

铝合金 TIG 焊接熔池状态多传感器数据协同感知算法

张琨¹, 邹宗轩¹, 刘烨², 刘政军¹

(1. 沈阳工业大学, 沈阳, 110870; 2. School of Electrical Engineering and Computer Science,
Oregon State University, Corvallis, OR 97331, USA)

摘要: 针对铝合金钨极惰性气体保护电弧焊 (tungsten inert gas arc welding, TIG 焊) 过程中, 焊接工艺参数的实时状态与焊缝熔池三维尺寸间的非线性对应关系, 研究建立一种基于信息物理融合的多传感器 TIG 焊过程熔池状态协同感知计算方法. 首先, 构建由红外温度传感器、电弧形态传感器、电弧能量传感器和焊接位置传感器组成的 TIG 焊过程熔池状态信息物理融合系统架构. 其次, 考虑焊接过程中焊枪电弧的运动特性和测量噪声影响, 设计基于温度、位置、能量传感器信息交互的熔池长宽深三维参数状态感知策略, 并基于多传感器数据的异步和异构特性, 提出了基于无迹卡尔曼滤波的焊接过程中熔池状态的多传感器数据协同感知算法. 针对 7075 超硬铝合金 TIG 焊过程进行熔池参数在线测量与辨识试验, 结果表明, 所提算法能够根据 TIG 焊过程多传感器数据实时计算熔池参数结果, 焊缝宽度和焊缝高度计算结果误差基本上控制在 10% 以内, 该算法响应时间基本控制在 0.3 s 内, 能够较为准确地评估焊接过程中熔池的实时状态.

创新点: (1) 建立了基于温度、位置、能量的多传感器的熔池状态信息物理融合系统架构.
(2) 提出了一种基于温度、位置、能量的多传感器数据协同的熔池状态感知算法.

关键词: 熔池状态; 焊接控制; 信息物理融合; 异步异构数据; 焊接传感网络

中图分类号: TG 407 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20211025001

0 序言

基于信息物理传感网络和焊接过程中信息交互的铝合金钨极惰性气体保护电弧焊 (tungsten inert gas arc welding, TIG 焊) 新焊接理论, 是推动焊接技术向基于数字应用的更高阶段智能化拓展的重要理论基础和技术关键^[1-3].

目前, 焊接过程智能化及焊接过程控制、焊接过程动态评估技术, 是国内外相关领域研究热点之一. 黄健康等人^[4]、刘政军等人^[5]和 Mugada 等人^[6]针对铝合金 TIG 焊接工艺过程, 研究了基于 ABAQUS 数值仿真的焊缝温度场分布特性及其对应的熔池形貌特征, 提出了基于熔池特性数值仿真的焊接工艺和焊接质量优化方法. Azarniya 等人^[7]、Kumar 等人^[8]和 He 等人^[9]设计了 TIG 焊过程中焊缝熔池在超声作用下的变化特性的试验检测方法,

提出了通过焊接过程超声能量控制焊缝形态及其组织性能的 TIG 焊控制机理与方法. Sardarmehni 等人^[10]、Zeng 等人^[11]和 Huang 等人^[12]采用激光反射成像在 TIG 焊接过程中对熔池的反射图像采集方法及图像特征与焊缝熔池特征间关系进行了研究, 提出了一种基于实时激光成像的焊接过程熔池特性的在线监测与评估方法; Li 等人^[13]和 Chen 等人^[14]针对焊接过程中焊接参数的实时动态控制与焊接质量间关系进行了研究, 建立了基于焊接参数动态优化的焊缝特征与焊接质量优化控制好方法.

针对铝合金 TIG 焊过程熔池三维参数的变化状态在线辨识和感知问题, 构建了基于控制、通信和计算于一体的焊接过程信息物理融合智能控制系统, 包括焊接工艺参数和焊接过程状态表征参数的实时传感、采集、处理、传输、控制与数据融合等过程. 为构建焊接过程信息物理融合系统, 部署了针对 TIG 焊工艺和焊接过程的多个红外温度、电弧形态、焊接速度 (位置) 和焊接能量传感器, 并基于多类型、多数量传感器间的数据异步异构特性,

研究了基于数据协同的熔池物理参数状态感知算法,建立基于信息物理融合的熔池状态感知模型和算法.最后,针对7075超硬铝合金TIG焊过程进行熔池参数在线测量与辨识试验,采用信息物理融合系统及熔池状态感知算法进行了焊接控制试验,能够对焊接过程中的熔池参数进行准确的实时计算.

