



Cr12MoV 模具钢激光抛光过程中工艺参数与热效应的关联性分析

程 君¹, 彭康威², 王 敬², 翟鑫琦¹, 公兵丽¹

(1 山东新华医疗器械股份有限公司, 淄博 255000; 2 重庆工商大学机械工程学院, 重庆 400067)

摘 要:激光抛光可以有效提高冷作模具钢 Cr12MoV 的表面质量。为了探索该种钢激光抛光表面质量的影响因素,利用正交实验法进行实验方案设计,采用不同激光抛光工艺参数对冷作模具钢 Cr12MoV 进行表面处理,通过对其抛光层组织及裂纹等几何形貌的表征,研究分析该模具钢激光抛光过程中表面裂纹的生成及扩散机理。利用 SPSS 软件评估激光抛光工艺参数对模具钢抛光部位的重熔区深度、抛光层深度、表面粗糙度和裂纹等表面质量的影响规律。研究发现:所有实验组次获取的模具钢抛光表面其表面粗糙度与原始表面均有所降低,最高可将模具钢的表面粗糙度降低至 0.944 μm ,较原始粗糙度降低 88.8%。部分抛光功率较大组次获取的模具钢抛光表面出现了裂纹现象。激光抛光过程中,激光工艺参数直接影响模具钢的重熔区深度、抛光层深度、裂纹尺寸以及表面粗糙度等表面质量,其中,激光功率、扫描速度是模具钢的以上表面质量指标的显著影响因素,搭接率对以上表面质量指标的影响呈非显著关系。合理选择激光抛光工艺参数可以有效改善冷作模具钢 Cr12MoV 的表面质量。

关键词:Cr12MoV; 激光抛光; 工艺参数; 裂纹; 热效应

DOI:10.20057/j.1003-8620.N260026 **中图分类号:**TG176

Study on the Correlation between Process Parameters and Thermal Effects during Laser Polishing of Cr12MoV Die Steel

Cheng Jun¹, Peng Kangwei², Wang Jing², Zhai Xinqi¹, Gong Bingli¹

(1 SHINVA Medical Instrument Co., Ltd., Zibo 255000, China; 2 School of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Laser polishing can effectively improve the surface quality of cold work die steel Cr12MoV. To explore the influencing factors of surface quality during laser polishing, an orthogonal experimental design was employed to formulate the experimental protocol. Cr12MoV die steel surfaces were treated using varying laser polishing parameters. Through characterization of the polished layer microstructure and geometric features such as cracks, the mechanisms underlying crack initiation and propagation during laser polishing of Cr12MoV die steel were examined. SPSS software was utilized to assess the influence patterns of laser polishing parameters on surface quality metrics of the polished regions, including remelted zone depth, polished layer depth, surface roughness, and crack formation. The results show that the surface roughness of all polished die steel specimens across experimental groups was reduced compared to the original surface, with the minimum value reaching 0.944 μm , decreased by 88.8% relative to the original surface. Crack formation was observed on the polished surfaces of die steel specimens in certain groups subjected to higher polishing power. During laser polishing of Cr12MoV die steel, laser process parameters directly effect surface quality indicators such as remelted zone depth, polished layer depth, crack dimensions, and surface roughness. Among these parameters, laser power and scanning speed are significant factors affecting the aforementioned surface quality metrics, whereas the influence of overlap rate is non-significant. Optimal selection of laser polishing process parameters can effectively enhance the surface quality of Cr12MoV die steel.

Key Words: Cr12MoV; Laser polishing; Process Parameter; Cracking; Thermal effect

激光抛光作为一种新兴的表面处理技术,采用高能激光为热源,通过快速热冷效应,在不改变材料成分的前提下调控材料微观组织改善材料表面质量^[1-2]。该技术的应用与传统抛光技术相比,不受

抛光对象形状的限制,可以应用于复杂型面的精密抛光。与传统抛光技术相比,激光抛光具有高柔性、高自动化等优势,能够精准控制和高效加工。然而,金属材料在经过激光抛光后,其表面经过了

