

TC4 钛合金激光深熔焊等离子体羽流热力学行为研究

贾晨鹏¹, 黄一鸣^{2*}, 赵圣斌¹, 袁炯¹, 张枫¹, 杨立军^{1**}¹天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350;²天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350

摘要 激光深熔焊过程中等离子体羽流的热力学行为与焊接过程稳定性及焊接质量息息相关。利用激光焊接等离子体光电信息同步检测系统测量了等离子体羽流热力学基本参数,并分析了其统计分布规律。结果表明:等离子体喷发速度主要分布在 6~70 m/s 范围内;随着焊接热输入增加,概率最大的等离子体喷发速度减小,而喷发速度分布范围变化不明显;在等离子体喷发过程中,随着等离子体羽流上升,其温度不断下降,等离子体羽流温度的下降程度随着焊接热输入的增加呈现为减小的趋势;在喷发后期,两探针电信号开始回升的前后顺序与喷发后期等离子体喷发的剧烈程度紧密相关。

关键词 激光技术; 激光焊接; 钛合金; 激光等离子体; 等离子体喷发速度; 小孔振荡

中图分类号 TG442 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL230632

1 引言

在激光深熔焊过程中,高能量密度的激光作用在金属上使其产生剧烈的熔化和蒸发,在熔池内形成小孔。熔融金属蒸发、电离过程中产生的金属蒸气、离子和自由电子从小孔中喷出形成等离子体羽流。以往的研究一般认为等离子体羽流的喷发过程具有周期性特征^[1-3],但其同样具有明显的随机性特征,具体表现在等离子体喷发周期的不固定以及等离子体羽流喷发强度的差异等。所查资料显示,目前还缺乏对等离子体羽流热力学行为的系统性研究。因此,通过测量诸如等离子体羽流的喷发速度和温度等热力学基础数据,分析其分布规律,对于进一步研究激光焊接过程中的质量传输和能量传输具有重要意义。

等离子体羽流的动态行为与焊接过程的稳定性息息相关^[4-10]。Xiao 等^[5]利用光谱检测技术研究了不同激光功率下的等离子体羽流温度、电子密度等参数的变化,认为等离子体羽流是激光功率衰减的主要原因。Tenner 等^[4]利用三维高速摄像监测系统对激光焊接过程中的等离子体羽流成像,探索了等离子体羽流与熔池小孔之间的相关性,进而评估了熔池小孔的稳定性。此外,等离子体羽流的动态行为同样影响着焊接质量。Zhang 等^[6]利用高速摄像技术获取了小孔口、等离子体羽流的面积,同时通过频谱分析的方法提取面积变化的频域特征,预测了焊缝的熔透模式。Arita 等^[7]通过 X 射线透射成像研究了激光焊接过程中飞溅的产生机

理,他们认为焊接过程中产生的等离子体羽流干扰了工件的激光热输入,引起熔池及小孔波动,从而导致飞溅产生。

由于激光焊接过程中等离子体喷发行为的随机性,此前的研究多采用高速摄像技术检测等离子体羽流的动态行为。如: Huang 等^[9]利用拍摄频率为 40000 frame/s 的高速摄像机获取了等离子体羽流的动态变化,同时开发了提取图像特征的图像处理算法,得到了等离子体羽流的喷发速度。但是,高速摄像技术的大样本图像数据处理复杂度较高,而且能够反映的等离子体羽流的热力学信息比较单一,这使得该技术的应用具有一定的局限性。

前期的研究表明,基于无源电探针检测技术的单探针检测装置,适用于分析等离子体羽流时域上的温度变化,反映其形态变化的趋势^[11-14]。笔者建立了一套由无源双探针检测装置和高速摄像设备构成的激光焊接等离子体光电信息同步检测系统,该系统能够以较高的信号采集频率检测等离子体羽流在时空上的形态变化和温度变化。相较于碳钢和不锈钢等材料,钛合金在激光焊接过程中产生的等离子体羽流较大,便于双探针检测装置的布置,因而笔者选择应用广泛的 TC4 钛合金作为试验材料,研究激光焊接等离子体羽流的热力学行为。

2 试验材料及试验装置

试验用 TC4 钛合金板材的厚度约为 3 mm。如图 1 所

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-05-08; 录用日期: 2023-05-26; 网络首发日期: 2023-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(51875403, 52201048)

