

激光与光电子学进展

基于回归分析的钛合金 T 型接头激光焊接焊缝成形尺寸预测

文学¹, 汪宏辉¹, 范德华², 雷正龙^{3*}, 毕思源³, 郭亨通³¹中石化江苏油建工程有限公司, 江苏 扬州 225009;²山东省天然气管道有限责任公司, 山东 济南 250014;³哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 利用光纤激光对 TA15 钛合金蒙皮网格结构进行焊接, 采用同轴高速摄像监测方案对不同焊接参数下的熔池形貌进行图像采集与特征提取。结果表明, 采取基于亮度特征的熔池边缘分段提取方法可以解决熔池图像前后亮度不均匀问题, 提取准确的熔池边缘信息。熔池宽度和后拖角度与对 T 型接头焊缝结合面宽度具有强相关性, 熔池长度、宽度、后拖角度与 T 型接头焊缝熔深具有强相关性。同时, 建立了焊接工艺参数与焊缝成形的回归分析模型, 并对焊缝成形尺寸进行预测, 焊缝结合面宽度和熔深的平均预测误差分别为 0.14 mm 和 0.10 mm。

关键词 激光技术; 激光焊接; T 型接头; 熔池视觉监测; 焊缝成形

中图分类号 TG457.14

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1914007

Prediction of Weld Forming Size for Laser Welded Titanium Alloy T-joint Based on Regression Analysis

Wen Xue¹, Wang Honghui¹, Fan Dehua², Lei Zhenglong^{3*}, Bi Siyuan³, Guo Hengtong³¹Sinopec Jiangsu Petroleum Construction Engineering Co., Ltd., Yangzhou 225009, Jiangsu, China;²Shandong Natural Gas Pipeline Co., Ltd., Jinan 250014, Shandong, China;³State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang, China

Abstract The fiber laser was used to weld the TA15 titanium alloy skin grid structure, and the coaxial high-speed camera monitoring scheme was used to collect images and extract features of the molten pool morphology under different welding parameters. The results show that the segmentation extraction method of molten pool edge based on brightness features can solve the problem of uneven brightness before and after the molten pool image, and extract accurate molten pool edge information. The molten pool width and drag angle have a strong correlation with the weld joint width, and the length, width, and drag angle of the molten pool have a strong correlation with the weld penetration. At the same time, a regression analysis model of welding process parameters and weld formation is established, and the weld forming size is predicted. The average prediction errors of the weld joint width and weld penetration are 0.14 mm and 0.10 mm, respectively.

Key words laser technique; laser welding; T-joint; molten pool visual monitoring; weld forming

1 引言

作为一种典型的近 α 型中强度钛合金, TA15 钛合金有着高比强度、优良的耐腐蚀耐高温性能、良好的焊接性与机械加工性等优点, 在航空、航天、武器装备等领域有着广泛的应用^[1-3]。蒙皮网格结构是一种中空的结构设计形式, 广泛应用于航空航天装备高强度结

构件的轻量化制造中^[4]。钛合金蒙皮网格结构通常采用焊接工艺连接, 焊接接头为 T 型接头, 焊件尺寸大、路径多, 对焊缝质量和焊接稳定性要求高, 常规破坏性焊后检测难以满足要求。掌握突破高温钛合金复杂构件的焊接质量在线监测方法对推动国防科技工艺水平发展, 提升航空航天装备制造能力有着重要意义。

激光焊接有着能量密度高、焊速快、精度高、变形

收稿日期: 2022-01-07; 修回日期: 2022-01-26; 录用日期: 2022-02-16

通信作者: *leizhenglong@hit.edu.cn

小、易于实现自动化的特点^[5-8],是实现高温钛合金高精度、高质量焊接的理想焊接工艺。视觉监测有着非接触、无干扰、直观性好、信息充分且通用性强的优势,可以通过熔池图像直接反映熔池的动态行为,以此作为焊接质量监测的依据^[9-14]。采用视觉监测手段与图像处理技术对激光焊接过程进行焊接质量监测具有深远的意义,受到国内外学者的广泛关注。德国光子技术研究所^[15]通过同轴监测匙孔与等离子体形态,建立了匙孔面积与焊缝熔深的关系。王春明等^[16]通过激光等离子体的监测,建立了等离子体形态与焊缝熔深之间的关系。

现有的焊接过程视觉监测一般采用被动光视觉成像,受激光焊接过程中等离子体、飞溅、烟尘、强光等影响,采集到的熔池图像成像噪声严重,焊接熔池匙孔特征难以识别提取^[17-20]。为了保证焊接视觉采集到高质量的熔池图像,必须消除图像噪声和干扰。本文针对 TA15 钛合金蒙皮网格结构,利用光纤激光器采用不同焊接工艺参数进行焊接,运用减光与滤光复合的同轴高速摄像监测方案采集焊接熔池图像,设计图像处理算法获得熔池特征量信息,分析熔池特征量与焊接工艺参数对焊缝成形特征的影响规律,选取合适的回归模型进行回归性分析,并对模型效果进行评价,对焊缝成形尺寸进行预测,为激光焊接质量监测方法及质

