

基于 Ansys 的铝箔密封受热温度场研究

辛传奇¹, 周益邦², 李维军¹, 白璐¹, 张学伟¹

(1. 辽宁石油化工大学, 辽宁 抚顺 113001; 2. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要: **目的** 研究铝箔不同的密封情况对电磁加热过程中铝箔表面温度分布的影响, 建立非接触式密封性检测方法的理论依据。**方法** 首先创建感应加热理论的有限元数学模型, 计算感应电流产生的焦耳热量, 以此为内部热源求解温度场。然后通过有限单元法创建6种不同密封情况的铝箔封口稳态热传导模型, 对不同铝箔密封情况在恒定温度条件下进行温度分布的三维分析求解, 并采用 Ansys 软件模拟分析加热温度场下铝箔密封的传热特性。**结果** 得到了各种密封情况对应的温度场图像及温度曲线, 其中铝箔密封完好的热图像呈高温闭合且均匀的环状区域, 在其温度曲线中, 温度集中分布在70~80℃, 并具有对称性特点, 且有2个高温峰值; 另外5种为不成环或成环不均的热图像, 表明铝箔密封失败。**结论** 通过研究热温度场分布特性可以判断铝箔封口密封程度, 能够为进一步优化非接触式密封性检测的自动化程度提供理论支持。

关键词: 铝箔密封性; Ansys 软件; 温度场; 数值模拟

中图分类号: TK124; O441.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)23-0137-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.23.020

Heated Temperature Field of Aluminum Foil Sealing Based on Ansys

XIN Chuan-qi¹, ZHOU Yi-bang², LI Wei-jun¹, BAI Lu¹, ZHANG Xue-wei¹

(1. Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of different sealing conditions of aluminum foil on the surface temperature distribution of aluminum foil during electromagnetic heating, and establish the theoretical basis of non-contact sealing detection. Firstly, a finite element mathematical model of the induction heating theory was created to calculate the Joule heat generated by the induced current to solve the temperature field for the internal heat source. Then, steady-state heat conduction model of aluminum foil seals with six different sealing ways was created by the finite element method. The three-dimensional analysis of the temperature distribution of different aluminum foil seals at constant temperatures was carried out. Simulation and analysis of heat transfer characteristics of aluminum foil seals in heating temperature field were conducted with Ansys software. The temperature field image and temperature curve corresponding to various sealing conditions were obtained. The temperature field image sealed by aluminum foil was a closed and uniform annular region with high temperature; in its temperature curve, the temperature was concentrated at 70~80℃ and featured by symmetry, and there are 2 high temperature peaks. The other 5 were unlooped or uneven thermal images, indicating that the aluminum foil sealing failed. According to the distribution characteristics of the thermal temperature field, the sealability of the aluminum foil seal can be evaluated.

收稿日期: 2019-05-20

基金项目: 青年科学基金项目(51206075)

作者简介: 辛传奇(1999—), 男, 辽宁石油化工大学本科生, 专业方向为传热数值模拟分析。

通信作者: 李维军(1977—), 男, 硕士, 辽宁石油化工大学副教授, 主要研究方向为状态监测与故障诊断、机械电子工程等。

ated, and it can provide theoretical support for further optimizing the automation degree of the non-contact sealing detection.

KEY WORDS: aluminum foil sealing; Ansys software; temperature field; numerical simulation

铝箔包装已经普遍应用在制药、食物、油品等包装领域。最普遍、最实用的一种铝箔封口方式是加热密封。该方式是利用外界各种条件（如电加热、高频电压及超声波等）使铝箔封口部位受热变成粘流状态，并借助一定压力，使铝箔与瓶口封合，冷却后保持强度^[1]；有时也会产生热封缺陷，即在包装产品后存在漏封、受热不均或铝箔片自身存在缺陷的问题。漏封是由于在生产过程中未放铝箔片，导致微生物渗透，从而导致产品氧化；受热不均主要是因为当拧盖机对瓶盖进行旋紧时，存在机械磨损或瓶体摆放有偏差，容易产生受力不均从而导致受热不均。这些都是容易引发泄漏的现象，在很大程度上影响了产品的包装质量^[2]。传统的铝箔密封性检测方法检测精度较低且无法实现自动检测，因此，寻找一种检测精度高，使用范围广，可自动识别检测的方法是铝箔包装密封性检测领域的研究热点^[3—6]。

