

# 炒的烹饪过程数值模拟与优化及其技术特征和参数的分析

邓 力

(贵州大学生命科学学院, 贵阳 550025)

**摘 要:** 基于中式烹饪代表性操作—炒的数值模拟, 以对流加热介质温度为优化变量、以终点成熟值为约束条件、以过热值为目标函数, 根据烹饪特征, 确定成熟品质因子和过热品质因子, 由文献确定其优化动力学参数, 通过 Matlab 编程对典型条件下的肉类爆炒烹饪过程的进行数值优化。结果表明: 存在使得烹饪过热值最小的对流加热介质温度, 从原理上解释了中式烹饪采用小体积颗粒和预热多量油脂的方法是合理的。同时, 在成熟值理论基础之上, 对炒工艺进行了传热学和动力学的数值模拟和分析。分析了炒与煮、蒸的区别, 以及刀工和搅拌对烹饪的作用。提出了影响炒工艺的主要技术参数, 包括油脂预热时间、烹饪功率、油料比等, 并初步解释了这些参数影响烹饪品质的原理。

**关键词:** 优化, 动力学, 传热学, 中式烹饪, 表面换热系数, 数值模拟

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.05.037

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-05-0282-11

邓 力. 炒的烹饪过程数值模拟与优化及其技术特征和参数的分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 282—292.  
Deng Li. Numerical simulation, optimization, study of technical features and operational parameters for Chinese cuisine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(5): 282—292. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

典型中式烹饪的过程特征是开放容器中被搅拌液体—颗粒食品的加热过程, 过程原理分析表明非稳态传热是烹饪的基本技术特征<sup>[1]</sup>。由于烹饪中颗粒的非稳态导热、烹饪的成熟和过热质量因子对温度敏感性不同, 烹饪过程存在一个使得烹饪质量最优的烹饪加热条件, 并提出了优化数学模型<sup>[2]</sup>。但前文并未选择具体烹饪工艺进行深入优化分析, 所提出的数学模型并未得到计算实例的验证。

高海薇<sup>[3]</sup>在 2001 年比较了中西烹调方法, 认为以油为传热介质的烹调方法是中餐的突出特色。爆、熘、煸、炆等烹调方法是中餐所独有的。炒虽然为中西共有, 但内涵大不相同, 而且中餐使用的频率要比西餐高得多。本文中这类以多量油为传热介质的快速烹饪方式通称为炒, 是中式烹饪的代表性操作。因而有必要对炒的工艺过程进行优化分析, 以评估现有烹饪工艺的合理性。而一般烹饪文献<sup>[4-5]</sup>, 对油传热烹饪工艺有正确合理的描述, 但没

有建立在理论基础上的数据分析和图表描述, 也没有与其他烹饪工艺进行过比较以及提出和分析过炒工艺的主要操作技术参数。因此, 有必要对炒的过程进行深入的过程传递和动力学分析, 以了解其特征, 提出和分析主要操作参数。

首先, 考察与烹饪优化相关的食品热处理优化研究的背景。

在食品非稳态传热过程的品质优化领域中, 以杀菌釜杀菌和液体-颗粒无菌工艺中的品质优化最为典型。两者的工艺优化目的是以最小的加热强度实现商业灭菌以减小产品品质破坏和降低能耗<sup>[6]</sup>。参见 2006 年本文作者建立的流态化液体-颗粒无菌工艺数学模型<sup>[7]</sup>。文献<sup>[8]</sup>讨论了不同研究的 27 个优化数据, 这些取数据得了近似的结论, 证实了优化方法的可靠性。较为全面的杀菌过程优化回顾参见文献<sup>[9]</sup>。

用烹饪液体-颗粒加热过程与液体-颗粒杀菌过程进行分析对比: 两者有近似的非稳态过程, 烹饪过程的成熟值  $M$  和杀菌过程的  $F$  值作为各自的限制函数, 烹饪过程的过热值  $O$  和杀菌过程的  $F$  值, 作为各自的目标函数, 限制函数和目标函数的  $Z$  值不相同, 两者将同样存在最优对流换热介质温度。

关于肉类加热品质变化的动力学研究, 尤其是蛋白质变化的动力学研究并不多, 这也是当前难以解释很多肉类加热中品质变化现象的原因之一。优

收稿日期: 2012-06-26 修订日期: 2012-12-29

基金项目: 国家科技支撑计划重大项目 (2012BAD37B02); 贵州省科学技术基金 ([2009]2238 号); 贵州大学引进人才科研项目 ((2009) 27 号)  
作者简介: 邓 力 (1966—), 男, 江苏南京人, 副教授, 博士, 主要从事研究方向为自动烹饪、复杂食品加工过程的数值分析、现代杀菌技术及挤压技术。贵阳 贵州大学生命科学学院, 550025。

Email: denglifood@foxmail.com

化计算中,品质变化因子及其动力学参数选择至关重要。为此必须深入分析烹饪中原料的化学、物理变化,找到其影响烹饪品质的关键变化,并从文献获合理选择而获得关键动力学参数。

其次,考察关于炒的工艺特征和操作参数分析的前期研究背景。

水传热方式的煮和汽传热方式的蒸是在全世界普遍应用的烹饪工艺,与油传热的炒相比区别很大。但目前还没有研究者从传递过程和动力学原理研究分析三者的区别。现有文献<sup>[5]</sup>指出刀工能够缩短烹饪成熟时间,但未见深入的原理分析。有必要展开进一步的分析研究。

而目前的烹饪文献中尚没有针对包括炒在内的烹饪工艺提出过建立在传热学和动力学基础上的定量工艺参数。有必要提出炒的关键工艺参数,并分析它们对烹饪品质的影响。

最后,考察先期论文<sup>[1][2]</sup>建立的研究基础对本文开展研究的意义。

在先期论文<sup>[1]</sup>建立了典型中式烹饪的过程传递的控制方程组。文中分析了容器-液体和液体-颗粒表面换热系数相似性,并对炒中预热油脂操作进行了传热学解释,但没有进行深入的分析。

由先期论文<sup>[2]</sup>提出了基于品质变化动力学的成熟值理论,结合控制方程组可以定量地分析烹饪品质,为炒工艺的模拟和分析提供了必要的理论基础和技术手段。

由于一些烹饪操作仅持续数10 s,如采用传统的理化分析为主的非动力学方法进行研究的难度很大,因此,采用数值技术是研究烹饪过程的优选手段。

本文希望通过开展对炒的数值模拟,初步了解烹饪质量优化的基本规律,以解释烹饪现象和评价手工烹饪技艺。同时以烹饪成熟值理论为基础,分析炒与其他烹饪方式的区别,说明烹饪的技术特征,提出影响炒工艺的技术参数及其原理。本研究的更为重要的目的是为烹饪工程化、自动化提供研究思路和理论基础。

## 1 烹饪的数值模拟与优化

### 1.1 烹饪优化的对象的选择

选择烹饪优化的对象的原则是,其操作特征和过程复杂性具较强的中式烹饪代表性。

由于爆、炒等操作过程激烈,非稳态性质显著,过程复杂性高于以水传热介质的煮、以汽为传热介质的蒸等烹调方法,研究价值更高。爆、炒工艺通常针对高蛋白质食品,如肉类。因此选择烹饪优化的对象为烹饪中的肉类爆炒工艺。同时,爆、炒工

