

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108158

# 铝管式油冷器横向磁通感应加热线圈研究

侯柏林<sup>1</sup> 袁熙<sup>2</sup> 王超<sup>3</sup> 苏峰华<sup>3</sup>

(1. 惠州城市职业学院 惠州 516025; 2. 佛山市南海蕾特汽车配件有限公司 佛山 528244;  
3. 华南理工大学 机械与汽车工程学院 广州 510640)

**摘要:** 为了实现铝管式油冷器的横向磁通感应加热技术(TFIH),并解决传统平面线圈存在的管端溶蚀和合格率低问题,设计了一种新型锥形线圈来替代传统平面线圈。通过 COMSOL 软件基于变物性条件进行电磁-热耦合仿真,分析了铝管式油冷器的温度分布、升温曲线、电流密度分布和焦耳热分布情况,并分析了锥角对加热效果的影响。结果表明,铝管式油冷器在新型锥形线圈下具有较好的温度分布,避免了管端溶蚀并且合格率在 95% 以上。使用温度传感器对管端温度进行监控,耦合仿真的相对误差在 4% 以内,结果表明耦合仿真具有一定的精度。此项研究可以指导工业设计及生产,为铝管式油冷器提供了 TFIH 线圈解决方案。

**关键词:** 铝管式油冷器;横向磁通感应加热;锥形线圈;变物性

**中图分类号:** TM551 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

## Research on transverse flux induction heating coils for aluminum tubular oil cooler

Hou Bolin<sup>1</sup> Yuan Xi<sup>2</sup> Wang Chao<sup>3</sup> Su Fenghua<sup>3</sup>

(1. City College of Huizhou, Huizhou 516025, China; 2. Foshan Nanhai Leite Automotive Parts Co., Ltd., Foshan 528244, China;  
3. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to realize the transverse flux induction heating (TFIH) of aluminum tubular oil cooler, and to solve the problem of the erosion of pipe end and low pass rate of the conventional plane coil, a new conical coil is designed to replace the conventional plane coil. The electromagnetic-thermal coupling simulation was carried out by COMSOL software based on variable physical properties, the temperature distribution, heating curve, current density distribution, joule heat distribution of aluminum tubular oil cooler and influences of conical angle on heating effect are analyzed. The results show that aluminum tubular oil cooler has a good temperature distribution under the new conical coil, avoiding the erosion of pipe end and the pass rate is above 95%. The pipe end temperature is monitored by temperature sensor, and the relative error of coupling simulation is less than 4%. The results show that the coupling simulation has a certain accuracy. This study can guide industrial design and production, and provide TFIH coil solutions for aluminum tubular oil cooler.

**Keywords:** aluminum tubular oil cooler; transverse flux induction heating; conical coil; variable physical properties

## 0 引言

高频感应加热技术(high-frequency induction heating, HFIH)具有成本低、易于实现自动化、安全性高和环保等优点,广泛应用于机械制造行业。区别于轴向磁通感应加热(longitudinal flux induction heating, LFIH), Baker<sup>[1]</sup>在 1950 年首次提出横向磁通感应加热(transverse flux induction heating, TFIH), TFIH 是放置在工件两侧的两组线圈对工件进行加热,其具有无功功率低并且不需围绕工

件等优势,后续研究者对此加热方式进行了研究。

闫朝辉等<sup>[2]</sup>对线圈结构、涡流分布与最终温度分布的关系进行了理论研究及数值仿真,结果表明带材表面的涡流分布可以近似为线圈结构在带材表面的投影,此现象可总结为线圈投影规律<sup>[3]</sup>。孙于等<sup>[4]</sup>提出了一种新型 TFIH 线圈结构,在保证效率的同时能够获得更为均匀的带材出口温度,为新型带材 TFIH 装置的制作提供了理论依据。郭春福<sup>[5]</sup>对比分析了矩形、菱形、圆弧形以及双层六边形线圈对带材的加热效果,得出双层六边形线圈加热时带材出

收稿日期:2021-10-21

口处表面的温度分布更均匀的结论。汪友华等<sup>[6]</sup>设计新型线圈对带材进行加热,温度分布均匀性和加热效率均有较大提升。梁利平等<sup>[7]</sup>对低功耗缩进式电磁流量传感器磁路结构优化设计增强相同励磁条件的感应电动势值。

Enokizono 等<sup>[8]</sup>考虑涡流对线圈的影响并基于材料变物性对钢材进行仿真分析,结果表明涡流对线圈影响和使用材料变物性非常重要。Drobenko 等<sup>[9]</sup>研究表明若忽略低碳钢电导率系数的温度依赖性,即在 300 °C 左右的温度下也会对仿真准确性产生较大影响。

