

# 激光微造型球墨铸铁表面的摩擦学特性

周建忠 王建军 冯 旭 孟宪凯 徐家乐

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 采用激光喷丸在球墨铸铁 QT600 表面加工出具有不同凹坑中心距的微凹坑造型阵列, 研究了激光微造型对其表面摩擦磨损性能的影响。仪器测试结果表明, 相比于未造型试样, 激光喷丸在球墨铸铁表面引入有益的残余压应力, 磨损量明显降低, 干摩擦条件下降幅达 7.9%。微造型试样在干摩擦条件下的表面摩擦系数明显提高, 增幅最大可达 12.9%, 而湿摩擦条件下则明显降低, 降幅最高可达 11.8%; 同时微造型试样表面磨损程度明显轻于未造型试样表面, 氧化物也明显减少。

**关键词** 激光技术; 激光喷丸; 残余应力; 摩擦系数; 磨痕形貌

**中图分类号** TN249

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0602007

## Tribological Behavior of Laser Textured Nodular Cast Iron Surface

Zhou Jianzhong Wang Jianjun Feng Xu Meng Xiankai Xu Jiale

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

**Abstract** The micro-dent pattern with different center distances was fabricated on nodular cast iron QT600 specimens by laser peening, and the effect of laser texturing on its surface friction and wear properties was investigated. The results show that the beneficial compressive residual stress was introduced on nodular cast iron QT600 surface by laser peening, and the wear mass loss is significantly reduced by 7.9% under dry friction conditions. Compared with that of the untextured specimens, the friction coefficient of the textured surface increases by 12.9% under dry conditions, and decreases by 11.8% under lubrication conditions. Meanwhile, the surface wear of the textured specimens is obviously weaker than that of the untextured ones, and the oxide content also decreases obviously.

**Key words** laser technique; laser peening; residual stress; friction coefficient; worn morphology

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 160.3900; 220.4610

## 1 引 言

球墨铸铁因其优异的可加工性和耐热性广泛应用于机械、车辆等领域中的关键摩擦副, 如内燃机的曲轴、凸轮轴等, 因此, 其表面需具备一定的减摩抗磨性能<sup>[1-2]</sup>。为了保证汽车制动过程的安全与稳定, 球墨铸铁制动盘表面必须拥有较高且稳定的摩擦系数<sup>[3-4]</sup>。目前, 激光表面织构、激光熔覆和激光表面合金化技术被引入球墨铸铁的表面改性中<sup>[5-7]</sup>, 这些技术虽然一定程度上增强了材料的表面硬度和耐磨性, 但加工热效应给材料带来了有害的残余拉应力, 大大减弱了零件的抗疲劳强度, 缩短了零件的使用寿命。作为激光表面微造型的一种方法, 激光喷丸是利用激光冲击诱导的力效应而非热效应<sup>[8-9]</sup>。基于激光喷丸技术在材料表面开展的微凹坑造型, 既能克服激光表面织构的缺点, 又能继承激光喷丸强化的优点<sup>[10]</sup>, 从而提高金属材料的抗疲劳性能, 改善金属材料表面摩擦性能。但是, 激光喷丸可诱导残余压应力, 使得机械部件的疲劳寿命延长, 这促使人们利用激光喷丸手段在材料表面进行合适的微造型, 以达到所需要的表面摩擦性能<sup>[11-13]</sup>。

**收稿日期:** 2016-01-18; **收到修改稿日期:** 2016-03-03

**基金项目:** 国家自然科学基金(51575247)、江苏省研究生创新项目(1011110008)

**作者简介:** 王建军(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光微造型球墨铸铁表面改性方面的研究。

E-mail: 18252584852@163.com

**导师简介:** 周建忠(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事先进激光制造技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

本文以球墨铸铁 QT600 为研究对象,采用激光喷丸的方法对其表面进行微造型,并通过旋转滑动摩擦磨损试验、扫描电子显微镜(SEM)等方法分析激光喷丸微造型后不同凹坑中心距对球墨铸铁表面摩擦磨损性能的影响。

