

基于Ansys Fluent的新型鞋胶隧道烘干设备 流场与温度场数值模拟及优化

姚瀚森¹, 吴明忠^{2*}, 彭静³, 赖德荣³

¹华侨大学制造工程研究院, 福建 厦门

²华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门

³福建春田新能源科技有限公司, 福建 泉州

收稿日期: 2026年3月18日; 录用日期: 2026年4月20日; 发布日期: 2026年6月16日

摘要

针对传统制鞋流水线中鞋胶烘干工序因内部流场无序导致的受热不均、局部脱胶与热能利用率低等痛点, 探究受限隧道空间内空气动力学布局对热活化质量的底层影响机理。文章以一款新型空气能热泵鞋胶烘干设备为研究对象, 采用计算流体力学(CFD)软件Ansys Fluent对其内部流场与温度场进行三维稳态与瞬态数值模拟。建立多面体网格模型, 选取Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 对比分析了同侧单向流与优化结构异侧环形流的流热耦合特性。通过对气动拓扑结构进行重构, 将出风口与回风口交错布置于传送带两侧, 在隧道内部激发涡旋环形流场, 增强了受限空间内的对流换热效率与温度场均匀性。仿真数据与热线风速仪实测数据(误差 < 5%)高度吻合, 验证了模型的可靠性, 为制鞋烘干装备的研发与流道设计提供了科学的理论依据。

关键词

鞋胶烘干, Ansys Fluent, 流场拓扑优化, 温度场均匀性

Numerical Simulation and Optimization of Flow and Temperature Fields in a Novel Shoe Glue Tunnel Drying Equipment Based on Ansys Fluent

Hansen Yao¹, Mingzhong Wu^{2*}, Jing Peng³, Derong Lai³

¹Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen Fujian

²College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen Fujian

³Fujian Chuntian New Energy Technology Co., Ltd., Quanzhou Fujian

*通讯作者。

文章引用: 姚瀚森, 吴明忠, 彭静, 赖德荣. 基于 Ansys Fluent 的新型鞋胶隧道烘干设备流场与温度场数值模拟及优化[J]. 仪器与设备, 2026, 14(2): 263-273. DOI: 10.12677/iae.2026.142031

Abstract

Addressing the pain points of uneven heating, localized degumming, and low thermal energy utilization caused by disordered internal flow fields in the shoe glue drying process of traditional shoe manufacturing production lines, this paper explores the underlying mechanism of the aerodynamic layout within a confined tunnel space on the quality of thermal activation. A novel air-source heat pump shoe glue drying equipment is used as the research object. Three-dimensional steady-state and transient numerical simulations of its internal flow and temperature fields are conducted using the computational fluid dynamics (CFD) software Ansys Fluent. A polyhedral mesh model is established, and a Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model is selected. The fluid-thermal coupling characteristics of unidirectional flow on the same side and annular flow on the opposite side of the optimized structure are compared and analyzed. By reconstructing the aerodynamic topology and staggering the air outlets and return air inlets on both sides of the conveyor belt, a vortex-like annular flow field is generated inside the tunnel, enhancing the convective heat transfer efficiency and temperature field uniformity within the confined space. Simulation data and measured data from a hot-wire anemometer (error < 5%) show high agreement, verifying the model's reliability and providing a scientific theoretical basis for the research and development and flow channel design of shoe drying equipment.

Keywords

Shoe Glue Drying, Ansys Fluent, Flow Field Topology Optimization, Temperature Field Uniformity

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

制鞋产业是全球重要的基础性消费品工业，而中国拥有全球最完备的制鞋产业链。在现代制鞋流水线中(图 1)，鞋面与鞋底的贴合工序是决定产品最终质量的关键环节。贴合前，需对涂抹在鞋底表面的处理剂和水性/油性聚氨酯胶水进行高温热活化烘干，以加速溶剂挥发并唤醒胶水的高分子粘性。



Figure 1. Main components of shoemaking processes

图 1. 制鞋的主要工艺组成

目前行业内广泛使用的传统电热隧道烘干设备,受传统红管电热效率局限,存在电热转换能耗高、车间存在热污染等环保问题,且其内部流场与温度场不均匀(图2)。传统设备往往采取简单的风机强排模式,内部气动流场混乱,将烘干隧道变成了一个不可视的“黑箱”[1]。这种无序的流场在宽幅传送带上易产生气流偏流与局部涡旋,导致同一批上的产品出现严重的受热不均现象——近风侧有机溶剂因过度受热而出现过烘现象、丧失粘性;远风侧有机溶剂则因处于“气流死区”,挥发不完全。这种温场失衡是导致成品鞋批量脱胶、制约制鞋企业提升产品附加值的核心问题。

