# 食物位置对热风微波耦合加热效果的影响

浦广益，宋春芳*，续艳峰，张翰之，崔政伟，金光远
（江南大学 机械工程学院，江苏省食品先进制造装备技术重点实验室，江苏 无锡 214122）

**摘要：**给出了微波与热风耦合同步加热物料的数学物理模型，以微波与热风耦合加热土豆为例，建立了完整的三维仿真模型，采用数值模拟法，分别得到了位于耦合加热腔内7个不同位置上土豆最终温度场的分布参数，并以实验加以验证，对数值模拟所得的仿真结果进行了分析与评定。结果表明，不同位置对热风微波耦合加热物料的效果影响极大，这主要体现在影响微波电磁场能量转化为热能功率的大小，以及密度分布及被加热食品温度场分布的不均匀性，故在采用热风微波加热食品时，应当要重视物料位置对耦合加热效果的影响。

**关键词：**微波热风耦合；电磁场；温度场；数值模拟仿真
**中图分类号：**TS201；TS215　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673—1689(2015)06—0592—07

## Effect of Different Positions on Hot-Air and Microwave Coupled Heating

*PU Guangyi*，*SONG Chunfang*，*XU Yanfeng*，*ZHANG Hanzhi*，*CUI Zhengwei*，*JIN Guangyuan*
（Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China）

**Abstract:** This study aimed to investigate the effect of different positions on the hot-air and microwave coupled heating. Based on the mathematical model of hot-air and microwave coupled heating, distribution parameters of the end temperature field for seven spots were first obtained for whole potato heated in a particular cavity by numerical simulation techniques. The simulations were further by verified by the experimental results that different spots showed varied heat power values and density distribution after the conversion of microwave electromagnetic energy into heat power and uneven distribution of the temperature field. Therefore, great attention should be paid to the food spots in the hot-air and microwave coupled heating.

**Key words:** hot-air and microwave coupled heating, electromagnetic fields, temperature field, numerical-simulation

**收稿日期：**2014-07-11
*基金项目：国家自然科学基金项目(21206051)；江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放基金项目(FM-201503)；江南大学国家级大学生创新创业训练计划项目(201410295050)。
作者简介：浦广益(1972-)，男，江苏无锡人，工学硕士，讲师，主要从事生化与食品机械的结构分析与优化设计研究。
E-mail: puguangyi@163.com
通信作者：宋春芳(1974-)，女，内蒙古巴彦淖尔人，工学博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事食品工艺与机械设备的研究。
E-mail:gracecf927@163.com

微波加热已经普遍应用于人们日常生活的各方面。在食品加工领域,微波耦合加热技术的应用也越来越广泛。微波加热的机理在目前公开出版的许多资料中均有详细的论述[1]。当然,在实际操作过程中,影响其耦合加热效率的因素有很多,如设备因素、微波功率大小、加热物料的介电性能、加热时间、进口热风的温度与流速等[2-4]。文献[1]中提到了物料位置对微波耦合加热效果的影响,但其影响的程度究竟如何,文献[1]并未作详细的展开说明。在目前公开出版的诸多资料中,亦极少见到有专门论述物料位置对微波加热效果影响的报道。

从物理场的角度而言,微波加热主要涉及的是电磁场与温度场能量的转换与传导。所以要讨论物料位置对耦合加热效果的影响程度,就要讨论位置对电磁场能量损耗的大小即用于发热功率大小的影响程度。同时,仅仅讨论发热功率的大小还不够,因为在物料内部,电磁场能量损耗功率的密度既不均匀亦不相等,这会直接导致物料内部温度分布的不均匀,而温度分布的均匀性是微波加热中一个非常重要的参数。所以要分析位置对微波耦合加热效果的综合影响,要考虑的主要参数应当是电磁场能量损耗功率的大小、电磁场损耗功率的密度分布以及物料最终温度场分布的均匀性。