1 TIG焊信息物理熔池感知策略

1.1 TIG焊信息物理融合架构

考虑由静态传感器、动态传感器和全局能量传感器构成的TIG焊信息物理融合系统架构如图1所示,其各部分功能如下.

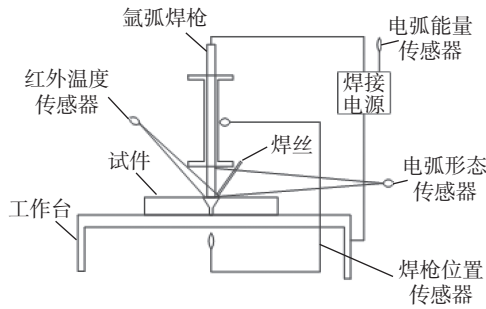


图1 TIG焊过程熔池状态感知信息物理融合架构
Fig.1 Fusion architecture of molten pool state-aware cyber-physical fusion in TIG welding process

(1) 红外温度传感器、电弧形态传感器. 这两种传感器,可以看作是静态传感器,因为一方面需要动态跟踪并反映电弧和熔池在空间上的移动,另一方面其安装位置又是固定的. 红外温度传感器置于焊件上方,电弧形态传感器置于焊接电弧水平位置. 针对某一焊件的焊接过程,可以设置多个红外温度传感器和电弧形态传感器,主要作用是协助电弧能量传感器对熔池所注入能量状态的监测和计算.

(2) 电弧能量传感器. 为全局能量传感器,与焊接电源相连,可通过红外温度传感器和电弧形态传感器的协助获取熔池输入能量状态信息,但受噪声因素影响,其状态信息与红外温度传感器和电弧形态传感器不一定同步,主要作用是通过信息物理融合获取焊接过程中焊枪位置传感器所对应焊接位置的输入能量信息.

(3) 焊接位置传感器. 为动态传感器,由焊枪上方的焊接速度传感器、焊接位置传感器及焊件下方与焊枪同步运动的高精度红外温度传感器构成. 其

作用是与静态的电弧能量传感器协同,通过对整个焊接进程的定位与能量输入状态计算,对焊枪所处位置熔池长度、宽度、深度进行感知和计算. 由于焊接位置传感配置了焊件下方的红外传感元件,在焊接过程中可以直接获取熔池深度信息.

1.2 熔池状态描述参数与感知策略

根据TIG焊接过程焊枪及电弧在焊件焊缝中的运动特性,提出熔池状态描述的3自由度方程. 设 v_{le} , v_{wd} , v_{dp} 分别表示动态熔池在长度、宽度、深度偏移上的变化速度,则熔池状态变化的动力学模型为

$$\begin{cases} v_{le}(k+1) = v_{le}(k) + \frac{\rho_l}{m_{le}} (F_{le} + m_{wd}v_{wd}r - k_{le}v_{le} - k_{le}^*v_{le}|v_{le}|) \\ v_{wd}(k+1) = v_{wd}(k) + \frac{\rho_l}{m_{wd}} (F_{wd} + m_{le}v_{le}r - k_{wd}v_{wd} - k_{wd}^*v_{wd}|v_{wd}|) \\ v_{dp}(k+1) = v_{dp}(k) + \frac{\rho_l}{m_{dp}} (F_{dp} + W - k_{dp}v_{dp} - k_{dp}^*v_{dp}|v_{dp}|) \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_{le} , m_{wd} , m_{dp} 分别表示某时刻熔池在长度、宽度、深度变化的阻力; v 为修正系数; k 为时间; F_{le} , F_{wd} , F_{dp} 分别表示焊枪运动伴与电弧能量输入对熔池长度、宽度、深度3个维度变化施加的推力; W 表示氩气的压力; ρ_l 为焊件密度; k_{le} , k_{le}^* , k_{wd} , k_{wd}^* , k_{dp} , k_{dp}^* 为3个维度上的熔池变化推力系数.

各阻力大小与焊件密度、熔池密度等密切相关,其计算公式如式(2)所示.

$$m_i = a \frac{R_c}{A_1 e^{-\frac{\pi}{4}} \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) + A_2 + A_3} + \mu D \frac{\pi}{4} l_c h g (\rho_w - \rho_l), \quad i \in [v_{le}, v_{wd}, v_{dp}] \quad (2)$$

式中: m_i 为熔池在第 i 个维度上的阻力; R_c 为焊件的抗压强度; a 和 μ 为辅助修正系数; l_c 为焊接长度; D 为焊枪与焊件接触处的宽度; h 为焊件的厚度; g 为重力加速度; ρ_w 为熔池的密度; A_1 , A_2 , A_3 为辅助参数.

