

# 激光维持等离子体钛合金表面渗氮研究进展

郭晋昌<sup>1,2</sup>, 石玕<sup>1</sup>✉, 耿培彪<sup>1</sup>, 朱明<sup>1</sup>

1 兰州理工大学省部共建有色金属先进材料加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050

2 陇东学院机械工程学院, 庆阳 745000

钛合金具有强度高、密度小等诸多优点, 在航空航天等行业具有广阔的应用前景, 但是硬度低和耐磨性差限制了其进一步应用。利用物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)等方法可提高钛合金表面硬度和耐磨性, 但是这些方法存在效率低等缺点。钛合金表面激光气体渗氮可快速提高钛合金表面硬度和耐磨性, 但是渗氮工艺复杂, 需要解决很多科学和技术问题。国内学者开始重视此方面研究, 国外学者的研究已经取得了一些成果, 目前的研究热点是渗氮过程的机理和等离子体对渗氮过程的影响。

最近几年, 国外学者采用高速摄像配合不同波长的透镜对等离子体进行系统化拍摄研究, 对氮等离子体产生的条件以及等离子体对能量传输、防止渗氮层氧化、增加渗氮层氮含量的作用有了较深入的认识。目前的研究认为氮离子对激光渗氮是有益的, 并且等离子体是实现高质量渗氮的核心。在以上研究的基础上, 发展了激光维持等离子体渗氮方法, 该方法采用激光诱导产生氮等离子体, 并在大激光功率、大离焦距离和大扫描速度的工艺参数下渗氮; 进一步研究了离焦距离、扫描速度及氮氩比例等工艺参数对激光维持等离子体渗氮过程的影响。激光维持等离子体渗氮层容易开裂, 为解决渗氮层开裂问题, 发展了两步法激光维持等离子体渗氮方法: 第一步激光诱导产生氮等离子体, 实现基体大量渗氮; 第二步在氩等离子体中用激光重熔渗氮层, 消除裂纹。两步渗氮法增强了对渗氮层性能的控制能力, 可使得渗氮层性能更优。另外, 对渗氮过程进行了定量研究, 发现激光扫描速度与钛合金表面熔池存在时间呈线性关系, 并且激光扫描速度与渗氮层氮含量呈线性关系, 渗氮层硬度和树枝晶含量也呈线性关系; 最后研究了两步法激光维持氮等离子体渗氮层的耐磨性, 提出渗氮层耐磨性增强的机理。

本文综述了激光维持等离子体钛合金表面渗氮的研究进展, 分别介绍了等离子体的作用, 激光维持等离子体渗氮方法, 两步法激光维持等离子体渗氮方法, 提出了未来亟需解决的重点问题及有效的研究方法, 为未来的研究工作提供参考。

关键词 激光维持等离子体 钛合金 激光渗氮 两步法渗氮

中图分类号: TG146.2 文献标识码: A

## Research Progress on Laser-sustained Plasma Surface Nitriding of Titanium Alloys

GUO Jinchang<sup>1,2</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>✉, GENG Peibiao<sup>1</sup>, ZHU Ming<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

Titanium alloys has many advantages such as high strength and low density, and has broad application prospects in aerospace and other industries, but its low hardness and poor wear resistance limit its further application. Physical vapor deposition (PVD) and chemical vapor deposition (CVD) can improve the surface hardness and wear resistance of titanium alloy, but these methods have disadvantages such as low efficiency. Laser nitriding of titanium alloy can quickly improve surface hardness and wear resistance of the titanium alloy, but the nitriding process is complicated and many scientific and technical problems need to be solved. Domestic scholars have begun to pay attention to this research, foreign scholars have made some achievements. The current research focus on the mechanism of nitriding process and the effect of plasma on nitriding process.

In recent years, foreign scholars have used high-speed imaging with different wavelengths of lenses to systematically study plasma, the conditions for the generation of nitrogen plasma as well as the role of plasma on energy transmission, prevent oxidation and the increase nitrogen content in nitrided layer have been deeply understood. At present, it is considered that nitrogen plasma is beneficial to laser nitriding, and plasma is the core to obtain high quality of nitride layer. Based on the above research, a laser-sustained plasma nitriding method has been developed in this method, nitrogen plasma is induced by laser, nitriding is performed under the parameters of large laser power, large defocus distance and large scanning speed; the effects of process parameters such as defocus distance, scanning speed and nitrogen-argon ratio on laser-sustained plasma nitriding process were further studied. The laser-sustained plasma nitride layer is easy to crack, in order to avoid cracking of nitriding layer, two-step laser-sustained plasma nitriding method was also developed, the first step is use laser-induced nitrogen plasma to achieve a large amount of nitrogen content of the substrate; the second step is to remelt the nitrided layer by laser in argon plasma to eliminate cracks. The two-step nitriding method enhances the ability to control the performance of the nitrided layer, the nitrogen layer performance is better. In addition, a quantitative study on the nitriding process was carried out, it was found that the laser scanning speed is directly proportional to the time of molten pool on the surface of titanium alloy and the laser scanning speed is directly proportional to the nitrogen content of nitriding layer; the hardness of the nitrided layer and the dendrite content are also linear relationship; the wear resistance of two-step laser-maintained plasma nitride layer was studied, and the mechanism of enhanced wear resistance of nitrided layer was proposed.

