

脉冲光纤激光抛光 TC4 合金的实验研究 与抛光层微观形貌分析

贺国阳, 王 涛

(河北工业大学机械工程学院, 天津 300312)

摘 要:针对 Ti6Al4V 材料的激光抛光工艺进行实验研究,通过改变脉冲式激光的工艺参数设置,来分析激光参数对抛光工艺效果的影响,主要研究了激光输出功率、离焦量 e 和激光光斑重叠率 δ 这三个参数的影响规律与作用机理,并结合试样表面粗糙度测量值 Ra ,得出:激光输出功率为 300 W 左右,离焦量 e 控制在 6 ~ 8 mm 范围内,光斑重叠率 δ 在 70 % ~ 75 % 范围内时,脉冲式激光对 TC4 合金材料表面的抛光效果最佳;最后通过光学显微镜测量仪器来分析抛光后的材料表面形貌与材料抛光层的内部晶格晶粒变化,来分析激光抛光对试样抛光层物理性质的影响,并对比抛光前后试样表面的进行了硬度测试对比。

关键词:激光抛光;工艺参数;微观形貌;表面粗糙度

中图分类号: TG131; TG178; TN249 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.010

Experimental research on pulsed fiber laser polishing TC4 alloy and analysis of polishing layer's micromorphology

HE Guo-yang, WANG Tao

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300312, China)

Abstract: this paper conducts experimental research on the laser polishing process of Ti6Al4V material, and analyzes the influence of laser parameters on the polishing laser, mainly studies the influence law and mechanism of the three parameters of laser output power, defocus e and the laser spot overlap rate δ . Combined with the sample surface roughness measurement value Ra , the conclusion is got: when the laser output power is set to approximately 300 W, the defocus e is controlled within the range of 6 ~ 8 mm, and the spot overlap rate δ is within the range of 70 % ~ 75 %, the pulsed laser has the best polishing effect on the surface of TC4 alloy material. Finally, by optical microscope measuring instrument, the surface morphology of the polished material and the internal lattice grain change of the polished layer are analyzed, the effect of polishing on the physical properties of the polished layer of the sample is analyzed, and the hardness of the sample surface before and after polishing is compared.

Keywords: laser polishing; process parameters; microscopic appearance; surface roughness

1 引 言

钛合金 Ti6Al4V 简称 TC4, 是一种具有高比强度、良

好的成形性与耐腐蚀性的 $\alpha + \beta$ 钛合金, 由于其优质的材料属性与良好的生物相容性而被广泛应用于医疗器械

作者简介: 贺国阳(1995 -), 男, 硕士, 主要从事激光应用方面的研究工作。E-mail: 2060817247@ qq. com

通讯作者: 王 涛(1963 -), 男, 教授, 硕导, 博士后, 主要从事机电设备一体化工作。E-mail: wtao_1@ 163. com

收稿日期: 2020-09-05

和航空制造当中^[1-3]。截止目前,Ti6Al4V 合金约占全球钛合金使用量的一半以上,然而,钛合金是典型的难加工材料,加工性能差,切削难度大^[4-7],使用环境条件苛刻,所以选择合适的抛光方法来给提高钛合金的表面质量是目前亟待解决的问题。

激光抛光作为一种利用高能量激光束来对工件表面进行处理的新兴技术,由于激光的单色性、相干性、高能量密度性和方向性等性质^[8-10],使得激光抛光技术具有诸多其他抛光技术无法比拟的特点,激光抛光技术不仅可以对陶瓷、磨料、耐火材料、高分子材料等非金属材料进行表面处理,而且对模具钢、工具钢、不锈钢、钛合金等金属材料的表面处理也是极佳的选择,特别适合于对超硬或者超脆材料的表面处理。利用激光抛光 TC4 合金表面,可以使 TC4 合金表面抗腐蚀性、硬度等材料相关物理性能提高^[11-15],但具体怎样改善材料的物性规律与其定量分析目前还有待研究 Y. M. Xiao 和 Michael Bass 等人^[16]最先尝试利用 CO₂ 连续激光器对不同材质的玻璃进行表面抛光实验,这些实验材料按照属性大致可分为低热膨胀系数玻璃与高热膨胀系数玻璃。实验结果表明:激光对于低热膨胀系数的玻璃(如:Pyrex 玻璃和熔融石英)有很好的抛光效果,而对于高热膨胀系数的玻璃(如:Zerodur 玻璃、BK-7 玻璃)则由于抛光时,玻璃吸收了大量热,导致其内部产生应力,表面出现大量裂纹,从而增大了玻璃表面的粗糙度。而后他们又利用 600 号砂纸打磨熔融石英表面,目的是让其表面产生一些砂粒磨痕,然后在通过激光抛光处理过后的熔融石英表面,结果在针形轮廓仪测量下发现熔融石英表面粗糙度明显降低,且通过电子显微镜发现砂粒磨痕完全消除。Perry, Tyler L. 等人^[17]在利用 Nd:YAG 激光器产生的波长为 1064 nm 的脉冲激光对厚度为 3.2 mm 的镍合金 200 进行抛光实验,实验样品镍合金通过微型铣削技术加工出一个宽 1 mm,深 25 μm 的凹槽,凹槽的表面粗糙度为 177 nm,将入射激光脉冲通量为 43.8 J/cm²、脉冲持续时间为 220 ns、激光光斑直径为 60 μm、光斑重叠率为 75% 脉冲激光打在凹槽内表面,通过计算抛光后的凹槽内表面的线轮廓得出:凹槽内表面平均表面粗糙度从 $R_a = 175$ nm 降低到 $R_a = 26$ nm,降低了 6 倍,并且通过观察抛光后形成的表面波峰与波谷分布,发现没有周围没有喷溅

