

P-GMAW 起弧过程特征分析及稳定性判别方法

刘文吉¹, 张亚丰¹, 王克宽², 岳建锋¹, 孙勇¹

(1. 天津工业大学, 机械工程学院, 天津, 300387; 2. 中国石油集团工程技术研究有限公司, 天津, 300451)

摘要: 脉冲熔化极气体保护焊 (pulsed gas metal arc welding, P-GMAW) 起弧过程易产生不稳定现象, 会严重影响电弧传感焊缝跟踪精度。针对这一问题, 对摆动电弧窄间隙 P-GMAW 不稳定起弧过程的成因进行了研究, 发现送丝速度对起弧过程稳定性具有重要影响。通过对电弧图像与电信号特征进行对比分析, 提取了表征电弧稳定性的电信号特征变量; 为减小变量冗余性和过拟合, 采用最大似然估计法筛选并提取了 8 个变量, 并通过主成分分析法 (principal component analysis, PCA) 对变量进行融合, 提取了方差贡献率最高的前两个主成分; 根据因子载荷发现, 相比熔滴过渡阶段和基值阶段, 脉冲峰值阶段是电弧更易发生不稳定现象的阶段。结合提取的主成分变量与二分类 Logistic 回归模型建立了起弧过程电弧稳定性判别模型。通过受试者工作特征 (receiver operating characteristic, ROC) 曲线得到了模型的最佳阈值。结果表明, 该模型对脉冲稳定性判别准确率达到了 80% 以上, 表明模型具有良好的判别性能。该模型对提高窄间隙高低跟踪精度、保证焊接质量具有一定应用价值。

创新点: (1) 分析得到起弧过程电弧稳定性随送丝速度的变化规律。

(2) 基于主成分分析和二分类 Logistic 回归建立的模型可有效实现起弧过程脉冲稳定性的判别。

关键词: 窄间隙焊接; 起弧过程稳定性; 主成分分析; 二分类 Logistic 回归

中图分类号: TG 409 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20230615004

Arc initiation process characteristics and stability evalution method in P-GMAW

LIU Wenji¹, ZHANG Yafeng¹, WANG Kekuan², YUE Jianfeng¹, SUN Yong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin, 300387, China;

2. CNPC Engineering Technology R & D Company Limited, Tianjin, 300451, China)

Abstract: The arc initiation process of P-GMAW is prone to instability, which can significantly affect the accuracy of arc sensing and weld seam tracking. In response to this issue, a study was conducted on the causes of unstable arc initiation in oscillating arc narrow gap P-GMAW, revealing the significant impact of wire feed speed on the stability of the arc initiation process. By comparing and analyzing arc images and electrical signal characteristics, key signal features representing arc stability are extracted. To reduce redundancy and overfitting, a maximum likelihood estimation method is employed to select and extract 8 variables, which are then fused using principal component analysis to extract the top two components with the highest variance contribution. Based on the factor loading, it is found that the pulse peak stage is the phase where the arc is more prone to instability compared to the droplet transition stage and the baseline stage. By combining the extracted principal component variables with a binary logistic regression model, an arc stability discrimination model for the arc initiation process is established. The optimal threshold model was obtained through the ROC curve. Experimental validation shows that the model achieves an accuracy rate of over 80% in pulse stability discrimination, indicating good discriminatory performance. This model holds certain application value in improving the accuracy of narrow gap high-low tracking and ensuring welding quality.

Highlights: (1) The variation of arc stability during arc initiation process with wire feed speed was analyzed.

(2) The model established based on PCA and binary logistic regression can effectively discriminate the pulse stability during the arc initiation process.

Key words: narrow gap welding; arc initiation process stability; principal component analysis; binary Logistic regression

0 序言

电弧传感器是一种常用的焊缝跟踪传感器^[1-2]。电弧传感器的静态数学模型表明,电流变化量和焊炬高度变化量存在线性关系。在进行焊缝高低跟踪时,需要在起弧阶段建立焊炬初始高度基准,从而得到初始电流参考量,以便对比焊接过程中电流值和电流参考值,获得高度偏差。但起弧过程易出现短路、断弧等不稳定情况,导致电弧传感器获得的高度基准不准确,引起后续对焊炬的调节过程中,出现过度压低焊炬,导致焊炬撞到工件;或者过度提高焊炬,引起断弧。因此,起弧过程的稳定性对于高度基准计算准确性及电弧传感焊缝高低跟踪精度具有重要的影响。

评估焊接起弧过程电弧稳定性,并根据稳定性特征选择高度基准的算法,是提高跟踪精度的重要手段。针对焊接过程稳定性的研究主要包括以下两方面,通过统计分析方法研究不同工艺参数下焊接特征信号的变化,从而得到焊接过程稳定性的情况;或者通过提取与焊接过程相关联的焊接特征信号,建立数学模型对焊接过程稳定性进行评价^[3-5]。统计分析法常用于描述数据的分布特性,如标准差、变异系数等常用指标用于描述数据离散程度^[6-7]。如当焊接过程稳定时,采集得到的信号数据分布相对集中,标准差和变异系数均较小。同时,根据焊接过程电弧、熔滴过渡的特点,分析其与电信号的关系,建立特征量实现焊接过程稳定性评价^[8-9]。针对单一特征量信息的全面性和准确性存在不足的问题,通过综合多个特征量,并结合适当算法建立数学模型,从而提高稳定性评判的准确性^[10-12]。以上针对焊接稳定性研究多集中在整个焊接过程分析,对起弧过程和单个脉冲周期稳定性研究较少。文中对起弧过程的电信号及电弧行为进行研究,提出 Logistic 回归模型结合主成分分析的稳定性判别方法,实现对起弧过程电弧稳定性的判别。