封口是铝箔密封包装过程中的一个重要环节，当产品装瓶结束后，利用拧盖机将内置瓶口铝箔片的瓶盖旋紧，然后通过电磁感应原理对瓶盖进行升温，从而实现封口。在现有的铝箔包装生产线上，都设有铝箔封口检测设备，目的是为了检测瓶盖内是否放有铝箔；当铝箔封口存在残缺或破损时则无法被检测出，从而造成误判^[3]。实际生产过程中，铝箔的残缺或破损往往是影响封口质量的主要因素。

李思畅^[7]研究了一套基于图像处理的铝箔泡罩包装密封性检测方法，综合运用了压差式空气泄露检测原理和 CCD 测量系统工作原理，实现了判别结果的可视化。常珈铭等^[8]针对铝箔封口温度场的表征进行了探究，建立了一种以 Gabor 变换和极限学习机 (ELM) 为基础的铝箔密封性检测方法。根据铝箔密封瓶口热图像的纹理特性差异，判断铝箔密封的好坏。该算法识别精度高、迅速，符合铝箔封口密封的要求。这些研究虽均处理了铝箔封口的图像，但未从原理上模拟计算图像的纹理特性。文中通过有限单元法建立 6 种不同密封情况的铝箔封口稳态热传导模型，在恒定温度条件下，对不同类型的铝箔密封情况进行温度分布的三维分析求解，利用 Ansys 软件对铝箔密封热温度场传热特性进行数值模拟分析，得到不同类型铝箔密封情况对应的不同类型热温度场分布特性。

1 铝箔密封受热温度场传热数值计算

1.1 几何模型及材料组成

研究对象为铝箔片以及瓶口部分，铝箔片选取的是纯铝材质，瓶口部分为聚乙烯材料。Ansys 18.0 是

由美国 Ansys 公司研制的大型通用有限元分析 (FEA) 软件，是世界范围内增长最快的计算机辅助工程 (CAE) 软件，能与多数计算机辅助设计软件接口，实现数据的共享和交换。为了研究铝箔密封受热形成的温度场，以便判断密封情况，基于 Ansys 有限元方法，建立铝箔片 6 种密封情况的稳态热辐射数值模型。根据实际情况，铝箔在封口机的加热下瞬间达到 80 ℃，由于铝箔与瓶体接触，能将热量迅速传递给瓶口部分，因此铝箔的中心温度最高，见图 1。选取铝箔片的公称直径为 30 mm，厚度为 0.01 mm；选取瓶口的外直径为 28 mm，内直径为 24 mm，高度为 10 mm，计算模型的热工参数见表 1，其中 λ 为导热系数， ρ 为密度， c 为比热容。利用 Ansys 前处理软件 Geometry 建立三维模型，然后通过 Model 采用体单元进行网格划分，使三维模型划分为六面体单元，网格尺寸为 0.05 mm，见图 2。

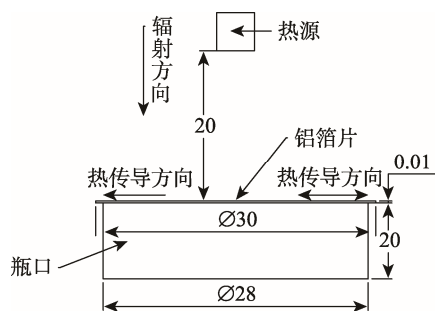


图 1 电磁感应热辐射及传导运算模型

Fig.1 Calculation model of electromagnetic induction heat radiation and conduction

