

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.09.14

晶体罩继电器激光密封焊有限元分析与密封性提升研究

韦明彰, 陈俊峰, 王明文, 赖业方

桂林航天电子有限公司, 广西 桂林 541002

摘要: 晶体罩继电器在激光密封焊生产过程中存在玻璃绝缘子与底板封接界面的泄漏问题,严重影响继电器密封性能及长期可靠性。本文建立了继电器激光密封焊三维有限元模型,采用高斯面热源与三维倒锥体热源组合模式模拟焊缝形貌,并通过热成像实验验证模型的准确性。仿真结果表明:原激光密封焊工艺(平均功率200 W,频率80 Hz)导致玻璃绝缘子封接界面峰值拉应力(73~107 MPa)超过玻璃抗拉强度(80 MPa),且部分区域峰值温度(最高724.9 °C)超过玻璃软化点(575 °C),引发界面裂纹导致泄漏。针对这个问题提出优化方案:首先,优化激光参数(平均功率150 W,频率50 Hz),维持峰值功率(1.5 kW)确保熔深,热输入降低25%;其次,在继电器四周增设紫铜导热块(厚度9.5 mm,顶紧力30 N)。优化后的有限元分析表明,封接界面峰值拉应力降至52~60 MPa(低于玻璃强度),峰值温度降至322~448 °C(低于软化点)。工艺试验证实,优化方案使泄漏率降至 $\leq 8.3 \times 10^{-10}$ Pa·m³/s,满足 $\leq 1 \times 10^{-9}$ Pa·m³/s的优质密封标准,较原工艺提升两个数量级。

关键词: 晶体罩继电器; 激光密封焊; 有限元分析; 密封性优化

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)09-0134-11

Finite Element Analysis and Sealing Improvement Research on Laser Sealing Welding of Crystal Cover Relay

WEI Mingzhang, CHEN Junfeng, WANG Mingwen, LAI Yefang

Guilin Aerospace Electronics Co., Ltd., Guilin 541002, China

Abstract: During the laser hermetic sealing production process of crystal can relays, leakage issues exist at the sealing interface between the glass insulator and the base plate, severely impacting the relay's sealing performance and long-term reliability. This paper established a three-dimensional finite element model for the relay's laser hermetic sealing. A combined heat source model, utilizing a Gaussian surface heat source and a 3D inverted cone heat source, was employed to simulate the weld morphology. The model's accuracy was validated through thermal imaging experiments. Simulation results revealed that the original laser sealing process (average power 200 W, frequency 80 Hz) caused peak tensile stresses at the glass insulator sealing interface (73-107 MPa) to exceed the glass's tensile strength (80 MPa). Furthermore, peak temperatures in some regions (up to 724.9 °C) surpassed the glass softening point (575 °C), inducing interfacial cracks and leading to leakage. To address this issue, an optimized solution was proposed: Optimized laser parameters (average power 150 W, frequency 50 Hz) were implemented, maintaining the peak power (1.5 kW) to ensure penetration depth while reducing heat input by 25%. Copper heat-conducting blocks (thickness 9.5 mm) were added around the relay and applied with a force of 30 N. Finite element analysis of the optimized solution showed that the peak tensile stress at the sealing interface decreased to 52-60 MPa (below the glass strength), and the peak temperature dropped to 322-448 °C (below the softening point). Process trials confirmed that the optimized solution reduced the leakage rate to $\leq 8.3 \times 10^{-10}$ Pa·m³/s, meeting the high-quality sealing standard of $\leq 1 \times 10^{-9}$ Pa·m³/s and representing an improvement of two orders of magnitude compared to the original process. This solution has been successfully implemented in formal production, significantly enhancing product sealing reliability.

收稿日期: 2024-05-31 修回日期: 2024-11-20

作者简介: 韦明彰(1987—),男,学士,工程师,主要从事继电器焊接技术研究。E-mail: 920862164@qq.com。

Keywords: crystal cover relay; laser sealing welding; finite element analysis; improved sealing performance

引用格式: 韦明彰,陈俊峰,王明文,等. 晶体罩继电器激光密封焊有限元分析与密封性提升研究[J]. 电焊机,2025,55(9):134-144.

Citation: WEI Mingzhang, CHEN Junfeng, WANG Mingwen, et al. Finite Element Analysis and Sealing Improvement Research on Laser Sealing Welding of Crystal Cover Relay[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(9): 134-144.

0 引言

继电器作为一种重要的自动控制元件,广泛运用于自动、遥控、遥测、通讯及电力系统等装置中,执行电源切换、控制和信号传递等功能。晶体罩继电器为底座组与外壳封接结构,其中底座组由底板、引出杆与DM-308玻璃绝缘子烧结封接而成(外壳厚度0.3 mm,材料为白铜B19,熔点1190℃;底板厚度1.5 mm,引出杆直径为1 mm,两者材料均为可伐合金4J29,熔点1430℃),继电器由底座组的底板与外壳通过激光密封焊形成密闭腔体。继电器腔体内部充满干燥的惰性保护气体,有利于保证触点长期、可靠工作,若出现泄漏,继电器内、外部气体就会出现交换,影响继电器性能的可靠与稳定。在晶体罩继电器激光密封焊生产过程发现,玻璃绝缘子与底板金属的封接界面出现泄漏,泄漏位置靠近底板周围的激光焊缝,泄漏率主要分布在 $6 \times 10^{-8} \sim 2 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。泄漏问题会影响晶体罩继电器性能的可靠与稳定,所以需要对其激光密封焊过程进行深入研究。

激光焊接是一个升温和降温极为迅速的热冲击过程,焊接过程产生的不均匀温度场导致焊接结构产生较大的焊接应力、变形等情况,所以研究激光焊接温度场分布情况,对认识激光焊接的本质和调整激光焊接的工艺参数都有重要意义^[1]。通过传统工艺试验等手段较难探究焊接过程温度分布与应力分布规律,随着有限元仿真技术的成熟,采用有限元软件模拟焊接过程,成为了一种理想的研究方法^[2-8]。有限元软件应用于激光焊接的温度场和应力场的仿真,可以解决焊接过程瞬间无法直接探测的难题^[9]。

