

基于流固耦合传热的宽幅铝箔热封辊轴温度场研究与应用

蔡少波,项筱洁

(温州职业技术学院,浙江 温州 325035)

摘 要:针对热封辊轴在工作过程中空气与辊轴和加热管间的流固耦合问题,在 Star CCM+ 中建立三维参数化仿真模型。根据试验数据设置运行速度、材料、导热系数、进出口界面等边界条件,采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行稳态传热数值计算,得到耦合系统的温度场。在此基础上,结合加热管分段数和螺距等因素设计了 4 组改型方案,并进行温度场仿真分析。结果显示:第二组方案的热封辊轴温度两端高中间低,可以部分抵消辊轴整体热胀;实物综合循环试验跟踪记录结果表明该方案满足新机器在实际使用中的要求。

关键词:热封辊轴;流固耦合;温度场;数值仿真

中图分类号:TB486 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2023)03-0029-04

Research and Application of Temperature Field of Wide Aluminum Foil Heat Sealing Roller Shaft Based on Fluid-solid Coupling Heat Transfer

CAI Shaobo, XIANG Xiaojie

(Wenzhou Polytechnic, Wenzhou 325035, China)

Abstract: To solve the problem of fluid structure coupling between air, roller shaft and heating pipe, a three-dimensional parametric simulation model was established in Star CCM+. According to the test data, boundary conditions such as running speed, material, thermal conductivity, inlet and outlet interface were set up, $k-\varepsilon$ turbulence model was used to calculate the steady-state heat transfer, and the temperature field of the coupling system was obtained. On this basis, combined with the number of heating tube segments and pitch and other factors, four groups of modification plans were designed, and temperature field simulation analysis was carried out. The results show that the temperature in the middle of the heat sealing roller shaft in the second group is lower than its two ends, which can partially offset the overall thermal expansion of the roller shaft. The track and record results of sample's comprehensive cycle test show that the proposed design meets the requirements of the new machine in actual use.

Keywords: heat sealing roller shaft; fluid-solid coupling; temperature field; numerical simulation

0 引言

随着人口老龄化、医保改革及全民对身体健康关注程度的不断提升,我国已成为全球药品消费增速最快的地区之一,新产品的不断开发加速了制药工业的进一步发展壮大^[1-2]。针对小颗粒药品对存放环境要求较高、保质期要求较长的特点,铝塑泡罩包装是目前发展前景最好的药品包装方式之一,如图 1 所示。铝塑泡罩包装机按泡罩成型与铝塑热封结构,可分为辊筒式、辊板式和平板式 3 种类型,其中辊板式生产能力高,冲裁频率高^[3],能较好地适应未来全自动高速包装机的使用要求。这类采用热辊的设备进行铝塑热封时工作位置是线接触,封合总压力较小,如果单次封合药品板数过多、封合长度过长则会导致局部受压受热不均匀,出现漏封、烫破等缺陷,这对后续缺陷检测也是一个挑战^[4]。因此,针对宽幅铝箔热封辊轴开展流固耦合传热仿真与试验验证,进行热封性能优化,对提升全自动高速铝塑热封稳定性有着重要意义。



图 1 采用铝塑包装的药物

1 控制方程

在分析宽幅铝箔热封辊轴换热过程后发现,该过程传热速度快,工作频率高,热量由电芯传递给热辊并快速进行热封散失,达到动态平衡,故需建立热源能量传递以及空气流动两个数学模型^[5]。热封辊轴空气流道内空气流动为湍流运动。在热封辊轴旋转过程中,其热量生成区域为内部管制加热电芯,热源能量传递过程计算时,可利用质量守恒、能量守恒等定律对具体温度场进行计算。

基金项目:温州市重大技术计划项目(ZG2019005);浙江省教育厅一般项目(Y202044908)