量评价模型的构建提供参考。

2 试验材料及方法

本试验焊接的对象为 TA15 钛合金蒙皮网格结构,接头为 T 型接头,如图 1 所示。T 型接头蒙皮试样尺寸为 150 mm×50 mm×1.5 mm,肋板试样尺寸为 150 mm×30 mm×10 mm。TA15 钛合金母材化学成分如表 1 所示。焊前采用体积分数 10% HNO₃+30% HF+水的酸液与体积分数 10% NaOH 溶液清洗母材表面油污并烘干。

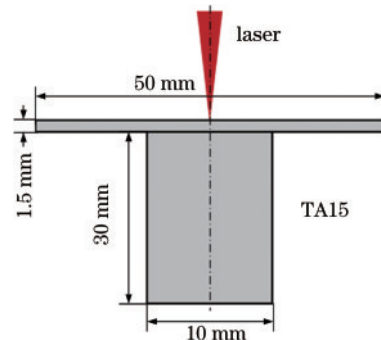


图 1 钛合金蒙皮网格结构 T 型接头示意图

Fig. 1 Schematic diagram of T-joint with titanium alloy skin grid structure

表 1 TA15 钛合金母材化学成分

Table 1 Chemical composition of base metal of TA15 titanium alloy

Element	C	O	H	N	Al	V	Fe	Mo	Zr	Ti
Mass fraction /%	0.10	0.015	0.015	0.05	5.5-7.0	0.8-2.5	0.25	0.5-2.0	1.5-2.5	Bal.

试验采用激光焊接系统包括 YLS 5000 光纤激光器、YW52 大功率激光头、KUKA 焊接机器人、AcuEye-1M3-1000 CMOS 高速摄像机、FL-808-PS 连续光纤激光光源与配套的 808 nm 窄带滤光片以及行走工作台等部分。激光器额定输出功率为 10 kW,波长为 1.07 μm。高速摄像机主轴与激光加工头的激光光路同轴,用于采集熔池正面图像。采用氩气作为保护气以防止焊接区域氧化和吹散等离子体。为防止反射光损伤激光头,将激光头向焊接后方偏移 5°,辅助光源向焊接前方偏移 8°。

T 型接头激光焊接示意图如图 2 所示,采用专用

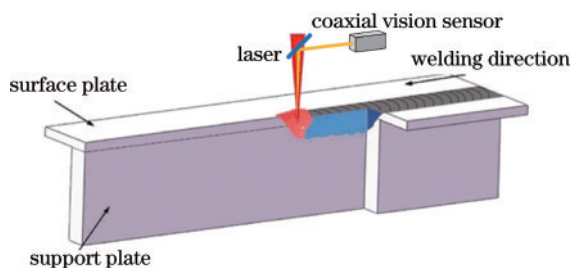


图 2 T 型接头激光焊接过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of T-joint laser welding process

夹具将面板与肋板母材试样装夹紧固,为保证装配精度,采用激光点焊将试样两端点固,再用连续激光实施焊接。激光焊接工艺参数如表 2 所示。

表 2 钛合金 T 型接头激光焊接试验工艺参数

Table 2 Technological parameters of laser welding test for titanium alloy T-joint

Welding parameter	Parameter value
Laser power /kW	1.0, 1.2, 1.4, ..., 2.8, 3.0
Welding speed / (m·min ⁻¹)	0.8, 1.0, 1.2, ..., 2.2, 2.4
Protective gas	Ar
Protective gas flow / (L·min ⁻¹)	15

3 分析与讨论

3.1 T 型接头激光焊接焊缝特征分析

钛合金 T 型接头焊缝典型形貌以及不同工艺参数所得焊缝特征量标注如图 3 所示,其质量主要取决于焊缝熔深与结合面宽度。其中,焊缝熔深为在接头横截面上从焊缝上表面到熔化区最深处的距离,结合面宽度为焊缝横截面在蒙皮与肋板结合处熔化区的宽

