

45[#] 钢表面激光织构淬火减摩抗磨复合处理技术研究

华希俊, 刘凯, 周万, 符永宏, 王蓉, 孙建国

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: **目的** 提高45[#]钢零件的表面硬度和润滑减摩性能。**方法** 在45[#]钢试样表面进行激光淬火, 研究激光功率和扫描速度对淬火表面淬硬层深度和宽度的影响, 分析淬硬层不同区域的显微硬度和微观组织。利用二极管泵浦 Nd:YAG 激光加工机在45[#]钢光滑试样表面加工出具有一定分布规律的微凹坑织构, 采用热压法向其中填入由 MoS₂、聚酰亚胺和石墨组成的复合固体润滑剂, 并与未处理的光滑试样进行摩擦学性能对比。**结果** 将激光织构与淬火技术有效融合, 可以使45[#]钢表面硬度提高至835HV, 摩擦系数减小约50%。**结论** 激光织构淬火减摩抗磨复合处理技术能够提高45[#]钢零件的表面硬度, 减小摩擦系数, 具有很好的工程应用前景。

关键词: 45[#]钢; 激光淬火; 微织构; 固体润滑剂

中图分类号: TG156.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2014)04-0086-06

Research of Antifriction and Wear Resistance Composite Technology by Laser-texturing and Quenching on 45[#] Steel Surface

HUA Xi-jun, LIU Kai, ZHOU Wan, FU Yong-hong, WANG Rong, SUN Jian-guo

(Mechanical Engineering College, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the hardness and antifriction properties on 45[#] steel surface. **Methods** Laser quenching was performed on the 45[#] steel surface. The effects on the hardened depth and width of the quenched surface by laser powers and scanning speeds were studied. The micro-hardness and micro-structure were analyzed on the different parts of the hardened layer. Uniform-distributive micro-dimples were conducted on the smooth surface of 45[#] steel specimens by diode-pumped Nd:YAG laser machine and MoS₂-PI-Gr composite solid lubricants were filled into the texture by hot-pressing method, then tribological performance comparison with the untreated smooth 45[#] steel surface was carried out. **Results** The hardness of 45[#] steel surface could reach up to 835HV and the friction coefficient could be reduced by almost 50% through laser-texturing and quenching composite technology. **Conclusion** The hardness of 45[#] steel surface could be increased and the friction coefficient could be reduced by laser-texturing and quenching composite technology, which would have a good engineering application prospect.

KEY WORDS: 45[#] steel; laser quenching; microstructure; solid lubrication

收稿日期: 2014-03-04; 修订日期: 2014-04-27

Received: 2014-03-04; Revised: 2014-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(51375211, 51175233); 国家重大科技成果转化项目(2060403); 江苏省科技支撑计划项目(BE2010060); 镇江市工业科技支撑项目(GY2012039)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51375211, 51175233), the Major National Science and Technology Achievement Transformation Project (2060403), the Science and Technology Support Program of Jiangsu (BE2010060) and the Industrial Science and Technology Support Program of Zhenjiang (GY2012039)

作者简介: 华希俊(1966—), 男, 江苏仪征人, 工学博士, 教授, 主要从事激光表面改性及摩擦学设计、固体润滑等方面的研究。

Biography: HUA Xi-jun (1966—), Male, from Yizheng, Jiangsu, Ph. D., Professor, Research focus: laser surface modification and tribological design, solid lubrication, etc.

45#钢因具有很好的机械综合性能而得到广泛应用,如用于制造连杆、齿轮、轴类以及活塞销等机械零件。机械零件表面的摩擦磨损、疲劳和腐蚀是其主要的失效形式^[1-3],每年因摩擦磨损所造成的经济损失达数千亿元^[4]。目前用于减小机械零件摩擦,提高其使用寿命的方法主要集中在两个方面:一是通过表面热处理、喷丸等方法来提高零件表面的硬度;二是通过添加润滑剂在摩擦副表面形成一层润滑薄膜,以降低表面的摩擦系数,减小磨损^[5-6]。传统的表面热处理方法具有能耗高、污染环境和工件变形量大等缺点;而激光淬火技术具有生产效率高、无需淬火介质、对环境无污染、变形小等独特优点,受到世界各国的广泛关注^[7-8]。金属零件经表面激光淬火强化处理后,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^[9-10],同时芯部仍可保持较好的韧性,因此能够具有很好的耐冲击和抗疲劳性能,使用寿命大大提高^[11-12]。另外,为了降低机械零件的能耗,在提高其表面硬度的同时,还需提高其表面的润滑减摩性能。常用润滑油和润滑脂无法在高温、真空等恶劣工况下使用,而表面织构化技术是一种先进的表面改性技术^[13-14],在表面织构中镶嵌固体润滑剂能有效改善表面润滑性能,尤其适用于低速、重载以及高温、真空、辐射等特殊工况^[15]。基于此,文中提出了一种激光织构淬火减摩抗磨复合处理新技术。

