

# 冷却方式对酱牛肉品质的影响

田欢<sup>1,2</sup>, 黄峰<sup>2</sup>, 李侠<sup>2</sup>, 韩东<sup>2</sup>, 景晓亮<sup>3</sup>, 贾伟<sup>3</sup>, 白振远<sup>3</sup>, 李茂<sup>3</sup>, 张春晖<sup>2,\*</sup>  
(1.宁夏大学食品与葡萄酒学院, 宁夏 银川 750021; 2.中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193; 3.江苏超悦农业发展有限公司, 江苏 泰兴 225400)

**摘要:** 为研究不同冷却方式对酱牛肉品质的影响, 分析冷风隧道、自然冷却和真空冷却条件下酱牛肉冷却速率、冷却损失率、菌落总数、色泽、剪切力、风味等指标变化, 通过扫描、透射电子显微镜观察不同冷却方式下酱牛肉的肌纤维横向和纵向收缩情况。结果表明: 3种冷却方式中, 真空冷却处理酱牛肉冷却速率最快、肉色较为鲜艳, 但冷却损失率和剪切力也最大, 扫描、透射电镜观察结果表明, 真空冷却加速了水分损失和肌纤维结构收缩; 冷风隧道和自然冷却处理酱牛肉的初始菌落总数分别为2.35、2.75 (lg (CFU/g)), 显著高于真空冷却酱牛肉的1.85 (lg (CFU/g)) ( $P < 0.05$ ); 3种冷却方式处理酱牛肉风味品质无明显差异。因此, 真空冷却可提高酱牛肉冷却速率, 降低颜色劣变, 延长产品货架期, 但水分损失相对较大, 嫩度下降, 在酱牛肉工业化加工应用中需综合考虑。

**关键词:** 真空冷却; 冷风隧道; 自然冷却; 酱牛肉; 品质

## Effect of Cooling Methods on Quality of Sauced Beef

TIAN Huan<sup>1,2</sup>, HUANG Feng<sup>2</sup>, LI Xia<sup>2</sup>, HAN Dong<sup>2</sup>, JING Xiaoliang<sup>3</sup>, JIA Wei<sup>3</sup>, BAI Zhenyuan<sup>3</sup>, LI Mao<sup>3</sup>, ZHANG Chunhui<sup>2,\*</sup>  
(1.School of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.Comprehensive Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3.Jiangsu Chaoyue Agricultural Development Co. Ltd., Taixing 225400, China)

**Abstract:** The objective of this study was to investigate the impact of three cooling methods: cold air tunnel cooling, natural cooling and vacuum cooling on the quality of sauced beef. The changes in cooling rate, cooling loss rate, total number of colonies (TNC), color, shear force and flavor of sauced beef were analyzed under the cooling conditions. Moreover, the transverse and longitudinal contraction of muscle fibers in sauced beef was observed by scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM). Results showed that among the three cooling methods, vacuum cooling gave the highest cooling rate, and imparted a brighter color to sauced beef despite resulting in the highest cooling loss rate and shear force. SEM and TEM demonstrated that vacuum cooling accelerated water loss and muscle fiber contraction. The TNC in cold air tunnel and natural cooling treatment were 2.35 (lg (CFU/g)) and 2.75 (lg (CFU/g)), which were significantly higher than 1.85 (lg (CFU/g)) observed for vacuum cooling ( $P < 0.05$ ). In terms of flavor, there was no significant difference among the three cooling methods. Overall, while vacuum cooling could improve the cooling rate of sauced beef, reduce color deterioration and prolong the shelf life, it could result in a large water loss and reduced tenderness. Therefore, the cooking method should be considered comprehensively before its application to the industrial processing of sauced beef.