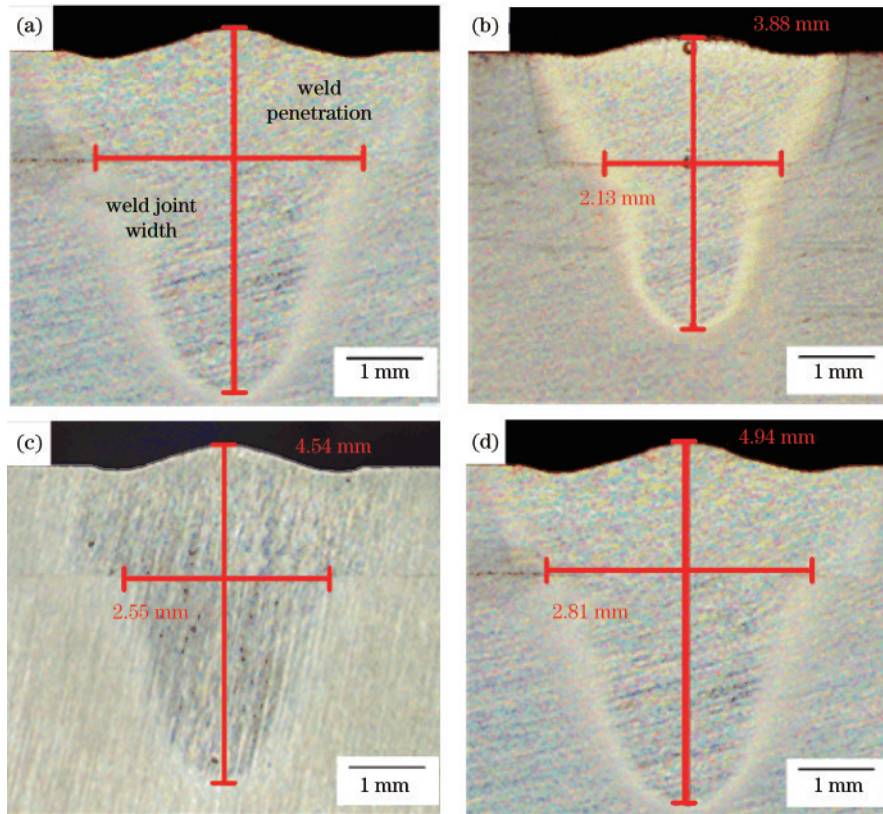


图 3 T 型接头主要焊缝形貌特征与不同试验条件下焊缝特征量。(a) 焊缝主要形貌特征;(b) $P=2000\text{ W}$, $V=1.0\text{ m/min}$;
(c) $P=2200\text{ W}$, $V=1.0\text{ m/min}$;(d) $P=2200\text{ W}$, $V=0.8\text{ m/min}$

Fig. 3 Main weld morphology characteristics of T-joint and characteristic quantity of welds under different test conditions. (a) Main morphology characteristics of welds; (b) $P=2000\text{ W}$, $V=1.0\text{ m/min}$; (c) $P=2200\text{ W}$, $V=1.0\text{ m/min}$; (d) $P=2200\text{ W}$, $V=0.8\text{ m/min}$

度。对比可见,随着激光功率的增加、焊接速度的减小,焊缝熔深和结合面宽度逐渐增大。

3.2 焊缝熔池形态与特征量分析

在钛合金激光焊接过程中,熔池形貌在一定范围内波动,而熔池尺寸和形状则基本保持稳定。图 4 为熔池图像特征量示意图,熔池轮廓与其外接矩形交于 A、B、C、D 四点,选取五个熔池几何尺寸特征量,其中 L 为熔池长度, R 为熔池后拖角度, W 为熔池宽度, S 为熔池面积, M 为熔池周长。

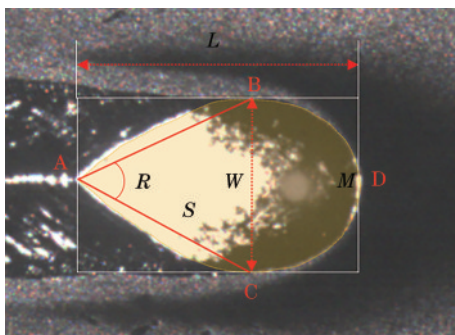


图 4 熔池和匙孔几何特征量测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measurement of geometric characteristic quantity of molten pool and keyhole

采用表 2 所示的焊接工艺参数进行焊接试验,焊接过程中同步采集熔池正面图像。不同工艺参数下焊接过程中熔池形态如图 5 所示。采集到的熔池图像前后端亮度不一致,熔池后端亮度较高,熔池前沿和后方焊缝成型区亮度较低。亮度分布不均匀导致熔池轮廓提取困难,为此,采取基于亮度特征的熔池边缘分段提取法,将 RGB 图像通过灰度处理转变为灰度图像,根据熔池图像前段和后段亮度分布情况不同,通过分段线性拉伸增强图像对比度,对熔池灰度图像进行二值化处理,通过形态学运算保留最大连通域,得到轮廓信息并计算熔池特征量。图像处理效果如图 6 所示。

选取每组工艺参数下焊接稳定阶段的连续 100 张熔池图像,提取熔池特征量,并以熔池特征量的平均值作为该工艺下的熔池形貌特征值,部分提取到的熔池形貌特征数据如表 3 所示,其中 WP 为熔深, WW 为结合面宽度。对比可见:在低功率低焊速下熔池形貌较为稳定,熔池尺寸波动范围小;降低焊接速度、增加激光功率将增大熔池尺寸,而熔池形貌的波动范围则随着焊速和激光功率的增大而增大,且焊接速度对熔池波动的影响高于激光功率对熔池波动的影响。

