

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2020.07.019

基于数值模拟的烤箱控制风量研究及性能优化

Study on air volume control and performance optimization of oven based on numerical simulation

李海运 张凯 黄加禹

LI Hai-yun ZHANG Kai HUANG Jia-yu

(中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

(College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

摘要:采用 9 点分布式热电偶实时测量烤箱每层温度场分布,测定分析烤箱温度均匀性,并运用计算流体力学对烤箱内部温度场进行数值模拟。结果表明,通过优化烤箱后挡板结构,调节风量分配,改变出风孔布局等方案显著地提升了烤箱内部温度场的均匀性。

关键词:电烤箱;温度均匀性;数值仿真;关键因素;结构优化

Abstract: A 9-point distributed thermocouple was used to measure the temperature field distribution of each layer of the oven in real time, and the oven temperature uniformity was determined and analyzed. Moreover, the internal temperature field of the oven was numerically simulated using computational fluid mechanics knowledge. The results showed that the uniformity of the temperature field inside the oven was significantly improved, by optimizing the structure of the rear baffle in the oven, adjusting the distribution of air volume, and changing the layout of the air outlet.

Keywords: oven; temperature uniformity; numerical simulation; key factors; structural optimization

随着国民经济的发展,采用烤箱烹制食物成为人们日常生活中越来越重要的一种生活潮流。烤箱内部温度的均匀程度决定了所烘烤的食物品质。烤箱内温度场如果不够均匀,食物在烘烤过程中会产生受热不均的现象,继而影响食物的口感、色泽。对于烤箱内部温度及流动状态的研究在学术上一般有两种方法:一种是试验研究,

这种方法虽然结果直观可靠,但往往需要消耗较大的人力物力,有时也会受到条件的限制而无法开展试验;一种是数值模拟,利用 CFD 理论建立数值模型得到仿真结果。这种方法对试验条件没有要求,并且可以节省大量人力物力,是未来产品研发方式的一种趋势。

袁宏等^[1]采用计算流体力学的方法对烤箱内部温度场进行了数值模拟,分析了烤箱原有结构温度场不均匀的原因。顾明敏等^[2]利用感受器辅助微波烘焙面包,与传统微波烘焙相比,面包质量有较大改善。Mistry 等^[3]建立了燃气烤箱的数值仿真模型,其仿真误差 $<6\%$,并在此基础上建立了一种烤箱性能的评价方法。程丽丽等^[4]分析了草莓在商用保鲜运输期间的温度分布,表明延长强制通风时间能提高温度的均匀性。余冰妍等^[5]概述了基于多孔介质热/质传递理论构建数学模型的原理与发展,此模型在处理流体颗粒食品热处理方面具有一定优势。张汝怡等^[6]对射频加热的视频升温过程进行了模拟,其升温曲线与试验结果较一致,表明通过仿真得到食物升温过程的方法是可行的。虞文俊等^[7]采用 Fluent 对茶叶的杀青过程进行模拟,分析了电加热与红外加热的区别与优缺点。项琳琳等^[8]通过实测和 CFD 数值模拟的方法,研究了某嵌入式烤箱内腔温度场分布现状,提出了改变烤箱顶部小孔、热风扇风速、加热管位置、热风扇挡板结构等优化方法来提高温度均匀性。王璟等^[9]研究发现,当食物温度上升至 171 °C 后,对流成为主导的换热方式,并利用数值模拟得到了烤箱的优化模型。张蓝心等^[10]研究发现,通过改进烤箱结构可对现有烤箱模型内部温度场均匀性进行优化。顾思源等^[11]通过建立烤箱的三维简化模型,模拟了多种改善措施对内腔温度分布的影响,最终综合多种措施得到了烤箱的最优模型。姚靖等^[12]从机理角度对烤箱内食物加热问题进行了分析,

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:11472260)