**Keywords:** vacuum cooling; cold air tunnel; natural cooling; sauced beef; quality

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201123-283

中图分类号: TS251.61

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2021) 01-0053-06

引文格式:

田欢, 黄峰, 李侠, 等. 冷却方式对酱牛肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2021, 35(1): 53-58. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201123-283. <http://www.rlyj.net.cn>

收稿日期: 2020-11-23

基金项目: 新疆生产建设兵团重点领域科技攻关项目 (2020AB012)

第一作者简介: 田欢 (1996—) (ORCID: 0000-0003-3475-8840), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉品科学。

E-mail: kad1996@163.com

\*通信作者简介: 张春晖 (1971—) (ORCID: 0000-0002-1411-4047), 男, 研究员, 博士, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: dr\_zch@163.com

TIAN Huan, HUANG Feng, LI Xia, et al. Effect of cooling methods on quality of sauced beef[J]. Meat Research, 2021, 35(1): 53-58. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201123-283. http://www.rlyj.net.cn

酱卤肉制品是我国生产和消费量最大的一类中式传统肉制品, 占我国肉制品年产量的50%以上。作为酱卤肉制品的典型代表, 酱牛肉具有丰富的营养价值和诱人的风味<sup>[1]</sup>。酱牛肉加工涉及解冻、腌制、卤制、冷却、包装等工艺环节, 其中冷却是调控酱牛肉产品保质期和质量的关键工艺<sup>[2]</sup>。产品快速通过20~50℃微生物易生长繁殖带将直接决定产品的最终保质期, 不同的冷却方式和冷却速率对产品颜色、质构、风味等品质指标有重要影响。

目前, 酱牛肉冷却工艺主要包括自然冷却、冷风隧道、真空冷却等。自然冷却冷却速率慢, 容易与外界发生交叉污染<sup>[3]</sup>, 多用于小批量生产。生产中最常用的是冷风隧道冷却, 冷风隧道冷却原理与自然冷却相似, 需综合考虑功耗等实际情况<sup>[4]</sup>。真空冷却以降温迅速和运行能耗小等特点在食品冷链中迅速发展<sup>[5-6]</sup>。真空冷却是一种快速冷却技术, 通过制造真空和低压环境, 使水分从食品表面和内部快速蒸发<sup>[7]</sup>, 与传统冷却相比, 温度分布均匀且下降速率很快<sup>[8]</sup>, 最早主要应用于园艺产品及蔬菜的采后预冷<sup>[9]</sup>。真空冷却技术能够延长货架期和保证产品的安全和卫生<sup>[10]</sup>。

本研究主要对比分析自然冷却、冷风隧道和真空冷却3种冷却方式对酱牛肉品质的影响, 为工业化加工中冷却方式的选择提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

酱牛肉 江苏超悦农业发展有限公司。

氯化钠(分析纯) 无锡市展望化工试剂有限公司; 平板计数琼脂 上海盛思生化科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

BSA423S电子天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; T10高速组织匀浆机 德国IKA公司; C-LM3B数显式肌肉嫩度仪 南农畜牧技术(北京)有限公司; PEN3便携式电子鼻 德国Airsense公司; CM-700D便携式色差仪 日本柯尼卡-美能达公司; DHP9052电热恒温培养箱 上海一恒科学仪器有限公司; S-570扫描电子显微镜、H-7500透射电子显微镜 日本Hitach公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 酱牛肉冷却处理

选取牛腱子肉作为原料进行卤煮, 将卤煮后的酱牛肉修整为质量约400 g、尺寸约18 cm×9 cm×5 cm进行实

验。采用冷风隧道、自然冷却和真空冷却3种冷却方式分别进行处理, 将中心温度从50℃降至15℃, 每种处理设置3个重复实验。3种冷却方式的参数分别为: 1) 冷风隧道: 风机出风口风速13.0~14.0 m/s, 室温10℃; 2) 自然冷却: 在10℃冷库进行, 风机出风口风速1.5~2.0 m/s; 3) 真空冷却: 冷却室温度维持在10℃左右, 真空度8.0~9.0 kPa。冷却结束后对样品进行称质量, 比较冷却前后质量变化, 进行冷却速率、冷却损失率、菌落总数、色泽、剪切力、电子鼻、微观结构的测定。

