

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.008

激光热处理对 EX1 压铸模具钢 组织和性能的影响

陈成¹, 苏钰¹, 桑震¹, 李莹¹, 冯萧萧¹, 崔浩田¹, 雷佳乐²

(1. 上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620; 2. 重庆优特模具有限公司, 重庆 401329)

摘要:为了提高模具钢 EX1 性能, 课题组采用 5 kW 光纤激光加工制造系统激光器, 对 EX1 钢表面进行激光强化处理。采用扫描电子显微镜、显微硬度计和摩擦磨损试验机等研究了激光强化工艺参数(激光功率 P , 扫描速度 v) 对 EX1 钢激光淬火层的组织、硬度及摩擦磨损的影响。研究结果表明: 激光强化处理后硬化层的显微组织明显细化, 淬火区硬度明显高于基体。该研究提高了 EX1 钢表面的光滑度, 降低了摩擦因数。

关键词: 压铸模具; EX1 钢; 激光硬化; 激光加工工艺参数; 摩擦磨损性能

中图分类号: TG111.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2019)03-0041-05

Effect of Laser Heat Treatment on Properties and Microstructure of EX1 Die Steel

CHEN Cheng¹, SU Yu¹, SANG Zhen¹, LI Ying¹, FENG Xiaoxiao¹, CUI Haotian¹, LEI Jiale²

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Chongqing Youte Tooling Co., Ltd., Chongqing 401329, China)

Abstract: In order to improve the performance of die steel EX1, the surface laser hardening was treated on EX1 steel with the laser of the 5 kW fiber laser processing and manufacturing system. The scanning electron microscope, microhardness tester and friction tester were used to study the influence of laser processing parameters (laser power P , scanning speed v) on the microstructure, hardness and wear resistance of EX1 steel. The results show that the microstructure of the hardened layer can be significantly refined, the hardness is significantly higher than that of the matrix, the smoothness of the surface is improved and the friction coefficient is reduced.

Keywords: die casting mould; EX1 steel; laser hardening; laser processing parameters; friction and wear properties

压铸模具是模具中的一个大类。近年来, 随着我国制造业飞速发展, 模具行业也迎来了新的发展机遇, 对模具的综合性能、寿命也提出更高的要求^[1]。模具寿命对企业的生产效率、产品质量和生产成本有着重要的影响。常规的整体淬火已很难满足模具钢对高的表面耐磨性和基体韧性的要求^[2]。用激光对模具表面进行处理可以有效地提高零件表面的强度、耐磨性和耐腐蚀性等性能^[3,4]。激光处理后所得到的表面硬化层的组织较细, 表面硬度也高于常规淬火的硬度^[5-8]。林继兴等^[9]研究表明, 当激光功率为 1 800

W, 扫描速度为 1 000 mm/min 时, H13 钢表面硬化性能最佳, 其表面硬度高达 777.5HV。何柏林等^[10]指出: 热作模具钢 5CrMnMo 在激光功率为 900 ~ 1 300 W、扫描速度为 6 ~ 16 mm/s 的条件下淬火, 硬度为 830HV 左右。Cr12MoV 钢在激光功率 1 500 W, 扫描速度 10 mm/s 时, 所获得的硬度为 700HV^[11]。EX1 钢适合用于压铸模具、热锻模具和热挤压模具等, 加强对 EX1 钢性能的研究具有重要的理论意义和实际应用价值。经过普通热处理后的 EX1 模具钢硬度在 540HV 左右。激光淬火后, EX1 钢性能会大幅度提升, 尤其是

收稿日期: 2018-10-25; 修回日期: 2019-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(51301105)。

第一作者简介: 陈成(1993), 江苏宝应人, 硕士研究生, 主要从事模具钢组织和性能的研究。通信作者: 苏钰(1977), 女, 上海人, 博士, 副教授, 主要从事金属热力学计算及高强钢成形性能研究。E-mail: suyu@sues.edu.cn

