22 kHz ($p<0.05$)。低频率处理质量变化变小，主要是因为低频率下，超声的空穴效应导致牛肉肌纤维蛋白结构松弛，增加了牛肉的持水性和卤汤的渗透^[31]，从而减少了卤牛肉在卤煮过程中质量的损失，增加了出品率；各频率下，随着卤煮时间的增加，质量变化均逐渐增加，100 min 后各频率下质量变化增加但无显著差异。

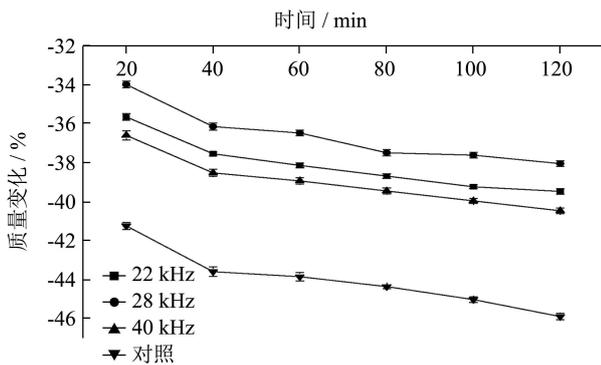


图 9 不同频率协同真空下卤牛肉质量变化

Fig.9 The weight change of stewed beef in seasoning under different frequencies in a coordinated vacuum

2.4 传质动力学

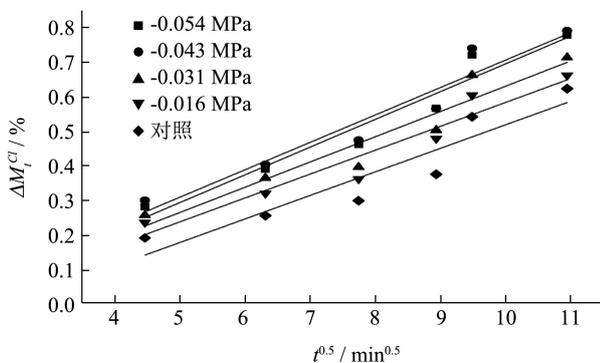


图 10 不同真空卤煮下卤牛肉食盐含量变化与时间的平方根归曲线

Fig.10 The square root regression curve of salt content change and time of stewed beef in seasoning under different vacuum stewed cooking

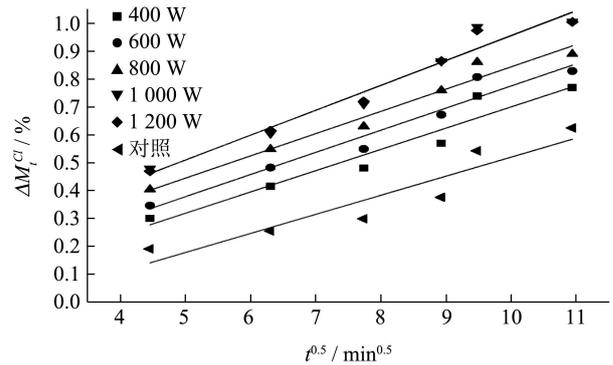


图 11 不同功率协同真空下卤牛肉食盐含量变化与时间的平方根回归曲线

Fig.11 The square root regression curve of salt content change and time of stewed beef in seasoning under different power and vacuum

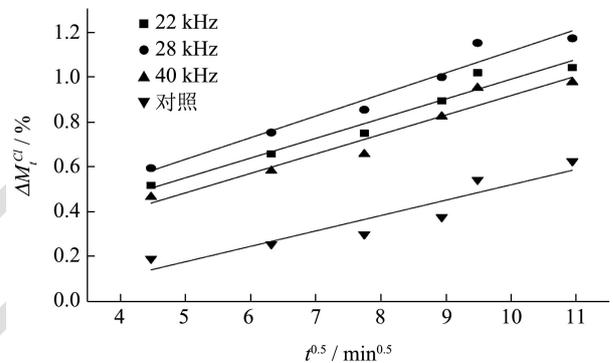


图 12 不同频率协同真空下卤牛肉食盐含量变化与时间的平方根回归曲线

Fig.12 The square root regression curve of salt content change and time of stewed beef in seasoning under different frequency and vacuum

