

激光与光电子学进展

能量密度对皮秒激光清洗 H13 模具钢的表面形貌与性能影响

彭伟^{1*}, 雷辉²¹河南职业技术学院机电工程学院, 河南 郑州 450046;²河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 采用 1064 nm 皮秒光纤激光器, 在 5 组不同的能量密度参数下对 H13 热作模具钢表面油污和锈迹等污渍进行激光清洗, 结果表明: 2 J/cm² 和 3 J/cm² 能量密度的激光清洗效果最佳, 可使清洗后的表面粗糙度 R_a 分别达到 $(1.1 \pm 0.3) \mu\text{m}$ 和 $(1.5 \pm 0.5) \mu\text{m}$, 表面硬度分别提高到 $(256 \pm 3.8) \text{HV}$ 和 $(256 \pm 2.9) \text{HV}$, 清洗后的物相主要包括 VC、(Mo, Cr)₆C、(Cr, Fe)₇C₃ 和 (V, Cr)₂C, 同时 EDS 能谱测试结果表明模具表面的 C、Mo、V、Cr 元素含量增大。

关键词 激光光学; 激光清洗; H13 模具钢; 表面性能; 工艺优化

中图分类号 TG146.23; TG178

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1714002

Effect of Energy Density on Surface Morphology and Properties of H13 Mold Steel via Picosecond Laser Cleaning

Peng Wei^{1*}, Lei Hui²¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Polytechnic, Zhengzhou, Henan 450046, China;²School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract Using a 1064-nm picosecond fiber laser, five different energy densities were designed to conduct laser cleaning experiments on oil and rust stains present on H13 hot die steel. The results show that energy densities of 2 J/cm² and 3 J/cm² have the best cleaning effect; the surface roughness R_a can reach $(1.1 \pm 0.3) \mu\text{m}$ and $(1.5 \pm 0.5) \mu\text{m}$, respectively; and the surface hardness increases to $(256 \pm 3.8) \text{HV}$ and $(256 \pm 2.9) \text{HV}$, respectively. The main phases after cleaning are VC, (Mo, Cr)₆C, (Cr, Fe)₇C₃, and (V, Cr)₂C. In addition, the EDS results show that the contents of C, Mo, V, and Cr on the mold surface are increased.

Key words laser optics; laser cleaning; H13 mold steel; surface properties; process optimization

OCIS codes 160.3380; 140.3390; 310.3840

1 引言

模具是一种按工件待加工的形状, 通过一定的

工艺使原材料成型的制造装备。如何提高模具材料的综合性能, 延长模具的使用寿命一直是制造业重点关注的问题^[1-2]。尤其针对热作模具钢的热

收稿日期: 2020-12-07; 修回日期: 2020-12-29; 录用日期: 2021-01-07

通信作者: *pengwei1969@126.com

疲劳开裂、热磨损、整体脆断、油渍侵蚀、锈迹点蚀或氧化脱落等缺陷的修复及清洗更为严格^[3]。传统的模具除油渍、除锈或去除氧化皮的方法主要是机械磨削法和化学清洗法^[4]。机械方法简单、操作灵活,但劳动强度大,噪声污染严重,易对零件表面造成永久性损伤;而化学清洗法的时间难以有效控制,不仅会对模具本身造成不同程度的腐蚀,且有毒、有污染^[5-6]。

激光清洗技术利用高能脉冲激光主要通过烧蚀效应及振动效应,使待清洗工件表面的油渍、锈迹或氧化皮等发生瞬间蒸发、破碎或剥离的物理化学变化来达到表面清洁的目的^[7-8]。与机械和化学清洗法相比,激光清洗不会造成基体损伤,也不会产生残留废液对环境产生污染,同时具有非接触柔性加工、不受材料限制、可进行复杂曲面/选区或微区清洗等特点,因此在清洗领域得到了迅速发展和应用^[9]。

