

# 电触点感应钎焊及控制

王 蕾<sup>1,2,3</sup>, 杨 辉<sup>1,2</sup>, 祁更新<sup>3</sup>, 樊先平<sup>1,2</sup>, 张玲洁<sup>1</sup>, 吴新合<sup>3</sup>

(1. 浙江大学 浙江加州国际纳米技术研究院, 浙江 杭州 310027)

(2. 浙江大学 材料科学与工程博士后科研流动站, 浙江 杭州 310027)

(3. 温州宏丰电工合金股份有限公司, 浙江 温州 325603)

**摘 要:** 求解了适用于电触点感应钎焊的电磁场及热场耦合方程, 获得了二维电触点感应钎焊的理论解, 并建立了电触点感应钎焊的有限元模型, 二者对比分析, 验证了有限元方法分析电触点感应钎焊的可行性。数值结果表明: 焊接区域的温度在靠近电触点边界的位置最高, 越靠近电触点中心位置的温度越低。线圈增加铁氧体后, 电触点中心位置与电触点边界位置的焊膏熔化情况更为接近, 一定程度上改善了焊接面温度的不均匀分布。另外, 线圈改进前后, 焊接时间均随着焊接电流的增大而减少。相同焊接电流参数下, 使用了缠绕有铁氧体的感应线圈只需花费更少的时间就可达到所需温升, 这明显提高了电触点组件的焊接效率。因此, 可通过在感应线圈中间增加铁氧体来改善感应钎焊温度不均匀分布, 以及缩短焊接时间, 从而提高电触点感应钎焊的焊接质量和焊接效率, 这对电触点材料的焊接有一定的指导意义。

**关键词:** 电触点; 感应钎焊; 铁氧体; 感应线圈; 焊接效率

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)S2-035-05

电触点是断路器、继电器等低压电器导电连通形成回路的关键元件<sup>[1]</sup>, 其焊接质量直接影响着低压电器的可靠性、稳定性、精密性。合理的焊接方法对于有效提高电触点焊接质量来说至关重要。

现阶段, 电触点产品广泛采用的焊接方法之一是高频感应钎焊。高频感应钎焊是一种高质量、高效率的焊接方法<sup>[2]</sup>, 具有加热快、可局部加热、热量大、温度易控制等特点。因此对高频感应钎焊工艺的研究, 具有广泛的应用前景。

高频感应钎焊本身是一个复杂的物理过程, 它涉及电、磁、热、相变、力学方面的综合知识, 代表该过程的偏微分方程难于求解。目前对感应线圈的设计大多根据经验公式进行计算<sup>[3]</sup>。随着计算机的迅速发展, 数值模拟技术已经成为复杂问题计算的有效工具。国内, 顾章平<sup>[4]</sup>应用有限元软件分析了电触点组件的感应钎焊温度场, 并分析了电流、频率、线圈匝数对电触点内产生涡流的影响。国外, C. Chaboudez<sup>[5]</sup>应用复矢量磁位势法计算了螺旋线圈感应加热不等截面工件的温度场分布, 该作者采用不均匀缠绕的螺旋线圈, 解决了不等截面的圆柱工件感应加热温度不均匀的问题, 但这种改进无法解决其他形状工件的感应加热温

度不均匀问题。

在此基础上, 我们通过增加铁氧体的方式来改进感应钎焊工艺。首先通过理论分析和数值模拟结果的对比, 验证了有限元方法数值模拟电触点感应钎焊的可行性, 然后用有限元方法数值分析线圈增加铁氧体前后电触点组件感应钎焊过程的温度分布, 分析了线圈增加铁氧体对电触点组件焊接质量和焊接效率的影响, 从而确定感应钎焊工艺的优化方案。这一方案可大大提高电触点产品制造厂家的产品生产能效, 并对行业内电接触材料的焊接有一定的指导意义。

## 1 感应钎焊理论

### 1.1 电触点感应钎焊原理

感应钎焊实质是利用电磁感应在工件内产生的涡流发热来实现电触点组件的焊接技术<sup>[6-11]</sup>, 如图 1 所示。感应线圈与被加热电触点组件不直接接触, 电触点组件置于线圈内, 当交变电流通过感应线圈时, 感应线圈内部和周围产生交变磁场, 在电磁感应作用下, 电触点组件被交变磁场的磁力线切割, 其内部产生涡流, 将电触点组件迅速加热, 实现焊接。

