

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.06.11

电极表面侵蚀对不等厚异种铝合金点焊形核的影响研究

韩磊¹, 彭江涛¹, 宋建岭², 杨菊鹏¹

1. 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462

2. 首都航天机械公司, 北京 100076

摘要: 针对 CZ-7 型号新一代运载火箭贮箱 5 mm 厚 2219 铝合金与 2 mm 厚 5A06 铝合金不等厚异种铝合金点焊中连续焊接后出现的脱焊问题, 研究了电极表面侵蚀状态对点焊形核的影响。通过工艺试验排除了设备功率输出不稳定和冷却效果不佳、点焊工艺参数不适合等外部因素, 在连续多次点焊后电极表面发生侵蚀状态下, 电极端面直径变大, 由原球面变为平台面, 电极与产品间的接触面积变大, 焊接电流密度降低, 产热变小; 电极表面侵蚀越严重, 铜铝化合物含量越多, 导电性变差。焊接电流密度降低和导电性变差容易造成形核不充分或无法形核, 导致试件焊点直径过小或无核。有限元仿真分析结果证明了电极侵蚀后端面弧度严重变形, 会导致熔核区域电流密度明显下降, 产热不足, 无法形核。将呈平面状的电极工作端面修磨成球面, 再次进行点焊试验, 防晃框焊点无脱焊质量问题, 满足点焊质量要求, 通过修磨故障电极后点焊成核试验验证了电极侵蚀下点焊成核分析的正确性。

关键词: 铝合金; 点焊; 电极侵蚀; 焊核

中图分类号: TG453.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)06-0084-08

Research on the Effect of Electrode Erosion on Spot Welding Nucleation of Heterogeneous Aluminum Alloys with Different Thickness

HAN Lei¹, PENG Jiangtao¹, SONG Jianling², YANG Jupeng¹

1. Tianjin Aerospace Long March Rocket Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462, China

2. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China

Abstract: This paper made research on spot welding nucleation of 5mm thick 2219 aluminum alloy and 2mm thick 5A06 aluminum alloy under electrode erosion in the case of multiple consecutive spot weld. And this spot welding process is commonly used for the Long March 7. Finite element simulation and process experiments were conducted to analyze the effect of electrode erosion on spot welding nucleation of heterogeneous aluminum alloys with different thickness. After excluding external factors such as unstable power output of the equipment, poor cooling effect of the equipment, and inappropriate spot welding process parameters, the analysis results indicate that the diameter of the electrode end face increases because of electrode erosion, and the contact area between the electrode and the specimen increases, this leads to the welding current density decreases and heat generation reduces. And The result is that the more severe the wear on the electrode surface, the higher the content of copper aluminum compounds, and the poorer the conductivity. After the surface condition of the electrode deteriorates, the electrode end face forms copper aluminum compounds, and the conductivity decreases, these can easily lead to insufficient or impossible nucleation during the spot welding process. The finite element simulation analysis results indicate that severe deformation of the end face curvature after electrode erosion can lead to a significant decrease in current density in the fusion zone. This causes insufficient heat generation, and inability to nucleate. The spot welding tests were conducted again after the working end face of the flat electrode was ground into a spherical surface. The test welding

收稿日期: 2025-09-01 修回日期: 2025-10-17

基金项目: 天津市制造高质量发展专项基金(Z-J12401-技)

作者简介: 韩磊(1987—),男,硕士,工程师,主要从事运载火箭制造工艺研究。E-mail:hanltop@126.com。

points had no quality problems of detachment. The correctness of spot welding nucleation analysis under electrode erosion was verified through spot welding nucleation tests after grinding the faulty electrode.

Keywords: aluminium alloy; spot welding; electrode erosion; weld nugget

引用格式:韩磊,彭江涛,宋建岭,等. 电极表面侵蚀对不等厚异种铝合金点焊形核的影响研究[J]. 电焊机,2026,56(6):84-91.
Citation:HAN Lei, PENG Jiangtao, SONG Jianling, et al. Research on the Effect of Electrode Erosion on Spot Welding Nucleation of Heterogeneous Aluminum Alloys with Different Thickness[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(6): 84-91.

