

# 基于小孔形状的 TCS 不锈钢激光 +GMAW-P 复合焊热场模型 \*

张转转<sup>1)</sup> 胥国祥<sup>1,2)</sup> 武传松<sup>1)</sup>

1) 山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061

2) 江苏科技大学材料科学与工程学院, 镇江 212003

**摘要** 为合理描述激光能量在小孔内的分布特征, 采用光线追踪法处理光线在小孔内的多次反射和孔壁的 Fresnel 吸收, 对线热源小孔模型做出了改进. 根据小孔形状尺寸的计算结果, 确定激光焊体积热源分布参数. 将标定后的激光焊体积热源分布参数应用于激光 + 熔化极脉冲电弧 (激光 +GMAW-P) 复合焊的组合式体积热源模型, 对 TCS 不锈钢复合焊准稳态温度场进行了数值分析. 开展了 TCS 不锈钢复合焊工艺实验, 将复合焊焊缝形状尺寸的模拟结果与实测结果进行了对比, 验证了所建立的复合焊热场模型. 基于小孔形状的复合焊热场模型能较好地模拟 TCS 不锈钢复合焊温度分布与焊缝成形. 利用该模型计算了不同工艺条件下 TCS 不锈钢焊接 HAZ 形状尺寸以及 HAZ 内不同位置处的热循环曲线, 分析了 TCS 不锈钢复合焊的热循环特征, 为接头组织与性能的预测分析奠定了基础.

**关键词** 小孔形状, 复合焊, TCS 不锈钢, 热场模型, 热循环

**中图分类号** TG456.9

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(2011)11-1450-09

## THERMAL FIELD MODEL FOR LASER+GMAW-P HYBRID WELDING OF TCS STAINLESS STEEL BASED ON THE PREDICTED KEYHOLE SHAPE

ZHANG Zhuanzhuan<sup>1)</sup>, XU Guoxiang<sup>1,2)</sup>, WU Chuansong<sup>1)</sup>

1) Key Lab for Liquid-Solid Structure Evolution and Materials Processing (Ministry of Education), Shandong University, Jinan 250061

2) School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003

Correspondent: WU Chuansong, professor, Tel: (0531)88392711, E-mail: wucs@sdu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51074098)

Manuscript received 2011-05-20, in revised form 2011-08-09

**ABSTRACT** In order to describe the distribution characteristics of laser energy inside the keyhole reasonably, the ray tracing method is used to deal with the multiple reflections of laser beam in the keyhole and Fresnel absorption on the keyhole wall. The line-source based keyhole model is modified. The predicted shape and size of the keyhole are employed to determine the distribution parameters of the volumetric heat source for laser beam welding, which are applied to the combined heat source model for hybrid laser+ pulsed gas metal arc welding (laser+GMAW-P) process. Based on such an adaptive heat source model, the numerical analysis of quasi-steady state temperature field in hybrid welding of TCS stainless steel is conducted. The hybrid welding experiments of TCS stainless steel are carried out, and the predicted weld shape and size are compared with the measured results to validate the established thermal model for hybrid welding. It is found that the thermal model for hybrid

\* 国家自然科学基金资助项目 51074098

收到初稿日期: 2011-05-20, 收到修改稿日期: 2011-08-09

作者简介: 张转转, 女, 1987 年生, 博士生

DOI: 10.3724/SP.J.1037.2011.00319

welding of TCS stainless steel based on the predicted keyhole shape can well simulate the temperature profiles and weld formation. Besides, the thermal model is used to calculate the shape and dimension of heat-affected zone (HAZ) and thermal cycles at different positions in HAZ under different process conditions, and the characteristics of thermal cycles of TCS stainless steel in hybrid welding are analyzed, which lay the foundation for the prediction of microstructure and properties of TCS stainless steel weld joints.

**KEY WORDS** keyhole shape, hybrid welding, TCS stainless steel, thermal model, thermal cycle

TCS 不锈钢是我国开发的新型铁路货车车体专用铁素体不锈钢<sup>[1]</sup>。但是,在焊接过程中,TCS 不锈钢焊接热影响区(HAZ)内,特别是近焊缝区晶粒会急剧长大,进而使近焊缝区的金属塑性大幅度降低,引起焊接接头的脆化,造成接头动载力学性能严重减弱、甚至不能满足使用要求<sup>[2]</sup>。因此,TCS 不锈钢的焊接需要严格控制热输入,其对焊接热源的特性有很高的要求。各类常规焊接工艺不能完全满足 TCS 不锈钢焊接加工的质量要求<sup>[1,3]</sup>。作为近年发展起来的新型焊接工艺方法—激光+熔化极脉冲电弧(GMAW-P)复合热源焊接,将激光焊和 GMAW-P 电弧焊两者的优点集成于一体,具有热源集中、热影响区窄、热输入低、焊接速度快等优点<sup>[4]</sup>,具备解决 TCS 不锈钢铁路货车焊接加工制造问题的潜力。然而,复合焊工艺将激光和 GMAW 电弧这两个热源复合在一起,两个热源的相互作用机理以及所表现出的复合热源特性对 TCS 不锈钢焊接热影响区的尺寸、晶粒长大敏感性、热循环特征的影响机制,尚不清楚。目前,国内外对复合热源焊接的研究仍主要集中在焊接工艺本身,并有了实际的应用,对于这一新型焊接工艺本身的热源特性和热循环特征等基础性和机理性问题,还研究得较少<sup>[4-7]</sup>。胥国祥等<sup>[8-10]</sup>从激光焊热源作用的特点出发建立了 4 种适用的激光体积热源模型,并在此基础上提出了四种复合焊组合式体积热源模型,对低碳钢试件复合焊焊缝成形进行了数值模拟,结果与实测数据较为吻合。但在对焊接温度场模拟过程中,需要根据焊缝形状与尺寸来选取激光体积热源的分布参数。

