

# 光纤激光气体氮化钛合金发射光谱及等离子体研究

郭晋昌<sup>1,2</sup>, 石 玟<sup>1\*</sup>, 顾玉芬<sup>1</sup>, 张 刚<sup>1</sup>

1. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050
2. 陇东学院机械工程学院, 甘肃 庆阳 745000

**摘 要** 激光气体氮化工艺可在钛合金表面快速生成氮化层, 提高钛合金表面硬度和耐磨性, 促进钛合金应用。采用光纤激光气体氮化 Ti-6Al-4V 合金, 为了明确氮化过程光谱发射区是否形成等离子体, 采用探针法检测了光谱发射区导电性; 为了研究工艺参数对光谱特性、光谱发射区温度及等离子体数量的影响, 采用光谱仪采集了氮化过程发射光谱, 并采用高速摄像拍摄了光谱发射区域照片。试验表明, 光纤激光气体氮化 Ti-6Al-4V 合金过程中, 光谱发射区可以导电, 形成了金属蒸汽等离子体, 这与 CO<sub>2</sub> 激光气体氮化钛合金工艺过程中形成的氮等离子体完全不同。采用光纤激光氮化 Ti-6Al-4V 钛合金工艺过程中, 工艺参数显著影响金属蒸汽等离子体的数量, 当激光功率较大, 扫描速度较小, 离焦量较小和氮气含量较高时, 光谱发射区可产生金属蒸汽等离子体。氮化过程发射光谱由连续光谱和线状光谱组成, 连续光谱主要由热辐射产生, 连续光谱强度可以表征光谱发射区温度, 线状光谱主要由等离子体区域原子核外电子跃迁产生, 线状光谱强度可以表征等离子体数量。氮化过程, 随激光功率增大或扫描速度减小, 连续光谱和线状光谱增强, 表明光谱发射区温度升高, 等离子体数量增加; 随离焦量增大, 连续光谱和线状光谱呈先减小后增大之后又减小的复杂变化趋势, 表明光谱辐射区温度先降低后升高之后又降低, 等离子体数量先减少后增加之后又减少; 氮气中加入少量氩气, 可强烈影响氮化过程, 使连续光谱和线状光谱大幅减弱, 随氩气流量进一步增加, 线状光谱和连续光谱继续减弱, 表明氮气中加入少量氩气使光谱发射区温度大幅降低, 等离子体数量大幅减小, 随氩气量进一步增加, 光谱发射区温度继续降低, 等离子体数量继续减少。

**关键词** 工艺参数; 光纤激光气体氮化; Ti-6Al-4V; 光谱发射特性; 等离子体

**中图分类号:** TG146.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)03-0961-09

## 引 言

钛合金表面激光气体氮化工艺可在钛合金表面生成与基体冶金结合的氮化层, 快速提高钛合金表面硬度和耐磨性, 具有广阔的应用前景。在过去几十年中, 众多学者对其进行了深入研究, 取得了广泛的研究成果<sup>[1-3]</sup>。但是氮化过程是否产生等离子体、等离子体对氮化工艺的作用以及工艺参数对等离子体数量的影响尚不明确, 一些学者认为等离子体对氮化过程有利, 因为等离子体通过逆韧致辐射吸收激光能量, 并发射出短波射线, 短波射线更有利于钛基体吸收<sup>[4]</sup>, 并且等离子体高速运动与基体撞击, 有利于传质过程<sup>[5]</sup>。另

一些学者认为等离子体对氮化过程有害, 因为等离子体屏蔽了激光能量, 降低了激光器与基体间的能量耦合作用<sup>[6]</sup>。多数学者认为氮化过程不能产生等离子体或者忽略了等离子体的作用<sup>[7-9]</sup>。

宾夕法尼亚大学学者研究发现, 采用 10.6 μm 长波 CO<sub>2</sub> 激光氮化钛合金过程可产生氮等离子体, 等离子体没有影响能量传输过程, 有利于增加氮化层氮含量, 并进一步研究了激光维持氮等离子体氮化方法<sup>[3, 10-11]</sup>。电子更容易通过逆韧致辐射吸收长波 CO<sub>2</sub> 激光能量, 并碰撞中性氮气, 导致中性氮气电离<sup>[12]</sup>, 短波光纤激光氮化钛合金过程是否可产生等离子体尚不明确。

采用 1.064 μm 短波光纤激光气体氮化 Ti-6Al-4V 钛合

收稿日期: 2021-03-05, 修订日期: 2021-05-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075235), 甘肃省重点研发项目(20YF3WA017), 甘肃省引导科技创新发展专项(2019ZX-08), 兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划项目(2018), 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室开放基金课题(SKLAB02019005)资助

作者简介: 郭晋昌, 1986年生, 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室副教授

e-mail: guojinchang2008@163.com \* 通讯作者 e-mail: shiyu@lut.cn

金,用探针法检测光谱发射区导电性,研究光谱发射区是否形成等离子体,采用光谱仪和高速摄像系统拍摄光谱发射区,研究激光功率、离焦量、激光扫描速度和气体成分对光谱特性、光谱发射区温度和等离子体的数量影响。

## 1 实验部分

采用钛合金 Ti-6Al-4V 板材,其化学成分如表 1。板材的厚度为 8 mm,试验前采用线切割将其切割成 100 mm×80 mm 的试块。试验选用工业纯氮气和纯氩气。试验激光器为 IPG 高功率光纤激光器,型号为 YLS-4000,最大输出功率为 4.0 kW,激光波长为 1.064 μm,激光器输出连续激光,激光光斑为圆形,焦点处光斑直径为 3 mm。光纤激光头搭载在六轴 KUKA 工业机器人手臂上。

