

DOI:10.11784/tdxbz202312033

基于光谱诊断的钛合金激光焊接熔深在线检测

黄一鸣^{1,2}, 杨凯淞^{1,2}, 余昆³, 王小博⁴, 杨立军^{1,2}, 李明宇^{1,2}

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市先进连接技术重点实验室, 天津 300350;
3. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 4. 北京新风航天装备有限公司, 北京 100854)

摘要: 激光焊接是一种多物理场耦合的高速激光加工过程, 对其熔深的精确在线检测一直是行业最为关注的关键难题. 本文针对 TC4 钛合金激光焊接过程, 搭建了光致等离子体光谱实时监测平台, 分析了激光功率对等离子体热力学特性、熔深的影响规律, 提出了一种熔深在线预测方法. 研究结果表明, 等离子体光谱数据和熔深的变化存在显著相关性. 基于此, 选择了 6 条线谱的强度特征用于熔深预测建模. 并采用降维技术对光谱数据进行特征提取, 基于提取的特征再次建立了熔深预测模型. 基于数据降维变换后的光谱特征构建的熔深预测模型的均方误差为 0.0194, 小于基于原始光谱强度特征建立的神经网络模型. 本文构建的高精度熔深预测模型为激光焊接熔深的实时反馈控制提供了理论依据.

关键词: 激光焊接; 钛合金; 光谱分析; 熔深; 在线检测

中图分类号: TG456.7 文献标志码: A 文章编号: 0493-2137(2024)12-1298-07

Online Detection of Laser Welding Penetration Depth of Titanium Alloy Based on Spectral Diagnosis

Huang Yiming^{1,2}, Yang Kaisong^{1,2}, She Kun³, Wang Xiaobo⁴, Yang Lijun^{1,2}, Li Mingyu^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China;
3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
4. Beijing Innowind Aerospace Equipment Co., Ltd., Beijing 100854, China)

Abstract: Laser welding is a high-speed laser process that couples multiple physical fields. The accurate online detection of the penetration depth of laser welding has been a critical challenge. Consequently, this study focused on the laser welding process of TC4 titanium alloy and constructed a spectrum monitoring platform for laser-induced plasma. The influence of laser power on plasma thermodynamic characteristics and penetration depth was analyzed. Subsequently, a real-time prediction method for penetration depth was proposed. The results determined a significant correlation between plasma spectral data and penetration depth values. Based on this correlation, the intensity characteristics of six line spectra were selected to construct a real-time prediction model of penetration depth. Using dimensionality reduction technology to extract features from spectral data, another prediction model for penetration depth was established based on the extracted features. The mean square error of the penetration depth prediction model constructed using spectral features after dimensionality reduction was 0.0194, which was smaller than that of the penetration depth prediction model based on the original spectral intensity features. Thus, the high-precision penetration depth prediction model constructed in this study provides a theoretical basis for real-time feedback control of laser welding penetration depth.

Keywords: laser welding; titanium alloy; spectral analysis; penetration depth; online detection

收稿日期: 2023-12-27; 修回日期: 2024-01-10.

作者简介: 黄一鸣 (1992—), 男, 博士, 副教授, ymhuang26@tju.edu.cn.

通信作者: 杨立军, yljabc@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52201048, 51875403).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52201048, No. 51875403).

激光焊接具有能量密度大、焊缝热影响区小和焊接效率高的特点,在焊接钛合金方面具有很大的优势^[1-2]。然而,激光与材料相互作用过程中产生等离子体云会影响焊接质量,使熔深出现波动,影响焊接接头的力学性能^[3]。

因此,在焊接过程中对熔深进行在线监测,为熔深的实时控制提供数据支撑,对保证焊接过程熔深的稳定性和保障焊缝质量具有重要意义。

但目前的技术手段无法直接对焊接过程中的熔深进行测量。采用传感器可以有效获得激光焊接过程中伴生的与焊缝质量密切相关的声、热、电和光等多种传感信息^[4-6]。通过建立传感信息和焊缝熔深之间的关系,就可以实现对熔深的在线预测。

Luo 等^[7]提出等离子体羽流作用于熔池产生的反冲力和热振动是产生声发射的源机制,声发射信号越强,焊缝的熔深越大。声学传感器采集信号操作简单,但信号容易受到环境噪声的影响,增加了数据的处理难度。在热信号方面,Xiao 等^[8]发现同轴红外辐射温度信号与熔深和焊缝宽度之间存在线性关系,但其所需的焊缝金属发射率较难确定。Qiu 等^[9]研究等离子体的电特性时发现,激光深熔焊的频谱强度远大于热导焊的频谱强度。电信号需将电子探针插入等离子体中接触测量,采集条件相对苛刻,工程化应用难度大。

