

## 高硅铝合金激光封焊与焊接接头的工艺研究

孙 鹏 张 婷 张亚楠

(中国空间技术研究院西安分院, 西安, 710000)

**摘要:** 针对高硅铝合金电子封装管壳激光封焊后, 焊接接头附近易出现裂纹, 产品密封成品率低的问题, 提出了一种具有预热-焊接-后处理的激光脉冲波形。通过研究激光封焊工艺参数与管壳焊接结构的作用关系, 以及焊接接头部位的微观结构, 确定了符合可靠性要求的管壳焊接接头的结构, 避免了裂纹等缺陷的发生, 并通过了可靠性验证, 将其应用到宇航用混合微电路生产中, 产品合格率得到了极大的提升。

**关键词:** 激光封焊; 高硅铝合金; 焊接接头结构

中图分类号: TN454

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2019)S-0044-06

## Laser Welding Technology on High-Silicon Aluminum Alloy and Its Welded Joint

SUN Peng, ZHANG Ting, ZHANG Yanan

(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, 710000, China)

**Abstract:** During laser welding high silicon aluminum (50% Si) with lid (27% Si), the welded joint crack is often found in the production process. An improved laser welding process with preheating, welding, and post-treating is described in this paper. By analyzing the relation between the process parameters of laser welding and the microstructure of welded joint, the qualified structure of welded joint without crack is obtained, which passes the reliability verification and has been used in the space hybrid microcircuit production. The yield is also greatly improved accordingly.

**Key words:** laser welding; high silicon aluminum alloy; welding joint

小型化、轻量化和高集成化一直是航天电子产品的发展目标, 因此随着元器件及组装技术的发展, 现代空间电子产品中采用了大量模块化的混合集成电路产品, 未来这一趋势将更加明显。

混合集成电路由包含至少一种有源器件(大部分是裸芯片)的元器件<sup>[1]</sup>在封装管壳中组装而成。封装管壳具有机械支撑、电信号传输、屏蔽、散热以及密封保护的功能。其中, 密封保护功能对于宇航用高可靠混合集成电路产品尤为重要, 可保证产品在经历地面试验、发射、空间运行等各种复杂环境的寿命期内, 使内部电路免受外部环境中水汽、氧气和氢气等具有腐蚀性气体的腐蚀而失效, 同时能

够耐受冲击振动和辐照条件。宇航用混合集成电路, 尤其在微波组件中, 主要采用金属管壳进行气密性封装, 传统的管壳材料有可伐(Kovar)合金、钨铜合金和10#钢等, 管壳的重量往往占到整个产品的90%以上, 因此密度更小、适配芯片热膨胀系数且强度可靠的管壳封装材料成为研究的热点。

近年来, 新型高硅铝合金由于具有密度小、质量轻、导热性好、热膨胀系数小和尺寸稳定性好等优点<sup>[2]</sup>成为优异的电子封装管壳替代材料。而激光封焊工艺技术具有能量集中、可瞬时加热、热影响区小、无需填充焊料和路径控制精确等优点, 成为高硅铝管壳气密性封装的首选工艺。

收稿日期: 2019-04-09; 修订日期: 2019-06-20

通信作者: 孙鹏, 男, 工程师, E-mail: 272367851@qq.com。

**引用格式:** 孙鹏, 张婷, 张亚楠. 高硅铝合金激光封焊与焊接接头的工艺研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(增刊): 44-49. SUN Peng, ZHANG Ting, ZHANG Yanan. Laser Welding Technology on High-Silicon Aluminum Alloy and Its Welded Joint[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 44-49.

在实际应用中,基于高硅铝合金的壳体中含硅量较高(50%),具有壳体与盖板热膨胀系数相差较大、封装壳体尺寸较大等特点,激光封焊的工艺窗口较小,焊接接头不仅需要承受焊接后的残余应力,而且在后续的热力学试验中需要承受环境应力作用,避免焊缝及壳体裂纹的产生。目前针对高硅铝电子封装壳体的激光封焊研究主要集中在对激光封焊外观缺陷的分析<sup>[3-4]</sup>和壳体的温度场仿真<sup>[5-7]</sup>等,而关于激光封焊工艺参数对壳体焊接接头焊缝内部结构的影响,以及焊接接头结构对焊缝影响的研究还很缺乏。