随着现代计算机和计算机辅助工程(CAE: Computer Aided Engineering)技术的飞速发展,数值模拟已成为当今科研与产品研发的重要手段,许多过去受条件限制无法分析的复杂问题现在都有可能解决,从而避免了许多重复性试验,缩短了研发时间。本文作者采用数值模拟与实验验证的方法,为了定量地探讨位置对热风微波耦合加热效果的影响程度,以微波耦合加热土豆为例,建立完整的三维仿真模型,在相同条件下,即采用同一实验设备在相同的微波功率、加热时间、初始与边界条件、进口热风等条件下,采用数值模拟法分析了在7个不同位置土豆最终温度场的分布参数,并将所得的结果进行分析、评定与总结。

## 1 微波与热风耦合加热物料的数学物理模型

对于微波加热物料过程的计算方法,目前比较成熟的是联合求解麦克斯韦方程组和热传导方程。其中,加热物料中的麦克斯韦电磁场方程为[5-7]

$$\nabla\times(\mu_r^{-1}\nabla\times\vec{E})-k_0^2(\varepsilon_r-j\sigma/\omega\varepsilon_0)\vec{E}=0 \quad (1)$$

式(1)中的 $\vec{E}$ 、$\mu_r$ 、$\varepsilon_r$ 、$\sigma$ 为对应于加热物料的电场强度、相对磁导率、相对介电常数和导电率。$\varepsilon_0$ 为真空介电常数,$\omega$ 为电磁波的激励角频率,$k_0$ 为自由空间的波矢量。

$$\varepsilon_r=\varepsilon'_r-j\varepsilon''_r=\varepsilon'_r(1-j\tan\delta) \quad (2)$$

式(2)中的虚部项 $\varepsilon''_r$ ,对应于加热物料自身电磁场能量的损耗,用于发热。这亦可以用加热物料的损耗角正切值即 $\tan\delta=\varepsilon''_r/\varepsilon'_r$ 来表示。

当加热物料特性为各向同性的线性介质时有

$$\vec{D}=\varepsilon_r\varepsilon_0\vec{E},\ \vec{B}=\mu_r\mu_o\vec{H},\ \vec{J}=\sigma\vec{E} \quad (3)$$

式(3)中的 $\vec{D}$ 、$\vec{B}$ 、$\vec{J}$ 、$\vec{H}$ 为对应于加热物料的电位移矢量、磁感应强度、电流密度和磁场强度。

在微波加热过程中,加热物料吸收微波功率的(即电磁场的损耗功率)大小为

$$P=\omega\varepsilon_o\varepsilon''_r\left|\vec{E}\right|^2 \quad (4)$$

加热物料中的热传导方程为[8-9]

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}=k\nabla^2T+P \quad (5)$$

式(5)中 $\rho,C_p,T,k$ 分别代表加热物料的密度、比热容、温度和传热系数。

方程(4)与方程(5)将电磁场与温度场两种不同的物理场,通过加热物料的电磁损耗功率 $P$ 耦合在一起。

在实际微波加热过程中,为了提高加热效率和促进加热物料中温度场分布的相对均匀,往往还同时进行热流体(如热风)与微波耦合同步加热物料。此时可以采用流-固耦合的共轭传热分析,或者在求解加热物料的热传导方程时再增添一项对流传热系数的边界条件来分析之[8],本文中就是采用定义 $h$ 来模拟热风与微波的耦合加热过程,其方程为

$$-k\frac{\partial T}{\partial n}=h(T-T_a) \quad (6)$$

式(6)中 $\partial T/\partial n$ 称为温度梯度,负号表示热流密度的方向与温度梯度的方向相反,$T$ 为加热物料表面温度,$T_a$ 为热流体(如热风)的温度。$h$ 是一个定义的系数,代表热流体(如热风)与加热物料之间的对流换热系数,它是一个反映对流换热过程强弱的物理量。

