

# 商业化烤制羊排中心温度预测模型\*

潘腾<sup>1</sup> 孟静<sup>1</sup> 崔建云<sup>1</sup> 郭慧媛<sup>1</sup> 罗海玲<sup>2</sup> 葛克山<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学动物科技学院, 北京 100193)

**摘要:** 烤羊排是我国传统肉制品,但目前市场上尚未开发出适用于羊排烤制的自动控温程序,阻碍了烤制羊排的工业化生产。由于烤制属于非稳态加热过程,明确烤制温度与物料中心温度的关系是建立自动控温程序的基础。然而羊排形状不规则、肉质不均一,造成烤制过程中的中心温度难以预测。以法式小切羊排(横截面积 $(11 \pm 4) \text{ cm}^2$ )为原料,针对商业化烤制羊排所普遍采用的低温( $120^\circ\text{C}$ )及高温( $220^\circ\text{C}$ )烤制条件,以升温曲线为基础,进行非线性数据回归,建立烤制羊排中心温度预测模型,并进行羊排品质评价与模型的验证。结果表明:所建模型能够准确预测 $120^\circ\text{C}$ 和 $220^\circ\text{C}$ 烤制温度时,不同羊排大小与烤制时间条件下羊排的中心温度,预测值与实测值的平均相对误差及均方根误差均低于6%,为进一步开发羊排烤制自动控温程序及设备提供了依据。

**关键词:** 烤羊排 中心温度 烤制时间 品质 数学模型

中图分类号: TS251 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)06-0233-06

## Mathematical Model for Predicting Core Temperature of Commercial Mutton Chops during Grilling

Pan Teng<sup>1</sup> Meng Jing<sup>1</sup> Cui Jianyun<sup>1</sup> Guo Huiyuan<sup>1</sup> Luo Hailing<sup>2</sup> Ge Keshan<sup>1</sup>

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Grilled mutton chops are traditional meat products, and the quality is greatly influenced by the final core temperature. However, the core temperature of mutton chops during grilling is difficult to monitor. To predict the core temperature of mutton chops during grilling accurately and conveniently, a mathematical model based on grilling time and shapes of mutton chops was established. Mutton chops with different cross-sectional areas of lean meat from  $7 \text{ cm}^2$  to  $15 \text{ cm}^2$  were grilled in an electric heat oven at  $120^\circ\text{C}$  or  $220^\circ\text{C}$ . Fifteen samples were grilled independently at each temperature until the core temperature reached  $75^\circ\text{C}$  and the temperature-time curves were recorded. Seven thermal probes were inserted into the different points of the mutton chops during grilling and the lowest temperature was taken as the core temperature. The model for predicting core temperature with grilling time and cross-sectional areas of lean meat was built with regression method, which was used to evaluate the quality of grilled mutton chops. The results showed that the established model could well predict the temperature changes of grilled mutton chops and the relative errors between simulated and measured results were lower than 6%. Different quality characteristics of mutton chops were formed under different grilling temperature based on the application of the model. The mathematical model could provide a convenient and timely method for predicting the core temperature of mutton chops during grilling.

**Key words:** Grilled mutton chops Core temperature Grilling time Quality Mathematical model

收稿日期: 2014-07-21 修回日期: 2014-09-16

\* 国家现代肉羊产业技术体系资助项目(CARS-39)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD28B01)

作者简介: 潘腾, 博士生, 主要从事肉品加工技术研究, E-mail: noahpan99@gmail.com

通讯作者: 葛克山, 副教授, 主要从事食品工程技术研究, E-mail: gkeshan@163.com

## 引言

建立标准化生产工艺,实现工业化生产是中国传统肉制品产业的发展方向。烤羊排作为具有代表性的中国传统肉制品之一,历史悠久且风味独特,深受大众喜爱。但目前仍以作坊式生产为主,多采用明火法等传统烤制方法,烤制终点的判断依赖于操作经验,缺乏自动控温设备,标准化生产工艺尚未建立,易造成产品品质不统一,质量不稳定等问题<sup>[1]</sup>,难以实现工业化生产。