1 试验

1.1 激光淬火

所用 45#钢淬火前的硬度为 265HV,试样尺寸为 $\phi 35\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ 。激光淬火前,对试样表面进行打磨、抛光,直至粗糙度 $Ra=0.05\text{ }\mu\text{m}$ 。

激光淬火处理采用 YLR-200-AC 光纤激光器(德国 IPG 公司),离焦量为 50 mm,分两组进行:第一组保持激光功率为 120 W,激光扫描速度分别为 100,120,140,160,180 mm/min;第二组保持激光扫描速度为 100 mm/min,激光功率分别为 110,120,130,140,160 W。

激光淬火完成后,将试样线切割成小块,经研磨、抛光后,利用 4%(体积分数)的硝酸酒精溶液腐蚀处理,利用 Leica DM 2500M 万能材料显微镜观察其显微组织,然后利用 HXD-1000TM/LCD 自动转塔数显微硬度计(上海光学仪器厂)测量试样不同部位单个点的显微硬度值,并分析其硬度的分布特征。硬度测试的试验力为 0.98 N,保荷时间为 15 s。

1.2 固体润滑剂填充及摩擦学性能对比

采用课题组自主研发的二极管泵浦 Nd:YAG 激光加工机在试样表面加工出具有一定分布规律的微凹坑织构,其输出波长为 532 nm,脉冲宽度 $\leq 70\text{ ns}$,泵浦电流 $\leq 19\text{ A}$,加工工艺为“单脉冲同点间隔多次”^[16]。图 1 为利用 Wyko-NT1100 三维形貌仪测出的单个微凹坑的形貌图,其直径约为 70 μm ,深度约为 25 μm 。

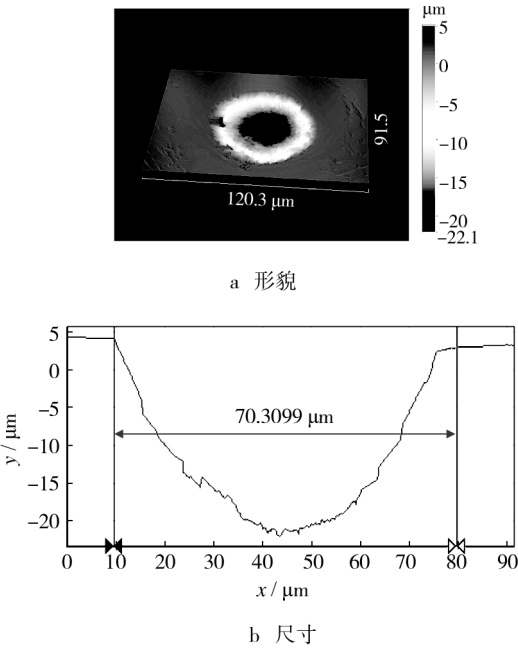


图 1 单个凹坑的形貌
Fig.1 The morphology of a single dimple

在课题组前期研究的基础上,选取了一组较为优化的复合固体润滑剂配方。将石墨(Gr),MoS₂和聚酰亚胺(PI)三种粉末按质量比 4:1:1 充分搅拌混合均匀,再利用热压法将其填充到试样表面的微凹坑织构中。所用 MoS₂粉末粒径约为 0.5 μm ,纯度为 99.5%;PI 粉末粒径为 10~20 μm ,纯度为 99%;Gr 粉末粒径为 0.8~1 μm ,纯度为 99%。热压填充法的步骤为:将复合固体润滑剂放入模具中冷压成型→在 250 $^{\circ}\text{C}$ 高温炉中烧结 1 h(电阻炉提前预热,每隔 20 min 加压一次)→空冷至室温→开模取样→用金相砂纸擦除多余润滑剂。

