

# 激光强化灰铸铁导轨的微观组织及磨损性能

邓 猛<sup>1,2</sup> 王义强<sup>2</sup> 谷 岩<sup>2</sup> 袁修华<sup>2</sup> 闫国琛<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 太原科技大学机械工程学院, 山西 太原 030024  
<sup>2</sup> 浙江大学宁波理工学院机电与能源工程学院, 浙江 宁波 315100)

**摘要** 采用正交实验优化了激光加工导轨试样的工艺参数,用光学显微镜、扫描电镜和显微硬度计对试样进行了显微组织分析和硬度测试,并在油润滑下与常规处理试样进行了磨损性能对比试验。结果显示,电流对硬化深度影响最显著,然后依次为扫描速度、脉宽和频率,优化后的激光加工参数:扫描速度为 0.25 mm/s,电流为 150 A,脉宽为 10 ms,频率为 7 Hz。激光加工试样熔凝区分布有球状石墨,相变区晶粒尺寸较熔凝区更细小,分布更均匀;硬度较常规处理有显著提高,其分布无变化梯度。当循环次数达 38000 时,激光加工试样较常规处理试样耐磨性提高约 1 倍。

**关键词** 激光技术; 激光强化; 导轨; 参数优化; 显微组织; 显微硬度; 耐磨性

中图分类号 TG143.2; TG163

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201441.0403009

## Microstructure and Wear Behavior of Laser Hardened Gray Cast Iron Guideway

Deng Meng<sup>1,2</sup> Wang Yiqiang<sup>2</sup> Gu Yan<sup>2</sup> Yuan Xiuhua<sup>2</sup> Yan Guochen<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology,  
Taiyuan, Shanxi 030024, China

<sup>2</sup> College of Mechanical and Energy Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University,  
Ningbo, Zhejiang 315100, China

**Abstract** The laser processing parameters of the sample guideway are optimized through orthogonal experiment. The microstructure analysis and hardness test of the laser-treated sample are carried out by optical microscopy, scanning electron microscope (SEM) and microhardness tester, and a contrast test of wear-resistance between the laser-treated and normally treated samples is conducted in oil-lubricated conditions. The results show that hardening depth is influenced most strongly by current, followed successively by scanning speed, pulse width and frequency. The optimized laser processing parameters are as follows: 0.25 mm/s for scanning speed, 150 A for current, 10 ms for pulse width, and 7 Hz for frequency. The spheroidal graphite is observed in the melted region of the laser-treated sample. The grain size in the phase transformation region is much smaller than that in the melted region and the grain is more evenly distributed. Compared with the normal treatment, laser processing produces a dramatic improvement in hardness without variation of gradient in distribution. When the cycle number reaches 38000, the wear-resistance of the laser-treated sample is almost one time higher than that of the normally treated one.

**Key words** laser technique; laser hardening; guideway; parameter optimization; microstructure; microhardness; wear-resistance

**OCIS codes** 140.3390; 140.3538; 160.3900; 350.3850

收稿日期: 2013-09-30; 收到修改稿日期: 2013-11-21

基金项目: 国家科技重大科技专项(2012ZX04011021)、宁波市自然科学基金(2013A610152)、浙江省自然科学基金(Y1110708)

作者简介: 邓 猛(1986—),男,硕士研究生,主要从事机床导轨的激光表面强化方面的研究。

E-mail: dmeng1202@163.com

导师简介: 王义强(1964—),男,博士,教授,主要从事数控装备与数字制造技术、质量控制与可靠性工程等方面的研究。

E-mail: jluwang@gmail.com

# 1 引 言

导轨是机床进给系统的重要环节,主要用来支撑和引导运动部件沿着一定的方向准确运动,要求导向精度高、低速运动平稳和耐磨性好。近年来机床向着高速、高效、高精度和节能方向发展<sup>[1]</sup>,对导轨的精度保持性和耐磨性提出了更高的要求。传统的热处理工艺已不能满足机床的进一步发展,因此,研究新工艺对导轨表面进行强化处理是延长机床工作寿命的有效途径。