在烤制过程中肌肉蛋白质、脂肪、碳水化合物等物质发生一系列生化反应<sup>[2-3]</sup>,呈现肉制品特有的香气、滋味及口感,因此,烤制是烤羊排的关键加工工序之一。研究表明,烤制终点中心温度对肉制品的嫩度、色泽、失重率、多汁性和风味等品质均产生较大的影响<sup>[4-6]</sup>。同时,烤制终点中心温度对肉制品水溶性蛋白、盐溶性蛋白的含量以及粗脂肪、粗蛋白含量有显著性影响<sup>[7-8]</sup>。

远红外技术在食品加工工业中广泛应用于水产品、果蔬以及肉制品的干燥、加热和烘烤<sup>[9-12]</sup>。远红外辐射加热方式具有加热速度快、耗能低、加热质量高、物体受热均一等特点<sup>[13]</sup>。本文以远红外辐射加热为烤制方式,选择现行商业化生产中常用的低温(120℃)及高温(220℃)工艺条件烤制羊排,以75℃作为羊肉烤制终点中心温度<sup>[14]</sup>,通过热电偶探针监测不同里脊横截面积样品内部中心点温升曲线,并进行非线性数据回归,建立羊排烤制温度-时间预测数学模型,并对依据该模型烤制的羊排进行品质评价,指导羊排烤制工业生产。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

羊排(内蒙古草原鑫河公司提供)沿脊椎并顺肋骨方向切割成单排,形状相同,厚度2.5 cm,其结构如图1所示,主体部分为瘦肉,即里脊,除两个切面外,一个面是与瘦肉相连接的骨头,其余面是筋膜和脂肪。-18℃保藏待用。羊排单个质量(90±20)g,里脊横截面积(11±4)cm<sup>2</sup>。

### 1.2 实验设计

样品使用前,在流动冷水中解冻30 min,然后用KWS1319Q-F2N型红外烤箱(广东格兰仕有限公司)进行低温(120℃)及高温(220℃)烤制,每个温度分别进行15个重复样本单独烤制,中心温度达到75℃后烤制结束。在烤制过程中,分别测定不同时间羊排的中心温度。烤制结束测定样品的质量损失、剪切力、色泽、可溶性蛋白含量及感官评分等指



图1 羊排  
Fig.1 Mutton chops

标。

### 1.3 测定方法

里脊横截面积用求积仪(无锡测绘仪器厂)测定;内部温度用插入热电偶的办法测量<sup>[15]</sup>,采用多路巡检显示控制仪(万山奥特工业自动化设备有限公司)测定。瘦肉部分近似为椭圆形,取其中心横断面上长轴和短轴的交点作为中心点,及分别相距中心点5 mm的左(a)、右(b)、前(c)、后(d)、上(e)及下(f)位置点,7个探针同时测量烤制过程中羊排内部不同部位温度变化,以获取最低温度点,如图2所示。热电偶探针直径为1 mm,测温精度为±1℃。低温烤制每隔2 min记录一次,高温烤制每隔1 min记录一次。

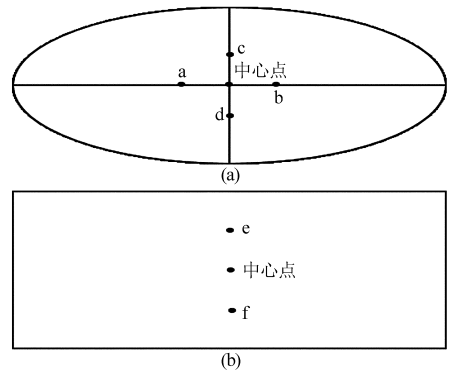


图2 热电偶探针布置

Fig.2 Thermocouples located on lean meat  
(part of mutton chop)

