

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + (z + a)^2 = b^2 \\ z \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: a, b 为球体的球心坐标, 则 $b - a$ 为熔池高度; $\sqrt{b^2 - a^2}$ 为熔池的半径, 如图2所示。

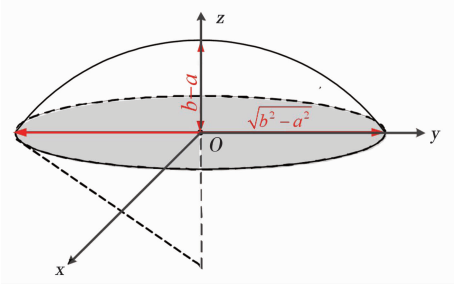


图2 熔池自由表面标准模型

Fig. 2 Standard model of weld pool surface

2.2 激光束入射线方程及入射线单位向量

为了简化计算, 激光点阵简化为 9×9 的点阵, 其中每条线间的夹角为 0.77° , 点阵行列用 i, j 表示, $i, j = -4, -3, -1 \dots, 4$, t 为变化参数。

入射线方程为

$$\begin{cases} x_{i,j} = x_0 + (\tan(0.77i))t \\ y_{i,j} = y_0 + (y_0 - \frac{z_0}{\tan(\vartheta + 0.77^\circ(j))}) \cdot t \\ z_{i,j} = z_0 + z_0 \cdot t \end{cases} \quad (2)$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 表示激光器在空间坐标系中的坐标; $(\tan(0.77i), y_0 - \frac{z_0}{\tan(\vartheta + 0.77^\circ(j))}, z_0)$ 为激光入射线向量; ϑ 为激光与水平面之间的夹角。

将入射线向量单位化, 即

$$\mathbf{I}' = \frac{\mathbf{I}}{\sqrt{(\tan(0.77i))^2 + (y_0 - \frac{z_0}{\tan(\vartheta + 0.77^\circ(j))})^2 + z_0^2}} \quad (3)$$

2.3 成像屏方程

成像屏用于接收反射激光点阵, 位于 zOy 平面, 如图1所示。成像屏方程采用以下方程组描述, 即

$$\begin{cases} y = -L \\ -\frac{A}{2} \leq x \leq \frac{A}{2} \\ 0 \leq z \leq B \end{cases} \quad (4)$$

式中: L 表示成像屏距离钨极的距离; A, B 分别表示表示成像屏的长宽。

2.4 法线单位向量、反射线向量及仿真算法

联立式(1), 式(2), 计算出熔池表面激光点的坐标 $[x'_{ij}, y'_{ij}, z'_{ij}]$, 并与球心连线向量作为该激光

点在熔池表面切平面的法线向量 $\mathbf{R} = [p'x_{ij}, p'y_{ij}, p'z_{ij}]$, 并将其单位向量化, 即

$$\mathbf{R}' = \frac{\mathbf{R}}{\sqrt{p'^2x_{ij}^2 + p'^2y_{ij}^2 + p'^2z_{ij}^2}} \quad (5)$$

由光学反射定律可知, 入射线单位向量 $\mathbf{I}'$ 、反射线单位向量 $\mathbf{F}$ 、法线单位向量 $\mathbf{R}'$ 之间存在以下关系

$$\mathbf{I}' + 2\mathbf{R}' = \mathbf{F}' \quad (6)$$

由式(5)可以求出反射线单位向量 $\mathbf{F}' = [p''x_{ij}, p''y_{ij}, p''z_{ij}]$, 则反射线方程可以描述为

$$\begin{cases} x''_{i,j} = x'_{i,j} + p''x_{i,j}t \\ y''_{i,j} = y'_{i,j} + p''y_{i,j}t \\ z''_{i,j} = z'_{i,j} + p''z_{i,j}t \end{cases} \quad (7)$$

联立式(7)与式(3)即可求出反射线在成像屏上投影点的位置。式(7)中 t 为变化参数。

3 仿真结果及分析

实际焊接中熔池宽度为 $5 \sim 9$ mm, 自熔焊时表面高度一般不超过 1 mm。因此, 在仿真中熔池半径 3.5 mm, 表面高度 0.5 mm。成像屏采用 100 mm $\times$ 100 mm。

