

文章编号:1001-5078(2025)01-0067-08

· 激光应用技术 ·

飞秒激光诱导钛合金表面减反射结构演化机制研究

王 会^{1,2}, 李 奔^{1,2}, 曹泽浩^{1,2}, 何宗泰^{1,2}

(1. 湖北工业大学 机械工程学院, 超快激光加工研究中心, 湖北 武汉 430068;

2. 湖北工业大学 机械工程学院, 现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘 要: 鉴于航空航天领域对钛合金光学器件表面减反射性能的需求, 本实验利用飞秒脉冲激光对 TC4 钛合金表面制备减反射微纳结构。通过脉冲激光直写的方法, 采用对样品进行 0° 和 90° 交叉扫描的加工方式, 探究了激光单脉冲能量密度和脉冲串子脉冲个数对 TC4 钛合金表面的反射率以及微观形貌的影响, 避免钛合金表面硬度因加工产生的热影响而发生变化, 采用不同方式对样品进行处理。采用分光光度计测试后 TC4 钛合金样品的反射率, 并且利用扫描电子显微镜 (SEM) 观察样品的微观形貌。结果表明, 当激光的能量密度为 1.27 J/cm²、扫描速度为 300 mm/s、扫描间距为 0.0015 mm、脉冲串子脉冲个数为 1 时, 样品在可见光波段 (400 nm ~ 780 nm) 的平均反射率达到 1.70 % 以下, 在波长为 300 nm 时, 反射率达到 1.30 % 以下。本实验研究结果使卫星相机遮光罩、位标器等重要器件表面对杂散光的抑制具有一定的指导意义。

关键词: TC4 钛合金; 减反射; 飞秒激光; burst 模式; 微纳结构

中图分类号: TG665; TN249 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2025.01.010

Femtosecond laser-induced structural evolution of surface anti-reflective structures in titanium alloys

WANG Hui^{1,2}, LI Ben^{1,2}, CAO Ze-hao^{1,2}, HE Zong-tai^{1,2}

(1. Ultrafast laser Processing Research Centre, School of Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2. Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quality Engineering, School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In view of the demand of antireflection performance of titanium alloy optical device surface in aerospace field, the antireflection micro-nano structure of TC4 titanium alloy surface is prepared by femtosecond pulsed laser in this experiment. Firstly, the effects of laser monopulse energy density and the number of pulse subpulses on the surface reflectivity and micromorphology of TC4 titanium alloy are investigated by means of 0° and 90° cross-scanning of the sample by pulsed laser direct writing method, so as to avoid the surface hardness of titanium alloy from changing due to the thermal effect of processing, and to treat the samples by means of different modalities. The reflectance of TC4 titanium alloy samples is measured by spectrophotometer, and the microstructure of the samples is observed by scanning electron microscope (SEM). The results show that when the energy density of the laser is 1.27 J/cm², the scanning speed is 300 mm/s, the scanning distance is 0.0015 mm, and the number of pulses subpulses is 1, the average reflectance of the sample reaches less than 1.70 % in the visible wavelength band (400 nm ~ 780 nm), and the reflectance reaches less than 1.30 % at the wavelength of 300 nm. The results of this experiment can provide some guidance for

作者简介: 王 会 (1999 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为激光微纳加工技术。E-mail: 2572207793@qq.com

通讯作者: 何宗泰 (1997 -), 男, 博士研究生, 研究方向为激光微纳加工技术。E-mail: 201910115@hbut.edu.cn

收稿日期: 2024-06-03; **修订日期:** 2024-06-27

the suppression of stray light on the surface of important devices such as the shutter and the position marker of satellite camera.

Keywords: TC4 titanium alloy; anti-reflection; femtosecond laser; burst mode; Micro-nano structure

1 引言

钛合金是一种由钛和其他金属元素(如铝、钒、铁等)组成的合金材料,具有低密度、高强度、良好的耐腐蚀性和优异的热稳定性等特点,在航空航天等重要领域应用十分广泛^[1-3]。钛合金的抗反射性能对光电子、隐身、传感等各大领域有着巨大的潜力,尤其在提升卫星敏感器遮光罩和制导武器以及位标器的抗反射性能具有重要意义^[4-5]。遮光罩作为卫星相机保护镜头并提高成像质量的关键部件,为了确保卫星相机在太空环境下能够稳定工作并获得清晰的图像,需要对遮光罩的减反射性能和材料硬度进行深入研究和优化。

对于金属减反射微纳结构的制备方法有许多种,传统的方法有等离子刻蚀法,热氧化法,电化学法以及纳米压印法等^[6-7]。其中,等离子刻蚀法需要使用昂贵的设备,并且需要非常复杂的工艺流程;热氧化法不好控制温度和时间,且对材料的要求极高,不适合大范围的使用;电化学法的制备较慢,并且需要控制好电解质溶液的成分和操作条件,避免不良结构的形成;纳米压印法只能实行单步压印,不能进行大面积的制造加工,而且对于压印所需模板的费用昂贵。

