

## TC4 钛合金激光焊接等离子体电信号熔透特征研究

李旺<sup>1</sup>, 杨立军<sup>2\*</sup>, 黄一鸣<sup>1\*\*</sup>, 田云付<sup>1</sup>, 贾晨鹏<sup>1</sup><sup>1</sup>天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350;<sup>2</sup>天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350

**摘要** 利用等离子体光电信号同步采集系统,对钛合金激光焊接熔透焊缝与未熔透焊缝在等离子体特征振荡频率上的差异展开了对比研究。结果表明:对于熔透焊缝与未熔透焊缝,等离子体电信号的特征振荡频率存在明显差异。相比熔透焊缝,在焊接初始阶段,未熔透焊缝的等离子体电信号的特征振荡频率较高,并且特征振荡频率随热输入变化的速度也有明显差异。在相对稳定阶段,未熔透焊缝的等离子体电信号的特征振荡频率的波动范围较小,相对稳定,而此时熔透焊缝的等离子体电信号的特征振荡频率的波动范围较大,稳定性相对较差,特征振荡有明显的不确定性。

**关键词** 激光技术;激光焊接;钛合金;等离子体;电信号;熔透状态

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.2202018

## 1 引言

激光焊接是 20 世纪出现的一种新型焊接方法,它以高能激光束作为焊接热源,具有能量密集、灵活高效等优点,在金属材料加工领域中得到广泛应用,是实现高端智能制造的重要途径<sup>[1]</sup>。等离子体的产生作为激光深熔焊接过程中的重要物理现象,包含了激光焊接过程的大量信息。研究等离子体的行为特征,对于深入了解激光焊接,进而实现激光焊接过程的质量监测具有重要意义<sup>[2]</sup>。

常用的研究激光焊接过程中的等离子体的手段有声信号检测与光信号检测等<sup>[3-11]</sup>,近些年有关等离子体电信号检测的研究也取得了一定进展<sup>[12-17]</sup>。等离子体电信号的检测基于等离子体鞘层理论,主要通过无源探针与等离子体接触的方法来采集电信号。该检测方法可以实现激光焊接过程的实时检测,并且采集到的等离子体电信号具有质量可靠、受环境因素干扰较小等优点。蔡颂等<sup>[12]</sup>利用无源探针检测计算了低碳钢激光焊接过程中的等离子体温度,其结果与光谱信号计算结果基本吻合,论证了利用无源探针来研究激光焊接等离子体的可行性。Zhao 等<sup>[13]</sup>研究了等离子体电信号的特征振荡频率与激光功率和焊接速度的关系。许赛等<sup>[14]</sup>在此基础上,研究了等离子体电信号的特征振荡频率与焊缝熔深的关系,并给出了二者之间的拟合公式,具有较好的预测效果。随着等离子体电信

号研究的不断深入,不同焊缝成形下的电信号特征正逐渐成为激光焊接过程监控的重要参数。相较于不锈钢和低碳钢,钛合金激光焊接过程中的等离子体喷发更加强烈,信号特征也更加明显。因此本文采用 TC4 钛合金作为试验材料,对钛合金激光焊接过程中熔透焊缝与未熔透焊缝的等离子体电信号特征展开了研究。

## 2 理论基础与试验方法

## 2.1 等离子体信号的采集装置

本试验所用的激光焊接等离子体光电信号同步采集系统如图 1 所示,等离子体电信号的采集原理如图 2 所示。

试验采用的激光器为 Nd:YAG 激光器,额定功率为 2 kW,可输出波长为 1064 nm 的激光,聚焦透镜的焦距为 160 mm,光斑直径为 0.6 mm。采用数据采集卡采集电信号的数据,采集频率为 100 kHz。采用的高速摄像机的拍摄频率为 2000 frame/s,拍摄方向与实际焊接方向垂直。

本试验中所使用的板材为 TC4 钛合金,其尺寸为 100 mm×50 mm×2 mm。正、背面均采用氩气保护,正面保护气流量为 20 L/min,背面保护气流量为 10 L/min,无源探针距离板面 2 mm。通过参数优化,将激光功率固定为 1300 W,焊接速度为 20~30 mm/s,焊接速度变化步长为 2 mm/s,对应的热输入分别为 43.33,46.43,50.00,54.17,59.10,65.00 J/mm。

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-03-14; 录用日期: 2022-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(51875403)