(a) 里脊横切面 (b) 里脊纵切面

质量损失率计算公式为

$$W = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $M_0$ 、 $M_1$ ——烤制前、后质量,g

剪切力<sup>[16]</sup>:将样品切成1 cm×1 cm×2 cm块状,用沃布式剪切力仪(美国G-R Manufacturing公司)进行剪切实验(垂直肌纤维方向)。

感官评价:由30位具有食品感官评定经验的人员组成评定小组,对成品进行评分。以色泽(10分)、组织状态(10分)、香味(10分)为指标进行评定(表1)。鉴评方法及要求参照《食品感官鉴

评》<sup>[17]</sup>的有关鉴评规则进行。

表1 烤制阶段感官评价标准

Tab.1 Standard of sensory evaluation

项目	特征
组织及外皮 状态(10分)	1. 干爽,结实,表面整齐,内部嫩,无粗糙感,有焦脆感(7.0~10)
	2. 稍干爽,组织结实,表皮微有弹性或表皮过硬(4.0~6.9)
	3. 肉质坚硬干燥或者表皮潮湿,较软,无焦脆感(0~3.9)
色泽(10分)	1. 表皮颜色亮棕红,色泽鲜亮,有烤制品特色(7~10)
	2. 表皮颜色暗红,色泽暗淡(4~6.9)
	3. 表皮颜色浅红或黑焦色,无光泽(0~3.9)
香味(10分)	1. 香气浓郁,有烤制品独特香味(7.0~10)
	2. 香味清淡,无焦苦味(4.0~6.9)
	3. 无烤香味或焦苦味浓(0~3.9)

可溶性肌红蛋白及高铁肌红蛋白含量:取样品不同部位称取总计2g于三角瓶中,加入10mL磷酸缓冲液(0.04 mol/L, pH值6.8)搅拌均匀后于4℃匀浆<sup>[18]</sup>,离心(5 635 g)15 min,上清液用滤纸过滤除脂肪,即得到肌红蛋白粗提液,4℃保存待测。

将制得的肌红蛋白粗提液分别在525、572、700 nm下比色,以磷酸缓冲液作空白对照,肌红蛋白的变性程度<sup>[19-20]</sup>可用可溶性肌红蛋白和高铁肌红蛋白反映,计算公式为:

可溶性肌红蛋白质量比

$$M = (A_{525} - A_{700}) \times 2.303 \times 5/m \quad (2)$$

式中  $M$ ——可溶性肌红蛋白质量比,mg/g

$m$ ——肉质量,g

高铁肌红蛋白质量分数

$$M_b = [1.395 - (A_{572} - A_{700}) / (A_{525} - A_{700})] \times 100\% \quad (3)$$

式中  $M_b$ ——高铁肌红蛋白质量分数,%

$A_{525}$ 、 $A_{572}$ 、 $A_{700}$ ——波长为525、572、700 nm下的吸光度

色泽<sup>[21]</sup>:将样品分别用CR-400型色差仪(日本柯尼卡美能达公司)进行测定,以标准白板进行校正,每个样品取3个点,测定每一点的 $L^*$ 值、 $a^*$ 值和 $b^*$ 值,取样品平均值。根据鉴评小组的感官鉴评,选取分数最高的一组为参照标准(表2)。最佳烤羊排的表面色泽亮棕红色,其色值为: $L^* = 33.01$ , $a^* = 7.2$ , $b^* = 13$ 。