3.1 成像屏与钨极水平距离变化对传感质量影响

为了研究 L 变化对传感质量的影响, 保持 $\theta = 30^\circ$, $D = 40$ mm 不变, 对 L 分别为 $35, 55, 75$ mm 时进行了仿真计算。

从仿真结果图 3a, b, c 中可以看出随着成像屏距离的增加, 反射点与点之间的距离逐渐增加、投射于成像屏上点的数目逐渐减少, 这表明成像屏位置变化将会主要引起激光点间距和投影点数目发生变化。当距离近 (25 mm) 时, 点与点之间的间距过密, 且由于距离焊枪过近电弧光辐射过强, 不利于后续图像处理及熔池三维恢复; 当距离过大 (75 mm) 时, 由于部分点超出成像屏使得成像屏上激光点的数目过少, 熔池信息丢失过多, 降低了后续恢复熔池形貌的准确性。因此, 根据仿真结果, 成像屏距离钨极的距离 L 应调整在 $40 \sim 60$ mm 之间。

3.2 激光器与熔池间距离 D 变化对传感质量的影响

为了研究 L 变化对传感质量的影响, 在仿真中, 保持 $\theta = 30^\circ$, $L = 55$ mm 不变, 对 D 为 $40, 60, 80$ mm 进行了仿真。从仿真结果图 4a, b, c 可以看出, 随着 D 的增加投射于成像屏激光点的数目越来越少, 这主要是由于 D 的增加使得投射与熔池表面的激光点减少造成的。但距离过近时, 由于激光器距离熔池表面过近, 可能造成激光器烧损。因此, 从根据仿真结果来看, D 的最佳参数为 $40 \sim 60$ mm 之间。

