

烘干炉内易开盖升温特性试验及数值模拟研究

翟银星¹, 陈厚忠^{1*}, 陈文明¹, 冯致², 潜培豪², 王进卿²

(1.义乌市易开盖实业公司, 浙江 义乌 322000; 2.中国计量大学 计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要: **目的** 易开盖刻线修补涂层在烘干过程中易出现气泡、开裂和剥落等问题, 为此需对易开盖在烘干炉内的升温特性进行研究。**方法** 采用现场试验和数值模拟方法, 首先对炉内温度分布及易开盖表面温度变化进行测定, 随后基于 CFD 仿真技术, 利用动网格模型对易开盖在炉内运动加热过程进行模拟, 并采用动态边界条件对单片易开盖表面温度分布进行计算。**结果** 炉内温度变化特性为沿盖体运动方向先上升后下降, 两侧各存在一个温度突降区域; 易开盖在炉内加热过程呈现快速升温、缓慢升温和快速降温 3 个阶段, 125、130 和 135 °C 3 个烘干炉设置温度工况下, 易开盖表面最高温度分别为 148、152 和 155 °C, 温度越高涂层气泡越多; 加热初期易开盖表面温差较大, 最高达 5 °C, 后期温差逐渐降低至 1 °C 以下。仿真结果与试验数据吻合较好, 平均相对误差 MRE 值为 0.1。**结论** 获得了易开盖在炉内的升温特性及最优加热工况, 同时构建了基于动网格模型的易开盖运动加热 CFD 仿真方法, 对烘干炉的设计和运行具有指导意义。

关键词: 干燥; 动网格模型; 温度场; 升温特性

中图分类号: TB489; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)11-0204-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.11.024

Experiment and Numerical Simulation on Temperature Rise Characteristics of Easy-open Ends in Drying Furnace

ZHAI Yinxing¹, CHEN Houzhong^{1*}, CHEN Wenming¹, FENG Zhi², QIAN Peihao², WANG Jinqing²

(1. Easy Open Lid Industry Corp Yiwu, Zhejiang Yiwu 322000, China; 2. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

ABSTRACT: Since the protective coating on easy-open ends frequently encounters challenges like bubbling, fissures, and delamination during the drying process, the work aims to study the temperature rise characteristics of easy-open ends in the drying furnace. By combining on-site experiments and numerical simulations, the thermal distribution within the furnace and the surface temperature variations of the easy-open ends were measured. Subsequently, based on CFD simulation technology, a dynamic mesh model was employed to intricately replicate the thermal evolution experienced by the moving easy-open ends inside the furnace. Additionally, dynamic boundary conditions were employed to meticulously calculate the surface temperature distribution of each individual easy-open end. The temperature change in the drying furnace was characterized by an initial temperature increase followed by a subsequent decrease, mirroring the motion of the easy-open ends and there were prominent temperature drop regions on both sides of this trajectory. The thermal transformation experienced by the easy-open ends within the drying furnace could be divided into three phases of rapid heating, gradual heating, and swift cooling. Under three distinct drying furnace temperature settings (125 °C, 130 °C, and

收稿日期: 2023-09-19

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LQ20E060005)

*通信作者

135 °C), the maximum surface temperature of the easy-open ends progressively reached 148 °C, 152 °C, and 155 °C, respectively, indicating a direct correlation between higher temperature and increased bubble formation in the coating. During the initial heating phase, there was a notable temperature difference across the surface of the easy-open ends, peaking at 5 °C, which gradually diminished to below 1 °C in later stages. The simulation results were consistent with the experimental data, with an average MRE of just 0.1. This comprehensive study not only obtains the thermal characteristics and optimal heating conditions for easy-open ends within the drying furnace but also establishes the groundwork for CFD simulation approach of easy-open end motion heating grounded in a dynamic mesh model, providing invaluable guidance in the design and operation of drying furnaces.

KEY WORDS: drying; dynamic mesh model; temperature field; temperature rise characteristic

金属包装材料因其强度性能好、款式多样、便于运输而广泛应用于食品、饮料等快消品领域^[1]。在注重食品安全与节能环保的当下,随需求提升而不断提升制造流水线速度的同时亦应注重产品质量^[2-3]。相较于一体成型的易拉罐身,带有刻痕的易开盖面临更大的安全考验^[4-5]。易开盖生产过程主要包括成型、刻线、补胶及烘干等,其中烘干是影响易开盖生产质量的重要工序^[6-7]。在进行烘干时,需控制烘干炉内温度分布,以避免涂层干燥不均匀、滞留气泡、局部温度过高导致涂层开裂等问题^[8-10],但烘干炉通常仅自带少量温度测点,在实际运行过程中无法获得炉内详细温度分布。