感应加热过程是电磁感应过程和热传导过程的综

收稿日期: 2017-07-25

基金项目: 浙江省科技计划项目 (2017C01051); 浙江省自然科学基金 (LQ17E010002)

作者简介: 王 蕾, 女, 1983 年生, 博士, 温州宏丰电工合金股份有限公司, 浙江 温州 325603, 电话: 0577-62876858, E-mail: wlsabrina@sohu.com

合体现, 这一过程中, 电磁感应过程起主导作用。热传导过程中所需要的能量是由电磁感应过程中所产生的涡流功率所提供。因此, 电磁场分布决定了温度场的分布, 从而影响电触点的焊接质量<sup>[3]</sup>。

### 1.2 电磁感应方程

通有交变电流的感应线圈内的工件, 其电磁场分布满足麦克斯韦方程组 (简称 Maxwell)。

我们假设被加热工件为无限长圆柱形工件, 忽略边缘效应, 并假设材料介质均匀、各项同性, 以及不考虑位移电流。假设磁场强度随时间的变化规律为:

$$\vec{H}(rt) = \vec{H}(r)e^{-i\omega t} \quad (1)$$

并考虑磁场分布的一维对称性, 取柱坐标, 有

$$\vec{H}(r) = H(r)\vec{\alpha}_z \quad (2)$$

式中,  $\vec{H}$  为磁场强度矢量, A/m;  $r$  为径向半径, m;  $t$  为时间, s;  $\omega$  为角频率, rad/s。

令  $k^2 = \omega\mu\sigma$ , 将式(1)、(2)代入 Maxwell 方程组, 可获得变形 Bessel 方程<sup>[12]</sup>:

$$\frac{d^2 H(r)}{d(\sqrt{ikr})^2} + \frac{1}{\sqrt{ikr}} \frac{dH(r)}{d(\sqrt{ikr})} + H(r) = 0 \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为磁导率, H/m;  $\sigma$  为电导率, S/m。

又因为  $\vec{B} = \mu\vec{H}$ ,  $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$ ,  $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ , 求解方程(3)得到

$$\vec{H}(r) = H_0 \frac{I_0(\sqrt{ikr})}{I_0(\sqrt{ikR})} \vec{\alpha}_z \quad (4)$$

$$\vec{E}(r) = E_0 \frac{I_1(\sqrt{ikr})}{I_1(\sqrt{ikR})} \vec{\alpha}_\theta \quad (5)$$

$$\vec{J}(r) = J_0 \frac{I_1(\sqrt{ikr})}{I_1(\sqrt{ikR})} \vec{\alpha}_\theta \quad (6)$$

式中,  $\vec{E}$  为电场强度矢量, V/m;  $\vec{j}$  为电流密度矢量, A/m<sup>2</sup>;  $R$  为工件半径, m;  $I_0(\sqrt{ikr})$  为第一类零阶变形 Bessel 函数;  $H_0$  为被加热工件表面的磁场强度值;  $E_0$  为工件表面的电场强度值;  $J_0$  为工件表面的涡流密度。

式(4)、(5)和(6)即为二维轴对称感应钎焊电触点组件内部的磁场、电场和涡流密度分布的理论解。其分



图 1 感应钎焊电触点组件

Fig.1 Induction brazing of electrical contact components

布均遵循相同的变化规律, 除和其本身的表面值有关外, 还和频率相关。中高频情况下,  $\omega$  很大时,  $k$  很大, 在靠近工件表面处,  $H$ 、 $E$ 、 $J$  均随  $r$  的减小而减小很快。当  $r=0$  时,  $I_0(0)=1$ ,  $I_1(0)=0$ , 此时  $H$ 、 $E$ 、 $J$  的值都趋于零。这说明, 在中高频感应钎焊中, 电磁场和涡流只分布在工件表面, 工件内部几乎没有, 这就是集肤效应。

### 1.3 热传导方程

在单位时间内, 物体内部任意单个微元体由于温度升高所需的热量等于与内部热源提供的热量与外部传入的热量之和。因此, 感应钎焊的瞬态温度场遵循如下热传导控制方程<sup>[13]</sup>:

$$\frac{\rho C_p}{k_T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_v}{k_T} \quad (7)$$

