

微探针法测定“北京烤鸭”皮下导热系数的研究

马玲娟 高振江 姜新杰 杜志龙

(中国农业大学工学院 北京 100083)

摘要:采用非稳态微探针法测定“北京烤鸭”皮下导热系数。结果显示,鸭坯皮下含水率为6.55%~14.2%时,导热系数值在0.1178 W/(m·K)~0.1973 W/(m·K)之间变化,且呈线性相关趋势。

关键词:鸭坯;含水率;导热系数;皮下组织;微探针

Abstract: Thermal conductivity of "Peking-duck" roasted by air-impingement was measured with microprobe. The result showed that the thermal conductivity of subcutaneous tissue with moisture content from 6.55% to 14.22% ranged 0.1178 W/(m·K)~0.1973 W/(m·K), indicating trends of linear correlation.

Key words: Duck; Moisture; Thermal conductivity; Subcutaneous tissue; Microprobe

前言

导热系数的测定对研究物料的热物性有重要作用。目前,测定物料导热系数的方法有很多种,包括稳态的和非稳态的及其他一些估算方法。本文将采用目前常用的微探针法测定鸭坯皮下的导热系数,此研究对研究气体射流冲击“北京烤鸭”的传热过程及工艺优化具有重要的意义。

1 微探针法导热系数测定的原理与理论模型

基本原理是在均温的各向同性的匀质试样中插入一根的金属探针,由探针内加热丝加热,探针的温升受到探针收到的加热功率、探针自身热容和探针

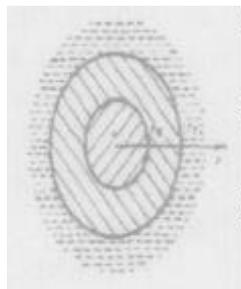


图1 模型原理图

周围物料的导热系数、比热等热物性的影响。在一

基金项目:国家自然科学基金项目(30571312)

定的加热功率被固定以后,测试探针的温升规律,就能够确定物料的导热系数。根据各向同性的假设,模型转化为一维传热的问题。

微探针是一个带尖直径为 r ,长 $L(L \gg r)$ 且可以方便刺入鸭坯的细长状针头,在初始状态下,探针和被测材料平衡地处于同一温度,当对探针内的加热丝施加一稳恒电压时,探针就相当于一个单位长度上产生恒定功率为 q 的线热源。金属加热丝为无限长热源,单位长度上的加热量为 q 。当时间 $\tau=0$ 时的瞬间,探针的温升满足方程^[1,2,3]:

$$\rho C_p \frac{\theta}{t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{x^2} + \frac{\partial^2 \theta(x, y, z)}{y^2} \quad (1)$$

$$\theta(x, y, z)_{t=0} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{q}{\rho C_p} = \theta(x, y, z) \text{ body} \quad (3)$$

解方程组得导热系数计算公式:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln(\tau_2/\tau_1)}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

其中 q 为每米长度电阻丝在单位时间内输入的热量, $J/m \cdot s$;

τ_1 、 τ_2 分别为测定时刻, min;

T_1 为在时间为 t_1 时测得温度, K (°C);

T_2 为在时间为 t_2 时测得温度, K (°C)。

根据鸭坯的生物物质特性以及微探针法测量导热系数理论模型的特点,做出如下假设:

1) 被测介质,即鸭坯皮下均匀各向同性且其物性视为常数,导热系数 λ 、导温系数 α 、比热 C_p 、密度 ρ 等均视为定值;

2) 被测物质相对于探针来论,具有较大的体

积，且具有均匀一致的初始温度。

2 测定装置

测定装置主要有加热和测量系统两个系统，装置连接见下图2。

1) 加热系统

主要由含微探针部分的加热回路来完成，由稳压电源供给微探针中的加热丝一定的电流。在测定过程中，微探针单位长度发热功率保持不变，通过电流表读取电阻丝回路中的电流，进而得出功率值。微探针结构见图3。