通信作者: *ymhuang26@tju.edu.cn; **yljabc@tju.edu.cn

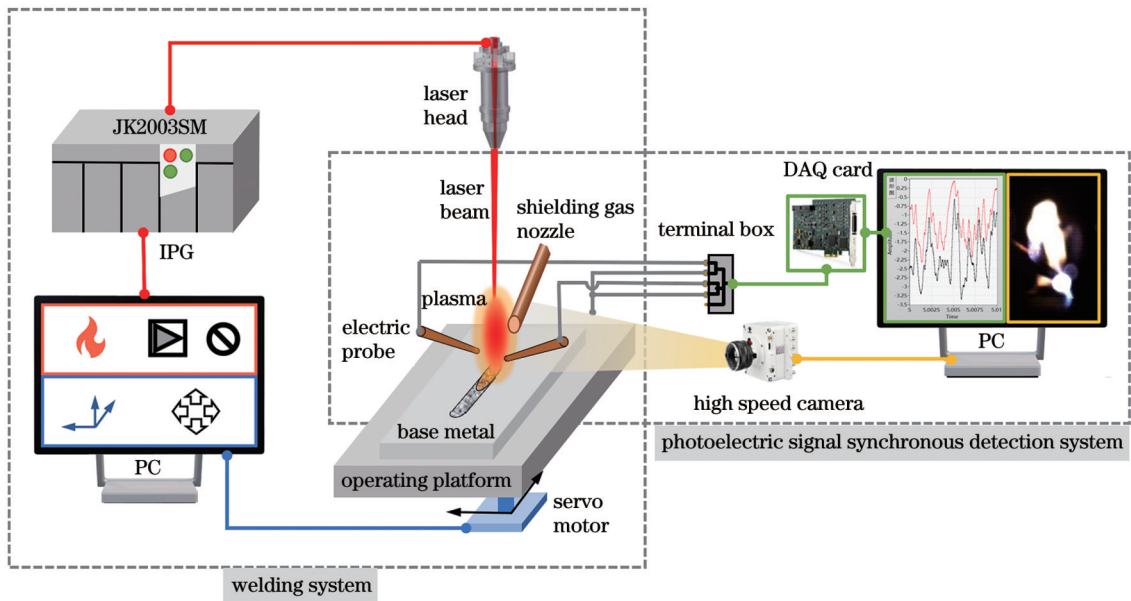


图1 试验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

示,试验装置分为焊接系统和光电信息同步检测系统。焊接系统采用额定功率为 2 kW 的 Nd:YAG 激光器 (JK2003SM 型),其输出激光波长为 1064 nm,试验时激光作用在板材上的光斑直径为 0.6 mm,操作平台带动试验板材进行三维运动,采用氩气作为保护气体,气流量为 20 L/min。光电信息同步检测系统由无源电探针装置和高速摄像设备构成,用于同步检测等离子体羽流的动态变化以及等离子体电信号的波动。

无源电探针装置如图 2 所示,采用熔点高、导电性良好的钨作为探针材料。如图 2(a)所示,将两探针分别置于焊缝两侧的不同高度处。如图 2(b)所示,探针到激光轴线的水平距离为 0.5 mm,两探针之间的夹角为 45°。根据此前对无源电探针适宜位置的研究^[12],本次试验采用的无源双探针的设置高度分别为 1.4 mm 和 2.2 mm。数据采集卡 (DAQ) 以 3 MHz 的采样频率采集焊接过程中的等离子体电信号。采用分辨率为 640 pixel×320 pixel、拍摄速度为 12500 frame/s 的

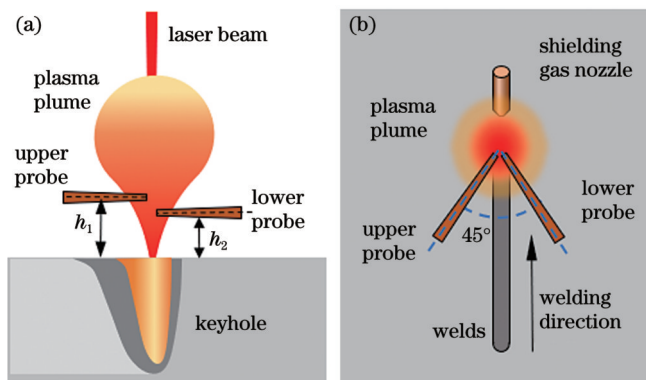


图2 无源电探针装置示意图。(a)侧视图;(b)俯视图

Fig. 2 Schematic diagrams of passive electric probe device.

(a) Side view; (b) top view

PHOTRON FASTCAM Mini UX100 高速摄像机记录等离子体羽流的动态行为。

3 检测原理

根据等离子体鞘层理论,当导体被置于等离子体内时,导体表面会积聚大量负电荷,导体与等离子体之间产生一个电势单调递增的电场,导体呈负电势。Zhao 等^[13]认为孔内等离子体与小孔壁之间同样存在等离子体鞘层效应。综合考虑上述两种等离子体鞘层效应后,将无源电探针测得的压降表示为

$$\varphi_{\text{probe}} = -\frac{k(T_B - T_e)}{e} \ln \sqrt{\frac{m_i}{4\pi m_e}}, \quad (1)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; e 为电子电荷; T_e 为等离子体电子温度; m_e 和 m_i 分别为电子质量和离子质量; T_B 为小孔壁或熔池内熔体层的表面温度。无源电探针检测到的压降变化会由数据采集程序绘制成等离子体电信号波形。根据 Boyer 等^[15]的研究, T_B 约为 3533 K,等离子体羽流的温度 T_e 可通过变换式(1)表示为

$$T_e = \frac{e\varphi_{\text{probe}}}{k \ln \sqrt{\frac{m_i}{4\pi m_e}}} + T_B. \quad (2)$$

