

GCr15 光纤激光淬火工艺及性能研究

尹燕¹ 魏小红¹ 张瑞华¹ 刘瑞君¹ 冷小冰²¹ 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050² 中山职业技术学院, 广东 中山 528404

摘要 为了提高轴承的表面硬度、耐磨性,减小能源消耗,改善传统淬火环境,利用 400 W 基模光纤激光器对 GCr15 钢进行了淬火研究。分析了扫描速度和离焦量等工艺参数对淬火层的影响。光纤激光淬火相变硬化区的组织为细小马氏体和少量球状碳化物。淬火层的显微硬度随扫描速度的增加先增大后减小,随离焦量的增加也先增大后减小。当激光功率 $P=400$ W、扫描速度 $v=0.6$ mm/s、离焦量 $f=0$ 时,淬火层的显微硬度达 960 Hv,是基体的 4.4 倍。摩擦磨损实验结果表明,GCr15 钢经光纤激光淬火后耐磨性显著提高,其磨损机制主要为氧化磨损、机械磨损和磨料磨损。

关键词 激光技术;光纤激光;淬火;GCr15 钢;耐磨性;显微硬度

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.041401

Surface Quenching of GCr15 Steel by Fiber Laser

Yin Yan¹ Wei Xiaohong¹ Zhang Ruihua¹ Liu Ruijun¹ Leng Xiaobing²

¹ State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-Ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China

² Zhongshan Polytechnic, Zhongshan, Guangdong 528404, China

Abstract In order to increase the surface hardness and wear resistance of the GCr15 steel, as well as reduce the energy consumption and improve the traditional quenching environment, laser quenching is carried out on GCr15 steel with a 400 W fundamental-mode fiber laser. The effects of scanning speed and defocusing amount on the quenching layer are analyzed. The microstructure of the hardened region consists of fine martensite and a few spheroidal carbide. The microhardness increases with the increase of scanning speed and then decreases, and the same for the defocusing amount. The microhardness of GCr15 steel is 960 Hv after being quenched with fiber laser power of 400 W, scanning speed of 0.6 mm/s and defocusing amount of 0, which is 4.4 times of that of the matrix. The wear resistance of GCr15 steel quenched by fiber laser is significantly improved. The wear mechanism is mainly oxidation wear, mechanical wear and abrasive wear.

Key words laser technique; fiber laser; quenching; GCr15 steel; wear resistance; microhardness

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

GCr15 钢主要用于制造冷冲模、滚动轴承、滚珠和轴套等。使用过程中主要有表面疲劳点蚀、粘着磨损、磨料磨损、疲劳磨损和微动磨损等破坏形式,它们直接影响了轴承的使用寿命^[1,2]。现有的轴承硬化工艺主要包括氮化、渗碳、油淬、高频和火焰等,但存在硬化层浅、淬火变形大、硬化层分布不均等问题。轴承激光强化工艺是一种新型的表面强化技术,具有能量密度高、加热时间短、可局部淬火、易控制和变形小等优点,且工艺简单。用于轴承的 CO₂ 激光淬火工艺实际应用少,且由于激光波长长,基材对激光的吸收率低,为了提高对光的吸收率,材料表面要进行黑化处理。文献[3~8]列举了使用 CO₂ 激光器对 GCr15 钢进行的淬火研

收稿日期: 2012-12-26; **收到修改稿日期**: 2013-01-04; **网络出版日期**: 2013-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(51265031)资助课题。

作者简介: 尹燕(1973—),女,副教授,主要从事活性焊接法、激光加工及形状记忆合金等方面的研究。

E-mail: yinyan@lut.cn

究,结果表明,激光淬火可以显著提高 GCr15 钢的表面硬度及耐磨性,但其对光能的利用率低,设备占地面积大,柔性化弱。光纤激光^[9]作为新一代激光技术的代表,具有体积小、可调谐范围宽、光束质量好和免维护等优点,且激光波长短,材料表面不需要黑化处理,对 GCr15 钢的淬火有很大优势,可以有效提高激光利用率。据作者所知,目前国内尚无人对光纤激光轴承淬火进行研究。本文采用光纤激光为热源,对 GCr15 钢进行了淬火研究。

2 实验材料、设备与方法

材料由中山市盈科轴承制造有限公司提供,材质为 GCr15,外径 95 mm,内径 70 mm,长 75 mm,表面宏观硬度为 11.4 HRC,化学成分如表 1 所列。

表 1 GCr15 钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of GCr15 steel (mass fraction, %)

C	Mn	Si	Cr	S	P	Fe
0.95~1.05	0.20~0.40	0.15~0.35	1.30~1.60	≤0.020	≤0.027	Bal.