和碎渣的痕迹由此证明了抛光的主要方式是熔化而不是烧蚀。通过反复进行类似实验,最终得出结论:当激光脉冲宽度为 200 ~ 300 ns 的范围内,对空间频率高于 200 mm⁻¹ 的微型器件有很好的抛光效果,并且抛光过程主要是通过熔化而不是烧蚀。T. A. Mai and G. C. Lim 等人^[18]使用二倍频 Nd:YAG 激光器对 304 不锈钢进行了抛光实验,并通过建立熔化凝固数值模型来分析抛光过程中熔池的形成与熔池深度的影响因素。

本文利用脉冲光纤激光抛光设备对 TC 合金的材料表面进行抛光实验,有关激光抛光会对被加工材料表面微观与宏观上会造成什么影响,材料内部组织晶相的转变等问题的研究目前国内外几乎没有,因此本研究通过实验数据与实验现象来分析研究脉冲激光与 TC4 合金的相互作用机制及其抛光对试样表面物性的影响。

2 实验设备与方案

2.1 实验设备

实验采用 CETC26thPFL 脉冲光纤激光器来对 TC4 合金进行表面抛光处理,该激光器可以发出波长为 1064 nm 的脉冲激光,输出功率可调范围为 200 ~ 500 W,功率可调范围 1% ~ 100%,激光光束直径为 6 ~ 8 mm,激光重复频率为 20 ~ 80 kHz,脉冲宽度为 100 ~ 130 ns,激光激励电压为 (24 ± 0.5) VDC,冷却方式为分冷。采用金相试样抛光机对试样进行粗抛光。实验设备如图 1 所示。



图 1 CETC26thPFL 脉冲光纤激光器设备和金相试样粗抛光机
Fig. 1 CETC26thPFL pulsed fiber laser equipment and gold sample rough polisher

实验样品表面微观形貌检测采用日立 S-4800 场发射扫描电镜和光学显微镜,利用 UHL VMH-00VD 的显微硬度测量仪测试抛光前后的试样表面硬度值,试样抛光前后的表面粗糙度检测使用北京时代之峰 TIME3220 触针式表面粗糙度仪。

2.2 实验材料

实验材料使用钛合金 Ti6Al4V (简称 TC4 合金), 钛合金材料相比其他金属材料更难加工, 而且由于其主要用于航空制造与医疗器械制造领域, 因此对其材料的表面形貌质量要求极高。实验中采用的 TC4 合金样品尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm 立方块, 其化学成分与物理性能如表 1 所示。

表 1 TC4 合金的元素含量

Tab. 1 The element content of the TC4 alloy

element	Ti	AL	V	Fe	C	O	N
fraction/%	Bal	6.42	4.00	0.21	0.0076	0.12	0.004

表 2 Ti6Al4V 合金的主要物理性能参数

Tab. 2 The main physical properties parameters of the Ti6Al4V alloy

性能	数值
抗拉强度/MPa	960 ~ 1270
屈服强度/MPa	820
延伸率/%	≥8
平均密度/(kg · m ⁻³)	4080
泊松比	0.34

2.3 实验方案

利用金相试样抛光机对 TC4 样品进行粗抛光, 然后对其进行脉冲激光抛光, 通过改变激光功率、激光扫描速度、离焦量、频率等激光工艺参数来研究这些参数对激光抛光效果的作用机理与影响规律, 从而优化激光对 TC4 合金材料的抛光效果, 最后通过光学显微镜对抛光后样品进行扫描, 通过分析图像上的晶格大小、晶界位置与其他因抛光形成的裂纹, 得出激光抛光会使 TC4 合金表面组织发生哪些转变与抛光裂纹的成型机理, 具体实验方案流程如图 2 所示。

