

模具钢的激光抛光表面处理及其耐腐蚀性研究

罗育银^{1*}, 段周波¹, 周浩²

¹深圳市创世纪机械有限公司, 广东 深圳

²湘潭大学机械工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2023年4月13日; 录用日期: 2023年6月22日; 发布日期: 2023年6月29日

摘要

模具钢的表面质量以及机械性能对航空航天产品的使用寿命以及应用范围具有重要影响。为了提高抛光效率, 采用激光抛光技术对S136D模具钢表面进行抛光, 提高其表面质量。对不同能量密度下抛光样品截面的微观结构、微观硬度、杨氏模量、表面物相组成、残余应力以及耐磨性进行了表征与分析。此外, 结合连续激光以及脉冲激光研究了双束激光抛光对样品的表面物相、残余应力以及耐腐蚀性的影响。研究表明, 激光抛光后样品抛光层的微观结构更加致密, 且经过能量密度为1500 J/cm²和3000 J/cm²抛光后样品表面的微观硬度以及杨氏模量有一定的增加。激光抛光后样品表面的残余应力随能量密度的增加而增加。经过激光抛光后样品表面的耐腐蚀性能明显增强, 而且双束激光抛光后的样品表面具有更好的耐腐蚀性能。

关键词

S136D模具钢, 激光抛光, 微观结构, 微观硬度, 残余应力, 耐腐蚀性

Study on Laser Polishing Surface Treatment of Die Steel and Its Corrosion Resistance

Yuyin Luo^{1*}, Zhoubo Duan¹, Hao Zhou²

¹Shenzhen Chuangshi Machinery Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

²School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan

Received: Apr. 13th, 2023; accepted: Jun. 22nd, 2023; published: Jun. 29th, 2023

Abstract

The surface quality and mechanical properties of die steel have an important influence on the service life and application range of aerospace products. In order to improve the polishing efficiency, laser polishing technology was used to polish S136D die steel to improve its surface quality. The microstruc-

ture, microhardness, Young's modulus, phase composition, residual stress and wear resistance of samples polished by different energy densities were analyzed in detail. In addition, the effects of dual laser polishing combined with continuous laser and pulsed laser on the surface phase, residual stress and corrosion resistance of the samples were also investigated. The results show that the microstructure of the polished layer of samples after laser polishing with laser energy density of 1500 J/cm² and 3000 J/cm² is more compact, and the microhardness and Young's modulus of the sample surface are increased. The residual stress on the surface of the sample after laser polishing increases with energy density. The corrosion resistance of the sample surface after laser polishing is significantly increased, and the after dual beam laser polished sample surface has the best corrosion resistance.

Keywords

S136D Die Steel, Laser Polishing, Microstructure, Microhardness, Residual Stress, Corrosion Resistance

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

S136D 模具钢由于其优异的耐磨性、耐腐蚀性、机械加工性以及能获得高光滑表面等特性，广泛应用于生物医药、航空航天零部件制造中。随着航空航天技术的不断发展，作为航天器核心的航空发电机，其制造材料已由全金属结构发展为以复合材料为主。航空发动机主机和短舱在一些高性能、低重量要求的非主承力构件上，已使用新型纤维增强树脂基等复合材料。S136D 模具钢是新型复合材料部件成型制造的关键模具材料，因此，其表面质量和机械性能对航空航天产品的性能及其使用寿命具有至关重要的作用[1] [2]。

抛光是工件在加工过程中获得更光滑表面形貌的工序，主要是通过机械作用使工件表面产生塑性变形，同时还结合化学及电化学反应使工件表面更光滑[3] [4] [5]，抛光是模具制造行业的重要加工工序[3] [6]，能明显提高模具钢表面的质量和精度。而现阶段模具制造领域，制造所需时间的一大部分消耗在终抛光工序，总体占据制造时间的 20%以上[6] [7]，且目前该过程大多数是采用人工进行，导致不仅抛光精度差、生产成本低、交货时间长[8]，而且该过程需要经验熟练的工人去完成，工人技术要求高。传统的抛光局限于材料损失、成本高、抛光率低以及废物处理等问题。近年来已有研究表明，与传统抛光方法存在的诸多局限性相比，激光抛光作为一种新型的抛光技术具有无污染、无接触、自动化高效率以及加工范围广等优势[9] [10] [11] [12]，且加工时不仅没有任何材料损失，还可实现自由曲面抛光[5]。其次，激光抛光技术不只局限于抛光金属材料，如：不锈钢、工具钢、模具钢、钛合金、铝合金以及镍合金等其他金属材料，还能应用于氧化铝陶瓷、碳化硅陶瓷、氧化锆陶瓷、石英玻璃等非金属材料的抛光[3] [4] [13]。