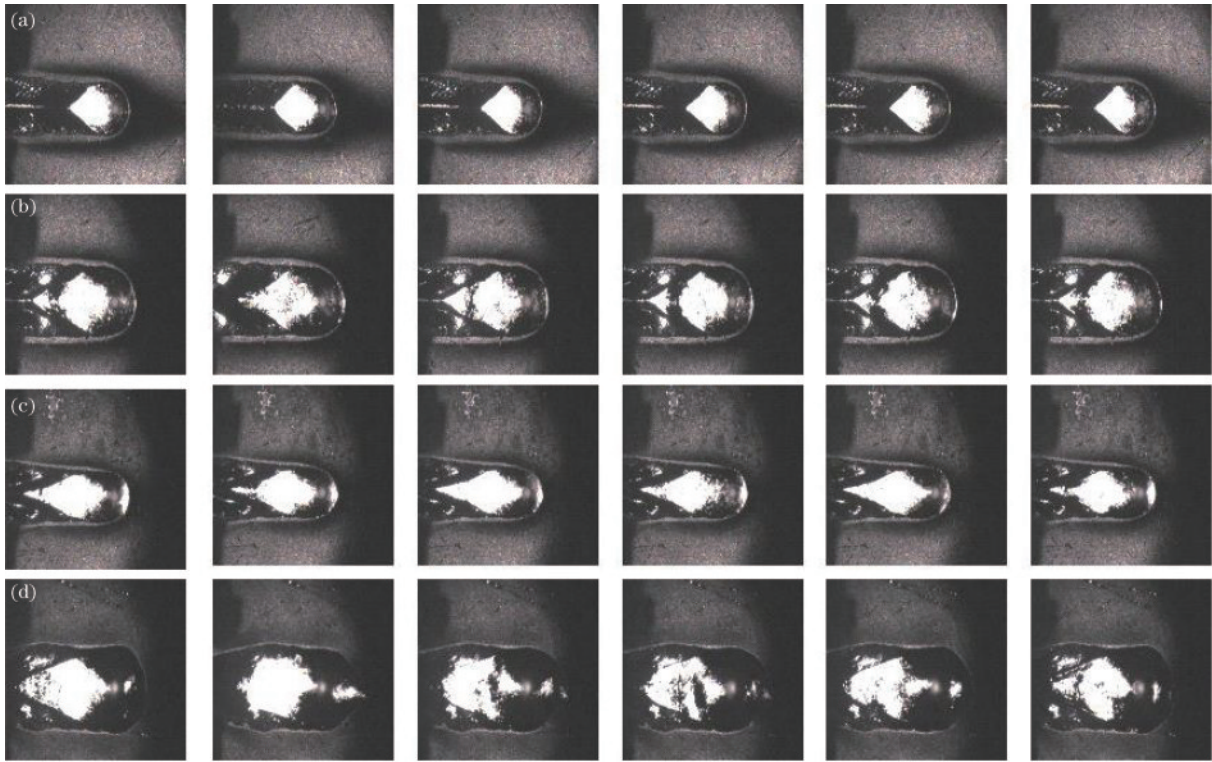


图 5 不同焊接工艺参数下熔池形态。(a) $P=1000\text{ W}$, $V=1.0\text{ m/min}$; (b) $P=2000\text{ W}$, $V=1.0\text{ m/min}$; (c) $P=2000\text{ W}$, $V=2.0\text{ m/min}$; (d) $P=3000\text{ W}$, $V=2.0\text{ m/min}$

Fig. 5 Molten pool morphologies under different welding process parameters. (a) $P=1000\text{ W}$, $V=1.0\text{ m/min}$; (b) $P=2000\text{ W}$, $V=1.0\text{ m/min}$; (c) $P=2000\text{ W}$, $V=2.0\text{ m/min}$; (d) $P=3000\text{ W}$, $V=2.0\text{ m/min}$

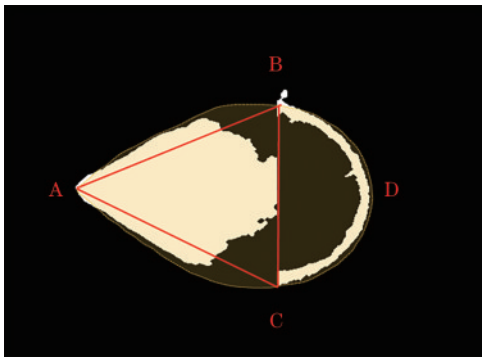


图 6 熔池及匙孔轮廓

Fig. 6 Outline of molten pool and keyhole

3.3 熔池特征量与焊缝形貌的相关性分析

图 7(a)和图 7(b)分别为熔池特征量对熔深和结合面宽度的显著性水平,显著性水平 $\alpha < 0.05$ 表明两个变量之间相关性显著。对于焊缝熔深而言,熔池长度、熔池宽度和熔池后拖角度的显著性水平 α 均小于 0.05,因此这三个特征量对焊缝熔深影响显著。对于焊缝结合面宽度而言,熔池宽度、熔池后拖角度这两个特征量的显著性水平 $\alpha < 0.05$,因此这两个特征量对焊缝结合面宽度影响显著。

