

强制对流烤箱温度场特性及其优化研究

Study and optimization on characteristics of temperature field in forced convection oven

袁 宏¹ 吴大转¹ 秦世杰¹ 郑 鑫² 武 鹏¹ 黄 滨³

YUAN Hong¹ WU Da-zhuan¹ QIN Shi-jie¹ ZHENG Xin² WU Peng¹ HUANG Bin³

(1. 浙江大学化工机械研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 宁波方太厨具有限公司, 浙江 宁波 315336;
3. 浙江大学海洋工程与技术研究所, 浙江 杭州 310027)
(1. Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;
2. Fotile Ningbo, Ningbo, Zhejiang 315336, China; 3. Institute of Marine Engineering Science and
Technology, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

摘要:为研究某型强制对流烤箱内温度分布特性,优化烤箱内部温度场均匀性,采用试验测试和数值模拟进行研究。通过 3×3 分布式电阻测点(Pt)动态测量烤箱各层温度场分布,针对烤箱温度均匀性指标进行了测量与分析。采用计算流体力学方法对烤箱内部温度场进行了数值模拟,综合考察了热传导、对流和辐射效应。进一步通过试验的温度测量,验证了数值模拟方法的准确性。结合试验和模拟结果,揭示并分析了烤箱原有结构温度场不均匀的原因。通过添加径向导叶结构、调整加热管位置、改进加热管形式和烤箱挡板等措施,有效改善了烤箱内部温度场的均匀性。

关键词:烤箱;强制对流;温度场分布;流场模拟;结构优化

Abstract: In order to study the characteristics of temperature distribution in a forced convection oven, and to optimize the uniformity of the temperature field inside the oven, the experimental and numerical simulation was carried out. The temperature distribution of each layer was measured by 3×3 distributed resistance points (Pt), and the temperature uniformity was measured and analyzed. The Computational Fluid Dynamics (CFD) method is used to simulate the temperature field inside the oven, considering the heat conduction, convection and radiation. The accuracy of the numerical simulation method is verified by the experimental results. Based on the experimental and simulation results, the reasons for the non-uniform temperature field of the original structure of the oven are revealed and analyzed. The uniformity of the temperature field in the oven is improved by adding the guide vane structure, adjusting the position of the heating tube, improving the heating tube and improving the baffle.

Keywords: oven; forced convection; temperature field; flow field simulation; structure optimization

强制对流烤箱相比传统烤箱具有升温快、热效率高等优点,然而,由于存在加热速度快、热风回旋等问题,使烤箱内部温度不均匀。而烤箱内部温度场均匀性直接影响着烤制食物的品质,因此,烤箱内部温度分布的研究得到充分重视^[1]。

目前研究烤箱温度分布的方法主要包括试验研究和计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值模拟。试验研究测试结果可靠,但投资大,时间长,同时受试验条件的限制;而 CFD 数值模拟具有速度快、花费少,且可以同时模拟多种工况等优势。因此,CFD 数值模拟被广泛用于烤箱内部气流流动和传热特性的研究,试验研究除了验证烤箱品质外,也用于数值模拟结果的验证^[1-2]。目前烤箱温度分布均匀性的研究已经广受关注,国外对烤箱已有较多的研究,如 Khatir 等^[3]研究了直接加热喷管式烤箱,同时用试验研究结果对数值模拟进行了验证;Smolka 等^[4]结合了试验研究和 CFD 数值模拟的手段对烤箱温度均匀性进行了优化。而中国研究较少,如王璟等^[5]研究了不同工作阶段烤箱内部的传热机理,便于进一步对烤箱内部进行优化。国内外大部分对烤箱的改进是基于增大加热管功率、提高风扇转速和改变排气口位置等措施实现的,而对于导叶、加热管位置和形式等影响烤箱温度场的重要因素并未进行深入研究。

本试验拟对某电加热强制对流烤箱进行研究,采用了 CFD 数值模拟和试验测试的方法分析其内部流场和传热特性,以及内部流场均匀性对温度场分布的影响。对导叶结构、加热管位置、加热管形式以及盖板结构等影响烤箱温度均匀性的重要因素进行了深入的研究,在此基础上提出了新的改进方法,并且从试验和数值模拟上进行了对比验证。