Research progress on laser-sustained plasma surface nitriding of titanium alloys are reviewed, the role of plasma, laser-sustained plasma nitriding and two-step laser-sustained plasma nitriding methods are introduced respectively, the key issues and effective research methods are proposed to provide reference for future research work.

**Key words** laser-sustained plasma, titanium alloy, laser nitriding, two-step nitriding method

基金项目: 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室(兰州理工大学) 开放课题(SKLAB02019005); 国家自然科学基金面上项目(51675256); 国家自然科学基金青年项目(51805234); 甘肃省基础研究创新群体计划(17JR5RA107); 甘肃省引导科技创新发展专项资金项目(2019ZX-08)

This work was financially supported by the State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology (SKLAB02019005), the National Natural Science Foundation of China (51675256), the National Natural Science Foundation of China (51805234), Innovation Group Plan for Basic Research in Gansu Province (17JR5RA107), Guide the Development of Science and Technology Innovation Special Fund Project in Gansu Province (2019ZX-08).

✉ shiyu@lut.cn

05109

DOI: 10.11896/cldb.19010094

## 0 引言

钛合金具有一些优良的性能,其密度大约为钢材的60%,强度与钢材相近,高温强度、耐腐蚀性能和生物相容性良好,在航空航天、汽车、能源、军工和医学等行业具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。钛在地壳中的含量约为0.63%,大约34亿t,被称为未来金属<sup>[2]</sup>。但是钛和钛合金的硬度低、耐磨性差,严重限制了其进一步应用<sup>[3]</sup>。表面处理可改善金属的表面性能,物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD)常用于提高钛合金的表面性能<sup>[4-7]</sup>,但是效率非常低,而且表面改性层容易脱落。

激光气体渗氮可以克服以上缺点,在氮气环境中用激光将钛合金表面熔化,氮直接进入钛基体,形成由氮化钛中间相或氮在 $\alpha$ 钛中形成固溶体的表面层,显著提高基体的硬度和耐磨性<sup>[8-11]</sup>。钛合金表面激光气体渗氮是一个非常复杂的过程,国内外学者进行了广泛的研究<sup>[12-16]</sup>。目前国外钛合金激光气体渗氮方面的研究热点是:(1)机理问题,如渗氮过程产生裂纹的机理等;(2)等离子体对渗氮过程的影响。

## 1 等离子体对激光气体渗氮的作用

早期,等离子体对钛合金表面激光气体渗氮的作用并不明确<sup>[17]</sup>,不同学者对此持不同的观点。

### 1.1 早期研究成果

20世纪90年代到本世纪初,一些学者认为氮等离子体对钛合金表面激光气体渗氮不利,因为氮气在电离过程中吸收大量激光能量,降低基体表面能量密度<sup>[18-19]</sup>。另一些学者认为等离子体对钛合金表面激光气体渗氮过程有利,原因一:等离子体的逆韧致辐射比激光更容易传递能量给基体,有利于增大钛合金表面能量密度;原因二:激光诱导的等离子体可辐射出紫外线,紫外线比激光更有利于钛合金吸收<sup>[20-22]</sup>,有利于增大钛合金表面能量密度;原因三:等离子体与基体碰撞过程中可传递能量给基体,而且等离子体的反向冲击力可帮助氮融入基体<sup>[23-24]</sup>,有利于传热和传质;原因四:氮等离子体比氧气更容易与钛基体发生作用,氮等离子体有利于防止渗氮层氧化<sup>[25]</sup>。其他研究人员只研究了渗氮过程,忽略了等离子体的作用<sup>[26-35]</sup>。

### 1.2 最新研究成果

2010年以后,国外研究人员采用高速摄像对等离子体进行系统化拍摄研究,研究发现产生氮等离子体需要钛合金的激发<sup>[36]</sup>。有两种方法可产生氮等离子体:(1)将钛丝伸入激光焦平面附近,钛丝可激发产生氮等离子体,然后将钛丝去除,在CO<sub>2</sub>激光的照射下氮气被连续不断地电离,形成连续氮等离子体;(2)离焦量足够小,当CO<sub>2</sub>激光功率大于3.5 kW,离焦量小于6 mm时,可在焦平面附近产生氮等离子体。若无钛合金,小功率CO<sub>2</sub>激光不能使氮气电离。很明显钛合金对氮等离子体的产生有重要作用,具体作用机理尚不明确,可能是由于钛的电离能低于氮,钛或表面杂质电离后对氮的电离起到诱导或激发的作用。

