

## 旁路耦合电弧焊温度场模拟及验证\*

石玕<sup>1)†</sup> 韩日宏<sup>2)</sup> 黄健康<sup>2)</sup> 樊丁<sup>1)</sup>

1) (兰州理工大学, 甘肃省有色金属新材料重点实验室, 兰州 730050)

2) (兰州理工大学, 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 兰州 730050)

(2011年3月23日收到; 2011年5月3日收到修改稿)

针对旁路耦合电弧焊的特点, 建立了一种适于用旁路耦合电弧焊的复合热源模型. 利用该热源模型对不同焊接参数下的旁路耦合电弧焊温度场进行了数值分析, 得到了总电流相同时不同旁路电流下的焊缝熔深、母材温度和特征点焊接热循环曲线的模拟结果, 分析了旁路耦合电弧焊焊接参数对母材热输入的影响, 并将特征点热循环曲线的模拟结果与相同条件下的试验结果进行了比较. 结果表明, 焊接总电流相同时母材热输入随着旁路电流的增加而降低, 且越靠近焊缝母材热输入的降幅越大, 特征点焊接热循环曲线的模拟结果与试验结果基本一致, 旁路耦合电弧焊温度场模型是合理的, 所建立的热源模型能够正确反映焊接参数与母材热输入之间的关系.

**关键词:** 旁路耦合电弧焊, 复合热源模型, 焊接温度场, 母材热输入

**PACS:** 02.60. Cb

## 1 引言

旁路耦合电弧焊是一种新型焊接方法, 由 Zhang 等首先提出<sup>[1]</sup>. 该方法是在传统 GMAW 的基础上增加 GTAW 旁路, 主路和旁路组成耦合电弧焊系统, 焊接过程中通过 GTAW 旁路电弧的分流作用, 可以实现在焊接总电流保持不变的前提下减小流经母材的电流. 这样既保证了较大的焊丝熔敷率, 同时又降低了母材的热输入<sup>[2]</sup>. 因此旁路耦合电弧焊可以有效控制高速焊接中容易出现的咬边、驼峰焊道等缺陷, 实现高效焊接<sup>[3]</sup>.

使用数值模拟方法建立焊接物理过程的有限元模型, 研究焊接参数对焊接过程的影响可以为焊接工艺的制定与优化提供有效参考<sup>[4]</sup>. 因此对旁路耦合电弧焊温度场进行建模分析, 不仅可以得到焊接参数与母材热输入之间的关系, 为其工艺参数的优化提供参考, 而且还能节省大量时间和成本. 但是现有的热源模型不能完全反映旁路耦合电弧焊的特点, 因此无法获得准确的温度场结果. 为了解决这个问题, 文献<sup>[5]</sup>提出了适用于旁路耦合电弧焊的热源加载方法, 将热源分为面热源和体热源

两部分并分别加载到工件上表面和焊缝堆高中, 并模拟了不同焊接参数下的焊缝形状和尺寸, 获得了良好效果.

旁路耦合电弧焊过程中, 热量在体热源和面热源之间如何分配对焊接温度场以及母材的热输入都有直接影响. 因此本文在现有研究基础上根据旁路耦合电弧焊的特点进一步研究了热量在面热源和体热源之间的分配方式, 建立了一种适用于旁路耦合电弧焊的复合热源模型. 对旁路耦合电弧焊温度场进行了数值分析, 模拟了不同焊接参数下工件温度场的分布情况, 分析了焊接参数对母材热输入的影响规律. 进行了相同条件下的堆焊试验, 采集了不同焊接参数下工件背面特征点的焊接热循环曲线, 并与相应的模拟结果进行了比较分析.

## 2 旁路耦合电弧焊原理及热源模型

## 2.1 旁路耦合电弧焊基本原理

旁路耦合电弧焊由主路 GMAW 和旁路 GTAW 组成, 主路焊机为恒压源旁路焊机为恒流源, 其基本原理如图 1 所示, 图中  $I_{bm}$  为母材电流,  $I_{bp}$  为旁

\* 国家自然科学基金 (批准号: 50805073), 兰州理工大学优秀青年教师培养计划 (批准号: Q200901) 和教育部科学技术研究重点项目 (批准号: 210229) 资助的课题.