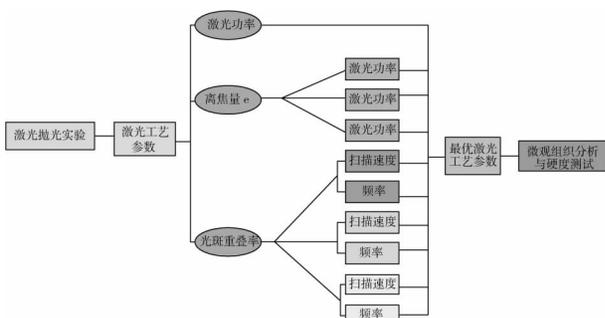


图 2 实验方案总流程图

Fig. 2 The total flowchart of the experimental scheme

3 实验结果分析与讨论

3.1 激光功率对表面粗糙度的影响

采用激光扫描速度为 20 mm/s, 离焦量为 8 mm 的抛光工艺参数对 TC4 合金材料进行抛光, 采用单因素实验法研究不同激光功率对激光抛光效果的影响效果, 利用触针式表面粗糙度仪分别测量了通过激光功率分别为 200 W、225 W、250 W、275 W、300 W、325 W、350 W、375 W、400 W、425 W 的高能光束抛光处理的试样表面各三次, 对每个试样测量的三次表面粗糙度值取其平均值作为试样实际表面粗糙度值 R_a , 并将其统计绘制成曲线图 3 来方便观察研究不同激光功率对材料表面粗糙度的影响规律。

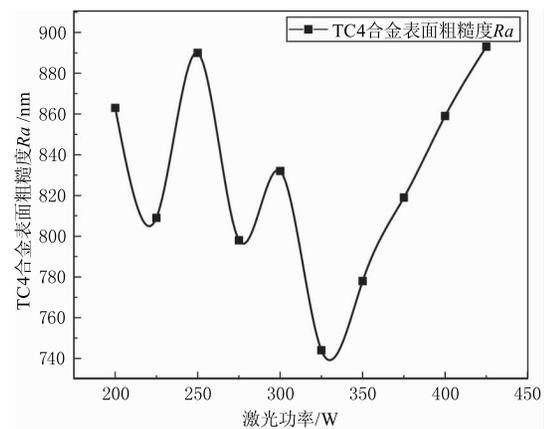
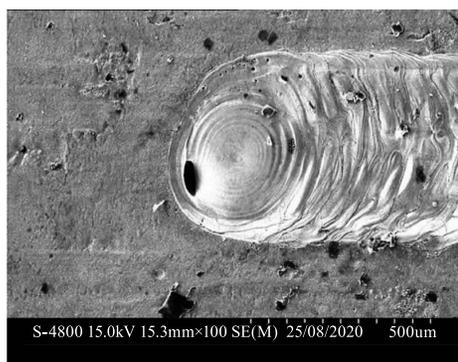


图 3 不同激光功率对材料表面粗糙度的影响规律

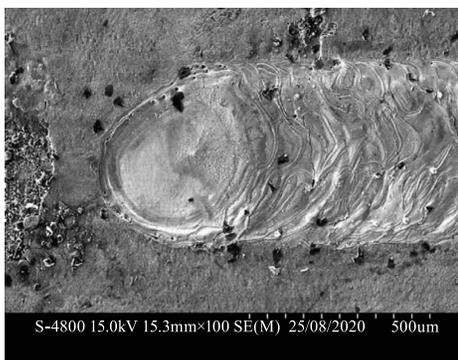
Fig. 3 The effect law of different laser power on the surface roughness of the material

由图 3 曲线图不难看出, 不同的激光输出功率对 TC4 合金材料表面的抛光效果有着巨大的差异, 导致最终的试样表面粗糙度值也大不相同, 在激光功率为 200 ~ 425 W 的范围内, 控制其他激光工艺参数一致, 得到的试样表面粗糙度值波动范围为 737 ~ 882 nm, 并且在 200 ~ 325 W 的激光功率范围内, 试样表面粗糙度值出现大幅度的波动, 出现这一实验现象的原因可能是由于材料原始表面形貌由峰值高度不同的凸起组成, 而在相同的激光扫描速度下, 具有不同能量的激光光束辐照在相同的材料表面区域, 使得该区域对激光能量的吸收大不相同, 不足以使材料表面凸峰完全熔化, 造成该区域金属熔融量与表面温度梯度也大不相同, 使得驱使金属熔融液流向凹处的表面张力也不相同。另外, 从后半段曲线看出, 激光功率从 325 ~ 425 W 的范围内时,