本文通过实验,提出了一种模拟预热-焊接-后处理的曲线形脉冲激光焊接波形,研究了激光封焊工艺参数对于不同焊接接头微观结构的作用效果,在此基础上对焊接接头的结构进行了优化。

1 激光封焊工艺

激光封焊的原理是将具有高密度能量的激光束辐射至管壳与盖板材料表面,焦点一般在焊缝处,材料吸收激光能量并转化为热能,使壳体和盖板的材料熔化后冷却结晶形成闭合的焊缝,达到气密的目的<sup>[8]</sup>。图1为典型的硅铝合金管壳与盖板经过激光封焊后的焊接接头剖面图,可以分为3个区域:熔池、熔池与壳体交界、熔池与盖板交界。在焊缝的熔池区,两种不同成分的硅铝材料首先被加热熔化,然后急剧冷却,此时材料的含硅量虽然较高,但是由于急剧的冷却作用控制了硅和铝基体的长大,形成了大量细小的等轴晶粒<sup>[9]</sup>,该区域晶粒尺寸远小于母材。而熔池与壳体交界区,熔池与盖板

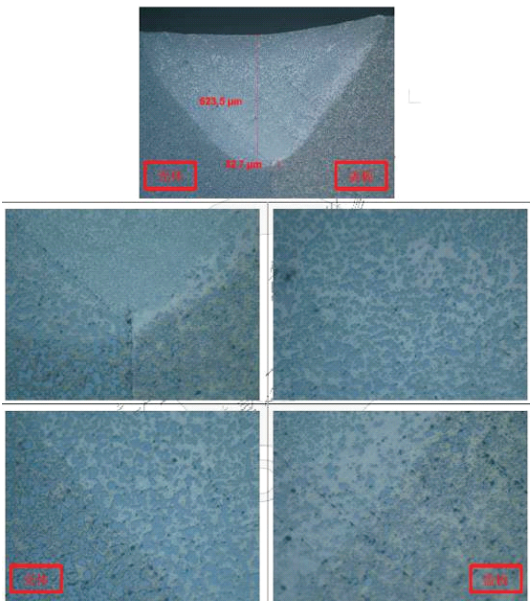


图1 硅铝管壳的焊接接头典型剖面图  
Fig.1 Profile of welded joint of Si-Al shell

交界区,均属于热影响区,相对于母材,硅和铝基体均有所增大。对于高硅铝合金封装管壳的激光封焊工艺研究,需要控制合适的工艺参数和焊接接头结构,提高该焊接接头的强度并避免承受较大的应力。

2 实验部分

实验材料选用高硅铝材料,其中壳体选用含硅量50%(质量分数)的铝硅合金,盖板选用含硅量27%的硅铝合金,两种材料的微观金相组织如图1所示,材料性能如表1所示<sup>[10]</sup>。

表1 硅铝材料特性 Tab. 1 Properties of Al-Si alloy					
硅含量/ wt%	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	热膨胀 系数/ 10 <sup>-6</sup> K	热导率/ (W·m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	抗拉 强度/ MPa	屈服 强度/ MPa
50	2.5	11.5	130	140	240
27	2.59	17	170	150	230

壳体和盖板的接头为对接方式,盖板厚1.5 mm,加工好的盖板可嵌入壳体,壳体和盖板焊接位置均为无镀层设计,如图2和图3所示。采用最大功率为600 W、且波形可调的Nd:YAG脉冲激光器,在充有高纯氮气的手套箱中进行封焊。

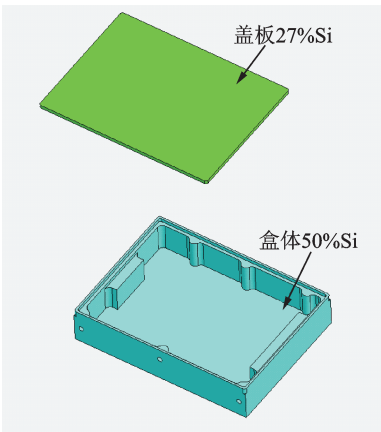


图2 管壳结构模型图  
Fig.2 Model of shell structure

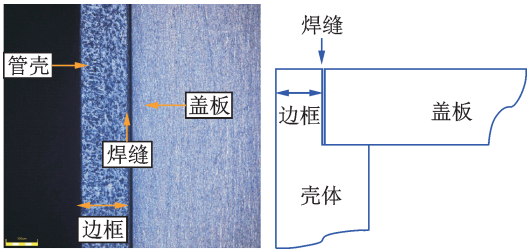


图3 壳体与盖板对接结构俯视图及剖面示意图  
Fig.3 Top and cross views of connection part of shell and lid

