

连续激光高速抛光冷作模具钢的 表面粗糙度及性能

周泳全¹, 张卫¹, 肖海兵¹, 徐晓梅¹, 朱颖²

(1.深圳信息职业技术学院 智能制造与装备学院, 广东 深圳 518172;
2.北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: **目的** 解决连续激光高速抛光模具钢的表面质量与效率问题。**方法** 将连续激光高斯光束通过缩束镜和 DOE 衍射整形器, 转变成平顶激光光束。通过激光抛光工艺参数的优化, 将光斑直径为 470 μm 的平顶连续激光束, 以之型与方波型组合扫描路径和 500 mm/s 的高速扫描速度, 抛光冷作模具钢 Cr12MoV, 并通过白光干涉仪和 SEM 电镜检测其表面性能。**结果** 连续激光高速抛光可将表面粗糙度由原始的 1.942 μm 快速降低至 0.26 μm , 抛光效率比传统机械抛光提高了 67%, 比人工抛光提高了 94%, 表面显微硬度提高了 125%。**结论** 工艺试验表明, 连续激光的光斑扫描路径和直径对抛光表面质量产生深远的影响, 对冷作模具钢进行高速抛光时, 需要对激光功率、光斑直径、扫描速度、扫描路径和扫描间距等激光加工参数进行优化, 在达到相同质量效果的前提下, 抛光效率是传统机械抛光效率的 8 倍以上, 是熟练技师人工抛光效率的 30 倍以上。同时, 连续激光抛光显著提高了模具钢的表面显微硬度, 无任何污染, 是一种绿色制造技术。

关键词: 激光抛光; 连续激光; 之型方波路径; 表面张力; 熔峰填充

中图分类号: TG356.28 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)02-0347-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.02.044

Roughness and Property of CW Laser High Speed Polishing of Die Steel

ZHOU Yong-quan¹, ZHANG Wei¹, XIAO Hai-bing¹, XU Xiao-mei¹, ZHU Ying²

(1.School of Intelligent Manufacturing and Equipment, Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518172, China;
2.School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the efficiency and quality problem of rapid continuous wave (CW) polishing of die steel surface. The CW laser Gaussian beam was converted into a flat-topped laser beam through a beam-shrinking mirror and a DOE diffraction shaper, so as to shape the CW laser beam and adjust the spot diameter. By optimizing the parameters of CW laser polishing process, the surface tension of molten pool was increased by combining scanning paths of zigzag pattern and square wave pattern while high laser scanning speed was maintained. The molten pool was promoted to flow around to make the peaks of microstructure generate material migration under the action of tension and flow to the valleys, thus achieving the purposes of

收稿日期: 2019-06-05; 修订日期: 2019-09-15

Received: 2019-06-05; Revised: 2019-09-15

基金项目: 深圳市科技计划 (GGFW2017041209483817, JCYJ20170817112440533, JCYJ20170817114441260)

Fund: Supported by Shenzhen Science and Technology Plan (GGFW2017041209483817, JCYJ20170817112440533, JCYJ20170817114441260)

作者简介: 周泳全 (1963—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为激光加工技术。邮箱: zhouyq@szit.edu.cn

Biography: ZHOU Yong-quan (1963—), Male, Master, Professor, Research focus: laser processing technology. E-mail: zhouyq@szit.edu.cn

引文格式: 周泳全, 张卫, 肖海兵, 等. 连续激光高速抛光冷作模具钢的表面粗糙度及性能[J]. 表面技术, 2020, 49(2): 347-353.

ZHOU Yong-quan, ZHANG Wei, XIAO Hai-bing, et al. Roughness and property of CW laser high speed polishing of die steel[J]. Surface technology, 2020, 49(2): 347-353.

filling peaks and valleys and reducing surface roughness. The flat-topped CW laser beam with a spot diameter of 470 μm was used to polish the die steel Cr12MoV with a combined scanning path of zigzag pattern and square wave pattern and a high-speed scanning speed of 500 mm/s. The original surface roughness R_a 1.942 μm could be rapidly reduced to R_a 0.26 μm through the detection of white light interferometer and SEM electron microscope and the polishing efficiency was 67% higher than that of traditional mechanical polishing, 94% higher than that of manual polishing and 125% higher than that of surface microhardness. Technological experiments show that the spot diameter of CW laser has a profound influence on the polishing surface quality. When CW laser is used to polish die steel surface, the laser processing parameters such as laser power, spot diameter, scanning speed, scanning route and step-over need to be optimized. On the premise of achieving the same quality effect, CW laser polishing efficiency is more than eight times that of the traditional mechanical polishing processes and more than 30 times that of skilled technicians' manual polishing. CW laser polishing can significantly improve the surface microhardness of die steel surface and is a kind of environment-friendly manufacturing technology without any pollution.

