

三层不锈钢板电阻点焊温度场数值模拟*

王春生 陈 勇

(吉林大学材料科学与工程学院 长春 130025)

韩凤武 陆培德 王洪亮

(长春轨道客车股份有限公司)

摘要: 根据三层不锈钢板电阻点焊熔核形成过程, 建立了模拟三层板点焊温度场的轴对称有限元模型。在分析了三层板点焊的热过程基础上, 计算结果表明三层板点焊熔核初期是先形成包含中间板和上下工件/工件接触面的较小的熔核, 随时间延长, 熔核再沿轴向和径向逐渐长大的过程。通过试验验证表明, 数值模拟结果与实际吻合良好。该模型为进一步的电阻点焊多层板的温度场和应力场分析提供了基础。

关键词: 电阻点焊 有限元法 温度场 数值模拟

中图分类号: TG402

符 号

θ ——摄氏温度	T ——热力学温度	ρ ——密度
K ——传热系数	Q ——内部热源	r, z ——径向和轴向坐标
V ——导体内电势	σ ——电导率	$\sigma_c(T_0, p)$ ——室温接触电阻率
$H(T)$ ——不同温度下硬度	γ ——材料比热	$H(T_0)$ ——室温下硬度
$\rho(T)$ ——导电系数矩阵	I ——节点电流矢量	U ——节点电压矢量
$C(T)$ ——比热容矩阵	$K(T)$ ——热传导矩阵	\dot{T} ——温度矢量对时间的导数
Q ——热流量矢量	Q_E ——电流流动产生的焦耳热矢量	B ——几何矩阵
a ——散热系数		

0 前言

电阻点焊在薄板的焊接中有着广泛的应用, 由于点焊焊核的不可见性, 对其质量监测十分困难, 所以理论模型的建立对它的分析研究点焊质量具有重要的理论意义和实际应用价值。至今几十年来各国学者分别建立不同形式点焊熔核温度场数值分析模型, 并不断完善了计算方法和边界条件处理方法^[1,2]。从最初只考虑电热数值分析差分求解一维热模型, 到电、热、力耦合有限元求解二维轴对称模型, 数值分析模型逐渐成熟。但大多数模型都是针对两层等厚板, 对于三层板点焊的温度场, 热过程数值分析尚未见报道^[2,3]。即对三层不锈钢板点焊建立二维有限元电热耦合模型, 并协同力学因素考虑了接触电阻变化对焊接过程的影响, 为电阻点焊不锈钢多层板的温度场和应力场分析奠定理论基础。

1 三层不锈钢板电阻点焊有限元模型

点焊过程的模拟是一个多因素及多重非线性的复杂问题^[4], 考虑到电极的对称性及由电极的对称性决定了电压和温度分布的对称性, 将这一问题简化为轴对称问题。自从 1984 年, Nied 通过建立点焊 1/4 轴对称模型对点焊过程进行了有限元分析以来, 1/4 模型和有限元法被广泛地用于分析点焊熔核生长的过程^[1-3]。但对于非等厚板和多层板以及焊接中零件变形的情况, 1/4 模型不能很好的反映点焊过程。为此, 建立了 1/2 模型对三层板点焊进行分析。三层板点焊模型比两层板要多一个贴合面, 如图 1 所示。

1.1 热传导方程

对于二维轴对称瞬态热传导问题, 其温度场分布可由下列方程描述

$$\rho\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(Kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (1)$$

其中比热、密度、传热系数均为随温度变化的函数, 并将材料的熔化潜热在固液相温度区间内均匀折算为比热容中计算。

* 长春轨道客车股份有限公司博士后基金资助项目。20020906 收到初稿, 20030421 收到修改稿

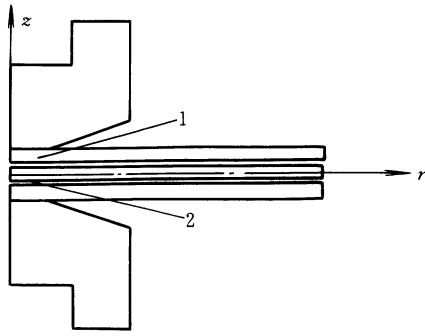


图 1 三层板点焊 1/2 模型

1. 上板与中间板的贴合面 2. 下板与中间板的贴合面

1.2 电传导方程

当施加电势时, 轴对称条件下的电场分布可由 Laplace 方程来描述

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \sigma \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