#### 1.3.2 冷却速率测定

将温度计探针插入酱牛肉几何中心, 间隔5 min记录温度变化情况。根据式(1)计算3种冷却方式的冷却速率。

$$\text{冷却速率}/(\text{℃}/\text{min}) = \frac{T_1 - T_2}{t} \quad (1)$$

式中:  $T_1$ 、 $T_2$ 分别为冷却前后酱牛肉的中心温度/℃;  $t$ 为冷却时间/min。

#### 1.3.3 冷却损失率测定

根据式(2)计算酱牛肉的冷却损失率, 比较样品的冷却损失情况。

$$\text{冷却损失率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

式中:  $m_1$ 、 $m_2$ 分别为冷却前后酱牛肉的质量/g。

#### 1.3.4 菌落总数测定

参照GB 4789.2—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》<sup>[11]</sup>。

#### 1.3.5 色泽测定

参考李银等<sup>[12]</sup>的方法, 采用色差计分别测定酱牛肉的亮度值( $L^*$ )、红度值( $a^*$ )和黄度值( $b^*$ )<sup>[13]</sup>。肉色可以通过 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 进行衡量,  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 又可以衍生出一些其他色差评估值, 如 $C^*$ 和 $h$ 。 $C^*$ 为饱和度, 反映肉色的鲜艳程度;  $h$ 为色调角, 是评价肉色的综合指标<sup>[14]</sup>。色差计在使用前进行校准。

#### 1.3.6 剪切力测定

冷却结束后, 用取样器沿着酱牛肉肌纤维方向取下肉样, 取样过程中避开结缔组织, 用数显式肌肉嫩度仪测定剪切力。

#### 1.3.7 电子鼻检测

使用PEN3电子鼻测定样品的风味。处理方法为: 酱牛肉均匀绞碎后取1 g装入顶空瓶内, 室温下静置30 min后测定样品风味<sup>[15]</sup>。PEN3便携式电子鼻标准传感器阵列及其性能描述如表1所示。



表1 便携式电子鼻传感器阵列及其性能  
Table 1 Sensor arrays and performance descriptions of portable electronic nose

编号	传感器名称	性能描述
R1	W1C	对芳香成分灵敏
R2	W5S	对氮氧化合物很灵敏
R3	W3C	对芳香成分灵敏
R4	W6S	对氢化物灵敏
R5	W5C	对烷烃灵敏
R6	W1S	对甲烷灵敏
R7	W1W	对无机硫化物灵敏
R8	W2S	对醇类和醛酮类化合物灵敏
R9	W2W	对芳香成分和有机硫化物灵敏
R10	W3S	对长链烷烃灵敏

### 1.3.8 微观结构观察

参考Palka等<sup>[16]</sup>的方法,将样品切成3 mm×3 mm×4 mm的小条,用体积分数2.5%的戊二醛溶液固定,用0.1 mol/L磷酸盐缓冲液洗涤,置于室温2 h;然后用蒸馏水冲洗样品,并用体积分数25%、50%、70%、95%、100%乙醇梯度洗脱2次;样品在液氮中冷冻断裂后进行干燥,干燥结束后用离子溅射镀膜仪溅射喷金,在扫描电子显微镜下观察拍照(放大倍数500)。

参考Mestre Prates等<sup>[17]</sup>的方法,将样品切成2 mm×2 mm×5 mm的小条,操作步骤同扫描电子显微镜,体积分数25%、50%、70%、95%、100%乙醇梯度脱水后用无水丙酮置换,而后进行包埋、切片、染色,最后用透射电子显微镜观察拍照(放大倍数15 000)。