本文将复合焊新工艺应用于 TCS 不锈钢的焊接。首先对现有激光焊线热源小孔模型做出改进,利用改进模型计算出小孔的形状与尺寸;然后,根据小孔形状与尺寸的预测值,确定激光焊体积热源的分布参数;再将标定后的激光焊体积热源模型与 GMAW-P 热源模型相结合,构建出适用的复合焊组合式体积热源模型。利用数值模拟技术对复合热源焊接时的 HAZ 形状和尺寸以及热循环特征进行定量分析。

### 1 小孔形状尺寸的确定

#### 1.1 线热源小孔模型

激光深熔焊的主要特征是小孔机制,激光能量主要通过小孔壁加热焊件。因此,激光热源作用区域与小孔之间必定存在着某种关系,可以依据小孔尺寸确定热源分布参数。但由于小孔行为是一个极其复杂的热-力耦合现象,

难以精确计算。到目前为止,这一问题仍没有得到很好地解决<sup>[5-7]</sup>。Kaplan<sup>[11]</sup>通过考虑工件不同厚度处小孔壁吸收激光能量速率的不同,根据小孔壁上的局部能量平衡,建立了线热源小孔模型。如图 1 所示,在试件纵截面( $xoz$ 面)内,根据局部孔壁吸收的激光能量与通过固体热传导输入焊件内部的能量以及蒸发热损失之间的能量守恒,逐点确定小孔前壁和后壁的坐标。局部小孔壁吸收的能量  $I_a$  与通过固体热传导传入焊件内部的能量  $q_v$  和蒸发热损失  $q_{evp}$  之间能量守恒,可由下式表示<sup>[11]</sup>:

$$\tan\theta = \frac{q_v}{I_a - q_{evp}} \tag{1}$$

式中,  $\theta$  是图 1 中所示的局部小孔壁的倾斜角。

纵截面内流入小孔前、后壁的热量分别为<sup>[11]</sup>,

$$q_v(x_f, 0) = (T_v - T_\infty)kPe' \left[ 1 + \frac{K_1(Pe'x_f)}{K_0(Pe'x_f)} \right] \tag{2}$$

$$q_v(x_r, 0) = (T_v - T_\infty)kPe' \left[ -1 + \frac{K_1(Pe'x_r)}{K_0(Pe'x_r)} \right] \tag{3}$$

式中,  $x_f$ ,  $x_r$  分别为小孔前、后壁与局部线热源之间的距离。  $T_v$  为沸点温度,  $T_\infty$  为环境温度,  $k$  为导热系数,  $K_1(\cdot)$  为第二类一阶修正 Bessel 函数,  $K_0(\cdot)$  为第二类零阶修正 Bessel 函数,  $Pe'$  为 Peclet 数 ( $Pe' = 0.5v_0/\lambda_d$ ,  $v_0$  为焊接速度,  $\lambda_d$  为热扩散系数)。

$q_{evp}$  可用下式简化计算:

$$q_{evp} = m_{er}L_b \tag{4}$$

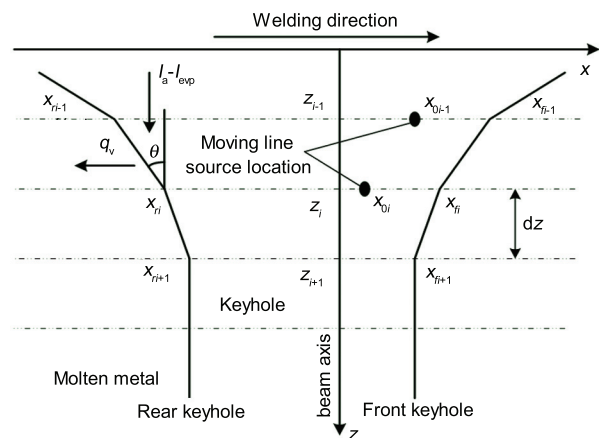


图 1 局部小孔壁能量守恒示意图  
Fig.1 Schematic of local energy balance of keyhole

式中,  $m_{er}$  为蒸发率,  $L_b$  为蒸发潜热.

文献 [11] 中的线热源模型在确定局部小孔壁吸收的能量  $I_a$  时, 忽略了光线在小孔内多次反射过程中吸收光线的孔壁的具体位置的计算, 仅通过将小孔假定为锥体, 估算光线经多次反射后被孔壁吸收的总的能量分数, 这种处理光线多次反射和 Fresnel 吸收的方式过于简单, 不能合理地描述激光能量在小孔内的分布特征. 因此, 利用此类模型对光线反射次数较多、孔深较大的小孔进行模拟计算时, 小孔尺寸的计算结果与实验结果差别较大, 从而限制了线热源小孔模型的应用.

### 1.2 改进的小孔模型

针对 Kaplan 线热源小孔模型存在的上述问题, 本文引入光线追踪法 [12] 来更好地描述光线的多次反射和 Fresnel 吸收, 对式 (1) 中的局部小孔壁吸收的激光能量密度项进行改进, 提高激光能量密度在小孔壁上分布的合理性, 以进一步提高模型的适用性和准确性.

小孔壁上局部某处吸收的能量  $I_a$  是直接入射和反射到该处的所有光线的能量密度之和, 如下式所示:

$$I_a = \sum_{i=1}^N \alpha(\phi_m) I_i \quad (5)$$

式中,  $\alpha(\phi_m)$  为光线第  $m$  次入射到小孔壁时的 Fresnel 吸收系数,  $I_i$  为某一条光线在第  $m$  次入射到小孔壁局部某处时的激光能量密度,  $N$  为直接入射和通过多次反射后入射到小孔壁某处总的光线数量.

