

泥浆泵高铬铸铁材料激光淬火技术及其 摩擦磨损性能研究

华希俊, 郝静文, 王蓉, 张培耘, 丁积霖, 符永宏

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: **目的** 提高高铬铸铁的耐磨性能。**方法** 采用 CO₂ 激光器对高铬铸铁工艺试样进行表面激光淬火, 利用 MMW-1A 型摩擦磨损试验机研究激光淬火后试样在磨粒介质条件下的摩擦学性能, 并对试样的表面摩擦系数以及磨损率进行测量与分析。**结果** 淬火后试样表层组织被细化, 由表及里可分为淬硬区、热影响过渡区和基体区。与基体相比, 淬硬层硬度显著提高, 最高硬度出现在次表层, 可达 1105.7HV。当摩擦磨损试验达到稳定状态时, 淬火后的试样表面摩擦系数均比未淬火的低, 当淬火带间距为 1 mm 时摩擦系数最小, 其值为 0.3 左右, 而未淬火的试样表面摩擦系数高达 0.65。相同磨损时间下, 激光淬火试样均比未淬火试样的磨损率小, 当淬火带间距为 1 mm 时, 磨损率最小, 耐磨性最佳。**结论** 激光淬火技术有效地提高了高铬铸铁材料的耐磨性能, 延长了泥浆泵缸套的使用寿命。

关键词: 泥浆泵缸套; 高铬铸铁; 激光淬火; 淬硬层; 摩擦磨损

中图分类号: TG156.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)06-0215-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.06.034

Laser Quenching Technology and Friction & Wear Properties of Mud Pump High Chromium Iron Material

HUA Xi-jun, HAO Jing-wen, WANG Rong, ZHANG Pei-yun, DING Ji-lin, FU Yong-hong

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

ABSTRACT: The work aims to improve abrasion resistance of high chromium iron. CO₂ laser was applied to surface laser-quenching of high chromium iron sample. Under the condition of abrasive medium, tribological properties of sample subject to laser quenching were studied on MMW-1A-type tester. Surface friction coefficient and wear rate of the sample were measured and analyzed. Surface micro-structure of the sample was refined by laser quenching, which could be divided into three zones from the surface to the center, namely, quenched zone, heat affected transition zone and substrate zone. Compared with the substrate, hardness of the quenched layer was enhanced greatly. The maximum hardness up to 1105.7HV was present on the subsurface. When the friction-wear test reached a steady state, friction coefficient of the quenched sample surface was lower than that of the unquenched one. The friction coefficient was about 0.3 (the minimum) at the quenching zone interval of 1 mm while that of the unquenched one was up to 0.65. Provided with the same wear duration, wear rate of the laser quenched sample

收稿日期: 2017-01-20; 修订日期: 2017-03-03

Received: 2017-01-20; **Revised:** 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375211); 江苏省工业支撑项目 (BE2014115); 江苏省自然科学基金 (BK20130524)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51375211), Industrial Support Project of Jiangsu Province, China(BE2014115), Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China(BK20130524)

作者简介: 华希俊 (1966—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向: 激光表面改性、摩擦学设计与固体润滑等。

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

was lower than that of the unquenched one. Minimum friction coefficient and optimum abrasion resistance were obtained at the quenching zone interval of 1 mm. The laser quenching technology can effectively improve abrasion resistance of high chromium cast iron, and prolong service life of mud pump cylinder.

KEY WORDS: mud pump cylinder; high chromium cast iron; laser quenching; hardened layer; friction and wear

缸套-活塞摩擦副是泥浆泵中最为关键的摩擦副之一。在工程应用中,约80%的钻井泥浆泵发生故障是由于缸套-活塞摩擦副摩擦磨损失效引起的^[1]。为了延长泥浆泵缸套的使用寿命,提高内套表面的耐高压、耐磨损、抗腐蚀性能^[2],采用激光淬火技术对传统泥浆泵高铬铸铁双金属缸套的加工工艺进行合理改进。