† E-mail: shiyu73@gmail.com

路电流,  $I_{\text{melting}}$  为总电流. 焊接过程中电流流经焊丝后分为两部分, 一部分由旁路 GTAW 分流, 另一部分流入母材. 因此作用于焊丝的电流并不等于流入母材的电流, 而是等于母材电流与旁路电流之和.

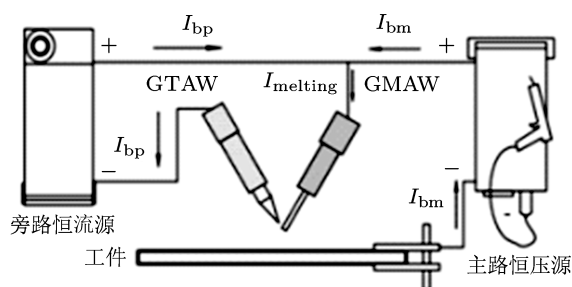


图1 旁路耦合电弧焊原理示意图

## 2.2 热源模型

焊接过程中焊缝的形状可以反映热输入过程, 而热输入过程决定热源模型的形式. 由于旁路的分流作用, 导致焊接过程中作用于焊丝的电流远大于作用于母材的电流. 在大电流的作用下焊丝被大量熔化并且以熔滴的形式过渡到工件上, 而作用于母材的电流较小使得母材金属的熔化量不大. 因此旁路耦合电弧焊所形成的焊缝具有熔深较小而余高较大的特点. 所以旁路耦合电弧焊过程中, 母材的热输入主要分为两部分. 一部分是由主路电弧从工件表面直接输入母材的热量, 另一部分是由熔化的焊丝带入母材的热量. 由于焊缝的熔深较小, 所以熔滴中的热量并没有直接进入母材, 而是通过与母材的接触面持续的向母材中传导. 根据上述热输入的过程, 旁路耦合电弧焊的热源模型也应该由相应的两部分组成, 用来分别模拟母材的两部分热输入. 由于熔深较小, 可以近似使用平面高斯热源来模拟主路电弧对母材的热输入. 而由熔滴带入母材的热量可以由一个均匀分布在电弧加热范围内焊缝堆高中的体热源来模拟.

综上所述, 旁路耦合电弧焊的热源模型由一个面热源和一个体热源共同组成, 用来模拟母材的两部分热输入. 而焊接过程中输入母材的热量都由电弧产生的, 所以电弧能量的分配方式决定了热源模型中热量在面热源和体热源上的分配方式. 焊接过程中, 主路电弧和旁路电弧是耦合的, 从焊丝流出的电流在主路电弧弧柱区上半部分通过旁路电弧分流了一部分. 流经主路电弧上半部分的电流为总电流, 而流经主路电弧下半部分的电流为母材电流.

由于电弧之间的耦合机理较为复杂, 所以在建立热源模型的过程中忽略了主路电弧和旁路电弧

的耦合作用. 假设总电流在焊丝尖端分流为母材电流和旁路电流. 经过上述简化, 面热源的热量只来自于主路电弧, 作用于面热源的电流为母材电流; 体热源的热量由主路电弧和旁路电弧共同提供, 作用于体热源的电流为母材电流与旁路电流之和. 热源模型的具体表达式如下.

面热源:

$$q(r) = q_m \exp\left(-\frac{3r^2}{R^2}\right), \quad (1)$$

式中  $R$  为主路电弧在工件表面的作用范围,  $r$  为距离电弧作用中心的距离,  $q_m$  为热源中心最大热流密度, 表达式为

$$q_m = \frac{3Q_{\text{面}}}{\pi R^2}, \quad (2)$$

式中  $Q_{\text{面}}$  为作用于面热源的功率, 表达式为

$$Q_{\text{面}} = \eta_1 U_{\text{bm}} I_{\text{bm}}, \quad (3)$$

式中  $\eta_1$  为主路电弧作用于面热源的功率系数,  $U_{\text{bm}}$  为主路电弧电压,  $I_{\text{bm}}$  为流入母材的电流.

