TC4 钛合金激光扫描焊接金属蒸气形态及其光谱特性研究

才宇航,高延峰,潘 皓,曾立雪,包俊阳
上海工程技术大学 机械与汽车工程学院,上海 201620

摘 要:目的 钛合金激光焊接时会产生大量等离子体/金属蒸气,等离子体/金属蒸气中包含了大量的焊接信息,通过研究这些信息与焊接状态的关系,可以实现焊接状态的实时反馈与调整,为焊接自动化提供了基础。**方法** 以 TC4 钛合金为实验对象,加入激光扫描焊接工艺方法;通过高速摄像与光谱采集的方式对焊接过程中的金属蒸汽形态以及光谱变化规律进行了研究。**结果** 试验结果表明:在点焊时加入扫描以后,等离子体/金属蒸气的摆动幅度减小,小孔效应减弱,焊接的稳定性得以提高;在移动焊接时,在不加扫描时,激光功率的提升以及焊接速度的减慢均会对使光谱强度得到显著的升高,而加入扫描以后,激光功率的提升以及焊接速度的减慢对光谱强度的影响变得很小,光谱强度并没有显著提升。**结论** 在点焊过程中扫描的加入会使等离子体摆动幅度减小,焊接的稳定性得到提高。在移动焊接过程中加入扫描,可以对光谱强度产生抑制,同样使得焊接的稳定性得以提高。

关键词:激光焊接;TC4 钛合金;等离子体;高速摄像;光谱分析
中图分类号:TG456.7 **文献标识码:**A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0005.011

Study on the Morphology and Spectral Characteristics of Metal Vapour in TC4 Titanium Alloy Laser Scanning Welding

CAI Yuhang, GAO Yanfeng, PAN Hao, ZENG Lixue, BAO Junyang
School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: Objective A large amount of plasma/metal vapor is generated during the laser welding of titanium alloy. The plasma/metal vapor contains a large amount of welding information. By studying the relationship between the information and the welding state, the real-time feedback and adjustment of the welding state can be realized, which provides the basis for welding automation. **Methods** Taking TC4 titanium alloy as the experimental object, a laser scanning welding process was added. The morphology and the rule of spectral variation of the metal vapor during the welding process were investigated by means of high-speed camera and spectral acquisition. **Results** The experimental results showed that the plasma/metal vapor swing amplitude decreased, the keyhole effect weakened, and the welding stability was improved after the scanning was added during spot welding. In mobile welding, without scanning, the increase in laser power and the slowing down of welding speed significantly increased the spectral intensity. However, after the addition of scanning, the increase in laser power and the slowing down of welding speed had little influence on the spectral intensity, and the spectral intensity wasn't significantly improved. **Conclusion** The addition of scanning in spot welding can reduce the swing amplitude of plasma and improve the stability of welding. When scanning is added to the process of mobile welding, the spectral intensity can be suppressed and the stability of welding can be improved.

Keywords: laser welding; TC4 titanium alloy; plasma; high-speed camera; spectral analysis

收稿日期:2023-04-18 **修回日期:**2023-05-21 **文章编号:**1672-058X(2024)05-0087-10
基金项目:上海市自然科学基金项目(21ZR1425900).
作者简介:才宇航(1997—),男,吉林长春人,硕士,从事焊接自动化研究.
引用格式:才宇航,高延峰,潘皓,等. TC4 钛合金激光扫描焊接金属蒸气形态及其光谱特性研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(5):87—96.
CAI Yuhang, GAO Yanfeng, PAN Hao, et al. Study on the morphology and spectral characteristics of metal vapour in TC4 titanium alloy laser scanning welding[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(5): 87—96.

1 引 言

钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好等诸多特性,是航空航天领域广泛采用的一种轻质高强材料。由于钛合金具有很低的导热系数,其焊接性能与铝合金等其他金属材料明显不同[1-5]。扫描振镜激光焊接通过振镜扫描使激光束以直线、圆形或者 8 字形高速扫描,可以有效抑制气孔的形成、提高焊接量,是一种适合于钛合金、铝合金等轻质高强材料的新型激光焊接方法。激光焊接产生的等离子体/金属蒸气是一个快速变化的物理过程。而激光焊接的质量与等离子体/金属蒸气的变化特征有关,因此对焊接时产生等离子体/金属蒸气进行研究有重要意义[4-5]。

激光焊接所产生的金属蒸气/等离子体中有很多能反映焊接状态的信息。因此许多科研人员通过光谱仪采集到弧光信号的光谱来分析其变化情况[6-7]。李升等[8]研究了等离子体光谱信号相对强度与工艺参数、焊接质量性能之间的关联。并且发现,平均相对光谱强度与离焦量以及保护器流量存在一定关联,但缺乏其他焊接工艺参数对光谱影响的研究。陈波等[9]在普通激光焊接的基础上加入了扫描振镜,研究加入扫描振镜后的激光点焊的熔池流动行为,但并没有深入分析等离子体变化规律以及熔池产生变化的原因。胡艳萍等[10]在激光电弧复合焊中研究发现光谱特征参数,包括光谱强度、电子温度和电子密度与焊缝裂纹敏感性和 Mg 元素烧损率的变化趋势一致,都随着焊接电流的增加而增加,随着焊接速度的增加而减小,但其只研究了某一种元素的光谱变化,并没有研究整体光谱的变化情况。徐晓磊[11]研究了不同艺参数对金属蒸气辐射强度、焊缝轮廓的影响规律,发现焊接速度减小、激光功率增大时,金属蒸发量提高,从而光谱信号强度增大,但其缺乏对如何提高焊接稳定的研究,没有实现焊接稳定性的提高。

因此,提出利用高速摄像设备拍摄点焊过程等离子体/金属蒸汽的变化,对焊接过程中的光谱信号进行采集,并分析二者之间的关系。其次在移动焊接过程中,通过改变不同工艺参数来观察光谱的变化规律。为通过光谱实现焊接状态的实时反馈与调整提供理论依据。

2 试验系统

2.1 试验装置

钛合金扫描振镜激光焊接系统如图 1 所示。激光器功率为 4 kW,波长为 1 080 nm。准直镜与水平面呈 45 度,通过 600 μm 芯径的光纤将其与光谱仪相连接,光谱仪与电脑连接进行光信号采集。光谱仪采用的是复享光学的 PG2000-Pro-EX,采集波段为 200 nm~1 100 nm。光谱仪收到采集到的光信号以后通过其所带的软件输入光谱图。试验中采用科天健的高速摄像机进行拍摄。在激光焊接过程中,固体金属在能量很高的激光作用下,经过一系列物理化学反应,会产生光致等离子体,此时产生的光信号就会被放置在激光焊接头旁边的光纤信号采集到,由于在光纤前面添加的一个准直镜,其有准直光线与聚焦散射光线的作用。然后光纤将光信号传到光谱仪中,经过光谱仪的处理,将所得光谱输出在电脑端,从而可以对采集到的光谱进行分析处理。