微波加热物料时,可以采用横截面上的加热不均匀性指数 $\lambda$ 来定量评估[10-11],计算公式如下:

$$\Delta\bar{T}=\sum k_i T_i \quad (7)$$

$$k_i=M_i/\sum M_i \quad (8)$$

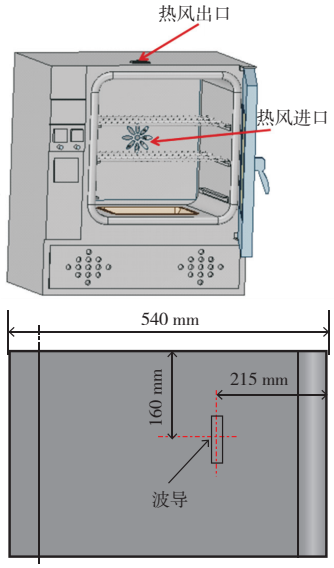
$$\Delta T=T_{i\max}-T_{i\min} \quad (9)$$

$$\lambda=\Delta T/\Delta\bar{T} \quad (10)$$

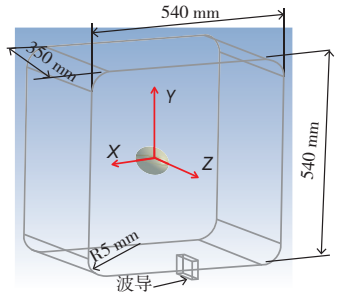
以上各式中 $T_i$ 是物料横截面上各个节点温度，$M_i$ 是对应的节点数。

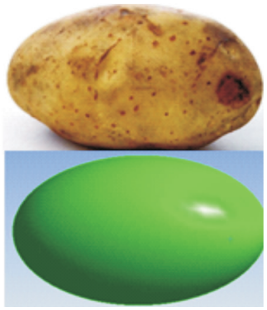
## 2 实验装置与数值模拟方法

采用自制的实验装置，其结构如图1所示。




（a）实验装置



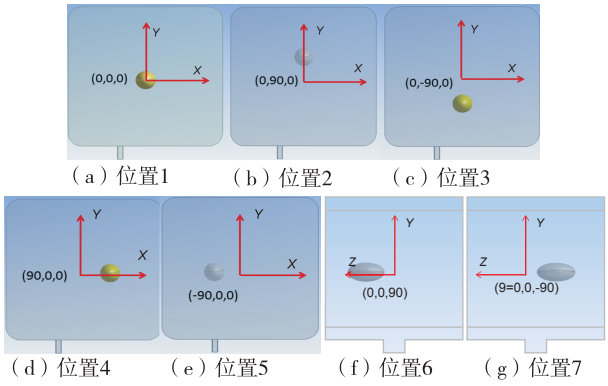
（b）土豆及其仿真

图1 实验装置、土豆及三维仿真模型

Fig.1 Experimental device、Potato & 3D models

见图1(a)，其背后花瓣形状孔为热风进口，顶部有热风出口孔。微波进口的波导管横截面尺寸为80 mm×18 mm。波导管入口位于装置底部，但并不位于底部中央。实验时微波的工作频率为2.45 GHz，在此频率下波导管中仅能通过TE10模式的波，微波功率为500 W。另外，测温设备应用的是美国FLIR Systems公司生产的FLIR T440型红外热像仪。

加热土豆大小形状约为130 mm×70 mm的椭圆球，其数值仿真时的三维模型亦如图1(b)所示。微波加热腔的空间大小为540×540×350 $mm^3$，腔体内同时还加载热风，土豆在微波和热风的共同作用下耦合同步加热。实验开始时，首先将土豆置于腔体的中心位置，中心位置为1($X$=0, $Y$=0, $Z$=0)，然后再将土豆的中心位置分别平移至2($X$=0, $Y$=90 mm, $Z$=0)；3($X$=0, $Y$=−90 mm, $Z$=0)；4($X$=90 mm, $Y$=0, $Z$=0)；5($X$=−90 mm, $Y$=0, $Z$=0)；6($X$=0, $Y$=0, $Z$=90 mm)；7($X$=0, $Y$=0, $Z$=−90 mm)。即在7个不同的位置分别进行数值仿真与实验验证，这几个点在腔体空间内正好是处于中间、前、后、左、右、上和下7个典型的位置上，如图2所示。模拟仿真流程如图3所示。