表 1 不同真空度下卤牛肉 ΔM_t^w 、 ΔM_t^{Cl} 、 ΔM_t^0 的动力学参数值 (k_1 和 k_2) 及其回归系数 ($p<0.05$)

Table 1 Kinetic parameter values (k_1 and k_2) and regression coefficients of stewed beef in seasoning ΔM_t^w 、 ΔM_t^{Cl} 、 ΔM_t^0 under different vacuum degrees ($p<0.05$)

指标	真空度/MPa	k_1	k_2	R^2
ΔM_t^{Cl}	-0.054	-0.11	0.08	0.95
	-0.043	-0.09	0.08	0.93
	-0.031	-0.10	0.07	0.92
	-0.016	-0.11	0.07	0.93
ΔM_t^0	-0.054	-33.93	-0.70	0.94
	-0.043	-33.18	-0.77	0.95
	-0.031	-34.69	-0.71	0.94
	-0.016	-34.77	-0.83	0.94
ΔM_t^w	-0.054	-29.82	-0.77	0.96
	-0.043	-30.40	-0.70	0.96
	-0.031	-31.18	-0.69	0.98
	-0.016	-32.05	-0.69	0.98

表2 不同超声功率协同真空下卤牛肉 ΔM_t^w 、 $\Delta M_t^{c'l}$ 、 ΔM_t^0 的动力学参数值 (k_1 和 k_2) 及其回归系数 ($p < 0.05$)

Table 2 Kinetic parameter values (k_1 and k_2) and regression coefficients of ΔM_t^w , $\Delta M_t^{c'l}$, ΔM_t^0 of stewed beef in seasoning under vacuum with different ultrasonic power

指标	功率/W	k_1	k_2	R^2
$\Delta M_t^{c'l}$	400	-0.05	0.07	0.94
	600	-0.02	0.08	0.95
	800	0.04	0.08	0.97
	1000	0.06	0.09	0.96
	1200	0.06	0.09	0.97
ΔM_t^0	400	-35.70	-0.64	0.80
	600	-35.28	-0.59	0.86
	800	-34.63	-0.58	0.93
	1000	-32.82	-0.65	0.87
	1200	-32.81	-0.67	0.86
ΔM_t^w	400	-31.03	-0.72	0.94
	600	-30.31	-0.66	0.96
	800	-29.12	-0.70	0.96
	1000	-27.19	-0.79	0.95
	1200	-26.83	-0.86	0.96

表3 不同超声频率协同真空下卤牛肉 ΔM_t^w 、 $\Delta M_t^{c'l}$ 、 ΔM_t^0 的动力学参数值 (k_1 和 k_2) 及其回归系数 ($p < 0.05$)

Table 3 Kinetic parameter values (k_1 and k_2) and regression coefficients of stewed beef in seasoning ΔM_t^w , $\Delta M_t^{c'l}$, ΔM_t^0 under vacuum with different ultrasonic frequencies

指标	频率/kHz	k_1	k_2	R^2
$\Delta M_t^{c'l}$	22	0.11	0.09	0.96
	28	0.15	0.10	0.96
	40	0.05	0.09	0.94
ΔM_t^0	22	-33.42	-0.59	0.94
	28	-31.70	-0.61	0.93
	40	-34.41	-0.57	0.95
ΔM_t^w	22	-27.99	-0.75	0.87
	28	-26.37	-0.82	0.93
	40	-30.05	-0.65	0.96

表4 无超声无真空下卤牛肉 ΔM_t^w 、 $\Delta M_t^{c'l}$ 、 ΔM_t^0 的动力学数值 (k_1 和 k_2) 及其回归系数 ($p < 0.05$)