20世纪80年代以来,激光清洗技术开始应用于艺术雕塑品的修复和维护,经过几十年的发展,激光清洗技术越来越完善,并逐渐应用到各种材料的表面清洁及保护^[7]。Tian等^[10]发现纳秒激光可以成功地利用瞬时热烧蚀效应快速去除铝基表面的海洋生物膜污染,且在较低的能量密度(1.08 J/cm²)下,激光清洗后的铝表面没有明显的热损伤。Liu等^[11]研究了不同能量密度对表面形貌改善的影响,分析了激光清洗后的磨损形貌和磨损机理,发现激光清洗后,原生形态缺陷转变为均匀的凹坑,且与基体材料相比,重熔层的摩擦系数下降到40%。王利华等^[4]分别采用5.1, 10.18, 15.29 J/cm²能量密度的激光,清洗了A5083-111H铝合金表面,发现当能量密度为5.1 J/cm²时,试样的表面形貌和成分分布最佳,可为后续的焊接提供良好的表面质量。王炎松等^[6]通过连续-脉冲激光的交替作用,实现了工业遗产类钢材锈蚀物的高效、高精清洗,同时发现激光清洗还能在此类钢材表面形成氧化物,该氧化物对钢材具有保护作用。陈一鸣等^[12]研究了铝合金板材光纤激光清洗机理,发现当激光功率小于12 W时,氧化膜

的去除主要靠条纹孔爆破;当激光功率大于12 W时,氧化膜的去除主要靠激光脉冲产生的热应力。邱太文等^[13]针对2024铝合金表面150 μm厚的漆涂层,应用不同脉冲频率和脉冲宽度的纳秒激光进行激光清洗技术的研究,发现当激光功率、脉冲宽度和脉冲频率分别为500 W、60 ns、20 kHz时,试样表面的油漆涂层被完全去除且基材表面未发生熔化。Palomar等^[14]采用1064, 532, 266 nm波长的Nd:YAG激光器对纯银和纯银基底进行激光清洗,发现532 nm波长激光的清洗效果最佳。

综上所述,大功率脉冲纳秒激光清洗在去除金属和复合材料表面的各种污染物、涂层、油类、颗粒等方面受到了研究人员的广泛关注。然而,纳秒脉冲激光清洗过程中由于峰值能量低,热作用时间长,基体更容易产生烧蚀、微裂纹与较厚的重铸层,且激光能量密度不可控。而皮秒超快激光由于峰值能量低,热作用时间短,材料晶格内部没有得到热量,因此材料表面没有出现熔池,有利于材料的精密加工。目前,在关于皮秒脉冲激光清洗模具表面油污和锈迹的研究中,还没有完全建立激光清洗后的表面形貌、工艺参数与力学性能之间的关系^[15-16]。因此,本文采用1064 nm皮秒光纤激光器,对热作模具钢表面的油污和锈迹进行激光清洗,探索厚层油污和锈蚀物的最佳清洗保护方案。

2 实验材料与方法

本实验选用锻造+退火态的H13(4Cr5MoSiV1)模具钢作为基体材料,其熔点为1427 °C,化学成分如表1所示。采用波长为1064 nm的皮秒脉冲激光(PX200-1-GM)和振镜扫描的方式,速度为550 mm/s,光斑直径为80 μm,光斑重叠率为45%,场透镜焦距为80 mm,脉冲宽度为10 ps,重复频率为10 kHz,最后选择5组能量密度:1 J/cm²、2 J/cm²、3 J/cm²、4 J/cm²、5 J/cm²,通过氩气保护,分别清洗H13钢表面的油污与锈迹。采用德国testo 872级智能红外热像仪[热灵敏度:0.06 °C,室温:(22±0.5) °C]实时监测清洗过程中的温度。

表1 H13(4Cr5MoSiV1)钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of H13 (4Cr5MoSiV1) steel

Element	C	Cr	Mo	Si	V	Mn	S	Fe
Mass fraction / %	0.38	5.15	1.21	1.11	0.89	0.37	0.004	Bal.