KEY WORDS: laser polishing; CW laser; zigzag and square wave trajectory; surface tension; MPFV method

模具是“工业之母”，无论冲压模、注射模还是压铸模和吹塑模，都需要对模具的凸模和凹模表面进行抛光。为满足现代制造业的需求，模具钢的抛光加工目前主要朝高质和高效方向发展。许多模具都需要进行超高精密的加工，对表面粗糙度 R_a 的要求甚至达到了纳米级别^[1]；另一方面，为了满足客户紧迫订单的要求，不少模具制造商希望大幅度缩短模具制造过程中最耗时之一的抛光工序的制造周期，期望一种新的表面抛光技术能将粗糙度较大（ R_a 为 1.8~5.0 μm ）的表面快速抛光至基本光滑的表面（ $R_a < 0.4 \mu\text{m}$ ）。激光抛光技术开始于 20 世纪 90 年代中期^[2]，相对于传统的磁研磨抛光、机械抛光、超声波抛光、化学抛光、电解抛光和流体抛光，在加工效率、加工质量和清洁制造等方面都具有卓越的优势。欧美国家开展激光抛光技术的研究比其他激光加工技术（如激光熔覆、超快激光加工）早，但激光熔覆和超快激光加工技术早已应用于多个行业，激光抛光技术因难度大，直到 2018 年初德国 Fraunhofer ILT 激光研究所和 Arnold 公司合作开发的五轴数控激光抛光机床^[3]，才正式在工业领域投入应用。

激光对金属材料的抛光包括连续激光抛光和脉冲激光抛光两种工艺^[4-7]，连续激光通常用于粗抛光或半精抛光，脉冲激光则用于精抛光^[5,7-8]。许多研究者对包括模具钢在内的工具钢进行了连续激光的抛光研究，并取得了把原始粗糙度降低 40%~80% 的研究成果。Ukar 等人^[9-10]建立了数学模型预测抛光结果，并利用灯泵浦和 CO_2 连续激光抛光 DIN 1.2379（D2）冷作模具钢，验证了仿真模型的正确性，并把原始粗糙度降低了 75%~80%。B. Richter 等人^[4]论证了临界频率和毛细管平滑预测模型在钴铬钼合金连续激光抛光中的适用性，并把原始表面粗糙度降低了 70%。Joshua D. Miller 等人^[11]指出，在 H13 模具钢连续激光抛光过程中，采用功率和速度的最佳瞬时组合，表面质量提高了 83%（表面粗糙度从 1.35 μm 降低到 0.23 μm ）。

许多研究人员研究了能量密度^[12-14]、扫描速度^[15]和扫描填充间距^[16]等工艺参数对连续激光抛光表面质量的影响，大多数研究人员认为激光能量密度对表面完整性的影响最大^[15]。激光能量密度的调节，可通过改变激光光束的离焦量来实现，从而相应地改变光束直径。M. T. C. Chow 等人^[12]在激光光束离焦量为 1.3~2.9 mm 时抛光了 AISI H13 模具钢表面，当离焦量大于 2.2 mm 时，表面粗糙度降低 39.7%。同样，Pfefferkorn 等人^[13]表明激光光束直径是影响激光抛光 S7 工具钢零件粗糙度的重要因素。我国学者陈继民^[17]通过优化连续激光的加工工艺参数（功率、离焦量、扫描速度和扫描填充间距），将 2316 模具钢表面的粗糙度由 1.0 μm 降低到 0.2 μm 。

高斯（Gaussian）光束和平顶（Top-hat）光束是连续激光的两种光束表现形式^[6,18]，因高斯光束聚焦光斑的能量高度集中在中央，容易导致抛光时材料表面的蒸发与气化，不易控制表面熔池的温度，常使抛光后的表面粗糙度失控，所以高斯光束适合激光打标和切割等工艺。而平顶光束的聚焦光斑，能量均匀分布，相对容易控制熔池温度^[6]，有利于控制激光抛光的粗糙度。

上述研究成果均是在激光功率小于 500 W、扫描速度低于 200 mm/s 的条件下获得，激光抛光的效率并不显著，但可以获得较高的表面质量。Kumstel 等人^[19]利用较低的扫描速度和平顶激光光束，抛光钛镍合金，获得了较低的表面粗糙度（ $R_a = 0.16 \mu\text{m}$ ）。北京航空航天大学管迎春团队^[20]利用连续激光以低于 150 mm/s 的扫描速度多次扫描抛光 3D 打印的 IN718 合金零件，表面粗糙度从原始的 7.5 μm 降低至 0.1 μm 。

本文利用连续激光，重点研究在获得较高表面质量的前提下，通过优化平顶光束光斑直径、扫描速度和扫描路径，大幅度提高抛光效率的方法。

1 试验材料与方法

连续激光抛光冷作模具钢的原理是利用激光能

量将工件表面瞬间熔化，形成熔池，然后依靠熔池的表面张力，将熔化后的表面波峰填入波谷，实现“熔峰填谷”（MPFV）和抛光的目的^[4-11,21]。试验材料为 Cr12MoV 冷作模具钢（其化学成分见表 1），对应美国 AISI D2 冷作模具钢，常用于金属板料的冲裁和拉伸冲压模具。快走丝电火花切割（Wire-EDM cut）和粗铣是该材料零件的常见粗加工手段，其加