在激光封焊参数优化的基础上,研究在不同边框厚度、拐角半径和盖板厚度条件下的焊接效果,以及通过 GJB548B—2005 中的方法 1014 的试验方法进行密封试验。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 激光封焊脉冲波形优化

目前,在高硅铝合金电子封装管壳的激光封焊中,大部分采用的激光波形通常为方波,其能量输出如图 4 所示。因封焊过程,硅铝材料在一个周期内的方波脉冲的作用下经历急速上升和急速冷却的过程,焊接后焊缝处残余应力较大,在筛选或考核试验中,焊缝及管壳侧壁易产生裂纹,大尺寸管壳这一点尤其明显。因此,设计了一种具有预热-焊接-后处理的激光脉冲波形,其能量输出如图 5 所示。

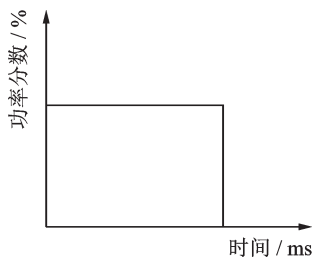


图 4 方波波形

Fig.4 Square wave

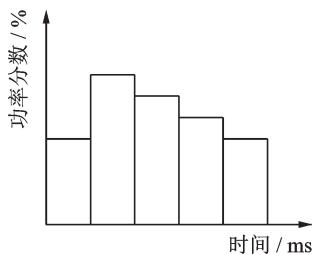
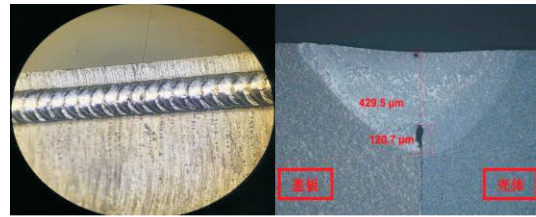


图 5 预热-焊接-后处理波形

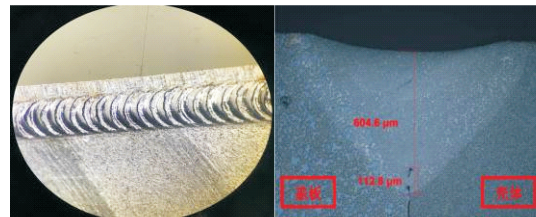
Fig.5 Preheat-welding-post treatment wave

采用这两种波形,峰值功率 2.2 kW,离焦量设置为 0 mm,分别进行激光封焊,焊接效果如图 6 所示,并根据 GJB548B—2005 中方法 1014 进行细检漏。

首先,从焊缝外观可以看出,两种波形的焊缝均呈由激光焊点组成的鱼鳞状,但具有预热-焊接-后处理的激光脉冲波形较方波焊点边缘褶皱较多,与其焊接时能量递减有关;其次,见表 2,从两种波形的焊缝宽度和熔深可以看出,具有预热-焊接-后处理的激光脉冲波形的较大(见表 2),其特殊之处在于第 1 ms 内的小能量预热脉冲,它可以在初始阶段使表面金属提高对光的吸收;最后,从两种波



(a) Square wave



(b) Preheat-welding-post treatment wave

图 6 采用两种波形进行激光封焊的效果对比

Fig.6 Comparison of laser welding effect by two kinds of waves

表 2 两种波形激光封焊对比

Tab. 2 Comparison of the two welding results

波形	焊缝宽度/ $\mu\text{m}$	熔深/ $\mu\text{m}$	漏率
方波	750	429.5	合格
预热-焊接-后处理	880	604.6	合格

形焊接的接头被剖切后的金相图中可以看到,具有预热-焊接-后处理的激光脉冲波形焊接后内部组织结构更为均匀。因此,选择具有预热-焊接-后处理的激光脉冲波形进行高硅铝合金电子封装管壳的激光封焊。

#### 3.2 边框厚度对于焊接接头的影响

分别采用边框为 0.6 mm, 0.8 mm, 1.0 mm 和 1.5 mm 的壳体,按照上述具有预热-焊接-后处理的激光脉冲波形进行管壳焊接,焊接后将该板与壳体分离后,观察焊接接头的盖板侧面的熔深及焊缝形貌,结果如图 7 所示,表面焊缝宽度及深度的测量值如表 3 所示。