作者简介:袁宏,女,浙江大学在读硕士研究生。

通信作者:吴大转(1977—),男,浙江大学教授,博士生导师。

E-mail: wudazhuan@zju.edu.cn

收稿日期:2017-04-18

1 试验方法

1.1 试验对象

图1为烤箱外观和内腔结构示意图。箱体为双层不锈钢材料,中间充填绝热材料;门体为3层耐高温透明玻璃,便于观察内部食品的烤制情况;烤箱内胆的底部、顶部和背部各布置有一个加热管,加热管采用金属管式结构,外表面涂敷红外辐射材料提高热辐射效率;背部挡板外设有热风机,通过热风机的旋转作用,内部空气经过中间加热管加热,从盖板结构的出风口吹出后到达烤箱门体,在烤箱主流域内形成循环后从中间入风口进入盖板结构,实现烤箱内部气流循环。

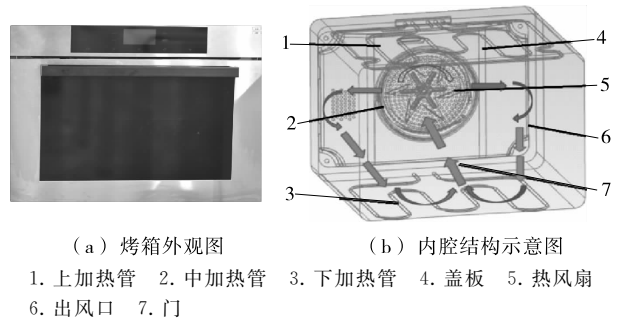


图1 烤箱示意图
Figure 1 Schematic of oven

1.2 试验方法

为研究烤箱内腔实际温度分布情况,对烤箱的各层烤架进行了温度测试。取内腔上、中、下层烤架对应的3个参考面,每个面上分别均匀布置9个测点^[6],见图2。测试仪器采用横河电机(中国)有限公司的GP20温度记录仪,每1 s记录一次,测量范围0~800℃,精度0.1℃。

2 数值模拟

2.1 网格划分

对烤箱进行几何建模,并使用ICEM软件划分网格,见

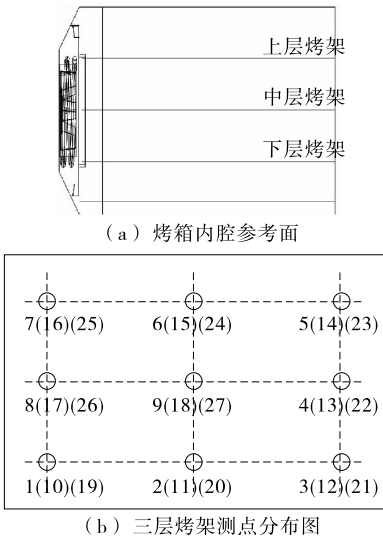


图2 烤箱测点分布图

Figure 2 Measuring point distribution of oven

图3。同时对烤箱进行网格无关性验证,见表1,随网格数的增加,实例2和实例3的温度变化趋势一致,且各测点的温度变化偏差均小于1%,满足计算精度的要求。综合考虑计算精度和计算量,最终确定最佳网格数量约为152万。

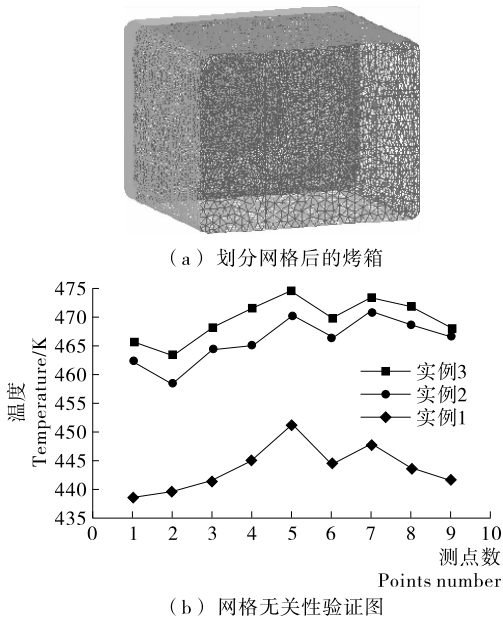


图3 烤箱网格划分及无关性验证

Figure 3 Mesh and independence verification of oven

表1 网格无关性验证

Table 1 Grid independence verification $\times 10^4$			
实例	单元格数	面单元数	节点数
实例1(较差)	31	65	6
实例2	152	268	20
实例3(较好)	344	698	61

