

管路组件高频感应钎焊过程的有限元分析

欧阳自鹏¹ 成群林¹ 姜 勇¹ 胡佩佩¹ 王学远¹ 陆燕琼¹ 沈浩然²

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 2. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245)



摘要: 建立了导管高频感应钎焊过程的有限元分析模型, 分析了不锈钢导管的高频感应钎焊过程中的温度场并与试验结果进行了对比, 仿真结果和试验结果基本吻合。在此基础上, 研究了接头形式、感应电参数(电流频率、电流密度)对钎焊过程的影响。结果表明, 接头的体积越大, 升温效率越低。随电流频率和电流密度的增加, 钎料熔化所需的时间逐渐减少。另外, 采用较高的电流频率和电流密度能有效降低接头形式对钎焊过程的影响。

关键词: 高频感应钎焊; 有限元; 不锈钢; 管路组件

Finite Element Analysis on High Frequency Induction Brazing of Pipeline Components

Ouyang Zipeng¹ Cheng Qunlin¹ Jiang Yong¹ Hu Peipei¹ Wang Xueyuan¹ Lu Yanqiong¹ Shen Haoran²

(1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600;

2. Shanghai Aerospace Equipments Manufacturer, Shanghai 200245)

Abstract: A FEM model on high frequency induction brazing process of the pipeline components was developed. The temperature field in the pipeline components for induction brazing process was simulated and compared with the experiment results. Based on the model, the effects of the joint shape and the induced current parameters on the brazing process were investigated. The results show that, as the volume of the joint increased, the heating time would be longer. The time of the solder melting reduced as the frequency and the density of the current increased. Moreover, the effects of the joint shape on the brazing process could be effectively reduced by employing high current frequency and high current density.

Key words: high frequency induction brazing; finite element method; stainless steel; pipeline components

1 引言

随着航天事业的蓬勃发展, 细管结构被广泛用于航天产品的关键部件上。细管结构的连接问题也逐渐被重视, 某航天产品中的管路组件结构如图1所示。生产过程中接头A、接头B通过搭接角焊缝与中间的导管相连接。

管路组件环缝焊接质量直接影响管路组件的气密性, 感应钎焊是一种常见的用于细管连接的方法^[1, 2]。由于钎焊过程中焊缝周围有缠绕软式感应线圈, 难以直接观测焊接区域的温度和液态钎料的流动情况。计算机技术和大批商业软件的迅猛发展使得人们可以对感应加热过程进行较为精确的计算和预测, 由于数值模拟可对焊接过程中的热过程、电磁感应过程进行仿真, 因而在科学研究得到广泛应用^[3~5]。但感应钎焊过程同时涉及到传热学、材料学、电磁学等多方面的复杂理论, 其中的电、磁、热、材料相变之间的相互耦合作用至今仍难以得到完整而精确的描

作者简介: 欧阳自鹏(1987-), 硕士, 材料加工工程专业; 研究方向: 焊接过程的模拟仿真研究。

收稿日期: 2014-01-23

述^[6, 7]。目前国内外关于细管高频感应钎焊的仿真研究还十分有限。大部分的研究在分析过程中认为线圈和空气为温度不变的理想状态,忽略了线圈与工件之间的热传导。事实上,在感应钎焊过程中,线圈及其周围的空气温度会急剧上升,同时,空气的导热作用不容忽视。

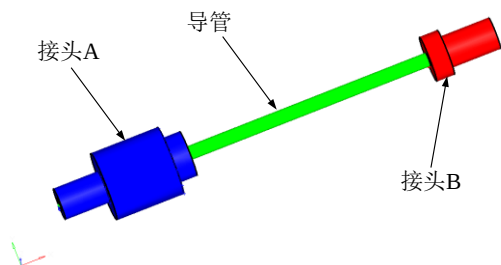


图1 管路组件几何模型和结构尺寸

本文充分考虑了感应钎焊过程中的空气导热作用及辐射作用,建立了管路组件感应钎焊过程的模型,分析了管路组件钎焊过程中内部温度的分布状况,以及温度随时间的变化规律。得到了钎焊接头形式、高频感应电参数(电流、频率)与钎焊时间之间的关系。对确保管路组件感应加热温度的均匀性具有重要意义,同时可为高频感应钎焊工艺参数的优化提供参考依据。