## 2 激光喷丸原理

激光喷丸(LP)技术是利用短脉冲(ns 级)的强激光( $\text{GW}/\text{cm}^2$  级),冲击分别涂覆能量吸收层和等离子体约束层的材料表面。当高能量的激光束辐照到材料表面,吸收层蒸发并形成高密度等离子体。汽化的吸收层吸收了激光束的高能热量,保护了靶材,使其免受热效应的不良影响。同时,由于约束层的存在使得膨胀的等离子体被束缚在靶材和约束层之间,从而产生高幅冲击波压力,该冲击波的压力值在 GPa 量级。当压力值超过材料本身的动态屈服强度时,近表面材料产生屈服和塑性变形,进而在材料表面形成具有一定深度的微凹坑,激光喷丸原理如图 1 所示。

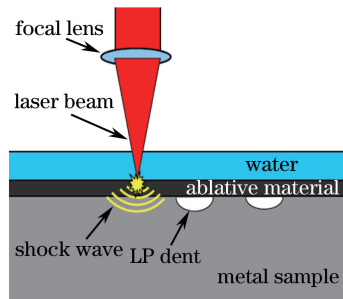


图 1 激光喷丸原理  
Fig. 1 Schematic of LP

## 3 试 验

### 3.1 微造型材料与设备

试验材料为球墨铸铁 QT600,将其加工成  $\text{Ø}30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  (直径 $\times$ 厚度)的圆盘状。材料的化学成分如表 1 所示,其中 RE 代表稀土元素。用不同粗糙度 SiC 砂纸(型号:500 # -1200 #)将试样表面磨光(粗糙度  $0.05 \mu\text{m}$ ),随后用酒精清洗干净。

表 1 QT600 化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of QT600 (mass fraction, %)

Material	C	Si	Mg	RE	Fe
QT600	3.55~3.85	2.34~2.86	0.02~0.04	0.03~0.05	94.1~93.2

激光喷丸试验采用德国 Innolas 公司的 Spit Light2000 型脉冲 Nd:YAG 固体激光器,对试样进行单次激光喷丸处理,激光器波长为 1064 nm、频率为 1 Hz、脉宽为 10 ns、激光能量为 1.5 J、光斑直径为 1 mm,图 2 所示为所用试验装置。试验前先在试样表面涂覆厚度为  $80 \mu\text{m}$  的铝箔作为吸收层,试验过程中以流动水作为约束层,约束层厚度为 2.5~3 mm,Morales 等<sup>[14]</sup>的研究表明厚度为  $300 \mu\text{m}$  以上的水约束层能达到很

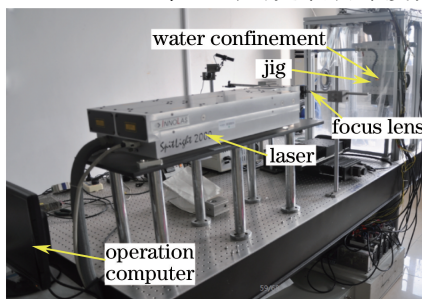


图 2 激光喷丸试验装置  
Fig. 2 Experimental setup of LP

好的等离子体约束效果。

### 3.2 残余应力测试

采用 X-350A 型 X 射线衍射仪对激光喷丸处理前后试样进行残余应力测试, 试验方法选用侧倾固定  $\psi$  法( $\psi$  为 X 射线入射角, 即入射线与试样表面法线的夹角), 定峰方法为交相关法。测试中, 选用靶材为钴靶  $\text{CrK}\alpha$  的特征辐射, 应力测试衍射晶面型号为 211, 侧倾  $\psi$  角选取  $0^\circ$ 、 $24^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $45^\circ$ , 应力常数为  $-318 \text{ MPa}/(^{\circ})$ ,  $2\theta$  扫描起始角度和终止角度分别为  $161^\circ$  和  $152^\circ$  ( $\theta$  为衍射光束和衍射面之间的夹角), 设定  $2\theta$  扫描步距为  $0.1^\circ$ , 计数时间为  $0.5 \text{ s}$ , X 光管电压和电流分别为  $20.0 \text{ kV}$  和  $5.0 \text{ mA}$ , 准直管直径  $1 \text{ mm}$ 。测试时, 选取 3 个不同点进行测试, 然后取平均值为最终残余应力值, 应力测试方向为纵向。