（a）位置1 （b）位置2 （c）位置3 （d）位置4 （e）位置5 （f）位置6 （g）位置7

图2 不同位置的土豆

Fig.2 Different position of potatoes

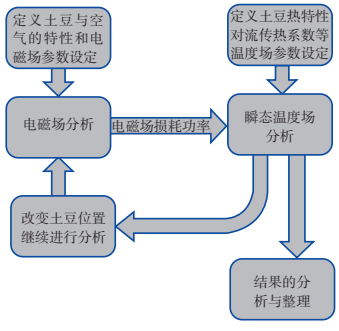



图3 模拟仿真流程

Fig.3 Flow chart of the simulation

本文所用土豆的特性参数如表1所示,具体可参见文献[12]。

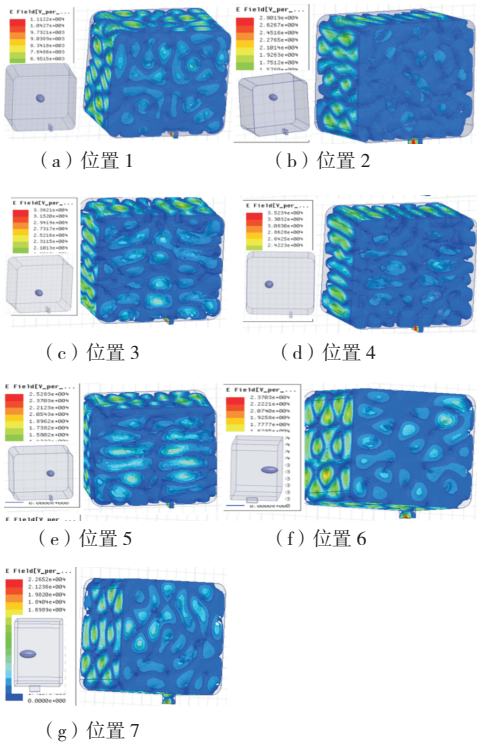
表1　土豆的特性参数

Table 1　Property of Potatoes

| 相对磁导率$\mu_r$ | 相对介电常数$\varepsilon_r$ | 相对损耗正切值tanδ | 导电率σ | 密度$\rho$/kg·m$^{-3}$ | 传热系数$k$/W·m$^{-1}$·℃$^{-1}$ | 比热容$C_p$/J·kg$^{-1}$·℃$^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 65 | 0.307 | 0 | 1 050 | 0.55 | 3 640 |

## 2.1　电磁场计算

首先进行电磁场计算,其三维计算模型如图1(a)所示。先将土豆置于微波加热的空间内中心位置1(0,0,0),然后设定如表1所示的土豆特性参数,电磁波的激励频率为2.45 GHz,功率500 W,微波加热空间的最外层均设定为理想导体,然后求解[13-14]。同理,再将土豆依次分别置于加热空间内的其余6个设定位置,再重复以上同样的设定求解,最后得到土豆在7个不同设定位置上时相对应微波室内电场强度的分布云图,如图4所示。