由式(1)可知, TIG焊过程中, 在一个传感器的测量时间间隔内, 焊件焊缝在焊枪电弧作用下形成熔池的三维参数可描述为

$$\mathbf{X}_k = [x_{le}(k), y_{wd}(k), z_{dp}(k)] \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}_k$ 为 k 时刻熔池焊件焊缝的三维参数矩阵; x_{le} , y_{wd} , z_{dp} 分别表示熔池焊件焊缝坐标系中长度、宽度、深度3个方向的参数.

结合式 (1) 和式 (3), 可得熔池状态在焊接过程中动态演化模型为

$$\mathbf{X}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}) + \bar{\omega}_k \quad (4)$$

式中: $\mathbf{X}_k$ 为预测值; f 为描述 $k-1$ 与 k 两时刻熔池状态之间关系的函数; $\bar{\omega}$ 为高斯白噪声. 其协方差为

$$Q_{\text{tdk}} = E(\bar{\omega}_k \bar{\omega}_k^T) \quad (5)$$

式中: Q_{tdk} 为协方差; E 为期望函数.

2 熔池状态传感器异步数据协同模型

根据静态、动态和能量传感器实现焊接过程中实时熔池状态的感知, 首先要构建各传感器间数据交互的异步数据特征与熔池状态间的对应关系模型; 其次, 建立熔池状态参数的多维传感器协同感知问题, 并根据式 (4) 的熔池状态在焊接过程中动

态演化模型, 建立基于无迹卡尔曼滤波的协同感知算法, 以实现熔池焊缝参数($x_{\text{le}}, y_{\text{wd}}$)的准确感知; 最后, 根据焊接位置传感器, 即动态传感器中位于焊件下方的红外传感器所测得的红外温度数据, 结合熔池焊缝长宽参数($x_{\text{le}}, y_{\text{wd}}$)、熔池能量输入参数, 即可对熔池焊缝深度 z_{dp} 进行计算.

由于动态传感器配置在焊件下方的红外传感器所测量的熔池深度 $z_{\text{dp}}(k)$ 与其它传感器测量数据所计算的($x_{\text{le}}, y_{\text{wd}}, z_{\text{dp}}$)应该是一致的, 但同时考虑到各类传感器之间的数据异构与异步特性, 建立熔池深度与熔池状态参数测量数据间关系如式 (6) 所示.

$$\mathbf{Z}_{\text{dp}}(k) = h_{\text{lwd}}(\mathbf{X}_k) + m_{\text{le}}(k) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{Z}_{\text{dp}}(k)$ 为熔池深度矩阵; h_{lwd} 为熔池深度与长宽间关系函数; $m_{\text{le}}(k)$ 为零均值测量噪声. h_{lwd} 的计算关系式为

$$h_{\text{lwd}}(\mathbf{X}_k) = [2dr_{s,1}(k), \dots, 2dr_{s,n}(k), dr_{1,2}(k) + dr_{s,1}(k) - dr_{s,2}(k), \dots, dr_{s,m}(k) + dr_{m,n}(k) - dr_{s,n}(k)]^T \quad (7)$$

式中: $dr_{s,n}$, $dr_{m,n}$ 分别为动态传感器与静态传感器节点 s 、静态传感器节点 n 与静态传感器节点 m 之间熔池状态传感和采集后数据间的差异修正量.

$$\begin{cases} dr_{s,n} = \ln[(x_{\text{le},s} - x_{\text{le},n})^2 + (y_{\text{wd},s} - y_{\text{wd},n})^2] \\ dr_{m,n} = \ln[(x_{\text{le},m} - x_{\text{le},n})^2 + (y_{\text{wd},m} - y_{\text{wd},n})^2] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $x_{\text{le},s}$, $x_{\text{le},m}$, $x_{\text{le},n}$ 为静态传感器节点 s , m , n 的熔池长度参数; $y_{\text{wd},s}$, $y_{\text{wd},m}$, $y_{\text{wd},n}$ 为静态传感器节点 s , m , n 的熔池宽度参数.

3 熔池状态感知算法

通过多维传感器数据估计出最接近实时焊接过程中实际情况的熔池长宽参数, 则在 k 时刻动态传感器处, 在给定的置信区间和方差下, 以 $\mathbf{Z}_k$ 为深度的熔池长宽深三维参数感知结果 $\hat{\mathbf{X}}_k$ 的计算步骤如下.

