

文章编号: 0258-7025(2009)08-2192-05

高速主轴用 40Cr 钢的激光相变硬化工艺

何 强¹ 苏华礼² 刘宏昭¹ 叶 军³

(¹ 西安理工大学机仪学院, 陕西 西安 710048; ² 安阳工学院机械系, 河南 安阳 455000)

³ 洛阳轴承研究所, 河南 洛阳 471039

摘要 40Cr 钢是一种主轴常用调质钢, 具有较高的强度、韧性和塑性。调制后的主轴其硬度与耐磨性能不太理想, 高速下容易在轴颈处磨损, 影响主轴工作精度。采用不同的激光相变硬化工艺对正火态 40Cr 进行表面处理, 找出适合高速主轴激光相变硬化方法, 提高材料的硬度、耐磨性和抗疲劳性。经过不同工艺处理后的试样分析, 得出了以激光功率 1600 W, 光斑直径 7 mm, 扫描速度 15 mm/s 的工艺硬度、层深等相对其他试样来说最为理想, 并着重对该工艺下各层金相组织进行了研究, 测量了层深与硬度。结果表明该工艺下试件表面硬度较低, 适合高速主轴的加工与磨削, 次表层硬度最高为 40Cr 主轴常规调质试件硬度的 2.04 倍, 且耐磨性较好。

关键词 激光技术; 激光相变硬化; 工艺; 硬度; 金相分析

中图分类号 TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.2192

Research on 40Cr Steel for High-Speed Spindle Laser Transformation Hardening Technics

He Qiang¹ Su Huali² Liu Hongzhao¹ Ye Jun³

¹ Department of Mechanical Engineering, Xian University of Technology, Xian, Shaanxi 710048, China

² Department of Mechanical Engineering, Institute of Anyang, Anyang, Henan 455000, China

³ Luoyang Bearing Research Institute, Luoyang, Henan 471039, China

Abstract 40Cr steel is a common quenched axis steel with high, tough, and plastic cooperation. However, quenched steel for high speed spindle rigidity and resistance is not satisfactory. It is easy wear at axle journals and affects the precision. 40Cr steel with normalized one has been hardened by laser. To find a good technics for high-speed spindle by laser surface hardening, to improve 40Cr steel's hardness and wear resistance. Analyse kinds of samples which are harden by different technics. Diameter of facula 7 mm, laser power 1600 W, speed of scan 15 mm/s is the best parameters. Then microstructures analysis, rigidity measurement are carried out. The result: the sample with the technics is the best for high-speed spind machining and milling. The hardness of hypo-surface layer's hardness is 2.04 times of the conventional heat treatment, and it is wearable.

Key words laser technigue; laser transformation hardening; technics; hardness; metallographic analysis

1 引 言

激光热处理在曲轴、轧辊、模切辊的应用较多, 而关于机床高速主轴激光强化方面的研究很少。40Cr 钢是一种主轴常用调质钢。主轴 40Cr 钢常规热处理方法为在 860 °C 油淬 30 min 之后在 520 °C

回火空冷 2 h, 硬度可达到 HRC33, 可满足 10000 r/min 左右的转速要求^[1]。随着主轴转速的提高, 滚珠与内圈摩擦力增大, 轴承内圈与轴过盈量不够时或轴承损坏拆卸, 都会在轴颈处产生磨损。磨损量的增加, 势必会影响主轴的工作精度^[2]。改

收稿日期: 2008-12-22; 收到修改稿日期: 2009-03-10

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006bfa01b02)和河南省科技攻关项目(0624260020)资助课题。

作者简介: 何 强(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事激光热处理机械设计方面的研究。

导师简介: 叶 军(1962—), 男, 博士生导师, 教授级高级工程师, 主要从事摩擦和激光热处理等方面的研究。

E-mail: aystar@163.com (通信联系人)