Fresnel 吸收系数由光线的入射角度计算得到, 即:

$$\alpha(\phi) = 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{1 + (1 - \varepsilon \cos \phi)^2}{1 + (1 + \varepsilon \cos \phi)^2} + \frac{\varepsilon^2 - 2\varepsilon \cos \phi + 2\cos^2 \phi}{\varepsilon^2 + 2\varepsilon \cos \phi + 2\cos^2 \phi} \right] \quad (6)$$

$$\varepsilon^2 = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + [\varepsilon_1^2 + (\sigma_{st}/\omega\varepsilon_0)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

式中,  $\sigma_{st}$  为材料的电导率,  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  分别为材料和等离子体的介电常数,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $\omega$  为激光的角频率,  $\phi$  为激光入射角.

光线多次反射的过程如图 2 所示, 根据几何光学理论可得  $P^k$  点处入射光线与反射光线的夹角  $\alpha^k$  为:

$$\alpha^k = \pi - 2(\theta_0^k + \theta^k) \quad (8)$$

$$\theta_0^k = 2 \sum_{m=1}^{k-1} \theta^m \quad (9)$$

式中,  $\theta^n$  为光线第  $n$  次反射处局部小孔壁角度,  $\theta^k$  为光线第  $k$  次反射处局部小孔壁角度.

由于计算时需将工件沿厚度方向离散, 可能找不到

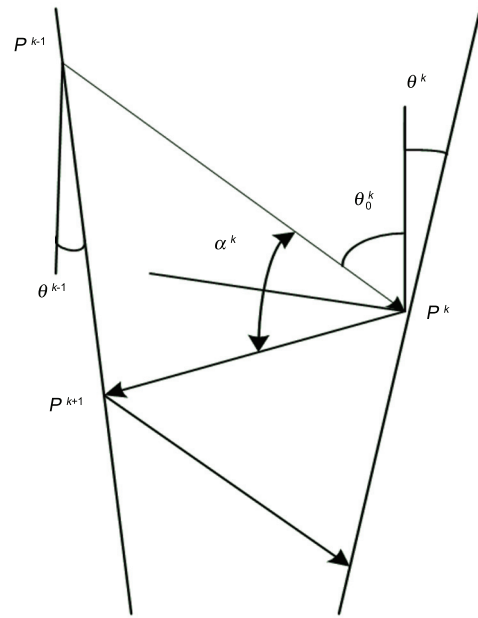


图 2 光线在小孔壁上多次反射的原理示意图

Fig.2 Schematic illustration of the principle of multiple reflections of laser beam on the keyhole wall

$P^{k+1}$  点使得入射光线和反射光线的夹角正好等于  $\alpha^k$ , 因此要选用与其最近的点  $P_m^k$  点代替它, 确定方法如下:

$$|\alpha_m^k - \alpha^k| \leq |\alpha_{m-1}^k - \alpha^k| \quad (10)$$

$$|\alpha_m^k - \alpha^k| \leq |\alpha_{m+1}^k - \alpha^k| \quad (11)$$

式中,  $\alpha_{m-1}^k$ ,  $\alpha_m^k$  和  $\alpha_{m+1}^k$  分别是光线反射到点  $P_{m-1}^k$ ,  $P_m^k$  和  $P_{m+1}^k$  时入射光线与反射光线之间的夹角.  $\alpha_m^k$  可由下式计算得到:

$$\alpha_m^k = \arccos \frac{(\vec{P}_m^k - \vec{P}^k) \cdot (\vec{P}^{k-1} - \vec{P}^k)}{|\vec{P}_m^k - \vec{P}^k| |\vec{P}^{k-1} - \vec{P}^k|} \quad (12)$$

式中,  $\vec{P}_m^k$ ,  $\vec{P}^k$  和  $\vec{P}^{k-1}$  分别为  $P_m^k$ ,  $P^k$  和  $P^{k-1}$  的矢量.

对于某条光线在第  $m$  次入射到小孔壁局部某处时的激光能量密度, 可以由下式表示:

$$I_i = \exp(-\beta l_m) \prod_{k=1}^{m-1} (1 - \alpha(\phi_k)) I(r_{i,1}, l_1) \quad (13)$$

式中,  $\alpha(\phi_k)$  是光线第  $k$  次入射到小孔壁时的吸收率, 入射角  $\phi_k = \alpha^k/2$ ,  $l_1$  表示第一次入射到小孔壁时光线在等离子体中经过的路径长度,  $l_m$  表示光线第  $m$  次入射到小孔壁时光线在等离子体中经过的总的路径长度,  $r_{i,1}$  是光线第 1 次入射到小孔壁上时的点与激光束轴线之间的径向距离.

### 1.3 小孔形状的计算步骤

首先确定焊件上表面小孔前、后壁位置, 假定光线在焊件上表面局部孔壁只反射一次便离开小孔, 即上表面小

孔前、后壁的倾斜角度为  $\pi/4$ ，算出小孔的初始形状。然后在计算得到的小孔内利用光线追踪法计算激光能量密度的分布，再利用能量平衡确定新的小孔形状，反复迭代计算直到收敛，得出最终的小孔形状。计算流程如图 3 所示。