表 1 材料系数
Tab.1 Material coefficient

材料	导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热容 $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
铝	237.5	2689	951
聚乙烯	0.4	930	2300

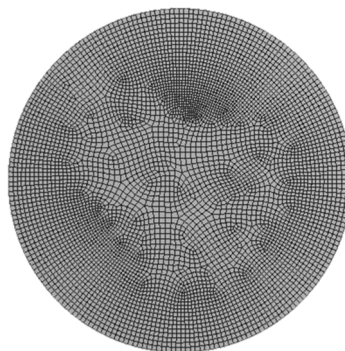


图 2 网格划分

Fig.2 Grid division

1.2 创建感应加热原理及有限元数学模型

1.2.1 创建电磁场原理及有限元模拟模型

电磁感应加热过程就是电能和磁能间的能量转换,最后转变为铝箔的内能,完成对铝箔的加热。电磁感应加热是一种非接触加热方式,过程比较简单,加热线圈中的高频交流电在导线周围生成频率一致的交变磁场。将具有导磁性的铝箔放在线圈周围的交变磁场中,会在铝箔中形成涡流,涡流使磁场中的金属原子进行无规则高速运动,原子间相互碰撞、摩擦而产生热能,从而达到加热目的^[9]。

由法拉第电磁感应定律^[10-12]可知:

$$\begin{cases} \phi = BS \\ B = \mu H \\ \varepsilon = N(\delta\phi/\delta t) \end{cases} \quad (1)$$

因此

$$\varepsilon = \mu NS(\delta H/\delta t) \quad (2)$$

式中: ϕ 为感应线圈产生的磁通量 (Wb); B 为磁感应强度 (T); S 为线圈截面积 (mm^2); μ 为介质的磁导率; H 为磁场强度 (A/m); ε 为感应电动势 (V); N 为线圈匝数。

H 的大小取决于磁场激励源,即磁场强度对时间变化率 $\frac{\delta H}{\delta t}$ 的大小由线圈中电流强度和频率决定。

$$\begin{cases} I = \varepsilon/R \\ P = I^2 R \\ R = \rho L/S \\ Q = Pt = I^2 Rt \end{cases} \quad (3)$$

式中: I 为涡流大小 (A); R 为电阻值 (Ω); ρ 为电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$); S 为横截面积 (m^2); L 为导线的长度 (m); c 为比热容 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); m 为质量 (kg)。

当电流大小和频率给定时,由以上计算公式就可以得出焦耳热量 Q 。

1.2.2 创建温度场理论及有限元数学模型

解决电磁场和温度场是为了将内部热源用已求得的感应电流焦耳热来求解温度场。温度场的最终求解成果可用于分析在感应加热时铝箔各区域的温度变化情况,从而提供制订热处理过程的依据。

感应加热的温度场应根据焦耳定律求解,以获得铝箔各区域在感生涡流作用下产生的热量,然后依据热传导方程计算和求解,并考虑边界条件,以得出铝箔的温度分布。

在进行感应加热时,铝箔的温度分布与坐标和时间具有函数关系,即:

$$T = f(x, y, z, t) \quad (4)$$

式中: x, y, z 为空间笛卡儿坐标; t 为时间坐标。

获得感应加热完成时铝箔内部温度的分布,即加热停止时铝箔的温度场就是文中目的。导热微分方程

表示为:

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right] + \varphi \quad (5)$$

式中: T 为物体的瞬态温度 (K); ρ 为材料密度 (kg/m^3); λ 为各向同性材料的导热系数 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$); c 为材料比热 ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$); φ 为内热源生成的热量 (J), 因此, 公式 (5) 可以变为柱坐标系下的导热微分方程, 即

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi \quad (6)$$

式中: r 为铝箔片的半径 (mm); θ 为角度; z 为铝箔片的厚度 (mm)。

对于具有对称特点的铝箔,由于其负载也具有对称性,则:

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \quad (7)$$

具有对称特点的铝箔,其对于温度场求解的基本数学模型可变为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi \quad (8)$$

由于铝箔厚度可以忽略不计,因此式 (8) 可变为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \varphi \quad (9)$$

1.2.3 初始条件与边界条件

模型中的铝箔片为纯铝,瓶口为聚乙烯材料,研究对象是铝箔片,即铝箔片受热密封时的温度变化。瓶口以及铝箔片的材料均选用 Ansys 材料库中自带的聚乙烯和纯铝材料参数。选取稳态温度分析模块,模型中铝箔为金属材料,其厚度较小,因此可以看作无限大平板,铝箔受热密封的有限元分析属于接触问题。由于铝箔面与空气间存在切向的相对滑动,并与瓶口存在法向接触,在设置中将空气与铝箔片的相关接触面、铝箔片与瓶口的相关接触面设置为 Frictional 接触,摩擦因数为 0.26,接触算法采用拉格朗日增强算法,将铝箔片的外表面设置为相互接触。相对于厚度极薄的铝箔片而言,将瓶口部分设置为刚体,可忽略其变形。然后将铝箔片设置为固定,热源持续向下辐射热量,最终使铝箔片与瓶口密封。

感应加热温度场的初始条件是指在热量传递开始时整个空间中物体的温度。在感应加热开始时,铝箔的初始温度是均匀的,即初始条件^[13-14]是:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (10)$$

式中: T_0 为铝箔片的初始温度 (K)。

利用电磁感应加热对铝箔进行密封的过程中伴随着热传导、热对流和热辐射等 3 种热量传递方式。

包括铝箔表面与周围环境的对流和辐射换热,感应加热与密封区域的辐射换热,铝箔内部的热传导,因此控制方程的边界条件为^[15-17]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + h(T_1 - T_2) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_2^4) = q_s(x, y, z, t) \quad (11)$$

式中: q_s 为单位面积所获热量 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); λ 为导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); h 为对流换热系数; n 为边界外法线的方向; T_1 为铝箔表面的温度 (K); T_2 为环境温度 (K); ε 为热辐射系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 约为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

2 模拟结果及分析

在实际加工过程中,铝箔密封一般是通过铝箔封口机实现的,其原理是电磁感应加热使温度瞬间升高,电磁感应加热的温度一般在 200°C ,在产品从封口机出来 30 s 后进行红外热像检测,获取热像图时铝箔的温度在 80°C 左右。为模拟实际情况,在 Ansys 分析铝箔密封受热温度场时,将热源设置为固定的 80°C ,进行对铝箔密封受热温度场的模拟。根据实际中取得的热图像,在相应的条件设定下,利用 Ansys 软件模拟 6 种铝箔密封情况不同的药瓶,得出其温度场分布情况,见图 3。

根据图 3 得出的温度数据,以铝箔的直径为横坐标,温度为纵坐标,铝箔片的中心为坐标原点,通过 Matlab 软件对铝箔受热之后沿直径方向的温度分布绘制温度分布曲线,见图 4。依据温度场图像和温度曲线,将这 6 种有差别的密封类型进行了区分。

1) 当铝箔密封完好时,铝箔片与瓶口完美粘合,

受热均匀。由于金属铝箔的导热率比塑料瓶盖的导热率高,因此会形成一个高温闭合的环状区域。其温度曲线处于高温段 $70 \sim 80^\circ\text{C}$ 之间,接近于热源温度,并具有 2 个高温峰值,呈对称分布。

2) 当瓶盖内的铝箔不完整时,铝箔与瓶盖粘合的部分产生高温,铝箔缺失的部分温度较低,形成非环状特征,与密封完好的图像相比有明显差异。其温度曲线中分布在 $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 之间,只有 1 个高温峰值,且不具有高度对称性。