2.2 边界条件及物性参数

表2为烤箱边界条件的设置,烤箱门体与空气接触,产生对流换热,且和内部发生辐射换热,因此门壁面选用Mixed模式;烤箱底部和地面接触,对流换热量极少,因此只考虑辐射换热,选用Radiation模式;而烤箱顶部结构比较复杂,对其简化后进行温度补偿,因此选用Heat Flux模式;中加热管则采用热流密度模式进行简化计算。空气、不锈钢和隔热玻璃的热物理辐射性质参考传热传质原理^[7]。烤箱内部的不锈钢、隔热玻璃看作不透明固体,热吸收系数设为

表2 边界条件的设置

Table 2 Boundary condition settings	
定义面	边界条件
中加热管	热流密度 $q=16\ 827\ \text{W/m}^2$,发射率0.7
热风扇	转速 $n=1\ 300\ \text{r/min}$,从入口看为顺时针方向
门壁面	Mixed模式, $k=3\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,外层有保温层
上壁面	热通量 Heat Flux模式, $q=-210\ \text{W/m}^2$
下壁面	辐射 Radiation模式,外层有保温层
其余壁面	Mixed模式, $k=3\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,外层有保温层

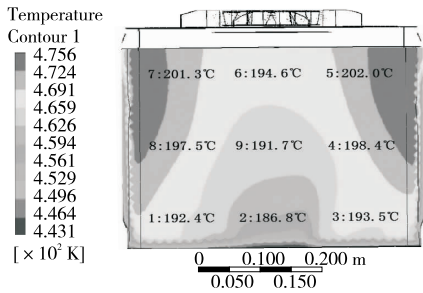
10 000,空气热吸收系数设为 0.75^[8]。

2.3 数值模型及求解设置方法

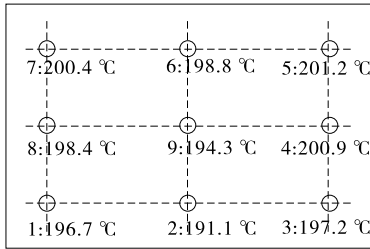
本试验的烤箱温度场分析基于三维不可压缩定常流动和传热模拟,采用 Fluent 软件实现。湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型,同时选择增强壁面函数。烤箱内部热量主要通过传导、对流和辐射进行传递,辐射模型选择 DO 模型^[9-10]。计算时利用 SIMPLEC 耦合算法,3 个坐标方向的速度方程和 k 方程的对流项离散采用二阶迎风差分格式,扩散项的离散采用二阶中心差分格式^[1]。

2.4 结果与讨论

2.4.1 数值模拟检验与验证 针对初始烤箱结构,对内腔温度进行了实际测量,并与数值模拟结果进行对比。由图 4 可知,数值模拟结果和实际测量温度分布趋势基本一致。



(a) 中层烤架模拟温度图



(b) 中层烤架实测温度图

图 4 中层烤架模拟温度和实测温度对比

Figure 4 Comparison between simulated and measured temperature of middle grill

进一步采用平均绝对误差来评估预测的准确性,其定义式为:

$$e_{abs} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{T_e - T_p}{T_e} \right) i, \quad (1)$$

式中:

e_{abs} ——平均绝对误差, %;

n ——测量范围内温度测点的数目;

T_e ——试验中测试的温度值, °C;