采用发射光谱分析技术,Mrna 等^[10]对激光深熔焊接过程中等离子体羽流光辐射进行了自相关分析,确定了等离子体爆发周期和焊接深度之间存在线性依赖关系。Li 等^[11]通过实验发现铝、铜特定谱线的光谱强度比值与熔深有很高的相关性,然后基于 BP (back propagation) 神经网络建立了不同激光功率下的 Al-Cu 激光搭接焊熔深监测模型,预测精度可以达到 0.05 mm。

目前,已经有学者基于等离子体光信号建立了熔深预测模型,但仍未清楚揭示钛合金激光焊接等离子体特征和熔深之间的内在关系,且熔深的实时预测精度有待提高。本文搭建了 TC4 钛合金激光焊接等离子体光谱监测平台,分析等离子体光谱特征随焊接参数的变化规律及其与熔深的联系,探究海量光谱数据的特征提取方法,建立熔深神经网络预测模型,为实现激光焊接过程的熔深闭环控制、提高焊接过程稳定性提供理论基础。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料和试验系统

试验材料为 TC4 钛合金,板厚 4 mm,化学成分

如表 1 所示。

表 1 TC4 钛合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of TC4 titanium alloy

w_{Al}	w_V	w_{Fe}	w_O	w_C	w_N	w_H	w_{Ti}
5.6 ~ 6.8	3.5 ~ 4.5	≤0.30	≤0.20	≤0.10	≤0.05	≤0.015	余量

本文搭建了由激光加工系统、数控运动系统、光谱传感测量系统组成的激光焊接过程监测平台,如图 1 所示。激光加工系统的核心是波长为 1064 nm 的 JK2003SM 型 Nd:YAG 固体激光器,激光束通过芯径 600 μm 的光纤传输到激光头。数控运动系统为 TDJG1 多轴数控激光加工机床,用于调节焊接过程中的运动参数。等离子体光谱采集系统由光谱仪和工控机组成,其中光谱仪的型号为海洋光学 Maya2000 Pro,测量范围为 350 ~ 800 nm,分辨率为 0.23 nm/pixel,采样频率设定为 50 Hz。光纤探头的采集角度为 11°,距离熔池中心 175 mm,探头上配备透过率为 5% 的减光片。

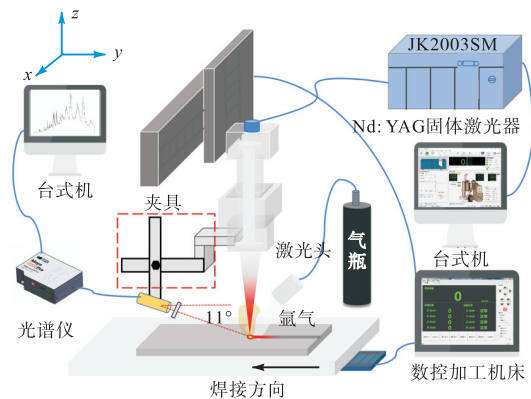


图 1 激光焊接等离子体光谱监测平台

Fig.1 Laser welding plasma spectrum monitoring platform

焊接形式为平板自熔焊,保护气体为纯氩气,气体流量为 15 L/min。焊接过程中,试件在工作台的驱动下以 10 mm/s 的速度运动,每次试验的激光功率以 100 W 为增量,由 800 W 变化到 1300 W。

1.2 等离子体光谱信号的处理

焊接过程中采集到的光谱数据由连续谱和线状谱组成,为去除辐射连续谱强度对线状谱强度的影响,使用三次样条插值法对采集到的光谱数据进行处理,得到只有线状谱的波形。对主要的线状谱进行了解析识别,如图 2 所示。测量波长-光强是判别元素及其含量最简单的方法,但无法有效反映等离子体热力学特性。本文通过求解电子温度、电子密度并分析它们的变化规律,深入探究热导焊向深熔焊转变时临界状态的等离子体特性。

