

奶瓶烘干装置内部流场CFD模拟研究

张玉国¹, 仝奂喆², 赵世田^{1*}, 蒋刘义¹, 高龙飞¹

¹盐城工学院机械工程学院, 江苏 盐城

²无锡中微高科电子有限公司, 江苏 无锡

收稿日期: 2026年8月7日; 录用日期: 2026年8月31日; 发布日期: 2026年9月8日

摘 要

为了提升奶瓶烘干装置的烘干效率, 本文对市场上某款奶瓶烘干装置内部流场进行了CFD数值研究。首先, 我们利用仿真软件对比了现有奶瓶烘干装置是否安装导风柱和不同高度的导风柱加热升温效果。然后, 针对现有装置导热效果不明显现状改进了烘干装置的进风结构, 使奶瓶内部温度快速升高, 实现加快烘干功能, 增强烘干效率, 达到节能目的。结果显示, 改进后的烘干装置在烘干速度和能效方面都有了显著提升, 满足了现代家庭对奶瓶烘干节能高效的环保需求。

关键词

奶瓶烘干, 导风柱, 结构改进, 烘干效率

CFD Simulation Study of the Internal Flow Field in a Bottle Drying Device

Yuguo Zhang¹, Huanzhe Tong², Shitian Zhao^{1*}, Liuyi Jiang¹, Longfei Gao¹

¹School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu

²Wuxi Zhongwei High-Tech Eletronics Co., Ltd, Wuxi Jiangsu

Received: August 7, 2026; accepted: August 31, 2026; published: September 8, 2026

Abstract

To improve the drying efficiency of a bottle drying device, this paper conducts a CFD numerical study on the internal flow field of a certain bottle dryer available on the market. First, we used simulation software to compare the heating and temperature rise effects of the existing bottle dryer with and without air-guiding columns, as well as with guiding columns of different heights. Then, addressing

*通讯作者。

文章引用: 张玉国, 仝奂喆, 赵世田, 蒋刘义, 高龙飞. 奶瓶烘干装置内部流场 CFD 模拟研究[J]. 建模与仿真, 2026, 15(9): 29-37. DOI: 10.12677/mos.2026.159131

the issue of insufficient heat transfer in the current device, we improved the air intake structure of the dryer, allowing the internal temperature of the bottle to rise more rapidly, thus speeding up the drying process and enhancing efficiency while achieving energy savings. The results show that the improved dryer exhibits significant improvements in both drying speed and energy efficiency, meeting the modern household's demand for an eco-friendly, energy-efficient bottle drying solution.

Keywords

Bottle Drying, Air Duct Column, Structural Improvement, Drying Efficiency

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国内经济的发展和三胎政策的开放,市场调研数据显示,母婴开支已经成为育儿家庭的主要支出。同时母婴消费的趋势正逐渐向幼儿阶段延伸[1],全球母婴消费市场将逐渐突破三万亿规模[2]。而奶瓶作为婴儿日常生活中必需的用品,其健康与安全对于婴幼儿至关重要。传统手工擦干可能导致干燥不彻底,增加细菌滋生风险。奶瓶烘干装置利用热风干燥技术,通过风机将热风吹入干燥室,将热量传递给奶瓶,促使表面水分汽化并扩散。物料表面水分蒸发后,内部水分向表面扩散,直至达到干燥要求,安全高效地解决了传统手工擦干面临的问题。热风干燥技术操作简单、成本低、适用广泛,干燥效率高[3]。但目前市场上热烘干产品仍面临一些耗能高、热效率低的问题。为了解决热风烘干机烘干周期长、效率低、耗能大的问题,张振林等[4]通过对其外观结构,优化压缩空气管路等方式,使烘干时间从 90 min 降到 60 min,效率约提高 30%,提高了烘干效率。陶向前[5]针对枸杞真空脉动烘干机存在的烘干室温度分布不均匀导致枸杞烘干不均匀的问题进行研究,通过数值模拟的方式对烘干箱结构进行优化。针对正交试验结果对烘干箱结构进行了优化,通过实验验证了结构优化后的烘干箱烘干室温度分布的均匀性和原烘干箱相比得到一定改善。张纪磊等[6]针对工业洗涤设备烘干机的低效能和高能耗问题,利用仿真方法分析了烘干机内部的压力、速度和温度对效率和能耗的影响。通过建立仿真模型,评估了烘干机的结构设计及改进方向。研究表明:优化后的流场设计提高了风干效率、温度均匀性和循环速度,减少了能量损耗。范建明[7]针对茶叶烘干机存在的主要问题,包括输送机构噪声过大、碎茶率偏高、烘干箱内温度场分布不均以及余热回收效率低等,进行了系统性分析。基于这些问题,提出了改进方案,对烘干机的输送机构、烘干箱内温度场布局及余热回收策略进行了优化设计。研发了一种新型链板循环式茶叶烘干机。该新型烘干机有效降低了输送机构的噪声,减少了碎茶率,优化了烘干箱内的温度场分布,并显著提升了余热回收效率。对热风烘干技术用于工业烘干设备的研究比较多,但对奶瓶热风烘干的研究比较缺乏。对容器烘干流场进行改进,主要体现在以下发明中。杜珊荔[8]发明一种可以根据具体的容器数量控制工作吹气管数量,且同时可以保证不同型号种类的容器烘干时稳定性的新型气流烘干机。桂青云[9]发明了一种玻璃容器烘干装置,该装置通过鼓风机将空气依次经过容纳腔、加热组件和气路,并从空心直杆的气孔排出,热气流迅速带走容器内的水分,实现玻璃容器的快速烘干。但目前对奶瓶烘干装置内部流场流动相关研究较少,因此,本文对奶瓶烘干装置内部流场流动进行了 CFD 模拟,为以后奶瓶烘干装置的设计提供一定的参考价值。