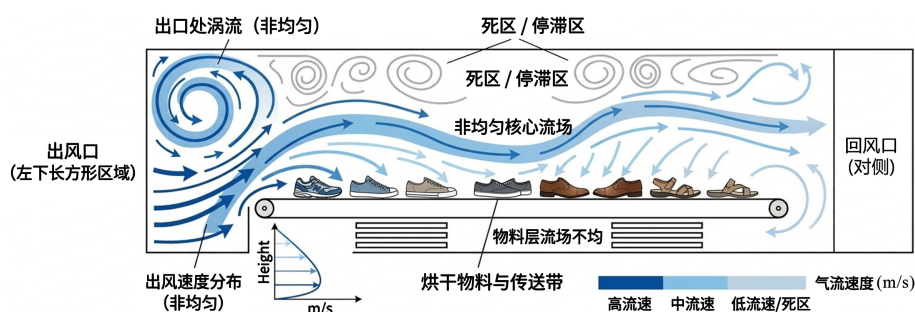


Figure 2. Schematic diagram of non-uniform flow field in the working area
图2. 工作区流场不均匀示意图

针对烘干质量不均的问题,单纯优化外部加热源功率已触及技术瓶颈,亟需深入探究设备内部的热流体动力学机制。传统装备研发高度依赖“物理样机试错法”,通过反复修改实体风管走向并测量出风口参数来调整设计。这种方法研发周期长、成本高昂,且受限于测量仪器的空间干涉,无法全景式、动态地捕捉隧道内部复杂的三维流热耦合演变过程。

随着计算流体力学(CFD)的飞速发展,以Ansys Fluent为代表的仿真模拟技术已被广泛应用于航空航天、汽车风洞及大型化工干燥装备的设计中(图3)。通过求解纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程与能量守恒方程,CFD技术能够在虚拟环境中精确复现流体流动与对流换热的微观细节,实现“黑箱可视化”,为受限空间内的气动布局优化提供了高效、低成本的技术路径。鞋胶烘干属于空间受限、伴随挥发物且对表面温度均匀度要求较高的特殊细分领域,目前针对该领域的三维数值模拟与拓扑结构优化研究仍较为匮乏[2]。

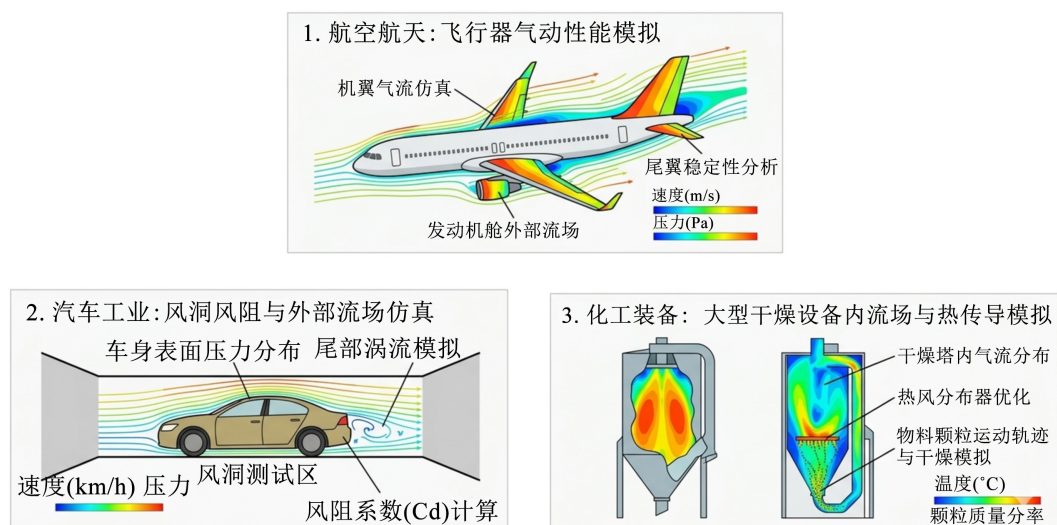


Figure 3. Some applications of Fluent simulation in industrial design
图3. Fluent 仿真模拟在工业设计中的部分应用

2. 研究内容与技术路线

针对上述传统烘干设备温场不均及物理试错成本高的工程实际问题, 本文以联合研发的新型空气能热泵鞋胶隧道烘干设备为依托, 利用 Ansys Fluent 软件对其核心受热温区开展流场与温度场的数值模拟。

在实际的产业化装备研发中, 烘干隧道内部空间狭长且处于封闭的高温工作状态, 常规的传感器多点测量难以完全捕捉气流组织的动态变化与热死角。借助 CFD 数值模拟来观测内部流体状态, 以此指导气动结构的改进, 具有显著的工程实用价值。本文的具体研究内容主要包括以下三个方面(图 4):