第一作者简介:蔡少波(1989—),男,浙江瑞安人,讲师,硕士,研究方向为现代设计理论与方法。

1.1 流动控制方程

仿真空间内的空气工作时作湍流运动,可采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型来模拟计算,该模型考虑了湍流运动中脉动速度与长度的输运,是一种开发成熟、应用广泛且更符合实际情况的湍流模型^[6]。其主要控制方程如下:

流体的连续性微分方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

湍流能量输运方程:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \tau_{ij} S_{ij} \quad (2)$$

能量耗散输运方程:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - c_{\varepsilon 2} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \varphi_\varepsilon \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; k 为湍动能; ε 为湍流耗散率; S_{ij} 为平均速度应变率张量; 右端 3 项分别为生成项、耗散项和壁面项。

1.2 传热微分方程

铝箔热封辊轴局部受加热棒加热后内部的传热过程同样遵守质量守恒定律,在有限元软件中,固体传热的速度与流体不同,其传热速度为 0 且传热规律遵循傅里叶导热定律。具体守恒方程及导热方程如式(4)~式(7)所示^[7]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta(\rho U) = 0 \quad (4)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} = \rho g - \Delta p + \mu \Delta U \quad (5)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \rho q + \lambda \Delta T + \Phi \quad (6)$$

固体导热微分方程:

$$\Delta^2 T = 0 \quad (7)$$

式中: U 为流速矢量; p 为压力; μ 为流体的黏度; c_p 为流体比热容; λ 为导热系数; g 为流体受到的质量力; q 为吸热量; T 为材料温度; Φ 为能量耗散函数。

假定热封辊轴外表面在均匀转动过程中与铝箔、空气发生的热交换属于强制对流,并用牛顿冷却定律描述对流传热量大小和传递速率^[8],表达式如下:

$$\Phi_d = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (8)$$

$$q_d = \Phi_d / A = h \cdot \Delta T \quad (9)$$

式中: ΔT 为辊轴外表面与流体间温度差的绝对值; A 为对流传热接触面积; h 为表面换热系数。

基于傅里叶热传导公式,对热封辊轴上的任一个微元建立传热微分方程如下^[9]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + \dot{\Phi} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (10)$$

式中: λ 为热封辊轴的导热系数; 工作空腔不含其他热源, 取 $\dot{\Phi} = 0$ 。

热封辊轴导热系数在工作过程中变化不大, 设为定值, 即求解常物性问题, 将式(10)改写为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T + \frac{\dot{\Phi}}{\rho c_p} \quad (11)$$

式中 $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$, 为热扩散率。

空气与热封辊轴表面的相互作用会影响流固耦合场的边界条件。流固耦合问题常用的数值求解方法主要有顺序求解法和整场求解法。整场求解法因其组合不同区域中的热传递过程进行整体求解, 减少了不同区域之间热传递的反复迭代, 显著提高了计算效率^[10]。

2 数值计算模型

2.1 三维有限元模型的建立

依据宽幅铝箔热封区域内腔尺寸建立一个立方体空气域模型, 按热封辊轴实际尺寸和安装位置建立数模, 并在辊轴内部设置与实物相同尺寸的加热管, 将热封辊轴、加热管和空气域作为计算域划分搭建对应的有限元模型, 如图 2 所示, 其中热封辊轴半径为 40 mm, 长度为 425 mm。铝塑泡罩包装设备的热封区域由亚克力板进行防尘保护, 因此将矩形空气域左、右两侧径向两面设为开放边界, 其余四面设为闭合边界。使用有限元仿真软件 Star CCM+ 进行三维流动与传热耦合计算。对于空气区域, 选用多面体网格结合棱柱层(3 层、延伸率 1.2) 网格以自动延伸形式划分, 生成共计 721 379 个单元; 固体区域采用多边形柱体网格划分, 生成共计 249 316 个单元。