光纤激光淬火装置如图 1 所示。由光纤激光光源(JK400 FL)、射出头、控制系统、精密机床、侧吹系统和冷却系统等组成。光纤激光器波长 $1.06 \mu\text{m}$ 。激光功率 $P=400 \text{ W}$,光斑直径 $D=3 \text{ mm}$,保护气体为氩气,流量 $q=15 \text{ L/min}$,焦距 $H=100 \text{ mm}$ 。光纤激光淬火试样表面形貌如图 2 所示,采用固定试样,通过激光射出头的移动来实现对试样的轴向淬火,淬火开始端即为激光束入射端。表面宏观硬度测量方向与淬火方向相同。

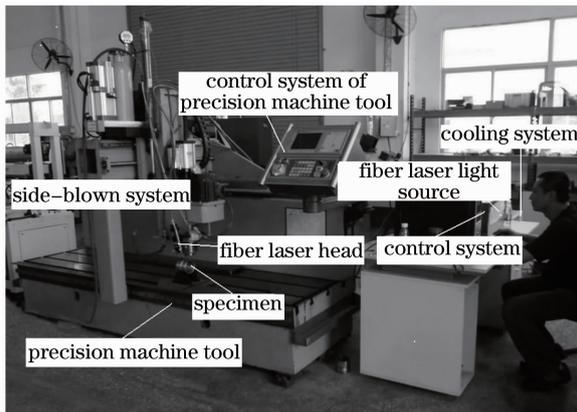


图 1 光纤激光淬火装置图

Fig. 1 Fiber laser quenching system

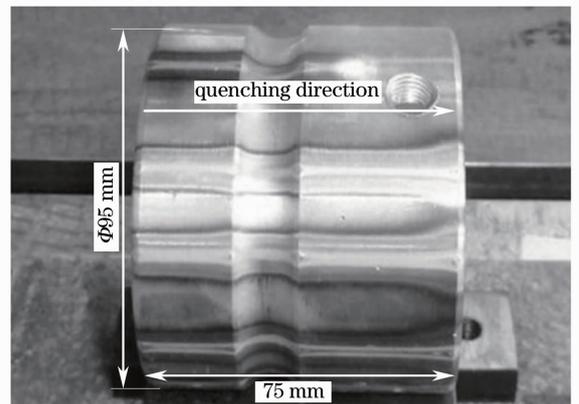


图 2 光纤激光淬火试样表面形貌示意图

Fig. 2 Surface morphology for fiber laser quenching

采用线切割机沿垂直于激光淬火方向将 GCr15 钢切成小块,尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,表面为曲面的类立方体,经金相砂纸研磨和抛光机抛光,用 4% (质量分数) 硝酸乙醇溶液腐蚀。然后采用 Olympus-PMG3 型光学显微镜(OM)观察试样显微组织。采用 HRS-150 型数显洛氏硬度计测量淬火层表面宏观硬度;采用 HV-1000 型显微硬度计在 300 N 的载荷下加载 15 s,测量淬火层深度方向的显微硬度,从距试样表面 $100 \mu\text{m}$ 处开始,每隔 $50 \mu\text{m}$ 测量一次,平行测量 3 点取平均值做为该深度的显微硬度,一直测量至基体部分,基体显微硬度 220 Hv。采用 UMT-3MT 摩擦试验机进行室温干滑动磨损试验,磨损试样采用线切割制成尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 、表面为曲面、淬火道在中心的类立方体,磨损试验采用微动线摩擦方式,沿淬火方向进行。对磨材料使用 $\phi 6 \text{ mm}$ 的 GCr15 钢珠。摩擦实验参数为:载荷 400 N,频率 10 Hz,往复线速度 60 mm/s,磨损时间 30 min。摩擦实验前后试样均用丙酮在超声波振荡仪中清洗三次,再使用蒸馏水在超声清洗仪中清洗三次,然后置于电烤箱中烘干,并用精度为 0.1 mg 的 FA1004 型电子天平称量试样的磨损量,采用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜(SEM)观察磨损形貌。

