

激光熔凝处理对 P20 钢组织及性能的影响

李勇, 缪星旭, 张成佳, 姜鹤明, 王坤, 王小瑾

(浙江工贸职业技术学院 国家激光制造与材料技术协同创新中心, 浙江 温州 325026)

摘要: **目的** 提高 P20 模具钢的表面硬度和耐磨性能。**方法** 采用激光熔凝技术对 P20 模具钢表面进行强化处理。通过硬度梯度检测和摩擦磨损测试, 分别评价熔凝层的硬度分布特征和耐磨性能, 并通过光学显微镜和扫描电子显微镜对熔凝层及磨痕形貌进行分析。**结果** 使用激光输出功率为 500 W、光斑直径为 2.5 mm、聚焦透镜距离为 40 mm、扫描速度为 6 mm/s、搭接率为 45%、氮气保护的激光熔凝工艺所得熔凝层的组织细小, 无脱碳、畸变、裂纹等缺陷, 熔凝处理质量高。熔凝过程中单道激光熔凝层呈半椭圆形分布, 最大深度为 610~620 μm 。熔凝处理后表面硬度提升显著, 熔凝层的硬度分布与熔凝层的区域位置有关, 具有较高硬度且硬度保持基本稳定的熔凝层深度约为 400 μm ; 单道激光熔凝层最高硬度可达 460~480HV, 重叠影响区即双熔凝区的最高硬度在 540~560HV 之间, 即熔凝层硬度普遍较基体硬度提高了 60%以上。此外, P20 模具钢经过激光熔凝处理后耐磨性能提升明显, 其平均摩擦因数约为 0.85, 熔凝处理的磨损失重较未处理的试样减少了约 61%, 其磨损机制主要表现为磨粒磨损和少量的黏着磨损或剥落脱离。**结论** 激光熔凝处理能够显著提高 P20 模具钢的表面硬度和耐磨性能, 试验采用的激光熔凝工艺可在 P20 钢表面获得硬度较高且稳定可靠的熔凝层深度在 400 μm 左右, 能将 P20 模具钢的表面硬度及耐磨性提高 60%以上。

关键词: P20 模具钢; 激光熔凝; 熔凝层; 显微硬度; 金相组织; 摩擦磨损

中图分类号: V261.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)09-0209-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.09.020

Effect of Laser Surface Melting Treatment on Microstructure and Properties of P20 Die Steel

LI Yong, MIAO Xingxu, ZHANG Chengjia, JIANG Heming, WANG Kun, WANG Xiaojin

(National Collaborative Innovation Center of Laser Manufacturing and Materials Technology, Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Zhejiang Wenzhou 325026, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the surface hardness and wear resistance of P20 die steel. The surface of P20 die steel was strengthened by laser surface melting technology. The hardness distribution characteristics and wear resistance of the laser surface melted layer were evaluated by the hardness gradient test and friction and wear test. In addition, the morphology of the laser surface melted layer and wear marks were analyzed by optical microscope and scanning electron microscope. With the laser output power of 500 W, the spot diameter of 2.5 mm, the focusing lens distance of 40 mm, the scanning speed of 6 mm/s and the lap rate of 45%, the microstructure of the laser surface melted layer obtained by nitrogen protection laser surface melting

收稿日期: 2023-04-18; 修订日期: 2023-10-14

Received: 2023-04-18; Revised: 2023-10-14

基金项目: 温州市重大科技创新攻关项目 (ZG2020035)

Fund: The Wenzhou Major Science and Technology Innovation Project (ZG2020035)

引文格式: 李勇, 缪星旭, 张成佳, 等. 激光熔凝处理对 P20 钢组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(9): 209-215.

LI Yong, MIAO Xingxu, ZHANG Chengjia, et al. Effect of Laser Surface Melting Treatment on Microstructure and Properties of P20 Die Steel[J]. Surface Technology, 2024, 53(9): 209-215.