#### 1.4 烤制预测中心温度的回归计算

建立中心温度及里脊横截面积、时间的数学模型,采用无因次过余温度 $\theta$ 对热处理羊排的温度进行表征,无因次过余温度的表达式为

表2 最佳表面色泽的选择实验结果

Tab.2 Results of option test of color on the surface

表面色泽	鉴评得分	色值		
		$L^*$	$a^*$	$b^*$
浅红	6.2	28.70	5.4	9
亮棕红	9.6	33.01	7.2	13
暗红	3.3	33.70	11.0	15

$$\theta = \frac{T_k - T_0}{T_k - T} \quad (4)$$

式中  $T_k$ ——烤制温度,℃

$T_0$ ——羊排入烤箱时的温度,℃

$T$ ——羊排烤制过程中中心的温度,℃

利用EXCEL软件对不同里脊横截面积不同温度的升温曲线数据进行数据回归,得中心温度的数学模型。

采用三元函数回归方法<sup>[22]</sup>。一般有

$$y = f(x_1, x_2) \quad (5)$$

先令其中一个变量 $x_2$ 为常数,在每一个 $x_2$ 值下以 $\varphi(x_1)$ 对 $\psi(y)$ 作图,便得到一组直线,即对不同 $x_1$ 的适用关系式

$$\psi(y) = a + b\varphi(x_1) \quad (6)$$

然后将其中系数 $a$ 、 $b$ 表示为 $x_2$ 的函数

$$\begin{cases} a = f_1(x_2) \\ b = f_2(x_2) \end{cases} \quad (7)$$

最后得到

$$\psi(y) = f_1(x_2) + f_2(x_2)\varphi(x_1) \quad (8)$$

令 $\theta$ 为 $y$ ,里脊横截面积 $S$ 、时间 $t$ 分别为 $x_1$ 、 $x_2$ ,进行非线性回归,建立数学模型。

#### 1.5 模型精度的检验指标

采用平均相对误差与均方根误差对模拟及实测结果间差异进行统计检验<sup>[23]</sup>。

## 2 结果与讨论

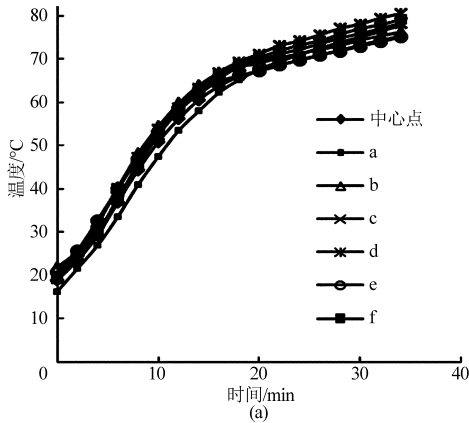
### 2.1 羊排烤制过程中内部温度分布

120℃及220℃烤制条件下,单个羊排内部各点升温曲线如图3所示。由于解冻过程受形状影响,羊排内部各点升温出现差异,导致烤制初始温度不同。随着温度的升高,各点温度逐渐升高;220℃比120℃烤制升温快,所需时间短;120℃及220℃烤制条件下,各点之间均存在温差,到达烤制终点各点温度最大相差10℃,由于原料形状的不规则性,脂肪、肌膜及骨头的包围,最低温度可出现在离中心点的不同位置,因此,对于不规则的羊排进行烤制,中心温度及其位置不易准确判断。以下实验都选择最低温度点为中心温度。

## 2.2 不同里脊横截面积羊排的烤制温度变化

低温(120℃)及高温(220℃)烤制条件下不同里脊横截面积在不同的烤制时间羊排的中心温度实验结果如图4所示。

可以看出,随着时间的推移,羊排内部温度将由



表及里地逐渐发生变化,即羊排内的温度场随时间变化<sup>[24]</sup>。中心温度的升温速度与里脊横截面积相关,这是因为羊排尽管厚度较小且相同,但是由于里脊肉部分的长度及宽度不同,导致里脊横截面积不同,里脊横截面积越大,传热热阻越大。