刘文明<sup>[10]</sup>研究螺旋形、锥形、平面形和组合形对 MEMS 封装性能的影响,发现锥形线圈较适合器件级感应加热。潘俊<sup>[11]</sup>针对线圈结构和线圈与被加热面间的距离进行分析,结果表明感应加热温度场高温区域的形状与线圈形状相似。并且线圈与被加热面之间距离越小,加热温度幅值越大,但对温度分布基本无影响。Shih 等<sup>[12]</sup>使用 COMSOL 软件来仿真各种线圈结构对用于制造汽车扰流器的弯曲模板表面感应加热的影响,并提出一种多区域感应加热方法,线圈设计相对简单,可以对工件进行有效加热。与单区感应加热相比,曲面多区感应加热提高了加热速率和均匀性。张青雷等<sup>[13]</sup>针对曲轴感应加热后温度分布不均匀及形变不规则的问题,将矩形线圈改为弧形线圈的方法。使用顺序耦合法进行仿真,证实电磁感应加热过程中使用弧形线圈可使曲柄孔周围变形不均的问题得到改善。Kaiser 等<sup>[14]</sup>采用变直径螺旋线圈实现了更均匀的样品加热,结果表明样品温度梯度可以明显降低。Zhao 等<sup>[15]</sup>探讨了异步双频感应加热锥齿轮时,迭代加热次数对温度分布均匀性的影响。

黄晓龙等<sup>[16]</sup>为研究高频电磁感应电流对 LD-14 桥丝的影响,提出一种基于隧道磁阻效应的非接触式电火工品感应电流检测方法,有效对电火工品的安全性进行预测。

铝管式油冷器在汽车等散热系统中应用广泛,其焊接法兰和管体之间的焊接工艺原为火焰钎焊,而采用高频感应焊接则会增加生产效率并提高产品合格率和质量,张智超等<sup>[17]</sup>设计了一种中低频的交流电磁场检测模型,对漏磁及涡流效应在交流电磁场检测中的耦合机制进行了分析,并制作电磁检测装置进行实验验证。本文以上述分析方法和线圈结构设计为基础,提出一种新型横向磁通感应加热锥形线圈对铝管式油冷器进行高频感应焊接。在相同电流参数下,利用 COMSOL 软件基于材料变物性条件对传统平面线圈和新型锥形线圈进行电磁-热耦合分析,得出了铝管式油冷器各部位温度随加热时间的变化及发热功率的分布。耦合仿真和试验结果表明本文提出的新型锥形线圈结构适合铝管式油冷器的横向磁通感应加热,并能得到良好的温度分布,为铝管式油冷器的高频感应焊接方法提供了理论依据和解决方案。

## 1 物理模型及网格划分

铝管式油冷器 TFIH 示意图如图 1 所示,其中设备主要包括高频焊接电源、旋转夹具、控制台、温度传感器和线圈。其中高频焊接电源提供稳定 1 500 A、60 kHz 的交流电,线圈均为厚度 1 mm、外径 5 mm 的紫铜管。温度传感器的测量范围为 -50 °C ~ 1 200 °C,精度在 ±3 °C。铝管式油冷器在线圈加热下升温,从而达到焊接的效果。