*通信作者 (Corresponding author)

process was fine, without decarbonization, distortion, crack and other defects, and the laser surface melted treatment quality was high. According to the microstructure and hardness distribution characteristics of the melted layer, from the surface layer to the matrix, the laser surface melted layer could be divided into laser melted zone, heat affected zone, overlapping affected zone and non-affected zone which was named the matrix zone. In the process of laser surface melting, the single-channel laser surface melted layer presented a semi-elliptical distribution, and the maximum depth was about 610-620 μm . After laser surface melting treatment, the surface hardness increased significantly. The hardness distribution of the laser surface melted layer was related to the location of the layer. The depth of the laser surface melted layer with high hardness and stable hardness was about 400 μm . Beyond this depth, the hardness of the melted layer tended to decrease. The maximum hardness of the single laser surface melted layer could reach 460-480HV, and the maximum hardness of the overlapping affected zone, namely the double melting zone, was between 540-560HV, namely that the hardness of laser surface melted layer was generally more than 60% higher than that of matrix. The hardness of the double melted zone was about 17% higher than that of the single laser melted layer, which indicated that the surface hardness of the laser melted layer could be improved by moderately increasing the bonding rate. The wear weight loss data showed that the wear mass loss of P20 die steel treated by laser melting was about 1.03 mg, while that of P20 die steel without laser melting was about 2.63 mg. The wear weight loss of P20 die steel after laser melting treatment was reduced by about 61% compared with that of untreated samples. The friction and wear test also showed that the average friction coefficient of laser melted P20 die steel was about 0.85. The wear mechanism was mainly characterized by abrasive wear and a small amount of adhesive wear or peeling off. Laser melting treatment can significantly improve the surface hardness and wear resistance of P20 die steel. The laser melting process used in the test can obtain high hardness and stable and reliable melted layer depth of about 400 μm on the surface of P20 die steel, which can increase the surface hardness and wear resistance of P20 die steel by more than 60%.

KEY WORDS: P20 die steel; laser surface melting; melted layer; microhardness; microstructure; friction and wear

随着塑件制品及产业的发展,塑料模具钢的生产应用越来越广泛,P20 塑料模具钢在预硬状态下即可加工成模具并直接使用,无需再进行热处理,这不仅能够避免模具在热处理过程中产生畸变、开裂、脱碳等缺陷;而且在预硬化硬度范围内具有较好的加工性能,其淬透性好,可以让大截面模具获得均匀的硬度,因此在塑料模具上的生产应用也越来越广泛,尤其在汽车、家电等领域。但塑件在注射成型时,某些塑料熔液容易释放出有害气体,以及注塑充型压力会导致模具型腔或型芯表面受到塑料熔液的腐蚀与冲刷,使模具磨损加剧而引起模具寿命下降,因此模具寿命提高问题一直是企业普遍需要面对解决的共性难题^[1-2]。

针对金属材料及模具的表面磨损失效以及其他失效形式,表面强化或改性处理技术方案是科技工作者研究提高材料性能或模具寿命的常用方法,如表面热处理、渗氮处理、激光淬火、表面涂层和合金化、激光熔覆、激光冲击强化等等^[3-14],这些技术方案各有优劣,一般认为,涂层等技术方案由于剥落和化学变化导致其表面更易失效,因而表面处理工艺比涂层工艺更有价值^[15-17]。

激光熔凝处理是利用高能量密度的激光束照射在基材表面,在不改变材料表面化学成分的前提下,通过“急热急冷”效应在基材表面原位生成熔凝层,与基体呈冶金结合,熔凝层的组织极为细小,并发生

相变,能较好地改变材料表面的力学性能,且层厚也具有一定的比较优势,是材料表面改性和提高产品寿命的一种有效技术手段^[18-20]。

激光熔凝处理后,材料表面硬度能获得显著提升,对耐磨性的提高有极大帮助,目前在一些产品的耐磨改性和寿命提升方面已经有了较多的应用与研究,不过这些研究工作主要集中在有色金属合金和其他钢铁材料方面^[21-24],在 P20 模具钢表面进行激光熔凝强化处理的研究文献还非常少。由于激光熔凝层直接决定材料表面改性的效果,而熔凝层质量的高低主要取决于基材、表面状态、激光工艺参数等,良好的工艺控制,可较好地预防熔凝层层厚过薄、变形和开裂等现象出现,因此在 P20 钢表面开展激光熔凝处理及熔凝层组织性能研究,探寻 P20 钢表面改性及耐磨效果,为 P20 钢模具磨损失效提供激光熔凝强化处理技术方案,就有着积极意义。

本研究在前期工作的基础上,采用激光熔凝工艺对 P20 模具钢进行表面强化处理,通过对熔凝层的层厚与硬度分布、显微组织、耐磨性能等进行测试和分析,希望能为 P20 模具钢使用寿命的提高提供新的技术方案和工艺参考。

1 试验

1) 试验材料。市场采购经过预先硬化处理的 P20

模具钢,其硬度为 31HRC 左右。试样尺寸为 40 mm×40 mm×15 mm,P20 钢的主要成分如表 1 所示。

表 1 P20 钢的化学成分
Tab.1 Chemical composition of P20 steel

C	Mn	Cr	Mo	Si	S, P	Fe
0.31	0.84	1.81	0.37	0.52	≤0.030	Bal.