本文通过晶体罩继电器激光密封焊有限元分析,探究激光焊过程的温度与应力对玻璃绝缘子封接界面的影响规律,最终通过优化激光密封焊工艺,降低激光密封焊对玻璃绝缘子与底座组封接界

面的破坏,提高产品的密封性能,提升继电器的可靠性及稳定性。

1 激光密封焊有限元建模

1.1 有限元模型建立及热源模型选择

建立继电器激光密封焊模型后进行网格划分,并对材料进行定义。有限元模型采用体网格划分,节点总数为65 220,单元总数为269 765,见图1。根据生产实际情况,对继电器激光密封焊模型装夹情况进行定义,模型下方为支撑平台,四周使用夹具固定。

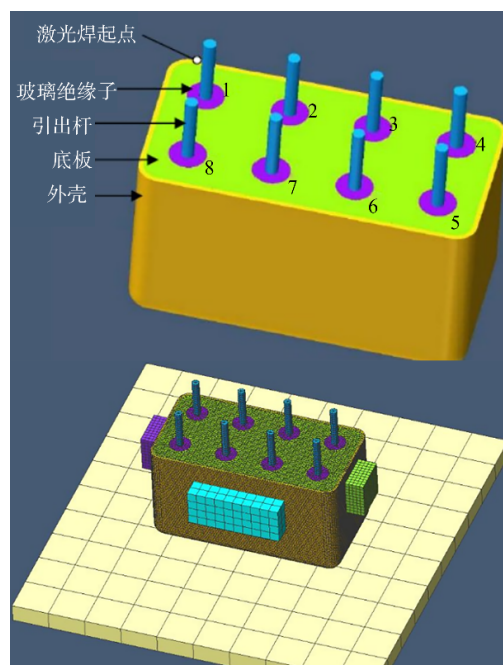


图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

热源模型的选取对于激光焊接有限元分析尤为关键,可获得准确的分析结果^[10-11]。根据晶体罩继电器激光密封焊缝截面形貌特征,采用高斯面热源与三维倒锥体热源组合模式。根据激光光斑的定义:从光斑中心功率密度到衰减为中心功率密度5%的距离称为光斑半径^[12]。在焦点附近光斑上的

热流分布近似用高斯分布函数描述,公式为^[13]:

$$q_s(r) = \frac{3\Phi}{\pi r_0^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \quad (1)$$

式中 $q_s(r)$ 为热源所在平面上距光斑中心 r 处的热流密度; Φ 为高斯面热源功率; r_0 为光斑半径。

三维倒锥体热源模型的实质是一系列平面高斯热源沿工件厚度方向叠加,而每个截面的热流分布半径沿厚度方向呈线性衰减,而热流密度在 z 轴(焊缝垂直中心线)上的热流密度保持不变,公式为^[14]:

$$r_0(z) = r_e - (r_e - r_i) \frac{z_e - z}{z_e - z_i} \quad (2)$$

$$q(r, z) = \frac{9Qe^3}{\pi H(e^3 - 1)(r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

式中 Q 为三维倒锥体热源功率; H 为焊件厚度; z_e 、 z_i 为热源作用工件上、下表面的 Z 坐标位置; r_e 、 r_i 为热源作用在工件上、下表面的热源分布半径。

设激光输入的总功率为 P , 有效功率为 P' , 则:

$$P' = \eta P = \Phi + Q \quad (4)$$

式中 η 为激光焊热效率, 结合热成像测温试验结果确定热效率为 0.7。

高斯面热源功率 Φ 与三维倒锥体热源功率 Q 分别取不同比例进行有限元模拟, 当两者比例采用 1:3 时, 所得的焊接熔池与实际焊接熔池吻合度较高, 见图 2。这表明采用高斯面热源与三维倒锥体热源体组合模式模拟激光密封焊是合理的。



图2 有限元模拟焊缝截面与实际焊缝截面对比

Fig. 2 Comparison: simulated vs. actual weld cross-sections

1.2 焊接边界条件

设材料的初始温度为 20°C , 考虑到激光的加热作用, 焊接表面的导热、对流及辐射换热为^[15]:

$$-k_e \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} + h(T_s - T_e) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_e^4) = q \quad (5)$$

式中 T 为材料体温度; T_s 为材料表面温度; T_e 为环境温度; z 为工件厚度方向坐标; k_e 为有效导热系数; h 为对流换热数; σ 为史蒂芬-玻尔兹曼常量; ε 为热辐射系数。另外, 相变潜热对温度分布也有很大影响, 需在有限元分析计入该因素^[16]。

2 原工艺激光密封焊有限元分析

2.1 原工艺有限元分析

设定原工艺激光焊参数: 脉宽 2 ms、平均功率 200 W、频率 80 Hz、焊接速度 12 mm/s, 顺时针焊接 1 圈, 用时 6.6 s。

从激光密封焊有限元分析过程可知, 激光光斑在焊接移动过程靠近并远离每一个玻璃绝缘子时, 该玻璃绝缘子与底板金属的封接界面受到较高的温度、应力作用。DM-308 玻璃属于脆性材料, 其抗拉强度约 80 MPa, 抗压强度为 600~1 600 MPa, 故对玻璃绝缘子施加拉应力与对其施加压应力相比更容易产生裂纹等缺陷。DM-308 玻璃软化温度为 575°C , 若玻璃温度大于软化温度, 其自身的强度变差, 此时对玻璃施加拉应力作用, 容易出现裂纹等缺陷。当玻璃绝缘子与底板金属的封接界面在较大拉应力及高温作用下被破坏产生裂纹, 并且此裂纹在该玻璃绝缘子的厚度方向出现贯穿时, 会导致密封继电器在此处泄漏。

以激光焊起点至终点的光斑顺时针路径为顺序, 依次对玻璃绝缘子编号 1~8。分别识别 1 号~8 号玻璃绝缘子与底板封接界面在焊接过程的法向拉应力最大值部位, 并拾取该部位在厚度方向的 3 点(分别在拉应力最大值部位 B 点, 及其厚度方向的上、下边缘各取 A、C 点, 见图 3), 进行应力、温度曲线分析, 结果见图 4、图 5。

