

# 基于空气能热泵与变频技术的鞋胶烘干设备结构设计及节能分析

姚瀚森<sup>1</sup>, 吴明忠<sup>2\*</sup>, 彭静<sup>3</sup>, 赖德荣<sup>3</sup>

<sup>1</sup>华侨大学制造工程研究院, 福建 厦门

<sup>2</sup>华侨大学机电及自动化学院, 福建 厦门

<sup>3</sup>福建春田科技有限公司, 福建 泉州

收稿日期: 2026年3月29日; 录用日期: 2026年4月22日; 发布日期: 2026年4月30日

## 摘要

针对制鞋行业传统电加热烘干设备能耗高、车间温湿度环境恶劣及存在消防隐患等痛点, 本文研发了一种基于空气能热泵与变频技术的新型智能鞋胶烘干设备。基于逆卡诺循环原理, 设计了内外物理隔离的双风道热力循环系统, 采用定制化9 kW级微通道冷凝器实现高效放热。针对传统烘干流场不均的问题, 引入贯流风机并依据流体力学“有效管长”原则加装整流风管, 将无序紊流转化为稳定二维层流, 使出风口风速极差小于0.05 m/s。实测及节能分析表明: 单组热泵烘干模块较传统电热模块直接运行能耗降低达62.0%; 结合热泵“一机两用”特性, 每日可产生相当于20.6 kWh电量的间接降温收益; 单组模块年度二氧化碳减排量约为12.3吨。设备在显著提升鞋胶热活化均匀度与良品率的同时, 大幅降低碳排放量, 为制鞋企业绿色转型提供技术支撑。

## 关键词

鞋胶烘干, 逆卡诺循环, 空气能热泵, 节能减排

# Structural Design and Energy-Saving Analysis of Shoe Glue Drying Equipment Based on Air Source Heat Pump and Variable Frequency Technology

Hansen Yao<sup>1</sup>, Mingzhong Wu<sup>2\*</sup>, Jing Peng<sup>3</sup>, Derong Lai<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen Fujian

<sup>2</sup>School of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen Fujian

<sup>3</sup>Fujian Chuntian Technology Co., Ltd., Quanzhou Fujian

\*通讯作者。

文章引用: 姚瀚森, 吴明忠, 彭静, 赖德荣. 基于空气能热泵与变频技术的鞋胶烘干设备结构设计及节能分析[J]. 机械工程与技术, 2026, 15(2): 238-249. DOI: 10.12677/met.2026.152025

## Abstract

Addressing the pain points of high energy consumption, harsh temperature and humidity environment, and fire hazards in traditional electric heating drying equipment in the shoe manufacturing industry, this paper develops a novel intelligent shoe glue drying equipment based on air source heat pump and variable frequency technology. Based on the reverse Carnot cycle principle, a dual-duct thermal circulation system with internal and external physical isolation is designed, and a customized 9kW microchannel condenser is used to achieve efficient heat release. To address the problem of uneven flow field in traditional drying, a cross-flow fan is introduced, and a rectifier duct is installed according to the “effective pipe length” principle of fluid mechanics, transforming disordered turbulent flow into stable two-dimensional laminar flow, resulting in an outlet air velocity difference of less than 0.05 m/s. Actual measurements and energy-saving analysis show that a single heat pump drying module reduces energy consumption by up to 62.0% compared to traditional electric heating modules. Combined with the “dual-purpose” characteristic of heat pumps, it can generate indirect cooling benefits equivalent to 20.6 kWh of electricity per day. The annual CO<sub>2</sub> emission reduction per module is approximately 12.3 tons. The equipment significantly improves the uniformity of thermal activation and yield of shoe adhesives while substantially reducing carbon emissions, providing technical support for the green transformation of footwear manufacturing enterprises.

## Keywords

Shoe Adhesive Drying, Reverse Carnot Cycle, Air Source Heat Pump, Energy Saving and Emission Reduction

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. 行业现状分析

### 1.1. 制鞋产业规模与发展趋势

#### (1) 全球与中国制鞋产业宏观规模

制鞋产业是全球重要的基础性消费品工业。根据《中国皮革行业深度分析报告》及历年产业统计数据显示,中国拥有全球最完备的制鞋产业链,长期稳居世界最大的制鞋基地与出口国地位。近年来,尽管面临全球产业链重构与外部环境波动,中国鞋类年产销量依然保持在巨大基数,年产量依然稳定在 120 亿至 130 亿双之间,占据了全球鞋类总产量的近半壁江山(如图 1)。在庞大的产能背后,支撑其运转的是高度密集的生产线集群。行业测算表明,按目前国内大中型制鞋企业的流水线平均节拍计算,为消化这超百亿双的产能,需要庞大的装备集群支撑。目前全国处于活跃状态的制鞋成型生产线总数量约为 15,000 至 20,000 条,存在着极为广阔的产能优化与老旧装备升级空间[1]-[3]。

#### (2) 泉州地区制鞋产业的核心地位与占比

从产业空间布局来看,我国制鞋业呈现出高度的产业集群化特征,其中以福建省泉州市,特别是晋江产区为核心的运动鞋服产业带,是全球最具影响力的制鞋中心。根据地方相关产业调研与公开报道,