工粗糙度一般在 1.5~4.0 μm 范围内。为了获得更光滑的表面和更高的尺寸及形状精度，还需要通过半精铣、精铣和磨削等后续加工手段，把表面粗糙度降低至 0.25 μm 左右。本试验样本通过快走丝电火花切割，切割表面粗糙度为 1.942 μm，试验目的是将该切割表面高速抛光至与磨削加工效果相同的表面粗糙度。

表 1 Cr12MoV 模具钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Cr12MoV steel

C	Si	Cr	Mo	V	Mn	S	P	Ni
1.45%~1.70%	≤0.4%	11.0%~12.5%	0.4%~0.6%	0.15%~0.3%	≤0.4%	≤0.03%	≤0.03%	≤0.25%

连续激光高速抛光系统的设备包括 500W 光纤连续激光发生器、缩束镜、扫描振镜、惰性气体密封舱等。连续激光发生器经过 DOE/ROE 衍射光学器件将高斯光束整形为平顶光束，并经缩束镜，通过振镜扫描，抛光工件表面，试验装置示意图如图 1 所示。表 1 显示 Cr12MoV 模具钢没有与氮气在高温下发生化学反应的金属成分（如 Mg、Ca、Sr 和 Ba 等），因此试验装置的密封舱采用氮气作为保护气体。

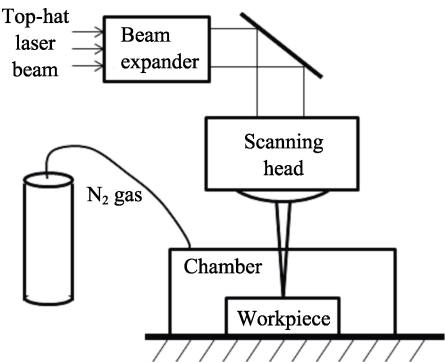


图 1 连续激光高速抛光试验装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of CW laser polishing experimental setup

文献[12-13,15,20]都是通过改变离焦量间接来改变作用在工件表面的激光光斑直径，这种方法不适合平顶光束的光斑调整，因为平顶光束在正离焦或负离焦位置，就会丧失光斑能量密度均匀分布的特点^[22]，无法实现激光抛光能量精密控制的目的。本试验通过缩束镜改变输入扫描振镜的光斑直径，实现正焦量

（离焦量为 0）的加工，光斑在 320~540 μm 范围内可无极调整，并始终保持平顶光束的特征。

试验按照不同光斑直径分为 I、II、III 和 IV 组，并经过前期工艺优化试验，选取试验参数如表 2 所示。每组扫描 2 次，第一次沿 x 轴扫描，第二次沿 y 轴扫描。

前期许多学者均使用之型或对角线型路径作为激光抛光的扫描路径^[8,11]，其特点都是光斑朝单一方向运动，只有到达扫描区域的边界后再移动一个扫描间距（Step-over）开始反向扫描，如图 2a 所示。这种扫描抛光路径只能朝一个方向实现熔峰填谷的方法，导致连续激光抛光很难将原始表面粗糙度降低 85%以上^[11,23,25]。连续激光抛光时产生的熔池深度一般为 50~150 μm^[20,23-24]，远远低于激光焊接和激光熔覆的熔池深度，如果扫描方向一直都沿四周方向，熔峰填谷的效果则更显著。为此，本试验采用之型-方波的复合路径，如图 2b 所示。

利用白光干涉仪（BRUKER WYKO Contour GT-K）直接测量连续激光抛光的表面粗糙度，并获取其 3D 微观形貌。用慢走丝线切割机沿垂直于激光光束扫描方向切取抛光工件，并经表面打磨、超声波除油及抛光处理后，最后使用 5%硝酸+95%酒精的混合溶液腐蚀横截面，制成试样，然后利用 SEM 扫描电镜 ZEISS SIGMA 500/VP 和 GeminiSEM 300，分别观察抛光表面微观形貌及其横截面的金相显微组织，横截面的尺寸为 5 mm×8 mm。采用 FM-800 显微维氏硬度计对抛光表面进行显微硬度测量，压入载荷为 3.0 N，加载时间为 12 s，取 5 次检测的平均值。

表 2 每组连续激光抛光的优化工艺参数
Tab.2 Optimized parameters of CW laser polishing in each group

Factor	I	II	III	IV
Spot diameter/μm	320	370	420	470
Polishing parameters	Wavelength 1080 nm, Power 500 W, Scanning speed 500 mm/s, Step-over 0.1 mm			
Scanning trajectory	Zigzag-square wave			
Polished roughness/μm	0.49	0.41	0.35	0.26

