

光纤激光淬火对凸轮用 45 钢表面磨损性能的影响

宋瑞宏, 彭 云

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213016)

摘 要: 为了提升凸轮表面耐磨性, 采用 YLS-4000 型光纤激光器通过不同的激光功率对基体材料 45 钢表面进行激光淬火。通过 SEM 观察激光淬火前后材料表面和界面形貌, 金相显微镜观察组织形貌, 通过 HVS-1000A 型显微硬度仪测试了试样表面硬度, 并测试了试样的摩擦因数和磨损形貌。结果表明: 淬火层界面显微组织为淬火马氏体及少量残余奥氏体, 在激光功率 1 000~1 800 W 时分别获得淬硬层深度为 0.3~0.8 mm 的单道热影响区; 淬硬层硬度分布基本均匀, 平均硬度约为 547~765 HV, 比基体硬度提高了 2~3 倍, 激光淬火后组织细化和形成大量马氏体是硬度提高的主要原因; 在一定激光功率范围内(1 200~1 800 W), 激光淬硬层的抗磨损性能比基体有较大的提升, 且当激光功率为 1 600 W 时能获得最佳的磨损性能。

关键词: 光纤激光淬火; 耐磨性; 45 钢; 表面硬度

中图分类号: TG174.44; TG115.58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2015)05-0086-07

Effects of Fiber Laser Quenching on Wear Performance of 45 Steel Used for Cam

SONG Rui-hong, PENG Yun

(College of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, Jiangsu)

Abstract: To enhance the wear resistance of the cam surface, YLS-4000 fiber-optic laser material was used to 45 steel surface for laser quenching in this research. The surface and cross-section morphology before and after laser hardening were observed by SEM. Additionally, cross-section metallographic structure, surface hardness, friction coefficients and attrition rates were analyzed by metallographic microscope, HVS-1000A micro-hardness tester and friction wear tester, respectively. The results show that micro-structure of the quenched layer is composed of quenched martensite and a small amount of austenite. The single channel heat affected zone of the hardened layer with a depth of 0.3-0.8 mm is obtained with a laser power of 1 000-1 800 W. The hardness of hardened layer is uniform and the average hardness is about 547-765 HV, which are almost 2-3 times of the matrix hardness. The micro structure refinement and large amount of high carbon martensite caused by laser quenching are the mainly cause for the increase in hardness. Wear resistance of the laser hardened layer is obviously improved within the laser power range of 1 200-1 800 W. The best wear performance is obtained when the laser power is 1 600 W.

Keywords: fiber laser quenching; wear resistance; 45 steel; surface hardness

0 引 言

凸轮与从动件往往为高副接触, 通常在高温、高转速与变压力作用下工作, 容易导致凸轮

工作面产生剧烈摩擦、磨损, 从而影响设备的工作精度^[1-2]。机械零件的主要的失效形式为摩擦磨损^[3-5]。金属零件经表面激光淬火强化处理后,

收稿日期: 2015-04-08; 修回日期: 2015-09-13

通讯作者: 宋瑞宏(1969—), 男(汉), 高级工程师, 硕士; 研究方向: 机械制造及其自动化; Tel: (0519) 8329 0274; E-mail: songrh929@163.com

网络出版日期: 2015-09-21 13:55; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150921.1355.004.html>

引文格式: 宋瑞宏, 彭云. 光纤激光淬火对凸轮用 45 钢表面磨损性能的影响 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(5): 86-92. Song R H, Peng Y. Effects of fiber laser quenching on wear performance of 45 steel used for cam [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(5): 86-92.

其表面硬度、耐磨性、耐蚀性及高温性能均可获得较大的提高^[6-7],同时芯部仍可保持较好的韧性,耐冲击和抗疲劳性能,从而提高其使用寿命^[8]。目前学者主要采用 CO₂ 激光器对 45 钢进行淬火研究,研究表明,激光淬火可以显著提高 45 钢的表面硬度及耐磨性,但存在激光波长较长,试样对激光的吸收率低,对能源的利用率低,且 CO₂ 激光器设备占地面积大,柔性化弱等缺点。光纤激光作为新一代激光技术的代表^[9],具有体积小、可调谐范围宽、光束质量好、光电转化率高和免维护等优点,且激光波长短,材料表面不需要黑化处理,对 45 钢淬火有很大优势,可以有效提高激光利用率,更加高效环保。文中采用光纤激光宽带扫描,对 45 钢的表面进行宽带激光淬火处理,研究不同激光功率条件下沿深度方向上硬度和显微组织的分布和淬火后 45 钢摩擦磨损性能,分析 45 钢的最佳激光淬火功率,为提高凸轮表面的耐磨性能提供试验依据。