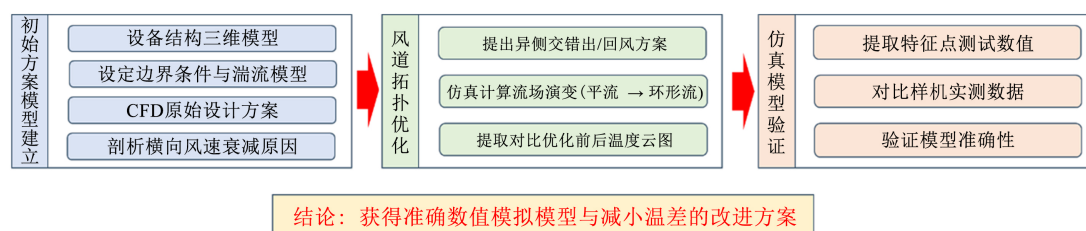


Figure 4. Research technology roadmap

图 4. 研究技术路线

依据实际设备的工程图纸, 建立包含贯流风机出风口、输送带、鞋品特征模型以及回风口的三维流域几何模型。通过设定合理的边界条件与湍流模型, 还原初始设计方案的气体流向与温度分布。从流体力学的角度, 定量剖析横向风速衰减导致远风侧出现“流场盲区”及横向温差过大的具体原因。

针对初始结构存在的横向温差缺陷, 在不增加风机能耗与总制热功率的前提下, 提出一种“异侧交错出/回风”的风道拓扑改进方案。通过仿真计算, 呈现流场由原先的“单向平流”向“涡旋环形流”演变的过程。提取并对比优化前后的输送带截面温度云图, 评估环形流场对缩小横向温差、提升鞋面受热均匀性的实际改善效果。

结合前期设备结构设计中的工程实践, 提取仿真模型中特定坐标点位的风速特征值, 将其与工程样机利用热线风速仪测得的实际物理数据进行误差比对, 以此验证本文数值计算模型的准确性与可靠性。

3. 几何模型构建与网格划分策略

计算流体力学(CFD)仿真在于用离散的数学模型去逼近真实的物理现象。鞋胶隧道烘干机内部包含极其复杂的流-热耦合过程, 建立科学合理的几何模型与网格系统, 是确保 Fluent 求解收敛结果准确的前提条件。

3.1. 物理模型提取与简化

在计算流体力学(CFD)数值模拟中, 仿真物体并非设备实体结构, 而是空气流经的“流体域”, 即实体结构内部的空腔部分。

模型简化基于流体力学与传热学假设, 烘干隧道内的气体流动主要受主风道拓扑结构和宏观障碍物的影响, 设备内壁的微小缝隙和表面粗糙度对整体宏观气流走向、压降的影响可忽略不计; 真实鞋底表面的复杂纹理虽在局部会产生微观尺度的流动分离与微小涡流, 但相对于隧道整体空间尺寸而言, 其对工件整体对流换热系数的改变有限。因此, 将鞋底模型简化为等效受热面积的半椭圆形凸起体, 保留物料对横向气流的空气动力学阻挡效应, 模拟热风在表面的对流换热过程, 确保壁面边界层网格的质量。模型假设设备双层保温外壳具有理想的绝热性能, 忽略热辐射以及外部环境温度对内部流场的热穿透影响。适度简化, 在确保三维流场拓扑结构和温场分布预测精度的前提下, 有效避免网格数量激增与求解震荡, 提升了计算效率[3] (图 5)。