泉州地区目前聚集了三千多家大大小小的制鞋企业，拥有的传统与现代化制鞋生产线数量保守估计已超过 5000 条，仅泉州一地的制鞋生产线数量就占据了全国总量的约 25%~30%。该地区不仅孕育了安踏、特步、361°、鸿星尔克等众多国内外知名品牌，其运动鞋产量占到全国的绝大比例，年产运动休闲鞋约占全球产量的 20% [4] [5]。

### (3) 行业发展趋势与热泵烘干机的市场前景

随着国家“碳达峰、碳中和”战略的全面推进，以及《工业能效提升行动计划》的实施，引导中小企业应用节能提效技术工艺装备，对标创建绿色工厂。分行业领域推动完善中小企业能效合作服务机制，面向中小企业开展各类节能服务，宣传推广节能提效改造案例[6]。

制鞋行业正处于由“规模扩张型”向“绿色低碳智造”转型的关键期[7]。庞大的生产线基数，一方面代表着极高的产业繁荣度，另一方面也意味着巨量能源消耗。传统高耗能的烘干设备已成为制约泉州本土乃至全国产线绿色升级的“卡脖子”环节。针对胶鞋烘干工序进行技术改造，引入高能效比的空气能热泵烘干机，是企业降低制造成本的内生需求。面对以“千、万”为单位的存量生产线替换市场，新型低能耗智能烘干设备具备极大的商业化潜能。

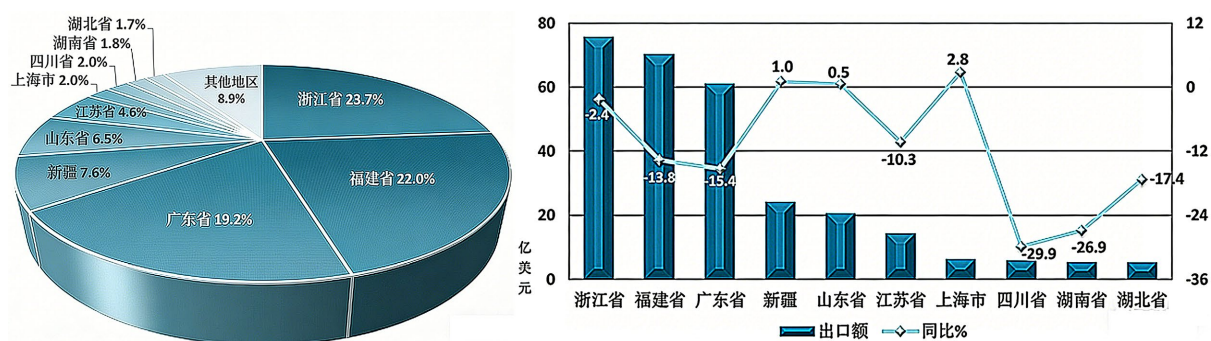


Figure 1. Market share of the footwear industry in various provinces

图 1. 制鞋行业各省市场份额

## 1.2. 烘干工艺在制鞋生产中的核心应用

在现代制鞋工艺特别是高端运动鞋的制造中，胶粘工艺是决定鞋品质量的关键环节，主要在于剥离强度、耐用度的评判。烘干机作为胶粘工艺的核心装备，广泛贯穿于整个生产流程，其应用主要集中在以下三个方面：

### ① 复合鞋底的鞋胶烘干与固化

高端运动鞋的底加工是一个复杂的多层复合过程。通常分为外底、中底以及鞋垫/内底等部分。如图 2，为追求轻量化与缓震回弹，常采用 EVA 发泡材质作为中底；为增加防滑与耐磨性，在频繁摩擦的后跟外腰与前掌内腰部位，拼接高耐磨橡胶外底。不同化学特性的材质在复合时，必须依赖专用的处理剂和鞋胶进行固定。所有需要粘附的接触面在涂胶后，都必须经过严格的加热烘干工序，以挥发溶剂并激活胶水分子，从而达到最佳的粘合强度。

### ② 面底贴合(鞋面与大底)的烘干与热活化

面底贴合不仅是制鞋流水线上最核心的成型工序(图 3)，更是决定成品鞋结构强度与使用寿命的关键环节。该工序的复杂性在于，它需要将两种或多种物理特性不同的材质进行高强度结合，如织物/皮革鞋面与橡胶/EVA 复合大底。

操作人员需将已经定型后套在鞋楦上的成品鞋面，与完成复合的大底，严格依照事先画好的定位



Figure 2. Composition of athletic shoe soles  
图 2. 运动鞋鞋底的组成

裁断 CUTTING	组底 STOCK FITTING
 <p>精准裁好每一块布料</p>	 <p>组装大底、橡胶和功能垫片</p>
针车 STITCHING	成型 ASSEMBLING
 <p>把布料和配件缝合成鞋面</p>	 <p>组装鞋面鞋底，打造完美鞋型</p>

Figure 3. Main components of shoemaking processes  
图 3. 制鞋主要工艺组成

标线进行打磨和表面处理。在双面上均匀涂抹专用的底料处理剂和强力面胶。涂胶后的鞋材必须立即送入隧道式烘干机。此时烘干机承担着双重物理化学任务，通过特定的风速与热量，快速挥发掉胶水与处理剂中的液态有机溶剂；更关键的是“热活化”过程——利用高温(通常需精准控制在  $60^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$  之间)使固态的聚氨酯胶水分子链活跃，达到最佳的初粘性与流动性状态。在热活化阶段，烘干隧道内部的温度均匀度与气流稳定性直接决定了成品的良品率。若温度过低或存在冷角，胶水无法完全活化会导致“假性粘合”，鞋子在后期穿着中极易出现严重的脱胶现象。若局部温度过高或风速不均，可能会将胶水吹出定位线，导致成型后出现溢胶，严重影响外观品质；持续的局部高温也可能导致鞋面材质发生不可逆的热变形或黄变。