灰铸铁因具有良好的自润滑、减振和低成本特性而广泛用于制造各类机床滑动导轨。激光表面处理技术出现后,国内外学者在利用激光处理金属零部件以提高表面质量方面做了大量研究。相对于传统工艺,激光加工后的工件表面具有组织细化<sup>[2]</sup>、硬度高及残余应力小等特性,使其耐磨性、疲劳强度和工作寿命有明显提高<sup>[3-6]</sup>。国内外学者用激光处理齿轮、阀座、缸套、活塞环等,均大幅提高了零件的使用寿命<sup>[6-10]</sup>,而部分学者针对激光处理灰铸铁后的残余应力、显微组织、干摩擦特性及其零件的工作寿命等方面的研究均取得了良好效果<sup>[8-9,11-13]</sup>。激光表面处理技术效率高、热应力小、适应性强、无污染

且工艺过程易实现自控和联机操作<sup>[3,14]</sup>,其应用日益广泛。

近年来国内外学者对机床导轨的研究涉及导轨设计、精度下降预测、热变形和对加工稳定性的影响等方面<sup>[15-17]</sup>,而很少有关于激光处理机床导轨的研究。本文主要研究激光熔凝加工灰铸铁导轨的参数优化、表面组织性能变化以及磨损性能。

# 2 实验材料及方法

实验所用材料为珠光体基灰铸铁,从机床导轨上切取,化学成分见表1,利用线切割机加工成尺寸为40 mm×25 mm×5 mm的试样。用WF300脉冲激光器对试样表面进行激光熔凝加工处理,并沿激光扫描的方向剖开,磨平抛光后用体积分数为4%的硝酸乙醇溶液制成金相试样,用Nikon MA100金相显微镜、日立S-4800扫描电镜(SEM)测量硬化深度(图1)和观察横截面显微组织,以最大硬化深度为指标,设计正交实验(表2,离焦量为-5 mm)对激光加工参数进行优化,用MH-60显微硬度计测试显微硬度。

表1 实验材料化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of test material (mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Others	Fe
3.1~3.3	1.5~1.6	0.9~1.0	<0.06	<0.07	<0.5	<0.3	Bal

表2 正交试验因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

Level	Factor			
	Scanning speed /(mm/s)	Current /A	Pulse width /ms	Frequency /Hz
1	0.25	60	6	7
2	0.45	90	8	8
3	0.65	120	10	9
4	0.85	150	12	10

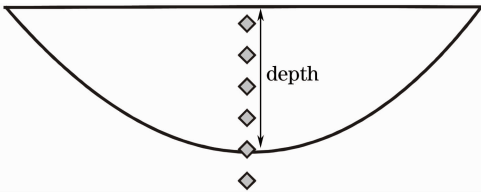


图1 激光硬化层深度与硬度测试点

Fig. 1 Depth of laser hardened layer and microhardness test positions

采用优化的参数加工试样并与原导轨表面试样在自行研制的往复摩擦磨损试验机(图2)上进行耐磨性测试。试样固定,加载为30 kg,配副为常规

工艺处理的相同材料导轨,固定于滑台上,往复进给速度V为0.05 m/s,单行程为0.4 m,用N68导轨油(GB3141)润滑,采用精度为0.1 mg的电子天平

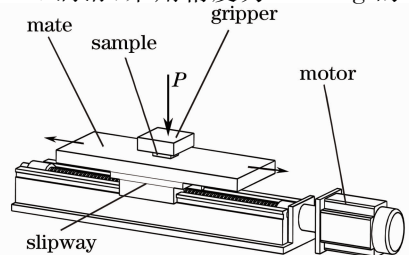


图2 摩擦磨损试验机示意图

Fig. 2 Schematic diagram of friction-wear tester

称量试样,称量前用丙酮在超声波清洗机中清洗并风干,每组试样称量 3 次取平均值,根据磨损速率随往复循环次数的变化分析磨损性能。

### 3 结果及讨论

#### 3.1 正交实验

导轨的宏观失效表现为高度方向尺寸的减少,硬化深度将直接影响导轨的使用寿命。在光斑大小(离焦量)一定的情况下,以扫描速度、电流、脉宽和频率的各水平及对应的硬化深度平均值绘制曲线(图 3),可以看出各参数对硬化深度的影响规律。