由上述结果可知,焊缝宽度随着边框厚度的变化并未有明显改变,而随着边框厚度的增加,焊接

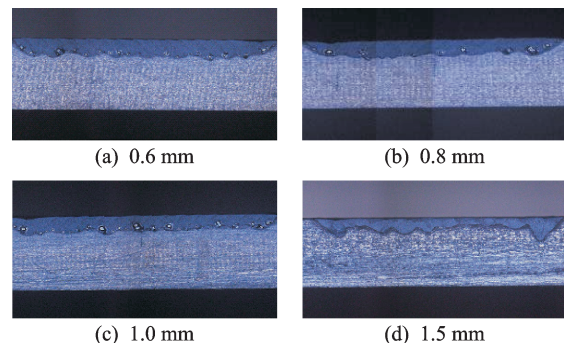


图 7 不同边框宽度的焊接效果对比

Fig.7 Welding penetration contrast of different border widths



表3 不同边框厚度激光封焊焊接接头对比  
Tab.3 Comparison of joint property with different border widths

边框宽度/mm	宽度/ $\mu\text{m}$	熔深/ $\mu\text{m}$
0.6	850	400
0.8	830	380
1.0	880	248
1.5	860	172

深度减小,且焊缝底部从边框厚度为0.6 mm时的较为平滑连续变为边框厚度为1.5 mm时的起伏变化。这是因为,虽然采用同样输入的激光封焊曲线进行焊接,但随着边框厚度的增加,能量在边框厚度范围内衰减较多,改变了激光焊接时焊接接头部位的热量分布,边框厚度越厚,焊缝越浅,强度越差。在焊接边框厚度较厚的管壳时,较浅的焊接熔深不足以抵抗残余应力而产生裂纹,或在后期加压检漏或温度循环过程中无法承受残余应力及环境应力的双重作用而产生裂纹。故在设计管壳时,其边框设计应考虑激光焊接能力。

在管壳设计时,不仅需要对直边的壳体边框厚度加以限制,对于拐角处的边框厚度也应加以限制。选取管壳圆角处的边框厚度分别为1.55 mm, 1.07 mm和0.89 mm,采用上述具有预热-焊接-后处理的激光脉冲波形进行管壳的焊接,结果如图8所示。从图8可以看出,边框厚度为1.55 m的管壳的气密性不满足要求。对拐角进行检查,发现在焊缝中间存在裂纹,并通过吸枪法确认该处漏气,而其余两只管壳外观及加压检漏测试均合格。

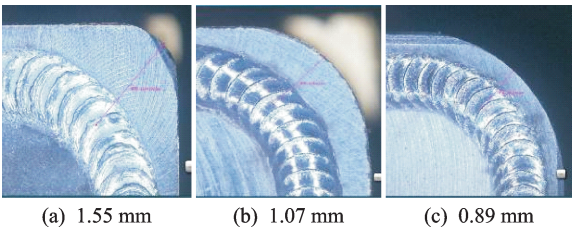


图8 圆角处不同边框宽度的焊缝  
Fig.8 Welded joint with different border widths in rounded corner

3.3 圆角半径对于焊接接头的影响

采用圆角半径分别为1 mm, 2 mm和3 mm的高硅铝合金电子封装管壳,其外形见图2。按照上述具有预热-焊接-后处理的激光脉冲波形进行管壳的焊接,焊接后根据 GJB548B—2005 中方法 1014 进行细检漏试验,结果如表4所示。

从结果可以看出,  $R=1\text{ mm}$  的一只气密性不合格,其余  $R=2\text{ mm}$  和  $R=3\text{ mm}$  时的检漏结果均

表4 不同圆角半径的激光封焊焊接接头对比  
Tab.4 Comparison of welded joint property with different radius

圆角半径/mm	管壳数量/只	外观检查	检漏合格率/%
1	4	无异常	75
2	4	无异常	100
3	4	无异常	100

合格。但并未在焊缝表面观察到异常情况,仅仅通过检漏时的吸枪法判断圆角处漏气。在拐角处,激光作用轨迹半径较小,能量的急剧加热和冷却有关,在应力的作用下有微裂纹。这一点在如图9所示的圆角结构中表现极为明显,当圆角半径  $R=1\text{ mm}$  时,在圆角的中心有一条向外扩展的裂纹并延伸至边框外侧壁,该裂纹出现的几率为100%。这是因为在该类圆角两侧均受到激光封焊后的拉应力作用,超过了壳体的屈服强度,而导致该裂纹的产生。需要增大激光在该类圆角的作用半径,减少热量积聚,减小拉应力。故将圆角半径增大到  $R=2\text{ mm}$  时,避免了该裂纹的出现,且经过检漏是合格的。