利用三维形貌分析仪对表面填充效果进行观测,并在室温条件下进行凸轮齿轮滚动摩擦副性能对比试验。摩擦试验采用 MMW-1A 万能摩擦磨损试验机,载荷为 200 N,转速为 200 r/min。

2 结果与分析

2.1 激光扫描速度对淬硬层宽度和深度的影响

图 2 为试样在不同扫描速度下淬火后的表面微观形貌,可见表面淬火区呈明显的月牙状。图 3 为淬硬层宽度和深度随激光扫描速度的变化情况。可见随着激光扫描速度的增大,淬硬层宽度和深度都逐渐减小。这是因为扫描速度越大,试样单位面积上的加热作用时间就越短,吸收的热量越少,激光加热范围越小,所以淬火区域面积越小。

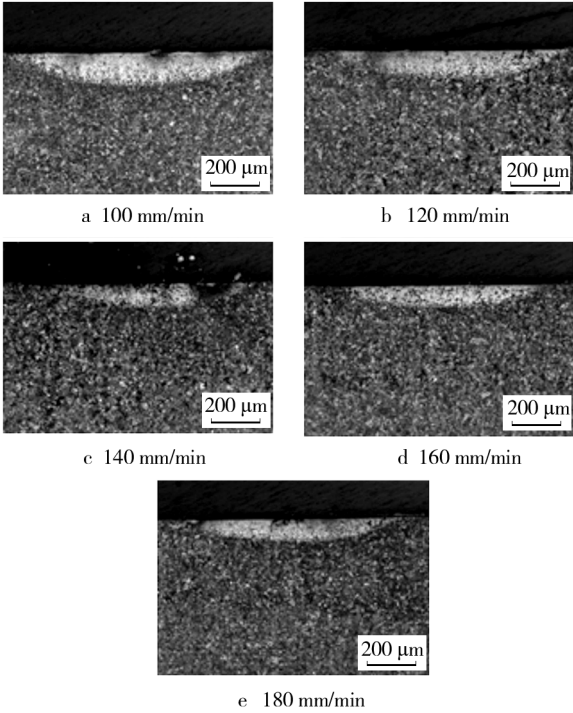


图 2 不同扫描速度下淬火后的表面形貌

Fig. 2 The surface morphology after quenching under various scanning speeds

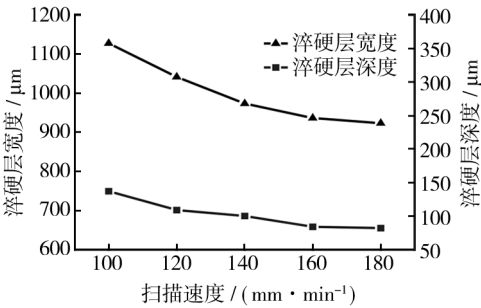


图 3 淬硬层尺寸随扫描速度的变化

Fig. 3 The dimensions of the hardened layer under various scanning speeds

2.2 激光功率对淬硬层宽度和深度的影响

图 4 为试样在不同激光功率下淬火后的表面微观形貌,图 5 为淬硬层宽度和深度随激光功率的变化情况。可以看出,在一定范围内,随着激光功率的增大,淬硬层宽度和深度不断增加。这是因为激光功率越大,试样表面单位面积所吸收的热量就越多,温升越高,达到奥氏体转变温度 (A_{c3}) 的范围更广,且加热表面和冷态基体之间的温度梯度越大,冷却速度越快。