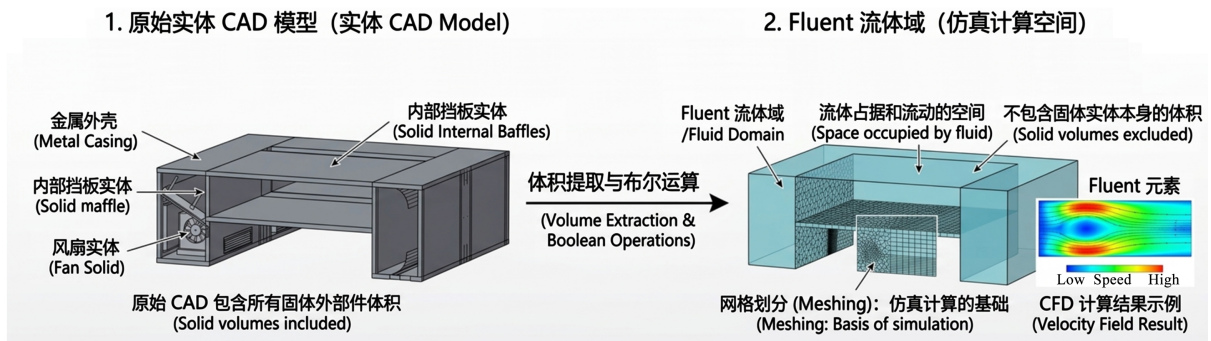


Figure 5. Schematic diagram of the fluid domain in Fluent simulation

图 5. Fluent 仿真中流体域示意图

提取热空气流经的有效内腔作为“流体域”。保留了烘干隧道的主体空间、两侧风机的进风口通道，以及平铺于输送带上的鞋底特征模型。实际生产中的鞋底纹理复杂，为提高网格质量，将流水线传送带上的鞋底统一简化为具有等效受热表面积 of 的半椭圆形凸起几何体。在真实反映流水线上工件对横向气流的阻挡与扰动作用的前提下，能够准确模拟热风在工件表面时的对流换热过程。

3.2. 流体域网格划分与局部网格加密

网格划分是将连续的流体空间分割为有限个微小计算单元的过程。采用 Meshing 模块生成多面体网格。相比于四面体网格，多面体网格在同等节点数量下拥有更多的相邻面，显著降低数值扩散，提高流场计算的收敛速度与精度[3]。

如图 6 所示，采取“全局控制与关键区域局部加密”相结合的策略进行网格尺寸控制。对烘干隧道中上部气流相对平缓的自由空间，采用较大尺寸的基础网格进行填充，以控制模型总节点数。设备的进出风口狭缝处存在极大的速度梯度。对这些区域施加了面网格局部加密。对风机出入口截面、整流风管内壁以及鞋底模型表面施加面网格尺寸限制与边界层网格控制。生成 5 层棱柱形边界层网格，捕捉近壁面区域的流体粘性底层效应和复杂的表面对流换热现象[4]。

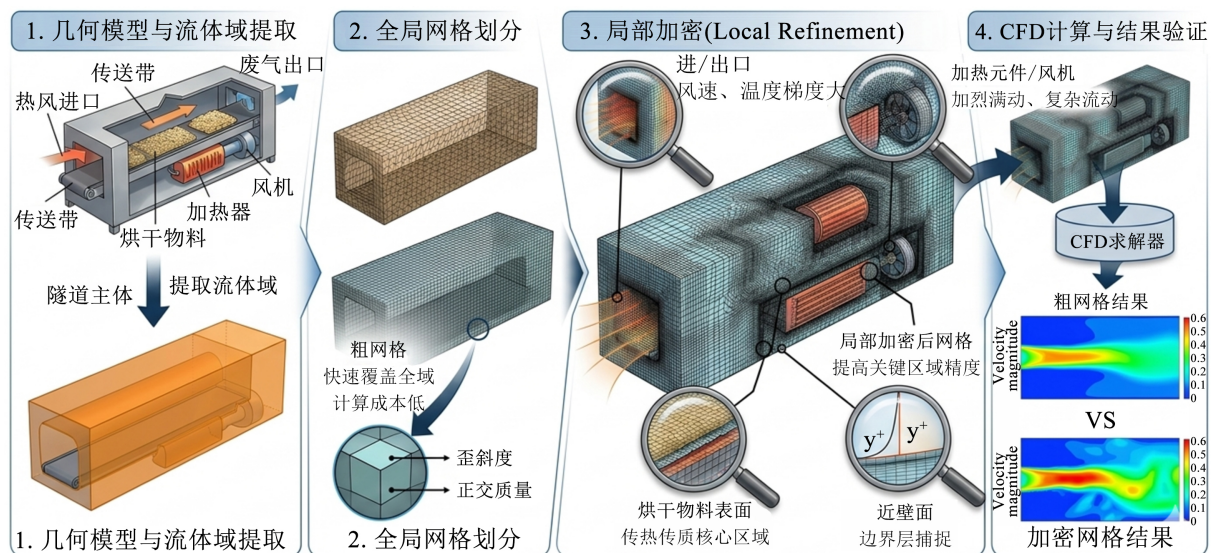


Figure 6. Mesh generation and local refinement

图 6. 网格划分与局部加密

3.3. 网格无关性验证

在数值模拟中，网格密度直接影响计算结果的准确性。网格过稀会导致流场细节丢失、结果失真；网格过密则会导致计算周期冗长，失去工程指导意义。为排除网格尺寸对最终仿真结果的干扰，本文设计了4套不同疏密程度的网格方案进行“网格无关性验证”。

在相同的边界条件和设定工况，输入风速与恒定热源功率下进行稳态计算，分别提取隧道截面中某固定监测点的最大气流速度和鞋底表面的平均受热温度作为评估指标。验证数据如表1所示。