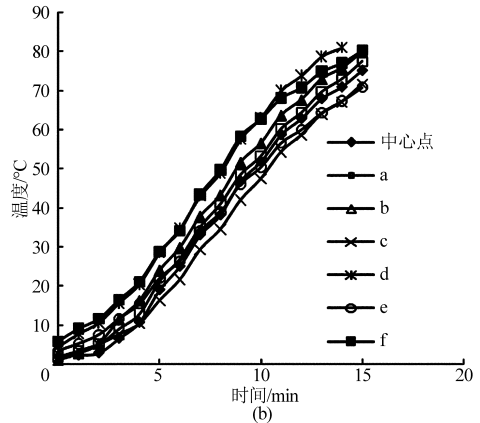


图3 烤制过程中羊排内部不同点温度-时间曲线

Fig.3 Temperature-time curve of different points during grilling

(a) 低温(120℃)条件 (b) 高温(220℃)条件

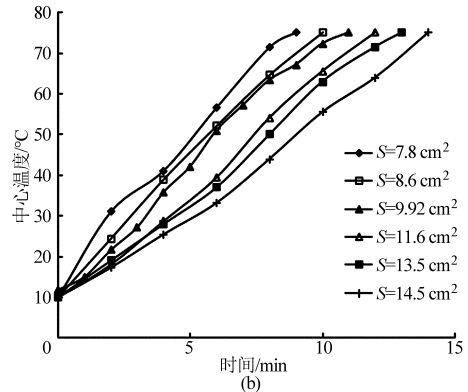
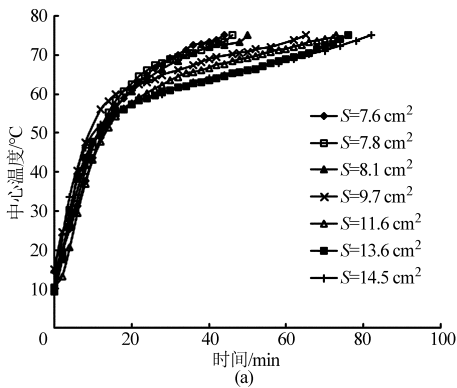


图4 不同里脊横截面积羊排烤制升温曲线

Fig.4 Time evolution of temperature in mutton chops with different areas of lean meat

(a) 低温(120℃)条件 (b) 高温(220℃)条件

羊排内部温度分布不均及不同横截面积羊排升温速率的不同受羊排热扩散系数的影响。在加热过程中,羊排热扩散系数随温度的变化而变化<sup>[25]</sup>,随着水分不断蒸发散失,气体分子活动范围越来越大,气相物质导热逐渐占主导地位,同时,肌肉间隙中水分、脂肪流出,肉中肌内膜及肌束膜收缩变性,相邻肌纤维排列变得紧实、致密,肌肉组织密度的增加易导致热扩散率降低<sup>[26]</sup>。烤制温度的不同,影响肌纤维内部结构及成分的变化,进而影响到肌肉热扩散率的变化,从而造成不同烤制温度下,羊排内部温度分布不均及不同横截面积羊排烤制过程中温度变化趋势的不同。

## 2.3 烤制中心温度预测数学模型的建立与验证

基于上述实验结果,采用三元函数回归方法对不同里脊横截面积的升温数据进行处理,并建立烤

制中心温度预测数学模型:

低温(120℃)条件下

$$\frac{120 - T_0}{120 - T} = -0.0051S^2 + 0.1409S + 0.3752 + (0.0005S^2 - 0.0137S + 0.1049)t \quad (9)$$

高温(220℃)条件下

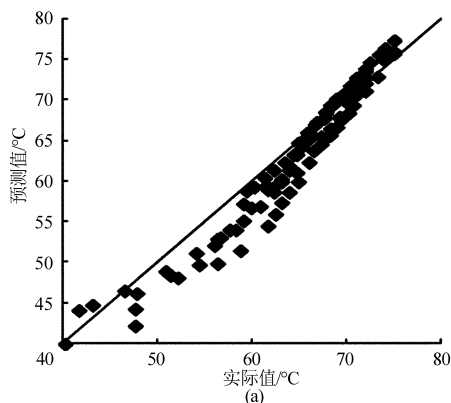
$$\frac{220 - T_0}{220 - T} = 0.9742 + (-0.0021S + 0.0621)t \quad (10)$$