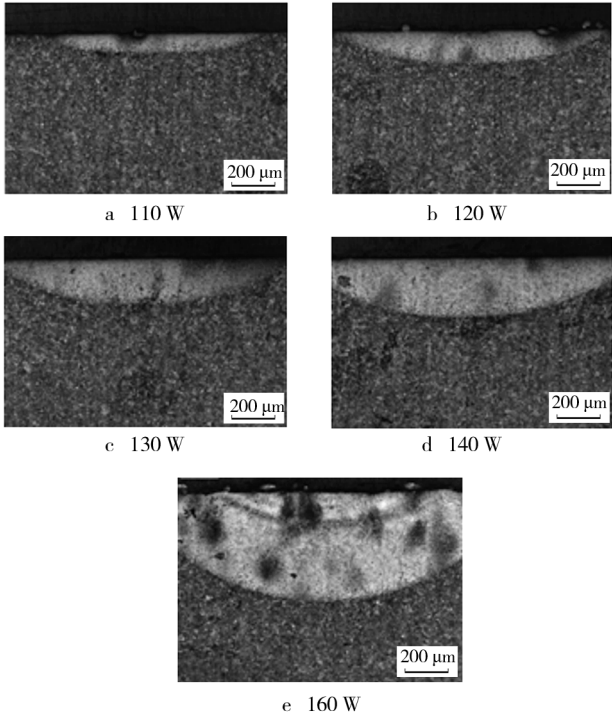


图 4 不同扫描功率下淬火后的表面形貌

Fig. 4 The surface morphology after quenching under various scanning powers

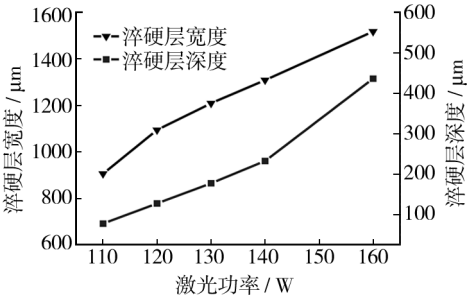


图 5 淬硬层尺寸随激光功率的变化

Fig. 5 The dimensions of the hardened layer under different powers

2.3 淬硬区的硬度

图 6 为三维形貌仪测得的表面淬硬区和基体的单个压痕形貌图,可见淬硬区的压痕宽度和深度比基

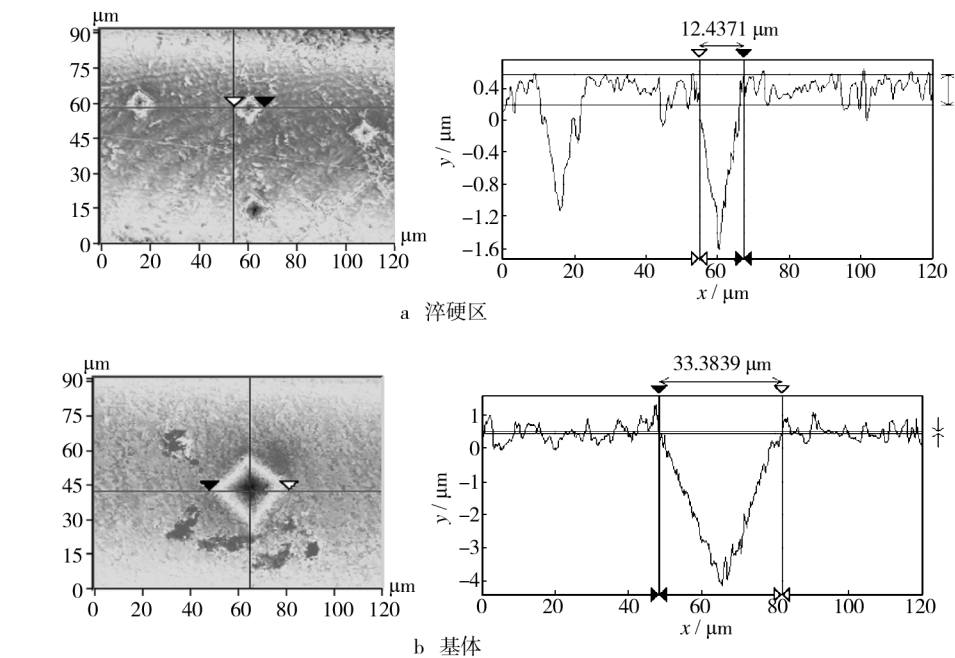


图 6 硬度计测量后的压痕形貌

Fig. 6 The impression morphology after hardness measurement

体小很多,说明淬硬区的硬度有了很大提高。

图 7 为硬度值随淬硬层深度的变化曲线,激光淬火条件为:扫描速度 100 mm/min,功率 160 W。可以看出,经激光淬火后,试样表面的硬度有了很大提高,最高可达 976HV,是未淬火时的 3.7 倍。这是因为激光的热作用使试样表面瞬间温度达到 A_{c3} 以上,微观组织由珠光体和铁素体迅速转变为奥氏体,当激光停止作用后,试样表面迅速冷却,奥氏体组织转变为晶粒细小的马氏体组织,从而使表面硬度有了很大的提