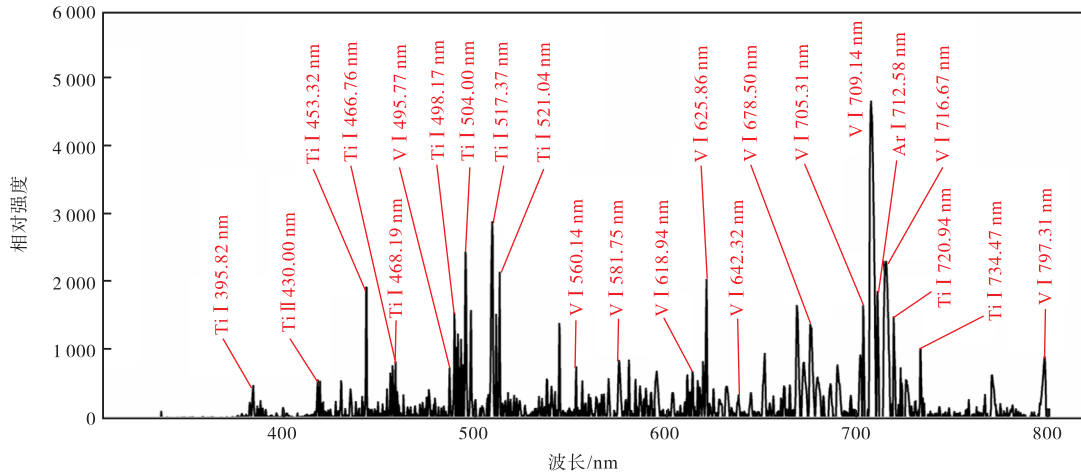


图 2 钛合金激光焊接等离子体的发射线性谱

Fig.2 Emission spectra of titanium alloy laser-induced plasma

本文选择 Ti I 499.11 nm、Ti I 500.10 nm、Ti I 500.72 nm、Ti I 506.47 nm、Ti I 519.30 nm 和 Ti I 521.04 nm 用于电子温度的计算. 通过查阅 NIST 原子数据库^[12]获得这些谱线的光谱参数. 以激光功率 1 000 W 为例, 根据玻耳兹曼图法^[13]绘制的坐标点及拟合的直线如图 3 所示, 由斜率换算可知电子温度 $T_e = 7 659.7$ K.

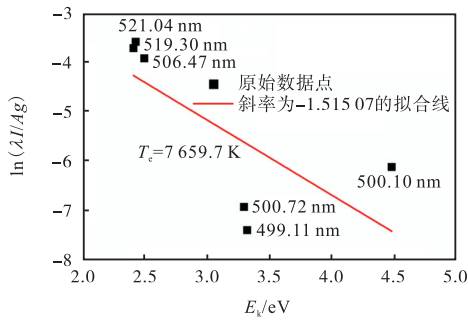


图 3 基于 6 条 Ti I 谱线绘制的玻耳兹曼图

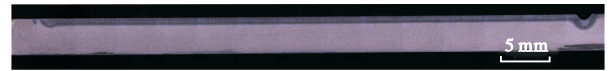
Fig.3 Boltzmann diagram based on six Ti I spectral lines

1.3 熔深提取

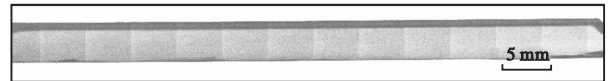
为了定量精确地获得熔深数据, 本文提出了一种激光焊接熔深值连续提取的方法. 焊后将试件沿焊缝方向切开, 对截面进行打磨后用凯勒试剂腐蚀, 得到有明显焊缝-母材交界线的截面, 如图 4(a)所示.

第 1 步截除由于激光热源作用半径而形成焊道区域, 并将截取后的图像转化为灰度图像, 如图 4(b)所示. 第 2 步是对图像进行二值化处理. 其中白色区域代表焊缝区, 黑色区域代表母材等其他区域, 处理后得到边缘清晰且能够区分焊缝和母材的边界线的二值化图像, 如图 4(c)所示. 第 3 步是轮廓提取, 得到焊缝的轮廓形状, 图 4(d)为焊缝熔深下轮廓线的局部放大图. 最后, 将图像依据左右交点分为上、下

两个区域, 记两个区域中轮廓的坐标矩阵分别为 A 和 B , 其中 $A = [u, v]$, $B = [x, y]$, 取矩阵 B 中的横坐标为绘制的曲线图的横坐标, 取矩阵 A 和矩阵 B 的纵坐标之差为绘制的曲线图的纵坐标, 最终的曲线图坐标可表示为 $C = [a, b]$, 其中 $a = x$, $b = y - v$; 图 4(e)为最终得到的熔深曲线.