T_p ——数值模拟预测的温度值, °C。

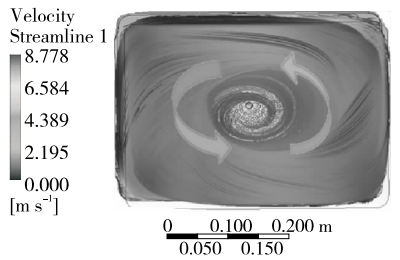
烤箱内腔模拟平均温度 195.4 °C,试测温度 197.7 °C,模拟值低于实测值 2.2 °C,数值模拟和实测所得平均绝对百分误差为 4.50%,最大偏差为 8.14% < 10%,在可接受范围内,故数值模拟结果较为可靠。

2.4.2 烤箱温度分布特性 由图 4 可知,烤箱内腔靠近壁面处温度较高,靠近烤箱门体处温度较低,从烤箱内腔后壁面到烤箱门体处的内腔温度呈逐渐降低的趋势。模拟和实测

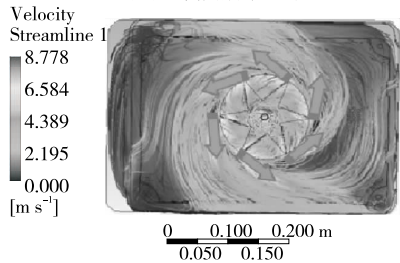
结果均表明烤箱内部温度场存在显著不均匀的现象,温度标准偏差达到了 4.63。其主要原因包括中心漩涡的存在、左右侧强制热风温差和局部不均匀性等。

(1) 中心漩涡:数值模拟结果表明烤箱内部存在大尺度漩涡,见图 5、6。由于漩涡中心处于流动死区,在实际加热过程中,对流换热效果差,因此该区域温度明显低于周围区域。烤箱中心漩涡是由风扇出口较大的周向速度分量引起的,故消除漩涡需要减少风扇出口的周向速度分量。

(2) 左右侧强制热风温度差:由于初始烤箱的加热管位于风扇入口外围,实际工作中只有外围入口空气得到加热,而大部分中间入口空气并未直接流过加热管,导致烤箱内部加热时间长,加热效果不佳,且原加热管左右侧出风位置不



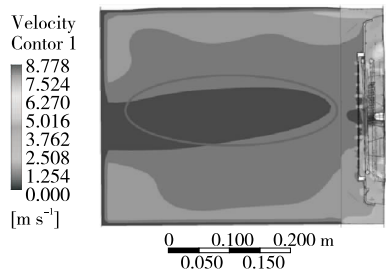
(a) 烤箱前侧流线图



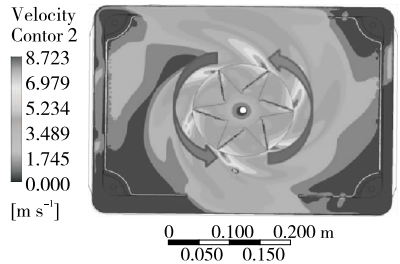
(b) 烤箱后侧流线图

图 5 烤箱流线图

Figure 5 Streamline distribution of oven



(a) 烤箱 XZ 平面速度云图



(b) 烤箱挡板入口平面速度云图

图 6 烤箱 XZ 平面及挡板入口速度云图

Figure 6 Velocity contours of XZ plane and baffle entrance of oven

对称,引起左右侧出风量不等,产生强制热风温差。

(3) 局部不均匀性:原烤箱热风出口动量损失较为严重,引起热风进入主流场区域风速降低,降低了热风机的加热效果。由图 7 可知,主要原因是原盖板左右侧出风口离壁面很近,且开口较小,而上下侧出风离壁面较远,且开口较大,导致经过风扇加速后的热风直接碰撞箱体壁面,造成较大的热风动量损失,因此通过改进挡板出风口结构可改善烤箱内部的局部不均匀性。

3 烤箱结构改进与温度场优化

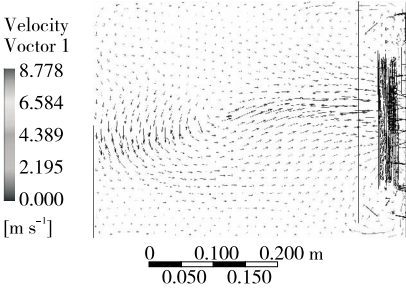
针对上述温度场存在的问题,本研究提出以下 3 种方案:①添加径向导叶结构;②改进加热管位置和加热管形