式中  $t$ ——羊排烤制时间, min

$S$ ——羊排里脊横截面积,  $\text{cm}^2$

为考察预测模型的准确性,对烤制羊排中心温度预测数学模型进行实验验证,实测结果与预测值如图5所示。由图5可以看出,烤制温度稳定后,各实测值与预测值均分布在直线附近。120℃烤制条

件下,平均相对误差为 2.23%,均方根误差为 4.41%;220℃ 烤制条件下,平均相对误差为



-2.24%,均方根误差为 5.96%。预测中心温度的数学模型具有较好的普适性及较高的预测精度。

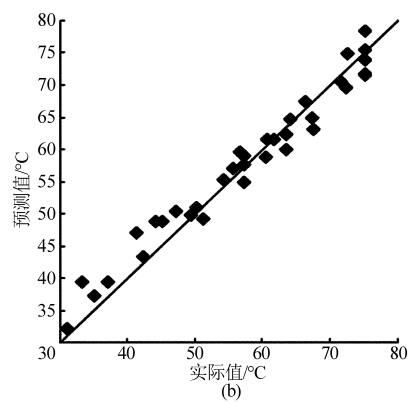


图5 烤制羊排不同时刻不同里脊横截面积中心温度的实际值及预测值

Fig. 5 Comparison of predicted core temperature with experimental results

(a) 低温 120℃ (b) 高温 220℃

## 2.4 烤制温度对烤制羊排品质的影响

选取里脊横截面积 8~12 cm<sup>2</sup>的羊排,依据该模型分别进行高低温烤制,并进行品质评价(表 3)。高温烤制的质量损失显著( $P < 0.05$ )高于低温烤制的质量损失。质量损失的不同是由于胶原蛋白收缩产生在肌原纤维上的拉应力不同,导致肌肉持水性下降,低温烤制由于胶原蛋白收缩产生的肌原纤维方向上的拉应力较小,使其质量损失低于高温烤制<sup>[27]</sup>。高温烤制的剪切力显著( $P < 0.05$ )高于低温烤制的剪切力。加热一方面引起肌肉蛋白质变性,从而发生凝固、凝集和短缩现象,但另一方面,肌肉中胶原蛋白明胶化,从而使肌肉嫩度增加<sup>[28]</sup>。Davey 等<sup>[29]</sup>发现嫩化速率在 60℃ 达到最大,在 70℃ 为零,低温烤制降低了加热速率,增加了加热时间,延长了经过 60~70℃ 温度段的时间,从而使胶原蛋白明胶化程度大于蛋白质受热变性凝固收缩程度,肌肉嫩度增加。高温烤制的可溶性蛋白含量显著( $P < 0.05$ )低于低温烤制过程。Murphy 等<sup>[30]</sup>指出可溶性蛋白可以作为加工程度的指标,并且发现增加产品温度可降低可溶性蛋白含量,提高加工温度导致蛋白分裂,造成蛋白多肽链的瓦解和缩短<sup>[31-32]</sup>。高温烤制的高铁肌红蛋白含量显著( $P < 0.05$ )高于低温烤制,其原因是温度越高,肌红蛋白、氧合肌红蛋白被氧化的速率越大,相应的高铁肌红蛋白积累量越多<sup>[33]</sup>。高温烤制的  $L^*$  值显著( $P < 0.05$ )高于低温烤制,主要是由于高温环境导致水分蒸发、脂肪流失加快,沉积表面,对光的反射能力增强所致<sup>[34]</sup>。高温烤制的  $a^*$  值显著( $P < 0.05$ )低于低温烤制,主要由于温度越高,肌红蛋白、氧合肌红蛋白被氧化的速率越大,肌肉红度越低。高温烤

制的  $b^*$  显著( $P < 0.05$ )高于低温烤制,说明高温烤制更易发生美拉德反应。烤制温度不同,羊排形成的品质特征不同,进一步工艺研究应该考虑以数学模型为基础,将低温和高温工艺结合,进行分段式温度烤制。

