

引用格式:杨洪刚,赵欣. 镀银铜导线与银箔平行微隙电阻焊影响因素[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(22): 110-114
Yang Honggang, Zhao Xin. Analysis of influencing factors of parallel micro gap resistance welding of silver-plated copper wire and silver foil [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(22): 110-114

镀银铜导线与银箔平行微隙电阻焊影响因素

杨洪刚¹ 赵欣²
(上海电机学院机械学院¹,上海 201306;昆山斯格威电子科技有限公司²,昆山 215301)

摘要 为了保证空间硅太阳能电池阵的连接质量,采用枪式微型电阻焊接系统对镀银铜导线与银箔连接片进行了工艺实验研究和影响因素分析。结果表明,采用纯钼电极焊接的焊点质量及其耐磨性要明显优于纯钨和钨铜电极。电极间隙对焊点质量影响很大,焊接电压对焊点质量的稳定性有较大影响。适当增加焊接压力会抑制焊接飞溅、改善焊点质量、提高焊点强度,但当压力大于 25 N 时,压力的增加对焊点强度的改善作用将不再明显。银箔扭曲或撕裂是最可靠的焊点拉伸破坏形式,此时对应的焊点强度超过 40 N,且焊接过程飞溅较小,电极无明显粘连。可见选用适当的工艺参数,则焊点界面结合良好且无明显孔洞缺陷以及虚焊现象,综合性能最佳。

关键词 枪式微型电阻焊接系统 工艺参数 焊点质量

中图分类号 TG406; **文献标志码** B

太阳能电池是光伏系统的核心器件,其中镀银铜导线作为外引线,具备良好的导热性和导电性^[1,2]。用于太阳能电池阵导线与连接片的传统焊接方法主要是软钎焊,但由于采用了低熔点的含锡(Sn)软钎料,锡铅钎料在低温下具有冷脆性,在高温下易于软化甚至是熔化,在真空环境中容易导致焊点失效;另一种方法是平行微隙电阻焊,其焊接过程中无钎料添加,金属丝与银箔在两个平行电极的压力下紧密贴合,在流过焊区的脉冲大电流作用下,焊接区域产热,同时在电极压力下,焊件两个洁净金属面之间发生塑性变形甚至熔化,形成焊核实现连接。焊接时为局部瞬时加热,加热温度对整个焊件影响极小^[3],该方法在航空等领域中应用优势明显^[4-6]。考虑到本文研究涉及的焊接接头的工作环境、性能要求和接头的特殊材料与结构形式,平行微隙电阻焊接方法是该类接头的合适连接方法。然而,通常的手持式平行微隙电阻焊的焊接过程存在可控性差,焊接一致性不良,飞溅难控制等缺点。

为提高太阳能电池阵电阻点焊质量,研制一套太阳能电池阵精密电阻焊接系统,又称为枪式微型电阻焊接系统,专用于太阳能电池板的电阻点焊。焊接系统采用平行微隙电阻焊,实现焊接压力精确可控、可

调;系统采用带焊接参数监测功能的直流双脉冲电源,焊接过程中可实施快速精确定位。研究运用枪式微型电阻焊接系统焊接太阳能电池阵导线的界面成形,探讨焊接工艺参数对焊接接头性能的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验系统

焊接对象为导线和银箔,其中:银箔连接片试样尺寸为 25 mm×7 mm,厚度为 0.05 mm,导线由 19 股细铜导线组成,导线整体直径仅 0.5~0.7 mm,各股导线均为铜镀银材料,镀层厚度约 1 μm。焊前导线镀层不需去除,但导线和银箔施焊部位均需丙酮擦拭,以保证良好的表面状况和接触状态。典型焊接接头形式如图 1 所示,为了保证导线与银箔的连接强度,每个连接接头分别焊接 3 个焊点,焊点间距为 2 mm。

焊接设备为自主研制的枪式微型电阻焊系统,该系统基于线性高速控制焊接电流的晶体管式电源,电极为纯钼电极,端面尺寸 2 mm×0.4 mm。焊接工艺参数范围如表 1 所示。

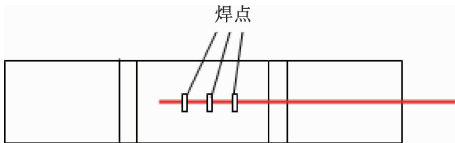


图 1 导线与银箔点焊接头示意图
Fig. 1 Schematic of spot-welded joint of conducting wire and silver foil