0 引言

2219 铝合金为 Al-Cu-Mn 系可热处理强化合金,具有良好的焊接性能和力学性能,在低温条件下强度与延伸率可同步提升;5A06 铝合金为 Al-Mg 系不可热处理强化合金,具有良好的耐蚀性和焊接性能,低温下仍保持较高延伸率^[1-3]。两者广泛应用于航天器低温燃料贮箱,以 CZ-7 型号新一代运载火箭为例,贮箱主体材料选用 2219 铝合金,其箱底和筒段上附件选用 5A06 铝合金,两者通过电阻点焊实现 5 mm 厚 2219 铝合金与 2 mm 厚 5A06 铝合金的不等厚异种铝合金连接。

电阻点焊具有焊接变形小、焊接效率高等优点,在航空航天领域广泛采用^[4]。然而,铝合金点焊焊核质量受设备功率输出稳定性、电极状态、产品厚度、电流、锻压力等诸多因素影响,电极状态是否满足点焊要求直接影响点焊形核质量^[5-9]。

本研究针对 CZ-7 型号新一代运载火箭贮箱 5 mm 厚 2219 铝合金与 2 mm 厚 5A06 铝合金电阻点焊过程中连续焊接后出现的脱焊问题,通过工艺试验排除设备与工艺参数等外部因素,系统分析电极侵蚀对电极与试件间接触电阻、点焊成核的影响,并利用 ANSYS 有限元仿真软件分析电极侵蚀前后熔核区域电流密度与温度场变化,最后通过修磨故障电极验证分析结论。

1 试验设备与材料

电阻点焊试验采用 SP-1000 型三相直流点焊机,额定容量 630 kVA。电极材料为铬钴铜,电极端面为球面,锻压球面半径 150 mm,电极直径 18 mm^[7]。焊接过程中采用米亚基 MM-315B 电流电压采集系统实时测量焊接电流与电压,精度可达±0.5%;采用

WRNK-191 热电偶测温枪监测设备冷却水出水温度,精度可达±0.5%;采用优利德 UT620A 数字式电阻测量仪测量电极与试件间的接触电阻,精度可达±0.2%;采用扫描电镜及配套能谱仪(SEM-EDS)分析电极表面化学成分;有限元仿真分析采用 ANSYS 软件。采用电流电压采集专用设备及电压检测仪测量点焊设备输出电流电压值,点焊过程中元器件的温度采用热电偶测温枪,电极化学成分分析采用原子吸收光谱仪,测量电极接触电阻采用数字式电阻测量仪,有限元仿真分析采用 ANSYS 软件。

试验材料与 CZ-7 型号新一代运载火箭氧化剂贮箱实际产品一致,试验工况采用与实际产品焊接工况一致的筒段与防晃框之间电阻点焊连接过程。筒段材料为 2219 铝合金,热处理状态 C10SYu 态,厚度 5 mm;防晃框材料为 5A06 铝合金,热处理状态 O 态,厚度 2 mm。两种铝合金的化学成分如表 1 所示。试验件在点焊前去除包铝层,且不做任何表面处理,两种材料通过电阻点焊连接。

表1 2219、5A06 铝合金的化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical composition of 2219 aluminum alloy and 5A06 aluminum alloy(wt. %)

材料	Cu	Mn	Zr	Zn	Si
2219	5.8~6.8	0.2~0.4	0.10~0.25	—	≤0.20
5A06	≤0.10	0.5~0.8	—	≤0.20	≤0.40

材料	Fe	Mg	Ti	Al
2219	≤0.30	≤0.02	0.02~0.10	余量
5A06	≤0.40	5.8~6.8	0.02~0.10	余量

2 试验方法

2.1 焊前准备与装配

焊前对试件表面进行清理,调试设备确定焊接参数稳定,检查防晃框与筒段之间的装配间隙。若间隙不满足点焊要求,则对筒段重新辊弯校正。采

用压圈工装安装防晃框进行试装配,记录对正后零件与壁板之间的装配间隙。贮箱筒段与防晃框装配示意图如图1所示。

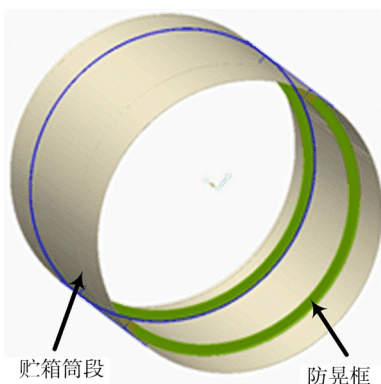


图1 贮箱筒段与防晃框装配图
Fig. 1 Assembly drawing of test specimen

2.2 焊接工艺流程

(1)焊前试片焊接:正式点焊前,采用同批次的切割余料作为验证试片进行点焊,确认焊核直径大于8 mm。

(2)定位焊:对防晃框进行定位焊,完成后拆掉压圈工装。

(3)连续点焊:定位焊后依次由防晃框的一端向另一端顺序点焊,焊点间距35 mm,整圈共188个焊点。点焊过程中采用边焊接边校形的方式,将范围较大、长度较大的装配间隙在附近范围内均匀分散,避免局部应力过大。焊接过程中禁止对电极进行修磨,每次点焊前观察并记录电极侵蚀状态。