研究发现,氮等离子体没有降低基体表面能量。文献[36]进行了对比试验,图1是渗氮层横截面,激光功率、扫描

速度和离焦量相同,图1a渗氮过程有等离子体,图1b渗氮过程没有等离子体,可以看出,渗氮层深度、轮廓、树枝晶数量和分布都非常类似,证明渗氮过程到达基体的能量是一样的,等离子体没有影响到达基体的能量。文献[37]用热电偶测量了钛基体背面的温度,分别测量渗氮轨道背面和距离背面13 mm处的温度,结果如表1所示,表中LSP是激光维持等离子体的简称。从表1中可以看出,有等离子体与没有等离子体的基体温度非常接近,再一次证明等离子没有影响能量传输。表1中在氩气环境中激光照射钛合金时,背面温度略低,证明氮和基体结合时会放出热量<sup>[21, 23]</sup>。以上对比试验只能说明氮等离子体没有降低到达基体的能量,但是氮等离子体形成过程中必然吸收了能量,等离子体以何种方式将能量重新传递给基体,有待进一步研究,可能是等离子与基体碰撞过程将能量传递给了基体。

表1 基体背面温度<sup>[37]</sup>

Table 1 Temperature measurements on the back-side of the substrate<sup>[37]</sup>

Thermocouple	Maximum temperature/°C		
	Nitriding without LSP	Nitriding with LSP	Laser glazing with Ar
Under beam	170.67	171.67	152.22
13 mm away from beam	56.23	68.35	51.16

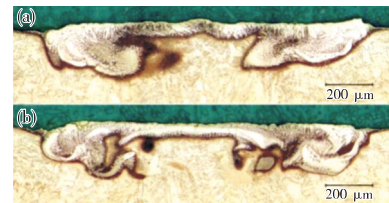


图1 渗氮层横截面:(a)渗氮过程有等离子体;(b)渗氮过程无等离子体<sup>[36]</sup>

Fig.1 Cross section of nitride: (a) there is plasma in nitriding process; (b) there is no plasma in nitriding process<sup>[36]</sup>

氮等离子体具有防渗氮层氧化的作用。宾夕法尼亚大学科研人员进行了对比试验发现,渗氮过程无氮等离子体时,渗氮层有明显的蓝紫色,渗氮层整体颜色不够鲜亮,这是由于渗氮层被氧化<sup>[38-39]</sup>;若渗氮过程有氮等离子体,则渗氮轨道呈金黄色,没有氧化痕迹。文献[38-39]认为,等离子体可以吸收氮气内部混合的少量氧气和氮气周围边界处的氧气,也有可能是在等离子体溅射过程中将氧气排出渗氮区域,从而有效防止氧化。文献[37, 40]也得出类似结论,氮等离子体可防止渗氮层氧化。未来可通过数值计算研究氮等离子体防渗氮层氧化的机理。

氮等离子体有利于增加钛基体的渗氮量。研究发现,与无氮等离子体相比,有氮等离子体渗氮层氮含量增加29%至54%。一般认为氮与钛基体作用是一个复杂过程,文献[32]认为没有氮等离子体参与时,钛合金激光气体渗氮过程如下:

- (1) 表面吸附:  $[Ti] + N_2 \rightarrow [Ti] + [N_2]$
- (2) 氮气分解:  $[N_2] \rightarrow 2[N]$
- (3) 氮传输:  $[N]_{\text{表面}} \rightarrow [N]_{\text{内部}}$
- (4) 氮化钛沉淀:  $[Ti(N)] \rightarrow TiN + [Ti(N)]'$
- (5) 熔池凝固:  $[Ti(N)]' \rightarrow TiN + \alpha Ti(N)$

以上过程中“[ ]”指溶液状态,“( )”指N固溶在钛结构

中, TiN 指氮化钛中间相, “~”表示马氏体相(标注来源于文献[32])。

文献[19]和文献[25]认为氮和钛基体作用过程与以上过程稍有差距。很明显,有氮等离子参与时氮和钛基体作用过程与以上过程有较大区别,氮气并不是先溶解到钛基体表面然后分解成氮原子。激光诱导电离的等离子运动速度可达  $10 \sim 100 \text{ km/s}$ <sup>[41]</sup>, 等离子体速度很高,与基体碰撞过程中将能量传递给基体,同时与基体作用的力较大,更容易进入基体,实现传质。

对氮等离子体的研究还得出了一些其他结论,例如氮等离子体会使熔池溶解过多氮,冷却时熔池溶解度下降,氮气外溢的同时熔池发生凝固,增大渗氮层表面粗糙度<sup>[36-38]</sup>。其他参数确定时,激光扫描速度存在最小门槛值,小于此门槛值会导致大量钛基体蒸发并形成钛等离子体,钛等离子体与氮和氧在大气中发生作用生成纳米尺度 TiN 和 TiO 颗粒,大幅减弱氮与基体的相互作用,激光和氮气移除后,渗氮层被剧烈氧化<sup>[37,40]</sup>。有氮等离子体时,渗氮层宽度更宽。总之,钛合金表面激光气体渗氮过程产生氮等离子体对渗氮过程有利,产生钛等离子体对渗氮过程非常不利,故要避免形成钛等离子体。

