

表面摩擦磨损与润滑

激光离散淬火对球墨铸铁磨损与损伤性能的影响

苏超然¹, 吕长乐¹, 师陆冰¹, 张勇强², 王文健¹, 刘启跃¹

(1.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031;
2.成都时代瑞通科技有限公司, 成都 610300)

摘要: **目的** 利用不同激光表面离散淬火方式, 改善球墨铸铁材料摩擦磨损性能。**方法** 采用 Nd:YAG 激光器对球墨铸铁圆盘试样表面分别进行激光环形淬火、条形淬火、点状淬火以及全淬处理, 分析处理后球墨铸铁材料的显微组织结构、表面硬度分布状况, 利用销-盘式摩擦磨损试验机研究不同激光淬火方式下球墨铸铁磨损与损伤的情况。**结果** 激光离散淬火球墨铸铁后, 其表面生成马氏体白层, 表面硬度提高约 62.7%~93.8%, 不同的处理方式硬化层深度相近, 约 55 μm 。球墨铸铁试样经过激光离散淬火处理后, 磨损量降低 99%以上。未处理试样表面出现破坏性材料去除, 损伤严重; 激光离散淬火试样表面损伤轻微, 以小块剥落与疲劳损伤为主。处理后的球墨铸铁材料抵抗裂纹萌生的能力增强, 剖面裂纹的长度明显减小。**结论** 球墨铸铁材料经过不同方式的激光表面离散淬火处理后, 表面硬度都得到显著增强, 耐磨性能和抗损伤能力明显改善。不同的淬火方式改善效果不同, 激光点状淬火效果最好, 磨损量小, 且剖面裂纹较小, 不易向材料内部扩展。

关键词: 激光离散淬火; 球墨铸铁; 磨损; 损伤; 裂纹

中图分类号: TG174.444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)11-0085-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.013

Effect of Laser Dispersed Quenching on Wear and Damage Property of Ductile Iron

SU Chao-ran¹, LYU Chang-le¹, SHI Lu-bing¹, ZHANG Yong-qiang², WANG Wen-jian¹, LIU Qi-yue¹

(1.State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2.Chengdu Shidai Ruitong Co., Ltd, Chengdu 610300, China)

ABSTRACT: The work aims to improve friction and wear properties of ductile iron by different laser surface dispersed quenching methods. Nd:YAG laser was applied to perform laser ring quenching, strip quenching, spot quenching and full quenching on the surface of ductile iron disc specimen. The microstructure and surface hardness distribution of the ductile iron materials were analyzed after treated. Pin-Disc friction and wear tester was used to explore the wear and damage of ductile iron by different laser quenching methods. The martensite white layer was formed on the surface of ductile iron after laser dispersed quenching. The surface hardness was increased by about 62.7% to 93.8%, and the depth of the hardening layer by different treatment

收稿日期: 2018-08-09; 修订日期: 2018-10-04

Received: 2018-08-09; **Revised:** 2018-10-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1102601); 国家重点实验室自主研究课题(2018TPL-T02)

Fund: Supported by the National Key R&D Program (2016YFB1102601) and National Key Laboratory Independent Research Project (2018TPL-T02)

作者简介: 苏超然(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: SU Chao-ran (1992—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 王文健(1980—), 男, 博士, 研究员, 主要从事轮轨摩擦学研究。邮箱: wwj527@163.com

Corresponding author: WANG Wen-jian (1980—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: wheel-rail tribology. E-mail: wwj527@163.com

methods was similar, about 55 μm . The wear loss of ductile iron samples was reduced by more than 99% after laser dispersed quenching. Material removed destructively on the surface of untreated sample resulted in severe damage. The surface damage of treated specimens was relatively slight and the dominant form of wear was small spalling and fatigue wear. The ability of ductile iron to resist crack initiation after laser treated was enhanced and the length of profile cracks was obviously reduced. The surface hardness, wear resistance and damage resistance of the ductile iron after laser quenching of different methods have been significantly improved. Different quenching methods have different effects. Laser spot quenching has the best effect and small wear. Cracks in the section are small and difficult to expand to the material.