2 管路组件钎焊过程数学模型

感应钎焊过程是电磁场感生涡流并产生焦耳热过程和传热过程的耦合,其中电磁场是钎焊过程中升温的主要来源,可由一组麦克斯韦方程组描述,麦克斯韦方程组实际上由高斯电通定律、安培环路定律、高斯磁通定律和法拉第电磁感应定律四个定律组成。电磁场基本定律在场域连续时亦可用微分形式表示,如式(1)。

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot D &= \rho_0 \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times H &= J_0 + \frac{\partial B}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: H ——感应磁场的强度, A/m ; J_0 ——感应过程中穿过线圈的电流密度, A/m^2 ; D ——感应线圈

的电位移, C/m^2 ; E ——线圈中的电流强度, V/m ; B ——线圈中的磁通密度, Wb/m^2 ; ρ_0 ——电荷密度, C/m^3 。在感应钎焊过程时,认为管路组件、线圈及其周围空气等介质具备各向同性,见式(2)。

$$\left. \begin{aligned} D &= \varepsilon_0 \varepsilon_r E \\ B &= \mu_0 \mu_r H \\ J_0 &= \gamma E \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: μ_0 ——真空磁导率, H/m ; μ_r ——材料的相对磁导率, H/m ; $\varepsilon_0, \varepsilon_r$ ——介电常数; γ ——材料电导率, S/m 。麦克斯韦方程组难以直接求解,将矢量磁势 A 和标量电势 φ 引入即可解决。其中矢量磁势 A 与磁通密度的关系见式(3)及库仑规范,式(4)。

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

$$\nabla \times A = 0 \quad (4)$$

对于电导率为恒定值的情况,可得标量电势满足 $\nabla^2 \varphi = 0$; 在交界上满足 $\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$ 。因此仅用矢量磁势 A 就可以确定整个区域的场量,式(5)。

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = -j\omega \gamma A + J_s \quad (5)$$

其中, J_s ——源电流密度矢量,在感应加热过程中,感生涡流作为内热源其强度见式(6)。

$$q_v = \gamma \omega^2 |A|^2 \quad (6)$$

根据能量守恒和傅立叶导热定律,假定材料导热各向同性,则钎焊过程中控制温度分布和热流传导的能量平衡方程为式(7)。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q_v \quad (7)$$

式中: q_v ——内生热源的强度; ρ ——材料密度; λ ——材料的导热系数; c ——材料比热容; T ——温度; t ——感应加热时间。导管钎焊中电磁场和温度场的耦合关系可以通过联立式(6)、式(7)确定。

钎焊过程中工件与周围环境存在对流换热和辐射换热,表示为式(8)。

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = -h_c (T - T_0) - k_b \cdot c_s (T^4 - T_0^4) \quad (8)$$

式中: h_c ——对流换热系数; T_0 ——环境温度; c_s ——黑度系数; k_b ——玻尔兹曼常数。

3 感应钎焊仿真模型的建立

3.1 模型的建立及有限元网格划分

感应钎焊过程涉及材料物理性能的非线性变化及电磁-热场的双向耦合,问题较为复杂,需要对感应钎焊过程中的条件进行合理的简化与假设。

a. 考虑比热容、热导率随温度的变化,假设材料的密度、磁导率为常数。

b. 忽略钎料流动的影响,固相不运动。

c. 焊接开始前,工件及周围环境的温度均为 20°C 。

由于管路组件为轴对称零件,所施加的载荷也都呈轴对称分布,因此,以管路组件截面的一半为研究对象,提高计算效率。同时由于感应线圈的横截面积较小,为 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$,因而可将感应线圈作为实心线圈考虑。另外,考虑实际钎焊过程中的漏磁现象,工件周围的部分空气在建模时不能忽略。图2为简化后的管路组件钎焊模型。

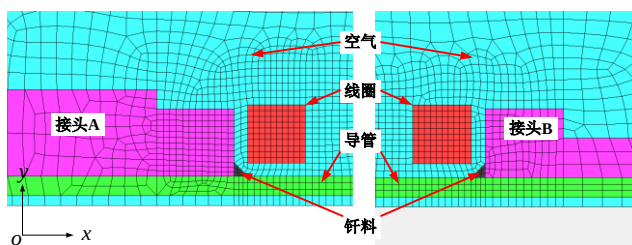


图2 管路组件钎焊模型网格划分

图2中网格密集区为管路组件的主要受热区域,感生涡流在该区域的变化剧烈,网格由工件外层向工件内和近工件的空气区逐渐增大。划分完成后单元总数为7680,节点数为7845,部分区域采用了手工过渡以获得质量较好的网格。