4 试验结果及分析讨论

在连续激光焊接模式下,利用等离子体光电同步检测系统,分析不同焊接热输入下的等离子体电信号波动及等离子体羽流的形态变化。设计激光焊接试验,设定激光功率为 1500 W,当焊接速度分别为 20、30、40 mm/s 时,对应的焊接热输入分别为 75、50、37.5 J/mm。

等离子体电信号的时域图如图 3 所示。不同焊接

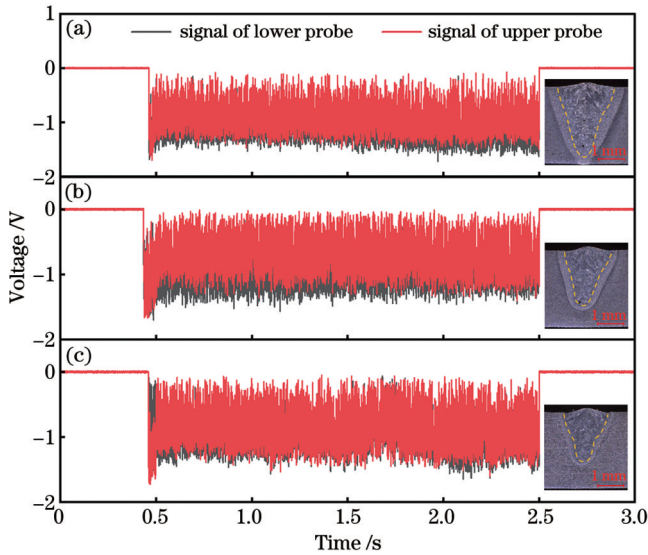


图3 不同热输入下等离子体的电信号波形。(a) 75 J/mm; (b) 50 J/mm; (c) 37.5 J/mm

Fig. 3 Electrical signal waveform of the plasma under different heat inputs. (a) 75 J/mm; (b) 50 J/mm; (c) 37.5 J/mm

热输入下获得的焊缝均为未熔透焊缝,电信号均在 $-1.5 \sim 0$ V 范围内振荡,将其代入式(2)可知孔外等离子体温度波动范围为 $3533 \sim 7469$ K,而且不同热输入下的波动范围变化不大。该波动范围上限与应业勇^[16]在研究 TC4 钛合金激光焊接时在相同焊接热输入下利用光谱检测技术测得的等离子体温度(7300 K 左右)基本一致。笔者采用的电探针检测方法具有相对于光谱检测方法高得多的采样速度,检测到的等离子体羽流的温度波动范围更大,检测的时间精度更高、实时性更强。电信号的振荡反映了等离子体羽流频繁的喷发扩张和收缩过程。本文将针对等离子体的喷发过程,研究等离子体羽流的热力学行为。

4.1 等离子体喷发速度分析

激光焊接过程中同步采集到的等离子体光电信息如图4所示。图4(a)为一段典型的等离子体电信号波形,图4(b)为从中截取的一个等离子体喷发过程的电信号波形。可以看出,等离子体羽流随着电信号的下降/升高而同步地膨胀/收缩。在该喷发过程的初期,从小孔内向外喷发的等离子体羽流在 t_1 时刻接触下探针(黑色点位置),下探针电信号(S_L)波形由上升转为下降。随着等离子体羽流升高,上探针电信号(S_U)波形在 t_2 时刻开始下降,此时等离子体羽流接触到上探针(红色点位置)。如图4(c)所示,以电信号开始下降的点为特征点,以导数波形为零的时刻为特征点对应的时刻。因此,等离子体羽流经过两探针时对应的电信号波形特征点时间差 $\Delta t = t_2 - t_1$ 。已知两探针高度差 Δh ,等离子体喷发速度 v 为