抛光后的表面粗糙度值大致与激光功率呈正相关,随着激光功率的增大,抛光后的表面粗糙度值也增大,并且由曲线可以得知,当激光器的激光输出功率在 200 ~ 500 W 之间时,控制激光输出功率在 325 W 左右能够使对 TC4 合金表面的抛光效果最佳。图 4 是 S-4800 扫描电镜对 325 W 和 450 W 激光功率下抛光试样的 SEM 图像,从图 4 中明显可以看出,激光功率为 325 W 进行的抛光效果明显好于 450 W,且激光扫掠过后的表面质量较高。



(a) 激光功率为 325 W



(b) 激光功率为 450 W

图 4 激光功率分别为 325 W、450 W 的抛光试样 SEM 图像

Fig. 4 When the laser power is 325W,450W,SEM image of polishing samples

3.2 激光离焦量对表面粗糙度的影响

采用激光功率为 300 W、400 W 与 500 W,激光扫描速度为 20 mm/s 的激光工艺参数,研究设置不同激光离焦量下,激光抛光工艺对 TC4 合金材料表面抛光效果的影响。规定从上往下观察时,样品材料待抛光表面在激光光束聚焦点下方时,离焦量数值为正值;带抛光材料表面在光束聚焦点上方时(即光束聚焦点落在材料抛光层内部),规定此时离焦量为负值,具体原理如图 5 所示,经过多次设置负离焦量值抛光 TC4 合金表面实验,发现抛光效果不明显且抛光过程不易观察,因此这里对正离焦量值下的抛光实验展开研究分析。图 6 为三种激光功率

下不同离焦量设置下测量的 TC4 合金材料表面粗糙度值。

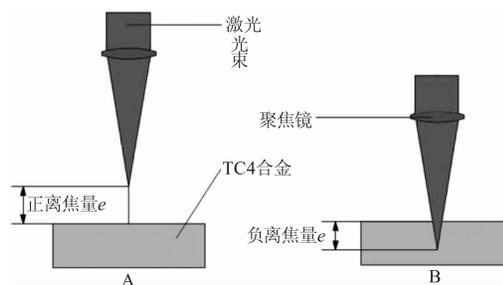


图 5 正负离焦量示意图

Fig. 5 Positive and negative out-of-focus schematics

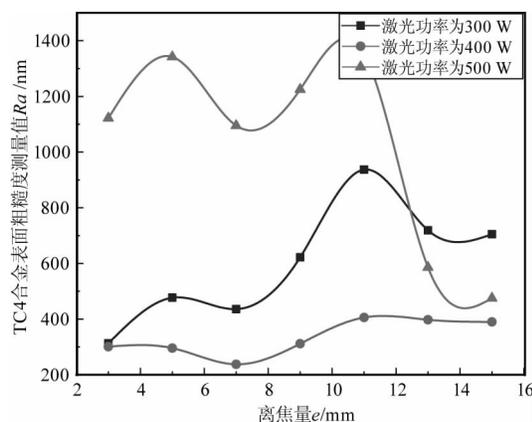


图 6 不同离焦量设置下测量的 TC4 合金材料表面粗糙度变化曲线

Fig. 6 The variation curve of the surface roughness of the TC4 alloy material measured under different off-focus settings

从图 6 可以看出,当激光输出功率为 500 W 时,抛光效果受离焦量 e 值的影响较大,尤其当离焦量的值在 11 ~ 14 mm 这一范围内,离焦量与表面粗糙度值呈现负相关关系,随着 e 值的增大, Ra 值逐渐减小,但从曲线走向看, e 值为 14 mm 以后, Ra 值又开始增大,是由于离焦量值太大,导致材料对激光能量的吸收率降低,不足以熔化材料表面凸起部分;当激光输出功率为 400 W 时,曲线走向刚刚好与激光功率为 500 W 的曲线相反,它是在离焦量 e 值为 3 ~ 11 mm 范围内与 Ra 值呈正相关,这也刚好印证了高功率 - 高离焦量与低功率 - 低离焦量的,而且从 400 W 曲线中还可以看出最佳抛光效果的离焦量 e 值为 3 mm;最后观察激光功率为 300 W 的曲线,整体走向呈抛物线形状,且可以得知在离焦量 e 值为 7 mm 时,能获得最佳的抛光效果,而且对比三条曲线得知,最佳的抛光激光输出功率为 300 W,这也间接的验证了前面关于最佳激光功率的结论。