3 结果及分析

3.1 显微组织

光纤激光淬火后的宏观形貌和显微组织如图3所示。扫描速度 $v=0.6$ mm/s, 离焦量 $f=0$ 。图3(a)为试样的低倍OM照片, 从上到下分为3个区, 依次为相变硬化区、过渡区和基体。月牙状淬火层的形成与光纤激光光斑的能量分布有关, 光斑属于高斯分布, 中间能量高, 四周低。图3(b)为图3(a)中相变硬化区的显微组织形貌, 由细小马氏体和少量球状碳化物组成。

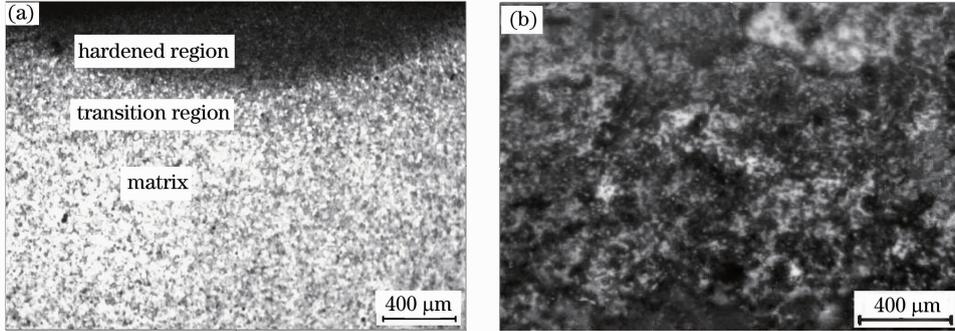


图3 光纤激光淬火 GCr15 钢的金相组织。(a) 低倍光学显微镜(OM)照片;(b) 相变硬化区

Fig. 3 Microstructure of GCr15 steel. (a) Low magnification optical microscope image; (b) phase-transition hardened region

3.2 硬度

3.2.1 扫描速度对硬度的影响

1) 表面宏观硬度。

光纤激光淬火试样的表面宏观硬度曲线如图4所示, 离焦量 $f=0$, 扫描速度分别为 0.3、0.5、0.7、1.0、1.5 mm/s。扫描速度由 0.3 mm/s 增加到 0.6 mm/s 时, 表面宏观硬度由 35.9 HRC 增加到 46.6 HRC; 当扫描速度大于 0.6 mm/s 时, 硬度值下降, 因为此时加热温度达不到相变温度。可见扫描速度的变化对硬度影响较大。淬火开始端与结束端硬度不同, 这是由于淬火过程中的热积累, 使得淬火结束端硬度比开始端高。可以通过增大激光功率或增大扫描速度来改善。

2) 显微硬度。

不同扫描速度下的显微硬度分布曲线如图5所示, 离焦量 $f=0$, 扫描速度分别为 1.5、1.0、0.7、0.6、0.5、0.4、0.3 mm/s。随着扫描速度的降低, 试样的显微硬度增大; 当扫描速度降到 0.6 mm/s 时, 显微硬度值达到最大, 为 960 Hv, 是基体的 4.4 倍; 扫描速度小于 0.6 mm/s 时, 硬度值减小。

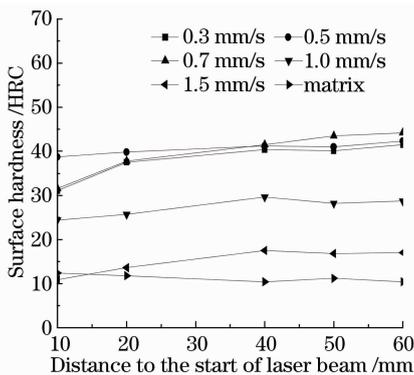


图4 不同扫描速度下的宏观硬度

Fig. 4 Surface hardness curves of laser quenching specimen under different scanning speeds

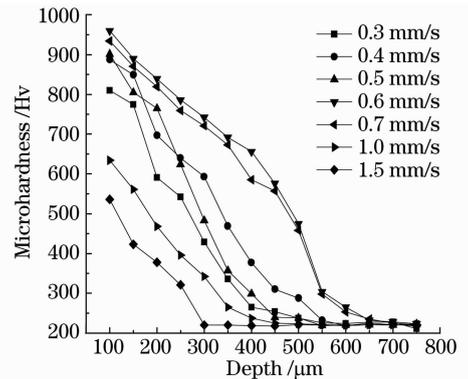


图5 不同扫描速度下的显微硬度分布曲线

Fig. 5 Microhardness distribution curves under different scanning speeds

扫描速度大时, 激光对试样的加热能力小, 材料表层不能加热到其相变温度点, 淬火效果差, 试样显微硬度低。随着扫描速度的降低, 显微硬度增大; 当扫描速度 $v=0.6$ mm/s 时, 激光加热使得材料表面温度达到相变