3.2 材料物性参数

金属材料的物理性能参数都随温度的变化呈非线性变化,在实际感应钎焊过程中,材料温度变化非常剧烈。管路组件导管和接头的材料为0Cr19Ni9,采用BAg45CuZn银基钎料作为钎焊材料,假设材料为各向同性,模拟计算所需要用到的材料物理参数见文献[8]。

3.3 边界条件

a. 热边界条件

整个模型采用总的换热系数模拟对流和辐射换热。

b. 载荷处理

线圈截面是尺寸 $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ 的实心线圈,由于漆包线的半径远远小于电流的渗透深度,可以认为感应线圈中的电流是均匀分布的^[6]。

c. 电磁边界条件

假设电流在线圈横截面上分布均匀,电流强度与线圈内测横截面积之比即为电流密度。同时假设无限远处的磁势为零,不考虑磁力线的逸散。

4 结果及分析

4.1 计算结果及验证

通过对所建立的模型进行求解计算,得到管路组件在钎焊1min时间内的温度场变化曲线。同时,采用与计算参数相同的工艺参数进行了管路组件高频感应钎焊试验。在焊接过程中,采用美国Raytek公司生产的MR1S型红外线测温仪测量工件表面温度,得到了钎焊过程中钎料表面温度随时间的变化曲线,将温度测量值与模拟值对比,如图3所示。

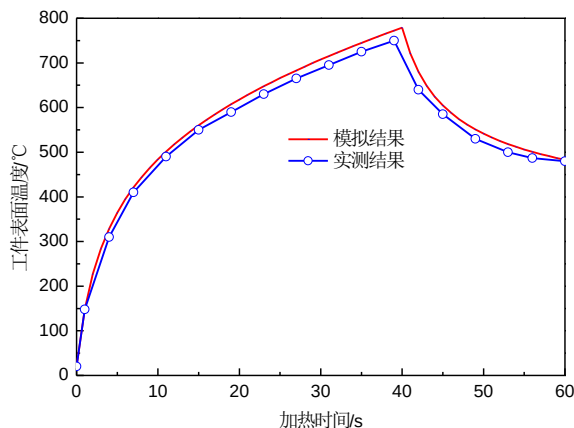


图3 钎料表面温度试验测量及验证

由图3可以看出测量值比模拟值略小,其原因是在实际焊接过程中,由于银基钎料的润湿性能和铺展性能较好,与接头及导管均为圆滑过渡,尖角效应不太明显,涡流产生的热量也比模拟值小。由此可见,模拟值能够比较真实地反映导管接头焊接区域温度场的分布。

4.2 管路组件钎焊过程中的温度场

首先考察管路组件两端钎焊过程中的温度变化趋势,利用同种线圈对焊缝A和焊缝B进行加热,在线圈中加载频率为 40kHz ,电流密度峰值为

$1.0 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 的正弦交变电流。对接头A和接头B加热后的温度场分布进行考察，如图4所示。提取焊缝表面的升温曲线如图5所示。