## 2 激光维持等离子体渗氮

在钛合金表面激光气体渗氮过程中,氮等离子体让渗氮层性能更优。将有氮等离子体参与的渗氮过程称为激光维持等离子体(Laser-sustained plasma)渗氮。激光维持等离子体渗氮一般在开放大气环境中进行,采用大离焦量和高扫描速度进行渗氮。

文献[40]系统研究了激光维持等离子体渗氮工艺。研究发现,保持其他参数不变,离焦量过大,渗氮层容易被氧化,离焦量过小,渗氮层表面更粗糙。激光焦平面附近温度最高<sup>[42]</sup>,激光焦平面不能离基体太远,增大离焦量会增大焦平面与基体的距离,使等离子体远离基体,减弱氮等离子体对基体的保护效果,导致基体氧化。较小离焦量会使等离子体靠近基体,氮在钛熔池中过饱和和固溶,冷却时氮气析出,表面粗糙度降低。试验发现,其他参数不变,随着扫描速度从  $135 \text{ mm/s}$  增大至  $300 \text{ mm/s}$ ,渗氮层表面产生更多裂纹。这是由于随着扫描速度的增大,冷却速度增大,基体产生更多淬硬的马氏体组织,产生裂纹。但激光扫描速度在  $0 \sim 300 \text{ mm/s}$  范围内时,裂纹数量并不是随扫描速度的增大而增多。文献[18-19]发现,扫描速度在  $5 \sim 50 \text{ mm/s}$  时,随扫描速度的增大,裂纹数量减少,文献[34]也发现类似现象。这是由于随扫描速度的增大,氮与熔池作用时间缩短,渗氮层含氮量减少, TiN 树枝晶密度减小,塑性增大,导致裂纹密度较低。因此,裂纹密度受氮含量和冷却速度的共同作用,可以推断,扫描速度在  $5 \sim 300 \text{ mm/s}$  范围内变化时,随扫描速度增大,裂纹数量先减少后增多。文献[43-44]研究发现,普通激光气体渗氮过程中,氮气中混入氩气可降低基体开裂趋势,文献[40]详细研究了激光维持等离子体渗氮过程中加入氩气的影响。如果不加入氩气,熔池表面存在表面张力梯度,引起马兰戈尼对流,将氮含量高的钛液体输送到熔池内部,将氮

含量低的钛液体输送到熔池表面,有利于进一步渗氮。加入氩气可显著降低熔池的表面张力梯度,显著降低马兰戈尼对流,氮通过扩散进入熔池表面,表面富氮层阻碍进一步渗氮,熔池氮含量显著减少。当加入氩气使氮气体积浓度降低 11% 时,熔池氮质量可减少 60%。加入氩气使马兰戈尼对流的趋势减小,渗氮层表面变得更光滑。图 2 为渗氮层表面 SEM 照片,当氮氩体积流量比为 16:2 或 16:3 时,渗氮层中心变得很光滑。目前尚未研究氩气减弱马兰戈尼对流的机理。温度梯度引起表面张力梯度,进而引起马兰戈尼对流。因此欲研究氩气减弱马兰戈尼对流的机理,首先要研究氩气对温度场和表面张力的影响。

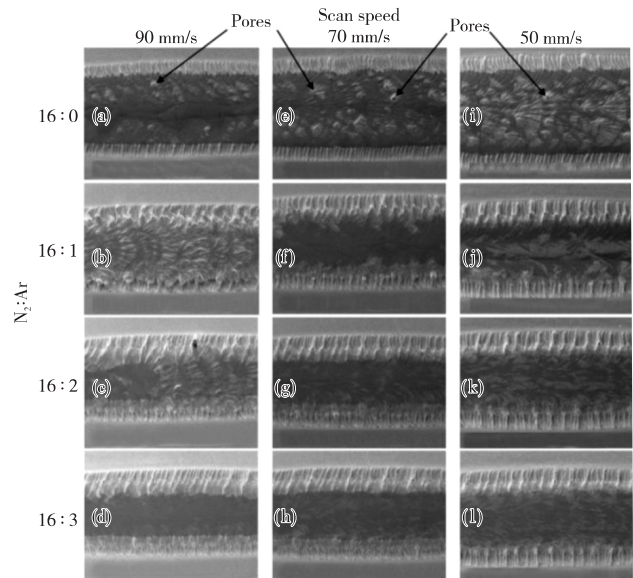


图 2 渗氮层表面的 SEM 照片<sup>[40]</sup>  
Fig. 2 SEM images of nitrided surface<sup>[40]</sup>