2. 奶瓶烘干装置结构及工作原理

本文的研究对象是某款奶瓶烘干装置(图 1)。该装置主要由进风口、排风口、支撑托盘、奶瓶和导风柱组成(图 2)。奶瓶烘干装置的工作原理如下：高速热风通过进风口进入装置内部，然后热风经过支撑托盘和导风柱流入奶瓶内部。在奶瓶内，高速热风对湿奶瓶进行加热，并通过对流传热和传质过程，实现奶瓶内水分的蒸发，从而达到烘干效果。为了反映烘干速度，该装置通过温度监测来跟踪达到预定烘干温度的进度。设置温度监测点可以实时记录奶瓶内部及周围环境的温度变化，从而评估烘干过程的效率。通过分析温度的上升速率和达到目标温度所需的时间，可以有效地评估装置的性能，并为优化烘干过程提供数据支持，从而提升整体效率。



Figure 1. Photo of the actual bottle dryer device
图 1. 奶瓶烘干装置实物图

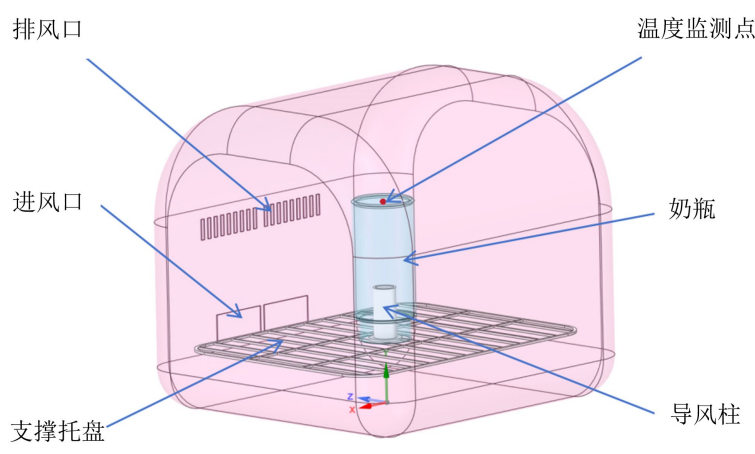


Figure 2. Schematic diagram of the bottle dryer device structure
图 2. 奶瓶烘干装置结构示意图

2.1. 理论模型建立与验证

本文使用 SolidWorks 软件建立了奶瓶烘干装置的三维模型。该装置的模型尺寸参数为：长度 339.5 mm，宽度 322 mm，高度 299 mm。奶瓶的计算容量为 160 mL，奶瓶模型尺寸为：高度 135 mm，瓶口宽度 50 mm，瓶身宽度 60 mm。导风柱的外径为 22 mm，内径为 18 mm，高度为 50 mm，托盘高度为 60 mm。为了在不影响计算精度的前提下加快计算收敛速度，缩短仿真计算时间，本次我们对烘干装置模型进行了适当简化，并采用了单个奶瓶进行仿真研究。