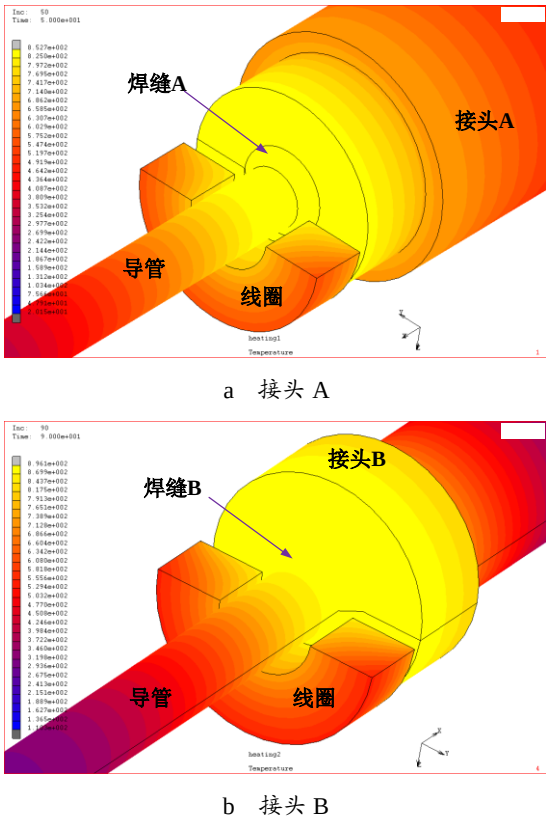


图 4 管路组件表面温度分布云图

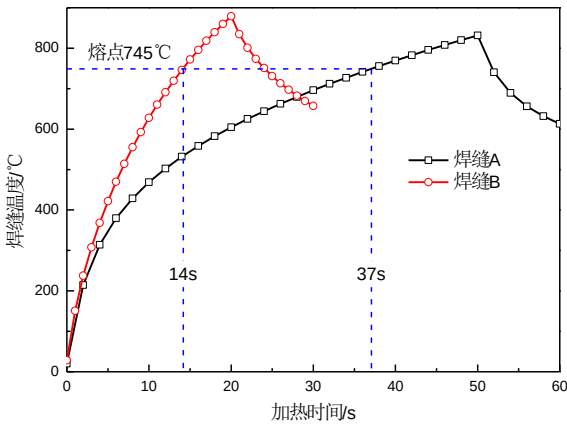


图 5 管路组件两端焊缝表面升温曲线

由图4可以看出，加热后导管的最大温度分布在焊缝区域，向接头和导管处逐渐降低。0Cr19Ni9不锈钢的熔点为1538℃，因而将钎焊温度选择为750~800℃比较合适。由图5可知，将焊缝A和焊缝B的钎料加热至熔化温度（BAg45CuZn的熔点约为745℃）

分别需要14s和37s，由于两条焊缝钎料的填充量和感应钎焊所采用的参数基本相同，因而推测其升温速度的差别主要由接头形式引起。

4.3 接头形式对钎焊过程的影响

为了考察管路组件表面温度的分布情况，在管路组件两端的接头处，由焊缝向两侧表面指定温度采集路径P1（由a点到b点）、P2（由a'点到b'点）见图6，则可得到两端接头沿该路径的温度分布，如图7所示。

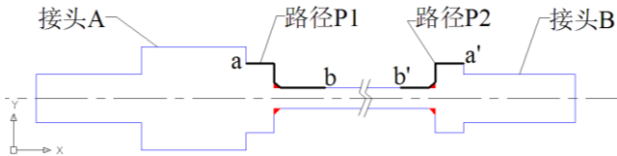
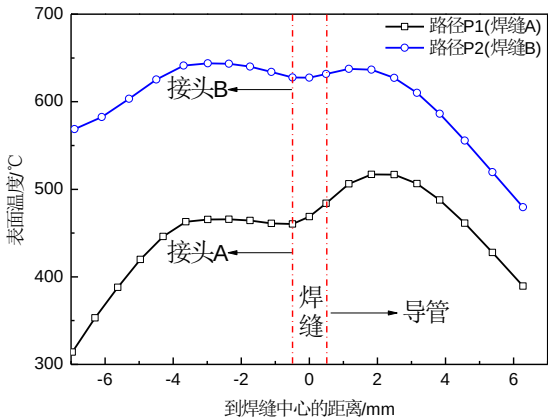
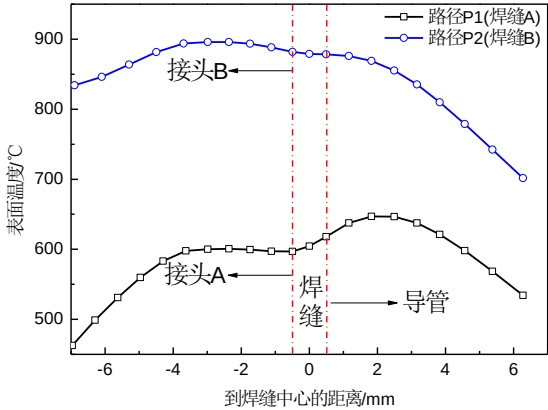


图 6 管路组件表面温度采集路径



a 加热时间 10s



b 加热时间 20s

图 7 管路组件接头表面温度分布曲线

由图7可知，在同样的焊接参数下加热相同时间，焊缝A的温度明显低于焊缝B。同时，接头A升温速度慢于中间导管，接头B则正好相反。分析其原因，高

频感应加热所产生的热量主要有四个去向:

$$Q_{\text{总}} = Q_{\text{钎料}} + Q_{\text{空气}} + Q_{\text{导管}} + Q_{\text{接头}} \quad (9)$$

其中, 向空气和导管中的热量传递 $Q_{\text{空气}}$ 、 $Q_{\text{导管}}$ 基本相同, 而接头A的体积明显大于接头B, 所以接头A产生的热传导效应也比接头B大得多, 热量散失较为严重, 因而焊缝A的升温速度慢得多。