激光表面淬火又叫激光相变硬化,利用聚焦后的激光束扫描金属材料表面,使其达到奥氏体相变温度以上,熔点温度以下,在极冷极热的条件下发生马氏体转变^[3]。激光表面淬火技术与常规淬火技术相比,淬火后的材料组织更加细化,马氏体含碳量和位错密度更高,耐磨性以及抗疲劳性更好^[4,5],硬度及淬硬层深度也得到显著提高^[6]。激光表面淬火技术作为激光表面热处理技术中最成熟的一项技术,已广泛应用到工业领域中^[7-9]。早在1974年,美国通用汽车首次对可锻铸铁转向器壳进行了激光淬火,耐磨性提高了10倍左右^[10]。2011年,M. Pellizzari和M. G. De Flora^[11]用Nd:YAG激光器对C40碳素钢进行激光淬火,淬火功率高达4.4 kW,光斑直径15 mm,从低温和高温两个角度阐述了激光淬火后的微观结构对摩擦磨损的积极影响。我国激光表面淬火技术近年来也取得了快速的发展^[12,13],国内许多汽车维修单位引进了缸套激光热处理设备等^[14]。李刚等^[15]用横流CO₂激光器对GCr15表面进行激光淬火,淬火功率1050 W,光斑直径4 mm,扫描速度6 mm/s,试样的硬化层硬度比基体提高了2.2~3.5倍,耐磨性比基体提高3倍,耐蚀性也显著提高。

本文将应用激光淬火技术来处理高铬铸铁材料表面,通过摩擦磨损试验研究激光淬火后的高铬铸铁在泥浆条件下的摩擦学性能,以提高高铬铸铁的耐磨性能。

1 实验部分

1.1 试样加工与制备

试验材料选用与泥浆泵内衬缸套材料一致的高铬铸铁(牌号KMTBCr26),硬度550HV,试样尺寸为 $\phi 70\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。实验前,将试样在磨床上磨至粗糙度为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,用丙酮和酒精清洗试样表面,去除油渍和锈渍,等待表面挥发干后,再用吸光涂料在试样表面进行预刷涂,待涂料吹干后进行激光表面淬火实验。

1.2 实验设备与方法

激光淬火加工采用CO₂激光器进行,激光工艺参数为:激光功率2000~3000 W,扫描速度10~20 mm/s,光斑尺寸1 mm \times 10 mm,离焦量320 mm。激光淬火加工后的试样如图1所示。在Laica DM 2500M万能材料显微镜下观察显微组织,并保存数据。采用HXD-1000TM/LCD显微硬度计检测淬硬层的硬度分布,记录下硬度值。

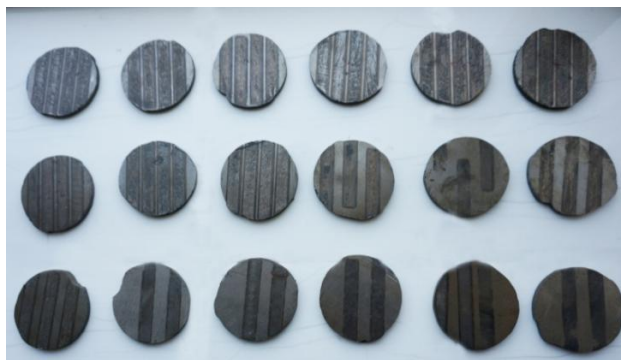


图1 激光淬火后的试样

Fig.1 The samples treated by laser quenching

根据工艺试验的结果,选择表面质量、表面硬度、淬硬层深度、淬硬带间隔较优的试样(工艺参数为激光功率 $P=2500\text{ W}$ 、扫描速度 $v=17\text{ mm/s}$ 以及淬硬带间距 $d=0\sim 2\text{ mm}$)进行摩擦磨损试验。选用MMW-1A型万能摩擦磨损试验机,用面接触形式摩擦副(图2)对激光淬火后材料的摩擦磨损性能进行考察。研究激光淬火加工时,相同载荷及转速条件下不同淬硬带间隔对摩擦系数以及磨损量的影响。



