[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.04.002

烤箱内胆流动特性与加热效率研究

孔静娴¹,姚 青^{2,3},付远华^{2,3},余科帆^{2,3},钱锦远^{1*}

(1. 浙江大学 化工机械研究所,浙江 杭州 310027;
2. 浙江省健康智慧厨房系统集成重点实验室,浙江 宁波 315336;
3. 宁波方太厨具有限公司,浙江 宁波 315326)

摘 要:为解决传统热风循环式烤箱受介质物性和烤箱结构限制而产生的温度不均匀问题,课题组提出了一种将过热蒸 气(过热蒸气因焓值高而有助于蛋白质改性)作为传热介质的新型烤箱及3种优化方案。根据优化前新型烤箱的温度和 速度分布,提出了在底部加设加热盘和在背部加设加热圈2种结构优化方案,以及增加蒸气进口速度的工艺优化方案; 对优化前后的模型进行仿真,并实验验证其准确性。结果表明:底部增设加热盘后,样本点温度方差和平均温度分别改 善了22.4%和2.9%;背部加设加热圈后,平均温度提升了3.5%,但温度均匀性下降;增加进口流速后,温度均匀性提升 了46.4%,但平均温度降低。该新型烤箱为传统热风循环式烤箱的优化提供了一个新方向和思路。 关键 词:烤箱;过热蒸气;温度场分布;流场模拟;CFD数值计算

中图分类号:TS972.2;TH164 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)04-0014-08

Research on Flow and Heating Efficiency Inside Steam Oven

KONG Jingxian¹, YAO Qing^{2,3}, FU Yuanhua^{2,3}, YU Kefan^{2,3}, QIAN Jinyuan^{1*}

(1. Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Key Laboratory of Healthy & Intelligent Kitchen System Integration of Zhejiang Province, Ningbo, Zhejiang 315336, China;

3. Ningbo Fotile Kitchenware Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315326, China)

Abstract: In order to solve the problem of the uneven temperature in forced convection oven caused by quantities of the medium and structures of oven, a novel oven using superheated steam (high enthalpy of superheated steam is helpful for protein modification) as heat transfer medium was proposed and three optimization schemes were put forward. Based on the distributions of temperature and velocity in traditional oven, two structural optimizations of adding a bottom-heating plate and a back-heating ring were proposed, as well as a process optimization of increasing the inlet velocity of superheated steam. The models before and after optimization were simulated and its accuracy was experimentally verified. The results show that with the addition of a bottom-heating plate, the temperature variance and average of temperature increases by 3.5%, while the uniformity decreases; with the increase of inlet velocity of superheated steam, the uniformity of temperature increases by 46.4%, while the average decreases. The novel oven provides a new orientation for the optimization of traditional forced convection oven.

Keywords: oven; superheated steam; temperature distribution; flow simulation; CFD (Computational Fluid Dynamics) numerical simulation

目前,强制对流烤箱不仅存在着烹饪功能单一、内 胆温度不均匀等问题,而且烹饪红肉时还会产生对人 体具有诱变致癌作用的杂环胺(HCA),长期食用会导 致结、直肠癌等疾病^[1]。目前集辐射换热、对流换热

收稿日期:2022-12-02;修回日期:2023-04-07

基金项目:国家重点研发计划(2020YFC1910100)。

第一作者简介:孔静娴(2000),女,满族,内蒙古赤峰人,博士研究生,主要从事强化传热技术研究。通信作者:钱锦远(1988), 男,浙江慈溪人,博士,副教授,主要研究方向为先进流动控制。E-mail:qianjy@ zju. edu. cn 和蒸气辅助于一体的综合型蒸烤箱越来越受到消费者 们的青睐。课题组欲在强制对流烤箱的基础上,引入 过热蒸气作为传热介质,数值分析现有蒸烤箱的流场 和温度场,并提出优化方案进一步提升烤箱平衡温度, 改善温度均匀性。