2.2. 数学模型

由于 $k-\omega$ SST 模型在壁面附近和自由流动区域都具有较好的表现，基于此本文采用该湍流模型进行

模拟。 $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport)模型是 $k-\omega$ 模型的一种改进版,结合了 $k-\epsilon$ 模型的优点以提高预测能力,特别是在处理湍流分离和低雷诺数流动时。它包括以下两个方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2)$$

式中, G_k 表示湍流的动能, G_ω 为 ω 的方程, Γ_k, Γ_ω 分别代表 k 与 ω 的有效扩散项, Y_k, Y_ω 分别代表 k 与 ω 的发散项。 D_ω 代表正交发散项, S_k 与 S_ω 为自定义项。

2.3. 物理模型及边界条件设置

通过 Fluent 软件对高速热风在烘干装置中的流动和温度分布特性进行模拟。本次模拟采用 k -omega SST 湍流模型,并启用了能量方程。空气入口设置为速度入口条件,入口速度为 2 m/s,进风温度设定为 70℃。求解过程中使用 SIMPLE 算法,初始温度设置为 20℃。温度监测点设置在(图 2)奶瓶底部中心位置,以跟踪和分析温度变化。

3. 仿真结果分析

奶瓶烘干装置的性能在有无导风柱的情况下有所不同,根据图 3 中的数据显示,尽管在有导风柱的设计下,烘干装置的温度曲线仅在前 10 秒左右呈现出一定的差异,在有导风柱情况下温度更高,但相比于无导风柱的设计,两种设计在达到目标烘干温度的时间上并未表现出显著差异,均在 40 秒后达到设定的烘干温度。这表明,导风柱对加快温度上升的效果较为有限。从数据可以看出,无论是有导风柱还是无导风柱的设计,温度曲线的变化幅度相对一致。这意味着导风柱在促进热风进入奶瓶内部以提升烘干效率方面的作用并不显著。虽然导风柱可能在改善气流分布方面有所帮助,但在实际应用中未能有效缩短达到烘干温度的时间。因此,为进一步提升奶瓶烘干装置的性能,对其他结构性因素进行深入研究和优化以寻求更有效的性能改进方案。

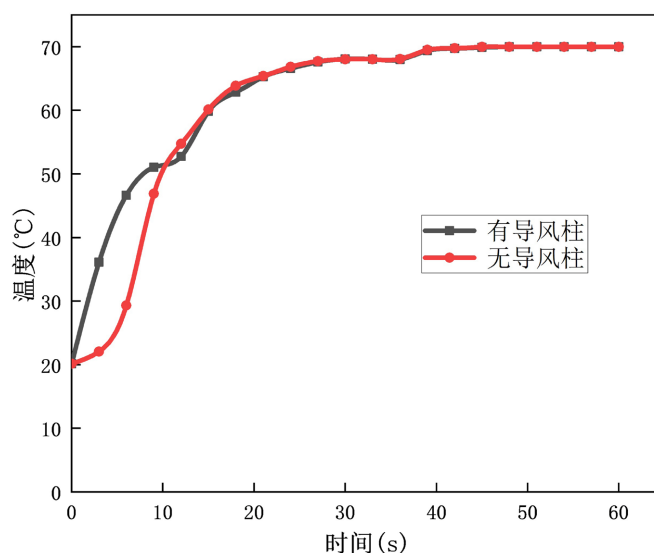


Figure 3. Temperature curve with and without airflow column
图 3. 有导风柱温度曲线图

考虑到导风柱在奶瓶烘干装置中的效能有限,对其几何尺寸进行了进一步探索。具体地,设置了五组不同高度的导风柱,分别为 10 mm、30 mm、50 mm、70 mm 和 90 mm,以评估这些高度对烘干温度的影响。仿真结果如图 4 显示,尽管导风柱的高度有所不同,达到预定烘干温度所需的时间差异并不显著。这表明,导风柱高度对装置达到目标温度的时间影响不大。通过分析数据,发现导风柱高度对温度上升速率和温度稳定性并未产生显著影响。这可能意味着其他设计参数(如导风柱的形状、结构及风流分布等)对烘干效果具有更为重要的作用。因此,为了进一步提升奶瓶烘干装置的性能,需要重点研究和优化这些设计因素,而不仅仅是调整导风柱的高度。综上,需要重新审视导风柱的设计与功能,并探索其他优化方案,包括改进空气流通路径、调整热风分布方式或优化其他结构设计,以更有效地提升烘干装置的整体性能。