针对金属材料的激光抛光，Souza 等人[14]采用固体激光器抛光 316 L 不锈钢来研究激光抛光对 316 L 不锈钢的表面粗糙度和湿润性的影响。研究结果表明：经过激光抛光后，样品表面平均表面粗糙度降低了 86%。并且由于表面质量的提高也会影响样品表面的湿润性，接触角的数值显示激光抛光后的重熔表面呈现出各向异性的湿润性。Chen 等人[15]采用波长为 1064 nm 的皮秒激光器抛光 ASP23 模具钢来降低样品的表面粗糙度。通过实验发现经过皮秒激光抛光后的样品表面粗糙度降低到了 0.163 μm，降低了

28.2%，而且在样品的截面明显观察到熔融区、热影响区以及基体材料区。Zhou 等人[16]利用 1070 nm 的连续激光器将钛合金样品从初始表面粗糙度 $7.3 \mu\text{m}$ 降低到 $0.6 \mu\text{m}$ 。研究结果还表明由于马氏体相的形成使得抛光后样品表面的微观硬度增加了约 25%，此外，由于抛光表面晶粒尺寸的增加会使得样品表面的耐腐蚀性能增加。

针对非金属材料的激光抛光，Zhang 等人[17]采用 1064 nm 的皮秒激光器来抛光 Al_2O_3 陶瓷材料，研究结果表明参数优化后的激光抛光能够将样品的平均表面粗糙度降低至 $0.32 \mu\text{m}$ 。而且，抛光后样品表面具有致密的细晶结构，孔隙率和力学性能较好，激光抛光后样品的断裂强度提高了 25%。Zheng 等人[18]利用飞秒激光抛光来提高 SiC 陶瓷的表面质量，研究结果显示激光频率过低或者过高均不利于提高样品表面质量，通过参数优化发现当脉冲激光频率为 40 KHz、脉冲能量为 $40 \mu\text{J}$ 时，样品表面可以获得无裂纹、凹坑和碎屑的优质表面，并且样品的平均表面粗糙度降低至 $0.79 \mu\text{m}$ 。

近年来，针对激光抛光研究，主要集中在单束激光抛光，关于双束激光抛光对样品表面质量影响的研究鲜有报道。本文采用连续激光抛光 S136D 模具钢，研究了不同激光能量密度对 S136D 模具钢表面截面的微观结构、微观硬度、杨氏模量、表面物相、残余应力以及表面耐腐蚀性的作用效果。此外，结合连续激光和脉冲激光研究了双束激光对样品表面物相、残余应力以及耐磨性的影响。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验材料

本次实验所使用的是尺寸为 $120 \times 115 \times 5 \text{ mm}^3$ 的模具钢，每个样品的激光抛光范围为 $9 \times 9 \text{ mm}^2$ 。这些样品在进行激光抛光之前经过退火热处理。为了降低样品环境对实验结果的影响，在进行抛光实验之前，对样品表面进行超声波清洗 30 min，然后吹干。