Table 1. Calculation results for different mesh generation schemes

表 1. 不同网格划分方案的计算结果

网格方案	基础网格尺寸(mm)	局部加密尺寸(mm)	总体网格数量(万)
方案 1 (疏松)	35	15	85
方案 2 (常规)	25	8	145
方案 3 (细化)	18	4	220
方案 1 (极细)	12	2	360

如表1所示，当网格数量由方案1(85万)增加到方案2(145万)时，流速和温度监测值发生了明显的阶跃，较粗网格无法准确捕捉该受限空间内的流场特征。当网格进一步加密至方案3(220万)时，监测点最大流速达到3.48 m/s，鞋底均温稳定在69.3℃。继续将网格细化至方案4(360万)时，出风口流速与鞋底均温的相对变化率均已不足0.6%，数值基本趋于稳定，不再随网格密度的增加而产生明显波动，但单次计算耗时大幅增加。综合考量，选取方案3作为后续所有同侧出风与异侧环形流场对比仿真的标准网格模型。

4. 数值计算方法与边界条件设定

在利用 Ansys Fluent 对鞋胶烘干隧道进行流场与温度场数值模拟时，数学模型选择与边界条件设定是决定仿真结果是否具备工程指导价值的关键。本章将详细阐述计算所遵循的控制方程、湍流物理模型、边界参数设置及数值求解策略。

4.1. 数值仿真控制方程

隧道烘干机内部的热空气流动属于三维非稳态不可压缩流动。在仿真计算中，空气被视为连续介质，运动过程受三大基本物理定律控制，即质量守恒、动量守恒和能量守恒[5]。

① 连续性方程(质量守恒定律)

质量守恒是流体流动的基本约束，确保进入流体域的质量等于流出的质量加上累积量。假定烘干隧道内的热空气为不可压缩流体，遵循质量守恒定律。其连续性方程的微分形式如式：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

其中， u 、 v 、 w 分别为流体在 x 、 y 、 z 的速度分量。

② 动量守恒方程(Navier-Stokes 方程)

该方程描述了流体在各种力作用下的运动状态。在隧道烘干空间内，热空气受到压力梯度力、重力与流体分子间的粘性力共同作用[6]，其表达式为：

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (4.2)$$

其中, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$, p 为静压力, μ 为动力粘度。通过求解该方程, **Fluent** 能够捕捉到热风从出风口喷出后, 由于隧道内壁的阻挡及鞋底模型的扰动所产生的回流、涡流及速度衰减现象。

③ 能量守恒方程

本研究的核心目标是分析鞋表面的温场均匀性, 通过求解能量方程来模拟热交换过程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + S_h \quad (4.3)$$

其中, c_p 为定压比热容, k 为导热系数, S_h 代表体积热源项。该方程计入由于气流对流和空气热传导引起的能量转移[7], 是计算 85℃ 工作区温度的关键。

4.2. 湍流模型的深度筛选与确定

隧道烘干机内部气流流态十分复杂。由于热泵风机强力驱动, 出风口处的雷诺数 Re 远超临界值, 气流呈现高度紊乱的湍流特征。为描述这些微观涡流对宏观温场的影响, 引入封闭的湍流模型。本文对比了多种模型后, 选用了 **Realizable $k-\epsilon$** 湍流模型。相比于传统的标准 $k-\epsilon$ 模型, 引入了新的湍流粘度公式, 保证了在计算中满足 **Normal Stresses** 的数学约束, 避免了在压力梯度较大的区域出现负压或不收敛的情况[8]。模型适合处理具有强旋转、分离流和二次流特征的流场。为保证数值求解的精度与收敛性, 在 **Fluent** 中对湍流物理模型及控制方程的求解器进行了规范化设定。借助 **SIMPLEC** 算法进行压力-速度耦合, 各项空间离散格式均采用二阶精度以降低数值伪扩散, 具体的模型参数与求解器设置如表 2 所示。

Table 2. Main parameter settings for the turbulence model and solver

表 2. 湍流模型及求解器主要参数设定

参数类别	设定项	设定值/方法
湍流物理模型	模型选择	Realizable $k-\epsilon$
	近壁面处理方法	标准壁面函数
求解器类型	压力-速度耦合算法	SIMPLEC
空间离散格式	梯度	基于单元的最小二乘法
	压力	二阶格式
	动量	
	湍流动能	
	湍流耗散率	二阶迎风格式
	能量	

4.3. 边界条件设置与物理工况还原

为了使仿真模型能够真实反映样机的运行状态, 本文将实验测得的动力学参数转化为了 **Fluent** 中的边界条件(表 3)。入口边界设定出风口为速度入口。根据前期对贯流风机的实测, 将初始风速设定为 3 m/s, 方向垂直于出风截面; 考虑到热量从冷凝器输送到烘干隧道的过程中存在热损耗, 为了使工作区达到理想的 85℃, 将入口空气温度设定为恒定的 95℃; 出口边界将回风侧的吸风口设定为压力出口。为了模拟