1 试验方法

试验系统如图 1 所示,焊接参数采用一元化调节,在一元化调节模式下,调节送丝速度就是改变

焊接电流的大小,调节弧长修正就是改变电压大小。信号采集设备主要由高速摄像、电流电压传感器和数据采集卡组成,实现对焊接过程中产生的电流信号、电压信号以及电弧图像信息进行同步采集。电信号采样频率为 10 kHz,高速摄像采样频率为 4000 帧/s,高速摄像置于坡口正前方对电弧进行拍摄。采用表 1 工艺参数进行试验。将 P-GMAW 的脉冲周期分为峰值阶段、熔滴过渡阶段和基值阶段 3 个阶段,如图 2 所示。

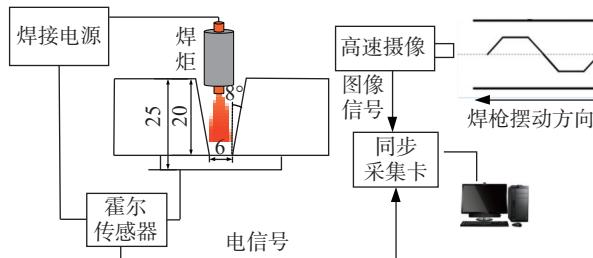


图 1 试验系统示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters

摆动幅度 S_w/mm	摆动频率 f/Hz	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	侧停时间 t/ms
3	1.8	4	100
气体流量 $Q/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	送丝速度 $v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	焊丝伸出长度 l/mm	焊丝直径 ϕ/mm
15	6	12	1

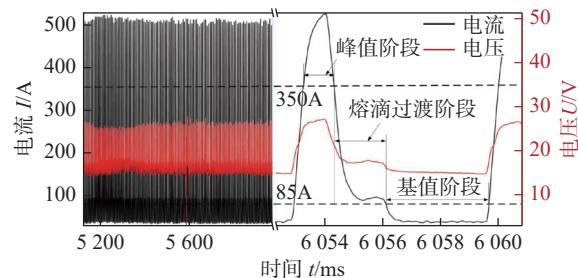


图 2 电信号脉冲波形
Fig. 2 Electric signal pulse waveform

2 试验结果与分析

进行下坡焊试验,高度基准自学习法下的焊缝跟踪过程如图 3 所示。焊枪高度基准自学习法通过实时采集焊接电流信号,并将连续 5~10 个摆动周期的平均电流作为焊炬高度基准值。可以看出在

第 6 ~ 10 个摆动周期内焊枪纠偏值为正如图 3(a) 所示, 即焊枪向上偏移, 与焊缝实际偏差方向相反, 最终使得焊枪发生较大偏差, 如图 3(b) 所示。分析原因为所建高度基准相较于实际值较小, 与后续摆动周期内的平均电流比较, 电流差值为负, 焊枪朝远离焊缝方向纠偏。并由于高度基准值较小, 导致焊枪始终高于初始端部到工件的距离(contact tip to workpiece distance, CTWD), 因此, 起弧阶段的电弧稳定性对焊枪高度基准值的准确性有重要影响, 从而影响焊缝跟踪精度。有必要对起弧阶段电弧稳定性进一步分析。

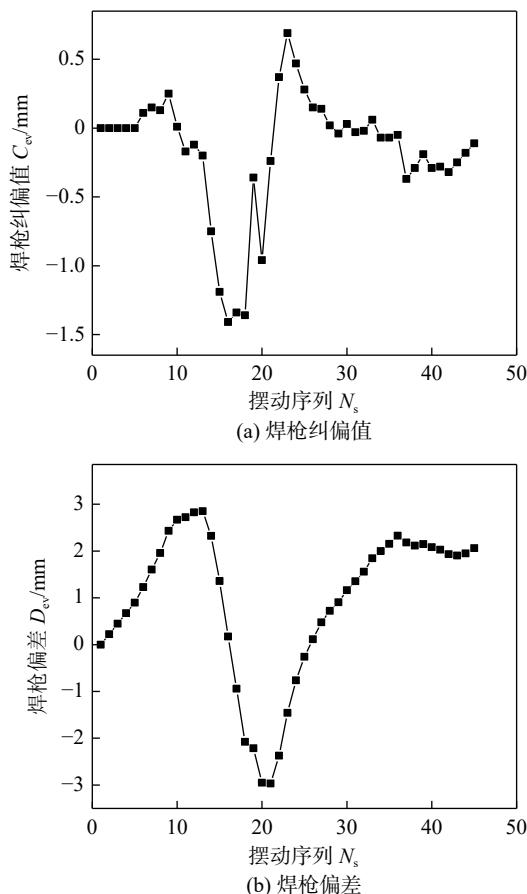


图 3 高度基准值学习法的焊缝跟踪

Fig. 3 Weld seam tracking using height reference value learning method. (a) welding torch correction values; (b) welding torch deviations

3 起弧过程电信号及图像特征分析

3.1 起弧过程信号特征及原因

由图 4 起弧过程焊缝图像可以看出, 图 4(a) 起弧过程相对稳定, 不稳定现象较少, 焊缝平整均匀, 图 4(b) 起弧过程受大量短路断弧影响, 焊缝成形较差。因为起弧过程是否稳定会严重影响后续的焊接

过程, 所以提出当电弧稳定后再沿焊接方向焊接, 但电弧从引弧到达稳定一般需要 1 ~ 2 个摆动周期, 这会导致起弧阶段焊层堆积, 所以有必要提出能够识别电弧稳定的方法。

