

38CrMoAl表面YAG激光抛光技术研究

那冉 陈涛

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 激光抛光是一种应用前途较广的特种加工技术,尤其适用于传统方法难以加工的高硬度且尺寸较小的零件。38CrMoAl合金结构钢多用于制造高疲劳强度、高耐磨性、热处理后尺寸精确、强度较高的各种尺寸不大的渗氮零件,如活塞螺栓和车床主轴等。利用激光技术可更加高效、环保的对38CrMoAl进行抛光加工。使用波长为1064 nm的YAG激光器在38CrMoAl表面上进行激光微抛光实验,利用三维形貌仪测量了材料表面粗糙度 R_a ,结合抛光前后材料表面微观形貌特征分析了激光电压、脉宽、离焦量等因素对该材料表面粗糙度的影响规律,并获得一个较为理想的工艺参数,即在激光聚焦面上方3 mm处,电压为790 V、脉宽为0.17 ms时,抛光表面粗糙度最低,由抛光前的142.02 nm降至79.10 nm,下降了44.3%。

关键词 激光技术; 1064 nm 激光抛光; 表面粗糙度; 38 CrMoAl

中文分类号 TN249; TG176

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.011402

YAG Laser Polishing of 38CrMoAl Surface

Na Ran Chen Tao

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Laser polishing is a special processing technology with prospect of application, particularly used for processing small size parts with high hardness which can't be achieved by conventional methods. 38CrMoAl has much superiority including high surface hardness, high fatigue strength and good resistance to overheating resistance. And it is widely used in mechanical machining, such as piston bolt and lathe spindles. 38CrMoAl can be polished by laser in a more efficient and environmental way. 38CrMoAl is micro-polished by YAG laser (1064 nm). Surface roughness of 38CrMoAl steel is analyzed by a three-dimensional topography instrument. Based on the surface morphology characteristics before and after polishing, the better processing parameters of the voltage at 790 V, pulse duration at 0.17 ms and the polishing position above the laser focal plane 3 mm are obtained. By using the micro-polishing method, the surface roughness of the metal can be decreased from 142.02 nm to 79.10 nm which have fallen by 44.3%.

Key words laser technique; 1064 nm laser polishing; surface roughness; 38CrMoAl

OCIS codes 140.3390; 350.3390; 120.6660

1 引言

激光抛光是一种新兴的抛光技术,其原理是:对金属而言,当红外激光(如YAG激光)辐射到金属材料表面时,其激光光子能量较小,在激光电磁波的作用下,金属材料中的自由电子发生强迫振动而产生次波,接着这些次波又发生了强烈的反射和较弱的透射,即自由电子通过碰撞将能量传递给晶格,实现能量的吸收^[1];当激光在材料表面形成一定的热累积并且能量密度达到熔化阈值后,材料表面上的微观高峰位置到达熔点而熔化,熔化部分受到重力和表面张力共同作用;因各处曲率半径不同,产生的表面张力梯度决定了其熔化方向,即高峰向低谷方向流动,最终获得光滑平整的表面^[2]。

38CrMoAl为高级渗氮钢,从材料特性看,具有许多优势,包括高表面硬度、高疲劳强度、良好的耐热性和耐蚀性,多用于制造高疲劳强度、高耐磨性、热处理后尺寸精确、强度较高的各种尺寸不大的渗氮零件,如活气缸套、座套、底盖、活塞螺栓、检验规、精密磨床主轴、车床主轴、搪杆、精密丝杠和齿轮、蜗杆、高压阀门、阀杆、仿模、滚子、样板、汽轮机的调速器、转动套、固定套、塑料挤压机上的一些耐磨部件^[3]。如能用激光热