1 试验方法

试验采用最大功率为 4 000 W 的 YLS-4000 型光纤激光器。激光光斑为矩形光斑,光斑尺寸为 10 mm×2 mm,激光波长 1 070 nm,扫描速度为 15 mm/s,激光功率分别为 1 000、1 200、1 400、1 600 和 1 800 W。试样材料为调质态的

45 钢,激光淬火完成后,采用线切割将试样切割成 20 mm×20 mm×10 mm 小块,将试样经金相砂纸和抛光机抛光。硬度测试使用 HVS-1000A 型显微硬度仪,载荷 9.8 N、载荷时间 10 s。金相观察前用 5% 的硝酸酒精溶液腐蚀处理,采用金相显微镜和 JSM-6360LA 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察不同工艺参数下的金相组织和形貌。摩擦磨损性能测试采用往复式干摩擦试验,试验仪器为 CFT-I 型材料表面性能综合测试仪,加载载荷 20 N、试验时间 20 min、行程 10 mm。

2 结果与分析

2.1 激光功率对淬硬层深度的影响

如图 1(a)~(c)所示为试样在不同激光功率淬火后界面微观形貌。激光功率分别为 1 200、1 600 和 1 800 W 时,其所对应的淬硬层深度分别为 0.2、0.5 和 0.7 mm,随着激光功率的增大,淬硬层深度不断增加。这是因为随着激光功率增大,45 钢表面单位面积所吸收的热量增加,温升越高,达到奥氏体转变温度 (Ac₃) 的范围更广,即淬硬层的深度越深。同时激光入射功率较大,淬火层和冷态基体之间的温度梯度越大,冷却速度越快,过冷奥氏体越容易转变为马氏体,有利于形成较厚的硬化层。

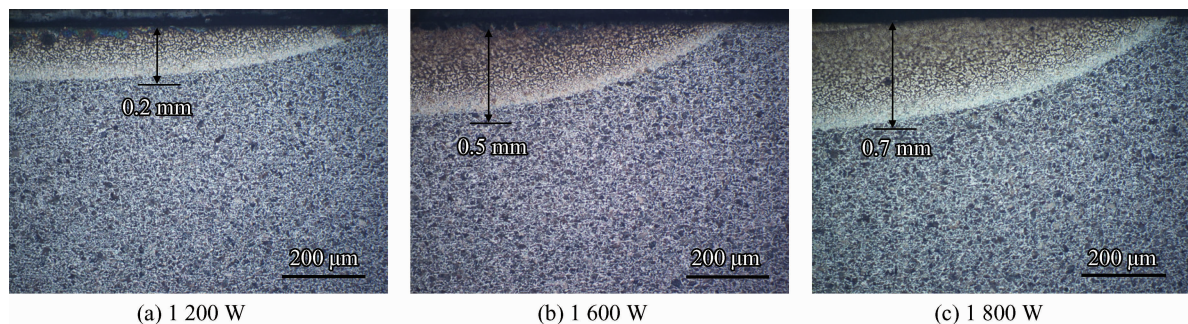


图 1 不同扫描功率下淬火后试样截面形貌

Fig. 1 Cross section morphologies of the laser quenched samples under different scanning powers

2.2 淬火硬度纵向分布

图 2 为激光功率为 1 200、1 600 和 1 800 W 时显微硬度垂直于表面纵向分布曲线。在经过光纤宽带激光淬火后,各个功率下试样表面的硬度均有很大的提升,最高硬度可达 860 HV 以上,是基体硬度 (约 245 HV) 的 3.7 倍。在激光快速加热和冷却过程中,相变完成时间短,形成马氏