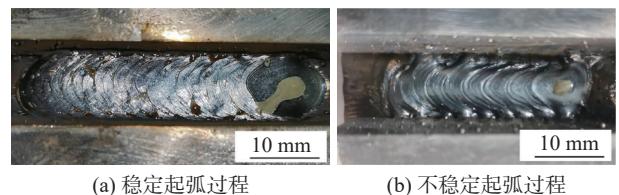
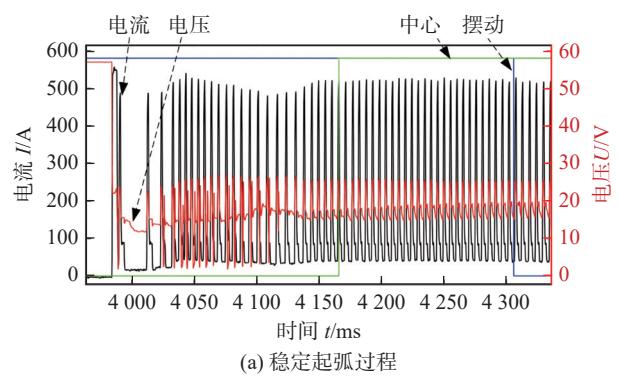


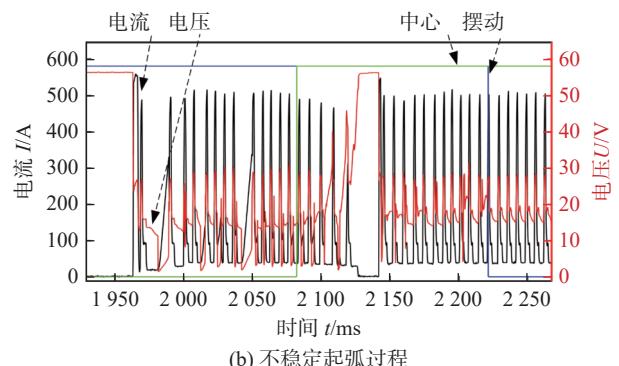
图 4 起弧过程焊缝图像

Fig. 4 Weld seams images during arc initiation processes. (a) stable arcing processes; (b) unstable arcing processes

对造成起弧过程不稳定现象的成因进行分析。起弧过程电信号如图 5 所示, 图 5(a) 为稳定起弧过程电信号的变化情况, 仅发生少量短路过渡。不稳定起弧过程如图 5(b) 所示, 发生了大量短路和断弧现象。如图 6 所示通过高速摄像发现引弧后的脉冲周期时间较长, 且电弧长度变化缓慢。因此对起弧过程送丝速度进行分析, 应用 IMAG J 结合高速摄像得出引弧的送丝速度小于焊接送丝速度, 即在引弧时进行缓送丝。作用是避免送丝速度过快造成短路接触时引起焊丝强烈塑性变形而导致引弧失败。引弧成功后, 送丝速度增加至设定焊接送丝速度。



(a) 稳定起弧过程



(b) 不稳定起弧过程

Fig. 5 Electric signal during arcing processes. (a) stable arcing processes; (b) unstable arcing processes

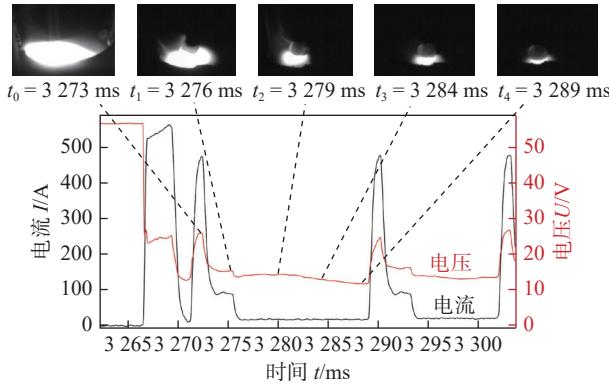


图 6 弧长较短时电信号

Fig. 6 Short arc length electrical signals

通过图 7 起弧过程参数变化对起弧过程的不稳定性进行原因分析。在引燃电弧后送丝速度要逐渐恢复到设定参数需要一定时间, 此时焊丝熔化速度大于送丝速度, 所以通过增加脉冲基值时间, 以降低平均电流, 可以进一步维持电弧的稳定状态, 但是也会导致弧长被压缩的很短。送丝速度达到设定值后, 为尽快恢复到设定弧长长度, 弧长调节阶段提高脉冲峰值电流和脉冲频率, 引起焊丝熔化速度大于送丝速度, 弧长逐渐恢复正常。但由于焊丝