式中,  $T$  为温度, °C;  $\rho$  为密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_p$  为比热, J/(kg m<sup>3</sup>);  $k_T$  为热导率, W/(m °C);  $q_v$  为内热源强度, W/m<sup>3</sup>。

## 2 感应钎焊数值分析

### 2.1 有限元分析

电触点感应钎焊涉及电场、磁场、热场、热传导、对流等因素, 采用有限元方法对其焊接过程进行数值分析, 可综合考虑这些因素的相互关联和耦合作用, 还可以了解焊接过程每个时刻的电磁场、温度场变化情况。

采用基于有限元方法的 CAE 软件数值分析了二维轴对称电触点感应钎焊的电磁场分布, 分析过程如下。

对电触点组件进行建模, 为计算方便, 我们将电触点模型简化成二维轴对称, 将实际为 3 圈的感应线圈简化为 1 圈, 如图 2 所示。并且假定: 电触头与环境之间的传热以对流的方式传递热量; 线圈和空气为温度不变的理想状态; 不考虑固液相变对温度场的影响。各部分尺寸为: 银触点尺寸  $\Phi 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ , 钎焊层厚度 0.1 mm, 铜触桥厚度 2.5 mm。线圈铜管的外部尺寸  $\Phi 2.5 \text{ mm}$ , 线圈铜管内孔径  $\Phi 1.5 \text{ mm}$ , 线圈的径向直径为  $\Phi 16 \text{ mm}$ 。

划分 27249 个四边形网格, 并建立有限元模型, 如图 3 所示。

定义材料属性。选用的银触点材料为 AgCdO(12); 铜触桥材料为 H62; 焊膏为 Ag25CuP, 其熔化温度为 660~715 °C; 所用焊剂为 QJ102。并定义空气介质, 用以产生磁场。这些材料的物理性能见文献[14]。

焊机的焊接工艺参数见表 1, 有限元模型中加载的焊接电流为 600 A, 因为是在高频感应焊机焊接, 所以线圈中焊接电流是实际加热电流的 3 倍。

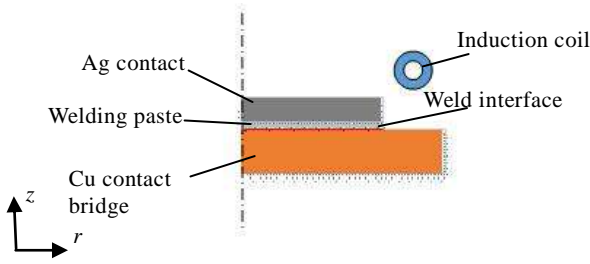


图 2 电触点组件的二维轴对称示意图

Fig.2 Two-dimensional axisymmetric graph of electric contact component

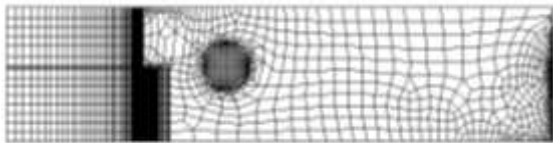


图 3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Brazing process parameters

Heating current/A	Heating time/s	Holding time/s	Holding current/A	Water cooling time/s	Brazing frequency/kHz
150~250	5~7	0.3~0.5	100~200	2.5	80

设定边界条件。电磁边界条件是远场外缘处磁势为零，工件中心施加磁力线平行边界。热场边界条件是热辐射边界条件<sup>[15]</sup>，银触点表面辐射系数为 0.02，铜触桥表面辐射系数为 0.6，焊膏表面辐射系数 0.68。环境温度为 25 ℃。

对比验证。我们在软件中对表征这些有限个小单元的偏微分方程进行数值计算，得到二维轴对称电触点组件的电磁场分布，并与 1.2 节的理论解进行比较，焊接面处径向磁场强度、涡流密度的分布如图 4、图 5 所示。

图 4、5 显示，数值结果与理论结果相吻合。这验证了有限元方法数值分析电触点感应钎焊过程的可行性。计算机数值模拟可成为工艺人员优化焊接加工工艺的一个重要手段。从图中还可看出，电磁场、涡流密度只分布在工件表面。

## 2.2 分析与讨论

从前文可知道，感应钎焊存在集肤效应，电磁场主要分布在工件表面附近的区域，工件中心几乎没有磁场分布。我们希望通过增强工件中心的电磁场来影响其温度分布，从而达到改善电触点焊接质量、焊接效率的目的。