飞秒激光加工作为一种新颖的加工手段,具有高精度、高效率、污染小,对材料的热损伤小等特点,成为了一种可供选择的方案。21 世纪以来,利用激光技术对钛合金表面处理来降低钛合金反射率的研究也比较成熟。Guo 等人^[8]通过改变激光脉冲的个数和单脉冲能量密度的大小来探究对金、铝等表面吸收率的影响。结果表明,随着脉冲个数的增加,金表面的减反射性能也随之增加,当脉冲的个数达到一定数量之后,吸收性能将保持稳定。Anatoliy Y. Vorobyev 等人^[9-10]采用高重复频率飞秒激光脉冲直写的方式刻蚀出多功能表面,如:超宽带吸收、超疏水结构以及自清洁结构等多功能表面。试验后的钛合金样品在可见光范围内的反射率在 4.2 % ~ 4.5 %。Huang 等人^[11]使用高脉冲重复率飞秒光纤激光器,通过改变激光的扫描速度以及填充间距来探究其对不锈钢和铝合金反射率的影响作用。结果

表明,改变扫描速度以及填充间距对反射率的影响较大,当使用高的扫描速度和小的填充间距时,将有利于材料反射率的进一步减小。通过对参数的改变可使样品表面在可见光区间内的反射率达到 98 % 左右。上述研究借助激光直写技术,通过调节工艺参数实现了钛合金减反射表面的制备。Peixun Fan 等人^[12-13]采用一种脉冲注入控制超快激光的直写策略,采用两种不同的工艺手段进行复合加工(在排列规则的微锥上附着大量纳米粒子的杂化结构),在紫外到近红外波段范围内,钛合金反射率的平均值达到 2.4 % 左右。娄睿等人^[14]通过纳秒激光器和飞秒激光器结合的方式,首先采用纳秒激光刻蚀凹槽,然后采用飞秒激光正交直写刻蚀纳米结构,使 TC4 钛合金材料在紫外到近红外波段的反射率达到 3.1 %。Peixun Fan 和娄睿等人使用不同加工策略制备具有复合结构的微纳陷光结构,综上所述在钛合金表面制备减反射微纳结构技术已经得到广泛应用并相对比较成熟,但这些研究缺少了对 TC4 钛合金红外飞秒激光作用演化机制的系统分析并忽视了加工后硬度的变化对材料性能的影响。

本文开展了飞秒脉冲激光对 TC4 钛合金金属微纳结构演化机制的探究,总结了激光能量密度与脉冲串子脉冲数对刻蚀效果的影响规律,并针对加工后材料硬度的削弱,本文提出了将样品置于不同环境下加工的新想法和思路,保证在制备过程中保持钛合金材料的硬度和稳定性。对于飞秒激光制备 TC4 钛合金减反射表面的工艺研究提供了一定的指导意义。

2 实验条件和方法

2.1 实验材料制备

钛合金根据使用状态下的组织可以分成 α 型、 β 型、 $\alpha + \beta$ 型三种类型,本实验所采用的 TC4 钛合金是 4 号 $\alpha + \beta$ 型钛合金^[15-16],为航空航天领域的常见钛合金材料型号。通过线切割制备成尺寸为 30 mm × 30 mm,厚度为 2 mm 的方形试样。在激光处理前将钛合金样品放置在水乙醇中,用超声波清洗机清洗 2 次,每次为 3 min,保证样品表面的污染物被清除干净^[17]。

2.2 实验设备

为了使激光在较短的时间内将光能转化为热能,提高钛合金表面的吸收率,并且在钛合金表面产生较少的热影响区域,减少加工过程中对钛合金材料的热损伤,选择波长为 1030 nm 的红外激光作为工作波长^[18]。

本实验使用的激光系统如图 1 所示。它主要由的飞秒脉冲激光器(FemtoYL-Vray)、水冷机、光束传输部件、三维运动加工平台以及用于控制系统的计算机等部分组成。该型号的激光器中心波长为 1030 nm,光束质量因子(M^2)小于 1.3,脉冲宽度为 300 fs ~ 10 ps,重复频率为 25 kHz ~ 5 MHz,脉冲串子脉冲 burst 数可根据需要在 1 ~ 10 范围内进行调节。激光器输出的最大平均功率为 25 W。通过计算机终端控制激光器产生激光,经过光束传输部件进入焦距 $f=100$ mm 的场镜后,光束最终聚焦垂直作用于样品的上表面,聚焦光斑直径 D_{waist} 为 30 μm ,如图 2 所示。