3) 当拧盖机在旋紧瓶盖的过程中发生故障,导致只有铝箔和瓶口材质加热粘合在一起,而瓶盖脱落。此时,由于直接对金属铝箔加热,整个铝箔片表面呈高温红热非环状的状态,与有瓶盖时密封完好的温度场图像有明显区别。其温度曲线也集中在高温段 $70 \sim 80^\circ\text{C}$ 之间,接近于热源温度,虽然也呈对称分布,但只有 1 个高温峰值。

4) 当瓶盖内没有铝箔时,对其加热密封,因没有铝箔片与瓶口粘合,最终导致密封失败。从温度场图像可以看出,由于内部没有铝箔,热源只对聚乙烯瓶盖加热,其温度梯度变化较大,二分之一半径之内的区域温度变化并不明显。在温度曲线上,其最低温度低于 60°C , $-7 \sim 7 \text{ mm}$ 间的温度曲线较平缓,曲线呈对称分布。

5) 当拧盖机对瓶盖进行旋紧时,由于机械磨损或瓶体摆放有偏差,往往容易产生受力不均的现象,因此在加热过程中就会出现受热不均的现象,铝箔片与瓶口材料的粘合程度就会不一致。就会出现以下 2 种情况:温度场图像会呈现出月牙型环状高温区域,

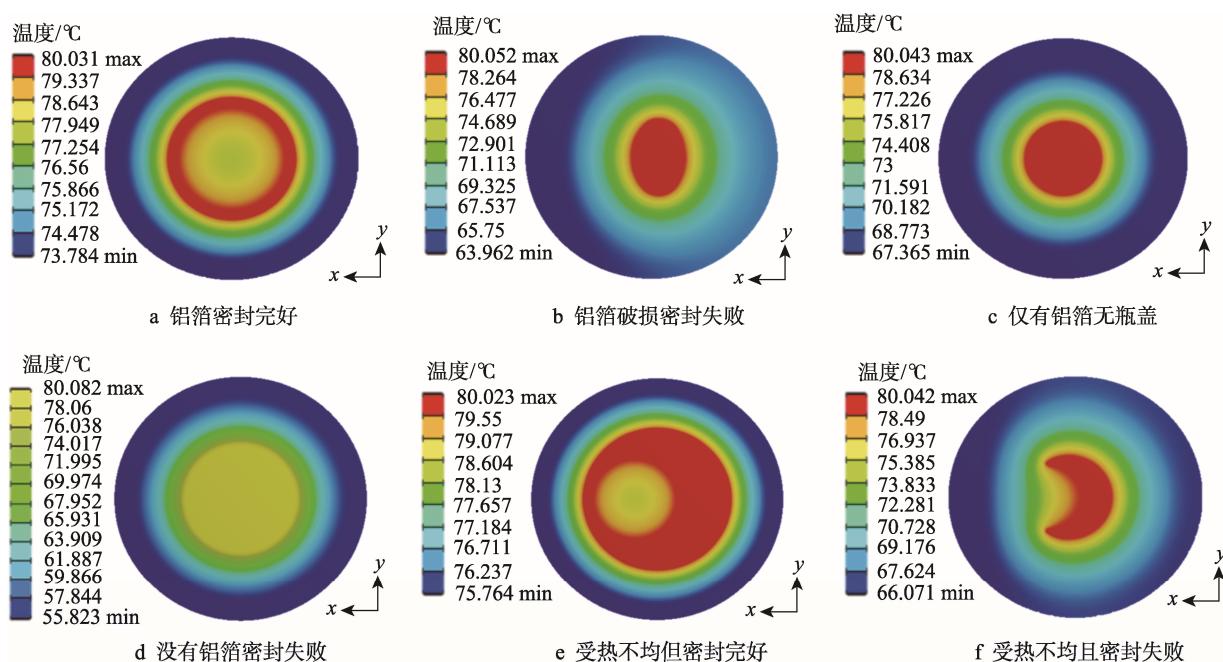


图 3 基于 ANSYS 模拟的 6 种密封情况的温度场图像

Fig.3 Temperature field images of six sealing conditions based on ANSYS simulation