激光维持等离子体渗氮法可防止渗氮层氧化,增加渗氮层的氮含量,总体来说是有利的,但是增大了渗氮层开裂的趋势,必须采取有效措施控制渗氮层开裂,在此基础上发展了两步法激光维持等离子体渗氮方法,该方法可有效解决渗氮层的开裂问题。

## 3 两步法激光维持等离子体渗氮

文献[45]介绍了两步法钛合金表面激光气体渗氮,第一步在氮气环境中用激光扫描基体,实现渗氮;第二步在氩气环境中用激光重熔渗氮层,改善渗氮层性能。他们认为两步法可以降低渗氮层表面粗糙度,使渗氮层成分和组织更加均匀,但是没有讨论两步法和裂纹的关系,也没有做进一步的研究工作。

### 3.1 方法研究

文献[46]将两步法与激光维持等离子体渗氮法结合,形成两步法激光维持等离子体渗氮方法(Two-step laser-sustained plasma nitriding),并对其进行了系统化研究。研究发现第二步重熔可减少或消除第一步渗氮产生的裂纹,因为重熔扫描速度比渗氮扫描速度慢,重熔时熔池更深,部分钛基体被熔化,对渗氮层有稀释作用,降低了渗氮层氮含量,减小了渗氮层的开裂趋势。重熔在氩气环境下进行,可降低熔池

表面张力梯度,避免发生马兰戈尼对流,有利于降低渗氮层表面粗糙度,重熔后的渗氮层表面非常光滑<sup>[46]</sup>。图3为渗氮层三维轮廓和表面轮廓,图3a没有重熔,图3b以20 mm/s的速度重熔,图3c以10 mm/s的速度重熔,很明显重熔轨道表面更光滑,而且重熔速度越低,渗氮层表面越光滑。一般在焊接或其他热加工过程中,过多热输入会使晶粒和组织变得粗大,降低基体的力学性能,但是两步法重熔时,部分钛基体被熔化,稀释了渗氮层,细化了渗氮层树枝晶,并增大了渗氮层厚度,同时氮的浓度降低使中间相氮化钛转化成氮在α钛中的固溶体,重熔没有恶化渗氮层性能,反而提高了渗氮层的综合力学性能。总之两步法激光维持等离子体渗氮可通过第一步渗氮工艺参数调整基体氮含量,通过第二步重熔工艺参数控制渗氮层性能,渗氮过程可控性更强。

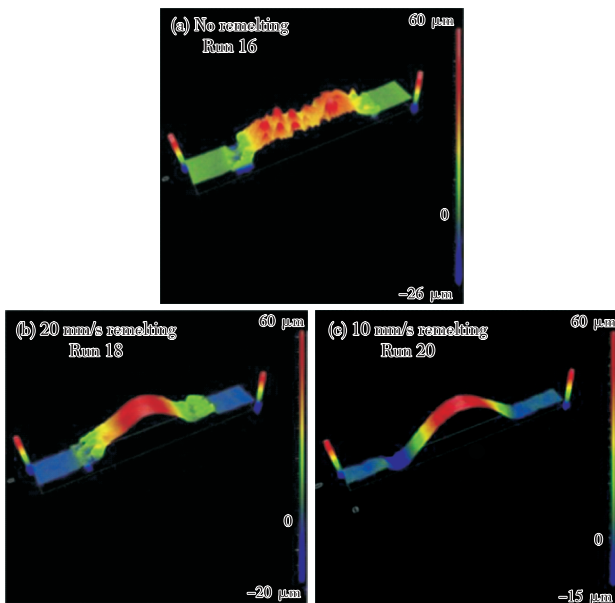


图3 渗氮层三维轮廓与表面轮廓<sup>[46]</sup>(电子版为彩图)  
Fig. 3 3D contours and corresponding surface profiles of nitride layer<sup>[46]</sup>

### 3.2 渗氮层耐磨性研究

两步法激光维持等离子体渗氮层的氮含量更高、性能更优。文献[47]研究了渗氮层的耐磨性能。图4为摩擦试验后磨损划痕量,图4中N75、N60和N45分别代表渗氮扫描速度为75 mm/s、60 mm/s和45 mm/s,所有渗氮层均未发现裂纹。从图4中可以看出没有渗氮的钛基体磨损最严重,随着渗氮扫描速度的降低,磨损量减少,渗氮速度为45 mm/s时的磨损划痕量与工具钢磨损划痕量接近,证明此渗氮层耐磨性较好。随着渗氮速度的降低,基体温度更高,熔池液态停留时