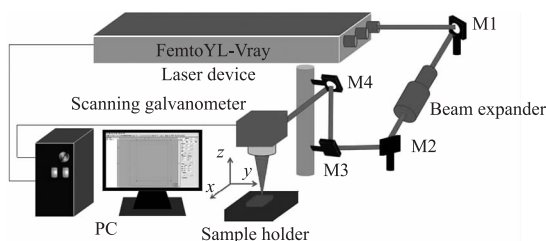


图 1 飞秒激光加工表面实验装置图

Fig.1 Diagram of experimental device for femtosecond laser surface processing

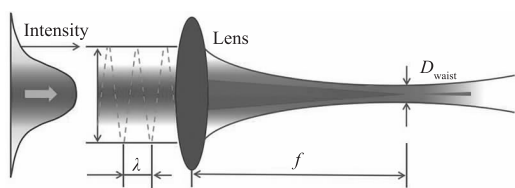


图 2 激光光束聚焦示意图

Fig.2 Laser beam focusing diagram

采用扫描电子显微镜镜(Prisma E, Thermo Fisher 公司)对加工后的钛合金样品表面进行微观结构检测。利用共聚焦显微镜(LSM 800, ZEISS 公司)观察加工后钛合金表面形貌和粗糙度。使用带积分球的分光光度计(UH 4150, HITACHI 公司),在紫外-可见-近红外波段(200 nm ~ 2500 nm)内,以 8° 恒定光入射角进行测量钛合金表面的总反射率。

2.3 实验方法

本实验采用上述激光加工系统,在尺寸为

30 mm × 30 mm 的钛合金试样表面进行 0° 和 90° 交叉扫描^[10],如图 3 所示,通过激光刻蚀,改变材料表面的微观结构,增加表面的粗糙度和表面积,从而提高钛合金样品整体的吸收能力^[19]。

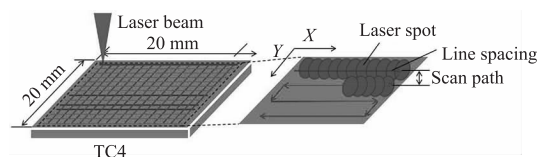


图 3 飞秒脉冲激光加工示意图

Fig.3 Femtosecond pulse processing diagram

3 实验结果与分析

3.1 激光参数探究

在激光的重复频率为 200 kHz,脉冲宽度为 350 fs,光斑搭接率为 95 % 不变的参数下,探究激光的单脉冲能量密度以及脉冲串的子脉冲个数对 TC4 钛合金表面形貌的影响规律。

3.1.1 激光能量密度对表面形貌的影响

当激光的能量密度较低时,激光作用在 TC4 钛合金表面上,通常会产生纳米量级的微小凹坑或者是微小颗粒结构(图 4(a)),此时较低的激光脉冲能量无法迅速传导到材料的内部,而是沉积于材料表层。并且由于每个激光脉冲在空间上呈高斯分布,在多个脉冲的耦合作用下诱导钛合金表面产生均匀密布的微小凹坑自组织结构。随着激光的能量密度的进一步加大(图 4(b) ~ (e)),入射激光在 TC4 钛合金表面引起显著的烧蚀并形成局部熔池,使材料发生热熔化与溅射。当激光能量以热能的形式被材料传导并吸收后,钛合金表面将迅速冷却并再次凝固,从而形成柱状结构与空腔结构交错分布的微纳空间^[20]。由于上述两种微纳结构具有多种不同数量级的深度和宽度,而每种尺寸的微纳结构对不同波长入射光的吸收效果不同,从而有利于钛合金表面对更宽频带入射光的吸收,进一步减小材料的在不同波长下的平均反射率。当激光的能量密度继续加大,过大的激光能量密度会导致激光能够穿透钛合金表面在材料的内部进一步熔化,如图 4(f)所示。此时尽管形成的凹坑占总面积的比值更大,但凹坑深径比降低,且强烈的烧蚀破坏了其原有的多尺度微纳形貌,不利于其对宽频带入射光的有效吸收。因此,在中等能量密度下进行激光刻蚀更有利于提高 TC4 钛合金表面的减反射性能。