不锈钢和铜电极的体电阻是随温度变化的, 工件接触面和电极与工件接触面上的接触电阻 σ_c 对点焊熔核形成前期有较大影响, 而工件及工件与电极在点焊熔核形成前期恰好有较大的变化规律复杂的接触电阻, 按参考文献[4]中研究结果认为接触电阻有如下关系

$$\sigma_c = \sigma_c(T_0, p) \sqrt{\frac{H(T)}{H(T_0)}} \quad (3)$$

1.3 热电边界条件

三层不锈钢板的有限元模型如图 1 所示, 电极直径为 7.2 mm, 不锈钢板板厚为 1.5 mm。热电边界条件处理如下所示。

当 $r=0$ 时

$$\frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

单元节点 n 水冷表面和空冷表面

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0) \quad \frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad (5)$$

电极端面

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad I = i(t) \quad (6)$$

电极末端

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad V = 0 \quad (7)$$

为模拟点焊贴合面之外未接触的情况, 把这一区域的单元的电阻率设一个很大的值, 以使电流不能从此区域流过。

2 热电耦合计算及结果分析

在点焊过程中材料密度、比热、导热系数以及

电导率等均随温度 T 变化, 由于这样的一个非线性的问题难以得到理论解, 采用有限单元法求解, 选用热电耦合单元, 利用商业软件 ANSYS 对点焊的热电过程进行数值计算。

2.1 有限元方程

电传导方程的有限元表达式

$$\rho(T) U = I \quad (8)$$

热传导方程的有限元表达式

$$C(T) \dot{T} + K(T) T = Q + Q_E \quad (9)$$

电流生热与热传导问题的耦合是通过方程式(8)中的 $\rho(T)$ 和方程式(9)中的 Q_E 实现的。 Q_E 由下面公式决定

$$Q_E = \int_V B^T q_E dV \quad q_E = i^2 R \quad (10)$$

i 和 R 分别为电流和工件电阻, 而 $\rho(T)$ 是温度的函数。由于热传导和电传导方程间存在耦合, 故整个方程组的求解是通过反复迭代完成的。

2.2 计算结果及讨论

用所建模型对三层不锈钢 1.5 mm、长宽各为 40 mm 板材的点焊进行了模拟计算, 焊件及电极的有关热物性参数及性能数据依据资料和手册选取, 水冷电极通过冷却水的散热系数取为 $3800 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 不同温度下的电极, 工件表面的对流和热辐射换热系数按传热方式折算为散热系数代替, 计算电流可为恒直流, 网格划分如图 2 所示, 图中数字为节点号码。节点 12 为中间板在中心轴侧上接触面上的节点, 坐标轴原点为节点 1728($r=0, z=0$), 节点 1743($r=0.00094, z=0$), 节点 1783($r=0.0032, z=0$), 节点 298($r=0, z=0.0015$)。