2019 年 1 月 25 日收到
上海市高峰高原学科项目
(A1-5701-18-007-03)、上海
电机学院特色学科建设项目(16TSXK01)资助
第一作者简介:杨洪刚(1979—),男,汉族,博士,副教授。E-mail:
yanghg@sdju.edu.cn。

表 1 导线与银箔焊接工艺参数范围
Table 1 Range of process parameters for welding
conducting wire and silver foil

电压/V	预压	保持	焊接时间/ms			焊接	电极间
	时间/s	时间/s	上升	焊接	下降	压力/N	隙/mm
1.2~2.0	0.2	0.2	10	12	15	25	0.15

由于银在空气中较易被氧化,当导线绝缘层剥除后,应尽快完成焊接,避免氧化膜形成后影响焊接性能。因此焊接过程中应辅以氩气气体保护措施,保证焊点质量稳定性,同时可以改善电极寿命。氩气出气量应适中,若出气量太大则会加速焊接区域的热量损失,降低焊点强度;出气量太小则会出现少量飞溅物。试验过程中选取较适宜的气体流量10~15 L/min。

焊接接头金相试样沿垂直于导线的方向,在焊点中心线处截取,将试样镶嵌、抛光,在低倍光学显微镜下观察焊缝宏观组织形貌。接头拉伸性能试验按照国标 GB/T 228—2002,在 XYB350C 电子拉力试验机上进行。

2 试验结果与分析

2.1 控制模式对焊点质量的影响

试验所用焊接电源如图 2 所示,该电源含有电压、电流两种控制模式,其中电压控制模式下可使用预焊检测功能,能有效抑制飞溅,提升焊点质量和电极寿命,同时可以监测瞬时电流和阻抗,当接触电阻过大时不执行主通电操作,从而避免对焊件及电极的损伤;而电流控制模式则能保证通过焊点区域的有效电流值大小,但该模式下的焊接窗口更窄,且无法使用预焊检测功能,对飞溅的控制不佳,焊点质量得不到很好的控制。因此,试验宜采取电压控制模式进行焊接。

2.2 焊接工艺参数对焊点质量的影响

2.2.1 焊接压力对焊点质量及其稳定性的影响

为了不影响电池基板性能,焊接压力不宜过大,选取 10~40 N 的压力进行试验。每种焊接压力条件下焊接两个试样,求剪切力平均值。结果表明:适当增加焊接压力会提高焊点强度、抑制焊接飞溅、改善焊点质量,但当压力大于 25 N 时,焊接压力的增

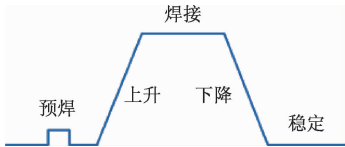


图 2 带预焊检测功能设置的焊接过程波形示意图
Fig. 2 Schematic of welding waveform with pre-welding
detection function setting

加对焊点强度的改善作用将不再明显,如图 3 所示。其主要原因是随着焊接压力的逐渐增加,导线和电极以及导线和基板的接触状态变得更加优良,并且焊接区金属塑性变形程度也随之增大,使得熔核尺寸增大,接头强度增加^[7];然而焊接压力过大时,焊点表面压痕较深,而且焊接热输入量也因压力增大而减少,形成的熔核尺寸降低,接头强度反而下降^[8]。同时,为了防止连接片下方的基板材料被焊穿,出现安全隐患,焊接压力值一般不应超过 35 N。因此,综合考虑焊点质量及安全技术要求,焊接压力值设为 25 N 左右。

2.2.2 焊接电压对焊点质量的影响

焊接电压对焊接能量的影响至关重要,图 4 显示了焊接电压逐步从 1.2 V 升至 2.0 V 的过程中焊点剪切力的变化。每个电压下焊接 5 个试样,求剪切力平均值,及最大、最小值。由图可见,随着焊接电压的提高,焊点强度近似呈线性递增,而且当参数合适时,焊接质量的波动较小。但是,当电压较高时,焊点强度波动很大,主要由于焊接飞溅及电极粘连。焊接中的飞溅使得焊点表面存在明显的氧化铜溅射物。飞溅会导致焊点连接不良,还会增加电极磨损同时造成安全隐患。因此,焊接过程中应优化焊接参数,避免采用过强的焊接参数,适当增加焊接压力,使用预焊检测功能,同时增加气体保护措施,能有效抑制飞溅现象的发生。