(4)焊后试片验证:点焊结束后,采用相同工艺参数对同批次切割余料进行焊后试片点焊,确认焊核直径大于8 mm。

不等厚异种铝合金电阻点焊工艺原理如图2所示。

2.3 焊后质量检验

点焊完成后,选取若干焊点进行撬检,检验焊点成形质量。

3 试验结果与分析

3.1 点焊工艺参数设定

通过焊前和焊后试片点焊验证工艺稳定性。焊接采用两段电流:第一段焊接电流45 kA,焊接时

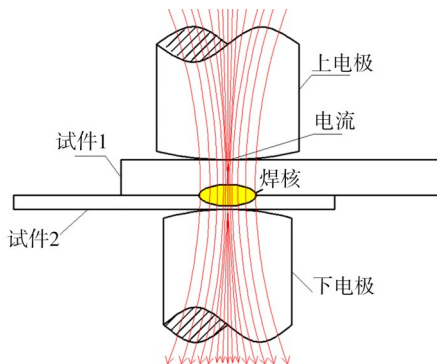


图2 不等厚异种铝合金电阻点焊工艺原理

Fig. 2 Schematic diagram of spot welding process for non-uniform thickness dissimilar aluminum alloys

间11个周波;第二段焊接电流34 kA,焊接时间15个周波;焊接压力15.6 kN,锻压力18.6 kN。撬检结果表明,焊前与焊后试片的焊核直径均大于8 mm,压痕深度小于20%试片厚度,焊核无异常,符合设计要求,如图3所示。

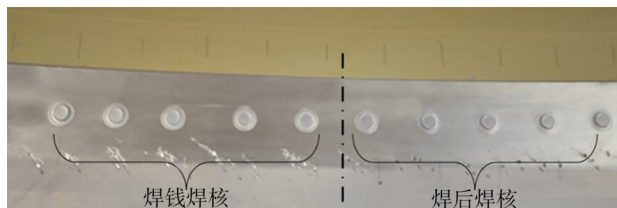


图3 焊前/焊后试片焊核

Fig. 3 Pre weld/post weld test piece weld nugget

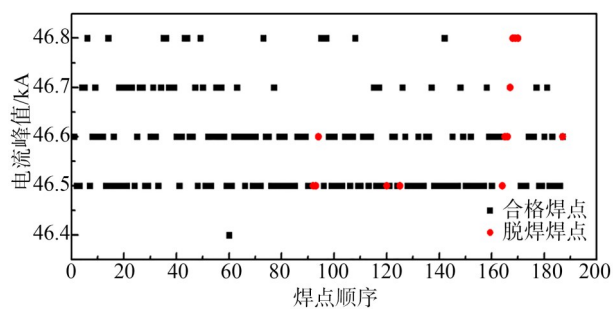
3.2 设备功率输出与冷却状态确认

为排除设备因素对焊核质量的影响,分别对设备功率输出稳定性和冷却状态进行验证。

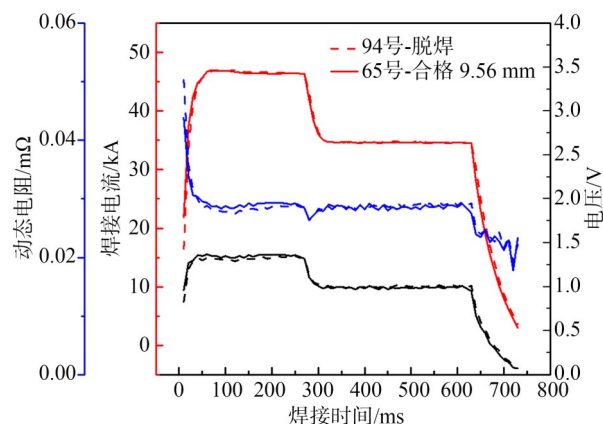
在整圈防晃框连续点焊试验中(共188个焊点),采用电流电压采集系统实时监测焊接电流与电压,结果如图4所示。焊接电流峰值在46.4~46.8 kA范围内波动,处于正常波动范围;脱焊焊点与合格焊点的焊接电流峰值无显著差异,两者的电压、电流和动态电阻曲线未见明显区别。整个焊接过程设备输出的电压电流稳定,计算得到的点焊过程动态电阻无变化,表明设备输出稳定。