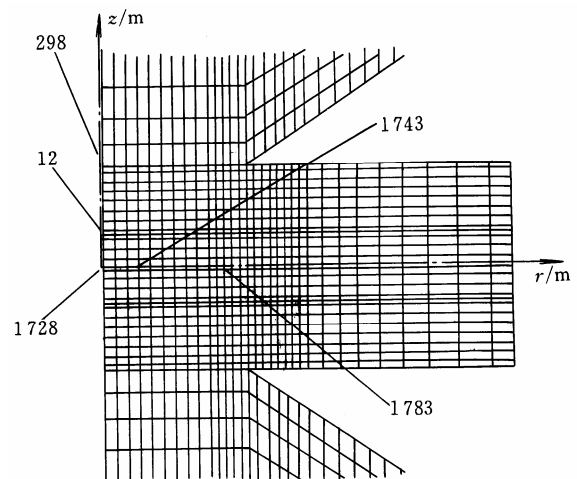


图 2 点焊模型有限元划分

如图 3 所示, 在加热初期, 由于接触电阻的存在, 两个工件接触面上节点温度上升较快。但在 1 周波后, 由于接触电阻迅速降低, 加热变缓, 而随

焊接时间延长，中间板距离上下端电极最远，散热效果最差，温度上升逐渐加快。在 3 周波时，靠近中轴处中间板的温度与两工件接触面的温度基本相同。5 周波时，中间板与接触面几乎是同时达到熔点，即形成一个包含中间板的熔核，如图 4a 所示，而并不是先在两个工件接触面上形成两个小熔核，再逐渐扩展成一个大熔核。随后，这个熔核不断沿轴向和径向长大，在 12 周波时，径向节点 1 783 达到熔点，焊接半径为 0.003 2 m。13 周波时，轴向节点 298 达到熔点，此时熔深约为 0.001 5 m。图 4 为 ANSYS 计算的各时间点的温度场等温线，反映了熔核的形成过程，图 4a 是 5.5 周波时的等温线分布，此时正好形成一个包含中间板的熔核，图 4b 是 8 周波时的等温线分布，此时熔核沿轴向和径向长大。图 4c 和图 4d 分别是 11 周波和 13 周波的等温线分布。从图中可看出熔核已初步形成，再继续加热，熔深由于电极的冷却效果，将处于稳定状态，生长速度变缓，熔核直径继续增大。图中五条等温线由熔核中心沿径向依次为 1 398 °C，1 098 °C，799 °C，499.5 °C，200 °C。其中 1 398 °C 为 SUS304 不锈钢的熔化温度。

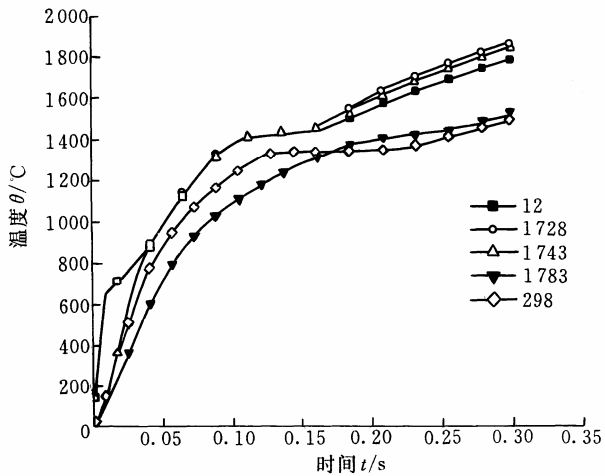


图 3 节点时间历程温度变化曲线

2.3 试验验证

图 5 是不同时间熔核大小计算结果与实测结果的比较，试验是在与计算相同的条件下进行的，将焊后试件沿焊核中心切开，制成宏观金相试样，然后用显微镜测得熔核尺寸，与计算结果比较。不同焊接时间下的模拟结果与试验结果进行比较，可以看出计算结果与实际吻合良好，计算的熔核直径比实测的大一些，根据计算模型的特点分析，是由于熔核形成初期，实测点焊中的工件/工件的接触面积比较难于确定，与模型所采用的方式存在误差所致。计算熔核熔深小于实际熔核熔深的原因是实际电极

/工件接触面不仅会产生接触电阻，而且对导热性也有影响，计算模型中则没有考虑接触面对导热的影响，计算中电极方向的散热量较大。熔核形成后期，由于接触面状态的大大改善，此方面的误差减小。