过热蒸气是在饱和蒸气基础上继续加热得到的, 其处理温度及热焓值均显著高于饱和蒸气,传热效率 较高,并且具有潜在蒸发热可重复使用的特点^[2]。目 前过热蒸气多应用于干燥领域中,如食品、药品行 业^[3]。它不仅能对原料进行干燥,还能消灭细菌和其 他有害微生物。过热蒸气也可应用于小麦粉的热处理 改性,经过热蒸气处理后的小麦粉水溶性指标下降,糊 化程度增加,吸水率提高,慢消化淀粉(SDS)含量显著 增加,同时更易受到淀粉酶的作用而产生发酵所需的 葡萄糖^[4]。Fraile 等^[5]在利用过热蒸气烤箱再加热土 豆泥的研究中发现过热蒸气的引入对食物的烹饪时 间、烹饪损失及营养保留程度均有积极影响。

对烤箱内温度的研究主流方法是采用数值模拟 (CFD),该方式具有成本低、研究周期短和使用范围广 的优势。黄宜坤等^[6]研究了蒸气在烤箱内的作用,在 实验和仿真中引入对蒸气行为的研究,与传统强制对 流烤箱不同的是蒸烤箱中涉及到蒸气的相变,因此他 们将烤箱问题定义为多相流问题,在 CFD 模拟中使用 了多相流模型进行仿真分析。MISTRY 等^[7]用 CFD 对燃气烤箱做了仿真分析,在烤箱边界条件的设定中, 使用内部红外摄像机测量壁面和玻璃的发射率。李海运等^[8]比较了热传导、热传导+辐射、热传导+辐射+ 对流3种不同传热模式对烤箱内胆温度场的影响,得 出对流有助于改善温度均匀性的结论,并通过理论计 算和仿真模拟对烤箱挡板的出风口进行了优化。顾思 源等^[9]在烤箱内腔温度场均匀性研究中,使用实测的 温度验证仿真结果的准确性;由于仿真各项设置与真 实情况存在不可避免的偏差,且研究重点在于温度的 均匀性,故提出将温度的分布趋势作为验证标准在均 匀性研究中是可行的。

1 计算模型及实验装置

1.1 计算模型

本研究中应用的三维模型由宁波方太厨具有限公司的某款烤箱模型简化得到。为明确各功能部件的用途、关注问题的主要矛盾和简化计算,去除了圆角、凹槽和突起等对计算结果影响不大的细小结构,并对一些功能部件进行降维简化。如针对加热管部分:因为本研究的关注重点不在于加热管本身的温度情况,而仅是其加热功能,故用3个长方形面热源代替加热管。简化结果如图1所示,内腔流域部分为410 mm × 290 mm × 210 mm 的长方体区域,背部蒸气进口半径 r = 80 mm,前门处有一长条状出风口,流域上方为均布的3 个长方形面热源,与模型顶端距离为 20 mm。

原烤箱结构复杂,而简化后的模型主要由长方形 区域组成,如图2所示,可全部使用结构性网格。



1一热源;2一出风口(烤箱门缝);3一进风口;4一蒸气冷凝盘;5一烤盘;6一挡风板;7一风扇。

图1 烤箱模型简化示意图

Figure 1 Simplified diagram of oven model



图 2 网格划分 Figure 2 Mesh of simplified model

在进行正式计算之前,首先进行网格无关性验证, 排除在数值分析过程中网格对分析结果的影响,验证 结果如表1所示。选取3组不同大小的网格:0.003, 0.005 和 0.007 m, 网格数量分别为 80 520, 218 776 和 1 023 253,比较相同工况下 XOZ 平面的平均温度。从 表中结果可知,第2组和第3组网格得到的结果几乎 相同。因此,为了节省模拟时间和计算量,确定最佳网 格数量为218776。

表1 网格无关性验证

Table 1	Grid	l-inde	epend	ence	verifi	cation
i abio i	. 0110	i ma	opene	ionoo	,01111	oution

组号	网格数量	网格尺寸/m	平均温度/℃
1	80 520	0.007	436.54
2	218 776	0.005	442.99
3	1 023 253	0.003	442.22