(1) 在 $k=1$ 时, 对熔池长宽深参数进行初始化.

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_0 = E[\mathbf{X}_0] \\ \hat{\mathbf{P}}_0 = E\left[\left(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0\right)\left(\mathbf{X}_0 - \hat{\mathbf{X}}_0\right)^T\right] \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}_0$ 为初始时刻的熔池参数估计矩阵; $\hat{\mathbf{P}}_0$ 为初始时刻的熔池参数估计的协方差矩阵.

(2) 基于上一时刻, 即 $k-1$ 时刻计算出的熔池焊缝长宽深参数 $\mathbf{X}_{k-1}$ 及其误差协方差矩阵 $\mathbf{P}_{k-1}$, 选择熔池焊缝长宽深状态的 Sigma 点如下.

$$\mathbf{X}_{j,k-1} = \left[\hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \hat{\mathbf{X}}_{k-1} \pm \left(\tau \sqrt{\hat{\mathbf{P}}_{k-1}} \right) \right]_{\hat{m}} \quad (10)$$

式中: $\hat{\mathbf{P}}_{k-1}$ 为 k 时刻的熔池参数估计的协方差矩阵; $\mathbf{X}_{j,k-1}$ 为 $k-1$ 时刻熔池焊缝长度、宽度、深度计算值 $\mathbf{X}_{k-1}$ 的第 j 列, $j=1, \dots, 2L, 2L+1$; $\tau = \sqrt{L+\lambda}$, L 为传感器数据维数, $\lambda = \alpha^2(L+k) - L$; $\hat{m}$ 为矩阵的第 $\hat{m}$ 列.

(3) 由式 (4) 的焊接过程熔池状态动态演化模型, 计算下一时刻熔池状态参数的预测值 $\mathbf{X}_{j,k|k-1} = f(\mathbf{X}_{j,k-1})$.

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(\hat{m})} \mathbf{X}_{j,k|k-1} \quad (11)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}$ 为熔池状态预测; $W_j^{(\hat{m})}$ 为辅助参数. 同时, 熔池长宽深状态实时计算结果的协方差矩阵更新为

$$\hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(c)} \left[\mathbf{X}_{j,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} \right] \cdot \left[\mathbf{X}_{j,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} \right]^T \quad (12)$$

$$\begin{cases} W_0^{(m)} = \lambda / (L + \lambda) \\ W_0^{(c)} = \lambda / (L + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ W_j^{(m)} = W_j^{(c)} = 1 / [(2(L + \lambda))] \end{cases} \quad (13)$$

式中: $0 \leq \alpha \leq 1$, $\beta = 2$.

由式 (10) 对熔池焊缝长度、宽度、深度状态进行第二次 Sigma 取点.

$$\mathbf{X}_{j,k|k-1} = \left[\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}, \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} \pm \left(\tau \sqrt{\hat{\mathbf{P}}_{k|k-1}} \right) \right]_{\hat{m}} \quad (14)$$

由式 (6) 计算熔池长度、宽度、深度测量值的无迹变换.

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{\text{dp},j,k|k-1} = h(\mathbf{X}_{j,k|k-1}) + n_{\text{le}}(k) \\ \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k|k-1} = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(\bar{m})} \mathbf{Z}_{\text{dp},j,k|k-1} \\ \begin{cases} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k} \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}} = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(c)} \left[\mathbf{Z}_{\text{dp},j,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k|k-1} \right] \cdot \left[\mathbf{Z}_{\text{dp},j,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k|k-1} \right]^T \\ \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}} = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(c)} \left[\mathbf{X}_{j,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} \right] \cdot \left[\mathbf{Z}_{\text{dp},j,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k|k-1} \right]^T \end{cases} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k} \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}}$ 和 $\mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}}$ 分别为熔池焊缝长度、宽度、深度测量协方差矩阵和熔池焊缝长度、宽度、深度值测量交互协方差矩阵.

(5) 通过以下更新规则来更新焊接过程中熔池焊缝长度、宽度、深度实时算法的卡尔曼增益、协方差和估计状态.

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k} \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}}^{-1} \\ \hat{\mathbf{P}}_k = \hat{\mathbf{P}}_{k|k-1} - \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k} \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}}^{-1} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k} \hat{\mathbf{X}}_k} \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}}^T \\ \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \left(\mathbf{Z}_{\text{dp},k} - \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k|k-1} \right) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\hat{\mathbf{X}}_k$ 为熔池焊缝长度、宽度、深度的参数估计值, 即($x_{\text{le}}, y_{\text{wd}}$).