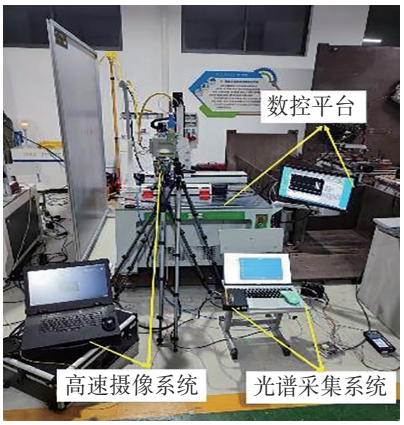


图 1 钛合金扫描振镜激光焊接系统

Fig. 1 Titanium alloy scanning galvanometer laser welding system

2.2 试验设计与试验参数

针对 TC4 钛合金激光扫描点焊金属蒸气形态变化的研究,设计了 3 组试验,分别是不加入扫描焊接,加入圆形扫描焊接,加入 8 字形扫描焊接。并且在高速摄像拍摄时,通过光谱仪进行光谱信号采集。3 组试验参数如表 1 所示。在进行扫描参数对移动焊接光谱影响的实验时,设计了 3 个不同的工艺参数变量,分别是激光扫描形状、激光焊接功率、激光焊接移动速度。具体试验工艺参数如表 2 所示。

表 1 点焊试验工艺参数

Table 1 Process parameters of spot welding test

工艺参数	不加扫描	圆形扫描	8 字形扫描
激光功率/w	1 000	1 000	1 000
离焦量	+2	+2	+2
氩气流量/(L·min^{-1})	25	25	25
焊接速度/(mm·s^{-1})	2	2	2
圆形扫描半径/mm	—	2	—
圆形扫描频率/Hz	—	90	—
8 字形扫描振幅/mm	—	—	3
8 字形扫描线速度/(mm·s^{-1})	—	—	1 000

表 2　移动焊接试验工艺参数

Table 2　Process parameters of mobile welding test

工艺参数	扫描形状试验	焊接功率试验	移动速度试验
激光功率/w	1 000	500/1 000/1 500	1 000
离焦量	+2	+2	+2
氩气流量/(L·min^{-1})	25	25	25
焊接速度/(mm·s^{-1})	2	2	1/2/3
圆形扫描半径/mm	2	2	2
圆形扫描频率/Hz	90	90	90
8 字形扫描振幅/mm	3	3	3
8 字形扫描线速度/(mm·s^{-1})	1 000	1 000	1 000

3　点焊金属蒸气形态及光谱研究

3.1　激光点焊金属蒸气形态分析

在激光焊接的过程中,由于激光的能量很高,导致单位面积中的热源能量很高。这种高能量的热源接触到钛合金板材表面时,会有许多金属蒸气产生。这些金属蒸气会冲出钛合金板材的表面。在这个过程中,熔化的钛合金板材会被一部分气体向外部推动,从而导致产生匙孔[12]。另一部分气体则会在电离作用下变成光致等离子体。光致等离子体会通过多种方式来阻碍入射激光的传播,如偏折,发散,汲取等,这会导致匙孔底部所收到的激光能量变少,使激光焊接的稳定性产生较大幅度的下降[13]。此外,焊接过程中金属蒸气产生的压力可以维持匙孔形貌的稳定,而匙孔自身的重力产生的静压力与熔池流动时产生的动压力会使匙孔闭合。这种平衡性一旦遭受到破坏,整个匙孔的内部会发生整体的塌陷或者被截断。当匙孔开始塌陷时,一旦气泡上浮的速度变慢,没办法逃离熔池,此时会形成焊接弊端[14-16]。

3.1.1　不扫描点焊时等离子体/金属蒸气形态分析

图 2 为不扫描点焊时的高速摄像图。从图 2 中可以看出,在不加入扫描进行激光焊接时产生的等离子体或金属蒸气的体积较大。这表明,焊接时的激光能量比较大,许多激光能量被匙孔吸收,匙孔的温度逐渐升高,所以等离子体/金属蒸气的轮廓可以被清晰地看到。这些等离子体会一直存在,只是偶尔才会消失,等离子体所在的位置即入射激光轴线的方向上,它们的摆动无明显的规律,并且会产生膨胀。由于受到马兰戈尼效应的影响,张力梯度的作用会导致熔池产生定向移动,但是熔池的表面依然会产生较大的波动情况,这是因为熔池局部受到激光作用产生的[17-18]。焊缝中的气孔与熔池表面的波动有着比较大的关系。此外,在激光焊接时,熔池的表面会有一些飞溅,这些飞溅的体积不一且迸出的距离较远。飞溅产生的原因是由于熔池产生剧烈震荡,在等离子体喷出钛合金母材表面时,匙孔周围的熔融金属会被甩出一些或者从匙孔中带出来的。飞溅的多少可以反映出激光焊接过程的平稳性以及匙孔的震荡程度。飞溅的体积多少与匙孔的扩张程度有关,匙孔的孔径较大时,开口尺寸存在比较大的变化,此时,产生的飞溅就会变多。

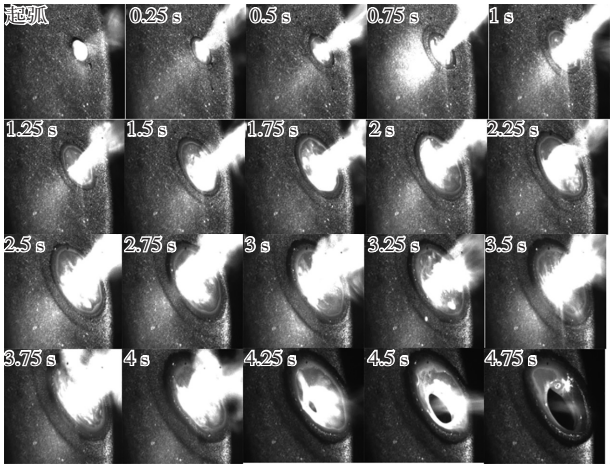


图 2　不扫描高速摄像

Fig. 2　High speed camera without scanning

3.1.2　圆形扫描点焊时等离子体/金属蒸气形态分析

图 3 为圆形点焊时的高速摄像图。从图 3 中可以看出,在加入圆形扫描以后,等离子体/金属蒸气的体积减小,且其等离子体的摆动幅度相对较小,焊接稳定性有所提高。在激光圆形扫描条件下等离子体有所减少,这是由于加入扫描后,激光的线速度开始逐渐增加,线能量逐渐降低,这时产生的匙孔温度也随之降低,导致迸出的等离子体/金属蒸气也随之变少。在激光焊接的过程中,等离子体/金属蒸气会随着激光束位置的变化和发生变化,在其位置变化时,等离子体的方向会与原先运动的路径产生偏移,其汲取到的热源也会变少。这也是等离子体变少的原因之一。