KEY WORDS: laser dispersed quenching; ductile iron; wear; damage; cracks

球墨铸铁具备强度高、质量轻、自润滑、耐磨性和抗疲劳性能好等综合性能,广泛用于机械行业中载荷大、受力复杂的零件,比如液压柱塞泵缸体、汽车发动机曲轴、轧机轧辊大齿轮、桥式起重机大小滚轮等^[1-2]。天然气压缩机活塞环工作状态复杂,在长期的服役过程中,由于气缸壁磨损过度导致的失效事故时有发生,往往造成严重的经济损失^[3],因此通过提高材料的耐磨性来提高材料的寿命成为了重要的方法。激光淬火处理是材料表面改性的途径之一,与常规淬火相比,具有硬化层均匀、硬度高、变形小、易于控制硬化深度和轨道等优点^[4-7]。目前,已有国内外学者采用激光淬火技术对球墨铸铁进行激光表面淬火,并取得了较好的效果。C. Soriano 等对两种球墨铸铁进行激光表面硬化处理,处理后的两种材料虽然在微观结构、淬火层深度、残余应力上略有差异,但力学性能都得到明显改善^[8]。A. Roy 等通过改变激光淬火参数发现,淬火层深度与激光入射能量成正比,与扫描速度成反比^[9]。冯爱新等对 QT600 球墨铸铁激光淬火后残余应力进行分析,发现处理后材料均为压应力,有利于使用寿命的提高^[10]。骆有东等对球铁曲轴进行激光淬火,曲轴处理前后变形量较小,抗疲劳性能良好^[11]。

虽然国内外学者对激光淬火处理有大量研究,但他们的研究有一定的局限性,激光淬火方式多为离散点状淬火或条形淬火^[12-16],而关于其他激光淬火方式对改善材料性能的效果并没有做进一步的比较分析。因此,文中提出应用不同的激光淬火方式(环形淬火、条形淬火、点状淬火、全淬)处理球墨铸铁材料表面,分析对比不同淬火方式下球墨铸铁试样的差异,通过磨损试验研究经过不同激光淬火方式处理后球墨铸铁的摩擦学性能,以达到最大程度上提高球墨铸铁材料寿命的目的。

1 试验

1.1 试验机及试验参数

磨损试验在自主研发的销-盘式摩擦磨损试验机上进行,试验机主要由伺服电机、扭矩、转速传感器、压力传感器、减震弹簧、加载弹簧、加载手柄等组成,

通过电机带动轮盘试样的旋转,实现与销试样的滑动摩擦。垂向载荷通过加载手柄加载,用压力传感器测量(精度为 0.1 N)。上下试样的相对位置和结构尺寸如图 1 所示。试验参数:垂向载荷为 150 N,下试样转速为 60 r/min,循环次数为 3600 转。试样在常温干态下进行。试验前后清洗并称取试样质量,通过质量差计算磨损量。用光学显微镜(OM, OLYMPUS BX60M, Japan)分析试样微观组织形貌及损伤情况。

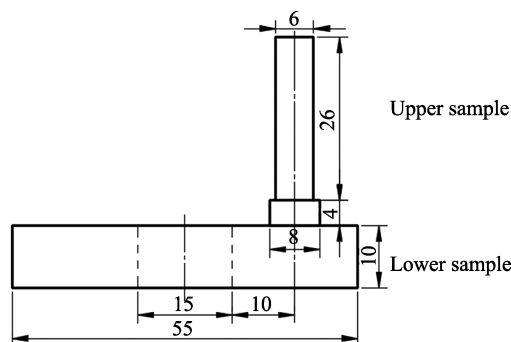


图 1 试样尺寸
Fig.1 Size of specimens

1.2 试样制备

上试样为天然气压缩机气缸体合金铸铁材料,下试样为 QT900-2 球墨铸铁材料,实验材料化学成分见表 1。图 2 为球墨铸铁试样金相组织,可以看出,碳元素的存在形式是球状石墨,基体组织均匀,主要由珠光体、贝氏体和球状石墨组成。