收稿日期: 2015-04-14; 收到修改稿日期: 2015-06-02; 网络出版日期: 2015-12-28

作者简介: 那冉(1990—),女,硕士研究生,主要从事激光微技术方面的研究。E-mail: bessiefox@163.com

导师简介: 陈涛(1970—),男,博士,教授,主要从事激光微技术方面的研究。E-mail: chentao@bjut.edu.cn

处理技术代替渗氮工艺,则可大大缩短生产周期、节约资源和能源、提高效益。在微型工件和精密仪器的生产过程中,表面粗糙度是一个非常重要的评价指标。尤其对于微细零件的制造,由于本身尺寸较小,对表面粗糙度尤为敏感,表面粗糙度对其性能的影响也尤为突出^[2]。而抛光的效果直接关系到产品质量是否达标。因此,在产品后续处理中,抛光是一道非常重要的工艺程序。传统抛光工艺很难涉及微观领域,因而以微加工见长的激光抛光更具研究意义。激光抛光具有非接触式、灵活性高、工艺简单、可实现精密或超精密抛光和微区选区抛光、可增加不同材料的抗腐蚀性能和抗疲劳性能、环境污染小等特点^[4]。

由于38CrMoAl材料表面在传统抛光工艺过程中极易被氧化,所以国内外对于此种材料的报道较少涉及。哈尔滨工业大学的高彩桥等^[5]使用波长为10.0 μm的HGL-81横流激光器对38CrMoAl进行了激光表面处理与材料耐磨性研究。实验结果表明,该材料经激光辐照后,由表及里,组织依次为熔凝层、过烧层、淬火层、回火层;淬火层耐磨性最佳,熔凝层次之,过烧层最差。

在激光抛光其他材料方面,Nd:YAG连续激光多用于不锈钢、镍合金、铸铁的抛光,抛光后表面平均粗糙度从15 μm到0.2 μm不等^[6],例如Abdullah等^[7]研究了两个连续的激光束(550 W、1064 nm连续波激光器)的轨道之间的重叠率对激光抛光AISI113工具钢表面质量的影响。采用了4种重叠百分比(80%、90%、95%、97.5%),在氩气保护的条件下,同时施加相同能量密度的激光抛光辐照,95%的重叠率可得到最好结果,即将表面粗糙度从1.35 μm降至0.18 μm,改善率高达86.7%。;也有学者采用YAG脉冲激光用于不锈钢^[8]、工具钢^[9-10]、钛合金^[11-12]、镍^[12-13]的抛光,可以获得更加平滑的表面,例如Perry等^[11]还使用调Q Nd:YAG激光器(1064 nm)配合一个二维扫描振镜,用脉冲激光对Ti6Al4V钛合金样品进行表面微抛光。所用激光重复频率为4 kHz、光斑大小为50~70 μm、脉宽为650 ns。在空气中进行激光微抛光时,待处理表面由于发了氧化反应出现微裂纹;当加入保护气体(氩气)时,抛光效果有了很大改善,表面粗糙度由0.206 μm降至0.070 μm。

采用波长为1064 nm的Nd:YAG脉冲激光对38CrMoAl进行辐照,采用单因素法分别研究了激光脉冲能量、离焦量、脉宽、光斑形状等因素对38CrMoAl表面粗糙度的影响规律。通过对实验数据间的比较,优化激光加工参数,进而获得更好的抛光效果。

2 实验条件及方法

2.1 实验材料

实验采用38CrMoAl钢(化学成分如表1所示^[8]),该材料属于合金结构钢,此外,该合金具有很高的渗氮性能和力学性能,良好的耐热性和耐蚀性,经渗氮处理后,能得到高的表面硬度、高的疲劳强度及良好的抗过热性,无回火脆性,切削加工性尚可,高温工作温度可达500℃,但冷变形时塑性低,焊接性差,淬透性低,一般在调质及渗氮后使用。

表1 38CrMoAl合金结构钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 38CrMoAl (mass fraction, %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	B	V	Others
0.35~0.42	0.20~0.45	0.30~0.60	1.35~1.65	0.15~0.25	—	—	—	Al 0.70~1.10

2.2 实验装置和检测设备

实验采用波长1064 nm的YAG激光器作为激光抛光的光源。该激光器可改变的相关参数如下:激光电源工作电压400~800 V,频率0.05~1000 Hz,脉宽0.10~9.99 ms,光纤芯径600 μm。实验装置如图1所示。