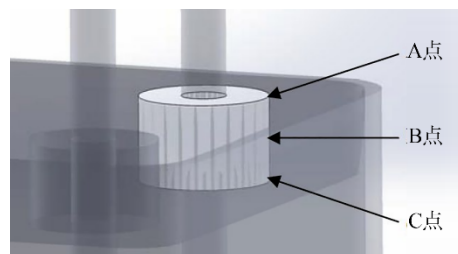


图3 拾取各个玻璃绝缘子封接界面 A、B、C 点

Fig. 3 Points (A, B, C) at glass insulator sealing interfaces

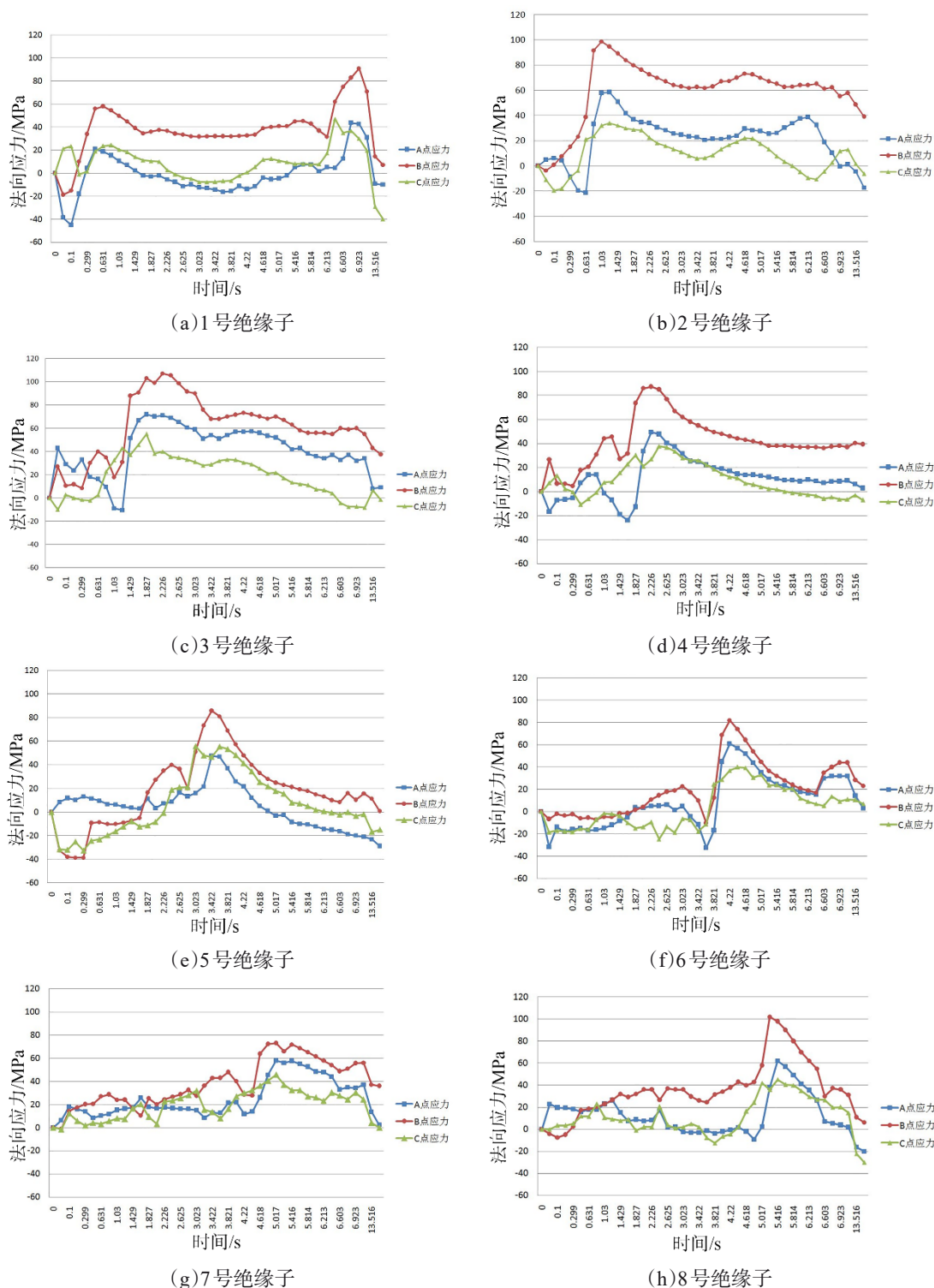


图4 1号~8号玻璃绝缘子封接界面应力曲线

Fig. 4 Stress curves:sealing interfaces of glass insulators No. 1~No. 8

由应力、温度曲线可知,激光光斑在依次靠近并远离1号~8号玻璃绝缘子时,熔化成形的焊缝金属因温度迅速降低而产生剧烈的收缩作用,导致玻

璃绝缘子与底板金属的封接界面受到较高的拉应力作用。1号~8号玻璃绝缘子封接界面的峰值拉应力分别为91.0 MPa、98.8 MPa、107.0 MPa、87.3 MPa、