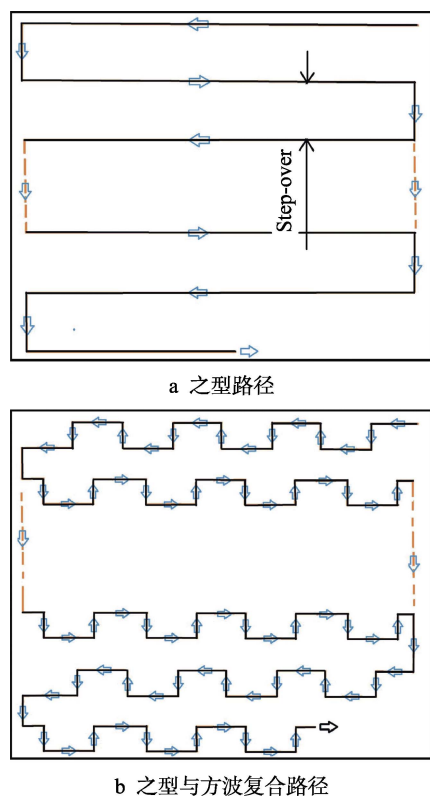


图2 连续激光抛光扫描路径
Fig.2 Scanning trajectory of CW laser polishing:
(a) zigzag; (b) zigzag-square wave

2 结果与讨论

2.1 抛光表面粗糙度及效率

图3a是Cr12MoV模具钢经快走丝线切割后的粗糙表面,图3b和图3c分别是激光束以之型路径和之型-方波复合路径扫描获得的抛光样品表面。图4a则揭示了在 $2.0\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}$ 测量区域内,该切割表面粗糙度($R_a=1.942\text{ }\mu\text{m}$)及其3D形貌,相对于基准表面,3D形貌波峰最高值 $R_p=29.871\text{ }\mu\text{m}$,波谷最低值 $R_v=-16.343\text{ }\mu\text{m}$,波峰与波谷的高度差 $R_t=46.214\text{ }\mu\text{m}$ 。激光束按表2的优化工艺参数分别以之型路径和之型-方波复合路径的扫描方式,对快走丝线切割后的表面进行连续激光抛光,两者扫描路径在Group I(光斑直径 $320\text{ }\mu\text{m}$)获得的抛光表面粗糙度最高,在Group IV(光斑直径 $470\text{ }\mu\text{m}$)获得的最低。之型路径扫描在Group I获得的最低粗糙度 R_a 为 $0.43\text{ }\mu\text{m}$ (图3b),而之型-方波复合路径在Group IV获得的最低抛光表面粗糙度 R_a 为 $0.26\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度的降低幅度更大,这是因为这种之型与方波型组合扫描路径形成的熔池表面张力,促使熔池沿四周流动,使微观形貌的波峰在张力作用下产生物质迁移,并流向周围波谷,相比之型扫描方法,达到熔峰填谷和降低表面粗糙度的效果更加显著。

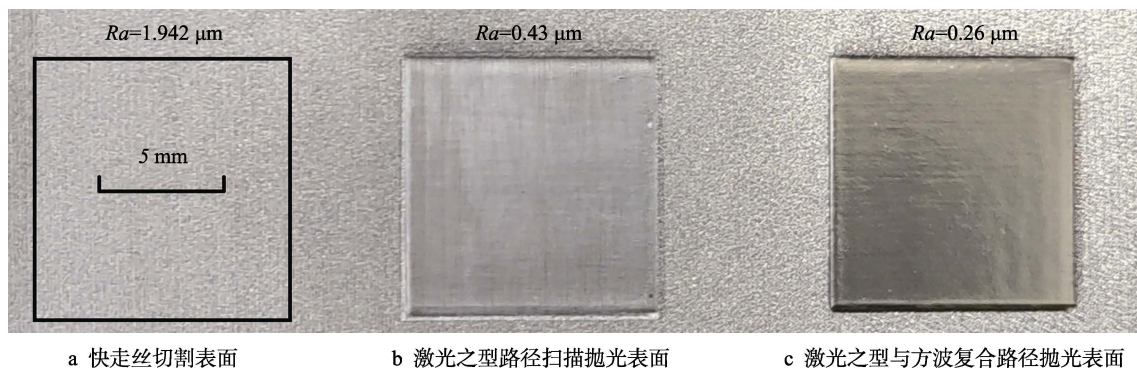


图3 粗糙表面激光抛光样品
Fig.3 Polished specimen with rough surface by laser: (a) wire-EDM cut surface;
(b) laser beam zigzag scan surface; (c) laser beam zigzag-square wave scan surface

无论哪种扫描方式,试验结果表明,光斑直径越小,抛光表面粗糙度就越大。Group I的光斑直径最小,能量密度最大,在相同的功率和扫描速度下,能量在熔池的沉积最高,导致熔池材料局部蒸发和气化严重,表面粗糙度也随之降低;随着光斑直径的增大,能量密度降低,当光斑直径为 $470\text{ }\mu\text{m}$ (Group IV)时,能量密度达到最佳值,所获得的表面粗糙度也最低。