高。不过,峰值硬化区并不是出现在试样的表面,而是出现在离表面约 50 ~ 100 μm 的位置。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峰值硬化区。另外还可以看出,淬硬层硬度整体随深度的增加而逐渐降低,直至接近基体的硬度。

图 8 为同一深度区域(约 76 μm)的显微硬度随离淬硬中心的距离的变化曲线,其激光淬火条件与图

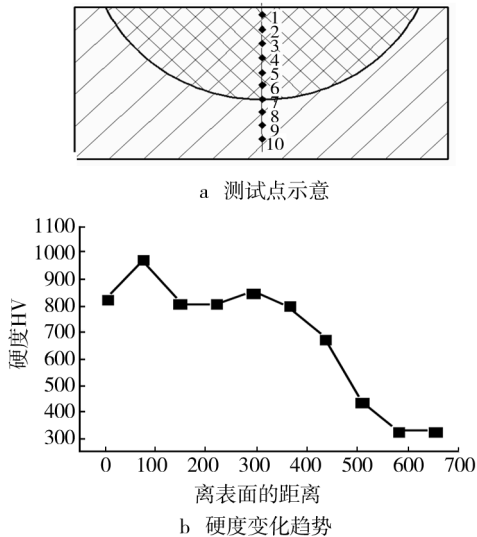


图 7 硬度随深度的变化

Fig. 7 Hardness distribution along the depth

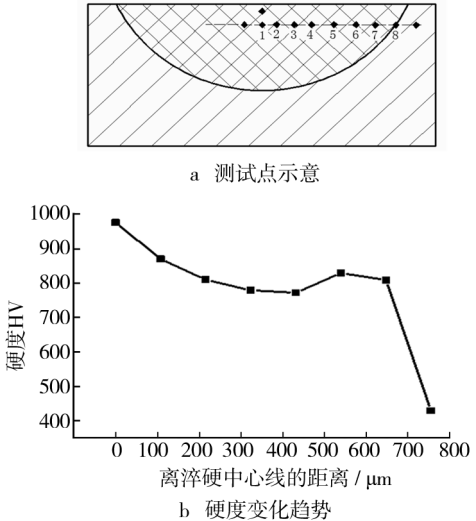


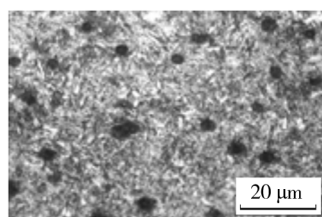
图 8 硬度随离淬硬中心的距离的变化

Fig. 8 Hardness distribution along the distance to the hardened centre

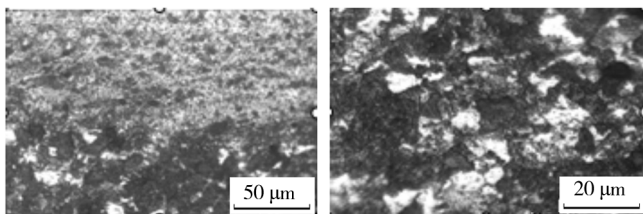
7 相同。可以看出,在离淬硬中心较近的地方 ($\leq 648 \mu\text{m}$), 硬度值分布具有一定的离散型, 其平均硬度值约为 835HV。这是因为激光作用在淬硬层同一深处不同部位的温度场不均, 使得加热、冷却及碳化物析出的条件不一致, 受热时间和奥氏体化程度也不一样。另外, 随着离淬硬中心距离的增加, 硬度整体呈下降趋势, 在离淬硬中心较远时 ($> 648 \mu\text{m}$), 硬度迅速下降并接近于基体的硬度值。这是因为离淬硬中心越远, 吸收的热量越少, 淬硬越不充分。