图2 面接触形式摩擦副

Fig.2 The friction pair of surface contact from

2 结果与分析

2.1 激光淬火硬化区的显微硬度测试与分析

选取激光光斑大小为 10 mm×1 mm，离焦量为 320 mm，激光功率为 2000、2250、2500、2750、3000 W，扫描速度为 10、12、15、17、20 mm/s 的 25 个试验试样，进行激光淬火工艺实验研究。实验中观察到当激光功率 $P \leq 2500\text{ W}$ 、扫描速度 $v \geq 15\text{ mm/s}$ 时，材料表面几乎没有发生变化，所测得的微观形貌以未熔状态为主；当激光功率 $P \leq 2500\text{ W}$ 、扫描速度 $v < 15\text{ mm/s}$ 时，材料表面以微熔状态为主；当激光功率 $P > 2500\text{ W}$ 时，材料表面出现了不同程度的熔化现象，甚至出现变形和裂纹等缺陷。

综上所述，激光功率过大时试样熔化严重，无法满足工艺要求。选择激光功率 $P \leq 2500\text{ W}$ 、扫描速度为 10、12、15、17、20 mm/s 时表面质量较好的 1[#]~15[#] 试样，测试表面硬度。取相近的 3 个点测量硬度值，并取其平均值作为表面硬度值，结果如表 1 所示。综合表中试样的表面状态和表面硬度可知，表面未熔、硬度值远高于基体材料的 2[#]、3[#]、8[#]、9[#]、14[#]、15[#] 试样符合要求。在这几组工艺参数中，激光功率 $P = 2500\text{ W}$ 、扫描速度 $v = 17\text{ mm/s}$ 时的试样在表面质量达到要求的前提下，硬度也最高，为最佳工艺组合。

表 1 试样激光淬火后表面硬度值
Tab.1 The surface hardness value of samples by laser quenched

编号	激光功率/kW	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	表面状态	平均硬度(HV)
1	2000	10	局部微熔	846.9
2	2000	12	未熔	805.9
3	2000	15	未熔	722.6
4	2000	17	未熔	677.1
5	2000	20	未熔	631.2
6	2250	10	微熔	872.7
7	2250	12	局部微熔	865.0
8	2250	15	未熔	807.0
9	2250	17	未熔	744.8
10	2250	20	未熔	679.4
11	2500	10	熔化	1007.2
12	2500	12	微熔	972.7
13	2500	15	局部微熔	900.9
14	2500	17	未熔	885.6
15	2500	20	未熔	799.6

如图 3 所示，从激光淬火表层至基材，每隔 50 μm 测量 3 个硬度，取平均值作为淬硬层硬度，淬硬区硬度随深度的变化曲线如图 4 所示。由图 4 可知，激光表面淬火使表层的硬度显著地提高，由于试样的含碳

量和合金元素分布不均匀，得到的显微硬度变化很大，但其总体趋势是沿着试样横截面深度方向逐渐降低。与铸态基体硬度 500 ~ 550HV 相比，淬硬层的最高硬度可达 1105.7HV，硬度显著提高。这是由于激光淬火是急热急冷的过程，碳在奥氏体中来不及均匀化，形成的马氏体中含碳量也相对较高，整个淬硬层具有较高的硬度。

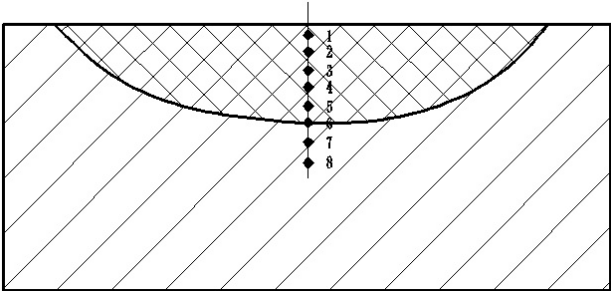


图 3 显微硬度检测方法（纵向）
Fig.3 Detection method of micro-hardness (vertical)