清洗完成后,采用Axiovert200MAT金相显微镜和德国蔡司FE-SEM型扫描电子显微镜

(scanning electron microscopy, SEM)观察表面显微组织与表面形貌;采用JB-6C表面轮廓仪测量激光

清洗后的表面粗糙度;采用能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)分析激光清洗表面的元素分布;采用MHV2000型显微硬度计进行硬度测试,载荷为0.98 N,加载时间为10 s,每个位置测量5次,取平均值,激光清洗后的表面物相结构采用D/Max-2500PC型X射线衍射仪(X-ray diffractometer, XRD)进行分析。

3 实验结果及讨论

激光清洗后的微观表面形貌如图1所示,未清洗的H13钢表面布满了锈迹与油污等污渍[图1(a)],这些污渍与H13模具钢表面之间的黏附作用力主要为范德瓦耳斯力、毛细力和静电力,由于激光清洗过程存在清洗阈值,只有能量密度高于污染物阈值并低于模具基体阈值才能实现有效的清洗^[11]。同时,在脉冲激光照射下,残留污渍从金属表面脱离有两种主要的机制:污渍的热膨胀和金属基底的热膨胀^[10]。经过不同能量密度的激光清洗后发现,表面油污和锈迹大部分被清除。1 J/cm²的能量密度虽然可以去除大部分表面污染物,但是部分残余颗粒物清晰可见,且表面粗糙度 R_a 为(3.3±0.7) μm,说明此时的能量密度不足以使污渍产生完全热膨胀,使其无法从模具表面整体去除,导致表面粗糙度较大,如图1(b)所示。继续提高激光能量密度达到2 J/cm²

后,模具表面残余颗粒物完全被去除,且表面出现金属光泽,激光扫描痕迹隐约可见,表面粗糙度 R_a 降低至(1.1±0.3) μm,说明清除污渍对H13钢基体的影响较小,且能降低其表面粗糙度,如图1(c)所示。当激光能量密度达到3 J/cm²后,清洗后的表面无油污和锈迹,金属光泽更加明显,激光扫描痕迹也变得更加清晰,表面粗糙度 R_a 提高到(1.5±0.5) μm,说明在去除污渍时H13钢基体发生了热膨胀,如图1(d)所示。能量密度进一步提高到4 J/cm²后,清洗表面微观形貌与3 J/cm²的形貌类似,虽然可以完全去除模具表面的污渍,但表面的激光扫描痕迹更加明显且微观起伏较大,表面粗糙度 R_a 提高到(2.6±0.6) μm,如图1(e)所示。当能量密度提高到5 J/cm²后,如图1(f)所示,模具表面出现了明显的烧蚀与裂纹,且表面粗糙度 R_a 高达(5.7±0.7) μm,说明过高的能量密度会对H13模具钢的表面产生不可逆的破坏。上述分析过程是从能量密度的角度来考虑的,由于激光的能量密度在H13钢模具的表层较大,一方面使污渍产生热膨胀,挣脱范德瓦耳斯力、毛细力和静电力的黏附作用,使其脱离基体表面;另一方面,激光与污渍接触过程中过高的局部瞬时温度使污渍产生光化学烧蚀以破坏化学分子之间的化学键,或光物理烧蚀破坏团簇之间的物理结合力,使得大块物质分解为小块物质,从H13模具钢表面脱离^[5]。

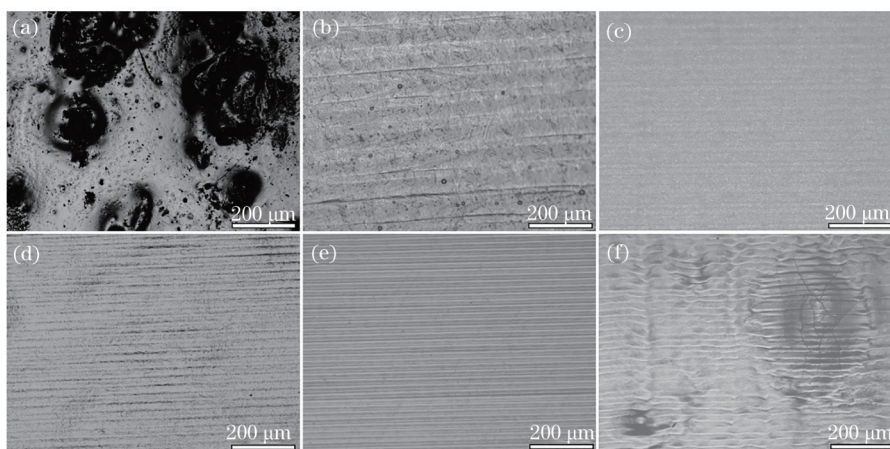


图1 不同能量密度激光清洗后的表面形貌。(a)原始表面;(b)1 J/cm²; (c)2 J/cm²; (d)3 J/cm²; (e)4 J/cm²; (f)5 J/cm²
Fig. 1 Surface morphology after laser cleaning under different energy densities. (a) Original surface; (b) 1 J/cm²; (c) 2 J/cm²; (d) 3 J/cm²; (e) 4 J/cm²; (f) 5 J/cm²