3.3 激光光斑重叠率对表面粗糙度的影响

光斑重叠率是继激光输出功率、离焦量之后,又一个对激光抛光效果有极大影响作用的重要工艺参数,因此对该参数的影响作用机理的研究及其重要,光斑重叠率的计算公式如下:

$$\frac{v}{f} = \frac{D}{N} \quad (1)$$

$$\delta = \left(1 - \frac{1}{N}\right) \times 100\% \quad (2)$$

其中, v 为激光扫描速度,单位为 mm/s; f 为激光重复频率,单位为 Hz; D 为激光光斑直径,单位为 μm ; N 为激光光斑重叠数; δ 为激光光斑重叠率。由公式可以看出,决定光斑重叠率的两个重要参数为激光扫描速度 v 与激光重复频率 f 。因此要先通过实验来研究激光扫描速度 v 与激光重复频率 f 对激光抛光的影响规律。实验设定光斑大小为 $50\ \mu\text{m}$,脉宽 $1\ \mu\text{s}$,功率 $300\ \text{W}$,入射角 90° 。

将上面进行的 $20\ \text{mm/s} \sim 2\ \text{kHz}$; $20\ \text{mm/s} \sim 4\ \text{kHz}$; $20\ \text{mm/s} \sim 6\ \text{kHz}$; $40\ \text{mm/s} \sim 2\ \text{kHz}$; $40\ \text{mm/s} \sim 4\ \text{kHz}$; $40\ \text{mm/s} \sim 6\ \text{kHz}$; $60\ \text{mm/s} \sim 2\ \text{kHz}$; $60\ \text{mm/s} \sim 4\ \text{kHz}$; $60\ \text{mm/s} \sim 6\ \text{kHz}$ 这九组激光工艺参数的光斑重叠率由公式(1)、(2)计算得出,具体计算值见表 3。

表 3 由公式计算得出的光斑重叠率统计表

Tab.3 A statistical table of spot overlap rates calculated by formulas

扫描速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	频率 f/kHz	光斑直径 $D/\mu\text{m}$	光斑重叠数 N	光斑重叠率 δ
20.00	5.00	30.00	7.5	0.86
20.00	8.00	30.00	12	0.91
20.00	10.00	30.00	15	0.93
40.00	5.00	30.00	3.75	0.73
40.00	8.00	30.00	6	0.83
40.00	10.00	30.00	7.5	0.86
60.00	5.00	30.00	2.5	0.60
60.00	8.00	30.00	4	0.75
60.00	10.00	30.00	5	0.80

采用触针式表面粗糙度仪对不同光斑重叠率下抛光得到的试样进行三次测量其表面粗糙度值,并计算三次测量值 Ra 算术平均值,整理得到不同激光光斑重叠率下抛光的 TC4 合金表面粗糙度的测

量值统计表见表 4,并绘制了对应的折线图如图 7 所示。

表 4 不同光斑重叠率下测量的 TC4 表面粗糙度值 Ra

Tab.4 TC4 surface roughness value Ra measured at different spot overlap rates

光斑重叠率 δ	TC4 合金表面粗糙度测量值 Ra/nm			算术平均值
	第一次	第二次	第三次	
0.93	800	790	784	792
0.91	691	712	742	715
0.86	703	673	637	671
0.83	613	619	634	622
0.80	525	516	516	519
0.75	315	321	303	313
0.73	488	458	485	477
0.60	431	435	442	436

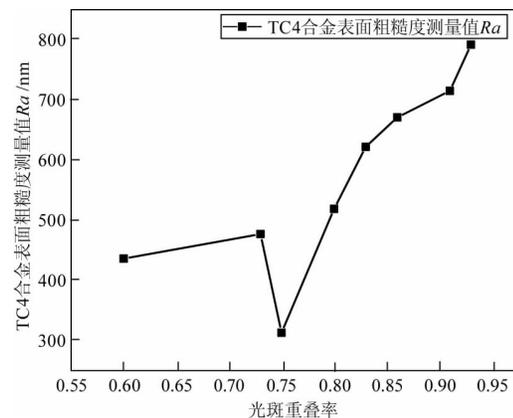


图 7 不同激光光斑重叠率下测量的 TC4 合金材料表面粗糙度值变化曲线

Fig.7 The variation curve of the surface roughness value of TC4 alloy material measured at different laser spot overlap rates