图1 激光器及其相关设备

Fig.1 Experimental setup

试验样品使用白光干涉仪即三维形貌仪(WYKO NT1100 Optical Profiling System)测量表面粗糙度 R_a , 在垂直扫描干涉(VSI)模式下测量精度为 1 nm, 采用 50 倍放大镜头, 其视场范围(对应测试面积大小)为 736 nm×480 nm。

2.3 实验方法

抛光实验前, 使用线切割方法将直径约为 40 mm 的 38CrMoAl 棒材切割成尺寸规格为 35 mm×13 mm×0.27 mm 的平板试样。为了统一实验的初始条件, 使用 600 号水砂纸预磨 38CrMoAl 合金钢的表面, 其初始表面粗糙度约为 130 nm。

抛光过程是固定位置辐照。抛光实验中, 由于该激光器功率过高, 选用不同形状的金属光阑置于聚焦镜下方, 限制通光光束大小并达到降低激光的单脉冲能量的目的。金属光阑使用 0.4 mm 厚的 304 不锈钢板, 由连续波(CW)光纤激光器(1070 nm)选用工作台移动速度 $v=18$ mm/s, 85 W 的工作功率切割而成。如图 2 所示, 每一片光阑(外径为 59 mm)的通光孔形状均为圆形, 通光孔的尺寸见表 2。抛光过程中工艺参数选择范围见表 3, 在大气环境下进行辐照, 常温冷却。

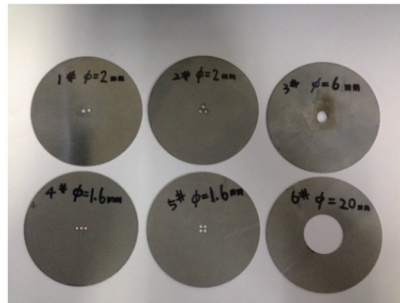


图2 金属光阑

Fig.2 Metallic apertures

表2 金属光阑的通光孔尺寸

Table 2 Size of metallic apertures

No.	Radius /mm	Distance of the circles centers /mm
1	2	3
2	2	3
3	6	-
4	1.6	2.2
5	1.6	2.2
6	20	-

表3 激光抛光的工艺参数

Table 3 Variation ranges of welding parameters

Option	Parameter
Laser voltage /V	700, 705, 720, ..., 770, 775, 790
Pulse duration /ms	0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 1.5, 9.99
Lens focus /mm	100

3 实验结果

本实验采用单因素法分别分析了光斑形状、激光电压、脉宽、离焦量等因素对抛光 38CrMoAl 合金钢表面粗糙度的影响规律。

3.1 金属光阑对抛光效果的影响

抛光实验中, 为了降低激光的单脉冲能量, 选用 6 种不同形状(见图 2)的金属光阑置于聚焦镜下方。在激光电压为 790 V、脉宽为 9.99 ms 参数下, 无金属光阑情况下, 激光单脉冲能量为 68.5 J, 加上金属光阑后, 入射到样品表面的激光单脉冲能量测量值如表 2 所示。不同的金属光阑对抛光加工的参数有着截然不同的要求, 根据不同的参数条件下, 得到每个金属光阑所获得的最佳表面粗糙度值, 同样列于表 4 中。4 号金属光阑对激

光能量的利用率最低,并且在实验中,该金属光阑几乎不能实现对38CrMoAl合金钢的抛光,这不仅是由于金属光阑的透过面积小,还因为直线型三孔金属光阑在辐照过程中,光斑形状过于分散、不集中,很难达到材料微熔的阈值,进而导致实验效果的不理想;相似的情况还有1号金属光阑。对比2号和5号金属光阑,虽然2号金属光阑的透过面积较高、激光能量利用率较高,但是5号金属光阑的透光孔布局更为紧凑,对抛光效果的影响更大,结果更好。3号金属光阑在透过面积和能量利用率上更具优势,但是单一的金属光阑形状并没有获得更加出色的抛光效果,表面粗糙度的下降率介于2号和5号金属光阑之间。6号金属光阑的面积过大,透过的激光能量过高超过了仪表测量范围,改用较低参数测得该金属光阑对能量的利用率约为49%,进而由于激光能量过大导致抛光失败。说明金属光阑的形状和透过面积对抛光效果均有着不同的影响。