式;③ 改进烤箱挡板。

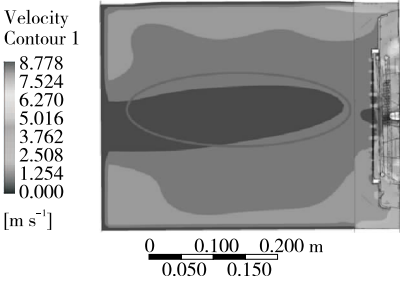
3.1 添加径向导叶结构

由于风扇出口存在较大的周向速度分量,烤箱的中心漩涡非常明显。因此添加合理的径向导叶结构可以消除风扇出口的速度环量,从而抑制烤箱腔内漩涡的产生。本研究针对烤箱提出了 3 种导叶结构(直导叶、径向导叶 1、径向导叶 2),见图 8。并基于以上 3 种结构,进行了数值模拟,并对流场均匀性的改善进行了比较,结果见图 9。

对比图 8 和图 9 可知,径向导叶结构对烤箱内部中心漩涡有一定的抑制作用。其中直导叶造成的速度损失较大,流线方向的改变较为有限,且烤箱内部的漩涡结构仍然较为明显;径向导叶 1 入口段虽然有较好的引导流线,但由于热风机挡板径向导叶长度有限,因此后半段导叶改变效果不太好;而径向导叶 2 在前两种导叶结构的基础上形成,可以较好地引导流线,改变流线的速度方向,各方向均匀出风,且无漩涡存在。为定量分析 3 种导叶结构消除周向速度分量的效果,本研究取导叶出口的径向速度分量和周向速度分量之

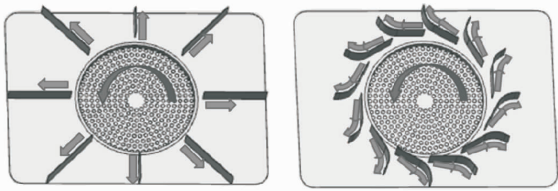


(a) 烤箱XZ平面速度矢量图



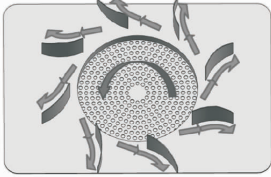
(b) 烤箱XZ平面速度云图

图 7 烤箱 XZ 平面速度矢量图和速度云图
Figure 7 Velocity vector and velocity contour of XZ plane of oven



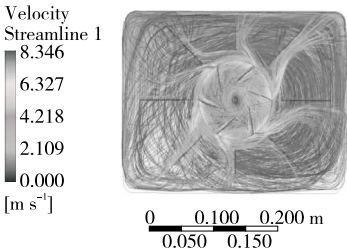
(a) 直导叶

(b) 径向导叶 1

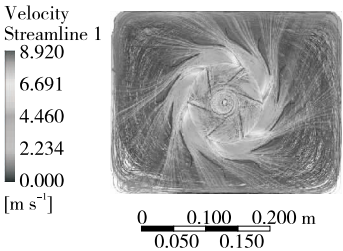


(c) 径向导叶 2

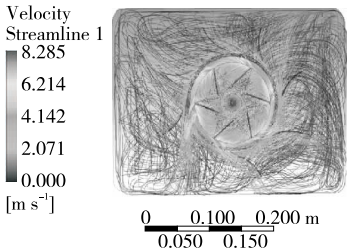
图 8 3 种不同导叶结构
Figure 8 Three different guide vanes