为进一步确定激光清洗H13模具钢表面油污与锈迹需要的阈值能量密度,对能量密度为2 J/cm²、3 J/cm²、4 J/cm²清洗后的截面形貌进行了观察,如图2所示。从图2(a)可以看到,未清洗的模具基体由于油污或锈蚀氧化的存在,截面顶部粗糙

且具有锯齿等凸起结构。当采用能量密度为2 J/cm²的激光进行清洗时,污渍在脉冲激光的瞬时高温下发生汽化、相变爆炸或者振动脱落,脱落后并未影响基体的组织,且截面顶部的锯齿等凸起结构消失,如图2(b)所示。随着能量密度增大到

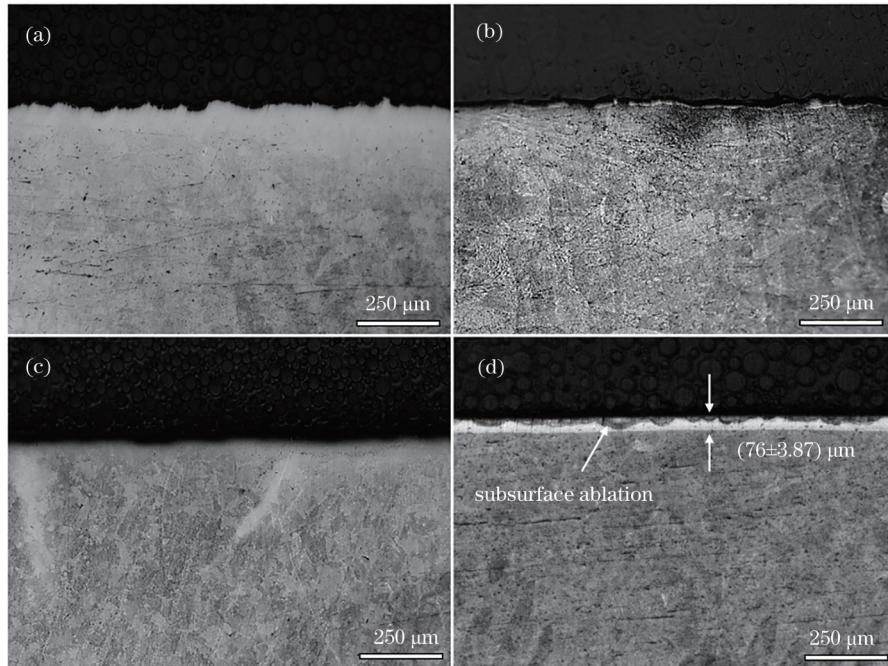


图2 不同能量密度激光清洗后的截面形貌。(a)原始截面形貌; (b) 2 J/cm²; (c) 3 J/cm²; (d) 4 J/cm²
 Fig. 2 Cross-section morphology after laser cleaning under different energy densities. (a) Original cross-section; (b) 2 J/cm²; (c) 3 J/cm²; (d) 4 J/cm²

3 J/cm², 如图2(c)所示, 模具钢表面的油污和锈迹在脉冲激光的作用下去除, 对基体的组织几乎没有影响, 且截面相对于图2(b)所示的截面变得平滑。当能量密度增大到4 J/cm²时, 如图2(d)所示, 虽然可以清洗掉表面的污渍, 但截面出现厚度为(76±3.87) μm的重铸层, 且亚表面出现烧蚀现象, 严重破坏了模具钢的基体, 因此能量密度为4 J/cm²的激光不适用于H13模具钢的清洗。通过激光能量密度参数的精确控制, 可在不损伤模具基体材料的情况