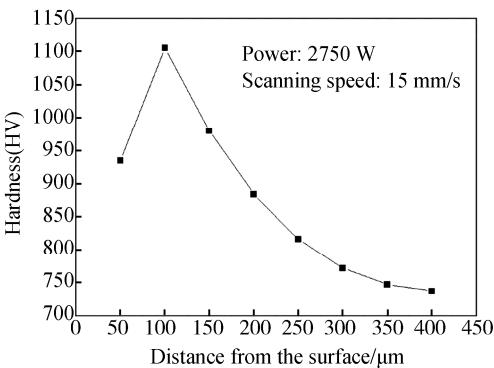


图 4 淬硬区显微硬度随深度的变化曲线图
Fig.4 Changes curves of micro-hardness of hardened area with depth

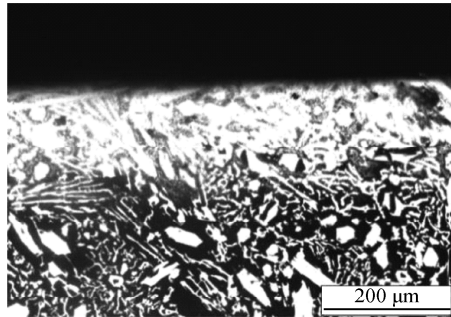
显微硬度的最大值往往并不出现在淬硬层的最表面地方，而是在距离表层约 100 μm 左右的地方。这种现象是由传质和传热两个因素造成的。传质方面，由于表面温度高，碳从金属内部不断迁移到表面而被气化，表面含碳量降低而出现脱碳层，次表层碳浓度相对高一些，而且过热度大，冷却速度快，组织细化，因此次表层硬度较高，出现硬度峰值；传热方面，激光淬火时，温度是从表面向心部逐渐递减的，而由于表层接触空气，心部接触基体，所以冷却速度却是从心部向表层递减的，这就导致了表层的奥氏体形核后拥有相对较长的时间进行生长，表层的马氏体组织相对于次表层稍微粗大些，硬度也要低一些。

2.2 激光淬火区的组织结构分析

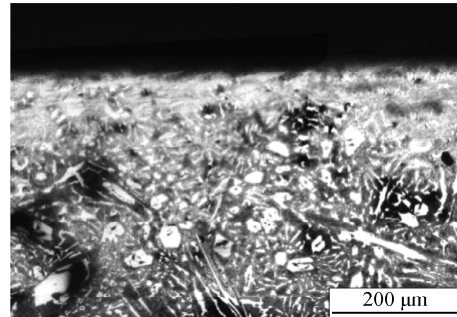
铬铸铁试样在激光淬火过程中由表及里各层吸热温度不相同，冷却速度也有差别，激光淬火后从表层至内部根据其显微组织的不同分为三层，如图 5a

所示。最表面为淬硬层区，其组织为马氏体、残余奥氏体以及未溶碳化物，由于激光的直接作用，在急冷急热的状态下，该区域组织位错密度较高，呈隐针状，如图 5b 所示。淬硬层与基体之间为过渡层，主要组织为马氏体、未转变的原始组织以及弥散的碳化物，

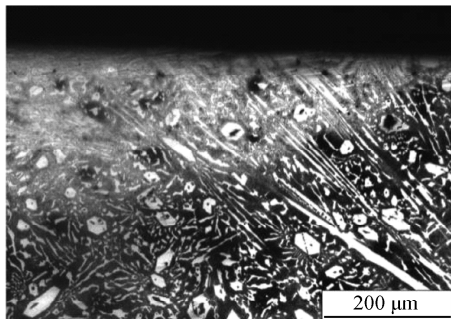
该层由于温度梯度小，奥氏体转变不完全，碳化物溶解不充分，与淬硬层相比马氏体含量稍低、晶粒更粗大，如图 5c 所示。内部为基体材料，主要组织为奥氏体及断续的杆状、块状和颗粒状的碳化物，该层因未达到相变温度，组织为原始组织，如图 5d 所示。



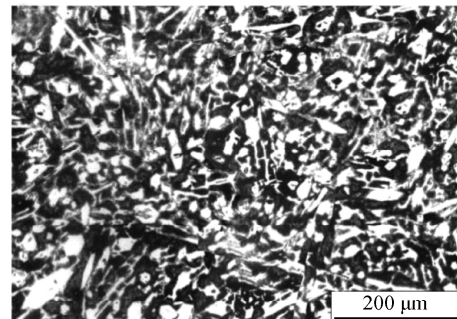
a 激光淬硬区形貌图



b 激光淬硬区金相组织



c 激光淬硬区边界形貌图



d 基体金相组织

图 5 激光淬火淬硬区的微观组织

Fig.5 Microstructure of laser hardening area: a) topography of laser hardening zone, b) microstructure of laser hardening zone, c) topography of laser hardening boundary, d) microstructure of substrate