Table 4 Kinetic values (k_1 and k_2) and regression coefficients of stewed beef in seasoning ΔM_t^w , $\Delta M_t^{c'l}$, ΔM_t^0 under no ultrasound and no vacuum

处理方式	指标	k_1	k_2	R^2
无超声无真空	$\Delta M_t^{c'l}$	-0.16	0.07	0.88
	ΔM_t^0	-38.71	-0.66	0.94
	ΔM_t^w	-35.36	-0.58	0.97

卤牛肉在不同真空卤煮、不同功率协同真空卤煮和不同频率协同真空卤煮食盐含量变化 ($\Delta M_t^{c'l}$) 与卤煮时间的平方根 ($t^{0.5}$) 的线性关系如图 10~12 所示。 k_2 值反映了卤牛肉中食盐含量变化 ($\Delta M_t^{c'l}$)、水分含量变化 (ΔM_t^w) 和质量变化 (ΔM_t^0) 的增加幅度, k_2 值越大, 传质扩散效率越快^[18]。从表 1 可知, k_2 值与真空度的大小有关, $\Delta M_t^{c'l}$ 和 ΔM_t^0 计算的 k_2 值随着真空度的增加而呈现增加趋势, ΔM_t^w 计算的 k_2 值随着真空度的增加逐渐降低。从表 2 中可以看出, 超声功率协同真空卤煮下, $\Delta M_t^{c'l}$ 计算的 k_2 值随着超声波功率的增大逐渐增加, ΔM_t^w 和 ΔM_t^0 计算的 k_2 值先增加后减小。频率影响方面, 卤煮 $\Delta M_t^{c'l}$ 计算的 k_2 值 (表 3) 随着频率的增大先增加后减小, ΔM_t^w 、 ΔM_t^0 计算的 k_2 随着频率的增大先减小后增加。根据杨登玲等^[34]研究发现, 加热传质下 k_1 、 k_2 值与加热方式有关。综合表 1、2、3 来看, 不同真空卤煮、不同超声功率协同真空卤煮和不同超声频率协同真空卤煮下的 $\Delta M_t^{c'l}$ 、 ΔM_t^w 和 ΔM_t^0 与 $t^{0.5}$ 都有很好的相关性且在 $p=0.05$ 水平上显著。因此, 此模型可以用来拟合卤牛肉中物质传质过程和时间的关系。

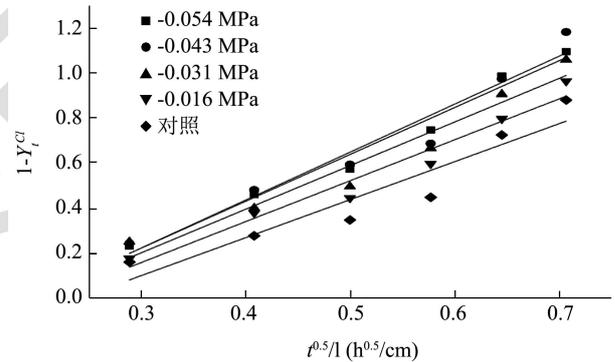


图 13 不同真空下的传质驱动力 ($1-Y_t^c$) 与 $t^{0.5}/l$ 的回归曲线
Fig.13 Regression curve of mass transfer driving force ($1-Y_t^c$) and $t^{0.5}/l$ under different vacuum

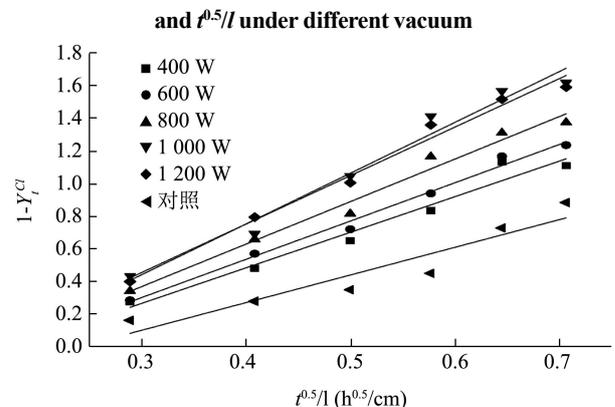


图 14 不同功率协同真空下的传质驱动力 ($1-Y_t^c$) 与 $t^{0.5}/l$ 的回归曲线
Fig.14 Regression curve of mass transfer driving force ($1-Y_t^c$) and $t^{0.5}/l$ under different powers in cooperative vacuum