表 1 试样化学成分
Tab.1 Chemical composition of sample

Material	wt%				
	C	Si	Mn	P	S
Ductile iron	0.37~3.9	1.8~2.1	0.3~0.6	≤0.07	≤0.03
Alloy cast iron	2.9~3.2	1.7~1.9	0.9~1.1	<0.13	<0.11

利用激光淬火装置(Nd:YAG 激光器)对球墨铸铁试样表面进行淬火处理。激光工艺参数:激光输出功率为 750 W,扫描速度为 6 mm/s。激光淬火采用四种不同的处理方式:环形淬火、条形淬火、点状淬火、全淬。如图 3 所示,激光表面环形淬火区域为五条同

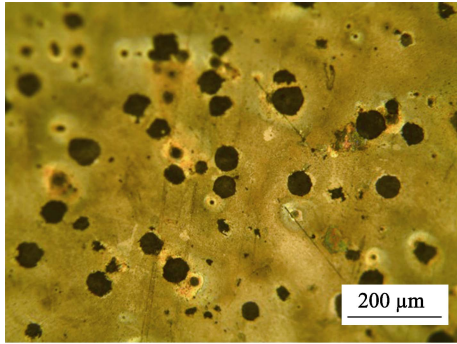


图 2 球墨铸铁试样显微组织
Fig.2 Microstructure of ductile iron sample



图 3 激光淬火球墨铸铁表面形貌
Fig.3 Surface morphology of laser quenching ductile iron: a) ring quenching; b) strip quenching; c) point quenching; d) full quenching

圆心的淬火圆环；激光表面条形淬火区域为并排的发射状条形；激光表面点状淬火区域为离散的淬火点，按规律分布在圆环中；激光表面全淬火区域为 8 条相邻的圆环。

2 结果及分析

2.1 显微组织

图 4 为激光淬火球墨铸铁试样金相组织。从图 4 中可发现，球墨铸铁材料经过激光淬火处理后，存在一定厚度的淬火层。淬火层有明显的晶粒细化，组织为均匀致密的马氏体组织，基体材料组织为珠光体和贝氏体以及均匀分布的球状石墨。不同激光淬火方式下，球墨铸铁微观组织没有明显差异，硬化区域显微组织主要由马氏体、残余奥氏体以及球状石墨组成。

2.2 试样硬度

图 5 为球墨铸铁试样处理前后的显微硬度。从图 5a 中可以看出，激光淬火处理后的球墨铸铁试样的表面硬度有明显提高，环形淬火提高了 93.8%，条形淬火提高了 78.6%，点状淬火提高了 88.1%，全淬提高了 62.7%。不同的激光淬火处理方式，表面硬度值有略微差异。这是因为激光淬火处理是一个快速加热和快速冷却的过程：当激光照射工件表面时，工件表面迅速升温至相变温度之上、熔点之下，材料表层发生固态相变；当激光束离开工件表面时，表层材料快速冷却，实现自冷淬火效果。在激光作用下，碳在奥氏体中来不及均匀化，形成的马氏体中含碳量相对较高，因此整个淬火区硬度较高^[7]。而由于全淬处理