实际的大气回风状态，静压设定为 0 Pa。软件会根据入口质量流量自动平衡出口的流速，仿真结果显示，回风侧平均风速在 2 m/s 左右，这与实验室测得的物理数据基本吻合；壁面边界设定为标准壁面，采用无滑移条件。考虑到设备采用了双风道保温结构，绝热性能较好，在热力学设置上将其壁面热流密度设定为 0。

Table 3. Main boundary conditions for numerical simulation of flow and temperature fields

表 3. 流场与温度场数值模拟主要边界条件设定

边界类型	设定位置	设定项	设定值/物理条件
入口边界	贯流风机出风口	边界条件类型	速度入口
		初始风速	3 m/s 垂直于出风面
		初始温度	95℃
出口边界	回风侧吸风口	边界条件类型	压力出口
		静压	0 Pa 模拟大气回流
壁面条件	烘干隧道内部	边界条件类型	固体壁面
	湍流动能	动量条件	无滑移边界条件
	湍流耗散率	热力学条件	热流密度 $q = 0 \text{ W}$

5. 烘干隧道流场仿真分析与结构优化方案

本章通过数值模拟手段，对烘干隧道内部的流场与温度场进行深度剖析。针对初始同侧出风结构存在的气动缺陷，提出基于流场拓扑重构的异侧环形流优化方案。通过对比分析两种气动布局下的速度场与温度场特征，论证环形流场在提升烘干质量上的决定性作用。

5.1. 初始结构流场缺陷溯源

初始设计方案采用同侧出/回风结构。图 7 仿真计算结果显示，该结构在受限的隧道空间内表现出明显的“单向流”特征，热风从一侧喷出后，受鞋底模型阻挡及空气粘性摩擦，动能消耗极快。近风侧平均风速约为 2.9 m/s，而横穿传送带到达远风侧时，风速衰减至 1 m/s 以下。这种速度失衡导致远风侧形成了明显的“气流停滞区”，空气搅动微弱。

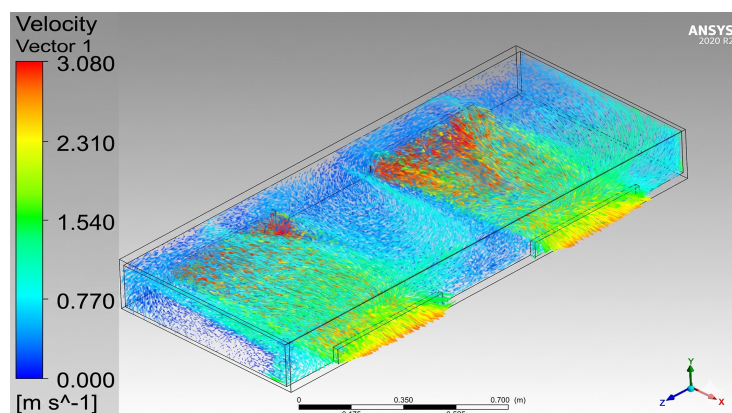


Figure 7. Simulation results of wind speed in unidirectional flow field

图 7. 单向流场风速仿真结果

流场的分布不均直接导致了热量的堆积与失衡。如图 8 所示，隧道横截面的温度梯度极高。近风侧直接受到高温热风的冲刷，局部温度接近 85℃；远风侧处于气流死区，主要依靠缓慢的热传导升温，温度仅在 70℃左右。这种“单向流”结构导致传送带横向的最大温差高达 15℃，极易造成同一排鞋底出现受热不均的质量问题。