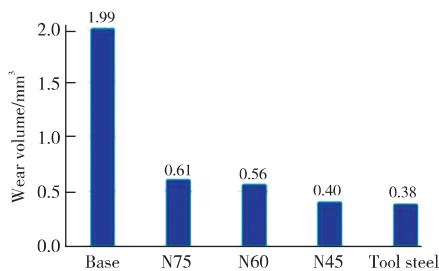


图4 磨损划痕量<sup>[47]</sup>  
Fig. 4 Wear scar volumes<sup>[47]</sup>

间更长,熔池与氮作用时间更长,渗氮层氮含量更高,耐磨性也更好。

两步法激光维持等离子体渗氮层耐磨性大幅提高的原因主要有三方面:第一,未渗氮的基体在摩擦过程中温度会升高,发生氧化磨损,但是渗氮层含有大量氮,相比于氧气,氮更容易与钛发生作用,故渗氮层在摩擦过程中不会发生氧化磨损,提高了耐磨性。第二,未渗氮基体非常软,摩擦过程表面会有颗粒发生塑性脱落,基体被破坏,但是渗氮层硬度大幅提高,不会发生塑性破坏(虽然会发生脆性破坏,但脆性破坏的量很少),提高了耐磨性。第三,渗氮层内有一些硬度极高的小颗粒,在摩擦过程中,这些小颗粒自身不易被破坏,承力能力非常强,从而有效保护了渗氮层不被损坏,提高了耐磨性。

以上三点渗氮层耐磨性提高的原因与普通激光气体渗氮法提高耐磨性的原因类似。但是普通渗氮法得到的渗氮层的氮含量低,耐磨性提高不显著。文献[48]采用Nd:YAG激光在纯氮气中对钛基体进行渗氮,并对其在37℃、10 N载荷下进行耐磨性测试,结果发现渗氮层耐磨性比基体提高了17%,但两步法激光维持等离子体渗氮层耐磨性比基体提高了70%~80%。

## 4 定量研究成果

两步法激光维持等离子体渗氮在定量研究方面也取得了较大突破,文献[46]选用文献[49]的热源模型对渗氮过程进行了数值研究,发现3.5 kW CO<sub>2</sub>激光扫描钛基体,离焦量为8 mm时,基体熔化时间与扫描速度呈线性关系,式(1)是二者的函数关系式,  $t_{melt}$ 为熔池存在时间,  $v$ 为激光扫描速度。试验发现,渗氮层氮含量与扫描速度也呈线性关系,并对其进行了绘图和拟合。式(2)为二者函数关系式,其中 $\Delta w$ 为单位长度渗氮层的氮含量。

$$t_{melt} = \frac{4}{v} - 0.0147 \quad (1)$$

$$10^5 \Delta w = \frac{778}{v} - 3.28 \quad (2)$$

由式(1)和式(2)得到渗氮层氮含量与熔池存在时间的函数关系。将式(3)进一步变形,等式两边同时除以渗氮轨道宽度 $c$ (式(4)),得到单位面积渗氮层单位熔池存在时间所吸收氮的质量为 $9.7 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ 。文献[47]进行了多道渗氮,渗氮轨道之间有重叠部分,用加权的方式计算了熔池存在时间,并考虑了渗氮轨道重叠处氮化钛熔点更高的影响,按式(3)计算了吸收氮的质量,与试验结果进行对比,误差小于10%,证明式(3)准确性高,也间接证明式(1)和式(2)准确性高。

$$10^5 \Delta w = 194 t_{melt} - 0.43 \quad (3)$$

$$\Omega_{N,Ti} = \frac{1}{c} \left( \frac{d\Delta w}{dt_{melt}} \right) = 9.7 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}) \quad (4)$$

试验测量渗氮层维氏硬度与树枝晶含量的关系,并对其进行了绘图和拟合,得到维氏硬度与树枝晶含量的关系。式(5)中 $VHN$ 为维氏硬度,  $DVF$ 为树枝晶含量。文献[50]研究了普通激光渗氮后的渗氮层维氏硬度与氮含量的关系。式(6)中 $VHN$ 为维氏硬度值,  $N$ 为氮含量。

$$VHN = 10.95DVF + 74 \quad (5)$$

$$VHN = 65 + 310 \sqrt{2N} \quad (6)$$

两步法激光维持等离子体钛合金表面渗氮是一个复杂的过程,但是研究发现很多参数是可以量化分析的。多数自然科学复杂变量都呈非线性关系,给研究造成了一定的困难,但是两步法激光维持等离子体渗氮的激光扫描速度与熔池存在时间呈线性关系,激光扫描速度与渗氮层氮含量呈线性关系,维氏硬度与树枝晶含量也呈线性关系,给研究工作带来一定方便。在未来工作中,可以借用同样的研究方法,对普通激光渗氮法的相关参数进行定量研究,使问题更加简化。