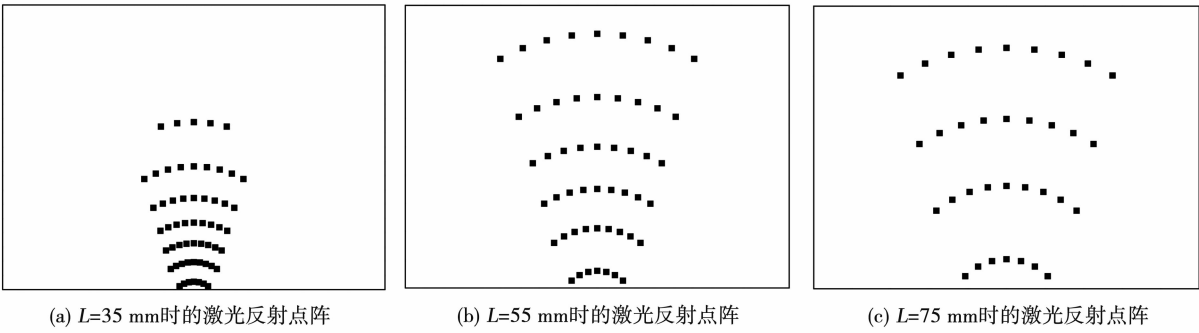


图 3 不同 L 的仿真点阵
Fig. 3 Simulation dot matrix in different L

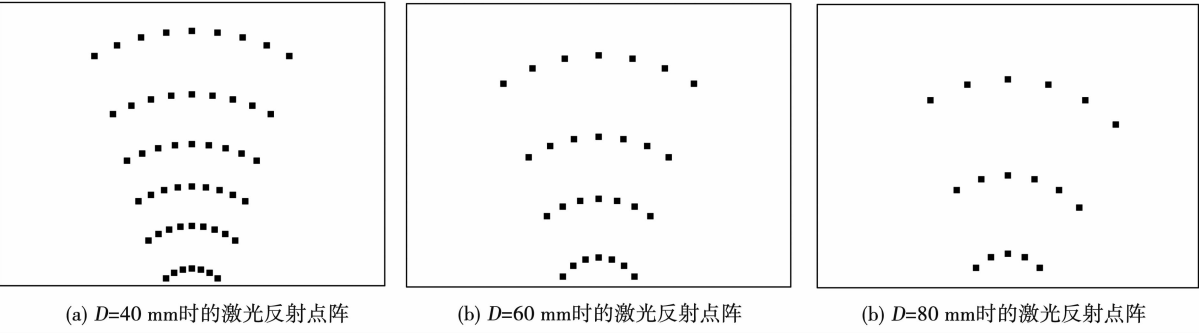


图 4 不同 D 的仿真点阵
Fig. 4 Simulation dot matrix in different D

3.3 激光器夹角 θ 变化对传感质量的影响

焊接时电弧长度一般维持在 $3 \sim 5 \text{ mm}$, 此时焊枪喷嘴会对激光反射点部分遮挡, 通过调节激光入射参数可将喷嘴的遮挡影响调到最小. 因此, 在仿真角度变化对传感质量的影响时, 需考虑喷嘴对激光的遮挡. 喷嘴的直径为 16 mm , 喷嘴距离工件表面为 12 mm . 在仿真中, 保持 $L = 55 \text{ mm}$, $D = 40 \text{ mm}$

不变, 对 D 为 $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ 进行了仿真. 仿真图中三角形点为被喷嘴遮挡掉的反射点. 从图 5 中, 可以看出随着夹角 θ 的增大, 喷嘴对激光点阵的遮挡越多, 得到的反射激光阵越少; 但当夹角过小时, 成像屏下部的激光点间间距过小, 过于密集, 不利于后续熔池三维恢复. 因此, 根据仿真结果 θ 的最佳调节范围为 $28^\circ \sim 32^\circ$.

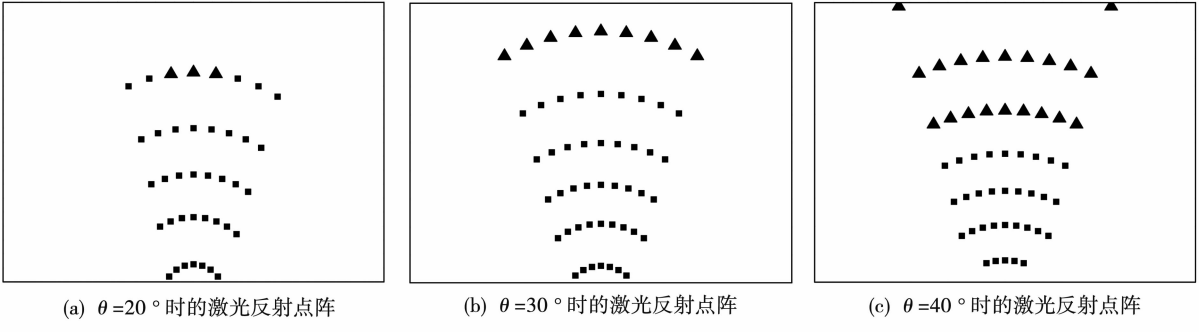


图 5 不同 θ 的仿真激光点阵
Fig. 5 Simulation dot matrix in different θ

4 试验验证

通过上述仿真, 得到最佳光路参数为 $L = 40 \sim$

60 mm , $D = 40 \sim 60 \text{ mm}$, $\theta = 28^\circ \sim 32^\circ$. 为了验证光路参数的正确性, 在该参数范围内和范围外, 采用表 1 焊接工艺参数, 进行工艺试验, 并采集了激光点阵.