硬度及耐磨性^[12]。目前对 EX1 钢进行激光淬火的研究较少,因此,课题组研究激光淬火工艺对 EX1 钢组织和性能的影响,以期对模具制造和生产提供参考。

1 实验方法

本次试验所用基体材料为 EX1 模具钢,其成分如表 1 所示。试样通过线切割得到,为两段式长方体,如图 1 所示。

表 1 EX1 模具钢的成分

Table 1 Composition analysis of EX1 steel %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.370	0.150	0.270	0.006	0.001	5.090	0.130	2.060	91.380

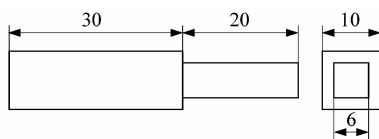


图 1 金属试样示意图

Figure 1 Schematic diagram of metal sample

利用 IPG YLS-5000 型号 5 kW 光纤激光加工制造系统对试样表面进行激光淬火处理,光斑半径 D 为 6 mm,激光淬火工艺参数如表 2 所示。激光淬火随着功率的增加,加热温度增加,温度过低,不能完全奥氏体化,温度过高,会出现熔融。EX1 模具钢的奥氏体化温度在 900 °C 以上,激光功率为 800 ~ 2 000 W。扫描速度低,淬火区吸收的热量多,扫描速度高,淬火区吸收的热量少,令扫描速度为 10, 20 mm/s。

表 2 激光淬火工艺参数

Table 2 Laser quenching process parameters

试样编号	激光功率 P/W	扫描速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$
3#	2 000	20
9#	800	10
11#	800	20

通过标准工序制备金相试样,根据激光工艺参数对试样进行编号,分别为 3#, 9# 和 11#, 并利用 4% 的硝酸酒精溶液对淬火后的 EX1 模具钢试样进行金相腐蚀。在 VHX-600 型超景深显微镜下对腐蚀后的试样进行金相组织观察,利用松下 S-3400N 扫描电镜拍摄高倍数的金相照片并进行枝晶和基体的能谱分析。利用 X-pert 型 XRD 衍射仪分析淬火后 EX1 模具钢的物相,扫描角度为 20° ~ 90°。使用 HT-600 型摩擦磨损试验机进行摩擦因数的测定,对磨材料为硬质合金球,载荷 20 N,试验时间 20 min。利用 MH_VK 显微硬度测试系统对试样进行硬度测试,在测量过程中,设置的试验参数,物镜 40 倍,载荷为 4.9 N,保荷时间 10 s。

2 实验结果与分析

2.1 金相组织分析

EX1 模具钢经过激光淬火后,分为熔融区(melted zone)、热影响区(heat affected zone, HAZ)和基体(base metal)3 个区域。图 2(a) ~ (d) 为 3# 试样的组织形貌图。由图 2(a) 中可以发现,3# 试样经过激光淬火后,分为熔融区、热影响区和基体 3 个区域。从图 2(b) 中可以发现 3# 试样熔融区边缘存在非常密集的枝晶和胞状晶,枝晶顺着基体方向生长,长度大约为 50 μm ,这是因为 EX1 模具钢进行激光淬火处理后从高温迅速冷却,熔融区因为温度梯度较小,从而形成了较大的成分过冷,沿着液相线结晶的初晶周边形成树枝状结晶。通过能谱分析可知,枝晶和基体上成分含量不同,表 3 列举了点 A 和 B 的各元素的质量分数。点 A 和 B 位置如图 2(c) 所示。由表 3 可以发现枝晶上的 Mo, V, Cr 质量分数高于基体,而基体上的 Fe 质量分数高于枝晶。这可能是由于在激光淬火的过程当中冷却速度过快,各元素在结晶时,液相中的原子来不及扩散而固相中的原子来不及扩散,造成不均匀分布,导致了偏析,所以枝晶上 Mo, V, Cr 等元素含量高于基体。由于大部分基体在激光淬火中,其温度稳定在 A_{c1} 线以下,其组织为原始组织,即为细小的板条状马氏体 + 细小的碳化物颗粒,如图 2(d) 所示。