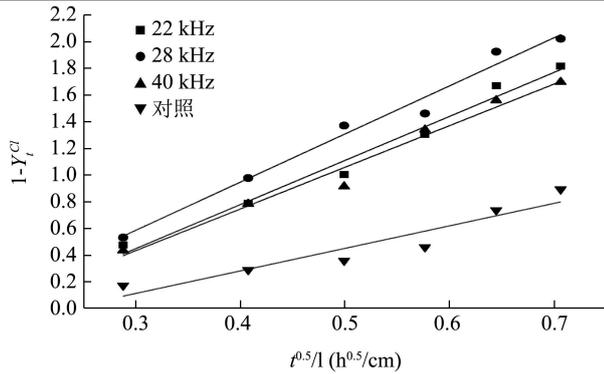


图 15 不同频率协同真空下的传质驱动力 $(1-Y_t^{\alpha})$ 与 $t^{0.5}/l$ 的回归曲线

Fig.15 Regression curve of mass transfer driving force $(1-Y_t^{\alpha})$ and $t^{0.5}/l$ under different frequencies in a coordinated vacuum

2.5 有效扩散系数 (De) 的计算

卤煮过程下肉制品的传质与阻力的大小有关，而阻力主要与卤牛肉中的结构变化有关。此模型中真空度和超声波是主要的传质动力，当达到卤煮平衡状态时，卤汤中的食盐含量 (y_e^{α}) 与卤牛肉水相中的食盐含量 (z_e^{α}) 相等，本试验过程中通过公式 (6) 计算得出平衡点为 0.021 58。通过公式 (7) 得出传质驱动力 $(1-Y_t^{\alpha})$ 与 $t^{0.5}/l$ 之间的线性曲线关系 (图 13、图 14、图 15)，算出 De 值，得到超声波协同真空的传质动力学模型。

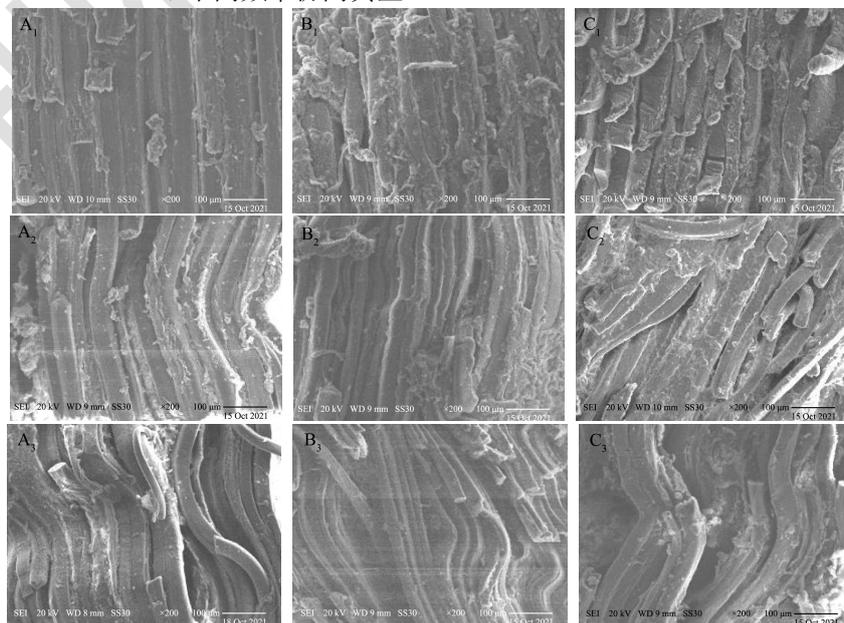
从表 5 中可以看出，对照组的有效扩散系数显著低于各真空卤煮与各超声波协同真空卤煮有效扩散系数。3 种卤煮条件下，有效扩散系数 De 值随着真空度的升高、功率的增大而逐渐增大，在真空度为 -0.043 MPa 时为 $6.60 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ，功率为 1 000 W 时有效扩散系数 De 值为 $1.17 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ，不同频率协同真空