(a) 焊缝截面原图



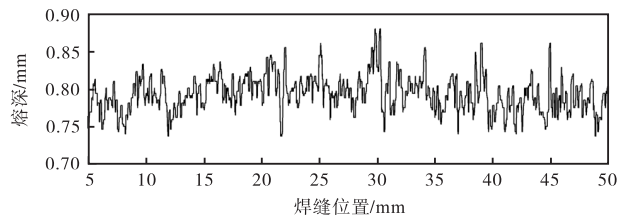
(b) 焊缝截面灰度变换图



(c) 焊缝截面二值化图



(d) 焊缝边缘下轮廓局部放大



(e) 熔深曲线

图 4 熔深提取过程

Fig.4 Extraction process of the penetration depth

焊缝起始 5 mm 和结尾处 5 mm 由于激光热源的

停留造成熔深数据偏离正常值,故实际分析时不考虑该区域.

2 结果和讨论

2.1 熔深数据分析

根据前文所述的熔深提取方法,得到了不同激光功率下的熔深变化,如图5所示.图6为激光功率在800~1300W范围内的熔深-熔宽-深宽比变化曲线.可以看出,焊缝熔深在焊接过程中是一个动态变化的过程.焊缝熔深和熔宽随激光功率的增大而增大.当激光功率达到1100W时,熔宽和熔深急剧增大,且焊缝熔深出现较大程度的波动.

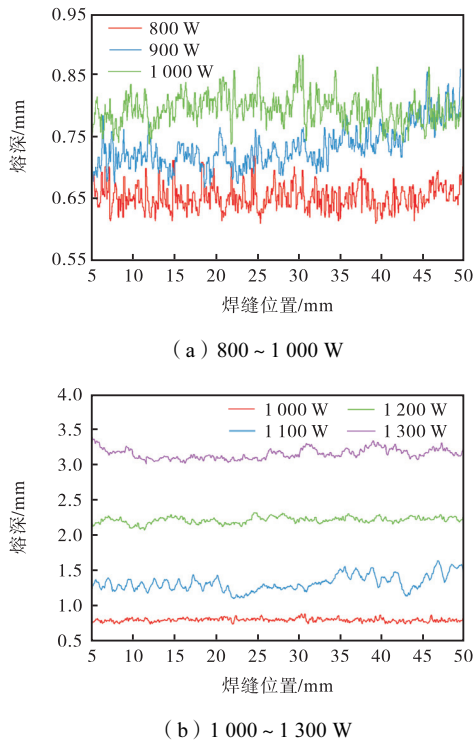


图5 熔深时序变化对比

Fig.5 Comparison of time series changes in the penetration depth

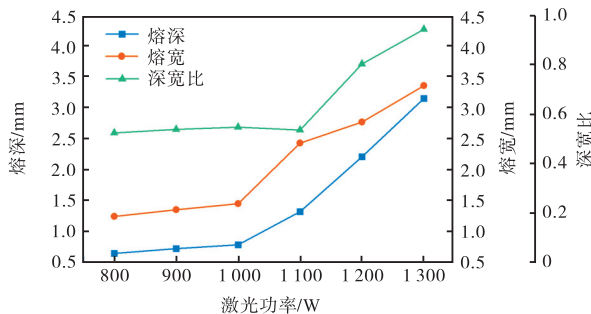


图6 不同激光功率下的熔深-熔宽-深宽比变化

Fig.6 Changes in the penetration depth, weld width, and depth-width ratio under various laser powers

当激光功率为800~1000W时,激光热输入较小,熔宽和熔深的数值都较小,增长趋势缓慢,为热导焊模式,深宽比处在0.52~0.55之间.当激光功率达到1100W时,激光热输入较大,熔深和熔宽剧烈增大,处在热导焊向深熔焊过度的临界状态.当激光功率为1200~1300W时,激光热输入较大.焊缝熔深和熔宽随着激光功率的增大迅速增大,为激光深熔焊模式,深宽比在0.80~0.94之间.

2.2 等离子体光谱特征分析

如图7(a)和(b)为不同激光功率下Ti I 506.47 nm谱线的发射光谱强度时序变化.从变化趋势上看,等离子体光谱强度随激光功率的增大而增大.但功率为900W和1000W时的等离子体光谱强度区分度较小.功率达到1100W时,等离子体光谱强度的数值和波动程度明显增大,且波动程度随激光功率的增大而增大.