钢的 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)物相图中, 2θ 为 44°, 65°, 82° 和 98° 的位置都是马氏体波峰可能出现的位置。由图 3 可以看出 3# 试样出现了 3 个马氏体波峰,分别在 2θ 为 44°, 64°, 81° 处,没有发现残余奥氏体波峰。说明激光淬火后,熔融区组织为马氏体。这是因为在高能量密度的激光束照射下,钢的过热度极大,造成相变驱动力也极大,从而奥氏体形核数目剧增,同时弥散的碳化物阻碍了奥氏体晶粒的长大,使奥氏体晶粒超细化。超细化的奥氏体晶粒在马氏体相变作用下,必然转变成细小的马氏体组织^[13]。

表 3 SEM 能谱中点 A 和 B 的成分质量分数

Table 3 Component content of points A and B in SEM spectra

	B in SEM spectra					%
点	C	Si	Mo	V	Cr	Fe
A	1.34	0.41	4.55	1.14	6.86	85.70
B	1.29	0.54	2.20	0.48	4.96	90.53

由图 2(b) 中树枝晶可以判断,3# 试样在 2 000 W 的激光功率下,试样表面迅速熔化并凝固,激光扫描后较大的温度梯度,导致树枝晶的形成。由图 2(e) 和

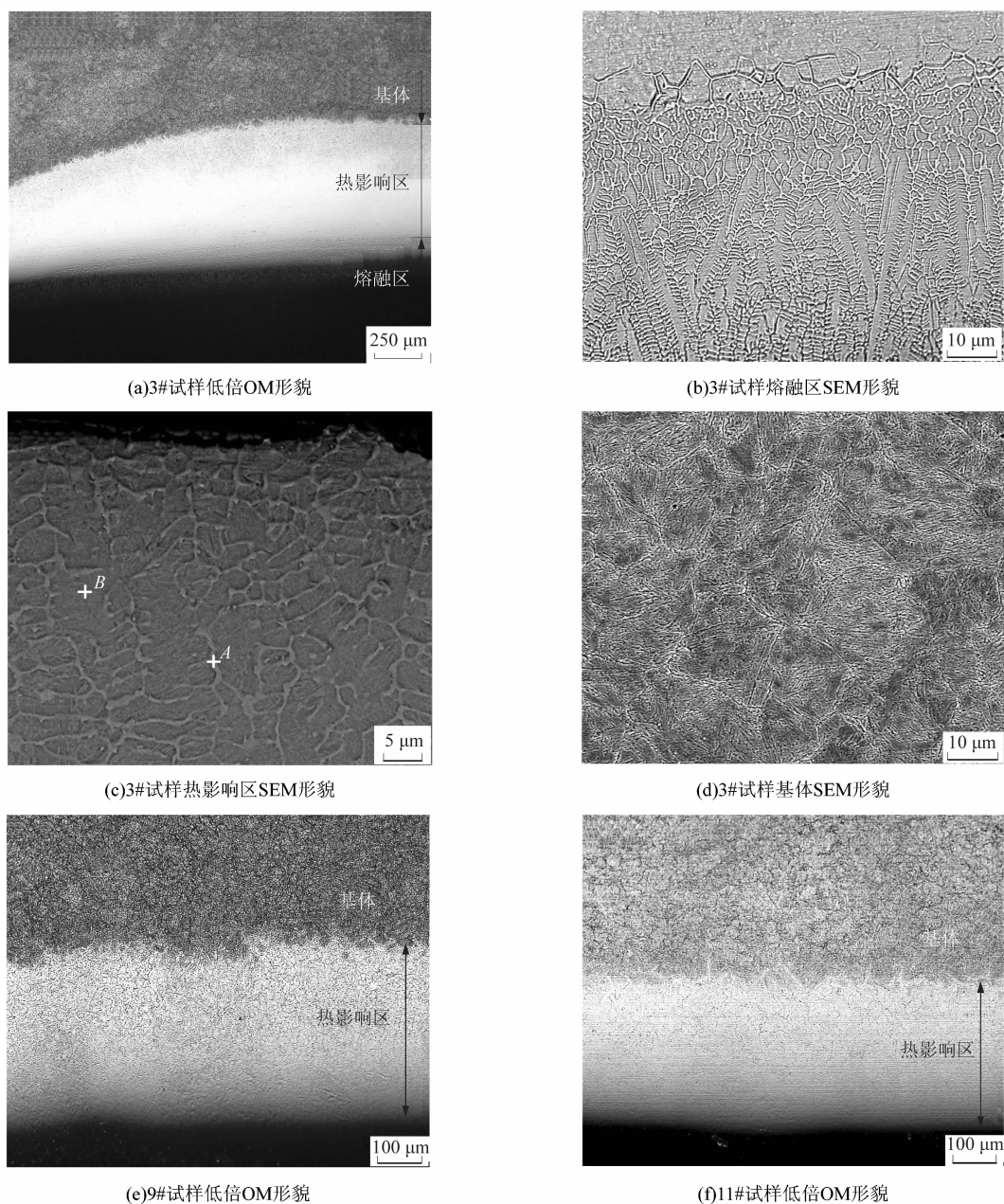


图2 激光淬火后 EX1 钢的 OM 及 SEM 形貌

Figure 2 OM and SEM micrographs of laser quenched EX1 steel