4 试验结果与分析

试板加工尺寸为 250 mm × 75 mm × 5 mm, V 形坡口角度为 60°, 背部采用开槽铜垫板, 母材采用 AA7075 试板, 其成分如表 1 所示^[15]. 试验采用母材切条作为焊接材料, 切条为 2 mm × 2 mm. 焊接过程信息物理传感系统配置原理如图 1 所示, 在焊台两侧分别布置位于焊缝斜上方的 ZTP-148SR 型红外探测器 4 个; 位于焊枪水平位置的 AAFD-DU-M7 型电弧传感器电弧传感器 4 个; 在焊接电源上布置 1 个 TLI4970D050T5XUMA1 型电流传感器; 在焊枪上部署 1 个 LSTR8050 型运动及位置传感器, 并与焊台下方与焊接位置对应的红外传感器 1 个, 共同构成动态传感器.

表 1 母材的主要化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of base metal

项目	Si	Cu	Mg	Mn	Zn
标准值	≤0.40	1.2~2.0	2.1~2.9	≤0.30	5.1~6.1
实测值	0.07	1.56	2.54	0.031	5.77

式中: $\mathbf{Z}_{\text{dp},j,k|k-1}$ 为熔池深度计算值 $\mathbf{Z}_{\text{dp},k-1}$ 的第 j 列; $\hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k|k-1}$ 是熔池深度的估计值.

(4) 熔池焊缝长度、宽度、深度测量协方差矩阵和熔池焊缝长度、宽度、深度值测量交互协方差矩阵更新为

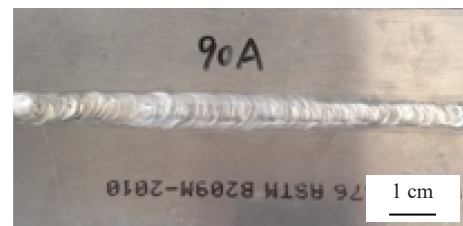
$$\begin{cases} \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k} \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}} = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(c)} \left[\mathbf{Z}_{\text{dp},j,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k|k-1} \right] \cdot \left[\mathbf{Z}_{\text{dp},j,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k|k-1} \right]^T \\ \mathbf{P}_{\hat{\mathbf{X}}_k \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k}} = \sum_{j=0}^{2L} W_j^{(c)} \left[\mathbf{X}_{j,k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} \right] \cdot \left[\mathbf{Z}_{\text{dp},j,k|k-1} - \hat{\mathbf{Z}}_{\text{dp},k|k-1} \right]^T \end{cases} \quad (16)$$

设计两组试验方案, 并在试验过程中对熔池参数进行感知计算, 两组试验焊接工艺参数如表 2 所示.

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding process parameters

方案	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 v/(mm·s ⁻¹)	钨极直径 d/mm
1	90	12	1.5	1.6
2	110	10	1.6	1.6

针对两种工艺参数方案, 分别进行 10 组试验, 对焊缝三维熔池参数进行实时状态感知, 并将感知结果与焊接结束后的焊缝实际测量数据进行对比. 图 2 和图 3 分别为两种方案下焊接试验后的焊缝正面和横截面形貌.



(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 2 焊件焊缝正面形貌

Fig. 2 Front view appearance of weldment weld. (a) plan 1; (b) plan 2

在实际的焊接工程应用中, 对于焊件焊接质量的控制与评价主要关注的是焊缝宽度、焊缝高度和焊接深度. 而在焊接过程中, 通过静态、动态传感器

间的数据协同,根据焊接速度、能量输入和熔池温度分布能够从信息物理融合角度对熔池的三维状态进行实时辨识。因此,针对焊接后焊缝特征的测量主要还是针对焊缝宽度和焊缝深度两个维度进行。焊接过程中对熔池状态进行实时感知的目的,也是要根据熔池参数实时状态的准确感知来实现对焊接过程的智能控制,以获得较为理想的焊缝宽度和焊缝高度。