### 1.4 数据处理

采用IBM SPSS Statistics 25.0软件进行数据分析,采用Origin 8.0软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同冷却方式对酱牛肉冷却速率的影响

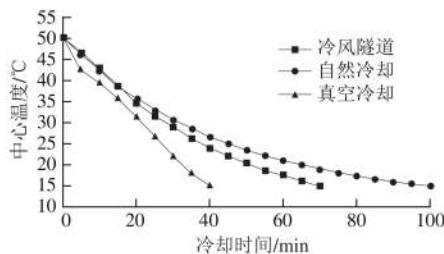
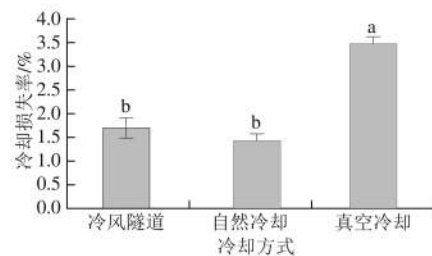


图1 不同冷却方式对酱牛肉温度-时间变化曲线的影响  
Fig. 1 Effects of different cooling methods on the temperature-time curve of sauced beef

由图1可知,冷风隧道、自然冷却和真空冷却酱牛肉中心温度从50 °C降至15 °C所用时间分别为70、100、40 min,对应的冷却速率分别为0.5、0.35、0.875 °C/min。因此,相比冷风隧道和自然冷却,真空冷

却的冷却速率最高。张璞等<sup>[18]</sup>在研究冷却方式对腊肉冷却速率的影响时发现,真空冷却具有较快的冷却速率,与本研究结果一致。自然冷却和冷风隧道是通过对流将热量传递给冷却介质,而真空冷却是在真空和低压环境下通过蒸发自身水分达到冷却目的<sup>[19]</sup>,相对于传统冷却方式,真空冷却冷却速率高,冷却均匀。传统冷却方式由于肉的热导率较低,因此冷却速率低<sup>[20]</sup>。同时,酱牛肉中心温度从50 °C降至35 °C时,3种冷却方式所用时间无明显差异,而35 °C降至15 °C差异明显,真空冷却所用的时间最短,这些结果说明,真空冷却的冷却速率较快,尤其在低温阶段(35~15 °C)降温过程优势突出,可为未来分阶段降温提供理论参考。

### 2.2 不同冷却方式对酱牛肉冷却损失率的影响



小写字母不同,表示同一指标组间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

图2 不同冷却方式对酱牛肉冷却损失率的影响  
Fig. 2 Effects of different cooling methods on the cooling loss rate of sauced beef

由图2可知,冷风隧道、自然冷却和真空冷却3种冷却方式条件下酱牛肉的冷却损失率分别为1.70%、1.44%和3.47%,差异显著( $P < 0.05$ ),其中自然冷却损失率最小,真空冷却损失率最大。目前真空冷却在酱牛肉产品中的应用报道还较少,但本研究结果与其他食品中应用真空冷却的结果一致。潘银珠等<sup>[21]</sup>在研究冷却对熟粽子品质的影响中发现,真空冷却的冷却损失显著高于常规方式的冷却损失。郭维璐等<sup>[22]</sup>研究发现,真空冷却处理白切猪手的冷却损失最大。真空冷却通过蒸发自身水分降温,冷却过程必定伴随水分的大量损失<sup>[23]</sup>,这部分水分主要为食品中的自由水。与真空冷却处理不同,冷风隧道和自然冷却水分流失相对较小,冷却损失率较低。

### 2.3 不同冷却方式对酱牛肉初始菌落总数的影响

微生物指标在肉制品加工中极为重要,是衡量食品安全的重要指标,直接影响产品的质量和保质期。由图3可知,真空冷却处理的酱牛肉初始菌落总数显著低于其他处理组,与冷风隧道和自然冷却处理组相比差异显著( $P < 0.05$ )。贺稚非等<sup>[24]</sup>研究发现,真空冷却处理的腊肉较散装晾挂更能保证产品安全,可以有效延长货架期。乔亮等<sup>[25]</sup>研究发现,真空冷却处理的乳化肠微生物水