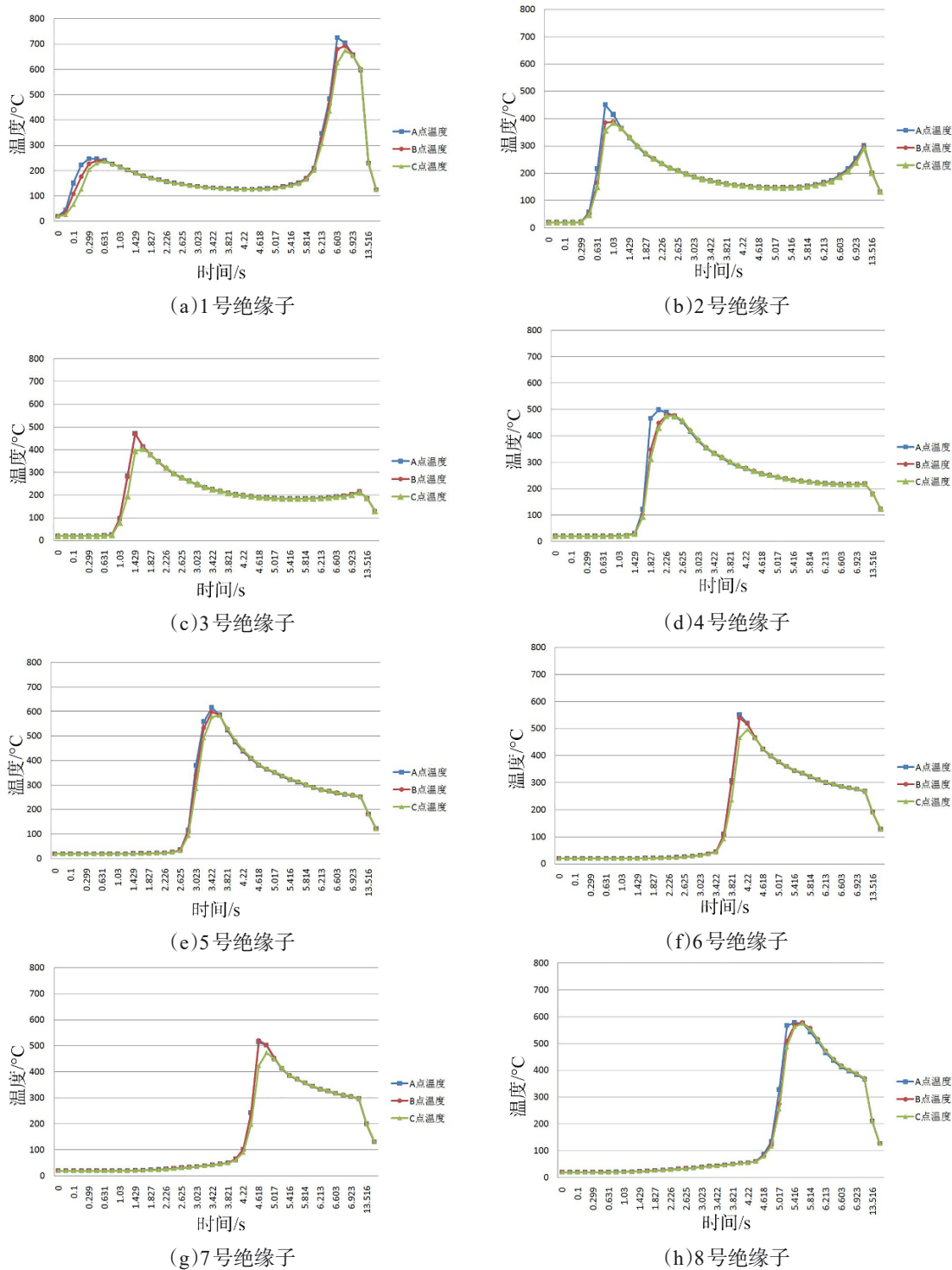


图5 1号~8号玻璃绝缘子封接界面温度曲线

Fig. 5 Temperature curves: sealing interfaces of glass insulators No. 1~No. 8

85.9 MPa、81.8 MPa、73.0 MPa、102.0 MPa, 峰值拉应力范围为73~102 MPa。除了7号绝缘子外,其余的7个绝缘子封接界面的峰值拉应力均超过玻璃材料抗拉强度,会破坏玻璃绝缘子与底板封接界面,

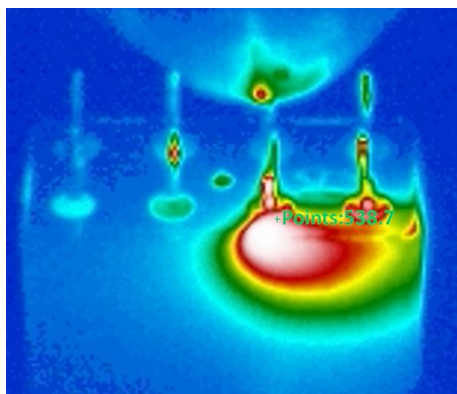
造成泄漏隐患。

1号~8号玻璃绝缘子封接界面的峰值温度分别为724.9 °C、450.5 °C、470.5 °C、498.8 °C、616.5 °C、552.1 °C、516.1 °C、577.7 °C,其中1号、5号、8号绝

缘子玻璃封接界面峰值温度偏高。在完成1圈焊接的第6.6 s时,焊接起点附近的金属尚未冷却,而激光光斑再次移动到该处,导致距该处最近的1号绝缘子封接界面温度迅速升高至724.9℃。底板金属在焊接过程因热传导作用温度逐渐升高,同时激光光斑移动到继电器拐角位置时焊接热量比较集中,导致距离该处较近的5号、8号绝缘子封接界面温度迅速升高,分别达到616.5℃、577.7℃。该三个玻璃绝缘子封接界面峰值温度高于玻璃材料的软化温度,其在较高的拉应力作用下,容易破坏玻璃与金属封接界面而导致泄漏。

2.2 热成像验证有限元分析准确性

为验证有限元分析的准确性,根据实际的激光焊设备条件,使用MAG-F7高速热像仪、FLIR T650sc手持式热像仪分别对焊接过程、焊后冷却过程的继电器玻璃绝缘子与底板金属封接界面温度进行测量(见图6),并与有限元分析数据进行对比,得出以下结果:



(a)MAG-F7高速热像仪



(b)FLIR T650sc手持式热像仪

图6 热像仪测温

Fig. 6 Thermal imaging temperature measurement

(1)使用MAG-F7高速热像仪分别测量焊接第3 s、4 s、5 s、6 s时6号玻璃绝缘子与底板金属封接界面温度,分别为30.9℃、538.7℃、364.3℃、300.1℃,有限元分析温度分别为31.8℃、552.1℃、377.0℃、310.9℃,两者分别存在2.9%、2.5%、3.5%、3.6%的较小误差。

(2)使用FLIR T650sc手持式热像仪分别测量焊后冷却过程的第12 s、18 s、24 s、30 s时6号玻璃绝缘子与底板金属封接界面温度,分别为219℃、148℃、136℃、130℃,有限元分析温度分别为211.2℃、141.0℃、132.1℃、125.3℃,两者分别存在3.6%、4.7%、2.9%、3.6%的较小误差。