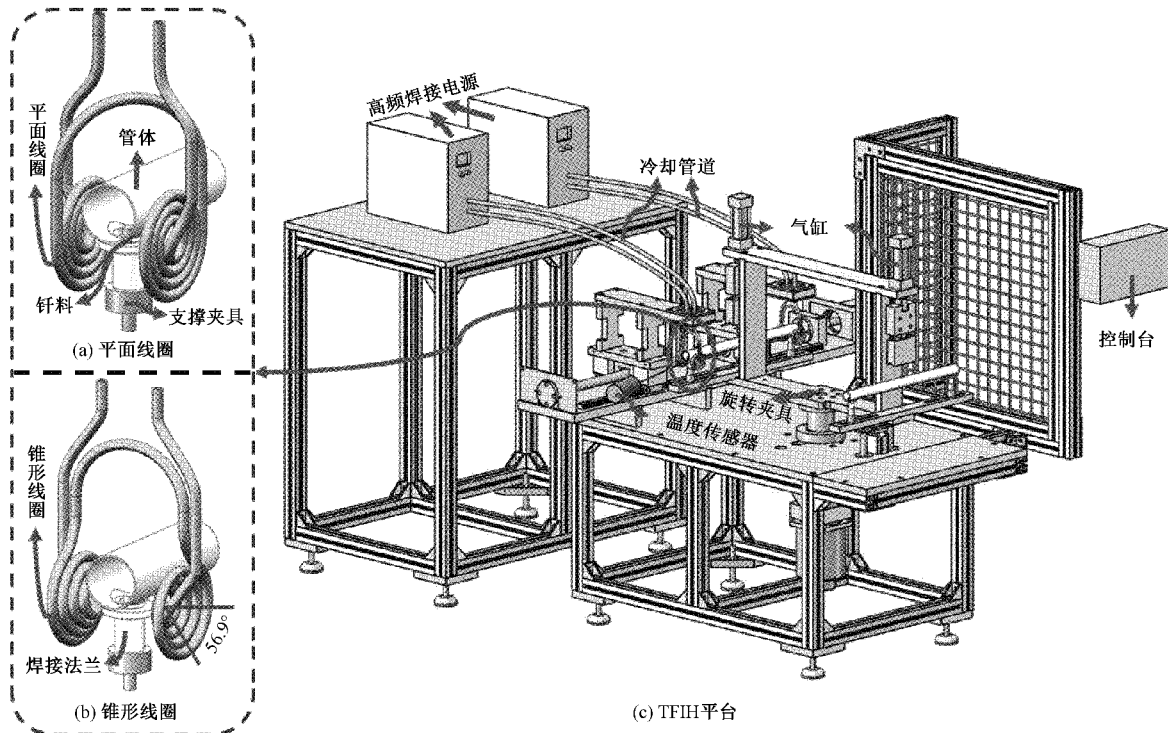


图 1 铝管式油冷器 TFIH 示意

仿真分析中,较高的网格质量是保证精度的基础,使用混合网格对模型进行划分。图2为模型的局部网格质量图,其中针对管体和线圈等规则体使用六面体结构性网格进行划分,而对于曲面连接部分则使用四面体网格进行划分。从图2可以看出大部分网格的质量在0.7以上,仅有少数网格质量在0.7以下。

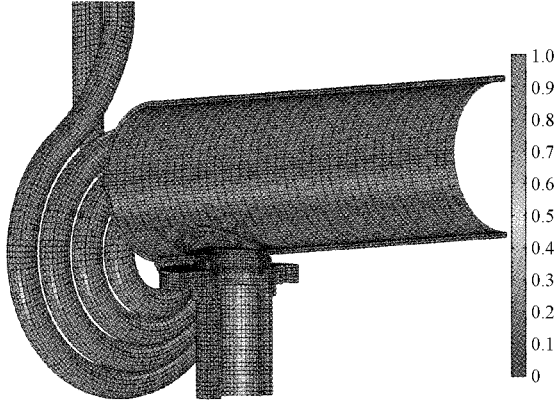


图2 局部网格质量图

## 2 电磁-热耦合分析

### 2.1 仿真数学模型

麦克斯韦方程组是解决电磁类问题的基础,频域-瞬态下的麦克斯韦方程组为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{B}$  为磁感应密度,  $\text{Wb}/\text{m}^2$ ;  $\mathbf{D}$  为电通量密度,  $\text{C}/\text{m}^2$ ;  $\rho_v$  为电荷体密度,  $\text{C}/\text{m}^3$ ;  $\mathbf{H}$  为磁场强度,  $\text{A}/\text{m}$ ;  $\mathbf{J}$  为传导电流密度,  $\text{A}/\text{m}^2$ ;  $\mathbf{E}$  为电场强度,  $\text{V}/\text{m}$ 。

在铝管式油冷器高频感应加热过程中,认为铝管式油冷器组件、线圈和周围空气介质具有各向同性,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_0$  为介电常数,  $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{M}^2)$ ;  $\epsilon_r$  为材料的相对介电常数;  $\mu_0$  为真空磁导率,  $4 \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$ ;  $\mu_r$  为材料的相对磁导率;  $\sigma$  为材料电导率,  $\text{S}/\text{m}$ ;  $\mathbf{J}_e$  为外部电流密度,  $\text{A}/\text{m}^2$ 。

直接求解麦克斯韦方程组较为困难,引入磁矢势  $\mathbf{A}$  即可解决,并且磁矢势  $\mathbf{A}$  与磁感应强度  $\mathbf{B}$  和电场强度  $\mathbf{E}$  的关系如式(3)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \\ \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \end{cases} \quad (3)$$

基于麦克斯韦方程,在频域中的磁矢势  $\mathbf{A}$  遵循如下关系。

线圈内:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} \right) + (j\omega\sigma - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r) \mathbf{A} = \mathbf{J}_e \quad (4)$$