2.2. 实验装置和检测设备

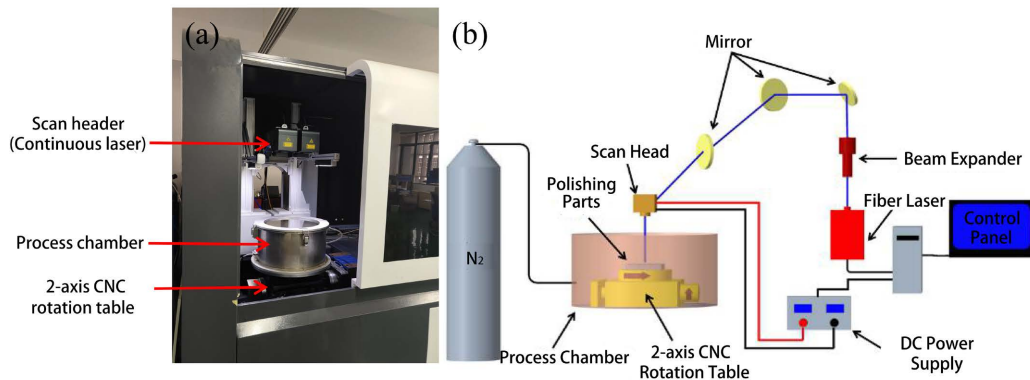


Figure 1. (a) Principle of experiment device; (b) Experiment device

图 1. (a) 实验装置原理; (b) 实验装置

实验装置及原理如图 1 所示，双激光抛光系统主要包括连续波激光器和脉冲激光器。连续激光器的波长为 1064 nm，最大的激光功率为 1000 W，聚焦后的光斑直径为 0.3 mm。脉冲激光器的波长为 1064 nm，最大的激光功率为 50 W，最大的激光频率为 100 KHz，聚焦后的光斑直径为 0.2 mm。整个抛光过程在充满氮气的环境下进行，防止模具钢在抛光过程中被氧化。

采用线切割将样品制备成 $9 \times 9 \text{ mm}^2$ 的小金属块，然后利用砂纸和磨抛机打磨样品截面，最后用配比为硝酸:盐酸:水 = 3:1:4 的王水稀释液腐蚀样品截面 30 s，然后采用型号为 Tescan Mira 3 XH 的扫描电镜

观测抛光后样品截面的微观组织结构。采用型号为 ContourGT 的纳米压痕仪来测量抛光样品截面的微观硬度以及杨氏模量, 压入载荷是 10 mN, 保载时间是 2 s。采用型号为 advance d8 的 X 射线衍射仪来对抛光样品表面进行物相分析。采用型号为 LXRD 的高速残余应力测试仪来测量抛光后样品表面残余应力。最后采用型号为 PARSTAT MC 的电化学工作站来测量激光抛光前后样品表面的耐腐蚀性能, 测量期间电解液选择溶液浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液, 参比电极选择饱和甘汞电极, 辅助电极选择铂片。

