

# 真空电子束钎焊温度场数值模拟

黄哲贇<sup>1</sup> 项明<sup>1</sup> 梁智<sup>2</sup>

(1 上海交通大学电子信息学院, 上海 200030)

(2 上海交通大学焊接工程研究所, 上海 200030)

**文 摘** 针对不锈钢毛细管板类结构件真空电子束钎焊的特点, 利用 ANSYS 软件建立了一个三维有限元分析模型对电子束钎焊温度场进行模拟。通过将热电偶测得的工件表面温度与有限元分析结果比较, 证明所建模型的合理性。利用该模型对不锈钢圆板电子束钎焊温度场进行了预测, 证明通过电子束扫描加热方式可以得到钎焊所需的局部均匀温度场。

**关键词** 电子束钎焊, 温度场, 有限元

## Simulation of Temperature Field for Vacuum Electron Beam Brazing

Huang Zheyun<sup>1</sup> Xiang Ming<sup>1</sup> Liang Zhi<sup>2</sup>

(1 School of Electrical and Information Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

(2 Institute of Welding Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

**Abstract** For the features of stainless steel capillary structure in vacuum electron beam brazing (VEBB), 3D finite element method (FEM) model is constructed with ANSYS software to simulate the temperature field. Comparison between measured workpiece temperature and FEM analysis proves reasonableness of the model. By prediction of the temperature field in VEEB with this model, a part uniform temperature field can be obtained.

**Key words** Vacuum electron beam brazing (VEBB), Temperature field, Finite element method (FEM)

### 1 前言

对具有毛细管板接头的精密结构件进行钎焊加工有较大的技术难度, 采用传统的真空炉中钎焊工艺, 由于加热是靠真空炉辐射加热, 升温、降温速度慢, 钎料在高温、真空中的停留时间较长, 毛细管因直径较小、壁较薄, 而极易产生熔蚀、堵塞和泄漏等问题, 从而降低了钎焊接头的综合性能和使用寿命。电子束钎焊是用高速扫描的电子束作为热源, 由点热源变为面热源, 使零件局部快速升温, 易进行钎焊。与整体钎焊相比, 热循环的时间可以缩短 10 ~ 20 倍<sup>[1]</sup>; 另外, 钎焊接头在高温停留的时间短, 减少

了钎焊中合金元素的蒸发, 使接头充分稳定, 获得良好的机械性能。

对非热处理强化的不锈钢, 选择的钎焊温度应使晶粒不致猛烈长大<sup>[2]</sup>。本文研究对象材料为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 晶粒长大温度为 1150℃, 故应低于此温度钎焊; 研究重点是建立合理的有限元分析模型, 在计算中选择合适的焊接参数, 使钎焊接头附近形成局部均匀温度场, 并使电子束加热位置的温度低于母材晶粒的长大温度。

### 2 传热分析

毛细管板接头真空电子束钎焊结构如图 1 所

收稿日期: 2003-12-30; 修回日期: 2004-02-16

黄哲贇, 1972 年出生, 工程师, 主要从事全自动氩弧焊、钎焊工艺技术方面的研究工作

示,采用 BNi2 粉状钎料(熔点 980℃)用粘结剂调成膏状置于不锈钢板下表面的毛细管附近,电子束在薄板上表面绕毛细管高速扫描加热。当接头附近到达钎焊温度,钎料熔化并通过毛细作用填满接头间隙,随后凝固形成良好的冶金结合。

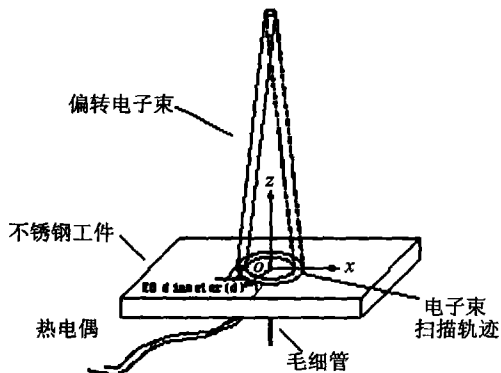


图1 电子束钎焊加工示意图  
Fig.1 Schematic of VEBB process

根据电子束焊接的特点,在进行温度场计算时做如下考虑:

- (1) 工件在真空室中进行加热(真空度  $10^{-2}$  Pa),因此不考虑热对流散热;
- (2) 为尽量减小钎焊过程因热传导而引起热量损失,试板所放置的支架与试板的接触面积积极小,通过支架热传导所损失的热量可忽略;
- (3) 实验中所使用的钎料量仅为 100 mg,钎料升温 and 熔化吸收的热量在计算中被忽略;
- (4) 真空电子束钎焊为高温钎焊,工件表面热辐射成为钎焊构件主要的散热方式;
- (5) 工件内部通过热传导传热,热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中, $T$  为温度, $t$  为时间, $\lambda$  为热导率, $c$  为比热容, $\rho$  为密度。

图2 表示的是电子束钎焊有限元分析的边界条件,根据工件的对称关系,取实际零件的一半建立模型,对称面上设定为绝热条件。

由于电子束扫描速度很快(1 kHz),可以认为在一定时间内,电子束扫描加热忽略移动造成的加热先后,而是按照一定的扫描带进行加热。因此在

计算中热流密度可用下式表达:

$$q(r) = q_{\max} \exp[-k(r - r_0)^2] \quad (2)$$

式中, $k$  为能量集中系数, $r_0$  为电子束扫描半径, $r$  为到电子束扫描中心的距离,如图2 所示。

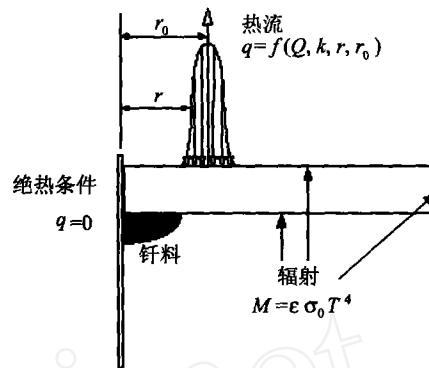


图2 传热分析边界条件  
Fig.2 Boundary conditions of heat transmission

计算中将电子束功率密度降为其最大值的 5% 的半径称为电子束有效半径  $d/2$ ,束斑直径  $d$  不同,对应的  $k$  值也不同。由该定义及等式(2) 得:

$$k = 12/d^2 \quad (3)$$

根据

$$\int_{-\infty}^{+\infty} q(r) 2\pi r dr = Q = \eta UI \quad (4)$$

确定

$$q_{\max} = \frac{\eta UI}{2\pi r_0} \sqrt{\frac{k}{\pi}} \quad (5)$$

式中, $\eta$  为热效率<sup>[2]</sup>, $U$  为电压, $I$  为电流。

热辐射是真空电子束钎焊中工件的主要散热方式,热辐射方程:

$$M = \epsilon \sigma_0 T^4 \quad (6)$$

式中, $M$  为单位表面辐射出的能量, $\epsilon$  为零件表面发射率, $\sigma_0$  为斯忒藩-玻耳兹曼常数, $T$  为零件表面的绝对温度。

以上公式中材料各热常数见文献[3~5]。

### 3 实验与有限元分析结果

不锈钢板(1Cr18Ni9Ti)尺寸:40 mm × 25 mm × 3.5 mm;毛细管直径 0.6 mm,壁厚 0.15 mm。电子束在工件上表面以 1 kHz 的频率扫描,在工件下表面接头附近点焊一热电偶,测量钎焊过程中接头附

宇航材料工艺 2004 年 第6期

近温度随时间的变化。在有限元分析中,根据工件尺寸取实际工件的一半建立几何模型,分别改变电子束束流、束斑直径、扫描中心位置做几组对比计算。

图3是利用ANSYS软件模拟出的电子束钎焊工件上下表面的温度场分布图(规范参数:电压60 kV,束流7.8 mA,加热中心位置5.5 mm,束斑直径3 mm,加热时间34 s)。

从图3可以看出,通过电子束扫描加热的方式

可以在接头附近获得局部均匀的温度场,在加热中心位置温度未超出不锈钢板熔点的情况下,在上下表面的接头附近达到钎焊温度。

我们改变相应的焊接参数做了一些实际零件的电子束钎焊实验,图4分别为相同条件下( $U = 60$  kV,  $d = 3$  mm,  $r_0 = 5.5$  mm,  $t = 36$  s)由热电偶在试板下表面接头附近测得的温度随时间变化曲线与通过计算得到的试件下表面毛细孔位置温度循环曲线的对比图。