体热源:

$$q = \frac{Q_{\text{体}}}{V}, \quad (4)$$

式中  $V$  是单位时间内所熔化的焊丝体积,  $Q_{\text{体}}$  为作用于体热源的功率, 表达式为

$$Q_{\text{体}} = \eta_2 U_{\text{bm}} I_{\text{bm}} + \eta_3 U_{\text{bp}} I_{\text{bp}}, \quad (5)$$

式中  $\eta_2$  是主路电弧用于熔化焊丝的功率系数,  $\eta_3$  为旁路电弧用于熔化焊丝的功率系数,  $U_{\text{bp}}$  为旁路电弧电压,  $I_{\text{bp}}$  为旁路电弧电流. 因为主路焊机为恒压源, 所以在只改变旁路电流时, 主路焊机的预设送丝速度和焊接电压是不变的. 因此单位时间内熔化的焊丝总量是不变的, 也就是用来熔化焊丝的总能量基本不变.

## 3 温度场模型及求解

### 3.1 数学模型

建立温度场模型过程中为了对模型进行简化使用了以下基本假设: 不考虑熔池中的化学反应以及液态金属的流动, 设定工件材料为各向同性, 设定工件表面通过对流和辐射散热. 焊接过程中热源在工件上不断移动, 使工件上的温度场随着时间和空间不断发生变化. 所以焊接温度场属于非线性瞬态传导问题, 其三维温度场控制方程如下:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial X} \left( K \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( K \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left( K \frac{\partial T}{\partial Z} \right) + Q, \quad (6)$$

式中  $\rho$  为材料的密度,  $C_p$  为材料的比热,  $T$  为温度,  $K$  为材料的热传导率,  $Q$  为方程源项, 计算中  $Q$  采用前文中建立的旁路耦合电弧焊热源模型.

要求解方程 (6) 必须有相应的边界条件, 文中采用热流通量边界条件. 为了方便计算, 设置一个综合散热系数来表征由对流和传导所散失的热量. 则各表面边界条件如下:

$$K \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0), \quad (7)$$

式中,  $n$  为各表面的外法线方向,  $T_0$  是环境温度,  $\alpha$  为工件表面对流和辐射综合散热系数, 随着表面温度的不同,  $\alpha$  也随之变化, 不同温度下的取值如表 1 中所示 [6].

表 1 综合散热系数取值

温度/ $^{\circ}\text{C}$	20	300	600	900	1200	1500
$\alpha/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	20	50	75	125	200	350

### 3.2 几何模型及网格划分

模型中工件为  $250\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 4\text{ mm}$  的平板. 由于复合热源模型中的体热源加载在焊缝堆高中, 因此堆高部分的形状和尺寸对温度场结果有直接影响. 文中不考虑堆高部分形成过程中的自由表面问题, 而是主要从热量的角度来描述旁路耦合电弧焊过程. 通过对大量的旁路耦合电弧焊焊缝截面试验数据进行整理观测后发现, 由于单位时间内熔化的焊丝体积很大, 大量熔敷金属堆积在焊缝表面并形成截面形状为近似半圆形的焊缝堆高. 根据此结果计算中将堆高部分的截面形状设为半圆形, 而堆高部分截面半径则是由单位时间内熔化的焊丝体积以及焊接速度共同决定的. 根据文中所采用的工艺参数, 焊缝堆高的半径取为  $0.25\text{ mm}$ .