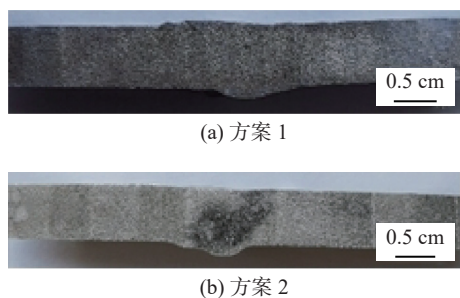


图 3 焊缝横截面形貌

Fig. 3 Cross-section appearance of the weld. (a) plan 1; (b) plan 2

图 4 和图 5 为焊接过程中的熔池状态感知计算结果与实测焊缝的宽度与深度对比情况。由图 6 可见,两种方案下焊接过程中的熔池状态感知结果与焊接结束后的焊件测量结果间的误差基本在 10% 以内。

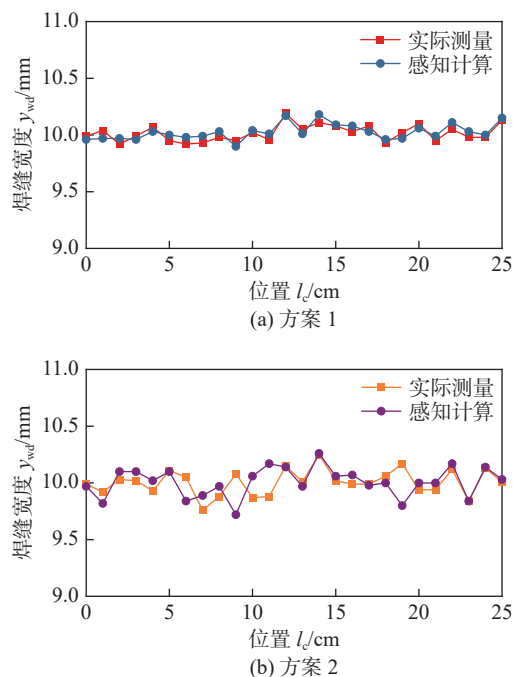


图 4 熔池状态感知计算与实测结果的焊缝宽度对比

Fig. 4 Comparison of weld width calculated by molten pool state perception and measured results. (a) plan 1; (b) plan 2

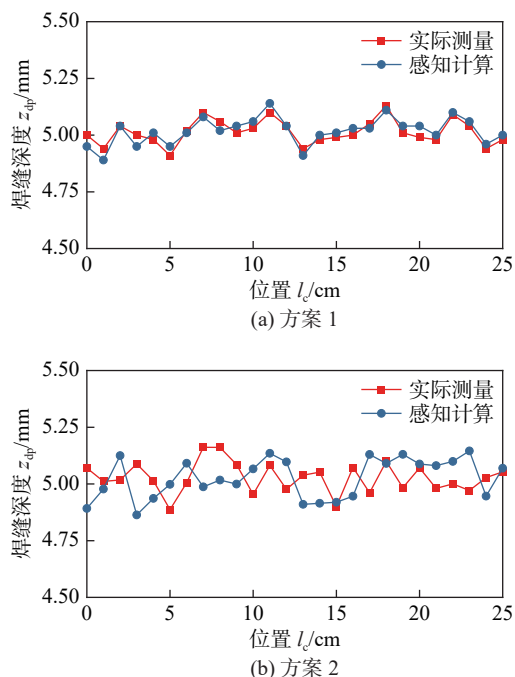


图 5 熔池状态感知计算与实测结果的焊缝深度对比

Fig. 5 Comparison of weld depth calculated by molten pool state perception and measured results. (a) plan 1; (b) plan 2

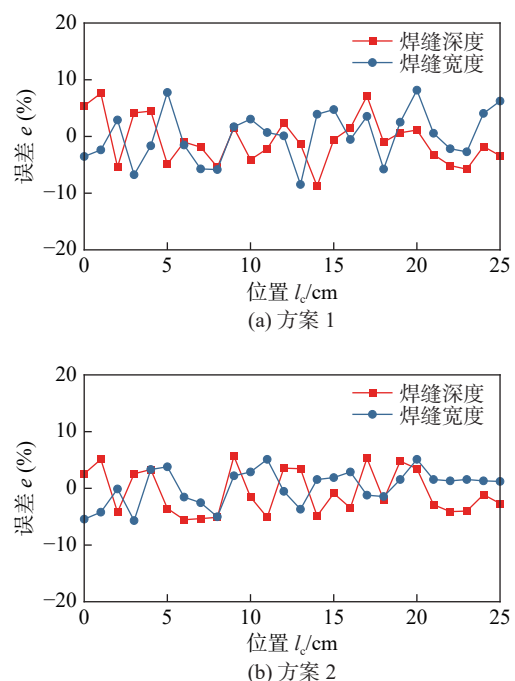


图 6 熔池参数状态感知误差特性

Fig. 6 Error characteristics of molten pool parameter situation awareness. (a) plan 1; (b) plan 2