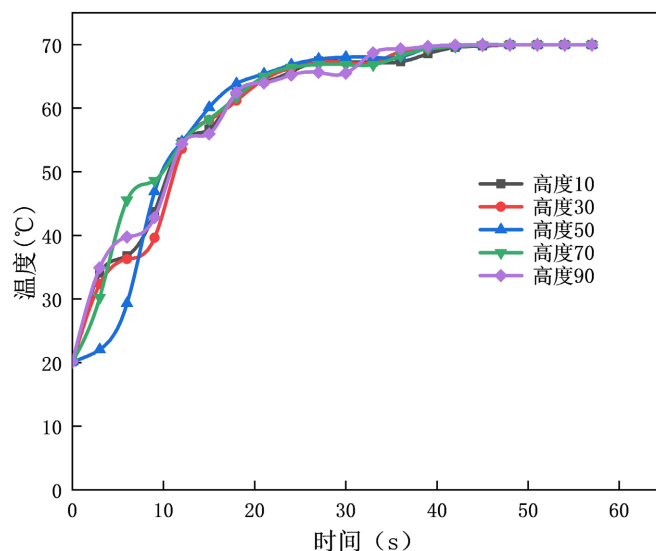


Figure 4. Temperature curve comparison with different airflow column heights

图 4. 导风柱高度对比温度曲线图

结构改进优化分析

对原有导风柱(图 5)进行了优化,将原托网格状托盘设计替换为单孔出气托盘,使进风口的热风只能通过托盘孔道,并沿导风柱直接进入奶瓶内部。此设计改进优化了热风的流动路径,使其更加集中且有效地进入奶瓶,同时在导风柱底部增加了支撑键。支撑键不仅增强了奶瓶的稳定性,确保其在干燥过程中的稳固放置,还扩大了奶瓶的进出风口面积,进一步促进了空气流通与热交换。这一结构优化有助于提升整体干燥效率。

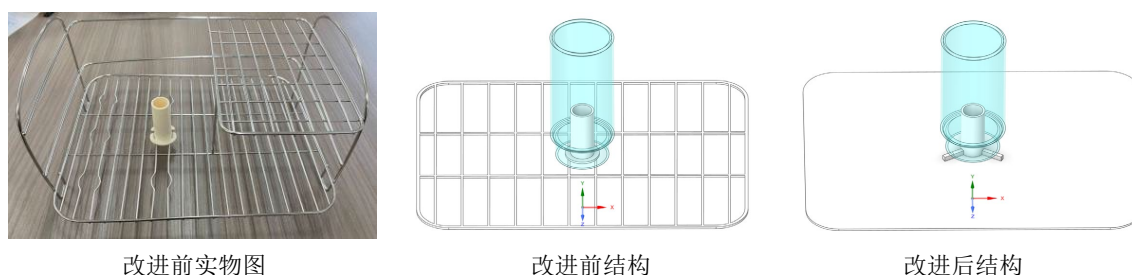


Figure 5. Schematic diagram of before and after the improvement

图 5. 改进前后示意图

通过对比图 6(a)、图 6(b)与图 7(a)、图 7(b)改进前后正面与侧面的流线图与矢量图可以看出,改进后的导风柱设计显著优化了气流分布。在奶瓶烘干装置内部,空气流动路径更加合理,能够覆盖整个奶瓶内部,有效避免了局部过热或气流死角产生,同时促进了合理的紊流分布。改进后的设计使空气与奶瓶表面的接触更加充分,大幅提升了传热效率。热风通过托盘孔道进入导风柱,在奶瓶内部形成稳定高效的热风循环。优化后的气流结构保证了奶瓶内部各部分均能够持续接触热风,从而有效避免干燥不均匀的问题。