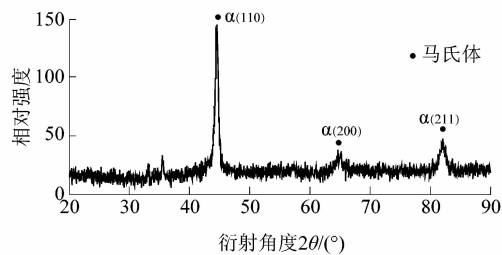


图3 3#试样的 XRD 图谱

Figure 3 XRD patterns of 3# sample

(f)可以看出,9#和11#试样由于激光功率过小,熔融区较小,热影响区较明显。9#试样的热影响区的宽度略宽于11#试样,说明减缓扫描速度,可以增加激光与基体作用的时间,增强能量密度,使激光热影响区更宽。综上所述,激光功率和扫描速度可以影响 EX1 钢的组织形貌和淬火区的组成。

2.2 硬度和淬火层厚度分析

EX1 压铸模具钢经过激光淬火后,试样的激光处理区相对于基体的硬度会发生较大的变化。为了更好地

的分析材料本身的硬度变化,需要对每一个试样的激光处理区至基体进行硬度测试,并对材料硬度变化情况进行对比。

从图4中可以看出,3#试样淬火区的最大硬度达到了838HV,约为基体硬度的2倍,远高于9#和11#试样。研究表明:扫描速度对熔覆层尺寸影响最大,对于H13钢的激光淬火工艺,扫描速度为20 mm/s时,模具钢性能最佳^[14]。9#试样因为激光功率下降,淬火层深度明显下降;对比11#试样发现,由于11#试样的扫描速度更快,导致淬火时间减少,硬度较9#和3#试样有所下降。从硬度变化曲线可以看出,硬度沿着硬化层深度方向发生变化,激光处理后的表层具有极高的硬度,从硬化层到基体方向,硬度急剧下降。

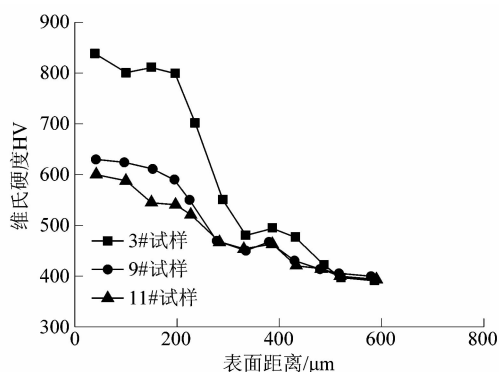


图4 3#、9#和11#试样硬度与表面距离的关系
Figure 4 Relation between hardness and surface distance of 3#, 9# and 11# samples