体和残余奥氏体,晶体缺陷密度激增。晶粒细化和马氏体的高位错密度和高的碳固溶度可提高淬硬层的强度及耐磨性。但最大的硬度值并不出现在表层,而是出现在距表面约 50~200 μm 之间的次表面。这是因为试样表面的温度过高,加热后所形成的奥氏体晶粒较粗大,以至冷却后所形成的马氏体晶粒相对较粗,使得该区域的硬

度值低于次表面。淬硬层硬度整体随深度的增加而降低,直至接近基体的硬度。随着淬硬深度的增加,由激光高能量转化的热量逐渐降低,因此马氏体组织的转变也减少,逐渐保持原始组织,硬度接近基体硬度。

功率为 1 200、1 600 和 1 800 W 时,在载荷为 20 N 下次表面最高硬度分别约 780、906 和 864 HV。表现为随着激光功率增强,硬化层最高硬度逐渐升高。入射功率为 1 200 W 时,硬度沿纵向迅速下降,硬化层最浅。当入射功率为 1 800 W 时,显微硬度分布曲线波动较大,是因为激光功率过大,表面过热区较大,整个淬硬层深度较大且受热不均匀,导致奥氏体的含碳量不均匀,因此冷却后产生的马氏体含碳量不同,造成硬度分布不规律。同时激光功率过大,会使试样表面熔化,产生粗大的马氏体结构,表面硬度下降,这是当功率升为 1 800 W 后,表面硬度比功率为 1 600 W 时有所下降的主要原因。在文献[11]中采用 CO₂ 激光器对 45 钢淬火,在功率 3 500 W 时表面最高硬度为 650 HV,而光纤激光淬火功率为 1 600 W 时表面最高硬度可达到 906 HV,这说明光纤激光淬火更大程度上提高 45 钢的硬度。

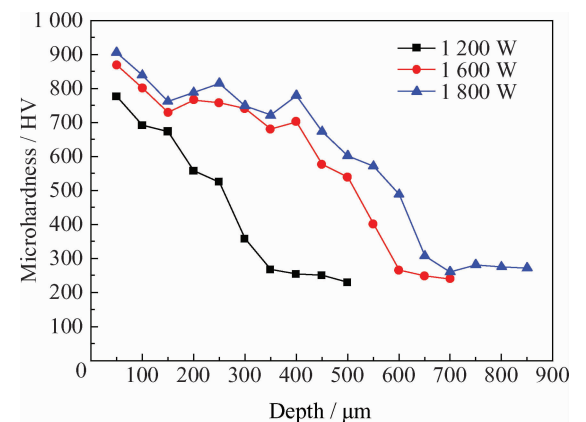


图 2 显微硬度沿硬化层深度的分布
Fig. 2 Microhardness distribution along the depth of hardened layer

2.3 淬硬层的成分分析

对激光入射功率为 1 600 W 时试样界面进行检测,如图 3 所示,选取 3 个区域 001、002、003 进行 EDS 分析。结果如表 1 所示,其含碳量从表面至基体呈现下降的趋势,其作用机理为激光淬火后,自冷效应明显,奥氏体中碳原子来不及排出便转化为过饱和马氏体,且越接近表面其温度

梯度越大。一般组织中含碳量高则硬度越高,从表面至基体含碳量呈逐渐下降趋势,这是显微硬度沿硬化层深度分布曲线变化的原因之一。

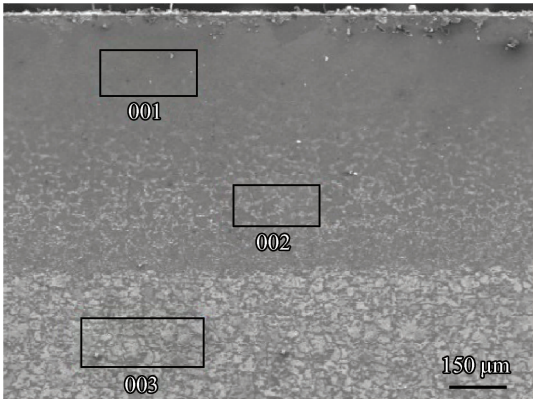


图 3 激光功率 1 600 W 时 45 钢界面 EDS 分析
Fig. 3 EDS analysis of the 45 steel interface at laser power of 1 600 W