下, 有效减小或者去除油污与锈迹, 提高清洗质量。

皮秒脉冲激光相对于纳秒脉冲激光具有较高的单脉冲峰值功率, 虽然可以去除模具表面的油污和锈迹等污渍, 但对于大幅面高曲率的模具基体, 需要严格控制其热输入才能保证基体不被损坏。因此, 采用智能红外热像仪对上述2 J/cm²和3 J/cm²能量密度激光清洗过程的升温速率、峰值温度和降温速率进行实时监测, 结果如图3所示。在这一过程中, 吸收入射激光能量的位置为污渍层的表面、

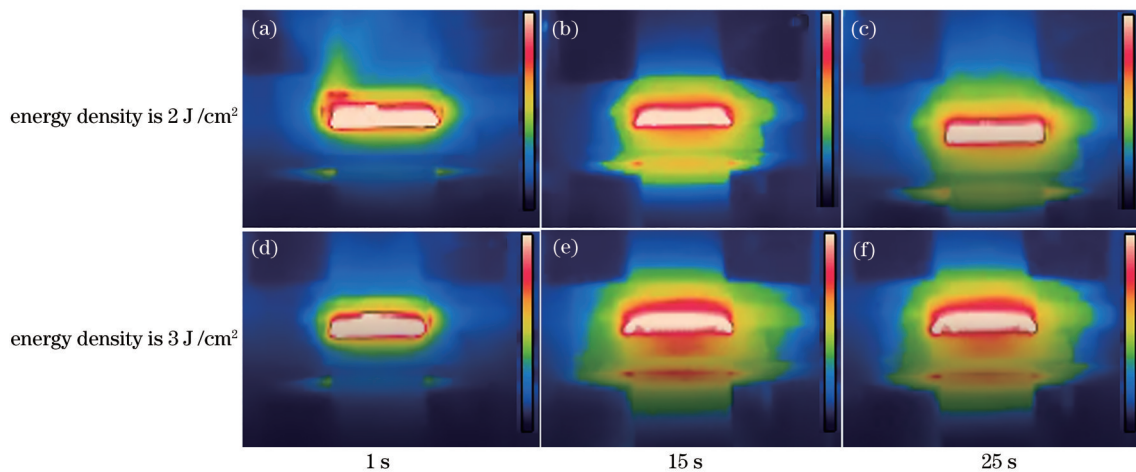


图3 不同能量密度下的温度场实时监测的SEM图像。(a) 245 °C; (b) 497 °C; (c) 156 °C; (d) 337 °C; (e) 536 °C; (f) 183 °C
 Fig. 3 SEM images of real-time monitoring of temperature field under different energy densities. (a) 245 °C; (b) 497 °C; (c) 156 °C; (d) 337 °C; (e) 536 °C; (f) 183 °C

污渍层和H13模具钢基底的交界处,同时氩气的加入也会带走一部分热量。随着激光能量密度的增大,模具表面会出现一个或多个热点,污渍表面开始热膨胀,发生烧蚀、汽化或者相变爆炸,对于油污表现为烧蚀、汽化消除,而对于锈迹则更多地表现为相变爆炸,最后通过激光脉冲的瞬时高温振动作用产生脱落^[9]。当能量密度为 2 J/cm^2 时,温度从室温快速升高到 $245\text{ }^\circ\text{C}$, 15 s 后达到最高温度 $497\text{ }^\circ\text{C}$,随后开始降温, 25 s 后将至 $156\text{ }^\circ\text{C}$,如图3(a)~(c)所示,其升温速率和降温速率分别为 $18\text{ }^\circ\text{C/s}$ 和 $34.1\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。当能量密度达到 3 J/cm^2 时,温度从室温经过 1 s 升高到 $337\text{ }^\circ\text{C}$, 15 s 后达到最高温度 $536\text{ }^\circ\text{C}$,随后开始降温, 25 s 后降至 $183\text{ }^\circ\text{C}$,如图3(d)~(f)所示,其升温速率和降温速率分别为 $14.2\text{ }^\circ\text{C/s}$ 和 $35.3\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。两种能量密度在模具基体表面产生的最高温度均未超过其熔点,由于瞬时高温只出现在表层,温度通过基体的热传导散热较快,H13钢表面没有经历重熔的变化。