通信作者: \*tdyljabc@163.com; \*\*ymhuang26@tju.edu.cn

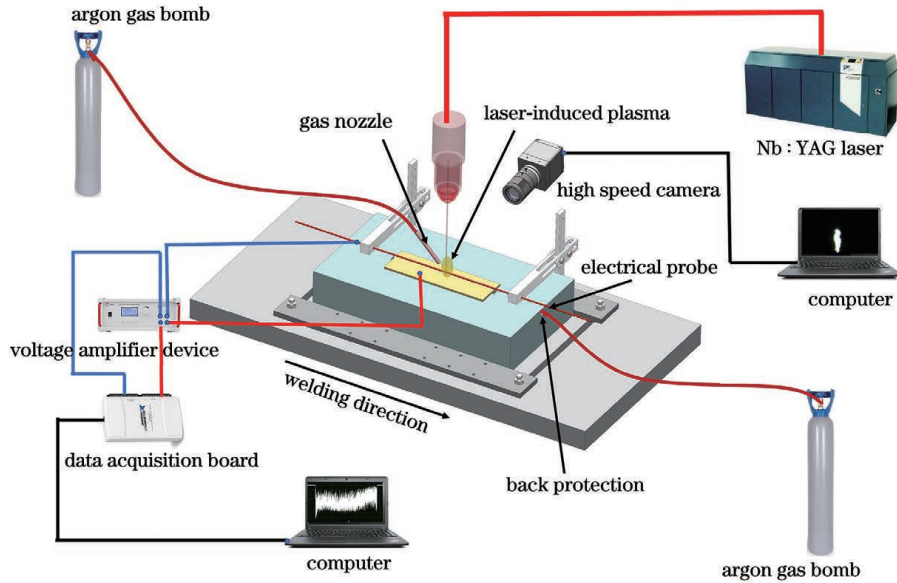


图 1 试验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental equipment

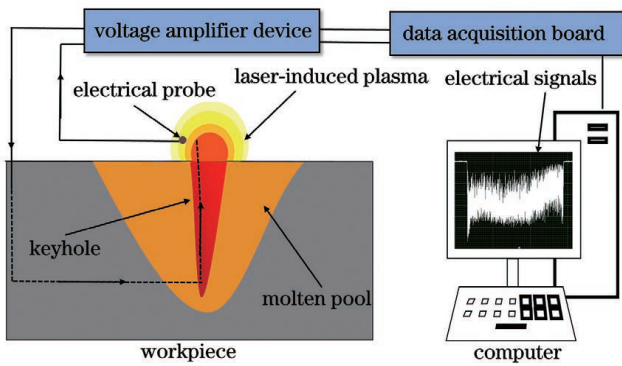


图 2 电信号采集原理图

Fig. 2 Schematic of electrical signal acquisition

### 2.2 等离子体电信号的检测原理

等离子体电信号检测的理论基础是等离子体鞘层效应。等离子体鞘层理论<sup>[15]</sup>指出:将一个相对于等离子体来说很“冷”的金属导体浸入到等离子体内部,由于等离子体内部自由电子的运动速度远大于正离子的运动速度,因此导体表面会聚集大量的自由电子,导体表面整体呈负电位,导体表面周围的电场会降低等离子体中自由电子的运动速度,同时提高正离子的运动速度。当电子流密度与正离子流密度达到动态平衡时,导体表面的电位不再发生变化,这样就形成了具有一定厚度的等离子体“鞘”层,此时导体表面的负电位被称作鞘层电压。根据 Zhao 等<sup>[16]</sup>的研究,在实际激光焊接过程中,不仅孔外等离子体和无源探针之间存在等离子体鞘层效应,孔内等离子体和熔池或小孔壁之间同样也存在等离子体鞘层效应。Zhao 等<sup>[16]</sup>综合考虑这两种等离子体鞘层效应,提出了无源探针测得的压降  $E_w$  的表达式:

$$E_w = -\frac{k(T_e - T_B)}{2e} \ln\left(\frac{m_i}{4\pi m_e}\right), \quad (1)$$

式中: $k$  为玻尔兹曼常数; $e$  为电子常量; $T_e$  为无源探针位置处的等离子体温度; $T_B$  为小孔壁或熔池内熔化层的表面温度; $m_i$  为离子质量; $m_e$  为电子质量。利用式(1)可以将等离子体的温度特征转化为电压信号,这为使用电信号检测方法研究等离子体行为奠定了理论基础。电信号产生波动的直接原因是等离子体温度的变化,本质上是小孔内外等离子体行为引起的。前期研究不锈钢等材料的激光深熔焊等离子体行为时发现<sup>[14]</sup>,等离子体行为与电信号的波动具有良好的对应性。本文在钛合金激光焊的研究中也发现了类似特征,如图 3 所示。当小孔中的等离子体/金属蒸气向外

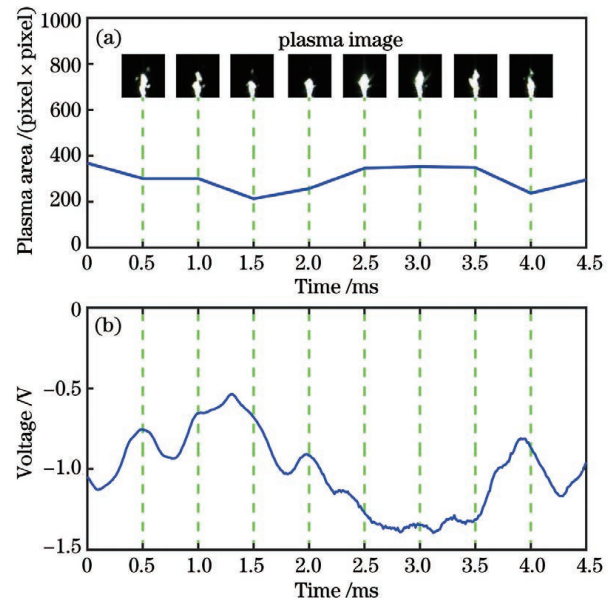


图 3 TC4 钛合金激光焊中的光电同步信号。(a) 等离子体图像及其面积;(b) 电信号

Fig. 3 Photoelectric synchronization signals in laser welding of TC4 titanium alloy. (a) Plasma images and area; (b) electrical signal

喷发时,高速摄像拍摄的等离子体面积增大,采集到的等离子体电信号  $E_w$  的绝对值也增大;当等离子体/金属蒸气收缩时,等离子体电信号  $E_w$  的绝对值也随之减小。钛合金激光焊接等离子体电信号与等离子体行为之间良好的对应关系意味着可以通过等离子体电信号检测来研究钛合金激光焊接过程中等离子体的热力学行为。根据图 3 中测得的等离子体电信号大小,结合式(1)可推算出无源探针位置处的等离子体温度最高可达 7200 K。