$$v = \Delta h / \Delta t. \quad (3)$$

图4(b)所示的等离子体电信号特征点时间差约为 $30 \mu\text{s}$,已知两探针高度差为 0.8 mm ,相应的等离子

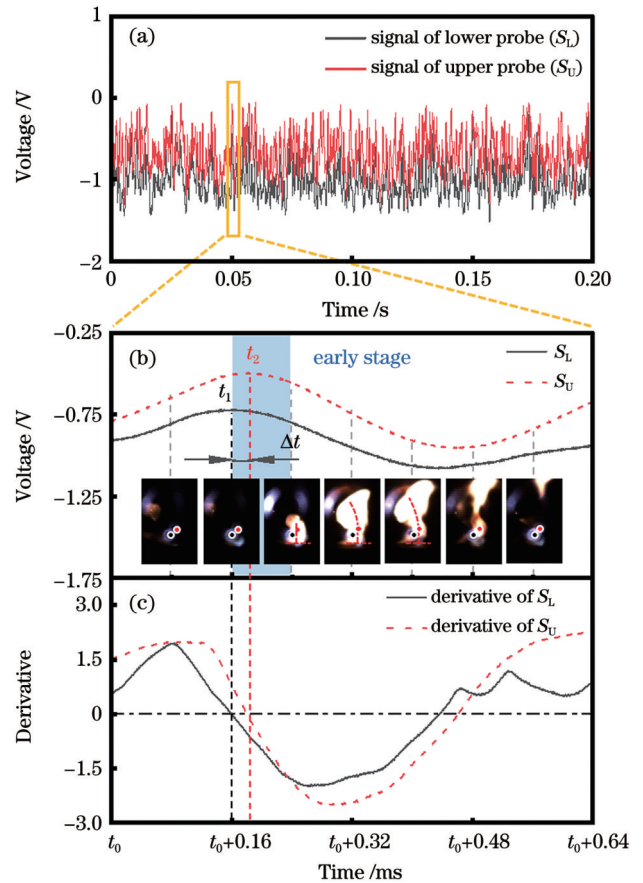


图4 等离子体光电同步信号。(a) 等离子体电信号波形; (b)(c) 一个等离子体喷发周期的电信号波形及其导数波形图

Fig. 4 Photoelectric synchronization signal of the plasma. (a) Electrical signal waveform of the plasma; (b)(c) electrical signal waveform of an plasma erupting period and its derivative waveform

体喷发速度约为 26.67 m/s 。由 $t_0 + 0.24 \text{ ms}$ 时刻的高速摄像可知,从小孔中喷发出来的等离子体垂直向上依次接触下探针和上探针,测量喷发速度的关键是两个探针接触等离子体的时间差。侧吹保护气的冷却作用会降低等离子体羽流接触探针时的温度,但不会影响其接触到探针的时间。随着等离子体喷发过程的进行,在距离工件表面较高的位置,等离子体羽流受侧吹气体的影响而产生较小的倾角,但在其根部附近这种偏转不明显,而喷发速度的测量并不使用这一阶段的数据,故而这一阶段等离子体羽流的形态变化不影响等离子体喷发速度的测量。因此,利用该方法测量到的喷发速度基本上可视为等离子体向上的喷发速度。

从不同热输入下采集到的等离子体电信号波形中,各选取 2 s 稳定焊接过程对应的电信号波形,对每个参数下约 400 个等离子体喷发过程样本进行计算,并绘制如图5所示的喷发速度时域图。可以发现,等离子体喷发速度具有变化范围较大、随机性较强的特征,适合用统计分析的方法研究其分布规律。

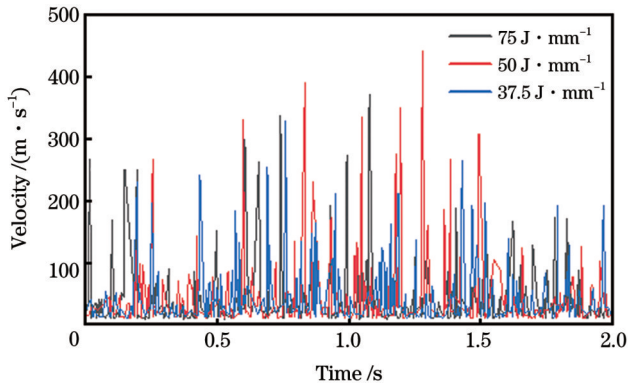


图 5 不同热输入下等离子体喷发速度时域变化

Fig. 5 Variation of plasma erupting velocity with time under different heat input

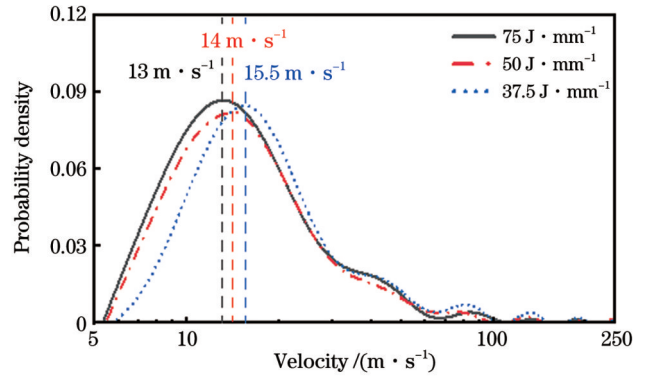


图 6 不同热输入下等离子体喷发速度的概率密度分布

Fig. 6 Probability density distribution of the plasma erupting velocity at different heat inputs