2) 试样前处理。依次采用 120 目、400 目、800 目、1200 目砂纸对试样表面进行磨制处理,然后用分析纯无水乙醇清洗表面,晾干待用。

3) 激光熔凝试验。采用武汉锐科 RFL-A1000D 型半导体激光器对试样表面进行熔凝强化,扫描激光波长为 1 064 μm,聚焦透镜距离为 40 mm,光斑直径为 2.5 mm,输出激光功率为 500 W,扫描速度为 6 mm/s,搭接率为 45%,喷嘴氮气保护。

4) 硬度检测与金相分析。采用线切割机纵向剖切试样,对切割面进行磨制、抛光和无水乙醇清洁处理。采用德国蔡司 Axio Scope.A1 型显微镜和荷兰飞纳 PhenomXL 电子扫描显微镜观测金相组织,金相腐蚀液采用 4% (体积分数) 硝酸酒精。采用莱州华银 HV-1000A 显微硬度计对试样熔凝层沿纵向进行梯度硬度检测,以及对熔凝层表面沿水平方向进行硬度检测,硬度检测载荷为 500 g,每个梯度位置取 3 个试样的平均值作为硬度检测结果。

5) 摩擦磨损试验及扫描电镜检测。利用兰州中科凯华 MSR-2T 型电化学往复摩擦磨损试验仪对试样进行摩擦磨损试验,试验载荷为 500 g,试验时间为 30 min,取 3 个试样的平均磨损值作为摩擦磨损检测结果。摩擦磨损试验后,采用荷兰飞纳 PhenomXL 电子扫描显微镜表征试样磨损形貌。

2 结果与分析

2.1 显微组织分析

将激光熔凝处理试样沿垂直于激光扫描方向的位置剖切,所得截面位置的熔凝层组织形貌及尺寸检测如图 1 所示。可以看出,相邻激光束边缘路径距离

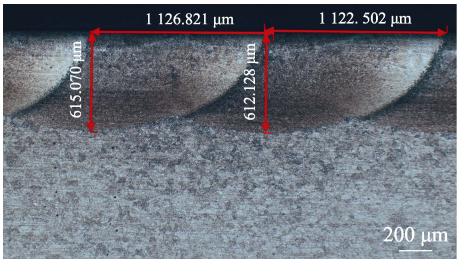


图 1 P20 钢激光熔凝层纵剖面组织形貌图
Fig.1 Microstructure of longitudinal section in laser melted layer of P20 steel

为 1.12~1.13 mm,即激光束轨迹复扫重合率约为 45%;熔凝层区域界限明显,层内组织分布均匀,无氧化、脱碳现象,也无裂纹、畸变、孔隙等缺陷;排除激光束复扫即搭接率的干扰,单束激光熔凝层约呈半椭圆形分布,其最大深度为 610~620 μm。

王源蜜等根据 Juan de Damborenea 的数学模型,提出单道激光束为高斯热源,能量分布不均匀,熔池越靠近激光束边缘位置,获得的能量越低,其熔池深度越浅,而光束中心部位的能量最高,所以熔池中央深度最深^[25-26]。受光束扫描搭接率影响,激光熔凝处理过程中熔凝层会交叉出现重熔区,因此根据熔凝层的总体组织形貌特征,从表层到基体可分为多个区域,具体分布如图 2 所示,分别为激光熔凝区 A (Re-melting Zone)、热影响区 B (Heat Affected Zone)、重叠影响区 C (Temper Affected Zone) 和非影响区即基体 D (Substrate)^[27]。

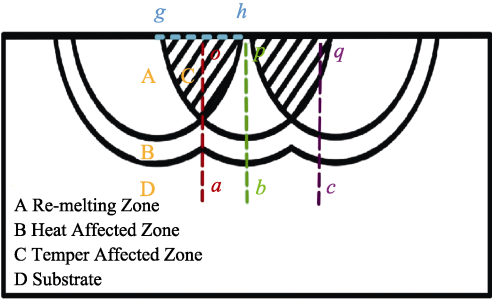


图 2 激光熔凝层分区示意图^[27]
Fig.2 Zoning diagram of laser surface melted layer^[27]