焊接过程中随着电弧在工件上移动, 熔滴也随之过渡到运动的熔池中并在电弧后方形成堆高, 因此焊缝堆高是随着焊接过程的进行而逐步形成的. 根据上述焊接过程, 在计算过程中, 体热源均匀的加载在电弧作用范围内的焊缝堆高中并随着电弧的运动逐步向前移动. 这样堆高部分就以运动的电弧为界分为两部分, 电弧之前的部分并不参与计算, 因为在实际焊接过程中这部分堆高并不存在, 只有电弧作用范围内以及电弧之后的堆高部分参与温度场计算.

在计算过程中, 细密的网格可以得到更加精确的结果, 但同时会增加计算量. 为了在结果精度满足要求的基础上尽量减少计算量, 所以在温度梯度很大的焊缝区域使用细密的网格, 在温度梯度较小

的区域使用较稀疏的网格, 模拟中采用如图 2 所示的网格划分方法. 整个模型共有 5403 个节点, 4200 个单元, 堆高部分采用棱柱网格其他部分采用六面体网格, 模型总自由度为 35405.

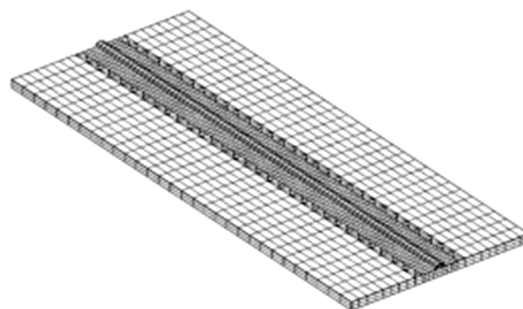


图 2 网格示意图

### 3.3 模拟参数取值及相变潜热的处理

文中对总电流为  $300\text{ A}$  不变, 旁路电流分别为  $0\text{ A}$ ,  $140\text{ A}$  和  $220\text{ A}$  时的情况进行了计算, 具体焊接参数如表 2 所示. 对于熔化极气体保护焊, 由于受电极材料沸点的限制, 导致阴极电子发射以场致发射为主, 造成阴极压降远大于电子逸出功, 所以其阴极产热大于阳极产热. 而非熔化极气体保护焊正好与之相反, 阳极产热大于阴极产热. 在旁路耦合电弧焊简化模型中, 焊丝作为主路电弧和旁路电弧共同的阳极, 所以主路电弧作用于工件的热效率应大于其作用于焊丝的热效率, 而旁路电弧作用于焊丝的热效率应大于其作用于钨极的热效率. 在主路电弧和旁路电弧组成的耦合系统中,  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  表示的意义是耦合系统中热量的分配方式及比例. 因此如果只改变旁路电流而不改变耦合系统中的其他参数时  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  的取值则基本保持不变. 并且旁路电流很大一部分实际上是从主路电弧弧柱区分流, 这导致旁路电弧作用于焊丝的热效率降低. 因此文中取  $\eta_1 = 0.37, \eta_2 = 0.28, \eta_3 = 0.31$ .

表 2 焊接工艺参数取值

总电流/A	旁路电流/A	主路电压/V	旁路电压/V	焊接速度/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
300	0	30	20	12.5
300	140	30	20	12.5
300	220	30	20	12.5

模拟中工件材料为 Q235 低碳钢, 材料的热传导率、比热容和密度随着温度的不同有很大的变化, 如果将其设为常数值进行计算, 很难得到准确的温度场结果. 因此在计算中考虑了材料的热传导率、比热容和密度随温度的变化情况, 不同温度下

的具体取值如表 3 所示 [7], 其他温度下的参数取值通过插值获得.

相变潜热是材料在发生相变的过程中吸收或放出的热量. 因为 Q235 相变潜热的数值很大, 所以必须考虑这部分热量对温度场的影响. 文中使用等效比热法来处理材料的相变潜热, 等效比热表达式如下:

$$C_{\text{eff}} = \frac{H}{(T_{\text{lig}} - T_{\text{sol}})}, \quad (8)$$

式中  $C_{\text{eff}}$  为材料的等效比热,  $H$  为材料的相变潜热,  $T_{\text{lig}}$  为材料的液相线温度,  $T_{\text{sol}}$  为材料的固相线温度, Q235 的等效比热如表 4 所示 [8].

