

基于声发射信号短时能量的 TIG 焊熔透状态识别

王齐胜, 高延峰, 龚岩峰, 黄林然, 赵佳敏

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 江西 南昌 330063)

摘要:针对 TIG 焊接质量在线检测问题,提出了基于声发射信号短时能量的焊缝熔透状态识别方法。采集了 TIG 焊接过程中母材负载的声发射信号并对其进行时频域分析。首先采用限幅滤波法降低信号中的脉冲干扰。为了提高信噪比并凸显信号的能量突变信息,对声发射信号进行了短时能量分析。结果表明,未熔透、临界熔透、过熔透三种状态的信号短时能量依次变大。最后,根据平均短时能量,利用支持向量机进行熔透状态的识别。试验结果表明,声发射信号的平均短时能量可以很好地三种熔透状态进行区分,对熔透状态的识别率达到了 98%以上,从而为焊接质量在线检测提供了一种新方法。

关键词:声发射信号;短时能量;熔透状态;状态识别

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20190670

中图分类号: TG444+.74; TG441.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2020)21-0107-04

Weld Bead Penetration State Recognition in TIG Welding Process Based on Short-time Energy of Acoustic Emission Signal

WANG Qisheng, GAO Yanfeng, GONG Yanfeng, HUANG Linran, ZHAO Jiamin

(School of Aeronautic Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Aiming at quality detection of TIG welding on line, a weld bead penetration state recognition method based on short-time energy of acoustic emission signal was proposed. The loading acoustic emission signal of the base metal in the process of TIG welding was collected and analyzed by time-frequency domain. Firstly, the amplitude limit filtering method was used to reduce the pulse interference in the signal. In order to improve the signal-to-noise ratio and highlight the energy mutation information of the signal, a short-time energy analysis of acoustic emission signal was performed. The results show that the short-time energy of the three states which are non-penetration, critical penetration, and excessive penetration becomes larger in turn. Finally, the support vector machine was used to realize the penetration state recognition based on the average short-time energy. The test results show that the average short-time energy of the acoustic emission signal can distinguish the three penetration states well, and the average recognition rate of the penetration state reaches over 98%. This research provides a new method for the welding quality online detection.

Key words: acoustic emission signal; short-time energy; penetration state; state recognition

TIG 焊是一种现代的焊接方法,由于具有电弧稳定、无飞溅、焊接质量好,可以焊接几乎所有合金或金属等诸多优点,自 20 世纪以来,该技术已被广泛地应用于工业的各个领域^[1]。而衡量焊缝成形质量最根本的指标是焊缝的熔透状态,获得均匀适度

的熔透是保证焊接质量的基本要求,而未熔透、不连续熔透及过熔透(焊缝明显下塌或烧穿)则应该避免^[2]。多年来,国内外许多工程因焊缝熔透质量未过关而造成的重大事故屡见不鲜,因此熔透状态的监控在世界范围内一直受到高度重视^[3]。

为了实现焊接过程中熔透状态的实时检测,国内外研究人员借助了各种不同的研究方法和手段。Yu^[4]等人以 5A06(LF6)铝合金的脉冲 GTAW 焊接过程中的质量控制为研究背景,利用电弧光谱中的 ArI 谱线信息实现了对焊缝熔透状态的模糊预测。吕娜^[5]以脉冲 GTAW 焊接过程中的质量控制为研究背景,分析了电弧声信号的熔透特性,提出了一整套熔透特征的时频-时频域特征提取算法,包括有

收稿日期:2019-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51465043);江西省自然科学基金资助项目(20171BAB206033);江西省重点研发计划项目(20171BBE50011)

作者简介:王齐胜(1995-),男,江西赣州人,在读硕士,主要研究方向:焊接自动化;电话:15797904036;E-mail:458590954@qq.com

通讯作者:高延峰(1974-),男,河北邯郸人,教授,博士,主要研究方向:焊接自动化;电话:15870618326;E-mail:gaoyf@nchu.edu.cn