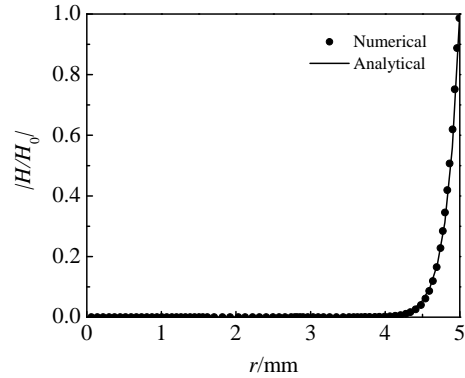


图 4 沿工件半径方向焊接面处的磁场强度分布

Fig.4 Distribution of magnetic field intensity along radius direction of the workpiece (magnetic field intensity in the figure is dimensionless)

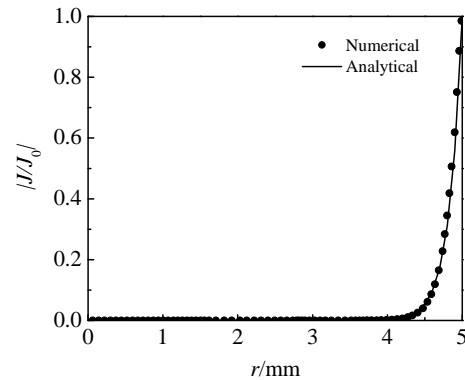


图 5 沿半径方向焊接面处的涡流密度分布

Fig.5 Distribution of eddy current density at the welding surface along radius direction. And eddy current density in the figure is dimensionless)

这里采用的方法是频率等其余工艺参数保持不变，仅改进线圈，在感应线圈中心位置增加铁氧体材料，如图 6 所示，线圈中间缠绕的柱状物体为铁氧体，线圈和铁氧体表面的白色物质为保护胶。对其进行数值分析，得到焊料熔化时电触点在焊接面处沿径向的温度分布（见图 7）。



图 6 常规感应线圈（未经过改进）和经改进的感应线圈

Fig.6 Induction coil without ferrite (a) and with ferrite (b)

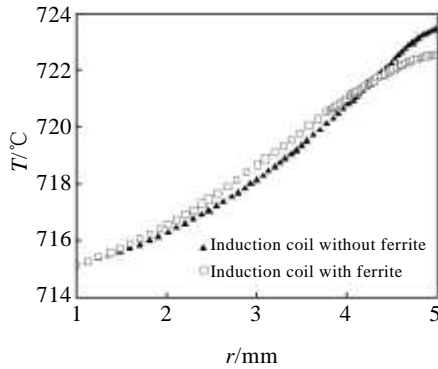


图 7 在焊接交界区域，温度随电触点径向半径的变化曲线  
Fig.7 Temperature variation with the radial radius of electrical contact at welding interface

表 2 线圈改进前后焊接电流与焊接时间的关系

Table 2 Relationship between brazing current and brazing time with the induction coil improved or not

Brazing current/A	Brazing time (without ferrite)/s	Brazing time (with ferrite)/s
450	10.50	7.35
600	5.82	4.02
750	3.75	2.61

从图 7 看出，焊接区域的温度在靠近电触点边界的位置最高，越靠近电触点中心位置的温度越低，具有显著的集肤效应。线圈增加铁氧体后，在焊接区域的温度随径向半径的变化趋势趋于平缓，这可使得电触点中心位置与电触点边界位置的焊膏熔化状况更为接近，有效提高了电触点的焊接质量。

线圈改进前后，焊膏达到熔化温度所需焊接时间与焊接电流的关系见表 2。表 2 表明，线圈改进前后，焊接时间均随着焊接电流的增大而减少。相同焊接电流参数下，使用了缠绕有铁氧体的感应线圈只需花费更少的时间就可达到所需温升。这也就是说，使用了缠绕有铁氧体的感应线圈来感应钎焊电触点组件，明显提高了电触点组件的焊接效率。

### 3 结论

1) 数值和理论结果对比，可看出计算机数值模拟高频感应钎焊电触点组件过程是可行的。

2) 感应钎焊电触点组件温度分布具有显著的集肤效应。焊接区域的温度在靠近电触点边界的位置最高，越靠近电触点中心位置的温度越低。线圈增加铁氧体后，电触点中心位置与电触点边界位置的焊膏熔化状况更为接近，有效提高了电触点的焊接质量。