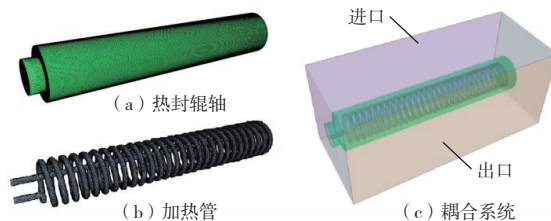


图 2 热封流固耦合系统三维有限元模型图

2.2 边界条件的确定

1) 材料设置

热封仿真模型中各主要零件的材料特性如表 1 所示。

表 1 模型中各零件的材料特性

名称	材料	导热系数 $\lambda /$ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	密度 $\rho /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	比热容 $c_p /$ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
热封辊轴	ZL101A	150	2.68	963
加热管	Cr20Ni80	15	8.40	0.46×10^{-3}

2) 热流边界条件的确定

在热封过程中, 加热管的热量主要通过辊轴与铝箔之

间的滚动摩擦、铝箔热变形、辊轴热变形以及空气对流进行耗散。对于安装有 80 mm 直径的热封辊轴,经用电功率实测反推,该转速下电能绝大部分转换为铝箔热变形,但仍有很大一部分残留以致辊轴发生局部变形。

测试实际情况为辊轴加热管中径 55 mm,线径 8 mm,螺距 14 mm,供热温度 265 ℃;热封辊轴总成 425 mm,转速 70 r/min,滚动半径为 40 mm,空气温度为室温。

2.3 数值计算结果

将上述各零件材料特性和具体边界条件施加到先前搭建的有限元模型上,在 Star CCM+软件中迭代计算收敛后得到热封流固耦合系统在特定试验条件下的温度场。图 3 为过热封辊轴圆心纵剖面(平行于进出口界面)的温度场云图,图 4 为热封辊轴表面温度场云图。

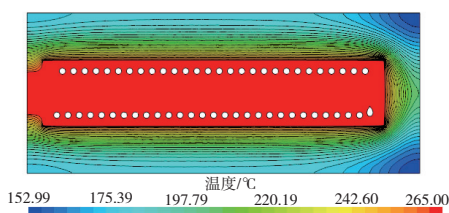


图 3 流固耦合系统纵剖面温度场云图

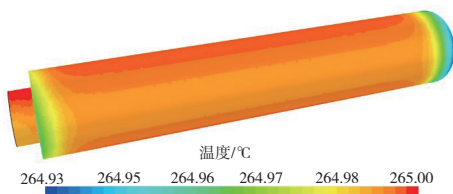


图 4 热封辊轴表面温度场云图

从图 3 中可以看出,随着迭代的完全进行,热封辊轴整体温度达到近 265 ℃,周围温度场以辊轴边缘为基准,往各个方向逐渐下降,辊轴驱动侧的空气温度明显高于辊轴外侧(约 20 ℃)。当均质物体内部有不均匀的温度变化时,即便在没有外部约束力的情况下也会产生温度应力以保证整体结构的维持^[11]。由图 4 分析,过长的等温加热段使得整个热封辊轴的内能持续增加,中间靠近辊轴侧热胀变形量明显大于自由端,整个辊轴在工作过程中会受热逐步变形成橄榄球形,中部凸出,两端与铝箔的垂直压力不足,热封效果变差,甚至出现漏封。

2.4 温度场试验结果

为确定该有限元仿真模型的准确性,在实机上进行温度场试验来验证。试验实物尺寸和条件设置均与仿真模型一致,试验时在距热封辊轴表面约 2 mm 处布置热电偶,测量辊轴表面温度,并对比其变形量,测量点如图 5 所示。

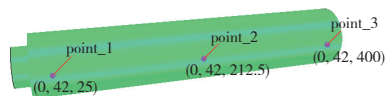


图 5 热封辊轴表面温度测点位置

采用多次测量平均值以减少测量表面波动误差和测量随机误差,仿真与测量值的对比结果如表 2 所示。

表 2 仿真与测量值的对比

编号	位置坐标(x,y,z)	仿真值 T/℃	测试值 T ₁ /℃	误差 σ/%
ponit_1	0, 42, 25.0	261.2	246.9	5.79
ponit_2	0, 42, 212.5	261.8	253.1	3.44
ponit_3	0, 42, 400.0	260.3	243.5	6.90