空气中:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} \right) - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{A} = 0 \quad (5)$$

工件上:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \mathbf{A} \right) + (j\omega\sigma - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r) \mathbf{A} = 0 \quad (6)$$

涡流密度  $\mathbf{J}_{eddy}$  的计算公式为:

$$\mathbf{J}_{eddy} = j\omega\sigma \mathbf{A} \quad (7)$$

式中:  $\omega$  为角频率。在高频感应加热过程中,感生涡流作为内热源,热源强度如式(8)所示。

$$Q = \frac{|\mathbf{J}_{eddy}|^2}{\sigma} \quad (8)$$

式中:  $Q$  为单位体积焦耳热,  $\text{W}/\text{m}^3$ 。

通常,在研究高频感应加热产生的温度场时,最受关注的是铝管式油冷器上的温度分布情况。在该区域,温度场不仅服从热力学第一定律(能量守恒定律),而且还遵循热传导过程中的傅里叶定律。傅里叶公式可以表示为:

$$\nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $c$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\lambda$  为热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

在高频感应加热过程中,由于目标温度较高,因此应考虑铝管式油冷器与周围环境之间的热传递(对流和辐射),边界条件可以表示为:

$$Q_r = -\epsilon\sigma_0(T_{amb}^4 - T_0^4) \quad (10)$$

$$Q_c = -h\Delta T \quad (11)$$

式中:  $Q_r$  为辐射热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\epsilon$  为表面发射率;  $\sigma_0$  为黑体辐射常数,  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_{amb}$  为环境温度,  $\text{K}$ ;  $T_0$  为工件表面温度,  $\text{K}$ ;  $Q_c$  为对流热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $h$  为对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

### 2.2 材料物性

高频感应加热是利用材料本身感生涡流产生的焦耳热作为热源进行加热,若材料物理特性不准确,则仿真结果常常与真实情况相差甚远,所以在仿真前取得各部分材料的真实物理特性极为重要。工件中焊接法兰使用的是 G77 铝合金,管体用是 3003 铝合金,钎料为 4047 铝合金。各部分材料的固-液相线温度对仿真分析有重要意义,表 1 为各材料的固-液相线温度,以 4047 钎料的液相线  $585 \text{ }^\circ\text{C}$  为钎料熔化的温度。为了防止管端和焊接法兰熔蚀,将  $613 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $604 \text{ }^\circ\text{C}$  作为 3003 和 G77 铝合金的临界温度点。

图 3(a)和(b)为 3003 和 G77 铝合金电导率和热导率的变化,从图中可以看出两者的电导率和热导率均随温度增加而增加,但呈非线性变化。两者的电导率在高温时比