变常规热处理工艺也可提高硬度与耐磨性,但硬度过高会给加工磨削带来难度,并且常规热处理容易产生工业污染^[3]。激光相变硬化是激光热处理的一种^[4~6],它是以激光为热源,通过高能量的激光束快速扫描工件,工件表面极薄一层的小区域内快速吸收热量使温度急剧上升。通过自身进行快速冷却,工件材料浅表层内,温度在材料的熔点和奥氏体转变临界温度之间的部分发生固态相变^[7]。激光加热速度快^[8],热影响区域小^[9],淬火应力及变形小。激光相变硬化具有周期短、生产效率高、耗电低、不需冷却介质、无工业污染等优点^[10],还可以对形状复杂的零件和不能用其他常规方法热处理的零件进行局部激光热处理,并且由于搭接作用相当于进行了回火处理,激光处理后最外层硬度往往低于次表层,这样只需精磨即可达到理想层,实现了节约材料和提高工作效率的目的。它对传统的热处理技术产生了极大的冲击^[11,12]。因此,寻找一种适合高速主轴激光热处理方法提高材料的硬度、耐磨性和抗疲劳性已成为一个研究热点^[13~16]。本实验的目的是为了找到一种适合高速主轴的激光热处理方法,达到主轴表面所要求的硬度及抗疲劳性。

2 实验材料及方法

以主轴常用 40Cr 钢为实验材料(化学成分见表 1)。主轴轴颈处硬化比较理想的状态为:表面硬度要达 HRC60~64,有一定的层深,但又要解决便于加工磨削的问题(硬度较低便于加工)。为观察和实验方便,将试样制成圆盘形状。该实验采用 GS-TFL 高功率 CO₂ 横流式激光器对试样进行激光热处理,光束模式为多模。

表 1 40Cr 钢的化学成分(质量分数%)

Table 1 40Cr steel component (mass fraction%)

C	Si	Mn	Cr	S	P
0.44	0.38	0.64	0.76	0.028	0.023

在激光硬化过程中激光加工参数为激光功率、光斑直径、扫描速度、光斑形状、聚焦条件、保护气体环境以及表面涂层材料。其中激光功率、光斑直径和扫描速度直接影响激光淬火层的深度、宽度、硬度、组织以及机械性能。根据文献记载、试样大小和操作工人的实际经验,以激光功率 1500 W,光斑直径 6 mm,扫描速度 15 mm/s 为基础进行扩展实验。A 组:固定光斑直径和扫描速度,激光功率在 1200~1700 W 范围变化;B 组:固定光斑直径和激光功率,扫描速度在 12~17 mm/s 范围变化;C 组:固定激光功率和扫描速

度,光斑直径在 2~7 mm 范围变化。

激光处理前在工件表面涂一层能量吸收层来提高工件表面的能量吸收率。为了降低激光束来回扫描对样块所造成的非实验性影响,扫描的进出端位置保持一致。每扫描一次都用冷水冲洗样块降温,保证每一次扫描都保持一样的初始温度。试样的制备包括取样、镶嵌、磨制、抛光、浸蚀等工序。制成金相试样后,用高倍金相观察微观组织。硬度用 MH-6 型显微硬度计测量,在 100 g 载荷下加载 10 s。磨损试验在 MPX 2000 盘销式摩擦磨损实验机上进行。

3 工艺与层深的关系

在扫描速度和光斑直径不变的情况下,仅改变激光功率,可得到硬化深度与功率的关系如图 1 所示。实验结果表明输出功率与硬化深度成正比。原因为随着激光输出功率的增大,金属表面可吸收的能量增大,使金属表层处于相变温度以上的区域增大,致使硬化层深度增加。在激光功率和光斑直径不变的情况下,可得到硬化深度与扫描速度的关系如图 2 所示。实验结果表明扫描速度与硬化层深成反比。原因是扫描速度越快,激光在材料上作用的时间越短,金属表面吸收的能量越低,从而导致淬火