作者简介:李海运,男,中国计量大学在读硕士研究生。

通信作者:张凯(1979—),男,中国计量大学教授,博士。

E-mail: zkb3026@gmail.com

收稿日期:2019-12-25

给出了加热过程中几种典型形状食物的热能分布情况,并发现圆形器皿为最优形状。李保强等^[13]提出了一种基于模糊自适应 PID 的控制方法,通过建立模糊控制模型,实现了对 3 个 PID 参数的在线校正。田松涛等^[14]就原模型中各个喷嘴出口速度分布不均的问题,提出了 4 种改进设计,发现气流分配室设计为梯形体,喷嘴排列形式为三角形排列的模拟效果最佳。试验拟以某厂家的嵌入式电烤箱为研究对象,通过试验和数值模拟相结合的方式,对烤箱内腔温度分布进行优化,使其分布均匀,为改善电烤箱在实际使用过程中的性能提供依据。

1 计算模型与试验装置

1.1 烤箱外观及内部结构

烤箱外观和内腔结构如图 1 所示。其中图 1(a)为烤箱外观正面视图,主要由门把手和玻璃门组成。图 1(b)为烤箱内部结构示意图,其中上加热管 1 一共分为内外两套,每套加热管可以单独开启;后部挡板 2 在挡板的上缘和下缘分别开有 4 个同等大小的矩形出风口即如图中 6 所示;后加热管 3 总体为圆环形,共有两圈;热循环风扇 4 在需要时可以开启以加强烤箱内的对流作用;下加热管 5 总体结构呈 U 形,其上方有一层金属挡板,因此烤箱内腔的空气不直接与加热管接触;玻璃门 7 采用 LOW-E 玻璃来降低烤箱的发射率。

1.2 试验装置

为研究烤箱内腔实际温度分布情况,对烤箱的中层烤架进行了温度测试。如图 2 所示,分别均匀布置 9 个测试点,采用美国安捷伦公司的 Agilent 34972A 数据采集器,每 1 s 记录一次,测量范围 0~800 °C,精度 0.1 °C。

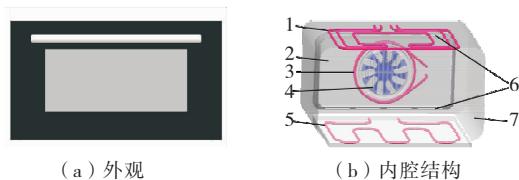


图 1 烤箱示意图
Figure 1 Schematic of oven

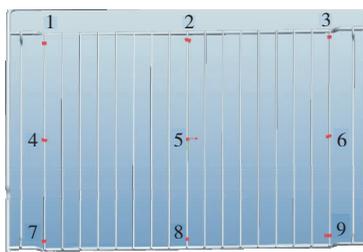


图 2 烤架试验测点布置图
Figure 2 Measuring point distribution of oven

2 数值模拟

2.1 网格划分及无关性

采用四面体网格单元对计算域进行网格划分,对加热管、风扇盖、玻璃门和风扇处的四面体网格进行加密处理。在风扇盖的开口和玻璃门的内侧,使用了额外的表面尺寸细化。通过对预先划分的 2.1×10^7 , 4.3×10^7 , 6.2×10^7 3 种不同数量的网格仿真结果进行对比,研究计算网格对计算机仿真精度的影响。对空载烤箱进行稳态模拟,在中心平面处均置 9 个监测点,当仿真收敛后取 9 个监测点数据并求平均值,其结果见表 1。由表 1 可知, 2.1×10^7 网格相对于其他两个网格的仿真结果有较大偏差, 4.3×10^7 网格和 6.2×10^7 网格仿真结果差异不大,故选择 4.3×10^7 网格密度进行后续模拟。

2.2 边界条件及仿真模型设置

采用 SST $k-\omega$ 湍流模型进行数值计算。由于高温加热元件在运行期间最高温度可达 700 °C,因此辐射效应在烤箱工作状态时的作用不可忽视,可以利用辐射模型对光学厚度的适用性来进行辐射模型的选择。经计算,试验烤箱的光学厚度为 0.004 5^[15],表明 P1 模型和 Rosseland 模型是不适用的。烤箱门为玻璃,属于半透明介质,故选用 DO 辐射模型。烤箱内腔、风扇盖板和烤盘以及其他内部元件的发射率为 0.90^[16-17],发热管和风机均为钢材质,发射率为 0.85,各材料的物性参数见表 2。