在考虑了相变潜热的影响之后, Q235 的比热表达式如下:

$$C_s = C_p, \quad (T < T_{\text{sol}}) \text{ 或 } (T > T_{\text{lig}}),$$

$$C_s = C_p + C_{\text{eff}}, \quad (T_{\text{sol}} \leq T \leq T_{\text{lig}}), \quad (9)$$

式中  $C_s$  为计算中使用的比热. 当材料温度低于固相线温度或者高于液相线温度时不考虑相变等效比热,  $C_s$  的取值为材料本身比热. 而当材料温度处于固相线温度与液相线温度之间时,  $C_s$  的取值为材料本身比热与相变等效比热之和.

表 3 Q235 热物性参数

温度 / °C	热传导率 / W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	比热容 / J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>	密度 / kg·m <sup>-3</sup>
20	50	460	7800
250	45	480	7700
500	40	530	7610
750	27	675	7550
1000	30	670	7490
1500	35	660	7350
1700	140	780	7300
2500	142	820	7090

表 4 Q235 等效比热

材料	$H/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	$T_{\text{lig}}/\text{°C}$	$T_{\text{sol}}/\text{°C}$	$C_{\text{eff}}/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$
Q235	267.21	1514	1473	6517

#### 4 模拟结果分析及验证

焊接过程中, 焊缝截面形状主要受熔池形态的影响, 而熔池形态则是由熔池中热量的传导和对流决定的 [9]. 由于模型中没有考虑电弧力对熔池的挖掘作用和熔池内液态金属的流动, 为了使模型更加接近真实焊接过程并得到更加准确的温度场结果, 模型中将熔池部位材料的热传导率加大以模拟熔池内的液态金属对流传热以及电弧力对熔池的

挖掘作用. 图 3 是旁路耦合电弧焊焊缝横截面图, 图 3(a) 为模拟结果, 图 3(b) 为试验结果. 从图中可以看出, 焊缝横截面的模拟结果与试验结果基本一致, 这表明所建立的模型能够反映旁路耦合电弧焊的特点.