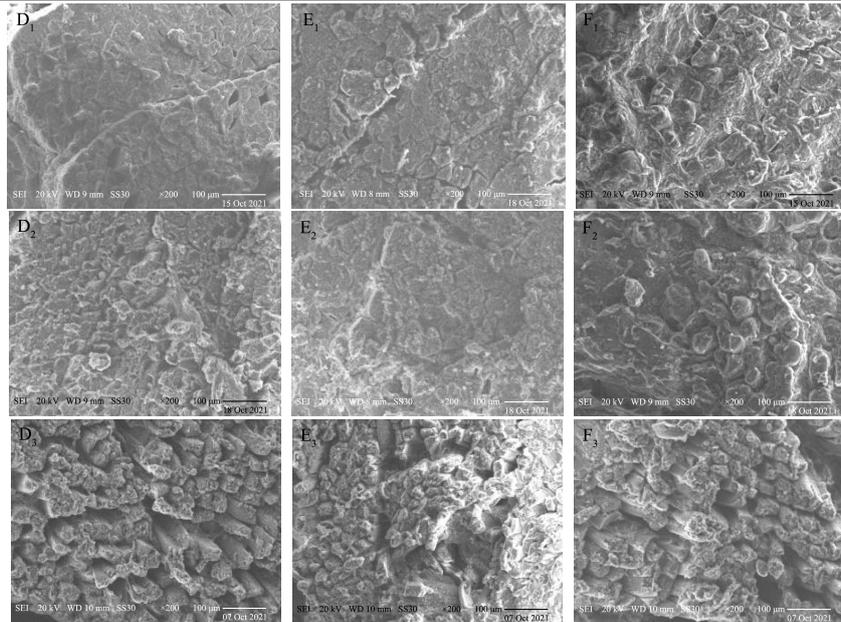
卤煮时也随着频率增大有增大趋势，在频率 28 kHz 时最大为 $1.42 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ；对于不同卤煮条件下，相同卤煮时间下的卤牛肉，有效扩散系数的大小分别为：不同超声频率协同真空卤煮 > 不同超声功率协同真空卤煮 > 不同真空卤煮 > 对照组。此外，真空卤煮与超声波协同真空卤煮的传质驱动力 $(1-Y_t^{\alpha})$ 与时间的平方根除以肉块厚度 $(t^{0.5}/l)$ 均有很好的线性关系 ($R^2 \geq 0.95$)。因此，超声波协同真空卤煮牛肉可以提高卤煮过程的传质效率，且在超声波频率 28 kHz、功率 1 000 W、真空度 -0.043 MPa 条件下扩散系数最高。

表 5 真空煮制和超声波协同真空煮制卤牛肉得到的理论动力学参数值

Table 5 Theoretical kinetic parameter values obtained by vacuum cooking and ultrasonic cooking of stewed beef in seasoning

组别	处理条件	De/(m ² /s)	k	R ²
真空煮制	-0.054 MPa	6.19×10^{-5}	-0.40	0.98
	-0.043 MPa	6.60×10^{-5}	-0.41	0.95
	-0.031 MPa	4.96×10^{-5}	-0.37	0.95
	-0.016 MPa	4.90×10^{-5}	-0.38	0.96
不同功率协同真空煮制	400 W	6.34×10^{-5}	-0.38	0.97
	600 W	7.34×10^{-5}	-0.39	0.99
	800 W	8.81×10^{-5}	-0.40	0.98
	1 000 W	1.35×10^{-4}	-0.48	0.98
	1 200 W	1.13×10^{-4}	-0.43	0.99
不同频率协同真空煮制	22 kHz	1.60×10^{-4}	-0.55	0.98
	28 kHz	1.72×10^{-4}	-0.50	0.98
	40 kHz	1.40×10^{-4}	-0.51	0.98
对照组		4.56×10^{-5}	-0.40	0.90