表 1 Ti-6Al-4V 化学成分

Table 1 Chemical component of Ti-6Al-4V

化学元素	含量/%	化学元素	含量/%
Al	5.9	C	0.09
V	4.1	N	0.05
Fe	0.28	Ti	其余

试验系统如图 1,氮化试验在大气环境下进行,未采用真空室,氮气喷嘴中心轴线和激光束中心轴线相重合。采用探针法研究氮化区是否形成等离子体,将 5 V 电池与万用表

串联,并串联两个钨极,将钨极尖端置于光谱发射区,钨极尖端相距 2 mm,检测光谱发射区导电性。采用荷兰 Avantes 公司的 10 通道光谱仪采集氮化过程发射光谱,光谱仪型号为 AvaSpec-ULS3648-X-USB2,测量波长范围 200~1 075 nm,最高光学分辨率 0.05 nm(FWHM),波长精度±0.02 nm,积分时间 10 μs~10 min,本研究中所有试验积分时间都是 375 μs。采用 OLYMPUS ispeed 3 高速摄像机拍摄光谱发射区域照片,高速摄像系统采样率范围为 1~3 000 Hz,配尼康 AF MIC RO 200 mm 1:4D 微距镜头,选用电弧焊接面罩黑玻璃对发射光谱进行滤波。

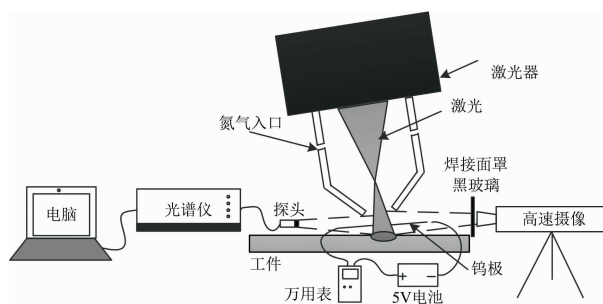


图 1 试验系统

Fig. 1 Experimental system

本研究试验工艺参数如表 2,采用单变量法进行研究,即分别研究激光功率、离焦量、激光扫描速度和氮气氩气比例对光谱特性、光谱发射区温度和等离子体数量的影响。

表 2 工艺参数

Table 2 Process parameters

分组	功率/kW	离焦量/mm	扫描速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	氮氩比	气体流量/(L·min <sup>-1</sup> )
1	3.0	0	0(定点)	10:0	10
2	1.5/2.0/2.5/3.0/3.5/4.0	0	0(定点)	10:0	10
3	3.0	0/5/10/15/20/25	0(定点)	10:0	10
4	3.0	0	2/4/6/8/10/12	10:0	10
5	3.0	0	0(定点)	10:0/8:2/6:4/4:6/2:8/0:10	10
6	3.0	0	0(定点)	9.5:0.5/9:1/8.5:1.5	10

## 2 结果与讨论

### 2.1 光纤激光致等离子体

采用图 1 中串联电路(探针法)判断光谱发射区导电性,并明确光谱发射区是否形成等离子体。采用表 2 中工艺参数进行氮化试验,试验过程万用表显示 10~40 mA 电流,证明光谱发射区形成了等离子体。

研究中,功率密度较大时,可观察到强烈的发光现象。采用表 2 中第 1 组参数进行氮化试验,用高速摄像系统拍摄光谱发射区照片,如图 2 所示。图 2 中发光区域存在等离子体,该区域底部仅仅贴合钛合金试样,且亮度极高,顶部受气流作用有扰动现象,亮度偏弱,其整体形貌非常像是从钛基体内燃烧起来的“火苗”。



图 2 发射光谱区域

Fig. 2 Emission spectrum region

文献[12]采用长波 CO<sub>2</sub> 激光气体氮化钛合金,发现长波 CO<sub>2</sub> 激光可导致氮气电离,作者认为 CO<sub>2</sub> 激光可以加热钛试样表面杂质并导致其蒸发,杂质蒸汽中发生少量热电离,形成少量自由电子,这些电子通过逆韧致辐射吸收 CO<sub>2</sub> 激光

能量，进而碰撞中性氮气分子，导致氮气发生“雪崩”式电离，形成高密度氮等离子体。与长波 CO<sub>2</sub> 激光相比，本研究采用的短波光纤激光对电子加热能力小几个数量级，杂质蒸汽通过热电离形成的少量电子无法吸收短波光纤激光能量，光纤激光氮化钛合金过程中无法通过文献[12]中的机制形成氮等离子体。但是短波光纤激光更容易被钛合金基体吸收，光纤激光对基体加热能力大幅提高，熔池温度大幅提高，可形成大量 Ti-6Al-4V 合金蒸汽，并通过热电离形成金属蒸汽等离子体。故本研究中短波光纤激光氮化钛合金过程形成了钛合金蒸汽等离子体，这与长波 CO<sub>2</sub> 激光氮化钛合金过程形成的氮等离子体是不同的。

采用表 2 中第 1 组参数进行氮化实验，采集了发射光谱，并对发射光谱进行诊断，诊断结果如图 3，金属蒸汽等离子体是由大量钛原子(Ti I)和钛一次离子(Ti II)组成。实验表明金属蒸汽的能量高于钛一次离子电离能，但是低于钛

二次离子电离能。对本研究中其他试验的发生光谱进行诊断，得到类似结论，金属蒸汽等离子体中含有大量钛原子(Ti I)和钛一次离子(Ti II)。实验还发现工艺参数显著影响线状光谱强度和金属蒸汽等离子体数量，2.2—2.5 节进行详细分析。

### 2.2 功率对光谱特性的影响

采用表 2 中第 2 组参数进行激光气体氮化试验，发射光谱如图 4 所示。激光功率为 1.5 kW 时，仅仅 1 064 nm 波长附近出现较强发射光谱，本试验激光波长是 1 064 nm，图 4 中 1 064 nm 附近强光谱是气体散射激光造成的，本研究所有试验都会在 1 064 nm 附近采集到强发射光谱。图 4 中，发射光谱由连续光谱和线状光谱组成，连续光谱和线状光谱变化趋势相同，但不是完全呈正比例，本研究所有试验中连续光谱与线状表现出类似变化趋势。