目前,国内外学者对烘干炉的研究主要集中在高速喷涂、控制系统及能效分析方面^[11-13],对干燥炉内温度分布研究较少。我国易开盖烘干炉的设计和运行主要依靠经验,缺乏系统的理论指导,导致未能较好地掌握干燥炉内易开盖烘干过程。因此数值模拟的方法对炉内温度场和易开盖加热过程的研究具有重要意义^[14-15]。章祺等^[16]利用 ANSYS 中磁-热耦合场分析功能对食品罐体上盖生产过程中下模具感应加热过程进行了有限元仿真,获得的温度场变化过程为实时控制盖表刻痕深度提供了理论基础。Liu 等^[17]基于标准 RNG k- ϵ 模型对热风干燥箱进行了数值模拟,研究了干燥箱不同位置的热风轨迹,分析了湍流产生的原因及对干燥效果的影响。Barata Bruno 等^[18]对用于干燥固化卷涂材料的盘管式镀膜烘炉内温度场进行了数值模拟,发现薄膜涂层的加入降低了板材的加热速率。De Vasconcellos Araújo 等^[19]分析了不同温度下陶瓷砖烘箱内的热风干燥过程,得到了干燥过程炉内及物料的温度场和水分分布随时间变化情况,提出了块状物料水分扩散系数随干燥空气温度变化的计算公式。以上工作主要针对固定物料下炉内温度场及干燥过程进行研究,未考虑物料的运动及全加热过程物料温度的变化。

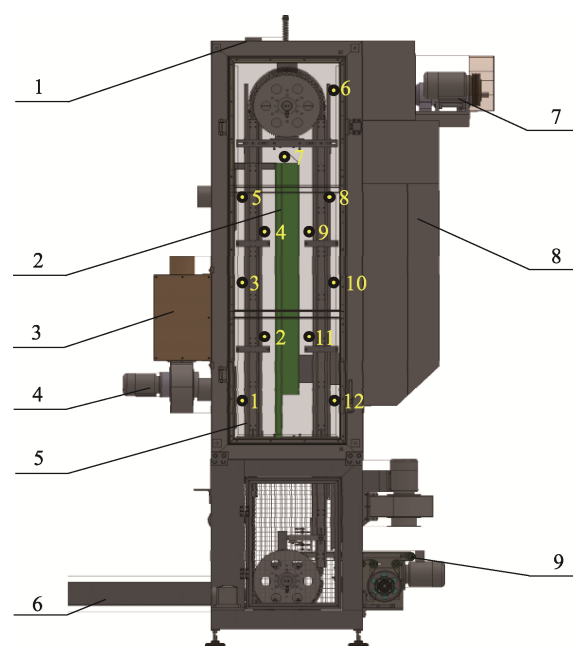
本文以易开盖烘干炉为研究对象,通过试验对干燥炉内各点温度、易开盖表面温度及炉外壁温度进行测定。并利用数值模拟方法对易开盖烘干全过程进行

计算,获得烘干过程易开盖整体温度变化及表面温度分布特性,最终得到一套可用于计算易开盖烘干过程的数值模拟方法。研究成果对烘干炉的设计和改造,以及优化工艺参数具有指导意义。

1 试验方法

1.1 烘干炉结构

烘干炉结构如图 1 所示,主要包括 2 台循环风机、易开盖传送带、电加热器、中心风道、排烟管道等部件。炉内空气在 2 台循环风机的带动下流经左右 2 个电加热器,其中右侧空气在主循环风机作用下流经空气加热器后向下流动,部分通过孔板进入炉膛,另一部分通过中心风道送入炉膛中上位置。左下辅助循环风机带动部分空气由炉膛底部进入加热区,加热后向



1.排烟口; 2.中心风道; 3.辅助电加热器; 4.辅助循环风机; 5.易开盖输送带; 6.传送带入口; 7.主循环风机; 8.主电加热器; 9.传送电机。

图 1 干燥炉结构及静态温度测点

Fig.1 Drying furnace structure and static temperature measuring point

上流动,并在左上位置进入炉膛。易开盖由底部入口处进入炉膛,随传送带运动到炉膛顶部后下降至出口处离开。新鲜空气由底部易开盖传送带的进出口漏入,废气由炉膛顶部排烟管道排出。

1.2 炉内温度测试方法

试验分别采用静态及动态测试的方法对炉内温度分布进行研究。静态测点为固定在炉内的热电偶,充分考虑了易开盖运动方向及关键位置,共布置 12 个(见图 1)。动态测点采用贴片热电偶,分别在易开盖中心及边缘涂层位置各布置 1 个,具体布置位置见图 2。此时,热电偶跟随目标易开盖运动,从而实现易开盖加热过程温度全流程测量。

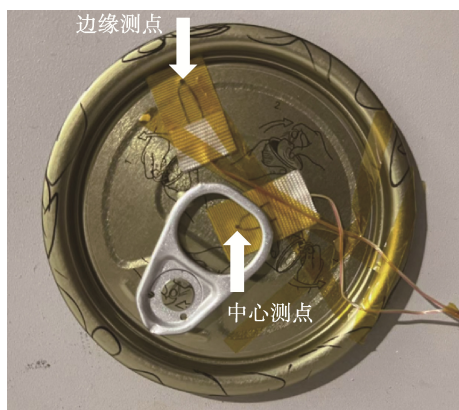


图 2 动态测点位置

Fig.2 Position of dynamic measuring point

为分析烘干炉不同温度水平下易开盖的升温特性,进行了 3 个加热工况试验。3 个加热工况采用烘干炉自带程序控制实现,即通过设定炉温控制点温度(见图 1)实现炉体不同加热水平。试验分别进行 125、130 和 135 °C 3 个工况测试(温度测点 5),每个工况测试 3 次,结果取平均值。每次调整工况后稳定 10 min 开始采集,每个工况温度采集时间 160 s,采集间隔为 2 s,采集仪器为安捷伦 34972A 温度数据采集仪,热电偶采用 K 型。采用红外热像仪(TESTO 890)对运行中干燥炉的表面温度进行测定。