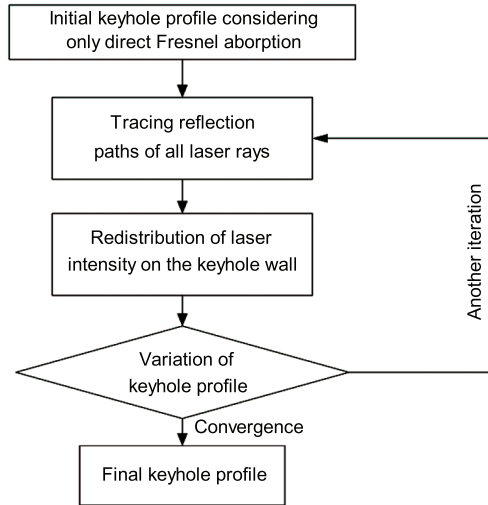


图 3 计算小孔形状的流程图  
Fig.3 Flow chart of calculating keyhole profile

### 2 基于小孔形状尺寸的激光体积热源参数标定

激光 +GMAW-P 复合热源焊接的热输入主要包括 3 部分：激光、电弧和熔滴热。为了更好地描述这 3 部分的热输入，本文采用组合式体积热源模型<sup>[8-10]</sup>来进行模拟计算。但是，组合式体积热源模型涉及热源分布参数多，为减少人为选取参数的数量，利用已计算出的小孔尺寸对激光体积热源的分布参数进行标定。激光体积热源  $q_l(r, z)$  采用峰值指数递增 - 锥体热源模型，如下式所示：

$$q_l(r, z) = Q_0 \exp\left(\frac{\ln(\chi)}{z_i - z_e}(z - z_e)\right) \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2(z)}\right) \quad (14)$$

$$r_0(z) = \frac{r_e - r_i}{z_e - z_i} z + \frac{r_i z_e - r_e z_i}{z_e - z_i} \quad (15)$$

$$Q_0 = 3\eta P \ln(\chi) / (\pi(1 - e^{-3})(z_i - z_e))$$

$$\left(r_e^2 - r_i^2 \chi - 2 \frac{r_i - r_e}{\ln(\chi)}(r_e - r_i \chi - \frac{r_i - r_e}{\ln(\chi)}(1 - \chi))\right) \quad (16)$$

式中， $z_e, z_i$  为热源上、下表面  $z$  轴坐标，热源高度  $H = z_e - z_i$ ， $r_e, r_i$  分别为热源上、下表面半径， $\chi$  为热源上、下表面热流峰值比例系数。

利用已知的小孔尺寸来确定热源分布参数  $r_e, r_i$  和  $H$ ，即：

$$r_e = L_K/2 \quad (17)$$

$$r_i = r_e/2 \quad (18)$$

$$H = H_K \quad (19)$$

式中， $L_K$  是焊件上表面小孔的长度， $H_K$  是小孔的深度。

### 3 TCS 不锈钢复合热源焊接的热场模型

本文主要考察复合热源对 TCS 不锈钢焊接热影响区内热循环特征及其形状尺寸的影响。为简化计算，模拟过程仅考虑适用体积热源和准稳态条件下的焊接热传导问题。复合焊接过程中，激光枪在前，GMAW-P 焊枪在后；激光枪前倾  $10^\circ$ ，两枪夹角  $40^\circ$ ，光 - 丝间距为 2.6 mm。以焊丝轴线与工件上表面的交点为原点建立移动坐标系  $(x, y, z)$ ， $x$  轴沿焊接方向， $y$  轴垂直于焊接方向， $z$  轴沿工件的厚度方向。则热传导方程为：

$$\rho c_p \left(-v_0 \frac{\partial T}{\partial x}\right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + q(x, y, z) \quad (20)$$

式中， $\rho$  为工件的密度， $c_p$  为定压比热容， $v_0$  为焊接速度， $T$  为温度， $k$  为导热系数。 $q(x, y, z)$  为组合式体积热源。

在工件上表面：

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = q_s - q_{cr} - q_{evp} \quad (21)$$

$$q_{cr} = \alpha_{cr}(T - T_\infty) \quad (22)$$

式中， $q_s$  为工件上表面热流， $q_{cr}$  为对流和辐射而引起的热损失， $\alpha_{cr}$  为对流和辐射边界的综合散热系数。

在工件下表面：

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = -q_{cr} \quad (23)$$

工件前后侧面：

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -q_{cr} \quad (24)$$

工件左右侧面：

$$\frac{\partial T}{\partial y} = -q_{cr} \quad (25)$$

组合式体积热源模型是对电弧、过热熔滴和激光束能量的恰当描述，激光热流密度用上述的激光体积热源  $q_l(r, z)$  来描述；对以脉冲方式工作的电弧热，采用两个分布参数不同的双椭圆平面分布热源来描述峰值期间的电弧热流  $q_{ap}(x, y)$  和基值期间的电弧热流  $q_{ab}(x, y)$ ；过热熔滴的热流密度  $q_d(x, y, z)$  用热量均匀分布的双椭圆体模型来描述<sup>[10]</sup>。所以总的热流密度为这 3 部分热输入之和，即

$$q(x, y, z) = q_l(r, z) + (q_{ap}(x, y) + q_{ab}(x, y)) + q_d(x, y, z) \quad (26)$$

### 4 计算结果与实验验证

利用上述改进的小孔模型计算出相应实验条件下的小孔形状和尺寸，工艺条件如表 1 所示。图 4 给出了实验

表 1 激光 +GMAW-P 复合热源焊工艺参数

Table 1 Process parameters in laser +GMAW-P hybrid welding (laser-wire distance 2.6 mm, laser-wire angle 40°, location of laser focus 2 mm, focal diameter 0.4 mm, wire diameter 1.2 mm, wire extension 18 mm)

Test No.	Average current $\bar{I}$ , A	Average voltage $\bar{U}$ , V	Welding speed $v_0$ , m/min	Laser power $P$ , kW	Wire feed rate $v_m$ , m/min
1	185	22.4	1.2	2.0	6.6
2	163	20.5	1.0	2.4	5.5
3	199	22.4	0.8	2.0	6.6

