

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.12.19

触头电阻钎焊工艺和微观组织研究

朱世良^{1,2}, 田修波¹, 陈庆², 张天怡², 郝子硕¹

1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001
2. 厦门宏发电声股份有限公司, 福建 厦门 361021

摘要: 采用电阻钎焊方法对AgSnO₂触点和H62黄铜触桥进行焊接, 钎料选用BAg60CuZn, 分析了焊接电流、焊接时间和焊接压力对触头剪切强度的影响规律。结果表明, 当焊接电流为7.5 kA, 焊接时间为90周波, 电极压力为2.3 kN时, 触头剪切强度达到最大值20.3 MPa。随着钎着率的增加, 触头的剪切强度不断增大, 并在钎着率约为85%时趋于稳定, 约为20 MPa。微观组织分析表明, 焊缝主要由银铜共晶体和固溶体组织组成, 且随着钎着率的提高, 焊缝组织逐渐完善, 缺陷减少。采用超声C扫描计算所得的钎着率可以直接反映触头的焊接质量。

关键词: 电阻钎焊; 触头; 钎着率; 剪切强度

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)12-0121-05

Study on the Resistance Brazing Process and Microstructure of Electrical Contacts

ZHU Shiliang^{1,2}, TIAN Xiubo¹, CHEN Qing², ZHANG Tianyi², HAO Zishuo¹

1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China
2. Xiamen Hongfa Electronic Sound Co., Ltd., Xiamen 361021, China

Abstract: The resistance brazing method was employed to weld AgSnO₂ contact points and H62 brass contact bridges using BAg60CuZn brazing filler metal. The effects of welding current, welding time, and welding pressure on the shear strength of the contacts were analyzed. The results indicate that the maximum shear strength of 20.3 MPa is achieved when the welding current is 7.5 kA, the welding time is 90 cycles, and the electrode pressure is 2.3 kN. As the brazing rate increases, the shear strength of the contacts continuously increases and stabilizes at approximately 20 MPa when the brazing rate reaches about 85%. Microstructural analysis reveals that the weld consists mainly of silver-copper eutectic and solid solution structures. With the increase of the brazing rate, the weld microstructure gradually improves, and defects decrease. The brazing rate calculated by ultrasonic C-scan can directly reflect the welding quality of the contact

Keywords: resistance brazing welding; electrical contact; brazing rate; shear strength

引用格式: 朱世良, 田修波, 陈庆, 等. 触头电阻钎焊工艺和微观组织研究[J]. 电焊机, 2024, 54(12): 121-125.

Citation: ZHU Shiliang, TIAN Xiubo, CHEN Qing, et al. Study on the Resistance Brazing Process and Microstructure of Electrical Contacts[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(12): 121-125.

0 引言

电工触头是低压电气设备中导通和切断电路的关键部件, 其工作过程中需要良好的导电和散热性, 因此材料一般选择银铜及其合金^[1-4]。但是, 银铜及其合金在电阻焊过程中产热慢、散热快, 焊接

性较差, 触头焊接不良不仅影响触点的性能, 还可能造成整个低压电器设备的损坏。目前, 我国低压电器产品大多局限在低端市场, 竞争力较弱, 其中电工触头焊接质量不稳定是一个重要原因。它限制了触头负载较大电流和频繁通断电的能力, 成为制约行业长远发展的薄弱环节^[5]。

收稿日期: 2024-05-08 修回日期: 2024-07-16

作者简介: 朱世良(1985—), 男, 博士, 主要从事低压电器、继电器触头焊接工艺和设备的研究。E-mail: ly920827@163.com。

在国内低压电器触头生产行业,大规格电工触头(焊接面积大于 100 mm²)通常采用感应加热方式进行装配,而小规格电工触头(焊接面积小于 16 mm²)则多采用电阻钎焊或者电阻焊工艺。电阻钎焊利用电阻热使钎料熔化,用液态钎料润湿母材并与母材相互扩散形成焊接接头的一种焊接方法。