激光功率2 000 W时,表层熔融区的硬度远高于热影响区和基体,这是由于高能量的激光束扫在EX1模具钢表面,短时间热量集中,温度超过了液相线,急冷时形成树枝晶,使激光表面熔融区具有超高的硬度。热影响区硬度沿着基体方向逐渐下降,温度超过了 A_{C3} 线,马氏体及其亚结构超细化,同时晶格内缺陷密度大幅增加,导致硬度有所增加,越靠近基体,温度梯度变小,硬度值也越低,但是硬度略高于基体。基体的温度由于没有超过 A_{C1} 线,故组织和形貌没有发生改变,故硬度不变^[15]。因此,3#试样表层熔融区硬度远高于9#和11#试样表面的热影响区。由以上分析得知,激光淬火时,当激光功率足够大,使模具钢表面瞬间熔化并凝固冷却时,模具钢的表面硬化程度和硬度高;而激光扫描速度越慢,激光淬火的时间越长,硬度越高,淬火深度越深,因而激光淬火后模具钢表面的硬度与激光功率成正比,与扫描速度成反比,而且随着淬火层深度的加深硬度逐渐下降。

图5所示为3#、9#和11#试样在不同工艺下激光淬火后淬火区厚度的柱状图,由图中数据可以看出,在扫描速度相同的情况下,增大激光功率,3#试样淬火区厚度为236 μm ,大约是11#试样的淬火区厚度的2.18倍;而在保持功率不变时,减缓扫描速度,9#试样的淬火区厚度大约是11#试样淬火区厚度的1.53倍。

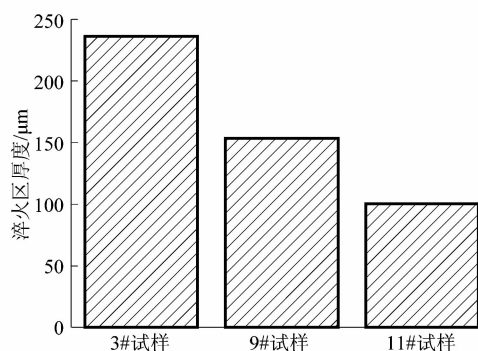


图5 3#、9#和11#试样淬火区厚度柱状图
Figure 5 Thickness column diagram in quench zone of 3#, 9# and 11# samples

2.3 摩擦因数及硬度分析

如图6所示,可以发现磨损试验刚开始时,3#试样的摩擦因数最低为0.13,9#试样略高一些达到了0.37,而11#试样摩擦因数为0.45,激光淬火试样的硬度较高,这是因为3#试样由于激光功率更高,淬火层的硬度也更高,降低了粘着磨损程度和表面粗糙度,所以摩擦因数小于9#和11#试样^[16]。

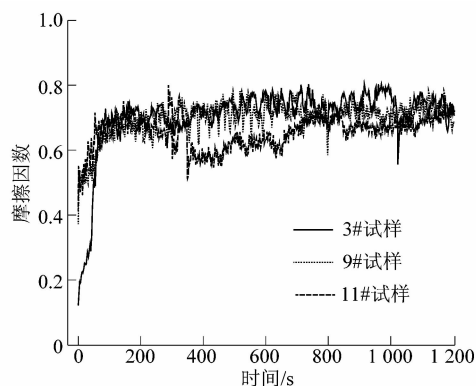


图6 不同试样磨损时间-摩擦因数
Figure 6 Wear time - friction factor of different specimens

随着磨损实验的进行,激光淬火层被磨损掉,摩擦因数开始逐渐上升并且趋于稳定,达到0.7左右,摩擦因数和基体的摩擦因数大致相同。激光淬火能够有效提高模具光表面的光滑度,降低表面的摩擦因数,而且

表面的摩擦因数与激光功率成反比,与激光扫描速度成正比。

3 结论

对 EX1 压铸模具钢激光处理后,对其进行组织和硬度分析,得到以下结论:

1) EX1 压铸模具钢经过激光热处理后,其硬度可以达到 800HV 以上,激光淬火后的硬度有更大的提升。激光功率 2 000 W 处理的试样硬度高于 800 W 处理的试样硬度,扫描速度 10 mm/s 处理的试样的硬度高于 20 mm/s 处理的试样硬度。