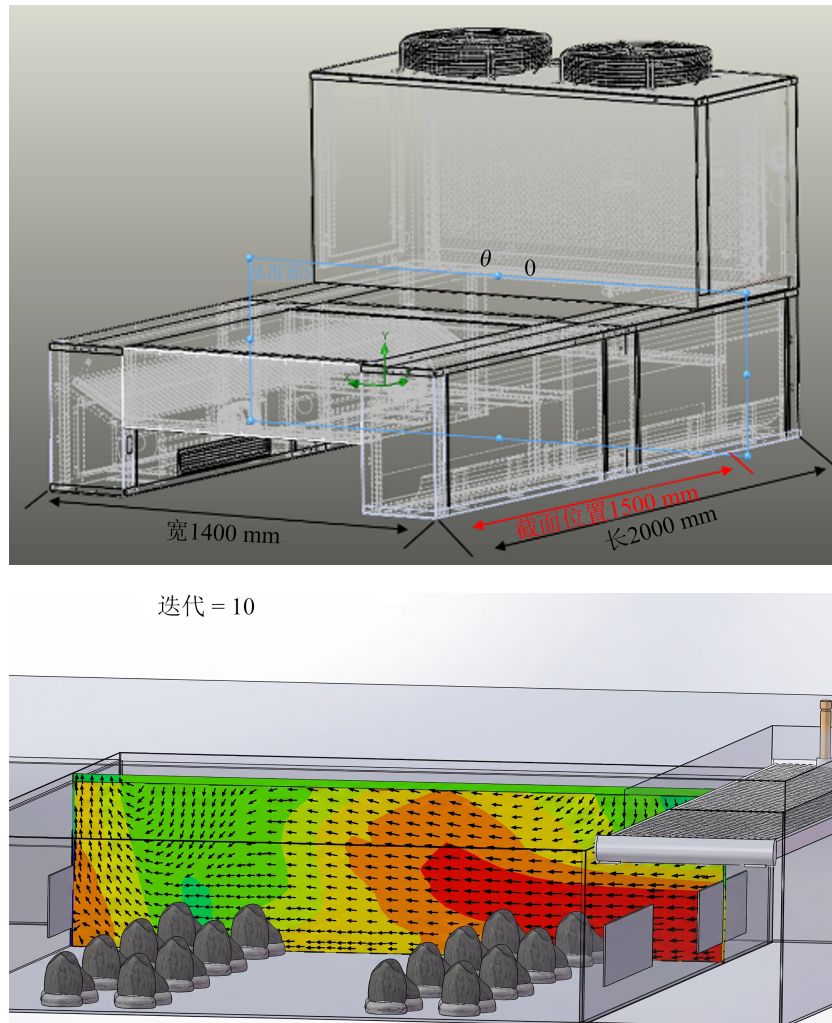


Figure 8. Simulation results of temperature and flow fields at the cross-section of unidirectional flow field
图 8. 单向流场截面位置温场流场仿真结果

5.2. 优化方案一：异侧交错布局下的环形流场重构

针对上述缺陷，本文提出了异侧交错出风的优化方案：将原同侧布置的出风口与回风口进行交叉对位布置，使两侧风机形成互补[9]。

① “涡旋环形流场”形成

重新进行数值模拟后，流场形态发生了根本性改变。如图 9 所示，从左侧喷出的热风与右侧喷出的热风在隧道中央区域发生剧烈交汇。由于两侧动量不平衡形成的剪切力，气流在隧道截面内被迫卷曲、上升，形成了一个大型的对流环。图 10 仿真显示，原本在远风侧的停滞区彻底消失，整个工作区的空气处于高速翻滚状态，极大地增强了对流换热的频率。

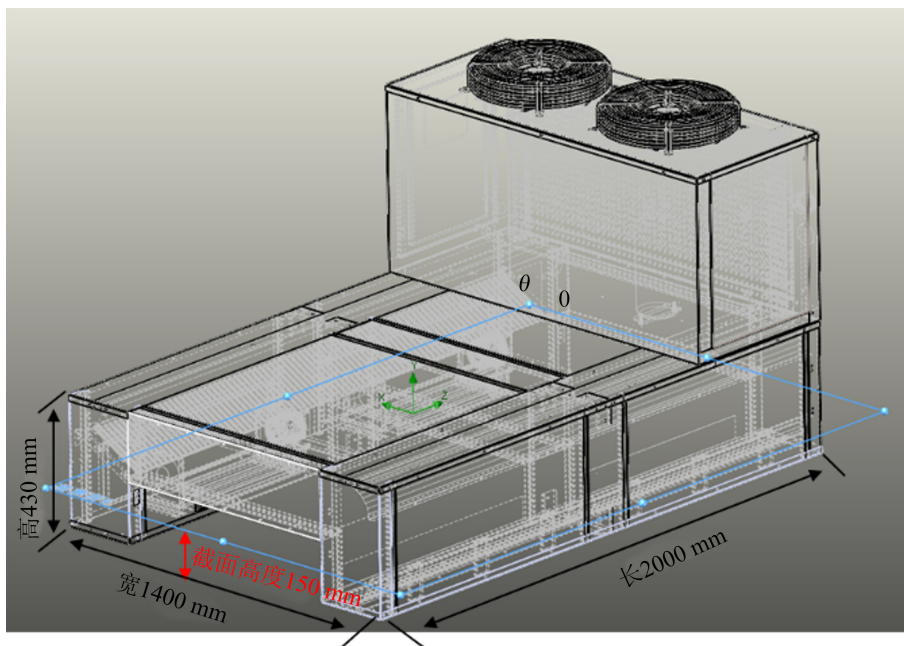


Figure 9. Schematic diagram of the location of the annular flow field section
图 9. 环形流场截面位置示意图