表 1 材料固-液相线温度

材料	固相线/°C	液相线/°C
3003	643	654
G77	634	675
4047	577	585

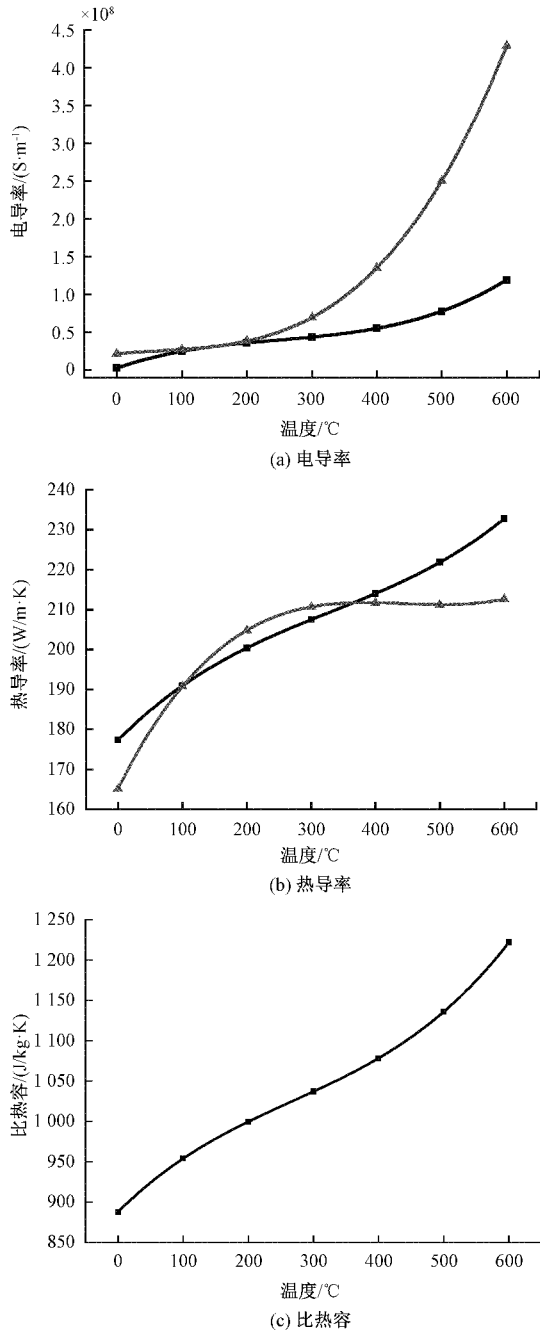


图 3 材料物性性能

在低温时性能大一个数量级,并且温度增加会使热源强度逐渐减小。由此看出,确定材料物性对温度的依赖性对仿真精度至关重要。图 3(c)为两者比热容的变化,经数据对

比得出两者的比热容性能完全相同,故图中仅有一条曲线。并且比热容随温度增加而增加,导致在相同的热源强度下,高温时材料的升温速度较慢。各部分材料采用非线性物理特性进行计算,提高仿真的精度。

2.3 仿真假设

使用 COMSOL 软件进行电磁-热耦合仿真时,需要进行如下合理假设:

- 1)铜管内通有冷却液,温度变化不大,故固体传热中不考虑铜管以减少仿真时间。并且假设铜管在焊接的过程中温度不变,一直保持 20 °C。
- 2)材料的电导率、热导率和比热容随温度变化而变化,密度和磁导率为常数。
- 3)考虑自然对流与对环境的热辐射,并且自然对流换热系数为 6 W/(m² · K);工件表面的发射率为 0.15。
- 4)材料达到熔点时在仿真处理上仍可继续升温,不设置固液相转变温度。

2.4 仿真分析流程

针对电磁场瞬态问题,根据已知的边界条件求解麦克斯韦方程组,同时进行电磁-热的耦合仿真。分析流程如图 4 所示,首先建立合理模型并使用混合网格进行网格划分,保证一定的网格质量。在线圈几何分析中,由于其使用资源较少,则使用全耦合求解方法和直接求解器对线圈内的电流密度分布进行计算。在电磁场和固体传热分析中,由于其网格数量多较难收敛,则采用分离式求解方法和迭代求解器以加快收敛速度,其中相对容差设置为 0.05 以保证足够的精度。仿真时每隔 0.1 s 读取一次温度场结果,根据读取的温度场结果计算材料的物性参数,进入下一步耦合计算。当仿真时间达到预设值时,则终止计算并输出结果。

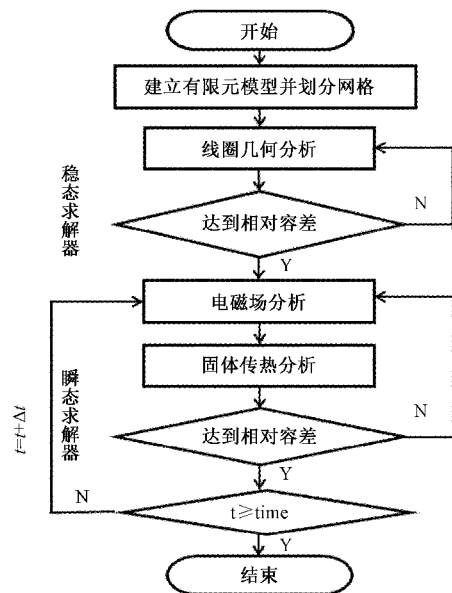


图 4 电磁-热耦合仿真流程

### 3 实验结果

#### 3.1 传统线圈

传统线圈为图1(a)所示的平面线圈,图5(a)为平面线圈在7.0 s时的温度分布云图。图中最高温度在管端偏下位置为643.8℃,此时已经高于管端的临界温度,会产生图6(a)所示的管端熔蚀现象。但是焊接法兰的温度为522℃,在此线圈加热下焊接法兰不易产生熔蚀。图5(b)为各个部位的升温曲线,管端温度和试验温度的最大误差仅有4%,说明耦合仿真具有较高的精度。从图中可以看出,管端的温度与其他部分相差较大,说明平面线圈加热时各部位温度分布不均匀。并且各个部位的升温速度先大后小,因为随着温度的升高,材料的电导率急剧增加导致发热功率减小。同时由于材料的比热容随温度增加而增加,在发热功率降低的情况下会进一步降低升温速度。