### ③ 高温杀菌消毒与定型辅助

除了鞋胶的活化，烘干设备在运行过程中产生的高温环境，还能有效杀灭各类鞋材在仓储和流转过程中附着的细菌与霉菌，同时高温热风也有助于鞋面材质的内应力释放，辅助鞋型固定，提升出厂产品的整体卫生标准与外观挺括度。

## 1.3. 传统制鞋烘干设备存在的痛点分析

目前泉州、晋江等产区大量使用的传统隧道式烘干机，主要以红外线电热管或纯电阻丝作为热源，已暴露出严重的行业痛点。

传统电热烘干的电热转换效率存在物理上限，且设备保温性能普遍较差，热能利用率低下。高昂的

电费已成为制鞋企业极其沉重的运营成本负担；传统设备在运行中会有大量高温热浪直接外溢散失到车间内。在泉州等南方地区的夏季，厂房内部温度常因此飙升至 40℃ 以上，这不仅大幅增加了车间降温空调的额外负荷，极其恶劣的高温环境也严重影响了一线工人的身心健康，导致招工难、留人难及生产效率下降；制鞋使用的处理剂与胶水大多含有挥发性有机化合物。传统电热管在工作时表面温度极高，当烘干隧道内局部通风不畅、有机废气浓度积聚超标时，极易引发爆燃与火灾事故，给企业带来不可估量的生命财产风险。

综上所述，研发一款能够突破传统电加热瓶颈的新一代烘干设备，已成为制鞋行业亟待解决的技术命题。

## 2. 基于逆卡诺循环的空气能热泵技术原理

传统制鞋烘干设备采用电阻丝或电热管直接加热，本质是基于焦耳定律将电能转化为热能，受物理定律限制，其电热转换效率(COP)永远无法突破 1.0 (100%)。为了实现能耗的显著下降，项目引入了基于“逆卡诺循环(Reverse Carnot Cycle)”的空气能热泵技术，核心理念从“制造热量”转变为“搬运热量” [8]。

### 2.1. 逆卡诺循环的热力学基础

根据热力学第二定律，热量自发地只能从高温物体传向低温物体。若要实现热量从低温热源向高温热源的逆向转移，则必须消耗一定的外部机械功或电功。逆卡诺循环正是实现这一过程的理想热力学模型[8]。

空气能热泵系统以低沸点的制冷剂，如 R410A 或 R134a 等环保冷媒作为实现热、功转换的工作物质，通过密闭管路在四大核心部件，蒸发器、压缩机、冷凝器、膨胀阀中不断进行状态相变，从而完成从环境中吸热并向目标空间放热的热力学循环[9]。

### 2.2. 系统的核心工作流程

结合本烘干设备的实际工况，空气能热泵的工作流程可分为以下四个连续的热力学过程(图 4)：

#### ① 蒸发器——等温吸热

处于低温低压状态的液态制冷剂进入位于设备外循环侧的蒸发器。由于制冷剂沸点极低，它能够轻易吸收制鞋车间环境空气中的热能，并在此过程中沸腾汽化，转变为低温低压的气态工质。此阶段蒸发器吸收大量环境热量，排出的空气温度显著降低，这部分干燥冷风被直接排放至车间内，起到了“逆向空调”的降温作用。

#### ② 压缩机——绝热压缩

低温低压的气态制冷剂被吸入变频压缩机。压缩机消耗电能对其进行做功加压，制冷剂气体的分子间距被剧烈压缩，内能急剧增加，转变为高温高压的过热蒸汽后被泵入冷凝器。

#### ③ 冷凝器——等温放热

高温高压的制冷剂气体进入位于烘干隧道内部的冷凝器。在贯流风机的强制对流作用下，高温制冷剂与隧道内的循环冷空气进行热交换。制冷剂释放出大量的潜热，加热隧道内的空气达到鞋胶热活化所需的工艺温度。放热后的制冷剂则由气态冷凝液化为高温高压的液态。