仿真计算在20℃的室温环境下进行。涉及的烤箱 传热介质为过热蒸气,其在不同温度下的物性均不同, 为简化计算,假设过热蒸气的物性固定不变,取定性温 度下的物性为其常物性。过热蒸气以 120 ℃ 的温度进 入烤箱内腔,实验结果显示烤箱的平衡温度为170℃左 右,结合入口过热蒸气温度进行计算,得到145℃作为 整个过程中过热蒸气的定性温度。腔内换热方式以对 流和辐射换热为主,通过上加热管增强腔内辐射,背部 风扇扰动腔内气体流动循环,使温度更加均匀。

由于烤箱内可能存在流体撞击和旋流等流动情 况,故湍流模型设置为 Standard κ -epsilon 模型,开启 DO 辐射模型。烤箱壁面边界条件设置如表2所示。

表2 边界条件设置

Table 2 Boundary conditions

	-	
位置	换热情况	边界设置
前门壁面	门体与外界空气发生对流换热,与内部发生辐射换热	Mixed 模式,发射率0.85,综合辐射换热系数 $k = 13 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K})$
其他壁面	上、下、侧和背部壁面均嵌入在橱柜中,不考虑对流换热,只	Radiation 模式,发射率0.9
	考虑辐射换热	
加热管	加热管功率为1 500 W	发射率为0.85,根据加热管表面积设置热流密度250000 W/m ²
进口	每秒通入4 mL水产生的过热蒸气,定性温度145 ℃,蒸气	入口速度1.5 m/s
	入口直径 80 mm	
出口	回流温度 300 K	压力出口,出口表压为0

1.2 实验装置

在过热蒸气蒸烤模式设定温度 180 ℃的工况下, 使用 K 型热电偶和 TASI, TA612C 数显仪对图 3 中所 示的9个测点分别进行3次温度测量。实验前首先进 行热电偶的标定,将热电偶的探头均放入混合均匀的 冰水混合物中,待示数稳定后检验其温度示数是否为 0℃。取放3次后,取示数的平均值,在之后的测量实 验中,最终测量结果为温度仪器示数减去该偏差值。

在分析烤箱内温度场之前,为验证仿真结果的准 确性,取图5中的9个测点进行实验测温。求取3次 实验的平衡温度并计算平均值,考虑到温度在平稳后



图 3 测点布置位置 Figure 3 Position of measured points in experiment



图 4 冰水混合物方法标定温度计 Figure 4 Calibration of thermometer with ice-water mixture method

还存在着上、下波动的现象,随意取平稳状态下的某个 值是不准确的,采用平均值法又因不能准确判断转折 点的位置而无法确定平衡区间。因此采用"重合点判 定法",先肉眼观察平衡温度的区间(数据选取区间 150~200℃),每隔0.1℃取1条水平线,将与水平线 温度差值小于0.1的实验数据点记为重合点,重合点 最多的水平线温度即为平衡温度。仿真中,取与烤盘 位置等高的平面,此时,*Y*=0.06 m。2种结果的平均 温度和各点的相对误差列于表3。各点相对误差平均 值为5.85%,小于10%,在可接受范围内。







此外,参考袁宏等^[10]对模拟与实测结果的比较评 价方法,采用平均绝对误差来评价模拟结果的准确性, 公式为:

$$P_{\rm abs} = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{T_{\rm e} - T_{\rm p}}{T_{\rm e}} \right) i_{\rm o} \tag{1}$$

式中: e_{abs}为平均绝对误差; n 为测量范围内温度测点的总数目; i 为测点序号; T_e 为实验中测试的温度

值,℃;T_p为数值模拟预测的温度值,℃。

计算平均绝对误差为 5.11%,小于 10%,在误差 允许范围内。

以上计算结果显示,各数据误差均在可接受范围 内。个别位置误差相对较大,推测由于该仿真模型对 烤箱背部进风口、上方加热管进行了较大的形状简化 造成的,但总体误差在允许范围内。