表 1 1 600 W 时淬硬层三区域成分表

Table 1 Compositions of the three zones of the hardened layer at 1 600 W

Element	Unit	001	002	003
C	w/%	3.10	2.22	2.06
	a/%	12.96	9.53	8.90
Fe	w/%	96.90	97.78	97.94
	a/%	87.04	90.47	91.90

2.4 激光功率 1 600 W 时的金相分析

图 4 为激光淬火后 1 600 W 试样金相组织形貌,淬硬层的深度随入射激光功率的增大而增大。激光硬化区从上到下分为 3 个区域:表面过热区、相变区和过渡区。图 1(a)中的硬化层分区不明显,这说明激光功率较低时试样表面接受到的光能较少,不能够形成一定的冷却梯度,所以得到的组织结构较单一,没有明显的硬化层分区。图 4(a)中显现出明显的硬化层分区。这是因为激光功率增大后,从表层到基体,其金相组织尺寸逐渐增大,激光相变明显。

图 4(b)为表面过热区 SEM 的形貌,其微观组织主要为针状马氏体,淬火时表面过热区温度最高,甚至大大高于 Ac₃,因此冷却后生成马氏体组织最多同时还有少量的残余奥氏体和未熔碳化物的混合物,所以表面过热区的表面硬度高平均可以达到 750 HV。图 4(c)为相变硬化区 SEM 的形

貌。相变硬化区范围最宽,如图 4(a)所示。微观组织结构主要为板条状马氏体、残余奥氏体和原始组织的混合物,淬火时相变区的温度比表面过热区的温度稍低,但稍高于 Ac3,激光作用时,有一部分基体组织还来不及转变为奥氏体就已冷却,保留下下原始的组织形态。这一区域的硬度低于表面过热区,平均硬度为 650 HV。图 4(d)

为过渡区 SEM 的形貌,其微观组织形貌为铁素体和珠光体且夹杂少量马氏体和屈氏体。过渡区离表面过热区较远,大部分热量还没来得及传导到过渡区就已经散去,因此激光作用对过渡区的影响小,所以过渡区的范围较小。通过对该微观组织的分析,验证了淬硬层硬度提高的原因是因为淬硬层组织细化和大量的马氏体分布。