2 数值仿真

2.1 物理模型

烘干炉结构复杂,为方便计算,需对其进行简化。去除电机、支座等不必要的部件,将易拉盖轨道划分为 U 型区域,还对烘干炉局部微小尺度区域(如薄壁,缝隙等)进行了优化重构。由于易开盖与干燥炉尺寸差异较大,对易开盖进行简化,去除拉环与沟槽,使表面平整化。利用 Fluent meshing 对网格进行划分,

简化后几何模型及网格划分见图 3,为适配动网格模型,网格采用四面体,总数量为 322 万,计算结果进行了网格无关性验证。

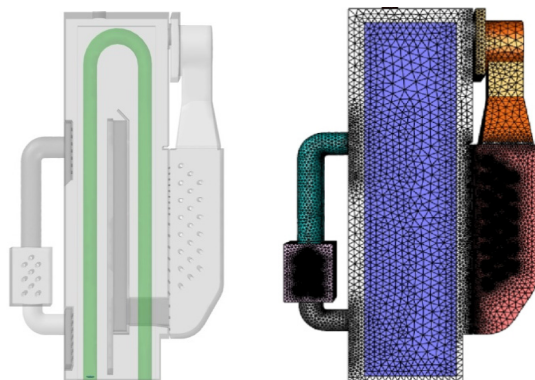
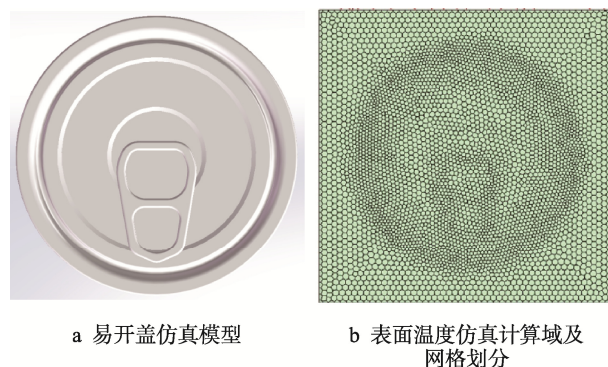


图 3 干燥炉简化模型及计算区域网格划分

Fig.3 Simplified model of drying furnace and mesh division of calculation area

由于易开盖表面拉环与沟槽会对附近流场产生影响,进而影响传热,进一步对单片易开盖进行细化建模,利用上述易开盖运动干燥过程计算所得沿程平均温度与速度作为边界条件对易开盖表面温度分布进行计算。

实际干燥过程中单片易开盖上下两侧高度总和为 12.5 mm,轨道四周支撑柱之间长度为 100 mm,因此建立一个尺寸为 12.5 mm×100 mm×100 mm 的长方体空间作为流通区域,通过布尔运算抽取流道。对易开盖附近进行局部加密,采用多面体网格,网格数量为 337 万,体网格最大单元长度为 3.07 mm,增长率为 1.2,如图 4 所示。



a 易开盖仿真模型

b 表面温度仿真计算域及网格划分

图 4 易开盖表面温度分布仿真

Fig.4 Simulation of surface temperature distribution of easy-open ends

2.2 数学模型

利用稳态计算获得炉内温度场与速度场,再利用动网格模型对易开盖运动干燥过程进行仿真。干燥炉

内部流动较平缓且发展充分, 没有强旋流、急转弯等复杂流动, 选用标准、湍流模型可以较好地描述其流场特点。该模型由湍流动能方程 k 和湍流耗散率方程 ε 组成。

k 控制方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = P - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

ε 控制方程:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

式中: P 为湍流动能产生项; ν_t 为黏性系数, $\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho}$,

$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}$; C_μ 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 σ_ε 和 σ_k 为模型系数。

气相流动的数学模型可用连续性方程、动量方程和能量方程进行描述, 它们可用通过控制方程式 (3) [20] 来表示。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \varphi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \varphi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \varphi) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + S \end{aligned} \quad (3)$$

式中: 变量 φ 代表速度、温度等物理量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u 、 v 、 w 分别代表 x 、 y 、 z 方向的速度分量, m/s 。

易开盖运动过程通过动网格模型完成, 对边界移动的任意控制体积 V 上的标量 φ (质量 ρ 、能量 E), 非定常守恒型动网格流场计算方程为:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_{\partial V} \rho \varphi (\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) dV = \\ \int_{\partial V} \Gamma \nabla \varphi dA + \int_V S_\varphi dV \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $V_{(t)}$ 为空间中大小和形状都随时间变化的控制体积; ρ 为流体密度; $\partial V_{(t)}$ 为控制体积的运动边界; $\mathbf{u}_g$ 为运动网格的运动速度; $\mathbf{u}$ 为流体速度矢量; Γ 为耗散系数; S_φ 为标量 φ 的源项。