听觉注意 AC-ROI 预处理方法及极大模阈值去噪方法,还提取出了电弧声信号的声道熔透特征系数。陈武柱^[6]等人研制了 CO₂ 激光焊同轴视觉系统,可以较清晰地显示熔透状态下的俯视小孔,并获得焊接中焊缝状态由未熔透转化为完全熔透时的视觉信息变化特征,为实现闭环的熔透控制奠定了理论基础。Wickle^[7]利用开发的点状红外传感实现了 GTAW 焊接过程中焊缝熔深的实时监控,并在改变焊接条件下利用反馈控制器获取了稳定的熔深。张志芬^[8]将焊接过程中的光谱、声音和电压信息进行了融合,实现了基于 SVM-CV 多信息融合模型的铝合金焊缝熔透状态分类预测。

在 TIG 焊接过程中,伴随着电弧热源对液态熔池的冲击,释放出弹性波能量。这种弹性波能量的一种表现形式即为以母材为传输媒介负载的声发射信号。焊接过程中随着熔池体积的变化,熔池的振荡情况必定有所变化,母材负载声发射能量传递的规律也发生相应的变化。因此,TIG 焊接过程中母材负载的声发射信号蕴含了熔透状态的特征信息。本文基于母材负载的声发射信号分析 TIG 焊接过程熔透状态信息的时频域表征,提取相关特征并分析,为 TIG 焊熔透状态实时检测提供一种新思路。

1 试验系统

在试验中,利用无丝进给的 TIG 焊接工艺。采用 JASIC-TIG300S 直流钨极氩弧焊电源进行焊接。采用北京声华兴业科技有限公司生产的 SR40M 声发射传感器拾取焊接过程中母材负载的声发射信号,采集系统使用北京阿尔泰科技公司生产的 USB3202 数据采集卡。采用厚度为 4 mm 的 Q235 低碳钢为母材进行焊接。采用流量为 15 L·min⁻¹ 纯氩(99%)保护电弧和熔池,将一个声发射传感器紧固在母材上,利用采集卡和计算机以采样频率为 80 kHz 采集焊接声发射信号,试验装置如图 1 所示。



图 1 试验装置
Fig.1 Experimental device

为了获得不同熔透状态的声发射信号,本文进行了三组试验,每组试验分别进行了多次,参数如表 1 所示。在相同的焊接参数下,焊接熔透状态一般随焊接速度的变化而变化。一般来说,TIG 焊接过程中有三种典型的熔透状态,即未熔透、临界熔透和过熔透状态。试验 1 所得焊缝处于未熔透状态,试验 2 所得焊缝处于临界熔透状态,试验 3 所得焊缝处于过熔透状态。

表 1 焊接参数
Tab.1 Welding parameters

焊接参数	试验 1	试验 2	试验 3
钨极直径/mm	1.2	1.2	1.2
氩气流量/(L·min ⁻¹)	15	15	15
电极高度/mm	10	10	10
焊接电流/A	110	110	110
焊接速度/(mm·s ⁻¹)	6	3	2.2

2 声发射信号特征分析

2.1 声发射信号的时频特征分析

从三组试验中分别随机选出一次试验结果,如图 2 所示。从时域信号可以看出,在一次试验过程中的声发射信号较为稳定,但是在某些时刻有较大的尖峰,这些尖峰可能是由偶然因素引起的脉冲干扰。从图中可以很明显看出,未熔透状态声发射信号能量远小于临界熔透状态,而过熔透状态的信号能量稍大于临界熔透状态。因此未熔透状态很容易识别,而临界熔透状态和过熔透状态的区别相对较小。

从三种熔透状态声发射信号频谱图可以看出,三种熔透状态主要频率成分分布在 0~20 kHz 之间,在主要频率成分中,未熔透状态幅值最小,过熔透状态幅值最大。其频谱图均在 4~5.5 kHz 内有一最大的频率分量,而且从未熔透到过熔透状态,最大频率分量所在频率位置依次变大。

2.2 限幅滤波

为了克服因偶然因素引起的脉冲干扰,对原始声发射信号进行限幅滤波。限幅滤波算法是求相邻两次采样数据相差的绝对值,并与两次采样允许的最大差值进行比较,若不大于最大差值,则认为此次采样有效,否则认为本次采样无效,并将上一次采样值作为本次的采样值,最大差值需要根据实际情况确定。