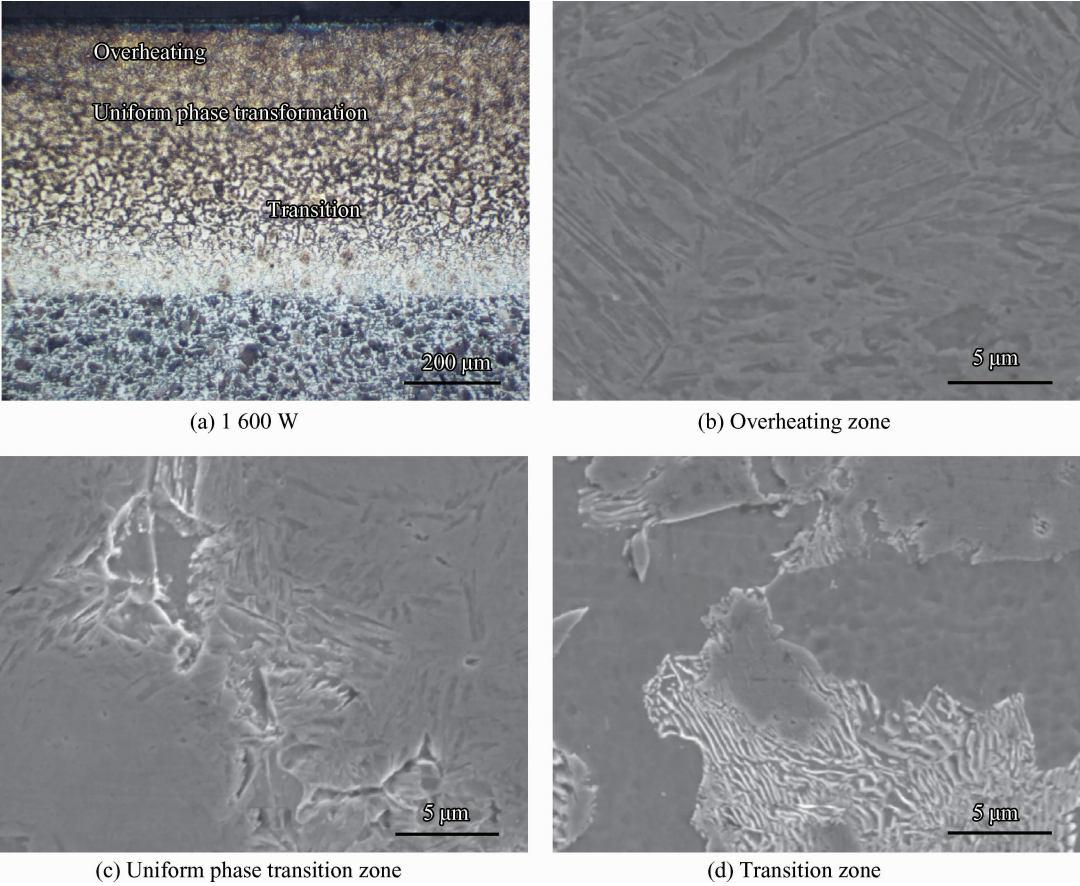


图 4 1 600 W 时激光淬火后试样的金相组织和 SEM 形貌
Fig. 4 Microstructure and SEM morphologies of the laser quenched samples at 1 600 W

2.5 耐磨性分析

2.5.1 磨损量

不同激光功率下试样往复式磨损试验的磨损量如表 2 所示。从表中可得,随着激光入射功率的增大磨损量减小,在功率增加到一定范围内磨损量趋于平稳。当功率超过 1 600 W 时,试样的磨损量仅为基体磨损量的 30.9%,这说明光纤激光淬火后的 45 钢的耐磨性显著提高。其原因在于经光纤激光淬火后,硬化层组织含有大量细化马氏体,提高了试样表面硬度,因此耐磨性得到加强^[12-14]。由表 2 激光功率为 1 600 W 时磨损

深度出现了极值,这是由于激光功率达到一定值时,试样表面的硬度变化不大,因此试样的磨损量近乎相同,但激光功率 1 600 W 时,试样相变完全表面硬度高,因此磨损的深度浅,当激光功率升至 1 800 W 时,试样表面出现微熔现象,表面硬度低于 1 600 W 时的硬度值,因此反致磨损深度升高。在文献^[15]中可以得知 CO₂ 激光淬火的 45 钢的试样,经过磨损实验后其磨损率为 $5.45 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N}$,远远大于试验中的最大磨损率 $1.435 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{N}$,因此光纤激光淬火对于提升试样的耐磨性能有较大的优势。

表 2 45 基体和不同功率下覆层的磨损参数

Table 2 Wear parameters of matrix and layers obtained at different power

Laser power	Matrix	1 000 W	1 200 W	1 400 W	1 600 W	1 800 W
Wear scar width/mm	1.082 5	0.968 9	0.902 2	0.748 4	0.815 2	0.661 5
Wear scar depth/ μm	11.645	11.535	13.164	7.34	4.89	5.115
Wear extent/ mm^3	0.029 4	0.028 7	0.012 2	0.009 6	0.009 3	0.009 1

2.5.2 摩擦因数

45 钢试样表面的摩擦因数随摩擦时间变化关系曲线图如图 5 所示。在磨损开始阶段,激光淬火试样表面的摩擦因数随时间快速上升,随着摩擦时间的增加,摩擦因数在一定范围内稳定波动并且趋于平缓。图 5 中可以看出 45 钢基体的摩擦因数较大且存在很大的波动,这说明基体的表面硬度很低,表面容易磨损。