艺是中式烹饪的特征工艺,很少出现在中国以外的烹饪方式中<sup>[3]</sup>。对炒的模拟和优化方法最为复杂,简化后容易应用到蒸和煮中,具有代表性。

### 1.2 成熟和过热品质因子的选择及其Z值的确定

#### 1.2.1 表征成熟的品质因子及Z值的确定

肉的成熟包括致病微生物的杀灭、蛋白质变性到合适的程度、色泽变化及特征风味的形成等。通常以肉中心温度达到60~80℃为终点温度,这时肉的嫩度随肉中心的终点温度升高而下降。为了保证卫生通常以70℃左右为终点温度<sup>[10]</sup>,综合考虑成熟程度,以中心温度70℃ 1 min为成熟条件<sup>[11]</sup>。客观上,不同种类、不同部位的原料肉采用不同的烹饪手段会有不同的成熟条件;主观上,不同的饮食习惯也会对成熟产生不同的判断。因此,肉的成熟有一个范围,即肉的终点成熟值<sup>[2]</sup>有一个范围。但对于一定的原料肉、一定的烹饪手段和一定的饮食习惯,存在一个固定的成熟值。

考察烹饪过程和饮食习惯,可以认为,嫩度是肉类成熟的关键指标。而嫩度的形成的关键原因是蛋白质的变性。食品中蛋白质变性的Z值范围在4~10℃<sup>[12]</sup>。例如,文献[13]中水中肉的胶原蛋白的活化能为518 kJ/mol,以80℃为参考温度计算,其Z值为4.6℃。

杀灭致病菌以满足基本的饮食卫生,也是加热烹饪的一个基本目标。而致病微生物的致死的Z值范围与蛋白质变性类似,文献[14]认为,总体上生长的微生物的耐热性Z值范围在4~7.7℃,如碎牛肉中E. coli O157:H7的Z值为5.3℃。

表征肉类成熟的品质因子为致病微生物的热致死和蛋白质的热变性。两者有接近的Z值范围,都在5~10℃。由此,确定烹饪优化计算的成熟品质因子的 $Z_M$ 值为7℃。鉴于该值在测定之中,设定一个范围,即以等效温度为70℃的终点成熟值 $M_{70℃}=0.1$  min和 $M_{770℃}=1$  min,为烹饪优化计算参数。这一终点成熟值使得肉类蛋白质变性达到成熟,同时杀灭致病菌。

#### 1.2.2 表征过热的品质因子及Z值的确定

虽然肉类在加热时,非稳态导热形成的中心及外部温度不同会产生不同部位的蛋白质变性差异,但不会形成烹饪操作参数优化的条件。因为从数学的角度来看,成熟品质和过热品质的动力学参数差异是优化的必要条件。

肉的烹饪过程中,水分的含量和状态关系到肉的多汁度(juiciness)、嫩度(tenderness)、收缩(shrinkage)等关键食用品质指标<sup>[15]</sup>。早在1965年,Bramblett就提出同样温度下快速加热肉类的多汁率高于慢速加热<sup>[16]</sup>,但并未揭示其原理。

在肉类的爆、炒等烹饪中，即使加热介质的温度大于 100℃，由于表面蒸发的存在，肉的温度在 100℃ 以内<sup>[17]</sup>，内部不存在水分蒸发，类似深层油炸工艺的初期。因此水分的散失是通过传质完成的，其关键的参数是水分扩散系数，而该参数是温度的函数。文献[12]中，肉的水分扩散系数的活化能为 20~100 kJ/mol，以 60℃ 计算得到 Z 值为 106.2~21.2℃。2006 年张厚军<sup>[18]</sup>研究猪通脊肉水分迁移动力学，高含水率时 60℃ 水分扩散系数的活化能为 24.74 kJ/mol，计算得到 Z 值为 85.8℃，同时数据表明，水分含量越高、温度越高，活化能越高，相应地 Z 值越小。肉类的水分扩散系数活化能与其他高含水食品类似，如马铃薯水分扩散系数的活化能为 25.2~36.2 kJ/mol<sup>[19]</sup>。在对水分损失影响最大的 70~100℃ 区间，水分扩散的 Z 值应在 20~40℃。

加热过程还会导致营养的损失。Mulley<sup>[20]</sup>在 1975 年研究了牛肉中维生素 B1 的热损失动力学，在 121~137.8℃ 值为 27.5℃。Feliciotti<sup>[21]</sup>在 1957 年研究了猪肉中 VB1 的热损失动力学，在 121~137.8℃ 温度范围内 Z 值为 27.4℃。维生素热损失的总体平均 Z 值为 20~30℃<sup>[12]</sup>。

确定以水分扩散和食品营养损失为过热值的品质因子，综合上述品分析及参数，确定烹饪优化计算的过热值的  $Z_O$  值为 30℃，该值接近计算热加工总体质量损失通常采用的 Z 值 33℃<sup>[12]</sup>。

### 1.3 设定条件下的烹饪优化计算

#### 1.3.1 设定条件

烹饪传热介质温度在烹饪过程中保持恒定；忽略烹饪中颗粒的边界收缩；烹饪过程中液体和肉片的热物性恒定；烹饪开始时颗粒温度均匀；忽略烹饪过程中颗粒的蒸发散热；颗粒被烹饪液态传热介质完全淹没。深层油炸的对流传热系数在表面蒸发时段为 1 000~1100 W/(m<sup>2</sup>·℃)<sup>[17]</sup>。该状况类似于烹饪爆炒，以 1 000 W/(m<sup>2</sup>·℃) 为计算条件。

#### 1.3.2 数学模型

目标函数：体积平均过热值  $O_V$  或表面过热值  $O_s \rightarrow \min$ ，计算公式分别为文献[2]式(17)和式(16)。

约束条件：成熟值  $M = M_{T70℃} = 0.1 \text{ min}$  或 1 min。

独立变量：颗粒为猪肉片，由文献[7]确定其热物性为导热系数 0.47 W/(m<sup>2</sup>·℃)、比热容 3.772 kJ/(kg·℃)和密度 1 057 kg/m<sup>3</sup>，厚度 2~6 mm，由文献[22]原理近似视为无限平板。

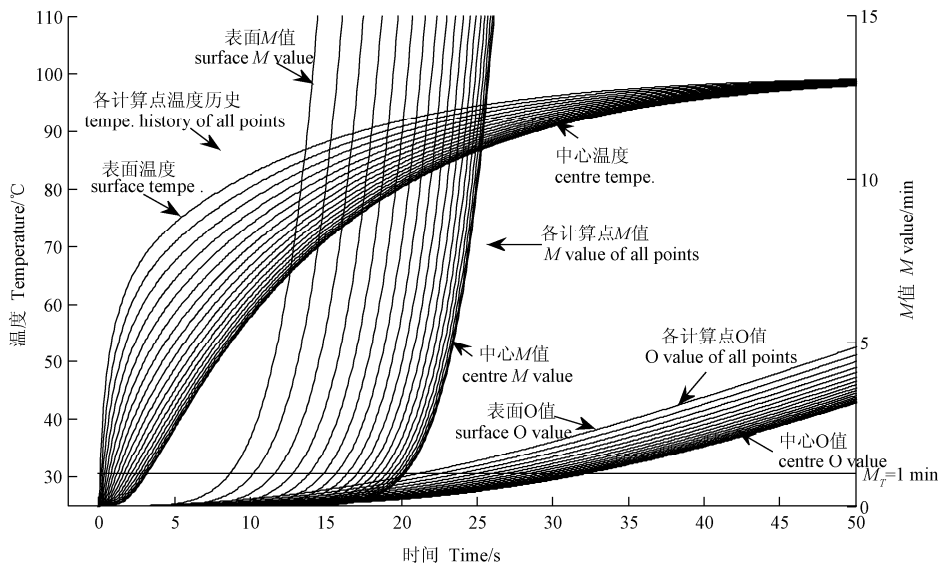
优化变量：烹饪油温度，优化范围 85~120℃；

数学模型：液体-颗粒非稳态导热控制方程为文献[1]式(8)和式(9)，采用解析法求解。

搜索方法：鉴于解析法求解数学模型的计算负荷较小，采用遍历法搜索最优烹饪油温。

#### 1.3.3 计算方法

首先设定优化烹饪油温的范围、步长及计算时间的长度、步长；并将平板在厚度方向上将半厚等



注：M 值为成熟品质等效加热时间，即成熟值；O 值为过热品质等效加热时间，即过热值； $M_T$  值为终点成熟值。

图 1 液体颗粒表面换热系数  $h_{fp} = 1\ 000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ ，油温 100℃，成熟品质 Z 值  $Z_M = 7\text{℃}$ ，过热品质 Z 值  $Z_O = 30\text{℃}$ ，3 mm 肉片各计算点的温度历史及成熟因子和过热因子 O 值