2.2.3 电极间隙对焊点质量的影响

电极间隙的不同会对焊接区温度分布产生影响。王晨曦等^[9]认为平行微隙焊接时电极间隙决定了焊接最高温度出现的位置,当电极间隙小于某临界值时两电极正下方的温度最高,当电极间隙大于某临界值时两电极中间出现最高温度。电极间隙还直接影响到电流密度,从而影响焊点的温度分布,进而影响焊点质量。如图 5 所示,焊接接头的拉剪力随着电极间隙的增加,呈先升后降的趋势。从

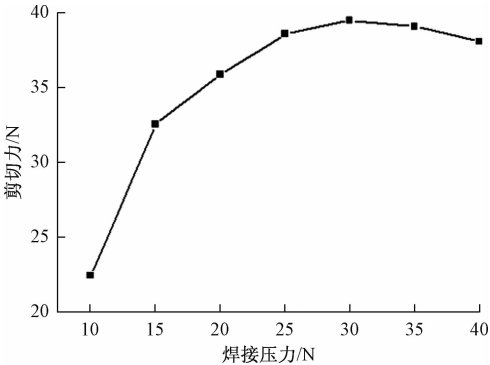


图 3 焊接压力对焊点强度的影响规律
Fig. 3 Influence of welding force on joint strength

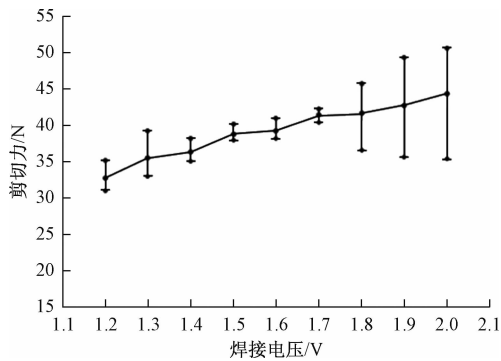


图4 焊接电压对焊点强度的影响规律
Fig. 4 Influence of welding voltage on joint strength

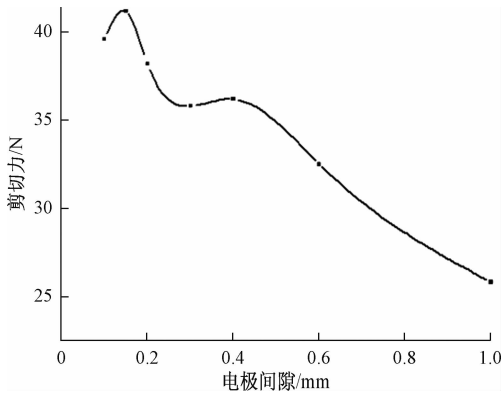


图5 电极间隙对焊点强度的影响规律
Fig. 5 Influence of electrode gap on joint strength

图5可以看出电极间隙为0.15 mm时接头的拉剪力存在一个最大值,达到42 N。经试验验证,选取最优的电极间隙为0.15 mm。

2.2.4 电极材料、结构尺寸对焊点质量的影响

电极材料和端面结构尺寸直接影响焊接过程中电流回路的形成和焊接热量的传导,从而影响焊点质量。在相同焊接参数下,分别采用1.1 mm×0.7 mm、2 mm×0.4 mm和2.5 mm×0.3 mm三种不同端面尺寸的焊接电极进行焊接试验。当电极端面尺寸较小时,焊接操作时定位难度较大,易焊偏;当端面尺寸较大时,电极容易粘连,且压痕较深。若在电极端面开一个微槽,在一定焊接参数范围内能明显提高焊点强度,但同时电极耐磨性明显下降,且更易发生飞溅,银箔易被焊穿,焊点质量一致性显著降低。并且,在相同焊接工艺参数下,采用纯钨电极焊接的焊点质量及其电极耐磨性均明显优于纯钨电极和钨铜电极。

2.3 焊点抗拉性能及拉伸破坏状态分析

试验中导线和银箔焊接工艺参数范围如表1所示。对应的3种典型焊点拉伸破坏状态分别为焊点界面撕裂、银箔扭曲变形和撕裂、导线拉断,如图6~图8所示。

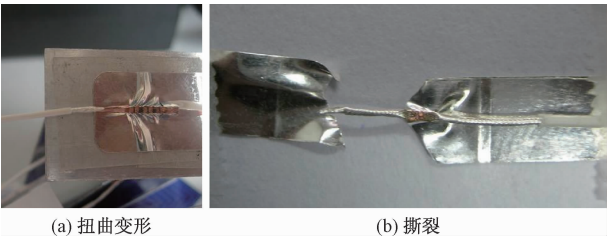


图6 焊点拉伸破坏状态:银箔扭曲变形和撕裂
(焊点强度43.7 N)
Fig. 6 Tensile failure mode of joint: twist and tear of silver foil
(welding spot is 43.7 N)