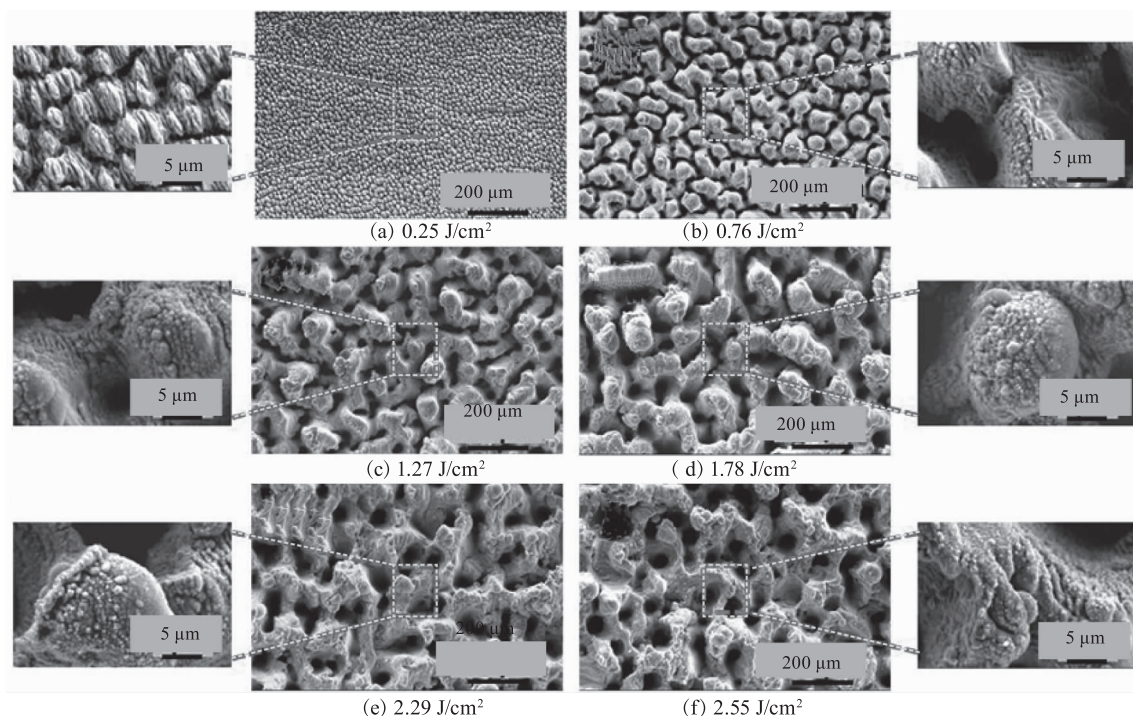


图 4 不同激光能量密度作用下的 SEM 图

Fig. 4 SEM images under different laser energy densities

3.1.2 burst 数目对表面形貌的影响

在能量密度为 1.27 J/cm^2 的条件下改变激光脉冲串子脉冲 burst 的个数。当 burst 为 1 时,此时激光充分作用于钛合金表面,形成具有错乱分布的凹坑,如图 5(a) 所示。此时凹坑具有一定的深度,使得不同波段的光进入凹坑中不容易反射出来,此时钛合金表面的反射率较低。随着脉冲串子脉冲个数的增加,微米量级的凹坑在逐渐减少,由于激光的

作用,将原本存在凹坑的结构进行了破坏,导致表

面呈现沟壑状,如图 5(e) 所示,此刻样品表面的吸收能力大幅度降低,导致反射率快速增加。当继续增大脉冲串子脉冲个数时,原来存在的沟壑进一步的加深,又逐渐形成了细小的微纳米凹坑结构,如图 5(j) 所示。但是此时的凹坑结构较少,而且凹坑的深度比较浅,对光的吸收能力有限,故此时的反射率有所减小。