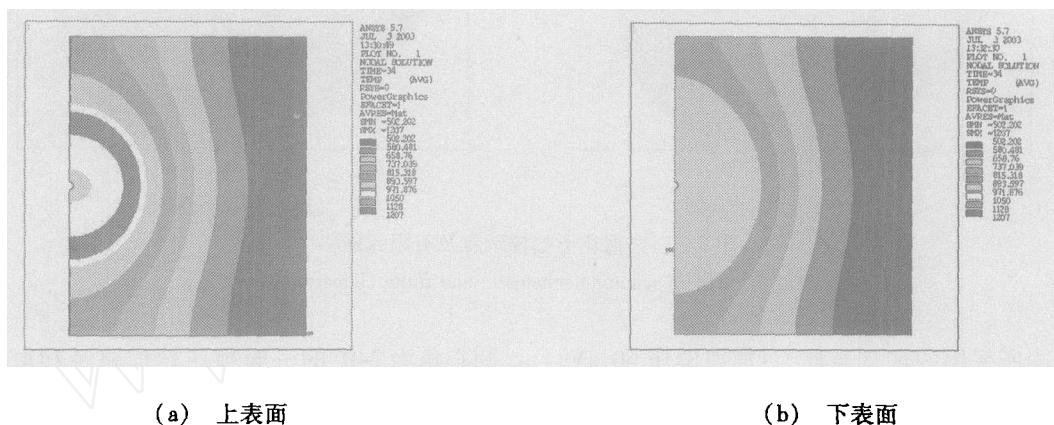


图3 工件上下表面的温度场模拟结果

Fig. 3 Simulated results of temperature field of the top surface and undersurface

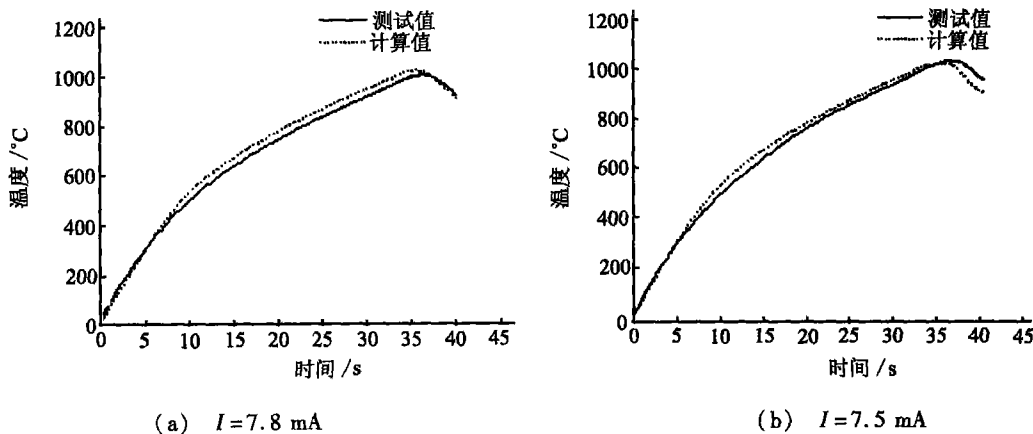


图4 实验与计算的温度循环曲线

Fig. 4 Experimental and calculated temperature cycle curves

从图4可以看出实验与计算结果有较好的一致性,从而证明了所建立的有限元模型是合理的。因此,对于具有较为复杂的结构和加热轨迹的电子束钎焊加工件,我们也可以利用类似的模型对