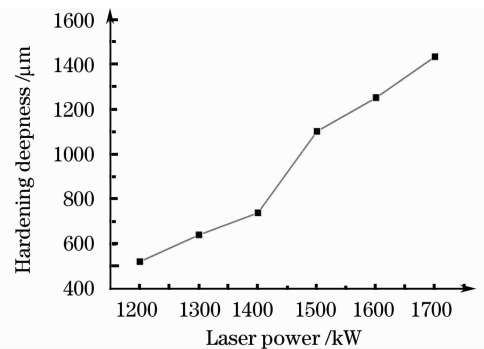


图 1 激光功率对硬化层深的影响

Fig. 1 Effect of different laser power

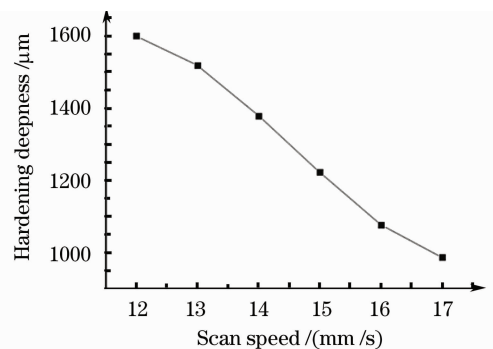


图 2 扫描速度对硬化层深的影响

Fig. 2 Effect of different scan speed

层层深变浅。在激光功率和扫描速度不变的情况下,可得到硬化深度与光斑直径的关系如图 3 所示。实验结果表明硬化深度与光斑直径成反比。原因在于相同的激光功率和扫描速度条件下,光斑直径越大,功率密度越低,硬化层就越浅。

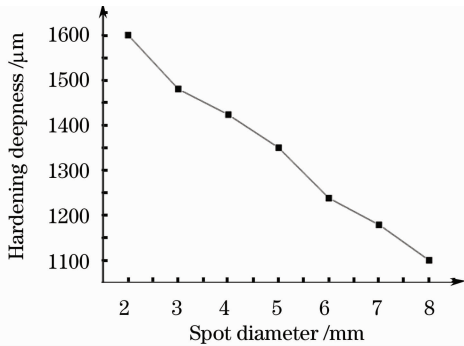


图 3 光斑直径对硬化层深的影响

Fig. 3 Effect of different facula diameter

4 硬化层组织及硬度分析

将激光功率 1600 W,光斑直径 7 mm,扫描速度 15 mm/s 简称 1600715 工艺。图 4(a)为该工艺试样的显微组织,右上角为该工艺镶嵌金相试样。将激光功率 1700 W,光斑直径 5 mm,扫描速度 16 mm/s 简称 1700516 工艺。图 4(b)为该工艺试样的显微组织,右上角为该工艺镶嵌金相试样。由于试样太多,这里只找了一个典型试件作对比分析,本文着重分析 1600715 工艺试样。

从图 4(a)可看到 1600715 工艺硬化金相显微组织全貌,激光淬火后的组织可分为 4 层。图 4(a)

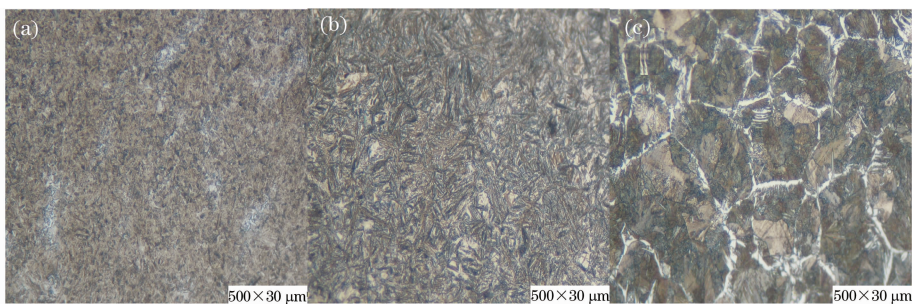


图 5 不同层的微观组织。(a)完全淬硬层;(b)过渡层;(c)原始基体层

Fig. 5 Microstructures of different layer. (a)Laser-hardened layer; (b)transition layer; (c)original matrix layers