3) 使用缠绕有铁氧体的感应线圈来感应钎焊电触点组件，缩短了焊接时间，从而提高了电触点组件的焊接效率，提高了企业产品能效，增强了企业竞争力。

### 参考文献 References

[1] Xin Xiaoqiang(刑小强), Pan Xide(潘希德), Gao Yubao(高玉保) *et al.* *Low Voltage Apparatus*(低压电器)[J], 2011(5): 14

[2] Xiao Bin(肖兵). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2009, 38(9): 155

[3] Davies J(戴维斯), Simpson P(辛普森). *Handbook of Induction Heating*(感应加热手册)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985: 416

[4] Gu Zhangpin(顾章平), Teng Zhijun(滕志君), Gao Yubao(高玉保) *et al.* *Low Voltage Apparatus*(低压电器)[J], 2015(10): 71

[5] Chaboudez C, Clain S, Glardon R *et al.* *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 1997, 33(1): 739

[6] Gu Xiaowen(顾晓文), Shi Wen(史文), Luo Juanjuan(罗娟娟). *Heat Treatment*(热处理)[J], 2009, 24(2): 60

[7] Chi Hui(迟辉), Zhang Wei(张伟), Zhao Weiwei(赵维巍) *et al.* *Metal Hotworking Technology*(热加工工艺)[J], 2007, 36(7): 20

[8] Luo Yunmeng(罗云萌). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2012

[9] Li Qilin(李奇林), Su Honghua(苏宏华), Xu Jiuhua(徐九华) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(12): 3250

[10] Xu Chao(徐超). *Thesis for Master* (硕士论文)[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2003

[11] Wang Xiaoxia(王小霞), Ding Yi(丁毅), Zhu Jing(朱婧) *et al.* *Welding and Joining*(焊接)[J], 2011(10): 59

[12] Liu Yin(刘颖). *Bessel Function*(圆柱函数)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1983

[13] Pan Zuowei(潘作为). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006

[14] Chen Lesheng(陈乐生), Wang Rong(王荣), Chen Xiao(陈晓) *et al.* *Electrical Engineering Materials*(电工材料)[J], 2010(1): 9

[15] Zhou Maoxiang(周茂祥). *Design Manual for Low Voltage Apparatus*(低压电器设计手册)[M]. Beijing: China Machine Press, 1992

## Analysis and Control on Induction Brazing of Electrical Contact

Wang Lei<sup>1,2,3</sup>, Yang Hui<sup>1,2</sup>, Qi Gengxin<sup>3</sup>, Fan Xianping<sup>1,2</sup>, Zhang Lingjie<sup>1</sup>, Wu Xinhe<sup>3</sup>

(1. Zhejiang-California International NanoSystems Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2. Post-Doctoral Research Station of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(3. Wenzhou Hongfeng Electrical Alloy Co. Ltd, Wenzhou 325603, China)

**Abstract:** Analytical solution was proposed for induction brazing of electrical contacts by solving coupled equations of electromagnetic field and thermal field. And a finite element model was presented in the paper to simulate induction brazing of electrical contact. The numerical results agree well with the analytical results. Therefore the feasibility of simulation analysis of induction brazing using finite element method is fully validated. Numerical results show that, the temperature near the boundary of electrical contacts is the highest in the brazing region. The closer to the center of brazing region, the lower the temperature. In addition, using induction coil wound with ferrite, the state of melting the solder near the center of electrical contact becomes more similar to the state near the boundary of electrical contact; accordingly nonuniform distribution of the temperature at brazing interface is improved to a certain extent. Furthermore, whether the induction coil is optimized or not, the brazing time all decreases with the increase of brazing current. And under the same brazing current, it costs less time to obtain the required temperature rise when using the coil wound with ferrite. This indicates that the use of ferrite to optimize induction coil will improve nonuniform temperature distribution of induction brazing, which will also save brazing time, thus improving brazing efficiency and brazing quality. This has certain instructive significance to the brazing of electrical contact material.

**Key words:** electrical contact; induction brazing; ferrite; induction coil; brazing efficiency

---

Corresponding author: Zhang Lingjie, Ph. D., Department of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, P. R. China, Tel: 0086-571-88206798, E-mail: zhanglingjie@zju.edu.cn