2.3 边界条件设置

运动烘干过程整体仿真: 定义易开盖轨道环缝为压力入口, 压力为 0 Pa, 顶部出口定义为压力出口, 压力 -50 Pa, 利用风扇模型定义 2 个循环风机, 压力分别为 600 Pa 与 400 Pa; 利用现场红外热像仪测试所得温度定义干燥炉边界温度; 由于易开盖数量较多, 间隙较小, 采用多孔介质模型定义易开盖运动轨道。动网格方法设置为平滑变形与网格重构, 区域类型设置为刚体运动; 由于易开盖运动过程为先向上平移, 再沿上方轨道中心旋转 180°, 最后向下平移, 因此将其运动过程分为 3 段, 分别利用 DEFINE_CG_MOTION 宏定义向上运动速度为 0.037 9 m/s, 旋转速

度为 -0.188 rad/s, 向下运动速度为 -0.037 9 m/s。

利用运动烘干过程整体仿真计算获得的易开盖周围温度、速度随时间变化数据, 作为入口边界条件对易开盖表面温度分布进行计算。定义涂层导热系数为 0.4 W/(m·°C), 易开盖导热系数为 202.4 W/(m·°C)。

3 结果及分析

3.1 试验结果及分析

图 5 为烘干炉内部沿易开盖运动方向温度分布。由图 5 可知, 3 个工况下炉内温度沿易开盖运动方向总体呈现先上升后下降的趋势, 最高温度均位于中心热风通道出口处。测点 4 与测点 8 出现温度异常突降的现象, 这是由于烘干炉采用了两侧热风循环的设计方案, 而在 2 个循环的中心位置无热风流通, 引起温度降低。

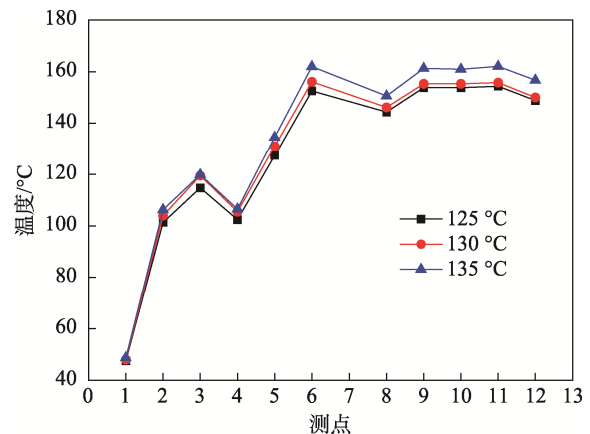


图 5 炉内静态温度分布
Fig.5 Static temperature distribution
in furnace

图 6 为易开盖表面温度沿程变化。从图 6 中可以看出, 3 个工况下易开盖在炉内加热过程均呈现快速升温、缓慢升温和快速降温 3 个阶段。易开盖快速升温阶段结束约在 70 s, 此时易开盖运动至测点 6 (见图 1), 慢速升温阶段结束约在 130 s, 此时易开盖运动至测点 12。结合图 5 可知, 测点 6 之前炉内属于快速升温区, 在此区域易开盖得到充分加热, 因此升温迅速; 测点 6 之后炉内升温幅度放缓, 因此易开盖加热减弱, 处于缓慢升温阶段; 在测点 12 附近, 易开盖接近炉膛出口, 此时受到冷却风的影响, 易开盖处于快速降温阶段。可见, 易开盖的加热升温过程与烘干炉内温度分布匹配较好, 因此可以通过调节 2 个加热器功率实现炉内温度分布的调控, 从而改变易开盖的升温曲线, 使其满足刻线涂料的干燥过程。

在 125、130 和 135 °C 3 个加热工况下, 易开盖

表面最高温度分别为 148、152 和 155 °C (见图 6), 比同一时刻炉内环境温度低 4~7 °C。3 个工况下涂层涂层的显微图像如图 7 所示, 125 °C 加热工况下的涂层气泡最少, 135 °C 下的气泡较多, 可见易开盖的加热温度显著影响涂层气泡的生成, 在烘干炉运行过程中, 设定温度不宜超过 125 °C。

图 8 为运行过程中烘干炉表面温度分布, 其中炉门外表面温度在 50 °C 以下。由于排烟口设置在炉顶, 排烟法兰外表面温度达 80 °C, 热损失较大。左侧循环风机通过软管连接且无保温措施, 温度高达 110 °C。

3.2 仿真结果及分析

3.2.1 干燥过程整体仿真分析

稳态下干燥炉内部速度分布见图 9, 在左右 2 台风机的带动下, 流场整体呈现两路循环流动的形态。其中左侧空气流经电加热器后向下流动, 部分通过孔板进入炉膛, 另一部分通过中心流道送入炉膛顶部位置。右侧空气从炉膛底部经加热后向上流动, 并在中上位置进入炉膛。

稳态下干燥炉内部温度分布见图 10a, 高温区域主要集中在 2 个电加热器内部, 温度场整体分布呈现沿物料运动方向先上升后下降的趋势, 图 10b 表明两路循环风的中心位置处温度较低。稳态仿真与试验结

果对比见图 11, 两者温度趋势吻合较好, 且在温度测点 4 与测点 8 处均存在温度突降现象。

在温度场与速度场计算完成后, 利用动网格模型对易开盖运动升温过程进行非稳态计算, 利用面积加权平均的方式定义易开盖表面平均温度, 并与试验值对比, 结果见图 12。仿真与试验的温度分布趋势基本一致, 易开盖进入干燥炉后表面温度先快速上升至 135 °C, 再缓慢上升至 154 °C, 最后快速