作者简介:程 君(1981—),男,本科,高级工程师; **E-mail:**chengjun@shinva.com; **收稿日期:**2026-02-10

通信作者:王 敬(1983—),女,博士,副教授; **E-mail:**wangjing-0113@163.com

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

快速加热与冷却,表面容易产生残余应力,当其超过材料的承受极限时,材料表面则会产生裂纹^[3-4],严重影响抛光件的力学性能和使用寿命,制约了激光抛光技术的进一步推广。

近年来,国内外众多学者对模具钢的激光抛光开展了大量研究。其中,周浩等^[5]采用双激光技术(连续-脉冲)对S136D模具钢进行了复合抛光处理,实验结果表明,经过该方法处理后,材料的表面粗糙度显著降低,由原来的7.973 μm 下降至0.872 μm ,摩擦性能也有所提高。梁强等^[6]采用连续激光将D2模具钢粗糙度降低79.65%,但未深入分析多参数协同效应。周泳全等^[7]研究了扫描路径对冷作模具钢Cr12MoV表面粗糙度的影响,应选取光斑直径为470 μm 的平顶连续激光束,扫描速度为500 m/s,选择“之型”与“方波型”组合扫描路径,将表面粗糙度由原始的1.942 μm 快速降低至0.26 μm 。Zhou等^[8]对Ti6Al4V钛合金进行了连续激光抛光,分析了激光能量分布、搭接率和激光扫描之间的相关性,通过有限元分析的方法,分析了抛光表面耐蚀性与表面粗糙度、抛光区的微观组织之间的关系。K μmstel 等^[9]以Incone1718合金为研究对象进行了连续激光抛光,研究了表面粗糙度与激光工艺参数之间的关系。Zhou Y等^[10]以自由曲面为研究对象采用双束激光对其进行了快速抛光,研究发现,粗糙半球表面从初始状态值Sa(=877 nm)快速抛光到抛光后值Sa(=142 nm),抛光效率高达2 890 cm^2/h 。Liu等^[11]研究了不同单脉冲能量密度对表面粗糙度的影响,其中2.5 J/cm^2 时的粗糙度最低。李道齐等^[12]探究了AIS1304不锈钢表面粗糙度与脉冲激光抛光工艺参数之间的关系,并对工艺参数进行了优化,优化后不锈钢的表面粗糙度得到了有效降低。

在激光加工中,裂纹的产生和扩展造成的安全隐患一直制约着该技术品的推广使用,对此,国内外学者对激光加工中裂纹的产生做了一些研究^[13-15]。叶俊洋等^[16]分析了Ni60合金涂层裂纹的影响因素,发现提升激光功率和预热温度有助于减少裂纹。王廷宣等^[17]总结了裂纹成因及控制方法,如预热、过渡层设置等。张佳虹等^[18]研究了气孔与裂纹的形成机制,指出熔覆层成分、夹杂物及激光

参数对其敏感性有影响。ZhangYali等^[19]通过实验发现,原位生成 TiC_xN_y 纳米颗粒可以抑制基体热裂纹的形成。

迄今为止,国内外学者对于激光抛光的研究大多停留在只考虑激光工艺参数对抛光层质量的影响,对于激光抛光加工中裂纹产生及扩展现象的研究也很少。本研究以冷作模具钢Cr12MoV为研究对象,采用光纤连续激光进行表面抛光处理,研究激光抛光过程中裂纹产生机理及激光抛光工艺参数对模具钢抛光层表面质量的影响规律。

1 实验材料与方法

1.1 样品制备

实验材料选用冷作模具钢Cr12MoV,其化学成分见表1。实验设备为光纤输出半导体激光器,型号:RFL-C3000。实验过激光焦距设定为0 mm,光斑直径选择1 mm,辅助气体选择氩气。

实验材料先用平面磨床磨平,后用球头铣刀进行纹理加工,加工后材料厚度一致为20 mm,表面纹理均匀,如图1所示。在激光抛光实验前需要先对材料进行清洗以去除材料表面的油污及附着物,清洗方式为超声清洗,清洗介质选用无水乙醇,清洗后立即用吹风机吹干,避免表面生锈。在样品中心选取100 mm \times 100 mm的区域进行激光抛光实验,每块抛光区域大小为15 mm \times 15 mm,抛光路径为“单向直线间隔往返”型,如图2所示。采用该路径进行激光抛光一方面是为了使材料表面抛光温度更加连续,另一方面是为了探究搭接率对抛光后材料性能的影响。