图 8(a)和图 8(b)分别为熔池特征量对焊缝熔深和焊缝结合面宽度的相关性分析,两个变量(样本)之

表 3 部分熔池形貌特征数据

Table 3 Part of the molten pool morphology characteristic data

No.	Welding parameters		Molten pool feature					Weld feature	
	P/W	$V/(m \cdot \min^{-1})$	L/mm	W/mm	$R/(\circ)$	M/mm	S/mm^2	WP/mm	WW/mm
1	1000	0.8	4.15	2.50	38.21	11.02	8.82	3.04	1.72
2	1000	1.0	3.86	2.21	38.31	10.23	7.02	2.72	1.30
3	1000	1.2	3.79	2.02	37.81	9.73	6.33	2.53	1.02
4	1200	0.8	4.68	2.70	34.71	12.27	10.14	3.20	1.81
5	1200	1.0	4.59	2.25	34.61	11.44	8.38	3.01	1.37
6	1200	1.2	4.38	2.11	30.71	10.50	6.72	2.79	1.16
7	1400	0.8	5.18	2.64	29.31	13.06	10.38	3.68	1.96
8	1400	1.0	4.91	2.53	1.01	12.31	9.21	3.29	1.61
9	1400	1.2	4.72	2.29	1.01	11.53	7.82	3.09	1.36

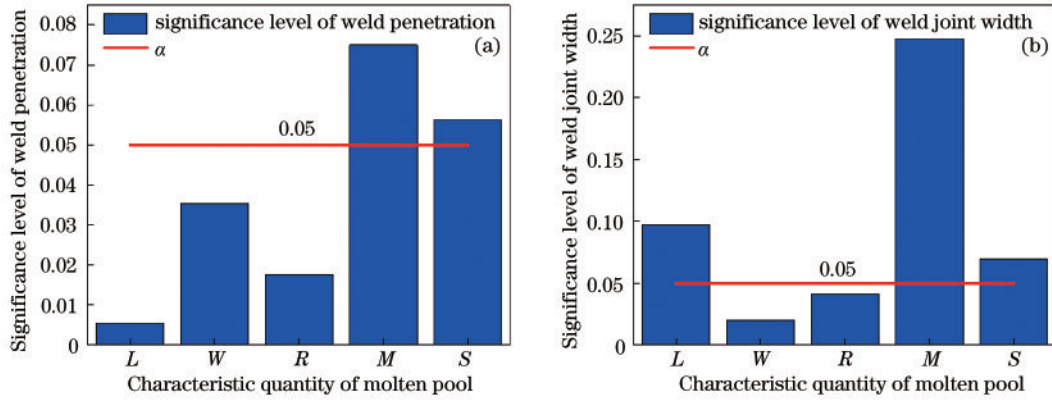


图 7 熔池特征量对焊缝特征量的显著性水平。(a)焊缝熔深显著性水平;(b)焊缝结合面宽度显著性水平
Fig. 7 Significance level of characteristic quantity of molten pool to the weld. (a) Significance level of weld penetration;
(b) significance level of weld joint width

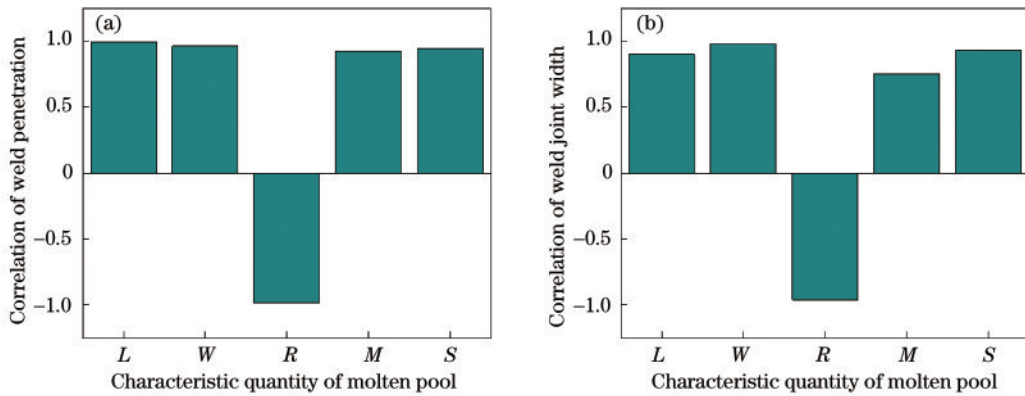


图 8 熔池特征量与焊缝特征量的相关性分析。(a)焊缝熔深相关性;(b)焊缝结合面宽度相关性
Fig. 8 Correlation between characteristic quantity of molten pool and welds. (a) Correlation of weld penetration;
(b) correlation of weld joint width

间的皮尔逊相关系数 r 定义为两个变量之间的协方差和标准差的商。当两变量相关性显著时, r 的绝对值越近于 1, 两个变量的相关性越强。当 $r > 0$ 时, 两个变量之间为正相关, 当 $r < 0$ 时, 两个变量之间为负相关。对于焊缝熔深而言, 熔池长度、熔池宽度、熔池后拖角的皮尔逊相关性系数均接近于 1, 且对焊缝熔深的显著性水平均小于 0.05, 因此, 这三个特征量与焊缝熔深具有极强的线性相关性, 其中熔池长度和熔池宽度与熔深之间为正相关, 熔池后拖角与熔深之间为负相关。对于焊缝结合面宽度, 熔池宽度、熔池后拖角的皮尔逊相关性系数均接近于 1, 且显著性水平均小于 0.05, 因此, 这两个特征量与焊缝结合面宽度具有极强的线性相关性, 且熔池宽度与结合面宽度之间为正相关, 熔池后拖角与结合面宽度之间为负相关。