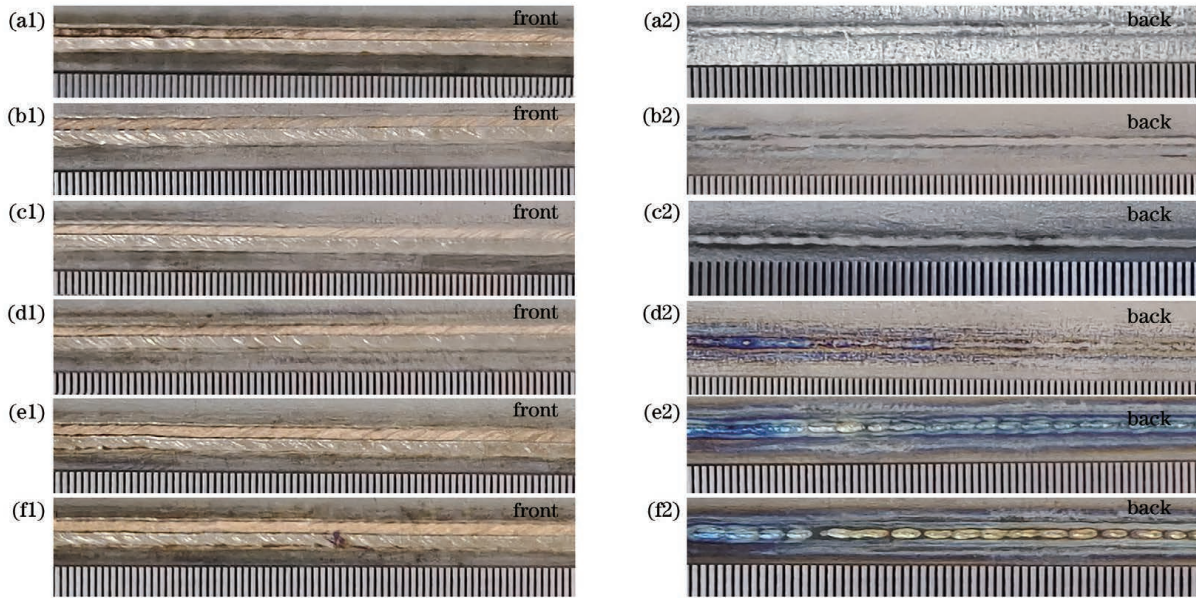


图 4 不同热输入条件下的焊缝正面和背面形貌。(a1)(a2)43.33 J/mm;(b1)(b2)46.43 J/mm;(c1)(c2)50.00 J/mm;(d1)(d2)54.17 J/mm;(e1)(e2)59.10 J/mm;(f1)(f2)65.00 J/mm

Fig. 4 Front and back morphologies of welds under different heat input conditions. (a1)(a2) 43.33 J/mm; (b1)(b2) 46.43 J/mm; (c1)(c2) 50.00 J/mm; (d1)(d2) 54.17 J/mm; (e1)(e2) 59.10 J/mm; (f1)(f2) 65.00 J/mm

表 1 焊缝尺寸  
Table 1 Weld size

Heat input /(J/mm)	43.33	46.43	50.00	54.17	59.10	65.00
Front width /mm	1.807	1.870	1.910	1.940	2.020	2.105
Back width /mm	0	0	0	0.324	0.460	0.556
Depth /mm	1.775	1.920	1.984	2.000	2.000	2.000

在一次完整的激光深熔焊过程中,激光小孔会在焊接开始后不断扩张,经过一段时间后会达到相对稳定的状态。通过观察图 5、6 中焊缝纵截面的熔深变化并结合等离子体电信号的变化情况,综合分析得到小孔到达相对稳定状态所需的时间一般在 0.2 s 以内。

焊接开始后不同时刻的等离子体电信号的局部放大图如图 5、6 中插图所示,S1 为小孔正在处于扩张阶段内的等离子体电信号,S2 为小孔扩张阶段结束附近的等离子体电信号,S3 为小孔扩张阶段结束后约 0.9 s 处的等离子体电信号。可以看出,熔透焊缝与未熔透焊缝的等离子体电信号的振荡特征存在明显差

### 3 试验结果及分析讨论

#### 3.1 试验结果

本实验中不同热输入条件下典型的焊缝正背面形貌如图 4 所示,典型的等离子体电信号如图 5、6 所示。当热输入为 43.33~50.00 J/mm 时,焊缝均为未熔透焊缝,对应的等离子体电信号及焊缝横、纵截面形貌如图 5(a)、(b)、(c)所示。当热输入为 54.17~65.00 J/mm 时,焊缝均为熔透焊缝,对应的等离子体电信号及焊缝横、纵截面形貌如图 5(d)和图 6 所示。焊缝横截面具体尺寸如表 1 所示。

异。为了深入研究熔透焊缝与未熔透焊缝的等离子体电信号在整个焊接过程中的振荡频率的变化,对等离子体电信号进行分段研究。虽然小孔扩张时间或电信号达到稳定振荡的时间因焊接热输入的不同而有所差异,但从过程监控的角度考虑,仍然需要采用统一的时间尺度对焊缝不同熔透情况下的电信号进行分段处理。本试验设置每段电信号时长为 0.25 s,先采用最小二乘拟合法消除每段信号的趋势项对振荡频率的干扰,然后采用自相关分析法估算该段时间内等离子体电信号的特征振荡频率。