图 6 所示为不同热输入下等离子体喷发速度的概率密度分布。等离子体喷发速度主要分布在 6~70 m/s 范围内,在 75、50、37.5 J/mm 的焊接热输入下,概率最大的等离子体喷发速度分别为 13、14、15.5 m/s,概率最大的等离子体喷发速度随热输入的降低呈增大的趋势。这说明在较大的焊接热输入差距下,等离子体喷发速度分布范围未出现较大变化。

在激光焊接过程中,小孔壁表面主要受阻止小孔扩张的熔池表面张力(P_λ)以及促进小孔扩张的金属蒸气反冲压力(P_{abl})的作用^[17]。小孔壁面所受的总压力

ΔP 可以表示为

$$\Delta P = P_{abl} - P_\lambda \quad (4)$$

图 7 所示为激光焊接过程中熔池小孔形成的原理图。如图 7(b)所示,在 A 点的左侧, $\Delta P < 0$, 此时表面张力占主导地位,小孔无法形成。当激光热输入足够大时,小孔壁所受金属蒸气反冲压力超过表面张力, $\Delta P > 0$, 小孔形成,并自发扩展到平衡点 B, 达到 $\Delta P = 0$ 。因此, A 点为亚稳态平衡点。当小孔扩展到点 B 的右侧时,表面张力再次占主导地位,促使小孔收缩;当小孔收缩到 B 点的左侧时,小孔又开始扩张。小孔将围绕稳态平衡点 B 振荡,进入稳定的焊接过程。

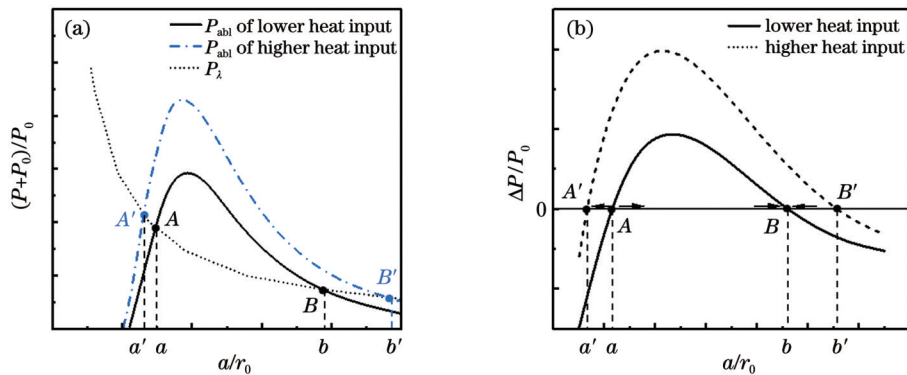


图 7 小孔形成原理图^[17](a: 熔池小孔半径; r_0 : 激光光斑半径; P_0 : 大气压力)。(a) P_{abl} 和 P_λ 随小孔半径变化的曲线; (b) ΔP 随小孔半径变化的曲线

Fig. 7 Principle diagrams of the keyhole formation^[17](a: molten-pool keyhole diameter; r_0 : laser spot radius; P_0 : atmospheric pressure). (a) Variation of P_{abl} and P_λ with the keyhole radius; (b) variation of ΔP with the keyhole radius

随着焊接热输入增加, ΔP 曲线整体上移, 此时稳态平衡点位于 B' 点。如图 7(a) 所示, B' 点对应的金属蒸气反冲压力低于 B 点, 等离子体倾向于以更低的速度喷发到小孔外。由于激光焊接过程中熔池小孔的振荡, 当等离子体喷发时小孔位于 B 点左侧, 小孔壁受到的反冲压力较大, 等离子体倾向于以较大的速度喷发到小孔外; 反之, 等离子体喷发速度会较小。这使得等离子体喷发速度的变化范围比较大, 等离子体喷发速度的波动会导致熔池内出现湍流, 从而可能引起孔隙等焊接缺陷^[13, 18-19]。

4.2 等离子体喷发过程中温度下降程度分析

如图 3 所示, 上探针电信号波形基本位于下探针电信号波形之上, 即上探针周围等离子体的温度一般低于下探针周围等离子体的温度。因此, 在等离子体喷发过程中, 随着等离子体羽流的上升, 其温度下降。由于等离子体喷发过程的随机性, 每个喷发过程的温度下降程度不同。

在一个等离子体羽流喷发过程的中期 ($t_3 \sim t_4$), 等离子体电信号近似线性下降的波段为特征区段。图 8 所示为电信号波形特征点和特征区段的时间差检测示

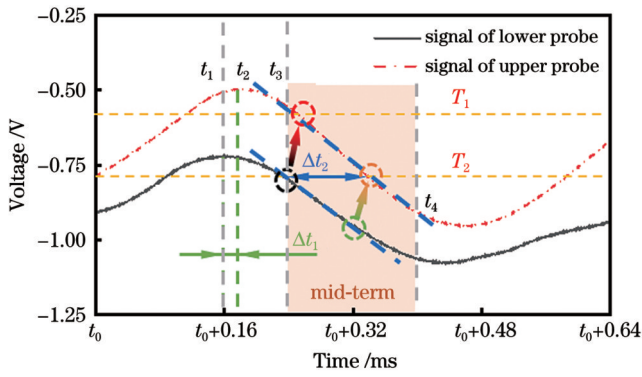


图 8 电信号波形特征区段的时间差检测示意图

Fig. 8 Time difference detection schematic diagram of characteristic bands of electrical signal waves