图 16 不同条件下卤牛肉微观结构 ($\times 200$)Fig.16 Microstructure of stewed beef in seasoning under different conditions ($\times 200$)

注: 字母 A、B、C 分别表示真空 (-0.043 MPa) 卤煮、无超声常压卤煮、超声 (28 kHz、1 000 W) 真空 (-0.043 MPa) 卤煮 (纵切), D、E、F 分别表示真空卤煮、无超声常压卤煮、超声波协同真空卤煮 (横切), 数字 1、2、3 分别表示卤煮时间 20 min、60 min 和 120 min, 标尺: 100 μm

2.6 微观结构

如图 16 是卤牛肉的微观结构变化图。各卤煮条件下, 卤煮初期, 真空 (-0.043 MPa) 卤煮微观结构与对照组无显著差异, 纤维结构排列紧密而规则, 超声 (频率 28 kHz、功率 1 000 W) 协同真空卤煮肌纤维细胞膜出现损伤, 排列较为紧密而规则, 这些变化会导致食盐渗透的阻力增大, 牛肉中的水分被挤出, 从而减少水分; 随着卤煮时间的增加, 3 种卤煮方式下的肌纤维结构均逐渐变得松散而不规则, 出现不规则孔洞, 纤维间隙增大。其中真空卤煮和超声波协同真空卤煮下肌纤维直径膨胀变大, 不规则孔洞增多, 超声波协同真空组的肌原纤维结构在 200 倍下可以清晰的看到, 肌原纤维束断裂分离, 肌纤维结构紊乱。研究表明, 卤煮时间的延长会导致蛋白质变性, 结缔组织降解和可溶性胶原蛋白流失, 肌原纤维内部的蛋白出现坍塌或聚集, 形成不规则的孔洞, 造成纤维细胞之间的间隙变大, 连接松散^[35,36], 而肌纤维直径膨胀, 间隙增大会使卤牛肉容纳更多的水分, 且减小卤汤渗入牛肉内部的阻力^[32], 从而提高卤牛肉的食盐含量, 增大传质效果。因此可知, 超声波协同真空卤煮下传质效果较好。

3 结论

本研究以牛腱子肉为研究对象, 通过不同真空卤

煮、不同超声功率协同真空卤煮、不同超声频率协同真空卤煮 3 种卤煮方式卤制牛肉, 测定卤煮过程中卤牛肉的食盐、水分和质量变化, 研究超声波协同真空卤煮牛肉的传质规律。结果表明: (1) 超声波协同真空卤煮和真空卤煮具有显著促进传质的效应。卤牛肉中的食盐含量变化 (ΔM_t^c) 随着真空度、超声波功率和频率的增加而增大, 水分含量变化 (ΔM_t^w) 和质量变化 (ΔM_t^g) 随着真空度、超声波功率和频率的增加而减小, 同时间下, 在真空度-0.043 MPa、超声功率 1 000 W、频率 28 kHz 时, 卤牛肉的 ΔM_t^c 最大, ΔM_t^w 和 ΔM_t^g 最小, 120 min 时分别为 1.17%、34.70%、38.03%。(2) 3 种卤煮方式下卤牛肉的 ΔM_t^c 、 ΔM_t^w 和 ΔM_t^g 与时间的平方根 ($t^{0.5}$) 均有较好的线性关系, 卤牛肉 ΔM_t^c 的 k_1 和 k_2 值随着真空度和超声功率的增加而增大, 随着超声频率的增加先增加后减小; 有效扩散系数 De 值随超声功率、超声频率和真空度增加而增加, 真空卤煮下, 真空度-0.043 MPa 时有效扩散系数最大, 为 $6.60 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 不同功率协同真空卤煮下, 功率为 1 000 W 时有效扩散系数最大, 为 $1.17 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, 不同超声频率协同真空卤煮时, 超声波频率 28 kHz 条件下卤牛肉的传质有效扩散系数最大, 为 $1.42 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, 其 De 值大小顺序为不同超声频率协同真空卤煮 > 不同超声功率协同真空卤煮 > 不同真空卤煮 > 对照组, 此外, 3 种卤煮方式的传质驱动力与 $t^{0.5}/l$ 具有很好的