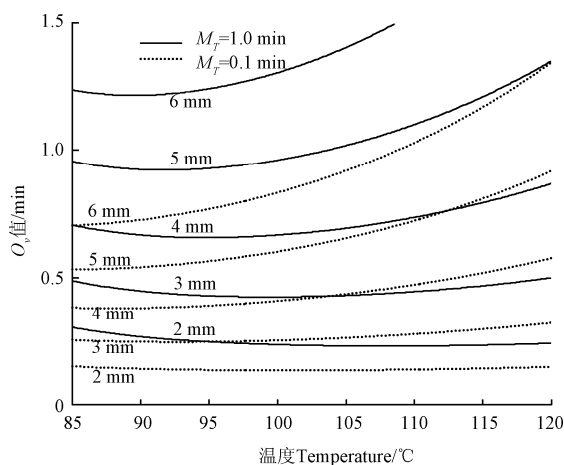
Fig.1 Temperature histories and O values of natural factors and over heated factors in the points selected of sliced pork,  $h_{fp} = 1\ 000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{℃})$ , oil temperature=100℃, thickness=3 mm,  $Z_M = 7\text{℃}$ ,  $Z_O = 30\text{℃}$

分为 20 份，等分点包括中心及表面，共 21 点；以解析法求解无限平板的导热方程<sup>[22]</sup>，得到中心、表面及各等分点的温度时间关系；按照先期论文<sup>[2]</sup>式(1) 计算中心  $M$  值，以  $M_{T70^{\circ}\text{C}}=0.1$  或 1 min 插值得到中心成熟时间；按先期论文<sup>[2]</sup>式(9) 计算成熟时间各等分点的各  $O$  值；以中心成熟时间对各  $O$  插值，得到成熟时的各等分点的各  $O$  值，对其进行体积平均，得到近似体积平均过热值  $O_v$ ；这一  $O_v$  计算方法是先期论文<sup>[2]</sup>式(17) 的近似方法，误差取决于等分数，等分数对误差影响的分析参见文献<sup>[7]</sup>； $O$  值原理参见文献<sup>[2]</sup>图 1；搜索求得最小  $O_v$  时相应的烹饪油温即为最优操作油温。计算通过 Matlab 软件编程序实现，具体优化计算流程类似文献<sup>[7]</sup>附录 1.5。

图 1 显示了一个计算环节，为 3 mm 猪肉片，表面换热系数  $1\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ，以  $100^{\circ}\text{C}$  烹饪油温加热后的 20 等分的各计算点的温度、成熟值  $M$  和过热值  $O$  的变化。

### 1.4 优化计算结果

计算得到不同厚度肉片在不同烹饪油温下达到成熟达到成熟时间 ( $M_{T70^{\circ}\text{C}}=1$  和 0.1 min) 的体积平均  $O$  值见图 2,  $M_{T70^{\circ}\text{C}}=0.1$  和 1 min 的数值见表 1。



注： $O_v$  为体积平均过热值， $M_T$  值为终点成熟值。

图 2 不同厚度肉片在不同烹饪油温下的  $O_v$  值

Fig.2  $O_v$  variation trend with various thickness of sliced pork, and with various cooking temperature

表 1 优化条件下的烹饪相关参数  
Table 1 Data under optimized condition

肉片厚度/mm	最优油温/ $^{\circ}\text{C}$		最优成熟时间/s		最优点过热值/min	
	$M_{T70^{\circ}\text{C}}=0.1\ \text{min}$	$M_{T70^{\circ}\text{C}}=1\ \text{min}$	$M_{T70^{\circ}\text{C}}=0.1\ \text{min}$	$M_{T70^{\circ}\text{C}}=1\ \text{min}$	$M_{T70^{\circ}\text{C}}=0.1\ \text{min}$	$M_{T70^{\circ}\text{C}}=1\ \text{min}$
2.0	100.8	107.9	9.14	9.75	0.13	0.23
3.0	92.5	99.5	19.16	20.45	0.25	0.42
4.0	87.9	94.8	32.56	34.83	0.38	0.66
5.0	85.0	91.8	49.09	52.67	0.53	0.92
6.0	82.8	89.5	68.93	74.23	0.70	1.22

由图 2 和表 1 可见，当  $M_{T70^{\circ}\text{C}}=0.1$  和 1 min 对于不同尺寸的肉片都存在使得体积平均过热值最小的最优油温。

### 1.5 讨论

#### 1.5.1 优化模型的可靠性

##### 1) 模型假设条件对模型可靠性的影响

优化模型中忽略蒸发散热的条件假设对实际传热过热过程影响较大，从而对优化结果产生影响。蒸发散失的热量可视为表面换热的减少，即表面换热系数变小，将导致最优烹饪油温的增加。因此，实际的烹饪最优油温高于本文计算结果。

数值分析结果表明，在较宽的成熟值范围 (0.1~1 min) 内，肉类爆炒烹饪过程都出现了使得过热值最小的烹饪温度优化点，参见图 2。成熟值的数值变化只会影响优化结果，而不会影响优化模型本身。

烹饪中颗粒的边界收缩、烹饪开始时颗粒温度均匀性、液体和肉片的热物性变化会对传热产生一定影响，但在烹饪中边界收缩及热物性变化幅度不大，初温的影响就更小，不会对优化模型产生颠覆性的影响。

实际烹饪中可能出现颗粒不被烹饪传热介质完全淹没，但此时颗粒仍被液态传热介质加热，与颗粒被淹没的不同之处在于，颗粒与液体的接触面不稳定，且处于变动之中，受人工搅拌的影响。其后果相当于表面换热系数降低了，不会影响到优化模型的存在。

由于烹饪优化模型的复杂性，涉及了大量的传热学和动力学参数，这些参数均为文献获得，但取之有据，而使用文献数据进行过程模拟也是国际通行的食品工程研究方式。

##### 2) $Z_M$ 、 $Z_O$ 取值对模型可靠性的影响

由于烹饪的复杂性，烹饪过程中存在大量种类的有关成熟和过热的质量因子<sup>[2]</sup>。对于蛋白质类食品的成熟， $Z$  值范围在  $4\sim 10^{\circ}\text{C}$  蛋白质热变性是关键因素，是一般肉类成熟研究文献<sup>[15]</sup>所公认的。而  $Z$  值为  $4\sim 10^{\circ}\text{C}$  的致病菌致死和平均  $Z$  值为  $33^{\circ}\text{C}$  综合食用品质虽然能够形成优化空间，但仍不是决定烹饪优化的关键因素。实际上，烹饪操作中，口感和火候的关系是决定性的。经过仔细分析考察，认为烹饪中水分的损失对口感起到决定性的影响，而烹饪中水分的扩散系数具有较大的  $Z$  值，从而导致的烹饪的优化模型的形成，因此，水分扩散问题是烹饪技术的关键问题。水分扩散系数如何直接导致烹饪成品水分的保持而影响到烹饪成品的质构及影响程度，需要进一步研究和验证，已经安排于作者研究计划。