#### ④ 膨胀阀——绝热膨胀

高温高压的液态制冷剂流经电子膨胀阀进行节流降压。在通过狭窄阀孔的瞬间，其压力与温度骤降，重新变回低温低压的液态工质后再次进入蒸发器，完成一个完整的闭合循环。

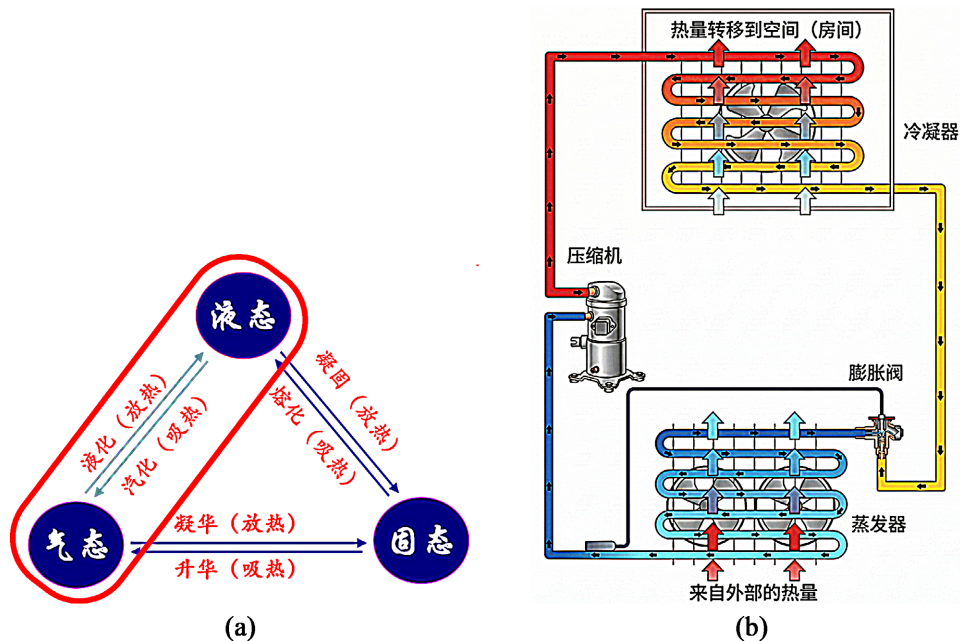


Figure 4. (a) Physical phase transformation process; (b) Working principle of air source heat pump  
图 4. (a) 物理变相过程; (b) 空气能热泵工作原理

### 2.3. 能效比(COP)与“一机两用”的节能机理

热泵系统的节能性由性能系数(Coefficient of Performance, 简称 COP)来衡量。在制热模式下, 其计算公式为:

$$COP = \frac{Q_{out}}{W} \quad (2.1)$$

$Q_{out}$  为冷凝器释放到烘干隧道内的总热量;  $W$  为压缩机消耗的电能。

根据能量守恒定律, 冷凝器释放的总热量等于蒸发器从空气中吸收的热量  $Q_{in}$  加上压缩机做功消耗的电能  $W$ , 即

$$Q_{out} = Q_{in} + W \quad (2.2)$$

由于系统大部分热量来源于免费的环境空气  $Q_{in}$ , 因此  $Q_{out}$  远大于  $W$ 。在泉州等南方地区常温工况下, 热泵烘干系统的综合制热 COP 通常可达 3.0~4.0。设备每消耗 1 单位的电能, 就能向烘干隧道内输送 3 到 4 单位的热能。本设备打破了传统单向加热的能耗孤岛, 实现了“一机两用”的热力学能量守恒。在隧道内部高效产热烘干有机溶剂的同时, 外部副产物是源源不断的冷空气。这种冷热双侧的高效利用, 不仅实现电加热烘干能耗的锐减, 更抵消了车间夏季昂贵的空调降温费用, 大幅提高系统整体的综合能源利用率。

## 3. 结合空气能热泵的新型烘干设备结构设计

针对现代制鞋工艺对温度均匀性及风速流场的严苛要求, 项目在设备机械结构与气动布局上进行创新与优化, 将逆卡诺循环系统与传统的隧道式流水线进行融合。

### 3.1. 总体双风道热力循环结构设计

传统隧道烘干机通常采用开放式或半开放式单风道结构(图 5), 导致大量高品位热能直接散失到车间,

易在隧道进出口形成冷热空气对流,造成内部温场的大幅波动。为解决这一问题,采用模块化隧道式框架,在气动结构上设计了“内循环热风道”与“外循环冷风道”完全物理隔离的双风道系统。

根据结构设计图纸,热泵组件布置于设备的底部与侧边空间。在内循环热风道侧,冷凝器的出风口宽度设定为 262.0 mm,精准对接隧道内部的受热区;而冷凝回风口宽度扩大至 360.0 mm。这种“窄出宽回”的非对称风口设计遵循空气动力学原理,利用文丘里效应(Venturi Effect)增加了内部热风的循环流速,使高温热空气在隧道内形成密闭的内循环,使其能够以更高的风速强力穿透传送带上的鞋底复合层;而较宽的回风口则有效降低了回风阻力,避免了风机前端产生局部负压涡流,两者配合使高温热空气在隧道内形成了一个阻力极小、流速均匀的密闭内循环[10]。

在外循环冷风道侧,设置了加厚的高密度聚氨酯发泡保温隔层,阻断内外侧的热桥效应。蒸发器在吸收环境热量后产生的干燥冷风,通过特定的导流风管,被定向引流至车间流水线的工人操作工位。系统电控箱巧妙布局于冷风道的回风侧与新风侧,利用这部分天然的冷气对变频器等发热电子元器件进行强制风冷,大幅提升了控制系统的运行稳定性。