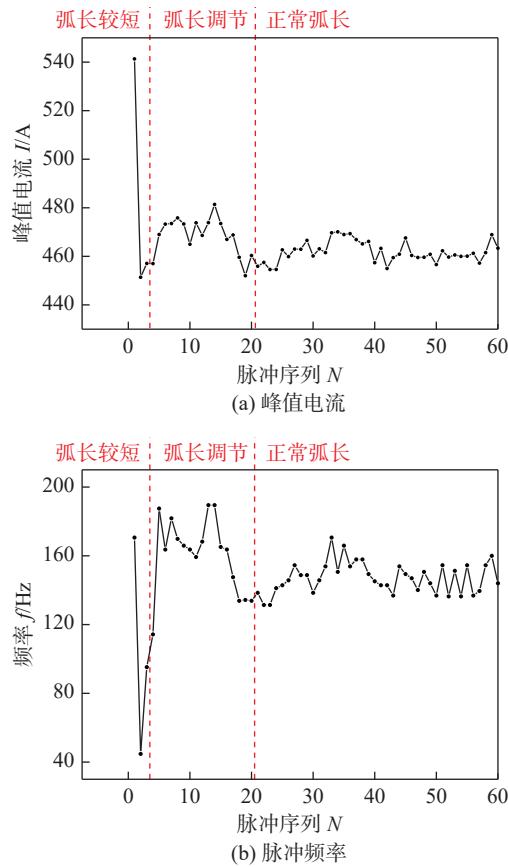
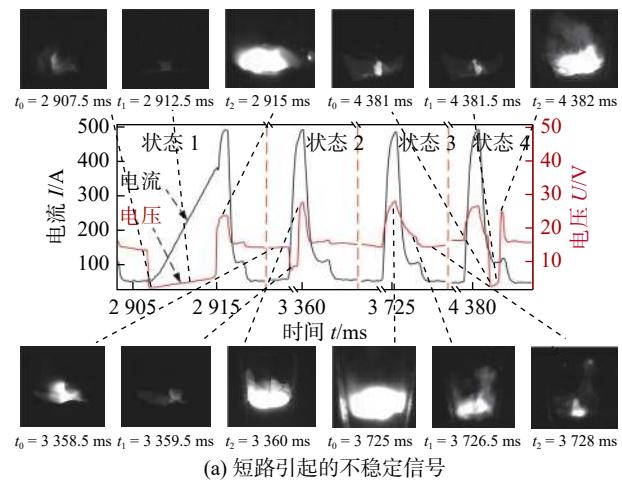


图 7 起弧过程参数变化

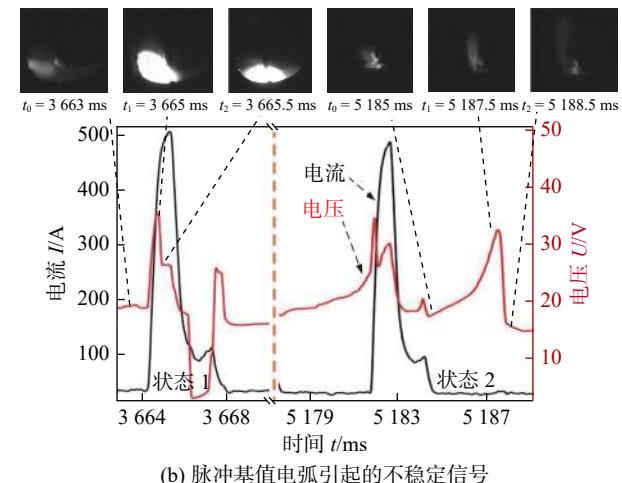
Fig. 7 Parameters change during arc initiation processes. (a) peak current; (b) pulse frequency

距离底部较近且电流较大, 会导致熔滴在形成阶段就与熔池或工件接触, 造成了大量短路、断弧等不稳定现象, 经一段脉冲序列的调整后, 电弧达到稳定。

不稳定信号的详细分析如图 8 所示, 图 8(a) 为短路引起的 4 种电弧状态, 状态 1 是弧长由于电弧距离底部过近与熔池接触, 形成直径大于焊丝的液桥, 导致缩颈困难, 随着短路电流不断增大, 缩颈力增大, 最终焊丝爆断引弧。状态 2、状态 3 和状态 4 的弧长相比状态 1 有所增大, 短路接触形成的液柱直径较小, 重新燃弧较为容易, 因此造成了瞬时短路接触。图 8(b) 是由焊枪摆动过程中, 电弧在基值阶段作用于侧壁上, 引起弧长发生变化。状态 1 是峰值阶段电流增大, 电弧挺度增加, 引起电弧对侧壁进行扫描, 极易造成咬边缺陷。状态 2 是焊丝与工件侧壁的距离变化引起的电压变化。根据上述



(a) 短路引起的不稳定信号



(b) 脉冲基值电弧引起的不稳定信号

图 8 弧长调节阶段的电信号

Fig. 8 Electrical signal during arc length adjustment stage. (a) unstable signals caused by short circuits; (b) unstable signals caused by pulse based arc

对起弧过程脉冲周期电信号及图像的分析, 发现送丝速度变化引起弧长的变化, 从而在参数调节过程中引起了大量不稳定现象。为探究不同送丝速度对起弧过程电弧稳定性的影响规律, 分别采用送丝速度为 5 m/min, 5.5 m/min, 6 m/min 和 6.5 m/min 时进行焊接, 当连续 5 个脉冲没有短路断弧, 波形呈现周期性波形时, 认为起弧过程已经达到稳定状态。结果如图 9 所示, 发现随着焊接送丝速度的增加, 电弧由引弧到稳定状态所需的时间, 即起弧时间逐渐变短, 不稳定现象也逐渐减少。

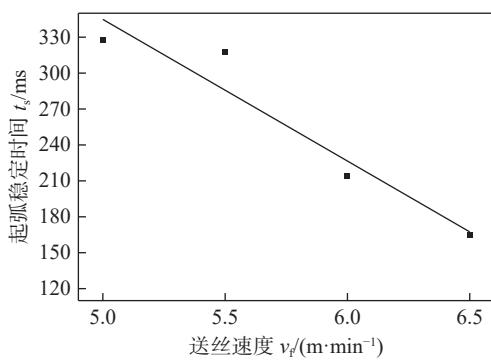


图 9 送丝速度对起弧过程稳定性的影响

Fig. 9 The influence of wire feeding speeds on the stability of arc starting processes

3.2 特征信号的选择

当焊接电弧不稳定时会产生偏移、扭转, 其相应电信号会发生变化, 特别是电压信号会出现比较明显的波动。利用统计分析方法提取能够表征电弧稳定性的特征变量。变异系数 V 是一个分析数据离散程度的统计量, 其作用是检测波形的稳定性或一致性, 能够表征焊接过程的波动程度。变异系数 V 值越小表明焊接过程越稳定, 变异系数 V 可由标准差 S 除以均值 $\bar{\mu}$ 得出, 变异系数 V 为

$$V = \frac{S}{\bar{\mu}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\mu_i - \bar{\mu})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (1)$$