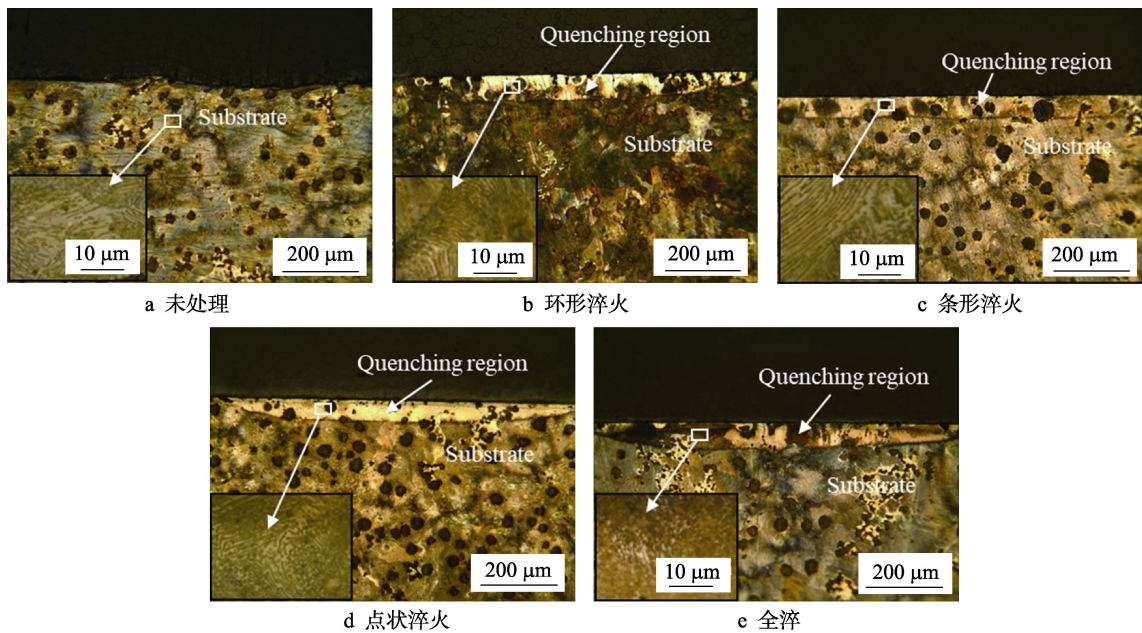


图 4 激光淬火球墨铸铁显微组织
Fig.4 Microstructure of laser quenching ductile iron: a) untreated; b) ring quenching; c) strip quenching; d) point quenching; e) full quenching

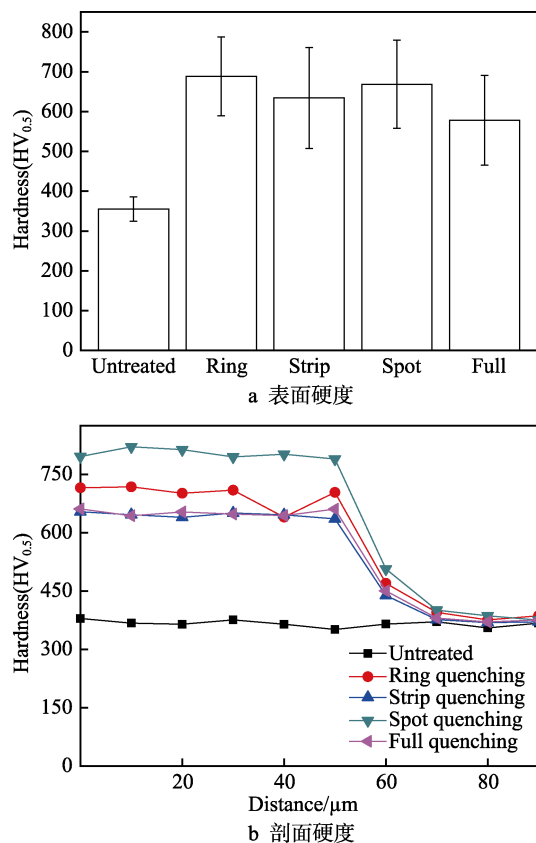


图5 球墨铸铁试样硬度
Fig.5 Hardness of ductile iron: a) surface hardness;
b) cross-section hardness

存在激光搭接区,造成回火软化,因此表面硬度相对较低。从处理后的球墨铸铁试样剖面硬度结果(图5b)可知,淬火层内剖面硬度值变化不大,且近似于表面硬度值。随着剖面深度增加到一定程度后,试样硬度值会迅速降低至基体硬度。不同激光淬火处理方式的淬火层深度接近,约为55 μm。