3.2 激光电压对抛光表面粗糙度的影响

使用四孔金属光阑,因上组数据充分反映出较低激光能量密度可以获得较好的抛光效果,因而本组实验决定略微升高激光脉宽(设为1.5 ms),这样便需要低于790 V的激光电压与之配合才能达到合理的激光能量密度。在不同激光电压(激光能量密度)的辐照下,材料表面发生不同的变化,包括固态加热、表面重熔(微熔、深熔)、形成小孔等。并选择在离焦量为2 mm的条件下进行激光辐照,得到激光电压对抛光表面粗糙度的影响,如图3所示。从三维形貌仪的测量结果可以看出:当激光电压小于715 V时(对应的激光脉冲能量也较低),抛光后粗糙度变化不明显,基本与基底粗糙度值持平;当激光电压为725 V时,抛光表面粗糙度最低,由126.48 nm降至95.80 nm,如图4所示,下降了24.3%,抛光后表面的划痕变少变浅;随着激光电压的升高,抛光表面粗糙度缓慢的增加;当电压超过770 V时,表面粗糙度陡然提升到300 nm;而后表面粗糙度曲线继续以锯齿形增长,由于激光器的电压值有限,最终抛光表面粗糙度停留在350 nm以下。此时,若激光器电压再继续增加,使38CrMoAl表面融化,由于基底与辐照区域存在温度差,辐照冷却后表面会形成火山形状的结构,致使表面粗糙度反而增加。在上述过程中,随着脉冲能量的增加,激光与金属中的自由电子发生作用,电子经过碰撞将能量传递给晶格,当能量积聚到材料的熔点温度时,金属发生表面的微熔。随着能量进一步的升高,材料表面的温度也随着升高,但金属对激光能量的吸收率在熔点附近有下降的趋势,所以表现为粗糙度的缓慢上升而不是急剧上升。说明电压对抛光效果影响尤为明显。

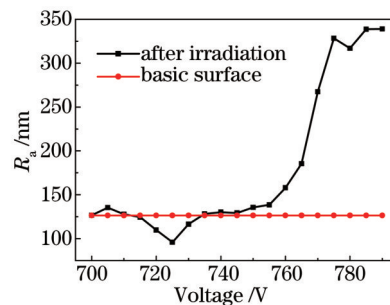


图3 电压对激光抛光表面粗糙度的影响

Fig.3 Roughnesses (a) at different laser voltages

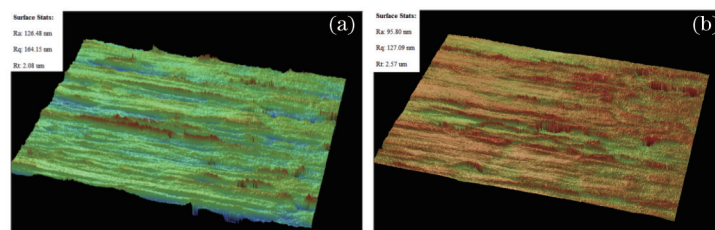


图4 辐照前后的38CrMoAl合金钢的三维形貌。(a) 基底(未辐照); (b) 辐照后; 激光电压力725 V

Fig.4 Surface profiles of 38CrMoAl before and after irradiation. (a) Basic surface (before irradiation);

(b) after irradiation at the voltage of 725 V

在本组实验中,最好的辐照参数为:激光电压为725 V,脉宽为1.5 ms,试样表面粗糙度由126.48 nm降至95.80 nm。因该参数能量过低,不易测量,使用能量计测得激光器在790 V、9.99 ms参数下经过四孔金属光阑后的能量平均值约为0.65 J,经推算725 V、1.50 ms参数下单脉冲能量约为 8.98×10^{-2} J,光学显微镜下测得辐照后的圆形(近似看成光斑大小)的直径约为0.185 mm,计算该条件下激光功率密度 I 约为 2.2×10^5 W/cm²,该