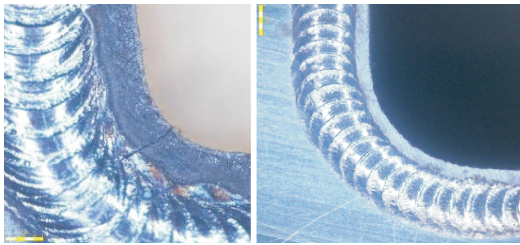


图9 不同圆角半径的激光封焊对比  
Fig.9 Laser welding contrast with different radius

3.4 盖板厚度对焊接接头的影响

某大尺寸管壳激光封焊后,个别管壳加压检漏时出现了侧壁裂纹的情况,如图10所示,其位置恰好处于管壳侧壁1.5 mm深度,即盖板搭接壳体位置的外侧。对此进行仿真计算,见图11,盖板厚度在1.5 mm时,在2个绝对大气压的加压条件下,其壳体侧壁应力最大点,与裂纹重合形变量为0.115 mm。在实际情况中,因加工公差,盖板与壳体匹配较紧,盖板无法正常搭接在壳体上,在受到加压时,盖板形变产生的拉力完全通过焊接接头作用于侧壁,因此也导致了裂纹的产生。

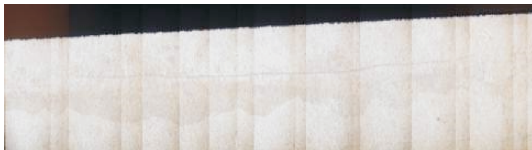


图10 管壳侧壁裂纹  
Fig.10 Crack in side wall of the shell

针对这种情况,首先在保证适应激光封焊的焊缝宽度的同时,盖板能够与壳体匹配,适配的搭在壳体的台阶处。采用同样大小的管壳,将盖板厚度调整为 2 mm,经过力学仿真,其盖板形变量减小了 27%,如图 12 所示,形变量为 0.085 7 mm。

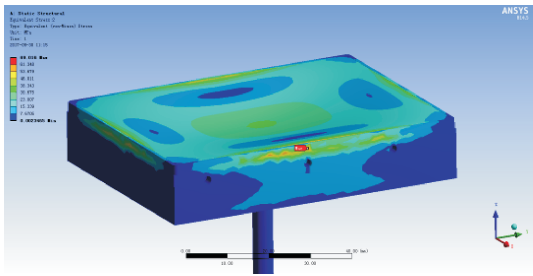


图 11 盖板厚度为 1.5 mm 时的加压变形情况

Fig.11 Pressure deformation of plate with the thickness of 1.5 mm

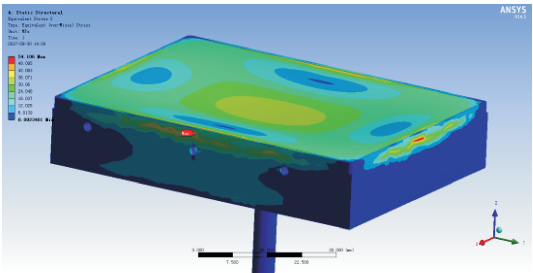


图 12 盖板厚度为 2 mm 时的加压变形情况

Fig.12 Pressure deformation of plate with the thickness of 2 mm

根据这两个解决途径,设计了以下试验:分别采用 1.5 mm 和 2 mm 的盖板,在盖板与壳体适配的情况下,依次提高加压检漏时的压强,其结果如表 5 所示。

表 5 不同厚度盖板激光封焊后的加压试验

Tab. 5 Pressure test with different thickness of the lid

盖板厚度/ mm	数量/ 只	3 个 大气压	4 个 大气压	5 个 大气压
1.5	4	合格	合格	侧壁裂纹
2	4	合格	合格	合格

从结果可以看到,采用 1.5 mm 盖板的管壳经历 4 个大气压已经是极限,出现了侧壁裂纹;而采用 2 mm 盖板的管壳在经历 5 个大气压后依然合格。这一结果对于后续设计更大尺寸的管壳有指导意义。