1.2 实验方案

实验过程激光工艺参数选用激光功率 P 、扫描速度 V 和搭接率 f ,评价指标选用重熔区深度、抛光层深度、表面粗糙度、裂纹几何形貌尺寸。采用正交试验方法进行实验设计。通过进行预实验发现激光功率低于200 W时,抛光后的材料表面无法消除原先的铣削加工纹理,功率高于400 W时抛光后的材料表面有明显的焦黑缺陷,如图3所示,故激光功率范围选择为200~400 W。查阅相关文献资料,扫描速度选择6~14 mm/s,搭接率 f [计算方法如公式(1)]选择40%~80%。

表1 冷作模具钢Cr12MoV的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of Cr12MoV cold work die steel

Table 1 Chemical composition of Cr12MoV cold work die steel							%	
Ni	Cr	Mo	Mn	Si	Cu	V	P	Fe
1.45~1.70	11.0~11.5	≤0.30	≤0.30	≤0.25	≤0.03	≤0.03	Mo	83.30

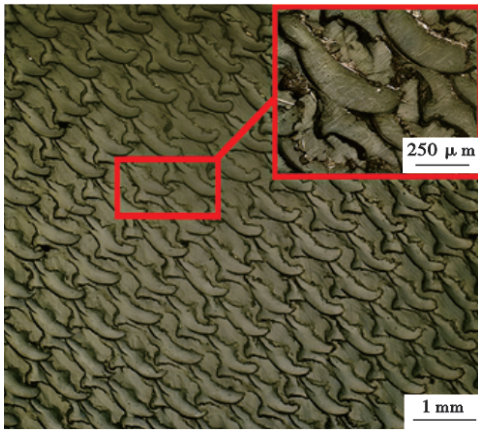


图1 抛光前的材料基体表面形貌

Fig. 1 Surface morphology of the material matrix before polishing

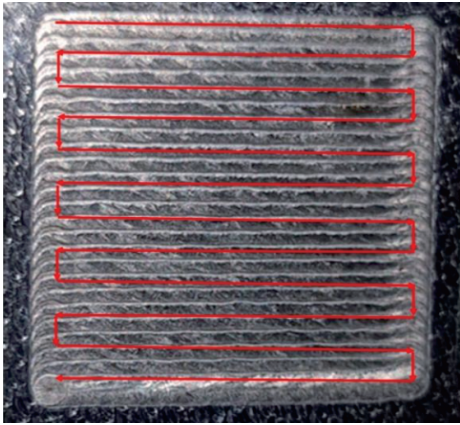


图2 抛光路径

Fig. 2 Polishing path



图3 焦黑缺陷

Fig. 3 Scorched black defects

$$f = \frac{2L - L_0}{L} \quad (1)$$

式中: f 为搭接率,%; L 为单道抛光宽度,mm; L_0 为相

邻两道抛光总宽度,mm。

采用SPSS软件进行实验设计,选择重熔区深度、抛光层深度、表面粗糙度、裂纹几何形貌尺寸作为响应目标设计,实验按照三因素五水平进行设置,见表2、表3实验方案。

表2 Cr12MoV 模具钢激光抛光正交试验表

Table 2 Cr12MoV mold steel laser polishing orthogonal experiment table

项目	-2	-1	0	1	2
激光功率/W	200	250	300	350	400
扫描速度/(mm·s ⁻¹)	6	8	10	12	14
搭接率/%	40	50	60	70	80

1.3 实验测量

用电火花线切割机将实验后的材料按照抛光区域进行切割,尺寸大小为10 mm×10 mm×20 mm。将试样清洗后,依次用不同型号的砂纸打磨抛光试样的横截面,然后采用300 r/min的转速在自动磨抛机上进行抛光。抛光液选用粒径为10 nm的金刚石磨粒,抛光至镜面无划痕,最后用4%硝酸酒精进行着色腐蚀。材料微观组织及表面形貌采用超景深显微镜观察,型号为Leica DVM6S。