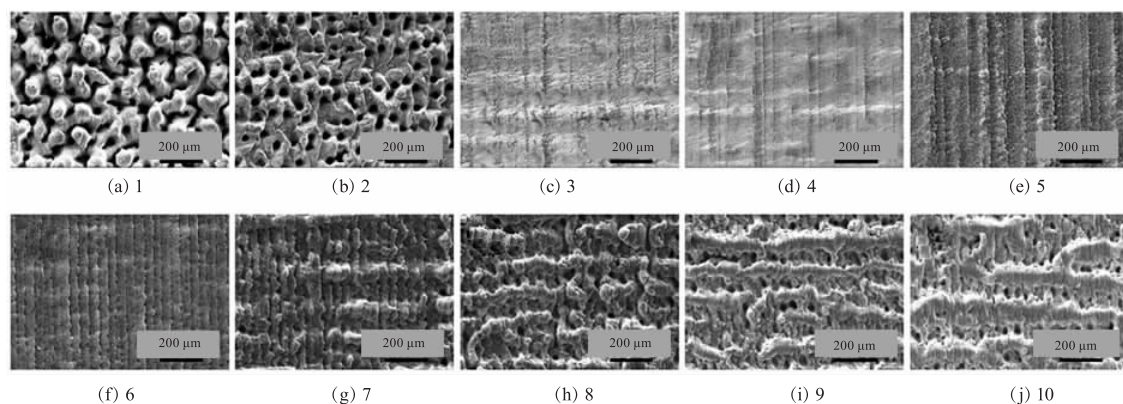


图 5 不同脉冲串子脉冲个数 burst 作用下的 SEM 图

Fig. 5 SEM images under the effect of different burst subpulses

3.2 实验结果表征

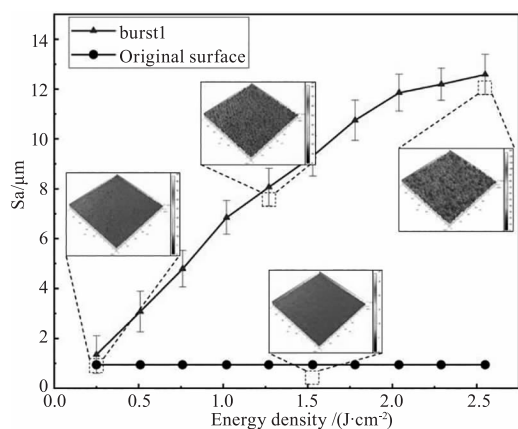
3.2.1 表面粗糙度检测

在频率为 200 kHz,脉冲宽度为 350 fs 的参数下,探究在脉冲串子脉冲个数 burst 为 1 时能量密度对表

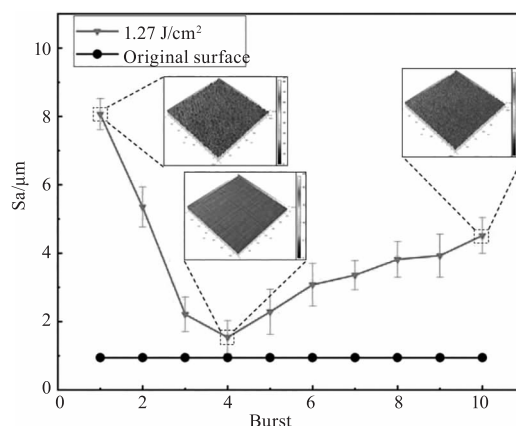
面粗糙度的变化趋势,以及在能量密度为 1.27 J/cm^2 时,不同脉冲串子脉冲个数对表面粗糙度的影响规律。由图 6(a) 所示,材料表面粗糙度随着能量密度的增大呈现逐渐升高的趋势,水平直线为钛合金样品未加工

时的粗糙度值。当激光的能量密度在 0.25 J/cm^2 时,此时激光的能量密度较小,形成的凹坑深度较小因此材料表面粗糙度较低,达到 $1.35 \mu\text{m}$ 。随着激光的能量密度增大到 1.27 J/cm^2 时,激光对钛合金表面的作用效果增强产生的孔洞微纳结构具有较大的深径比,因此样品的表面粗糙度进一步增加,达到 $8.06 \mu\text{m}$ 。当激光的能量密度增加到 2.55 J/cm^2 时,强烈的烧蚀导致具有较大尺度微纳结构的大深径比凹坑遭到破坏,但是由于激光脉冲能量密度较大,导致凹槽的熔深增加,使得粗糙度呈现继续升高的趋势,面粗糙度 S_a 值达到 $12.59 \mu\text{m}$ 。

当单脉冲能量密度保持 1.27 J/cm^2 不变的情况下改变 burst,此时试验后 TC4 钛合金样品表面的粗糙度随脉冲串子脉冲个数的增加呈现先减小后增大的趋势,如图 6(b) 所示。产生这个现象的原因是钛合金样品表面吸收不同的能量后形成不同的熔覆层。当 burst 为 1 时,此时单脉冲的峰值能量较高,使材料表面发生显著的力学剥蚀,形成了具有一定深度的凹坑,从而增大了表面的粗糙度,此时粗糙度为 $8.06 \mu\text{m}$ 。当 burst 由 2 增加至 3 时,脉冲串内每个子脉冲所分配到的峰值能量降低,激光作用不能使样品表面的形成高深度的凹坑,而是以熔覆为主导的作用效果使其表面发生重熔与再凝固,此时的粗糙度会急剧地减小,达到 $1.09 \mu\text{m}$ 。当 burst 继续增加时,由于初始若干个子脉冲烧蚀所形成的氧化物沉积于脉冲辐照区域内,而氧化物的烧蚀阈值通常低于金属基体^[21],其更容易在与后续子脉冲的相互作用过程中被去除,从而导致凹槽结构再次形成微小的凹槽,所以 burst8 到 10 的区间内粗糙度会有小幅度的增加,最终 S_a 达到 $2.46 \mu\text{m}$ 。