温度以上,快速冷却时形成细小的马氏体,从而得到最高硬度的淬火层;当扫描速度小于 0.6 mm/s 时,热量停留在试件表面的时间长,过高的激光功率密度使试样表面出现熔融及过热现象,淬火效果差,显微硬度降低。

3.2.2 离焦量对显微硬度的影响

不同离焦量下的显微硬度分布曲线如图 6 所示,扫描速度 $v=0.6$ mm/s,离焦量分别为 6、4、2、0、-2、-4、-6 mm。当离焦量为正时,随着离焦量的减小,试样的显微硬度增大;当离焦量为 0 时,显微硬度达到最大,为 960 Hv,硬化效果最好;当离焦量为负时,随着离焦量的减小,试样的显微硬度减小。

离焦量的大小和正负不仅影响试样表面激光光斑的大小,而且影响材料表面吸收能量的多少,因而对淬火层的形状和深度产生影响。当离焦量为正时,激光的光斑直径大,功率密度低,试样表面受热面积大,表面温度达不到相变温度点,淬火层显微硬度低;随着离焦量的减小,离焦量为 0 时,试样表面受热面积减小,试样表面吸收的热量多,温度达到相变温度以上,淬火层显微硬度大;当离焦量为负时,与离焦量为正时一样,试样表面温度过低,材料吸收的热量少,淬火层显微硬度低。

3.3 耐磨性

表 2 给出了基材试样和在扫描速度 $v=0.6$ mm/s、离焦量 $f=0$ 时的淬火试样在相同条件下摩擦实验后的磨损量。可以看出,光纤激光淬火后 GCr15 钢的耐磨性显著提高。这是因为基体组织为碳化物和铁素体,易磨损,而相变硬化区组织为细小马氏体和少量球状碳化物,耐磨性好。耐磨性与表面硬度有一定的对应关系,试样的表面硬度越高,耐磨性越好。但当表面硬度特别高的时候,材料的脆性升高,耐磨性下降。

表 2 GCr15 钢磨损量的比较

Table 2 Comparison of GCr15 steel wear mass loss

Specimen	Quality before quenching /mg	Wear mass loss /mg	Mass ratio of wear loss /‰
Substrate	4405.8	9.5	2.16
Quenching	4592.4	1.1	0.24

GCr15 钢表面磨损形貌如图 7 所示,其中图 7(a)为基体的磨损形貌,从图中可看出,试样表面分布着刮痕和大小不一的金属颗粒。刮痕是钢珠与试样表面相互摩擦形成的犁沟;金属颗粒是轴承试样磨损引起的表面污染膜和氧化膜破裂形成的。此外,试样表面存在细小的点蚀凹坑,是粗糙表面和剥落粒子的微切削作用以及局部高温黏着划伤造成的金属疲劳脱落而形成的。磨损机制主要有磨料磨损、犁沟、微切削、粘着磨损和氧化磨损。图 7(b)为淬火试样的磨损形貌,可以看出,试样磨损基本完整,有少量的小凹坑,零星分布着小划痕,但是存在一些疲劳剥落坑,且分布着窄而浅且不连续的犁沟。表面较为平坦,金属颗粒很少。光纤激光淬火后,试样的表面硬度显著提高,磨损时由于表面摩擦力大使得温度较高,金属软化,金属颗粒产生

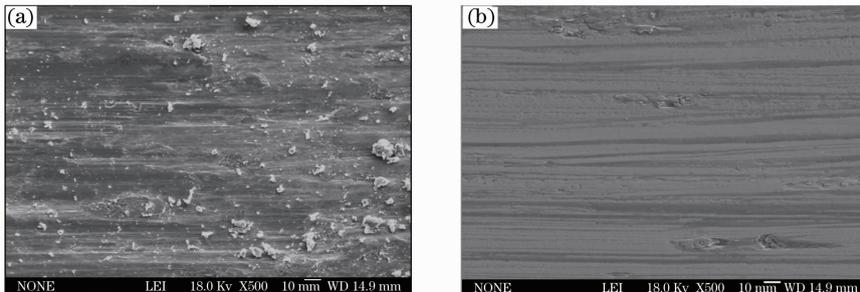


图 7 GCr15 钢表面磨损形貌。(a) 基体的磨损形貌;(b) 淬火试样的磨损形貌

Fig. 7 Surface morphologies of specimen after wear. (a) Matrix; (b) laser quenched specimen