材料表面粗糙度值 R_a 采用表面粗糙度测量仪测量,型号为TIME 3221。测量时参数选取根据国标GB/T 1031—2009《表面结构轮廓法表面粗糙度参数及其数值》执行。测量长度取5段,每段取样长度为2.5 mm,总评价长度为12.5 mm,如图4所示。粗糙度的 R_a 的计算方法为如式(2)。

$$Ra = \frac{\sum_{i=1}^5 Rai}{5} \quad (2)$$

经测量,模具钢磨削加工后即激光抛光前的表面粗糙度 R_a 为8.452 μm。冷作模具钢Cr12MoV在激光抛光处理后,抛光层可以分为重熔区、热影响区^[20],如图5所示,抛光层深度为两者之和。为了便于裂纹程度的表征,将材料表面的裂纹分为四类,第一类是无裂纹;第二类是裂纹宽度小于0.5 mm的小裂纹;第三类是裂纹宽度大于0.5 mm且小于2 mm的中裂纹;第四类是裂纹宽度大于2 mm的大裂纹。

2 结果与分析

2.1 实验结果

实验结果见表3。在裂纹几何形貌尺寸分类中将无裂纹设为0;小裂纹设为1;中裂纹设为2;大裂

表3 实验方案及结果
Table 3 Orthogonal experimental program and results

序号	激光功率/W	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	搭接率/%	重熔区深度/μm	抛光层深度/μm	粗糙度/μm	裂纹几何分类
1	200	10	60	209	395	1.362	0
2	200	8	50	226	426	1.522	0
3	250	10	40	214	450	1.539	1
4	300	6	50	297	625	1.768	2
5	350	10	50	275	558	1.313	1
6	300	14	40	252	515	1.255	0
7	300	10	70	273	564	1.359	1
8	350	12	60	337	641	1.210	2
9	400	12	40	325	615	1.043	2
10	250	12	50	258	510	1.453	0
11	300	12	80	304	622	1.305	1
12	350	6	80	369	717	1.640	3
13	400	8	70	393	773	2.116	3
14	400	10	80	378	726	1.312	2
15	250	14	60	254	523	1.260	0
16	400	14	50	222	462	1.385	2
17	200	12	70	196	406	1.186	0
18	200	14	80	178	353	1.106	0
19	200	6	40	253	523	1.425	0
20	350	14	70	322	617	1.806	3
21	400	6	60	425	856	1.532	2
22	250	8	80	295	596	0.944	1
23	300	8	60	312	621	1.432	0
24	350	8	40	343	685	1.261	1
25	250	6	70	320	653	1.061	1

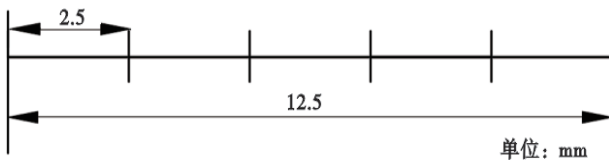


图4 粗糙度测量示意图

Fig 4 Schematic diagram of roughness measurement



图5 抛光深度测量方式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of polishing depth measurement method

纹设为3。

将激光抛光后的实验结果用SPSS分析软件进行实验多因素显著性分析,得到的分析结果分别见表4、表5、表6。其中,统计量 F 为处理均方与均方误差的比值,其反映了各个因素对目标响应量的影响程度大小, F 越大,说明实验不同组的均值差异越明显。分析表4、表5可知,材料表面重熔区深度与抛光层深度的影响因素中,激光功率的影响最大,其次是扫描速度,搭接率的影响最小,且前两者对重熔区深度的影响显著。对表6进行分析可知,裂纹宽度的影响因素中,影响最大的仍然是激光功率,其次是搭接率,扫描速度的影响则最小,且激光功率对裂纹宽度的影响显著。由表3可知,激光抛光实验中,第22组(激光功率250 W,扫描速度8 mm/s,搭接率80%)效果最佳,该组工艺参数下,粗糙度为0.944 μm,试样无裂纹。