2.3 磨损量

图6为球墨铸铁试样的磨损量,可以看出,经过不同方式激光淬火后,球墨铸铁试样的磨损量均有大幅下降,磨损量降低99%以上。激光淬火处理

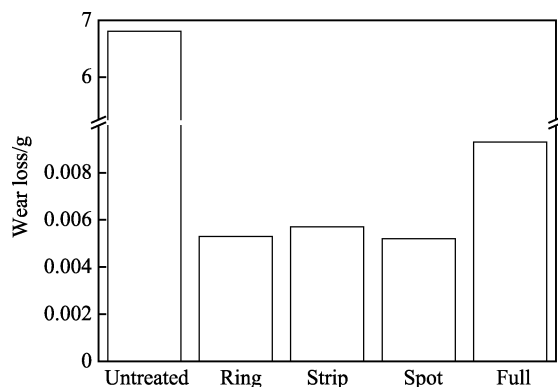


图6 不同淬火方式球墨铸铁磨损量
Fig.6 Ductile iron wear by different quenching methods

后,球墨铸铁材料中的珠光体组织转变为高硬度的马氏体组织,提高了材料的硬度和强度。因此处理后的球墨铸铁试样磨损量大幅降低,耐磨性显著增强。不同的淬火处理方式,对球墨铸铁耐磨性的提高程度有一定差异。淬火对减磨的提升效果由强至弱依次是点状淬火、环形淬火、条形淬火以及全淬。进行激光点状淬火处理的球墨铸铁磨损量比全淬处理减少约为44.1%。环形、条形、点状三种淬火方式减磨效果相当。

2.4 损伤行为

图7为不同激光淬火处理方式的球墨铸铁试样表面损伤形貌。当摩擦副相对滑动时,球墨铸铁圆盘试样表层产生塑性变形,并不断累积,进而产生裂纹。当裂纹扩展到临界长度后,在裂纹与表面之间的材料将以片状磨屑的形式剥落,形成剥落损伤^[19]。未处理球墨铸铁试样表面粗糙,且磨出了一定深度的凹槽,材料去除量较大,表面损伤严重;与其对磨的销试样表面粗糙度较大,表层出现严重的剥落去除,出现大面积的剥落坑群,同时伴随着一定的粘着磨损(图7a)。激光环形淬火球墨铸铁试样表面较光滑,磨损主要来自未淬火区的环槽上,未处理区有轻微划痕,淬火区表面损伤减轻,存在少量的点蚀坑,其磨损机制主要为轻微的疲劳磨损;与之对磨的销试样表面粗糙度较低,表面有轻微的磨痕,磨损机制主要为疲劳磨损(图7b)。激光条形淬火球墨铸铁试样表面有明显磨痕,且穿过淬火区,在淬火区上形成划伤,但是由于圆盘和销试样相对运动的方向与淬火条的方向相互垂直,当未处理区出现一定磨损后,淬火区由于自身的高硬度,不易磨损,对未处理区起到了保护作用,因此总的磨损量较小;与之对磨的销试样表面磨痕较多,有少量的剥落坑(图7c)。激光点状淬火球墨铸铁试样未处理区出现明显划痕,淬火区表现为点蚀和轻微的剥落损伤,由于淬火区不易磨损,因此磨损主要来自淬火点之间的基体区域;与之对磨的销试样较为光滑,表面存在轻微磨痕(图7d)。激光全淬球墨铸铁试样表面光滑,存在少量的剥落坑,磨损机制主要为疲劳磨损,相邻两条激光淬火区的搭接部分由于会出现回火软化作用,因此磨损量相对较大,磨损主要来自激光搭接区;与之对磨的销试样表面光滑,损伤轻微,主要表现为小剥落坑(图7e)。