为更准确反映Group IV获得的图3c抛光表面的3D表面微观形貌,测量区域设置为 $5.0\text{ mm}\times 5.0\text{ mm}$,如图4b所示,图3c抛光表面的3D形貌波峰最高值 $R_p=28.883\text{ }\mu\text{m}$,波谷最低值 $R_v=-9.691\text{ }\mu\text{m}$,波峰与波

谷的高度差 $R_t=38.574\text{ }\mu\text{m}$ 。

光斑直径为 $470\text{ }\mu\text{m}$ 时,原始表面粗糙度 $R_a=1.94\text{ }\mu\text{m}$,抛光表面粗糙度 $R_a=0.26\text{ }\mu\text{m}$,而表面粗糙度降低了86.5%,相比文献[11,23,25],在保持表面粗糙度几乎相同降幅的情况下,抛光的扫描速度为 500 mm/s ,效率提高了1倍以上。此时扫描间距(如图2a)为 0.1 mm ,扫描2次,那么抛光 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 的平面只需6.7 min。而传统的磁研磨抛光、机械抛光、超声波抛光、化学抛光、电解抛光和流体抛光,把原始表面粗糙度降低86.5%,最快也需要20 min。如果由熟练技师进行手工抛光,至少需要120 min。

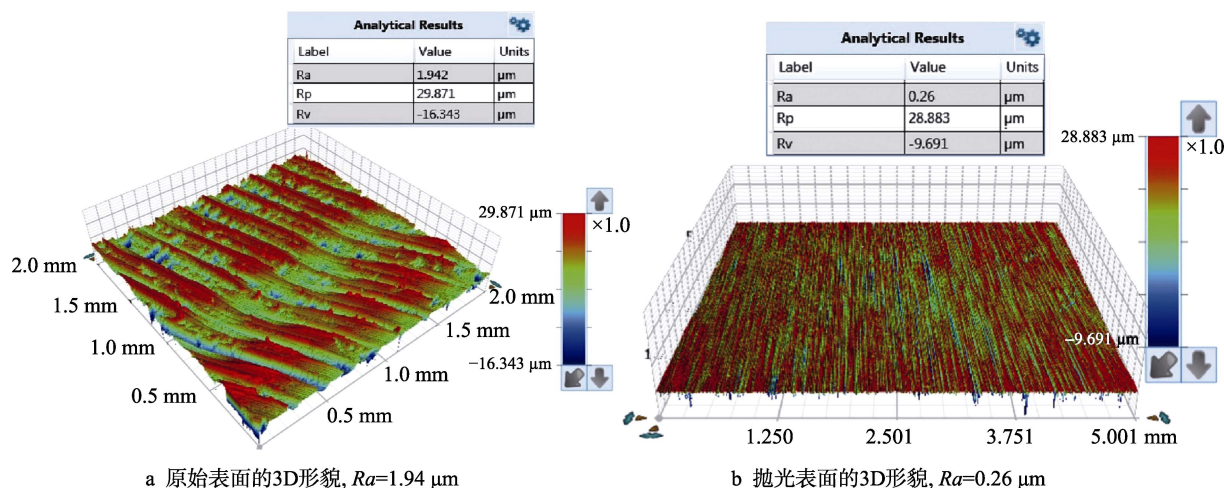


图 4 粗糙度与 3D 形貌
Fig.4 Roughness and 3D topography: (a) 3D topography of original surface $Ra=1.94 \mu\text{m}$;
(b) 3D topography of polished surface $Ra=0.26 \mu\text{m}$

2.2 抛光表面微观组织形貌与显微硬度

前期大量研究工作^[4-7,10-12,14]均描述了连续激光在扫描速度较低 ($<200 \text{ mm/s}$) 时对抛光表面显微组织的影响, 较高扫描速度 ($\geq 400 \text{ mm/s}$) 对表面显微组织的影响则鲜见报道。为了研究此影响, 选取图 3a 的原始快走丝线切割后的粗糙表面和图 3c 的最低表面粗糙度的表面, 进行 SEM 微观形貌的检测及对比分析。

从图 5 可见, 在扫描速度较高的情况下, 激光抛光表面微观组织相比原始快走丝线切割表面发生了显著变化。图 5a 显示原始快走丝线切割表面粗糙度较大, 整体体现出微观波峰连绵起伏的特征, 在箭头

及其周围位置更加明显; 而图 5b 显示的激光抛光表面粗糙度较小, 整体平坦, 仅在箭头所处的局部位置体现了较大的波峰与波谷的高度差 R_t , 这与图 4 分析结果 (Analytical Result) 是一致的 (快走丝线切割后表面 $R_t=46.214 \mu\text{m}$, 抛光表面 $R_t=38.574 \mu\text{m}$, $R_t=|R_p|+|R_v|$)。