3. 结果及分析

3.1. 不同能量密度下的微观组织结构及微观硬度

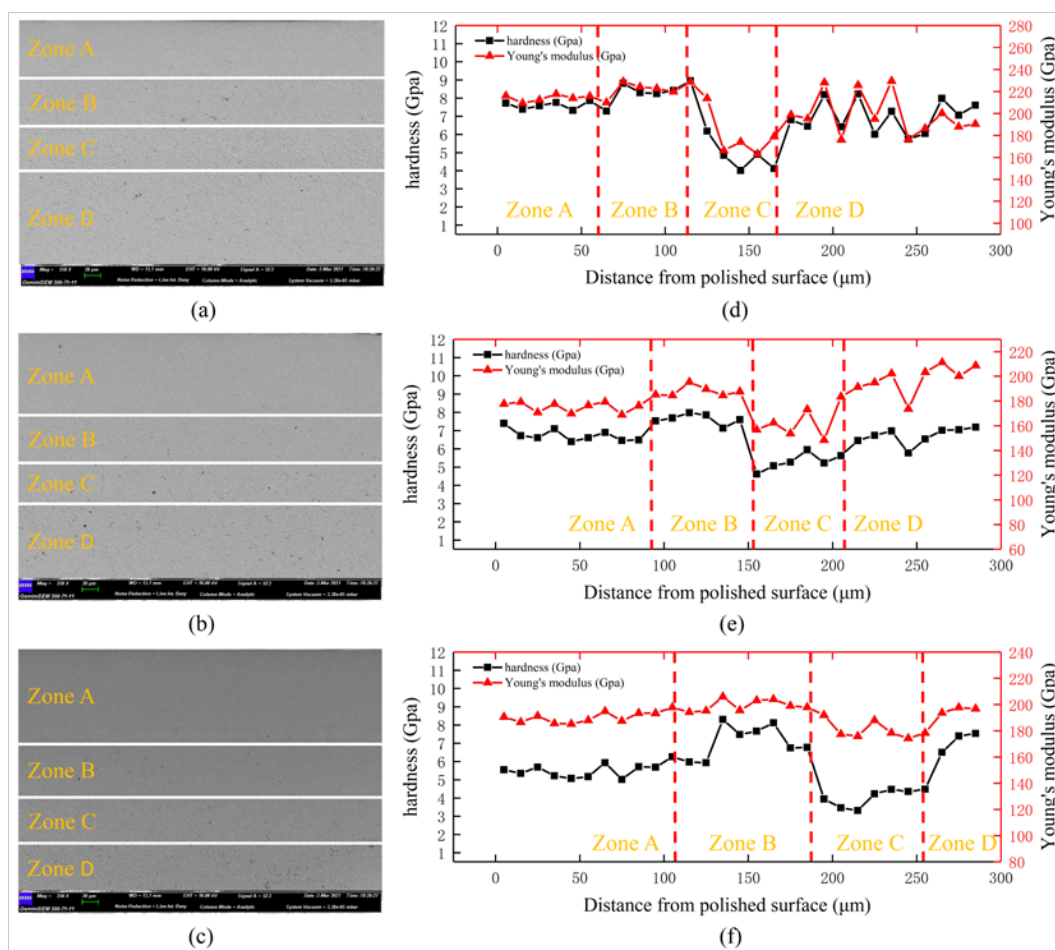


Figure 2. (a), (b), (c) The microstructure in polished sample cross section with different energy densities; (d), (e), (f) The hardness and Young's modulus of each region in the polished sample cross section

图 2. (a)、(b)、(c) 不同能量密度下样品截面的微观结构, (d)、(e)、(f) 抛光样品截面各区域的硬度和杨氏模量

图 2 揭示了不同能量密度下, 抛光样品亚表层的微观组织结构、微观硬度以及杨氏模量。图 2(a)、(b)、(c) 分别是能量密度为 1500 J/cm^2 、 3000 J/cm^2 、 4500 J/cm^2 抛光区域显微组织结构。从图 3 中可以发现, 经过激光抛光后, 样品抛光截面主要包括 4 个区域, 其中区域 A 是熔融区、区域 B 和 C 是热影响区、区域 D 是基体材料。Marimuthu 等人[19]也观察到了相同的结果。由于温度不同会导致显微组织结构发生变化, 发现区域 A 的显微组织结构非常致密, 而且该区域的孔隙和裂纹也较少。随着熔池深度的增加, 截面显微组织区域的孔隙和裂纹逐渐增多, 显微组织结构逐渐变得稀疏。表 1 是不同能量密度的截面区域

A、区域 B 和区域 C 的尺寸。随着能量密度的增加,可以发现截面熔融区和热影响区的尺寸不断增加,尤其是熔融区 A 的尺寸从 63.5 μm 增加到 112.5 μm ,增加了 77.2%。由于随着能量密度的增加,样品表面聚焦的能量增多,导致熔融区深度明显增加,同时更多热量传导到热影响区,使得热影响区的深度也随之增加。