对设备冷却状态,在焊接过程中以1 min为间隔测量冷却水出水温度,结果如图5所示。整个焊接过程中水温在17.9~26℃间变化,处于正常波动范围,不存在异常过热现象。

综上,设备功率输出稳定、冷却系统正常,排除了设备因素对脱焊问题的影响。



(a)采集的电流值



(b)脱焊焊点和合格焊点电压电流和动态电阻对比

图4 采集的输出电流电压对比分析

Fig. 4 Comparative analysis chart of collected output current and voltage

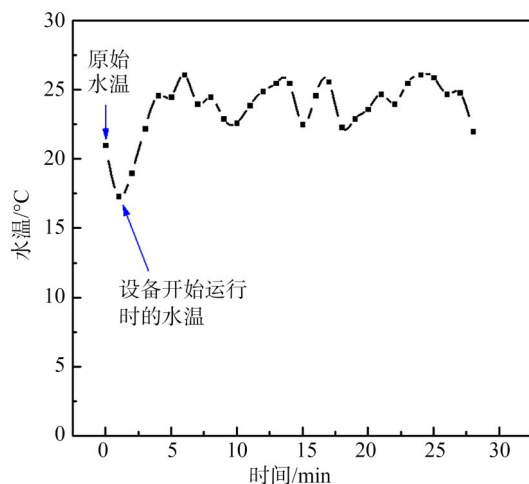


图5 水温变化曲线

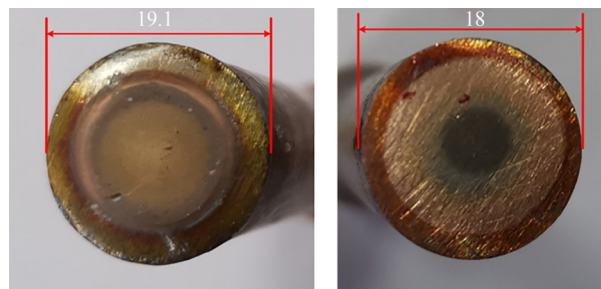
Fig. 5 Water temperature variation curve chart

3.3 电极侵蚀形貌与表面状态变化

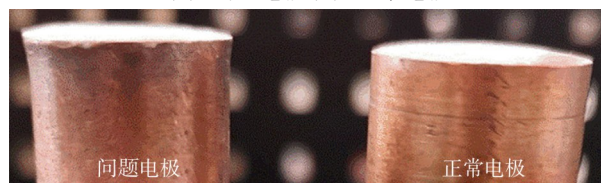
3.3.1 电极端面形状变化

标准电极锻压面应为球面,直径18.0 mm,球面半径150 mm。长时间连续点焊过程中未对电极端面进行修磨,电极端面出现明显侵蚀,如图6所示。

侵蚀后电极端面球面半径特征消失,呈平台状,端面直径增大至19.1 mm,出现明显“墩粗”现象。端面直径增大导致电极与试件间接接触面积增大,焊接电流密度降低,产热减少。



(a) 问题电极 (b) 正常电极



(c)端面墩粗状况

图6 电极侵蚀前后形貌对比

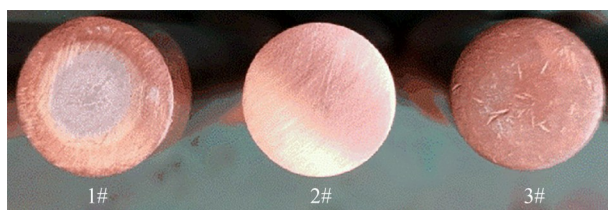
Fig. 6 Comparison of morphology before and after electrode erosion

3.3.2 电极表面化学成分变化

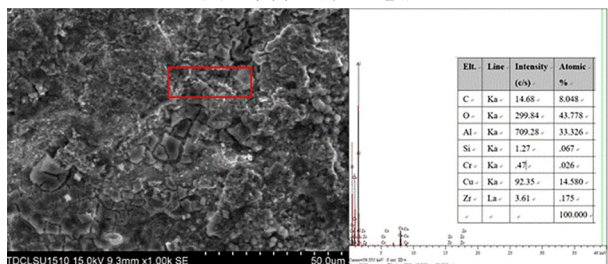
对3种不同表面状态的电极进行SEM-EDS分析,结果如图7所示。2#电极表面打磨光亮,Cu原子分数达75.78%,Al含量极低(0.71 at.%),无铜铝化合物。1#和3#电极表面粘铝,1#电极Al原子分数达33.33%,3#电极Al为3.54 at.%,同时O含量显著升高,电极中心产生铜铝化合物。1#电极Al和O含量最高,表明其表面铝粘附与氧化最为严重;3#电极次之;2#电极表面未检测到明显的铝粘附。这表明电极表面侵蚀程度越深,铜铝化合物含量越多,且伴随氧化加剧,证明电极表面的铜铝化合物的聚集导致表层物质发生变化,导电性变差,影响点焊质量。同时由于焊接电流较大和表面形成铜铝化合物,Peltier效应会加剧电极两端生热的不平衡性^[10],从而导致熔核偏移现象。