线性相关性,可以较好的应用于卤牛肉卤煮工艺中。

(3) 卤煮初期,真空(-0.043 MPa)卤煮微观结构与对照组无显著差异,纤维结构排列紧密而规则,超声(频率 28 kHz、功率 1 000 W)协同真空卤煮肌纤维细胞膜出现损伤,排列较为紧密而规则;随着卤煮时间的增加,3种卤煮方式下的肌纤维结构均逐渐变得松散而不规则,出现不规则孔洞,纤维间隙增大,超声波协同真空肌原纤维束断裂分离,肌纤维结构更加紊乱,真空卤煮肌原纤维损坏较小。因此,超声协同真空卤煮对卤牛肉中的传质有显著影响,能促进传质进程,超声波协同真空卤煮最佳传质条件为真空度-0.043 MPa,超声频率 28 kHz,超声功率 1 000 W,超声时间 30 min。

参考文献

- [1] 王浩明,郑海波,李景军,等.酱卤肉制品关键加工技术研究进展[J].肉类研究,2020,34(8):102-107
- [2] Zhao H F, Cheng L. Immersion vacuum cooling as a novel technique for cooling meat products: Research advances and current state of the art [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(6): 785-795
- [3] 蔡华珍,蔡飞飞,周岷,等.真空冷却协同减菌处理对卤牛肉保鲜的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(19):233-238
- [4] Baldwin D E. Sous vide cooking: A review [J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2011, 1(1): 10-13
- [5] Rinaldi M, Santi S, Paciulli M, Ganino T, et al. Comparison of physical, microstructural and antioxidative properties of pumpkin cubes cooked by conventional, vacuum cooking and sous vide methods [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 101(6): 234-238
- [6] 彭子宁.低温烹煮技术下的酱卤制品品质及风味研究[D].哈尔滨:哈尔滨商业大学,2020
- [7] 闫寒,崔震昆,李阳阳,等.两段式低温真空烹饪对牛肉品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(18):231-236
- [8] 顾思远.低温慢卤牛肉的开发及其保藏研究[D].成都:成都大学,2020
- [9] Alejandra T, Sofia R M, Silvina P, et al. Vacuum impregnation in *Merluccius hubbsi* Hake fillets brining. Effect on mass transfer kinetics, texture and colour [J]. *LWT*, 2020, 119: 1254-1263
- [10] François D, Gilles T, Antoine C, et al. Pulsed vacuum brining of poultry meat: Interpretation of mass transfer mechanisms [J]. *Journal of Food Engineering*, 2003, 58(1): 75-83
- [11] 李可,刘俊雅,张艳艳,等.超声波在肉品加工中应用的研究进展[J].食品工业,2018,39(4):280-284
- [12] Zou Y H, Zhang W G, Kang D C, et al. Improvement of tenderness and water holding capacity of spiced beef by the application of ultrasound during cooking [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(3): 828-836
- [13] 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
- [14] Maanas S, Kshirod K D. Effect of ultrasonic vacuum pretreatment on mass transfer kinetics during osmotic dehydration of black jamun fruit [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 58: 234-242
- [15] 黄月,黄苇,陈宇,等.真空结合超声波加速盐水渗透鸡翅的方法研究[J].食品研究与开发,2015,36(19):8-11
- [16] 张凯华,臧明伍,李丹,等.真空低温蒸煮技术在动物源性食品中的应用进展[J].肉类研究,2016,30(12):35-40
- [17] Marchetti M D, Gomez P L, Yeannes M I, et al. Mathematical modeling of mass transfer kinetics during salting procedures of hake fillets [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 45(1): 45-53
- [18] 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
- [19] Paika K. The influence of postmortem ageing and roasting on the microstructure, texture and collagen solubility of bovine semitendinosus muscle [J]. *Meat Science*, 2003, 64(2): 191-198
- [20] Goli T, Bohuon P, Ricel J, et al. Mass transfer dynamics during the acidic marination of turkey meat [J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(1): 161-168
- [21] 孟祥忍,王恒鹏,谢静,等.真空低温烹饪对牛肉微观结构与理化性质的影响[J].食品与发酵工业,2019,45(9):152-158
- [22] 杨登玲,范远景,王明和,等.温度和压强对鸭肉食盐渗透与水分扩散的影响[J].食品与发酵工业,2018,44(6):211-215
- [23] Zheng H B, Xiong G Y, Han M Y, et al. High pressure/thermal combinations on texture and water holding capacity of chicken batters [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2015, 30: 8-14
- [24] 李艳红,王稳航.低温热处理对牦牛肉理化性质及感官特性的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(2):145-152
- [25] 朱莹莹,张丽,汝骅,等.牛肉加热过程中水分迁移规律研究[J].保鲜与加工,2021,21(2):122-127
- [26] Boland M, Kaur L, Chian F M, et al. *Muscle Proteins* [M]. *Encyclopedia of Food Chemistry*. Oxford. Academic Press. 2019: 164-179
- [27] 孙红霞,黄峰,丁振江,等.不同加热条件下牛肉嫩度和保水性的变化及机理[J].食品科学,2018,39(1):84-90
- [28] 陈美玉.基于水分迁移及肌原纤维蛋白特性研究真空低温

