

激光焊熔透特征混沌信号解析与多维复合识别研究

孙 谦^{1,2}, 黄瑞生^{1*}, 李小宇¹, 王旭友¹, 李俐群², 梁晓梅¹

1. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150028

2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘 要 激光焊接时光感检测信号具有混合信息数量多、时域及频域变化复杂、信号随机波动剧烈等明显的混沌信号特征, 常规检测手段对激光焊接熔透特征信息难以有效分离。在激光焊接熔透特征信号同轴增效提取技术基础上, 针对光谱透视成像中提取出的复杂混合信号的分布特征, 提出一种大功率固体激光焊熔透特征混沌信号解析方法。具体通过统计方法提取混沌检测信号的各瞬态概率密度函数, 然后动态形成一系列具有趋势性特征的简化图形模式, 并根据图形的多项形貌特征与熔透行为建立复合关联识别。文中重点介绍了基值、离散度和畸变率3种特征参数的定义及数学模型, 这些特征参数不但可以对特征模型的重心位置、离散情况和单向畸变情况进行准确描述, 而且通过实验方法还充分验证了不同特征参数与激光焊接熔透状态的关联特性。如基值特征参数在焊缝熔透程度较大时具有明显的识别效果, 但是熔透程度较小时其波动幅值较大; 而离散度特征参数只对较小熔透状态测试敏感, 可以对基值进行有效补充, 但是对较大熔透状态的识别存在不足; 畸变率特征参数虽然在适度熔透附近时数值波动剧烈, 但是对于焊缝熔透程度较小或较大时都能通过畸变率数值关系对熔透程度进行较好关联识别, 有效弥补了基值和离散度的检测盲区。因此, 基值、离散度及畸变率特征参数间具有相互补充、相互验证关系, 通过它们的特征曲线进行复合识别可以对激光焊接熔透状态实现较好的定性及定量检测。实验结果表明, 混沌信号解析方法结合激光焊接熔透特征信号同轴增效提取技术后, 可实现光谱学、光学、统计学、抽象化解析等的多维复合识别效果, 可有效增强大功率固体激光焊的熔透检测能力, 实现可靠熔透在线识别。

关键词 激光焊接; 熔透状态; 混沌信号解析; 多维复合识别

中图分类号: TG409

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)04-1076-06

引 言

在文献[1]中通过光谱透视、红外显微成像、光电传感、空间定位提取等复合处理方法, 实现了对匙孔内熔透特征荧光信号的有效增强和精准提取。但是, 激光焊接是一个复杂、剧烈的动态热反应过程, 熔透特征会时刻伴随焊接状态产生急剧变化, 因此检测数据中也耦合了众多混合干扰信号, 并存在着复杂的时域及频域变化, 数据波动极为剧烈^[2-4], 常规信号分析方法依然难以对激光焊接熔透特征信息进行有效把握。

虽然大功率固体激光焊接时光感信号具有明显的混沌信号特征, 但是在一定焊接条件不变的情况下, 焊接的热反应本质是没有改变的, 因此对该条件下的一定数量检测信号在

其整体分布趋势上会趋于一致, 而且所收集的信号数量越多分布特征越明显, 决定这一特征的主要因素不在于检测信号随时域及频域的变化过程, 而取决于实际焊接条件^[5-6]。基于此原理, 文章首先从数据处理研究方面, 创新性地提出一种混沌信号解析方法。基于统计方法, 将复杂的混沌检测信号简化成具有趋势性特征的图形识别模式, 挖掘图形的形貌特征与熔透行为关联, 获得对焊接复合影响机制的宏观认知, 实现对模型抽象化特征的简化分离。再将混沌信号解析方法与激光焊接熔透特征信号同轴增效提取技术有机结合, 创新出了大功率固体激光焊熔透状态多维复合识别新方法。促生了光谱透视、红外显微成像、光电传感、混沌信号图形化解析、形貌特征复合识别的多方法复合应用, 通过多角度光谱及光学处理和数据模型多特征复合识别的多维复合应用, 使检测效果相互增强、相互补充, 寻求一种有效增强