式中: μ_i 为第 i 个电压值, n 为电压采样个数。

因此, 提取脉冲周期的峰值、熔滴过渡和基值 3 个阶段的电压变异系数; 同时提取峰值电流上升斜率和峰值阶段动态电阻检测峰值阶段电弧稳定性; 提取脉冲周期各阶段的电压极差以检测电弧是否存在突变; 提取峰值能量确保为焊丝熔化形成熔滴提供合适能量; 提取脉冲周期检测单个脉冲时间是否合理。

4 单个脉冲周期稳定性判别模型

4.1 基于 Logistic 回归模型变量筛选

对起弧阶段单个脉冲周期稳定性采用二分类判别, 而二分类 Logistic 回归模型的因变量取值范围为 [0, 1], 因此利用该模型建立数学模型从而判断脉冲周期的稳定性。同时采用最大似然估计法进行模型参数估计。提取起弧过程中 360 个脉冲周期作为样本, 对提取的特征变量进行单变量 Logistic 回归模型拟合分析, 并计算最大似然估计值来进行变量筛选。通过对自变量和因变量进行线性拟合得到最大似然函数值, 利用 Logistic 回归函数得到最优拟合直线 Logistic 回归函数为

$$\begin{cases} \ln\left(\frac{p_i}{1-p_i}\right) = \alpha + \beta x_i \\ \ln[L(\theta)] = \ln\left[\prod_{i=1}^k p_i^{y_i} (1-p_i)^{(1-y_i)}\right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: α 为回归截距; β 为回归系数; p_i 为第 i 个脉冲在给定自变量条件 x_i 的稳定性概率估计; y_i 为第 i 个脉冲实际稳定性概率值; k 为总脉冲个数。

$\ln[L(\theta)]$ 为各脉冲周期预测结果乘积, 其值越接近 0 代表模型拟合程度越好。对数似然函数为

$$\ln[L(\theta)] = \sum_{i=1}^k [y_i(\alpha + \beta x_i) - \ln(1 + e^{\alpha + \beta x_i})] \quad (3)$$

求解最优拟合直线参数 α 和参数 β 使 $\ln[L(\theta)]$ 达到最大。经拟合单变量 Logistic 回归判断模型, 得到最大对数似然估计值如表 2 所示。筛除拟合效果较差的峰值能量和脉冲周期这两个变量。对剩余 8 个变量进行相关性检验如图 10 所示, 发现各变量间相关性很高, 特别是各阶段的组内变量相关系数都达到 0.8 以上, 会导致模型参数估计出现较大误差, 所以无法直接建立多变量 Logistic 回归模型。

4.2 主成分分析

由于反应起弧过程脉冲周期稳定性的特征量较多, 且各变量间存在较高相关性。为了减少变量之间的相关性和信息的冗余性。采用 PCA 将众多变量重新组合成数目较少且不相关的综合变量, 同时提高模型参数估计的准确性。采用抽样适合性检验 (kaiser meyer olkin, KMO) 检验判断变量是否适合采用 PCA, 对提取的变量计算得到 KMO 值为 0.79(大于 0.6), 表明对数据进行主成分分析是有必

表 2 单变量最大似然估计
Table 2 Univariate maximum likelihood estimation

变量	对数自然函数值 $\ln[L(\theta)]$	自由度 d_f	显著性 S_1
峰值电流上升斜率 x_1	-189.10845	1	0
峰值动态电阻 x_2	-194.89861	1	0
峰值变异系数 x_3	-170.74018	1	0
熔滴过渡变异系数 x_4	-120.66539	1	0
基值变异系数 x_5	-194.85681	1	0
峰值极差 x_6	-162.22914	1	0
熔滴过渡极差 x_7	-115.91707	1	0
基值极差 x_8	-196.57049	1	0
脉冲周期 x_9	-206.13597	1	0
峰值能量 x_{10}	-215.57218	1	0