2.2 激光抛光对材料表面粗糙度的影响

由表3实验结果可知,采用连续的光纤激光抛光Cr12MoV模具钢,其抛光层深度最高可达856 μm,最

表4 重熔区深度主体间效应分析

Table 4 Analysis of between-subjects effects of remelted zone depths

来源	自由度	均方	F值	显著性
校正模型	12	7 607.500	10.717	<0.01
截距	1	2 090 916.000	2 945.644	<0.01
激光功率 /W	4	14 337.700	20.199	<0.01
扫描速度 /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	4	6 013.100	8.471	0.02
搭接率 /%	4	2 471.700	3.482	0.42
误差	12	709.833		

表5 抛光层深度主体间效应分析

Table 5 Analysis of the between-subjects effect of polished layer depth

来源	自由度	均方	F值	显著性
校正模型	12	28 494.060	12.795	<0.01
截距	1	8 331 304.960	3 740.999	<0.01
激光功率 /W	4	52 443.260	23.549	<0.01
扫描速度 /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	4	25 156.860	11.296	<0.01
搭接率 /%	4	7 882.060	3.539	0.40
误差	12	2 227.027		

表6 裂纹几何形貌尺寸主体间效应分析

Table 6 Analysis of intersubjective effects on crack geometry size

来源	自由度	均方	F值	显著性
校正模型	12	1.927	4.898	0.050
截距	1	29.160	74.136	<0.010
激光功率 /W	4	4.760	12.102	<0.010
扫描速度 /($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	4	0.460	1.169	0.372
搭接率 /%	4	0.560	1.424	0.285
误差	12	0.393		

低也有 $353 \mu\text{m}$,属于激光抛光过度熔化机制^[21]。在这种机制下,熔池存在时间较长,重熔区内发生马兰戈尼对流效应,使得材料表面能够在较大范围内实现再分布从而获得光滑的抛光表面。因此,激光抛光可以使Cr12MoV模具钢表面粗糙度大幅度降低。所有实验数据中经过激光抛光后的材料表面粗糙度相对于原始粗糙度均有所下降,最高降低了88.8%。抛光前后的材料表面粗糙度如图6所示,抛光后的材料表面形貌如图7所示。

2.3 工艺参数对抛光层深度的影响

图8(a)为激光功率对重熔区和抛光层深度的影响关系图,由图8(a)可知,激光功率越大,材料重熔区和抛光层深度也随之增加后期重熔区和抛光层深度的增加逐渐变缓。图8(b)为扫描速度对重熔区和抛光层深度的影响关系图,由图8(b)可知,

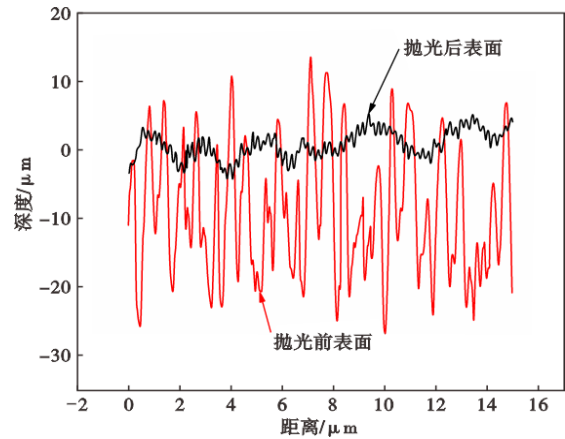


图6 抛光前后的Cr12MoV粗糙度轮廓迹线

Fig. 6 Material roughness contour traces before and after polishing

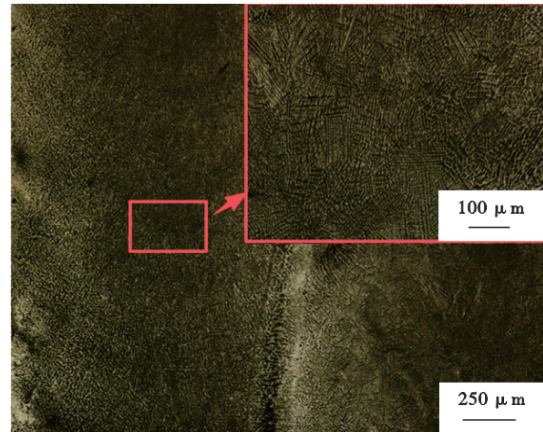


图7 抛光后的Cr12MoV基体表面形貌

Fig. 7 Surface morphology of the polished material matrix

增大扫描速度,材料重熔区和抛光层深度整体呈下降趋势,波动相对平缓。图9为抛光层深度与重熔区深度比值图,抛光层深度约为重熔区深度的两倍,抛光层深度主要受激光能量密度的影响,能量密度越大抛光层深度越深^[22],其中,能量密度的计算公式为如公式(3)所示。