3) 烹饪实践和现有文献对优化模型存在的反证

现有的烹饪实践, 例如, 爆炒肚片、宫保肉丁的烹饪中, 存在显著的火候控制问题, 火力(功率)大小、切割形状尺寸、预热油温、加热时间长短明显影响到烹饪成品的质构, 过强或过弱的加热都导致成品品质偏离最优, 这一现象, 及其操作控制对成品质量的影响趋势, 可由上述优化模型得到解释。而 Bramblett 的升温速度对肉类品质影响的研究<sup>[16]</sup>也对本文观点有利。另一个烹饪实践, 即小炒的蔬菜(快速加热)明显比大炒的蔬菜(慢速加热)鲜嫩多汁, 也适合用水分扩散速度不同来解释。显然, 问题的完全澄清尚需要进一步的理论和试验研究。

### 1.5.2 优化模型的原理、多样性及意义

#### 1) 优化模型的原理解释

烹饪优化模型存在的原因在于, 烹饪的成熟品质比过热品质对温度更为敏感, 即  $Z_O$  明显大于  $Z_M$  值, 因此可以通过快速加热, 使得原料在成熟的同时, 取得更好的烹饪品质。其原理类似于食品超高温杀菌原理。

#### 2) 优化模型的多样性

上述优化模型是以颗粒中心终点成熟值为约束条件, 以体积平均过热值和表面过热值为目标函数建立的。由于烹饪的成熟值和过热值种类和空间位置的多样性, 会出现以不同的种类和空间位置终点成熟值为约束条件, 以及不同的种类和空间位置过热值为目标函数的多种优化模型。

#### 3) 优化模型的意义

本文中实际使用的优化模型及其优化结果可以应用于中国传统烹饪中具有典型性的炒、爆类工艺, 具有参考价值和指导意义。由于缺少烹饪动力学基础试验, 由文献获得的参数的准确性受到限制。在原理上, 上述优化模型适用于一切在烹饪中成熟品质和过热品质的  $Z$  值不同, 即两者对温度的敏感性不同的一切烹饪工艺中。实际上, 本文提出的烹饪优化模型的主要价值在于试图从理论上揭示中式烹饪的核心原理。

### 1.5.3 优化模型解释中国传统烹饪合理性

#### 1) 火候控制的难度所在

由于烹饪者无法观察到烹饪原料的温度, 只能凭借视觉观察和经验控制加热和判断成熟, 有一定难度。对于一些过热品质对温度敏感度高的菜品, 尤其需要通过大功率、高温预热油脂、快速搅拌、精细切割等方式快速加热原料, 以使品质最优, 但必须在到达成熟时间立即停止加热, 否则, 快速加热同样会快速增加过热值, 迅速降低烹饪品质。

这时停止点的掌控, 就必须更加精准。如爆炒腰花这样的菜品, 火候掌握难度就比一般肉类爆炒的难度大。

#### 2) 预热多量油脂到高温的合理性

对于 2~3 mm 厚肉片, 在  $M_{770^\circ\text{C}}$  为 0.1~1 min 的较宽范围内, 最优油温可能在 100℃ 以上, 而对于肉类这样的高含水组织较疏松的食品, 在 100℃ 左右已开始蒸发, 即使外部实际油温很高, 食品表面温度也仅处在 100℃ 左右。本文优化模型的简化边界条件并未考虑蒸发。实际上可能实现的最优加热操作条件是, 以足够高的油温保持颗粒表面蒸发, 才能够使得肉片品质最佳。

因此, 小颗粒肉类原料烹饪时, 让油温较多地超过 100℃ 以保持颗粒表面蒸发是获得最佳烹饪品质的必要条件。中式烹饪的爆和炒中, 常常通过预热多量油脂到远高于 100℃ 的高温, 有时甚至到燃点附近, 目的就是持续提供弥补蒸发散热的热量, 维持表面蒸发。分析表明, 中式烹饪中采用多量高温油脂处理肉类的爆和炒等烹饪工艺是符合上述模型原理的。后续论文会在这一问题上进行进一步的试验研究和理论分析。

#### 3) 精细切割的合理性

由图 2 和表 1 可见, 肉片厚度越小, 优化油温越高, 相应的过热值越小, 而成熟时间越短。表 1 数据表明, 肉片尺寸从 2 mm 增加到 3 和 4 mm, 体积平均过热值会分别提高约 2 倍和约 3 倍, 意味着品质的大幅度降低。说明烹饪原料尺寸越大, 烹饪过程的品质损失就越大。在爆和炒等烹饪中蛋白质类食品切割为较小尺寸, 如肉片厚度保持在 2~3 mm, 有利于烹饪品质。分析表明, 中式烹饪中将原料切割为小颗粒以缩小传热学特征尺寸的刀工工艺是符合科学原理的。

#### 4) 成熟的控制

由表 1 数据可见, 成熟值  $M_{770^\circ\text{C}}$  在 0.1~1 min 的较宽范围变化, 在烹饪中常用的 2~4 mm 厚度范围内, 最优成熟时间差值不超过 3 s。其最优成熟时间相差很小, 说明控制肉类的最佳成熟点是有一定难度的。过长和过短的烹饪时间都会导致烹饪品质的劣化, 这是烹饪中火候控制难度较大的主要原因之一。