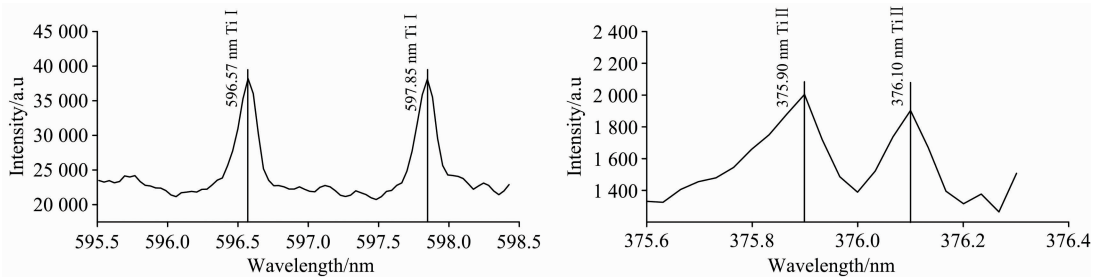
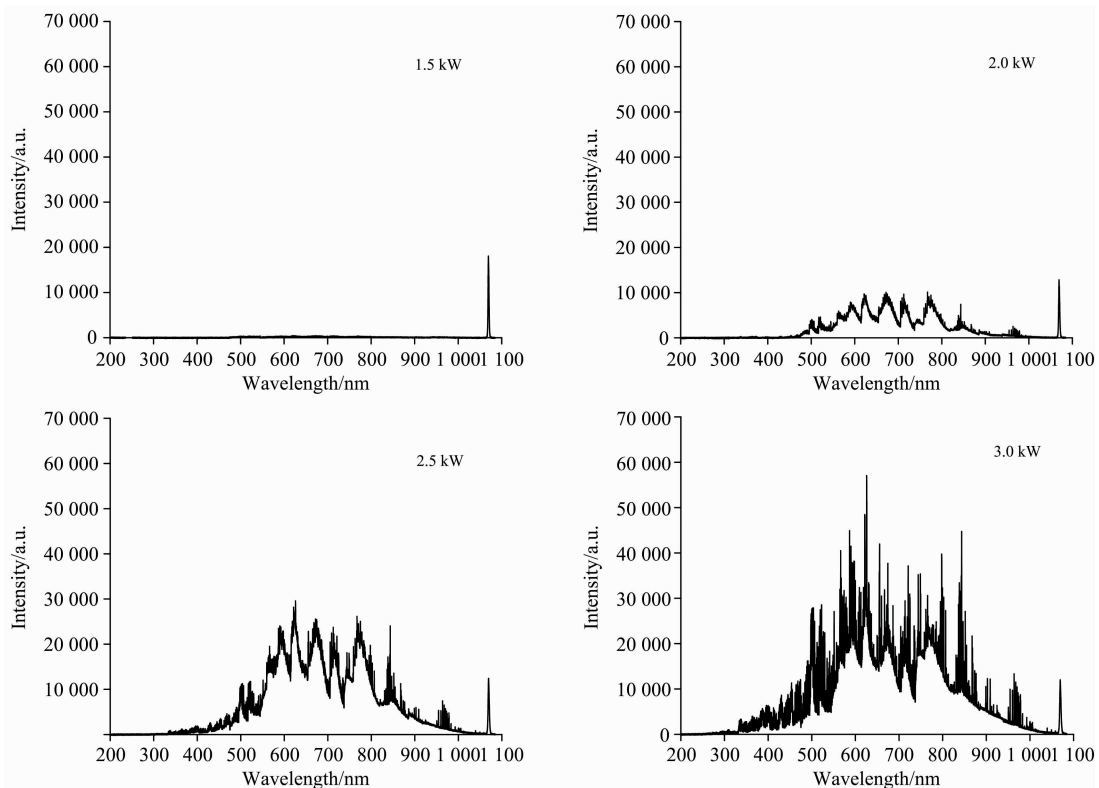