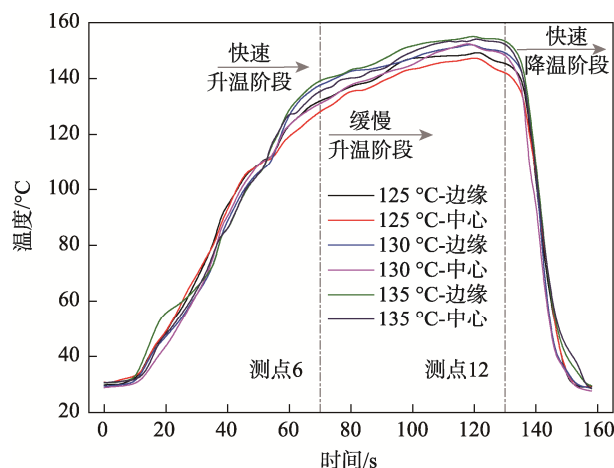


图 6 易开盖表面温度随时间变化特征
Fig.6 Characteristics of surface temperature of easy-open ends changing with time

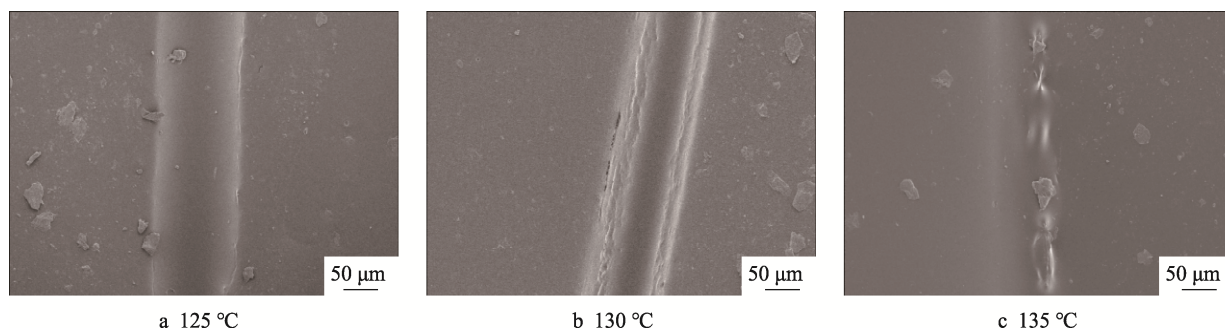


图 7 不同温度下涂层截面微观形貌

Fig.7 Microscopic morphology of coating cross-section at different temperature

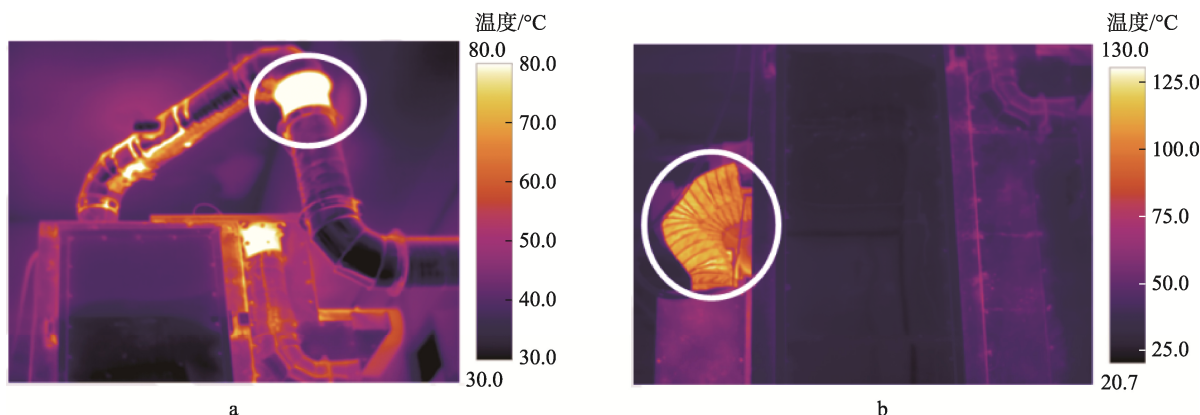


图 8 运行过程中干燥炉表面温度

Fig.8 Surface temperature of drying furnace during operation

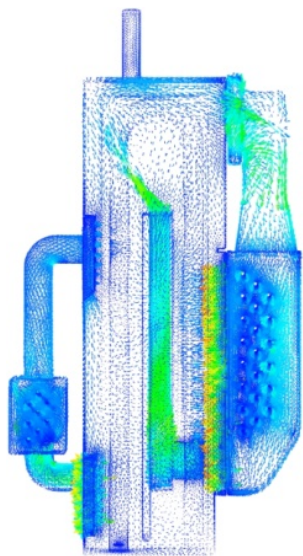
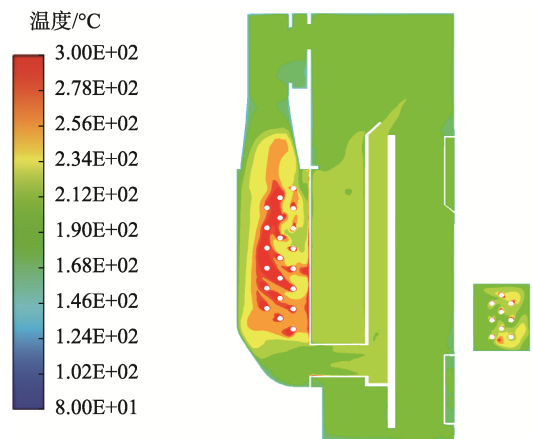
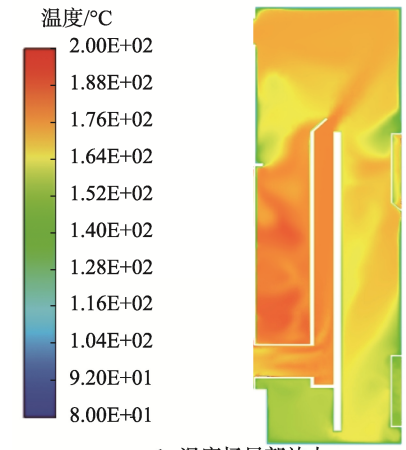


图 9 炉内流场分布
Fig.9 Flow field distribution in furnace



a 整体温度场分布



b 温度场局部放大

图 10 炉内温度场分布
Fig.10 Temperature field distribution in furnace

下降。利用平均相对误差 MRE 评价仿真值和试验值的吻合程度, 计算得到 MRE 值为 0.1, 其值较低, 数值模拟可靠。