$$\rho = \frac{4P}{\pi D^2 V} \quad (3)$$

式中, P 是激光功率, W ; D 是光斑直径, mm ; V 是扫描速度, mm/s ;由式(3)可知,能量密度受 P 、 D 、 V 等工艺参数的影响,从而影响重熔区和抛光层的深度。

2.4 裂纹产生机理及形貌分析

Cr12MoV模具钢在激光抛光处理后,部分试样表面产生了裂纹,产生的裂纹既有细小的扩展裂纹,也有粗大裂纹。其中,小裂纹和中裂纹主要集中在抛光层,大裂纹则贯穿到基体内部,如图10所示。

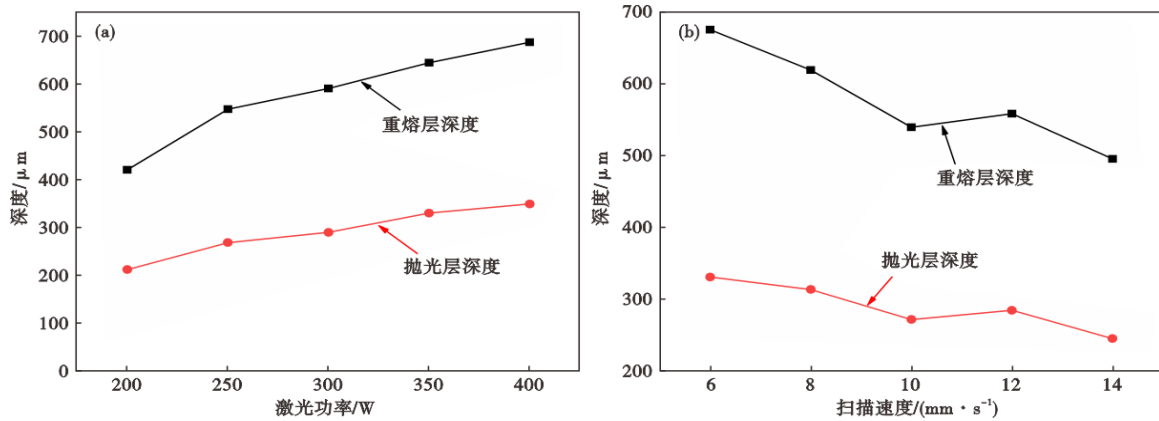


图8 激光功率和扫描速度对重熔区和抛光层深度的影响关系图:(a) 激光功率,(b) 扫描速度

Fig. 8 Influence of laser power and scanning speed on remelted zone and depth of polished layer : (a) Laser power, (b) Scanning speed

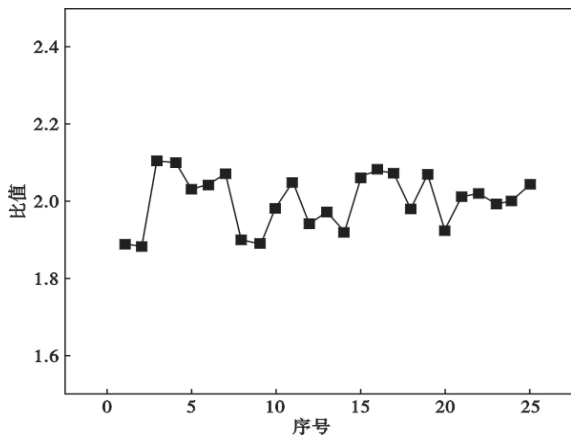


图9 抛光层深度与重熔区深度比值

Fig. 9 Ratio of depth of polished layer to depth of remelted zone

选取的无裂纹试样功率为250 W、扫描速度为8 mm/s、搭接为80%;选取的小裂纹试样功率为300 W、扫描速度为10 mm/s、搭接为70%;选取的中裂纹试样功率为350 W、扫描速度为12 mm/s、搭接为60%;选取的大裂纹试样功率为400 W、扫描速度为8 mm/s、搭接为70%。