图7 焊点拉伸破坏状态:焊点界面撕裂
(焊点强度35.7 N)
Fig. 7 Tensile failure mode of joint: interface tear
(welding spot is 35.7 N)



图8 焊点拉伸破坏状态:导线拉断(焊点强度:55.8 N)
Fig. 8 Tensile failure mode of joint: conducting wire fracture
(welding spot is 55.8 N)

基于强度理论及应用背景综合考虑,银箔扭曲或撕裂是最可靠的焊点拉伸破坏形式,此时对应的焊点强度水平超过40 N(图6),且焊接过程飞溅较小,电极无明显粘连。焊点界面撕裂的断裂模式下,对应的焊点强度也可能在30 N以上(图7),但这类焊点失效模式的可靠性较差,强度低于30 N的弱连接焊点,其失效模式也是界面撕裂;而导线拉断的失效模式在导线/银箔焊接中并不常见,过强的焊接参数或不适当的电极状况下可能形成这类焊点。焊接参数过强导致导线拉断失效,尽管其得到的焊点拉伸强度较高(图8),但由于参数过强,会造成较大飞溅,电极磨损增大,甚至可能焊穿银箔,造成安全隐患;由于电极表面不光滑等原因造成的导线拉断失

效,焊接中会焊断若干股导线,致使在破坏强度并不是很高的情况下造成导线拉断。

2.4 导线和银箔平行微隙电阻焊焊点的界面成形

为了更准确地评估焊点质量,对焊点进行宏观金相分析,如图9所示。

分析可知:焊后导线的镀银层、银箔及部分铜导线基体已经熔合成一体。从焊点成形情况看,若选用较弱工艺参数,则导线和银箔的焊点界面结合状态一般,存在局部虚焊缺陷[图9(a)];若选用过强工艺参数,则焊点中会出现空穴或孔洞缺陷,尽管界面结合紧密,焊点抗拉强度高,但疲劳寿命及耐高低温性能可能会下降[图9(b)];若选用工艺参数适当,则焊点界面结合良好且无明显缺陷,焊点连接界面处形成共晶组织,焊点综合性能最佳[图9(c)],满足太阳能电池焊接强度指标要求^[10]。

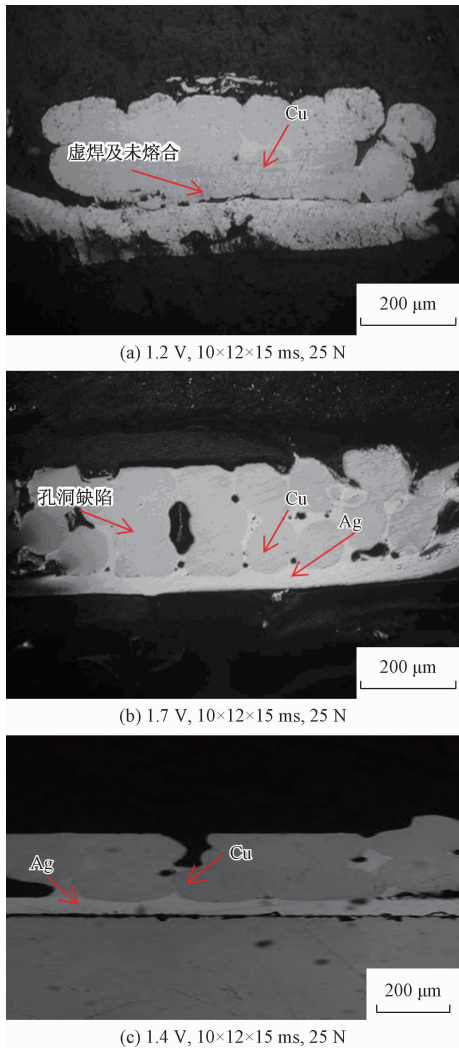


图9 不同焊接参数条件下导线和银箔焊点宏观金相图
Fig.9 Metallurgical structure of conducting wire and silver foil joints under different welding parameters

3 结论

(1)选取合适的工艺参数,采用自主研发的枪式微型电阻焊接系统能成功实现对空间太阳能电池阵导线与银箔连接片的焊接。

(2)采用纯钨电极焊接的焊点质量及其耐磨性优良,适当增加焊接压力会提高焊点强度、抑制焊接飞溅、改善焊点质量,试验得出最优的电极间隙为0.15 mm,保护氩气的最佳气流量为10~15 L/min。采用1.4 V、10×12×15 ms、25 N焊接规范的焊点综合性能最佳。