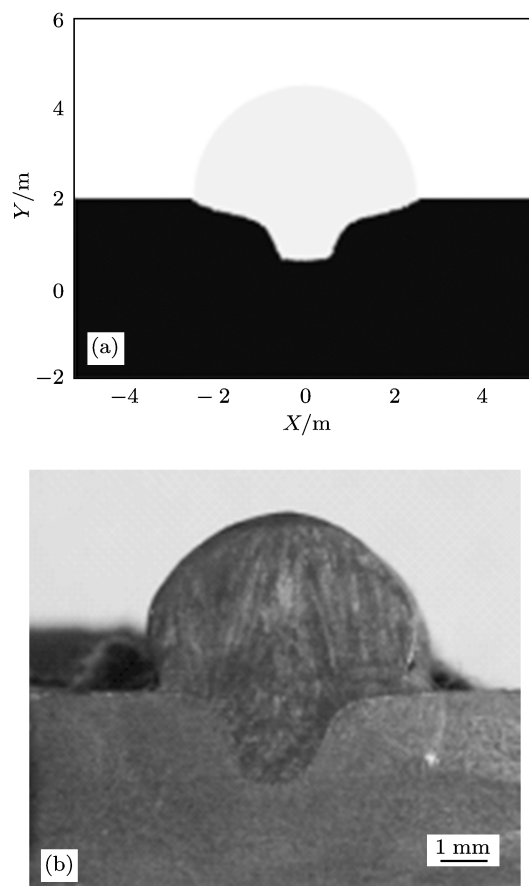


图 3 焊缝横截面图 (a) 模拟结果 (b) 试验结果

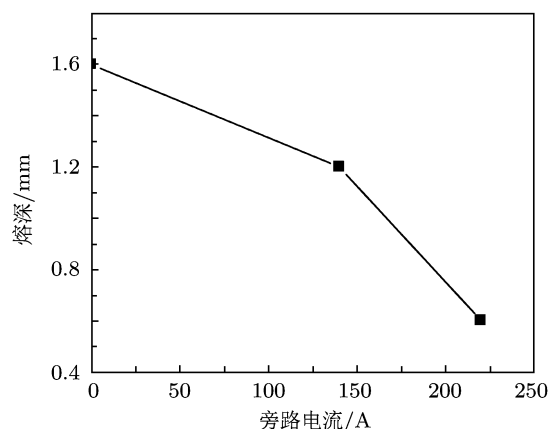


图 4 熔深模拟结果

为了分析焊接参数对焊缝熔深的影响, 将不同旁路电流下焊缝熔深的模拟结果进行比较, 如图 4 中所示. 从图中可以看出, 当仅用 GMAW 焊接时,

焊缝熔深为 1.6 mm, 当旁路电流为 140 A 时, 焊缝熔深为 1.2 mm, 而当旁路电流为 220 A 时, 焊缝熔深为 0.6 mm. 模拟结果表明, 总电流相同的情况下使用旁路耦合电弧焊可以显著减小焊缝熔深, 并且旁路电流越大焊缝熔深越小.

图 5 是一组旁路耦合电弧焊熔深的试验结果, 试验中焊接总电流为 397 A 不变. 从图中可以看出, 随着旁路电流从 40 A 增加到 120 A, 焊缝熔深从 2.49 mm 减小到 1.04 mm. 通过图 4 与图 5 的比较可以看出, 由模拟得出的熔深随旁路电流的变化趋势与试验结果是一致的.

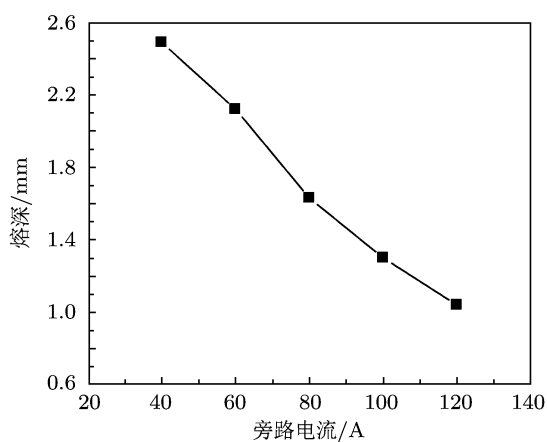


图 5 焊缝熔深试验结果

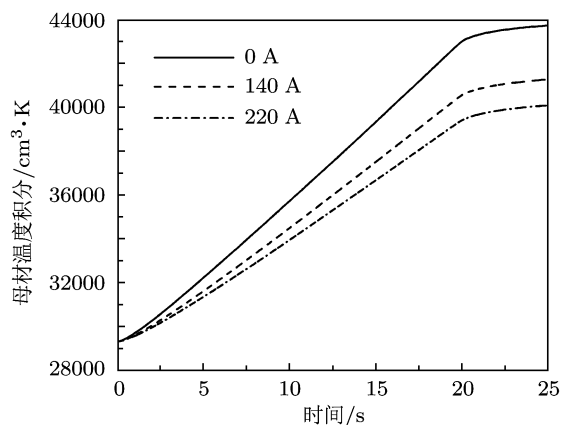


图 6 母材内温度积分随时间变化情况

在工件材料以及焊接环境相同的条件下, 可以使用母材温度的上升幅度来衡量母材的热输入. 图 6 为不同旁路电流下母材温度在母材范围内的积分随时间的变化情况. 从图中可以看出, 在 0 s 到 20 s 之间时母材热输入迅速升高, 而在 20 s 之后母材热输入的增加速率明显减缓. 这是因为焊接过程在第 20 s 时结束, 20 s 之后母材的热输入来自堆高向母材的热传导. 模拟结果表明, 总电流相同的情况下随着旁路电流的增加母材的热输入

随之降低.