本文采用电阻钎焊方法对 AgSnO₂触点和黄铜触桥进行焊接,研究焊接电流、焊接时间和焊接压力等参数对剪切强度的影响规律,并分析电工触头的缺陷及焊接界面组织形态。研究旨在提高触头焊接的稳定性和质量,从而提升我国低压电器产品的市场竞争力,推动行业的可持续发展。

1 试验材料及试验条件

电工触头是由触点和触桥焊接而成,试验触点材料为 AgSnO₂,形状为 $\varnothing 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 的圆片,物理和性能如表 1 所示。AgSnO₂触点具有较好的导电性、散热性,优良的抗电磨损性和抗熔焊性。然而,当 AgSnO₂触点直接与触桥进行电阻钎焊时,AgSnO₂中的 Ag 会溶解在液态钎料中,导致 SnO₂在焊缝界面处富集,大幅度降低焊接接头强度。因此,需要在 AgSnO₂基体预敷一层厚度约 0.55~0.65 mm 的 Ag 层。

表 1 AgSnO₂触点的物理性能
Table 1 Physical property of AgSnO₂ contacts

密度/(g·cm ⁻³)	硬度	电阻率/(μΩ·cm)	电导率/%IACS
10.0	86	2.17	80

触桥材料选用 H62 黄铜,形状为 40 mm×11 mm×3 mm 的薄板,物理性能如表 2 所示。触点、触桥如图 1 所示。

表 2 黄铜 H62 的物理性能
Table 2 Physical property of brass H62

液相线 /°C	固相线 /°C	密度 /(g·cm ⁻³)	热导率 /W·(m·K) ⁻¹	电阻率 /(μΩ·cm)
906.0	899.0	8.430	116.7	7.1

试验用的钎料为片状 BAg60CuZn,化学成分和机械性能见表 3。该钎料具有适宜的熔点、良好的流动性和浸润性,同时强度、韧性、导电性、导热性和抗腐蚀性良好,主要用于钎焊导电性要求高的触头。

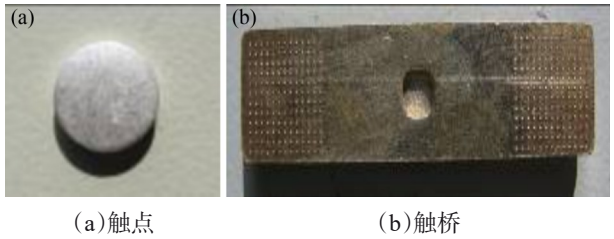


图 1 电工触头
Fig. 1 Electrical contact

表 3 BAg60CuZn 钎料的化学成分和机械性能
Table 3 Composition and property of BAg60CuZn

化学成分/%			熔化温度 /°C	抗拉强度 /MPa	电阻率 /μΩ·m
Ag	Cu	Zn			
60±1	26±1	余量	695~730	343	0.072

钎剂选用 FB102,适用于 600~850 °C 范围内银基钎料的钎焊。

试验采用东莞安达电机有限公司生产的单相工频点焊机,功率为 63 kVA,该焊机可实现焊接电流、焊接时间和电极压力的精确控制。电极选用 CuW70,电极端面尺寸为 16 mm×14 mm。

2 工艺参数对剪切强度的影响

由于 AgSnO₂触点和 H62 触桥的导电、导热性能较好,当电阻钎焊的工艺参数不合理时,会出现触点表面严重烧损氧化、钎料未完全铺展、未焊合、钎料溢出及触桥退火软化等问题,触头的剪切强度和使用性能也会大幅度降低。因此,需要对焊接电流、焊接时间、焊接压力与电工触头剪切强度之间的关系规律进行试验分析。

2.1 焊接电流对剪切强度的影响

保持焊接时间为 90 周波、电极压力为 2.3 kN,焊接电流和剪切强度的关系如图 2 所示。由图 2 可见,剪切强度随焊接电流的增大先增大后减小,当电流为 7.5 kA 时,剪切强度达到最大值,约为 20.3 MPa。选取焊接电流最大和最小试样的焊缝拍摄金相照片如图 3 所示,结合金相照片分析焊接电流对剪切强度和焊缝形态的影响规律。