2.3 抛光表面显微硬度

Ukar^[9-10]和 Amine T 等人^[26]利用连续激光抛光 ANSI D2 冷作模具钢时, 在获得最低表面粗糙度的情况下, 熔池区域凝固后的显微硬度分别为 610HV 和 590HV。本试验通过 SEM 电镜检测了抛光表面横截面的显微组织, 发现激光高速抛光后, 平顶光束的能量均匀导致 Cr12MoV 材料表面的熔池张力均匀、流速均匀, 能降低马氏体激活能, 促使一部分残余奥氏体充分转换为马氏体, 并使整体马氏体均匀分布, 使材料的显微组织更加致密, 如图 6a 和图 7a 所示, 不仅降低了表面粗糙度, 也提升了表面显微硬度。图 6a 揭示了激光抛光层主要由熔池层 (A 区) 和热影响区 (B 区和 C 区) 构成, 其显微硬度随深度的分布如图 6b 所示。经 FM-800 显微维氏硬度计测试, 在距离表面 $15 \mu\text{m}$ 深处的显微硬度为 601HV, 之后随着深度的增加, 显微硬度显著下降, 直到深度达到 $120 \mu\text{m}$ 附近 (达到热影响区上层区域 B 区) 后, 显微硬度才趋于稳定 (266HV), 即接近 Cr12MoV 退火后的出厂硬度。

图 7 揭示了抛光表面横截面的 A、B、C、D 四区 (图 6a) 的显微组织。A 区是熔池层, 其显微马氏体组织非常致密 (图 7a), 这也导致了熔池层的显微硬度大幅度提升; 但随着深度的增加, 从热影响区上层 B 区 (图 7b) 至热影响区下层 C 区 (图 7c), 直至材料基层 (图 7d), 其显微组织逐渐粗疏, 直至还原材料基层的组织结构。

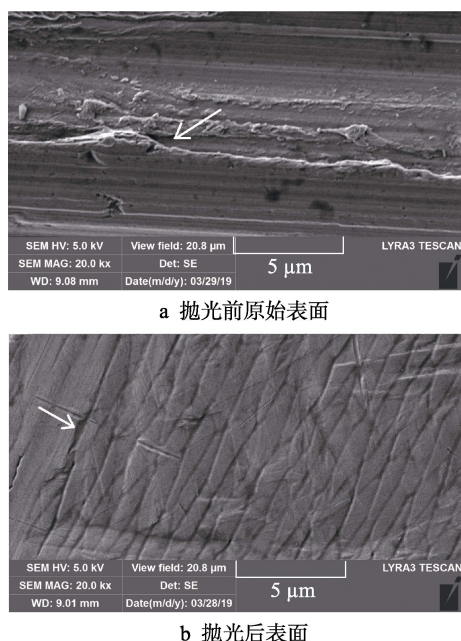
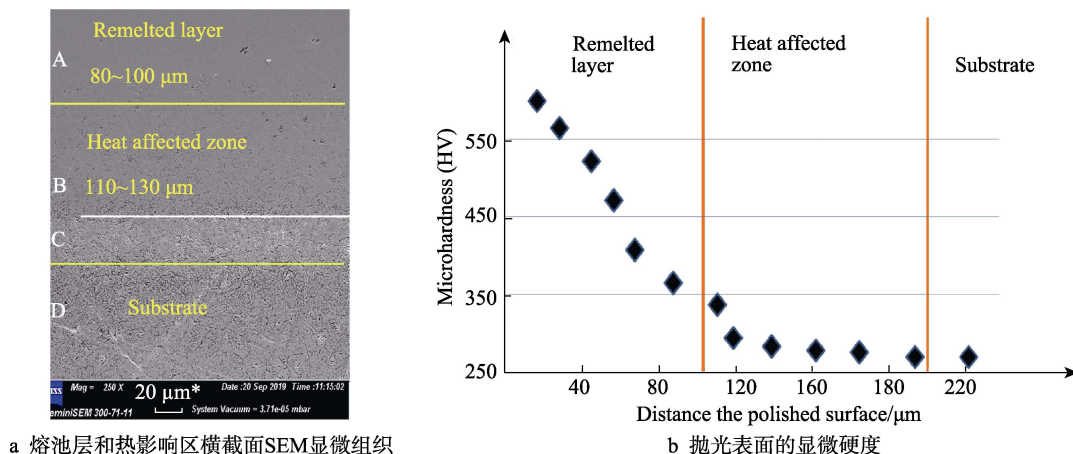


图 5 抛光前后表面的 SEM 微观形貌

Fig.5 SEM micro topography of original surface and polished surface: (a) before polishing; (b) after polishing