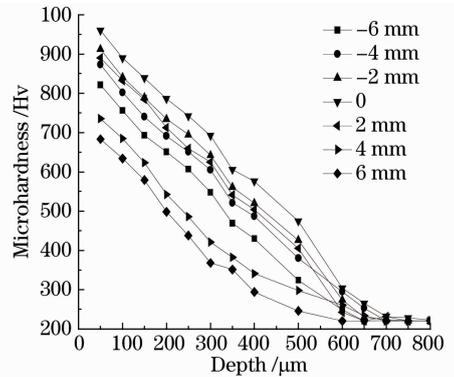


图 6 不同离焦量下的显微硬度分布曲线
Fig. 6 Microhardness distribution curves of different defocusing amounts

塑性变形而断裂。同时,由于摩擦力大,断裂的金属颗粒具有较大的初速度,能够迅速脱离接触区域,形成极少的磨粒研磨试样。磨损机制主要为氧化磨损、机械磨损和磨料磨损。

4 结 论

1) GCr15 钢的光纤激光淬火层由相变硬化区、过渡区和基体组成,相变硬化区的组织为细小马氏体和少量球状碳化物。

2) 淬火层的显微硬度随扫描速度的增加先增大后减小,随离焦量的增加也先增大后减小。

3) 当激光功率 $P=400\text{ W}$ 、扫描速度 $v=0.6\text{ mm/s}$ 、离焦量 $f=0$ 时,GCr15 钢的淬火层显微硬度最高达到 960 Hv ,是基体的 4.4 倍。

4) 光纤激光淬火后耐磨性显著提高。基体试样的磨损机制主要有磨料磨损、犁沟、微切削、粘着磨损和氧化磨损。淬火试样的磨损机制主要为氧化磨损、机械磨损和磨料磨损。

参 考 文 献

- Ding Yangxi, Yang Liuqing, Fu Wei. Research status and development of laser heat treatment[J]. *Mechanical Engineers*, 2006, (1): 19~21
丁阳喜, 杨柳青, 付 伟. 激光热处理技术的研究现状及发展[J]. 机械工程师, 2006, (1): 19~21
- Zhang Guangjun. Status and development of laser heat treating in china[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2000, **25**(1): 6~8
张光钧. 激光热处理的现状及发展[J]. 金属热处理, 2000, **25**(1): 6~8
- Wang Yunshan, Zhang Xingquan, Lei Jianbo *et al.*. Processing of laser quenching crankshaft[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 574~576
王云山, 张兴泉, 雷剑波 等. 曲轴激光淬火工艺[J]. 中国激光, 2007, **34**(4): 574~576
- Lei Sheng, Zhao Yali, Gui Zhongxiang *et al.*. Numerical simulation of the transient temperature field of laser hardened layers for race surface of bearing rings[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2010, **33**(1): 21~25
雷 声, 赵雅丽, 桂中祥 等. 轴承滚道激光淬火的温度场数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, **33**(1): 21~25
- Lei Sheng, Liu Quankun, Ma Yuping *et al.*. Wear performance of laser surface hardened GCr15 steel[J]. *J. Wuhan University of Technology: Materials Science*, 2010, **25**(1): 84~88
- Li Gang, Xiang Jun, Kuang Jun *et al.*. Microstructure and properties of GCr15 steel treated by laser quenching[J]. *Transaction of Materials and Heat Treatment*, 2010, **31**(4): 129~132
李 刚, 相 珺, 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
- Xu Hongwei, Huang Yumei, Wang Zhaolong *et al.*. Analysis on laser quenching technology of GCr15 hasp pole[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(6): 70~71
徐宏伟, 黄玉美, 王兆龙 等. GCr15 纺锭杆激光淬火工艺研究[J]. 激光杂志, 2008, **29**(6): 70~71
- Zou Xiangjun, Lou Yan, Ouyang Basheng *et al.*. Laser-beam hardening of steel GCr15 and its application[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, **29**(5): 15~17
邹湘军, 娄 燕, 欧阳八生 等. GCr15 钢激光淬火及其应用[J]. 金属热处理, 2004, **29**(5): 15~17
- Liu Jiang, Wang Pu. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, **40**(1): 0102001
刘 江, 王 璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, **40**(1): 0102001