2.4 淬硬层的微观组织分析

根据激光能量分布的不同, 可将激光热作用区域分为相变硬化区、过渡区和微影响区, 各区域的微观组织见图 9。相变硬化区所能达到的加热温度最高, 甚至大大高于 Ac_3 , 冷却后的马氏体组织最多, 其微观组织为针状马氏体、残余奥氏体和未熔碳化物的混合物。过渡区的温度比相变硬化区稍低, 但稍高于 Ac_3 , 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, 保留了原始的组织形态, 因此该区域迅速冷却后所形成的组织为马氏体、残余奥氏体和原始组织的混合物。微影响区离加热表面较远, 大部分热量还没来得及传导至该区域就已经散去, 故激光作用对该区域的影响较小, 其微观组织主要是铁素体和珠光体的混合物。该微观组织分析再次验证了淬硬层硬度值随深度增加而逐渐减小的结论。



a 相变硬化区



b 过渡区

c 微影响区

图9 不同区域淬火后的显微组织

Fig. 9 Microstructure of different regions after quenching

另外, 图 9a 中马氏体组织的颜色深浅不一, 说明其含碳量不均匀, 这是造成显微硬度分布不均匀的根

本原因。这再次验证了同一深处不同部位硬度分布具有一定离散性的结论。

2.5 固体润滑剂填充效果及摩擦学性能对比

试样表面经复合固体润滑剂填充前后的三维形貌对比如图 10 所示。可以看出, 利用热压法在试样表面微凹坑结构中填入复合固体润滑剂具有较好的填充效果。从图 11 可知, 经激光织构硬化复合处理技术处理后, 试样表面摩擦系数比光滑表面低, 减小了约 50%, 这缘于微凹坑起到了储藏、释放固体润滑剂和收集磨损颗粒的作用。

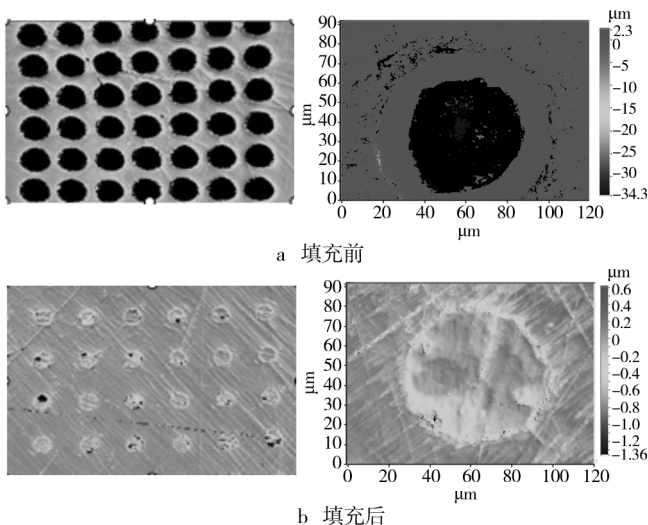


图10 固体润滑剂填充前后的形貌

Fig. 10 The surface morphology before and after filling with solid lubricant

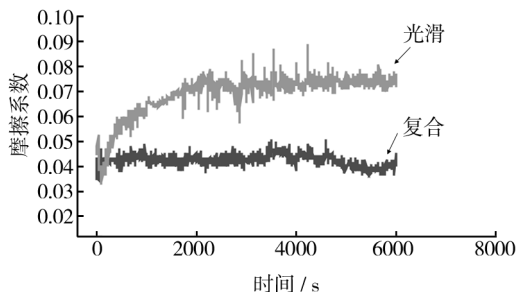


图11 摩擦系数随滚动时间的变化

Fig. 11 Change of friction coefficient with time

3 结论

1) 激光淬火时, 淬硬层宽度和深度随着扫描速度的增大而逐渐减小, 随着激光功率的增大而逐渐增大。

2) 激光淬火后,试样表面硬度有了很大的提高,最大硬度值达到976HV,且峰值硬化区出现在离表面深约50~100 μm 的区域。随着深度的增加,淬硬层的硬度逐渐降低,直至接近基体硬度值。