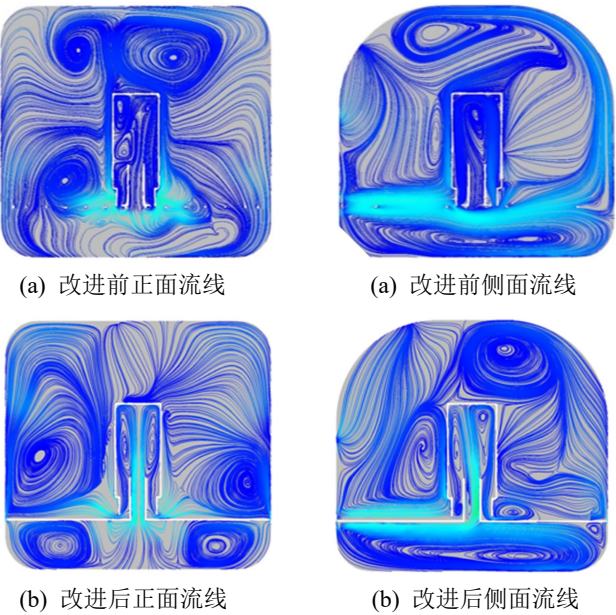


Figure 6. Comparison of streamline diagrams before and after the improvement. (a) Before improvement; (b) After improvement
图 6. 改进前后对比流线图。(a) 改进前; (b) 改进后

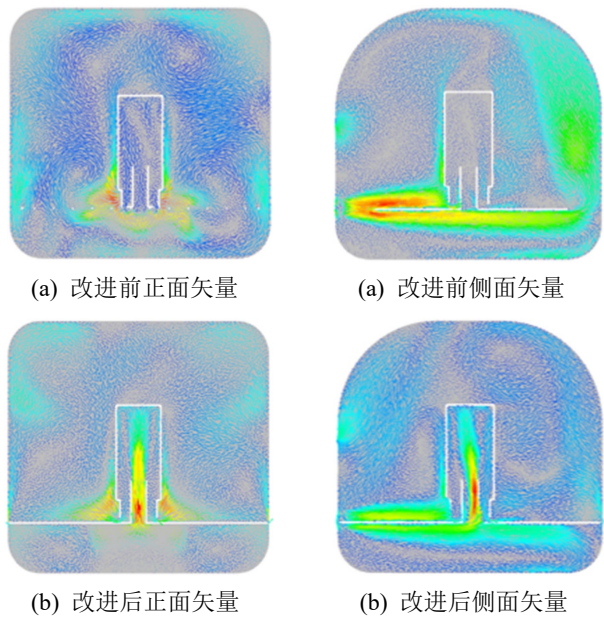


Figure 7. Comparison of vector graphics before and after the improvement. (a) Before improvement; (b) After improvement
图 7. 改进前后对比矢量图。(a) 改进前; (b) 改进后

通过对图 8(a)、图 8(b)与图 9(a)、图 9(b)从开始烘干不同时间段的改进前后正面和侧面烘干装置内部温度云图变化进行对比分析,由图可见改进后的奶瓶烘干机在温度上升速率方面展现了显著的性能提升,体现为改进后更短达到烘干温度。通过对风道结构的重新设计,改进后的烘干装置能够在烘干初期迅速将热量均匀传递至奶瓶内壁。