对比四个试样的抛光工艺参数会发现随着激

光功率的增大,裂纹的程度也随之变大,说明激光功率的大小是裂纹产生及裂纹程度的主要影响因素。

随着激光功率的不断提升,试样表面所吸收的激光能量也随之增加,从而使得材料表面的温度不断上升。这种温度的升高会导致抛光层中的奥氏体晶粒逐渐变得粗大,并进一步促使形成粗针状的马氏体组织。与此同时,基体组织也发生了显著变化,原本存在的球状珠光体逐渐转变为细小的马氏体结构。同时,抛光层表面残余热应力受到激光功率和扫描速度以及光斑直径的影响,在搭接区域进行光纤激光多道次抛光时,抛光深度受到上一道次温度场影响导致其并非一致。特别是在搭接区域,由于前一道次已经形成了新的组织结构,当后续抛光过程中发生急冷急热现象时,马氏体的转变过程中会产生大量的高密度晶格缺陷,如位错和大角度晶界等。冷作模具钢Cr12MoV激光抛光处理前的显微硬度较大(63HRC),其在激光抛光过程中快热速冷使得熔池区域温度梯度极大,导致抛光层在冷却收缩的过程中受到较冷的基体区域的约束,从而在材料内部积累了较大的抛光热应力。这些热应

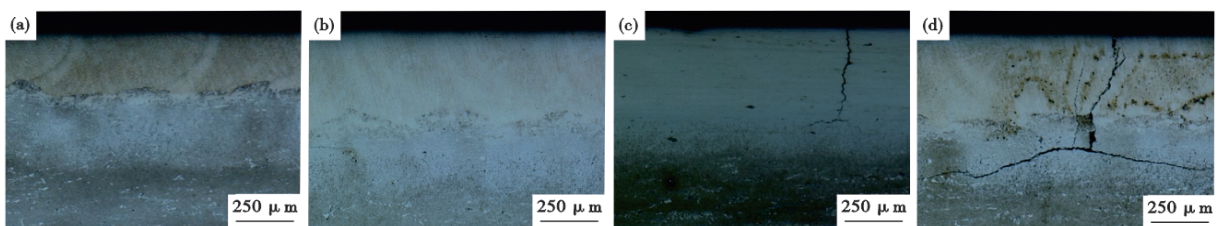


图10 各裂纹微观形貌:(a)无裂纹,(b)小裂纹试样重熔区,(c)中裂纹试样热影响区,(d)大裂纹试样热影响区

Fig. 10 Microstructures of various cracks : (a) Morphology without cracks, (b) remelted zone in the small-crack specimen, (c) heat-affected zone (HAZ) in the medium-crack specimen, (d) heat-affected zone (HAZ) in the large-crack specimen

力在积累到一定程度后会集中释放,促使材料内部产生裂纹。随着热应力的持续增大,裂纹的几何尺寸也会随之扩大,从而对材料的性能和质量造成不利影响。

同时激光抛光过程中,材料内部组织转变前后的热膨胀系数会发生变化^[23-24],而抛光层组织与基体组织之间的热膨胀系数不同导致的微观应力差异也会促使裂纹产生并扩展。

3 结论

1)采用光纤激光抛光冷作模具钢 Cr12MoV 可显著降低表面粗糙度,最佳参数为 250 W(激光功率)、8 mm/s(扫描速度)、80%(搭接率),粗糙度降至

0.944 μm,降幅达 88.8%。

2)在激光功率 200~400 W,扫描速度 6~14 mm/s,搭接率 40%~80%,重熔区和抛光层的深度受到激光功率和扫描速度的显著影响,随着激光功率的增大,重熔区和抛光层的深度先急剧增大后减缓增大,随着扫描速度的增大,重熔区和抛光层的深度整体呈下降趋势,波动相对平缓。

3)冷作模具钢 Cr12MoV 模具钢激光抛光过程中,中小裂纹在热影响区生成并扩散,破坏性的大裂纹则贯穿进基体。裂纹深度与激光抛光区和抛光层有关,激光功率是影响裂纹尺寸的主要因素,功率增大导致裂纹宽度和深度增加。