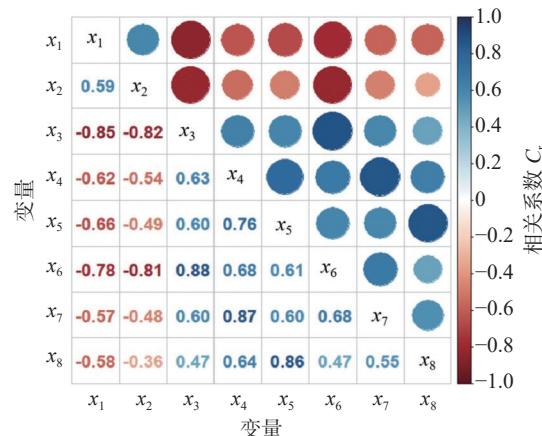


图 10 变量间相关性检验

Fig. 10 Correlation test between variables

要的。主成分分析结果如图 11 所示,选取累计贡献率达到 80% 以上的主成分作为分析焊接稳定性的

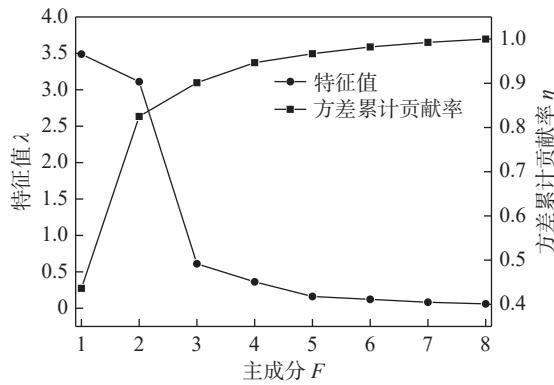


图 11 主成分分析结果

Fig. 11 Principal components analysis result

主要影响因子,因此选取前两个主成分。表 3 为两个主成分的因子载荷和得分系数,由因子载荷可知变量 x_i 和主成分 F_j 的相关程度,可看出主成分

表 3 因子载荷和得分系数
Table 3 Factors load and scores coefficient

变量	因子载荷		得分系数	
	主成分 F_1	主成分 F_2	主成分 F_1	主成分 F_2
峰值电流上升斜率 x_1	-0.7244	-0.4751	-0.20258	-0.00784
峰值动态电阻 x_2	-0.8915	-0.1651	-0.40750	0.23845
峰值变异系数 x_3	0.9045	0.3233	0.35470	-0.14980
熔滴过渡变异系数 x_4	0.4609	0.7759	-0.04961	0.28493
基值变异系数 x_5	0.3403	0.8657	-0.14702	0.38349
峰值极差 x_6	0.8821	0.3600	0.32909	-0.11968
熔滴过渡极差 x_7	0.4649	0.6814	-0.01186	0.22756
基值极差 x_8	0.1723	0.8987	-0.24798	0.46632

F_1 主要由峰值电流上升斜率、峰值动态电阻、峰值变异系数和峰值极差 4 个变量所决定, 这 4 个变量在主成分 F_1 上的载荷大小均在 0.7 以上, 它代表着起弧过程单个脉冲周期中峰值阶段的电弧稳定性, 且 F_1 对 x_i 的方差贡献率已达 43.62%。主成分 F_2 主要由熔滴过渡变异系数、基值变异系数、熔滴过渡极差和基值极差 4 个变量所决定, 代表着起弧过程单个脉冲周期中熔滴过渡阶段和基值阶段的电弧稳定性, 其方差贡献率为 38.88%。综上说明 F_1 是判断起弧过程电弧稳定性的重要变量。根据主成分得分系数可求出主成分计算表达式, 主成分由变量 x_i 表示的线性组合为

$$F_j = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m \quad (4)$$

式中: a_i 为变量 x_i 的主成分得分系数; m 为变量个数。进而可以求出 F_1 和 F_2 的值。

4.3 稳定性判别模型

将主成分分析提取的两个主成分 F_1 和 F_2 作为 Logistic 回归模型的自变量, 得出最终稳定性判别模型为

$$P = \frac{e^{(-3.050 - 9.128F_1 - 8.299F_2)}}{1 + e^{(-3.050 - 9.128F_1 - 8.299F_2)}} \quad (5)$$

式中: F_1 为表征脉冲周期峰值阶段稳定性的变量; F_2 为表征脉冲周期熔滴过渡阶段和基值阶段稳定性的变量。

结合式(4)和式(5)可计算出每个脉冲周期对应的电弧稳定性概率预测值 P 。一般选取 $C = 0.5$ 作为 Logistic 回归结果判断的阈值, 为得到最佳的模型判别效果, 采用 ROC 曲线求取最佳阈值。文中采用“灵敏度 S_n + 特异度 S_f ”和最大法进行最佳阈值的求取, 最靠近 ROC 曲线左上方的点为灵敏度 S_n 和特异度 S_f 均较高的临界值, 即最佳阈值。灵敏度为实际稳定脉冲个数中预测结果为稳定个数所占比例; 特异度为实际不稳定脉冲个数中预测结果为不稳定个数所占比例, 常用 $1-S_f$ 来表达。经计算, 当 $S_n = 0.92$, $S_f = 0.87$ 时, 两者的和达到了最大值 1.79, 其对应的阈值为 0.71366。因此, 采用 $C = 0.71$ 为模型的判断阈值。ROC 曲线越靠近左上角, 即 ROC 曲线下的面积 S_2 越接近于 1, 表明模型的预测效果越好。由图 12 可知 $S_2 = 0.95$, 说明模型的预测效果很好。

4.4 模型试验验证

为了验证模型的有效性, 采集稳定起弧过程和不稳定起弧过程各 50 个脉冲周期电信号, 模型预

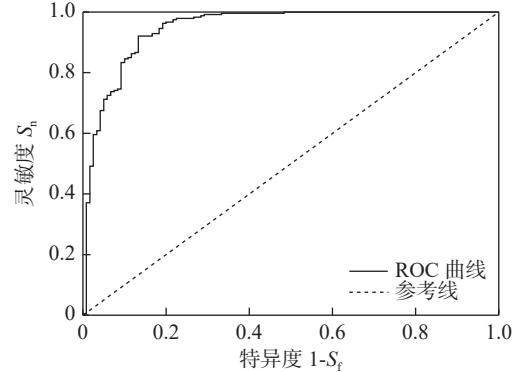


图 12 ROC 评估曲线
Fig. 12 ROC evaluation curves

测结果如图 13 所示, 预测准确率都达到了 80% 以上。不同送丝速度下的起弧稳定性概率分布及电流波形如图 14 所示。图 14 中预测概率值为实际概率放大 1000 倍的结果。可以看到在启动焊接后, 焊丝未接触到坡口底部前, 并未有电流产生, 因此脉冲预测概率为 0; 当短路接触后产生电流并经过一段时间的电弧不稳定阶段, 此时预测概率较小, 在电弧稳定后, 预测概率值较大。脉冲预测概率分布与实际电流波动情况有着较好的对应关系。