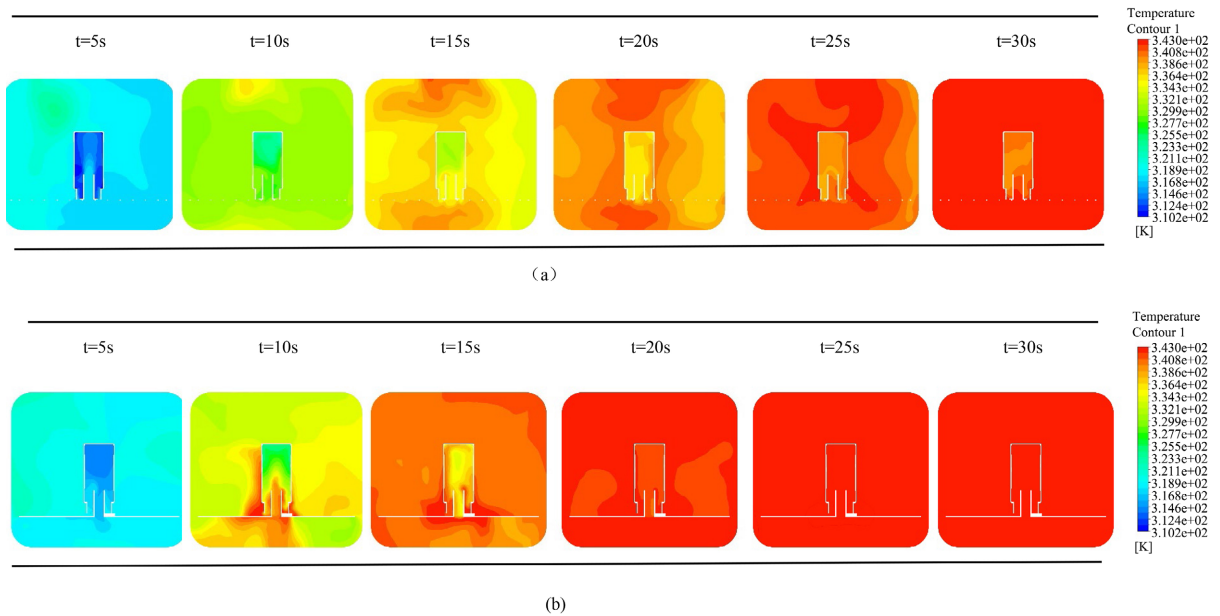


Figure 8. Front view temperature contour map before and after the improvement. (a) Before improvement; (b) After improvement

图 8. 改进前后正面温度云图。(a) 改进前; (b) 改进后

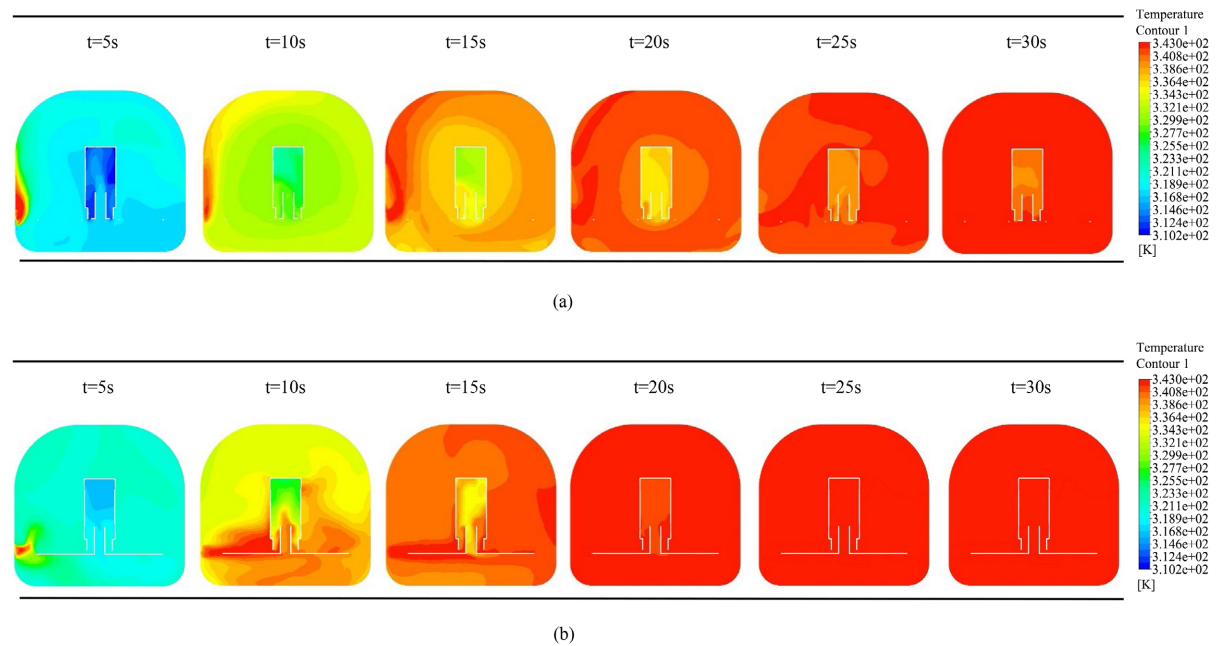


Figure 9. Side view temperature contour map before and after the improvement. (a) Before improvement; (b) After improvement

图 9. 改进前后侧面温度云图。(a) 改进前; (b) 改进后

图 10 数据显示,在相同工作条件下,改进后的烘干机相较于改进前,奶瓶内温度的上升速率显著提高,升温时间从原来的 40 秒缩短至约 20 秒,节省了约 40%的时间。这表明该改进设计能够更快速地使奶瓶达到烘干所需的温度,从而加快水分的蒸发过程,缩短整体烘干周期。进一步分析显示,温度上升的均匀性和速率的改善显著降低了湿气滞留的可能性,优化了干燥过程的均匀性,进而提高了烘干效率。同时,温度上升速率的提高也优化了热能利用效率,减少了能耗,显著提升了设备的节能性能。综上,改进后的烘干机在温度上升速率及其均匀性方面取得了显著进步,极大地提高了烘干效率与能源利用率,充分证明了结构改进的有效性。