2) 激光淬火工艺可以提高 EX1 钢的表面光滑度,降低摩擦因数,提升了 EX1 钢的性能,并且随着激光功率的增加而逐渐降低,扫描速度的减慢而降低。

3) EX1 压铸模具钢在激光处理后,金相组织显著细化,淬火区会发生成分偏析,使得枝晶上的 Mo, V, Cr 元素含量高于基体,而 Fe 含量低于基体。

参考文献:

- [1] 刘雪华. 压铸模具表面的处理新技术[J]. 铸造,2003,52(12): 1130-1132.
- [2] 丁阳喜,李军. 模具钢激光表面改性技术的研究发展[J]. 模具工业,2007,33(9):65-68.
- [3] BASSO R L O, PASTORE H O, SCHMIDT V, et al. Microstructure and corrosion behavior of pulsed plasmanitrided AISI H13 tool steel [J]. Corrosion Science,2010,52(9):3133-3139.
- [4] 张飞霞,何为. 模具钢激光表面强化研究[J]. 新技术新工艺,2008(12):91-92.
- [5] LEE J H, JANG J H, JOO B D, et al. Laser surface hardening of AISI H13 tool steel [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2009,19(4):917-920.
- [6] TELASANG G, MAJUMDAR J D, PADMANABHAM G, et al. Wear and corrosion behavior of laser surface engineered AISI H13 hot working tool steel [J]. Surface and Coatings Technology,2015,261: 69-78.
- [7] TELASANG G, MAJUMDAR J D, PADMANABHAM G, et al. Structure-property correlation in laser surface treated AISI H13 tool steel for improved mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering: A,2014,599:255-267.
- [8] 厉全明,管平. 激光熔覆高铬铸铁组织和硬度的研究[J]. 机电工程,2016,33(5):560-562.
- [9] 林继兴,曹洪钢,牛丽媛,等. 基于正交实验的 H13 模具钢半导体激光淬火工艺优化[J]. 应用激光,2015,35(3):314-318.
- [10] 何柏林,江明明. 激光淬火技术在模具表面处理中的应用与展望[J]. 表面技术,2016,45(11):180-186.
- [11] 吴一弘. Cr12MoV 汽车冲压模具的钢的激光淬火工艺及摩擦磨损机理研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017:15-23.
- [12] 桑震. 双重淬火对 EX1 和 8418 模具钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理,2017,42(9):31-35.
- [13] 周健,李立君. H13 模具钢激光相变强韧化处理研究[J]. 矿冶工程,2008,28(2):100-103.
- [14] 陈峰. H13 钢激光熔覆工艺参数优化研究[D]. 常州:江苏理工学院,2017:12-26.
- [15] 李刚,相琚,况军,等. GCr15 钢表面激光淬火的组织与性能[J]. 材料热处理学报,2010,31(4):129-132.
- [16] 孔德军,付贵忠,王文昌,等. 激光淬火对 40CrNiMo 摩擦与磨损性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(3):714-720.

基于数字化平台推进机床行业全价值链的数字化

在第十六届中国国际机床展览会(CIMT2019)上,西门子展示了持续升级的机床行业数字化企业解决方案,以及其为机床制造商和机床用户挖掘数字化带来的巨大潜能。西门子向机床制造商和用户呈现了其端到端的数字化解决方案如何实现数据分析、资源管理和机床性能的大幅提升。

1) 西门子基于数字化平台,实现机床行业全价值链的数字化。西门子能够借助其全面解决方案,在虚拟世界中对机床用户的实际工艺链进行仿真设计,创建机床制造全价值链数字化双胞胎,涵盖产品设计、生产规划、生产工程、生产制造和数字化服务。

2) 机床制造商及用户都能够借助西门子数字化平台,灵活使用本地数据处理和基于云的数据处理,实现数控系统与 IT 的集成,从而大幅提高生产灵活性与效率,缩减工程投入和产品上市时间,并通过数字化来巩固并扩展在全球市场中的竞争力。

3) 西门子还能够为机床厂商的数字化升级提供从需求分析到方案实施、跟踪分析、再到生产过程持续优化的全面服务。

(张 争)