5 结论

(1) 针对铝合金 TIG 焊过程中状态感知问题,提出了基于红外温度传感器、能量输入传感器、焊

接位置传感器等的多传感器实时数据的焊缝熔池状态参数信息物理数据监测方法。该方法能够将电弧和熔池空间的移动数据、熔池输入能量状态数据、焊接位置数据等多种异构数据进行协同处理,能够有效减弱多种传感器采集参数的噪声。

(2) 基于熔池状态与焊接能量输入、熔池温度分布、焊接速度等物信息物理特征之间关系,提出了一种基于多传感器数据协同的熔池状态感知算法。该算法能够根据TIG焊过程焊枪及电弧在焊件焊缝中的运动特性实时计算熔池焊缝长度、宽度、深度三维参数结果,误差可以控制在0.4 mm以内,且该算法的响应时间在0.3 s内,可以较好地适应工程需要。

(3) 以7075超硬铝合金TIG焊试验为基础,设计了2组工艺参数下的焊接试验,试验结果表明,基于多传感器数据协同的TIG焊过程熔池状态感知算法,对焊缝宽度和焊缝高度的计算误差可以控制在10%以内,基本能够满足实际工程要求。

参考文献

- [1] 刘政军, 张琨, 刘长军. 铝合金振动焊接过程非线性时间序列模型分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(3): 85–90.
Zhang Kun, Liu Zhengjun, Liu Changjun. Study on nonlinear time series model of vibration welding process of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(3): 85–90.
- [2] 陈琪昊, 林三宝, 杨春利, 等. 周期超声对铝合金TIG焊缝成形影响机制分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(3): 9–12.
Chen Qihao, Lin Sanbao, Yang Chunli, *et al.* Analysis on influencing mechanism of periodical ultrasound on formation of TIG weld of aluminum alloys[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(3): 9–12.
- [3] 何笑英, 黄健康, 石玟, 等. 基于网格激光的TIG焊熔池三维表面凹凸性分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(1): 65–68.
He Xiaoying, Huang Jiankang, Shi Yu, *et al.* Analysis on concavity and convexity of TIG weld pool threedimensional surface based on grid lasers[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(1): 65–68.
- [4] 黄健康, 陈会子, 杨茂鸿, 等. 基于示踪粒子的摆动TIG填丝焊熔池行为数值分析[J]. 焊接学报, 2019, 40(6): 7–13.
Huang Jiankang, Chen Huizi, Yang Maohong, *et al.* Numerical analysis of the behavior of swing TIG wire-filled weld pool based on tracer particles[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 7–13.
- [5] 刘政军, 张琨. 超硬铝合金搅拌摩擦焊全局动态鲁棒控制技术[J]. 焊接学报, 2019, 40(4): 73–78.
Liu Zhengjun, Zhang Kun. Global dynamic robust control of friction stir welding of high strength aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(4): 73–78.
- [6] Mugada K K, Adepu K. Influence of ridges shoulder with polygonal pins on material flow and friction stir weld characteristics of 6082 aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 625–634.
- [7] Azarniya A, Taheri A K, Taheri K K. Recent advances in ageing of 7xxx series aluminum alloys: A physical metallurgy perspective[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 781: 945–983.
- [8] Kumar G P, Koppad P G, Keshavamurthy R, *et al.* Microstructure and mechanical behaviour of in situ fabricated AA6061-TiC metal matrix composites[J]. Archives of Civil & Mechanical Engineering, 2017, 17(3): 535–544.
- [9] He K, Li X. Time-frequency feature extraction of acoustic emission signals in aluminum alloy MIG welding process based on SST and PCA[J]. IEEE Access, 2019, 7: 113988–113998.
- [10] Sardarmehni T, Keighobadi J, Menhaj M B. Robust predictive control of lambda in internal combustion engines using neural networks[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2013, 13(4): 432–443.
- [11] Zeng X, Yu J, Fu D, *et al.* Wear characteristics of hybrid aluminum-matrix composites reinforced with well-dispersed reduced graphene oxide nanosheets and silicon carbide particulates[J]. Vacuum, 2018, 155: 364–375.
- [12] Huang Y, Xie Y, Meng X, *et al.* Numerical design of high depth-to-width ratio friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 233–241.
- [13] Li Z, Fan G, Guo Q, *et al.* Synergistic strengthening effect of graphene-carbon nanotube hybrid structure in aluminum matrix composites[J]. Carbon, 2015, 95: 419–427.
- [14] Chen Shujun, Zhang Hongwei, Jiang Xiaoqing, *et al.* Mechanical properties of electric assisted friction stir welded 2219 aluminum alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019(44): 197–206.
- [15] Cheng X, Du L, Yang G, *et al.* Adaptive robust control of dynamic gas pressure in a vacuum servo system[J]. Vacuum, 2018, 148: 184–194.