## 2 炒的工艺特征及参数分析

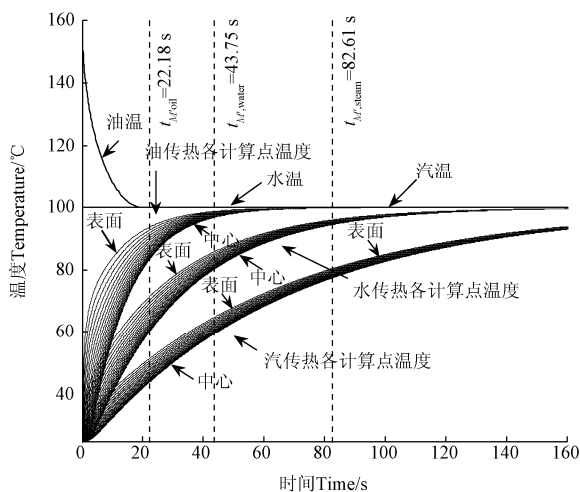
### 2.1 传热形式的影响——炒、煮和蒸的比较

首先对在炒、煮和蒸中的 3 mm 猪肉片进行传热学和动力学数值模拟。

计算条件: 与本文 1.3.1 节的设定条件同, 另, 边界条件确定为: 炒过程中由于高油温导致猪肉片

表面水分蒸发, 相当于表面温度保持在 100℃ 左右, 而煮和蒸中介质温度保持在水的沸点和常压蒸汽温度, 均为 100℃, 作为颗粒表面介质温度。参照本文 1.2 节, 动力学参数确定为: 参考温度为 70℃, 终点成熟值  $M_{T70^{\circ}\text{C}}=1 \text{ min}$ , 成熟品质因子的 Z 值  $Z_M=7^{\circ}\text{C}$ , 过热品质因子的 Z 值  $Z_O=30^{\circ}\text{C}$ 。传热学参数定如下: 由于油炸的对流传热系数在表面蒸发时段为  $1\,000\sim 1\,100 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ <sup>[24]</sup>, 状况类似于烹饪爆炒, 以油传热表面换热系数  $h_{fp}$  为  $1\,000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ ; 对于水传热, 文献<sup>[23]</sup>中马铃薯在流动水中的  $h_{fp}$  为  $239\sim 303 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ , 文献<sup>[25]</sup>中甘蓝在淀粉悬液中的的  $h_{fp}$  为  $156\sim 177 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ , 考虑一般煮通常在沸腾状况下, 热效率较高, 确定水传热  $h_{fp}$  为  $300 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ ; 通常气体-固体的表面换热系数在  $10\sim 100 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$  之间, 考虑到蒸的过程带有轻微的冷凝, 相当于提高了  $h_{fp}$ , 确定汽传热  $h_{fp}$  为  $100 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$ 。以参考温度 70℃, 按本论文 1.3.3 节中的方法, 计算油传热、水传热和汽传热的肉片 21 等分点的温度历史, 得到近似体积平均过热值  $O_v$ 。同时, 类似地以 21 等分点中的中心点温度历史分别按文献<sup>[2]</sup>中式 (12) 式 (15) 计算 3 种烹饪方式的中心成熟值  $M_c$ 、中心过热值  $O_c$ , 以 21 等分点中的表面点温度历史按文献<sup>[2]</sup>中式 (9) 按计算 3 种烹饪方式的表面过热值  $O_s$ 。以  $M_{T70^{\circ}\text{C}}=1 \text{ min}$  对成熟值  $M_c$  插值得到的 3 种烹饪方式的成熟时间  $t_M$ 。计算过程和计算结果见图 3、4 和表 2。3 种烹饪方式的热量传递、动量传递、质量传递和加热品质变化动力学计算结果比较和分析见表 2。

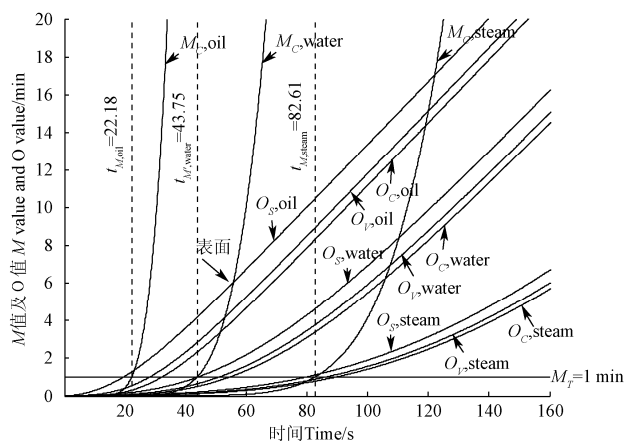
由计算结果可见, 炒的成熟时间 22.18 s 比较煮 43.75 s 和蒸 82.62 s 短得多, 同时体积平均过热值  $O_v$  最小, 具有明显的效率和品质优势。但其表面过



注:  $t_M$  为成熟时间。

图 3 不同烹饪方式的传热分析

Fig.3 Analysis of heat transfer for different cooking method



注:  $O$  为过热品质因子相对参考温度的等效加热时间, 即过热值;  $M$  为成熟品质因子相对参考温度的等效加热时间, 即成熟值;  $M_T$  值为终点成熟值; 下标  $s$  代表颗粒表面平均; 下标  $v$  代表颗粒体积平均; 下标  $c$  代表颗粒中心; oil 代表油传热; water 代表水传热; steam 代表汽传热。

图 4 不同烹饪方式的动力学分析

Fig.4 Dynamic analysis for different cooking method

表 2 不同传热介质烹饪的比较

Table 2 Comparison of three kinds cooking with different heat transfer media

性质	项目	油传热	水传热	汽传热
热量传递	流体-颗粒传热速度	最快	中间	最慢
	表面换热系数	近似无穷大	$100\sim 1\,000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$	$<100 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$
	最高温度	$>100^{\circ}\text{C}$	$\leq 100^{\circ}\text{C}$	$\leq 100^{\circ}\text{C}$
	表面相变	蒸发	无	无
	质量传递	扩散	油溶性物质	水溶性物质
动量传递	对流传质	可能	可能	可能
	搅拌	强烈	可能有, 较轻	无
	体积平均过热值 $O_v$	最低 (0.54 min)	中间 (0.64 min)	最高 (0.88 min)
动力学	表面过热值 $O_s$	最高 (1.27min)	最低 (0.99 min)	中间 (1.11 min)
	成熟时间 $t_M$	快 (22.18 s)	中间 (43.75 s)	慢 (82.61 s)

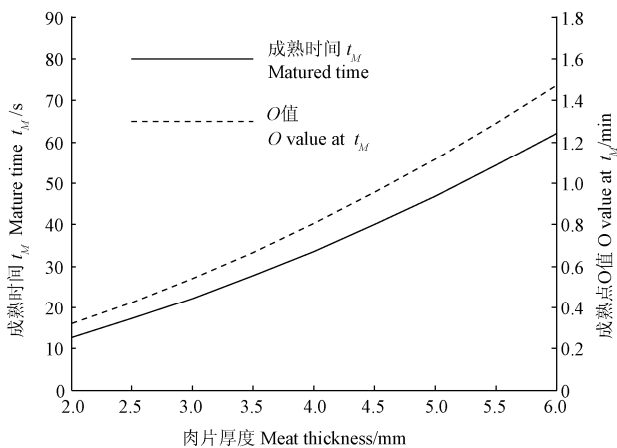
热  $O_s$  值是最高的, 说明表面受到高强度加热。另外, 在爆炒工艺中, 极可能在局部脱水后短时形成壳层, 其温度大幅度超过 100℃, 形成高温风味。炒中常用的挂糊工艺可以延长表面蒸发时间, 避免表面壳层的形成。炒的过程中, 原料内部温度变动剧烈, 温差大, 形成了炒制菜品的加热差异性, 会产生独特的烹饪品质。由于油可以加热到远超过 100℃, 而开放环境下水、汽最高温度仅 100℃。预热油蓄积的能量使得烹饪原料表面持续蒸发, 形成 100℃ 左右的有利表面温度及较高的表面换热系数。而水、汽对食品颗粒的传热界面基本无相变, 表面换热系数较低, 偏离了最佳烹饪条件。总体而言, 炒, 更适用于热敏性高、机械强度较大 (耐搅拌)、需要高温风味、耐油的食品原料的烹饪; 煮, 更适用

于热敏性一般、机械强度中等及以上、不需高温风味（如高温产生不需要风味）、耐水的食品原料的烹饪；蒸，更适用于热敏性较低、机械强度低的食品原料的烹饪（不耐搅拌）、不需要高温风味、可能不耐水不耐油（会在其中溶解或溶胀）的食品原料的烹饪。同时，介质的传质特性对烹饪风味的形成有很大影响。

## 2.2 刀工的作用——传热学特征尺寸对烹饪的影响

首先对 0.2~0.6 mm 猪肉片炒的工艺进行传热学和动力学数值模拟。

计算条件：厚度 2~6mm，其余计算条件以及计算方法同 2.1 的油传热情况，模拟计算的肉片的成熟时间，和成熟点的  $O_v$  值，结果见图 5。



注： $O_v$  值为过热品质因子相对参考温度的体积平均等效加热时间

图 5 不同厚度肉片的烹饪优化

Fig.5 Cooking optimization with different thickness of sliced pork

由文献<sup>[2]</sup>可知，烹饪中原料的温度历史决定了烹饪品质，当外部加热条件和颗粒热物理性质相同，原料颗粒的传热学特征尺寸决定了温度历史和烹饪品质。传热学特征尺寸又称传热学特征长度，是用于计算传热学特征数的几何尺度<sup>[22]</sup>。不同形状烹饪固体原料有不同的传热学特征尺寸。对于薄片，由于宽度对传热的影响可以忽略，其厚度就是其特征尺寸。由图 5 可见，颗粒厚度，即特征尺寸越小，加热达到成熟的时间越短，同时，过热值——即品质损失越小。其他刀工将烹饪原料切割为条、丝、丁、末、块的同时，也减小了其传热特征尺寸。而传热学特征尺寸越小，烹饪固体原料中心升温速度越快。产生的品质变化趋势与上述算例相同。中式烹饪中，尤其是炒工艺中，刀工的主要的功能是控制其传热学特征尺寸。但在实际操作中有两个方面限制了颗粒尺寸过小，一方面，很多烹饪原料有合理