由表 2 可知,仿真值和试验测试值的误差较小,轴向温度变化的趋势基本一致,应用该仿真方法可以有效地模拟稳态下热封辊轴的传热关系。

3 热封辊轴使用性能优化

对加热管结构进行优化,改变热封辊轴使用过程中总体热场分布,改善整体热变形过大和局部压力减弱的问题,保障设备平稳、可靠运行。传统热源供应为单加热管,现考虑优化重点是分段加热以及加热管的螺距。

主要原因是:

- 1) 单段加热管温度可调性不佳,局部过热问题无法全局解决;
- 2) 相同条件下,不同螺距位置的加热对局部升温速度有直接影响。

3.1 热封辊轴优化方案

结合前文流固耦合计算分析的结果与实践应用的经验,在不改变辊轴外形尺寸和材料的前提下,设计了下述几种优化方案,如图 6 所示,具体参数如表 3 所示。

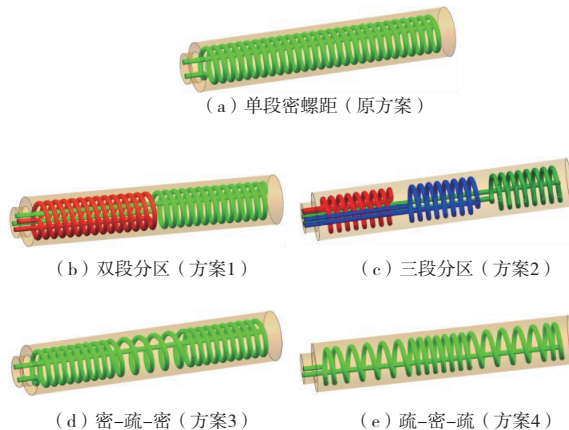


图 6 热封辊轴改进方案

表 3 热封辊轴改进方案具体参数

方案	分段数	螺距 P/mm	加热温度 T/℃
原方案	1	14	265
方案 1	2	14	260, 265
方案 2	3	14	265, 260, 265
方案 3	1	14, 26, 14	265
方案 4	1	26, 14, 26	265

3.2 优化后热封辊轴温度场计算与分析

采用前文数值仿真方法对优化方案进行计算获得对应表面温度场,图7和图8展示了部分云图。

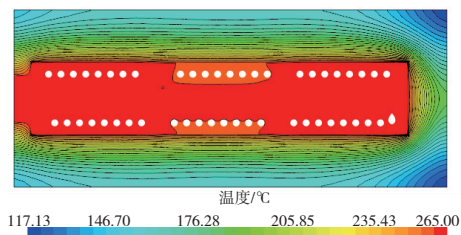


图7 流固耦合系统纵剖面温度场云图(方案2)

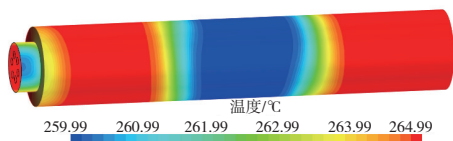


图8 热封辊轴表面温度场云图(方案2)

与原方案对比可知,方案1能优化左侧变形,但趋于变形为一个圆台形,驱动侧变形小,自由端变形大,仍旧存在一定的漏封隐患;对于方案2,辊轴表面热场温度两端高中间低,可以部分抵消辊轴材料整体热胀,能较好地满足宽幅铝箔的热封要求;对于方案3和方案4,对升温过程有较大影响,初始升温中部与两端极不平衡,但是在足够长的时间后,总体辊轴表面热场趋于平衡,与原方案对比差别不大,依旧存在变形导致两侧漏封的问题。