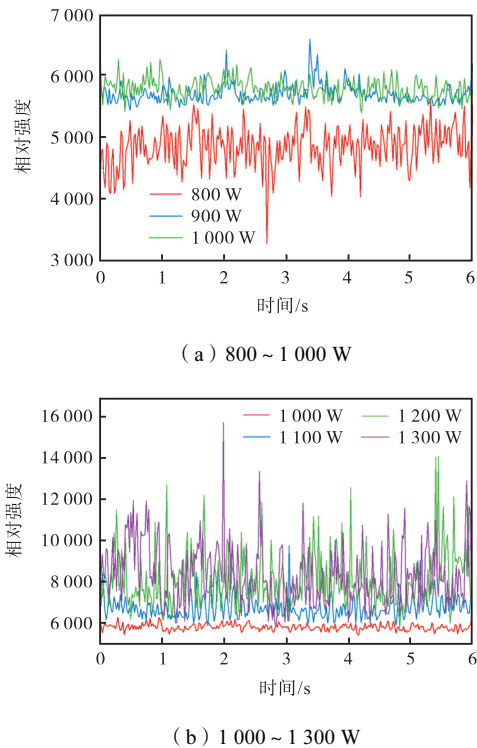


图7 Ti I 506.47 nm谱线等离子体光谱强度变化
Fig.7 Spectral intensity variation of Ti I 506.47 nm spectral line plasma

等离子体电子温度的计算采用玻耳兹曼图法,等离子体电子密度的计算采用Saha方程和Boltzmann方程^[14].图8为不同激光功率下等离子体电子温度和电子密度的误差棒图.可以看出等离子体电子密度和等离子体电子温度的变化趋势基本一致.在1100W的激光功率下,等离子体电子温度和电子密度都显现出较大的波动.

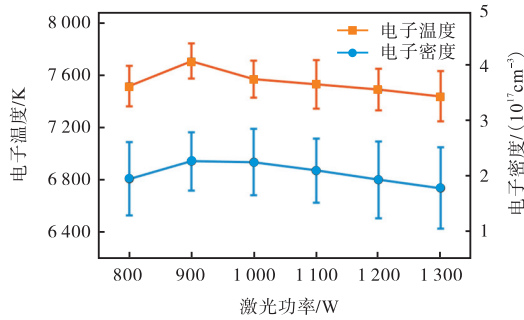


图 8 不同激光功率下等离子体电子温度和电子密度的误差棒图

Fig.8 Error bar plots of plasma electron temperature and plasma electron density under different laser powers

等离子体光谱特征受激光热输入和等离子体羽流热源运动的影响. 当激光功率在 800 ~ 900 W 之间变化时, 焊接模式为热导焊, 等离子体羽流热源核心和等离子体高密度区域在焊缝表面附近. 随着热输入

的增加, 等离子体光谱特征随激光功率的增大而增大. 当激光功率由 900 W 变化到 1 000 W 时, 激光束在母材上的作用位置下移, 等离子体羽流热源核心和等离子体高密度区域下移. 虽然热输入的增加使得等离子体发射光谱强度增大, 但此时增长趋势已经放缓, 等离子体电子温度和电子密度减小. 激光功率达到 1 100 W 时, 焊缝熔宽和熔深急剧增大, 为热导焊和深熔焊的临界功率参数. 此时小孔的形成极不稳定, 熔池的流动非常剧烈, 等离子体光谱特征、熔宽和熔深数值明显增大且出现较大程度的波动. 当激光功率在 1 200 ~ 1 300 W 之间变化时, 焊接模式为深熔焊, 等离子体羽流热源核心和等离子体高密度区域继续下移, 等离子体发射光谱强度小幅增加, 等离子体电子温度和电子密度随激光功率的增大而减小. 不同焊接模式下的等离子体热力学特征演变原理如图 9 所示.

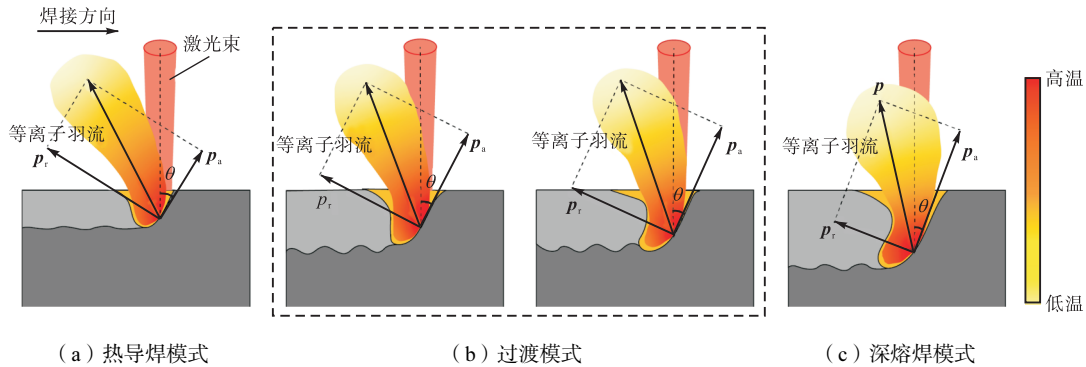


图 9 不同焊接模式的等离子体热力学特征演变

Fig.9 Evolution of plasma thermodynamic characteristics under different welding modes