3) 淬硬层同一深度处的硬度分布具有一定的离散型,其平均硬度值约为835HV。在离淬硬中心较远的地方(>759 μm),硬度值随着离淬硬中心的距离增大而迅速下降,直至接近基体硬度值。

4) 利用热压法在表面微凹坑织构中填入复合固体润滑剂,能够获得较好的填充效果。

5) 通过激光织构与淬火复合处理,试样表面摩擦系数减小了约50%,摩擦副表面润滑抗磨性能得以提高。该复合处理技术具有很好的工程应用前景,为今后进一步研究奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] PINKERTON A J, LIN L I. The Effect of Laser Pulse Width on Multiple Layer 316L Steel Clad Microstructure and Surface Finish[J]. Applied Surface Science, 2003, 209(2): 411—416.
- [2] 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 Xu-dong, ZHANG Lian-feng, ZHU Wu-feng, 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.
- [3] 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 Zhong, WANG Jian, LI Ying. Research of Abrasion of Bionic Coatings and Its Relevance with Surface Morphology[J]. Surface Technology, 2013, 42(4): 9—11.
- [4] 韩晓明,高飞,宋宝韫,等. 摩擦速度对铜基摩擦材料摩擦磨损性能影响[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1): 89—96.
HAN Xiao-ming, GAO Fei, SONG Bao-yun, et al. Effect of Friction Speed on Friction and Wear Performance of Cu-matrix Friction Materials[J]. Tribology, 2009, 29(1): 89—96.
- [5] DROZDOV Y N. The Main Problems of the Space Tribology [C]//2nd World Tribology Conference, Austria: Vienna, 2001: 382—385.
- [6] 张津,李军,李春天,等. 金属摩擦表面耐磨自修复技术的研究[J]. 表面技术, 2004, 33(5): 7—8.
ZHANG Jin, LI Jun, LI Chun-tian, et al. Research on Self-repairing Technique of Wear Resistance on the Metal Friction Surface[J]. Surface Technology, 2004, 33(5): 7—8.
- [7] MAHMOUDI B, TORKAMANY M J, AGHDAM A R, et al. Laser Surface Hardening of AISI 420 Stainless Steel Treated by Pulsed Nd:YAG Laser[J]. Materials & Design, 2010, 31(5): 2553—2560.
- [8] 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.
LI Gang, XIANG Jun, KUANG Jun, et al. Microstructure and Properties of GCr15 Steel Treated by Laser Quenching[J]. Transaction of Material and Heat Treatment, 2010, 31(4): 129—132.
- [9] 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 Yin-qun, CHEN Rui-fang, YANG Ji-chang, et al. Study on Wear-resistance of Laser Quenched and Shocked 40Cr Steel[J]. Tribology, 2003, 23(5): 448—450.
- [10] WANG 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.
- [11] 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 Zhi-qiang, CHEN Zhao-yun. Study on Fatigue Resistance of 17-4PH Stainless Steel after Laser Transformation Hardened[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(4): 196—198.
- [12] WANG W J, LIU J H, GUO J, et al. Effect of Laser Quenching on Wear and Damage Behaviors of Heavy-haul Wheel/Rail [J]. Materials Science and Technology, 2012, 6: 14.
- [13] DA SILVA W M, SUAREZ M P, MACHADO A R, et al. Effect of Laser Surface Modification on the Micro-abrasive Wear Resistance of Coated Cemented Carbide Tools [J]. Wear, 2013, 302(1): 1230—1240.
- [14] 符永宏,杨巍,张华伟,等. 激光微造型凸轮副的摩擦磨损[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 216—220.
FU Yong-hong, YANG Wei, ZHANG Hua-wei, et al. Friction and Wear of Cam with Laser Micro-texture under Lubrication[J]. Transaction of the Chinese Society for Agriculture Machine, 2010, 41(1): 216—220.
- [15] MARQUART M, WAHL M, EMRICH S, et al. Enhancing the Lifetime of MoS₂-lubricated Ball Bearings [J]. Wear, 2013, 303(1): 169—177.
- [16] 张培耘,华希俊,符永宏,等. 激光表面微织构工艺试验及应用研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 55—58.
ZHANG Pei-yun, HUA Xi-jun, FU Yong-hong, et al. Experimental Investigation on Laser Surface Micro-texturing Technology and Application [J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 55—58.