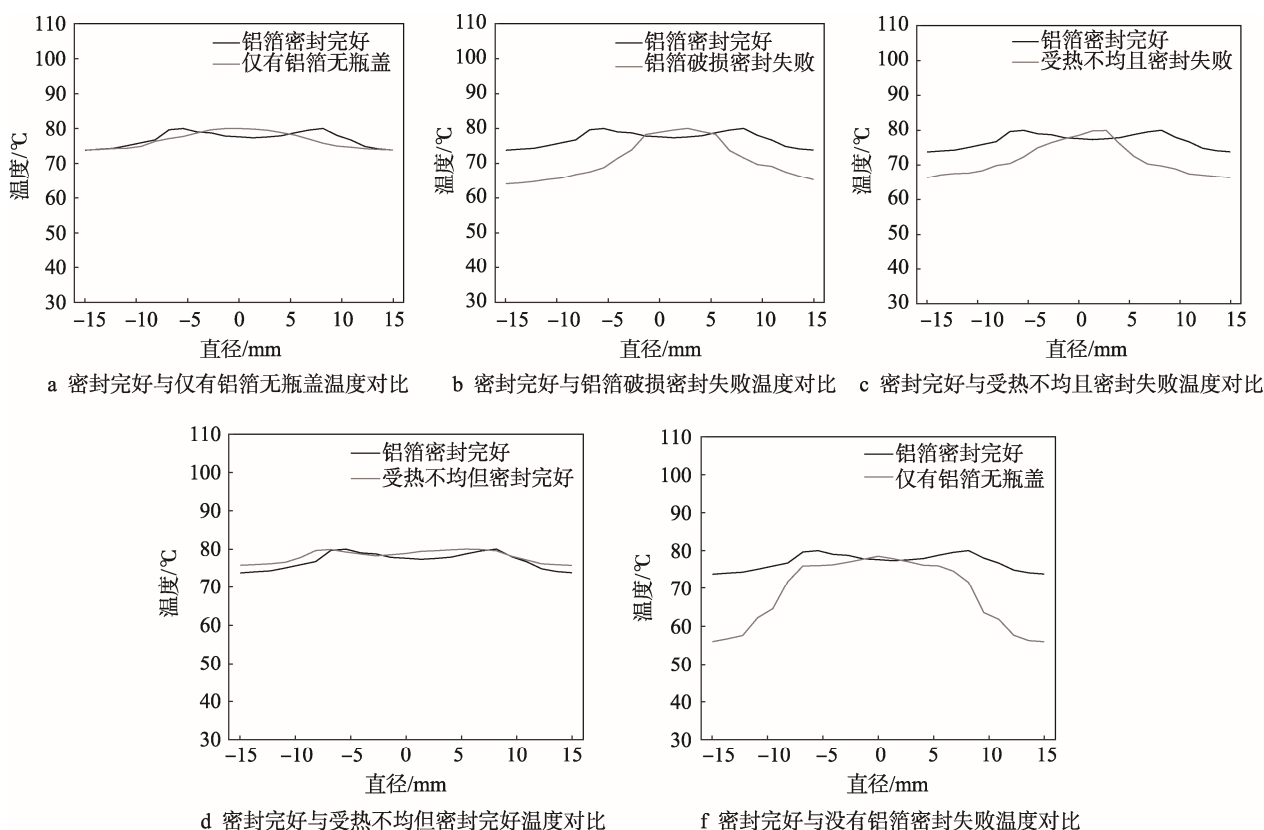


图 4 5 种密封缺陷分别与密封完好温度对比曲线

Fig.4 Five kinds of sealing defects and good sealing temperature contrast chart

未成环位置粘合程度较差,存在泄漏隐患,其温度曲线也处于高温段 70~80 °C 间,接近于热源温度,虽然有 2 个高温峰值,但是并不具有对称性特征,而且在 0~5 mm 间的温度明显低于铝箔密封完好的温度;温度场图像会呈现出月牙型非环状高温区域,未成环位置温度过低,导致铝箔与瓶口塑料无法粘合在一起,其温度曲线中的温度分布在 60~80 °C 间,只有 1 个高温峰值,且不具有高度对称性。