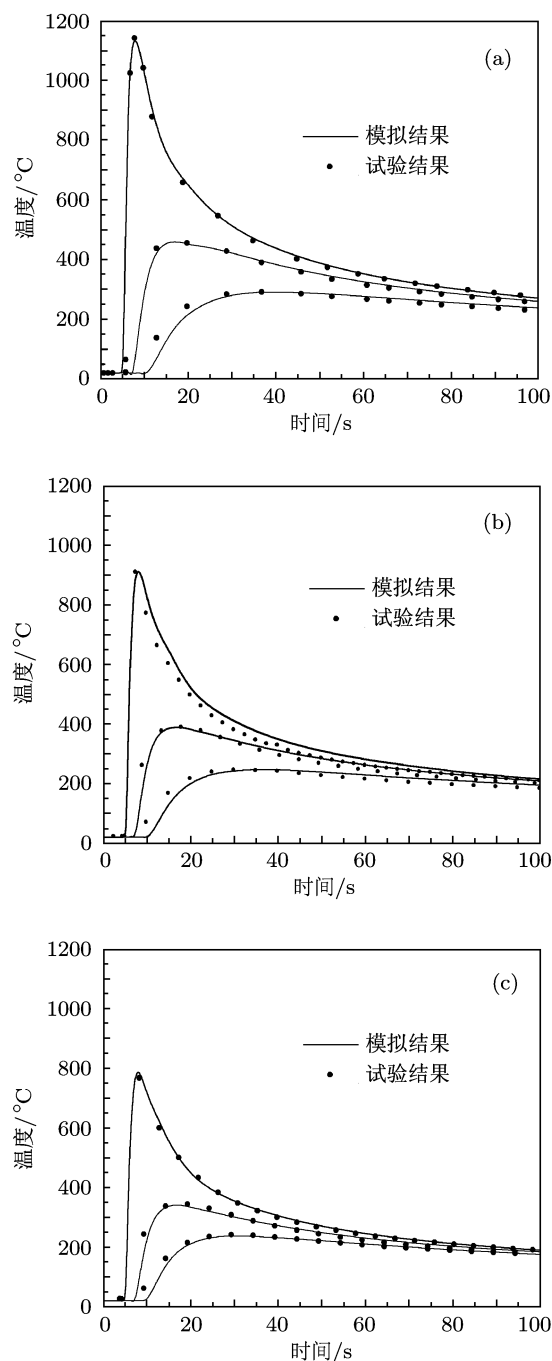


图 7 特征点焊接热循环曲线 (a) 旁路电流为 0 A; (b) 旁路电流为 140 A; (c) 旁路电流为 220 A

为了验证所建立的旁路耦合电弧焊温度场模型的合理性, 进行了与模型中相同条件下的实际焊接试验. 使用国产华意隆 NBC-630-S 焊机进行堆焊试验, 焊丝牌号为 CHT711, 焊接过程中采用氩气保护, 保护气流量为 12 L/min. 为了全面的反映工件的温度场情况, 从工件背面选取了距离焊缝中心距离分别为 1 mm, 10 mm 和 20 mm 的三个点 A, B, C 作为特征点, 并且特征点连线与焊缝的夹角为 30°.

焊接过程中使用 K 型镍铬 - 镍硅热电偶丝采集工件背面对应特征点的焊接热循环曲线, 并与相应的模拟结果进行比较, 结果如图 7 中所示.

从图 7 中的模拟结果可以看出, 随着熔池的靠近, 特征点温度迅速升高直至达到峰值温度, 之后随着熔池的远离特征点温度随之逐渐降低. 通过比较不同旁路电流下的特征点温度可以发现, 随着旁路电流的增大, 特征点温度随之降低, 其中 A 点温度降幅最大, C 点温度降幅最小. 模拟结果表明, 随着旁路电流的增大, 母材的热输入随之降低, 且越靠近焊缝热输入降幅越大. 而通过对模拟结果与试验结果的比较可以看出, 不同参数下的模拟结果与试验结果基本一致. 这表明旁路耦合电弧焊温度场模型是合理的, 并且根据旁路耦合电弧焊特点所建

立的热源模型能够正确反映焊接参数与母材热输入之间的关系.