平相对较低，与本研究结果一致。本研究中真空冷却处理可以有效抑制细菌的繁殖，保障产品的安全卫生，原因一方面可能是因为真空冷却时间短，快速通过了细菌滋生的危险温度带，另一方面，真空冷却可明显减少自由水含量，降低产品的水分活度，抑制微生物的生长。

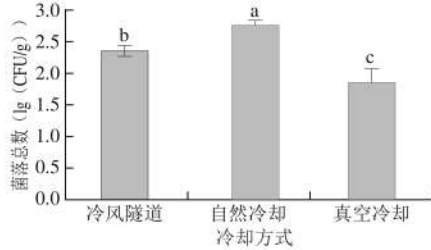


图3 不同冷却方式对酱牛肉初始菌落总数的影响  
Fig. 3 Effects of different cooling methods on the total number of colonies in sauced beef

#### 2.4 不同冷却方式对酱牛肉色差值的影响

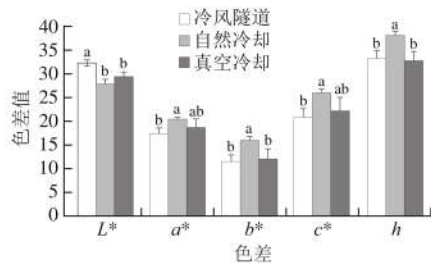


图4 不同冷却方式对酱牛肉色差值的影响  
Fig. 4 Effects of different cooling methods on the color difference of sauced beef

肉色是肉品重要的感官评价指标之一，同时也是衡量肉新鲜度和卫生状态的指标之一<sup>[26]</sup>，是消费者评价肉品质的重要依据。由图4可知：冷风隧道处理组L\*与其他冷却处理组之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )；冷风隧道处理组a\*和自然冷却处理组有显著差异 ( $P < 0.05$ )，自然冷却处理组a\*相对较高；自然冷却处理组b\*较高，且自然冷却处理组c\*和h最高。结果表明，与冷风隧道相比，真空冷却和自然冷却均能改善产品的色泽。

#### 2.5 不同冷却方式对酱牛肉剪切力的影响

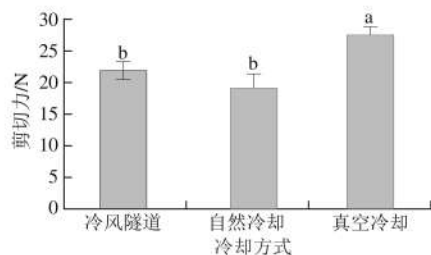


图5 不同冷却方式对酱牛肉剪切力的影响  
Fig. 5 Effects of different cooling methods on the shear force of sauced beef

剪切力是衡量肉制品品质的重要指标。由图5可知，真空冷却处理组酱牛肉剪切力与冷风隧道、自然冷却处理组之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。李静等<sup>[27]</sup>研究发现，真空冷却处理的白煮牛肉剪切力最大，远高于自然冷却，与本研究结果类似。真空冷却酱牛肉剪切力比传统冷却酱牛肉大，可能与真空冷却过程中样品大量失水有关，水分大量蒸发，导致肌纤维收缩变硬，肌束间缝隙变大，肌束膜受到严重破坏，造成产品剪切力较大。

#### 2.6 不同冷却方式对酱牛肉风味的影响

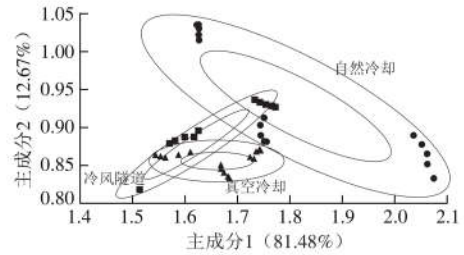


图6 不同冷却方式处理下酱牛肉风味的主成分分析结果  
Fig. 6 Principal component analysis of flavor compounds in sauced beef with different cooling methods