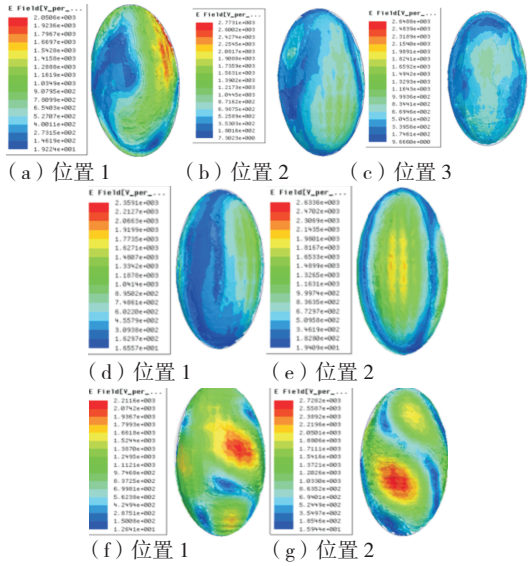


(a)位置1　(b)位置2　(c)位置3　(d)位置4　(e)位置5　(f)位置6　(g)位置7

图4　土豆位于不同位置时微波室内的电场分布云图

Fig.4　Distribution of the electric field intensity in chamber corresponding potatoes

从图4中可以清楚地见到,加热土豆在不同位置时,相对应微波室内电场强度的大小及场整体场的分布状况都不相同。位于7个不同位置上的土豆,对应其自身内电场强度的分布云图如图5所示。



(a)位置1　(b)位置2　(c)位置3　(d)位置1　(e)位置2　(f)位置1　(g)位置2

图5　不同位置时土豆自身内部电场分布云图

Fig.5　Distribution of the electric field intensity at different locations

从图5可以明显地看到,所加热的土豆在微波空腔内不同的位置时,其自身内部电场强度的大小及场整体场的分布状况明显大不相同。

从公式(4)可知,电磁场在土豆内的损耗功率正比于电场强度的平方。在数值仿真结果中可以得到土豆在7个不同位置时相对应电磁场的损耗功率值,如表2所示。

表2　不同位置时相应电磁场在土豆中所损耗的功率

Table 2　Loss of power in different positions corresponding potatoes

| 土豆坐标点位置 | 电磁损耗功率/W | 有效功率比/% |
|---|---|---|
| 1(0,0,0) | 302.9 | 60.6 |
| 2(0,90,0) | 477.4 | 95.4 |
| 3(0,-90,0) | 479.9 | 95.9 |
| 4(90,0,0) | 420.5 | 81.1 |
| 5(-90,0,0) | 416.3 | 83.3 |
| 6(0,0,90) | 383.9 | 76.8 |
| 7(0,0,-90) | 318.1 | 63.6 |

从图5及表2中可以明显地看出:在不同位置的土豆,其电磁能转换成热能的有效功率比相差很大(最大值95.9%,最小值60.6%)。电磁场分析实际就是在求解空腔与土豆内的麦克斯韦方程组即公式(1),其设定的边界条件是:

1)最外层,均设定为理想导体。

2)表面即与空腔内空气的接触面处电场的切向分量连续,而磁感应强度的法向分量连续。

从数学的角度而言,也就是在确定的边界条件上,求解控制体内公式(1)的偏微分方程,即空腔与土豆内电磁场的数值解。从电磁场计算的结果可知:在同等条件下,物料位置极大地直接影响了微波电磁场能量损耗功率的大小。

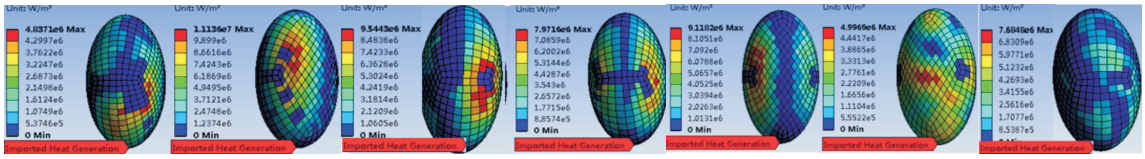
## 2.2 温度场计算

当电磁场计算结束后,如图3的仿真流程所示,接下来可将电磁场损耗的功率加载到如公式(5)所示的热传导方程中,即进行土豆加热计算。具体就是在划分好土豆模型的网格后,将土豆体内电磁损耗的功率密度值插值至土豆模型的各个热单元节点上[15],图6就是土豆在7不同位置时,经插值后的热功率密度的分布云图。可以看出,不同位置土豆中热功率密度的分布很不均匀,且相差很大。从而可知:在同等条件下,物料位置直接影响了微波电磁场能量损耗功率的密度分布。