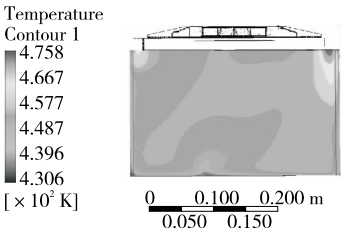
(a) 直导叶背部流线图



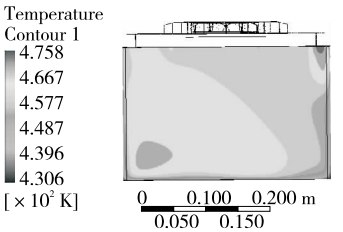
(b) 径向导叶 1 背部流线图



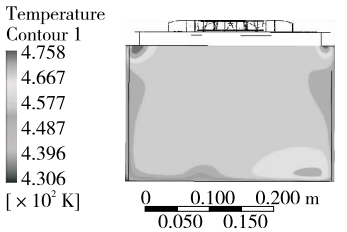
(c) 径向导叶 2 背部流线图



(d) 直导叶温度云图



(e) 径向导叶 1 温度云图



(f) 径向导叶 2 温度云图

图 9 3 种不同导叶结构的背部流线图和温度云图

Figure 9 Streamlines distribution and temperature contours of three different guide vanes

比来评判其合理性。其中径向分量/周向分量比值越大,说明引起中心漩涡的周向速度分量所占比例越小,有利于抑制烤箱内部中心漩涡,改善内部流场均匀性。根据数值模拟结果得直导叶、径向导叶 1 和径向导叶 2 的径向分量/周向分量分别为 1.05,1.41,2.89。因此,径向导叶 2 对消除风扇出口周向速度分量效果良好,能有效抑制中心漩涡的产生。

3.2 调整加热管位置和改进加热管形式

为了提高烤箱内部的加热效率,将加热管的位置进行调整,即加热管往风扇尾部移动,使加热管与风扇出风处直接相对;同时对加热管形式进行改进,缩小螺旋结构间距,示意图见图 10、11,模拟结果见图 12。

由图 10~12 可知,加热管位置和加热管形式影响着烤箱内部流线的分布,烤箱内部流线从上下出风变成了四周出风。改进前的风扇外围只有较少的空气被加热,加热管效率低,而改进后的加热管放置在风扇外围,以出风加热方式代替原有的入风加热方式,不仅改善了左右侧出风量不均匀的问题,同时还改善了烤箱内部的温度均匀性。

3.3 改进烤箱挡板

由于原盖板出风口设置不合理,热风在开口附近的动能损失较大。故对盖板结构进行简化。将盖板四周均匀开口保证其均匀出风,同时将四边设置成角度较小的斜坡,以改善盖板附近气流分布,减少涡流和死角,结构示意图和模拟结果见图 13、14。