图 3 光谱诊断结果

Fig. 3 The result of spectral diagnosis



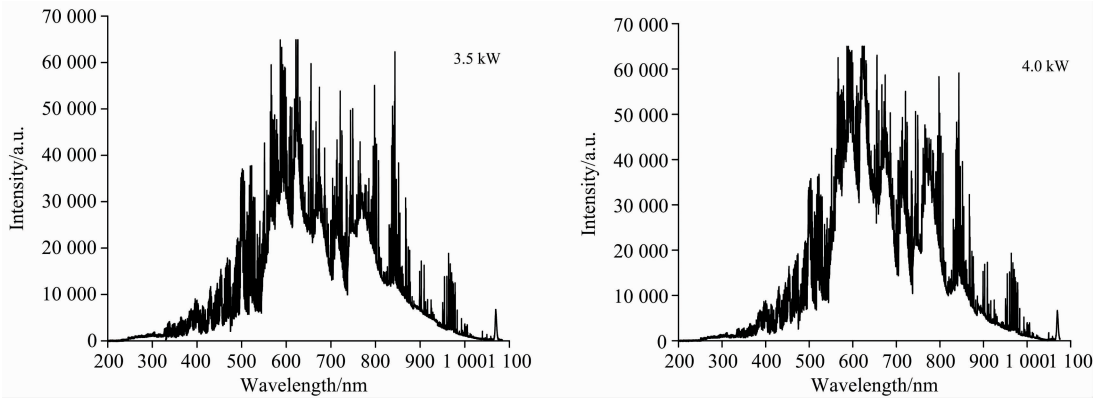


图 4 功率对发射光谱的影响

Fig. 4 Effect of power on emission spectrum

文献[13]采集了不同电流的电弧发射光谱, 电弧光谱中存在连续光谱, 由于连续光谱由热辐射和韧致辐射等过程产生, 其中热辐射占主要部分, 所以较大电流导致电弧温度升高, 连续光谱增强。文献[14]研究了水下湿法焊接引弧过程等离子体电子数密度, 引弧光谱中存在线状光谱, 线状光谱主要由等离子体区域原子核外电子由激发态跃迁到基态时产生, 所以等离子体密度越高线状光谱越强。以上分析表明连续光谱强度可以大致表征光谱发射区温度, 线状光谱的强度可以大致表征等离子体的数量。图 4 中随着激光功率增大, 连续光谱和线状光谱都呈现增强趋势, 表明随着激光功率增大, 光谱发射区域温度升高, 并且等离子体的数量不断增加。功率小于 2.5 kW 时, 只有连续光谱, 功率大于 2.5 kW 时出现明显的线状光谱, 证明此时可形成等离子体。图 5 为光谱发射区高速摄像照片, 图 5(a)激光功率为 2.0 kW, 图 5(b)激光功率为 2.5 kW, 图 5(b)中等离子体区亮度比图 5(a)大幅提高, 并且面积大幅增大, 证明产生等离子体时, 亮度会大幅提高。文献[15]采用 CO<sub>2</sub> 激光器气体氮化钛合金, 发现激光功率大于 3.5 kW, 即激光功率密度大于  $6.6 \times 10^3 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$  时, 可产生氮等离子体。本研究采用 3.0 kW 光纤激光气体氮化 Ti-6Al-4V 合金, 激光能量分布为高斯模型, 焦平面中心点最大功率密度为  $2.3 \times 10^2 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 氮化过程形成了金属蒸汽等离子体, 表明光纤激光氮化钛合金过程形成金属蒸汽等离子所需要的激光功率密度更低。

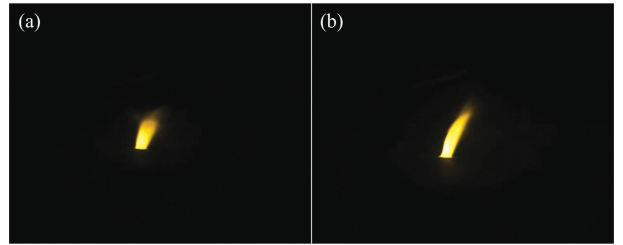


图 5 光谱发射区

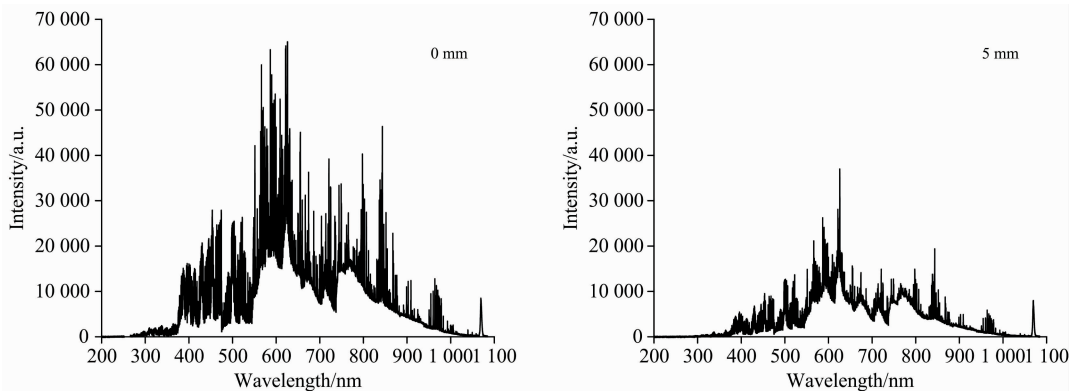
(a): 2.0 kW; (b): 2.5 kW

Fig. 5 Emission spectrum region

(a): 2.0 kW; (b): 2.5 kW

### 2.3 离焦量对光谱特性的影响

采用表 2 中第 3 组参数进行激光气体氮化试验, 发射光谱如图 6。随着离焦量的增大, 连续光谱和线状光谱都出现先减弱后增强, 之后又减弱的复杂变化趋势, 文献[4]研究离焦量变化对 CO<sub>2</sub> 激光致光谱发射特性变化, 试验现象与本研究相似。增大离焦量, 光斑面积增大, 激光功率密度降低, 故光谱呈减弱趋势; 但是增大离焦量, 光斑面积增大, 形成更多钛蒸汽, 故光谱有增强的趋势; 以上相互矛盾的因素共同作用, 造成光谱随离焦量复杂的变化趋势。离焦量从 10 mm 依次增大到 25 mm, 因为激光功率不变, 加热区域面积增大, 气体温度少量降低, 导致连续光谱少量减弱; 但是气体温度降低, 引起等离子体大量复合, 导致线状光谱大幅度