通过以上分析,可以大致分为以下 2 种情况,其中一种是呈高温闭合均匀环状区域的温度场图像,另外 5 种为不成环或成环不均的温度场图像。通过温度曲线对比,可以明显看出,密封完好的铝箔,温度曲线处于高温段 70~80 °C 间,并具有 2 个高温峰值,呈对称分布;受热不均但密封完好的铝箔,其温度曲线虽然也集中分布在 70~80 °C 之间,并具有 2 个高温峰值,但是温度分布不对称,而且在 0~5 mm 间的温度明显低于铝箔密封完好的温度;此外,其余 4 种密封情况的温度曲线大多不对称,而且都仅具有 1 个高温峰值,最低温度除了仅有铝箔无瓶盖这种情况高于 70 °C 外,其余 3 种密封情况的最低温度都低于 70 °C。综上所述,根据温度曲线对比图,通过温度范围、对称情况及最低温度可直接判断铝箔受热的 6 种密封情况。

3 结语

在根据实际情况模拟的 6 种铝箔密封情况获得的温度场图像中,有一种是呈高温闭合均匀环状区域的温度场图像,其铝箔密封效果良好;另外 5 种是不成环或成环不均的温度场图像,铝箔封口处存在不同程度的缺陷。

在所获得的温度曲线中具有 2 个高温峰值、温度分布在 70~80 °C 之间,且具有对称性特点的为铝箔密封完好的情况,不具备这 3 个条件的均视为铝箔密封失败。

分析结果表明,通过研究热温度场分布特性可以判断铝箔封口的密封程度,能够为进一步优化非接触式密封性检测的自动化程度提供理论支持。

参考文献:

- [1] 魏保花. 微小缺陷对铝塑复合软包装阻隔性影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010: 7—9.
WEI Bao-hua. Study on the Effect of Micro-defects on the Barrier Properties of Aluminum-plastic Composite Flexible Packaging[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2010: 7—9.
- [2] 陆刚. 漫谈铝箔的包装市场及其发展趋势[J]. 塑料