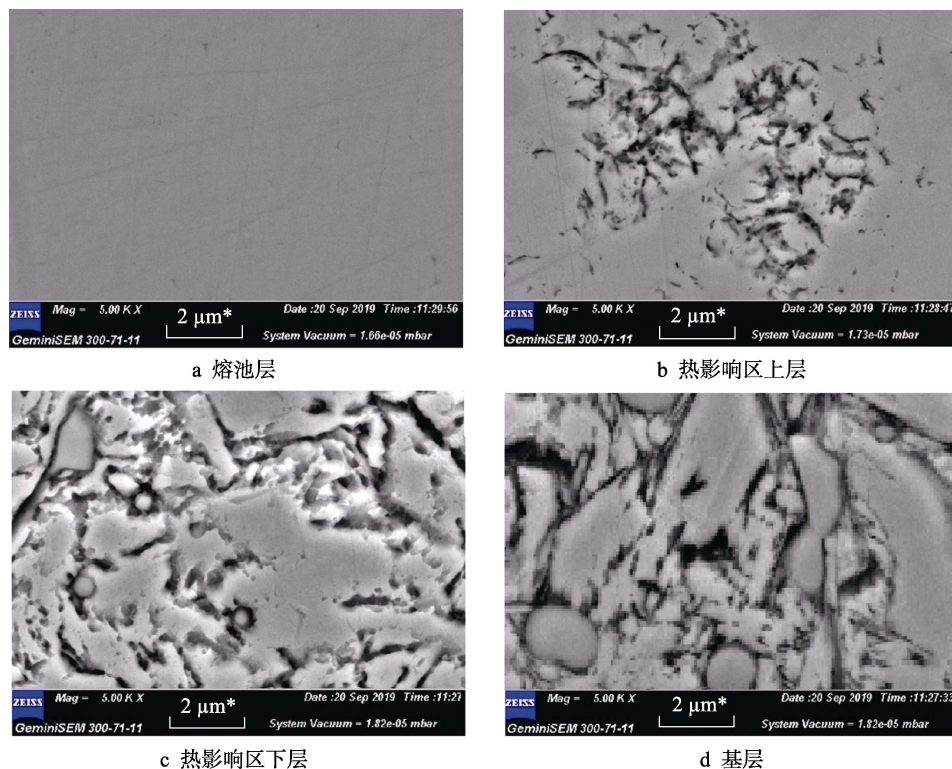


a 熔池层和热影响区横截面SEM显微组织

b 抛光表面的显微硬度

图6 抛光表面的显微组织和显微组织硬度

Fig.6 Microstructure and microhardness of polished surface: (a) SEM microstructure of cross-section of remelted layer and heat affected zone; (b) micro-hardness of polished surface



a 熔池层

b 热影响区上层

c 热影响区下层

d 基层

图7 抛光表面横截面不同区的显微组织

Fig.7 Microstructure of different sections of polished surface (a) microstructure of remelted layer; (b) microstructure of upper layer in heat affected zone; (c) microstructure of lower layer in heat affected zone; (d) microstructure of substrate

3 结论

1) 具备一定中等功率和平顶光束特征的连续激光,在优化激光加工工艺参数(含扫描路径)的前提下,可以将较高粗糙度($Ra=2.0\text{ }\mu\text{m}$ 左右)的模具钢表面快速抛光至机械磨削的光滑程度,表面粗糙度可以降低86%以上,抛光效率比传统机械抛光工艺大幅提升67%,比人工抛光提升94%,让零件表面粗糙度一步降低到位。激光抛光在充满惰性气体的密封舱进行,除惰性气体本身外,无需任何外来材料辅助加工,同时也不产生任何材料的流失或挥发。因为激光通过

熔池张力使工件表面重新分布,达到降低粗糙度的目的,无任何材料的增减,因此是真正的无污染的绿色制造。

2) 使用优质平顶激光光束和之型-方波复合扫描路径,可突破连续激光抛光模具钢时无法高效快速地把表面粗糙度降低86%以上的极限。无论采用何种激光光束和扫描路径,激光光斑功率密度必须与扫描速度相匹配,实现优化组合,使激光能量导致的熔池张力充分实现熔峰填谷的效果。如果激光光斑功率密度与扫描速度不匹配,一方面,能量沉积过多,导致熔池材料蒸发或气化,抛光表面容易滋生次生粗糙度;

另一方面, 能量不足, 熔池张力不够, 无法实现熔峰填谷的效果, 原始粗糙度的降低效果不显著。

3) 连续激光抛光后的模具钢表面的显微硬度明显上升, 提高幅度达到了 125%, 但硬度层的深度有限, 远远低于淬火硬度层。因此, Cr12MoV 材料的显微硬度层深度为 120 μm 时, 不能满足大批量冲压加工的冷作模具要求, 但对中小批量冲压加工的冷作模具却非常合适。

参考文献:

- [1] 徐志强, 王秋良, 张高峰, 等. 可控柔性表面抛光研究综述[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 99-107.
XU Zhi-qiang, WANG Qiu-liang, ZHANG Gao-feng, et al. Controllable flexible surface polishing[J]. Surface technology, 2017, 46(10): 99-107.
- [2] LAGUARTA F, LUPON N, ARMENGOL J. Optical glass polishing by controlled laser surface-heat treatment[J]. Appl opt, 1994, 33(27): 6508-6513.
- [3] History of the Karl H. Arnold machine factory. <https://www.arnold-rv.de/english/company/history.html>[EOL]. 2019-05-31
- [4] RICHTER B, BLANKE N, WERNER C, et al. Effect of initial surface features on laser polishing of Co-Cr-Mo alloy made by powder-bed fusion[J]. JOM, 2019, 71(3): 912.
- [5] BHADURI D, PENCHEV P, BATAL A, et al. Laser polishing of 3D printed MESO scale components[J]. Appl surf sci, 2017, 405: 29-46.
- [6] NÜSSER C, SÄNDKERB H, WILLENBORG E. Pulsed laser micro polishing of metals using dual-beam technology[J]. Physics procedia, 2013, 41: 346-355.
- [7] DEBAJYOTI B, PAVEL P, AFIF B, et al. Laser polishing of 3D printed mesoscale components[J]. Applied surface science, 2017, 405: 29-46.
- [8] FRANK E P, NEIL A D, JUSTIN D M, et al. Effect of beam diameter on pulsed laser polishing of S7 tool steel[J]. CIRP annals manufacturing technology, 2014, 63: 237-240.
- [9] UKAR E, LAMIKIZ A, LÓPEZ L N, et al. Laser polishing of tool steel with CO₂ laser and high-power diode laser[J]. Int j machtools manuf, 2010, 50: 115-125.
- [10] UKAR E, LAMIKIZ A, MARTÍNEZ S, et al. Roughness prediction on laser polished surfaces[J]. J mater proc technol, 2012, 212: 1305-1313.
- [11] JOSHUA D M, TUTUNEA-FATANA O R, EVGUENI V B. Experimental analysis of laser and scanner control parameters during laser polishing of H13 steel[J]. Procedia manufacturing, 2017, 10: 720-729.
- [12] CHOW M T C, BORDATCHEV E V. Experimental study on the effect of varying focal offset distance on laser micropolished surfaces[J]. Int j adv manuf technol, 2013, 67: 2607-2617.
- [13] PFEFFERKORN F E, DUFFIE N A, MORROW J D, et al. Effect of beam diameter on pulsed laser polishing of S7 tool steel[J]. CIRP, 2014, 63(1): 237-240.
- [14] CHANG C S, CHEN T H. Influence of laser beam fluence on surface quality, microstructure, mechanical properties, and tribological results for laser polishing of SKD61 tool steel[J]. J mater proc technol, 2016, 229: 22-35.
- [15] GUO W, HUA M, WAI-TAT T P, et al. Process parameters selection for laser polishing DF2 (AISI O1) by Nd:YAG pulsed laser using orthogonal design[J]. Int j adv manuf technol, 2012, 59: 1009-1023.
- [16] HAFIZ A M K, BORDATCHEV E V, TUTUNEA-FATAN R O. Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel[J]. J manuf proc, 2012, 14: 425-434.
- [17] 陈继民, 仇毅. 激光抛光模具钢参数优化[J]. 北京工业大学学报, 2015(12): 1841-1845.
CHEN Ji-min, QIU Yi. Optimizing parameters of laser polishing mould steel[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015(12): 1841-1845.
- [18] GOFFIN N, TYRER J, WOOLLEY E. Complex beam profiles for laser annealing of thin-film CDTE photovoltaics[J]. J laser appl, 2018, 30: 042006.
- [19] KUMSTEL J, KIRSCH B. Polishing titanium-and nickel-based alloys using CW-laser radiation[J]. Physics procedia, 2013, 41: 362-371.
- [20] FANG Zhi-hao, LU Li-bin, GUAN Ying-chun, et al. Laser polishing of additive manufactured superalloy[J]. Procedia CIRP, 2018, 71: 150-154.
- [21] ZHOU Yong-quan, ZHAO Zhen-yu, ZHANG Wei, et al. Experiment study of rapid laser polishing of freeform steel surface by dual-beam[J]. Coatings, 2019, 9(5): 324.
- [22] Beam shaper/top-hat. Available online: <https://www.holoor.co.il/OEL>. 2019-05-09.
- [23] EVGUENI V, BORDATCHEV M, ABDULLAH K H. Performance of laser polishing in finishing of metallic surfaces[J]. Int j adv manuf technol, 2014, 73: 35-52.
- [24] TEMMLER A, WILLENBERG E, WISSENBAACH K. Laser polishing laser application in microelectrode and optoelectrode manufacture XVII[J]. Proc of SPIE, 2012, 243: 82430.
- [25] PONG-RYOL J, TAE-SOK J, NAM-CHOL K, et al. Laser micro-polishing for metallic surface using UV nano-second pulse laser and CW laser[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2016, 85(9-12): 2367-2375.
- [26] AMINE T, NEWKIRK J W, HUSSAM E S, et al. Microstructural and hardness investigated of tool steel D2 processed by laser surface melting and alloying[J]. Int j adv manuf technol, 2014, 73: 1427-1435.