不同参数下工件钎焊过程的温度场进行预测。

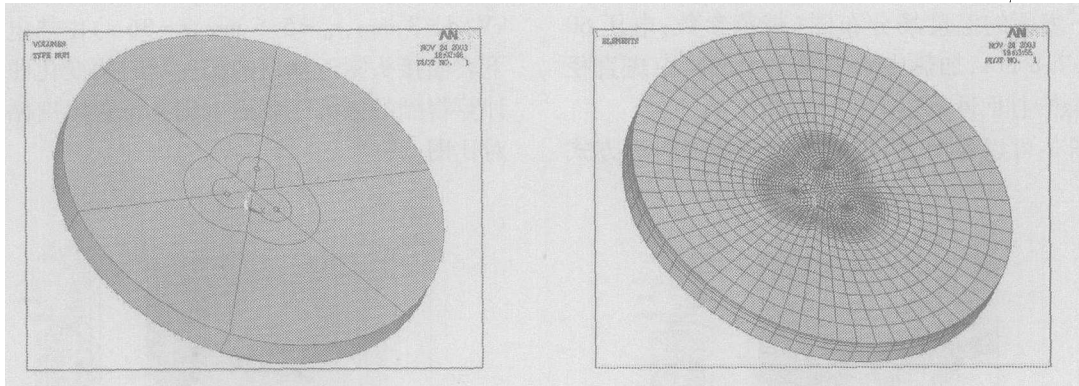
#### 4 不锈钢圆板电子束钎焊温度场模拟结果

利用上面的有限元分析模型,我们对工艺试验件的电子束钎焊过程温度场进行预测。工艺试验中

所采用的试样是直径 40 mm、厚 3 mm 的不锈钢圆板。利用 labview 软件,对电子束扫描轨迹进行编辑,考察不同扫描轨迹对于钎焊温度场的影响。有限元模拟过程中,对模型进行适当修改,对不同扫描

花样下的温度场进行了预测。

采用的电子束扫描轨迹为三瓣梅花形状,图 5 为花瓣圆心角为 200°条件下的不锈钢圆板电子束钎焊有限元模型。小孔周围的梅花环为电子束扫描路径。



(a) 计算对象示意图

(b) 有限元网格

图 5 三瓣梅花形扫描示意及有限元网格

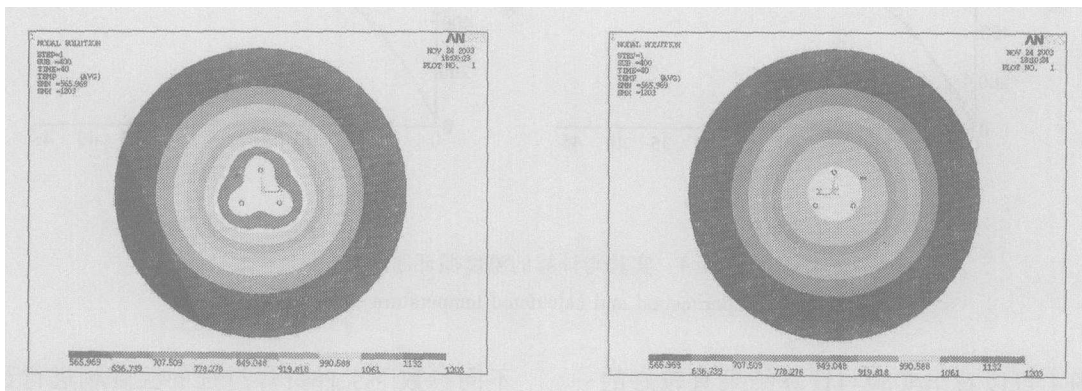
Fig. 5 Object scanning schematic and finite element mesh

计算中所采用的规范参数为:加速电压 60 kV,束流 6.9 mA,束斑直径 3 mm,花瓣半径 3.444 mm,花瓣圆心角 200°,加热时间为 40 s。

图 6 为电子束加热结束时,利用 ANSYS 软件模拟出的工件上下表面温度场分布图。从图 6 可以看出,通过电子束扫描加热,在工件上下表面毛细管附近都形成了局部均匀的温度场,有利于钎料的熔化并填满接头间隙。

圆心角为 240°的三瓣梅花扫描路径和电子束扫描半径为 6 mm 圆轨迹扫描路径,在其他规范参数不变的条件下,分别计算出两种情况下工件上下表面的温度分布。并通过比较三种扫描轨迹下,在工件同一截面上下表面的温度随位置变化的曲线来考察不同扫描轨迹对电子束钎焊过程温度场的影响。图 7 为不同扫描路径下,电子束加热结束时工件上下表面温度随位置变化的曲线。