模型壁面采用无滑移边界条件。通过数值模拟与试验测量可知,保温层的换热系数为 5 W/(m²·K),玻璃门处的换热系数为 13 W/(m²·K)。所有连接均采用保守的界面通量边界条件域。数值模拟中,玻璃被看作一种透明介质,其吸收系数为 89.15 m⁻¹,折射率为 1.51,烤箱内腔、风扇盖和烤盘被看作是钢和搪瓷的混合材料。烤箱温度场数值模拟结果与试验结果对比如图 3 所示。

由图 3 可知,试验数据与仿真数据随温度的变化曲线吻合度较好,表明仿真结果是准确的。

3 结果与分析

3.1 温度场及流场分布特性

烘烤模式中,上部和底部加热管开启,总功率达 1 600 W,不同传热方式的数值仿真结果如图 4 所示。由图 4 可知,热传导模式下,烤箱中部区域温度明显低于周围温度,由于顶部加热管的形状近似为回字形,中心位置

表 1 网格无关性分析

Table 1 Mesh independence analysis

网格数量	9 点温度平均值/°C
2.1×10^7	213.56
4.3×10^7	221.32
6.2×10^7	223.14

表 2 烤箱各材料的物性参数

Table 2 Physical properties of the materials in use

材料	厚度/mm	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	折射率	密度/(kg·m ⁻³)
空气(理想状态)	/	0.026	1 004.4	/	理想气体
玻璃	4.0	1.400	750.0	0.15	2 500.0
隔热层	20.0	0.040	670.0	/	50.0
内腔	0.8	45.700	513.0	0.90	6 515.5
加热管	6.5	60.500	434.0	0.85	7 854.0
风扇	0.8	60.500	434.0	0.85	7 854.0
风扇盖板	0.6	45.700	513.0	0.90	6 515.5
烤盘	0.6	45.700	513.0	0.90	6 515.5

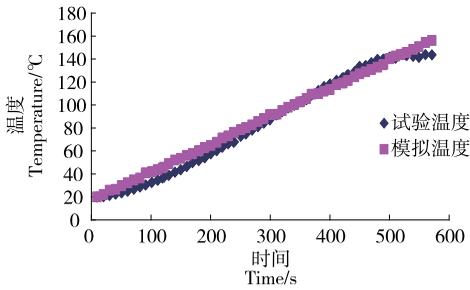


图 3 数值模拟与试验升温曲线对比

Figure 3 Comparison between numerical simulation and experimental heating curve

缺少热源。加入热辐射后,烤箱中部温度相对于周围温度依然偏低;烤箱门附近温度变低,烤箱门为透明玻璃,由于玻璃的固有属性,热量以辐射的形式散失到外部环境中;说明热辐射对于中心温度的改善没有明显贡献。热传导+辐射+对流模式下,温度分布较均匀,大致分布在 110~120 °C,没有出现温度鸿沟,表明自然对流对于改善焙烤模式下的温度场均匀性有显著效果。后续应着重考虑加热管形状和自然对流对焙烤温度场均匀性的影响。

3.2 优化方案及验证实验

3.2.1 速度场特性 风焙烤模式中,后加热管开启,总功率为 1 300 W,后离心风机开启。后风机功率为 20 W,转速为 1 300 r/min,扇叶半径为 63 mm,主要用于加强对流作用。这种模式主要针对肉类对火候要求较高的食物,配合专用于烧烤的旋转烤架,能使食物达到上色均匀,避免生熟不均的情况出现。

由图 5 可知,混合室中两侧风速云图呈左右对称趋势,风机沿顺时针方向旋转,从中部吸入口吸入的空气在离心风机作用下分别从上、下 8 个进风口排出。上部 4 个进风口中,第 1 个进风口处速度梯度较少,第 2 个进风口处速度梯度最少,第 3 个进风口处速度梯度较第 1 个多,第 4 个进风口处速度梯度最大,下部进风口与之成中心对称形式。

图 6 为风量分配公式示意图。

通过整理可得:

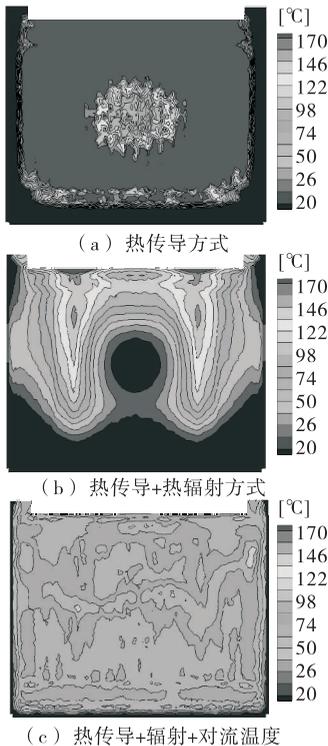


图 4 不同传热方式下的温度云图

Figure 4 Temperature profiles under different heat transfer modes

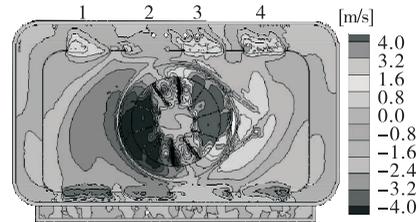


图 5 风机混合室速度等值线图

Figure 5 Velocity contour map of mixing chamber

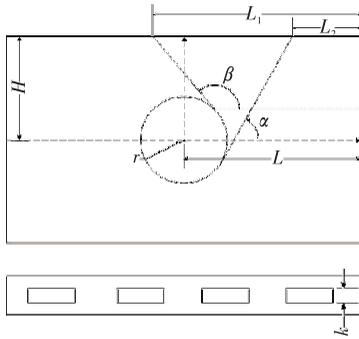


图6 风量分配公式示意图

Figure 6 Schematic diagram of air volume distribution formula

$$Q = klv(\cos\alpha - \cos\beta), \quad (1)$$

$$\alpha = \arctan(H/L) + \arcsin(r/\sqrt{H^2 + L^2}). \quad (2)$$

当 $(L-r) < l \leq L$ 时,

$$\beta = \cos\{\pi/2 + \arcsin[r/\sqrt{(L-l)^2 + H^2}]\}, \quad (3)$$

当 $l > L$ 时,

$$\beta = \cos\{\pi/2 + \arctan[(l-L)/H] + \arcsin[r/\sqrt{H^2 + (l-L)^2}]\}, \quad (4)$$

式中:

H ——挡板高度的 1/2, 102 mm;

L ——挡板长度的 1/2, 190.5 mm;

k ——挡板开孔的厚度, 10 mm;

v ——风扇叶轮边缘线速度, 8.57 m/s;

α ——起点角, rad;

β ——终点角, rad;

L_1 ——开孔起点位置;

L_2 ——开孔终点位置;

l ——出风口长度, $l = L_2 - L_1$;

r ——风扇半径, mm.

将仿真数据与公式计算所得数据进行对比(图7), 结果较为吻合。

3.2.2 方案优化 对于原始结构的挡板, 当出风口尺寸相同时, 气流在出口处分布不均匀, 形成了强制热风温差, 加剧了烤箱内温度不均匀的趋势。根据风量分配规

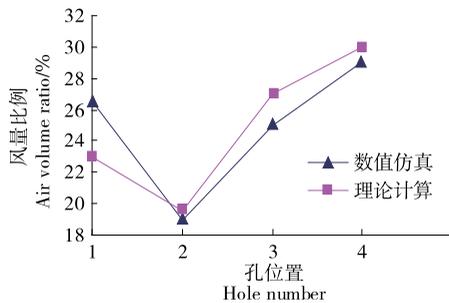


图7 风量分配对比

Figure 7 Air volume distribution

律, 对不同位置的出风口在宽度不变的情况下改变其长度, 使处于同一侧的各个出风口风量所占总风量的比例近似相同。其最优方案设计如图8所示。

烤箱内腔温度均匀性采用温度标准偏差进行评价, 其定义式为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2 / (n - 1)}, \quad (5)$$

式中:

σ ——温度标准偏差, $^{\circ}\text{C}$;

n ——同一烤箱平面内温度测点数;

T_i ——数值模拟中各测点温度值, $^{\circ}\text{C}$;

\bar{T} ——数值模拟中所有测点平均温度值, $^{\circ}\text{C}$ 。

烤箱改进前后的最大温差监测数据如图9所示。由图9可知, 改进结构的温差分布区间明显低于原始挡板, 说明改进效果显著。改进结构较原始结构温度均匀性有了较大提升, 改进结构温差区间分布在 $6.6 \sim 9.0^{\circ}\text{C}$, 波动较小; 原始结构温差区间整体分布在 $8.6 \sim 13.4^{\circ}\text{C}$, 波动较大。根据式(6)对试验数据进行计算可得, 改进前烤箱温度标准偏差为 6.332°C , 改进后为 2.524°C , 改进后烤箱的温度分布较为集中, 说明温度均匀性较改进前有显著提升, 也说明试验所述方法是有效的。

对改进前后的烤箱烘焙效果进行验证发现, 改进后的挡板烘焙效果明显优于原始结构挡板, 改进后的蛋糕整体色泽较为均匀, 说明按风量分布规律设计挡板结构的确能消除原始结构挡板存在的风量分布不均的问题。

4 结论

以某强制对流电烤箱为研究对象, 通过计算流体力学仿真研究了烤箱内部的温度场及流场分布, 建立了一种烤箱数值仿真模型; 利用 Fluent 分别对热传导、热传导加热对流以及实际工况下的烤箱内的温度分布进行了仿真模拟。分析了不同传热方式下对温度场均匀性的影响

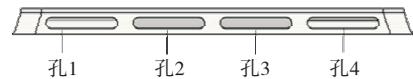


图8 最优方案

Figure 8 Optimization scheme

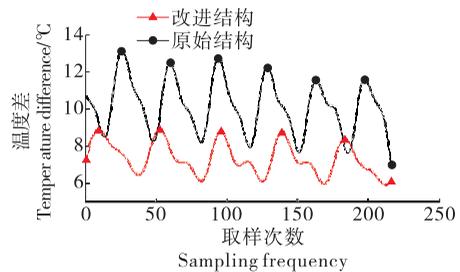


图9 最大温差试验数据对比

Figure 9 Comparison of experimental data of maximum temperature

强弱以及所呈现出来的特征。根据其特性提出了改进加热管形状和加强对流换热方式对温度场的均匀性的影响是正面的。同时,基于对烤箱内部流场的分析,拟合出了烤箱内部气流在通过后部挡风板时的分布规律,根据其规律推导出表征风量分配的计算公式。根据此公式设计了新型挡风板。对改进挡风板前后的烤箱进行仿真,得到其升温过程的最大温差数据。对比结果表明,改进后的挡板能显著提升烤箱的温度均匀性。后续仿真时可以进行负载烤箱的仿真,并考虑食物在烘焙过程中水分的蒸发,从而使仿真工况更接近实际工况。