3.3 优化后热封辊轴实际验证

按设计方案2具体参数制作实物,并应用于优化的铝塑泡罩包装机,如图9所示。

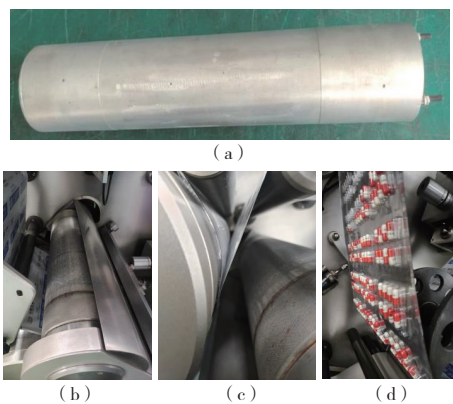


图9 改进实物装配于优化的铝塑泡罩包装机

新机器最大成型面积达到230 mm×350 mm,单排可布置3板药板,最大泡罩包装生产能力接近300板/分。对新机器进行综合循环测试,并跟踪记录该辊轴的使用情况

和成品缺陷及废品情况。基本试验条件如下:总测试时长12个班次,单次循环时长为8h,辊轴平均转速为55 r/min,最高转速为75 r/min,试验周期6d。在设计指定的70 r/min运行速度附近,改进后的辊轴并未发生大尺寸变形,未出现连续两侧边缘漏封等重大产品缺陷,满足铝塑泡罩包装机实际使用的要求。

4 结语

1)流固耦合传热数值仿真可较为准确地模拟宽幅铝箔热封辊轴温度场,分析相关零件的受热状态。

2)多段温度分区控制能够将中部温度降低近5℃,中部减缓的变形能有效地改善宽幅热封辊轴的热胀橄榄状变形情况;变螺距单段加热在升温过程会有较大影响,但是在足够长的时间后,总体辊轴表面热场趋于平衡。后续可以结合多段和变螺距以适应热封速度快速变化时需要辊轴加热或冷却来做出响应的工作场景。

3)将改进辊轴实物安装在优化的铝塑泡罩包装机上,进行综合循环测试,跟踪记录结果显示零件满足新机器实际使用的要求。

4)用数值仿真方法可以得到比试验测量更为丰富和全面的信息,同时不受测试设备和运行环境限制,有效缩短了开发周期,提高了设计的准确性,降低了新产品开发、验证与生产的成本。

参考文献:

- [1] 查玉琴,付映林,王杰,等. 制药工业的现状和发展趋势分析[J]. 广州化工,2020,48(6):14-16.
- [2] 孔祥金. 新医改背景下医药产业的发展与整合方向[J]. 医学与哲学(人文社会医学版),2009,30(4):55-56,63.
- [3] 孙怀远,顾青青,孙波,等. 铝塑泡罩包装机及其应用[J]. 机电信息,2015(17):22-26.
- [4] 方文星,王野. 一种铝塑泡罩药品包装缺陷检测方法[J]. 包装工程,2019,40(1):133-139.
- [5] 吴波,孙磊. 基于流固耦合传热的制动盘瞬态温度场研究[J]. 机械设计与制造,2020(6):117-120.
- [6] 付长顺,巴力登. 基于数值分析的离心泵性能预测[J]. 科技信息,2013(7):6-7.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [8] DAVIDZON M I. Newton's law of cooling and its interpretation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21/22):5397-5402.
- [9] 李晨. 基于有限元的特种车辆方舱隔热性能和力学性能综合研究[D]. 镇江:江苏大学,2019:10-11.
- [10] 李迎,俞小莉,陈红岩,等. 发动机冷却系统流固耦合稳态传热三维数值仿真[J]. 内燃机学报,2007,25(3):252-257.
- [11] 时子青. 新型压阻式MEMS温度传感器的理论研究[D]. 成都:西南交通大学,2011:7-8.

收稿日期:2021-11-25