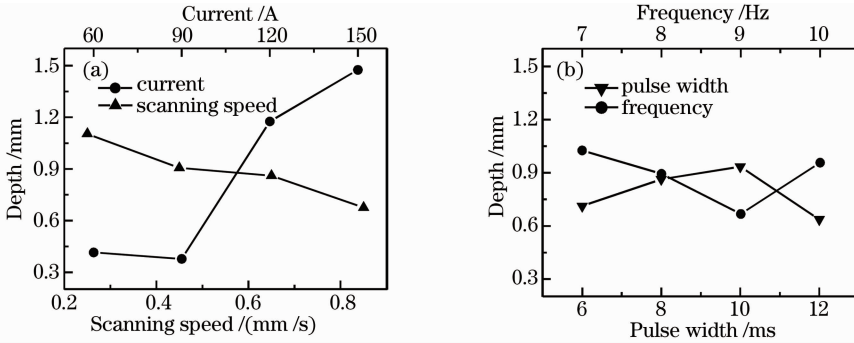


图 3 激光参数对硬化深度的影响。(a)扫描速度和电流;(b)脉宽和频率

Fig. 3 Depth of hardened layer with different laser parameters. (a) Scanning speed and current; (b) pulse width and frequency

#### 3.2 显微组织与显微硬度

试样经激光熔凝加工后横截面形貌如图 4(a)所示,可分为熔凝区和相变硬化区。熔凝区中原片状石墨在激光加热过程中全部溶解,但有较大的石墨凹坑出现[图 4(b)],这是石墨以气泡为基底不断扩散和生长的结果。激光快速加热时,外界空气进入液态组织中与碳等反应生成气泡,未及时逸出的气泡表面界面能较低,为石墨微晶的形核、结晶创造了条件,液态组织中的碳原子(热扩散率较大)不断

随扫描速度的增加,硬化深度有下降的趋势;电流较小时(小于等于 90 A),硬化深度无明显变化,而当电流继续增大时,硬化深度增加显著,电流为 150 A 时,硬化深度最大(约为 1.4 mm),较 60 A 增加近 1 mm;脉宽在 6~12 ms 范围内变化时,硬化深度出现先增加后减小的变化趋势,在 10 ms 处出现最大值(约 0.9 mm);频率在设置的水平内变化时,与脉宽有相反的影响趋势。从各曲线的变化梯度可见电流对硬化深度影响最大,然后依次为扫描速度、频率和脉宽,最优激光加工参数为:扫描速度 0.25 mm/s,电流 150 A,脉宽 10 ms,频率 7 Hz。

游离附着于气泡表面形成石墨微晶,随着气泡内部压力降低,石墨晶核向气泡内部扩散生长,最终将其填满形成球状石墨<sup>[18-19]</sup>。激光处理区光学显微照片和高倍扫描电镜照片分别如图 5 和图 6 所示。相变区加热温度未达到熔点温度,只发生固态相变,原基体中的片状石墨局部溶解扩散至奥氏体中[图 6(b)],尺寸较小的则全部溶解,因而冷却后相变区的石墨尺寸与分布密度均比基体中小。

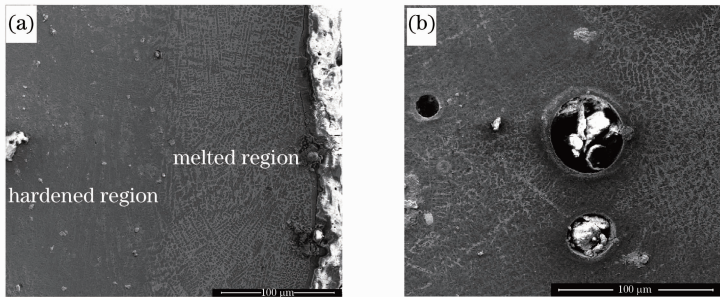


图 4 (a)试样横截面形貌和(b)球状石墨

Fig. 4 (a) Cross sectional shape of sample and (b) spheroidal graphite

熔凝区与相变区经放大后,呈现出明显的浮凸效应(图 6)。熔凝区主要为树枝状莱氏体(渗碳体和残留奥氏体)和少量片状马氏体[图 5(a),图 6(a)]。熔

凝区的加热速率快、温度高,奥氏体化瞬间完成,碳扩散较充分,随后的快速凝固造成了固液界面前的液态组织中出现很大成分过冷区,使初生奥氏体以树枝状

生长,最终形成树枝状莱氏体,图 5(a)中可见熔凝区胞状晶与枝状晶特征。由于冷却速度较慢,晶粒形核后有较多的时间作扩散生长,因而尺寸粗大。相变硬化区[图 5(b),图 6(b)]组织主要为针状马氏体,未溶片状石墨以及少量残留奥氏体。与熔凝区相比,相变硬化区加热温度未达到熔点温度,主要发生马氏体转变。激光加热时,相变硬化区石墨溶解扩散至奥氏体