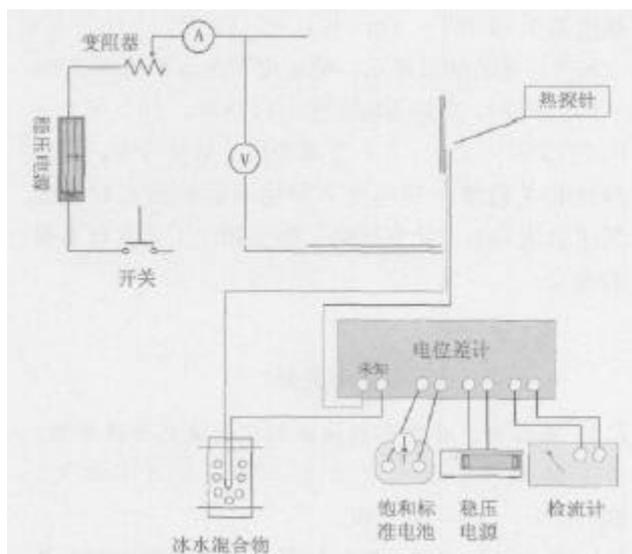


图2 导热系数测定装置简图

注： 电流表，量程0~1A；检流计，AC-15型；稳压电源，6V，YJ24型；电位差计，UJ31型；探针长度为53mm，外径为0.7mm；热电偶采用T型铜—康铜绝缘热电偶（直径0.0762 mm），测温点布置在针管内表面的中间位置；加热丝采用康铜丝（直径0.0762 mm），对折后插入探针管中，长度跟钢管一致。

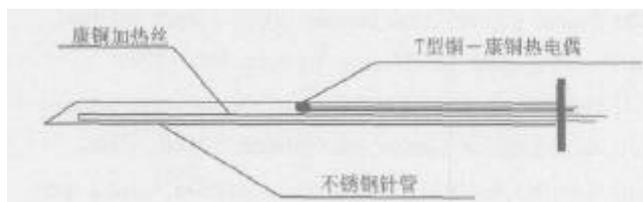


图3 探针结构示意图

2) 测量系统

采用直流电位差计精确测量电动势的方法。

其结构主要包括标准饱和电池、AC-15型检流计、YJ24型稳压电源和UJ31型电位差计。这种方法是将未知电压与电位差计上的已知电压相比较，不干扰待测电路，测量结果仅仅依赖于准确度极高的标准电池、标准电阻和高灵敏度的检流计，准确度可以达到0.01%或更高。

3 测定方法及实验材料

实验材料选用2.0kg左右的冷冻鸭坯。鸭坯皮下含水率的测定采用标准烘干法，仪器选用DHG-9140A型上海一恒科技有限公司电热恒温鼓风干燥箱。

3.1 q 的测定

根据电阻丝的电阻值R和电流值I计算q。

$$q = I^2 R$$

其中q为每米长度电阻丝在单位时间内输入的热量，J/m·s；

I为电流强度，A；

R为电阻丝每米长度的电阻值，Ω。

3.2 热电偶的标定

测温元件采用铜—康铜热电偶，实验室条件下，采用恒温水浴进行标定，得到线性回归方程：

$$= -0.2863 + 0.0438 \quad (5)$$

也可将此公式制成表格，以备查找使用。在以后的测量中只要已知电动势的测量值即可采用插值法取得相应的温度值。

3.3 导热系数的测定与计算

将探针横向插入鸭坯的前胸部位皮下组织中，记录下从电位差计上读取的数据，再利用公式(5)转换为相对应的温度值。然后，利用公式(4)计算导热系数。对于因探针结构、接触热阻以及仪器仪表而造成的测量误差，引入探针系数k对测量结果进行校正^[4]，以甘油为标准介质，按上述试验方法，经3次重复测定，得到甘油在测定温度范围内的平均导热系数0.02847W/(m·K)。将甘油导热系数推荐值0.286W/(m·K)除以0.02847W/(m·K)，可得探针系数k=10.0457。将测定的鸭坯皮下组织导热系数值乘以这个系数就得到真实值。

4 结果与分析

鸭肉是热的不良导体，鸭坯皮下的导热系数大小决定着鸭坯的冷却、冻结及解冻时温度升降的速度与品质，直接影响烤制后鸭子的口感与色泽。而鸭肉又属于生物质材料，其导热系数受组织

结构、水分和脂肪含量、冻结状态及测定环境（如温度、压力）等因素的影响。本试验仅研究含水率对导热系数的影响，采用正交试验，测定9组鸭坯的前胸部位的皮下导热系数，结果如下：