2.3 淬火带间距对摩擦系数的影响

激光淬火的工艺参数以及试验工况都会对试验结果产生影响。淬火工艺参数主要有激光功率 P 、扫描速度 v 和淬火带间隔 d 。表面质量达到要求的前提下，激光功率 $P=2500\text{ W}$ 、扫描速度 $v=17\text{ mm/s}$ 为最佳工艺组合，所以摩擦磨损实验主要考察淬火带间隔 d 对试样摩擦学性能的影响。试验中试样的激光淬火工艺参数如表 2 所示。试验在工况一致的条件下进行，试验工况为：转速 150 r/min ，载荷 150 N 。所有试验均在温度 10°C 、湿度 55% 下进行。

表 2 摩擦磨损试样工艺参数

Tab. 2 Processing parameters of friction-wear samples

试样编号	功率/W	扫描速度/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	淬火带 间距/mm
1	2500	17	0
2	2500	17	0.5
3	2500	17	1
4	2500	17	1.5
5	2500	17	2
6		未淬火	

试验中对比试样磨损前后形貌，发现未淬火试样在摩擦磨损后，表面产生了较深的犁沟，这主要是由于摩擦副间嵌入的石英砂粒对表面产生的微切削作用。而淬火处理过的试样由于硬度较高，磨损较轻，所以划痕较浅，主要存在一些疲劳剥落坑。图 6 所示为在转速 150 r/min ，载荷 150 N 的条件下，不同淬火带间距的试样表面摩擦系数随时间的变化曲线。结果表明，当达到稳定状态时，淬火后的试样表面摩擦系数均比未淬火的低，这主要是由于经过激光表面淬火后的试样相对于基体材料硬度提高，耐磨性更好。未淬火的试样表面由于石英砂粒的切削作用，表面被撕裂后粗糙不平，摩擦系数较高，其值为 0.65 。

相同的激光功率和扫描速度下，当淬火带间距为 1 mm 时摩擦系数最小，其值为 0.3 左右，表面磨损形貌较浅，主要是因为当间距太大时，相邻淬火带之间有未淬火区域，形成了硬-软-硬的表面状态，相对较软的地方更容易磨损；当间距太小时，靠近淬火带边缘区域的材料二次加热，产生回火效应，硬度反而下降。故当间距为 1 mm 时淬火效果最好，表面整体较硬，耐磨性达到最佳。

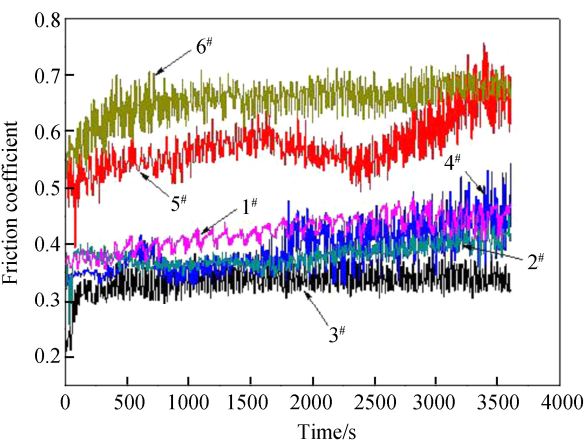


图 6 不同淬火带间距的试样表面摩擦系数
随时间变化的曲线

Fig.6 The curves of friction coefficient of the laser quenched samples with different quenching gap

2.4 淬火带间距对磨损率的影响

相同试验条件下(即转速 150 r/min,载荷 150 N),由 Ohaus Discovery 天平每隔 20 min 测量一次磨损量,根据公式(1)计算出磨损率。

$$A=\frac{\Delta m}{\rho \cdot S \cdot F} \tag{1}$$

其中,Δm 为摩擦前后的质量差,ρ 为材料的密度(即高铬铸铁的密度 7.65 g/cm³),S 为摩擦路程,F 为所加载荷。不同试样各个阶段的磨损量和磨损率如表 3 所示。