图 6 为 40Cr 钢在两种激光热处理工艺下的显微硬度曲线。从硬度曲线图可以看出,1600715 激光工艺处理试样,最外层硬度为 553 HV,次表层具有极高的硬度,达到 721 HV,且深度为 500 μm ,然后硬度逐步降低,最后是原始基体的硬度 207 HV。相变硬化层到基体硬度急剧下降,从激光硬化层到

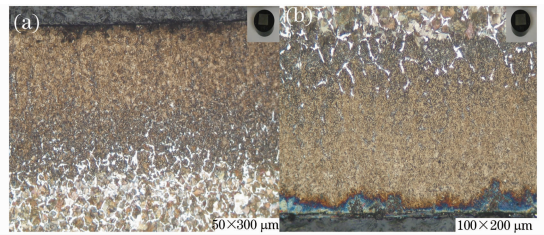


图 4 试样金相显微组织。(a)1600715 工艺;
(b)1700516 工艺

Fig. 4 Microstructures of the tested samples
(a)1600715 technics; (b)1700516 technics

最上层黑色部分,深度为 10~80 μm ,硬度为 550~553 HV,该层组织主要为板条马氏体和残留奥氏体,这一层与激光束作用时间最长,马氏体组织较粗。由于光斑搭接过程中的回火将不可避免地使硬度降低,这一层硬度较低便于加工,只需精磨即可。图 5(a)第二层为完全淬硬层显微组织,深度为 400~700 μm ,硬度为 718~721 HV。该层组织由细小板条马氏体、少量奥氏体、局部未溶铁素体组成。由于加热时间短速度快,因此组织较细小,马氏体的板条界较平直,内部存在大量缠结位错。另外由于原始组织不均匀,局部有少量未溶解的块状铁素体组织。图 5(b)为第三层过渡层显微组织,深度为 200~350 μm ,硬度为 280~540 HV。由于温度梯度和加热作用时间较短,珠光体与铁素体向奥氏体转变不充分,冷却后形成马氏体、铁素体、屈氏体混合组织。图 5(c)为第四层原始基体显微组织,深度为 1000~1200 μm ,由珠光体和白色网状铁素体组成,硬度为 207 HV。

基体的硬度落差高达 500 HV。最高硬度是基体硬度的 3.48 倍,约为主轴常调质试件硬度的 2.04 倍。1700516 激光工艺处理试样,最外层硬度为 612 HV,次表层具有极高的硬度,达到 740 HV,但深度只有 150 μm ,然后硬度逐步降低,最后是原始基体的硬度 207 HV。

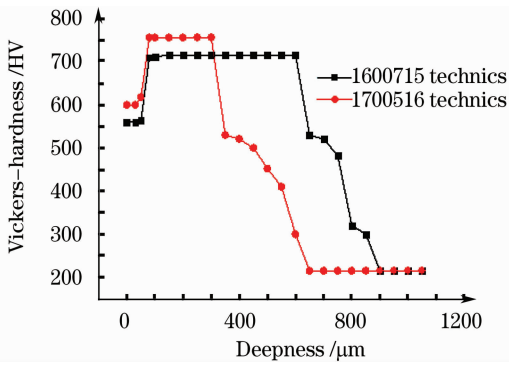


图 6 维氏硬度曲线图

Fig. 6 Graph of Vickers-hardness

5 磨损试验与分析

在 MPX 2000 盘销式摩擦磨损实验机上进行磨损实验,由激光处理后固定的 40Cr 钢盘(直径为 34 mm,厚 10 mm)与旋转的 GCr15 钢销(直径为 5 mm,厚 18 mm)构成。实验温度为室温,为加快磨损,主轴转速定位 $n=2930$ r/min,实验载荷固定为 300 N。开机运行良好,实验机没有明显振动。分别进行 3 次磨损实验,每隔半小时停机对钢盘进行超声波清洗,并用紫外光进行烘干,用精度为万分之一克的分析天平称量磨损前后的质量损失。对每种试样进行 5 次平行测试,取其平均值。