自相关分析法是求取随机信号振荡周期的常用方

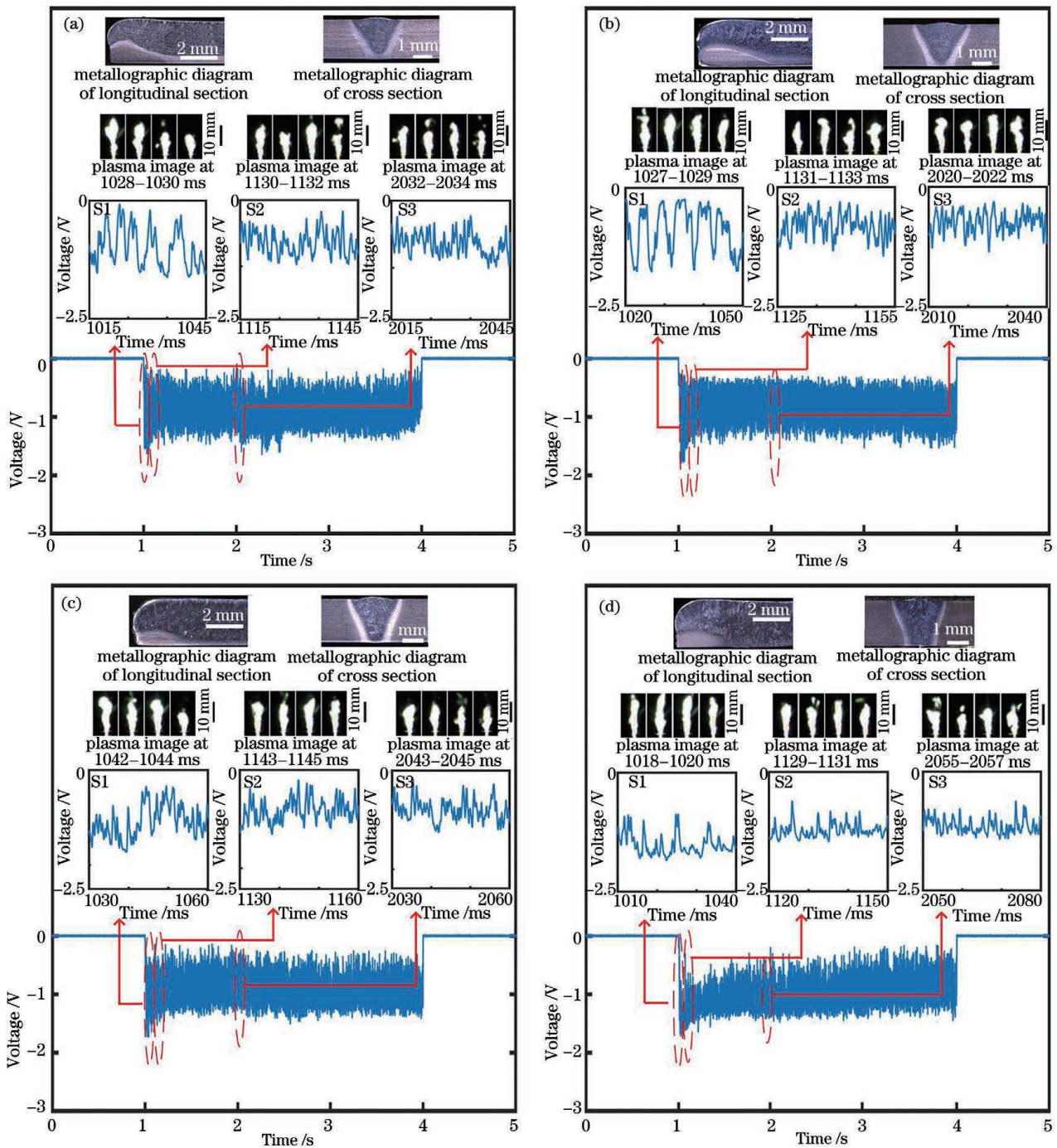


图 5 热输入小于 59.10 J/mm 时的典型等离子体电信号。(a)43.33 J/mm;(b)46.43 J/mm;(c)50.00 J/mm;(d)54.17 J/mm  
 Fig. 5 Typical plasma electrical signals when heat input is less than 59.10 J/mm. (a) 43.33 J/mm; (b) 46.43 J/mm; (c) 50.00 J/mm; (d)54.17 J/mm

法,在等离子体电信号研究方面具有很强的适用性。已知一段随机信号  $y(t)$ ,其平均值为  $\sigma$ ,则随机信号  $y(t)$  归一化的自相关函数  $R(\tau)$  与时滞  $\tau$  的关系为

$$R(\tau) = \frac{\sum_t \{ [y(t - \tau) - \sigma][y(t) - \sigma] \}}{\sum_t [y(t) - \sigma]^2}, \quad (2)$$

式中:  $t$  为时间。

以时滞  $\tau$  为自变量,  $R(\tau)$  为因变量,可以得到自相关函数  $R(\tau)$  关于时滞  $\tau$  的变化曲线。将变化曲线的第一个极大值点所对应的时滞  $\tau$  定义为  $\tau_m$ 。根据

自相关函数理论,时滞  $\tau_m$  即为随机信号  $y(t)$  的特征振荡周期,据此进而可以得到随机信号  $y(t)$  的特征振荡频率。本试验分段计算的等离子体电信号的特征振荡频率如表 2、3 所示。

根据前文分析,  $0 \sim 0.25$  s 范围内的等离子体电信号对应小孔的扩张阶段,  $0.25$  s 以后的电信号则对应小孔的稳定振荡阶段。将  $0 \sim 0.25$  s 部分定义为等离子体电信号的初始阶段,将  $0.25$  s 以后的部分定义为等离子体电信号的相对稳定阶段,分阶段对电信号特征展开研究。