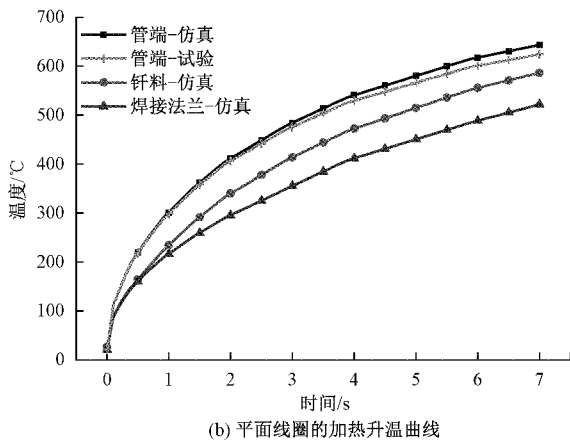
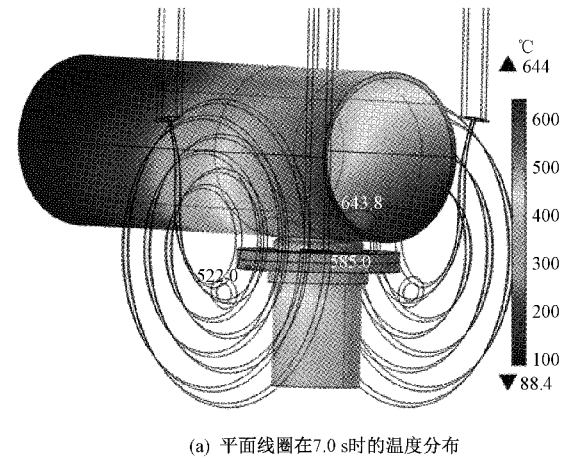
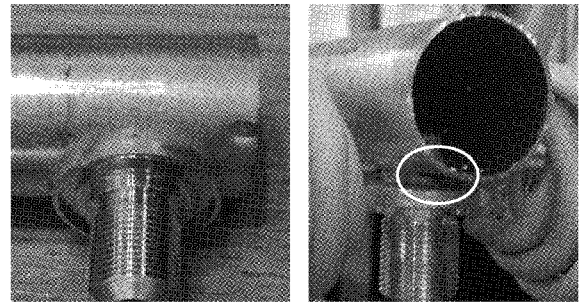


图5 平面线圈的温度分布及升温曲线

#### 3.2 新型线圈

新型线圈为具有一定锥度的线圈,以图1(b)所示锥角为56.9°的线圈为例,对铝管式油冷器进行TFIH焊接仿真分析。图7(a)为56.9°锥形线圈在15.5 s时的温度分布云图,此时管端仅为595.6℃,焊接法兰的温度为578.2℃,



(a) 钎料熔化管端熔蚀 (b) 钎料熔化

图6 焊接试验图

并且各自的温度均在临界温度以下。使用此结构线圈进行加热时,焊接时间为15.5 s,并且产品合格率在95%以上。相对于平面线圈,56.9°锥形线圈的外圈距离管端较远,因为平面线圈距离管端较近也是造成管端熔蚀的一大原因,而56.9°锥形线圈的喇叭状结构则避免了此种缺陷,并且56.9°锥形线圈加热时工件具有更均匀的温度分布。然而由于锥形线圈的外圈远离铝管式油冷器,造成加热功率降低,但是焊接时间仍处在20 s以内(火焰钎焊的焊接时间一般为30~60 s)。相对于平面线圈,此种锥形线圈结构的焊接效果取得了较大的进步。

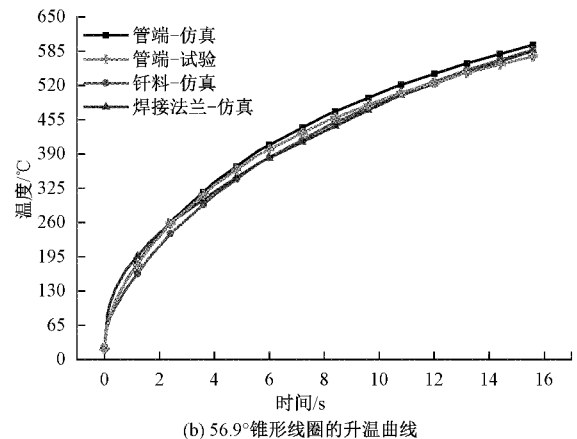
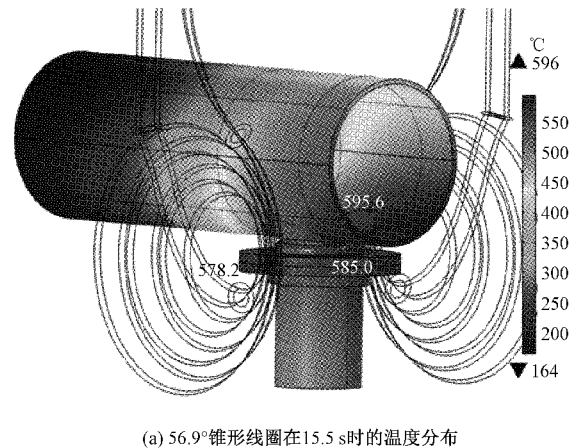