图 2(d)、(e)、(f)是不同能量密度下,抛光样品截面各区域的硬度和杨氏模量的变化图。结合三个折线图中杨氏模量与微观硬度与杨氏模量的变化趋势,可发现二者具有相同的变化趋势,且杨氏模量与微观硬度成正比。表 2 为不同能量密度下工件加工表面亚表层的各区域平均杨氏模量及平均硬度。从中可发现在能量密度为 1500 J/cm^2 的条件下,由区域 A 到区域 B 样品截面的平均杨氏模量以及平均微观硬度有轻微的增加,其中区域 A 的平均杨氏模量和平均微观硬度为 213.51 Gpa 和 7.56 Gpa,区域 B 的平均杨氏模量和平均微观硬度为 224.82 Gpa 和 8.55 Gpa,产生这种变化是由于激光抛光能量密度低,工件表面冷却速度快,过冷度大,导致重熔区的柱状晶细小,因此硬度较高。但是从区域 B 到区域 C,样品截面的平均微观硬度以及平均杨氏模量有明显的降低,而且该区域的平均微观硬度以及平均杨氏模量均低于初始样品。主要是由于在激光能量会对样品表面进行二次加工,而由于抛光层不同区域的温度不同,形成的微观组织不同,导致微观硬度以及杨氏模量发生变化。由于区域 A 和区域 B 的温度高,导致在抛光层一部分残余奥氏体会转变为马氏体,使得其的微观硬度要高于区域 C 的微观硬度。而区域 C 的硬度和杨氏模量要低于初始样品,主要是由于区域 C 温度低,产生退火,使得该区域的硬度杨氏模量降低。能量密度为 3000 J/cm^2 的样品和 1500 J/cm^2 的样品抛光层具有相似的平均微观硬度和平均杨氏模量变化趋势。但是相比于前两种能量密度,在能量密度为 4500 J/cm^2 的条件下,样品截面区域 A 的平均微观硬度以及平均杨氏模量明显降低。

Table 1. Sizes of each zone under different energy densities

表 1. 不同能量密度下的各区域尺寸

样品能量密度($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)	区域 A (μm)	区域 B (μm)	区域 C (μm)
1500	63.5	53.2	56.8
3000	95.2	65.3	57.9
4500	112.5	75	62.5

Table 2. Average hardness and Young's modulus of polishing subsurface at different energy densities

表 2. 不同能量密度下加工表面亚表层的各区域平均硬度和平均杨氏模量

样品能量密度($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)	硬度(Gpa)				杨氏模量(Gpa)			
	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D	Zone A	Zone B	Zone C	Zone D
1500	7.56	8.55	4.81	6.98	213.51	224.82	174.33	199.57
3000	6.74	7.63	5.05	6.72	175.15	197.81	167.96	198.22
4500	5.58	7.52	4.66	7.05	165.14	200.89	158.60	196.03

3.2. XRD 和残余应力分析

图 3 是五种样品表面的 XRD 图,从上到下依次为初始样品表面、1500 J/cm^2 、3000 J/cm^2 、4500 J/cm^2 的能量密度以及双激光抛光作用下的样品表面。双激光中连续激光能量密度为 3000 J/cm^2 ,脉冲宽度为 200 ns,激光频率为 100 KHz,脉冲激光功率为 30 W,扫描速度为 20 mm/s。从图中可以看出,初始样品主要是由体心立方晶格的 $\alpha\text{-Fe}$ 和面心立方晶格 $\gamma\text{-Fe}$ 组成。此外,当扫描角度 2θ 为 35° 时,在初始样品表面发现了 Fe_2O_3 ,主要是初始样品表面部分被氧化产生了 Fe_2O_3 ,经过激光抛光后,氧化层被去除。而且,由于材料熔化后快速冷却导致部分 $\alpha\text{-Fe}$ 转变为 $\gamma\text{-Fe}$,从而使得 $\alpha\text{-Fe}$ 的峰值有所降低而 $\gamma\text{-Fe}$ 的峰值有所

提升。

由于 S136D 模具钢的晶粒尺寸远大于 100 nm，在 XRD 测量中，晶粒的变化直接反映在衍射峰的峰宽上，当测量尺寸大于 100 nm，峰宽对于晶粒变化的敏感度下降，因此 XRD 只局限于测量尺寸在 100 nm 以内的晶粒，但可以通过衍射峰半峰宽去对比抛光前后晶粒的粗细。从图 3 中可以看出，不同能量密度抛光后的三个样品的半峰宽均要小于初始样品，所以抛光前的晶粒尺寸要小于抛光后的晶粒尺寸。