### 3.3 摩擦磨损试验

测试前对所有试样进行超声波清洗。如图 3 所示, 使用球盘式摩擦磨损试验机(型号: UMT-2), 分别在干摩擦和润滑条件下(润滑油: 美孚 SN5W-30)对不同微造型参数试样进行摩擦磨损试验。试样采用硬度  $750 \text{ HV}$  的 GCr15 钢球, 球与盘的旋转轴中心偏距  $3 \text{ mm}$ , 加载后与盘试样进行旋转摩擦, 载荷方向与旋转轴方向平行。钢球直径为  $9.5 \text{ mm}$ , 表面粗糙度为  $0.05 \mu\text{m}$ , 载荷和转速分别为  $10 \text{ N}$ 、 $200 \text{ r/min}$ (相当于  $0.06 \text{ m/s}$ ), 磨痕直径为  $6 \text{ mm}$ , 测试时间为  $20 \text{ min}$ , 记录摩擦系数随时间的变化。在每一个测试条件下对三个不同试样重复进行摩擦磨损试验, 并获取平均摩擦系数。将磨损前后的试样放置于丙酮容器中并用超声波清洗  $20 \text{ min}$  后吹干, 减少润滑油对磨损重量的影响, 使用感量为  $0.1 \text{ mg}$  的分析天平称量磨损前后的质量, 从而间接得到磨损量<sup>[15]</sup>。每组试样重复三次, 取其算术平均值为试验结果。最后用 SEM 观察磨痕表面的微观形貌, 并研究其磨损机理。

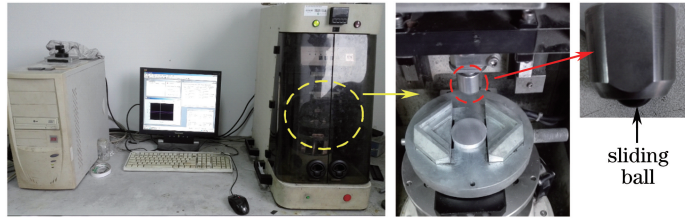


图 3 UMT-2 摩擦试验机  
Fig. 3 UMT-2 microtribometer

## 4 结果和分析

### 4.1 凹坑形貌

图 4 所示为光滑试样和具有不同中心距的微造型试样。使用 KEYENCE VHX-1000 超景深显微镜观察图 4 中黄色方框内单个微凹坑的二维形貌, 如图 5 所示, 凹坑直径  $948.6 \mu\text{m}$ 、深  $49.48 \mu\text{m}$ 。与去除材料使凹坑边界断裂的激光表面织构相比, 激光喷丸制备的微凹坑阵列是在机械作用力下产生塑性变形, 从而使凹坑的表面形貌具有很好的连续性<sup>[10]</sup>。由于激光冲击波的压力呈高斯分布, 使得微凹坑与基体表面的过渡比较平缓, 分界不明显, 因此存在一定的误差。凹坑内部和四周没有出现烧蚀现象, 是由于汽化的吸收层吸收了激光束的高能热量, 使基体免受热效应的不良影响。

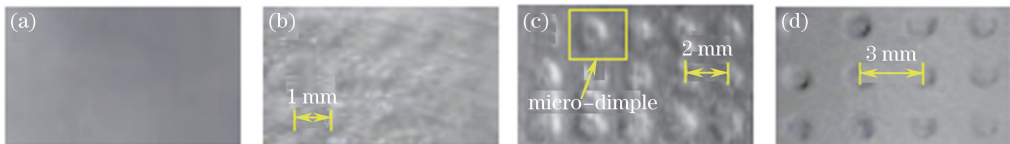


图 4 表面不同中心距微凹坑阵列。(a) 光滑试样; (b) 1.0 mm; (c) 2.0 mm; (d) 3.0 mm

Fig. 4 Surface topography of micro-dimple arrays with different center distance.