风味是评价肉制品品质的重要指标<sup>[28]</sup>。利用电子鼻自带的分析软件对不同冷却方式酱牛肉信号数据进行主成分分析，由图6可知，不同冷却方式处理的酱牛肉第1主成分和第2主成分的总贡献率为94.15%。不同冷却方式处理对酱牛肉挥发性风味物质的影响并不显著。由电子鼻10个传感器的响应值(图7)也可以看出，冷风隧道、自然冷却与真空冷却处理组之间没有显著差异。

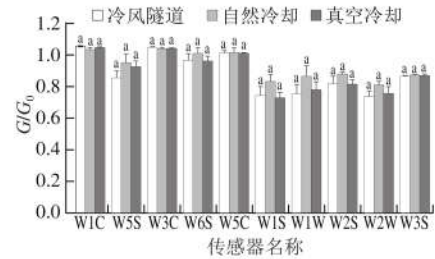
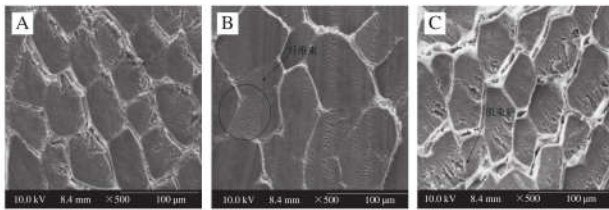


图7 不同冷却方式下酱牛肉电子鼻传感器响应值  
Fig. 7 Response values of electronic nose sensors to sauced beef with different cooling methods

#### 2.7 不同冷却方式对酱牛肉微观结构的影响

肉品微观结构的改变与其品质密切相关<sup>[29]</sup>。图8为不同冷却方式下酱牛肉的肌纤维横截面，自然冷却的酱牛肉肌纤维束间排列紧凑、孔隙较小，肌束膜结构完整；风冷会导致肌束收缩，肌束间缝隙变大，冷风隧道处理的酱牛肉肌束纤维结构较完整，肌束收缩较小，肌束膜受破坏程度较轻；而真空冷却肌束膜受破坏程度较重。





A. 冷风隧道; B. 自然冷却; C. 真空冷却。图9同。

图8 不同冷却方式对酱牛肉微观结构的影响 ( $\times 500$ )

Fig. 8 Effects of different cooling methods on the microstructure of sauced beef ( $\times 500$ )

表2 不同冷却方式酱牛肉的肌纤维特性

Table 2 Muscle fibre characteristics of sauced beef with different cooling methods

冷却方式	肌纤维直径/ $\mu\text{m}$	肌纤维横截面积/ $\mu\text{m}^2$	肌间距离/ $\mu\text{m}$
冷风隧道	$64.18 \pm 1.35^a$	$119.58 \pm 0.92^b$	$8.98 \pm 0.33^b$
自然冷却	$58.84 \pm 2.90^b$	$115.27 \pm 1.15^c$	$3.12 \pm 0.71^c$
真空冷却	$68.17 \pm 2.33^a$	$127.99 \pm 2.62^a$	$12.60 \pm 1.16^a$

由表2可知,真空冷却酱牛肉具有较大的肌纤维直径、肌纤维横截面积及肌间距离,肌纤维直径、肌纤维横截面积与剪切力呈正比,而肌间距离则是产品皱缩失水情况的直接反映。

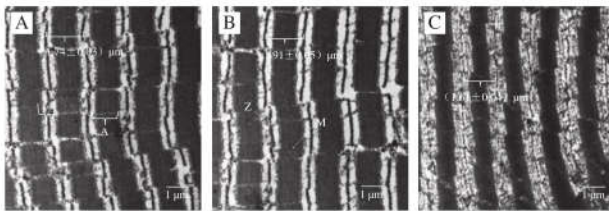


图9 不同冷却方式对酱牛肉超微结构的影响 ( $\times 15000$ )