收稿日期: 2019-01-29, 修订日期: 2019-04-26

基金项目: 国家科技重大专项项目(2018ZX04044001), 中国博士后基金项目(2017M611412)资助

作者简介: 孙 谦, 1980年生, 哈尔滨焊接研究院有限公司正高级工程师 e-mail: 13936469057@163.com

* 通讯联系人 e-mail: huangrs8@163.com

激光焊接熔透状态识别能力的可靠途径。

1 实验装置

试验主要装置包括 6kW 德国 IPG YLS-6000 型大功率固体激光焊器、德国 HIGHYAG BIMO DF 型双焦点激光焊接头、行走式焊接工作台、自制激光焊接熔透检测装置、计算机控制系统。激光焊接头及熔透检测装置实物图如图 1 所示。

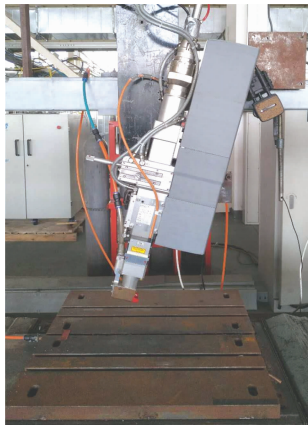


图 1 激光焊接头及熔透检测装置

Fig. 1 Laser welding head and penetration detection device

2 混沌信号解析

2.1 等效图形转化

通过熔透特征信号同轴增效提取技术获得的光感检测信号如图 2(a)所示,其在空间分布上是一个有规律的点阵,不同检测信号强度区域内所获得的检测信号点的数量存在明显差异。为了获取信号分布的更直观特征,根据这些信号在空间分布的相对密度,通过数学统计方法,利用 C++ 软件对所有单位强度区间内信号进行密度统计,提取出信号整体分布情况数据,并拟合出概率密度分布函数及其特征曲线模型,转化后的概率密度特征模型如图 2(b)所示,由此可将十分复杂的光学检测信号通过统计学等效图形方式转化成具有明显趋势性特征信息的简单模型。

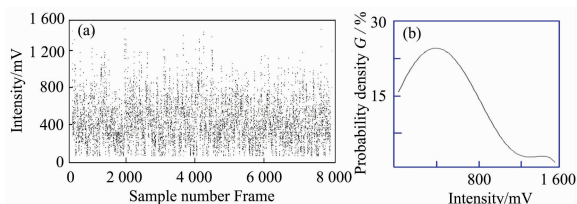


图 2 特征模型转化原理图

(a): 光信号时域分布情况; (b): 光信号特征分布模型

Fig. 2 Schematic diagram of feature model transformation

(a): Time-domain distribution of optical signals;

(b): The feature model of optical signal distribution

2.2 形貌特征与熔透行为关联

为了找到与激光焊接熔透状态直接相关的模型特征变化,采用 2 500 W 激光功率, 2 m · min⁻¹ 焊接速度, 0 mm 离焦量等参数的相同焊接条件下,分别对 2 和 4 mm 厚钛合金试板进行了激光熔透实验,在 2 mm 厚钛合金试板上获得了适度熔透焊缝,在 4 mm 厚钛合金试板上获得了非熔透焊缝,实验同时通过熔透特征信号同轴增效提取技术获得了二者的熔透辐射特征信号,如图 3 所示。