表 3 磨损量测量结果
Tab. 3 Wear measurement

编号	时间/min	平均磨损 质量/g	磨损率/ (mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹)
1	20	0.70×10 ⁻³	1.41×10 ⁻⁶
	40	1.31×10 ⁻³	1.32×10 ⁻⁶
	60	1.83×10 ⁻³	1.23×10 ⁻⁶
2	20	0.68×10 ⁻³	1.37×10 ⁻⁶
	40	1.25×10 ⁻³	1.26×10 ⁻⁶
	60	1.73×10 ⁻³	1.16×10 ⁻⁶
3	20	0.52×10 ⁻³	1.05×10 ⁻⁶
	40	1.01×10 ⁻³	1.02×10 ⁻⁶
	60	1.44×10 ⁻³	0.96×10 ⁻⁶
4	20	0.79×10 ⁻³	1.59×10 ⁻⁶
	40	1.65×10 ⁻³	1.66×10 ⁻⁶
	60	2.40×10 ⁻³	1.61×10 ⁻⁶
5	20	0.86×10 ⁻³	1.73×10 ⁻⁶
	40	1.70×10 ⁻³	1.71×10 ⁻⁶
	60	2.53×10 ⁻³	1.70×10 ⁻⁶
6	20	1.07×10 ⁻³	2.15×10 ⁻⁶
	40	2.12×10 ⁻³	2.13×10 ⁻⁶
	60	3.02×10 ⁻³	2.02×10 ⁻⁶

图 7 所示为试样在不同时间内的磨损率,通过表 3 和图 7 可以清楚地看出,随着时间的延长,试

样的磨损量均不断增大,但是磨损率却略微下降。这是由于材料逐步进入稳定磨损阶段,单位时间内的磨损量不断减少并达到稳定,因此其磨损率不断降低,最终稳定在一个范围内。相同磨损时间下,激光淬火试样均比未淬火试样的磨损率小。这说明未淬火试样表面硬度低,随着摩擦磨损的进行,其表面的材料被石英砂粒磨削脱落,耐磨性较差;而淬火后的试样表面由于形成了组织细密的马氏体,耐磨性被提高。3[#]试样的磨损率最小,即当激光功率为 2500 W、扫描速度为 17 mm/s、淬火带间距为 1 mm 时试样的耐磨性最好。这主要是因为当间距过大或过小时,中间的软带会使材料表面产生“搓衣板”效应,从而阻碍了摩擦副之间磨粒的流出,造成进一步的磨损,从而磨损率变大。

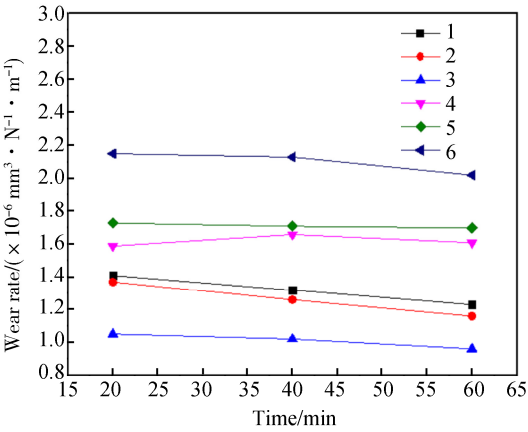


图 7 试样磨损率曲线图
Fig.7 The curves of wear rate at different times

3 结论

- 1) 与基体相比,激光淬火后试样淬硬层硬度显著提高,最高硬度出现在次表层,可达 1105.7HV。
- 2) 激光淬火后材料由表及里存在三层组织结构,淬硬层组织被细化。
- 3) 同等试验条件下,当摩擦磨损试验达到稳定状态时,淬火后的试样表面摩擦系数均比未淬火的低。当淬火带间距为 1 mm 时摩擦系数最小,其值为 0.3 左右,而未淬火的试样表面摩擦系数高达 0.65。
- 4) 相同磨损时间下,激光淬火试样均比未淬火试样的磨损率小,当淬火带间距为 1 mm 时,磨损率最小,耐磨性最佳。