参考文献

- [1] 刘二举,徐杰,陈曦,等. 激光抛光技术研究进展与发展趋势[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 1602202.
- [2] 陈博文,孙树峰,王茜,等. 材料表面激光抛光技术研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6): 74-89.
- [3] 赵昌龙,于子策,杜伟龙,等. 表面织构对 H13 模具钢激光熔覆残余应力影响分析[J]. 制造技术与机床, 2025(1): 21-27.
- [4] 吴韬. 激光熔覆 CoCrFeNiMoNb/WC 复合涂层及高温服役性能的研究[D]. 北京:北京科技大学, 2025.
- [5] 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.
- [6] 梁强,徐永航,杜彦斌,等. 基于综合满意度函数的 D2 钢激光抛光工艺参数优化方法[J]. 表面技术, 2024, 53(16): 169-181.
- [7] 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.
- [8] Zhou J, Liao C H, Shen H, et al. Surface and property characterization of laser polished Ti6Al4V[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 380: 125016.
- [9] Kumstel J. Laser polishing of metallic freeform surfaces by using a dynamic laser beam preforming system[J]. Journal of Laser Applications, 2021, 33(2): 022020.
- [10] Zhou Y Q, Zhao Z Y, Zhang W, et al. Experiment study of rapid laser polishing of freeform steel surface by dual-beam[J]. Coatings, 2019, 9(5): 324.
- [11] Liu Z Y, Han Q Q, Zhang Z H, et al. Design of a novel crack-free precipitation-strengthened nickel-based superalloy and composites for laser powder bed fusion[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2023, 18: e2224769.
- [12] 李道齐,王涛,杨紫璠,等. 304 不锈钢激光抛光的参数优化及抛光层性能分析[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 0402021.
- [13] 陈滋鑫,周后明,徐采星. 激光熔覆裂纹研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0700006.
- [14] Zhou Z W, Zhao Z Y, He J, et al. Pulsed laser polishing of zirconia ceramic microcrack generation mechanism and size characterization study[J]. Crystals, 2024, 14(9): 810.
- [15] Lin D Q, Li Y, Zhang H, et al. In situ super-hindrance-triggered multilayer cracks for random lasing in π -functional nanopolymer films[J]. Research, 2023, 6: 0027.
- [16] 叶俊洋,李先芬,沈虎,等. 激光熔覆 Ni60 合金涂层裂纹控制研究[J]. 焊管, 2023, 46(12): 28-33.
- [17] 王廷宣,章健,刘敬,等. 激光熔覆层裂纹控制的研究进展[J]. 机械工程材料, 2023, 47(8): 1-7.
- [18] 张佳虹,孙荣禄. 激光熔覆 Ni 基复合涂层气孔及裂纹敏感性的研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(4): 141-144.
- [19] Zhang Y L, Fang Y J, Kim M K, et al. In-situ TiCxNy nanoparticle reinforced crack-free CoCrFeNi medium-entropy alloy matrix nanocomposites with high strength and ductility via laser powder bed fusion[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 273: 111237.
- [20] Li Y H, Zhang Z, Guan Y C. Thermodynamics analysis and rapid solidification of laser polished Inconel 718 by selective laser melting[J]. Applied Surface Science, 2020, 511: 145423.
- [21] Deng T T, Xie F, Li J J, et al. Effect of overlapped adjacent tracks on surface morphology in plasma beam polishing of austenitic stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2020, 512: 145739.
- [22] Xu J, Guo B, Shan D B, et al. Surface quality improvements of WC-Co micro-punch finished by ion beam irradiation for micro-punching process of metal foil[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 235: 803-810.
- [23] Li L, Miyamoto G, Zhang Y J, et al. Quantitative analysis of microstructure evolution, stress partitioning and thermodynamics in the dynamic transformation of Fe-14Ni alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 184: 221-234.
- [24] Ajeet Babu P K, Karle U S, Ambhore Y, et al. Role of temperature and strain rate on evolution of microstructure, flow stress and constitutive equation in hot deformation of AZ80A Mg alloy[J]. International Journal of Material Forming, 2022, 15(6): 76.