表 2 40Cr 钢磨损质量损失比较

Table 2 Comparison of wear mass loss of 40Cr

Sample	Wear mass loss /mg		
	Firstly	Secondly	Thirdly
1700516 technics	0.42	0.29	0.76
1600715 technics	0.47	0.32	0.33

由表 2 可以看出 1700516 工艺和 1600715 工艺,第 1 次磨损质量损失都大于第 2 次,这是由于这一层与激光束作用时间最长,马氏体组织较粗,光斑搭接过程中的回火将不可避免地使硬度降低。前 2 次相同时间内磨损质量损失 1600715 工艺大于

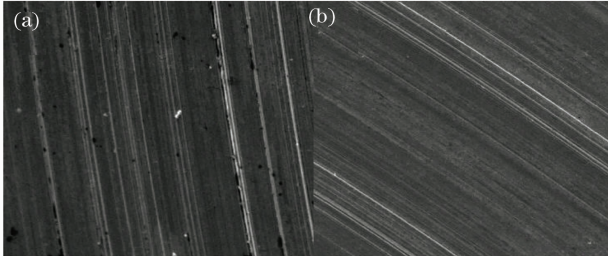


图 7 两种处理试样磨损 SEM 图。(a)1700516 试样 SEM;(b)1600715 试样 SEM

Fig. 7 Abrasion SEM of two different heat treatment. (a)1700516 technics SEM;(b)1600715 technics SEM

1700516 工艺,验证了 1700516 工艺比 1600715 工艺表面硬度高,越高耐磨性越好的特点。1700516 工艺第 3 次磨损质量损失明显高于前 2 次质量损失总和,而 1600715 工艺第 3 次磨损质量损失无明显变化,原因在于 1700516 工艺下完全淬硬层的深度较浅,第 3 次磨损已经到过渡层,而 1600715 工艺完全淬硬层较深,耐磨性较好。经过 3 次磨损后,通过扫描电镜(SEM)观察两种工艺试样最终表面,最终磨痕如图 7。两种试样表面磨损的形式主要是犁沟、塑性变形和一些碳化物的脱落。由图 7(a)可看出 1700516 工艺试样出现了明显的较深犁沟,磨损严重。由图 7(b)可看出 1600715 试样表面出现均匀的犁沟,相对来说犁沟较浅,磨损较轻,说明了 1600715 工艺耐磨性较好。

6 结 论

经过几种工艺对比得出:1600715 处理工艺得到的试样在硬度与层深最为理想。该工艺试样可分为淬回火层、完全淬硬层、过渡层和原始基体层 4 部分。由表及里组织分别为板条马氏体和残留奥氏体、细小板条马氏体及少量奥氏体和局部未溶铁素体、马氏体及铁素体和屈氏体、珠光体和白色网状铁素体。完全淬硬层最高硬度为 712 HV,淬回火层硬度 553 HV。与基体相比,完全淬硬层硬度有大幅度的提高,约为基体硬度的 3.48 倍,约为主轴常规热处理硬度的 2.04 倍。激光热处理后的工件只需表面进行精磨便可达到完全淬硬层,起到节材与提高加工效率的作用。通过比较试样的最终磨损质量损失和观察最终磨损 SEM 图片,可得出 1600715 工艺试样耐磨性也较为理想。

参 考 文 献

- Zhang Weiping, Liu Zhonghua. Study on microstructure of in-situ synthesis of $\text{TiC-Cr}_7\text{C}_3\text{-Ti-Ni}$ metal-ceramics composite coating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1091~1094
张维平,刘中华. 激光熔覆原位合成 $\text{TiC-Cr}_7\text{C}_3\text{-Ti-Ni}$ 金属复合材料涂层[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1091~1094
- P. Kaul, P. Ganesh, S. K. Albert *et al.*. Laser cladding of austenitic stainless steel with nickel base hardfacing alloy[J]. *Surf. Eng.*, 2003, **19**(4): 268~270
- Li Gang, Qiu Ling, Qiu Xingwu. Study on microstructure and hardness of laser melting of 40Cr steel [J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2008, **29**(3): 25~28
李 刚,邱 玲,邱星伍. 40Cr 激光熔凝硬化组织形态及硬度研究[J]. *热处理技术与装备*, 2008, **29**(3): 25~28
- Wang Xinhong, Zhang Min, Zou Zengda *et al.*. Investigation on the microstructure and properties of laser clad TiCp/NiCrBSi alloys composite coating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6): 562~566