3.4 电极与试件间接接触电阻变化

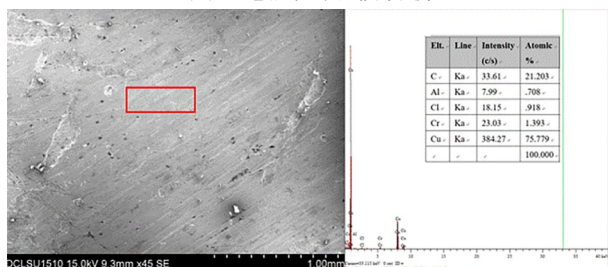
对5种不同状态电极(见图8)测量其与试件间的接触电阻,结果如表2所示。电极端面形状和表面状态共同影响接触电阻,端面越平,电极与试件的接触面积越大,接触电阻越小;电极的表面状态越差,即铜电极上形成的铜铝化合物越多,接触电



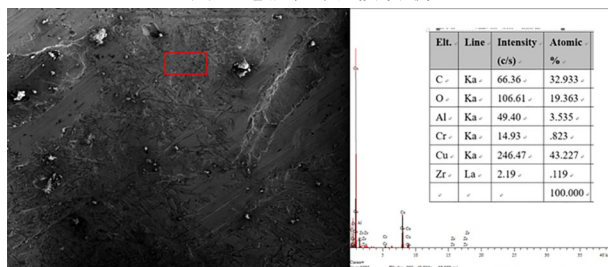
(a)不同表面状态电极



(b)1#电极化学成分分析



(c)2#电极化学成分分析



(d)3#电极化学成分分析

图7 不同表面状态电极化学成分分析

Fig. 7 Chemical composition analysis of electrodes with different surface states

阻越大。由表2可知,1#电极端面呈平面但表面光亮,接触电阻最小(0.71 mΩ);3#~5#电极虽端面同样趋于平面,但表面侵蚀严重,接触电阻显著增大至14.3~17.39 mΩ。这表明在电极侵蚀过程中,因不同的接触面积和表面状态这两种相反的影响因素相互作用,引起接触电阻不稳定。

3.5 连续点焊焊核质量

对整圈防晃框连续焊接,焊接过程中禁止修磨电极,焊后撬检发现部分焊点存在脱焊和焊核直径偏小等质量问题,如图9所示。统计188个焊点的

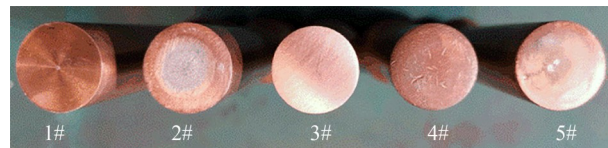


图8 5种不同状态电极

Fig. 8 Five different states of electrodes

表2 5种不同状态电极与试件间的接触电阻

Table 2 Contact resistance between electrodes and specimens in 5 different states

电极编号	电极状态	接触电阻/mΩ
1#	端面直径18.0 mm、弧面半径R150 mm,未侵蚀	0.71
2#	端面直径18.2 mm、弧面半径R155 mm,轻微侵蚀	1.23
3#	端面直径18.6 mm、弧面半径R180 mm,加剧侵蚀	14.3
4#	端面直径18.8 mm、弧面半径R190 mm,严重侵蚀	16.19
5#	端面直径19.0 mm、弧面半径R200 mm,过度侵蚀	17.39

焊核直径结果如图10所示,前段焊点焊核直径普遍满足要求,随焊接次数增加,焊核直径逐渐减小,后半段出现脱焊焊点,验证了电极在未修磨条件下连续点焊,焊接质量不稳定,易出现脱焊现象。