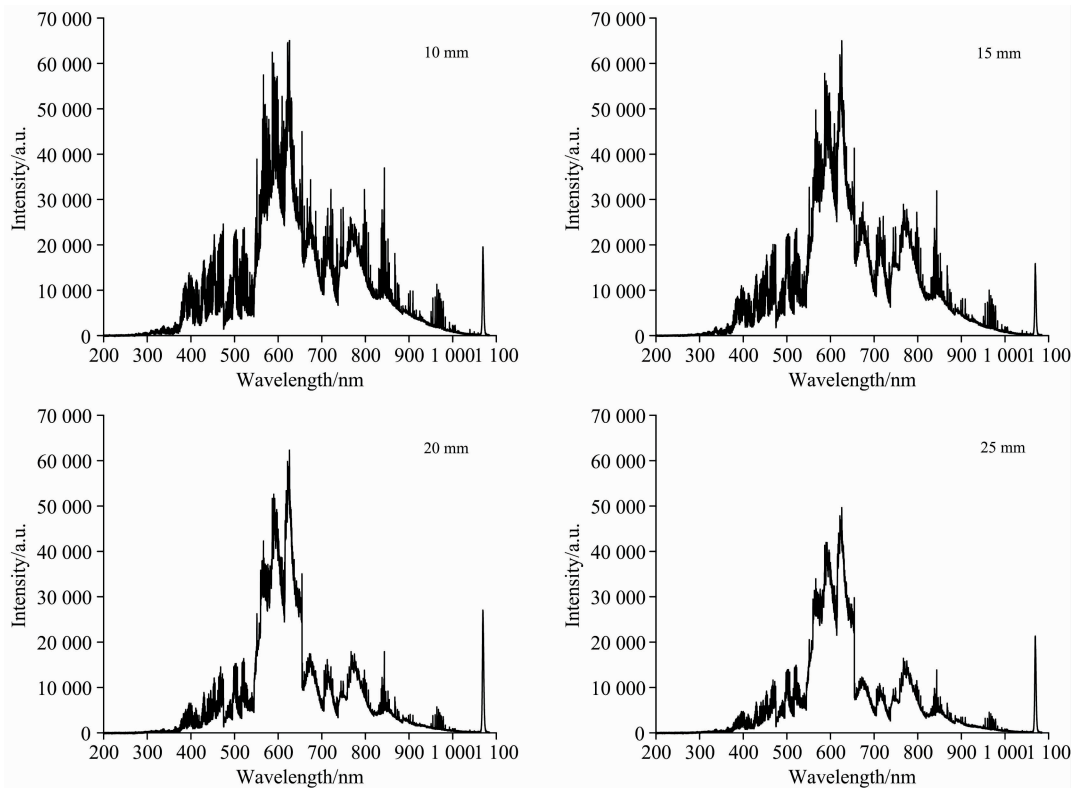


图 6 离焦量对发射光谱的影响  
 Fig. 6 Effect of defocus distance on emission spectrum

减弱。离焦量大于 20 mm 时，线状光谱非常微弱，证明此时等离子体的量非常少。总体而言，离焦量从 0 mm 依次增大到 25 mm，等离子体数量随线状光谱强度变化，表现出先减少后增多，之后又减少的复杂变化趋势。

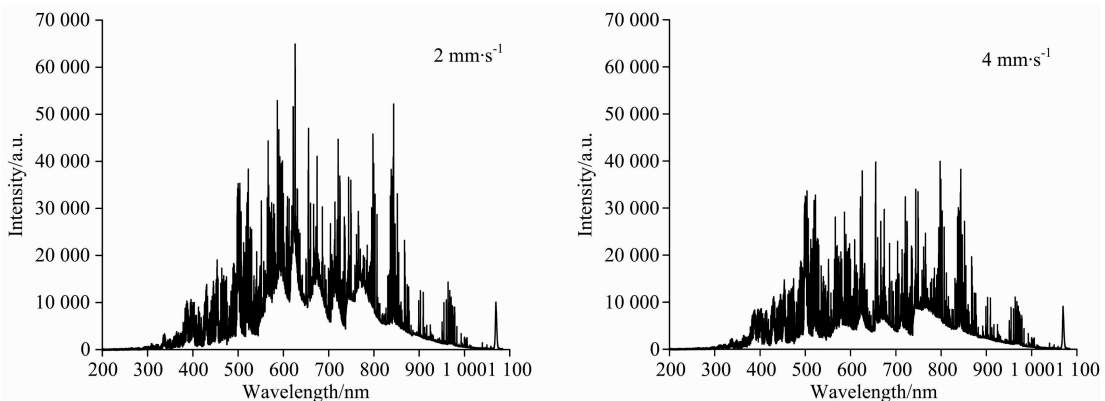
2.4 扫描速度对光谱特性的影响

采用表 2 中第 4 组参数进行激光气体氮化试验，发射光谱如图 7，由于扫描速度增大，施加到试样单位面积上的能量减小，温度降低导致热辐射减小，能量密度降低导致等离子体数量减少，故连续光谱和线状光谱都呈减弱趋势。如图 4 和图 6，定点氮化时存在热积累，所以线状光谱比连续光谱减弱更快；如图 7，连续氮化过程热积累更小，所以随扫描速度增大，连续光谱和线状光谱减弱的速度相当。另外，当扫描速度达到  $12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时，线状光谱已经非常微弱了，证

明激光扫描速度大于  $12 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时，不能产生等离子体。

图 8 为氮化层表面照片，本研究未对工艺参数进行优化，故氮化轨道没有 TiN 特有的金黄色。图 8 中可见，扫描速度较大时，氮化轨道宽度少量减小。氮化轨道均表现出中间光滑两侧粗糙的特点。文献[3]认为，熔池受热膨胀，结合马兰戈尼对流的影响，导致熔池表面液态金属外溢，形成了粗糙区。

图 9 为氮化层横截面照片，横截面采用砂纸打磨，并采用 3% HF 和 5% HNO<sub>3</sub> 混合溶液进行了腐蚀。图 9 中激光扫描速度从左往右依次增大。图中氮化区、热影响区和基体清晰可见，而且随激光扫描速度增大，氮化区和热影响区的尺寸都明显减小。氮化层和热影响区深度随热输入变化如图 10，热输入较大时，氮化层和热影响深度增加速度减小，这是