根据焊接过程中电阻热计算公式 $Q=I^2Rt$ (I 为焊接电流, R 为工件电阻和接触电阻, t 为焊接时间)可知,电阻热 Q 与 I^2 成正比,焊接电流对电阻钎焊过程的产热影响最大。当焊接电流较小时,钎焊接头

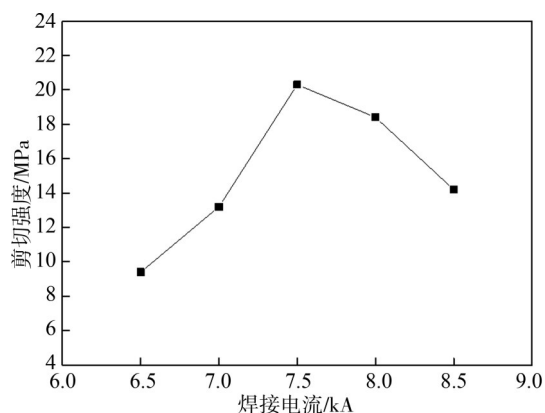
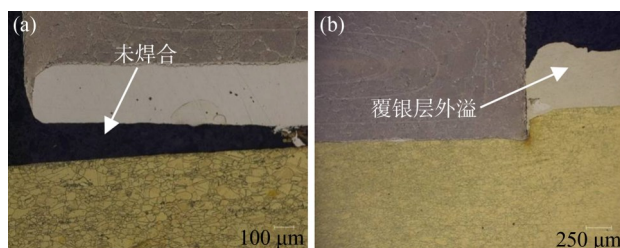


图 2 焊接电流对剪切强度的影响

Fig. 2 Relationship between welding current and shear strength

处产热较少,焊接区温度较低,钎料润湿铺展的效果较差,焊缝结合面存在大面积未焊合缺陷(见图 3a),钎着率(有效焊接面积)较低。此外,焊接区温度低也会导致钎剂活性变差,无法有效去除焊缝结合面的氧化膜,容易存在氧化皮夹杂,剪切强度较低。



(a) 6.5 kA

(b) 8.5 kA

图 3 焊接电流与焊缝形态:

Fig. 3 Welding current and interface

当焊接电流增加至约 7.5 kA 时,焊接区温度大幅度升高,钎料润湿铺展效果得到明显改善,剪切强度也大幅度提高。但是,过大的焊接电流会导致焊接区温度过高,液态钎料产生飞溅,母材也会溶蚀,焊接界面的覆 Ag 层在电极压力的作用下挤出焊缝,剪切强度大幅度下降。此外,覆 Ag 材料的大量损失会使电工触头的使用性能和电寿命降低,同时在钎焊过程中大量外溢的液态钎料粘附在电极上,对生产设备造成损害,焊后的电工触头也无法使用。

2.2 焊接时间对剪切强度的影响

保持焊接电流为 7.5 kA、电极压力为 2.3 kN,焊接电流和剪切强度的关系如图 4 所示。由图 4 可见,剪切强度随焊接时间的增长先增大后减小,在 90 周波时,达到剪切强度峰值约为 20.3 MPa。

焊接过程产生的电阻热与焊接时间成正比,当

焊接时间比较短(只有约 87 周波)时,结合面处产热过小,钎料只在焊缝界面的部分区域铺展,周围部分存在大面积未焊合缺陷,不能与母材进行扩散形成完整牢固的接头。此外,由于结合面处产热较少,钎剂也无法有效地去除母材表面的氧化膜,因此液态钎料只是与部分母材相互作用,导致焊缝钎着率和剪强度比较低。