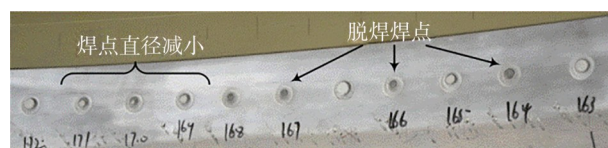


图9 试件撕开后焊核

Fig. 9 The tests weld nugget after tearing open

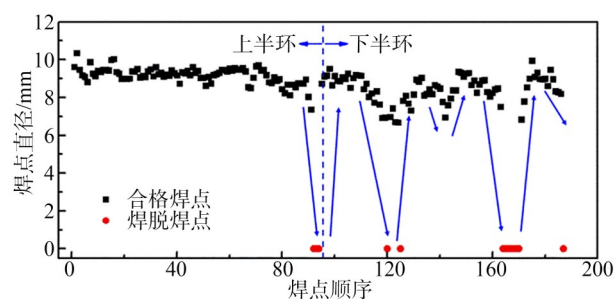


图10 试件整圈焊点直径变化

Fig. 10 Diagram of changes in the diameter of the entire circle of welding points on the test piece

3.6 电极侵蚀下点焊成核质量有限元仿真分析

利用ANSYS软件开展电极侵蚀下点焊成核质量分析。仿真采用5 mm厚2219铝合金与2mm厚5A06铝合金作为母材,分别建立两种电极模型:标准电极(直径18.0 mm、弧面半径R150 mm)和侵蚀电极(直径19.0 mm、弧面半径R200 mm)。点焊为典型的轴对称工况,建立轴对称模型以简化计算。

电极和试件采用 PLANE67 电热耦合单元,接触区采用 CONTA171 单元,为兼顾计算精度和计算效率,试件与电极接触区附近的网格采用正面体同时对该区域进行细化,其他部位的网格适当粗化。2219 铝合金、5A06 铝合金及铬锆铜的热物性参数(接触热导、熔、导热系数、电阻率及力学性能)取自《金属材料手册》^[11]。

边界条件设定如下:电极内表面冷却水对流换热系数为 $4.187 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,水温 20°C ;空气温度 23°C ;电极外表面及试件表面的空气自然对流换热系数为 $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;对称中心线设为绝热边界;仿真模型初始温度 23°C 。点焊仿真过程与试验过程一致,采用两段电流(第一段 $45 \text{ kA}/11$ 个周波,第二段 $34 \text{ kA}/15$ 个周波),焊接压力 15.6 kN ,锻压力 18.6 kN 。

有限元仿真计算结果如图 11 所示。标准电极条件下,计算得到熔核直径 8.62 mm (灰色区域);侵蚀电极条件下,熔核直径为 0 。仿真结果表明,电极侵蚀后端面弧度严重变形,会导致熔核区域电流密度明显下降(颜色变浅),产热不足,无法形核。仿真结果与试验结果一致。需要指出的是,本仿真仅考虑了电极几何参数变化的影响,未将电极表面铜铝化合物层导致的导电性变化纳入模型,仿真结果反映了端面变形对形核的单独效应。

3.7 电极侵蚀下点焊成核分析

铝合金电阻点焊具有“大电流、短时间”的工艺

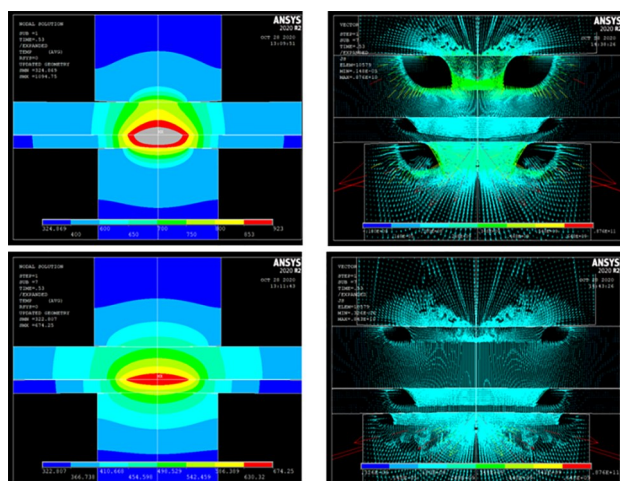


图 11 两种电极温度场和电流密度对比有限元仿真结果

Fig. 11 Comparison of finite element simulation results on temperature field and current density of two types of electrodes