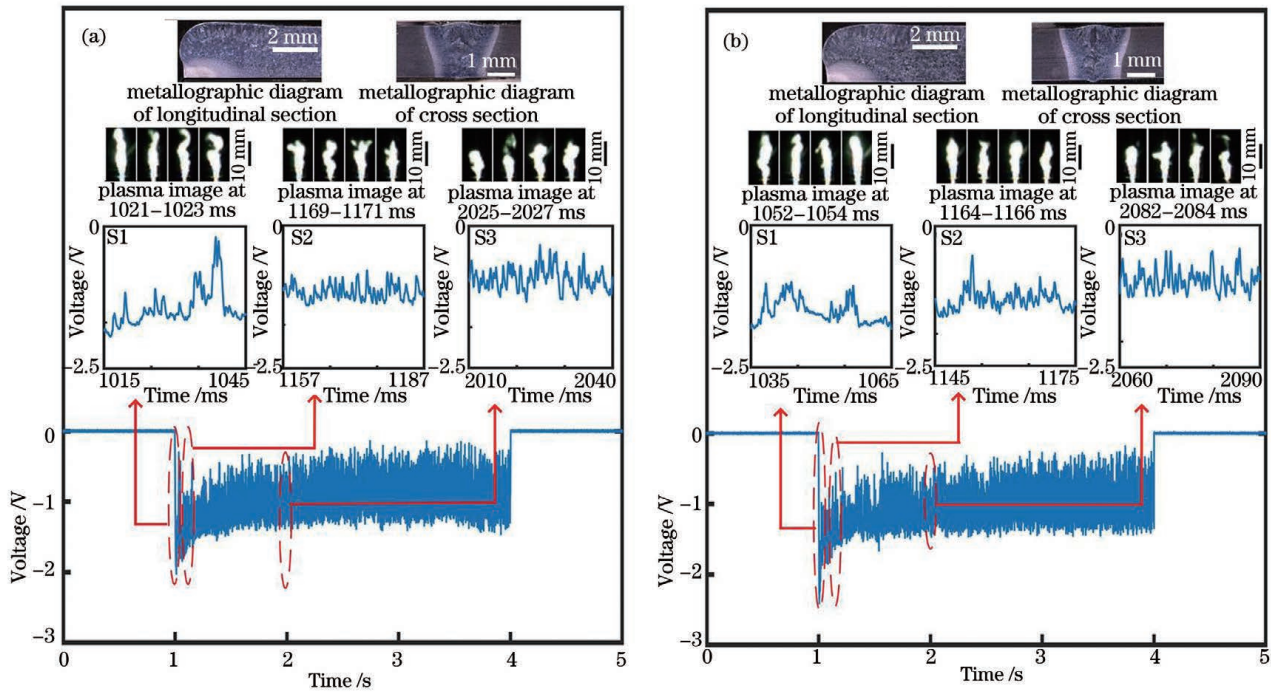


图 6 热输入不小于 59.10 J/mm 时的典型等离子体电信号。(a) 59.10 J/mm; (b) 65.00 J/mm

Fig. 6 Typical plasma electrical signals when heat input is not less than 59.10 J/mm. (a) 59.10 J/mm; (b) 65.00 J/mm

表 2 0~1.5 s 范围内的等离子体电信号的特征振荡频率

Table 2 Characteristic oscillation frequencies of plasma electrical signal in range of 0-1.5 s

Heat input / (J/mm)	0-0.25 s	0.25-0.50 s	0.50-0.75 s	0.75-1.00 s	1.00-1.25 s	1.25-1.50 s
43.33	669 Hz	1280 Hz	1389 Hz	1408 Hz	1220 Hz	1449 Hz
46.43	594 Hz	1222 Hz	1370 Hz	1205 Hz	1235 Hz	1324 Hz
50.00	523 Hz	1142 Hz	1205 Hz	1176 Hz	1250 Hz	1136 Hz
54.17	347 Hz	971 Hz	1046 Hz	924 Hz	995 Hz	1096 Hz
59.10	304 Hz	904 Hz	996 Hz	1004 Hz	566 Hz	938 Hz
65.00	241 Hz	820 Hz	1024 Hz	911 Hz	741 Hz	989 Hz

表 3 1.5~3.0 s 范围内的等离子体电信号的特征振荡频率

Table 3 Characteristic oscillation frequencies of plasma electrical signal in range of 1.5-3.0 s

Heat input / (J/mm)	1.50-1.75 s	1.75-2.00 s	2.00-2.25 s	2.25-2.50 s	2.50-2.75 s	2.75-3.00 s
43.33	1370 Hz	1471 Hz	1236 Hz	1220 Hz	1359 Hz	1235 Hz
46.43	1250 Hz	1282 Hz	1078 Hz	1126 Hz	1316 Hz	1210 Hz
50.00	1235 Hz	1301 Hz	1168 Hz	1154 Hz	1316 Hz	1190 Hz
54.17	590 Hz	962 Hz	1018 Hz	969 Hz	1016 Hz	1005 Hz
59.10	1082 Hz	945 Hz	571 Hz	1220 Hz	585 Hz	1034 Hz
65.00	1007 Hz	592 Hz	560 Hz	1034 Hz	963 Hz	1078 Hz

结合表 2、3 和图 7 可以看出, 等离子体电信号在初始阶段的特征振荡频率比较低, 并且焊接热输入越高, 特征振荡频率越低。当焊接热输入小于 50.00 J/mm 时, 焊缝未熔透, 焊缝在初始阶段的等离子体电信号的特征振荡频率均高于 523 Hz, 并且每增加单位热输入, 特征振荡频率约降低 22 Hz; 当焊接热输入为

54.17 J/mm 时, 焊缝达到刚好熔透的状态, 等离子体电信号的特征振荡频率为 347 Hz, 相当于从未熔透到熔透, 每增加单位热输入, 特征振荡频率约降低 42 Hz; 此后焊接热输入继续增加, 焊缝均熔透, 等离子体电信号的特征振荡频率继续下降, 每增加单位热输入, 特征振荡频率约降低 10 Hz。这种特征振荡频