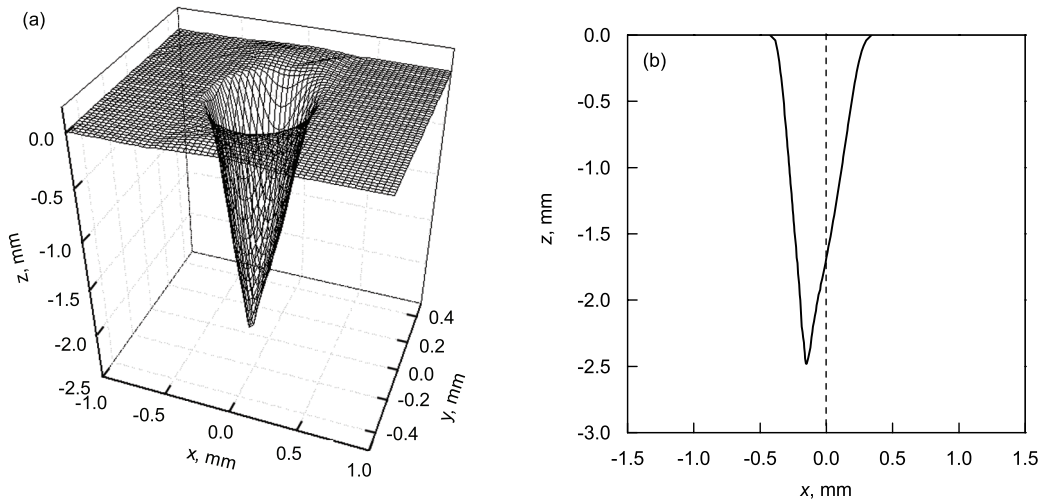


图 4 小孔的三维形状和纵截面形状

Fig.4 3D keyhole shape (a) and longitudinal cross-section of keyhole (b) (test No.1)

No.1 条件下的小孔形状尺寸的计算结果. 图 4a 是小孔的三维形状, 图 4b 是小孔的纵截面形状. 计算出的小孔形状是非对称的, 小孔呈窄而长的形状, 小孔前壁的倾斜角度明显大于后壁的倾斜角度, 激光轴与前壁相交, 并且交点靠近孔壁中部. 这是由于在激光焊过程中, 小孔前壁附近的金属没有经过加热, 温度很低; 而小孔后壁附近为熔融金属, 温度较高, 因此小孔前壁附近的温度梯度远大于小孔后壁, 相应的前壁的热传导程度要比后壁强烈, 为保证孔壁上的能量平衡, 前壁要比后壁具有较大的倾斜角度来截获更多的能量以平衡热传导损失. 计算结果与焊接过程中小孔发生弯曲的现象较吻合. 利用已计算出的小孔尺寸确定出实验 No.1 条件下的激光体积热源分布参数为:  $r_e=0.4$  mm,  $r_i=0.2$  mm,  $H=2.5$  mm. 其它工艺条件下的体积热源分布参数依此确定. 需要注意的是小孔形状的确定过程中没有考虑电弧和激光之间的相互作用. 通过计算发现, 基于小孔尺寸标定激光体积热源上下表面半径对模拟结果几乎没有影响, 而标定热源高度对模拟结果存在一定的影响, 可以通过提高热流峰值递增比例系数  $\chi$  来间接地反应小孔吸收电弧热量的增加.

图 5 给出了改进模型计算结果和原有模型计算结果的对比. 可以看出原模型由于通过 Fresnel 机制估算小孔壁吸收的总的激光能量分数使得计算出的小孔深度偏大,

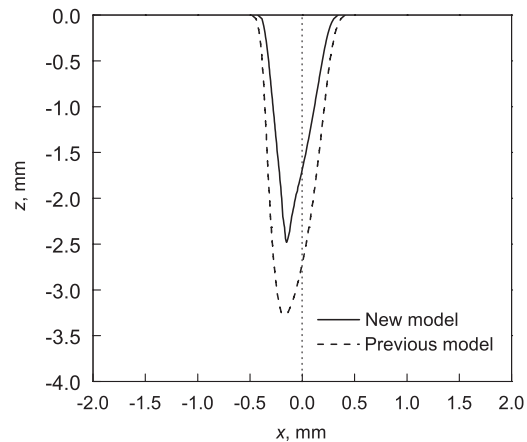


图 5 改进模型与原有模型所计算的小孔纵截面形状的比较

Fig.5 Comparison of the calculated longitudinal sections of keyhole calculated by the improved model and previous model (test No.1)

甚至大于焊缝熔深 (2.96 mm), 而且光轴与前壁的交点接近小孔底部, 从而使大量的光线直接入射到小孔后壁, 这与真实的小孔形状不符. 改进模型通过更全面地描述光线在小孔内的多次反射过程以及孔壁对激光能量的 Fresnel 吸收, 且计算过程中减少了假设条件, 模拟的小孔深度小于且接近焊缝熔深. 因此, 改进后的模型能够更合理地反

映光能密度在小孔壁上的分布特征，计算出的小孔形状更合理。然而该模型仅考虑了激光作用条件下的小孔形状，没有考虑激光与电弧相互作用对小孔形状的影响，所以该模型仍有待改进。

利用组合式体积热源模型对 3 组实验条件下的焊接温度场进行模拟计算。计算过程中，熔池表面变形和焊缝余高的计算方法与文献 [9] 相同。由于温度场相对于  $y=0$  平面对称，仅取一半的工件作为计算区域。模拟计算所用的 TCS 不锈钢钢板试件的厚度为 6 mm。将其划分为有限差分网格。在每个网格点上，将控制方程及其边界条件转化为差分方程。编制计算程序，利用有限差分法求解热传导方程。

图 6 给出了 TCS 不锈钢复合焊的上表面和纵截面的温度分布情况，其中 1763 K 是 TCS 不锈钢的熔点温度。可以看出，熔池呈扁而长的形状，熔池前部等温线高度密集，这与激光前置复合焊温度场的特点相符。图中，1503 K 是铁素体晶粒异常长大的临界温度；在熔池最宽处（上表面）或最深处（纵截面），从固相等温线（1763 K）到 1503 K 等温线沿垂直于焊接方向的距离即为粗晶区的宽度；从 1503 K 等温线到 1373 K 等温线沿垂直于焊接方向的距离为混合晶粒区的宽度；二者的宽度对 TCS 不锈钢焊接接头的质量具有重要影响。