(a) 不同单脉冲能量密度



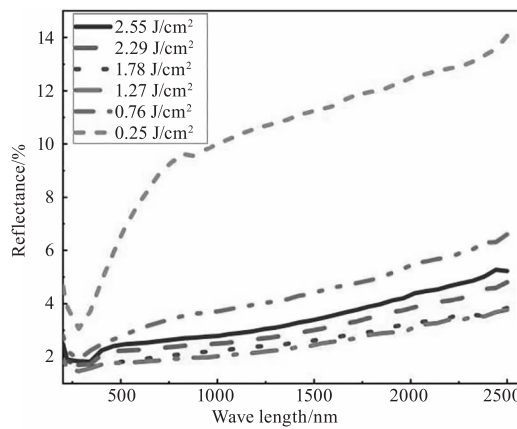
(b) 不同脉冲串子脉冲个数burst

图 6 表面粗糙度图

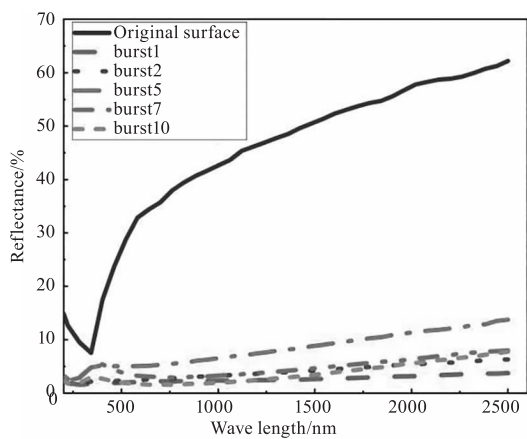
Fig.6 Surface roughness map

3.2.2 反射率检测

脉冲串子脉冲个数 burst 不变时,在 250 nm 到 2500 nm 的波段范围内,随着激光能量密度的增加,反射率先增加后减小,在能量密度为 1.27 J/cm^2 时,此时钛合金样品的整体反射率反射率最小,在可见光 $400 \text{ nm} \sim 780 \text{ nm}$ 波段内的平均反射率为 1.70% ,在波长为 300 nm 时,达到最低反射率 1.30% ,如下图 7(a) 所示。激光的能量密度保持 12.73 J/cm^2 不变,在上述波段范围内,改变脉冲串子脉冲的个数 burst1 到 burst10,钛合金样品表面的反射率先增大后减小,与材料的表面粗糙度变化规律有直接关联。当 burst 为 1 时,平均反射率为 1.70% ; burst 为 5 时,平均反射率为 5.18% 达到最大值, burst 增加到 10 时,平均反射率降低至 1.83% ,如下图 7(b) 所示。综上所述,当激光的能量密度为 1.27 J/cm^2 ,脉冲串的子脉冲个数 burst 为 1 时,钛合金表面达到最低反射率。



(a) 改变单脉冲能量密度



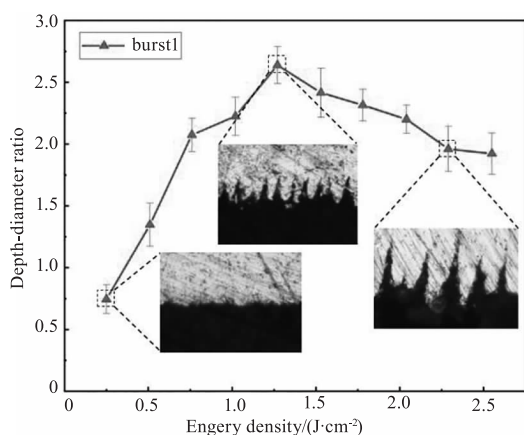
(b) 改变脉冲串子脉冲个数burst

图 7 反射率曲线图

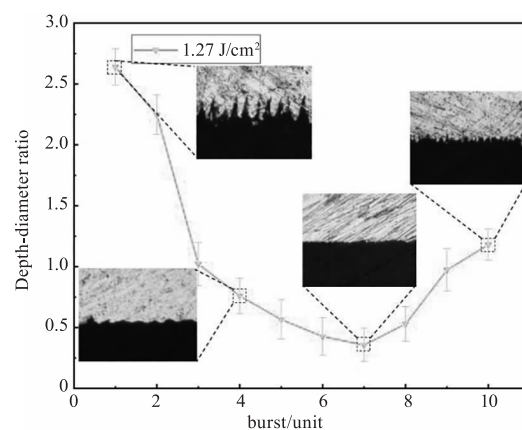
Fig. 7 Reflectance chart

3.2.3 深径比测量

通过线切割将试验后的样品切成小块,在显微镜下观察横截面的深径比。结果表明,当 burst 数目不变时,随着单脉冲能量密度的增加,激光对样品的烧蚀作用逐渐增强,形成具有深度的凹坑,此时样品的深径比呈现着增加后减少的趋势,如图 8(a) 所示。当单脉冲能量密度过大,超过了 TC4 钛合金材料的烧蚀阈值,此时由于烧蚀作用,凹坑的深度会继续加深,但两个凹坑之间坑壁会塌陷,形成了一个更大的凹坑,使凹坑整体的深径比减小。当单脉冲能量密度不变时,随着 burst 数目的增加,样品的深径比呈现着先减小后增大的趋势,如图 8(b) 所示。脉冲串子脉冲个数 burst 数目的增加,导致单个脉冲的峰值能量成倍数的减小,此时激光的作用导致凹坑深度急剧的降低,深径比减小;随着 burst 的进一步增加,此时材料的烧蚀阈值会随着 burst 数目的增加而降低,导致凹坑的深径比增加^[22]。



(a) 改变单脉冲能量密度



(b) 改变脉冲串子脉冲个数burst

图 8 深径比曲线图

Fig. 8 Depth-diameter ratio chart

3.2.4 维氏硬度检测

激光扫描过程中两条线段之间的填充间距远小于光斑直径,且激光的能量高于钛合金表面的损伤阈值。在激光作用于钛合金表面过程中,材料会产生大量的热量,这个过程会对钛合金的表面硬度产生一定的变化。将同一参数下(搭接率 95 %、能量密度 1.27 J/cm^2 、burst1)加工的三块样品处于三种不同的状态,如图 9 所示。分别为空气环境下加工、空气中加工后浸没于常温(20°C)水中、除上表面外其他部分置于水中加工,使用型号为 UHL VMHT 的维氏硬度计测量三种状态下的维氏硬度。测试中设置初始试验力为 100 g ,施加载荷时间为 10 s ,材料中的压痕为菱形,每个样品分别提取 5 个点测试,如图 10(a) 所示。测试结果如图 10(b) 所示,三种状态下加工后的平均维氏硬度分别为 530.3 HV 、 550.4 HV 、 598.3 HV ,原始钛合金表面的维氏硬度为 612.9 HV ,相比较激光加工钛合金前硬度分别下