(a) Smooth; (b) 1.0 mm; (c) 2.0 mm; (d) 3.0 mm

### 4.2 微造型前后表面残余应力分析

Shepard<sup>[16]</sup>在宏观上对激光喷丸在材料表面诱导产生的残余压应力进行了研究, 研究表明激光喷丸增

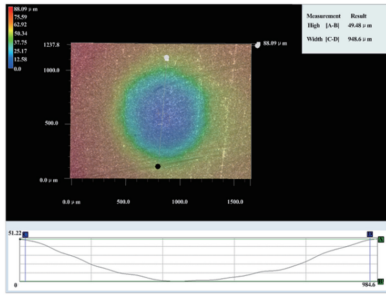


图 5 微凹坑形貌图

Fig. 5 Surface topography of micro-dimples

加了材料表面残余压应力,并且增大了塑性变形深度。不同能量下未造型表面与微造型表面残余压应力测试结果分析图如图 6 所示。材料表面凹坑中心距为 1 mm 的表面残余压应力明显高于材料表面凹坑中心距为 2 mm 的表面残余压应力,最大可达 -445 MPa。这是由于相比于凹坑中心距为 2 mm 的微造型表面冲击区域,凹坑中心距为 1 mm 的表面冲击区域较密集,激光喷丸区域完整。已有研究表明表面残余压应力的增加有助于提高材料表面的耐磨性<sup>[17]</sup>。

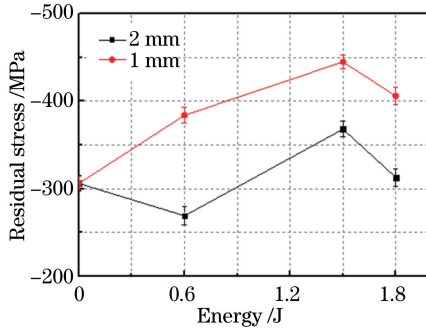


图 6 不同凹坑中心距表面残余压应力随激光能量的变化图

Fig. 6 Surface residual stress versus laser energy for different dimple center distances

### 4.3 不同凹坑中心距对摩擦系数的影响

在干摩擦和润滑条件下,不同凹坑中心距材料表面的摩擦系数如图 7 所示。在干摩擦条件下,所有微造型试样的摩擦系数均高于未造型试样表面摩擦系数,这是由于微凹坑造型使球墨铸铁表面的粗糙度增加,摩擦表面的实际接触面积减小,从而使接触

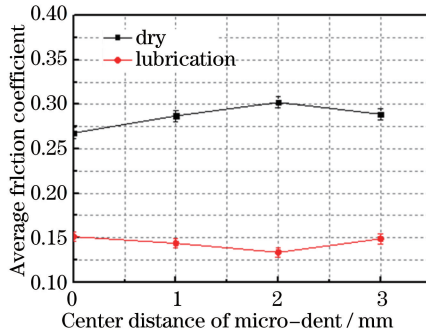


图 7 不同工况下对应不同凹坑中心距的材料表面摩擦系数

Fig. 7 Friction coefficients for different dimple center distances under dry and lubricating conditions

应力有所增大。其中凹坑中心距为 2 mm 的试样表面摩擦系数最高,凹坑中心距为 1 mm 和 3 mm 的试样表面摩擦系数则无明显差异。在润滑条件下,所有微造型试样的摩擦系数均明显低于未造型试样,其中凹坑中心距为 2 mm 的试样表面摩擦系数最低,这是由于球墨铸铁表面的微凹坑起到储存润滑油的作用,增强了流体动压润滑的效果,从而使得接触应力降低,同时微凹坑中存储部分磨屑,减少了由磨屑引起的磨损,