图8为球墨铸铁试样OM裂纹形貌。未处理球墨铸铁试样表层存在较大裂纹,且裂纹扩展到一定深度后又向材料表层扩展,进而形成较大的材料去除(图8a);环形淬火试样裂纹较小,裂纹以近90°的角度向材料内部扩展(图8b);条形淬火试样剖面有较小裂纹,且在材料近表面扩展(图8c);点状淬火试样裂纹扩展到一定深度后折回材料表面,形成了剥落坑(图8d);全淬试样剖面裂纹细小,向材料内部

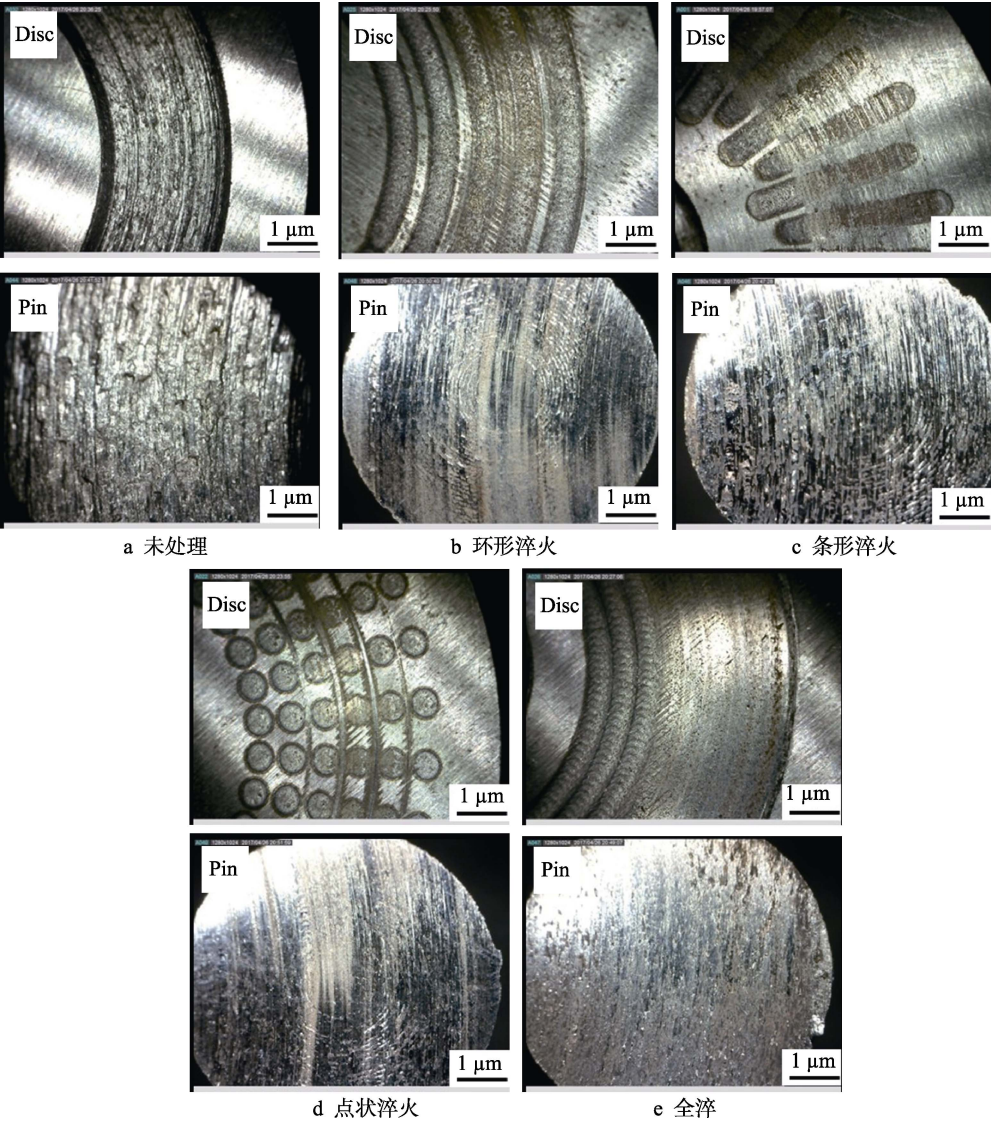


图 7 试样表面磨痕损伤形貌
Fig.7 Wear surface morphology of the sample: a) untreated; b) ring quenching;
c) strip quenching; d) point quenching; e) full quenching