特性,在很短的时间内($<1 \text{ s}$)产品界面处要局部熔化形核并快速长大,由于界面电阻很小,需要高密度的大电流通过才能获得足够的初始形核热量。

电极状态对点焊质量影响显著,如图 12 所示。电极表面侵蚀后,电极端面端面由球面变为平台状,直径变大,电极与焊件间的接触面积变大,焊接电流密度降低,产热不足;电极表面状态变差,表面粘附铝并形成铜铝化合物及氧化物,导电性变差,接触电阻发生变化。当表面侵蚀严重时,接触电阻增大效应占主导,进一步减少有效产热。上述两个因素作用,导致焊接区产热量不足,形核不充分或无法形核,最终表现为焊核直径偏小或脱焊,如图 13 所示。

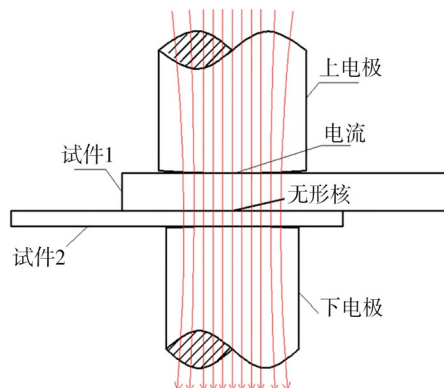


图 12 侵蚀电极下电流密度分布示意图

Fig. 12 Schematic diagram of current density distribution under electrode erosion

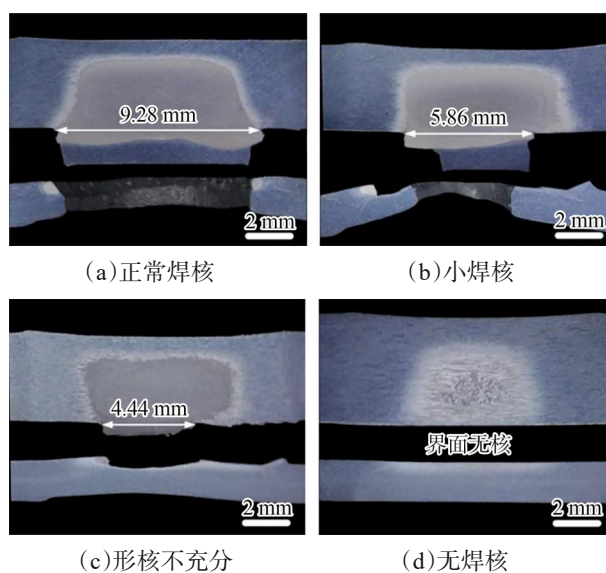


图 13 典型焊点失效分析

Fig. 13 Typical solder joint failure analysis

3.8 修磨故障电极后点焊成核试验结果

将侵蚀后呈平台状的电极工作端面修磨恢复成球面,如图 14 所示,再次进行防晃框连续点焊试验。撬检结果表明,修磨后焊核成形正常,无脱焊现象,如图 15 所示,满足点焊质量要求。



图 14 修磨后电极对合状态

Fig. 14 Electrode alignment status after grinding

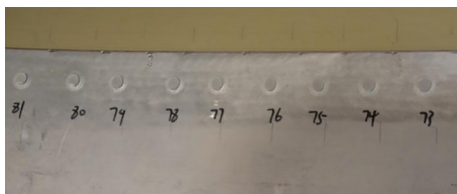


图 15 防晃框撕开后焊核

Fig. 15 The test weld nugget after tearing open

4 结论

对 5 mm 厚 2219 铝合金与 2 mm 厚 5A06 铝合金在电极表面侵蚀状态下的点焊形核开展了工艺研究,主要结论如下:

(1)连续点焊造成电极侵蚀,状态变差,主要引起电极形状变化、表面状态变化、与产品间接触电阻变化。

(2)电极状态变差导致焊接电流密度降低,引起焊点强度降低,造成形核不充分或无法形核,最终产品焊点直径过小或无核。

(3)铝合金电阻点焊不允许长时间连续点焊,点焊过程中应对电极状态进行跟控,点焊一定数量的焊点需对电极进行修磨,对于 5 mm 厚 2219 铝合金与 2 mm 厚 5A06 铝合金的不等厚异种铝合金点焊,在两焊点间距 35 mm 的条件下,建议最佳焊接次数不超过 15 次。

(4)铝合金点焊过程中,可通过电极表面光洁度判断点焊稳定性,当电极表面形成铜铝化合物后,表面光洁度降低,应修磨成光亮的弧面,点焊质量可得到有效保证。

参考文献:

- [1] 孙世烜,张勤练,李延民,等. 2219 铝合金变极性 TIG 横焊接头组织与性能研究[J]. 航天制造技术, 2015 (1):4-14.
SUN S X, ZHANG Q L, LI Y M, et al. Research on Microstructures and Mechanical Properties of Horizontal Position Welding Joints of 2219 Aluminum Alloy by Variable Polarity TIG [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(1):4-14.
- [2] 王金萍. 汽车用 2219 铝合金搅拌摩擦焊组织性能研究及仿真分析[J]. 热加工工艺, 2014(3):196-198.
WANG J P. Numerical Simulation and Study on Microstructure and Properties of Friction Stir Welding for Aluminum Alloy [J]. Hot Working Technology, 2014 (3):196-198.
- [3] 林有东,杨培杰. 铝合金在汽车上的应用及发展趋势[J]. 汽车与配件, 2000(1):20-21.
LIN Y D, YANG P J. Application and development trend of aluminum alloy in automobiles[J]. Automobile & Parts, 2000(1):20-21.
- [4] 魏强,宋建岭,苏再为,等. 不等厚异种铝合金点焊焊核偏移工艺研究[J]. 焊接技术, 2014(6):63-65.
WEI Q, SONG J L, SU Z W, et al. Nugget migration in spot welding of dissimilar Al alloys with different thickness[J]. Welding Technology, 2014(6):63-65.
- [5] 陈素玲,朱小兵,窦红强. 铝合金点焊电极端面铜铝合金化机理研究[J]. 焊接技术, 2014(12):19-22.
CHEN S L, ZHU X B, DOU H Q. Research on Copper Aluminum Alloying Mechanism of Aluminum Alloy Spot Welding Electrode End Face[J]. Welding Technology, 2014(12):19-22.
- [6] 王薇,许永仕,杨志斌,等. 电极带对不锈钢电阻点焊温度场影响的数值模拟[J]. 电焊机, 2024, 54(12):96-100.
WANG W, XU Y S, YANG Z B, et al. Numerical Simulation of Effect of Electrode Strips on Temperature Field of Resistance Spot Welding of Stainless Steel[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(12):96-100.
- [7] 王雨,黄桂超,袁佳辉,等. 电阻点焊焊接缺陷分析及其预防措施[J]. 焊接技术, 2023(5):174-177.
WANG Y, HUANG G C, YUAN J H, et al. Analysis of Welding Defects in Resistance Spot Welding and Preventive Measures [J]. Welding Technology, 2023 (5):174-177.
- [8] 王福生. 国内外电阻焊设备的发展[J]. 电焊机, 2005, 35(2):1-4.

- WANG F S. The Development of Resistance Welding Equipment at Home and Abroad [J]. *Electric Welding Machine*, 2005, 35(2): 1–4.
- [9] 朱文志, 胡德安, 陈益平, 等. 不等厚一种铝合金电阻点焊的工艺分析[J]. *焊接技术*, 2011(3): 31–34.
- ZHU W Z, HU D A, CHEN Y P, et al. Process analysis of resistance spot welding of an aluminum alloy with different thickness [J]. *Welding Technology*, 2011(3): 31–34.
- [10] 赵琰, 王惠龄, 谢江波, 等. 超导应用Peltier电流引线界面热(电)阻特性研究[J]. *低温与超导*, 2006(3): 205–209.
- ZHAO Y, WANG H L, XIE J B, et al. Optimal design of Peltier–Current–Lead (PCL) considering interface effect for conduction-cooled superconducting system [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2006(3): 205–209.
- [11] 杨满. 金属材料手册[M]. 机械工业出版社.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>
-
- ☞ 上接第83页
- 究[D]. 江苏: 南京理工大学, 2016.
- LI L B. Study on the wear resistance mechanism of non-equilibrium metal deposition welding [D]. Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [13] 李镇. TC4及TA1钛合金激光焊接接头组织及性能研究[D]. 山东: 齐鲁工业大学, 2023.
- LI Z. Study on microstructure and properties of TC4 and TA1 titanium alloy laser-welded joints [D]. Shandong: Qilu University of Technology, 2023.
- [14] Han L, Han T, Wu Q, et al. Study on microstructural characterization and local stress-strain behavior of transition zone within K-TIG welded SAF2205/Q235 dissimilar joints [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 5119–5138.
- [15] Xie W, Zhou Y, Nian K, et al. Effect of process parameters on arc behavior and weld formation in weaving gas tungsten arc welding [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, 32(24): 11393–11407.
- [16] Mello D B I P, Lima M S D, Bezerra H T S D, et al. Microstructure characterization of the weld cladding of clad steel plate A516 GR. 70–AISI 904L by electrosag strip cladding using Inconel 625 strip [J]. *Welding in the World*, 2023, 67(11): 2571–2587.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>