虽然激光清洗后的截面形貌与温度实时监测的SEM图像基本可以确定H13模具钢的激光能量密度,但图1(c)、(d)的表面中仍然出现了激光扫描痕迹,可能是模具基体产生了热膨胀或相变。为进

一步确定激光清洗对模具的影响,测试了模具的表面硬度和物相组成,结果如图4所示。从图4(a)可以看出:模具基体的平均硬度为 $(211\pm 2.3)\text{ HV}$,经过 2 J/cm^2 能量密度激光清洗后的平均表面硬度增加到 $(256\pm 3.8)\text{ HV}$; 3 J/cm^2 的能量密度激光清洗后的平均表面硬度增加到 $(256\pm 2.9)\text{ HV}$ 。清洗后的物相组成如图4(b)所示,两种能量密度清洗后的物相主要由VC、 $(\text{Mo}, \text{Cr})_6\text{C}$ 、 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 和 $(\text{V}, \text{Cr})_2\text{C}$ 组成,通过与H13模具钢基体的物相对比发现, 2 J/cm^2 和 3 J/cm^2 能量密度的激光清洗并未在基体中增加新的物相。由此推测:硬度提升可能与清洗后的表面元素含量变化有关^[17];激光清洗是一个热加工工艺过程,表面温度的变化会使其表层组织结构发生改变,进而改变模具的表面硬度^[18]。此外,由于激光的脉冲宽度小而热流密度大,基体上表面的对流换热速度快,污渍层自身的疏松多孔结构中存在大量空气,这些空气在高温的激光热影响下将发生膨胀,局部气体的压强升高,当压强足以克服污渍层之间的结合力时,次表层将发生破碎分解,进而发生相爆炸,相变爆炸使基体在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ (图3)的温度下出现较为清晰的扫描轨迹^[19]。

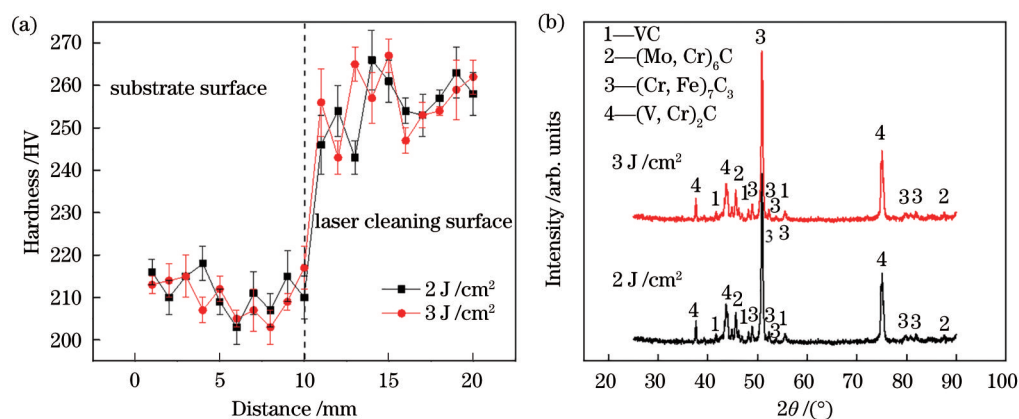


图4 清洗后的表面硬度及物相组成的测试结果。(a) 表面硬度; (b) 物相组成

Fig. 4 Test results of surface hardness and phase composition after laser cleaning. (a) Surface hardness; (b) phase composition

为进一步确定清洗表面的元素变化,在 2 J/cm^2 和 3 J/cm^2 的能量密度下对激光清洗表面进行EDS(对整个视野进行面扫)测试,所得图谱如图5所示。可以看到,两种能量密度下模具表面的元素主要包括C、Si、Mo、V、Cr、Fe,且 2 J/cm^2 和 3 J/cm^2 的能量密度下得到的元素质量比与原子数比基本相同,没有检测出O元素,说明在稀有气体保护下模具表面的锈迹等氧化物基本被清除,没有出现二次氧化,同时模具表面的C、Mo、V、Cr元素的含量均提高。