由于限幅滤波算法总是对单一相邻点进行比较,如果干扰信号在短时间内连续出现,则无法将所

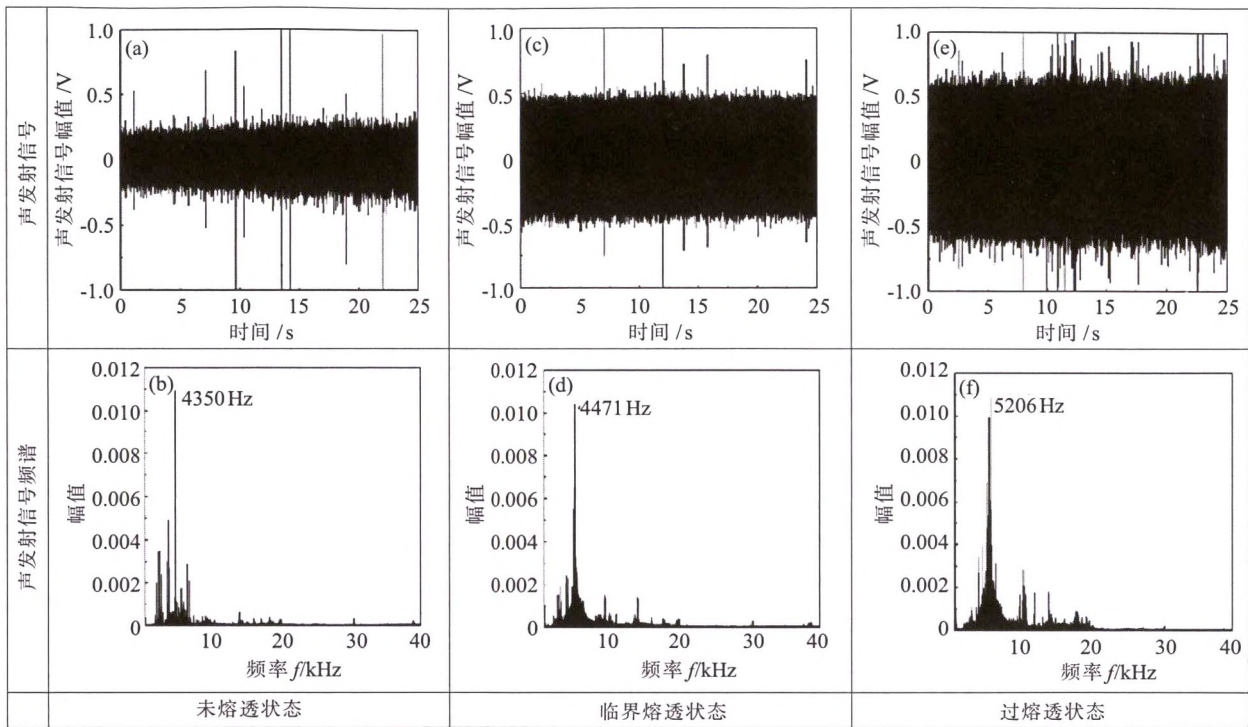


图 2 不同熔透状态声发射信号和频谱图
Fig.2 Acoustic emission signals and spectrogram under different penetration states

有干扰点滤除。根据上述思想对限幅滤波法进行改进,将本次采样值作为中心点,取窗口长度为 l ,求本次采样值与窗口中所有采样值的差值,然后求其绝对值的最大值,若不大于允许的最大差值,则采用本次采样值,否则将窗口内所有采样值的均值作为本次采样值。改进后的滤波公式如式(1)所示,式中: Δe 为允许的最大差值; X_n 为本次采样值; Y_n 为滤波后数值。

$$Y_n = \begin{cases} X_n & \max(|X_n - X_i|) \leq \Delta e \\ \left(\sum_{i=n-l/2}^{n+l/2} X_i \right) / l & \max(|X_n - X_i|) > \Delta e \end{cases} \quad (1)$$

结合多次试验数据分析,确定合适的最大差值和窗口长度。图 3 为选取允许最大差值为 1,窗口长度为 21,对临界熔透状态声发射信号滤波后结果,相比图 2(c),大部分尖峰被滤除。