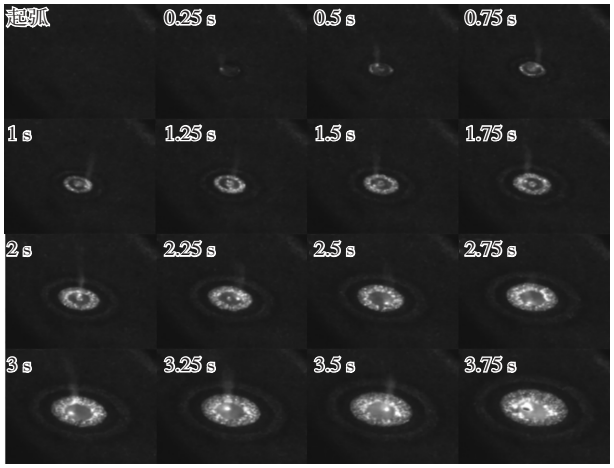


图 3　圆形扫描高速摄像

Fig. 3　Circular scanning with high-speed camera

由于扫描的加入会使激光光斑的速度提升,快速运动的激光束使得匙孔的位置在不停变化,此时激光束对液态金属的影响范围变大,降温速率会被减缓。同时,等离子体的迸出同样会减缓液态金属的波动。由于激光束在不停地扫描摆动,已经凝固的液态金属会被重新熔化。扫描会使得匙孔的孔径增大,并且孔径的尺寸不随时间的变化而生较大变化,这表明匙孔比较稳定。在高速摄像下也可以看到加入扫描后熔池表面的波动也比较平稳,飞溅有所减少。表明加入扫描后,激光焊接过程的稳定性有所提高。

3.1.3 8 字形扫描点焊时等离子体/金属蒸气形态分析

图 4 为 8 字形点焊时的高速摄像图,其离子体/金属蒸气的体积相较于不加扫描时要小,和圆形扫描类似,且其等离子体的摆动幅度也相对较小。在此工艺下,激光束沿着“∞”特殊的轨迹摆动,其熔池的形状可以明显看到为一个 8 字形。激光在对熔池前端的钛合金金属加热熔融后,会在移动到熔池的后端以后对熔池后端的金属进行二次加热,但由于其高速摆动的原因,熔池在重复冷却凝固加热的过程,会导致匙孔温度降低,等离子体迸发出来的相较常规焊接少了很多,同时,“∞”的扫描方式导致激光束与熔池的接触面积比圆形扫描还要小,其单位熔池所接受的热量更小,所以钛合金被焊穿的时间虽然比常规焊接更短,但是要比圆形扫描的时间更长一些。

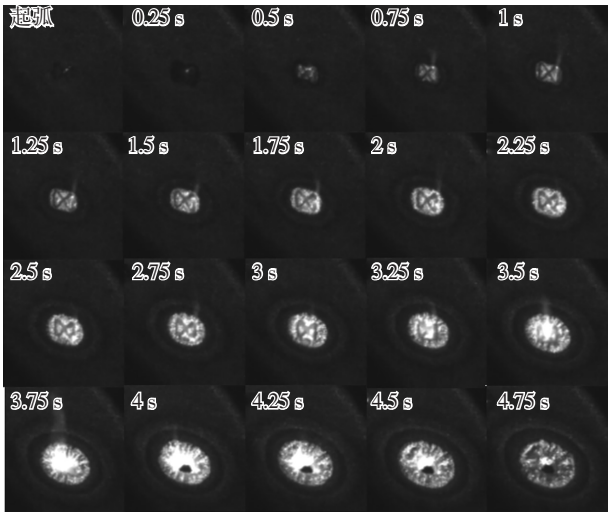


图 4 8 字形扫描高速摄像

Fig. 4 8-shaped scanning with high-speed camera

如图 5 所示,采用高速摄像机对 8 字形扫描焊接的等离子体/金属蒸气的变化特征进行拍摄时,可以比较明显的发现其等离子体/金属蒸气的摆动会呈现出一定的周期性。图 5 所选图片为焊接时间 $t=3$ s 以后的图片,可以看到,在 t+20 μs 时,等离子体/金属蒸气近乎消失,随着焊接的进行,等离子体/金属蒸气逐渐增多,在 t+100 μs 时等离子体/金属蒸气的数量达到最大。随后又渐渐消失,在 t+120 μs 时,又重新开始一个新的周期。