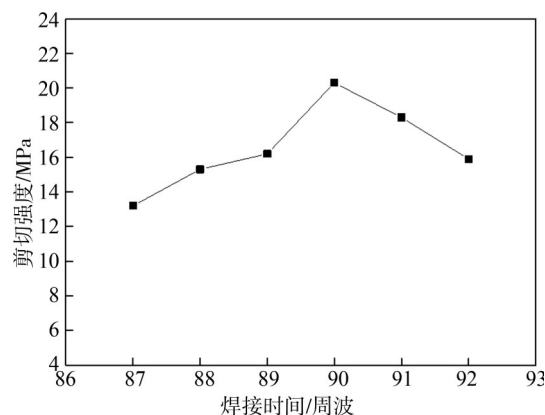


图 4 焊接时间对剪切强度的影响

Fig. 4 Relationship between welding time and shear strength

当焊接时间增大至 90 周波时,钎料润湿铺展效果得到明显改善,剪切强度也大幅度提高至 20.3 MPa。当焊接时间过长时,结合面产热较多,钎料熔化并在连续压力的作用下挤出焊缝,焊缝中部仅剩余少量钎料,无法形成理想的钎焊接头。与焊接电流过大产生的后果相类似,外溢的钎料还会使电极和触桥发生粘附现象,污染电阻焊机的电极,此外过多的热量使触桥严重氧化、烧伤。

2.3 焊接压力对剪切强度的影响

保持焊接电流为 7.5 kA、焊接时间为 90 周波,电极压力和剪切强度的关系如图 5 所示。由图 5 可知,当焊接压力为 1.9~2.3 kN 时,剪切强度均随电极压力的增大而缓慢增大,当电极压力约为 2.3 kN 时,剪切强度达到峰值,为 20.3 MPa;当焊接压力超过 2.3 kN 时,剪切强度迅速降低。选取电极压力最大和最小试样的焊缝拍摄金相照片如图 6 所示,结合金相照片分析焊接电流对剪切强度和焊缝形态的影响规律。

焊接压力在电阻焊接过程中直接决定了各工件之间的接触电阻。当焊接压力较小时,触点和触桥之间、触点与电极之间的有效接触面积较小,接

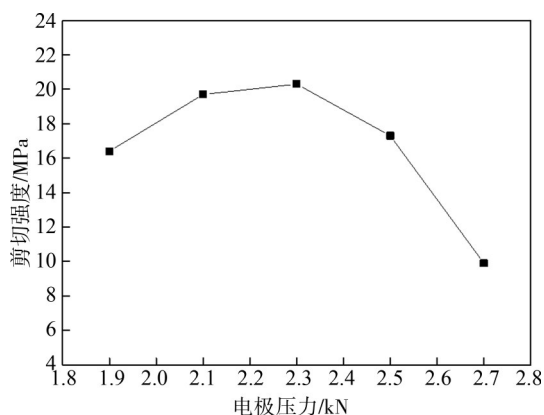
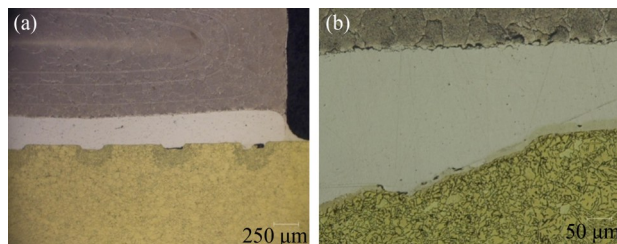


图5 焊接压力对剪切强度的影响

Fig. 5 Welding pressure and shear strength

触电阻较大,焊接过程产热较多,剪切强度较大;随着焊接压力的增大,各工件之间的有效接触面积增大,焊接初期产生的电阻热大幅度降低,剪切强度也不断减小。此外,较大的焊接压力也会导致焊缝局部熔化的钎料被挤出焊缝(见图6b),焊缝剪切强度大幅度降低。