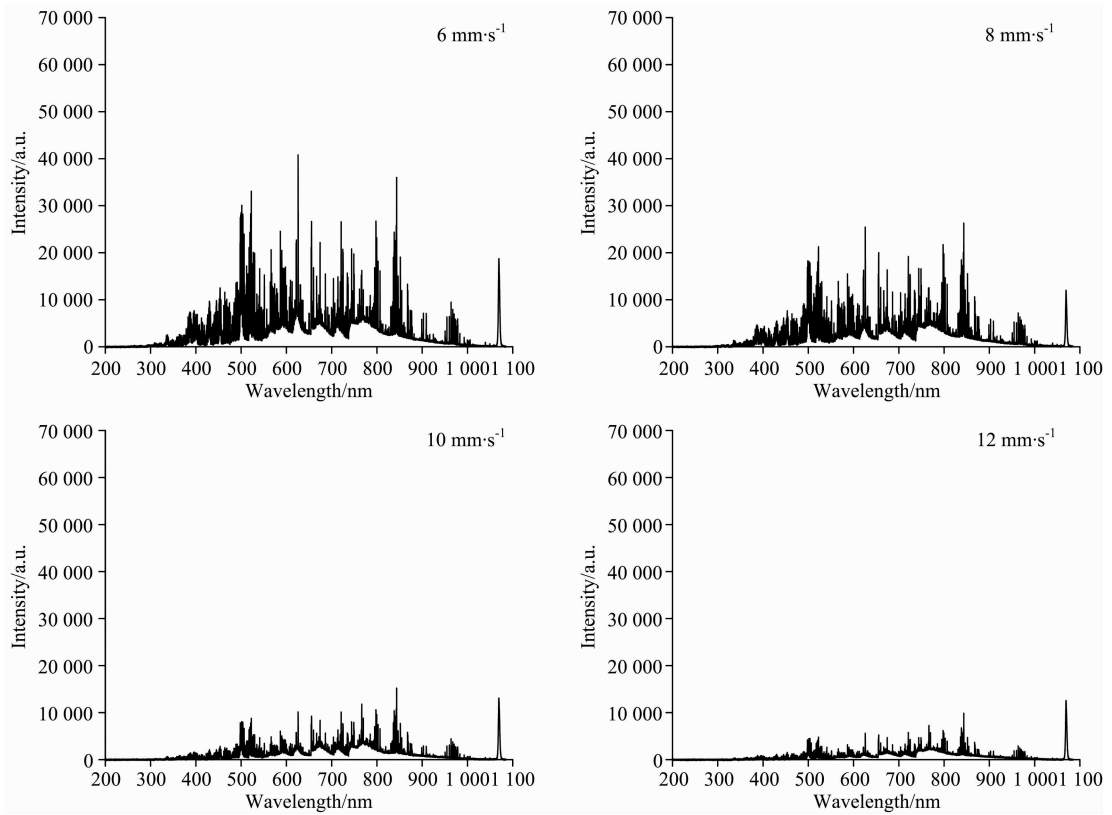


图 7 扫描速度对发射光谱的影响

Fig. 7 Effect of scanning speed on emission spectrum

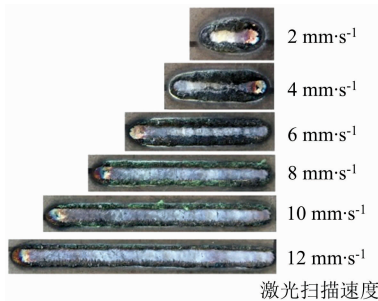


图 8 氮化层表面

Fig. 8 The surface of nitride layer

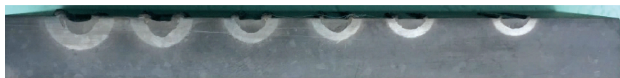


图 9 氮化层横截面

Fig. 9 Cross section of nitride layer

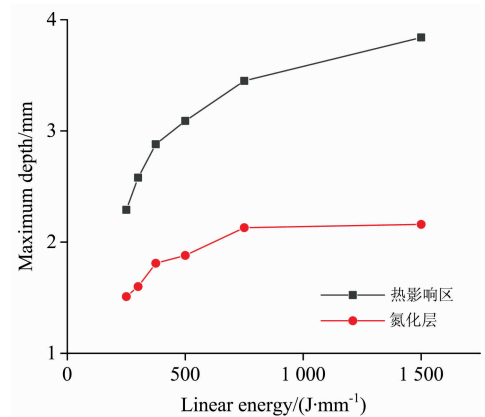


图 10 氮化层和热影响区深度

Fig. 10 Depth of nitride layer and heat effected zone

由于热输入较大时产生了更多等离子体，屏蔽了部分激光能量。文献[16]研究发现，光纤激光焊铝合金可导致合金中Mg元素电离，屏蔽大量激光能量，所以热输入增大时焊缝熔深增大更慢，与本研究结论一致。

### 2.5 氮氩比对光谱特性的影响

钛合金表面激光气体氮化的难点之一是氮化层容易开裂，采用氩气对氮气进行稀释，可有效避免氮化层开裂<sup>[3, 17]</sup>。本研究总气流量保持  $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ，采用氩气稀释

氮气，并进行氮化试验，研究了氮氩比对光谱发射特性和等离子体数量的影响。采用表 2 中第 5 组参数进行激光气体氮化试验，发射光谱如图 11，氮气和氩气比例为 0 : 1 和 2 : 80 时，光谱曲线与图 4 中激光功率为 1.5 kW 的曲线类似，几乎检测不到光谱信息，故文中未展示这两条曲线。图 11 中可见，随着氩气含量的增加，连续光谱和线状光谱都会减弱，这是由于加入氩气使氮气稀释，进入熔池的氮元素数量减少，氮气和钛金属的反应本身就是放热反应，所以熔池温度降低，蒸发量减少，等离子体量减少，空间温度降低，进而连