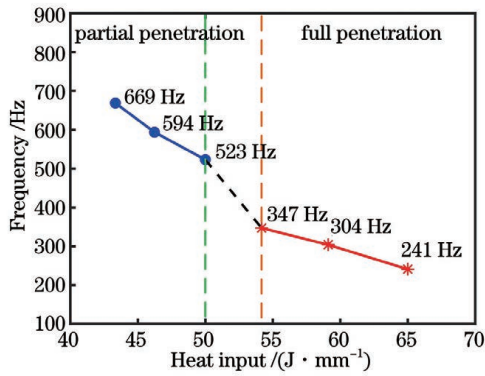


图 7 不同热输入下等离子体电信号在初始阶段的特征振荡频率

Fig. 7 Characteristic oscillation frequencies of electrical signals at initial stage under different heat inputs

率及其变化速度的差异可以作为判断焊缝是否熔透的重要依据。

在焊接开始 0.25 s 以后,未熔透焊缝与熔透焊缝的等离子体电信号均进入了相对稳定阶段。以时间为横轴,以特征振荡频率为纵轴,可以得到等离子体电信号的特征振荡频率随时间的演化过程,如图 8

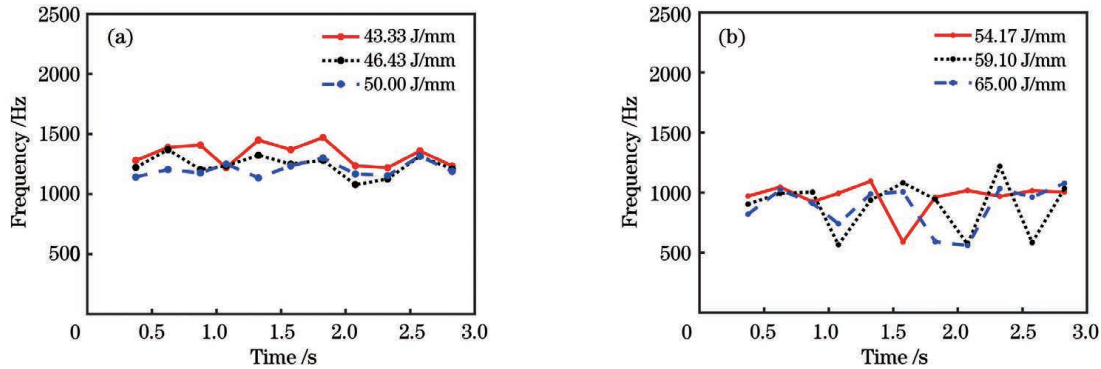


图 8 相对稳定阶段内等离子体电信号的振荡频率变化过程。(a)未熔透焊缝;(b)熔透焊缝

Fig. 8 Oscillation frequency change process of plasma electric signals in relatively stable stage. (a) Partial penetration weld;

(b) full penetration weld

### 3.2 等离子体的振荡机理分析

根据前面的分析和计算,发现了等离子体电信号特征振荡频率的两个特征:一是在初始阶段,等离子体电信号的特征振荡频率比较低,并且焊接热输入越高,特征振荡频率越低;二是在相对稳定阶段,熔透焊缝的等离子体电信号的特征振荡频率波动范围明显大于未熔透焊缝。

首先进行小孔受力的分析。小孔在出现以后,在金属蒸气的反冲压力、表面张力、流体动压力等的作用下逐渐扩张,扩张到一定直径后,小孔受力状态达到平衡,扩张过程结束。前期的研究<sup>[14]</sup>指出,只要小孔形貌或者小孔尺寸发生变化,小孔内部就会偏离平衡受力状态,小孔在非平衡受力状态下会产生不同模态的振荡。这些不同模态的振荡也必然会影响到等离子体由小孔内部向小孔外部的喷发,导致等离子体的喷发也具有本征振荡的特征。

所示。

当焊缝为未熔透焊缝时,相对稳定阶段内等离子体电信号的特征振荡频率如图 8(a)所示。等离子体电信号的特征振荡频率在 1100~1500 Hz 之间波动。在某一热输入条件下,等离子体电信号的特征振荡频率的波动区间约为 200 Hz,偏离量为平均值的 7%~9%,振荡相对稳定。

当焊缝为熔透焊缝时,相对稳定阶段内等离子体电信号的特征振荡频率如图 8(b)所示。三种热输入条件下等离子体电信号的特征振荡频率依次是 590~1096 Hz、566~1220 Hz、560~1078 Hz,频率变化范围均超过了 500 Hz,最大偏离量为平均值的 40%,较低振荡频率的出现具有一定的随机性和不确定性。与未熔透焊缝相比,熔透焊缝的等离子体电信号的特征振荡频率的变化范围明显较大,这说明熔透焊缝的等离子体振荡过程更加不稳定。等离子体电信号较大范围的频率波动是熔透焊缝区别于未熔透焊缝的另一个重要特征,即使在热输入 [54.17 J/mm(熔透)和 50.00 J/mm(未熔透)]较为接近的条件下,该特征仍旧存在。

根据 Kroos 等<sup>[18]</sup>的研究,小孔主要受金属蒸气反冲压力  $P_{abl}$  和表面张力  $P_\gamma$  的影响。Klein 等<sup>[19]</sup>在此研究基础上又考虑了金属蒸气流动带来的流体动压力  $P_g$  的影响,小孔在稳定状态下满足压力偏移量  $\Delta P = 0$ 。 $\Delta P$  表达式为

$$\Delta P = P_{abl} + P_g - P_\gamma, \quad (3)$$

式中:  $P_{abl} = mn_g u_g^2$ , 其中  $m$  为气体的原子质量,  $n_g$  为 Knudsen 层的表层粒子密度,  $u_g$  为 Knudsen 层的表层粒子运动速度;  $P_g = d^2 P_{abl} / (3R^2)$ ,  $d$  为小孔深度,  $R$  为小孔半径;  $P_\gamma = \gamma / R$ ,  $\gamma$  为材料的表面张力系数。通过求解不同小孔半径下的  $\Delta P$ , 绘制出激光焊接过程中压力偏移量  $\Delta P$  随小孔半径  $R$  的变化曲线,如图 9 所示,其中  $P_0$  为大气压力,  $r_0$  为激光束半径。