这主要是因为H13钢表面的油污本身含有大量的C元素,而锈迹等氧化物本身存在大量的Mo、V、Cr等金属元素,激光清洗H13钢模具表面的去除机理主要为污渍吸收高能激光后瞬间发生烧蚀、汽化或者相变爆炸,使部分元素挣脱基体,另一部分随高温等离子体的无规律飞溅回落到基体表面,造成C、Mo、V、Cr元素含量增大^[14],进一步说明激光清洗后的表面元素含量变化可以适当提高H13钢的表面硬度,由此可以推断出在保证其他激光参数不变的

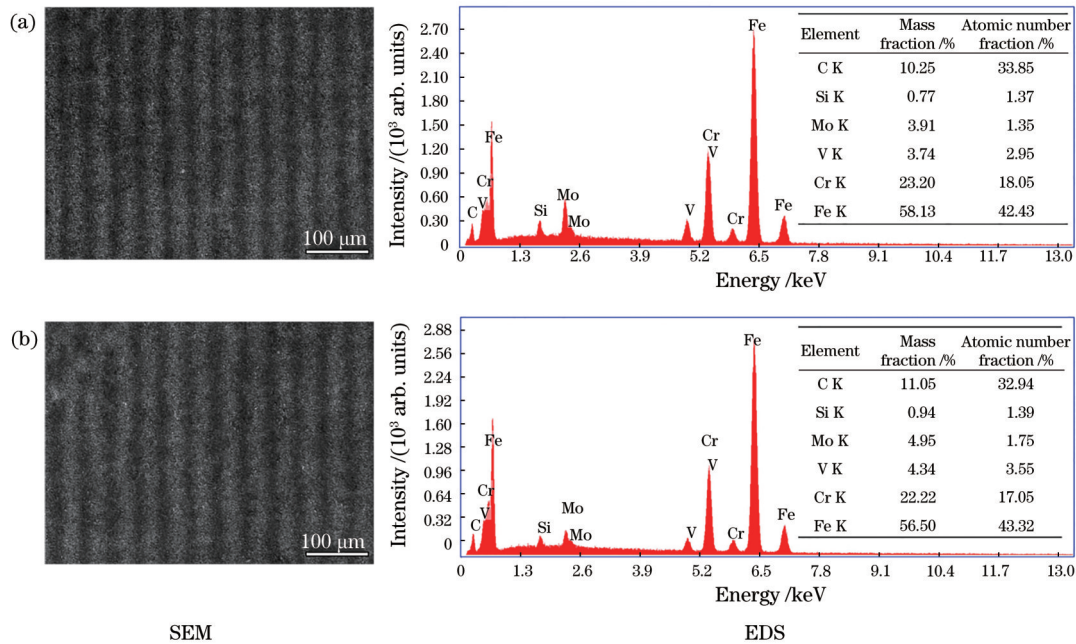


图5 不同激光能量密度下模具表面的EDS测试结果。(a) 2 J/cm²; (b) 3 J/cm²

Fig. 5 EDS test results of mold surface under different laser energy densities. (a) 2 J/cm²; (b) 3 J/cm²

情况下, H13模具钢最佳的激光清洗能量密度在2~3 J/cm²之间。

4 结 论

使用不同能量密度的激光进行模具表面清洗后发现, 表面油污和锈迹大部分被清除, 但最佳能量密度在2~3 J/cm²之间。使用2 J/cm²和3 J/cm²能量密度的激光清洗H13模具钢表面后平均硬度分别提高到(256±3.8) HV和(256±2.9) HV, 清洗后的物相主要为VC、(Mo, Cr)₆C、(Cr, Fe)₇C₃和(V, Cr)₂C, 与模具基体的物相差别不大。EDS能谱显示, 使用2 J/cm²和3 J/cm²两种能量密度激光清洗后的模具表面元素主要包括C、Si、Mo、V、Cr、Fe, 且C、Mo、V、Cr元素的含量均增大。

