

# 外加纵向磁场 GTAW 平板堆焊温度场数值模拟与验证

罗键<sup>1</sup>, 赵国际<sup>1,2</sup>, 王向杰<sup>1,2</sup>, 覃玲萍<sup>2</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 利用 ANSYS 对外加纵向磁场作用下 GTAW 平板堆焊过程温度场进行了数值模拟, 并进行了实验验证。结果表明, 所采用的简单磁控焊接电弧热源模型在外加磁场作用下形成“钟罩形”电弧, 模拟焊接温度场与实验结果基本吻合。

**关键词:** 纵向磁场; 堆焊; 温度场; 模拟

中图分类号: TG455

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2010)03-0133-03

## Numerical Simulation and Verification of Temperature Field in GTAW Plate Surfacing Under External Longitudinal Magnetic Field

LUO Jian<sup>1</sup>, ZHAO Guoji<sup>1,2</sup>, WANG Xiangjie<sup>1,2</sup>, QIN Lingping<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Welding temperature distribution of GTAW plate surfacing was simulated by ANSYS software under external longitudinal magnetic field, and experimental verification was carried out. The results show that under external longitudinal magnetic field, it forms bell shaped arc using simple heat source model, and the simulation of welding temperature distribution is basically accorded with the experimental results.

**Key words:** longitudinal magnetic field; surfacing; temperature field; simulation

磁控技术可用于电弧焊、气体保护焊以及激光焊中, 起到降低焊缝金属的化学成分不均匀性、细化焊缝金属的结晶组织、减少裂纹出现的几率、有效抑制焊缝中气孔的产生、减小气孔尺寸等方面的作用<sup>[1]</sup>, 从而提高连接强度, 改善接头性能。研究表明, 横向旋转磁场对电弧瞬时形态的改变使工件上电弧热和电弧力的分布发生改变<sup>[2]</sup>; 外加间歇交变纵向磁场对熔滴过渡的形态和形式会产生显著影响<sup>[3-4]</sup>。

焊接数值模拟技术近年来已经得到了广泛的研究和应用。本文利用 ANSYS 对外加纵向磁场作用下 GTAW 平板堆焊过程温度场进行了动态模拟, 对模拟结果进行了实验验证, 为利用有限元模拟磁控焊接进行了基础研究。

## 1 磁控平板堆焊模型的建立

### 1.1 焊接温度场

焊接是一个局部快速加热到高温, 并随后快速冷却的过程。随着热源的移动, 整个焊接的温度随时间和空间急剧变化, 材料的热物理性能也随温度剧烈变化, 同时还存在熔化和相变潜热现象。因此, 焊接温度场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题, 其三维温度场控制方程为<sup>[5]</sup>:

$$\rho c = \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + Q \quad (t > 0) \quad (1)$$

式中:  $Q$  为内热源强度;  $T$  为温度场分布函数;  $\lambda$  为导热系数;  $\rho$  为材料的密度;  $c$  为材料比热容。

### 1.2 建立磁控焊接模型

在磁控焊接过程中, 外加磁场会对焊接热过程产生显著影响<sup>[1-4]</sup>。在外加纵向磁场作用下, 纵向运动的带电粒子在磁场作用下旋转并促使电弧扩张。与普通 GTAW 焊接电弧相比, 磁场使电弧径向温度梯度减小, 形成分布范围较广的“钟罩形”电弧, 电弧中

收稿日期: 2009-10-20

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20070611030); 重庆市自然科学基金项目(CSTC2008BB3303)

作者简介: 罗键(1971-), 男, 湖南湘西人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向: 现代材料加工过程数值模拟技术, 新型高效(特种)电磁焊接技术与理论研究; 电话: 02365105721; E-mail: luojian\_cn\_2005@163.com

心区温度不是很高<sup>[6]</sup>。

试件尺寸为 88 mm × 80 mm × 4 mm，材料为 Q235 钢。由于试件是对称的，故取一半进行建模计算。电弧中心在焊件的 x-z 平面中心线上移动。焊接工艺参数见表 1。

表 1 焊接工艺参数  
Tab.1 Welding process parameters

电弧电压 /V	焊接电流 /A	焊接速度 /(mm·s <sup>-1</sup> )	电弧功率有效利用系数	电弧有效加热半径 /mm
22	165	2	0.68	6

在数值模拟计算中，热物理性能和力学性能参数见文献[7]。

由于焊接加热过程极不均匀，本文采用映射网格和自由网格相结合的网格划分方案，网格划分时，焊缝和热影响区的温度梯度变化很大，要采用加密的网格；远离焊缝的区域，温度梯度变化相对较小，采用相对稀疏的网格。有限元网格划分见图 1，焊缝处网格大小 1 mm，远离焊缝区域网格大小 5 mm，中间过渡单元网格大小 3 mm，共 2707 个节点，3933 个单元。