(a) 1.9 kN

(b) 2.6 kN

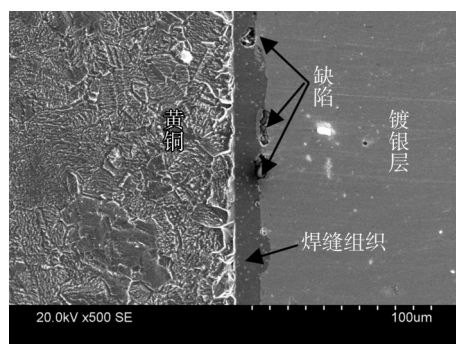
图6 电极压力与焊缝形态

Fig. 6 Relationship between welding pressure and interface

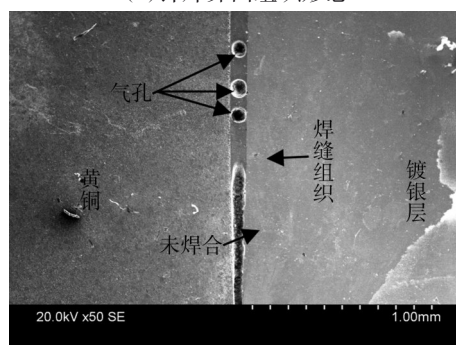
3 钎着率和力学性能分析

在触点与触桥的焊接过程中,由于覆Ag层中的Ag会向液态钎料中溶解,随着液态钎料的铺展填缝,覆Ag层中的Ag向液态钎料中溶解量逐渐减少。在焊后冷却结晶过程中,过饱和的Ag元素将沿着母材的一些晶粒的密排晶面形核长大,该过程会阻碍稀疏晶面的晶粒生长,钎料与母材间的这种溶解与结晶作用,使焊缝组织在靠近覆Ag层的一侧形成凸峰状组织,这种相互交错的结晶组织使钎焊接头的结合更加牢固,降低电工触头失效的几率,提高电工触头工作的可靠性。但是,由于电工触头电阻钎焊时间特别短,钎料难以在焊缝界面完

全铺展润湿,会产生大量的气孔和未焊合区域(常见的触头钎焊界面组织形态如图7所示),触头剪切强度和钎着率均会有一定程度的降低。



(a) 钎焊界面组织形态



(b) 钎焊界面组织宏观照片

图7 钎焊界面组织形态

Fig. 7 Brazing interface morphology

目前,触头焊接质量主要以剪切强度和钎着率为判定标准。剪切强度可以准确反映触头焊接力学性能,但是此种测量方法是一种破坏性检测方法,耗时耗力;钎着率检验是通过超声C扫描来计算触头的实际焊接面积,以此衡量触头焊接质量。图8为不同工艺条件下触头钎着率与剪切强度之间的关系曲线。由图8可知,随着钎着率的增加,剪切强度在整体趋势上是不断增大的。当钎着率达到约85%时,剪切强度逐渐趋于稳定。

然而,钎着率不能反映电工触头焊缝的微观组织形态^[6],因此需要对焊缝的微观组织进行分析。以图8中钎着率为92.5%的触头为例,焊缝界面能谱分析结果如图9所示。分析结果表明,钎料中的Zn元素仅有少量剩余,焊缝组织主要由银铜共晶体和固溶体组织组成。这是因为在电阻钎焊过程中,瞬间的电阻热会导致焊接区温度急剧上升至约800~900℃,Zn元素快速挥发。结合图8分析可知,

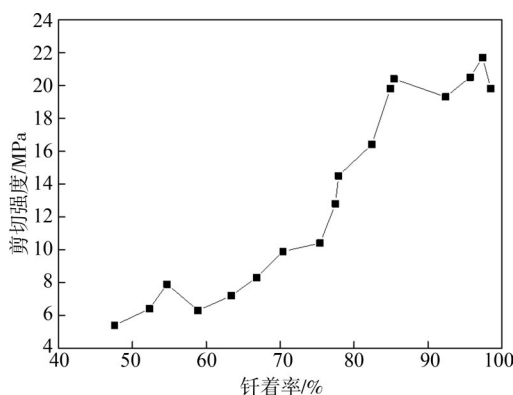
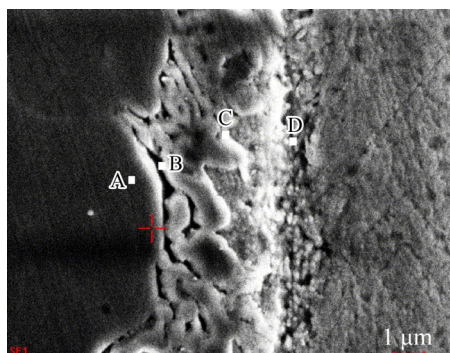