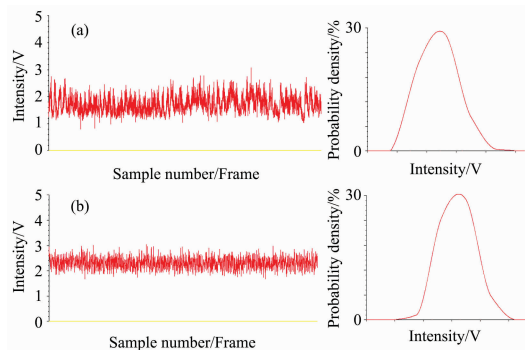


图 3 熔透辐射特征信号及特征模型

(a): 适度熔透焊; (b): 非熔透焊缝

Fig. 3 Characteristic signal and model of penetration radiation

(a): Moderate full penetration; (b): Non-penetration

然后通过数学概率密度分析手段,分别获得了二者特征模型,适度熔透焊缝的特征模型如图 3(a)所示,非熔透焊缝的特征模型如图 3(b)所示。通过对比观察图 3 中适度熔透焊缝与非熔透焊缝的辐射特征信号可以发现,不同焊接熔透状态时光感检测信号的分布情况是存在一定差异的,而且这些差异可以通过适度熔透与非熔透焊缝特征模型的一些形貌特征上找到明显区别,即特征参数^[7]。

特征参数 1:

特征模型的重心线位置,即信号空间分布的最密集区域,在这里可以找到光感检测信号中最集中出现的信号强度数值。由于此数值附近出现的信号频率最多,概率最大,作用最集中,而从文献[1]中可知激光焊接熔透状态与熔透特征区域辐射行为存在规律性变化特征,因此可视为与焊接熔透关联的一项准稳态平衡参数,定义其为基值。在光感检测信号特征模型中,可以从曲线的顶点位置对应找到基值的强度数值,如图 4 中所示,基值的表达式为

$$\alpha = \phi^{-1}(\chi_{\max}) \quad (1)$$

式中: α 为基值; ϕ 为光感检测信号概率密度分布函数; χ_{\max} 为光感检测信号概率密度分布中的最大值(%)。

特征参数 2:

特征模型的离散度,即对所有统计分析信号加权后的统计值,可以反映出信号的整体分布集中情况。因为除了基值以外,其他区域内的点也同样会对信号分布趋势产生作用,只是它们的影响效果会受到这些点出现的位置及分布概率的直接影响。出现位置与基值距离越远,且分布概率越大,对基值效果下产生的波动也就越大。在非熔透光感检测信号中

由于匙孔底部未形成缺口,熔透特征区域信相对稳定,其光感检测信号的大概率变化幅值(设定为 98% 信号的集中分布区间)相对较小。而适度熔透时由于激光非连续性穿透工件,在匙孔底部形成缺口,熔透特征区域低辐射信号呈周期性的闪动出现^[1],因此光感检测信号大概率变化幅值相对变大。离散度可根据实际信号的概率密度分布模型的积分值求得。如图 4 中所示,离散度的表达式为

$$\beta = \int_{\min}^{\max} C |D(\kappa)| \phi(\kappa) d\kappa \quad (2)$$

式中: β 为离散度; C 为比例调节常数; κ 为检测信号范围内的任一点信号强度值; $\phi(\kappa)$ 为 κ 点对应的概率密度值; $D(\kappa)$ 为 κ 点与基值的距离; \min 和 \max 为 κ 的取值范围。

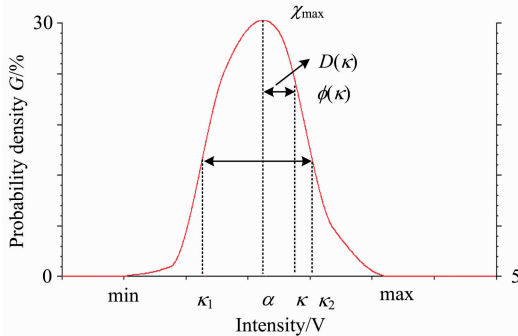


图 4 参数说明图

Fig. 4 Diagram of the parameter explaining

特征参数 3:

畸变率特征参数,即描述特征模型沿重心线左右两侧曲线对称情况,对于离散度产生的单向畸变偏移有较好的识别效果。在非熔透焊接情况下匙孔底部信号会随匙孔自身波动在一定幅值范围内变化,但如果焊缝熔透以后,熔透特征区域的信号会随着匙孔底部缺口的形成而陡然降低,再随着缺口的闭合重新上涨,匙孔底部开口的停留时间以及产生频率决定了光感检测信号特征模型的畸变方向及幅值,比如在焊缝刚熔透时匙孔底部产生的缺口停留时间较短,频率也较低,对于特征模型重心的左向偏离效果也较小,而随着熔透幅度的加大缺口停留时间增加左向偏离效果也更加明显,担当匙孔底部缺口停留时间与闭合时间逐渐接近时偏移产生双向波动,直至缺口停留时间超过闭合时间偏离方向转为右向,当缺口形成“常开”模式后,偏移幅值降至最低,由此可实现对焊缝熔透程度的有效识别。为了减小运算量,畸变率可近似选取特征模型半波位置的左右对比值,具体从曲线的顶点 1/2 位置对应找到半波宽起点和终点的数值,如图 4 中所示,畸变率的表达式为

$$\delta = \frac{|\alpha - \kappa_1|}{|\kappa_2 - \alpha|} \quad (3)$$

$$\kappa_1, \kappa_2 = \phi^{-1}(1/2\chi_{\max}) \quad (4)$$

$$\kappa_2 > \kappa_1 > 0 \quad (5)$$

式中: δ 为畸变率。

2.3 混沌信号动态分析

在上述瞬态分析的基础上,从动态角度可将复杂的熔透

辐射特征信号按采样时间顺序分解成一系列描述微小时间段内信号密度特征的图形化模型,然后再通过数学解析方法获得每个模型的熔透特征参数,最后顺次连接可获得激光焊接熔透行为检测曲线,从而在不遗漏任何检测点信息的情况下大幅简化分析难度实现对焊接熔透信息的有效识别^[8-9],动态分析原理示意图见图 5。

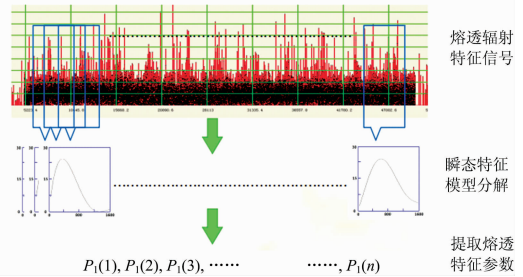


图 5 混沌信号动态解析方法原理图

Fig. 5 Schematic diagram of dynamic analytical method for chaotic signals

3 熔透状态复合识别

为了研究基值 α 、离散度 β 及畸变率 δ 对未熔透、熔透、过熔透几种激光焊接熔透状态的识别效果,采用 1 300—1 900—2 500 W 阶梯式激光输出形式,以 $2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 焊接速度,0 mm 离焦量焊接条件下,在 1.5 mm 厚钛合金试板上获得了一条从未熔透、熔透、到过熔透变化的焊缝。试验检测信号由熔透特征信号同轴增效提取技术获得,采样频率 5 000 Hz,通过 C++ 软件完成了等效图形转化、特征参数提取、混沌信号动态分析等数据处理后,获得的基值 α 、离散度 β 及畸变率 δ 的特征曲线如图 6 所示。