3.4 T型接头激光焊接焊缝形状回归分析与尺寸预测

基于焊接工艺参数与标注的焊缝横截面特征量, 构建评价焊缝结合面宽度和焊缝熔深的回归模型。焊接工艺与焊接质量之间是多变量的非线性耦合关系, 通

过实验结果和参考经验分析结果, 选择多项式回归分析构建模型, 其方程形式^[21]表示为

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2 \quad (1)$$

进行回归分析前, 先对数据进行归一化处理, 将原数据归一化到 [0, 1] 范围内。式 (1) 中 Y 为归一化后的 T 型接头焊缝横截面特征量, x_1 为归一化后的激光功率, x_2 为归一化后的焊接速度, $a_0 \sim a_5$ 为焊缝成形系数, 取值与焊接光束质量有关。基于大量试验数据, 采用 SPSS 软件通过序列二次规划法求解回归方程, 得出焊缝成形系数, 代入原方程得到相应回归模型。图 9、图 10 分别为激光焊接工艺参数与焊缝结合面宽度和焊缝熔深之间的回归模型, 回归模型系数取值分别如表 4、表 5 所示。

对回归模型进行方差检验和 F 检验, 检验本文模型的拟合优度和可信度, 如表 6、表 7 所示, 其中 DF 为自由度, SS 为均值偏差的平方和, MSE 为均方根, P 为回归系数, F_0 为显著性系数, R^2 为拟合优度。可见 P 值均远小于 0.05, F_0 值均远大于 P , 这表明回归效果高度显著, 而且 R^2 均十分接近 1, 说明拟合效果良好。

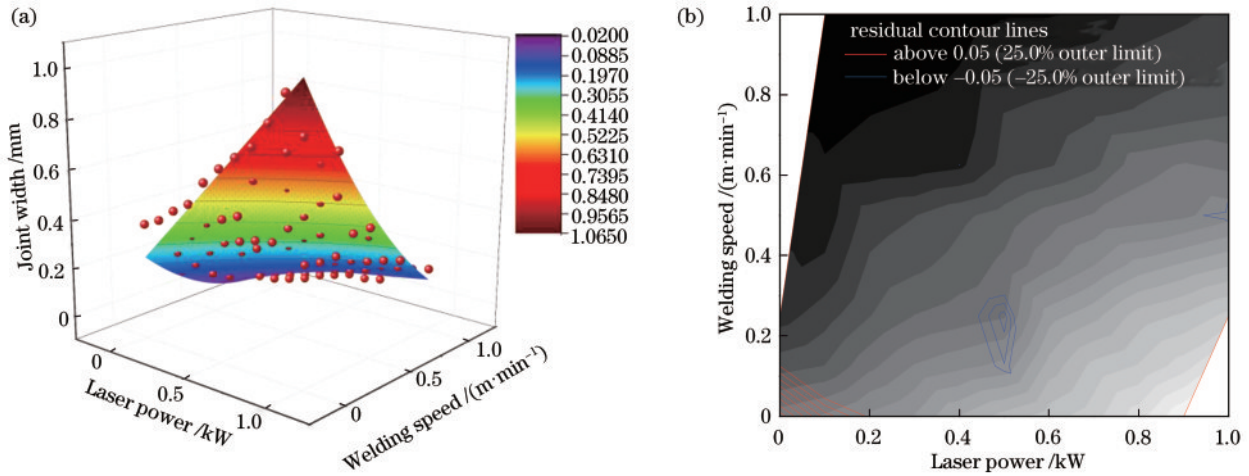


图 9 焊缝结合面宽度的回归模型。(a) 回归模型;(b) 回归模型残差

Fig. 9 Regression model of weld joint width. (a) Regression model; (b) regression model residuals