(3)有限元分析温度数据与热成像实测温度数据对比结果表明,两者的误差≤4.7%,故有限元分析可以较准确模拟激光密封焊接过程。

3 激光密封焊工艺优化有限元分析

3.1 工艺优化方案

根据晶体罩继电器原激光密封焊参数的有限元分析结果可知,焊接过程激光焊热输入较大,导致大多数玻璃绝缘子封接界面的峰值拉应力超过玻璃材料抗拉强度,甚至部分绝缘子的封接界面峰值温度超过玻璃软化温度,会破坏该封接界面,导致继电器在该处泄漏,故需从以下两个方面进行优化:

(1)降低激光密封焊热量输入。

降低激光密封焊热量输入,即降低激光焊平均功率,可以降低玻璃绝缘子与底板封接界面受到的拉应力与温度影响。继电器激光密封焊使用Nd:YAG脉冲激光器,可以通过优化匹配激光焊参数以调制光束。激光焊峰值功率影响熔池深度,足够的熔深可以保证继电器激光焊缝密封良好。通过优化匹配激光焊参数,在降低平均功率以减小激光密封焊热量输入的同时,确保峰值功率不低于原激光焊参数。

激光焊峰值功率的计算公式:

$$P_p = \frac{P_a}{ft} \quad (6)$$

式中 P_p 为峰值功率; P_a 为平均功率; f 为频率; t 为

脉宽。

结合工艺试验,将激光焊参数优化匹配为:平均功率 150 W、频率 50 Hz,其余参数与原工艺一致。经计算,优化后的峰值功率为 1.5 kW,高于原工艺的峰值功率 1.25 kW。优化后的焊接热输入较原工艺降低 25%。

(2) 增加激光密封焊过程接触散热。

在降低继电器激光密封焊平均功率的基础上,在继电器外壳四周增加 9.5 mm 厚度导热块顶紧,增强焊接过程对继电器的接触散热,以进一步降低焊接热及焊接应力对玻璃绝缘子与金属封接界面的影响。对比不同的金属材料,紫铜热导率为 383 W/(m·K),导热性能良好,拟采用紫铜导热块对继电器进行四边顶紧以增强焊接过程工件接触散热。

3.2 工艺优化有限元分析

首先,采用降低激光密封焊热输入的优化参数进行继电器激光密封焊有限元分析。

然后,在采用相同优化参数的基础上,使用导热块顶紧继电器以增强激光密封焊过程接触散热。继电器模型下方为支撑平台,工件四周使用 9.5 mm 厚的紫铜导热块顶紧,顶紧力为 30 N,确保焊接过程导热块与继电器壳体接触良好。

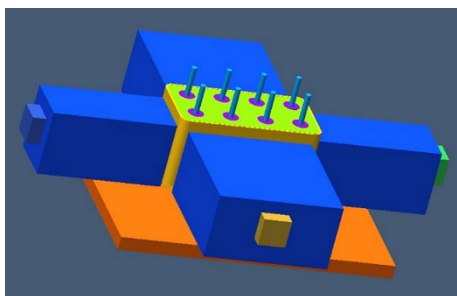


图7 紫铜导热块顶紧简化模型

Fig. 7 Simplified model: clamping of copper heat-conducting block

以激光焊起点至终点的光斑顺时针路径为顺序,依次对玻璃绝缘子编号 1~8。分别识别激光焊优化参数、激光焊优化参数+增加接触散热的 1 号~8 号玻璃绝缘子与底板封接界面在焊接过程的法向拉应力最大值部位,并对该部位进行应力、温度曲线分析,同时与原激光焊参数进行对比,结果如图 8、图 9 所示。

应力、温度曲线对比分析如下:

(1) 在采用优化参数的激光密封焊过程,激光

光斑在依次靠近并远离 1 号~8 号玻璃绝缘子时,因焊缝区域温度降低产生收缩作用,玻璃绝缘子与底板金属的封接界面受到一定程度的拉应力作用,1 号~8 号玻璃绝缘子封接界面的峰值拉应力分别为 75.0 MPa、68.0 MPa、69.0 MPa、64.6 MPa、62.8 MPa、64.8 MPa、59.4 MPa、72.5 MPa,均低于原激光焊参数焊接状态,且低于玻璃材料抗拉强度。1 号~8 号玻璃绝缘子封接界面的峰值温度分别为 538.7 °C、340 °C、354 °C、372 °C、466 °C、404 °C、373 °C、442.8 °C,均低于原激光焊参数焊接状态,并低于玻璃材料的软化温度。与原激光焊参数相比,采用激光焊优化参数,减轻了焊接应力及焊接热对玻璃绝缘子与底板封接界面的破坏,降低泄漏隐患。

(2) 采用优化参数+导热块接触散热的激光密封焊过程,1 号~8 号玻璃绝缘子封接界面的峰值拉应力为 53.9 MPa、62.0 MPa、52.6 MPa、59.8 MPa、60.0 MPa、58.3 MPa、52.0 MPa、55.2 MPa,1 号~8 号玻璃绝缘子封接界面的峰值温度分别为 447.9 °C、330.8 °C、322.3 °C、338 °C、402.2 °C、359.8 °C、328.3 °C、363.7 °C,较激光焊优化参数焊接状态进一步降低。与采用原激光焊参数、激光焊优化参数条件相比,采用激光焊优化参数+导热块接触散热条件的激光密封焊过程的 1 号~8 号玻璃绝缘子封接界面的峰值拉应力、峰值温度最低,对玻璃绝缘子与底板封接界面的影响最小。对比分析表明,采用激光焊优化参数+导热块接触散热方式密封性提升效果最优。

4 工艺优化效果

取 60 件晶体罩继电器试验样品,平均分为 3 组,每组 20 件,分别采用原激光焊参数、优化参数、优化参数+导热块接触散热的密封焊试验条件进行对比试验,试验结果见表 1。

试验结果表明,采用原激光焊参数、优化参数、优化参数+导热块接触散热条件的密封焊试验样品的密封效果逐级提升,其中采用优化参数+导热块接触散热条件的试验样品密封性能最好,泄漏率均满足 $\leq 1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 的优水平。工艺试验结果与有限元分析结果接近,有限元分析优化效果明显,继