表 3 120℃ 及 220℃ 条件下烤制羊排品质结果

Tab.3 Quality of grilled mutton chops at 120℃ and 220℃

参数	烤制温度/℃	
	120	220
烤制时间/min	73.33 ± 2.52 <sup>a</sup>	12.67 ± 0.58 <sup>b</sup>
质量损失率/%	0.31 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.36 ± 0.01 <sup>b</sup>
剪切力/N	25.80 ± 2.52 <sup>a</sup>	31.52 ± 3.36 <sup>b</sup>
可溶性蛋白质量/(mg·g <sup>-1</sup> )	0.65 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.41 ± 0.02 <sup>b</sup>
高铁肌红蛋白质量分数/%	10.02 ± 0.80 <sup>a</sup>	50.03 ± 0.60 <sup>b</sup>
$L^*$	28.05 ± 2.20 <sup>a</sup>	33.70 ± 1.99 <sup>b</sup>
$a^*$	9.07 ± 0.71 <sup>a</sup>	5.20 ± 0.79 <sup>b</sup>
$b^*$	7.79 ± 0.70 <sup>a</sup>	13.08 ± 0.95 <sup>b</sup>
色差	7.67 ± 1.33 <sup>a</sup>	2.77 ± 1.37 <sup>b</sup>
感官评分	6.10 ± 1.20 <sup>a</sup>	5.00 ± 1.70 <sup>b</sup>

## 3 结束语

通过三元函数回归法,分别建立羊排商业化低温(120℃)及高温(220℃)烤制条件下,中心温度与里脊横截面积及烤制时间的数学模型,以准确判断烤制终点,验证结果表明,所建数学模型可以准确预测不同大小样品烤制不同时间的中心温度,利用该模型进行羊排的烤制,烤制温度不同,羊排形成的特定品质不同。本研究通过建立数学模型,为实现羊排烤制的温度自动化控制奠定基础,对烤制羊排的工业化生产具有实际意义。