由图 7 折线图可以看出:当激光光斑重叠率 δ 在 $55\% \sim 70\%$ 与 $75\% \sim 95\%$ 范围内,随着 δ 的增大,激光抛光机对 TC4 合金的抛光抛光效果逐渐变差,使得试样表面的粗糙度值随之增大,造成这一现象的主要原因是当激光光斑重叠率过小,试样材料表面不能接收到足够的激光能量,使得试样材料表面温度不能升高到材料熔化温度,从而导致材料表面的凸起部分不足以熔化,从而使得对试样表面的抛光效果不理想;当激光光斑重叠率过大时,试样表面吸收了太多的激光能量,使得材料表面温度远远超过材料熔点,并且材料表面持续处于高温状态,导致熔融金属量增多,材料表

面形成了尺寸较大的熔池,从而使得材料表面形貌变得凹凸不平,表面粗糙度值 Ra 增大,抛光效果不理想。另外从图 7 中可以看出:激光光斑重叠率 δ 在 70% ~ 75% 之间时,出现 Ra 值降低,说明此范围的 δ 值可以使得激光抛光效果增强,有利于降低试样表面的粗糙度值。

4 抛光缺陷机理分析

4.1 TC4 合金激光抛光后显微组织分析

采用激光功率为 350 W,激光扫描速度为 10 mm/s,离焦量为 0.8 的脉冲激光光束对 TC4 合金进行表面抛光处理,同等激光工艺参数下有限元数值模拟温度分布云图如图 8 所示,经过查阅相关文献得知,TC4 合金的熔点为 1668 °C,当材料温度低于 882 °C 时,其材料微观组织为呈密排六方晶格结构,即 α 钛相;当材料温度高于 882 °C 时,其材料微观组织呈现为体心立方晶格结构,即 β 钛相。通过观察模拟温度分布云图 8,抛光过程中 TC4 材料内部的温度梯度较大,造成的不同区域的材料微观组织变化大不相同,因此为了更准确的分析 TC4 材料抛光后的微观组织形貌变化,本研究决定将激光扫描过的材料分为两部分研究其微观晶相组织在高温下的演变过程。一部分为从材料上表面到往下 30 μm 这部分区域,为了方便研究故取名为 A 区,另一部分为从 A 区往下 60 μm 区域,取名 B 区,具体区域划分如图 8 所示。

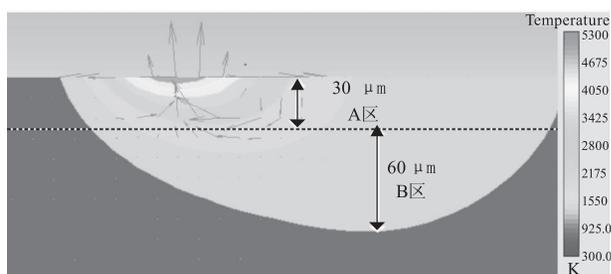
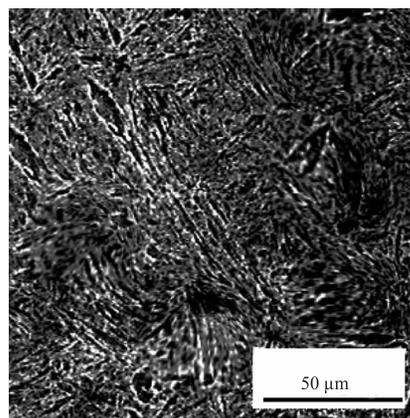


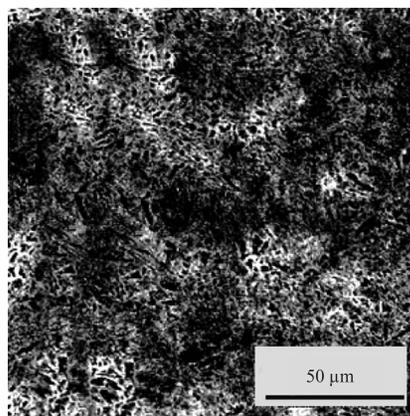
图 8 有限元数值模拟温度分布云图

Fig. 8 Finite meta values simulate a cloud map of temperature distribution

在抛光后的 TC4 试样表面质量较好区域选取平行于激光光束方向的纵向截面,然后按照图 8 所示 A、B 区域将选取的纵向截面分成两部分,利用利用光学显微镜对 A、B 试样进行微观组织的观察分析表征,得到 TC4 合金激光抛光后微观组织如图 9 所示,图 9(a) 为 A 试样的组织微观图,图 9(b) 为 B 试样的组织微观图。