热风微波耦合加热也就是微波与热风同步耦合加热物料实验中,实测得到流入空腔体内热风的温度是50 ℃。这属于典型的流-固耦合共轭传热问题,采用在土豆外表面上插入$h$值为15 W/(m$^2$·℃)的平均对流换热系数,用来模拟热风与土豆之间的热传递[8]。设定加热时间为45 s,类型为瞬态热分析,最后分别求解[13]。图7(a)从左至右为土豆分别在第1—7不同位置时,在结束时间即在45 s时,土豆整体温度场的分布云图。

## 2.3 实测结果

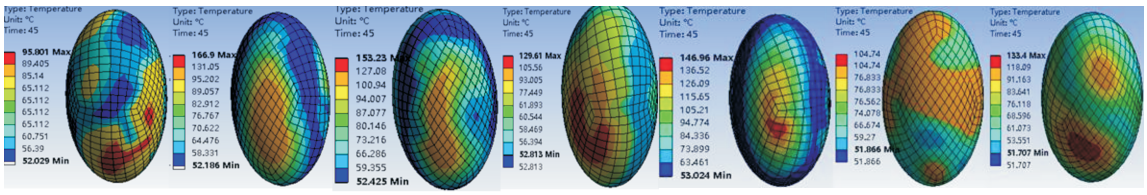
图7(b)从左到右是在位置1—7上,分别在7个不同位置上相对应土豆的实测整体温度场,这与图7(a)即与仿真所得结果相吻合。



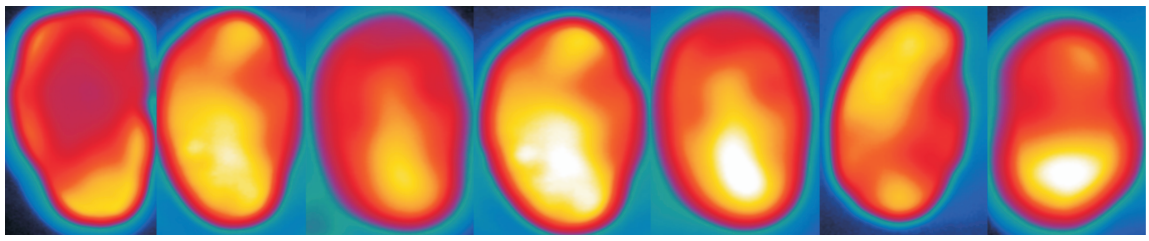
(a)位置1 (b)位置2 (c)位置3 (d)位置4 (e)位置5 (f)位置6 (g)位置7

图6 不同位置时土豆自身内的热功率密度分布云图

**Fig.6 Distribution of the thermal power density at different locations**



(a)土豆整体温度场分布云图



(b)实测不同位置时土豆的整体温度场分布

图7 不同位置时数值模拟及实测的土豆整体温度场分布图

**Figure.7 Simulation & measured the temperature field distribution of potatoes**

### 2.4 分析与评定

从图7可知道,不同位置上土豆中的最高温度均不相同,其中在位置2时有最高的温度值166.9 ℃,而在位置1的最高温度值是95.8 ℃,两者温差△$T$=71.1 ℃。从表2可知,位置1与位置2的热功率差为△$P$=174.5 W。不同位置上土豆相对应的最高温度如表3所示。

从表2和表3可知,不同位置时的土豆不但热功率相差大,且最高温度相差亦很大。将土豆体过长轴横截面上的平均温度,采用加热不均匀性指数λ来评估[10-1],其计算如公式(10)所示。