第一作者: 张琨, 博士, 讲师; 主要研究方向为焊接材料的开发与研制、金属表面强化; E-mail: zhangkun@sut.edu.cn.
通信作者: 刘政军, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: liuzhengjun1962@163.com.

mechanical properties of insulated copper wire/phosphor bronze foil welded joints were explored.

(3) The evolution process of the insulated copper wire/phosphor bronze foil welded joint under the micro-resistance thermocompression welding process was analyzed.

Key words: resistance thermocompression micro-welding; high temperature resistant fine insulated copper wire; joint evolution; fracture mode

Multi-sensor data collaborative sensing algorithm for aluminum alloy TIG welding pool state ZHANG Kun¹, ZOU Zongxuan¹, LIU Ye², LIU Zhengjun¹(1. Shenyang University of Technology, Shenyang, 110870, China; 2. School of Electrical Engineering and Computer Science, Oregon State University, Corvallis, OR 97331, USA). pp 50-55

Abstract: Aiming at the non-linear correspondence between the real-time state of welding process parameters and the three-dimensional size of the weld pool in the tungsten inert gas arc (TIG) welding process of aluminum alloy, a multi-sensor TIG welding process based on cyber-physical fusion is studied to establish a multi-sensor TIG welding process collaborative sensing calculation method. First, build a TIG welding process molten pool state information physical fusion system architecture consisting of infrared temperature sensors, arc shape sensors, arc energy sensors and welding position sensors. Then, considering the influence of the environment and measurement noise in the welding process, a three-dimensional parameter state sensing strategy of the length, width and depth of the molten pool based on the exchange of temperature, position, and energy sensor information is designed. Based on the asynchronous and heterogeneous characteristics of multi-sensor data, a new method based on Multi-sensor data collaborative sensing algorithm for the state of the molten pool in the welding process based on trace Kalman filtering. Finally, taking the TIG welding process of 7075 super-hard aluminum alloy as the test object, the test results show that the proposed algorithm can calculate the welding pool parameter results in real time according to the motion characteristics of the welding torch and the arc in the welding seam of the TIG welding process. The error of the calculation results of the weld width and weld height can be controlled within 10%, and the response time of the algorithm is within 0.3 s, which can accurately evaluate the real-time state of the weld pool.

Highlights: (1) A multi-sensor melt pool state cyber-physical fusion system architecture based on temperature, position and energy is established.

(2) A melt pool state perception algorithm based on multi-sensor data collaboration of temperature, location and energy is proposed.

Key words: molten pool status; welding control; cyber-physical integration; asynchronous heterogeneous data; welding sensor network

Multiview solder joint defect detection based on improved ResNet DENG Zhichao, YAN Runming, YANG Huitong, CHEN Haolin, LAI Jinxiang, LEI Liang(Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China). pp 56-62

Abstract: The single view detection based on convolutional neural network cannot effectively identify 3D shape defect targets. As a result, in practical applications, the low-precision detection requirements are often achieved by detecting only one of the most representative views or detecting each face in turn, which brings large time cost and use restrictions. To solve this problem, this paper proposes an improved residual network and applies it to 3D shape solder joint defect detection. The model can firstly obtain all view images of solder joints at one time, and then get detection results through feature aggregation and adaptive learning module. The multi-view solder joint data set was obtained from high frequency inductor element, and the identification accuracy of the proposed method reached 99.48%. The results show that the improved residual network can effectively improve the image identification accuracy under the same number of network layers. Compared with the single view detection, the multi-view detection structure can achieve greater accuracy with less time cost, and can effectively complete the detection task of 3D shape defect targets in actual industrial production.

Highlights: (1) Better performance of residual network module can be transplanted to any network and can accurately identify solder joint defects.

(2) Through the multi view adaptive fusion learning method, the problem of 3D solder joint defect recognition is solved.

Key words: defect detection; multi-view; feature fusion; solder joint; convolutional neural network