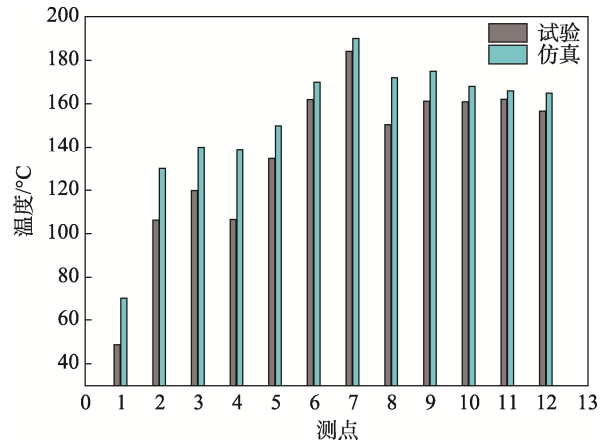


图 11 稳态仿真与试验结果对比
Fig.11 Comparison of steady-state simulation and test results

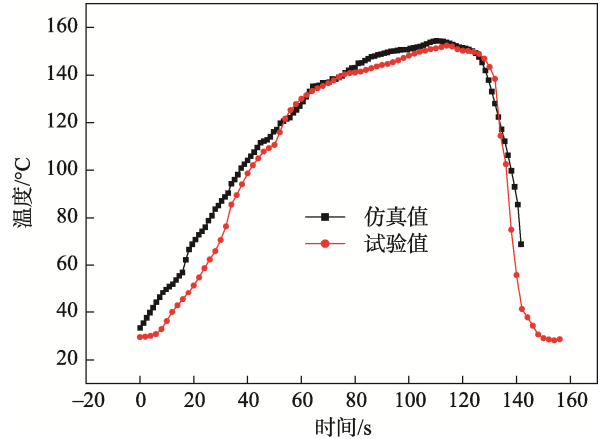


图 12 易开盖表面平均温度仿真值与试验值对比
Fig.12 Comparison of the simulated and experimental values of the average temperature of the easy-open end surface

3.2.2 易开盖表面温度分布分析

不同时刻易开盖表面温度分布结果见图 13。在升温阶段, 温度分布沿气流方向逐步降低, 在降温阶段则相反。由于拉环的阻挡, 中心位置温度较垂直气流方向侧边温度更低。易开盖初始温度为 20 °C, 在升温阶段前 20 s 内, 由于升温速率较高, 约为 2.5 °C/s, 导致表面温差较大, 最高达 5 °C。表面温度在 60 s 时约为 127 °C, 80 s 时约为 143 °C, 在 120 s 时达到最高温度 154 °C, 期间升温速率逐渐减小, 盖表面温差逐渐降低, 135 °C 后小于 1 °C。温度抵达峰值后先缓慢下降, 130 s 后快速下降, 140 s 时降至 100 °C 左右, 变化趋势与整体仿真分析的结果一致。

由于涂层采用了丙烯酸树脂, 其导热系数较铝材更低, 因此涂层位置的温度变化更为滞后, 在同一时刻, 涂层位置的温度与中心铝材的温度存在 0~2 °C 的温差, 这与图 6 所示试验测得易开盖边缘与中心位置温差结果一致。