不同位置土豆横截面上的温度场分布云图如图8所示。

当时间为45 s时,此截面上的最大温度值、最小温度值、最大温度差值△$T$、平均温度值和不均匀性指数λ等参数如表4所示。

表3 不同位置时土豆的最大温度

Table 3 Maximum temperature values at different positions of potatoes

| 土豆坐标点位置 | 45 s时最大温度值/℃ |
|---|---|
| 1(0,0,0) | 95.8 |
| 2(0,90,0) | 166.9 |
| 3(0,-90,0) | 153.2 |
| 4(90,0,0) | 129.6 |
| 5(-90,0,0) | 146.9 |
| 6(0,0,90) | 104.7 |
| 7(0,0,-90) | 133.4 |

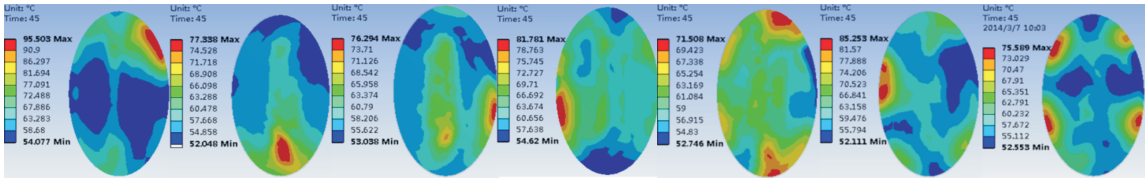


图8 不同位置时土豆中间对称横截面上温度场分布

Figure.8 Cross-section spatial temperature distribution at different positions of potatoes

表4 不同位置时土豆中间横截面的最大温度、最小温度、温度差值、平均温度值及不均匀性指数λ

Table 4 Maximum temperature, the minimum temperature, temperature difference, the average temperature and Heterogeneity parameter at different cross-sectional position of the potato

| 土豆坐标点位置 | 45 s时最大温度值/℃ | 45 s时最小温度值/℃ | 最大温度差值△T/℃ | 45 s时平均温度值/℃ | 不均匀性指数λ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1(0,0,0) | 95.5 | 54.1 | 41.4 | 62.8 | 0.66 |
| 2(0,90,0) | 77.3 | 52.0 | 25.3 | 58.9 | 0.43 |
| 3(0,-90,0) | 76.3 | 53.0 | 23.3 | 59.7 | 0.39 |
| 4(90,0,0) | 125.5 | 81.8 | 43.7 | 63.5 | 0.69 |
| 5(-90,0,0) | 71.5 | 52.7 | 18.8 | 61.3 | 0.31 |
| 6(0,0, 90) | 85.3 | 52.1 | 33.2 | 60.8 | 0.55 |
| 7(0,0,-90) | 75.6 | 52.6 | 23.0 | 59.1 | 0.39 |

从表4中可以看出,虽然各横截面上的平均温度都在59.1~63.5 ℃,但最大温度值却在71.5~125.5 ℃,相差最大值为54 ℃;最低温度值在52.0~81.8 ℃,相差最大值为30.8 ℃;在同一横截面上的最大温度差值在18.8~43.7 ℃。若以参数λ来评定加热特性,显然,相对而言在第5点位置较好。因为在此横截面上各点的温度较之其他位置温差最小,且温升相对均匀亦无过热点,这些特性无疑对于物料的加热有益。从图7、8和表4得知:在同等条件下,物料位置直接影响加热物料内温度的均匀性分布。

## 3 结 语

以微波与热风耦合共同加热土豆为例,采用数值模拟结合实验验证的方法,直接得到了不同位置土豆的最终温度场分布。这虽然是个例,但从本文所举特例中可以看出,在同等条件下,物料不同的