的食用尺寸，尺寸过小影响食用品质，同时还增加了切割难度；另一方面，过小颗粒的最优颗粒表面温度在 100℃ 以上过多，在实际烹饪中是达不到的。对于片状肉类食品合适的厚度是 2~4 mm。这也是中式烹饪中最经常采用的尺寸<sup>[4-5]</sup>。

传统烹饪的刀工，其主要作用是减小原料的传热学特征尺寸。显著的例子是刮刀方法，大幅度缩小特征尺寸而保持了原料的外形，提高了烹饪质量。

## 2.3 搅拌对炒的影响

炒工艺中，搅拌至关重要不可或缺。手工操作中通过翻锅和用勺实现。首先，搅拌使得烹饪原料传热均匀，否则局部过热会导致焦糊，导致炒工艺的失败。其次，搅拌决定了油脂和烹饪原料颗粒以及烹饪容器内壁之间的相对运动速度，而上述相对运动速度决定了油-颗粒之间、油-容器间表面换热系数从而深度控制炒工艺，参见文献<sup>[1]</sup>。油-颗粒之间表面换热系数对烹饪工艺有直接影响。

采用本论文 1.3 节中的数学模型、计算条件和算法，以油-颗粒表面换热系数  $h_{fp}=200\sim 30\,000\text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})$  计算 3 mm 猪肉片的优化条件，得到表 3。由表 3 可见， $h_{fp}$  越大，则最优烹饪温度越低，成熟时间越短。说明传统手工烹饪中在烹饪热敏性蛋白质烹任原料时，采用强烈的搅拌措施是合乎科学原理的。

表 3 不同油-颗粒表面换热系数下的烹饪优化结果

Table 3 Cooking optimized result with various surface heat transfer coefficients between oil and particulates

$h_{fp}/\text{W}\cdot(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})^{-1}$	最优油温/ $^\circ\text{C}$	最优成熟时间 $t_M$ /s	最优点过热值 $O_v$ /min
200	148.7	25.03	0.439
400	117.5	22.97	0.431
800	102.3	21.05	0.425
1 000	99.4	20.49	0.424
5 000	90.2	18.42	0.425
30 000	88.4	17.89	0.428

注： $h_{fp}$  为油-颗粒表面换热系数。

## 2.4 炒的传热学及主要操作参数

### 2.4.1 炒的传热

手工烹饪中，炒包含了热源对容器外壁辐射、容器内部传导、油对容器的对流、有对原料颗粒的对流、颗粒内部传导及颗粒表面蒸发等 6 个主要传热和相变过程，一些菜品的炒制过程仅数秒，短促激烈，过程中各传热过程都是非稳态的。对比食品工程常用的传热单元操作，如杀菌、浓缩、干燥等，无疑要复杂很多。炒的传热过程参见图 6。炒的传热控制方程参见文献<sup>[1]</sup>。



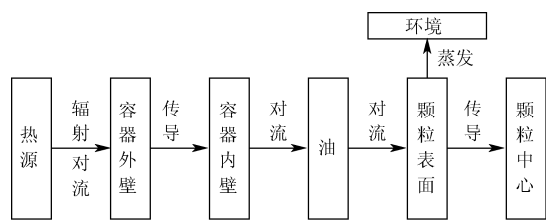


图 6 炒的传热过程  
Fig.6 Heat transfer of stir-frying

### 2.4.2 影响炒过程的控制参数

烹饪中，操作、原料和设备等 3 个方面控制了烹饪过程，并影响到烹饪过程传热数学模型的各个参数，从而影响到烹饪品质。详见图 7。其中烹饪操作包括操作时间控制，如投料、起锅的时机；搅拌控制，如翻锅和用勺；锅的移动，即离开和接近热源。参考文献<sup>[1]</sup>数学模型中影响传热的参数，对比图 7 可以了解到烹饪的控制是如何影响到烹饪传热的。

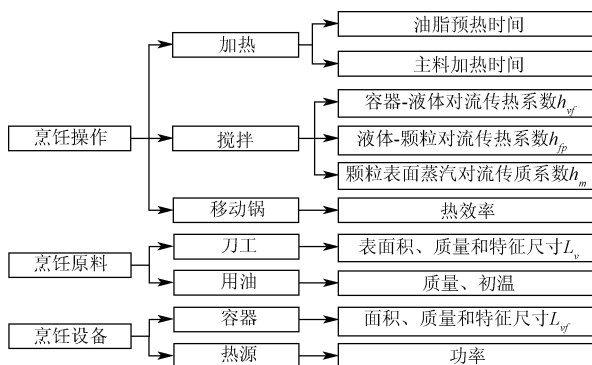


图 7 炒的控制参数  
Fig.7 Controlling parameters of stir-frying

下面分析重要的烹饪过程中原有或次生操作参数的对炒的影响。

### 2.4.3 油温过低使得烹饪品质偏离最优

由前文可知，对于 2~3 mm 厚肉片的爆和炒中，通过预热质量为肉片数倍到数十倍的多量油脂到远高于 100℃ 的温度，使得加入其中的肉片表面处在蒸发状态，即 100℃ 左右的最佳温度，使得肉片嫩度最佳。这一结论对多数肉类食品的炒具有代表性意义。当油温低于 100℃，颗粒表面温度也会低于 100℃，从而偏离最佳烹饪条件而降低烹饪品质。其原理见图 8。

图中合理烹饪油温及相应肉片温度采用 3 mm 肉片数值模拟的最优工艺，而低油温状况是根据传热原理绘制的，并非数值模拟。

炒过程预热油温是一个次生参数，不但与加热功率、加热效率和加热时间相关，在烹饪过程中还受到油料比的影响。

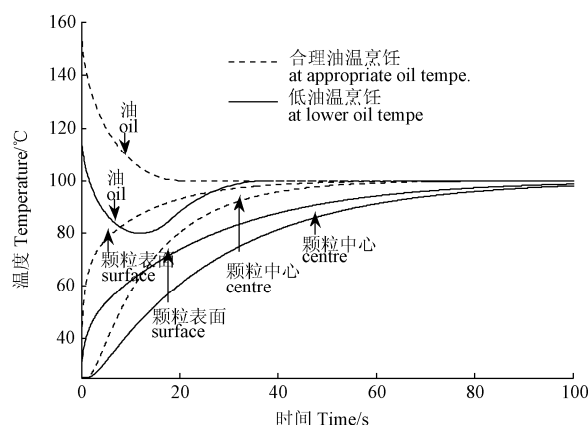


图 8 低油温对炒的影响  
Fig.8 Effect of low oil temperature on stir-frying

### 2.4.4 影响炒工艺中油温的参数

#### 1) 油料比

油料比是油传热烹饪中预热油脂和加入的烹饪原料的质量比。会直接影响到烹饪过程的油温以及烹饪质量。参看文献<sup>[1]</sup>式 (7)，当油料比过低，即使油脂预热温度足够高，由于油脂数量少，烹饪原料吸热和水分蒸发消耗油脂热量，而加热功率不足以弥补，油温会迅速降到 100℃ 以下，使得烹饪偏离最优条件。参见图 9 中油料比过低油温度变化曲线。