图 7 是准稳态熔池在不同横断面上的形状。激光热源中心处 ( $x=2.6$  mm) 熔池的横断面形状明显具有激光焊熔池深宽比大的特点，熔池表面无明显变形，这是由于计算过程中未考虑小孔及其内部蒸发反作用力的影响。电弧热源中心处 ( $x=0$ ) 熔池横断面的形状具有熔宽较大、熔深较深的特点，这是激光热源、电弧热源和熔滴热源共同作用的结果；该位置熔池处在电弧的正下方，在熔滴冲击力和电弧压力的作用下熔池表面产生下凹。而电弧热源后方 ( $x=-2$  mm)，熔池横断面形状主要反映了电弧热源作用下的特点，具有较大的熔宽和较浅的熔深；由于处在熔池后部，液体表面隆起形成焊缝余高。TCS 不锈钢复合焊热场的模拟结果展示出了复合焊的工艺特点（综合了激

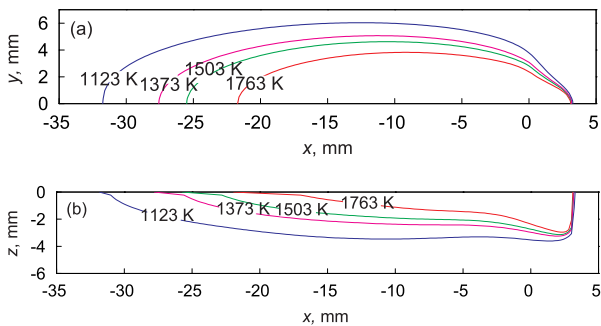


图 6 复合焊温度场的计算结果

Fig.6 Calculated temperature fields of the top surface (a) and longitudinal section (b) in the hybrid welding process (test No.1)

光焊和 GMAW-P 的优点)。

图 8 是 TCS 不锈钢复合焊焊缝横断面计算结果与实验结果的比较。图中也用虚线划出了小孔横断面的预测结果。可以看出，基于小孔形状尺寸的热场模型，能较好地模拟焊缝横断面形状，TCS 不锈钢复合焊焊缝成形的模拟结果与实测结果比较吻合。

图 9 给出了 TCS 不锈钢在 3 组不同复合焊工艺条件下的热影响区的形状尺寸。其中，热影响区的温度范围为 1123—1763 K<sup>[2]</sup>。从图中可以看出实验 No.1 条件下焊接热影响区的尺寸最小，而实验 No.3 的 HAZ 尺寸最大，实验 No.2 的介于两者之间。单位热输入决定着焊接热影响区形状尺寸的大小，激光 +GMAW-P 复合热源焊接的单位热输入应是激光和电弧的有效功率之和与焊接速度的

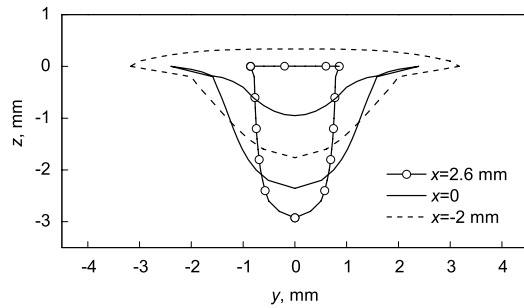


图 7 不同位置处准稳态熔池的横断面形状

Fig.7 Transverse sections of weld pool at different positions (test No.1)

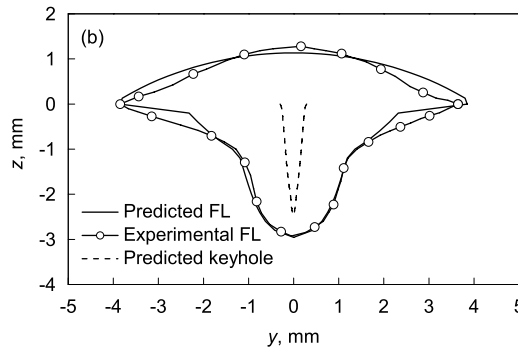
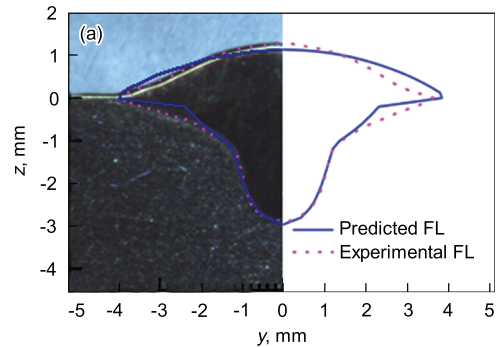


图 8 焊缝横断面形状计算结果与实验结果的比较

Fig.8 Comparison between the predicted and measured weld cross-section (test No.1)  
(a) images (b) curves

比值, 计算 3 种条件下的热输入, 得到实验 No.3 的最大 (0.356 kJ/mm), 实验 No.2 的次之 (0.266 kJ/mm), 实验 No.1 的最小 (0.225 kJ/mm), 这与热影响区的形状和尺寸的预测结果相一致.