(3)银箔扭曲或撕裂是最可靠的焊点拉伸破坏形式,对应的焊点强度超过40 N,而且焊接过程飞溅较小,无明显电极粘连。

(4)当工艺参数选用恰当时,焊点界面结合良好且无明显孔洞缺陷以及虚焊现象,界面成形良好。

参 考 文 献

1 Murali S, Srikanth N, Wong Y M, et al. Fundamentals of thermosonic copper wire bonding in microelectronics packaging[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(2): 615-623

2 汪 婧,舒碧芬,郭 银,等. 基于微热管的高倍聚光光伏模组新型散热实验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(15): 105-111

Wang Jing, Shu Bifen, Guo Yin, et al. A new heat dissipation experimental research of high concentrated photovoltaic based on micro-heat pipe[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(15): 105-111

3 曾 乐,石小平,张红权. 硅太阳能电池方阵组装的平行间隙电阻焊技术及其连接本质[J]. 焊接, 1993(3): 2-5

Zeng Le, Shi Xiaoping, Zhang Hongquan. Essence of parallel gap resistance welding for assembling square matrix of silicon[J]. Welding, 1993(3): 2-5

4 王志彬,贺 虎,陈萌炯,等. 太阳能电池阵新型互连片微连接技术探讨[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(1): 104-107

Wang Zhibin, He Hu, Chen Mengjiong, et al. Micro-joining technology for new-type interconnectors of solar array[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(1): 104-107

5 张成聪,杨世华,丛 茜,等. 镀银铜箔平行微隙电阻焊接头组织与性能[J]. 焊接学报, 2016, 37(5): 107-110

Zhang Chengcong, Yang Shihua, Cong Qian, et al. Microstructure and mechanical properties of parallel micro gap welds in silver-gilt copper foil and copper foil[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(5): 107-110

6 Dong S J, Kelkar G P, Zhou Y. Electrode sticking during micro-resistance welding of thin metal sheets[J]. IEEE Transaction on Electronics Packaging and Manufacturing, 2002, 25(4): 355-361

7 朱正行,严 向,王 敏. 电阻焊技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2001

Zhu Zhengxing, Yan Xiang, Wang Min. Resistance welding technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001

8

王亚荣, 张忠典, 冯吉才. 交流点焊工艺参数对 AZ31B 镁合金接头性能的影响[J]. 焊接, 2003(7): 18-20
Wang Yarong, Zhang Zhongdian, Feng Jicai. Influence of AC spot welding parameters on mechanical properties of AZ31B alloy joints [J]. Welding, 2003(7): 18-20

9

王晨曦, 王春青, 孔令超. Ni/NiCr 平行微隙焊接接头的形成机理[J]. 焊接学报, 2004, 25(4): 99-102
Wang Chenxi, Wang Chunqing, Kong Lingchao. Mechanism of Ni/NiCr joint formation by parallel micro gap welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(4): 99-102

10

中国人民解放军总装备部. 空间用三结砷化镓太阳能电池通用规范: GJB 7392—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011
General Equipment Department of the Chinese People's Liberation Army. General specification for GaInP /GaAs/Ge solar cell for space application: GJB 7392—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011

Influencing Factors of Parallel Micro Gap Resistance
Welding of Silver-plated Copper Wire and Silver Foil

YANG Hong-gang¹, ZHAO Xin²

(College of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University¹, Shanghai 200245, China;
Kunshan Skyway Electrical Technology Co. Ltd.², Kunshan 215301, China)

[**Abstract**] The newest system of micro gun resistance welding was developed and used to weld the silver-plated copper wire and silver foil in order to guarantee connecting quality of the space solar cell. The results show that in comparison with pure tungsten and tungsten-copper electrode respectively, the joint quality and abrasion resistance welded using pure molybdenum electrode are better. Electrode gap has a great effect on welding quality, and welding voltage influences the stability of welding quality mostly. In order to reduce welding spatter and improve joint quality and strength, it is necessary to raise the weld pressure appropriately. Improving effects of joint strength *via* raising the weld pressure are inconspicuous, when the weld pressure is in excess of 25 N. Thus the best weld pressure is about 25 N. Twist or tear are the most reliable forms of tensile failure mode, and the joint strength is over 40 N, and the phenomenon of welding spatter and electrode adhesion don't or seldom occur in welding. By selecting appropriate process parameters, the welding interfaces are sound and without obvious faulty welding defects and holes, which make the weld performance best.

[**Key words**] system of micro gun resistance welding process parameters welding quality