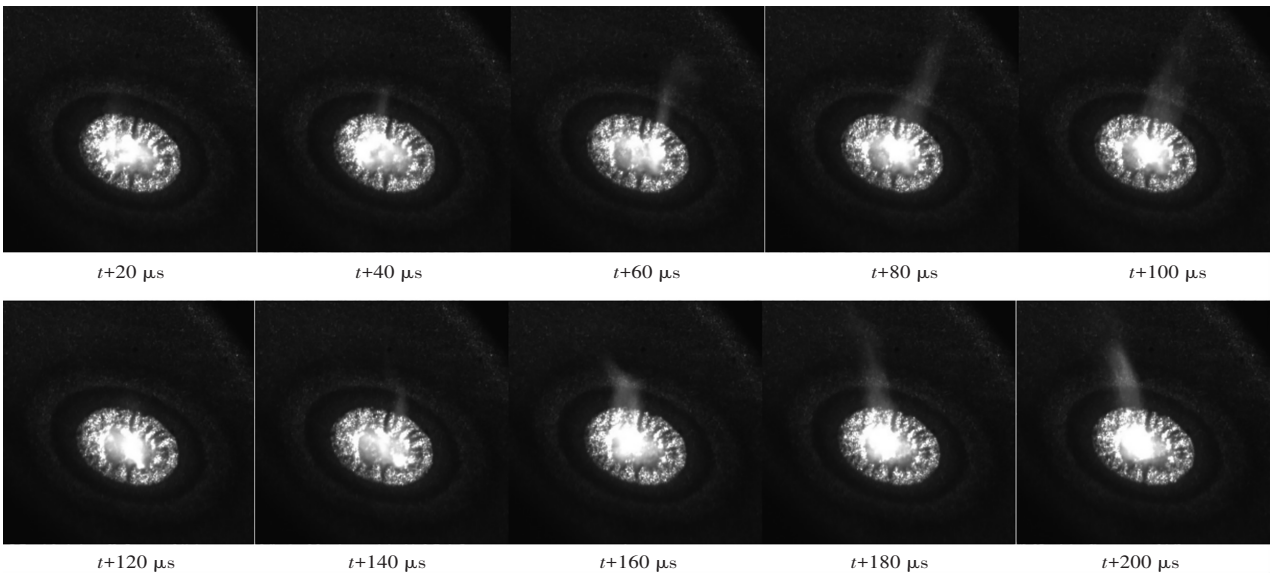


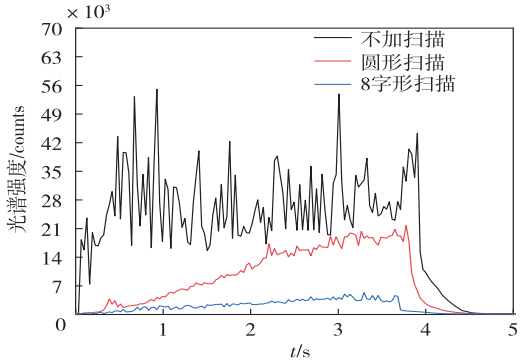
图 5 8 字形扫描等离子体周期性

Fig. 5 8-shaped scanning plasma periodicity

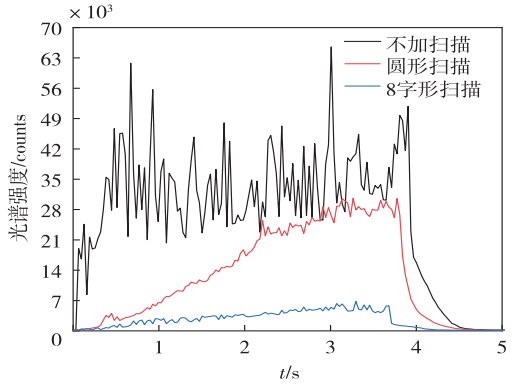
3.2 光谱信号特性分析

经过多组试验对焊接光谱进行采集,通过滤波等处理之后得到其光谱图,如图 6 所示,分别为波长为 650 nm、700 nm、750 nm、800 nm 的光谱图,虽然不同波长所对应的光谱强度不同,但是其光谱强度的变化趋势是一样的,所以选取 650 nm、700 nm、750 nm、800 nm 来进行研究。从几幅图中可以看到,不加扫描时的光强幅值是最高的,与高速摄像的拍摄的等离子体/金属状态是一致的,因为不加扫描时的等离子体/金属蒸气的体积较大,等离子体由于小孔效应所迸发出的数量

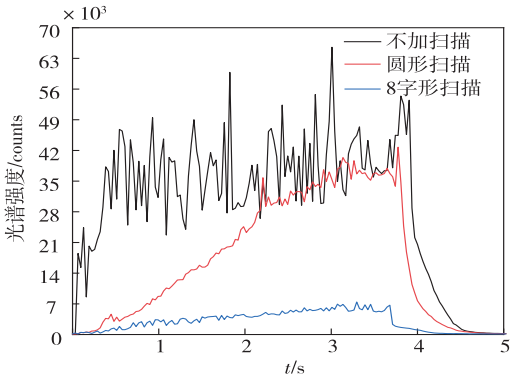
也是最多,所以此时对应的光谱强度是最大的,在 4.3 s 左右 TC4 钛合金板材被焊穿以后,等离子体/金属蒸气数量急剧减少,导致光谱强度随之大幅下降。



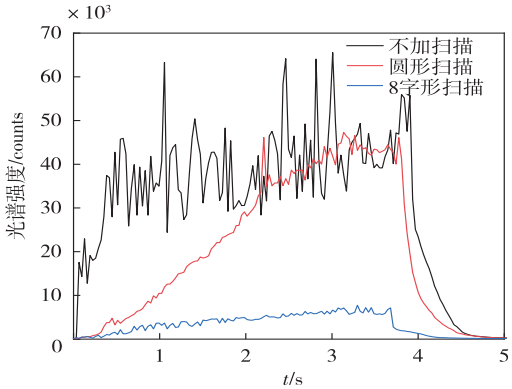
(a) 650 nm 光谱图



(b) 700 nm 光谱图



(c) 750 nm 光谱图



(d) 800 nm 光谱图

图 6　点焊光谱图像

Fig. 6　Spot welding spectral image

在加入圆形扫描后,从几幅图 6 中可以看到其光谱强度的幅值明显小于不加扫描时的光谱强度,同时可以看到在两秒左右其熔池充分形成后,光谱强度一直保持在一个稳定的区间,可以看到,不加扫描时的光谱强度浮动很大,这也从另一个角度证明了加入圆形扫描以后其焊接的稳定性得以提升。而在焊接的 4 s 左右,光谱强度急剧下降,这说明,圆形扫描焊穿 TC4 钢板的时间为 4 s。等离子体/金属蒸气摆动幅度的变小,体积变小,都对光谱强度的下降有所影响,同时也影响着光谱强度的幅度,这些与高速摄像机拍摄的结果一致。

加入 8 字形扫描以后,由于其特殊的轨迹原因,激光束与熔池接触的相对面积变得更小,导致其光谱强度大幅度降低,且光谱强度的幅值浮动范围更小,这表明,8 字形扫描时,焊接的稳定性要比圆形扫描时的还要高。

4　移动焊接激光扫描参数对光谱影响分析

4.1　激光焊接扫描形状对光谱的影响分析

4.1.1　不加扫描焊接时光谱特性分析

图 7 为不加扫描时焊接速度 2 mm/s 的光谱图。在 500 nm~750 nm 波长范围内,光谱强度呈现出一个逐渐上升的正弦趋势,其峰值光谱强度达到 29 000 counts。在 750 nm 波长之后,光谱强度呈现出一个逐渐向下的正弦趋势,在 900 nm 以后光谱强度变得很小,光谱强度稳定。在不加扫描焊接时,其激光束与熔池接触充分,作用时间较长,此时由于激光能量集中,导致熔池的单位热输入量升高,等离子体温度也随之升高,光谱强度也随之升高。

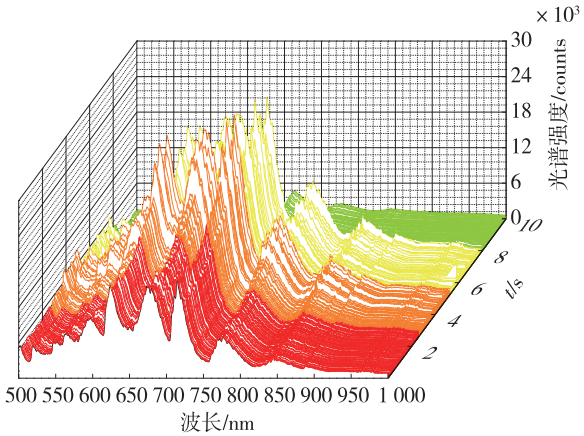


图 7　不加扫描光谱图

Fig. 7　Spectrogram without scanning

4.1.2 加入圆形扫描焊接时光谱特性分析

如图 8 所示,其为加入圆形扫描后的光谱图,对比图 7 可以明显看到,虽然其光谱整体变化趋势与不加扫描焊接时的光谱变化趋相同,但是其整体光谱强度要远远小于不加扫描焊接时的光谱强度。加入圆形扫描后,其峰值光谱强度为 4 900 counts,其光谱强度被抑制得非常明显,平均光谱强度仅为不加扫描时的六分之一。这是因为与不加扫描时相比,圆形扫描的激光焦点的形状变成一个半径为 2 mm 的圆形,且在焊接过程中以 90 Hz 的频率一直不停地摆动。此时,与不加扫描时相比,激光作用于熔池的时间因激光不停地摆动而大大减小,这导致熔池单位面积的热量变少。因为激光束与熔池作用时间变短,减弱了激光小孔效应,使得从小孔喷射出的光致等离子体强度减弱,导致此时等离子体光谱强度明显下降。