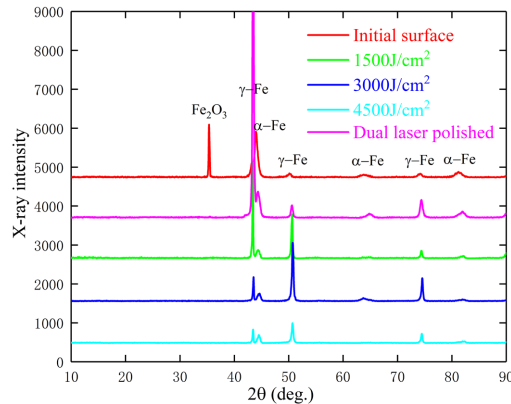


Figure 3. XRD patterns of different samples

图 3. 不同样品的 XRD 图

图 4 显示了不同能量密度下以及双激光作用下各样品的残余应力。图 4 纵坐标中的负号代表残余应力的类型为残余压应力。由图 4 可知，增加激光抛光的能量密度，会增加样品内的残余压应力。主要原因是非均匀的温度场导致工件表面产生局部热效应，使得熔池冷却后产生了残余应力。而激光能量密度越大，加工过程中温度梯度越大，导致抛光后产生的残余应力越大。

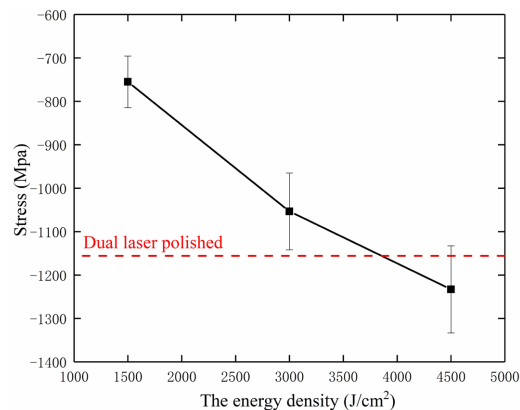


Figure 4. Residual stress of different samples

图 4. 不同样品的残余应力

3.3. 耐腐蚀性能分析

图 5 显示了所有样品的极化曲线，材料的腐蚀与自腐蚀电位成正比，与自腐蚀电流密度以及腐蚀速率成反比。而激光抛光后的样品表现出了更低的自腐蚀电位、自腐蚀电流密度以及腐蚀率，这说明了激光抛光能够提高样品表面耐腐蚀性。而且通过对比自腐蚀电位以及自腐蚀电流密度可以发现，双激光抛光样品具有最低的自腐蚀电位和电流密度，说明双激光抛光样品具有最好的耐腐蚀性能。

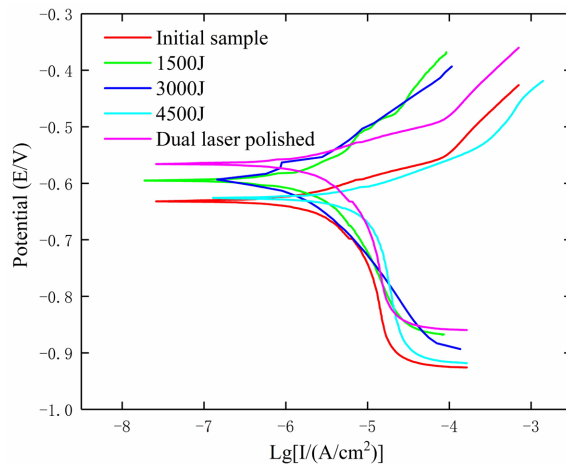


Figure 5. Tafel curves with different samples
图 5. 不同样品下的塔菲尔曲线

4. 结论

(1) 经过激光抛光后, 样品亚表面会形成三个主要的区域分别是: 重熔区、热影响区以及基体材料。经过激光抛光后, 重熔区和热影响区具有更加致密的微观结构, 具有更高的微观硬度以及杨氏模量。然而, 随着激光能量密度的增加, 样品亚表面的微观硬度以及杨氏模量有所降低。

(2) 初始样品表面主要由 α -Fe 和 γ -Fe 组成。在经过激光能量的作用后, 由于温度梯度的影响使得样品表面的一部分 α -Fe 转变为 γ -Fe。同时, 由于高的冷却速率, 导致样品表面过冷度大, 从而产生残余压应力, 并且随着激光能量密度的增加, 样品表面的残余应力逐渐增大。