参考文献

- [1] 袁宏, 吴大转, 秦世杰, 等. 强制对流烤箱温度场特性及其优化研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(6): 73-78.
- [2] 顾明敏, 杨哪, 徐学明. 感受器辅助微波烘焙的面包性质研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(24): 92-96.
- [3] MISTRY H, GANAPATHISUBBU S, DEY S, et al. A methodology to model flow-thermals inside a domestic gas oven[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(1): 103-111.
- [4] 程丽丽. 草莓保鲜运输中强制通风预冷与温度分布的相关性[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 151-154.
- [5] 余冰妍, 邓力, 程芬, 等. 基于多孔介质热/质传递理论的流体-颗粒食品热处理数值模拟研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 209-215.
- [6] 张汝怡, 李锋, 焦阳. 基于三维扫描和射频加热的食品升温过程模拟[J]. 食品与机械, 2019, 35(7): 39-44.
- [7] 虞文俊, 吴瑞梅, 李红, 等. 基于 Fluent-EDEM 耦合的茶叶红外杀青机滚筒内流场数值模拟[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 104-109, 120.
- [8] 项琳琳, 刘东, 任悦, 等. 某烤箱内腔温度场均匀性的优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2016, 35(2): 45-48, 87.
- [9] 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.
- [10] 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, 34(3): 33-35, 16.
- [11] 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.
- [12] 姚靖, 王振华, 尹访宇, 等. 关于烤箱加热的传热模型及器皿最优形状选择问题的研究[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2014, 17(1): 77-82.
- [13] 李保强, 任天平, 刘玲玲. 模糊自适应 PID 在叶腊石烤箱温度控制中的应用[J]. 机械设计与制造, 2010(12): 77-78.
- [14] 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.
- [15] CHHANWAL N, INDRANI D, RAGHAVARAO K, et al. Computational fluid dynamics modeling of bread baking process[J]. Food Res Int, 2011, 44(4): 978-983.
- [16] KOKOLJ U, SKERGET L, RAVNIK J. A numerical model of the shortbread baking process in a forced convection oven[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111(1): 1 304-1 311.
- [17] PINELLI M, SUMAN A. Thermal and fluid dynamic analysis of an air-forced convection rotary bread-baking oven by means of an experimental and numerical approach[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 117(5): 330-342.

(上接第 81 页)

输送物料的品质。后续将针对实体样机开展试验探究,以进一步验证设备的有效性及其可靠性。

参考文献

- [1] 陈洪亮, 李申岩, 刘玲, 等. 露天矿端帮自移式大倾角输送设备结构形式的研究[J]. 煤矿机械, 2019, 40(6): 149-151.
- [2] 齐梦学, 车新宁, 李秀云. 复合式大倾角皮带机在地铁施工中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2019(9): 1 530-1 536.
- [3] 李荣隆, 龙飞帆, 骆燕, 等. 定点落料输送机轻量化设计与试验[J]. 机械设计与制造, 2019(8): 131-134.
- [4] 左青, 左晖. 国产大型输送设备改进[J]. 中国油脂, 2017, 42(1): 156-160.
- [5] 何柏岩, 孙阳辉, 聂锐, 等. 矿用刮板输送机圆环链传动系统动力学行为研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(17): 50-56.
- [6] 左青, 杨伟峰, 张伟春. 大型国产输送设备在油厂的应用[J]. 中国油脂, 2010, 35(10): 61-65.
- [7] 杨鹏民. 国外带式输送机输送带清扫装置[J]. 煤炭科学技术, 2005(8): 7-10.
- [8] 冯伟元, 陈祥伟. 双层埋刮板输送机常见故障分析研究[J]. 中国油脂, 2007, 32(4): 68-69.
- [9] 高昌乐, 闵令江, 林翔. 刮板输送机动力特性分析与仿真[J]. 煤矿机械, 2019, 40(1): 64-66.
- [10] 徐乃兵, 李光凡. 浅谈通用型埋刮板输送机的选型与设计[J]. 中国油脂, 2007, 32(4): 70-71.
- [11] 谢华昆. 集成清扫技术在硫磺输送系统中的研究与应用[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(6): 92-97.
- [12] 王庆杰, 李洪文, 何进, 等. 螺旋刀型垄台清理装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 109-113.
- [13] 苏冠明. 矩形通风管道清洁机器人机构设计与作业性能分析和仿真[D]. 南京: 东南大学, 2017: 18-27.
- [14] FRIEDRICH Krause, ANDRE Katterfeld. Functional analysis of tube chain conveyors [J]. Particle and Particle Systems Characterization, 2004, 21(4): 348-355.
- [15] KATTERFELD A, WILLIAMS K. Functional analysis of tube chain conveyors, Part 1: General design and calculation principles[J]. Bulk Solids & Powder-Science & Technology, 2008, 3(1): 23-32.
- [16] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 北京工业出版社, 2016: 89-107.
- [17] 杨文武, 马旭, 马瑞峻, 等. 滚筒式毛刷清扫装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 197-200.
- [18] 覃安松. 基于 ANSYS 的旋转轴件静力学分析[J]. 中国设备工程, 2020(10): 121-123.