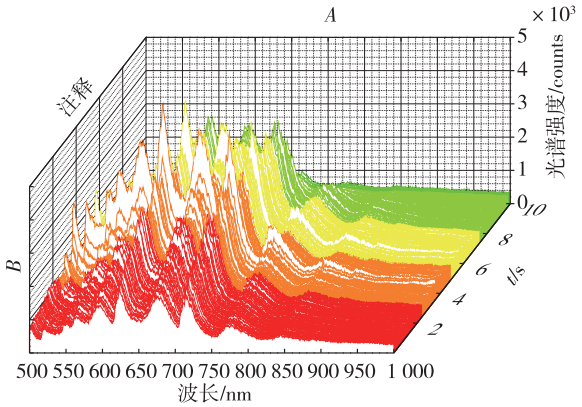


图 8 加入圆形扫描光谱图

Fig. 8 Adding a circular scanning spectrogram

4.1.3 加入 8 字形扫描焊接时光谱特性分析

图 9 为加入 8 字形扫描条件下的光谱图,从图中可以看到其光谱最大峰值为 2 000 counts,平均光谱强度仅为不加扫描时光谱的十分之一,同时也小于圆形扫描的光谱强度。8 字形扫描时,其线速度为 1 000 mm/s,振幅为 3 mm。采用 8 字形扫描焊接时,激光束的轨迹也为 8 字形,这导致激光束与熔池的作用时间因激光进行 8 字形的轨迹摆动被进一步缩短,进而使得熔池单位面积所受到的热量输入更少。激光的小孔效应被进一步减弱,小孔喷射出的光致等离子体强度比圆形扫描时还要少,这导致熔池单位面积的热量变少,导致此时等离子体光谱强度明显下降。所以 8 字形扫描焊接时的光谱强度不仅远小于不加扫描时的光谱强度,也要小于圆形扫描焊接时的光谱强度。

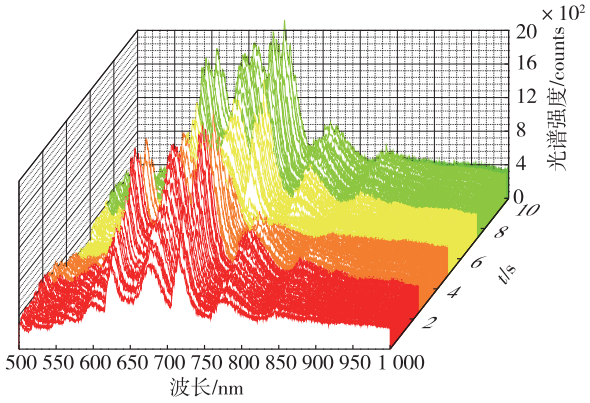


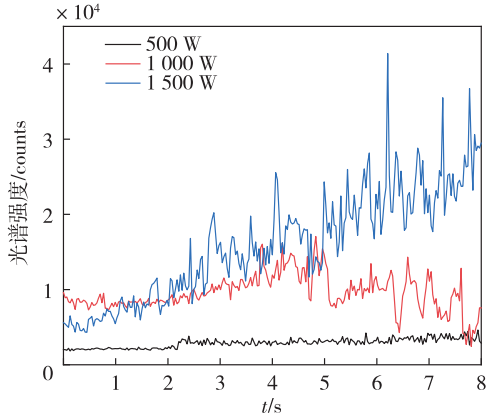
图 9 8 字形扫描光谱图

Fig. 9 8-shaped scanning spectrogram

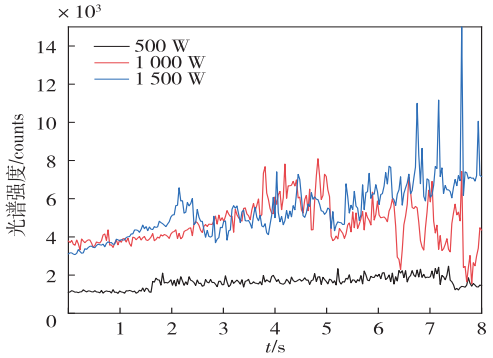
4.2 激光功率对光谱的影响分析

4.2.1 不加扫描激光功率对光谱影响分析

图 10(a) 为不加扫描波长 700 nm 时,焊接功率 500 W、1 000 W、1 500 W 的光谱图。图 10(b)为不加扫描 800 nm 时,焊接功率 500 W、1 000 W、1 500 W 的光谱图。从图 10(a)中可以看到,焊接功率为 500 W 时,其光谱强度非常的弱,且其变化趋势相对稳定,这是由于激光功率较小时,熔池的形成并不充分,等离子体被激发的数量较少,所以其光谱强度保持在一个相对稳定的低幅值区间。当焊接功率增加到 1 000 W 时,光谱强度有一个较大程度的上升。当激光功率继续增加到 1 500 W 时光谱强度继续大幅度提升。这是因为随着激光功率的增加,激光所激发出的等离子体变得更多,同时,激光功率的增加导致熔池完全形成,且功率的增加会导致等离子体温度的上升,最后影响光谱强度的上升。图 10(b)中焊接功率 500 W、1 000 W、1 500 W 的光谱变化趋势与图 10(a)的变化趋势相似。这表明在不加扫描时,激光焊接的光谱强度与激光功率呈现出正相关。即激光功率越大,其光谱强度越大。