- 王新洪, 张敏, 邹增大等. 激光熔覆 TiCp/NiCrBSi 复合涂层的组织与摩擦学性能[J]. 中国激光, 2003, **30**(6): 562~566
- 5 Chao Mingju, Liang Erjun, Zhao Dong. Effect of TiO₂ on the laser cladding layers of Ni-based alloy on 45# steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 947~952
- 晁明举, 梁二军, 赵栋. TiO₂ 对 45# 钢表面激光熔覆镍基合金的影响[J]. 中国激光, 2003, **30**(10): 947~952
- 6 Huang Kaijin, Lin Xin, Chen Chi *et al.*. Microstructure and wear behaviour of laser-clad Zr-Cu-Ni-Al/TiC composites on AZ91D magnesium alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 549~554
- 黄开金, 林鑫, 陈池等. AZ91D 镁合金表面激光熔覆 Zr-Cu-Ni-Al/TiC 复合粉末的组织与磨损[J]. 中国激光, 2007, **34**(4): 549~554
- 7 S. H. Lee, Y. S. Yang. Sensitivity analysis of processing parameters by direct differentiation method for laser surface hardening[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2001, **16**(3): 353~374
- 8 Luo Genxiang, Wu Guoqing, Huang Zheng *et al.*. Microstructures of Ni-Cr-Ti-Al laser claddings on K418 superalloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 283~287
- 罗根香, 吴国清, 黄正等. K418 合金激光熔覆 Ni-Cr-Ti-Al 涂层的组织研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 283~287
- 9 S. Lampman. Introduction to Surface Hardening of Steels[M]. ASM Handbook, Vol. 4, Heat Treating, ASM International, Materials Park, OH. 1997. 259~267
- 10 R. C. Reed, Z. Shen, J. M. Robinson *et al.*. Laser transformation hardening of steel; beam mode, beam size, and composition[J]. *Mater. Sci. Technol.*, 1999, **15**: 109~118
- 11 Hua Yinqun. Study on wear-resistance of laser quenched and shocked 40Cr steel[J]. *Tribology*, 2003, **23**(5): 448~450
- 花银群. 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
- 12 Wei Lun, Chen Qihua, Li Junchang *et al.*. Laser surface alloying of 40Cr steel with carbon[J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(1): 1~4
- 魏 仑, 陈庆华, 李俊昌等. 40 铬钢表面加碳激光合金化处理[J]. 激光技术, 2002, **26**(1): 1~4
- 13 Gongying Liang, T. T. Wong, Geng An *et al.*. Atmosphere corrosion behavior of plasma sprayed and laser remelted coatings on copper[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1): 59~62
- 14 Li Qiang, Lei Tingquan, Meng Qingchang *et al.*. Transmission electron microscopy for microstructural characterization of the laser clad Ni-Cr-B-Si-C alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(4): 372~378
- 李 强, 雷廷权, 孟庆昌等. 激光熔覆 Ni-Cr-B-Si-C 合金涂层显微组织的透射电镜研究[J]. 中国激光, 1999, **A26**(4): 372~378
- 15 Zhang Weiping, Liu Shuo, Ma Yutao. Strengthening mechanism of particle reinforced metal matrix composite coating by laser cladding[J]. *Trans. Mater. Heat Treat.*, 2005, **26**(1): 70~73
- 16 Li Baoling, Wen Zongyin, Liu Xuhong *et al.*. An experimental study of laser cladding technology applied for axle surface repair [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(4): 290~293
- 李宝灵, 温宗胤, 刘旭红等. 激光熔覆技术应用于轴类零件表面修复的实验研究[J]. 应用激光, 2007, **27**(4): 290~293