表3 实验与仿真温度比较

Table 3 Comparison of experimental and

simulated temperatures

类别	数值模拟/℃	实验测温/℃	相对误差/%
1	184.20	179.10	2.80
2	205.00	177.30	15.60
3	179.40	177.20	1.20
4	176.60	174.00	1.50
5	170.40	173.60	1.80
6	153.60	174.40	11.90
7	181.80	177.10	2.70
8	199.20	178.30	11.70
9	177.60	183.60	3.30
平均值	180.87	177.18	5.85

2 结果分析及结构优化

2.1 结果分析

烤箱流场分析的目的是验证过热蒸气在烤箱内的 影响范围及流动规律。图 6 为从上方(Y向)和左侧 (X向)看的烤箱内胆整体流线图。从流线分布可知 过热蒸气的影响范围基本覆盖烤箱内胆的全部区域, 顶点处几乎无死角,且真实结构的内胆又存在圆角结 构,可推测过热蒸气也可无死角地覆盖全部区域。从 流动方向来看,蒸气从进口流入,有一部分蒸气未参与 腔内循环而直接从前门出风口流出,这种状况与进出 风口的位置有关。烤箱的前、后进出风口在 Y 方向位 置较为相近,撞到前门壁面后向上参与循环的部分流 体迅速流出,未得到充分加热;而由于烤箱下半部分不 存在加热管,导致向下流动的部分流体虽循环充分,但 离加热管较远,也没有得到充分加热。

图 7 为该模型的温度计算结果。图 7(a)显示上 方加热管的热量没有很好地传递到下方,导致在竖直 面上上半部分温度明显比下半部分高;且当烤箱腔体 被加热管加热至一定温度后,由于进口蒸气温度相对







较低,产生了以进口为中心的圆形低温区。而图7(b) 所示的水平面位于进口圆的中心线上,中间存在条状 低温区,验证了流场分析中得到的结论,即进口部分过 热蒸气未经过充分循环加热就直接流出,低温蒸气降 低了该区域的温度。

2.2 优化方案

2.2.1 加设底部加热盘

原结构烤箱腔体内下半部分的温度总体低于上半部分,故在烤箱底部设置1个直径为200mm的加热盘。为保证总发热功率不变,根据"功率再分配"原则,设置顶部加热管功率为1200W,底部加热盘为300W。根据各自的发热面积得到其热流量分别为200000.0W/m²和9549.3W/m²。底部加热盘优化模型如图8所示。

优化后温度场分布如图9所示。从图中可以看到 底部加热盘对于提升烤箱下半部分腔体的温度产生了 积极作用,高温区域向下的辐射范围明显增加,进口圆 形低温区的范围也略微减小。

2.2.2 加设背部加热圈

原始模型的水平面温度分布显示蒸气入口处存在





Figure 7 Temperature distribution of initial model



图 8 底部加热盘优化模型 Figure 8 Model of bottom heating plate

带状低温区域,这就要求进一步提高过热蒸气的温度, 考虑到蒸气发生器的加热能力有限,故在烤箱背部入 口处设置1个内径65 mm、外径80 mm 的加热圈,及时 为蒸气提供二次加热。同样遵循"功率再分配"原则, 设置顶部加热管功率为1200 W,背部加热圈功率为 300 W,根据各自的发热面积计算得热流密度分别为 200 000 W/m²和500 000 W/m²。背部加热圈优化模 型如图10 所示。

背部加热圈模型温度分布如图 11 所示。从图 11 (a)可知入口的低温圆形区域明显减小,很好地实现









图 10 背部加热圈优化模型



了温度的平稳过渡。在总加热功率不变的情况下,热 量更多地影响到了烤箱下半腔体且对称性较好,总体 温度较高。从蒸气入口中心平面的温度分布中也可以 更直观地观察到相比于原始模型,中间的带状低温区 明显变小,高温区基本覆盖整个平面。