Fig. 9 Effects of different cooling methods on the ultrastructure of sauced beef ( $\times 15000$ )

图9为透射电镜观察到的不同冷却方式下酱牛肉的肌纤维纵截面。肌肉超微结构中存在平行相间排列的明暗条带,其中较亮区域称为亮带,也称I带,主要由细肌丝组成;较暗区域称为暗带,也称A带,主要由平行排列的粗肌丝组成;I带中间的暗线称作Z线,相邻2条Z线之间的区域叫1个肌节<sup>[30]</sup>,一般肌节长度越长,肌肉保水性越大,反之则越小<sup>[31]</sup>。由图9可知,与自然冷却酱牛肉的肌节长度( $1.91 \pm 0.05$ )  $\mu\text{m}$ 相比,冷风隧道和真空冷却处理的酱牛肉肌节长度均有所变短,分别为( $1.74 \pm 0.03$ )、( $1.61 \pm 0.04$ )  $\mu\text{m}$ ,表明冷却过程造成肌肉收缩,从而导致肌肉中的水分被挤出,与真空冷却相比,冷风隧道处理的酱牛肉肌节长度收缩程度相对较小。

### 3 结论

研究不同冷却方式对酱牛肉品质的影响。实验结果表明:真空冷却的冷却速率最快,但同时冷却损失率也最大,达3.47%,冷风隧道和自然冷却的酱牛肉冷却速率虽低于真空冷却,但冷却损失率相对较小;通过对比冷风隧道、自然冷却和真空冷却酱牛肉品质可以得出,真空冷却酱牛肉色泽较佳,同时可以减少微生物污染,延长产品贮藏期,但水分损失相对较大,嫩度下降,在酱牛肉工业化加工应用中需综合考虑。

### 参考文献:

- [1] 慕艳梅. 酱牛肉调味汁的研制及应用[J]. 中国调味品, 2019, 44(1): 132-135. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2019.01.031.
- [2] 李静, 李兴民, 穆国锋, 等. 不同冷却方式对酱牛肉冷却效果的影响[J]. 食品科技, 2008(8): 73-77. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2008.08.022.
- [3] 张璞. 中式熟制腊肉冷却冷藏技术研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2017: 5-6.
- [4] 刘斌, 郭亚丽, 邹同华. 强制通风预冷风速选择研究[J]. 食品科学, 2004, 25(7): 181-183.
- [5] MCDONALD K, SUN D W. Vacuum cooling technology for the food processing industry: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2000, 45(2): 55-65. DOI:10.1016/S0260-8774(00)00041-8.
- [6] FENG C H, DRUMMOND L, ZHANG Z H, et al. Vacuum cooling of meat products: current state-of-the-art research advances[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(11): 1024-1038. DOI:10.1080/10408398.2011.594186.
- [7] DONG Xiaoguang, CHEN Hui, LIU Yi, et al. Feasibility assessment of vacuum cooling followed by immersion vacuum cooling on water-cooked pork[J]. Meat Science, 2012, 90(1): 199-203. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.07.002.
- [8] SUN Dawen, ZHENG Liyun. Vacuum cooling technology for the agri-food industry: past, present and future[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 203-214. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.06.023.
- [9] BRILEY G C. Vacuum cooling of vegetables and flowers[J]. ASHRAE Journal, 2004, 46(4): 52-53. DOI:10.1260/1369433041211129.
- [10] JIN T X, XU L. Development and validation of moisture movement model for vacuum cooling of cooked meat[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 75(3): 333-339. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2005.04.022.
- [11] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-4.
- [12] 李银, 孙红梅, 张春晖, 等. 牛肉解冻过程中蛋白质氧化效应分析[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1426-1433. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2013.07.013.
- [13] 徐吉祥, 楚炎沛. 色差计在食品品质评价中的应用[J]. 现代面粉工业, 2010, 24(3): 43-45. DOI:10.3969/j.issn.1674-5280.2010.03.016.
- [14] 王丽莎, 王航, 李侠, 等. 不同部位猪肉肌纤维类型组成与品质特性比较研究[J]. 肉类研究, 2020, 34(6): 1-7. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200316-073.
- [15] 崔方超, 李婷婷, 杨兵, 等. 电子鼻结合GC-MS分析草鱼脱腥前后风味变化[J]. 食品科学, 2014, 35(20): 126-130. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201420025.