## 5 结语与展望

本文综述了激光维持等离子体钛合金表面渗氮研究进展。(1) 总体而言,氮等离子体对渗氮过程有益,钛等离子体对渗氮过程有害。激光维持等离子体渗氮在大激光功率和大扫描速度下进行,效率更高;在开放大气环境中渗氮,无需封闭容器,工艺简单,适应性强,未来会有更多研究和应用。(2) 钛合金表面激光气体渗氮的最主要问题之一是渗氮层容易开裂,很多学者采用氩气稀释氮气降低开裂趋势,但是同时会降低渗氮层的氮含量和硬度,等于是以降低渗氮层硬度为代价来提高渗氮层塑性,从而降低开裂趋势。此问题的实质是金属材料硬度和塑性的矛盾问题。而两步法激光维持等离子体渗氮可以不限制渗氮层氮含量,避免渗氮层开裂,而且二次热输入没有使渗氮层树枝晶粗大,反而使树枝晶更细化。两步法激光维持等离子体渗氮,不像传统方法在硬度和塑性之间寻找平衡点,同时避免了二次热输入使渗氮层组织粗大的问题,是一种非常理想的钛合金表面渗氮方法,未来会得到更广泛的应用。(3) 两步法激光维持等离子体钛合金表面渗氮的研究才刚起步,有许多问题亟需解决。其研究过程中可借鉴普通钛合金表面激光气体渗氮的研究方法和成果,也可以借鉴独立于材料的一些研究方法,如此可事半功倍。(4) 传统激光气体渗氮工艺参数众多,有激光参数、气体参数和基体参数,两步法激光维持等离子体渗氮使以上参数数量加倍,还增加了等离子体参数,工艺参数增加给研究工作带来极大困难。研究过程可将耦合度非常高的参数进行耦合简化表征,简化研究过程,最简单的例子是用表面能量密度表征激光功率、激光斑点直径和扫描速度,如此可简化研究过程。(5) 目前多数研究者采用 CO<sub>2</sub> 激光器和 Nb:YAG 激光器,其他激光器虽也有研究,但是研究较少。对于大型、异厚和异型的工件,CO<sub>2</sub> 激光器系统复杂,无法适用于此类工件。光纤激光器的激光头便于搭载在机械手臂上,便于对大型、异厚和异型工件进行渗氮。未来应重点研究钛合金表面光纤激光气体渗氮。(6) 激光气体渗氮是气体-熔池耦合过程,未来可从气体-熔池耦合角度出发,研究等离子体对氮传输的影响,揭示激光气体渗氮的机理。

## 参考文献

- Poondla N, Srivatsan T S, Patnaik A, et al. *Jorunal of Alloys and Compounds* 2009, 486(1), 162.
- Xu C, Zhu W F. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*,

- 2010, 20(11), 2162.
- Dong H. *Surface Engineering of Light Alloys*, 2010, 10(1), 58.
- Sproul W D. *Surface & Coatings Technology*, 1996, 81(1), 1.
- Torrent F, Lavis L, Berger P, et al. *Surface & Coatings Technology*, 2014, 55(2), 146.
- Zhecheva A, Sha W, Malinov S A, et al. *Surface Coatings Technology*, 2005, 200(7), 2192.
- Sarma B, Ravi K S. *The Minerals Metals Materials Journals*, 2011, 63(2), 85.
- Man H C, Cui Z D, Yue T M, et al. *Materials Science and Engineering*, 2003, 355(2), 167.
- Kaspar J, Bretschneider J, Jacob S, et al. *Surface Engineering*, 2007, 23(2), 99.
- Duraiselvam M, Shariff S M, Padmanabham G, et al. *Wear*, 2013, 309(1), 269.
- Lisiecki A, Piwnik J. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2016, 61(2), 543.
- Katayama S, Matsunawa A, Arata Y, et al. In: *Metallurgical Society of AIME Annual Meeting*. Philadelphia, 1984, pp. 39.
- Xue L, Islam M, Koul A K, et al. *Advanced Performance Materials*, 1997, 4(1), 25.
- Raaf M, El-Hossary F M, Negm N Z, et al. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2008, 41(8), 85208.
- Höche D, Shinn M, Müller S, et al. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(8), 1.
- Lisiecki A. *Metals*, 2015, 5(1), 54.
- Schaaf P. *Progress in Materials Science*, 2002, 47(1), 1.
- Abboud J H, Fidel A F, Benyounis K Y. *Optics & Laser Technology*, 2007, 40(2), 405.
- Kloosterman A B, De Hosson J T M. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1995, 33(4), 567.
- Thomann A L, Sicard E, Boulmer-Leborgne C, et al. *Surface and Coatings Technology*, 1997, 97(3), 448.
- Akarapu R K, Dua P, Campbell A, et al. *Materials Research Society Proceedings*, 2007, 1040(2), 25.
- Thomann A L, Boulmer-Leborgne C, Andrezza-Vignolle C, et al. *Journal of Applied Physics*, 1996, 80(8), 46783.
- Giren B G. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1993, 13(1), 133.
- Giren B G. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1991, 24(7), 1086.
- Hoche D, Schaaf P. *Heat and Mass Transfer*, 2010, 47(5), 519.
- Qi Y T, Liu S X, Zhang S Z, et al. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2014, 35(6), 22(in Chinese).  
齐勇田, 刘世玺, 张世忠, 等. *钢铁钒钛*, 2014, 35(6), 22.
- Xue L, Islam M U, Koul A K, et al. *Advanced Performance Materials*, 1997, 4(1), 25.
- Nwobu A I P, Rawlings R D, West D R F, et al. *Acta Mater*, 1999, 47(2), 631.
- Cao L Q, Xuan F Z, Wang Z D, et al. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2011, 32(11), 157(in Chinese).  
曹丽琴, 轩福贞, 王正东, 等. *材料热处理学报*, 2011, 32(11), 157.
- Selamat M S, Baker T N, Watson L M. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 113(3), 509.
- Weerasinghe V M, West D R F, Czajlik M. *Materials Science Forum*, 1992, 104(3), 102.
- Jianglong L, Qiquan L, Zhirong Z. *Surface and Coatings Technology*, 1993, 57(2), 191.
- Bonss S T, Brenner B, Beyer E. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 2001, 32(2), 160.
- Mridha S, Baker T N. *Materials Science and Engineering*, 1994, 188(1), 229.
- Mridha S, Baker T N. *Materials Science and Engineering*, 1991, 142(1), 115.
- Nassar A R, Akarapu R, Copley S M, et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(18), 1.
- Kamat A M, Copley S M, Todd J A. In: *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium*. California, 2016, pp. 893.
- Han B, Fu X Q, Cao N, et al. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*,