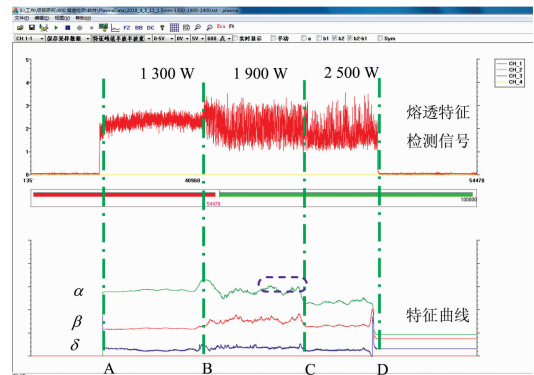


图 6 激光焊接熔透检测数据分析

Fig. 6 Data analysis of penetration detection for laser welding

对比观察激光功率输出与基值 α 特征曲线的变化趋势可知,当 AB 段激光功率输出 1 300 W 时,焊缝为未熔透状态,此时基值 α 处于较大数值区域且波动幅度较小,当 BC 段激光功率提高至 1 900 W 时,焊缝由未熔透状态变化到了熔透状态,此时基值 α 先是有一小段爬升过程,然后转而向下,同时波动幅度大幅增加,当 CD 段激光功率升至 2 500 W 时,

产生了过熔透焊缝,此时基值 α 数值继续大幅减小,但波动幅度明显收窄。由此可见在焊缝未熔透时,基值 α 特征曲线会随激光功率的增加而变大,但当焊缝熔透以后,基值 α 会随熔透程度的加大而反向减小。该项特征参数在焊缝熔透程度较大时具有明显的识别效果,但是在焊缝熔透程度较小时,由于在该区域下波动幅值较大,因此会产生部分“误判”,如图 6 中虚线标注部分。

与基值 α 相比离散度 β 特征曲线的变化规律具有较大差异,在 AB 段未熔透时离散度 β 的数值和波动幅值都较小,当 BC 段焊缝熔透时,数值和波动幅值同步明显加大,而在 CD 段焊缝过熔透以后,数值和波动幅值又同时大幅下降。这是由于焊缝熔透程度较小时在熔透特征区域中产生了低频低辐射信号,低辐射信号与高辐射信号的“共存”导致了检测信号大概率变化幅值的相对变大,引起了离散度 β 的上升,但当熔透程度过大时,激光匙孔底部呈“常开”状态,低辐射信号几乎完全取代了高辐射信号,检测信号大概率变化幅值反而下降,导致了离散度 β 的下降。因此,离散度 β 特征曲线只对焊缝熔透程度较小时具有明显的识别效果,可以作为对基值 α 的有效补充。

畸变率 δ 是一个较特殊的特征参数,由于在焊缝熔透程度较小时畸变率 δ 可以较好的反映出由于低频低辐射信号对特征模型产生的左向畸变偏移(畸变率 $\delta > 1$),而在焊缝熔透程度较大时可以识别对高辐射信号对特征模型产生右向畸变偏移(畸变率 $\delta < 1$),同时其规律性特征还能够对焊接熔透与焊接波动对检测结果的影响进行一定的辅助区分。所以其对于基值 α 和离散度 β 的“检测盲区”都是一个较好补充,但是在适度熔透状态附近时由于低辐射信号与高辐射信号的剧烈切换,使得畸变率 δ 数值产生剧烈波动。因此,基值 α 、离散度 β 及畸变率 δ 特征参数间具有相互补充、相互验证关系,通过它们的特征曲线进行复合识别可以对激光焊接熔透状态实现较好的定性及定量检测^[10]。

4 试验验证及结果分析

4.1 熔透验证试验设计

为了验证在相同焊接条件下能否对熔透与非熔透特征交替存在的焊缝进行有效识别,试验选取 300 mm × 150 mm × 4 mm 钛合金试板,焊前先将钛板背面机加工出 2 个矩形凹槽,凹槽最深位置距试板上表面厚度为 1.5 mm,试板实物及熔透鉴定点位置如图 7 所示。焊接工艺类型为钛合金不等厚试板激光表面堆焊,焊接速度 2 m · min⁻¹,保护气成分工业高纯 Ar,信号采样频率 5 000 Hz,分别在激光功率 2 400, 2 300 和 2 200 W 焊接 3 条、2 条、3 条焊缝,共计 8 条焊缝,每条焊缝上 10 个鉴定点,共计 80 个鉴定点。焊接结束后可依据鉴定点位置的实际熔透情况,判定熔透检测的准确率。