### 3.5 可靠性验证

最后,根据上述研究成果进行了可靠性验证。采用尺寸为 85 mm×65 mm×15 mm 的高硅铝合金电子封装管壳,壳体含硅量 50%,盖板含硅量 27%,边框为 0.8 mm,圆角半径为 2 mm,激光脉冲

采用具有预热-焊接-后处理的波形,封焊 5 只样件。经过温度循环(GJB548B—2005 方法 1010.1)以及恒定加速度(GJB548B—2005 方法 2001.1),进行加压细检漏(GJB548B—2005 方法 1014.1),全部满足宇航用要求。

## 4 结 论

通过对高硅铝合金电子封装管壳的激光封焊试验,在优化脉冲波形的基础上,对不同的焊接接头结构进行了研究,对于高硅铝合金激光封焊,得出以下结论:

- (1)含预热-焊接-后处理的激光脉冲波形较方波焊接的接头性能更好;
- (2)接头部位的焊接形貌与管壳边框厚度有关,壳体设计应根据激光封焊的能力进行;
- (3)合适的圆角半径能够舒缓应力,避免出现裂纹;
- (4)用于激光封焊的壳体和盖板应保证匹配性,尤其对于大尺寸管壳,加厚盖板可减小对侧壁的应力。

### 参考文献:

[1] 中央军委装备发展部. GJB 2438B—2017, 混合集成电路通用规范[S]. 北京:国家军用标准出版发行部, 2017.

China Military Commission Equipment Development Department. GJB2438B—2017, General specification for hybrid integrated circuits [S]. Beijing: National Military Standard Publishing and Distribution Department, 2017.

[2] 王传伟,雷党刚,梁宁,等. 激光参数对铝硅壳体焊缝形貌和气密性能影响[J]. 电子工艺技术, 2015, 36(4):231-233.

WANG Chuanwei, LEI Danggang, LIANG Ning, et al. Influence of laser parameters on surface modality and gas tightness of Si-Al alloy shell [J]. Electronics Process Technology, 2015, 36(4):231-233.

[3] 周明智,雷党刚,李正,等. 高硅铝合金壳体激光封焊缺陷及机制分析[J]. 电子机械工程, 2013, 29(6): 54-56.

ZHOU Mingzhi, LEI Danggang, LI Zheng, et al. Analysis on the defects and mechanism of laser seal welding of high silicon content aluminum alloy shell [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2013, 29(6): 54-56.

[4] 黄新临. 高硅铝合金激光焊接工艺研究[J]. 电子工艺技术, 2018, 39(5):293-296.

- HUANG Xinlin. Study on laser welding technology of high silicon aluminum alloy [J]. Electronics Process Technology, 2018, 39(5):293-296.
- [5] 栾兆菊. 微波组件激光封焊的温度场仿真 [J]. 电子机械工程, 2013, 29(5): 38-40.
- LUAN Zhaoju. Numerical simulation on temperature field of microwave modules in laser seal welding [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2013, 29(5): 38-40.
- [6] 赵龙海. 高硅铝合金激光焊接头组织性能研究及温度场数值模拟[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
- ZHAO Longhai. Research on structure and property of high silicon aluminum alloy laser welding joints and temperature [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [7] 崔永强. 硅铝合金激光焊接的仿真及微观分析[D]. 成都:电子科技大学, 2014.
- CUI Yongqiang. Simulation and microscopic analysis of laser welding of silicon aluminum alloy [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [8] 郝新锋,朱小军,李孝轩,等. 激光焊接技术在电子封装中的应用及发展[J]. 电子机械工程, 2011,27(6): 43-45.
- HAO Xinfeng, ZHU Xiaojun, LI Xiaoxuan, et al. Application and development of laser welding technology in electronic packaging [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2011, 27(6):43-45.
- [9] 王成. 高硅铝电子封装壳体激光焊接的数值模拟[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
- WANG Cheng. Numerical simulation of the laser welding on high-silicon aluminum alloy for electronic packaging [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [10] 方坤,王传伟,梁宁,等. 高硅铝合金 T/R 盒体激光封焊应力分析及优化设计[J]. 焊接学报, 2016, 37(5): 19-22.
- FANG Kun, WANG Chuanwei, LIANG Ning, et al. Stress analysis and optimization design of laser sealing of high silicon aluminum alloy [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(5): 19-22.

(编辑:王静)