图7 56.9°锥形线圈的温度分布及升温曲线

56.9°锥形线圈加热时各部位的升温曲线如图 7(b)所示,虽然温度最高的部位仍是管端偏下位置,并且其升温速度也是先大后小。但是可以看出各部位的温度相差不大,避免了管端熔蚀现象。使用红外线高温测温仪对管端温度进行监测,仿真升温数据与试验数据的相对误差仍在 4%以内。

图 8(a)和(b)为 56.9°锥形线圈加热时的电流密度和焦耳热自然对数分布图,从图 8(a)中可以看出,电流密度分布符合线圈投影规律,呈现圆形,导致焊接法兰和管端位置的特定位置电流密度最大。又因为电流从焊接法兰流向管体时必须经过钎料与管体的接触位置,导致该处电流密度较大。考虑到焦耳热自然对数分布云图的显示问题,图 8(b)是数值为 6.5~10.9 的分布情况图。从图中可以看出,焦耳热最大处依然对应的是电流密度最大和温度最高的 3 个位置,说明这 3 个位置的发热量最大。

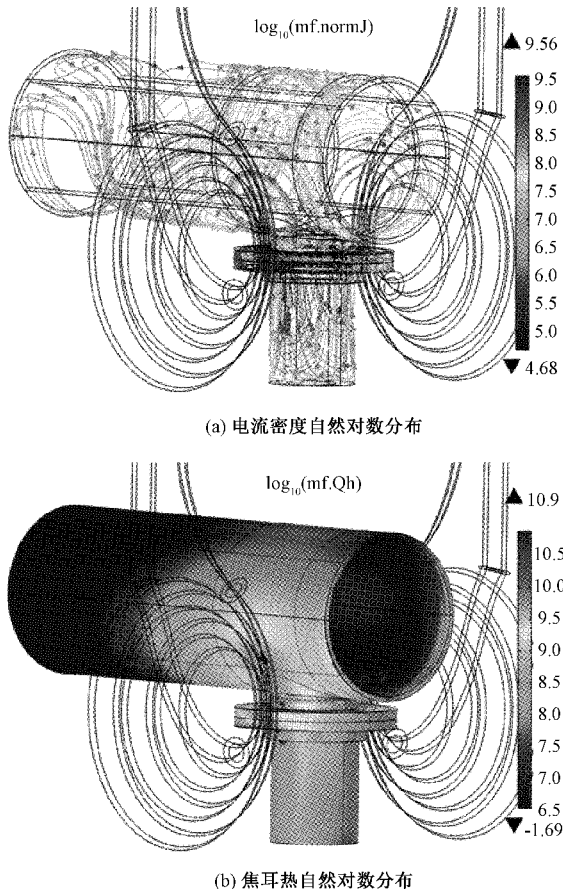


图 8 56.9°锥形线圈在 15.5 s 时的云图分布

图 6(b)为钎料开始熔化的现场图,钎料从与管端接触的位置开始熔化并蔓延整个钎料,实际过程少于 1 s。由图 5(a)和图 7(a)可以看出,无论是平面线圈还是 56.9°锥形线圈,钎料的温度最高点均在钎料与外管接触位置。区别在于,平面线圈加热时钎料的温度分布不均匀,最低温度为 482℃。而 56.9°锥形线圈加热时钎料的温度分布相

对均匀,最低温度为 543.9℃。对比结果说明 56.9°锥形线圈的加热效果更好,钎料温度分布更均匀,有利于改善焊接效果。

### 3.3 锥角分析

锥形线圈的加热效果优于平面线圈,需要对锥角进行分析以得出最优的加热效果。根据不同的螺距确定不同的锥角,分析不同锥角达到钎料熔化温度的时间和各部分的易熔蚀程度来确定最优的锥角。表 2 为不同锥角的加热效果,从表 2 中可以看出,当锥角增大时,焊接时间减少、焊接法兰温度减小但是管端温度增加。综合考虑温度大小和焊接时间,当锥角为 56.9°时各部位温度均在临界温度以下,并且具有较短的焊接时间。