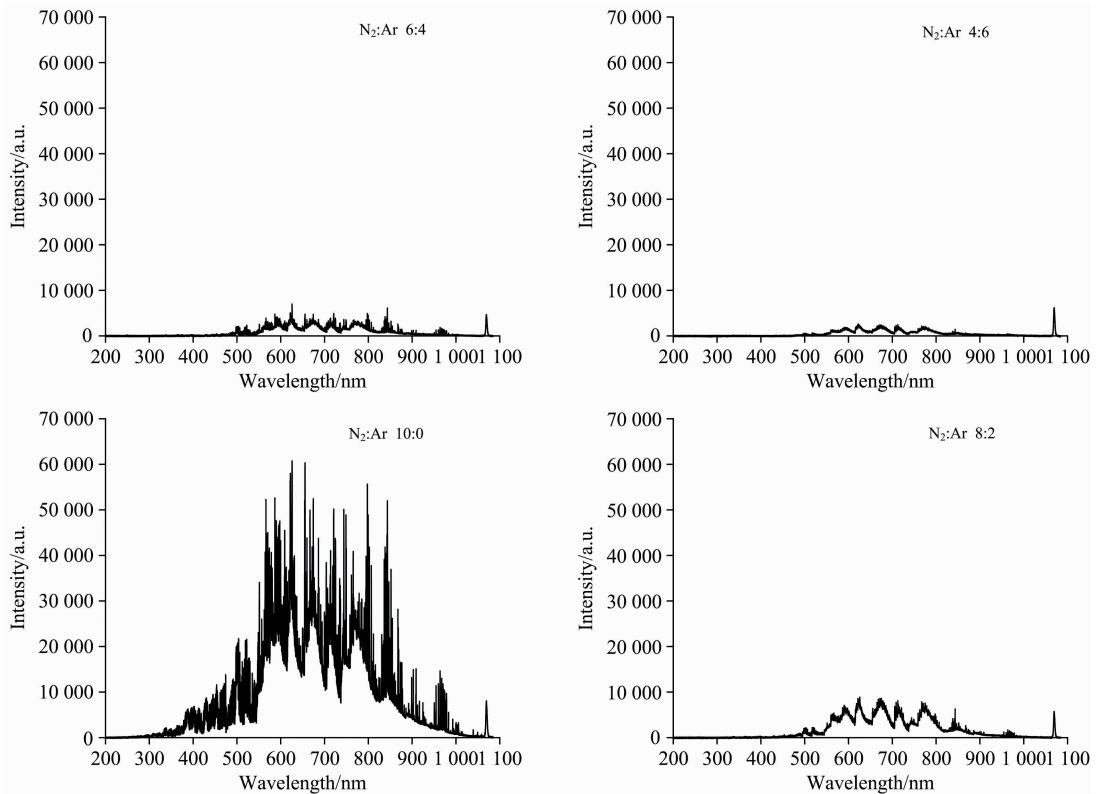


图 11 氮氩比例对发射光谱的影响

Fig. 11 Effect of nitrogen argon ratio on emission spectrum

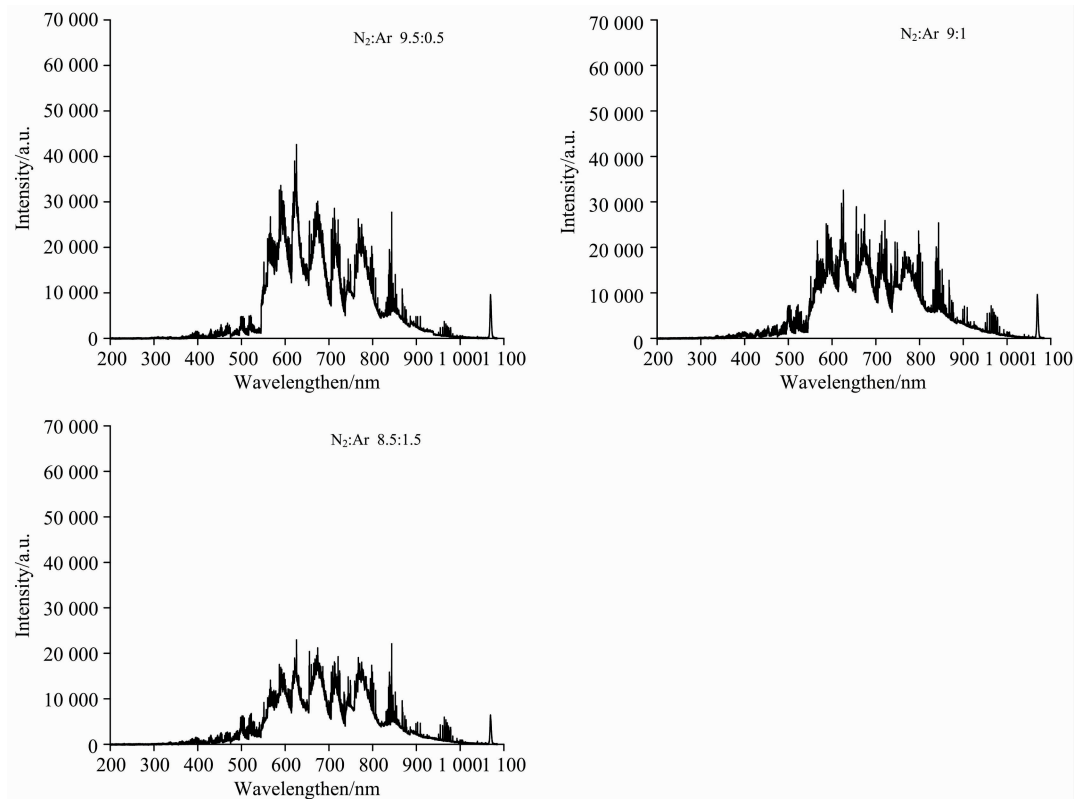


图 12 氮氩比例对发射光谱的影响

Fig. 12 Effect of nitrogen argon ratio on emission spectrum

续光谱和线状光谱都会减弱。

图 11 中可见,加入少量的氩气(20%)时,让连续光谱和线状光谱都大幅减弱。加入少量氩气不仅稀释了氮气,更重要的是改变氮气进入熔池及氮元素在熔池中的传输方式<sup>[3]</sup>。不加氩气时,熔池会发生马兰戈尼对流,将氮元素带入熔池内部;加入少量氩气,熔池不再发生对流,氮气必须通过扩散的方式进入熔池,并在熔池中以扩散的方式传递,扩散速度较慢,表面富氮层阻碍更多氮进入熔池,因此加入少量氩气可大幅减少熔池中氮含量,降低熔池温度,减少钛金属蒸发量,进而连续光谱和线状光谱都大幅减弱,等离子体数量大幅减少。本研究光谱信息证明了文献<sup>[3]</sup>的研究成果,即氮气中加入少量氩气,可强烈影响氮化过程。

为了进一步明确加入氩气对发射光谱和等离子体数量的影响,进行了更详细的试验。采用表 2 中第 6 组参数进行激光气体氮化试验,发射光谱如图 12 所示。加入 5% 的氩气使得线状光谱大幅减少,等离子体数量大幅减少,这进一步证明了前面的结论,加入少量氩气,可剧烈改变氮化过程。另外氩气从 5% 增大到 15% 时,连续光谱也不断减弱。结合图 11 和图 12,发现氩气含量大于 15% 时,线状光谱非常少,证明此时等离子体的量非常少。