从图 9 可以发现,不同热输入条件下压力偏移量  $\Delta P$  随小孔半径  $R$  的变化过程类似,下面以低热输入为例展开分析。

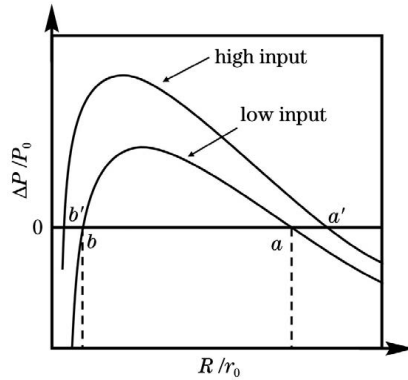


图9 压力偏移量随小孔半径的变化

Fig. 9 Pressure offset versus keyhole radius

$b$  点之前为小孔出现前的熔化阶段。该阶段内阻碍小孔长大的表面张力占优势,  $\Delta P$  始终小于 0, 小孔未能出现。此后, 在激光的持续作用下, 金属蒸气反冲压力和流体动压力持续增大。

在  $b$  点, 小孔开始出现, 等离子体从小孔内部向外喷发。该点  $\Delta P$  等于 0, 小孔长大的驱动力和阻力首次达到平衡, 但小孔在  $b$  点并不能保持真正的稳定状态。这是因为一旦小孔由于瞬态波动而偏离到  $b$  点左侧时, 表面张力占优势, 这会促使小孔消失; 当偏离到  $b$  点右侧时, 金属蒸气反冲压力和流体动压力占优势, 这会促使小孔继续长大。

$b \sim a$  点区间对应小孔扩张阶段。虽然该阶段存在小孔随机闭合行为所导致的瞬态振荡, 但由于  $\Delta P$  大于 0, 促进小孔扩张的力始终占据优势, 小孔更倾向于扩张, 从而振荡受到抑制, 特征振荡频率很低。相较于未熔透焊缝, 熔透焊缝的焊接热输入更大,  $\Delta P$  也更大, 抑制作用也就更强, 小孔振荡和等离子体振荡的频率也相对更低。

在  $a$  点, 小孔达到平衡状态。 $a$  点是小孔真正的受力平衡点, 当小孔由于瞬态波动而偏离  $a$  点时, 其瞬时受到的力会促使小孔向  $a$  点回归。即当小孔由于瞬态波动而偏离到  $a$  点左侧时, 金属蒸气反冲压力和流体动压力占优势, 这会促使小孔扩张至  $a$  点; 当偏离到  $a$  点右侧时, 表面张力占优势, 这会促使小孔缩小至  $a$  点, 所以小孔处于该位置时喷发的等离子体电信号始终以相对稳定的状态振荡。若此时熔透焊缝的小孔贯穿板材, 其小孔底部所受约束比未熔透焊缝弱, 这意味着熔透焊缝更容易发生距离  $a$  点较远的偏离, 因此熔透焊缝等离子体电信号的特征振荡频率会有更大的波动范围。同时, 熔透焊缝的等离子体还有可能会向板材背面喷出, 该种喷发模式会干扰到小孔的振荡过程, 增加了小孔振荡的不确定性, 进而等离子体电信号的振荡也表现出较大的不确定性。

## 4 结 论

借助等离子体光电信号检测手段开展了钛合金激光焊接试验, 分析研究了 TC4 钛合金激光焊接时等离

子体电信号在熔透焊缝和未熔透焊缝条件下的特征振荡频率, 得出了以下结论:

1) 未熔透焊缝在初始阶段内的等离子体电信号的特征振荡频率远高于熔透焊缝, 且特征振荡频率的变化速度也高于熔透焊缝(约为熔透情况下的 2 倍), 这些差异是熔透焊缝区别于未熔透焊缝的重要特征。

2) 在相对稳定阶段, 未熔透焊缝的等离子体电信号的特征振荡频率的波动范围较小, 偏离量为平均值的 7%~9%; 而熔透情况下特征振荡频率出现较大波动, 最大偏离量为平均值的 40%。这是熔透焊缝区别于未熔透焊缝的另一个重要特征。

## 参 考 文 献

- [1] 邹琼琼, 龚红英, 黄继龙, 等. 激光焊接技术的研究现状及发展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(21): 20-23.  
Zou Q Q, Gong H Y, Huang J L, et al. Research status and development of laser welding technology [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(21): 20-23.
- [2] 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.
- [3] Konuk A R, Aarts R G K M, Veld A J H I, et al. Process control of stainless steel laser welding using an optical spectroscopic sensor[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 744-751.
- [4] Yusof M F M, Ishak M, Ghazali M F. Feasibility of using acoustic method in monitoring the penetration status during the Pulse Mode Laser Welding process[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 238(1): 012006.
- [5] Yusof M F M, Ishak M, Ghazali M F. Classification of weld penetration condition through synchrosqueezed-wavelet analysis of sound signal acquired from pulse mode laser welding process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 279: 116559.
- [6] 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.
- [7] 韩雪, 赵宇, 邹江林, 等. 基于可视化观察的光纤激光深熔焊接羽辉形成原因分析[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0602004.  
Han X, Zhao Y, Zou J L, et al. Analysis of plume formation reasons in laser deep penetration welding based on visual observation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0602004.
- [8] Sibillano T, Ancona A, Berardi V, et al. Optical detection of conduction/keyhole mode transition in laser welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(1/2/3): 364-367.
- [9] 芦伟, 马旭颐, 段爱琴, 等. BTi6431S 钛合金光纤激光焊接成形及稳定性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131405.  
Lu W, Ma X Y, Duan A Q, et al. Weld formation and stability analysis of fiber laser beam welded BTi6431S titanium alloy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131405.
- [10] Zhang Y X, You D Y, Gao X D, et al. Welding defects detection based on deep learning with multiple optical sensors during disk laser welding of thick plates [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 51: 87-94.
- [11] 周建, 邵晨东, 崔海超, 等. 激光-电弧复合焊在坡口中的等离子体耦合行为[J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202006.  
Zhou J, Shao C D, Cui H C, et al. Plasma coupling behavior of laser-arc hybrid welding in groove [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202006.
- [12] 蔡颂, 陈根余, 周聪, 等. 单脉冲激光烧蚀青铜砂轮等离子体物