图8 剪切强度和钎着率关系曲线

Fig. 8 Relationship between shear strength and brazing rate

当工艺参数偏小(设定值偏小或者焊接过程工艺参数波动)时,钎料润湿铺展时间较短,钎料和母材之间几乎不存在扩散层,气孔、夹渣、未焊合等缺陷较多,钎着率和剪切强度均较低。随着焊接工艺参数的不断增大,钎料得到充分的润湿铺展,并与母材形成了充分的扩散层,界面组织也主要由固溶体组织或者共晶体组成,钎着率和剪切强度显著提升。当钎着率达到约85%时,焊缝中细小的气孔、局部的未熔合缺陷对焊接接头的力学性能影响不大,剪切强度也趋于稳定在约20 MPa。这表明,采用超声C扫描(无损检测)计算所得的钎着率可以直接反映触头的焊接质量。



位置	Ag(wt.%)	Cu(wt.%)	Zn(wt.%)
A	11.15	87.68	1.17
B	30.38	67.87	1.76
C	90.79	9.21	—
D	91.38	8.62	—

图9 焊缝能谱分析

Fig. 9 EDS of weld joints

4 结论

本文通过对 AgSnO₂触点和 H62 触桥焊接工艺

的优化和焊缝组织缺陷分析,得到以下结论:

(1)研究了焊接电流、焊接时间和焊接压力对触头剪切强度的影响规律。当焊接电流为7.5 kA、焊接时间为90周波、电极压力为2.3 kN时,触头剪切强度达到最大值约20.3 MPa。

(2)随着触头钎着率的不断增大,剪切强度不断增大;当钎着率达到约85%时,焊缝局部缺陷对焊接接头的力学性能影响较小,剪切强度渐渐趋于稳定在约20 MPa。

参考文献:

- [1] Xu C H, Yi D Q, Wu C P. Microstructures and properties of silver-based contact material fabricated by hot extrusion of internal oxidized Ag-Sn-Sb alloy powders [J]. Materials Science and Engineering, 2012, 58: 202-209.
- [2] Cosovic V, Talijan N, Zivkovic D. Comparison of properties of silver-metal oxide electrical contact materials [J]. Journal of Mining and Metallurgy, 2012, 48 (1): 131-141.
- [3] 万江文, 荣命哲, 王其平. 电弧对银金属氧化物触头的熔炼和侵蚀特性[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32 (4): 13-17.
WAN J W, RONG M Z, WANG Q P. Smelting and Erosion Characteristics of AgMeO Contacts by Breaking Arcs[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32 (4): 13-17.
- [4] Li J, Ma Z Y, Li J M. Arc erosion of silver/tungsten contact material under low voltage and small current and resistive load at 400 Hz and 50 Hz [J]. IEICE Transactions on Electronics, 2011, E94C (9): 1356-1361.
- [5] 陈仲, 廖宏彬, 张明江. 欧洲电触头产业发展状况[J]. 电工材料, 2002(12): 31-35.
CHEN Z, LIAO H B, ZHANG M J. The Development Situation of Electrical Contact Industry In Europe [J]. Electrical equipment industry, 2002(12): 31-35.
- [6] 祁少飞. 共晶体组织对 Ag-CdO 触头感应钎焊剪切强度的影响[J]. 太原重型机械学院学报, 2003, 24(2): 117-119.
QI S F. The Effect of Eutectic Microstructure on Shear Strength of the Induction Solder on the Ag-CdO Tip [J]. Journal of Taiyuan Heavy Machinery Insitute, 2003, 24(2): 117-119.