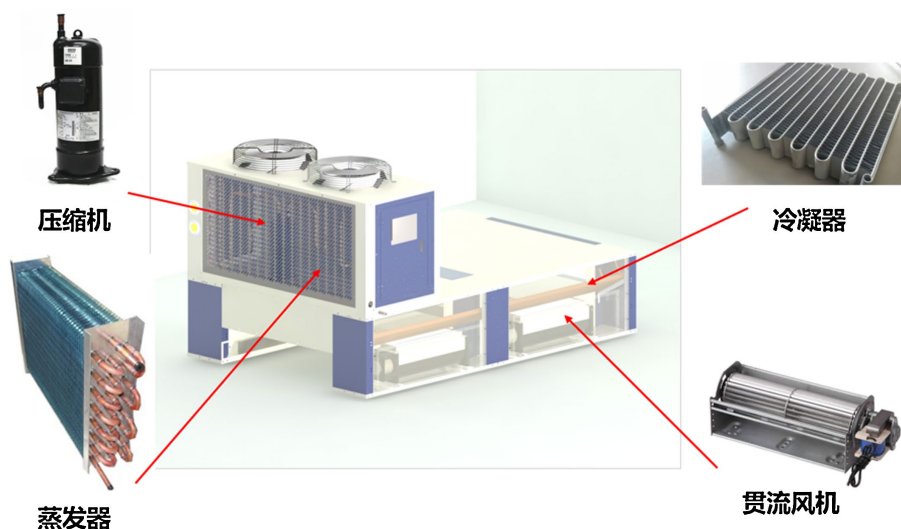


Figure 5. Overall structure of a single-channel shoe glue dryer  
图 5. 单通道式鞋胶烘干机整体结构

### 3.2. 适应高强度工况的换热器设计

在受限的设备内部空间中,为了最大化热泵系统的换热效率(COP),本设备摒弃了市面通用的冷凝器,定制 9 KW 级微通道换热结构。根据设计规范,换热器的核心参数进行结构优化。

根据核心零部件图纸规范,该换热器总长度达到 1940 mm,适配了烘干隧道的纵向加热温区。换热器采用  $\phi 32$  mm 直径集流管,以保证高温高压制冷剂在 9 KW 大负荷下的充足流量;内部循环管舍弃了传统的圆管,改用 26×2 mm 微通道扁管。扁管迎风面积小,有效降低空气侧的流动阻力,减轻贯流风机的负载,提升管内制冷剂与管外空气的换热系数。

换热翅片规格设定为 26×0.08 mm,翅片高度为 8 mm,核心参数 FPI 每英寸翅片数设定为 20。高密度的翅片布局,在系统允许的风压降范围内,极限扩充了空气侧的换热表面积。配合智能变频压缩机的负荷调节,高频翅片能够快速将制冷剂的潜热散发,有效避免了因局部热量堆积导致的系统高压报警,确保了设备在 80℃~120℃持续高温烘干工况下的长期稳定运行。

换热翅片规格设定为 26 × 0.08 mm,翅片高度为 8.0 mm。最关键的是,其 FPI (每英寸翅片数)被精

准设定为 20。

这种高密度的翅片布局，在风阻允许的范围内极限扩充了空气侧的换热面积。配合智能变频压缩机的负荷调节，系统能够快速响应隧道内部的温差波动，有效避免了因局部热量堆积导致的冷凝压力过高问题，确保了设备在 60℃~80℃ 烘干工况下的长期稳定运行。

### 3.3. 基于“有效管长”的贯流风机气动布局

鞋胶热活化的质量高度依赖于鞋底表面风速与温度的均匀性。传统烘干机多采用轴流风机，易在宽幅传送带上产生紊流、漩涡以及“风力盲区”。为解决这一流场缺陷，设备选用某品牌型号的贯流风机。其气流贯穿叶轮流动，能够输出宽域且均匀的二维层流，契合隧道式几何特征。为进一步消除出口气流的脉动，引入了流体力学中的“有效管长”原则对出风道进行整流计算。(图 6)

以单组 100 W 贯流风机，根据风机测试报告可知额定风量 352 m<sup>3</sup>/h，在有效出风面 491.5 mm × 56 mm 条件下，依据流体力学中有效管长需达到当量直径 2.5 倍的原则[11]，在风机出口处增加了一段 50 mm 的整流风管。理论测算下，该出风口的截面风速应稳定在 3.5 m/s 左右。(图 7)

为验证整流风管的实际气动效果，针对无导流管原结构与增加风管整流结构进行了多距离截面的风速对比测试。待主机运行稳定后(15 分钟以上)测试隧道内部温度场：主要测试是否存在涡流、中间