意图,对该特征区段进行线性拟合,两电信号波形达到相同电压值的时间差 Δt_2 即为两探针感应到相同等离子体温度的时间间隔。

对比图 8 所示电信号特征点和特征区段时间差可知, Δt_2 与 Δt_1 的差值越大,等离子体羽流在经过上探针时温度下降得越大。因此,笔者用 k 值来衡量等离子体羽流在喷发过程中的温度下降程度。 k 值的表达式为

$$k = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\Delta t_2} \quad (5)$$

假设等离子体羽流处于与外界没有热交换的理想状态,等离子体羽流经过两探针时的温度不变。此时, $\Delta t_1 = \Delta t_2$, $k = 0$,即等离子体羽流先后接触两探针的时间间隔等于两探针感应到相同等离子体温度所需的时间。

但在实际情况下,等离子体羽流会与外界发生热量交换、能量交换,等离子体羽流经过上探针时,其温度 T_1 低于经过下探针时的温度 T_2 。上探针需要经历更长的时间感应到温度 T_2 。因此,一般情况下, $0 < k < 1$ 。 k 值越大,等离子体羽流在喷发过程中温度下降的程度越大。不同热输入下 k 值的统计结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出, k 值主要分布在 0.5 以上的范

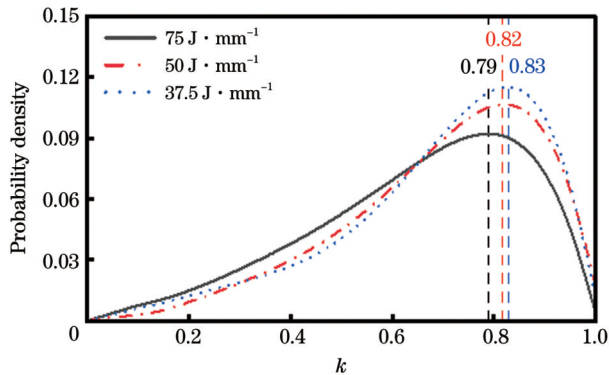


图 9 不同热输入下 k 值的概率密度分布图

Fig. 9 Probability density distribution of k at different heat inputs

围,两探针感应到相同等离子体温度所需时间是等离子体羽流先后接触两探针的时间间隔的两倍以上。图中竖直虚线对应着出现概率最大的 k 值。出现概率最大的 k 值随着焊接热输入的增大而减小,这说明喷发过程中等离子体温度的下降程度随着焊接热输入的增大而趋于减小。

4.3 等离子体喷发后期分析

根据两探针测得的等离子体电信号开始回升的先后顺序,等离子体羽流在喷发后期的热力学行为可分为两种情况:下探针电信号超前回升或滞后回升。图 10 所示为两种情况下的等离子体电信号波形以及等离子体羽流变化。

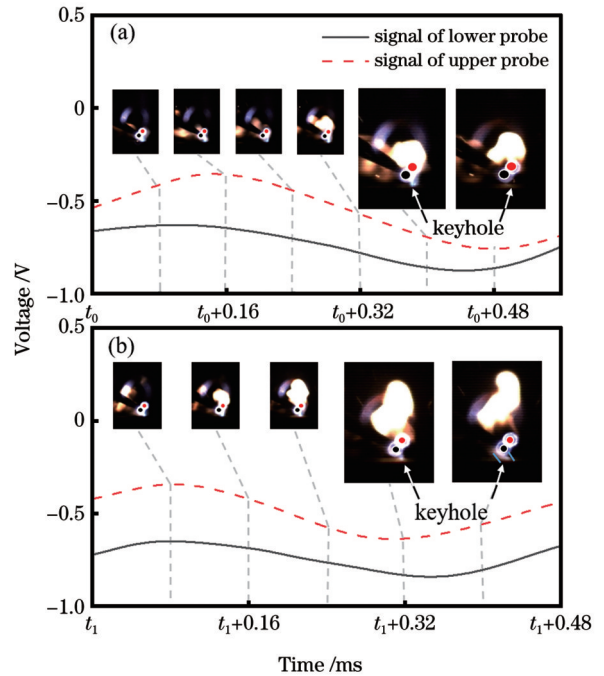


图 10 电信号波形开始回升的先后顺序示意图。(a)下探针超前;(b)下探针滞后

Fig. 10 Schematic diagrams of sequence of the signal start to increase. (a) Lower probe ahead; (b) lower probe behind

如图 10(a)所示,下探针电信号波形先开始回升。在喷发后期,等离子体羽流覆盖了两个探针,随后在上升过程中先后离开两探针,等离子体电信号波形依次回升。喷发后期以等离子体较强烈的喷发行为结束。