为了更全面了解 TCS 不锈钢复合焊热影响区内的热循环特征, 计算了 TCS 不锈钢焊接 HAZ 内某些位置的热循环曲线, 计算选取位置如图 10 所示. 图 11 给出了图 10 所示位置的热循环曲线, 其中图 11a 是上表面位置 1 处某些点 ( $y$  坐标不同) 的热循环曲线. 可以看出, 距离焊缝中心的位置越近, 热循环曲线的峰值温度越高, 相应的冷却速度也越大. 图 11b 为纵截面位置 2 处某些点 ( $z$  坐标不同) 的热循环曲线, 图 11b 与图 11a 有某些相同的特征, 但也有不同之处, 即在峰值温度处快速冷却到某一温度后, 温度又有所回升, 然后再缓慢冷却. 这是因为复合焊接过

程中, 激光和电弧之间存在着光丝间距 (2.6 mm), 在峰值温度处极高的加热和冷却速度反映了激光热源加热的特点, 之后的温度回升又缓慢冷却正是电弧热源和激光热源共同作用的结果. 而焊件上表面的热循环曲线没有这一现象是因为复合焊的熔宽主要由电弧热作用决定, 而熔深主要由激光热作用决定. 图 11c 和图 11e 分别是位置 3 和 5 处的热循环曲线, 其中图 11c 中距离焊缝中心最近的点的热循环曲线具有图 11b 中热循环曲线的特点, 这是激光热源作用局部性的体现. 图 11e 中距离焊缝中心较远的点的热循环曲线具有高温停留时间长和冷却速度较慢的特点. 图 11d 为位置 4 处的热循环曲线, 距离焊件上表面较近的点的热循环曲线具有上表面热循环曲线的特点, 而距离上表面远且靠近焊缝中心的点的热循环曲线与图 11b 中的热循环曲线类似.