这与华希俊等<sup>[18]</sup>关于激光微造型具有贮油、积屑和动压润滑作用的研究发现一致。

#### 4.4 不同凹坑中心距对磨损量的影响

在干摩擦和润滑条件下,不同凹坑中心距球墨铸铁表面的磨损量如图 8 所示。在干摩擦条件下,微造型试样的磨损量均低于未造型试样的磨损量,其中凹坑中心距为 1 mm 的试样表面磨损量最小。这主要是因为激光喷丸过程中冲击波的力效应在材料表面引入了残余压应力,改善了表面的力学性能,有效提高了材料表面的耐磨性<sup>[19]</sup>。在润滑条件下,所有微造型试样的磨损量都低于未造型试样,其中凹坑中心距为 2 mm 的试样表面磨损量最低,这是因为激光喷丸强化了试样表层,提高了表面硬度,促使耐磨性能得以提高;同时激光微造型后球墨铸铁表面的微凹坑在摩擦磨损过程中释放出的润滑油有效隔离摩擦副,从而达到减摩的效果<sup>[19]</sup>,有效降低了磨损量。

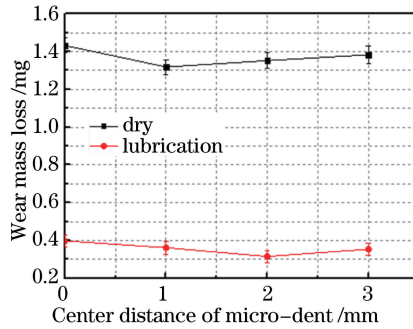


图 8 不同工况下对应于不同凹坑中心距的材料表面磨损量

Fig. 8 Wear mass loss for different dimple center distances under dry and lubricating conditions

#### 4.5 干摩擦磨损表面磨痕形貌分析

球墨铸铁通常用于工况复杂、条件恶劣且对耐磨性要求较高的机械零部件中,因此,提高球墨铸铁表面耐磨性显得至关重要。图 9(a)、(b)分别给出常温下,未造型试样表面与微造型试样表面的干摩擦磨损磨痕形貌,并用能谱仪分析了部分区域的元素组成。所有显微图片上基本都会出现 3 种典型形貌:第一种形貌的特点是具有犁沟和聚集的磨屑颗粒,属于磨粒磨损状态;第二种形貌中有金属黏着物和塑性变形,属于黏着磨损;第三种为常见的干摩擦磨损,磨痕表面有光滑区域和分层区域。另外,摩擦过程中会引起温升,而温升会加剧材料的磨损与氧化<sup>[20-21]</sup>,沿着裂纹方向容易出现分层和氧化膜的剥落。