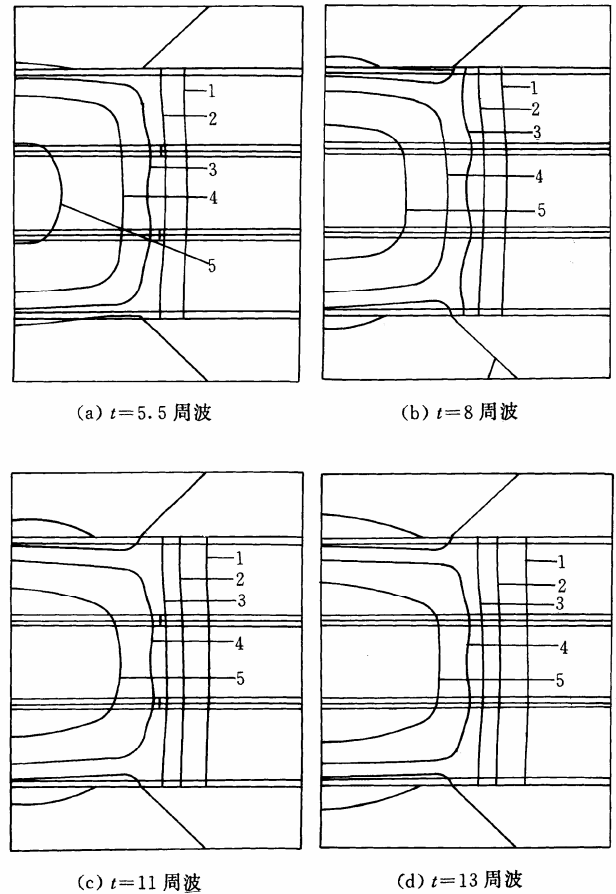


图 4 点焊接头温度分布等值线图

- 1. $\theta=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2. $\theta=499.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3. $\theta=799.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 4. $\theta=1\ 098\text{ }^{\circ}\text{C}$ 5. $\theta=1\ 398\text{ }^{\circ}\text{C}$

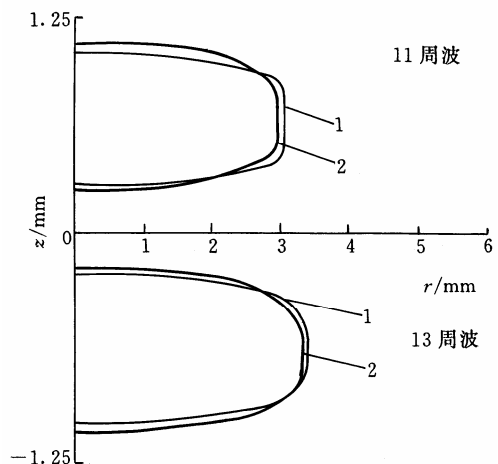


图 5 熔核计算结果与实测结果的比较

- 1. 计算值 2. 试验值

3 结 论

(1) 采用有限元模型, 对不锈钢三层板电阻点焊的温度场进行了数值模拟, 模型中分析了三层不锈钢板点焊的接触电阻变化及材料的热物性参数变化对数值模拟结果的影响, 并确定了合理的边界条件。试验结果表明, 模型结果与实际焊接过程吻合良好。

(2) 对三层板点焊热电过程分析, 认为三层板点焊初期是先形成包含中间板和上下工件/工件接触面的较小的熔核, 随时间延长, 熔核再沿轴向和径向逐渐长大。

参 考 文 献

- 1 Wang C S. Electrical-thermal interaction simulation for resistance spot welding nugget process of mild steel and stainless steel. *China Welding*, 2002,11(1): 51~54
- 2 龙昕, 汪建华, 张增艳, 等. 电阻点焊温度场分布的数值模拟. *上海交通大学学报*, 2001, 35(3): 416~419
- 3 曹彪. 点焊熔核形成过程的有限元模型. *机械工程学报*, 1995, 31(2): 99~104
- 4 赵熹华. 压力焊. 北京: 机械工业出版社, 1988

NUMERICAL SIMULATION FOR RESISTANCE SPOT WELDING NUGGET PROCESS OF THREE LAYERS STAINLESS STEEL SHEETS

Wang Chunsheng Chen Yong

(Jilin University)

Han Fengwu Lu Peide Wang Hongliang

(Changchun Railway Car Corp)

Abstract: An axisymmetric finite element model is developed to simulate the temperature field of resistant spot welding according to the process of nugget formation of three layers stainless steel sheets. A simulation method of the interaction of electrical and thermal factors is presented. Computed results show in the early stages of nugget formation, a small nugget which comprised up and down faying surfaces and middle sheet is firstly developed. With time prolonging, the nugget then develops along the axial and radial direction. Experimental verification shows that the model prediction agrees well with the practical. This model provides a useful basis for the analysis of temperature field and stress field of resistance spot welding for multi-layers sheets.

Key words: Resistance spot welding Finite element method
Temperature field Numerical simulation

作者简介: 王春生, 男, 1965 年出生, 博士, 副教授。主要从事焊接材料开发及焊接热过程控制方面的研究。