数据恰好满足文献[1]中给出的激光加工金属表面重熔的参考范围,即当激光功率密度 I 在 $10^4\sim 10^6\text{ W/cm}^2$ 数量级范围内时,金属材料表层发生熔化。比较本组和上组实验结果,由于激光器的电压调节不能像脉宽的调节那样精准,所以电压对抛光效果影响次于脉宽抛光效果影响。

表4 各光阑能量透射率及达到的最佳粗糙度值

Table 4 Energy transmission proportions and minimum roughness values with different apertures

No.	Area of aperture /mm ²	Energy of single pulse /J	Energy transmission proportion %	Roughness average of basic surface /nm	Roughness average of the surface after irradiation /nm	Rate of the reduce of roughness average %
1	6.28	0.74	1.08	177.64	157.38	11.41
2	9.42	1.0925	1.59	132.87	91.90	30.83
3	28.3	3.16125	4.61	158.64	94.31	40.55
4	6.03	0.6515	0.95	139.27	135.44	2.75
5	8.04	0.98225	1.43	142.02	79.10	44.30
6	314	-	-	156.87	110.42	29.61

3.3 离焦量对激光抛光表面粗糙度的影响

结合上组实验结果,使用四孔金属光阑,在激光电压为790 V、脉宽分别为5 ms和2.5 ms的条件下,得到离焦量对抛光表面粗糙度的影响,如图5所示,测量结果可以看出:YAG激光抛光38CrMoAl合金钢过程中,表面粗糙度随着离焦量的增大而降低。脉宽为5 ms条件下,当离焦量小于8 mm时,辐照后表面粗糙度远高于基底表面粗糙度,未能达到抛光的效果;当离焦量达到8 mm时,抛光表面粗糙度下降明显。脉宽为2.5 ms条件下,当离焦量小于6 mm时,辐照后表面粗糙度远高于基底表面粗糙度,未能达到抛光的效果;当离焦量大于等于6 mm时,抛光表面粗糙度下降明显,且出现一个较为理想的位置达到抛光的效果,即离焦量为聚焦面上方7 mm处,由抛光前的157.80 nm降至143.60 nm,下降了9.0%,如图6所示。通过研究认为:在其他工艺参数相同时,随着离焦量的增加,抛光后的表面粗糙度呈下降趋势,并出现一个较为理想的位置使抛光效果更好。说明在激光脉冲能量很高的情况下,离焦量对抛光效果的改善并不明显。

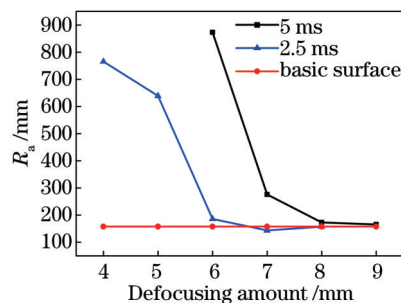


图5 离焦量对激光抛光表面粗糙度的影响

Fig.5 Roughnesses at different defoucing amounts

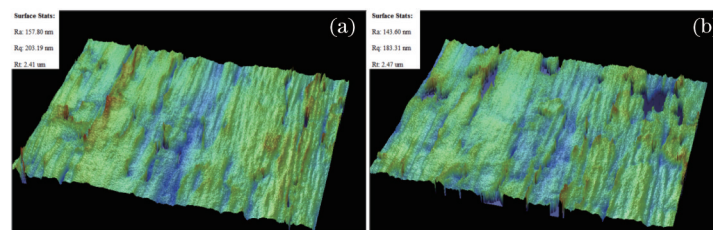


图6 辐照前后的38CrMoAl合金钢的三维形貌。(a) 基底(未辐照); (b) 辐照后; 离焦量为7 mm

Fig.6 Surface profiles of 38CrMoAl before and after irradiation. (a) Basic surface (before irradiation); (b) after irradiation at focal distance of 7 mm