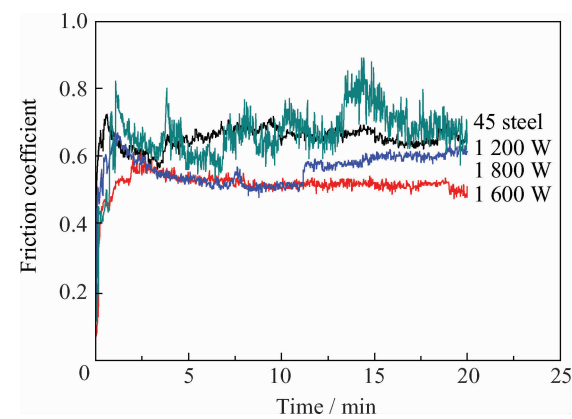


图 5 激光淬火后试样表面摩擦因数与时间关系
Fig. 5 Friction coefficient of the laser quenched samples as a function of time

从图 5 中也看到 1 200 W 激光淬火试样表面摩擦因数远大于 1 600 和 1 800 W。这说明激光功率较低时,试样表面硬度过低,表面易被对磨副破坏,造成表面粗糙度上升。磨损前期淬火功率为 1 800 W 时试样的摩擦因数高于 1 600 W 时的曲线,这说明激光功率过大时,试样表层分布的是晶粒粗大的马氏体,所以硬度较低,导致试样的耐磨性差。磨损一段时间后,1 800 W 试样表面的摩擦因数下降并趋于稳定。这说明试样的次表层组织结构为细化的马氏体,因此硬度高,所以耐磨性好。试验约 12 min 时,1 800 W 时试样表面的摩擦因数陡然上升,并持续升高。这说明由于激光功率过大,提高硬度的同时造成淬硬层脆性较差,发生脆性剥落,所以导致摩擦

因数增大。

2.5.3 磨痕形貌

45 钢基体和试样淬火后不同功率试样表面磨损形貌如图 6 所示,其中图 6(a)为基体试样表面磨痕形貌,试样表面出现大小不一的深坑,表面非常凹凸不平,这说明基体的耐磨性较差。图 6(b)为激光功率 1 200 W 时试样表面磨痕形貌,试样表面凹凸不平,存在许多较深的犁沟,并且表面出现严重剥落,这说明激光功率较低时,试样表面的耐磨性差,也进一步说明,激光功率低时,试样的表面硬度低。图 6(c)为激光功率 1 600 W 时试样表面磨痕形貌,表面较平坦,只有局部的小凹坑和小划痕,说明试样表面耐磨性显著提高。图 6(d)为激光功率 1 800 W 时试样表面磨痕形貌,试样表面分布较多较浅的犁沟,并且局部有深划痕。其原因为激光功率过高时试样表面会出现微熔现象,试样表面硬度降低,导致试样表面耐磨性差。

3 结 论

- (1) 激光淬火后 45 钢表面硬度得到大幅提高,是基体硬度的 2~3 倍。激光淬火的淬硬层深度和表面硬度随着激光的功率的增大而增大,但是在激光功率增大到一定范围内,淬硬层深度和表面硬度逐渐趋于稳定。激光功率过大可能导致表面重熔,降低其硬度。
- (2) 光纤激光功率在(1 200~1 600 W)时,通过金相组织分析得出,淬硬层分为 3 个区域:表面过热区、相变区、过渡区。试样表面的硬度和耐磨性都得到了提升,特别激光功率为 1 600 W 时,表面的硬度和耐磨性的性能较好。
- (3) 一定范围内,淬火后试样磨损量和摩擦因数随着激光功率的增大而降低。当功率过大时,表面过热区范围大,可能出现脆性剥落,导致摩擦因数变大。因此得出应用于 45 钢光纤激光淬火最佳功率为 1600 W。