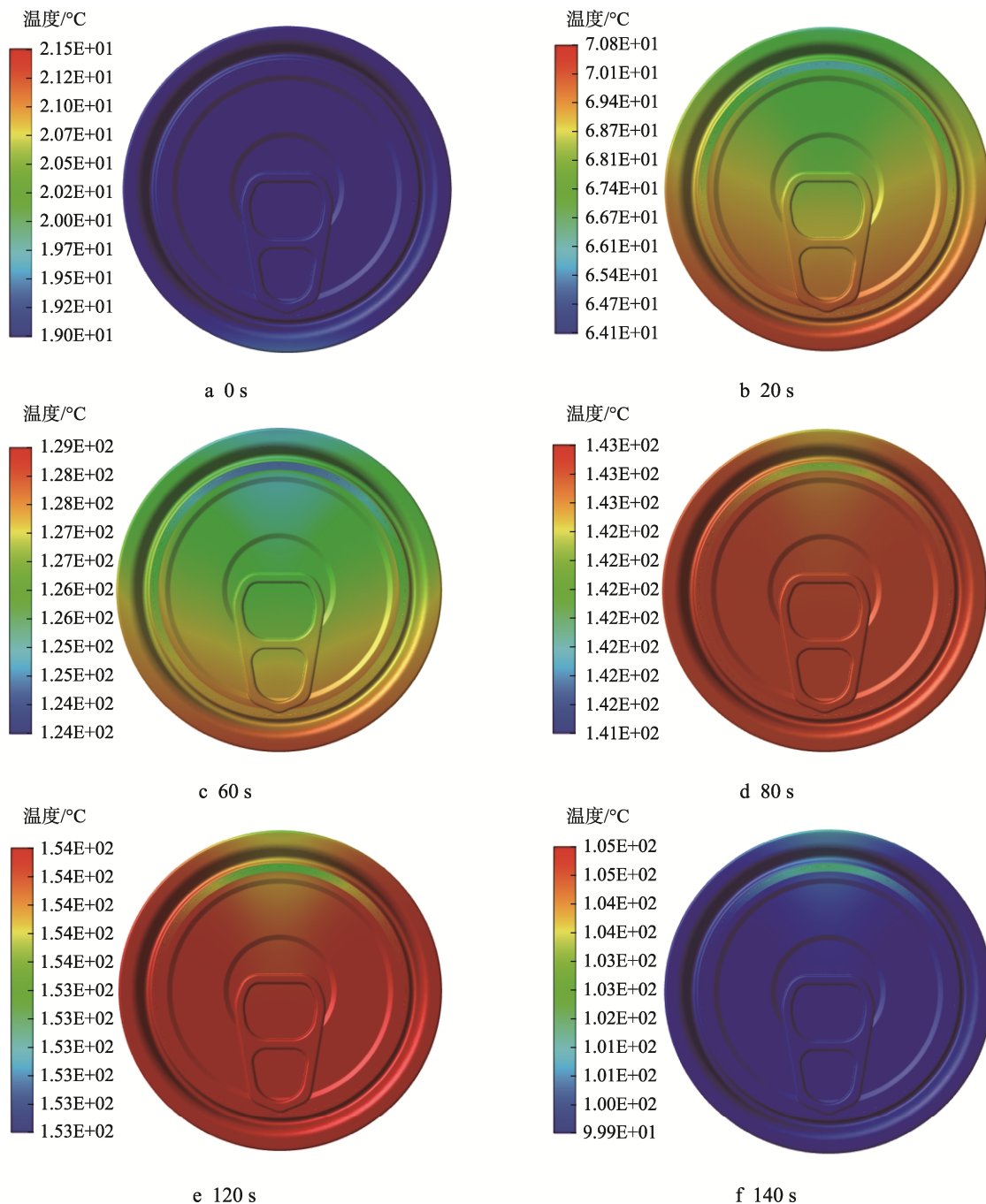


图 13 易开盖升温过程表面温度场

Fig.13 Surface temperature field during the heating process of the easy-open ends

4 结语

1) 通过在干燥炉内及易开盖表面布置热电偶获得炉内温度分布与易开盖升温特性,结果表明干燥炉内温度沿盖体运动方向先上升后下降;易开盖温度呈现先快速上升,再缓慢上升,最后快速下降的趋势,3个工况下最高温度分别为148、152、155℃。两者吻合较好,表明改变炉内温度分布能有效控制易开盖的升温过程。

2) 对不同加热温度下固化的涂层进行微观形貌分析,结果表明加热温度显著影响涂层中气泡生成。温度越高,气泡生成越多,在烘干炉运行过程中,设定温度不宜超过125℃。

3) 利用动网格模型对易开盖全流程运动烘干过程进行仿真计算,计算结果与试验结果吻合较好,平均相对误差MRE值为0.1。同时构建了基于动网格模型的易开盖运动加热CFD仿真方法,对烘干炉的设计和运行具有指导意义。

4) 利用运动烘干过程整体仿真计算获得的易开盖周围温度、速度随时间变化数据,作为入口边界条件对易开盖表面温度分布进行计算。结果表明在升温阶段,易开盖表面温度沿气流方向逐步降低,在降温阶段则相反。涂层的温度变化较附近铝材更为滞后,存在 0~2 °C 的温差,计算结果可为易开盖烘干工艺设定提供依据。

参考文献:

- [1] 肖颖,麻祥才,金琳,等. 3D 网点制版参数与金属易拉罐网点扩大关系的研究[J]. 包装工程, 2023, 44(5): 203-210.
XIAO Y, MA X C, JIN L, et al. Relationship between 3D Dot Plate Making Parameters and Dot Gain of Metal Cans[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(5): 203-210.
- [2] 张志晟,张雷洪. 基于深度学习的易拉罐缺陷检测技术[J]. 包装工程, 2020, 41(19): 259-266.
ZHANG Z S, ZHANG L H. Defect Detection Technology for Cans Based on Deep Learning[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(19): 259-266.
- [3] 滕国先,邱逊,赵永兵,等. “双碳”背景下的易开盖发展趋势[J]. 中国包装, 2022, 42(4): 17-19.
TENG G X, QIU X, ZHAO Y B, et al. Development Trend of Easy-to-Open Lid under the Background of "Double Carbon"[J]. China Packaging, 2022, 42(4): 17-19.
- [4] TAYLOR P L D, NAGY T G, OWEN J R D. Experimental Investigation of Damage and Fracture Mechanisms Controlling the Performance of Full Aperture Easy Open Ends for Food Containers[J]. AIP Conference Proceedings, 2011, 1353(1): 201-206.
- [5] SIMAL-GÁNDARA J, PAZ-ABUÍN S, AHRNÉ L. A Critical Review of the Quality and Safety of BADGE-Based Epoxy Coatings for Cans: Implications for Legislation on Epoxy Coatings for Food Contact[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1998, 38(8): 675-688.
- [6] 林明山,黄新文,林红梅. 易开盖成形模设计[J]. 模具工业, 2002, 28(1): 20-25.
LIN M S, HUANG X W, LIN H M. Design of the Dies for the Easy-Pulling Lid[J]. Die & Mould Industry, 2002, 28(1): 20-25.
- [7] 金美华,陈厚忠,季正峰. 异形易开盖刻线补涂的数控技术应用[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(4): 60-63.
JIN M H, CHEN H Z, JI Z F. CNC Technology Application on Irregular Easy Open Ends Score Repairing[J]. Packaging and Food Machinery, 2011, 29(4): 60-63.
- [8] MISHNAEVSKY JR L, FÆSTER S, MIKKELSEN L P, et al. Micromechanisms of Leading Edge Erosion of Wind Turbine Blades: X-ray Tomography Analysis and Computational Studies[J]. Wind Energy, 2020, 23(3): 547-562.
- [9] GAO F, MU J, BI Z, et al. Recent Advances of Polyani-line Composites in Anticorrosive Coatings: A Review[J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 151: 106071.
- [10] 李涛,徐志远,陶志民,等. 5182 铝合金易开盖开裂的原因与改善措施[J]. 轻合金加工技术, 2023, 51(3): 41-45.
LI T, XU Z Y, TAO Z M, et al. Analysis and Improvement of Cracking Issue of 5182 Aluminum Alloy Easy-Open End[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2023, 51(3): 41-45.
- [11] 辛蔚,王玉江,魏世丞,等. 热喷涂制备高熵合金涂层的研究现状与展望[J]. 工程科学学报, 2021, 43(2): 170-178.
XIN (W /Y), WANG Y J, WEI S C, et al. Research Progress of the Preparation of High Entropy Alloy Coatings by Spraying[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(2): 170-178.
- [12] VOGT S, GÖBEL M, FU E. Perspectives for Conventional Coating Processes Using High-Speed Laser Cladding[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2022, 144(4): 044501.
- [13] GRADOV D V, YUSUF Y O, OHJAINEN J, et al. Modelling of a Continuous Veneer Drying Unit of Industrial Scale and Model-Based ANOVA of the Energy Efficiency[J]. Energy, 2022, 244: 122673.
- [14] LI C, HUANG Y, SUN J, et al. Numerical Simulation of Pressure Distribution in a Walking-beam Type Reheating Furnace[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020, 467(1): 012025.
- [15] 滑广军,吴若梅,蒋海云,等. CAE 在金属包装设计与制造课程教学的改革与实践[J]. 包装工程, 2021,

- 42(增刊 1): 97-100.
- HUA G J, WU R M, JIANG H Y, et al. The Reform and Practice of CAE in the Teaching of Metal Packaging Design and Manufacturing Course[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(Supp. 1): 97-100.
- [16] 章祺, 侯升平. 食品罐体模具感应加热过程的有限元仿真及分析[J]. 机电工程, 2013, 30(5): 600-602.
- ZHANG Q, HOU S P. Finite Element Modeling Analysis and Simulation on Induction Heating Process of Food Tank Die[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(5): 600-602, 622.
- [17] LIU L, SUN Z, WAN C, et al. Jet Flow Field Calculation & Mechanism Analysis on Hot-air Drying Oven Based on RNG $k-\varepsilon$ Model[J]. International Journal of Heat and Technology, 2015, 33(1): 77-82.
- [18] BARATA BRUNO A C, DIAS BEATRIZ S, NAVALHO JORGE E P, et al. Numerical Investigation of an Innovative Furnace Concept for Industrial Coil Coating Lines[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 42: 101843.
- [19] DE VASCONCELLOS ARAÚJO M, DE BRITO CORREIA B R, BRANDÃO V A A, et al. Convective Drying of Ceramic Bricks by CFD: Transport Phenomena and Process Parameters Analysis[J]. Energies, 2020, 13(8): 1-18.
- [20] 周萍. 传递过程原理及其数值仿真[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006: 57-58.
- ZHOU P. Principle and Numerical Simulation of Transport Processes[M]. Changsha: Central South University Press, 2006: 57-58.