3 声发射信号短时能量分析

母材负载的声发射信号采集中会受到噪声的干扰,利用短时能量法可以增强有用信号与噪声的对比度,从而明显的提高信噪比,并且有效凸显信号所包含的突变信息以及信号的稳定性情况,因此进一步对滤波后信号进行短时能量分析。

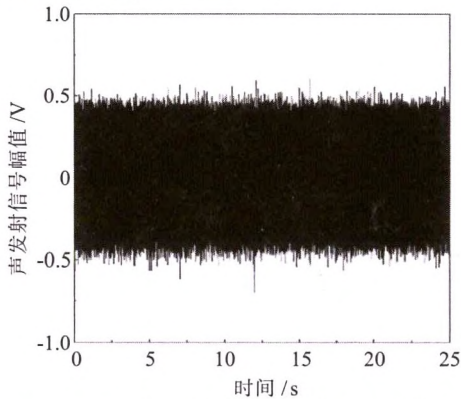


图 3 限幅滤波后临界熔透状态声发射信号
Fig.3 Acoustic emission signal of critical penetration state after amplitude limit filtering

3.1 信号分帧和加窗处理

声发射信号是一个非稳态且瞬变的信号。但是在较短时间内可认为是相对稳定且不变的,这个短时一般指 10~30ms。在短时分析中,将信号分为一段一段来分析,通常称一段为“一帧”。在每一帧内认为声发射信号是一个准稳态过程,也就是说声发射信号具有短时平稳性,对声发射信号短时能量分析之前需要进行分帧、加窗处理。按式(2)进行分帧,假设 N 为信号的总长度, L 为每一帧的长度。为了使特征参数平稳过渡,在不重叠的帧之间内插一些帧,帧移为 A ,即后一帧相对前一帧的位移量, f 为被分总帧数。

$$f=(N-L)/A+1 \quad (2)$$

加窗就是利用窗函数与原始信号相乘得到加窗信号:

$$y_n(m)=x(m)\omega(n-m) \quad n-L+1 \leq m \leq n \quad (3)$$

式中: $x(m)$ 为原始信号; $\omega(n)$ 为加窗函数; $y_n(m)$ 为在位置 n 的加窗信号。常用的窗函数有矩形窗、汉宁窗、海明窗,由于海明窗具有较大的带宽和较快的带外衰减速度,输入信号的失真较小,因此选择海明窗,窗长与帧长一致。

3.2 短时能量

在位置 n 的短时能量定义为:

$$E_n = \sum_{i=1}^L y_n^2(i) \quad (4)$$

当窗长较小时,处理的平滑作用不明显,但能反映出能量的快变细节;而当窗长较大时,处理的平滑作用大,有利于观察信号能量的包络,而且更好地提高信噪比。综合考虑,窗长取 20ms,帧移取帧长的 30%。图 4 为临界熔透状态的声发射信号 1s 内短时能量分布,实时呈现了声发射信号的能量变化信息,短时能量在 a 时刻有一个明显的增加,在 b 时刻有一个明显的减小,在整个时长过程中,能量振幅大约为 30。

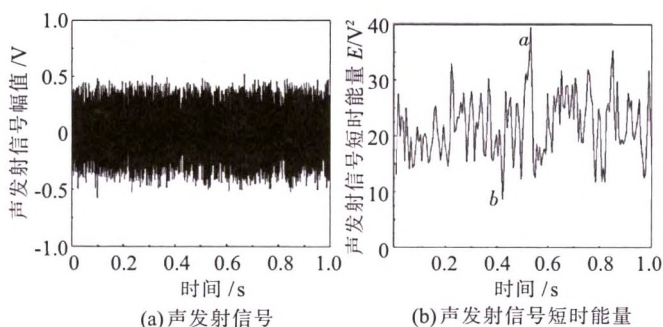


图 4 临界熔透状态的声发射信号及其短时能量

Fig.4 Acoustic emission signal in critical penetration state and its short-time energy