## 5 结论

1. 不同焊接参数下对旁路耦合电弧焊工件温度场的模拟结果表明, 在焊接总电流不变的基础上, 母材的热输入会随着旁路电流的增加而降低, 并且越靠近焊缝母材热输入的降幅越大.

2. 特征点焊接热循环曲线的模拟结果与试验结果基本一致, 文中所建立的温度场模型是合理的, 根据旁路耦合电弧焊特点建立的热源模型能够正确反映焊接参数与母材热输入之间的关系.

- 
- [1] Zhang Y M, Jiang M, Lu W 2004 *Welding Journal* **83** 39
- [2] Shi Y, Liu X P, Zhang Y M 2008 *Welding Journal* **87** 229
- [3] Wu C S, Zhang M X, Li K H, Zhang Y M 2007 *Acta Metallurgica Sinica* **43** 663 (in Chinese) [武传松, 张明贤, 李克海, 张裕明 2007 金属学报 **43** 663]
- [4] Liu H, Ke F J, Pan H, Zhou M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 407 (in Chinese) [刘浩, 柯孚久, 潘晖, 周敏 2007 物理学报 **56** 407]
- [5] Zhang M X, Wu C S, Li K H, Zhang Y M 2007 *Transactions of the China Welding Institution* **28** 33 (in Chinese) [张明贤, 武传松, 李克海, 张裕明 2007 焊接学报 **28** 33]
- [6] Brickstad B, Josefson B L 1998 *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **75** 11
- [7] Wu C S 2007 *Welding Thermal Processes and Weld Pool Behaviors* (Beijing: China Machine Press) p122—124 (in Chinese) [武传松 2007 焊接热过程与熔池形态 (北京: 机械工业出版社) 第 122—124 页]
- [8] Edson C S 2006 *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **46** 1459
- [9] Lu S P, Dong W C, Li D Z, Li Y Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** s95 (in Chinese) [陆善平, 董文超, 李殿中, 李依依 2009 物理学报 **58** s95]

# Numerical simulation of temperature field of DE-GMAW and its comparison with experimental measurements\*

Shi Yu<sup>1)†</sup> Han Ri-Hong<sup>2)</sup> Huang Jian-Kang<sup>2)</sup> Fan Ding<sup>1)</sup>

1) (State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

2) (Key Laboratory of Non-ferrous Metal Alloys and processing, The Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(Received 23 March 2011; revised manuscript received 3 May 2011)

## Abstract

Based on the features of DE-GMAW (double electrode gas metal arc welding), a new hybrid heat-source model that is suited for the DE-GMAW is established. Using this heat-source model, the temperature fields of DE-GMAW with different welding parameters are simulated. According to the simulation results with different welding parameters, in this article we analyze the influence of welding parameters on the heat input of base metal in DE-GMAW. To verify the rationality of the hybrid heat-source model of DE-GMAW, the simulation results of the temperature field are compared with the results obtained from the experiment that is carried out under the same condition. The research results indicate that under the same total current, the heat input of base metal decreases gradually with the increase of by-pass current. Moreover, the closer to the welding line the greater the decrease rate of the heat input of base metal is. The study and the comparison of the thermal cycle curve of measured points show that the simulation results are in good agreement with the experimental results. These results indicate that the temperature field model is accurate and the hybrid heat-source model is reasonable.

**Keywords:** DE-GMAW, hybrid heat-source model, welding temperature field, heat input of base metal

**PACS:** 02.60. Cb

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50805073), the Prominent Youth Foundation of LUT (Grant No. Q200901), and the Key Project of Chinese Ministry of Education, China (Grant No. 210229).

† E-mail: shiyu73@gmail.com