图 3 为激光熔凝处理所得熔凝层的金相组织。根据铁碳合金相图和合金加热熔化及冷却结晶原理,表层部分吸收激光能量高,液化后快冷结晶为熔凝层(A 区和 C 区);液相下层部分受热传导及吸收能量不足以达到熔化温度,受较高温度影响有组织变化因而成为热影响区(B 区);更下层的底部温度较低,不足以改变基体预硬化处理后的回火组织状态,因而仍然为基体组织(D 区)。从图 3b 可以看出,熔凝层内的组织主要为马氏体和残余奥氏体,马氏体的亚结构主要为位错,且尺寸非常细小,利用较大倍数的扫描电镜才易辨识。此外,重叠影响区(C 区)的马氏体与熔凝区(A 区)的马氏体相比,其亚结构位错特征更不易分辨,是更为明显的隐晶马氏体组织。因此,熔凝层内除发生马氏体相变外,其组织细化效果也极为明显。一般认为这是材料在激光照射下,晶格与自由电子相碰撞而产生热振动,从而把光能快速转换为热能,使试样表面迅速升温;另一方面,由于基体本身的热传递以及环境的对流换热作用使得冷却速度很快,从而产生了很大的过冷度,这样的“急热急冷”过程使部分组织形核来不及长大就快速凝固,凝固后的组织极细且位错密度更高^[28-30]。

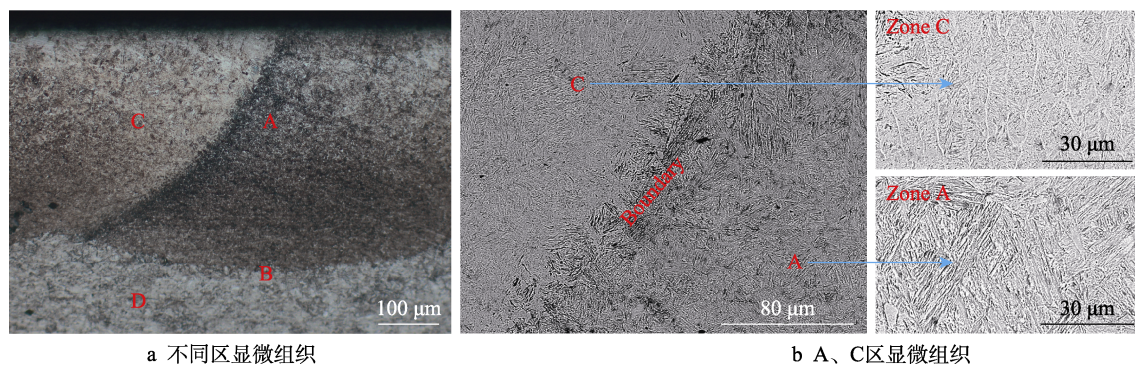


图3 激光熔凝层金相组织

Fig.3 Microstructure of laser surface melted layer: a) microstructures of different zones; b) microstructures of zones A and C

2.2 硬度测试与分析

为检测熔凝层各区域硬度的分布与变化情况,从熔凝层表面向基体方向垂直取点,分别沿图2所示的 oa 线(C区中心轴线方向)、 pb 线(A区深度最大方向)和 qc 线(C区靠近边缘方向),进行显微硬度梯度检测,每条线两点硬度检测的间隔距离为 $100\mu\text{m}$,所得的阶梯硬度值如图4所示。为分析熔凝层重叠影响区(双熔凝区C区)表层的硬度变化情况,沿图2所示的 hg 线(表层水平向左方向, h 点为C区右边缘边界起点),进行熔凝层表层的显微硬度检测,每两点检测的间隔距离为 $100\mu\text{m}$,所得的表层硬度值如图5所示。

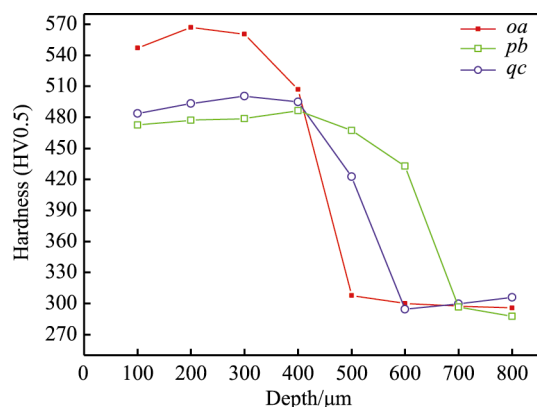


图4 熔凝层不同区域的硬度沿深度变化折线图

Fig.4 Variation curve of microhardness in the zones of different depth in the laser surface melted layer