表1 前胸部位不同含水率的皮下导热系数

试验号	测定项目	
	含水率%	导热系数 W / (m · K)
1	7.89	0.1291
2	6.55	0.1178
3	9.21	0.1737
4	10.8	0.2359
5	8.6	0.1371
6	9.77	0.1438
7	14.22	0.1973
8	9.41	0.1508
9	14.2	0.1628

将数据绘在坐标系中见图4，为不同含水率时鸭坯前胸部位皮下组织导热系数的曲线。

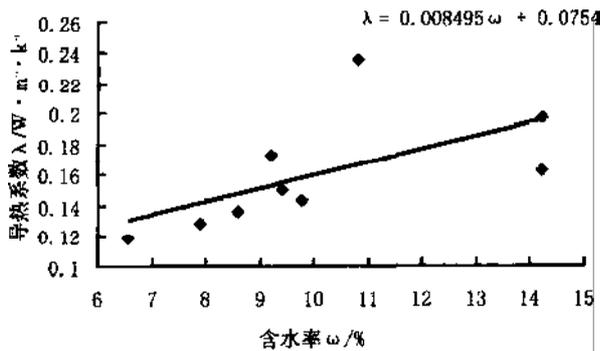


图4 不同含水率皮下导热系数曲线

由表及图可知，在常温条件下，不同含水率鸭

(上接第28页)

参考文献

[1] Bruce, H.L., & Ball, R.O. (1990). Postmortem interaction of muscle temperature, pH and extent of rigor on beef quality. *Journal of Animal Science*, 68, 4167~4175.
 [2] Culler, R. D, Parrish J, Smith G C, et al. Relationship of myofibril fragmentation index to certain chemical, physical and sensory characteristics of bovine longissimus muscle [J]. *Food Science*, 1978, 43:1177.

坯皮下组织导热系数在一个较小的范围内变化，呈现出随着含水率的增加而增大的趋势。如果将导热系数随含水率的变化关系曲线，以线性方程

$$y = a + bx \tag{6}$$

进行拟合，回归分析计算显示：

$a = 0.0754, b = 0.008495$ 。因此，鸭坯皮下组织导热系数随含水率变化的关系，可以描述为

$$\lambda = 0.0754 + 0.008495\omega \tag{7}$$

式中 ω ——鸭坯前胸部位皮下的湿基含水率，%。

对一些常见食品蛋白质和多糖类的固有导热系数按串联模型推算结果得出脂质材料的导热系数数值为 $0.14 \text{ W / (m · K) } \sim 0.19 \text{ W / (m · K) }$ 之间^[5]。实验结果显示：鸭坯皮下含水率为6.55%~14.22%时，导热系数值在 $0.1178 \text{ W / (m · K) } \sim 0.1973 \text{ W / (m · K) }$ 之间变化，结果可信，且呈线性相关趋势。鸭坯皮下导热系数的测定对研究气体射流冲击“北京烤鸭”鸭皮膨化工艺具有重要的意义。

参考文献

[1] 龚红菊. 非稳态热线法测定大麦的导热系数. *CEREAL & FEED INDUSTRY*. 2003, No.10: 48~49.
 [2] 彭海柱, 王刚, 陶乐仁等. 热线法测量食品热导率的实验研究. *食品科学*. 2001, 22(1): 27~30.
 [3] 谢华清, 王锦昌, 程曙霞等. 热针法测量材料导热系数研究. *应用科学学报* 2002, 20(1): 6~9.
 [4] 陈坤杰, 龚红菊. 基于非稳态热探针法的稻谷导热系数的测定. *农业机械学报* 2005, 36(1): 65~67.
 [5] 李里特. *食品物性学*. 中国农业出版社. 1982, 2: 370~373.
 [3] Dransfield, E. (1999), Meat tenderness—theu-calpain hypothesis, In Proceedings 45th ICOMST, Japan, Yokohama 220~228.
 [4] Dransfield, E. (1994), Modeling post-mortem tenderisation: inactivation of calpains, *Meat Science*, 37, 391~409.
 [5] Dransfield, E. (1992), Optimisation of tenderisation, aging and tenderness. Proc. 38th ICOMST, Clermont-Ferrand 1, 71~78.
 [6] Fields, P.A., Carpenter, Z.L., & Smith, G.C. (1976). Effects of elevated temperature conditioning on youthful and mature beef carcasses. *J. Anim. Sci.* 42, 72~83.