如图 10(b)所示,上探针电信号波形先开始回升。在 $t_1 + 0.32$ ms 时刻等离子体羽流离开了上探针,而小孔口外的等离子体羽流只覆盖了下探针。等离子体羽流未充分上升到上探针的高度,推测此时小孔还未闭合。在 $t_1 + 0.4$ ms 时刻,下探针附近的等离子体羽流受保护气的作用发生偏转。因此,在该情况下喷发后期的等离子体喷发较弱。

不同热输入下探针电信号开始回升的超前时长统计结果如图 11 所示,当下探针电信号回升的时刻滞后时,超前时长表示为负值。超前时长主要分布

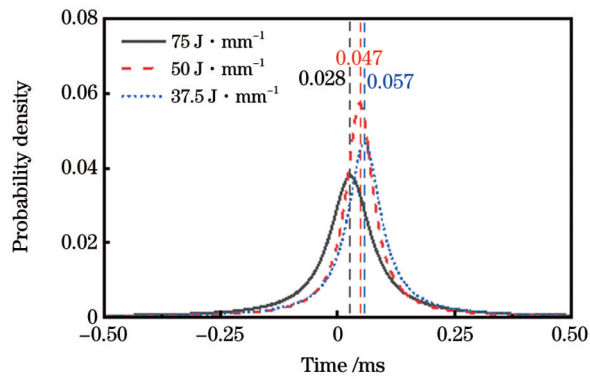


图 11 不同热输入下探针电信号超前时长概率密度分布图
Fig.11 Probability density distribution of the lower probe ahead time at different heat input

在 $-0.125 \sim 0.25$ ms 范围内,显然下探针超前于上探针开始回升的概率更大,说明多数情况下后期等离子体喷发较强烈。图中虚线为不同热输入下发生概率最大的下探针电信号回升的超前时长,其随热输入的增大呈现减小的趋势,但这种趋势不明显。随着热输入增加,熔池小孔半径及熔深增大,熔池小孔较难闭合,这可能是造成后期等离子体喷发较弱的原因。

5 结 论

借助等离子体光电信息同步检测系统开展了钛合金的激光焊接试验,研究了激光焊接过程中等离子体羽流的热力学行为。在激光功率为 1500 W、焊接热输入变化范围为 $37.5 \sim 75$ J/mm 的试验条件下,得出了以下结论:

- 1) 等离子体喷发速度主要分布在 $6 \sim 70$ m/s 范围内;随着焊接热输入增加,最大概率的等离子体喷发速度减小,喷发速度的分布范围无明显变化。
- 2) 等离子体羽流在上升过程中温度不断下降,等离子体羽流温度的下降程度随着焊接热输入的增加呈减小的趋势。
- 3) 在喷发后期,当下探针电信号开始回升的时刻超前于上探针时,等离子体羽流喷发较强烈,反之则喷发较弱。

参 考 文 献

- [1] Wang J, Wang C M, Meng X X, et al. Study on the periodic oscillation of plasma/vapour induced during high power fibre laser penetration welding[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 67-70.
- [2] Beyer E, Bakowsky L, Loosen P, et al. Development and optical absorption properties of a laser induced plasma during CO₂ laser processing[J]. Proceedings of SPIE, 1984, 0455: 75-80.
- [3] Kawahito Y, Matsumoto N, Mizutani M, et al. Characterisation of plasma induced during high power fibre laser welding of stainless steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(8): 744-748.
- [4] Tenner F, Brock C, Klämpfl F, et al. Analysis of the correlation between plasma plume and keyhole behavior in laser metal welding for the modeling of the keyhole geometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 64: 32-41.
- [5] Xiao X F, Song L J, Xiao W J, et al. Space-dependent characterization of laser-induced plasma plume during fiber laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(48): 485203.
- [6] Zhang Y, Li F Z, Liang Z C, et al. Correlation analysis of penetration based on keyhole and plasma plume in laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 256: 1-12.
- [7] Arita T, Sato Y, Kurita Y, et al. *In situ* observation of dynamics of keyhole and molten pool in laser welding for development of spatter suppression[J]. Journal of Laser Applications, 2022, 34(3): 032017.
- [8] 李妍坤, 邹江林, 牛建强, 等. 不锈钢 CO₂ 激光焊接等离子体行为特性实验研究[J]. 应用激光, 2012, 32(3): 180-183.
- [9] Li Y K, Zou J L, Niu J Q, et al. Experimental study on plasma characteristics in CO₂ laser welding of stainless steel[J]. Applied Laser, 2012, 32(3): 180-183.
- [10] Huang Y, Shen C, Ji X R, et al. Correlation between gas-dynamic behaviour of a vapour plume and oscillation of keyhole size during laser welding of 5083 Al-alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 283: 116721.
- [11] Pang S Y, Chen X, Shao X Y, et al. Dynamics of vapor plume in transient keyhole during laser welding of stainless steel: local evaporation, plume swing and gas entrapment into porosity[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 82: 28-40.
- [12] Zhao S B, Yang L J, Liu T, et al. Analysis of plasma oscillations by electrical detection in Nd: YAG laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 479-489.
- [13] Bi C, Yang L J, Xu W H, et al. An electrical detection of the fluctuating plasma of laser welding with a passive probe[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(38): 385202.
- [14] Zhao S B, Yang L J, Huang Y M, et al. A study on welding mode transition by electrical detection of laser-induced plasma at varying energy levels[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(1/2/3/4): 893-906.
- [15] 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.
- [16] Boyer R R, Gerhard W, Collings E W. Materials properties handbook: titanium alloys[M]. Materials Park: ASM International, 1994.
- [17] 应业勇. TC4 钛合金激光焊接变形与光致等离子体的行为研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016: 49-53.
- [18] Ying Y Y. Study on laser welding deformation and induced plasma behavior of TC4 titanium alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2016: 49-53.
- [19] Kroos J, Gratzke U, Simon G. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(3): 474-480.
- [20] Matsunawa A, Kim J D, Seto N, et al. Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(6): 247-254.
- [21] Kroos J. Stabilität und dynamik der dampfkapillare beim laserstrahlschweißen von metallen[D]. Braunschweig: Universität Bremen, 1993: 62-66.