4.4 感应加热频率及电流密度对钎焊过程的影响

为了进一步考察感应加热频率和电流密度对钎焊过程的影响, 分别计算了电流频率30~50kHz、电流密度 $0.8 \times 10^8 \sim 1.2 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 下钎料达到熔化温度所需要的时间, 如图8、图9所示。

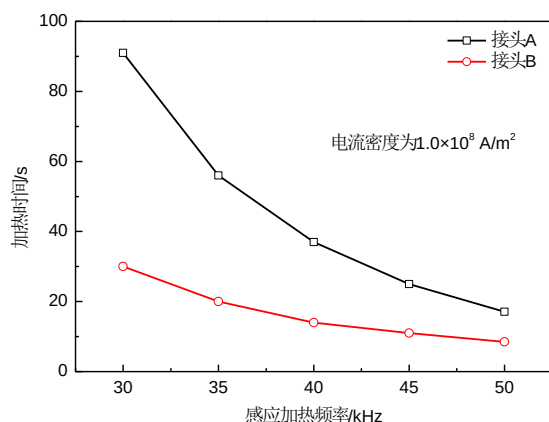


图8 不同频率下加热时间的变化趋势曲线

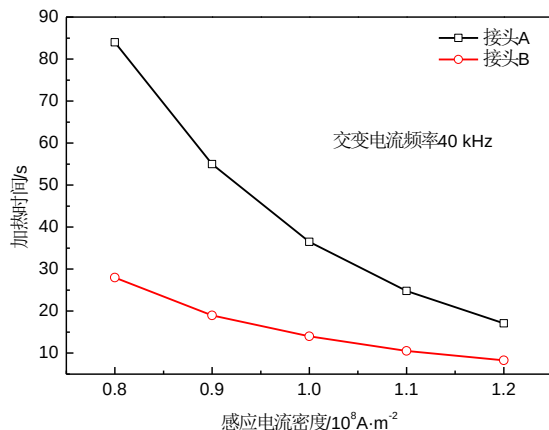


图9 不同电流密度下加热时间的变化趋势曲线

由图8可以得出, 随频率增加, 将钎料加热到熔点温度所需的时间逐渐减少。当电流频率为30kHz时, 加热接头A所需的时间为接头B的3倍, 当电流频率为50kHz时, 加热接头A所需的时间为接头B的2倍, 说

明随着电流频率的增加, 接头形式对加热时间的影响程度逐渐减小。由图9可以得出, 当电流密度从 $0.8 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 增加至 $1.2 \times 10^8 \text{ A/m}^2$ 时, 加热接头A和接头B所需的时间比从3降为2.1。以上结果说明, 采用较高的电流频率和电流密度能有效克服接头形式对钎焊过程的影响。

5 结束语

a. 建立了管路组件高频感应钎焊过程的模型并计算了焊接过程中的温度场, 通过与实验对比, 验证了所建立模型的准确性。为进一步研究感应钎焊过程提供了理论依据。

b. 讨论了接头的结构形式对高频感应钎焊升温的影响, 接头体积越大, 导热性能越好, 感应钎焊所需要的升温时间越久。

c. 随电流频率和电流密度的增加, 将钎料加热到熔点温度所需的时间逐渐减少。采用较高的电流频率和电流密度能有效降低接头形式对钎焊过程的影响。

参考文献

- 贾志华, 王轶, 马光, 等. 不锈钢毛细管的真空钎焊研究[J]. 热加工工艺, 2011, 40(23): 180~184
- 邱惠中. 先进钎焊技术在航天器上的应用[J]. 宇航材料工艺, 2000(3): 11~13, 37
- 徐艳利, 魏艳红, 董志波, 等. 不同软件模拟不锈钢 GTAW 温度场结果的比较[J]. 焊接学报, 2006, 27(1): 9~12, 16, 113
- 徐文立, 魏艳红, 刘雪松, 等. Moiré method analysis for tensile strain field of 2024 aluminum alloy welded joint[J]. China Welding, 2003, 12(1): 39~44
- 王敏, 董志波, 于澜, 等. Numerical simulation of temperature fields for T-joint during TIG welding of titanium alloy[J]. China Welding, 2008, 17(3): 6~9
- 张伟, 齐铂金, 许海鹰. 导管安装感应钎焊温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(5): 73~76
- 汪殿龙, 王军, 胡云岩, 等. 导管安装感应钎焊温度场分布数值模拟[J]. 铸造技术, 2009, 30(1): 73~76
- Chaboudez C, Clain S, Glardon R, et al. Numerical modelling of induction heating of long workpieces[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1994, 30(6): 5028~5037