(a) A 试样的组织微观图



(b) B 试样的组织微观图

图 9 利用光学显微镜得到的 TC4 合金激光抛光后微观组织

Fig. 9 Microscopic tissue after polishing of TC4 alloy lasers using optical microscopes

从图 9(a) 中可以看出:A 区域组织金相主要由针状 α 相、黑色 β 相层片和晶界 α 相构成。激光光束辐射到材料表面时,材料表面温度迅速升高,导致 A 区熔融层金属内部组织 α 相迅速转变为尺寸较小且均一黑色片层 β 相组织,随着激光光束的扫离,材料表层温度迅速降低,一部分 β 相组织由转变回针状 α 相与片层 α 组织,导致最终靠近 A 区材料表面的熔融层金属内部组织为针状 α 相与片层 α 相及残余黑色 β 相组成。金相转变过程为 α 相 \rightarrow β 相 \rightarrow α 相和 β 相,并且由于激光抛光的影响,抛光后的显微组织微观晶粒方向是顺着激光光束扫描路径分布的。图 9(b) 中所展示的为距离抛光面 30 μm 以下的 B 区域的微观组织图,对比图 9(a),可以发现 B 区域内的晶格细化程度不明显,晶粒方向杂乱无章, α 相与 β 相共存,且明显看出黑色 β 相要多余白色针状 α 相,原因为:试样 B 区域温度升高温度,会发生 α 相向 β 相的转变,且相变时由于原子的扩散、相的溶解、析出聚集等,使得形状改变的 β 相慢慢转变

为分布在 α 相晶粒周围的小岛,使得晶界不明显。

4.2 抛光前后 TC4 合金的测量硬度对比

采用型号为 UHL VMH-00VD 的显微硬度测量仪分别对只经过金相试样抛光机粗抛光的 TC4 样品与经过激光抛光(激光工艺参数为激光功率为

350 W,扫描速度为 10 mm/s)的 TC4 合金试样进行硬度测量,在每种试样测试表面上各选取 5 个测试点,对每个施加时长持续 20 s 的 400 gf 载荷,最后统计测试点的硬度值并计算出平均值作为最终的 TC4 合金的硬度值。统计结果见表 5 所示。

表 5 试样抛光前后表面硬度测量统计表

Tab.5 Sample polishing front and rear surface hardness measurement statistics table

	测试点 1	测试点 2	测试点 3	测试点 4	测试点 5	平均值
试样抛光前/HV	395	409	386	391	398	395.8
试样抛光后/HV	425	422	435	432	419	426.6

由表 5 知,抛光后的试样表面显微硬度从 395.8 HV 增加到了 426.6 HV,使得试样表面抗压能力增强,主要由于温度变化,使得试样材料内部组织晶格尺寸变小,数量增多导致以及在抛光过程中转变成更加致密的金相组织。

5 结 论

通过脉冲光纤激光抛光机对 TC4 合金试样进行表面抛光处理实验,研究分析了激光输出功率、离焦量、光斑重叠率对抛光效果的影响机理和抛光后试样材料微观组织变化情况,得出了以下结论:

(1)对于利用可调激光输出功率 200 ~ 500 W 的激光抛光机抛光 TC4 合金材料时,最佳的激光功率设定值范围为 325 W 左右,在该设定值范围内,可以得到最佳的抛光效果。

(2)高离焦量应该搭配高激光输出功率,低离焦量时,激光输出功率应该尽量低一些,并且经实验数据分析得到当激光输出功率为 300 W 时,激光离焦量的设定值最佳为 +7 mm。

(3)通过观察分析特定激光工艺参数配置下的抛光后试样表面微观组织形貌,得出经激光抛光后的试样微观组织经历了金相转变为 α 相 \rightarrow β 相 \rightarrow α 相 + β 相的过程,并且抛光层表面晶格尺寸细化,晶粒数增大,使得试样表面的硬度、强度、抗腐蚀性等物理属性得到了优化加强,并通过实际硬度测试验证了该结论。

参考文献:

[1] Zhan Xiangxin, Xiong Liangxuan, Feng Chen, et al. 3D-printed titanium alloy structural part milling technology [J]. Tool Technology, 2020, 54(8): 38 - 40. (in Chinese)
战祥鑫,熊良钊,冯晨,等. 3D 打印钛合金结构件铣削

加工技术[J]. 工具技术, 2020, 54(8): 38 - 40.