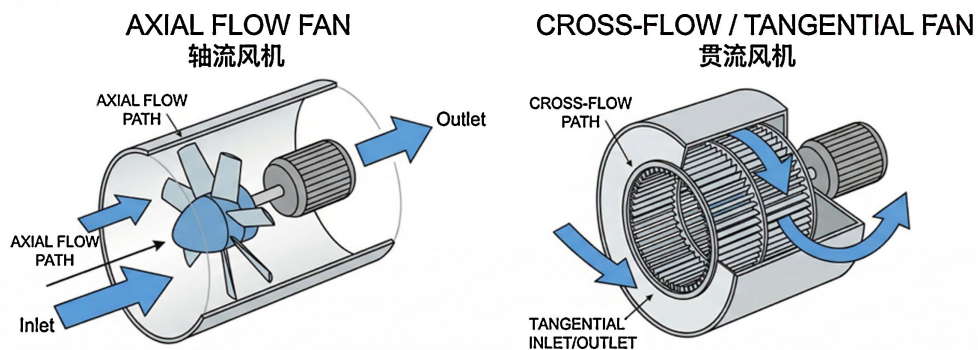


Figure 6. Structural comparison between axial flow fans and cross flow fans

图 6. 轴流风机与贯流风机结构对比

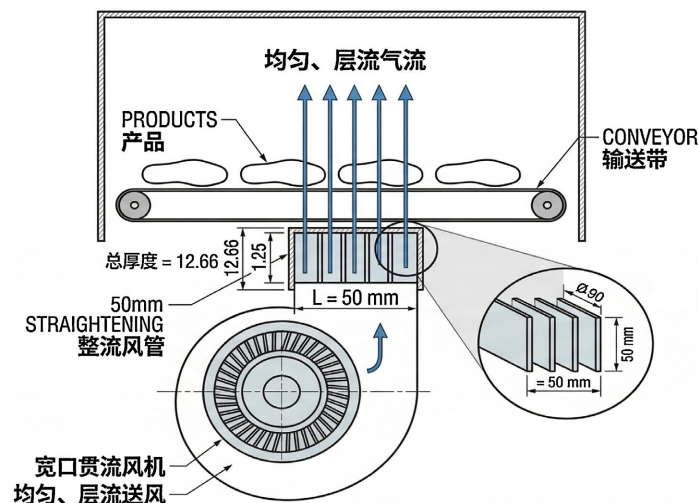


Figure 7. Schematic diagram of duct airflow optimization

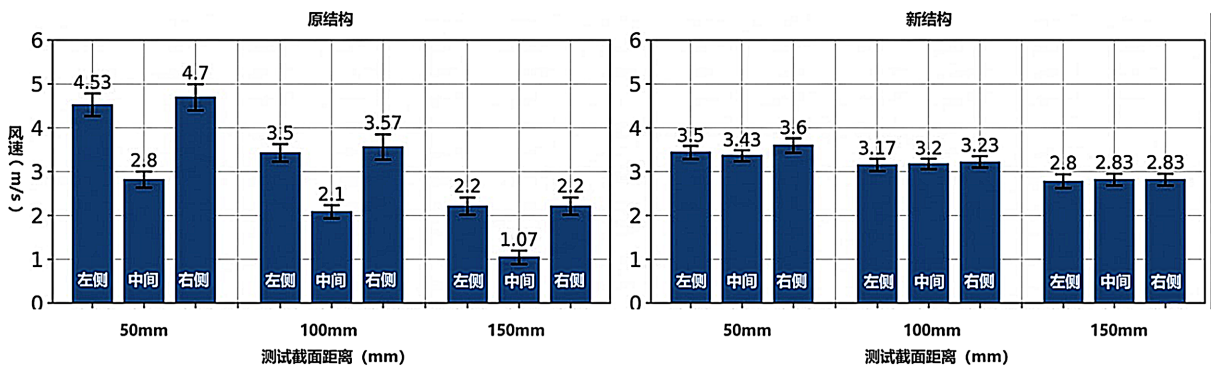
图 7. 风管气流优化示意图

流点温度、烘干工作区温度等，单个隧道截面测试 9 个温度点，测试分别在距离出风口 50 mm、100 mm、150 mm 的位置，以及左、中、右三个横向特征点进行，分三个温度工况测试，分别为 55℃；65℃；75℃ 实测数据如下图 8、图 9 分析：

**Table 1.** Measured wind speed data for different cross-sections (partial)

**表 1.** 不同截面风速实测数据(部分)

截面距离 点位	50 mm			100 mm			150 mm			
	左侧	中间	右侧	左侧	中间	右侧	左侧	中间	右侧	
原结构	组 1	4.8	2.6	4.9	3.5	1.8	3.7	2.2	0.9	2.1
	组 2	4.6	2.8	4.7	3.3	2.0	3.5	2.0	1.1	2.2
	组 3	4.2	3.0	4.5	3.7	2.5	3.5	2.4	1.2	2.3
新结构	组 1	3.5	3.4	3.6	3.2	3.2	3.3	2.9	2.8	2.9
	组 2	3.6	3.5	3.5	3.1	3.3	3.2	2.8	2.9	2.8
	组 3	3.4	3.4	3.7	3.2	3.1	3.2	2.7	2.8	2.8



**Figure 8.** Wind speed data for different cross sections

**图 8.** 不同截面风速数据图



**Figure 9.** Test results under different temperature conditions

**图 9.** 不同温度工况测试图

由表 1 可知,在未加装整流风管的原结构中,出风口 50 mm 处横向极差较大,左/右侧平均高达 4.61 m/s,而中间仅为 2.80 m/s。随着纵向距离下探至截面距离 150 mm 工作区时,中间区域风速降至不足 1.0 m/s。流场发散严重,测试数据在同一维度的波动较大,空间内存在无序紊流。不均匀且不稳定的流场易造成同一批鞋底胶水的活化程度不一,是导致鞋品批量脱胶的重要诱因。

对比表 1 新结构风速数据,加装 50 mm 整流风管后,出风气流的均流与稳压效果显著跃升,高度契合理论计算值。在 50 mm 截面处左、中、右平均风速稳定在 3.48~3.51 m/s 之间,印证前期依据“有效管长”推导出的 3.5 m/s 理论流速。横向流场均匀且稳定,在任意深度截面下左、中、右三点的横向风速极差均被严格压缩在 0.05 m/s 平均值极差以内,且测试数据的组间波动极小,证明气流已形成稳定的二维层流。紊流被消除后,气流的纵向动能损耗大幅降低。即便在 150 mm 的底部空间,平均风速能保持在 2.80~2.90 m/s 区间,确保传送带上不同高度与位置的鞋材均能获得一致的烘干风压。