- 加热对牛肉品质的影响[D].杭州:浙江大学,2021
- CHEN Meiyu. Research on the effect of vacuum heating on beef quality based on water migration and myofibril protein characteristics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021
- [29] Alarcon-Rojo A D, Janacua H, Rodriguez J C, et al. Power ultrasound in meat processing [J]. Meat Science, 2015, 107(5): 86-93
- [30] 贾娜,刘丹,李博文,等.超声波辅助腌制及煮制温度对酱牛肉品质的影响[J].食品研究与开发,2016,37(9):115-118
- [31] 邵建航.超声波联合碳酸钾处理对牛肉品质及微观结构的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2021
- [32] 邹云鹤.超声波辅助煮制对酱卤牛肉品质的影响研究[D].南京:南京农业大学,2018
- [33] Turantas F, Kiliq G B, Kilip B. Ultrasound in the meat industry: general applications and decontamination efficiency [J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 198: 59-69
- [34] 杨登玲,范远景,王明和,等.不同加热方式对鸭肉渗透传质过程的影响研究[J].肉类工业,2017(12):19-25
- [35] Astruc T, Gatellier P, Labas R, et al. Microstructural changes in m. rectus abdominis bovine muscle after heating [J]. Meat Science, 2010, 85(4): 743-751
- [36] Li Y, Huang J, Zhou Y, et al. Structure-related differential proteins identification for sous-vide cooking hairtail (*Trichiurus lepturus*) product [J]. Food & Function, 2020, 11(11): 9960-9972

勘 误

因作者的疏忽,本刊特对以下内容进行勘误:

2021年第37卷第9期文章《贵州不同地区刺梨的综合品质对比分析》和2022年第38卷第9期文章《黔产不同海拔野生型刺梨原汁对2型糖尿病小鼠糖脂代谢及氧化应激的干预作用》,文中的基金项目“贵州省林业局科技项目(黔林科合[2020]2015)”和“贵州省林业局科技项目(黔林科合[2020]2011)”项目编号标错,应更正为“贵州省林业局科技项目(黔林科合[2020]11)”。