4.2 试验结果及分析

通过已设定的 80 个鉴定点,对熔透检测可靠性进行了对比验证,如表 1 所示。检测结果与实际焊缝熔透状态全部相一致,证明该熔透检测方法对钛合金激光焊接熔透行为具有较好的识别能力。而从对每条焊缝熔透检测特征曲线的验

证效果上分析(如图 8 中对试验 F15 的检测结果),基值 α 特征曲线对于焊缝的熔透状态具有较好的趋势性识别能力,而离散度 β 可实现对基值 α 的有效复合验证,畸变率 δ 可对基值 α 与离散度 β 的测试结果进行佐证分析,同时提供焊缝在较小程度熔透时和过熔透时的识别信息。由此有效提高了对于大功率固体激光焊的熔透检测能力。

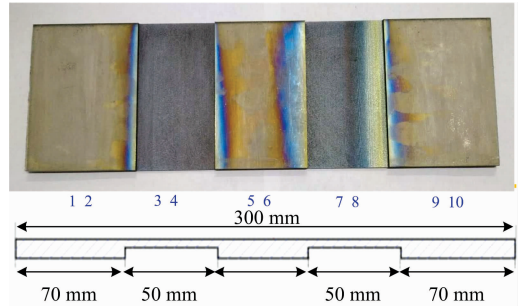


图 7 试板实物及熔透鉴定点位置
Fig. 7 Test plate object and the location of identification point for penetration

表 1 鉴定点数据

Table 1 Identification point data

焊接组	激光功率/W	试验结果									
		通过(√)					未通过(×)				
		鉴定点 1	鉴定点 2	鉴定点 3	鉴定点 4	鉴定点 5	鉴定点 6	鉴定点 7	鉴定点 8	鉴定点 9	鉴定点 10
F11	2 400	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
F12	2 400	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
F13	2 400	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
F14	2 200	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
F15	2 200	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
F16	2 200	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
F17	2 300	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
F18	2 300	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

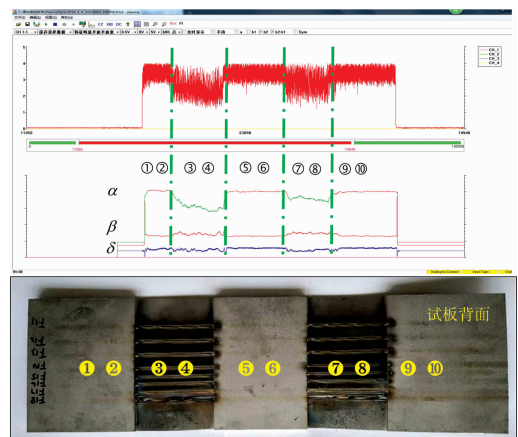


图 8 试验 F15 软件分析结果及试板验证
Fig. 8 Penetration analysis results and verification of the Lab F15

5 结 论

(1)将复杂的混沌信号简化成具有趋势性特征的图形识别模式,并挖掘图形的形貌特征与熔透行为关联,可获得对焊接复合影响机制的一种宏观认知,并有利于实现对抽象化

特征的简化分离。

(2)将混沌信号解析方法与熔透特征信号同轴增效提取技术相结合,促生了光学谱段管控、匙孔影像特征萃取、混沌信号图形化解析、形貌特征复合识别的多方法复合应用,通过多维复合识别的相互增强、相互补充,可有效增强对大功率固体激光焊接熔透状态的识别能力。