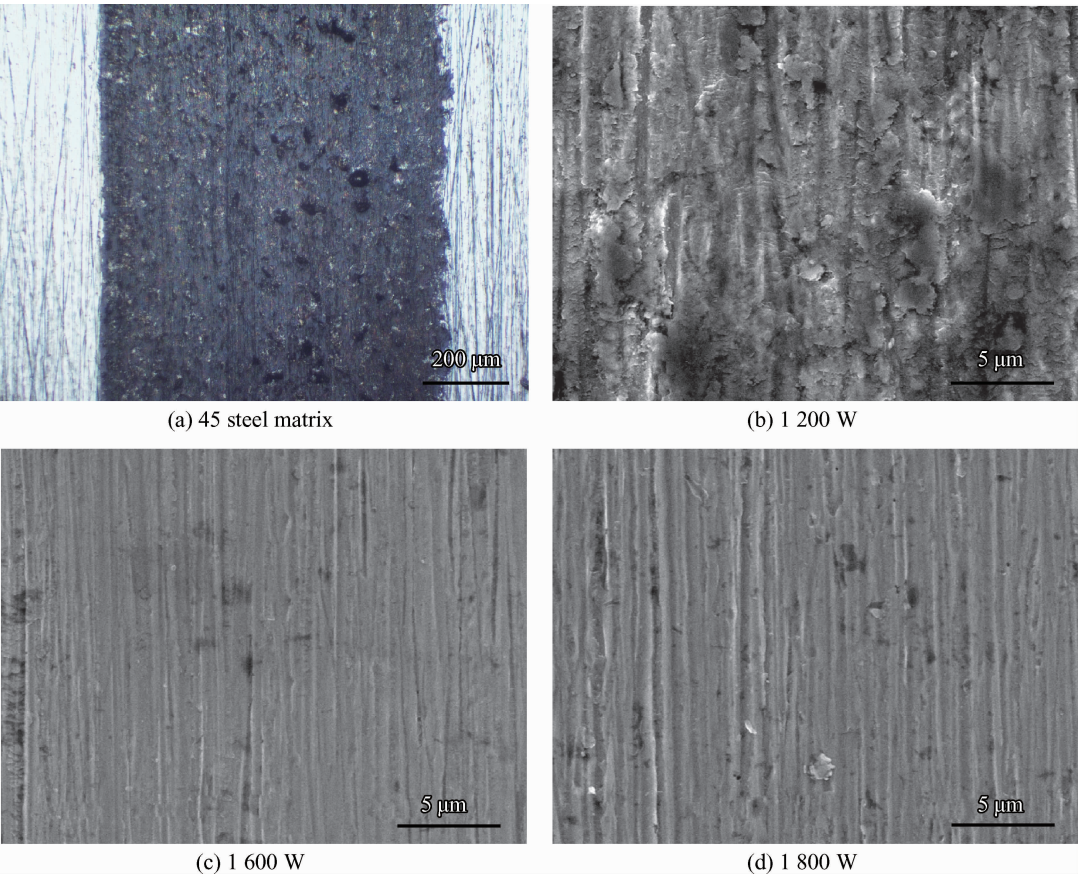


图 6 45 钢和不同功率淬火后覆层的表面磨痕形貌

Fig. 6 Worn morphologies of 45 steel and layers obtained with different power

(4) 不用光纤激光淬火功率对试样表面进行黑化处理,节省时间,激光利用率远高于 CO₂ 激光淬火。光纤激光淬火后试样表面硬度及耐磨性远优于 CO₂ 激光淬火。

参考文献

[1] 唐琴, 章易程, 林晨岚, 等. 凸轮磨损的研究综述与思考 [J]. 机械传动, 2010, 34(8): 95-97.
Tang Q, Zhang Y C, Lin C L, et al. Overview and consideration on cam wear [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(8): 95-97 (in Chinese).

[2] 杜则裕, 刘继元, 张世林, 等. 工程材料简明手册 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1996: 112.
Du Z Y, Liu J Y, Zhang S L, et al. Engineering materials cookbook [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1996: 112 (in Chinese).

[3] Pinkerton A J, Lin L L. The effect of laser pulse width on multiple layer 316L steel clad microstructure and surface finish [J]. Applied Surface, 2003, 209(2): 411-416.

[4] 李旭东, 张连峰, 朱武峰, 等. 铝合金高温低周疲劳裂纹扩展可靠性评估 [J]. 装备环境工程, 2013, 10(5): 134-138.

Li X D, Zhang L f, Zhu W F, et al. Reliable evaluation of aluminum alloy under high temperature based on low cycle fatigue crack growth [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5): 134-138 (in Chinese).

[5] 徐中, 王健, 李颖. 仿生涂层磨损及其与表面形貌的关联性研究 [J]. 表面技术, 2013, 42(4): 9-11.
Xu Z, Wang J, Li Y. Research of abrasion of bionic coatings and its relevance with surface morphology [J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 9-11 (in Chinese).