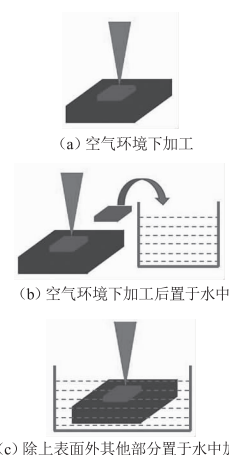


图 9 不同状态下加工示意图

Fig. 9 Processing diagram in different states

降了 82.6 HV、62.5 HV、2.6 HV,图 9(a)加工的样品可知,温度对钛合金材料的硬度影响较大。图 9(c)加工的方法,可以加快加工过程中材料的散热,从而大幅度的减小对钛合金硬度性能的影响。

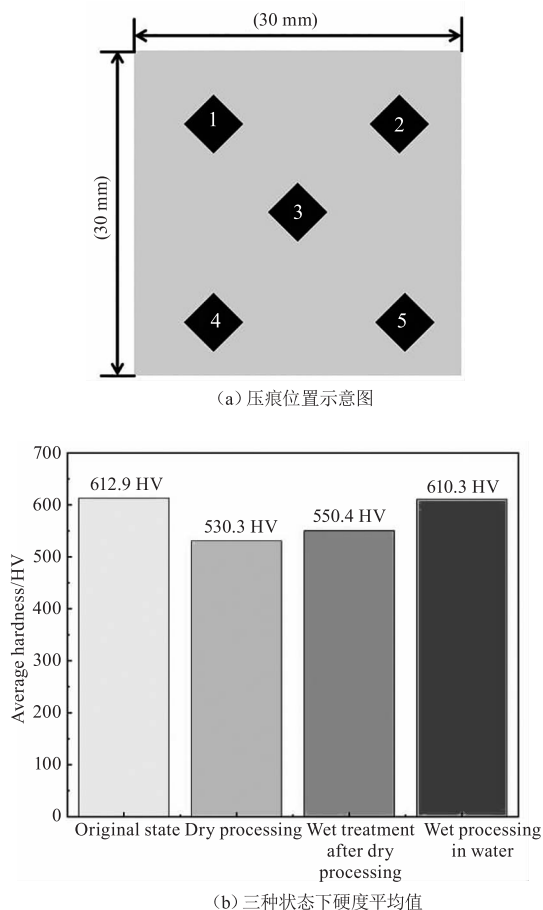


图 10 压痕位置及硬度测量示意图

Fig. 10 Indentation position and hardness measurement diagram

4 结论与展望

根据 TC4 钛合金在飞秒脉冲激光的作用下产生微纳结构特征,通过设置工艺参数使其具有较低的反射率,得到如下的结论。

(1)在脉冲串的子脉冲个数不变的情况下,随着能量密度的增加,TC4 钛合金样品的反射率呈现着先减小后增加的趋势。在能量密度不变的情况下,随着脉冲串子脉冲的个数增加,TC4 钛合金的反射率呈现着先增加后减小的趋势。

(2)当能量密度为 1.27 J/cm^2 时,脉冲串子脉冲的个数为 1 时,此时 TC4 钛合金的样品反射率最低,实现在可见光波段(400 nm ~ 780 nm)的平均反射率为 1.70 %,在波长为 300 nm 时最低反射率为 1.30 %。另一方面,由图 6 可知材料在红外波段上的反射率呈现随波长的增加而不断增大的趋势。为

了增强钛合金表面在红外波段上的陷光能力,需要通过引入多级微纳结构等方法,进行更深入的研究和技术优化。

(3)将样品除上表面外其他部分置于水中,飞秒激光对钛合金烧蚀所产生的热量能够及时传导给水,从而避免了对钛合金表面维氏硬度的影响,试验后钛合金表面的维氏硬度相对于激光作用前变化不明显。

参考文献:

- [1] Feng Mingjia. Progress in Surface Modification of Titanium and Titanium alloys [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023, (9): 106 - 108. (in Chinese)
冯明佳. 钛及钛合金表面改性技术研究进展[J]. 内燃机与配件, 2023, (9): 106 - 108.
- [2] Cui Jing, Zhang Yong-wei, Wang Cheng-xuan, et al. Research on nanosecond laser of textured titanium alloy surface and its wettability [J]. Laser & Infrared, 2023, 53 (5): 658 - 662. (in Chinese)
崔静, 张勇为, 王成轩, 等. 纳秒激光织构钛合金表面及其润湿性研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(5): 658 - 662.
- [3] Gong Meime, Wu Ten, Xie Linyi, et al. Study on forming quality and properties of Fe-TiC composite coatings by laser remelting [J]. Applied Laser, 2023, 43 (7): 1 - 7. (in Chinese)
龚美美, 吴腾, 谢林垠, 等. 激光重熔对铁基/TiC 复合涂层成形质量及性能研究[J]. 应用激光, 2023, 43(7): 1 - 7.
- [4] Bharatish A, Soundarapandian S. Influence of femtosecond laser parameters and environment on surface texture characteristics of metals and non-metals-state of the art [J]. Lasers in Manufacturing and Materials Processing, 2018, 5: 143 - 167.
- [5] Li Xun. Research on femtosecond laser fabrication of micro/nano structure and its anti-reflection properties [D]. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
李珣. 微纳结构飞秒激光制备技术及其抗反射特性研究[D]. 中国科学院大学, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2022.
- [6] Wang Y, Zhao W, Wu Y, et al. Micro/nano-structures transition and electrochemical response of Ti-6Al-4V alloy in simulated seawater [J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2018, 6(3): 034009.

- [7] Wang Yongdong, Chang Mengyang, Wang Jinyu, et al. Research status of preparation methods for titanium and titanium alloy surface coatings [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(6): 46–54. (in Chinese)
王永东, 常萌阳, 王金玉, 等. 钛及钛合金表面涂层制备方法研究现状[J]. 电焊机, 2022, 52(6): 46–54.
- [8] Vorobyev A Y, Guo C. Metallic light absorbers produced by femtosecond laser pulses [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2010, 2: 452749.
- [9] Vorobyev A Y, Guo C. Enhanced absorptance of gold following multipulse femtosecond laser ablation [J]. Physical Review B, 2005, 72(19): 195422.
- [10] Vorobyev A Y, Guo C. Multifunctional surfaces produced by femtosecond laser pulses [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(3): 137–171.
- [11] Huang H, Yang L M, Bai S, et al. Blackening of metals using femtosecond fiber laser [J]. Applied Optics, 2015, 54(2): 324–333.
- [12] Fan P, Bai B, Zhong M, et al. General strategy toward dual-scale-controlled metallic micro-nano hybrid structures with ultralow reflectance [J]. ACS Nano, 2017, 11(7): 7401–7408.
- [13] Fan P, Bai B, Long J, et al. Broadband High-performance infrared antireflection nanowires facilely grown on ultrafast laser structured Cu surface [J]. Nano Letters, 2015, 15(9): 5988–5994.
- [14] Lou R, Zhang G, Li G, et al. Design and fabrication of dual-scale broadband antireflective structures on metal surfaces by using nanosecond and femtosecond lasers [J]. Micromachines, 2019, 11(1): 20.
- [15] Wang Y, Ma K, Zhang T, et al. Iodine-induced self-assembly structure transition of organic molecules on the Ag (111) surface [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2023, 127(3): 1381–1387.
- [16] Li Jing, Lin Xin, Qian Yuanhong, et al. Research on microstructure and properties of Ti6Al4V alloys by high power laser solid forming [J]. Applied Laser, 2014, 34(6): 4. (in Chinese)
李静, 林鑫, 钱远宏, 等. 高功率激光成形 Ti-6Al-4V 合金组织和性能的研究 [J]. 应用激光, 2014, 34(6): 4.
- [17] Xiao L, Liu L, Zhou Y, et al. Resistance-spot-welded AZ31 magnesium alloys: part I. dependence of fusion zone microstructures on second-phase particles [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41: 1511–1522.
- [18] Li Kun, Cao Sheng-zhu, Zhang Xiao-yu, et al. Blackening on Titanium surface by femtosecond laser [J]. Surface Technology, 2018, 47(5): 4. (in Chinese)
李坤, 曹生珠, 张晓宇, 等. 利用飞秒激光对钛金属表面黑化处理的研究 [J]. 表面技术, 2018, 47(5): 4.
- [19] Zheng Buxiang, Jiang Gedong, Wang Wenjun. Ablation characteristics and interaction mechanism of ultra-fast pulse laser-induced damage in Titanium alloy [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(12): 8. (in Chinese)
郑卜祥, 姜歌东, 王文君, 等. 超快脉冲激光对钛合金的烧蚀特性与作用机理 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 8.
- [20] Huang Y, Liu S, Li W, et al. Two-dimensional periodic structure induced by single-beam femtosecond laser pulses irradiating titanium [J]. Optics Express, 2009, 17(23): 20756–20761.
- [21] Li J, Xu J, Lian Z, et al. Fabrication of antireflection surfaces with superhydrophobic property for titanium alloy by nanosecond laser irradiation [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 126: 106129.
- [22] Mur J, Petelin J, Osterman N. High precision laser direct microstructuring system based on bursts of picosecond pulses [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(32): 325104.