(3) 采用激光抛光可以提高模具钢表面的耐腐蚀性。与能量密度 4500 J/cm^2 相比, 能量密度 1500 J/cm^2 和 3000 J/cm^2 时的抛光样品耐腐蚀性能更优。通过对比腐蚀电位、腐蚀电流以及腐蚀速率, 双激光抛光后的样品表面具有最佳的耐腐蚀性能。

参考文献

- [1] 王细洋. 航空发动机模具的高速铣削[J]. 航空制造技术, 2012(8): 53-56.
- [2] 杨永强, 黄坤, 吴世彪, 等. H13 模具钢粘结剂喷射增材制造工艺参数对成形质量的影响[J]. 航空制造技术, 2022, 65(23): 90-97.
- [3] 周浩, 赵振宇, 周后明, 等. S136D 模具钢表面双激光抛光技术研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 111-120.
- [4] 周浩. 模具钢 S136D 的激光抛光工艺、数值模拟及抛光表面形状研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.
- [5] Zhou, H., Zhou, H.M., Zhao, Z.Y., Li, K. and Yin, J. (2021) Numerical Simulation and Verification of Laser-Polishing Free Surface of S136D Die Steel. *Metals*, **11**, Article No. 400. <https://doi.org/10.3390/met11030400>
- [6] 单等玉. 激光抛光模具钢的模拟仿真及工艺研究[J]. 电加工与模具, 2019(5):44-50.
- [7] Ukar, E., Lamikiz, A., López, D.E., Lacalle, L.N., et al. (2010) Laser Polishing of Tool Steel with CO₂ Laser and High-Power Diode Laser. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **50**, 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.09.003>
- [8] Temmler, A., Liu, D., Luo, J., et al. (2020) Influence of Pulse Duration and Pulse Frequency on Micro-Roughness for Laser Micro Polishing (L μ P) of Stainless Steel AISI 410. *Applied Surface Science*, **510**, Article ID: 145272. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145272>
- [9] 戴伟, 郑志镇, 李建军, 等. 金属材料表面的激光抛光研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 7-20.
- [10] 车科, 刘俨后, 秦继鹏, 等. 连续激光抛光 9CrWMn 模具钢工艺参数研究[J]. 工具技术, 2022, 56(8): 25-29.

-
- [11] 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, 41(12): 1841-1845.
- [12] Yung, K.C., Zhang, S.S., Duan, L., *et al.* (2019) Laser Polishing of Additive Manufactured Tool Steel Components Using Pulsed or Continuous-Wave Lasers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **105**, 425-440. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04205-z>
- [13] Zhao, Z., Zeng, J., Lai, Z., *et al.* (2022) Laser Polishing Die Steel Assisted by Steady Magnetic Field. *Micromachines*, **13**, Article No. 1493. <https://doi.org/10.3390/mi13091493>
- [14] Souza, A.M., Ferreira, R., Barragán, G., *et al.* (2021) Effects of Laser Polishing on Surface Characteristics and Wettability of Directed Energy-Deposited 316L Stainless Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, **30**, 6752-6765. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05991-y>
- [15] Chen, Y.D., Tsai, W.J., Liu, S.H., *et al.* (2018) Picosecond Laser Pulse Polishing of ASP23 Steel. *Optics & Laser Technology*, **107**, 180-185. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.05.025>
- [16] Zhou, J., Shen, H., Lin, Y., *et al.* (2022) Microstructural Evolution during Multiple Scans in Laser Polishing of Ti6Al4V. *Journal of Manufacturing Processes*, **75**, 1202-1216. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.01.072>
- [17] Zhang, X., Ji, L., Zhang, L., *et al.* (2020) Polishing of Alumina Ceramic to Submicrometer Surface Roughness by Picosecond Laser. *Surface and Coatings Technology*, **397**, Article ID: 125962. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125962>
- [18] Zheng, Q., Cui, J., Fan, Z., *et al.* (2020) An Experimental Investigation of Scan Trajectory into the Underwater Femtosecond Laser Polishing SiC Ceramic. *Ferroelectrics*, **563**, 77-86. <https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1760611>
- [19] Marimuthu, S., Triantaphyllou, A., Antar, M., *et al.* (2015) Laser Polishing of Selective Laser Melted Components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **95**, 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2015.05.002>