- [2] Song Xinhua, Gao Hongwang, Tian Zhengfang, et al. Numerical simulation of Ti6Al4V titanium alloy machining [J]. Tool Technology, 2020, 54(7): 40 - 43. (in Chinese)
宋新华,高红旺,田正芳,等. Ti6Al4V 钛合金切削加工的数值模拟[J]. 工具技术, 2020, 54(7): 40 - 43.
- [3] Mogale N F, Matizamhuka W R. Spark plasma sintering of titanium aluminides: a progress review on processing, Structure-Property Relations, Alloy Development and Challenges [J]. Metals, 2020, 10(8).
- [4] Shi Chen, Tian Yabing, Fan Zenghua, et al. Multi-magnetically coupled rotating magnetic field photoretic properties of titanium alloy surfaces [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(12): 1415 - 1420. (in Chinese)
石晨,田业冰,范增华,等. 钛合金表面多磁极耦合旋转磁场光整加工特性[J]. 中国机械工程, 2020, 31(12): 1415 - 1420.
- [5] Morakabati M, Hajari A. Hot working behavior of near alpha titanium alloy analyzed by mechanical testing and processing map [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(6): 1560 - 1573.
- [6] Guo W, Wang H, Peng P, et al. Effect of laser shock processing on oxidation resistance of laser additive manufactured Ti6Al4V titanium alloy [J]. Corrosion Science, 2020, 170.
- [7] Cai X, Dong B, Yin X, et al. Wire arc additive manufacturing of titanium aluminide alloys using two-wire TOP-TIG welding: processing, microstructures, and mechanical properties [J]. Additive Manufacturing, 2020, 35.
- [8] Yao Hongbing, Highland, Yuan Dongqing, et al. Numerical simulation of the evolution of the surface temperature field characteristics of laser irradiated aluminum [J]. Laser &

- Infrared, 2015, 45(10): 1175 - 1179. (in Chinese)
- 姚红兵, 高原, 袁冬青, 等. 激光辐照铝材表面温度场特征演化的数值模拟[J]. 激光与红外, 2015, 45(10): 1175 - 1179.
- [9] Li Chenglong, Tang Wei, Yu Junfeng, et al. Study on the relationship between thermal response and material scale law of strong laser irradiation 7075 aluminum alloy[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(7): 789 - 794. (in Chinese)
- 李成龙, 汤伟, 邵俊峰, 等. 强激光辐照 7075 铝合金热响应与材料尺度律关系研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(7): 789 - 794.
- [10] He Wei, Zhao Wei, An Chengbin. Software design of laser damage threshold analysis system[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(5): 547 - 551. (in Chinese)
- 何奕岑, 赵昕, 安成斌. 激光损伤阈值分析系统的软件设计[J]. 激光与红外, 2016, 46(5): 547 - 551.
- [11] Zhu Dong, Zhang Liang, Wu Wenheng, et al. Advances in the study of microethics and properties of laser-plate melted-forming TC4 titanium alloys[J]. Mechanical Engineering Materials, 2020, 44(8): 1 - 4, 9. (in Chinese)
- 朱冬, 张亮, 吴文恒, 等. 激光选区熔化成形 TC4 钛合金显微组织与性能的研究进展[J]. 机械工程材料, 2020, 44(8): 1 - 4, 9.
- [12] Xia Y, Dong H, Li P. Brazing TC4 titanium alloy/316L stainless steel joint with $Ti_{50-x}Zr_xCu_{39}Ni_{11}$ amorphous filler metals[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, (849): 155650.
- [13] Wang H, Wang C, Li M, et al. Constitutive equations for describing the hot compressed behavior of TC4-DT titanium alloy[J]. Materials, 2020, 13(15): 3424.
- [14] Liu S, Zhang Z, Tang Y, et al. A novel Al-Rich/Ti-6Al-4V layered composite with superior wear and electrochemical behavior[J]. Advanced Engineering Materials, 2020, 22(8).
- [15] Li R, Liu G, Yang L, et al. Tantalum boride as a biocompatible coating to improve osteogenesis of the bionano interface[J]. Journal of Biomedical Materials Research Part A, 2020, 108(8).
- [16] Xiao YM. Thermal stress limitations to laser fire polishing of glasses[J]. Applied Optics, 1983, 22(18): 2933.
- [17] Perry T L, Werschmoeller D, Li X, et al. Micromelting for laser micro polishing of meso/micro metallic components [C]//proceedings of the ASME 2007 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2007.
- [18] Mai T A, Lim G C. Micromelting and its effects on surface topography and properties in laser polishing of stainless steel[J]. Journal of Laser Applications, 2004, 16(4): 221 - 228.