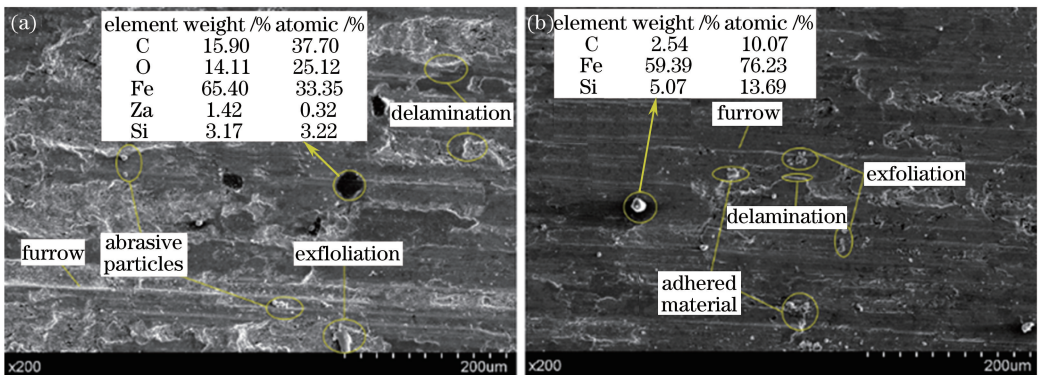


图 9 摩擦表面磨痕形貌。(a) 未造型试样; (b) 微造型试样

Fig. 9 Micrograph of the worn surface. (a) Untreated sample; (b) textured sample

值得注意的是,激光喷丸后试样的磨损程度要轻于未喷丸试样,从图 9(a)可以观察到大量剥落物和较深的犁沟,但是图 9(b)中显示的磨损性能明显更好。已有研究表明激光喷丸处理后的材料表面耐磨性得到明显提高<sup>[22]</sup>。

## 5 结 论

通过激光喷丸对球墨铸铁 QT600 试样表面进行了微凹坑造型,并对干摩擦和湿摩擦两种条件下造型前

后试样表面的摩擦磨损性能进行了比较和分析,结论如下:1) 在干摩擦条件下,所有经激光喷丸微凹坑造型后的试样表面摩擦系数都明显高于未造型试样,其中凹坑中心距为 2 mm 的试样表面摩擦系数最高,相对于未造型试样提高了 12.9%,而凹坑中心距为 1 mm 的试样表面磨损量最小;在润滑条件下,所有经激光喷丸微凹坑造型后的试样表面摩擦系数都明显低于未造型试样,其中凹坑中心距为 2 mm 的试样表面摩擦系数最低,相对于未造型试样降低了 11.8%,且磨损量最小;

2) 球墨铸铁表面合适的微造型能够提高表面耐磨性。从磨痕形貌可以观测出,织构试样表面的磨损程度明显轻于未造型试样表面,且表面氧化物较少,磨损机制包括磨粒磨损、黏着磨损以及氧化磨损;

3) 激光喷丸球墨铸铁表面可以提高表面残余压应力,激光能量为 1.5 J 时,表面残余压应力最大,此时凹坑中心距 1 mm 的试样表面残余压应力最高,可达 -445 MPa,这也解释了干摩擦条件下凹坑中心距为 1 mm 的试样表面磨损量最低的原因。