2.3 熔深预测模型的建立

由前文所述, 在 800 ~ 1 000 W 的热导焊模式下, 焊缝熔深、熔宽与等离子体光谱强度均随激光功率的增大而增大. 因此, 基于等离子体光谱特征可以进行焊缝熔深预测.

BP 神经网络可以构建输入层和输出层之间的映射关系, 且映射结果能无限逼近存在于闭区间内的任何连续函数. 本文构造了包含两个隐含层的 BP 神经网络来预测焊缝熔深, 结构如图 10 所示. 选择焊接中部稳定阶段的光谱数据特征作为模型输入, 激活函数选择 *tansig* 函数, 对应的焊缝熔深值作为模型输出. 数据集的 80% 作为训练集, 20% 作为测试集. 使用 R^2 、RMSE 和 MAE 3 个指标对每个模型的准确性进行评价.

每个光谱采样点都涵盖 350 ~ 800 nm 波段范围的 2 068 个波长维度的光谱信息, 包含紫外线、可见光和红外光的波段. 丰富的焊接过程信息有利于挖

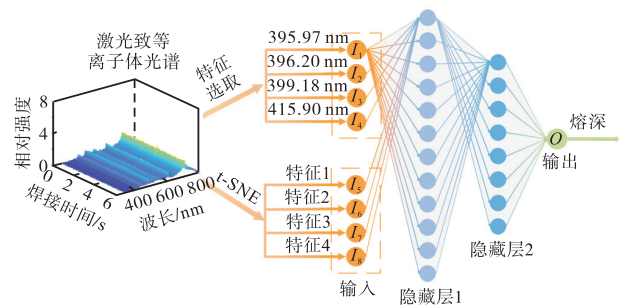


图 10 BP神经网络结构

Fig.10 BP neural network structure

掘光谱数据与焊缝熔深的对应关系. 但由于信息冗余, 使用原始的高维数据建立模型时导入数据要花费更多的时间, 且训练出的模型性能有所下降. 因此, 在建模之前减少数据维度是很有必要的.

为了选出与熔深相关性较强的特征, 本文将 800 W、900 W 和 1 000 W 下的光谱强度数据、电子温度和电子密度组成 2 070 维的新数据, 然后对每个维

度和焊缝熔深进行皮尔逊双变量相关性分析,发现光谱传感信号和焊缝熔深数据存在很强的相关性. 随后按照相关系数从大到小排列后选取相关系数排前4位的维度特征,即396.20 nm、395.97 nm、415.90 nm和399.18 nm对应的光谱强度. 把特征和熔深一起绘制在相关矩阵中,如图11所示. 以这4个维度的特征作为BP神经网络模型的输入,焊缝熔深数据作为输出建立基于光谱传感信号的熔深预测模型. 模型训练测试集的预测结果如图12所示. 模型测试集的 R^2 为0.7463, RMSE为0.0303, MAE为0.0238, 真实值和预测值之间的拟合程度较低, 预测值和观测值之间的差异较大. 可以发现尽管选取了与焊缝深度的相关性最显著的4个特征进行模型训练,但结果并不理想.

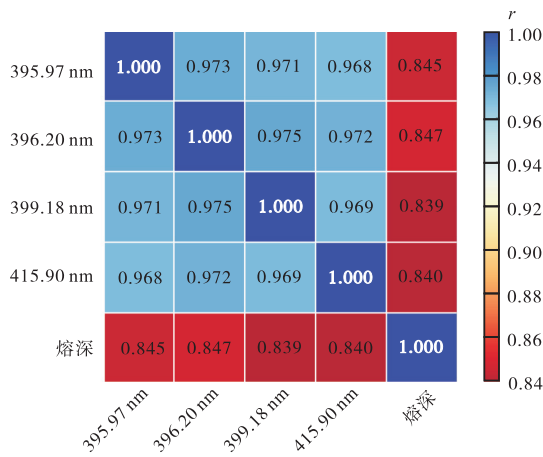


图11 基于相关性排列选取的等离子体光谱特征和熔深的相关矩阵

Fig.11 Correlation matrix of plasma spectral features based on correlation permutation selection and penetration depth