3.4 脉宽对激光抛光表面粗糙度的影响

使用四孔金属光阑,激光电压为790 V,尝试了在聚焦面上方离焦量分别为2 mm、3 mm和8 mm处,在不同脉宽的条件下进行辐照。当离焦量为3 mm时,有较好的结果,得到激光脉宽对抛光表面粗糙度的影响,如图7所示。在其他工艺参数相同时,随着脉宽的增加,抛光后的表面粗糙度呈先下降后升高的趋势,并呈现一

个理想的位置使抛光效果最好。测量结果可以看出:YAG激光抛光38CrMoAl合金钢过程中,当脉宽为0.17 ms时,抛光表面粗糙度最低,由抛光前的142.02 nm降至79.10 nm,如图8所示,下降了44.3%,抛光后表面的划痕消失。此时,若想获得更加平滑凝固的表面,则需要液态金属具有最小表面能,又由于液态金属杂质(例如氧化物)阻碍了平滑的凝固表面的形成,所以表面粗糙度未能得到进一步地下降。虽然使用的是四孔金属光阑,由于离焦量并不大,激光光束尚未分离,只有一个辐照区域,如图9所示,中心位置为辐照区域,四周为基底,整体来看,抛光后的材料表面与基底有明显的改善,划痕几乎完全消失。说明脉宽对抛光效果影响显著。

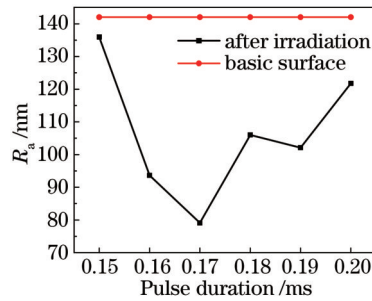


图7 脉宽对激光抛光表面粗糙度的影响

Fig.7 Roughnesses at different pulse durations

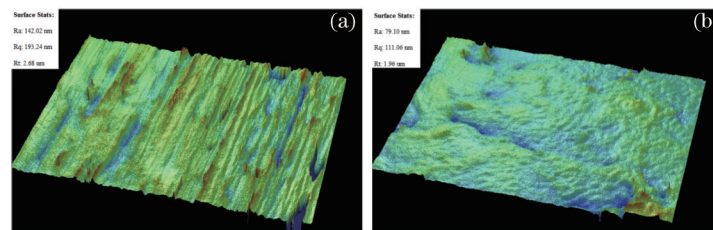


图8 辐照前后的38CrMoAl合金钢的三维形貌。(a) 基底(未辐照); (b) 辐照后; 脉宽为0.17 ms

Fig.8 Surface profiles of 38CrMoAl before and after irradiation. (a) Basic surface (before irradiation); (b) after irradiation at 0.17 ms pulse duration

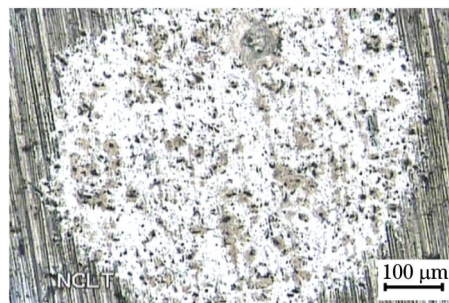


图9 抛光后的38CrMoAl合金钢表面的显微照片

Fig.9 Optical microscope image showing the result of laser polished 38CrMoAl

4 结 论

采用YAG激光器对38CrMoAl合金钢进行了抛光实验。辐照过程中,有很多因素会影响到材料的表面粗糙度。分析了6种不同形状的金属光阑对抛光效果的影响。当金属光阑的透过面积过小或形状分布于分散、不集中时,大大降低了激光的单脉冲能量,导致很难达到材料微熔的阈值;当金属光阑的透过面积适中(约为 8 mm^2)时,透光孔布局更为紧凑的金属光阑(如四孔金属光阑)对激光能量利用率较高,抛光效果更好。当金属光阑的透过面积过大(达到 10^2 mm^2 量级)时,已不能达到降低激光单脉冲能量的目的,因而导致抛光失败。说明金属光阑的形状和透过面积对抛光效果均有着不同的影响。并存在一个较为理想的参数可以实现抛光,即使用四孔金属光阑,在激光聚焦面上方3 mm处,电压为790 V、脉宽为0.17 ms时,抛光表面粗糙度最低,由抛光前的142.02 nm降至79.10 nm,下降了44.3%。