### 参 考 文 献

- Li Jiarong, Xiong Jichun, Tang Dingzhong. Advanced high-temperature structural materials and technology (below)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 9.  
李嘉荣, 熊继春, 唐定中. 先进高温结构材料与技术(下)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 9.
- Sun Lixi, Liu Xiaolie, Pan Hui. The application of ductile cast iron in automobile panel drawing die[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2008, 36(4): 11-13.  
孙立喜, 刘晓烈, 潘 辉. 球墨铸铁在汽车覆盖件拉伸模中的应用[J]. 金属材料与冶金工程, 2008, 36(4): 11-13.
- Chichinadze A V. Calculation and investigation of external friction during braking[J]. Moscow, Nauka, 1967: 3.
- Feng X, Zhou J Z, Mei Y F, *et al.*. Improving tribological performance of gray cast iron by laser peening in dynamic strain aging temperature regime[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(5): 904-910.
- Yuan Run, Cheng Yunrong, Fu Yonghong, *et al.*. Influence of laser surface texturing on tribological performance of ductile cast iron under line contact conditions[J]. Journal of Jiangsu University, 2013, 34(4): 450-454.  
袁 润, 程云荣, 符永宏, 等. 线接触副球墨铸铁表面激光织构对摩擦学特性的影响[J]. 江苏大学学报, 2013, 34(4): 450-454.
- Xiong Xugang, Liu Wenjin, Zhang Hongjun, *et al.*. Investigation on laser alloying of nodular cast iron piston ring and research on characteristics of wear resistance of piston ring-cylinder[J]. Heat Treatment of Metals, 2000(7): 5-7.  
熊绪刚, 刘文今, 张红军, 等. 球墨铸铁活塞环激光合金化及其摩擦磨损特性的研究[J]. 金属热处理, 2000(7): 5-7.
- Liu Anmin, Wang Xinheng, Kuang Jianxin, *et al.*. Study on friction and wear of cast iron friction surface layer by laser cladding[J]. Tool Engineering, 2011, 45(5): 44-46.  
刘安民, 汪新衡, 匡建新, 等. 球墨铸铁摩擦副激光熔覆处理层摩擦磨损研究[J]. 工具技术, 2011, 45(5): 44-46.
- Montross C S, Wei T, Ye L, *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: A review[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10): 1021-1036.
- Yao Z Q, Lawrence Y Y, Wang F, *et al.*. Progress in advanced laser assisted manufacturing technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(12): 57-61.
- Huang Zhihui, Liu Huixia, Shen Zongbao, *et al.*. Process parameters analysis on surface texturing under laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0503004.  
黄志辉, 刘会霞, 沈宗宝, 等. 工艺参数对激光冲击微造型效果的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503004.
- Luo K Y, Wang C Y, Li Y M, *et al.*. Effects of laser shock peening and groove spacing on the wear behavior of non-smooth surface fabricated by laser surface texturing[J]. Applied Surface Science, 2014, 313: 600-606.
- Wang Xiao, Xia Liqi, Gao Chuanyu, *et al.*. Research in improving tribology performance by surface texturing [J]. Lubrication Engineering, 2006(4): 167-170.  
王 霄, 夏立齐, 高传玉, 等. 表面微造型技术改善物体表面摩擦性能的研究[J]. 润滑与密封, 2006, (4): 167-170.
- Zhang W W, Yao Y L, Noyan I C. Microscale laser shock peening of thin films, part 2: High spatial resolution material characterization[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(1): 18-24.
- Morales M, Porro J A, Blasco M, *et al.*. Numerical simulation of plasma dynamics in laser shock processing experiments [J]. Applied Surface Science, 2009, 255(10): 5181-5185.
- Zhong Jinshan, Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, *et al.*. Influence of laser shock processing on tensile properties and tribological behaviors of AISI304 stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503002.

- 钟金杉, 鲁金忠, 罗开玉, 等. 激光冲击对 AISI304 不锈钢拉伸性能和摩擦磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503002.
- 16 Shepard M J. Laser shock processing induced residual compression: impact on predicted crack growth threshold performance[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 14(4): 495-502.
- 17 Yu Xianhai. Effect of residual stress of surface on sliding wear[J]. Journal of Wuhan University of Water Transportation Engineering, 1991, 15(3): 303-309.  
余宪海. 表面残余应力对滑动磨损的影响[J]. 武汉水运工程学院学报, 1991, 15(3): 303-309.
- 18 Hua Xijun, Fu Yonghong, Yuan Run, *et al.*. Study on friction and wear performance of laser texturing surface[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(5): 20-22.  
华希俊, 符永宏, 袁 润, 等. 激光微造型表面摩擦磨损性能研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(5): 20-22.
- 19 Krupka I, Hartl M, Zimmerman M, *et al.*. Effect of surface texturing on elastohydrodynamically lubricated contact under transient speed conditions[J]. Tribology International, 2011, 44(10): 1144-1150.
- 20 Ding T, Chen G X, Zhu M H, *et al.*. Influence of the spring stiffness on friction and wear behaviours of stainless steel/copper impregnated metallized carbon couple with electrical current[J]. Wear, 2009, 267(5): 1080-1086.
- 21 Yi F, Zhang M, Xu Y. Effect of the electric current on the friction and wear properties of the CNT-Ag-G composites[J]. Carbon, 2005, 43(13): 2685-2692.
- 22 He Huanju, Zhang Lingfeng, Yang Genmei, *et al.*. Friction and wear properties of AZ31 magnesium alloy by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0906003.  
何换菊, 张凌峰, 杨根妹, 等. 激光冲击强化 AZ31 镁合金摩擦磨损性能的研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0906003.