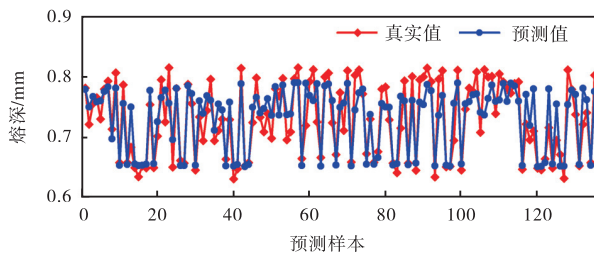


图12 基于相关性排列选取的等离子光谱特征的模型的测试集的预测结果

Fig.12 Prediction results of model training test set for plasma spectral features based on correlation permutation selection

Guyon 等^[15]的研究表明,单独且相互独立地对变量进行评分的方法无法确定哪种变量组合的性能最佳. 非常高的变量相关性(或反相关性)并不意味

着缺乏变量互补性. 一个本身完全无用的变量与其他变量一起使用时,可以显著提高性能. 因而,相关性分析仅能为选择特征提供一定参考,特征选择是否恰当还要看模型训练的实际结果.

为此,本文采用非线性数据降维技术对光谱进行深度特征提取. 对2068维的光谱强度数据进行t-SNE降维处理,使维度降低到4维. 4个特征代表数据点在低维空间的位置分布,没有主次之分和具体含义,降维后的数据是与原始数据点分布相似且个数相同的数据点集合. 图13为特征的可视化图. 将降维后的4个维度的数据分别和焊缝熔深进行皮尔逊双变量相关性分析,绘制相关矩阵如图14所示. 以这4个维度作为模型的输入、熔深作为模型的输出,建立熔深预测模型. 模型训练测试集的预测结果如图15所示. 模型测试集的 R^2 为0.9052, RMSE为0.0194, MAE为0.0146. 可以看到,尽管降维后的数据和熔深之间的相关程度并不显著,但和使用降维前的数据训练的模型相比,拟合程度提高,误差减小,模型的准确率提高.

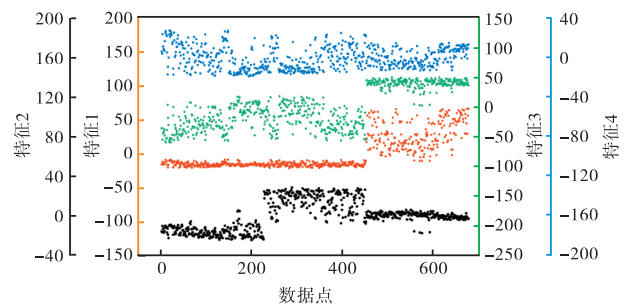


图13 经t-SNE降维后的等离子体光谱特征

Fig.13 Plasma spectral features after t-SNE dimensionality reduction processing

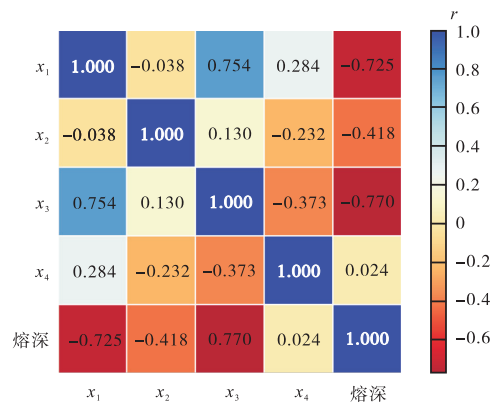


图14 基于t-SNE降维的等离子体光谱特征和熔深的相关矩阵

Fig.14 Correlation matrix of plasma spectral features based on t-SNE dimensionality reduction and penetration depth

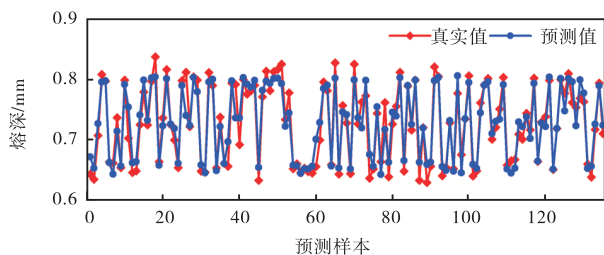


图 15 基于 t-SNE 降维的等离子体光谱特征的模型的测试集的预测结果

Fig.15 Prediction results of model training test set for spectral features based on t-SNE dimensionality reduction