[6] 花银群, 陈瑞芳, 杨继昌, 等. 激光淬火和冲击复合强化处理 40Cr 钢的耐磨性能研究 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23(5): 448-450.
Hua Y Q, Chen R F, Yang J C, et al. Study on wear resistance of laser quenched and shcoked 40Cr steel [J]. Tribology, 2003, 23(5): 448-450 (in Chinese).

[7] Wan W J, Guo J, Liu Q Y, et al. Effect of laser quenching on wear and damage of heavy-haul wheel/rail materials [J]. Proceedings of the Institution of mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2014, 228(1): 114-122.

[8] 李志强, 陈昭运. 17-4PH 不锈钢激光淬火疲劳性能研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42(4): 196-198.

LI Z Q, Chen Z Y. Study on fatigue resistance of 17-4PH stainless steel after laser transformation hardened [J]. Hot Working Technology, 2013, 42(4): 196-198 (in Chinese).

[9] 刘江, 王璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺钕连续光纤激光器 [J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102001.

Liu J, Wang P. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(1): 0102001 (in Chinese).

[10] 尹燕, 魏小红. GCr15 光钎激光淬火工艺及性能研究 [J]. 激光与光电子进展, 2013, 50(4): 041401.

Yin Y, Wei X H. Surface quenching of GCr15 steel by fiber laser [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 041401 (in Chinese).

[11] 梁二军, 杜利平, 雒江涛, 等. 45 钢宽带激光淬火研究 [J]. 激光应用与系统, 2001, 22(2): 52-54.

Liang E J, Du L P, Luo J T, et al. Quenching of 45 steel with a wide-band CO₂ laser beam [J]. Laser Applications and Systems, 2001, 22(2): 52-54 (in Chinese).

[12] Flocker F W. Addressing cam wear and follower jump in single-dwell cam-follower systems with an adjustable modified trapezoidal acceleration cam profile [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2009, 131(3): 111-119.

[13] 李月英, 刘勇兵, 陈华, 等. 凸轮材料的表面强化及其摩擦学特性 [J]. 吉林大学学报, 2007, 37(5): 1064-8.

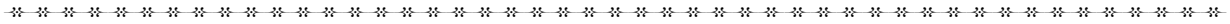
Li Y Y, Liu Y B, Chen H, et al. Surface hardening and tribological properties of a cam materials [J]. Journal of Jilin University, 2007, 37(5): 1064-8 (in Chinese).

[14] Sert H, Can A, Arikan H. et al. Wear behavior of different surface treated cam spindle [J]. Wear, 2006, 260(9/10): 1013-9.

[15] 花银群, 陈瑞芳, 杨继昌, 等. 45 钢经激光淬火和冲击复合强化后的耐磨性能 [J]. 金属热处理, 2003, 28(8): 5-7.

Hua Y Q, Chen R F, Yang J C, et al. Wearability of the steel 45 quenched and shock hardened by laser [J]. Transactions of Metal Heat Treatment, 28(8): 5-7 (in Chinese).

(责任编辑: 陈茜)



• 本刊讯 •

本刊再次入选《中文核心期刊要目总览》和中国科学引文数据库(CSCD)

《中文核心期刊要目总览》2014 年版已经发布。自 2008 年以来,《中国表面工程》再次入选该要目的金属学与金属工艺类。该要目对入选期刊具有严格的评审过程,采用定量评价和定性评审相结合的方法。涉及期刊 14 728 种,参加评审的学科专家达 3 700 名;通过被索量、被摘量、被引量、他引量、被摘率、影响因子、他引影响因子、被重要检索系统收录、基金论文比、Web 下载量、论文被引指数和互引指数等 12 个评价指标,在严格的定量筛选和专家定性评审后,选出中文期刊 1983 种。

与此同时,《中国表面工程》再次入选 2015 年中国科学引文数据库(CSCD)。中国科学引文数据库创建于 1989 年,该系统具备检索功能和引文索引,提供数据链接机制,支持用户获取全文;内容丰富、结构科学、数据准确,被誉为“中国的 SCI”。2014 年数据显示:目前 CSCD 共收录了 1 140 种期刊,其中中文期刊 1 013 种,英文期刊 127 种。

(本刊编辑部 供稿)