- 理模型研究[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0414001.
- Cai S, Chen G Y, Zhou C, et al. Research of plasma physical model for single pulsed laser ablation of bronze-bond grinding wheel[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0414001.
- [13] 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.
- [14] 许赛, 杨立军, 徐书峰, 等. 激光深熔焊等离子体电信号振荡特征与焊缝熔深的特征关系[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0102006.
- Xu S, Yang L J, Xu S F, et al. Relation between plasma electrical signal oscillation and weld depth in laser deep penetration welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0102006.
- [15] Cherrington B E. The use of electrostatic probes for plasma diagnostics: a review [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1982, 2(2): 113-140.
- [16] 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.
- [17] 赵圣斌, 杨立军, 刘桐, 等. 不同焊接模式下的 A304 不锈钢 YAG 激光焊等离子体的电信号特征[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202005.
- Zhao S B, Yang L J, Liu T, et al. Electrical signal characteristics of plasma in YAG laser welding of A304 stainless steels under different modes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1202005.
- [18] 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.
- [19] Klein T, Vicanek M, Simon G. Forced oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1996, 29(2): 322-332.

## Study on Penetration Characteristics of Plasma Electrical Signals in Laser Welding of TC4 Titanium Alloy

Li Wang<sup>1</sup>, Yang Lijun<sup>2\*</sup>, Huang Yiming<sup>1\*\*</sup>, Tian Yunfu<sup>1</sup>, Jia Chenpeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

<sup>2</sup> Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China

### Abstract

**Objective** Laser welding, which uses a high-energy laser beam as a welding heat source, has been widely used in material processing because of the advantages of energy concentration, high flexibility, and high production efficiency. As an important physical phenomenon in deep penetration laser welding, plasma generation contains considerable information about laser welding processes. The study of plasma behavior is critical for the quality monitoring of laser welding processes. In recent years, plasma electrical signal detection technology has been used because of its advantages of simultaneously acquiring plasma temperature and oscillation characteristics. With the further study of plasma electrical signals, the characteristics of electrical signals under different welds are becoming crucial parameters for monitoring laser welding processes. Some scholars studied the relationship between the oscillation of plasma electrical signals and weld penetration depth. However, the difference in plasma electrical signal characteristics between partial and full penetration welds have received little attention. Therefore, it is essential to analyze the plasma electrical signals under different penetration conditions and improve plasma detection methods for monitoring the laser welding process.

**Methods** In this study, titanium alloy TC4 is used to investigate the characteristics of the plasma electrical signals under partial and full penetration welds. The titanium alloy plate with a 2-mm thickness is welded using an Nd:YAG laser. Partial and full penetration welds are realized by adjusting the laser power and changing the welding speed. During the welding process, a synchronous acquisition system for plasma photoelectric signals is used. The short-time autocorrelation analysis method is used to analyze the difference in the oscillation frequency of plasma electrical signals between partial and full penetration welds.

**Results and Discussions** Comparing the collected plasma photoelectric signals, the oscillation characteristics of electrical signals at different periods are different (Fig. 5). The electrical signals are segmented and every section is analyzed using short-time autocorrelation method to investigate the oscillation frequency variation of the plasma electrical signals in the entire welding process. The characteristic oscillation frequency of the plasma electrical signals in the initial stage is 241–669 Hz, which is evidently lower than that in the relatively stable stage, and the characteristic oscillation frequency decreases as the welding heat input increases (Fig. 6). The fluctuation interval length of the plasma characteristic oscillation frequency under the partial penetration weld in the relatively stable stage is only 200 Hz, whereas that under the full penetration weld can reach 500 Hz (Fig. 7), which is an important feature that can be used to distinguish the partial penetration weld from the full penetration weld.

**Conclusions** In this study, a photoelectric observation system is constructed to obtain plasma photoelectric signals



during laser welding of titanium alloy. The difference in the characteristic oscillation frequencies of plasma electrical signals is analyzed under different conditions of partial and full penetration welds. The main findings of this study are as follows.

In the initial stage, the characteristic oscillation frequency of the plasma electrical signals under the partial penetration weld is much higher than that under the full penetration weld. Simultaneously, the characteristic oscillation frequency of the plasma generated under the partial penetration changes faster than that under the full penetration. The differences in oscillation frequency and variable speed are important features that distinguish the partial penetration weld from the full penetration weld.

In the relatively stable stage, the characteristic oscillation frequency of the plasma electrical signals under the partial penetration weld fluctuates and the deviation is 7%–9% of the average. The characteristic oscillation frequency under the full penetration varies dramatically and the maximum deviation is over 40% of the average. The stability of the characteristic oscillation frequency is another important feature that distinguishes the partial penetration weld from the full penetration weld.

**Key words** laser technique; laser welding; titanium alloy; plasma; electrical signals; penetration condition