表 1 焊接规范和光路参数

Table 1 Welding parameters and optical parameters

电流 I/A	弧长 L/mm	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	成像屏与 钨极间距离 $L/(\text{mm})$	激光器与 熔池间距离 $D/(\text{mm})$	激光器夹角 $\theta/(\text{^\circ})$
70	5	1	55	45	30
70	5	1	85	80	45

图 6a,b 分别为在光路参数 1 和光路参数 2 下采集的激光点阵和采用三维恢复算法^[5]得到的熔池三维形貌。从激光点阵中可以看出,在最佳光路

参数范围内,采集的点阵数量多、密度大、清晰;而在非理想光路参数下,点阵少、密度小、不清晰。

表 2 为熔池特征参数实测值与三维恢复计算值。在标准参数下得到的熔宽、熔池高度误差分别为 0.78%,5%,而在非标准参数下分别达到了 8.9%,12.5%。由于激光点阵密度与熔池自由表面信息直接相关^[5],点阵密度越大,所反映的熔池自由表面形貌信息越多、越准确,在进行三维恢复后的熔池特征参数越准确。因此在实际焊接中应将光路参数调节在最佳光路参数范围内。

表 2 熔池特征参数实测值与计算值

Table 2 Characteristic parameter of weld pool for calculated value and measured value

参数 序号	实测熔宽 W_e/mm	计算熔宽 W'_e/mm	误差 $\delta/(\%)$	实测熔池高 度 H_0/mm	计算熔池 高度 H'_0/mm	误差 $\delta'(\%)$
参数 1	6.35	6.4	0.78	0.20	0.21	5
参数 2	5.1	5.6	8.9	0.24	0.27	12.5

5 结 论

(1) 提出了一种激光点阵测量熔池表面三维形貌的方法,并实现了对 GTAW 熔池形貌的测量及三维恢复。

(2) 建立了理想 GTAW 熔池表面标准模型、入射线、反射线、成像屏方程,利用 MATLAB 软件逆向仿真各个光路参数变化对传感质量的影响规律。

(3) 通过仿真计算,得到最优光路参数, $L=50\sim60\text{ mm}$, $D=40\sim60\text{ mm}$, $\theta=28^\circ\sim32^\circ$,通过试验对仿真结果进行了验证,试验与仿真结果吻合良好。

参考文献:

[1] 李来平,林 涛,陈善本. 用从明暗恢复形状方法提取焊接熔池的表面高度[J]. 焊接学报, 2005, 26(5): 5-8.
Li Laiping, Lin Tao, Chen Shanben. Research on shape from shading in welding pool topside height acquisition[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26(5): 5-8.

[2] 汪岩峰,刘南生,林浩亮,等. 基于结构光投影的焊接熔池图像获取与处理[J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 81-84.
Wang Yanfeng, Liu Nansheng, Lin Haoliang, et al. Image taking and processing of welding pool based on structured light projection [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(10): 81-84.

[3] 王继锋,王文怡,陈善本. 基于线形化算法的熔池三维形状提取[J]. 焊接学报, 2007, 28(8): 54-56.
Wang Jifeng, Wang Wenyi, Chen Shanben. Extraction of welding pool shape using linear approximation[J]. Transactions of the Chi-