位置对热风微波耦合加热效果的影响非常大。这主要体现在：

1)影响电磁场能量损耗功率的大小。

2)影响电磁场损耗功率的密度分布。

3)影响加热物料内温度分布的均匀性。

故在采用微波加热食品的过程中，切不能忽视物料位置对加热效果的影响。物料温度分布的均匀性是采用微波加热过程中一个极为重要的参数。本文讨论的是波导管入口相对固定，仅改变加热物料在空腔内的相对位置后再研究位置对热风微波耦合加热的效果。为了提高加热物料温升的均匀性和耦合加热的模拟计算精度，今后还可以进一步既改变物料的位置，同时还通过旋转物料或者再增加金属搅拌器；在计算热风与微波耦合同步加热时，不采用公式(6)即引入平均对流换热系数$h$的方式，而采用流-固耦合的共轭传热方式来分析求解，最后再研究微波与热风耦合加热的特性。同样，在此过程中可以先采用数值模拟法分析，所得结果对具体物料加热工艺参数的确定与优化都具有一定的指导意义。

## 参考文献：

[1] Helmar Schubert, Marc Regierm (德). 食品微波加工技术[M].徐树来，郑先哲，译. 北京：中国轻工业出版社，2008.

[2] 周韵，宋春芳，崔政伟.热风微波耦合干燥胡萝卜片工艺[J].农业工程学报，2011(2)：382-386.
ZHOU Yun, SONG Chunfang, CUI Zhengwei. Coupled hot air and microwave drying technology for carrot slices dehydration [J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2011(2)：382-386.(in Chinese)

[3] 陈桂芬，宋春芳，崔政伟.响应面分析法优化热风微波耦合干燥油茶籽工艺[J].食品工业科技，2012(3)：272-275.
CHEN Guifen, SONG Chunfang, CUI Zhengwei. Optimizing of coupled hot-air and microwave drying of tea camellia seeds by response surface analysis[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2012(3)：272-275.(in Chinese)

[4] 张琦，宋春芳，周韵，等.热风微波耦合干燥鲜枣的研究[J].食品工业科技，2012(11)：123-126.
ZHANG Qi, SONG Chunfang, ZHOU Yun, et al. Study on coupled hot air and microwave drying of fresh jujube[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2012(11)：123-126.(in Chinese)

[5] Sekkak A, Pichon L, Razek A. 3-D FEM Magneto- thermal analysis in microwave ovens [J], **IEEE Trans Magnetics**, 1994,30(5)：3347-3350.

[6] Francois Torres, Bemard Jecko. Complete FDTD analysis of microwave heating processes in frequency-dependent and temperature-dependent media [J]. **1EEE Trans on Microwave Theory and Techniques**, 1997,45(1)：108 -116.

[7] Varith J, Dijkanarukkul P, Achariyaviriya A, et al. Combined microwave-hot air drying of peeled longan[J]. **Journal of Food Engineering**, 2007,81(2)：459-468.

[8] 杨强生，浦保荣.高等传热学[M].第2版.上海：上海交通大学出版社，2001.

[9] 霍尔曼 J. 传热学[M].马庆芳译. 北京：机械工业出版社，2011.

[10] Fakhouri M O, Ramaswamy H S. Temperature Uniformity of microwave heated foods as influenced by product type and composition [J]. **Food Research International**, 1993,26(2)：89-95.

[11] Wang S, Tang J, Johnson J A, et al. Heating uniformity and differential heating of insects in almonds associated with radio frequency energy[J]. **Journal of Stored Products Research**, 2013,55：15-20.

[12] Online Computer library Center, COMSOL Inc. Microwave oven [EB/OL] [2014-07-11] http://www.cn.comsol.com/model/microwave-oven-1424

[13] David B Davidson. Computational electromagnetics for RF and microwave engineering [M]. Second Edition. Cambridge：Cambridge University Press ,2011.

[14] 曹善勇. Ansoft HFSS磁场分析与应用实例[M].北京：中国水利水电出版社，2010.

[15] LEE HueiHuang. Finite element simulations with ANSYS workbench 14[M]. Taibei: SDC Publications，2012.