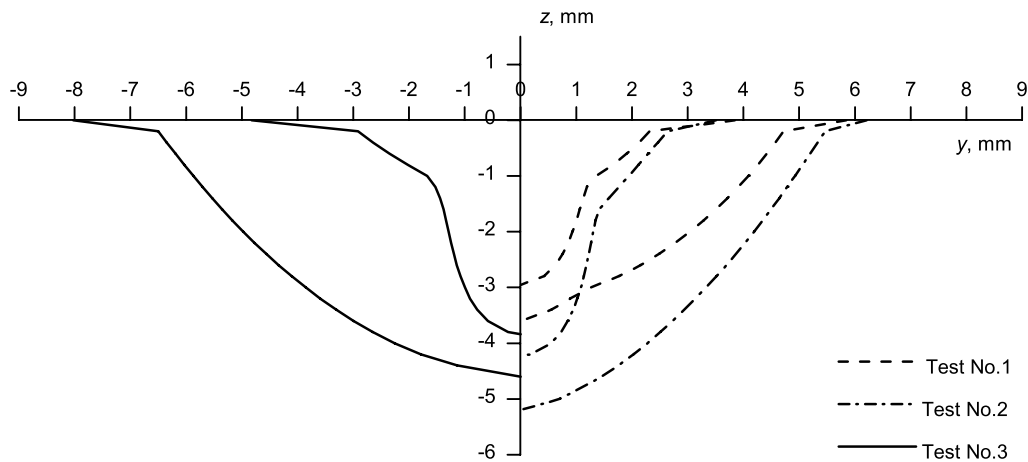


图 9 3 种工艺条件下的热影响区的形状尺寸

Fig.9 Profiles and dimensions of HAZ under three different process conditions

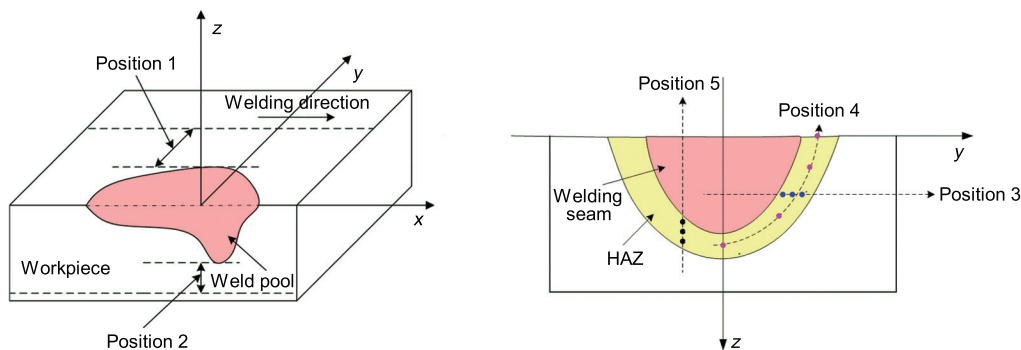


图 10 热循环计算取点位置的示意图

Fig.10 Schematic illustration of calculating positions on weldment

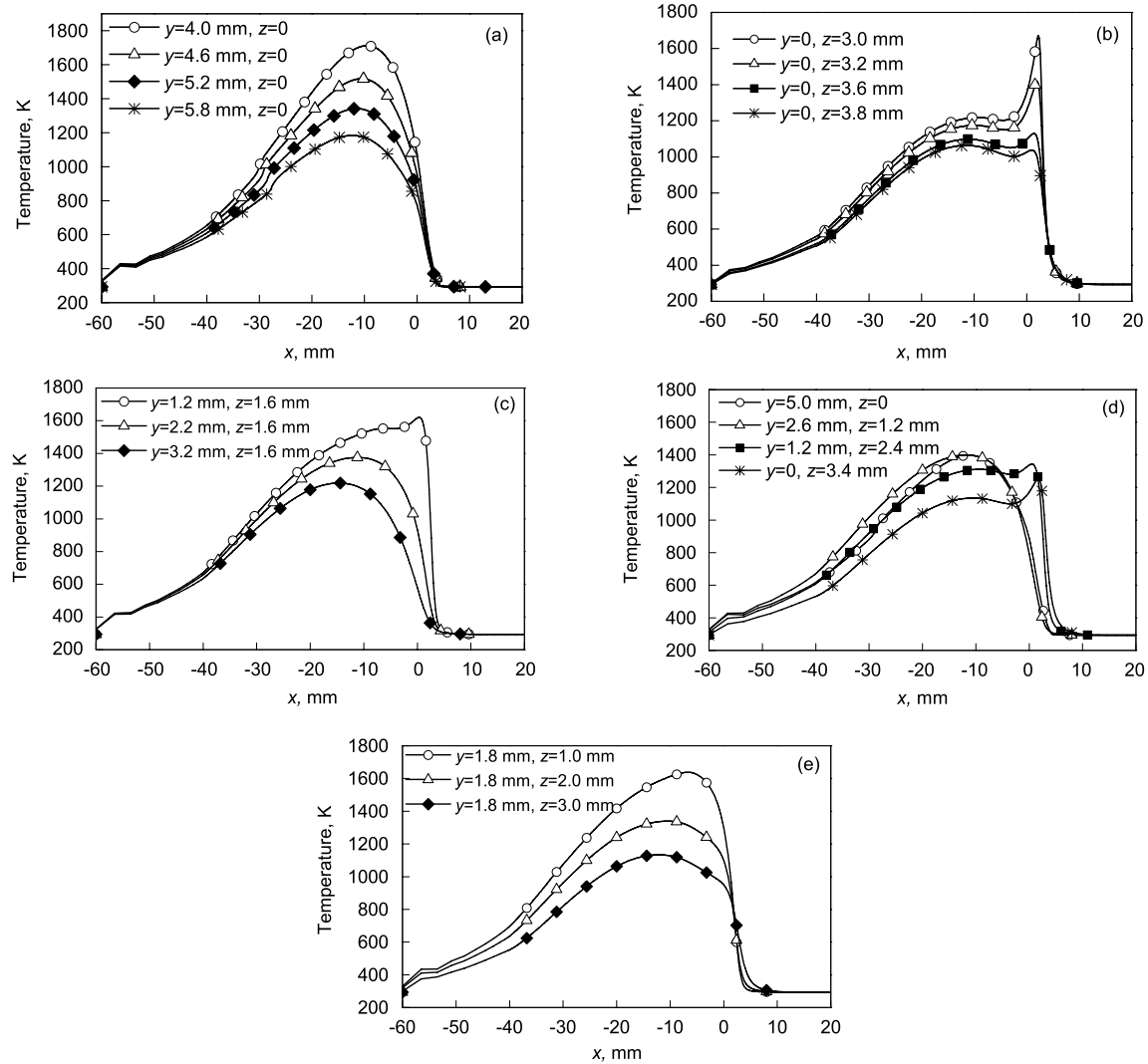


图 11 焊件不同位置处焊接热影响区内的热循环曲线

Fig.11 The thermal cycles in HAZ at different positions of the workpiece (test No.1)

- (a) thermal cycle in HAZ at position 1      (b) thermal cycle in HAZ at position 2  
 (c) thermal cycle in HAZ at position 3      (d) thermal cycle in HAZ at position 4  
 (e) thermal cycle in HAZ at position 5

## 5 结论

(1) 考虑激光能量的 Fresnel 吸收及反切致辐射吸收, 引入光线追踪法对线热源小孔模型进行了改进, 较全面地描述了激光在小孔内的多次反射过程, 准确地反映了光能密度在小孔壁上的分布特征. 根据计算出的小孔形状与尺寸, 实现了对复合焊组合式热源模型中激光体积热源分布参数的标定.

(2) 将基于小孔形状的复合焊热场模型应用于 TCS 不锈钢激光 +GMAW-P 复合热源焊接温度场的数值模拟. 复合焊缝横断面形状尺寸的数值模拟结果与实验测试数据吻合良好, TCS 不锈钢复合焊温度场模拟结果符合复合焊实际温度场的特点.

(3) 计算了 TCS 不锈钢复合焊热影响区的形状与尺寸及其热循环曲线, 分析了不同位置处的热循环特征, 为下一步的 HAZ 组织与性能预测奠定了基础.

## 参考文献

- [1] Wang B S, Ma L, Tian J S, Mao H G. *Welding*, 2008; (5): 54  
(王宝森, 马立, 田劲松, 毛惠刚. 焊接, 2008; (5): 54)
- [2] Wang L X, Song C J. *Iron Steel*, 2008; 43: 71  
(王立新, 宋长江. 钢铁, 2008; 43: 71)
- [3] Wu Y L, Li J L, Li J Q, Zhang M H. *Welding*, 2007; (12): 37  
(武永亮, 李加良, 李践桥, 张明华. 焊接, 2007; (12): 37)
- [4] Defalco J. *Welding J*, 2007; 86: 47
- [5] Mahrle A, Beyer E. *J Laser Appl*, 2006; 18: 169
- [6] Bagger C, Olsen F O. *J Laser Appl*, 2005; 17: 2



- [7] Guen E L, Carin M, Fabbro R, Coste F, Masson P L. *Int J Heat Mass Tran*, 2011; 54: 1313
- [8] Xu G X, Wu C S, Qin G L, Wang X Y, Lin S Y. *Acta Metall Sin*, 2008; 44: 478  
(胥国祥, 武传松, 秦国梁, 王旭友, 林尚扬. 金属学报, 2008; 44: 478)
- [9] Xu G X, Wu C S, Qin G L, Wang X Y, Lin S Y. *Acta Metall Sin*, 2008; 44: 641  
(胥国祥, 武传松, 秦国梁, 王旭友, 林尚扬. 金属学报, 2008; 44: 641)
- [10] Xu G X, Wu C S, Qin G L, Wang X Y, Lin S Y. *Acta Metall Sin*, 2009; 45: 107  
(胥国祥, 武传松, 秦国梁, 王旭友, 林尚扬. 金属学报, 2009; 45: 107)
- [11] Kaplan A. *J Phys*, 1994; 27D: 1805
- [12] Cho J H, Na S J. *J Phy*, 2006; 39D: 5372