表 2 不同锥角的加热效果

螺距/ mm	锥角/ (°)	焊接 时间/s	钎料/ ℃	管端/ ℃	焊接 法兰/℃
0	90.0	7.0	585.0	643.8	520.7
2	68.7	9.0	585.0	619.2	558.3
3	56.9	15.5	585.0	594.9	582.5
4	43.3	31.2	585.0	581.3	598.8

## 4 结 论

本文填补了工业上铝管式油冷器使用 TFIH 技术的空白,为相关工业生产起到指导作用。本文采用相同电流参数对铝管式油冷器进行 TFIH 焊接,分析平面线圈与新型锥形线圈加热效果的区别,通过采用变物性为基础的 COMSOL 软件进行仿真,和实验升温曲线进行对比,其相对误差仅有 4%,表明该仿真方法具有可靠的精度,可以指导工业设计和生产。本文采用新型锥形线圈替代传统平面线圈对管式油冷器进行 TFIH,结果表明新型锥形线圈结构能避免管端的溶蚀,并且随着锥度的增加,焊接时间减少、焊接法兰的温度减小但是管端的温度增加。通过实验结果表明使用新型锥形线圈进行横向磁通感应加热,铝管式油冷器的温度分布符合要求,并且 56.9°为最佳的锥角。

### 参考文献

- [1] BAKER R M. Transverse flux induction heating[J]. Electrical Engineering, 1950, 69(10): 922-924.
- [2] 闫朝辉,汪友华,刘成成,等. 横向磁通感应加热激励参数对带材温度的影响及加热器优化[J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 87-94.
- [3] 李奇林. 超高频连续感应钎焊高速砂轮[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [4] 孙于,汪友华,杨晓光,等. 新型横向磁通感应加热线圈[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 85-90.
- [5] 郭春福. 横向磁通感应加热带材温度场的计算与分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.

- [6] 汪友华,吴建成,李宾,等.新型带材横向磁通感应加热器设计与相关激励参数优选[J].电工技术学报,2020,35(4):745-757.
- [7] 梁利平,葛玉石,徐科军,等.低功耗缩进式电磁流量传感器磁路结构优化设计[J].电子测量与仪器学报,2018,32(12):26-33.
- [8] ENOKIZONO M, TANABE H. Numerical analysis of high-frequency induction heating including temperature dependence of material characteristics [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(4): 2438-2444.
- [9] DROBENKO B, HACHKEVYCH O, KOURNYTS'KYI T. A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2007, 50(3/4): 616-624.
- [10] 刘文明.感应局部加热封装技术及其应用研究[D].武汉:华中科技大学,2010.
- [11] 潘俊.发动机缸盖感应加热线圈设计方法研究[D].杭州:浙江大学,2015.
- [12] SHIH S Y, NIAN S C, HUANG M S. Comparison between single- and multiple-zone induction heating of largely curved mold surfaces [J]. International Communications in Heat & Mass Transfer, 2016, 75: 24-35.
- [13] 张青雷,龙鑫涛,段建国.船用曲轴红套过程中线圈的结构改进及位置影响研究[J].现代制造工程,2019(5): 91-96,103.
- [14] KAISER D, TORRES-VELASQUEZ D, DIETRICH S, et al. Design, fabrication and validation of an improved coil for induction dilatometry [J]. Thermochimica Acta, 2020, 689: 178612.
- [15] ZHAO Y Q, HAN Y, XIAO Y. An asynchronous dual-frequency induction heating process for bevel gears [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 169: 114981.
- [16] 黄晓龙,张鹏,王耀利.桥丝式火工品安全感应电流测量方法研究[J].国外电子测量技术,2021,40(1):5-8.
- [17] 张智超,沈常宇,朱周洪,等.漏磁结合涡流的非铁磁性金属材料探伤研究[J].仪器仪表学报,2021,42(4): 150-159.

### 作者简介

侯柏林,硕士研究生,副教授,主要研究方向为感应加热、机电控制。

E-mail:houbolin@tm.hzc.edu.cn

袁熙,硕士,高级工程师,主要研究方向为感应加热、表面技术。

E-mail:359105881@qq.com

王超,硕士研究生,主要研究方向为感应加热、摩擦学。

E-mail:lhsu@scut.edu.cn

苏峰华,博士研究生,教授,博士生导师,主要研究方向为感应加热、摩擦学及表面技术。

E-mail:lhsu@scut.edu.cn