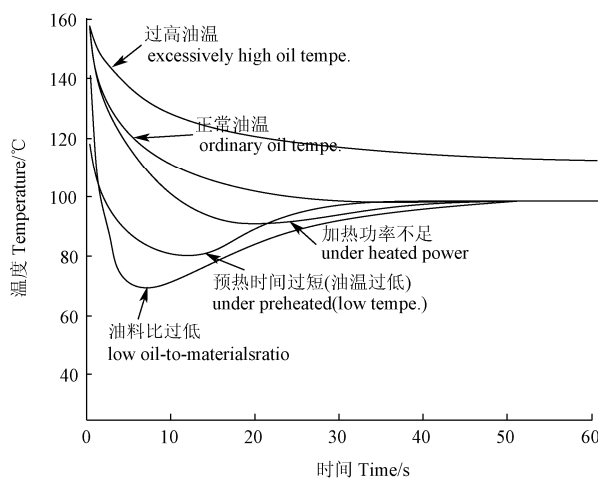


图 9 影响炒工艺中油温的参数  
Fig.9 Parameter influences on oil temperature in stir-frying

#### 2) 烹饪功率

即使油料比合理，油脂预热温度足够高，当烹饪功率不足时，当油脂和原料换热平衡后，油温逐渐降低，而加热功率不足以提升温度，油温会降到 100℃ 以下。在烹饪操作中可以调节热源功率来控制功率，但在短促的烹饪过程中，通常是通过调整锅具与热源的距离来实现烹饪功率的调节。参见图 9 中加热功率不足的油温变化曲线。



### 3) 油脂预热时间

在加热功率一定的情况下油脂预热时间不足,会导致炒过程中油脂温度不足。参见图9中预热时间过短的油温变化曲线。

家庭烹饪的烹饪功率和油料比通常都比厨师的专业烹饪低,这是专业烹饪具有品质优势的原因之一。

### 4) 油温过高

与上述情况相反,当油料比过高、油脂预热时间过长、加热功率过高时,由于蒸发,会导致表面脱水干燥,形成壳层。这种情况可能导致表面的质构和风味品质劣化,而一些烹饪中需要出现这种情况,以产生需要的高温风味。多数情况下,由于内部水分扩散,壳层会在烹饪后吸收水分而消失。参见图9中油温过高曲线。

### 5) 设备外形参数的影响——大炒与小炒

中式烹饪中,设备上大炒是小炒的工艺放大,即大炒采用大锅,小炒采用小锅。当锅增大时,表现为球缺高度和球面直径的增加,由于锅的形状基本不变,球缺高度和其球面直径保持比例关系,容易由的球冠面积和球缺体积公式<sup>[27]</sup>推导出,球冠面积按高度的平方关系增加,而球缺体积按高度的立方关系增加。考虑加入的物料在烹饪中不规则运动以及锅的形状小幅度变化等因素,大炒和小炒相比,随着锅的增大,加热面积和物料体积分别以近似平方和近似立方关系增加。由辐射传热原理<sup>[26]</sup>,燃烧加热的火焰温度一定并包围锅体时,锅的辐射热量与受加热的面积成正比。因此,大炒与小炒相比,随着锅的高度增大,加热功率按近似平方关系增加,而物料体积却按近似立方关系增加,相当于大幅度降低了加热功率,烹饪中会出现图9中加热功率不足的油温变化曲线。另外,由于大炒中物料质量很大,难以实现手工快速沥油,从而无法实现小炒中通常以多量油脂快速加热烹饪物料的方式,油的数量受到限制,导致油料比相对小炒大幅度下降,出现图9中油料比过低导致油温过低的情况。因此,大炒中,即使预热油温到较高温度,烹饪中油温也会明显低于小炒,偏离了最优烹饪条件,使得大炒质量明显低于小炒。

分析也说明了,烹饪设备受热面积和原料容量之比,是重要的设备参数,关系到烹饪质量。

## 3 结论

传热过程分析表明,炒包含了辐射、传导、对流、蒸发等主要传热和相变过程。对炒的传热学和动力学模拟、分析和比较表明,在炒、煮、蒸等采用不同传热介质的烹饪技法中,炒对于热敏性

物料具有明显优势。刀工在炒中作用很大,它可以降低原料传热学特征尺寸,是形成最优炒工艺的必要手段。烹饪中的搅拌不可或缺,使得系统传热均匀,并增加了表面换热系数,说明传统手工烹饪中采用强烈的搅拌措施是合乎科学原理的。文中提出了影响炒工艺的主要技术参数,包括油脂预热时间、烹饪功率、油料比、容器外形等,以是否偏离烹饪最优条件,初步分析了这些参数对烹饪品质影响,解释了小炒的大炒之间产生烹饪质量区别的原理。

烹饪优化数学模型及其模拟计算结果表明,中式烹饪选用小颗粒原料以及采用大量高温油脂爆炒有利于提高烹饪品质。传统的中式爆炒工艺,不但因加热杀菌而卫生、因蔬菜和肉类配伍而营养均衡、因高温加热而风味诱人,因“食不厌精,脍不厌细”的精细切割而易于食用,本文的分析研究表明,它还高度符合食品热处理的动力学和传热学原理,获得了优良的烹饪品质。

### [参 考 文 献]

- [1] 邓力. 中式烹饪热/质传递过程数学模型的构建[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 285—292.  
Deng Li. Construction of mathematical model for heat and mass transfer process of Chinese cooking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(3): 285—292. (in Chinese with English abstract)
- [2] 邓力. 烹饪过程动力学函数、优化模型及火候定义[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4): 278—284.  
Deng Li. Kinetic functions, optimizing model and definition of “Huohou” for Chinese cooking[J]. Transactions of the 2013, 29(4): 278—284. (in Chinese with English abstract)
- [3] 高海薇. 中西烹调方法的比较[J]. 四川烹饪高等专科学校学报, 2001(4): 20—22  
Gao Haiwei. Comparison of Chinese and Western cooking methods [J]. Journal of Sichuan Higher Institute of Cuisine, 2001(4): 20—22. (in Chinese with English abstract)
- [4] 阎喜霜. 烹调原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000: 89—102
- [5] 周晓燕. 烹调工艺学[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2008: 295—302
- [6] Cleland A C, Robertson G L. Determination of thermal processes to ensure commercial sterility of food in cans[J]. Developments in Food Preservation-3, 1985(3): 1.
- [7] 邓力. 固体食品流态化超高温技术的研究[D]. 无锡: 江南大学食品学院, 2006: 105—118.  
Deng Li. Study on the Solid Food Fluidization Ultra High Temperature Sterilization Technology[D]. Wuxi: School