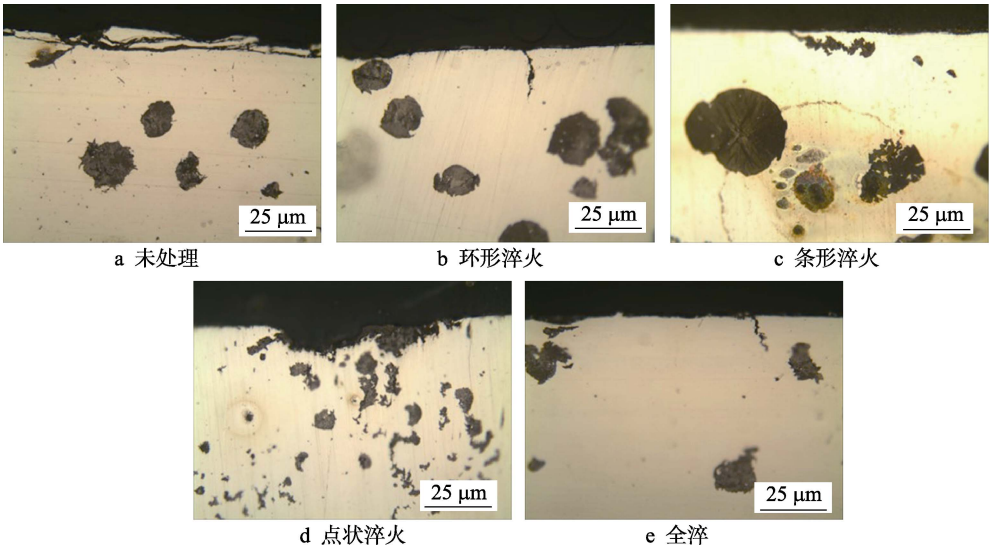


图 8 试样剖面裂纹
Fig.8 Section crack of sample: a) untreated; b) ring quenching; c) strip quenching; d) point quenching; e) full quenching

扩展(图 8e)。由于向材料内部扩展的裂纹不易发现和去除,当累积到一定程度时,会对材料造成更加严重的破坏,因此应当尽量避免此类裂纹的萌生。

综上所述,激光淬火处理后,试样显微组织细化,形成致密的马氏体组织,表面硬度和强度提高,材料的耐磨性增强,摩擦过程中表面损伤相对轻微。此外,经过激光淬火处理后,球墨铸铁试样具有较好的抗表面损伤能力。采用不同的激光处理方式,材料的磨损量和损伤形态均存在一定的差异。激光点状淬火后的磨损量最小,激光条形淬火和激光点状淬火后表面损伤轻微,剖面裂纹较小,且不易向材料内部扩展。

3 结论

1) 不同激光淬火方式处理球墨铸铁试样后均得到一定厚度的马氏体白层,从而使材料表面硬度得到不同程度的提高,其表面硬度增加 62.7%~93.8%。对表面硬度提高的程度由高到低依次是环形淬火、点状淬火、条形淬火和全淬。

2) 经过不同激光淬火方式处理后,球墨铸铁试样的磨损量均降低 99%以上,耐磨性明显增加。其中减磨效果最好的是点状淬火,处理后材料的磨损形式由破坏性的材料去除转变为小块剥落损伤与轻微的疲劳磨损。激光淬火处理对球墨铸铁组织的抗损伤能力具有明显的改善作用,使其裂纹得到了较好的抑制。

参考文献:

- [1] 罗玉梅,樊湘芳. 球墨铸铁 QT600-3 激光淬火工艺研究[J]. 热加工工艺, 2005(3): 50-51.
LUO Yu-mei, FAN Xiang-fang. Study of nodular cast iron QT600-3 laser quenching technique[J]. Hot working technology, 2005(3): 50-51.
- [2] ASI O. Failure analysis of a crankshaft made from ductile cast iron[J]. Engineering failure analysis, 2006(13): 1260-1267.
- [3] 杨兴华,汤小东,薛茂全. 球墨铸铁曲轴表面强化处理技术[J]. 机械设计与制造, 2011(1): 151-153.
YANG Xing-hua, TANG Xiao-dong, XUE Mao-quan. The surface strengthening techniques of spheroidal graphite cast iron crankshaft[J]. Machinery design & manufacture, 2011(1): 151-153.
- [4] 尹晨. QT600 球墨铸铁激光淬火相变层机械性能的研究[J]. 激光杂志, 2006, 27(4): 74-75.
YIN Chen. Study on mechanical properties of phase transformation layer in QT600 nodular cast iron by CO₂ laser quench[J]. Laser journal, 2006, 27(4): 74-75.
- [5] ZHENG Yin-lan, HU Qian-wu, LI Chong-yang, et al. A novel laser surface compositing by selective laser quenching to enhance railway service life[J]. Tribology international, 2017(106): 46-54.
- [6] 王玉玲,惠英龙,姚翠翠. 齿轮激光淬火研究[J]. 表面技术, 2014, 43(5): 109-117.
WANG Yu-ling, HUI Ying-long, YAO Cui-cui. Research progress of gear laser quenching[J]. Surface technology, 2014, 43(5): 109-117.
- [7] 华希俊,郝静文,王蓉,等. 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[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 215-220.
HUA Xi-jun, HAO Jing-wen, WANG Rong, et al. Laser quenching technology and friction & wear properties of mud pump high chromium iron material[J]. Surface technology, 2017, 46(6): 215-220.
- [8] SORIANO C, LEUNDA J, LAMBARRI J, et al. Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades[J]. Applied surface science, 2011(257): 7101-7106.
- [9] ROY A, MANNA I. Laser surface engineering to improve wear resistance of austempered ductile iron[J]. Materials science and engineering, 2001(297): 85-93.
- [10] 冯爱新,孔德军,张永康,等. QT600 球墨铸铁激光淬火相变层残余应力测试研究[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(2): 79-82.
FENG Ai-xin, KONG De-jun, ZHANG Yong-kang, et al. Research on residual stress of laser quenched phase change layer of QT600 ductile iron[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2006, 27(2): 79-82.
- [11] 骆有东. 球墨铸铁曲轴激光淬火试验研究[J]. 激光杂志, 2009, 30(3): 55-56.
LUO You-dong. Study on the experiment of laser quenching the ductile iron crankshaft[J]. Laser journal, 2009, 30(3): 55-56.
- [12] GUO Qing-chun, ZHOU Hong, WANG Cheng-tao, et al. Effect of medium on friction and wear properties of compacted graphite cast iron processed by biomimetic coupling laser remelting process[J]. Applied surface science, 2009 (255): 6233-6273.
- [13] ZHOU Hong, SU Na, SHAN Hong-yu, et al. Bio-inspired wearable characteristic surface: Wear behavior of cast iron with biomimetic units processed by laser[J]. Science direct, 2007(253): 9513-9520.
- [14] HAN Zhi-wu, MU Zheng-zhi, YIN Wei, et al. Biomimetic multifunctional surfaces inspired from animals[J]. Advances in colloid and interface science, 2016(234): 27-50.
- [15] CHEN L, ZHOU H, ZHAO Y, et al. Abrasive particle wear behaviors of several die steels with non-smooth surfaces [J]. Journal of materials processing technology, 2017(190): 211-216.
- [16] PANG Zuo-bo, ZHOU Hong, CHANG Fang, et al. Effect of the microhardness difference between base metal and bionic coupling unit on wear resistance of gray cast iron[J]. Optics & laser technology, 2015(75): 151-156.
- [17] SUN P. The delamination theory of wear[J]. Wear, 1973(25): 111-124.