研究了离焦量对试样表面粗糙度的影响,由于离焦量影响着激光能量密度,进而影响了抛光效果。在激光电压为790 V、脉宽分别为5 ms和2.5 ms的条件下,随着离焦量的增加,激光能量密度下降,试样表面粗

糙度均呈现下降的趋势,但对材料表面粗糙度的改善效果一般,说明在激光脉冲能量仍处于较高水平时,离焦量对抛光效果影响并不明显。

研究了激光的脉宽和电压对试样表面粗糙度的影响。激光的电压和脉宽决定了激光功率密度,并决定了是否能达到抛光的阈值。在其他参数一定的条件下,随着激光电压的升高、脉宽的增加,试样表面粗糙度先下降后升高;并比较两组实验结果,得到最佳的抛光工艺参数为:当激光电压为790 V、脉宽为0.17 m,在聚焦面上方3 mm位置辐照,试样表面粗糙度由抛光前的142.02 nm降至79.10 nm,下降了44.3%。

致谢 感谢郑崇、闫晓光在采集实验结果数据上的帮助。

参 考 文 献

- 1 Zuo Tiechuan. Advanced Manufacturing in 21 Century: Laser Technology and Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007, 29: 33-35, 27.
左铁钊. 21世纪的先进制造: 激光技术与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 29: 33-35, 27.
- 2 Chen Ling, Yang Yongqiang. Laser polishing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(8): 57-59.
陈 林, 杨永强. 激光抛光[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(8): 57-59.
- 3 Zhao Baorong, Cai Hongnian. Metallic Material Handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 29, 45-46, 59, 186.
赵宝荣, 才鸿年. 金属材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 29, 45-46, 59, 186.
- 4 Chen Tao, Wang Caihong, Wu Jian, *et al.*. The current research situation of laser polishing technology[J]. New Technology & New Process, 2009, (9): 70-73.
陈 涛, 王彩红, 吴 坚, 等. 激光抛光技术的研究现状[J]. 新技术新工艺, 2009, (9): 70-73.
- 5 Gao Caiqiao, Yang Ping. Laser surface processing of 38CrMoAl[J]. New Technology & New Process, 1989, 4: 9-11.
高彩桥, 杨 平. 38CrMoAl钢激光表面处理[J]. 新技术新工艺, 1989, 4: 9-11.
- 6 Bordatchev E V, Hafiz A M K, Tutunea F O R. Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2014, 73(1-4): 35-52.
- 7 Hafiza A M K, Vbordatchevb E, Tutunea F R O. Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2012, 14(4): 425-434.
- 8 Mai T A, Lim G C. Micro-melting and its effects on surface topography and properties in laser polishing of stainless steel [J]. Journal of Laser Applications, 2004, 16(4): 221-228.
- 9 Hua M, Shao T M, Tam H Y. Surface transformation of DF-2 steel after continuous mode laser irradiation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192(4): 89-96.
- 10 Hua M, Shao T M, Tam H Y. Surface modification of DF-2 tool steel under the scan of a YAG laser in continuously moving mode[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(10): 4689-4697.
- 11 Perry T L, Werschmoetter D, Li X, *et al.*. Pulsed laser polishing of micro-milled Ti6Al4V samples[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2009, 2(11): 74-81.
- 12 Kumstel J, Kirsch B. Polishing titanium- and nickel-based alloys using CW-laser radiation[J]. physics procedia, 2013, 41: 362-371.
- 13 Perry T L, Werschmoeller D, Li X C, *et al.*. The effect of laser pulse duration and feed rate on pulsed laser polishing of micro-fabricated nickel samples[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 2009, 131(3): 031002.

栏目编辑: 张浩佳