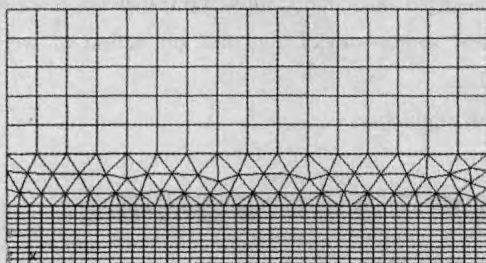


图 1 模型有限元网格划分  
Fig.1 Finite element mesh of model

外加纵向磁场 GTAW 焊接电弧热流分布高斯模型为<sup>[6]</sup>：

$$q(r) = \left( \frac{\eta UI}{3\pi\sigma_q} \right) \exp\left( \frac{-r^2}{3\sigma_q} \right) \quad (2)$$

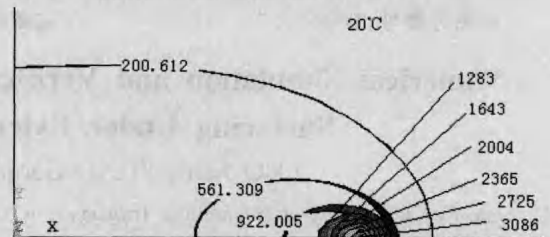
式中： $q(r)$ 为焊接电弧热流密度； $r$ 为某点的径向距离； $U$ 为电弧电压； $I$ 为焊接电流； $\eta$ 为焊接电弧功率有效利用系数； $\sigma_q$ 为电弧热流分布参数。

通过 ANSYS 软件提供的 APDL 语言编写子程序，然后通过多次循环来实现热源的移动。具体做法是：沿焊接方向将焊缝长度  $L$  分为  $N$  段，将各段的后点作为热源中心加载高斯热源，即每段热源作用步长为  $L/N$  (mm)；设定时间步长，加载热源进行计算；当对下一段加载热源计算时，须消除上一段所加的高斯热流密度，且将上一次加载计算的温度场作为下一段加载的初始值；依次循环模拟热源的移

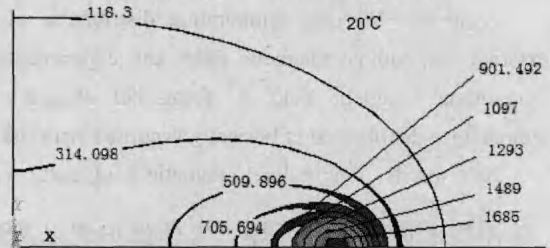
动，计算焊接瞬态温度场。模拟冷却阶段时，删除内热源，定义加载热源时间步长，进行循环计算直至焊件温度趋于室温。

## 2 焊接温度场模拟

在焊接过程中，一般时间步长控制在 0.2 s 左右，冷却过程中，可逐渐增大时间步长。本次模拟，焊接加热时间 40 s，冷却时间为 800 s，本次模拟中对边界条件的处理：热流密度加载于电弧所在面的节点上，其它表面施加对流换热，初始温度为 20 °C。焊接温度场等值面分布模拟结果见图 2。



(a) 无磁场时焊接温度等值面分布



(b) 有磁场时焊接温度等值面分布

图 2 焊接温度场等值面分布 (°C)

( $t=20$  s,  $U=22$  V,  $I=165$  A,  $v=2$  mm/s)

Fig.2 Iso-surface distribution of welding temperature field ( $t=20$  s,  $U=22$  V,  $I=165$  A,  $v=2$  mm/s)

模拟结果表明，在工艺参数不变的情况下，当存在磁场时，熔池变宽，且熔池中心最高温度明显下降，即当焊接输入总能量一定时，熔宽变大而熔深将减小。这是由于在外加纵向磁场作用下电弧发生的旋转扩张使单位面积上的能量输入降低，电弧温度分布发散且中心温度下降。这与磁场作用下“钟罩形”电弧的作用结果是一致的。

## 3 实验验证

为了验证模拟结果的准确性，进行了平板堆焊熔敷实验，以 A、B、C 三个特征点作为热电偶采样点，通过电容偶仪将镍镉-镍硅热电偶焊合在特征点上，然后通过记录仪记录焊接过程中各特征点的实际温度曲线，并与模拟结果进行比较。A、B、C 三个特征点依次位于：纵向距焊接起始点 40、44 和

48mm, 横向距焊缝 6、9 和 11 mm。

实测与模拟特征点温度曲线见图 3, 对比结果见表 2。

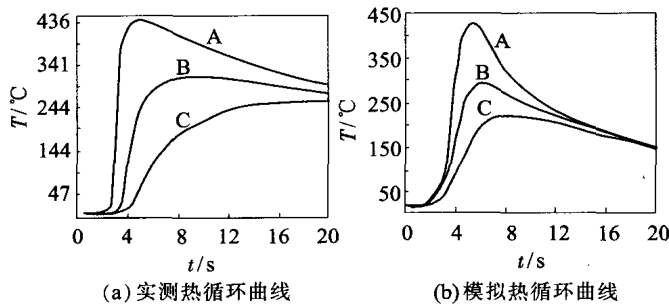


图 3 焊接热循环曲线 ( $I=150\text{ A}$ ,  $U=22.8\text{ V}$ )