- 包装, 2013, 24(3): 8—14.
- LU Gang. Talk about the Packaging Market of Aluminum Foil and Its Development Trend[J]. Plastic Packaging, 2013, 24(3): 8—14.
- [3] 郑兆平, 曾汉生, 丁翠娇, 等. 红外热成像测温技术及其应用[J]. 红外技术, 2003, 25(1): 96—98.
- ZHENG Zhao-ping, ZENG Han-sheng, DING Cui-jiao, et al. Infrared Thermography Temperature Measurement Technology and Its Application[J]. Infrared Technology, 2003, 25(1): 96—98.
- [4] MALDAGUE X P V. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing[J]. Chapter, 2001, 4(3): 307—310.
- [5] HEIKKINEN E, HURME E, AHVENAINEN R. Method for Treating a Product and a Leak-detection Device: US, 6279384[P]. 2001-08-28.
- [6] PASCALL M A, RICHTSMEIER J, RIEMER J, et al. Non-destructive Packaging Seal Strength Analysis and Leak Detection Using Ultrasonic Imaging[J]. Packaging Technology & Science, 2002, 15(6): 275—285.
- [7] 李思畅. 基于图像处理的铝箔泡罩包装密封性检测技术研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014: 5—7.
- LI Si-chang. Research on Sealing Detection Technology of Aluminum Foil Blister Packaging Based on Image Processing[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014: 5—7.
- [8] 常珈铭, 李维军, 石成江. 基于 Gabor 变换和极限学习机的铝箔密封性检测[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2017, 37(3): 64—69.
- CHANG Jia-ming, LI Wei-jun, SHI Cheng-jiang. Sealing Detection of Aluminum Foil Based on Gabor Transform and Extreme Learning Machine[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum and Chemical Technology, 2017, 37(3): 64—69.
- [9] 毛廷廷, 郑甲红, 孙鹏, 等. 电磁感应压光机的设计与分析[J]. 中华纸业, 2019, 40(4): 16—19.
- MAO Ting-ting, ZHENG Jia-hong, SUN Peng, et al. Design and Analysis of Electromagnetic Induction Calender[J]. Zhonghua Paper, 2019, 40(4): 16—19.
- [10] 高中堂, 谭金强, 郭卫, 等. 16Mn 模具钢电磁热止裂与激光熔覆再修复的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(24): 190—194.
- GAO Zhong-tang, TAN Jin-qiang, GUO Wei, et al. Numerical Simulation of Electromagnetic Hot Crack Arrest and Laser Cladding Repair of 16Mn Die Steel[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(24): 190—194.
- [11] 黄世泽, 郭其一, 李凡璋, 等. 基于 Ansys 的电磁系统温度场仿真技术研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(2): 32—37.
- HUANG Shi-ze, GUO Qi-yi, LI Fan-zhang, et al. Research on Temperature Field Simulation Technology of Electromagnetic System Based on Ansys[J]. Electrical and Energy Efficiency Management Technology, 2015(2): 32—37.
- [12] 朱绍军. 电磁感应加热在热整理机中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 15—18.
- ZHU Shao-jun. Application of Electromagnetic Induction Heating in Thermal Finishing Machine[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 15—18.
- [13] 许雪峰, 赵敏, 吴金富. 钢坯料感应淬火温度场有限元模拟分析[J]. 金属热处理, 2005(30): 152—155.
- XU Xue-feng, ZHAO Min, WU Jin-fu. Finite Element Simulation Analysis of Induction Quenching Temperature Field of Steel Billet[J]. Metal Heat Treatment, 2005(30): 152—155.
- [14] 李韵豪. 锻压工业中的感应加热[J]. 机械工人, 2007(2): 82—85.
- LI Yun-hao. Induction Heating in Forging Industry[J]. Mechanical Workers, 2007(2): 82—85.
- [15] 何小东, 张建勋, 裴怡, 等. 钛合金薄板激光焊接和 TIG 焊接残余应力数值模拟[J]. 机械工程材料, 2005, 29(3): 25—28.
- HE Xiao-dong, ZHANG Jian-xun, PEI Yi, et al. Numerical Simulation of Residual Stress in Laser Welding and TIG Welding of Titanium Alloy Sheets[J]. Mechanical Engineering Materials, 2005, 29(3): 25—28.
- [16] 王秀凤, 郭晓丽, 陈光南, 等. 板料激光弯曲过程的数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(3): 389—392.
- WANG Xiu-feng, GUO Xiao-li, CHEN Guang-nan, et al. Numerical Simulation of Sheet Laser Bending Process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(3): 389—392.
- [17] 李昊, 沈以赴, 李守卫, 等. 激光扫描路径对直接金属激光烧结温度场的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(5): 638—642.
- LI Hao, SHEN Yi-fu, LI Shou-wei, et al. The Effect of Laser Scanning Path on the Temperature Field of Direct Metal Laser Sintering[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 37(5): 638—642.
- [18] 葛磊. 45#、65Mn 温变形流变应力及组织特性的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012: 43—45.
- GE Lei. 45#, 65Mn Temperature Deformation Flow Stress and Microstructure Characteristics[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012: 43—45.
- [19] 龚幼. 船舶分段制造过程中的应力与变形问题研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 12—15.
- GONG You. Research on Stress and Deformation in Ship Segmentation Manufacturing Process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 12—15.