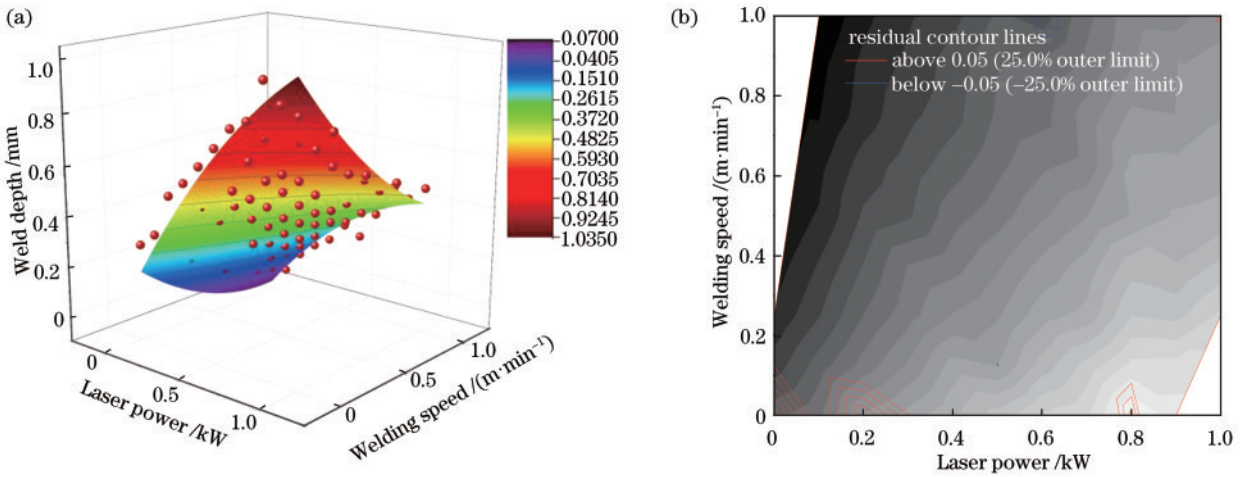


图 10 焊缝熔深的回归模型。(a) 回归模型;(b) 回归模型残差

Fig. 10 Regression model of weld penetration. (a) Regression model; (b) regression model residuals

表 4 焊缝结合面宽度回归模型系数

Table 4 Regression model coefficients of weld joint width

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
0.17559	1.21041	-0.52678	-0.35576	0.28463	-0.36479

表 5 焊缝熔深回归模型系数

Table 5 Regression model coefficients of weld penetration

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
5.64472	0.00119	-3.80834	5.28598×10^{-7}	0.97741	-2.27567×10^{-4}

表 6 T 型焊缝结合面宽度回归模型分析

Table 6 Analysis of regression model of T-joint weld joint width

Item	DF	SS	MSE	F_0	P	$R^2 / \%$
Regression	5	19.50248	3.90050	2647.92561	1.446×10^{-4}	
Residual	82	0.12079	0.00147			97.163
Total	87	19.62327				

采用回归模型预测焊缝形貌尺寸,两个模型对功率 1~3 kW、焊速 0.8~2.4 m/min 的 20 组不同工艺参数测试样本的焊缝熔深和结合面宽度的预测与实际测

量值误差如图 11 所示,误差来源主要包括熔池图像波动误差、焊缝形貌尺寸标注精度误差以及简化模型带来的误差。本文模型对焊缝结合面宽度和熔深的平均

表 7 T 型接头焊缝熔深回归模型分析

Table 7 Analysis of regression model of T-joint weld penetration

Item	DF	SS	MSE	F_0	P	$R^2 / \%$
Regression	5	12.74066	2.54813	2173.93311	1.446×10^{-4}	
Residual	82	0.09611	0.00117			97.973
Total	87	12.83678				

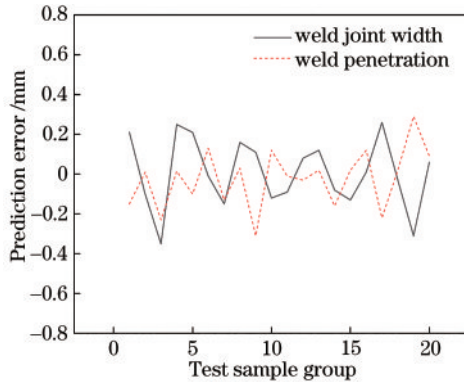


图 11 回归模型预测焊缝形貌尺寸误差

Fig. 11 Size errors of weld topography predicted by regression model

预测误差分别为 0.14 mm 和 0.10 mm, 具有较高的预测精度。

4 结 论

本文针对熔池图像前后亮度不均匀的特征, 设计了分段线性拉伸算法, 采用灰度处理、分段线性拉伸、二值化、形态学运算、保留最大连通域并进行特征计算可以提高熔池边缘区域的对比度, 并提取到准确的熔池边缘信息。然后, 通过相关性分析发现, 并非所有的熔池特征量都与焊缝特征量线性相关。熔池长度、宽度和后拖角度与 T 型接头的焊缝熔深具有强相关性, 其中, 熔池长度和熔池宽度与熔深之间为正相关, 熔池后拖角与熔深之间为负相关。熔池宽度和后拖角度与 T 型接头的结合面宽度具有强相关性, 熔池宽度与结合面宽度之间为正相关, 熔池后拖角与结合面宽度之间为负相关。焊接工艺参数对焊缝成形影响显著, 随着激光功率的增加、焊接速度的减小, 焊缝熔深和结合面宽度逐渐增大。最后, 建立了焊接工艺参数与 T 型接头焊缝特征量间的多项式回归分析模型, 并对焊缝形貌尺寸进行预测。显著性分析和方差分析表明, 回归方程的效果显著, 对焊缝结合面宽度和熔深的平均预测误差分别为 0.14 mm 和 0.10 mm。

参 考 文 献

[1] 刘全明, 张朝晖, 刘世锋, 等. 钛合金在航空航天及武器装备领域的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(3): 1-4.
Liu Q M, Zhang Z H, Liu S F, et al. Application and development of titanium alloy in aerospace and military

hardware[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(3): 1-4.