(a) 700 nm 光谱图



(b) 800 nm 光谱图

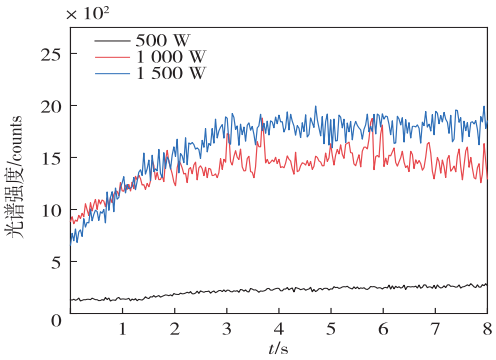
图 10　不加扫描光谱图

Fig. 10　Spectrogram without scanning

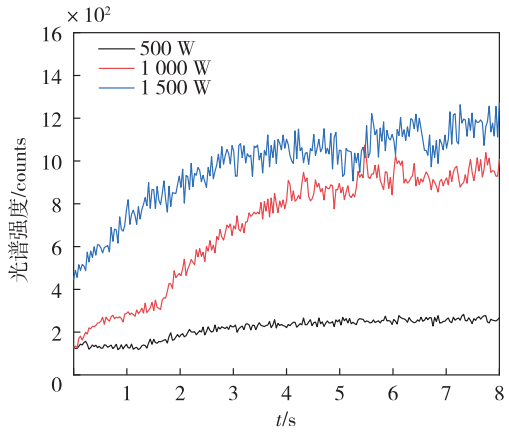
4.2.2　加入圆形扫描后激光功率对光谱影响分析

图 11(a) 为加入圆形扫描波长 700 nm 时,焊接功率 500 W、1 000 W、1 500 W 的圆形扫描焊接时的光谱图。图 11(b) 加入圆形扫描为 800 nm 时,焊接功率 500 W、1 000 W、1 500 W 的圆形扫描焊接时的光谱图。对比图 10 中光谱强度的幅值,可以看到,加入圆形扫描后的光谱强度要远小于不加扫描时的光谱强度。由于加入圆形扫描以后,激光束以圆形轨迹快速摆动,激光束与熔池的作用时间变短,导致光谱强度整体大幅度下降。在焊接功率为 500 W 时,激光自身功率不足熔池形成不充分叠加激光束摆动的原因,导致在激光功率为 500 W 时的光谱强度幅值 200 左右浮动,且其变化趋势相对稳。激光功率从 500 W 升到 1 000 W 时,光谱强度变大,由于熔池的充分形成,产生的小孔效应使得光谱强度上升。

从两幅图中可以看到激光功率增加到 1 000 W 增加到 1 500 W 时,与常规焊接不同,其光谱强度仅有非常小幅度的提升。其原因是扫描的加入使得激光束与熔池的作用时间大大减少,导致单位熔池所接收到的热量变少,同时,因为扫描导致的光谱幅度减小的值与激光功率增加导致的光谱幅度增加的值相近,所以,即使激光功率增加,其光谱幅度也仅仅只有小幅度的增加。也进一步地证明了在激光焊接时,加入扫描会抑制光谱强度。



(a) 700 nm 光谱图



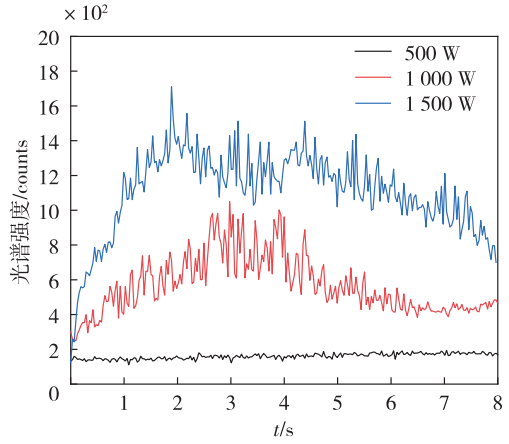
(b) 800 nm 光谱图

图 11　圆形扫描光谱图

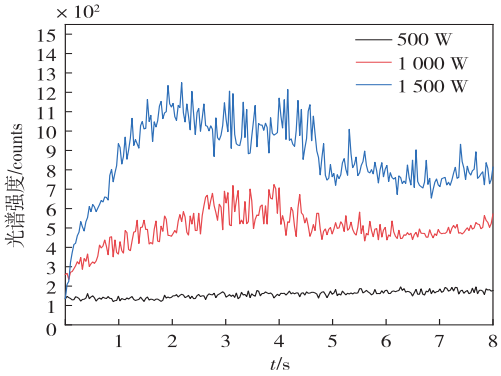
Fig. 11　Spectrogram with circular scanning

4.2.3　加入 8 字形扫描后激光功率对光谱影响分析

图 12(a) 为加入 8 字形扫描波长 700 nm 时,焊接功率 500 W、1 000 W、1 500 W 的 8 字形扫描焊接时的光谱图。图 12(b) 加入 8 字形扫描为 800 nm 时,焊接功率 500 W、1 000 W、1 500 W 的 8 字形扫描焊接时的光谱图。当焊接功率为 500 W 时,其光谱强度与前面两种焊接方式的光谱强度变化趋势相似,均为比较稳定幅值很低且没有太多波动的走势。无论是波长 700 nm 还是 800 nm 时,当功率到从 500 W 升到 1 000 W 以及 1 000 W 升到 1 500 W,光谱强度均有所升高,但是其光谱强度增加的幅度远远小于不加扫描时光谱强度增加的幅度。其原因与上述圆形扫描相同。但是由于 8 字形轨迹的特殊性,导致其光谱强度的均值要比圆形扫描的光谱强度幅值还要小,这是因为 8 字形扫描的情况下,激光束与熔池的作用时间进一步变短,单位熔池所接受的热量比圆形扫描时所接受的热量还要少,同时,由于 8 字形轨迹的运动特点,其线能量降低,匙孔温度也随之降低,会导致迸发出的等离子体/金属蒸气也随之减少,多种原因叠加下,导致其光谱强度强度比圆形扫描时的光谱强度还要小。



(a) 700 nm 光谱图



(b) 800 nm 光谱图

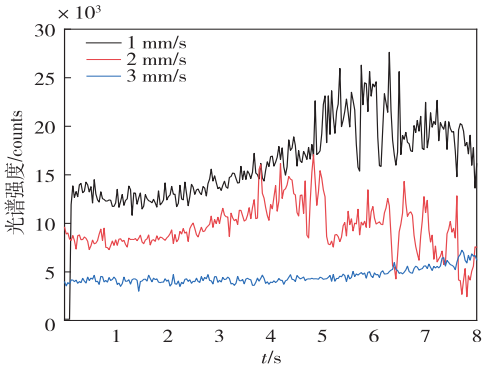
图 12 8 字形扫描光谱图

Fig. 12 8-shaped spectrogram scanning

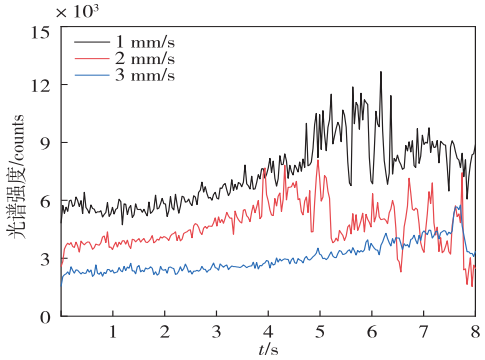
4.3 焊接速度对光谱的影响分析

4.3.1 不加扫描时焊接速度对光谱的影响分析

图 13(a)为不加扫描时波长为 700 nm 时的光谱图,图 13(b)为不加扫描时波长为 800 nm 时的光谱图。从图中可以看出,当激光焊接的移动速度为 1 mm/s 时,光谱的相对强度对大,随着焊接速度的增大,光谱强度逐·渐减小。这是由于焊接速度越慢,激光束与熔池之间的接触时间就越长,单位熔池所接受的热量越多,其小孔效应越明显,导致迸发出的等离子体/金属蒸气越多,从而光谱强度越大。而当焊接速度变慢时,激光束与熔池之间的接触时间就越短,单位熔池所接受的热量越少,此时,匙孔温度降低速度变快,就会导致迸发出的等离子体/金属蒸气减少,使得其光谱强度变弱。