参 考 文 献

- [1] Kang J W, You R, Nie G, et al. Study on the thermal fatigue life of H13 steel for aluminum alloy casting [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(12): 63-68.
康进武, 游锐, 聂刚, 等. 铝合金压铸模具热疲劳寿命试验研究[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(12): 63-68.
- [2] Okada A, Okamoto Y, Uno Y, et al. Improvement of surface characteristics for long life of metal molds by large-area EB irradiation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(8): 1740-1748.
- [3] Gu J B. Study on strengthening-toughening mechanism and heat treatment of nitrogen-alloyed hot-working die steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
谷金波. 微氮合金化热作模具钢强化机制及工艺调控探究[D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [4] Wang L H, Wang S Y, Cheng Y F, et al. Research on surface morphology and element distribution of aluminum alloy after laser cleaning[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(20): 102-106.
王利华, 王少阳, 程银芬, 等. 铝合金激光清洗表面的形貌与元素分布研究[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(20): 102-106.
- [5] Zhou C, Li H G, Chen G Y, et al. Effect of single pulsed picosecond and 100 nanosecond laser cleaning on surface morphology and welding quality of aluminium alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 127: 106197.
- [6] Wang Y S, Wang C G N. Laser cleaning and protection of industrial heritage steel structure [J]. *Journal of Shenzhen University (Science and Engineering)*, 2020, 37(5): 466-473.
王炎松, 王陈高男. 工业遗产钢结构的激光清洗及保护[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2020, 37(5): 466-473.
- [7] Zhu G D, Wang S R, Cheng W, et al. Corrosion and wear performance of aircraft skin after laser cleaning [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020,

- 132: 106475.
- [8] Li X G, Huang T T, Chong A W, et al. Laser cleaning of steel structure surface for paint removal and repaint adhesion[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(3): 340-344.
- [9] Li W. Research on mechanisms of laser rust removal and manufacture of laser cleaning devices [D]. Tianjin: Nankai University, 2014.
李伟. 激光清洗锈蚀的机制研究和设备开发[D]. 天津: 南开大学, 2014.
- [10] Tian Z, Lei Z L, Chen X, et al. Evaluation of laser cleaning for defouling of marine biofilm contamination on aluminum alloys [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 499: 144060.
- [11] Liu B W, Mi G Y, Wang C M, et al. Research on grain refinement and wear behavior of micro-remelted TA15 alloy surface by laser cleaning [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 259: 124022.
- [12] Chen Y M, Zhou L Z, Yan F, et al. Mechanism and quality evaluation of laser cleaning of aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(12): 1202005.
陈一鸣, 周龙早, 闫飞, 等. 铝合金激光清洗机理与质量评估[J]. *中国激光*, 2017, 44(12): 1202005.
- [13] Qiu T W, Yi J L, Cheng C, et al. Characteristics of nanosecond pulse laser cleaning paint coatings from 2024 Al alloy surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0514001.
邱太文, 易俊兰, 程程, 等. 纳秒脉冲激光清洗2024铝合金表面油漆涂层特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0514001.
- [14] Palomar T, Oujja M, Llorente I, et al. Evaluation of laser cleaning for the restoration of tarnished silver artifacts [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 387: 118-127.
- [15] Lu Z Y, Xu Z Q, Meng C, et al. Numerical simulation of electromagnetic pulse in target chamber of nanosecond laser inertial confinement facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0914001.
卢志永, 徐志谦, 孟萃, 等. 纳秒级激光惯性约束装置靶室内电磁脉冲数值模拟[J]. *光学学报*, 2020, 40(9): 0914001.
- [16] Ji L F, Yan T Y, Jiang R, et al. Picosecond laser precision processing of ceramic gear [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111429.
季凌飞, 燕天阳, 姜锐, 等. 陶瓷齿轮皮秒激光高精加工研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 111429.
- [17] Wang L L. Study on effect of magnesium on inclusion and properties of H13 hot work die steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
王亮亮. 镁对H13热作模具钢夹杂物及性能影响的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [18] Zhu H M, Hu W F, Li Y Z, et al. Effect of tempering temperature on microstructure and properties of laser-cladded martensitic stainless steel layer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1202001.
朱红梅, 胡文锋, 李勇作, 等. 回火温度对马氏体不锈钢激光熔覆层组织和性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1202001.
- [19] Lu Y, Yang L J, Wang M L, et al. Simulation of nanosecond laser cleaning the paint based on the thermal stress [J]. *Optik*, 2021, 227: 165589.