## 4. 节能与综合效益对比分析

为量化本设备的实际应用价值,以一条标准制鞋流水线中的单组 9 KW 级烘干模块为测算基准。采用传统纯电加热的旧式烘干模块,与搭载新结构设计的空气能热泵烘干模块进行同等工况,即目标烘干温度 70℃,日均运行 10 小时,年运行 300 天下的对比测试与测算。综合效益体现在运行电耗降低、间接降温电耗节省以及碳减排三个维度。

### 4.1. 运行电耗降低分析

为确保节能对比数据的科学性与对比基准的合理性,构建了标准化对照组。选取目前制鞋产线上广泛使用的主流旧式纯电加热烘干模块作为对照组,与本文研发的新型热泵实验组进行对比。两种模块均负责单段 2 米长隧道的烘干工艺。对照组与实验组的具体规格与关键参数如表 2 所示。

**Table 2.** Comparison of key parameters between traditional electric heating modules and new heat pump modules  
**表 2.** 传统电热模块与新型热泵模块关键参数对比

关键维度参数	传统电热对照组	变频热泵实验组
核心加热方式	红外线电热管直排加热	微通道冷凝器空气能热泵换热
设备额定总功率	10.0 kW	3.8 kW
加热端输入功率	9.0 kW (3 组 * 3 kW 电热管)	2.8 kW (直流变频压缩机)
风机类型与功率	普通交流轴流风机	宽口贯流风机
保温材料与厚度	20 mm 单层硅酸铝石棉	50 mm 聚氨酯发泡
实际输出制热量	约 8.5 kW	约 8.96 kW

由表 2 可知,传统烘干设备依赖焦耳定律,电热转换效率受物理规律限制最高仅 100%,实际多在 80%~90%。其采用单层薄保温层且无余热回收设计,热散失较大,其实际有效输出制热量约为 8.5 kW 至 9.0 kW。本文新型热泵设备依靠逆卡诺循环搬运空气热能,提供等量甚至更优制热量的前提下,大幅压降输入电功率。新型热泵设备依靠逆卡诺循环搬运空气热能,其制热综合能效比(COP)通常可达 3.0 以上。

### 4.2. 核心工况下的 COP 测试与能耗测算

系统的能效比(COP)是系统制热量与输入功率在特定工况下的实测比值。为准确评估本设备的节能表现,本文在标准化的车间环境下对新型热泵模块进行性能测试。测试工况条件如下:

车间环境温度(吸热端)25℃;

环境相对湿度(RH): 60%;

目标烘干温度(放热端): 70℃。

在该稳态运行工况下,通过系统采集端测得变频压缩机的实际输入电功率为 2.8 kW。通过测试冷凝器进出风口的风量与温焓差,计算得出该系统向烘干隧道内输送的实际有效制热量约为 8.96 kW。根据热泵能效比计算公式:

$$C = \frac{Q_h}{W} = \frac{8.96 \text{ kW}}{2.8 \text{ kW}} = 3.2 \quad (4.1)$$

在该典型制鞋烘干工况下,系统的实际运行平均 COP 达到了 3.2。在此基础上加上 1.0 kW 的贯流风机功耗,新型热泵模块的总运行功率为 3.8 kW。在达到同等烘干制热量的前提下,本文新型设备的实际运行功率远低于传统电热对照组。单组模块的直接运行综合节能率达到:

$$\eta = \frac{10.0 \text{ kW} - 3.8 \text{ kW}}{10.0 \text{ kW}} \times 100 \quad (4.2)$$

单组模块每小时可节约电能 6.2 kWh。按每天运行 10 小时计算,单日直接节电 62 kWh。与传统设备相比,直接运行阶段的节能率达 62.0%。对于拥有成百上千条流水线的泉州大型制鞋企业而言,直接电费削减将极大降低工厂的制造成本。

### 4.3. 间接运行电耗降低

鞋用胶水含有大量挥发性有机溶剂,传统烘干机存在高温热浪外溢的“热污染”问题,恶劣的车间环境严重降低工人生产效率。本设备在绝热双风道结构的加持下,在锁住了内部热量的同时,蒸发器端持续执行吸热制冷的物理过程。

根据热力学能量守恒定律,蒸发器的制冷量  $Q_c$  等于冷凝器的制热量  $Q_h$  减去压缩机的耗功  $W$ 。

$$Q_c = Q_h - W = 6.2 \text{ kW} \quad (4.3)$$

单组热泵烘干模块在运行期间,可向车间源源不断地输出 6.2 kW 的制冷量,约合 2.5 匹工业空调的冷量。在泉州地区长达半年以上的高温酷暑季节,这部分被定向引导至操作工位的“免费冷气”,不仅改善了一线工人的作业环境,直接减少车间独立安装工位空调的投资。若按普通空调 COP 为 3.0 计算,每天 10 小时又可为企业间接节省约 20.6 kWh 的空调降温耗电。

### 4.4. 碳减排效益核算

在全球供应链对 ESG(环境、社会和治理)合规审查日益严苛、欧盟“碳关税”(CBAM)逐步落地的宏观外贸背景下,制鞋企业的碳足迹表现已成为获取国际订单的硬通货。将上述两项节能数据合并计算,假设全年 300 天运行,其中 150 天需计入夏季车间降温的间接节省电量,单组测试模块的年度总节电量  $E_{save}$  为:

$$E_{save} = (62 \text{ kWh/day} \times 300 \text{ day}) + (20.6 \text{ kWh/day} \times 150 \text{ day}) = 21,690 \text{ kWh} \quad (4.4)$$