(a) 700 nm 光谱图



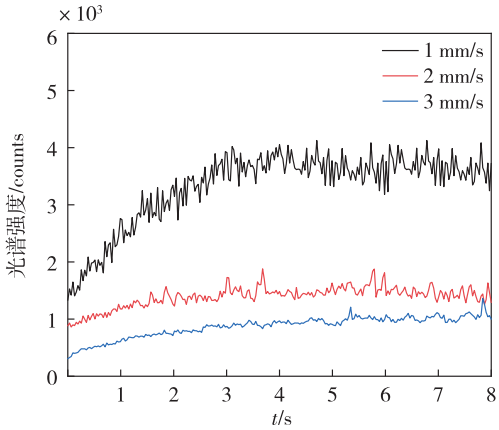
(b) 800 nm 光谱图

图 13 不加扫描光谱图

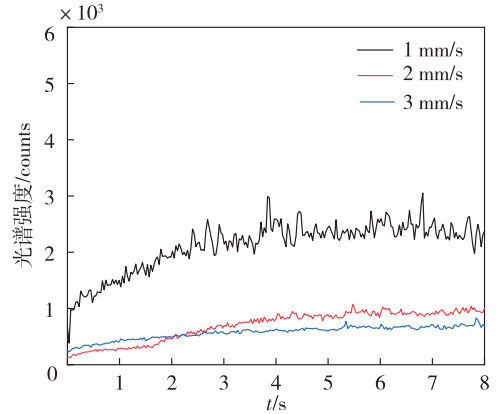
Fig. 13 Spectrogram without scanning

4.3.2 加入圆形扫描焊接后焊接速度对光谱的影响分析

图 14(a)为加入圆形扫描时波长为 700 nm 时的光谱图,图 14(b)为加入圆形扫描时波长为 800 nm 时的光谱图。从两幅图中可以看到,加入圆形扫描后,虽然随着焊接速度的变慢,光谱强度也随之增加,但由于加入扫描会对光谱的强度产生抑制的效果,所以其光谱强度上升的幅度要比不加扫描时要小得多。在激光焊接中加入扫描后,激光束的实际运动路径为激光头的运动路径与激光的扫描路径合成的结果。所以激光束的实际运动速度和范围由扫描的振幅和频率共同决定。当移动速度减慢时,激光的线速度开始逐渐减弱,线能量逐渐增加,这时产生的匙孔温度也随之升高,导致迸出的等离子体/金属蒸气也随之增加,但是由于扫描的加入会使得其对熔池进行不断地搅拌,激光束与单位熔池间的作用时间由于扫描的加入而变短,此时小孔效应减弱,迸发出的等离子体减少。所以,虽然移动速度的变慢会导致等离子体/金属蒸气的增加,但是由于扫描的加入会使得等离子体/金属蒸气减少,所以在加入扫描后,速度的变慢,虽然会使得光谱强度有所提升,但是光谱强度的提升幅度要小于不加扫描时的提升幅度。



(a) 700 nm 光谱图



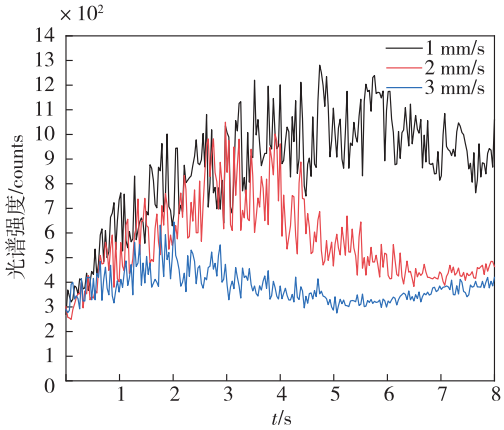
(b) 800 nm 光谱图

图 14 圆形扫描光谱图

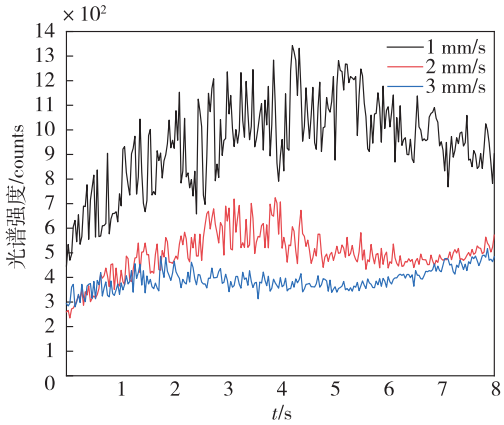
Fig. 14 Spectrogram of circular scanning

4.3.3　加入 8 字形扫描焊接后焊接速度对光谱的影响分析

图 15(a)为加入 8 字形扫描时波长为 700 nm 时的光谱图,图 15(b)为加入 8 字形扫描时波长为 800 nm 时的光谱图。由于 8 字形扫描的特点,无论焊接速度的快慢,其光谱强度的幅值都要远小于不加扫描时的光谱强度。此外,从两幅图中可以看到虽然焊接速度减慢时,光谱强度有所升高,但是其升高的幅度要比圆形扫描升高的幅度还要小,可以看出加入 8 字形扫描后,焊接速度对光谱强度影响程度要小于不加扫描以及加入圆形扫描的情况。这是由于 8 字形扫描时,激光束与熔池的接触时间要更短,且其等离子体/金属蒸气的摆动呈现出一定的周期性,熔池在重复冷却凝固加热的过程,这会导致匙孔温度降低,等离子体迸发出来的相对常规焊接少了很多,进而导致光谱强度大幅度被抑制。而且加入 8 字形扫描以后,其光谱强度幅值变化的区间较小,这也进一步说明了加入扫描以后,会提升激光焊接的稳定性。