从图4与图5可以看出:熔凝层的硬度分布与熔凝层的区域位置有关,具有较高硬度的熔凝层其稳定深度约为 $400\mu\text{m}$,超过该深度后熔凝层的硬度有急剧下降的趋势,且在约 $600\mu\text{m}$ 之后,除熔池最深位置外,其余区域的硬度皆趋向于稳定。另外,激光束复扫区(搭接区)即熔凝层重叠影响区(C区)的硬度明显比其他区域的硬度更高,而熔凝区A区的硬度变化则较为平缓,即A区硬度的稳定性更好。具体来看,重叠影响区C区(即双熔凝区)的最高硬度在 $540\sim 560\text{HV}$ 之间,比单道激光熔凝区(A区)的

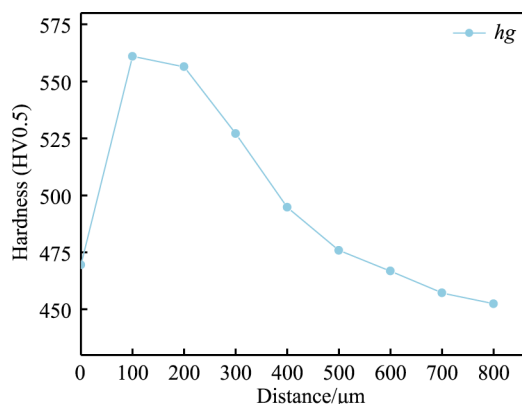


图5 熔凝层C区至A区的表层硬度变化折线图

Fig.5 Variation curve of surface microhardness from zone C to zone A of the laser surface melted layer

最高硬度 $460\sim 480\text{HV}$ 提高了约17%,而靠近表层区域即离表层 $400\mu\text{m}$ 深度内的熔凝层硬度较基体硬度($290\sim 310\text{HV}$)普遍提高了约60%以上。这种熔凝层不同区域的硬度分布特征及其变化趋势主要是由激光熔凝处理导致的细晶强化效应及淬火作用引起的^[31];双熔凝区强化层受2次激光扫描,在一定深度范围内,其组织亚结构较单次激光扫描更细,单位面积上的相界面及边界增多,位错运动受阻,因此材料硬度更高。

2.3 摩擦磨损测试与分析

为研究激光熔凝处理对试样耐磨性的影响,分别对激光熔凝处理的P20钢试样A和未处理的P20钢试样B进行摩擦磨损测试,其结果如图6所示。由测试结果可知:未熔凝处理的试样B的摩擦因数平均值为0.81左右,在前3 min内摩擦因数快速上升至0.8左右,3 min后摩擦因数稳定在0.8附近;而熔凝处理的试样A的平均摩擦因数约为0.85,在前3 min内摩擦因数快速上升至1.2后迅速回落,在3~17 min时摩擦因数在0.8左右,17 min后摩擦因数缓慢上升至0.85附近。摩擦磨损前期由于摩擦副处于相互咬合阶段,熔凝层表面存在一些微观的凸起和氧化层,因此摩擦因数变化较快,3 min左右进入平稳摩擦阶

段; 由于熔凝层存在硬度梯度变化的原因, 因此其摩擦因数的起伏性较未熔凝处理的试样稍大。

分别对比并称量激光熔凝处理试样 A 和未熔凝试样 B 在 3 组摩擦磨损测试前与测试后的质量, 所得磨损量如表 2 所示。由表 2 可以看出, 经过激光熔凝

处理的 P20 钢, 其磨损量在 1.03 mg 左右, 而未经激光熔凝处理的 P20 钢的磨损量约为 2.63 mg, 熔凝处理后 P20 钢的磨损量减少了 61%左右, 因此可以认为 P20 钢在激光熔凝处理后, 其耐磨性能提高了 1 倍以上。

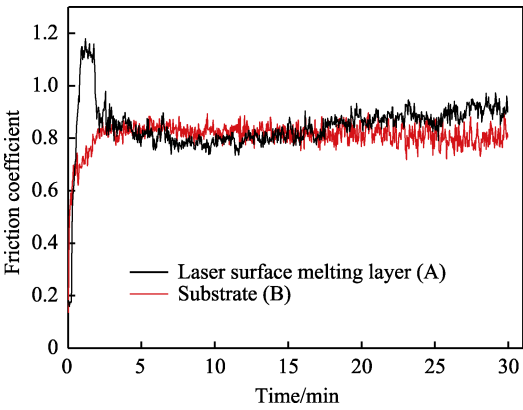


图 6 激光熔凝试样与未处理试样的摩擦因数
Fig.6 Friction coefficient of laser surface melted sample and untreated sample