- 2014, 24(9), 2302( in Chinese ).  
 韩彬, 付现桥, 曹宁, 等. *中国有色金属学报*, 2014, 24(9), 2302.
- 39 Saha N C, Tompkins H G. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(7), 3072.
- 40 Kamat A M, Copley S M, Todd J A. *Journal of Applied Physics*, 2016, 107(1), 72.
- 41 Li X W, Wu J, Jia S L. *Foundation and Application of Discharge Plasma*, Science Press, China, 2017( in Chinese ).  
 李兴文, 吴坚, 贾申利. *放电等离子体基础及应用*, 科学出版社, 2017.
- 42 Akarapu R, Nassar A R, Copley S M, et al. *Journal of Laser Applications*, 2009, 21(4), 169.
- 43 Baker T N, Selamat M S. *Materials Science and Technology*, 2008, 24(2), 189.
- 44 Xin H, Hu C, Baker T N. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(13), 3373.
- 45 Weerasinghe V M, West D R F, Damborenea J. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 58(1), 79.
- 46 Kamat A M, Copley S M, Todd J A. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 313(15), 82.
- 47 Kamat A M, Segall A E, Copley S M, et al. *Surface and Coatings Technology*, 2017, 325(1), 229.
- 48 Sathish S, Geetha M, Pandey N D, et al. *Materials Science and Engineering*, 2010, 30(3), 376.
- 49 Cline H E, Anthony T R. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(9), 3895.
- 50 Conrad H. *Materials Science*, 1981, 26(2), 123.

(责任编辑 李敏)



**Jinchang Guo** graduated from Lanzhou University of Technology in June 2012 and obtained a master's degree in material processing engineering. He is currently teaching at Longdong University and studying for a Ph. D. in School of Materials Science and Engineering at Lanzhou University of Technology. He is doing scientific research under the guidance of Professor Yu Shi. At present, his main research field is titanium alloy surface modification.

郭晋昌 2012年6月毕业于兰州理工大学, 获得材料加工工程专业硕士学位。现为陇东学院老师, 同时在兰州理工大学攻读材料加工工程专业博士学位, 在石玟教授的指导下进行科研工作。目前主要研究领域为钛合金表面改性。



**Yu Shi**, professor, doctoral tutor. Dean of graduate school, Lanzhou University of Technology. He is currently a distinguished professor of Feitian Scholars in Gansu Province, deputy director of the State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals. He is a editorial board of *The Scientific World Journal* and many domestic and foreign magazine reviewers. He is also a member of the Robotics and Automation Committee of the Welding Society of the Society of Mechanical Engineering, a secretary general of the Gansu Provincial Welding Society, and a reviewer of the National Natural Science Foundation of China. He is mainly engaged in research work in the fields of non-ferrous metal materials, advanced welding methods, welding physics and welding process control, and has published more than 100 academic papers, including more than 50 papers by SCI, EI and ISTP, and more than 20 National Natural Science Foundation, Provincial and Ministerial Funds.

石玟 教授、博士研究生导师。兰州理工大学研究生学院院长。现为甘肃省飞天学者特聘教授、省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室副主任, *The Scientific World Journal* 杂志编委, 多种国内外杂志审稿人。兼任机械工程学会焊接学会机器人与自动化委员会委员, 甘肃省焊接学会秘书长, 国家自然科学基金项目评议专家。主要从事有色金属材料、先进焊接方法、焊接物理及焊接过程控制等领域的研究工作, 发表学术论文 100 余篇, 其中 SCI、EI、ISTP 收录 50 余篇, 主持国家自然科学基金、省部级基金项目 20 多项。