2.2.3 增大入口蒸气流速

为了验证进口蒸气流速对腔内流场和温度场的影响,将进口蒸气流速从原来的1.5 m/s 增加至3.0 m/ s,其他条件不变,流场结果比较如图12 所示。流速增 大后腔内整体压力升高,压力分布规律与原始模型大 致相同,但不均匀程度增加。在流速为3.0 m/s 的情 况下,流线明显向下倾斜,高压区位置偏下,使得有更 多流体向下参与循环,减少了直接流出的蒸气数量。

改变流速后的温度结果如图 13 所示。从图中可 以观察到:流速增大后温度总体更低,但均匀性更好;





由于内部蒸气流动紊乱,温度分布也呈现出不对称的 特点,这验证了烤箱腔内紊乱的流场可以提升温度分 布的均匀性。

2.2.4 平均温度指标及均匀性指标

对 *Y* = 0.06 m 的烤盘平面上 9 个测点计算平均值:

$$T_{\rm ave} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{9} T_{i\circ}$$
 (2)

式中: T_{ave} 为平均温度, T_i 为第 i 个测点的温度。

计算9个测点温度的方差作为温度离散系数:

$$s^{2} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^{9} (T_{i} - T_{ave})^{2}$$
(3)

式中s²为温度方差。

原始模型与3组优化方案的计算结果列于表4, 设置底部加热盘的模型平均温度比原始模型提高了 2.9%,方差降低了22.4%。背部加热圈较大程度地 提高了平均温度,相比于原始模型,平均温度提高了 3.5%,但方差增加幅度较大。增大入口蒸气流速后, 温度均匀性有了大幅度改善,方差降低了46.4%,但 平均温度相比于原始模型降低了4.4%。



图 12 流线分布比较及 X = 0 m 平面压力分布比较 Figure 12 Comparison of streamline distribution and pressure distribution at X = 0 m

表4 优化前、后样本点平均温度及方差

Table 4	Average	e tem	peratur	re and	variance	of
sample	points b	efore	and at	fter op	timization	ı

描画米画	亚 拘汨 南 /V	十半	相对误差/%	
候型失望	半均温度/ κ	刀左	平均温度	方差
原始模型	453.80	201.99		
底部设置加热盘	466.80	156.73	2.9	-22.4
背部设置加热圈	469.56	447.85	3.5	121.7
增大蒸气入口流速	433.81	108.20	-4.4	-46.4

由此,可得出烤箱优化的几个重要思路:①在烤箱 功率不变的情况下,采用烤箱内热源的"功率再分配" 方法,可实现腔体内部的温度优化;热源布置遵循"功 率小、数量多"的原则。②保证烤箱外部能量补充,如 提高入口流体温度和速度,以提升平衡温度、改善均匀 性。③耦合使用多种优化方案以最大程度地发挥各自 的优化作用。

3 总语

课题组在强制对流烤箱的基础上,将传热介质替



图 13 增大蒸气入口流速后温度分布 Figure 13 Temperature distribution of model with

increased inlet steam velocity

换成过热蒸气。对传统热风循环式烤箱和优化后的过 热蒸气烤箱均进行了数值计算仿真,通过分析传统烤 箱在温度及速度分布上的不足,提出了过热蒸气烤箱 的结构优化方案,主要结论如下:

 1)数值模拟结果显示烤箱内部流场和温度场分 布不均匀的原因主要是热源数量较少、热量集中,使得 热量不能均匀遍布烤箱内腔;入口蒸气能量较低,使得 烤箱得到的外部热量补充较少,甚至对温度升高起到 负作用。

 2)通过保持总加热功率不变,有针对性增加热源 数量的方式减少热量集中;通过提高蒸气动量的方式 增加外部能量补充,以改善烤箱内部温度场的不均匀 问题。

此外,在过热蒸气烤箱的研究中,理论及实验方面 有待深化,如系统地探究过热蒸气对食物内部结构的 影响;数值模拟上还可进一步考虑蒸气的相变和物性 变化;对烤箱的结构优化还可探究更加创新的方式。

(下转第27页)