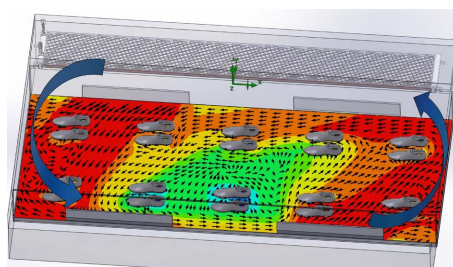


Figure 10. Velocity contour plot of the annular flow field
图 10. 环形流场速度云图

② 温度均匀性显著提升

在环形流场的强制搅动下，热量被带往隧道的各个区域。提取优化后的温度云图显示(图 11)，工作区的核心温度稳定在 85℃左右，分布均匀。15℃横向温差被压缩至 5℃以内。通过瞬态动画的关键帧提取，可以看到温场进入了极为稳定的平衡状态，有效避免了局部过热或活化不足。

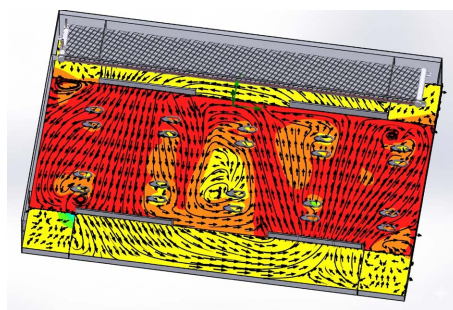


Figure 11. Temperature contour plot of the annular flow field
图 11. 环形流场温度云图

③ 鞋底表面受热质量的定量评价

为直观对比优化效果,沿传送带的横向 x 轴方向在鞋底表面选取了三个特征监测点:左侧、中间、右侧。表 4 汇总了两种方案在稳态工况下的监测数据。

Table 4. Comparison of temperature and wind speed at monitoring points on the sole surface before and after optimization
表 4. 优化前后鞋底表面监测点温度与风速对比

监测点位置	原方案风速(m/s)	原方案温度(°C)	新方案风速(m/s)	新方案温度(°C)
左侧区域	2.95	92.4	2.82	85.6
中间区域	1.85	81.5	2.45	82.8
右侧区域	0.95	71.2	2.78	84.3
横向极差	2	21.2	0.37	2.8

6. 结论

针对传统制鞋流水线鞋胶烘干工序中存在的受热不均、局部脱胶等工程痛点,本文借助计算流体力学(CFD)技术,对新型隧道烘干设备的内部受限空间开展了三维流热耦合数值模拟与气动拓扑优化。

1) 初始设计的“同侧出/回风”结构在受限隧道内会产生严重的横向速度衰减效应。仿真表明,热风横穿输送带后动能迅速耗散,在远风侧形成明显的气流停滞区。流场缺陷导致横向最大温差高达 15.5°C,是引发鞋胶活化质量不均的根本原因。

2) 提出将出风口与回风口交错布置的“异侧对流”气动优化方案。数值模拟证实,拓扑重构在隧道横截面内激发“涡旋环形流场”,消除了远风侧死区。在环形流场的强制对流搅动下,工作区鞋底表面的横向温差被严格控制在 5°C 以内,温度均匀性得到显著提升。基于多面体网格与 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型构建的 CFD 计算域,输出的出风口流速数据与工程样机的热线风速仪实测数据高度吻合,相对误差仅为 0.57%。

3) 本文揭示了宏观气动布局对隧道烘干设备热力学性能的底层影响机理。采用“异侧环形流”设计,无需增加额外的风机能耗与发热功率,即可实现热能的高效、均匀分配。研究有效降低了物理样机的试错成本,为高端制鞋烘干装备及同类工业通道式热处理设备的结构定型提供了可靠的数据支撑与数字化研发范式。

参考文献

- [1] 康宏彬, 邓先奋, 肖波, 等. 热泵干燥室的流场模拟及结构优化[J]. 农机化研究, 2024, 46(10): 15-20.
- [2] Cebulski, D. and Cyklis, P. (2024) Application of CFD Simulation to the Design of an Innovative Drying Chamber. *Energies*, 17, Article No. 3338. <https://doi.org/10.3390/en17133338>
- [3] 温正, 司马可. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [4] [美]约翰·安德森(John D. Anderson). 计算流体力学基础及其应用[M]. 吴颂平, 刘赵淼, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [5] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 孔珑. 工程流体力学[M]. 第 4 版. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [8] 曾德旺, 唐玉荣, 周龙, 等. 空气能热泵烘干房温度场、风速场仿真分析[J]. 建模与仿真, 2022, 11(1): 123-132.
- [9] 原野, 张洪生, 彭斌. 基于 CFD 的甘草切片烘干隧道结构优化设计[J]. 机械制造, 2016, 54(8): 5-8.