3 结 论

(1) 对不同激光功率下的钛合金激光焊接等离子体热力学特性进行了研究. 利用 6 条 Ti I 谱线和 1 条 V I 谱线的强度计算得到了不同激光功率条件下的钛合金激光焊接等离子体电子温度和电子密度的时序变化. 激光功率在 800 ~ 1 300 W 时, 随着激光功率的增大, 平均电子温度由 7 516.1 K 增大到 7 708.3 K 然后减小到 7 438.9 K, 平均电子密度由 $1.94 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 增大到 $2.26 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 然后减小到 $1.78 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

(2) 分析了焊缝熔深、等离子体光谱特征随激光功率的变化. 通过特征提取获得了激光功率 800 ~ 1 300 W 条件下的熔深、Ti I 506.47 nm 的光谱强度. 随着激光功率的增大, 各特征值呈现相同的变化趋势, 熔深由 0.65 mm 增大到 3.14 mm, Ti I 506.47 nm 的光谱强度由 4 860 增大到 8 363. 此外, 在 1 100 W 的焊接模式过渡参数下, 各特征值均发生突变.

(3) 研究了等离子体光谱特征和焊缝熔深的相关性, 分别建立了基于光谱强度特征和光谱降维特征的熔深神经网络预测模型. 波长 395.97 nm、396.20 nm、399.18 nm、415.90 nm 对应的光谱强度和熔深的相关系数均在 0.839 0 以上, 建立的神经网络模型的 R^2 为 0.746 3, RMSE 为 0.030 3. 经 t-SNE 方法由 2 068 维降低到 4 维的光谱特征和熔深的相关系数较小, 但建立的神经网络模型和使用降维前的数据训练的模型相比, R^2 由 0.746 3 增加到 0.905 2, RMSE 由 0.030 3 降低到 0.019 4, MAE 由 0.023 8 降低到 0.014 6, 模型的准确率提高.

参考文献:

[1] Auwal S T, Ramesh S, Yusof F, et al. A review on laser beam welding of titanium alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(1/2/3/4): 1071-1098.

- [2] Huang Y M, Hou S S, Xu S F, et al. EMD-PNN based welding defects detection using laser-induced plasma electrical signals[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 642-651.
- [3] Gong J F, Peng G C, Li L Q, et al. Effect of plasma plume produced by vacuum laser welding on energy transmission[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 136: 106744.
- [4] Cai W, Wang J Z, Jiang P, et al. Application of sensing techniques and artificial intelligence-based methods to laser welding real-time monitoring: A critical review of recent literature[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 57: 1-18.
- [5] Wu D, Zhang P L, Yu Z S, et al. Progress and perspectives of in-situ optical monitoring in laser beam welding: Sensing, characterization and modeling[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 75: 767-791.
- [6] Huang Y M, Xu S, Yang L J, et al. Defect detection during laser welding using electrical signals and high-speed photography[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 394-403.
- [7] Luo Y, Zhu L, Han J T, et al. Study on the acoustic emission effect of plasma plume in pulsed laser welding[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 124: 715-723.
- [8] Xiao X F, Liu X B, Cheng M P, et al. Towards monitoring laser welding process via a coaxial pyrometer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116409.
- [9] Qiu W C, Yang L J, Zhao S B, et al. A study on plasma plume fluctuation characteristic during A304 stainless steel laser welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 33: 1-9.
- [10] Mrna L, Sarbort M, Rerucha S, et al. Autocorrelation analysis of plasma plume light emissions in deep penetration laser welding of steel[J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(1): 012009.
- [11] Li S X, Jiang P, Gao Y, et al. A penetration depth monitoring method for Al-Cu laser lap welding based on spectral signals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2023, 317: 117972.
- [12] Kramida A, Ralchenko Y, Reader J. Nist atomic spectra database[EB/OL]. <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>, 2022-10-21.
- [13] Li J, Zhang Y, Liu W, et al. Prediction of penetration based on plasma plume and spectrum characteristics in laser welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 75: 593-604.
- [14] Griem H R. Plasma Spectroscopy[M]. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [15] Guyon I M, Elisseeff A. An introduction to variable and feature selection[J]. Journal of Machine Learning Research, 2003, 3: 1157-1182.

(责任编辑: 田 军)