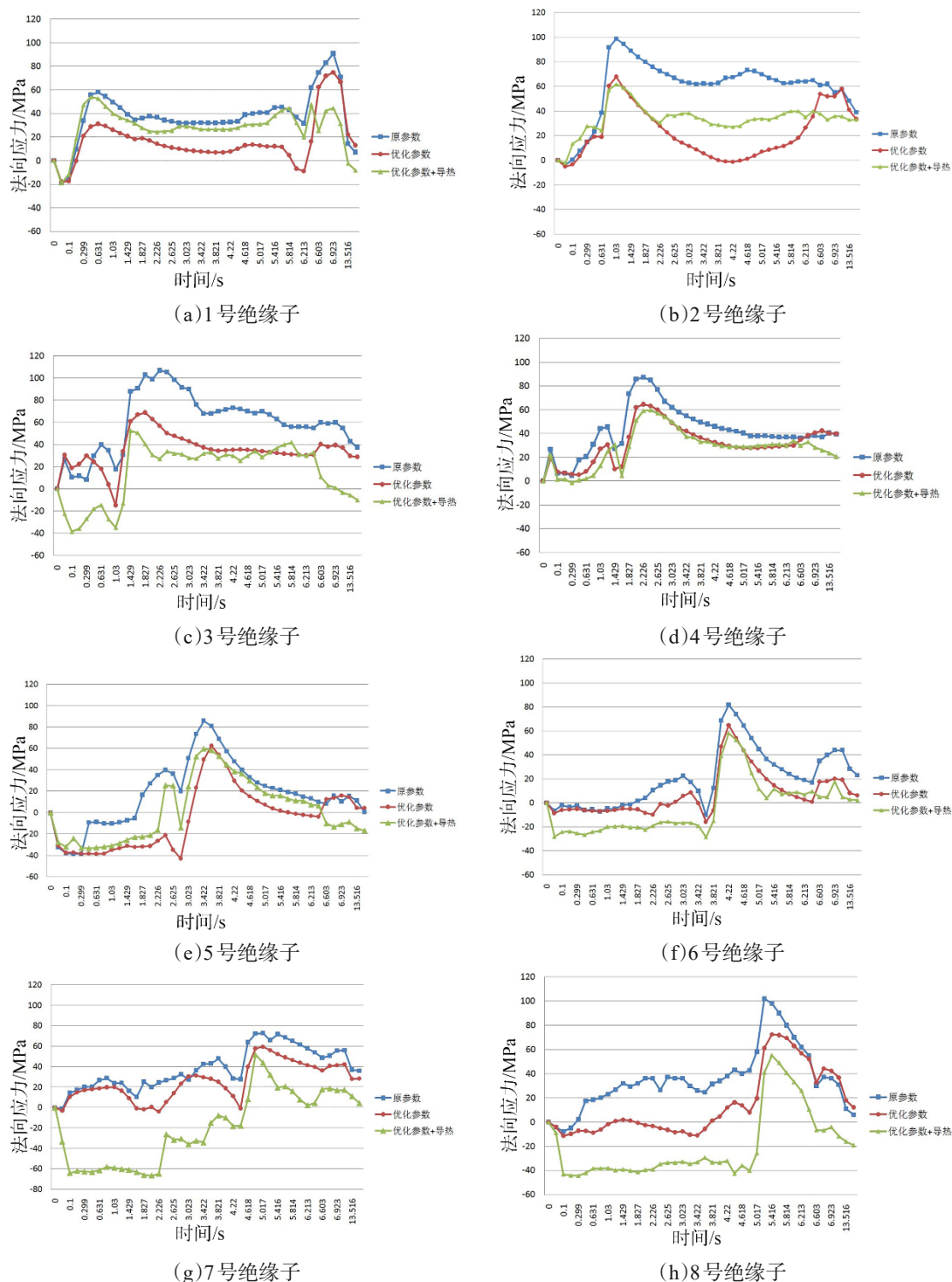


图8 1号~8号玻璃绝缘子封界面应力曲线对比

Fig. 8 Stress curve comparison: sealing interfaces (No. 1~No. 8)