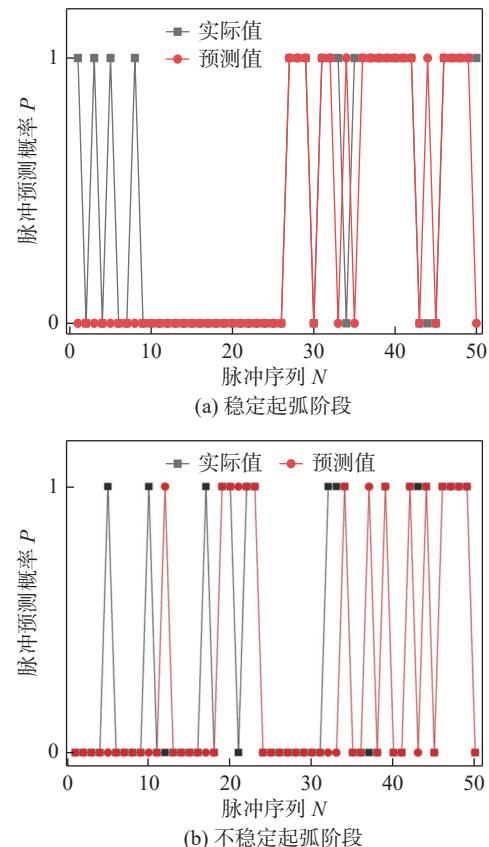


图 13 模型预测结果
Fig. 13 Model prediction result. (a) stable arcing processes; (b) unstable arcing processes

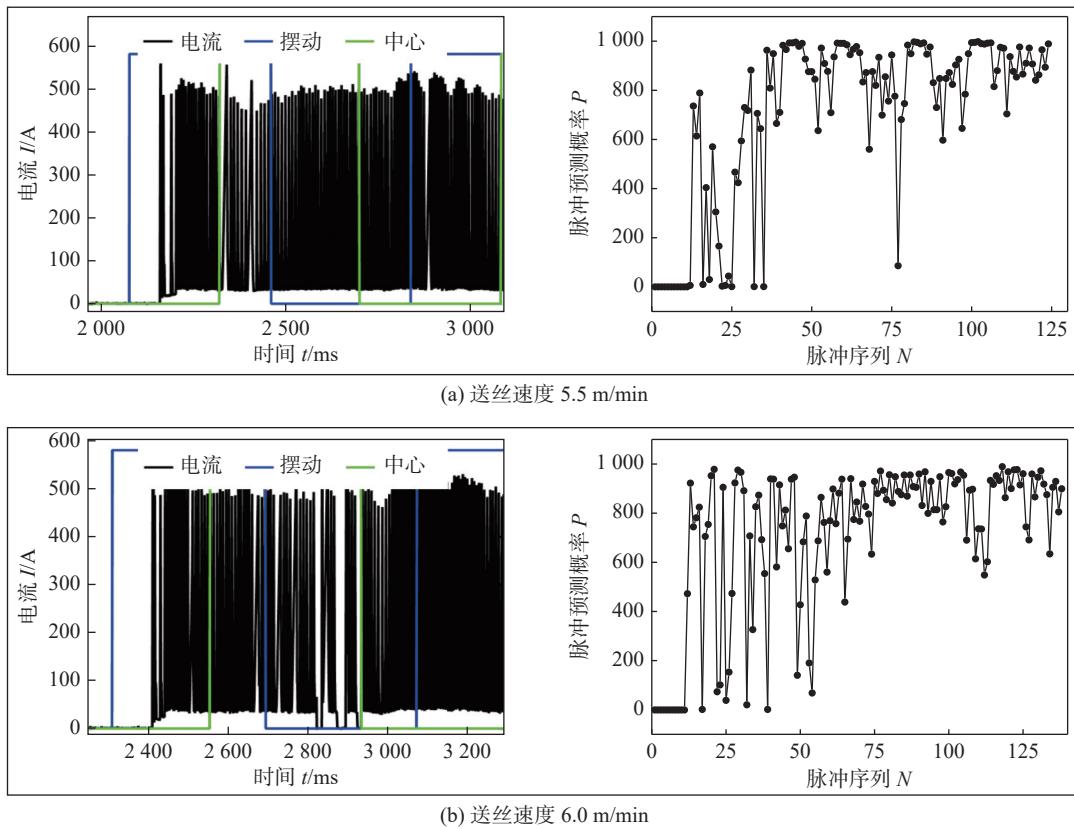


图 14 不同送丝速度下的起弧稳定性概率

Fig. 14 Probability of arc stability under different wire feeding speeds. (a) wire feeding speed 5.5m/min; (b) wire feeding speed 6m/min

5 结论

(1) 起弧过程电弧不稳定现象随着焊接送丝速度的增大而逐渐变少,且电弧由引弧到达稳定状态所需时间逐渐变短。

(2) 基于主成分分析发现相较于熔滴过渡阶段和基值阶段,脉冲峰值阶段是电弧更易发生不稳定情况的阶段。

(3) 建立的起弧过程脉冲稳定性判断模型对脉冲稳定性预测准确率达到了 80%。通过该模型为可以提高焊炬高度基准计算准确性,从而提高窄间隙高低跟踪精度,保证焊缝质量提供了新的途径。

参考文献

- [1] 杨秀烨, 方金祥, 何鹏. 自动焊接传感技术研究现状及发展趋势 [J]. 材料导报, 2022, 36(3): 20090224 – 8.
Yang Xiuye, Fang Jinxiang, He Peng. Research status and development trend of automatic welding sensor technology[J]. Materials Review, 2022, 36(3): 20090224 – 8.
- [2] 秦国梁. 窄间隙气体保护焊接工艺发展与应用 [J]. 金属加工(热

加工), 2022(9): 8 – 20.