表 2 P20 钢的磨损量
Tab.2 Wear loss of P20 steel

Samples	Wear loss/g	Average wear loss/g
Laser melted sample A	0.001 0, 0.001 0, 0.001 1	0.001 03
Substrate sample B	0.002 6, 0.002 8, 0.002 5	0.002 63

为进一步分析激光熔凝处理对 P20 模具钢耐磨性的影响, 利用扫描电镜观察试样的磨痕微观形貌。试样 A 的磨痕微观形貌如图 7a 所示, 可见主要为微观的沟状磨痕 (Ditch) 和少量的块状剥落斑点 (Speckle); 试样 B 的磨痕微观形貌如图 7b 所示, 可见主要为大量的块状剥落斑点和少量的沟状磨痕。

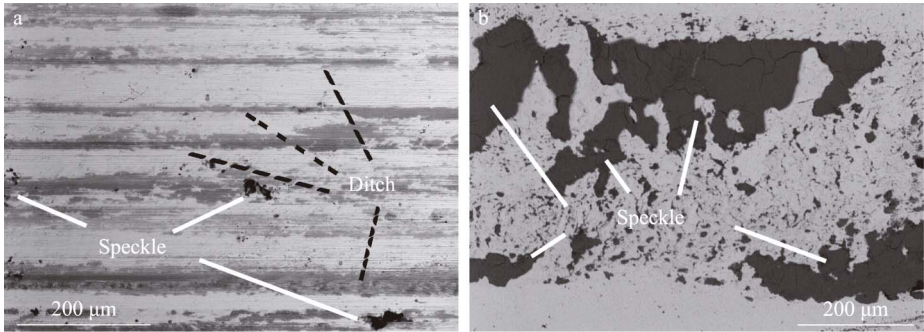


图 7 激光熔凝试样 (a) 和未处理试样 (b) 磨痕微观形貌
Fig.7 Wear morphology of laser surface melted sample (a) and untreated sample (b)

综合激光熔凝层微观组织和摩擦磨损测试结果可知, 经过激光熔凝处理的 P20 钢在磨损时, 由于熔凝层硬度较高, 抵抗摩擦副中硬质颗粒嵌入的能力较强, 其表面主要磨损机制为沟犁现象导致的磨粒磨损; 同时由于摩擦副实际接触点局部应力引起塑性变形, 使接触面产生黏着效应, 接触面中较软部分被剪切转移至较硬部分表面, 随后脱落形成斑点, 经过激光熔凝处理的 P20 钢表面硬度高, 由于黏着导致的脱落的斑点数和面积小于未强化处理状态下的 P20 钢试样, 因此磨损量小; 而未处理的 P20 钢试样则由于表层硬度较低, 主要磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损或剥落脱离, 磨损量大, 黏着磨损中剪切脱落的磨屑进入摩擦副, 起到一定的填隙滑动作用, 摩擦因数的波动较小。

3 结论

1) 采用激光输出功率为 500 W、光斑直径为 2.5 mm、聚焦透镜距离为 40 mm、扫描速度为 6 mm/s、

搭接率为 45%的激光熔凝工艺处理 P20 模具钢, 所得熔凝层组织分布均匀, 晶粒组织及亚结构细小, 无畸变、裂纹、脱碳等缺陷, 熔凝层质量良好; 单道激光熔凝后, 其熔凝层呈半椭圆形分布, 最大深度为 610~620 μm。

2) 激光熔凝处理后的 P20 钢表面硬度显著提高, 具有较高硬度且硬度基本稳定的熔凝层深度约为 400 μm, 其硬度较基体提高了约 60%以上, 层深超过 400 μm 后, 熔凝层的硬度有显著下降的趋势。熔凝层的硬度分布与熔凝层的区域位置有关, 激光束复扫区即熔凝层重叠影响区 (C 区) 的硬度明显比其他区域的硬度更高; 而单道激光所得熔凝区即 A 区硬度的稳定性更好一些。试验的 P20 钢激光熔凝层其重叠影响区最高硬度可达 540~560HV, 比单道激光熔凝区的最高硬度 460~480HV 提高了约 17%。

3) P20 钢经过激光熔凝处理后表面硬度提高, 减少了黏着导致的磨损, 磨损量较未处理的试样减少了约 61%, 提高了材料的耐磨性能。其表面主

要磨损机制为磨粒磨损和少量的黏着磨损或剥落脱离。

参考文献:

- [1] 李明, 张逊. P20 塑料模具钢低能耗热处理工艺的生产实践[J]. 现代冶金, 2016, 44(2): 7-10.
LI M, ZHANG T. Production Practice of Low Energy Consumption Heat Treatment Process for P20 Plastic Die Steel[J]. Modern Metallurgy, 2016, 44(2): 7-10.
- [2] 吴茜, 刘斌. 模具材料研究与应用现状及发展趋势[J]. 模具工业, 2017, 43(3): 1-7.
WU X, LIU B. Research on Application Status and Development Trends of Die & Mould Materials[J]. Die & Mould Industry, 2017, 43(3): 1-7.
- [3] 闫洪泽, 吴明忠. P20 钢等离子体氮化/DLC 双重处理研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2019, 37(2): 258-261.
YAN H Z, WU M Z. Duplex Treatment of Plasma Nitriding/DLC on P20 Steel by Meshed Plasma Immersion Ion Deposition Technical[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2019, 37(2): 258-261.
- [4] ZHANG Z, YU T, KOVACEVIC R. Erosion and Corrosion Resistance of Laser Cladded AISI 420 Stainless Steel Reinforced with VC[J]. Applied Surface Science, 2017, 410: 225-240.
- [5] TELASANG G, DUTTA MAJUMDAR J, WASEKAR N, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Laser Clad and Post-Cladding Tempered AISI H13 Tool Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(5): 2309-2321.
- [6] WANG B, ZHAO X F, LI W Z, et al. Effect of Nitrided-Layer Microstructure Control on Wear Behavior of AISI H13 Hot Work Die Steel[J]. Applied Surface Science, 2018, 431: 39-43.
- [7] PENG T T, DAI M Y, CAI W, et al. The Enhancement Effect of Salt Bath Preoxidation on Salt Bath Nitriding for AISI 1045 Steel[J]. Applied Surface Science, 2019, 484: 610-615.
- [8] HOPPIUS J S, KUKREJA L M, KNYAZEVA M, et al. On Femtosecond Laser Shock Peening of Stainless Steel AISI 316[J]. Applied Surface Science, 2018, 435: 1120-1124.
- [9] SALIMIANRIZI A, FOROOZMEHR E, BADROSSAMAY M, et al. Effect of Laser Shock Peening on Surface Properties and Residual Stress of Al6061-T6[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 77: 112-117.
- [10] LEE K H, CHOI S W, YOON T J, et al. Microstructure and Hardness of Surface Melting Hardened Zone of Mold Steel, SM45C Using Yb: YAG Disk Laser[J]. Journal of Welding and Joining, 2016, 34(1): 75-81.
- [11] 高健, 刘奋成, 刘丰刚, 等. WC-Ni-Co 硬质合金表面激光熔凝修复组织与摩擦磨损性能[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 171-182.
GAO J, LIU F C, LIU F G, et al. Microstructure and Friction-Wear Properties of WC-Ni-Co Cemented Carbide with Surface Laser Melting[J]. Surface Technology, 2021, 50(3): 171-182.
- [12] 张伟. P20 模具钢表面合金化组织与性能[J]. 中国表面工程, 2012, 25(3): 68-70.
ZHANG W. Microstructure and Properties of Laser Alloying on the Surface of P20 Die Steel[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(3): 68-70.
- [13] 魏子豪, 朱春东, 汪黎明, 等. P20 模具钢 TD 盐浴渗铬覆层摩擦磨损性能研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(8): 72-76.
WEI Z H, ZHU C D, WANG L M, et al. Study on Friction and Wear Properties of P20 Die Steel Coating TD Salt Bath Chrome[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(8): 72-76.
- [14] 戴晓光, 周圣丰. P20 塑料模具钢表面激光熔覆球磨 Fe 基 SiC 金属陶瓷涂层的研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(6): 190-192, 198.
DAI X G, ZHOU S F. Study on Milled Fe-Based SiC Ceramic-Metal Coating Prepared by Laser Cladding on P20 Plastic Mold Steel Surface[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(6): 190-192, 198.
- [15] TRDAN U, SKARBA M, PORRO J A, et al. Application of Massive Laser Shock Processing for Improvement of Mechanical and Tribological Properties[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 342: 1-11.
- [16] ABEENS M, MURUGANANDHAN R, THIRUMAVALLAVAN K, et al. Surface Modification of AA7075 T651 by Laser Shock Peening to Improve the Wear Characteristics[J]. Materials Research Express, 2019, 6(6): 066519.
- [17] 王建军, 舒凤远, 王建伟, 等. P20 汽车模具钢表面激光淬火对其组织与性能的影响[J]. 锻压技术, 2023, 48(1): 222-228.
WANG J J, SHU F Y, WANG J W, et al. Influence of Surface Laser Quenching on Its Microstructure and Properties for P20 Automobile Die Steel[J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48(1): 222-228.
- [18] 仇安, 陈慧, 宋婕, 等. NiTi 合金激光熔凝处理及其生物腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2023, 52(1): 364-371.
QIU A, CHEN H, SONG J, et al. Laser Melting Treatment on NiTi Alloy and Its Biological Corrosion Properties[J]. Surface Technology, 2023, 52(1): 364-371.
- [19] 王子璇, 胡艳娇, 庞铭. 激光熔凝不锈钢的组织 and 综合