References

- [1] SUN Qian, HUANG Rui-sheng, YANG Yi-cheng, et al(孙 谦,黄瑞生,杨义成,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(3): 679.
- [2] Zhang Yi, Li Fazhi, Liang Zhichao, et al. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 256: 1.
- [3] Chen Zongyao, Chen Jian, Feng Zhili. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 224.
- [4] REN Yong, WU Qiang, ZOU Jiang-lin, et al(任 勇,武 强,邹江林,等). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2017, 44(5): 0502003.
- [5] WANG Xu-you, SUN Qian, WANG Wei, et al(王旭友,孙 谦,王 威,等). Transactions of the China Welding Institution(焊接学报), 2016, 37(3): 45.
- [6] SUN Qian, WANG Xu-you, WANG Wei, et al(孙 谦,王旭友,王 威,等). China Patent: Oline Detertion Method for Laser Welding Quality: CN201310459376. 4(中国专利: 激光焊接质量在线检测方法: 201310459376. 4), 2013-10-02.
- [7] SUN Qian, WANG Xu-you, LI Xiao-yu, et al(孙 谦,王旭友,李小宇,等). Transactions of the China Welding Institution(焊接学报), 2016, 37(6): 1, 129.
- [8] SUN Qian, WANG Wei, WANG Xu-you, et al(孙 谦,王 威,王旭友,等). On-Line Penetration Detection Method of Laser Welding (激光焊接熔透在线检测方法). China Patent(中国专利): 201610326537. 6, 2019-03-22.
- [9] GU Yu-fen, YUAN Peng, DU Lei-ming, et al(顾玉芬,袁 鹏,杜雷明,等). Journal of Beijing University of Technology(北京工业大学学报), 2017, 43(6): 809.
- [10] Sheng Jie, Cai Yan, Li Fang, et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(1-4).

Study on Chaotic Signal Analysis and Multidimensional Composite Recognition of Penetration Characteristics in Laser Welding

SUN Qian^{1,2}, HUANG Rui-sheng^{1*}, LI Xiao-yu¹, WANG Xu-you¹, LI Li-qun², LIANG Xiao-mei¹

1. Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin 150028, China
2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract Because the optical signal has the characteristics of chaotic signal obviously in laser welding, such as large number of mixed information, complex changing in the time domain and the frequency domain, fluctuation violently of random signals, and so on, it is difficult to separate the characteristic information of penetration by conventional means in laser welding. So, according to the distribution characteristics of complex mixed signals extracted from spectral perspective imaging, a new chaotic signal analytical method for high power solid state laser welding is proposed in this paper, which bases on the synergistic extraction method for coaxial penetration characteristic signal. The method includes extracting each transient probability density function of the chaotic signal, dynamically forming a series of simplified feature models with trend recognition feature, and establishing compound correlation recognition between the multi-morphological characteristics of the feature models and penetration state. In this paper, three kinds of characteristic parameters and their definitions and mathematical models were introduced in detail, and there are basic value, dispersion degree and distortion rate, which not only can accurately describe the different characteristics of the feature model, but also have much relationship with different penetration states of laser welding, by experiment verifying. For example, the base value characteristic parameter has obvious recognition effect when the weld penetration degree is bigger, but has much fluctuation amplitude when the penetration degree is smaller. The dispersion degree characteristic parameter is only sensitive to the small penetration state test, which can effectively supplement the basic value, but there are some shortcomings in the larger penetration state. The distortion rate characteristic parameter although fluctuates violently near the moderate penetration rate, when the penetration degree of weld is smaller or larger, the characteristic parameter can get better recognition, which

the characteristic parameters of the basic value and the dispersion degree can't do. Therefore, in the characteristic parameters of basis value, dispersion degree and distortion rate, there are relationship of complementary and mutual verification. By the composite identification of their characteristic curves, the laser welding penetration state can be detected qualitatively and quantitatively. The experimental results showed that, after the chaotic signal analytical method combined with the coaxial synergistic extraction method, it can realize the multidimensional compound recognition effect of spectroscopy, optics, statistics, abstract analysis, etc, which can enhance the penetration detection ability of high power solid laser welding effectively, and realize reliable on-line identification of penetration.

Keywords Laser welding; Penetration state; Chaotic signal analysis; Multidimensional composite recognition

(Received Jan. 29, 2019; accepted Apr. 26, 2019)

* Corresponding author