由图 14 可知,改进后的缓斜坡盖板四周开口均匀,利于热风更好地经过盖板,减少了热风出口的动量损失,且烤箱内部流场均匀性和温度均匀性均得到了改善。

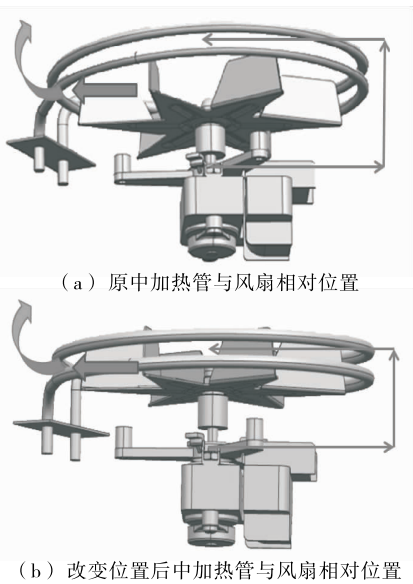


图 10 加热管与风扇的相对位置

Figure 10 Relative position of heating tube and fan

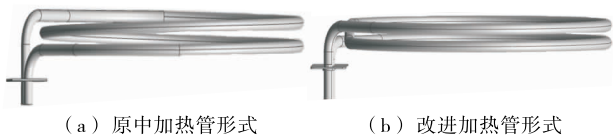


图 11 原加热管形式与改进后加热管形式

Figure 11 Relative position of heating tube and fan

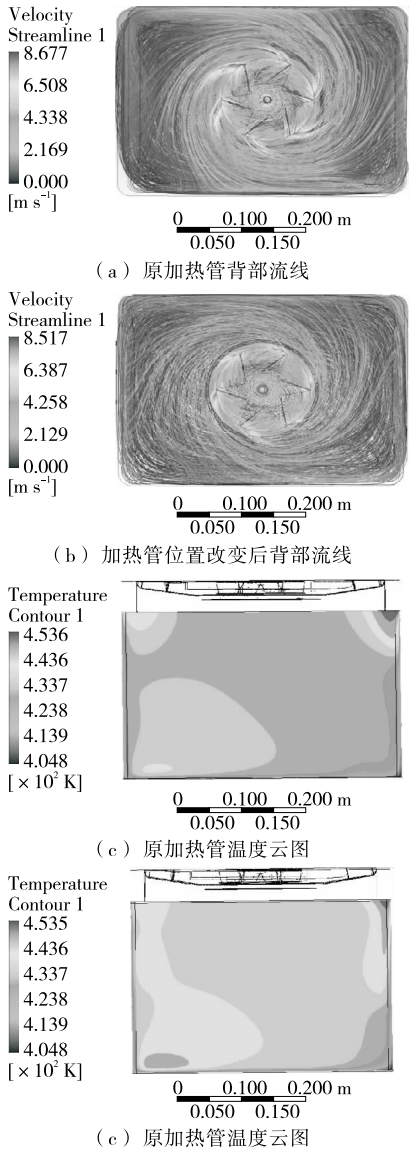


图 12 烤箱背部流线图及温度云图

Figure 12 Streamlines distribution and temperature contours of oven

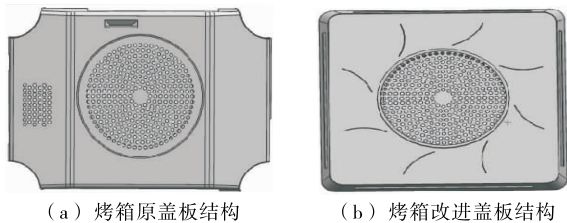
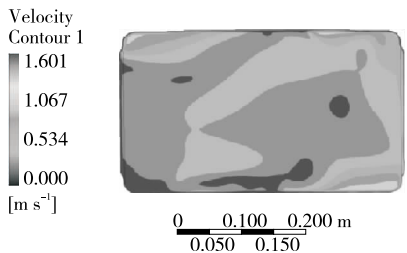


图 13 烤箱背部盖板结构

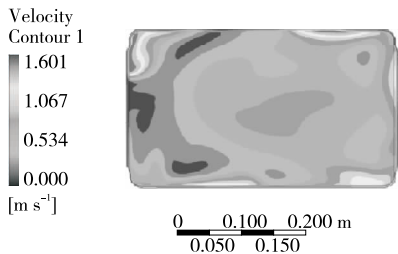
Figure 13 Structure of oven cover plane

3.4 最终优化结果分析

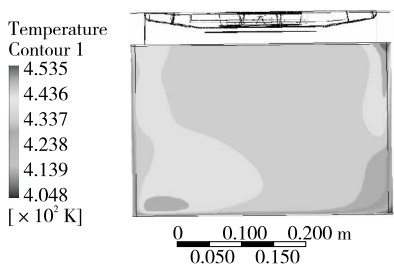
由图 15 可知,对改进后的烤箱进行数值模拟和试验测试,发现烤箱整体温度均匀性较好,内腔模拟最高温度 207.3℃,最低温度 201.3℃,平均温度 204.3℃,而实测最高温度 208.3℃,最低温度 201.8℃,平均温度 205.2℃,温度标准偏差从原来的 4.63 降低到了 2.05,温度均匀性比原烤箱有较大的提高。