根据国家生态环境部最新发布的《关于做好 2023~2025 年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知》,全国电网平均碳排放因子  $EF_{grid}$  取值为 0.5703 kg CO<sub>2</sub>/kWh [12]。

由此测算,单组新型设备模块每年的二氧化碳减排量  $ER_{CO_2}$  为:

$$ER_{CO_2} = E_{save} \times EF_{grid} \approx 12,370 \text{ kg CO}_2 \quad (4.5)$$

仅替换一组标准的 9 KW 级热泵烘干模块, 企业每年即可减少超过 12.3 吨的二氧化碳排放。一台常规的 10 米级流水线烘干机通常包含 3~4 个这样的温区模块, 其整机年碳减排量可达 40 吨以上。这不仅为制鞋企业申请“绿色工厂”提供了极其有力的数据支撑, 更是打破外贸绿色壁垒、提升出口高附加值竞争力的核心技术利器。

## 5. 结论

针对传统制鞋行业中鞋胶烘干工序存在的能耗极高、温流场不均、车间环境恶劣及存在消防隐患等痛点, 本文基于逆卡诺循环原理与空气动力学, 设计并研发了一款基于空气能热泵与变频技术的新型智能鞋胶烘干设备。

将空气能热泵技术引入隧道式流水线, 设计内外物理隔离的双风道热力循环系统。通过定制化的 9 KW 级微通道冷凝器, 在低风阻下实现高效放热。热泵的“一机两用”特性, 在隧道内高效烘干的同时, 向车间排放干燥冷气, 改善操作工人作业环境。

针对传统轴流风机易产生紊流的缺陷, 使用宽口贯流风机。基于有效管长原则加装了 50 mm 整流风管。多组实测数据表明, 优化后的出风口风速稳定在 3.5 m/s 左右, 横向风速极差小于 0.05 m/s。该结构将无序紊流转化为稳定二维层流, 消除了流场死角, 提升鞋胶热活化的均匀度与良品率。

经同等工况测算, 单组 9 KW 级热泵烘干模块较传统电热模块可降低直接运行能耗达 62.0%, 每日可带来相当于 20.6 kWh 的间接空调降温收益。单组模块年度可减少约 12.3 吨的二氧化碳排放。

综上所述, 该新型鞋胶烘干设备不仅在机械结构与空气动力学设计上实现技术改进, 卓越的低能耗、低碳排表现, 为泉州乃至全国制鞋产业为实现“双碳”目标下的高质量绿色转型, 提供了一套工程装备落地方案。

## 参考文献

- [1] 观研天下. 中国皮革行业深度分析报告 2022-2029 [R/OL]. 2022. <https://www.chinabaogao.com/detail/582471.html>, 2026-03-12.
- [2] 中国皮革网. 2025 年 3 季度我国鞋类产品出口分析[EB/OL]. 2025-12-22. <https://oa.chinaleather.org/front/article/142731/475>, 2026-03-12.
- [3] 中国皮革网. 2024 年我国出口鞋类产品数据分析[EB/OL]. 2025-03-13. <https://oa.chinaleather.org/front/article/137697/475>, 2026-03-12.
- [4] 泉州市发展和改革委员会. 创新方程式! 看泉州最会搞经济的县域如何续写产业新奇迹[EB/OL]. 2025-06-17. [https://www.quanzhou.gov.cn/zfb/xxgk/zfxgkz/qzdt/qzyw/202506/t20250617\\_3180643.htm](https://www.quanzhou.gov.cn/zfb/xxgk/zfxgkz/qzdt/qzyw/202506/t20250617_3180643.htm), 2026-03-12.
- [5] 华经产业研究院. 2026 年及未来 5 年市场数据中国皮革鞋靴行业深度调研与发展趋势研究报告[R/OL]. 2026-02-26. <https://max.book118.com/html/2026/0215/8010061110010046.shtml>, 2026-03-12.
- [6] 工业和信息化部, 国家发展改革委, 财政部, 等. 工业能效提升行动计划[EB/OL]. 2022-06-23. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/29/content\\_5698410.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/29/content_5698410.htm), 2026-03-12.
- [7] 福建省工业和信息化厅. 福建省工业和信息化厅关于省政协十三届三次会议第 20251457 号提案的答复[EB/OL]. 2025-09-15. [https://gxt.fujian.gov.cn/zwgk/zfxgk/fdzdgnr/dbwyzs/zxwyta/202507/t20250703\\_6961226.htm](https://gxt.fujian.gov.cn/zwgk/zfxgk/fdzdgnr/dbwyzs/zxwyta/202507/t20250703_6961226.htm), 2026-03-12.
- [8] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 第 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [9] Çengel, Y.A., Boles, M.A. and Kanoğlu, M. (2019) Thermodynamics: An Engineering Approach. 9th Edition, McGraw-Hill Education.
- [10] 龙天渝, 蔡增基. 流体力学[M]. 第 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [11] Air Movement and Control Association (2023) AMCA 201-23 Fans and Systems. AMCA.
- [12] 生态环境部办公厅. 关于做好 2023-2025 年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知[EB/OL]. 2024-02-07. [https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231018\\_1043427.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231018_1043427.html), 2026-03-12.