## 参 考 文 献

- 1 武彩霞. 影响烤羊排的品质因素及加工技术研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- 2 Mottram D S. Flavour formation in meat and meat products: a review [J]. *Food Chemistry*, 1998, 62(4): 415 - 424.
- 3 Bowers L J, Dikeman M E, Murray L, et al. Cooked yields, color, tenderness, and sensory traits of beef roasts cooked in an oven with steam generation versus a commercial convection oven to different endpoint temperatures [J]. *Meat Science*, 2012, 92(2): 97 - 106.
- 4 王霞. 烧烤条件对烤肉食用品质的影响 [J]. *肉类工业*, 2004, 9(6): 6 - 9.
- 5 Wattanachant S, Benjakul S, Ledward D A. Effect of heat treatment on changes in texture, structure and properties of Thai indigenous chicken muscle [J]. *Food Chemistry*, 2005, 93(2): 337 - 348.
- 6 Aaslyng M D, Bejerholm C, Ertbjerg P, et al. Cooking loss and juiciness of pork in relation to raw meat quality and cooking procedure [J]. *Food Quality and Preference*, 2003, 14(4): 277 - 288.
- 7 孙丽. 金枪鱼肉在蒸煮过程中品质特性变化的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- 8 秦刚. 荣昌猪肉在不同烤制温度中挥发性风味物质的研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- 9 Krishnamurthy K, Khurana H K, Soojin J, et al. Infrared heating in food processing: an overview [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2008, 7(1): 2 - 13.
- 10 Mongpraneet S, Abe T, Tsurusaki T. Accelerated drying of onion by infrared radiation under vacuum condition [J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(2): 147 - 156.
- 11 Afzal T M, Abe T. Diffusion in potato during far infrared radiation drying [J]. *Journal of Food Engineering*, 1998, 37(4): 353 - 365.
- 12 Sheridan P, Shilton N. Application of far infrared radiation to cooking of meat products [J]. *Journal of Food Engineering*, 1999(41): 203 - 208.
- 13 胡亚范. 远红外辐射加热技术节能原理与应用 [J]. *红外技术*, 2002(5): 58 - 59.
- 14 Jeremiah L, Tong A, Gibson L. Hot-processing and elevated temperature conditioning influences on lamb cooking properties, palatability attributes, and consumer acceptance [J]. *Food Research International*, 1997, 30(1): 45 - 53.
- 15 李业波, 于庆龙. 土豆干燥过程中内部传热传质的实验研究 [J]. *农业工程学报*, 1996, 12(4): 62 - 65.
- 16 Zhen S, Liu Y, Li X, et al. Effects of lairage time on welfare indicators, energy metabolism and meat quality of pigs in Beijing [J]. *Meat Science*, 2013, 93(2): 287 - 291.
- 17 张水华. 食品感官鉴评 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- 18 Warris P D. The extraction of haem pigments from fresh meat [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 1979, 14(1): 75 - 80.
- 19 Krzywicki K. Assessment of relative content of myoglobin, oxymyoglobin and metmyoglobin at the surface of beef [J]. *Meat Science*, 1979, 3(1): 1 - 10.
- 20 John L, Cornforth D, Carpenter C E, et al. Color and thiobarbituric acid values of cooked top sirloin steaks packaged in modified atmospheres of 80% oxygen, or 0.4% carbon monoxide, or vacuum [J]. *Meat Science*, 2005, 69(3): 441 - 449.
- 21 American Meat Science Association. Meat color measurement guidelines [M]. Illinois USA: American Meat Science Association, 2012: 45 - 52.
- 22 江体乾. 化工数据处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1989: 17 - 18.
- 23 尹海蛟, 杨昭, 陈爱强. 果蔬热处理传热过程的数值模拟及验证 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 344 - 348.
- 24 于帆, 张欣欣, 何小瓦. 非稳态平面热源法同时测量材料的导热系数和热扩散率 [J]. *宇航计测技术*, 2007, 26(6): 13 - 17.
- 25 Marcotte M, Taherian A R, Karimi Y. Thermophysical properties of processed meat and poultry products [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 88(3): 315 - 322.
- 26 张立彦, 吴兵, 包雨坤. 加热对三黄鸡胸肉嫩度、质构及微观结构的影响 [J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(8): 116 - 121.
- 27 King D, Dikeman M, Wheeler T, et al. Chilling and cooking rate effects on some myofibrillar determinants of tenderness of beef [J]. *Journal of Animal Science*, 2003, 81(6): 1473 - 1481.
- 28 于立梅, 杨敏, 吴杰, 等. 烤卤牛肉加工过程质控及菌相变化 [J]. *食品研究与开发*, 2012, 33(9): 193 - 197.
- 29 Davey C, Kuttel H, Gilbert K. Shortening as a factor in meat ageing [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 1967, 2(1): 53 - 56.
- 30 Murphy R, Marks B, Marcy J. Apparent specific heat of chicken breast patties and their constituent proteins by differential scanning calorimetry [J]. *Journal of Food Science*, 2008, 63(1): 88 - 91.
- 31 Dube G, Bramblett V, Judge M, et al. Physical properties and sulfhydryl content of bovine muscles [J]. *Journal of Food Science*, 1972, 37(1): 23 - 26.
- 32 Hearne L E, Penfield M P, Goertz G E. Heating effects on bovine semitendinosus: shear, muscle fiber measurements, and cooking losses [J]. *Journal of Food Science*, 1978, 43(1): 10 - 12.
- 33 牛力, 陈景宜, 黄明, 等. 不同冻藏温度和时间对鸡胸肉食用品质的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 2012, 35(4): 115 - 120.
- 34 Wulf D, Wise J. Measuring muscle color on beef carcasses using the  $L^* a^* b^*$  color space [J]. *Journal of Animal Science*, 1999, 77(9): 2418 - 2427.