- of Food Science and Technology, Jiangnan University, 2006: 105—118. (in Chinese with English abstract)
- [8] Teixeira A A, Shoemaker F C. Computerized Food Processing Operations. AVI book[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Publishing Co. 1989: 206.
- [9] Silva C, Hendrickx M, Oliueira F, et al. Critical evaluation of commonly used objective functions to optimize overall quality and nutrient retention of heat-preserved foods[J]. *J. Food Eng.* 1992, 17(4): 241—258.
- [10] 刘兴余, 金邦荃. 影响肉嫩度的因素及其作用机理[J]. *食品研究与开发*, 2005(4): 177—180.  
Liu Xingyu, Jin bangquan. Effects on meat tenderness and its mechanism[J] *Food Research and Development*, 2005(4): 177—180. (in Chinese with English abstract)
- [11] 闽连吉. 肉的科学及加工技术[M]. 北京: 中国食品出版社, 1988: 347—353.
- [12] Rao M A, Rizvi S S H. Engineering Property of Foods[M]. New York: Marcel Dekker Press, 1986: 61—70.
- [13] Christopher A Milesa, Thengiz V. Burjanadzeb and Allen J. Bailey. The kinetics of the thermal denaturation of collagen in unrestrained rat tail tendon determined by differential scanning calorimetry[J]. *Journal of Molecular Biology*, 1995, 245(4): 437—446.
- [14] US. Food and Drug Administration. Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies Microwave and Proc- essing[R]. <http://www.fda.gov/Food/ScienceResearch/ResearchAreas/SafePracticesforFoodProcesses/ucm100198.htm>. 2000.
- [15] Lawrie R A. Lawrie's meat science(Sixth edition)[M]. Abington: woodhead publishing limited, 1998: 219
- [16] Bramblett V D, Vail G E. Further studies on the Qualities of beef as affected by cooking at very low temperature for long periods time[J]. *Food Technol*, 1964, 18: 245.
- [17] Halder A Dhall, Datta A K. An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying Part I: Model Development and Input Parameters[J]. *Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing*, 2007, 85(C3): 209—219.
- [18] 张厚军. 猪通脊肉水分迁移动力学及腊肉烘烤工艺优化试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006: 18.  
Zhang Houjun. Kinetic of moisture migration of pork tenderloin and experimental study on optimization of Chinese bacon toasting process[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006: 18. (in Chinese with English abstract)
- [19] McMinn W M, Magee T R A. Air drying kinetics of potato cylinders[J]. *Drying Technology*, 1996, 14(9): 2025—2040.
- [20] Mulley E A, Stumbo C R, Hunting W M. Kinetics of thiamine degradation by heat:A new method for studying reaction rates in model systems and food products at high temperatures[J]. *Journal of Food Science*, 1975, 40(5): 985—988.
- [21] Feliciotti E, Esselen. Thermal destruction rates of thiamine in pureed meats and vegetables[J]. *Food Technology*, 1957, 11(2): 77—84.
- [22] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 102—125.
- [23] Chang S K, Toledo R T. Heat transfer and simulated sterilization of particulate solids in a continuously flowing system[J]. *Food Sci*, 1989, 54: 1017
- [24] Halder A, Dhall A, Datta A K. An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying Part I: Model Development and Input Parameters [J]. *Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing*, 2007, 85(C3): 209—219.
- [25] Zitonu K B, Sastry S K. Convective heat transfer coefficient for cubic particles in continuous tube flow using the moving thermocouples method[J]. *Food Pr oc. Eng.* 1994(17): 229.
- [26] 杨世铭. 传热学(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 116, 362.
- [27] 叶其孝, 沈永欢. 实用数学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 29.

## Numerical simulation, optimization, study of technical features and operational parameters for Chinese cuisine

Deng Li

(Life Science College, GuiZhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** So far numerical simulation, optimization and parametric analysis about heat transfer and kinetics for Chinese cuisine has been a virgin area. As the most representative arts for Chinese cuisine, stir-frying should be defined as a rapid cooking operations with stirring using plenty of oil as heat transfer medium in opened vessel. This thesis which consists of two parts focuses on processing optimization, technical features and operational parameters of stir-frying. In the first part, optimization of culinary processing was carried out via numerical simulation based on the existing heat transfer model and kinetics principle put forward by author, and was analogous to optimization of can sterilization and liquid-particulate aseptic processing. The optimization model for stir-frying of sliced pork was

established, in which target variables is oil temperature, constraints condition is that maturity value equals terminal maturity value, and objective condition is to make overheated value with average volume to minimum. The parameters of the above model were determined as follows: the quality factors to indicate cooked well done of pork were identified as thermal death of pathogenic microorganisms and thermal denaturation of proteins, both of them have similar  $Z$  value range, and the quality factors to indicate pork overheated were identified as moisture diffusion and food nutrition loss, thus  $Z$  value of maturity value and overheated value was respectively set at  $7^{\circ}\text{C}$  and  $30^{\circ}\text{C}$ . According to several references, pork mature value was set to 0.1-1 min at  $70^{\circ}\text{C}$ , surface heat transfer coefficient was set to  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2\text{C}$ , and the thermal physical parameters of pork were set in the same way. The solutions of optimization model which obtained via compiling program and calculation with Matlab showed that a certain sizes of pork slices has a certain optimum oil temperature with minimum average overheated value. And then the reliability and complexity of the optimal model and the effect of model hypothesis conditions on the model were discussed, the optimization model can be applied for the most of cuisine process effectively. The reason why optimal model of cuisine is exist was considered that cuisine maturing (done well) is more sensitive to temperature than overheating, so better cooking quality can be achieved via rapid heating while the raw materials reach to maturity. The loss of water was regarded as decisive influence on texture of cuisine products, and the diffusion coefficient of water in particulates has greater  $Z$  value than mature qualities, so lead to existing of the optimum oil temperature, therefore, water diffusion is the crucial problem concerning products qualities for Chinese cuisine. The rationality of traditional Chinese cuisine was explained via the analysis on the calculation results of the optimal model. The stir-frying that heat animal meat by a larger amount of oil with high temperature and cutting raw materials into small particles to reduce the size of heat transfer agreed with the kinetics and heat transfer principles reflected in the optimal model. In the second part, technical features and operational parameters of stir-frying was studied. First of all, the difference between stir-frying, boiling and steaming were analyzed via numerical simulation of their heat transfer and kinetics, where heat transfer medium are respectively oil, water and steam. Calculation results showed that maturity time of stir-frying (22.18 seconds) is much shorter than steaming (43.75 seconds) and boiling(82.62 seconds), meanwhile the volume average overheated value of stir-frying is also the lowest, consequently, stir-frying has evident advantages on efficiency and quality. However, the surface overheated value of stir-frying is the highest, it meant that the thermal quality loss is serious on the surface. Overall, stir-frying is more suitable for those culinary materials which are heat-sensitive, impact- resisting, oil-resistance, have the necessity to form favorite flavor caused by high temperature. And then, the affect of cutting and stirring on culinary qualities were analyzed. Numerical simulations of the stir-frying process of 0.2-0.6mm sliced pork showed that the smaller the size of particles, the shorter maturity time, and the smaller overheated value. Calculation results showed that the most suitable thickness for sliced pork is 2~4 mm, and this size is commonly used in stir-frying of Chinese cuisine. In terms of the established optimal mathematical model, calculation condition and algorithm, the results computed with  $h_{fp}=200\sim 30\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\text{C})$  and thickness 3mm for sliced pork showed that the higher  $h_{fp}$ , the lower optimum temperature and the shorter maturity time. Stirring is indispensable which contributes to uniform heat transfer and increases surface heat transfer coefficient in stir-frying. Thereby, strong agitating and stirring measures adopted in traditional manual cuisine is agree with the principles about heat transfer and kinetics. Finally, heat transfer and operating parameters of stir-frying were listed and analyzed. Six major forms of heat transfer and phase change process in stir-frying were listed. The influences on culinary qualities of several parameters in stir-frying, such as warm-up time of oil, oil-to-material ratio, equipment size and other parameters, were analyzed on whether these factors result in deviation from optimum operating conditions.

**Key words:** optimization, kinetics, heat transfer, Chinese cuisine, surface heat transfer coefficient, simulation