Qing Guoliang. Development and application of narrow gap gas shielded welding technology[J]. MW Metal Forming, 2022(9): 8 – 20.

[3] 刁国宁, 徐国敏, 张天奕, 等. 焊丝伸出长度对三丝间接电弧焊稳定性和焊缝成形的影响 [J]. 焊接学报, 2022, 43(3): 31 – 36.

Diao Guoning, Xu Guomin, Zhang Tianyi, et al. Effect of wire extension on stability and bead formation of triple-wire gas indirect arc welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(3): 31 – 36.

[4] Paul K, Gabriel O E, Benoit N, et al. Assessment of arc stability features for selected gas metal arc welding conditions[J]. SN Applied Sciences., 2022, 4(10): 268.

[5] Zhou K, Yao P. Review of the recent trends of process monitoring and control for double-wire GMAW process[J]. IEEE Access, 2019, 7: 124621 – 124631.

[6] Liu L M, Yu S B, Song G, et al. Analysis of arc stability and bead forming with high-speed TW-GIA welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 46(10): 67 – 76.

[7] Wang J F, Sun Q J, Zhang T, et al. Arc stability indexes evaluation of ultrasonic wave-assisted underwater FCAW using electrical signal analysis[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103: 2593 – 2608.

- spectives of titanium-based braze filler metal: a review[J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(38): 14945 – 14996.
- [8] Cui B, Song L Y, Liu Z W, et al. Study of the morphology and properties of diamond joints brazed with carbide-reinforced Cu-Sn-Ti filler metal[J]. China Welding, 2022, 31(3): 53 – 60.
- [9] 姜虹, 张礼敬, 杨静. 不锈钢真空钎焊 [C]//中国真空学会真空冶金专业委员会. 2004' 全国真空冶金与表面工程学术研讨会论文集. 沈阳, 2004: 102 – 106.
Jiang Hong, Zhang Lijing, Yang Jing. Vacuum brazing of stainless steel[C]// Vacuum Metallurgy Committee of China Vacuum Society. Proceedings of 2004 National Symposium on Vacuum Metallurgy and Surface Engineering. Shenyang, 2004: 102 – 106.
- [10] Ma H Y, Liu Z P, Zhou G Y, et al. Study on element diffusion behaviour of vacuum-furnace brazing 316L/BNi-2 joints based on boltzmann-matano model[J]. Welding in the World, 2021, 65: 2239 – 2246.
- [11] Chen L, Chen H Z, Yang W P, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti/1Cr21Ni5Ti stainless steel joints brazed with Mn-based brazing filler[J]. Materials, 2022, 15(19): 7021.
- [12] Roy R K, Panda A K, Das S K, et al. Development of a copper-based filler alloy for brazing stainless steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 523(1-2): 312 – 315.
- [13] 胡胜鹏, 李文强, 付伟, 等. BNi-2 非晶钎料钎焊高镍 TiAl 合金与 GH3536 合金接头组织与性能 [J]. 航空学报, 2021, 42(3): 417 – 428.
Hu Shengpeng, Li Wenqiang, Fu Wei, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of high Nb containing TiAl alloy and GH3536 superalloy brazed using amorphous BNi-2 filler[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3): 417 – 428.
- [14] 14, Min M, Mao Y W, Deng Q R, et al. Vacuum brazing of Mo to 316L stainless steel using BNi-2 paste and Cu interlayer[J]. Vacuum, 2020, 175: 109282.
- [15] Yong D, Chang Y A, Huang B Y, et al. Diffusion coefficients of some solutes in fcc and liquid Al: critical evaluation and correlation[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 363(1-2): 140 – 151.
- [16] 李扬, 李晓延, 姚鹏. 空位对 Cu/Sn 无铅焊点界面元素扩散的影响 [J]. 焊接学报, 2018, 39(12): 25 – 30.
Li Yang, Li Xiaoyan, Yao Peng. Effect of vacancy on the elements diffusion in Cu/Sn lead-free solder joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(12): 25 – 30.

第一作者: 田晓羽, 男, 1985 年出生, 博士; 主要从事真空钎焊方面研究; Email: hittianxiaoyu@163.com

通信作者: 付伟, 博士; 副教授; Email: wei.fu@hit.edu.cn

(编辑: 汤明日)

[上接第 60 页]

- [8] Roshan R, Kumar N A, Kumar S K, et al. Effect of welding speed and wire feed rate on arc characteristics, weld bead and microstructure in standard and pulsed gas metal arc welding[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023, 37(21/24): 3297 – 3314.
- [9] Hong H T, Han Y Q, Lu Y, et al. Approximate entropy analysis of arc stability in VPPA-GMAW hybrid welding[J]. China Welding, 2022, 31(3): 35 – 41.
- [10] Wu K Y, Chen Z W, Huang H, et al. Intelligent control of arc stability and arc length in aluminum alloy pulsed GMAW[J]. Welding in the World, 2022, 66(7): 1357 – 1368.

- [11] Kim S, Hwang I, Kim D Y, et al. Weld-quality prediction algorithm based on multiple models using process signals in resistance spot welding[J]. Metals, 2021, 11(9): 1459.
- [12] 张鸿博, 刘琰, 阚永彬, 等. 一种输气管道环焊缝缺陷自身高度精准预测模型 [J]. 天然气工业, 2022, 42(7): 101 – 109.
Zhang Hongbo, Liu Yan, Que Yongbin, et al. A high-accuracy prediction model for self height of girth weld defect in gas pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(7): 101 – 109.

第一作者: 刘文吉, 博士; 高级实验师; 主要研究方向为焊接自动化, 焊接过程质量控制; Email: Liuwenji1981@126.com

(编辑: 汤明日)