图 5 为三种熔透状态声发射信号及短时能量分布图,其中每幅图中分别由三种熔透状态的短时能量组合而成,0~1s 为未熔透状态,1~2s 为临界熔透状态,2~3s 为过熔透状态。从图 5 中可以看出,短时能量进一步增加了不同熔透状态的区别,未熔透状态短时能量远小于临界熔透状态,过熔透状态短时能量整体上大于临界熔透状态,但有小部分重叠,两者区别相对较小。这说明不同的熔透状态的声发射信号具有不同的短时能量,根据短时能量即可

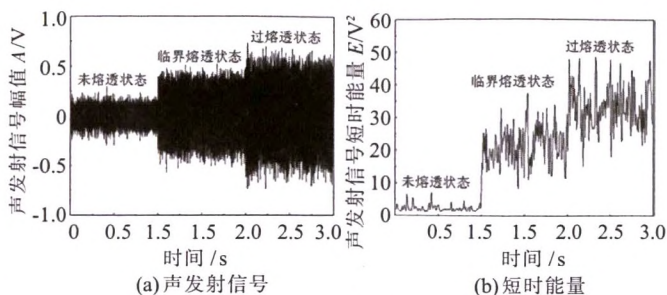


图 5 三种熔透状态声发射信号及其短时能量

Fig.5 Acoustic emission signals and their short-time energy in three penetration states

对其进行辨识。

4 SVM 识别结果与分析

本文利用SVM(支持向量机)进行熔透状态的识别,选取径向基核函数。考虑到过熔透状态短时能量整体大于临界熔透状态,但部分重叠的情况,选取一段信号的平均短时能量作为支持向量机的输入特征,同时考虑检测的实时性要求,将三次试验信号分为 250 段,每一段信号 100ms。每种熔透状态随机选取 50 段信号作为训练样本,剩下的作为测试样本。识别结果如表 2 所示。从表中可以看出,三种熔透状态的识别率均高达 98%以上,说明基于声发射信号的短时能量可以很好地将三种熔透状态进行区分。从表 2 中也可以看出,未熔透状态很容易识别出来,而临界熔透状态与过熔透状态更容易发生混淆。

表 2 熔透状态识别混淆矩阵

Tab.2 Penetration state recognition confusion matrix

类别	未熔透	临界熔透	过熔透	整体识别率
未熔透	100%	—	—	—
熔透	—	99%	1%	—
过熔透	—	2%	98%	—
整体识别率	—	—	—	98.7%

5 结论

(1) 通过对不同熔透状态声发射信号的时频特征分析,发现三种熔透状态信号能量有所区别,未熔透状态信号能量远小于临界熔透状态,临界熔透状态能量稍小于过熔透状态;三种熔透状态主要频率成分分布在 0~20kHz 之间,在主要频率成分中,未熔透状态幅值最小,过熔透状态幅值最大。利用改进的限幅滤波法可以较好滤除因偶然因素引起的脉冲干扰。

(2) 短时能量实时呈现了声发射信号的能量变化信息,有效凸显了能量的突变信(下转第 116 页)

本体姿态控制准确且平稳。

焊缝跟踪时,机器人驱动轮侧滑速度如图 12 所示,该速度反映机器人在跟踪过程中的侧滑。由图 12 可知,其侧滑速度变化范围主要在 $-0.1 \sim 0.1$ mm/s,平滑滤波后侧滑速度近似为 0。表明该机器人在焊缝跟踪过程中,各驱动轮几乎无侧向运动,验证了机器人机构的无侧滑转向特性。

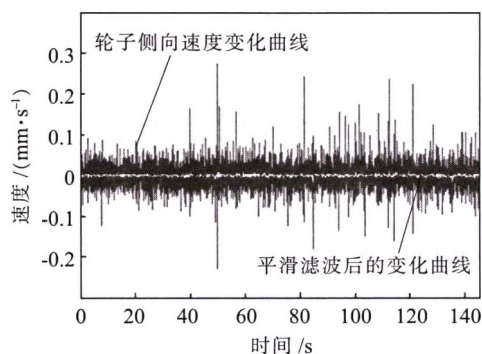


图 12 驱动轮侧向速度变化曲线

Fig.12 Lateral speed change curve of drive wheel

5 结论

(1) 提出了一种空间差动轮系四轮转向移动机器人机构,实现了两驱动电机与两转向电机同时驱动四轮前进与转向,建立了该新型机器人无侧滑转向条件下的运动学模型,并提出了用于该机器人的双 PID 控制方法。