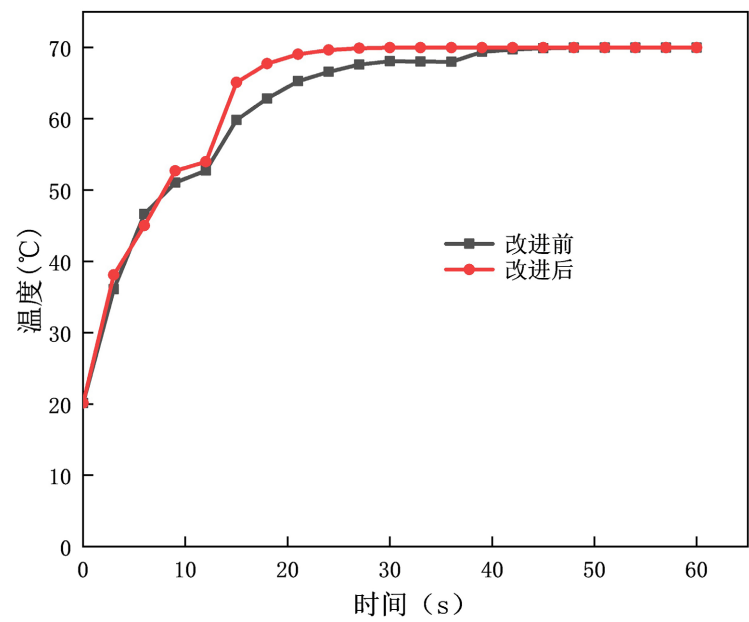


Figure 10. Comparison of temperature curves before and after structural improvement
图 10. 结构改进前后对比温度曲线图

4. 结论

本文基于现有的奶瓶烘干装置,在奶瓶底部设置温度测点,并运用 CFD 软件对奶瓶的热烘干过程进行模拟分析。对于烘干装置内部的流场而言,其结构设计是影响流场分布的关键因素。因此,本文提出通过调整装置结构来优化内部的温度场和流场。通过模拟分析,得出以下结论:

- 1) 安装导风柱后,奶瓶的烘干效果相较于未安装时提升较小。
- 2) 仅调整导风柱高度而不改动其他结构,烘干效果的提升不显著。
- 3) 对导风柱和托盘进行结构改进后提升了热风在奶瓶内的流动效果,减少了达到烘干温度的时间,对奶瓶烘干效率提升较大。

尽管本文改进后已经取得了一些进展,但从文中流线图分析奶瓶外部仍存在大型涡流,是否对烘干带来正面影响,以及未从流体力学角度具体解释分析导风柱对气流的影响等一些问题值得后续进一步研究与探讨。

参考文献

[1] 凌慧. 2022 年母婴家电市场分析[J]. 家用电器, 2022(10): 34-35.
[2] 艾瑞咨询. 中国互联网母婴行业研究报告 2018 年[C]//艾瑞咨询系列研究报告(2018 年第 11 期). 2018: 282-311.

-
- [3] Guo, X., Hao, Q., Qiao, X., Li, M., Qiu, Z., Zheng, Z., *et al.* (2023) An Evaluation of Different Pretreatment Methods of Hot-Air Drying of Garlic: Drying Characteristics, Energy Consumption and Quality Properties. *LWT*, **180**, Article ID: 114685. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114685>
- [4] 张振林, 马美华, 夏辉, 等. 提升热风烘干机能效的实践[J]. 纺织器材, 2023, 50(1): 53-55.
- [5] 陶向前. 枸杞真空脉动烘干箱结构参数优化及分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [6] 张纪磊, 伊廷刚, 邬士新, 等. 基于 FLUENT 的工业洗涤设备用烘干机流场仿真分析[J]. 装备制造技术, 2024(1): 112-114.
- [7] 范建明. 新型链板循环式茶叶烘干机结构优化设计[J]. 机电技术, 2024(1): 93-95.
- [8] 杜珊荔. 一种新型气流烘干机[P]. 中国专利, CN202211658210.0. 2023-04-11.
- [9] 桂青云. 一种玻璃容器烘干装置[P]. 中国专利, CN201911112618. 2020-01-21.