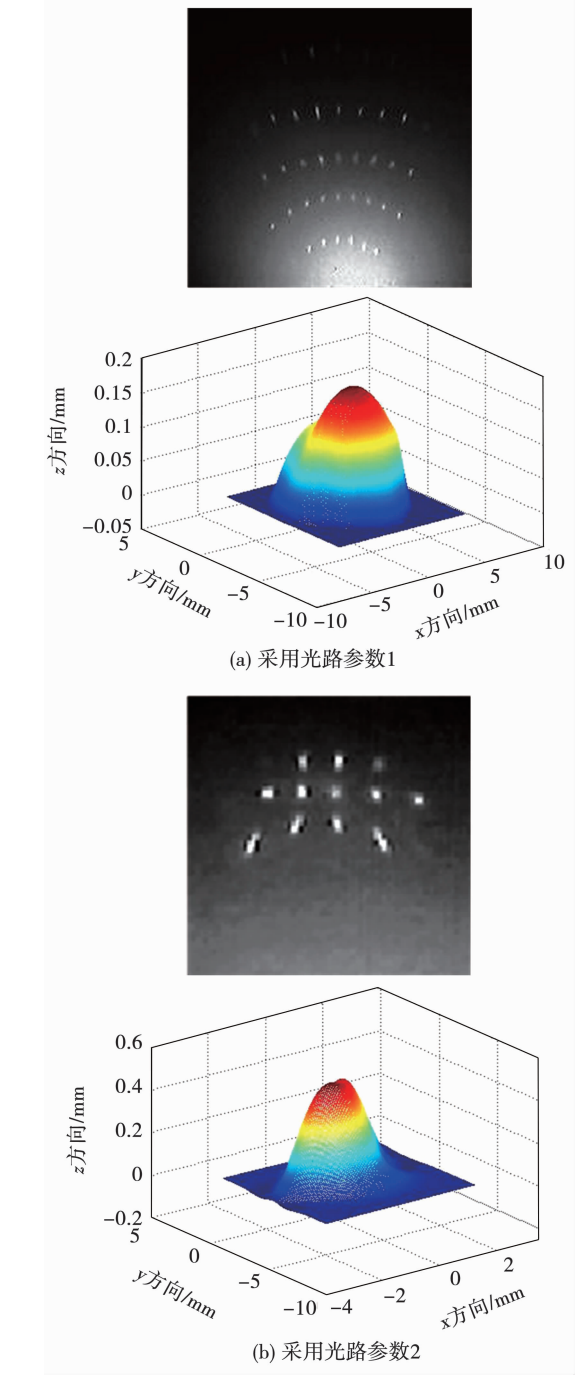


图 6 不同光路参数点阵图像及三维熔池形貌

Fig. 6 Reflected dots image and 3D weld pool surface

na Welding Institution, 2007, 28(8): 54-56.

[4] Zhang Y M, Song H S. Observation of a dynamic specular weld pool surface[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(6): 9-12.

[5] 张 刚, 石 玟, 黄健康, 等. 基于激光点阵的 TIG 焊熔池自由表面三维测量方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(24): 10-16.

Zhang Gang, Shi Yu, Huang Jiankang, *et al.* Method to measure

three dimensional specular surface of TIG weld pool based on dot-matrix laser pattern[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(24): 10-16.

作者简介: 李春凯,男,1990 年出生,博士研究生. 主要从事焊接过程控制及自动化. 发表论文 3 篇. Email: 15339316249@163.com

通讯作者: 石 玟,男,教授,博士研究生导师. Email: shiyu@lut.cn

[上接第 4 页]

[7] Ramos E G, Carvalho G C D, Alfaro S C A. Analysis of weld pool oscillation in GMAW-P by means of shadowgraphy image processing[J]. Welding International, 2015, 29(3): 197-205.

[8] Matsui H, Chiba T, Yamazaki K. Detection and amplification of the molten pool natural oscillation in consumable electrode arc welding[J]. Welding International, 2014, 28(1): 5-12.

[9] 赵鹏成, 梁 瑛, 马莎莎. 脉冲熔化极氩弧焊熔池自由表面波动行为的数值模拟[J]. 青岛科技大学学报, 2013, 34(4): 407-413.

Zhao Pengcheng, Liang Ying, Ma Shasha. Numerical simulation on wave behaviors at a weld pool free surface in pulse gas metal arc welding[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology, 2013, 34(4): 407-413.

[10] 杨运强, 李 桓, 李俊岳, 等. 熔化极电弧焊多信息同步高

速摄影[J]. 焊接学报, 2002, 23(6): 29-32.

Yang Yunqiang, Li Huan, Li Junyue, *et al.* High-speed photography with multi-information synchronizer for GMAW[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(6): 29-32.

[11] 周 品, 李晓东. MATLAB 数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

[12] 杨 倩, 王广伟, 华学明, 等. 基于小波变换的熔滴过渡图像的边缘检测[J]. 焊接学报, 2007, 28(4): 38-40.

Yang Qian, Wang Guangwei, Hua Xueming, *et al.* Edge detection of metaltransfer image based on wavelet transform [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(4): 38-40.

通讯作者: 吕小青,男,1978 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师. 主要从事焊接逆变电源及自动化、弧焊混沌理论及弧焊工艺等方面的研究. 发表论文 20 余篇. Email: xiaoqinglv77@163.com