我们对电子束扫描轨迹稍加改动,采用花瓣的



(a) 上表面

(b) 下表面

图 6 工件上下表面温度场分布图

Fig. 6 Temperature distribution of the top surface and undersurface

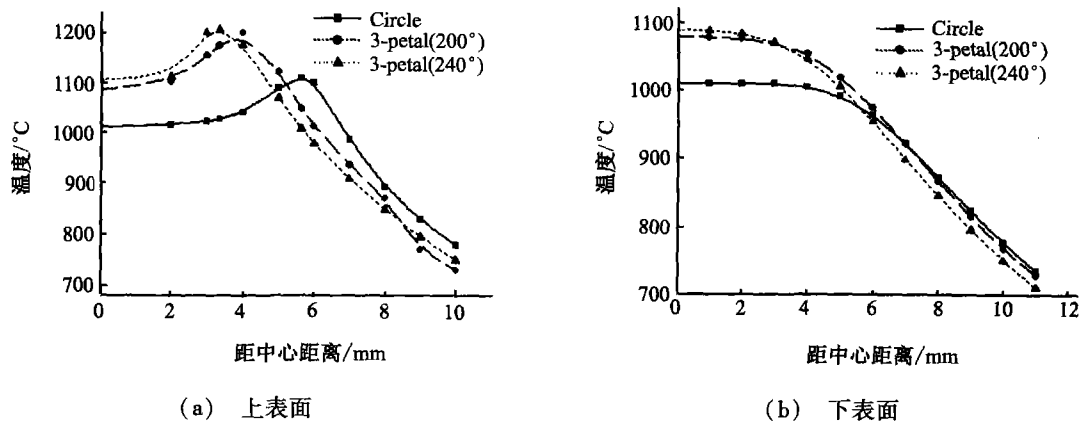


图7 上下表面温度变化曲线  
Fig.7 Temperature change curves of the top surface and undersurface

从图7可以看出,三瓣梅花形的扫描轨迹比圆形的扫描轨迹在相同时间内,能使圆板中心位置达到更高的温度,但它们在圆板中心附近形成的均匀温度场范围较小,使得毛细管周围温度均匀性相对较差,对钎料的熔化和填满缝隙会产生一定影响。而圆心角不同的两个三瓣梅花轨迹扫描得到的温度分布差别不大。花瓣圆心角增大,工件表面中心温度变大,但在圆板中心区的温度均匀性变差,毛细管周围温度变化范围增大。

### 5 结论

(1)通过有限元模拟得到的计算结果与工艺试验结果有较好的一致性,证明本文利用 ANSYS 软件所建立的三维钎焊温度场分析模型是合理的。

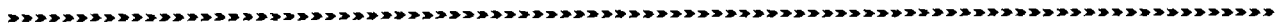
(2)计算表明,通过真空电子束扫描加热的方式可以获得钎焊所需要的局部均匀的温度场,有利于钎料的熔化并填满接头间隙。

(3)不同的电子束扫描轨迹对钎焊温度场有一定影响,三瓣梅花形扫描路径在相同条件下能使工件中心区具有较高的温度,但温度分布的均匀性不如圆形轨迹下的温度分布好。

### 参考文献

- 1 王天泉. 电阻炉设计. 北京:航空工业出版社, 2000:9~38
- 2 邹僖主编. 钎焊. 北京:机械工业出版社,1988:79~81
- 3 刘江龙,邹至荣,苏宝容. 高能束热处理. 北京:机械工业出版社,1997:58~80
- 4 Jeon Min Kyu, Kim Weon Bae. A study on heat flow and temperature monitoring in the laser brazing of a pin-to-plate joint. *Journal of Materials Processing Technology*,1998;82:53~60
- 5 Dave V R, Carpenter R W. Precision laser brazing utilizing nonimaging optical concentration. *Welding research Supplement*, 2001;(6):142~147

(编辑 任涛)



(上接第32页)

在本实验设定的范围内,针刺结构织物的致密化效果较其它结构表现出了明显优势;碳布穿刺织物和三维四向织物的致密化效果较为接近;正交三向结构织物的致密化效果较差。

(3)实验及分析表明造成传统沥青液相工艺效率低下的直接原因是碳化时沥青的流淌。

(4)试样经石墨化后,再次进行浸渍-碳化,致密化效率可大幅提高。

### 参考文献

- 1 Fitzer E, Manacha L M. Carbon reinforcements & Carbon/Carbon composites. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York,1998:311~355
- 2 贺福,王茂章. 碳纤维及其复合材料. 北京:科学出版社,1995:201
- 3 许斌,潘立慧. 碳材料用煤沥青的制备、性能与应用. 武汉:湖北科学技术出版社,2002:94
- 4 Guillén M D, Iglesias M J, Domínguez A, Blanco C G. Semi quantitative FTIR analysis of a coal tar pitch and its extracts and residues in several organic solvents. *Energy & Fuels*,1992;(6):518
- 5 王俊山等. 影响碳/碳复合材料常压碳化致密化效果因素研究. *宇航材料工艺*,2001;31(6):40

(编辑 任涛)