参考文献:

[1] 苑会娟,郭建英,苏子美,等. 国产钻井泥浆泵缸套活塞摩擦副可靠性研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(11): 1425—1430.
YUAN Hui-juan, GUO Jian-ying, SU Zi-mei, et al. Re-

- search on Reliability of Domestic Drilling Mud Pump Piston-cylinder Liner Friction Pair[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(11): 1425—1430.
- [2] 赵辉. 影响泥浆泵缸套使用寿命的因素[J]. 机械, 2011(s1): 158—159.
- ZHAO Hui. Factors that Affect the Service Life of Cylinder[J]. Machinery, 2011(s1): 158—159.
- [3] RUBAHN H G. Laser Applications in Surface Science and Technology[J]. Optics&Lasers in Engineering, 1999 (31): 529—530.
- [4] EIBATAHGY A M, RAMADAN R A, MOUSSA A R. Laser Surface Hardening of Tool Steels—Experimental and Numerical Analysis[J]. Surface Engineered Materials and Advanced Technology, 2013, 3(2): 146—153.
- [5] XU Guang, WANG Tao, ZHU He-yuan, et al. Generation of the Cascaded Fifth-order Nonlinear Phase Shifts with Femtosecond Pulse[J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(7): 417—419.
- [6] 吴健. 金属材料的激光相变硬化机理及其工艺参数优化[J]. 热加工工艺, 2004(7): 57—59.
- WU Jian. Mechanism of Metal's Laser Transformation Hardening and Optimum of Laser Technical Parameters[J]. Hot Working Technology, 2004(7): 57—59.
- [7] LI Rui-feng, JIN Ya-juan, LI Zhu-guo, et al. A Comparative Study of High-power Diode Laser and CO₂ Laser Surface Hardening of AISI 1045 Steel[J]. Materials Engineering and Performance, 2014, 23(9): 3085—3091.
- [8] 罗玉梅. 激光淬火工艺的现状及应用[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2004, 1(3): 49—51.
- LUO Yu-mei. Reality and Application of Laser Quenching Technique[J]. Journal of Shaoyang University(Natural Sciences), 2004, 1(3): 49—51.
- [9] XU G, WANG T, ZHU H, et al. Generation of the Cascaded Fifth-order Nonlinear Phase Shifts with Femtosecond Pulse[J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(7): 417—419.
- [10] KATSAMAS A I, HAIDEMENOPOULOS G N. Laser-beam Carburizing of Low-alloy Steels[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 139(2): 183—191.
- [11] PELLIZZARI M, FLORA M G D. Influence of Laser Hardening on the Tribological Properties of Forged Steel for Hot Rolls[J]. Wear, 2011, 271(9): 2402—2411.
- [12] 汪孟春, 杨永茂, 王续宝, 等. 泥浆泵缸套新材料的研究[J]. 钢铁, 2005(6): 57—61.
- WANG Meng-chun, YANG Yong-mao, WANG Xu-bao, et al. Study on New Material Used to Mud-pump Cylinder[J]. Iron&Steel, 2005(6): 57—61.
- [13] 周玉海, 刘超, 徐志明, 等. 新型耐磨钻井泵缸套试验研究[J]. 石油矿场机械, 2012, 40(11): 20—23.
- ZHOU Yu-hai, LIU Chao, XU Zhi-ming, et al. Testing Study of New Drilling Pump Cylinder Linger Oil Field Equipment[J]. Oil Field Equipment, 2012, 40(11): 20—23.
- [14] 赵新, 金杰. 激光表面改性技术的研究与发展[J]. 光子·激光, 2000, 11(3): 324—328.
- ZHAO Xin, JIN Jie. Studies and Developments of Laser Surface Modification Technologies[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2000, 11(3): 324—328.
- [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(4): 129—132.
- LI Gang, XIANG Jun, KUANG Jun, et al. Microstructure and Properties of GCr15 Steel Treated by Laser Quenching[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010(4): 129—132.