(2) 通过整圆焊缝轨迹的跟踪控制仿真,实现了机器人在焊缝跟踪过程中的无侧滑转向控制,验证了机器人运动学模型的正确性及机器人机构的可行性。

(3) 所提出的机器人机构具有控制简单、转向

灵活、运动平稳及跟踪精度高等特点,不仅可用于移动焊接机器人,还可用于其他移动机器人机构上。

参考文献:

- [1] Lee D, Lee S, Ku N, et al. Development and application of an intelligent welding robot system for shipbuilding[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(2):377-388.
- [2] 陈易新,张轲. 基于三线激光的除锈爬壁机器人焊缝实时辨识方法[J]. 热加工工艺, 2019, 48(1):178-182.
- [3] 刘诚,张华,乐健,等. 移动机器人跟踪 90°折线角焊缝的路径规划及直角点识别[J]. 热加工工艺, 2019, 48(1):189-192.
- [4] 周依霖,张华,王帅. 轮式机器人 90°折线角焊缝跟踪运动动力学分析[J]. 焊接学报, 2017, 38(10):33-38.
- [5] 叶艳辉,张华,王帅. 小型移动焊接机器人结构设计[J]. 焊接学报, 2016, 37(7):101-104.
- [6] Lee J K, Choi Y H, Jin B P. Sliding mode tracking control of mobile robots with approach angle in cartesian coordinates[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2015, 13(3):718-724.
- [7] Trong H B, Tan T N, Tan L C, et al. A simple nonlinear control of a two-wheeled welding mobile robot[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2003, 1 (1): 35-42.
- [8] Zhao Y H, Chen N, Tai Y P. Trajectory tracking control of wheeled mobile robot based on fractional order backstepping [C]//Proceedings of the 28th China Control and Decision Conference. Shenyang, Northeastern University, 2016:6992-6996.
- [9] Kecskés I, Balogh Z, Odry P. Modeling and fuzzy control of a four-wheeled mobile robot [C]//Intelligent Systems and Informatics Piscataway, IEEE, 2012:205-210.
- [10] 张平霞,朱永强,黄瑞生,等. 五轴全轮转向轮式机器人转向模式研究[J]. 机械设计与制造, 2015(3):39-42.
- [11] 毛志伟,吴训,周少玲,等. 四轮驱动全轮差速转向移动焊接机器人运动学分析与仿真[J]. 中国机械工程, 2016, 27(13):1731-1734.

(上接第 110 页)

息,短时能量进一步增加了不同熔透状态的区别。利用平均短时能量对熔透状态进行识别,结果表明,利用短时能量可以有效地区分熔透状态,研究结果为实现 TIG 焊熔透状态的在线检测提供了一种新方法。

参考文献:

- [1] 常云龙,高峰,路林,等. TIG 焊接技术研究现状及发展趋势 [C]//中国船舶与海洋工程焊接与涂装技术发展论坛论文集. 2012.
- [2] 刘立君,兰虎,郑红艳,等. MIG 焊电弧声信号与熔透状态相关性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14):79-84.
- [3] 潘际奎,陈强,吴志强. MIG 焊的熔透控制[J]. 焊接学报, 1991(1):53-58.

- [4] Yu H, Xu Y, Lv N, et al. Arc spectral processing technique with its application to wire feed monitoring in Al-Mg alloy pulsed gas tungsten arc welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(5):707-716.
- [5] 吕娜. 基于电弧声信号的铝合金脉冲 GTAW 熔透特征识别及其实时控制研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
- [6] 陈武柱,贾磊,张旭东,等. CO₂ 激光焊同轴视觉系统及熔透状态检测的研究[J]. 应用激光, 2004, 24(3):130-134.
- [7] Wikle H C, Kottilingam S, Zee R H, et al. Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1):228-233.
- [8] 张志芬. 基于多信息融合的铝合金脉冲 GTAW 过程焊接缺陷特征提取研究[D]. 上海:上海交通大学, 2015.