### 3 结 论

(1) 短波光纤激光气体氮化 Ti-6Al-4V 钛合金过程中,

基体对激光吸收率高,导致熔池温度高,大量基体蒸发形成金属蒸汽,金属蒸汽通过热电离形成等离子体。

(2) 当激光功率较大,扫描速度较小,离焦量较小和氮气含量较高时,光谱发射区可产生金属蒸汽等离子体。

(3) 光纤激光气体氮化 Ti-6Al-4V 钛合金,发射光谱由连续光谱和线状光谱组成。连续光谱主要由热辐射产生,连续光谱的强度可表征光谱发射区温度,线状光谱主要由等离子体区域的原子核外电子跃迁形成,线状光谱的强度可以大致表征等离子体数量。线状光谱和连续光谱随工艺参数变化趋势相同,但是并不呈正比例。

(4) 随激光功率增大或扫描速度减小,连续光谱和线状光谱都呈增加趋势;随离焦量增大,连续光谱和线状光谱呈先减小后增大,之后又减小的复杂变化趋势。氮气中加入少量氩气,强烈影响氮化过程,使连续光谱和线状光谱大幅减弱,随氩气含量增加,连续光谱和线状光谱会进一步减弱。光谱发射区温度与以上连续光谱变化趋势相同,光谱发射区等离子体数量与以上线状光谱变化趋势相同。

### References

- [1] Zeng C, Wen H, Ettefagh A H, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 385: 125397.
- [2] Ohtsu N, Saito W, Yamane M. *Surface and Interface Analysis*, 2019, 51(3): 302.
- [3] Kamat A M, Copley S M, Todd J A. *Acta Materialia*, 2016, 107: 72.
- [4] Akarapu R K, Dua P, Campbell A, et al. *MRS Proceedings*, 2007, 1040: Q08-02.
- [5] Giren B G. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1993, 13(1): 133.
- [6] Abboud J H, Fidel A F, Benyounis K Y. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(2): 405.
- [7] Senthilselvan J, Monisha K, Gunaseelan M, et al. *Materials Characterization*, 2020, 160: 110118.
- [8] Dahotre S N, Vora H D, Pavani K, et al. *Applied Surface Science*, 2013, 271: 141.
- [9] Dahotre S N, Vora H D, Rajamure R S, et al. *Annals of Biomedical Engineering*, 2014, 42(1): 50.
- [10] Kamat A M, Copley S M, Todd J A. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 313: 82.
- [11] Kamat A M, Copley S M, Segall A E, et al. *Coatings*, 2019, 9(5): 283.
- [12] Hermann J, Boulmer Leborgne C, Mihailescu I N, et al. *Journal of Applied Physics*, 1993, 73(3): 1091.
- [13] DUAN Zheng-chao, ZHANG Tian-liang, LIANG Chun-xia, et al(段正超, 张天亮, 梁春霞, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2019, 39(6): 1935.
- [14] LI Zhi-gang, XU Xiang, LI Yang, et al(李志刚, 徐翔, 李洋, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2020, 40(11): 3404.
- [15] Nassar A R, Akarapu R, Copley S M, et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(18): 185401.
- [16] Gao M, Chen C, Hu M, et al. *Applied Surface Science*, 2015, 326: 181.
- [17] Kaspar J, Bretschneider J, Jacob S, et al. *Surface Engineering*, 2007, 23(3): 99.



# Study of Spectral Emissions Characterization and Plasma During Fiber Laser Gas Nitriding of Titanium Alloy

GUO Jin-chang<sup>1,2</sup>, SHI Yu<sup>1\*</sup>, GU Yu-fen<sup>1</sup>, ZHANG Gang<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China
2. College of Mechanical Engineering, Longdong University, Qingyang 745000, China

**Abstract** Laser gas nitriding technology can quickly generate a nitride layer on the surface of titanium alloy, improve the surface hardness and wear resistance of titanium alloy, and promote the application of titanium alloy. Fiber laser was used to nitride of Ti-6Al-4V alloy, the electrical conductivity of the spectral emission region was measured using the probe method to define whether a plasma was formed in the spectral emission region during the nitriding process. The emission spectra of nitriding process were collected using a spectrograph. The spectral emission region was photographed using a high-speed camera to study the effect of process parameters on spectral characteristics, the temperature of spectral emission region the quantity of plasma. Experiments show that the spectral emission region can conduct electricity during the process of fiber laser gas nitride of Ti-6Al-4V alloy, which indicates that the metal vapor plasma was formed in the spectral emission region. This was completely different from the nitrogen plasma formed in the process of CO<sub>2</sub> laser gas nitriding of titanium alloy. The number of metal vapor plasma was significantly affected by the process parameters during the process of fiber laser nitriding of Ti-6Al-4V titanium alloy. The metal vapor plasma can be produced in the spectral emission region when the laser power is higher, the scanning speed is lower, the defocusing is low, and the nitrogen content is high. The emission spectrum of the nitriding process is composed of continuous spectrum and liner spectrum. The continuous spectrum is mainly generated by thermal radiation, and the intensity of the continuous spectrum can represent the temperature of the spectrum emission region. The linear spectrum is mainly generated by the extranuclear electron transition of the plasma region, and the intensity of the linear spectrum can represent the quantity of the plasma. In the nitriding process, with the increase of laser power or the decrease of scanning speed, the continuous spectrum and linear spectrum were enhanced, indicating that the temperature of the spectral emission region increases and the number of plasma increases. As the defocus increases, the continuous spectrum and linear spectrum show a complex trend of decreasing first, then increasing and decreasing at last, which indicates that the temperature of the spectral emission region decreases first, then increase and decrease at last, and the number of plasma decreasing first, the increasing and decrease at last. Added a small amount of argon gas, nitriding process can be significantly influenced, the continuous spectra and linear spectra weakened dramatically, with the further increase of argon content, the linear spectrum and continuous spectrum continue to weaken, which indicated that the addition of a small amount of argon to nitrogen reduces the temperature of the spectral emission region and the number of plasma. With the further increase of the amount of argon, the temperature of the spectral emission continues to decrease, and the number of plasma continues to decrease.

**Keywords** Process parameter; Fiber laer nitriding; Ti-6Al-4V; Spectral Emissions Characterization; Plasma

(Received Mar. 5, 2021; accepted May 14, 2021)

\* Corresponding author