- [2] 单奇博, 刘忱, 姚静, 等. 扫描策略对激光熔化沉积态 TC4 钛合金组织性能及残余应力的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1114002.
Shan Q B, Liu C, Yao J, et al. Effects of scanning strategy on the microstructure, properties, and residual stress of TC4 titanium alloy prepared by laser melting deposition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1114002.
- [3] 王蔚, 沈杰, 刘伟军, 等. 脉冲激光清洗过程中振镜扫描速度对 TA15 钛合金表面氧化层的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(18): 1802004.
Wang W, Shen J, Liu W J, et al. Effect of scanning speed of galvanometer on surface oxide layer of TA15 titanium alloy in pulsed laser cleaning[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(18): 1802004.
- [4] 梅述文, 成群林, 胡佩佩, 等. TC4 钛合金蒙皮骨架结构件光纤激光焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(3): 83-86.
Mei S W, Cheng Q L, Hu P P, et al. Study on fiber laser welding of skinned skeletal structure titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(3): 83-86.
- [5] 刘海, 陈辉. 激光功率对异种钢激光焊接接头组织与性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2314007.
Liu H, Chen H. Effect of laser power on microstructure and properties of dissimilar steel's laser welded joint[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2314007.
- [6] 柴旭天, 尹燕, 王志鹏, 等. D36 钢窄间隙激光焊接接头组织和性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1714008.
Chai X T, Yin Y, Wang Z P, et al. Joint microstructure and properties of D36 steel using narrow gap laser welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1714008.
- [7] 赵乐, 韩雪, 邹江林, 等. 光纤激光深熔焊接小孔形成过程的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071402.
Zhao L, Han X, Zou J L, et al. Research on formation process of keyhole during fiber laser deep penetration welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071402.
- [8] Sudnik W, Radaj D, Breitschwerdt S, et al. Numerical simulation of weld pool geometry in laser beam welding [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(6): 662-671.
- [9] 高世一, 吴瑞珉, 陈卫东, 等. 激光焊接过程监测及焊缝质量检测技术研究现状[J]. 世界钢铁, 2010, 10(3): 51-54, 63.

- Gao S Y, Wu R M, Chen W D, et al. Development status of laser welding process monitor and seam quality detection[J]. *World Iron & Steel*, 2010, 10(3): 51-54, 63.
- [10] Ancona A, Spagnolo V, Lugarà P M, et al. Optical sensor for real-time monitoring of CO₂ laser welding process[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(33): 6019-6025.
- [11] 侯文慧. 基于深度学习的焊缝图像缺陷识别方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- Hou W H. Research on defect recognition of weld image based on deep learning[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [12] 吴松坪. 激光焊接过程熔透状态实时监测与模式分类[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- Wu S P. Online monitoring of laser welding penetration status and its pattern classification[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [13] 秦国梁, 林尚扬. 基于同轴视觉监测的激光深熔焊缝熔深监测[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(8): 229-233.
- Qin G L, Lin S Y. Weld penetration monitoring in Nd: YAG laser deep penetration welding based on coaxial visual sensing technology[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(8): 229-233.
- [14] Kong F R, Ma J J, Carlson B, et al. Real-time monitoring of laser welding of galvanized high strength steel in lap joint configuration[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2186-2196.
- [15] Brueggemann G, Benziger T. Process-control in laser beam welding using acoustic emission analysis[J]. *Schweissen & Schneiden*, 1997, 5: E73-E76.
- [16] 王春明, 余福林, 段爱琴, 等. 非穿透激光深熔焊熔深与等离子体光信号的关系[J]. *焊接学报*, 2002, 23(5): 45-48, 56.
- Wang C M, Yu F L, Duan A Q, et al. Relationship between penetration depth and plasma optic signal during partial-penetration laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2002, 23(5): 45-48, 56.
- [17] 齐秀滨. 激光焊接过程视觉传感技术的发展现状[J]. *焊接学报*, 2008, 29(2): 108-112, 118.
- Qi X B. State-of-arts of visual sensing technology to monitor laser welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(2): 108-112, 118.
- [18] 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.
- Chen W Z, Jia L, Zhang X D, et al. Coaxial vision sensing system and detection of penetration status in CO₂ laser welding[J]. *Applied Laser*, 2004, 24(3): 130-134.
- [19] Fang J F, Chen Y B, Li L Q, et al. Coaxial monitoring with a CMOS camera for CO₂ laser welding[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5633: 101-109.
- [20] Shao J, Yan Y. Review of techniques for on-line monitoring and inspection of laser welding[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2005, 15: 101-107.
- [21] Zhao D W, Wang Y X, Liang D J, et al. Performances of regression model and artificial neural network in monitoring welding quality based on power signal[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(2): 1231-1240.