Fig.3 Curves of welding thermal cycling ( $I=150\text{ A}$ ,  $U=22.8\text{ V}$ )

表 2 焊接热循环曲线峰值的比较

Tab.2 Comparison of the peak value of thermal cycling

特征点	实测温度峰值 / °C	模拟温度峰值 / °C	相对误差 (%)
A	441	435	1.4
B	307	315	2.5
C	248	243	2.1

从图 3 可以看出: 热传导使各特征点到达局部最高温度的时间随着距热源距离的增大而逐渐延迟, 热源的作用逐渐减弱, 所达到的峰值温度远远低于焊接熔池, 并且随着与焊缝距离的增大而降低, 温度上升的速度明显比温度下降的速度快。各特征点的温度峰值见表 2。

结果表明, 两温度曲线的变化规律是一致的, 特征点温度峰值相差不是很大, 考虑到热物理性能参

数、有限元网格节点间的不连续、以及模型、测量等因素造成的误差, 可以认为两者吻合较好。

### 4 结论

(1) 本文所采用的简单磁控焊接电弧热源模型能够较有效地对外加纵向磁场作用下平板堆焊熔敷过程进行模拟, 其模拟焊接温度场与实测结果基本吻合。

(2) 对比结果验证了在外加磁场作用下, 形成“钟罩形”电弧并导致焊接熔池相对“宽而浅”。

### 参考文献:

- [1] 许超, 魏齐龙, 曹天玮. 磁场控制技术在焊接中的应用[J]. 新技术新工艺, 2007, (11): 51-53.
- [2] 华爱兵, 陈树君, 殷树言, 等. 横向旋转磁场对 TIG 焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2008, (1): 5-8.
- [3] Luo J, Luo Q, Lin Y H, et al. A new approach for fluid flow model in gas tungsten arc weld pool using longitudinal electromagnetic control [J]. Welding Journal, 2003, 82(8): 202-206.
- [4] 常云龙, 李多, 李大用, 等. 纵向磁场作用下 MIG 焊熔滴过渡过程的分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 21-24.
- [5] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- [6] 罗键, 贾昌申, 王雅生, 等. 外加纵向磁场 GTAW 焊接机理 - I. 电弧特性[J]. 金属学报, 2001, 37(2): 212-216.
- [7] 谢元峰. 基于 ANSYS 的焊接温度场和应力的数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006. [4]

(上接第 132 页)区, 由于组织细化为微粒状珠光体, 它的硬度值略有提高; 熔合区由于邻近的热影响区含碳量较高, 而堆焊层的合金元素含量也较大, 发生冶金反应后, 增大了其淬透性, 所以组织为贝氏体 + 少量马氏体, 这些贝氏体又包括无碳贝氏体、粒状贝氏体和板条状贝氏体, 所以其硬度值较大; 在堆焊层, 其组织为条(粒)状的贝氏体且分布比较均匀, 所以硬度低于熔合区<sup>[6]</sup>。

### 3 结论

(1) 采用 JD-960 焊条来堆焊修复 U75V(PD3)钢轨, 其熔覆层为性能俱佳的贝氏体组织, 实际效果较好, 能显著延长钢轨修复后的使用寿命, 同时可有效的解决高碳钢可焊性差, 应力大等问题。

(2) 堆焊层和母材的硬度符合强度匹配。

(3) 修复 U75V(PD3)钢轨工艺简单, 焊前不需

预热, 焊后不需热处理。

### 参考文献:

- [1] 高炳易. 贝氏体焊条修复铁路钢轨堆焊性研究[D]. 成都: 西华大学, 2007.
- [2] 刘文源. 合金钢组合辙叉翼轨焊修[J]. 电焊机, 2008, 38(8): 37-40.
- [3] 刘天模, 周守则, 左汝林, 等. 钒对 PD3 钢珠光体组织形态的影响[J]. 钢铁, 2003, 38(4): 56-59.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 81-82.
- [5] 李亚江, 张永喜, 王娟. 焊接组织性能与质量控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 96-97.
- [6] 邓建辉, 雷秀华, 刘晓华, 等. PD3 75 kg/m 含钒微合金热处理钢轨[J]. 钢铁, 2001, 36(3): 45-48.
- [7] 尹士科. 焊接材料实用基础知识[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 18-19.
- [8] 陈晓男, 栾道成, 苏素娟, 等. 贝氏体钢辙叉心轨组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(2): 25-27. [4]