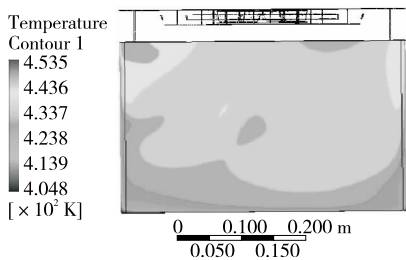
(a) 烤箱原盖板结构速度云图



(b) 烤箱改进盖板结构速度云图



(c) 烤箱原盖板结构温度云图



(d) 烤箱改进盖板结构温度云图

图 14 烤箱背部盖板速度云图及温度云图

Figure 14 Velocity contours and temperature contours of oven cover plane

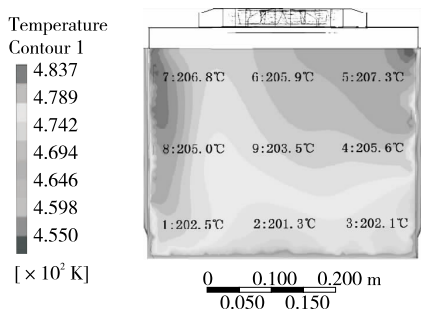
4 结论

本试验针对某电加热强制对流烤箱进行了内部流动和传热的数值模拟,分析带风扇的强制对流烤箱内部温度场分布不均匀的现象及其原因,并以改善烤箱内部温度分布均匀性为目标,提出了几种烤箱内部结构优化的措施,并在此基础上进行数值模拟和试验。主要结论如下:

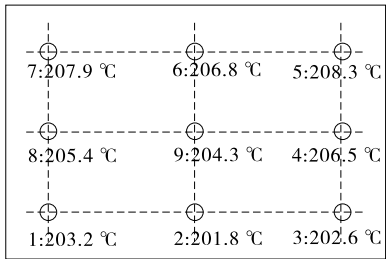
(1) 建立了可靠的数值模拟方法,对原烤箱进行数值模拟和试验测试,发现数值模拟和实测所得平均绝对百分误差为 4.50%,在可接受范围内,故数值模拟结果较为可靠。

(2) 分析和揭示了烤箱内部温度分布特性,烤箱内腔靠近壁面处温度较高,靠近烤箱门体处温度较低,从烤箱内腔后壁面到烤箱门体处的内腔温度呈逐渐降低的趋势,烤箱内部温度场存在显著的不均匀性。

(3) 添加合理的径向导叶结构可减少风扇出口环量,进而消除烤箱内部大尺度漩涡;调整加热管位置和改进加热管形式可减少烤箱左右侧强制热风温差;改进背部盖板结构可



(a) 中层烤架模拟温度图



(b) 中层烤架实测温度图

图 15 中层烤架模拟温度和实测温度对比

Figure 15 Comparison between simulated and measured temperature of middle grill

改善盖板附近流场分布,减少局部漩涡和流动死角区域,从而显著改善烤箱内部温度场的均匀性,温度标准偏差从 4.63 降到了 2.05。

参考文献

[1] 顾思源, 刘东, 项琳琳. 影响烤箱内腔温度场均匀性的关键因素分析[J]. 建筑热能通风空调, 2015, 34(2): 54-58.

[2] 刘俊, 刘东, 杭寅. 烘箱内部热环境的数值模拟研究[J]. 建筑热能通风空调, 2006, 25(4): 78-85.

[3] KHATIR Z, PATON J, THOMPSON H, et al. Computational fluid dynamics (CFD) investigation of air flow and temperature distribution in a small scale bread-baking oven[J]. Applied Energy, 2012, 89(1): 89-96.

[4] SMOLKA J, NOWAK A J, RYBARZ D. Improved 3-D temperature uniformity in a laboratory drying oven based on experimentally validated CFD computations[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(3): 373-383.

[5] 王璟, 刘东, 项琳琳. 某烤箱不同运行阶段内部的传热机理研究[J]. 节能技术, 2015, 33(6): 539-545.

[6] 张蓝心, 刘东, 项琳琳. 不同运行模式下烤箱内腔温度场的优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2015(3): 33-35.

[7] INCROPERA F P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer [M]. 6th ed. New York: John Wiley & Sons, 2007: 139-162.

[8] CHHANWAL N, ANISHAPARVIN A, INDRANI D, et al. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of an electrical heating oven for bread-baking process[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3): 452-460.

[9] 田松涛, 高振江. 基于 Fluent 的气体射流冲击烤箱气流分配室改进设计[J]. 现代食品科技, 2009, 25(6): 612-616.

[10] 郭磊. 对 Fluent 辐射模型的数值计算与分析[J]. 制冷与空调, 2014, 28(3): 358-360.