Plasma Plume Thermodynamic Behavior During Laser Deep-Penetration Welding of TC4 Titanium Alloy

Jia Chenpeng¹, Huang Yiming^{2*}, Zhao Shengbin¹, Yuan Jiong¹, Zhang Feng¹, Yang Lijun^{1**}

¹*School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;*

²*Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China*

Abstract

Objective In the laser deep-penetration welding process, a high-energy-density laser produces intense melting and evaporation on the metal surface, generating a keyhole inside the molten pool. The keyhole gives rise to a plasma plume, composed of metallic vapor and plasma, induced by the evaporation and ionization of the molten metal. Previous studies generally believed that the plasma plume eruption process is periodic; however, elements of randomness are also present, specifically reflected in the random plasma eruption period and the difference in plasma plume eruption intensity. However, systematic research on the thermodynamic behavior of plasma plumes is still lacking. Therefore, it is of great significance to further study mass and energy transfer in laser welding by measuring the basic thermodynamic data of the plasma plume and analyzing its distribution.

Methods In this study, a TC4 titanium alloy was used to study the thermodynamic behavior of a plasma plume in laser deep-penetration welding. A titanium alloy plate with a thickness of 3 mm was welded using an Nd:YAG laser. During the welding process, a plasma photoelectric signal synchronous detection system with a passive dual-probe device was used to obtain the photoelectric information of the plasma plumes under different welding heat inputs. The thermodynamic parameters, including the eruption velocity and temperature of the plasma plume, were measured to study the thermodynamic behavioral characteristics of the plasma plume.

Results and Discussions The plasma plume expanded and contracted frequently during laser welding. In this study, the plasma eruption velocity and spatiotemporal distribution characteristics of the plasma plume temperature were studied by analyzing the characteristics of electrical signals in the plasma eruption process. Under the welding heat inputs of 75 J/mm, 50 J/mm, and 37.5 J/mm, the maximum probability plasma erupting velocity was 13 m/s, 14 m/s, and 15.5 m/s, respectively (Fig. 6). In the eruption process, the decrease degree of the plasma plume temperature (k) was primarily distributed in the range of above 0.5 (Fig. 9). The time interval for the two probes to sense the same plasma temperature exceeded twice the time it took for the plasma plume to make contact with both probes. Moreover, the maximum probability value of k decreased with an increase in welding heat input. In the late eruption period, the sequence of the two electrical signals that began to rise was closely related to the plasma eruption intensity (Fig. 10).

Conclusions In this study, laser welding experiments on titanium alloys were conducted using a plasma photoelectric signal synchronous detection system, and the thermodynamic behavior of the plasma plume during laser welding was analyzed. Under the experimental parameter of 1500 W laser power and a welding heat input range of 37.5–75 J/mm, the main findings of this study are as follows.

- 1) The plasma eruption velocity was mainly distributed in the range of 6–70 m/s. With an increase in the welding heat input, the maximum probability of the plasma eruption velocity tended to decrease, and there was no evident change in the distribution range.
- 2) The temperature of the plasma plume decreased with an increase in the plasma plume size, and the decrease in the plasma plume temperature tended to decrease with an increase in the welding heat input.
- 3) In the later stages of the plasma eruption process, when the electrical signal of the lower probe began to rise earlier than that of the upper probe, the plasma plume eruption was stronger; otherwise, the plasma eruption was weaker.

Key words laser technique; laser welding; titanium alloy; laser-induced plasma; plasma erupting velocity; keyhole oscillation