电器密封性能得到提升。现激光密封焊参数优化措施与导热块接触散热措施已经应用于晶体罩继电器正式批次产品生产,多批次验证结果表明,继电器的密封性能得到明显提升。

5 结论

(1)采用有限元分析方法分析晶体罩继电器原工艺参数激光密封焊过程,发现焊接应力与焊接热

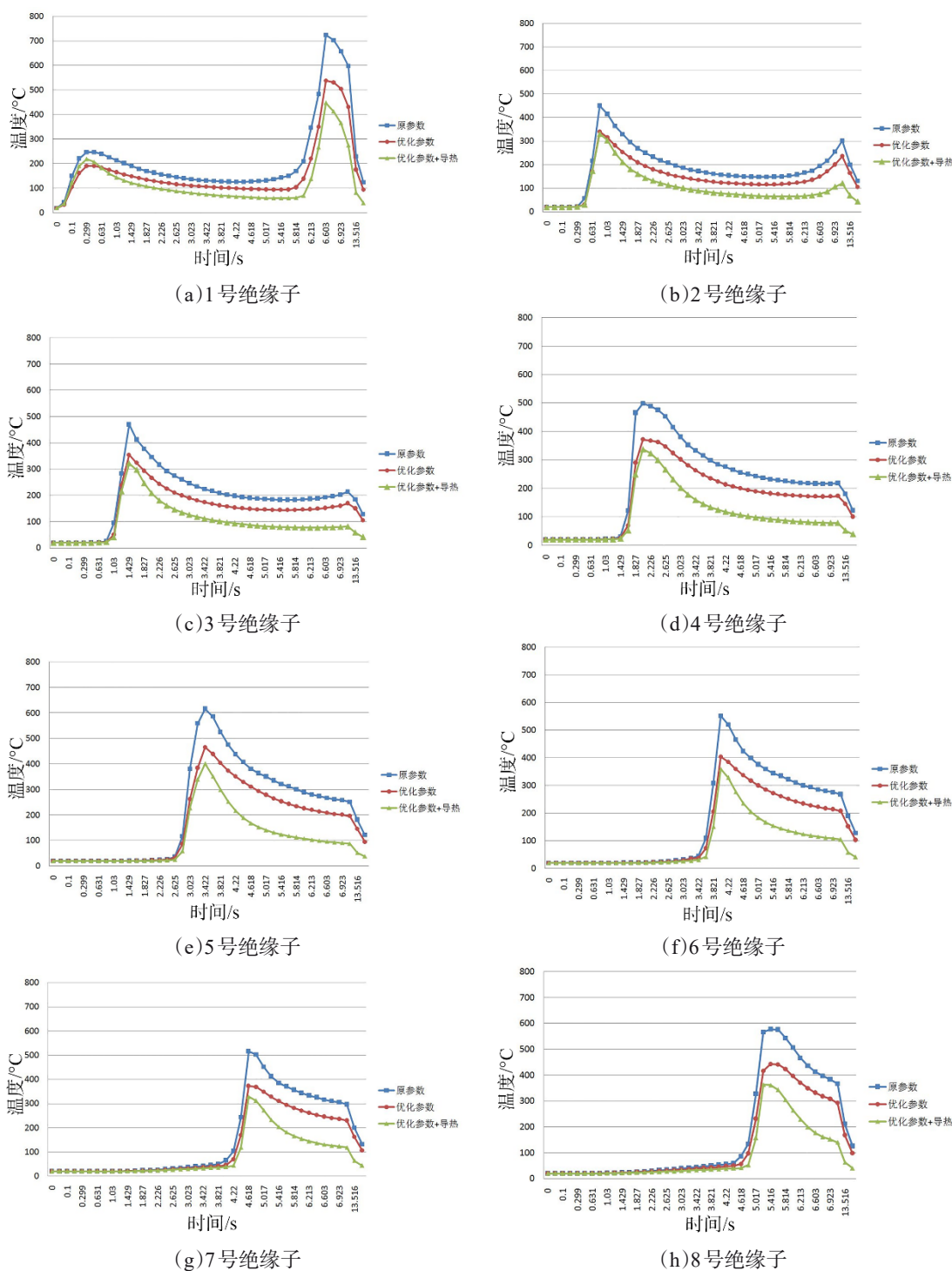


图9 1号~8号玻璃绝缘子封接界面温度曲线对比

Fig. 9 Temperature curve comparison: sealing interfaces (No. 1~No. 8)

会对玻璃绝缘子与底板金属封接界面造成较大程度的破坏,容易导致泄漏。

(2)采用降低激光焊热输入的优化参数进行有限元分析,发现玻璃绝缘子封接界面的峰值拉应

力、峰值温度均低于原激光焊参数焊接状态,并分别低于玻璃材料的抗拉强度、软化温度,减轻了焊接应力与焊接热对玻璃绝缘子与底板金属封接界面破坏,降低泄漏隐患。

表1 晶体罩继电器密封焊泄漏率对比试验结果($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$)Table 1 Comparison test results of sealing welding for crystal cover relays ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$)

序号	原参数	优化参数	优化参数+ 导热块接触散热
1	2.3×10^{-9}	1.8×10^{-9}	5.0×10^{-10}
2	2.8×10^{-9}	2.0×10^{-10}	8.3×10^{-10}
3	2.9×10^{-9}	2.2×10^{-10}	4.7×10^{-10}
4	1.3×10^{-8}	5.2×10^{-10}	1.2×10^{-10}
5	1.0×10^{-8}	1.8×10^{-10}	1.6×10^{-10}
6	5.0×10^{-8}	1.9×10^{-10}	1.6×10^{-10}
7	1.1×10^{-8}	1.9×10^{-10}	2.3×10^{-10}
8	7.8×10^{-9}	4.0×10^{-9}	1.9×10^{-10}
9	4.0×10^{-9}	2.3×10^{-10}	1.5×10^{-10}
10	4.7×10^{-8}	2.0×10^{-10}	1.6×10^{-10}
11	2.1×10^{-9}	2.1×10^{-10}	1.8×10^{-10}
12	2.0×10^{-8}	1.8×10^{-10}	1.9×10^{-10}
13	3.6×10^{-9}	1.9×10^{-10}	1.2×10^{-10}
14	7.5×10^{-9}	2.3×10^{-10}	1.9×10^{-10}
15	8.4×10^{-9}	1.8×10^{-10}	2.1×10^{-10}
16	3.6×10^{-8}	2.4×10^{-9}	1.6×10^{-10}
17	5.2×10^{-9}	1.5×10^{-9}	1.5×10^{-10}
18	4.3×10^{-8}	7.8×10^{-10}	1.7×10^{-10}
19	1.5×10^{-8}	2.0×10^{-10}	1.3×10^{-10}
20	9.2×10^{-9}	1.7×10^{-10}	1.6×10^{-10}
范围	$2.1\times 10^{-9}\sim 5.0\times 10^{-8}$	$1.7\times 10^{-10}\sim 4.0\times 10^{-9}$	$1.2\times 10^{-10}\sim 8.3\times 10^{-10}$
平均	1.5×10^{-8}	6.9×10^{-10}	2.3×10^{-10}
效果	较差	良	优

(3)通过有限元分析,发现在降低激光焊热输入的优化参数基础上,采用导热块接触散热的方法可以进一步降低焊接应力与焊接热对玻璃绝缘子与底板封接界面影响。工艺试验表明,采用激光焊优化参数+导热块接触散热方式进行焊接,继电器密封性提升效果最优,泄漏率满足 $\leq 1\times 10^{-9}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 的优质水平,该优化措施已应用于晶体罩继电器的正式批次生产,产品的密封性能得到明显提升。

参考文献:

- [1] 王前进. 6016-T4铝合金板材激光焊接工艺及数值模拟研究[D]. 湖南:湖南大学,2020.
WANG Q J. Laser welding technology and numerical simulation of 6016-T4 aluminum alloy plate[D]. Hunan: Hunan University, 2020.
- [2] 李建强. 304不锈钢激光焊接的建模与仿真[D]. 天津:天津大学,2004.
LI J Q. Modeling and simulation of laser welding of 304 stainless steel[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [3] 李建强,韩国明,何雨. 激光焊接的模拟仿真研究[J]. 电焊机,2003,33(9):10-14.
LI J Q, HAN G M, HE Y. Study on simulation of laser welding[J]. Electric Welding Machine, 2003, 33(9): 10-14.
- [4] 余杰冰,康玲,刘磊. 0.2 mm 不锈钢薄板焊接工艺研究及仿真分析[J]. 焊接技术,2023,52(10):16-19.
YU J B, KANG L, LIU L. Welding process research and simulation analysis of 0.2 mm stainless steel sheet[J]. Welding Technology, 2023, 52(10): 16-19.
- [5] 宋荣武,李萌盛,孙芳芳. 不锈钢薄板激光焊热源模型的探讨[J]. 应用激光,2009,29(6):502-506.
SONG R W, LI M S, SUN F F. Heat Source Model's Discussion of Laser Welding for Stainless Sheet Steel[J]. Applied Laser, 2009, 29(6): 502-506.
- [6] 黄欣. 激光焊板式换热器板片焊接与传热性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
HUANG X. The analysis of plate welded and heat transfer characteristics in laser welded plate heat exchanger[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [7] 张建强,张国栋,赵海燕,等. 铝合金薄板焊接应力三维有限元模拟[J]. 焊接学报,2007,28(6):5-9.
ZHANG J Q, ZHANG G D, ZHAO H Y, et al. 3D-FEM numerical simulation of welding stress in thin aluminum alloy plate[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2007, 28(6): 5-9.
- [8] 段伟,周丽红. 基于 Simufact.welding 的铝合金薄板激光焊接模拟研究[J]. 热加工工艺,2018,47(15):168-171.
DUAN W, ZHOU L H. Simulation of Laser Welding of Aluminum Alloy Thin Sheet Based on Simufact.welding[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(15): 168-171.
- [9] 宋芳芳,金亮,恩云飞,等. 异种金属激光焊接的温度场分析方法及应用[J]. 焊接技术,2016,45(12):9-13.
SONG F F, JIN L, EN Y F, et al. Temperature field analysis method and application of laser welding of dissimilar metals[J]. Welding Technology, 2016, 45(12): 9-13.
- [10] 康悦,占小红,封小松,等. 6061 铝合金激光焊温度场与应力场数值模拟研究[J]. 上海航天,2020,37(6):58-63.
KANG Y, ZHAN X H, FENG X S, et al. Numerical Simulation Study on Temperature Field and Stress-Strain Field of 6061 Aluminum Alloy in Laser Beam

- Welding[J]. Aerospace Shanghai(Chinese & English), 2020,37(6):58-63.
- [11] 欧阳智勇,卢国杰,郭亮,等. 激光焊接温度场模拟分析及熔池深度的计算[J]. 应用激光, 2018, 38(1): 52-57.
- OUYANG Z Y, LU G J, GUO L, et al. Simulation Analysis of Temperature Distribution of Laser Welding and Calculation of Weld Penetration Depth[J]. Applied Laser, 2018, 38(1): 52-57.
- [12] 史元春,顾国晨,王洪潇,等. 不锈钢车体非熔透激光搭接焊热源模型[J]. 焊接学报, 2011, 32(5): 85-88.
- SHI Y C, GU G C, WANG H X, et al. Heat source model for partial penetration lap laser welding of stainless steel railway vehicles [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2011, 32(5): 85-88.
- [13] 秦国梁,杨永波,林泳,等. Nd:YAG CW激光热传导焊I温度场三维解析计算[J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 13-16.
- QIN G L, YANG Y B, LIN Y, et al. Nd:YAG CW Laser Heat-conduction Welding (Paper I) [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2002, 23(6): 13-16.
- [14] 胡庆贤. 穿孔等离子弧焊接温度场的有限元分析[D]. 山东:山东大学, 2007.
- HU Q X. Finite Element Analysis of Temperature Fields in Keyhole Plasma Arc Welding [D]. Shandong: Shandong University, 2007.
- [15] 胡增荣,周建忠,郭华锋,等. 应用ABAQUS模拟激光焊接温度场[J]. 激光技术, 2007, 31(3): 326-329.
- HU Z R, ZHOU J Z, GUO H F, et al. Simulation of temperature field of laser welding by ABAQUS[J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 326-329.
- [16] 许波,王恪典,李雪芝,等. 焊接数值计算中几种相变潜热处理方法[J]. 热加工工艺, 2020, 49(3): 7-10.
- XU B, WANG K D, LI X Z, et al. Several Treatment Methods of Latent Heat of Phase Change in Numerical Calculation of Welding [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(3): 7-10.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 101 页

- munications, 2020.
- [4] 王睿,胡云雷,李海涛,等. X射线焊缝图像缺陷实例分割算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(05): 140-145.
- WANG R, HU Y L, LI H T, et al. Defect segmentation algorithm for X-ray weld images[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(05): 140-145.
- [5] 叶定剑,华学明,吕艳丽,等. 高速焊接驼峰形成机理综述[J]. 热加工工艺, 2011, 40(11): 148-151+154.
- YE D J, HUA X M, LV Y L, et al. Formation Mechanism of Humping at High Speed Welding [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(11): 148-151+154.
- [6] 陈英红,杜明坤. 基于Mask-RCNN与结构激光的纵焊缝5个参数检测方法[J]. 自动化与信息工程, 2018, 39(05): 18-23.
- CHEN Y H, DU M K. A Mask-RCNN & Structured Light Based on Five Shape Parameters Detection Method for Longitudinal Welds [J]. Automation & Information Engineering, 2018, 39(05): 18-23.
- [7] He K, Gkioxari G, Dollár P, et al. Mask R-CNN [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017.
- [8] 谢世朋,李博,张冬. 基于改进Mask-RCNN的配电线路语义分割[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(06): 41-46.
- XIE S P, LI B, ZHANG D. Improved Mask - RCNN based semantic segmentation for distribution power lines [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2021, 41(06): 41-46.
- [9] Woo S, Park J, Lee J Y, et al. CBAM: Convolutional Block Attention Module [C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 3-19.
- [10] Ajmi C, Zapata J, Martínez-Álvarez J J, et al. Using Deep Learning for Defect Classification on a Small Weld X-ray Image Dataset [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(3): 68-81.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>