- 性能[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1914006.
- WANG Z X, HU Y J, PANG M. Microstructure and Comprehensive Properties of Laser-Melted Stainless Steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1914006.
- [20] 孟云龙, 杨胶溪, 张健全, 等. 激光熔凝对 AerMet100 钢显微组织及性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021414.
- MENG Y L, YANG J X, ZHANG J Q, et al. Effect of Laser Melting on Microstructure and Performance of Aer Met100 Steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021414.
- [21] 陈小明, 王海金, 周夏凉, 等. 激光表面改性技术及其研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(S1): 341-344.
- CHEN X M, WANG H J, ZHOU X L, et al. Laser Surface Modification Technology and Its Research Progress[J]. Materials Reports, 2018, 32(S1): 341-344.
- [22] 丁建岗. 激光模具表面抗裂仿生单元体模型[J]. 精密成形工程, 2018, 10(4): 156-162.
- DING J G. Blocking Cracks Model of Laser Melting Bionic Body on Mould Surface[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(4): 156-162.
- [23] 孟泽华, 王义强, 郭宏, 等. 激光强化对滚动导轨耐磨性能的影响[J]. 机械工程师, 2017(10): 13-16.
- MENG Z H, WANG Y Q, GUO H, et al. Effects of Laser Melting Technology on the Wear Resistance of Rolling Guides[J]. Mechanical Engineer, 2017(10): 13-16.
- [24] 姚建华. 激光表面改性技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- YAO J H. Laser Surface Modification Technology and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [25] 王源蜜. 激光熔凝对 304 奥氏体不锈钢组织及力学性能的影响[D]. 衡阳: 南华大学, 2013.
- WANG Y M. Effects of Laser Melting on Microstructure and Mechanical Properties of 304 Austenitic Stainless Steel[D]. Hengyang: University of South China, 2013.
- [26] 黄伟军, 黄永俊. 激光熔凝强化 45 钢的组织与性能[J]. 热加工工艺, 2017, 46(8): 58-60.
- HUANG W J, HUANG Y J. Microstructure and Property of 45 Steel by Laser Melting-Hardening Strengthening[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(8): 58-60.
- [27] 姜鹤明, 李勇, 赵鑫达, 等. 球阀密封面激光熔凝强化工艺及性能的研究[J]. 南方农机, 2022, 53(16): 124-126.
- JIANG H M, LI Y, ZHAO X D, et al. Study on Laser Melting Strengthening Technology and Performance of Ball Valve Sealing Surface[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2022, 53(16): 124-126.
- [28] 冯勋恒. 激光熔凝对超高铬高碳钢组织及性能影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- FENG X H. Effect of Laser Remelting on Microstructure and Performance of Ultra High Chromium and High Carbon Steel[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [29] 张慧妍. 选择性激光熔凝钛合金及 316L 不锈钢的组织与性能研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.
- ZHANG H Y. Microstructure and Properties of Selective Laser Melting Titanium Alloy and 316L Stainless Steel[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2021.
- [30] 谢亚东, 祁文军, 高文会. U71Mn 钢激光熔凝工艺及性能研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(12): 112-114.
- XIE Y D, QI W J, GAO W H. Study on Laser Melting Process and Properties of U71Mn Steel[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(12): 112-114.
- [31] 庞铭, 浮艺旋. 激光功率变化对 AZ80D 镁合金熔凝区域性能影响的研究[J]. 热加工工艺, 2020(8): 1-5.
- PANG M, FU Y X. Study on Effect of Laser Power Change on Properties of Melting Area of AZ80D Magnesium Alloy[J]. Hot Working Technology, 2020(8): 1-5.