(a) 700 nm 光谱图



(b) 800 nm 光谱图

图 15　8 字形扫描光谱图

Fig. 15　8-shaped scanning spectrogram

5　结　论

通过高速摄像机观察点焊时的等离子体/金属蒸气可以发现,加入圆形以及 8 字形扫描以后,等离子体/金属蒸气体积有所减小,等离子体/金属蒸气摆动幅度变小,焊接的稳定性性得以提高。通过光谱仪测得点焊时的光谱,不加扫描时光谱强度最大在加入圆形与 8 字形扫描以后,光谱强度有了明显的不同程度的下降且光谱强度摆动幅度较小。

移动焊接时,不加扫描振镜焊接时,其光谱强度的幅值较大。加入扫描振镜后,对光谱的光强产生抑制效果。当激光功率增加时,不加扫描时的光谱强度会随着激光功率的升高有较大的幅值上升,而加入扫描以后,光谱幅度减小的值与激光功率增加导致的光谱幅度增加的值相近,导致光谱强度不会有较大幅度的上升。当焊接速度减慢时,不加扫描的情况下,光谱强度会随速度的减慢而大幅升高,在加入扫描以后,会对光谱产生更强的抑制效果。

参考文献(References):

[1]　胡志杰,冯军宁,马忠贤,等. 我国钛及钛合金热处理标准现状[J]. 金属热处理, 2021, 46(3): 243—246.
HU Zhi-jie, FENG Jun-ning, MA Zhong-xian. Current status of heat treatment standards for titanium and titanium alloys [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(3): 243—246.

[2]　雒设计, 李丹, 李宁. 钛及钛合金热氧化行为的研究现状[J]. 热加工工艺, 2021, 50(10): 17—21.
LUO She-ji, LI Dan, LI Ning. Research status of thermal oxidation behavior of titanium and titanium alloy [J]. Hot Working Technology, 2021, 50(10): 17—21.

[3]　陈玮, 刘运玺, 李志强. 高强 β 钛合金的研究现状与发展趋势[J]. 航空材料学报, 2020, 40(3): 63—76.
CHEN Wei, LIU Yun-xi, LI Zhi-qiang. High strength β research status and development trends of titanium alloys [J]. journal of aeronautical materials, 2020, 40(3): 63—76.

[4]　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.
YING Ye-yong. Study on the deformation and the behaviour of plasma during laser welding of TC4 titanium alloy [D]. Changsha: Hunan University, 2016.

[5]　余杰, 蔡创, 谢佳, 等. 基于响应面法的低碳贝氏体钢激光-电弧复合焊接工艺参数优化[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 179—188.

YU Jie, CAI Chuang, XIE Jia. Optimization of laser arc hybrid welding process parameters of low carbon bainitic steel based on response surface methodology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 179—188.

[6] 赵杰魁, 魏昕, 陈树青, 等. 激光焊接光谱及匙孔图像的采集与分析[J]. 机械设计与制造, 2020(11): 110—113.
ZHAO Jie-kui, WEI Xi, CHEN Shu-qing. Acquisition and analysis of laser welding spectrum and keyhole image[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(11): 110—113.

[7] 代孝红, 郭紫威, 王鑫. 基于响应面法的 DP800 车用高强钢激光-电弧复合焊接焊缝成形研究[J]. 应用激光, 2023, 43(1): 12—17.
DAI Xiao-hong, GUO Zw-eii, WANG Xin. Study on weld formation of laser-arc hybrid welding of DP800 automotive high strength steel based on response surface method[J]. Applied Laser, 2023, 43(1): 12—17.

[8] 李升. 激光焊接异种铝合金光谱信号与焊件质量之间的关联研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
LI Sheng. Study on the relation between spectrum signal and welding quality of laser welding of different aluminum alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2014.

[9] 陈波, 孟正, 马程远, 等. 扫描振镜激光 TC4 钛合金焊接性能及熔池流动行为研究[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 438—450.
CHEN Bo, MENG Zheng, MA Cheng-yuan. Study on welding performance and melt pool flow behavior of TC4 titanium alloy by scanning galvanometer laser[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 438—450.

[10] 胡艳萍. 铝合金激光—电弧复合焊接缺陷光谱诊断研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
HU Yan-ping. A Dissertation Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.

[11] 徐晓磊. 基于光谱分析的铝合金搭接接头熔深在线检测[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
XU Xiao-lei. Online detection method of weld depth for aluminum alloy overlap joint based on spectral analysis[D]. Shanghai: Shanghai Jiao TongUniversity, 2019.

[12] 罗灿, 张臣, 赵志远, 等. 振荡激光扫描路径对 TC11 钛合金焊接组织性能的影响[J]. 精密成形工程, 2023, 15(3): 9—18.
LUO Can, ZHANG Chen, ZHAO Zhi-yuan. Effects of beam oscillating path on microstructure and mechanical properties of laser welded TC11 titanium alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15(3): 9—18.

[13] 李路雨, 胡永俊, 李风, 等. 几种常见合金的激光扫描焊接特性及研究现状[J]. 电焊机, 2022, 52(2): 26—35.
LI Lu-yu, Hu Yong-jun, LI Feng. Laser scanning welding characteristics and research status of several common alloys[J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(2): 26—35.

[14] 许飞, 陈俐, 何恩光. 钛合金扫描振镜激光焊接接头特性分析[J]. 热加工工艺, 2022, 51(1): 107—110.
XU Fei, CHEN Li, HE En-guang. Characteristics analysis of scanning galvanometer laser welded joint of titanium alloy[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(1): 107—110.

[15] 黄瑞生, 邹吉鹏, 宫建锋, 等. 激光扫描焊接熔池及等离子体动态行为[J]. 焊接学报, 2020, 41(3): 11—16.
HUANG Rui-sheng, ZOU Ji-peng, GONG Jian-feng. Dynamic characteristics analysis of resistance spot welding pressure signal of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(3): 11—16.

[16] 张甫, 王威, 王旭友, 等. TC4 钛合金激光扫描焊接工艺参数对气孔的影响[J]. 焊接, 2016(2): 35—39.
ZHANG Fu, WANG Wei, WANG Xu-you. Effect of laser beam oscillation welding process parameters on porosity tendency of TC4 titanium alloy[J]. Welding & Joining, 2016(2): 35—39.

[17] 史亚贝, 袁苏楠, 户燕会. 316 不锈钢焊点的激光扫描修饰工艺研究[J]. 应用激光, 2021, 41(4): 691—696.
SHI Ya-bei, YUAN Sun-an, HU Yan-hui. Effect of laser scanning welding process parameters on porosity of TC4 titanium alloy[J]. Applied Laser, 2021, 41(4): 691—696.

[18] 谢小珑, 李权洪, 母中彦, 等. 304 不锈钢扫描激光焊接的熔池流动行为及焊缝成形研究[J]. 电焊机, 2021, 51(1): 42—48.
XIE Xiao-long, LI Quan-hong, MU Zhong-yan. Study on the Flow Behavior of the Melt Pool and Weld Formation in 304 Stainless Steel Scanning Laser Welding[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(1): 42—48.

责任编辑:田 静