- [16] PALKA K, DAUN H. Changes in texture, cooking losses, and myofibrillar structure of bovine *M. semitendinosus* during heating[J]. *Meat Science*, 1999, 51(3): 237-243. DOI:10.1016/S0309-1740(98)00119-3.
- [17] MESTRE PRATES J A, GARCIA E COSTA F J S, RIBEIRO A M R, et al. Contribution of major structural changes in myofibrils to rabbit meat tenderisation during ageing[J]. *Meat Science*, 2002, 61(1): 103-113. DOI:10.1016/S0309-1740(01)00175-9.
- [18] 张璞, 张典, 张坤生, 等. 冷却方式对熟制腊肉品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(11): 21-25. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201811004.
- [19] 王海鸥, 姜松. 真空冷却技术及其在食品工业的研究和应用[J]. *制冷*, 2004(1): 33-36. DOI:10.3969/j.issn.1005-9180.2004.01.007.
- [20] MCDONALD K, SUN D W, LYNG J. Effect of vacuum cooling on the thermophysical properties of a cooked beef product[J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 52(2): 167-176. DOI:10.1016/S0260-8774(01)00100-5.
- [21] 潘银珠, 张坤生, 任云霞. 冷却对熟粽子品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(5): 140-146. DOI:10.16429/j.1009-7848.2015.05.019.
- [22] 郭维璐, 陈诚, 韦保耀, 等. 不同冷却方式对白切猪手品质的影响研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(9): 329-332; 338. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.09.055.
- [23] 郭雪. 高温熟食品真空冷却的理论及实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2013: 40-41.
- [24] 贺稚非, 薛山, 李洪军, 等. 川味腊肉货架期间的品质变化[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(18): 318-321. DOI:10.12677/HJAS.2013.31003.
- [25] 乔亮, 张坤生, 任云霞. 真空冷却技术对低温乳化肠品质影响的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(20): 101-104. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2012.20.047.
- [26] 李侠, 钱书意, 杨方威, 等. 低压静电场下不同间隔冻结-解冻对牛肉品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 278-285. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.037.
- [27] 李静, 李兴民, 刘毅. 真空冷却与常规冷却方式对白煮牛肉品质影响的比较[J]. *肉类研究*, 2007, 21(10): 8-11; 32.
- [28] DOMÍNGUEZ R, GÓMEZ M, FONSECA S, et al. Effect of different cooking methods on lipid oxidation and formation of volatile compounds in foal meat[J]. *Meat Science*, 2014, 97(2): 223-230. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.01.023.
- [29] QIAN Shuyi, LI Xia, WANG Hang, et al. Effects of low voltage electrostatic field thawing on the changes in physicochemical properties of myofibrillar proteins of bovine *Longissimus dorsi* muscle[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261: 140-149. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2019.06.013.
- [30] 谢小雷, 李侠, 张春晖, 等. 不同干燥方式对牛肉干物性特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(增刊1): 346-354; 380. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2015.z1.042.
- [31] 陈韬. 宰后肌肉蛋白质和组织结构变化与冷却猪肉持水性的关系研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005: 57-58.