中,而部分基体扩散至相变区的碳使奥氏体中含碳量进一步升高,随后的激光冷却过程形成了含碳量高的针状马氏体。由于相变硬化区自动冷却条件好,冷却速度较熔凝区更快,Fe 原子(表面活性较碳原子低)的扩散速率受到抑制,奥氏体晶粒来不及长大,导致形核率远大于晶核生长率,最终获得的马氏体晶粒尺寸较熔凝区更细小,分布更均匀。

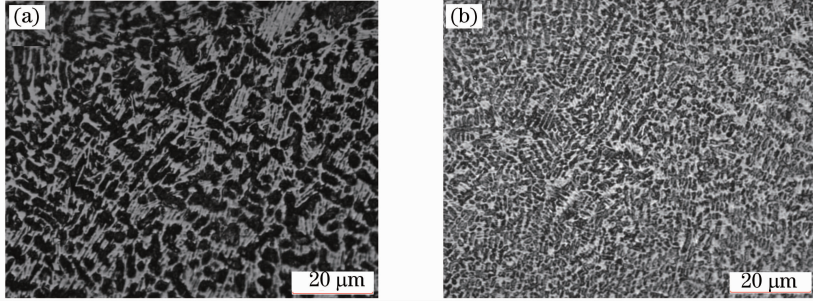


图 5 激光处理区光学显微照片。(a) 熔凝区;(b) 相变硬化区

Fig. 5 Optical micrographs of laser processing region. (a) Melted region; (b) transformation hardened region

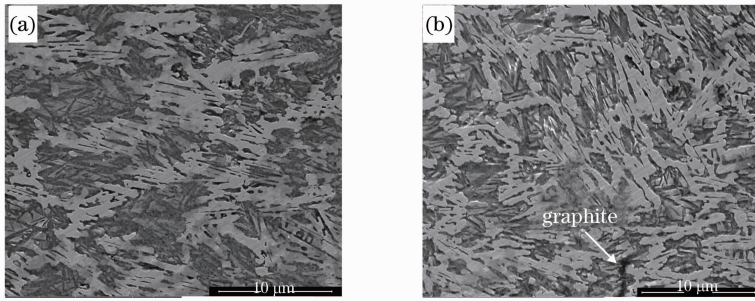


图 6 激光处理区高倍扫描电镜照片。(a) 熔凝区;(b) 相变硬化区

Fig. 6 SEM images of laser processing region with high magnification. (a) Melted region; (b) transformation hardened region

对硬化深度为 0.6 mm 与 1.2 mm 的试样进行显微硬度测试,并与常规处理试样比较(图 7),激光处理区的硬度分布于 700~900 HV 之间,与常规处理试样(450~720 HV)相比有明显提高。

域内碳的浓度不同使硬度分布有微小波动<sup>[12]</sup>,但整体分布变化梯度小,分布均匀(约 850 HV),这归因于该区域快速冷却使晶粒(针状马氏体等)得到超细化以及大量细小的碳化物保留下来,残留奥氏体量也远小于熔凝区,且快速冷却导致位错密度更高,畸变强化效果更明显,因而硬度值高于熔凝区。常规处理试样表层硬度分布有较大的起伏,在 0.2 mm 处达到峰值(约 720 HV),随深度增加(大于 0.2 mm),硬度呈阶梯状递减,当深度超过 0.75 mm 时,硬度快速下降至基体硬度值。激光硬化深度不同时,硬度分布并无明显起伏(图 7)。由此可知,不同的激光加工参数组合后仍能得到均匀的硬化区和硬度分布,Liu 等<sup>[5]</sup>在研究中也表明了此观点。

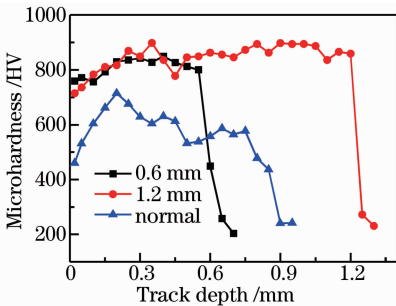


图 7 硬化层硬度的分布

Fig. 7 Hardness profile of hardened layer

激光加热时表面脱碳导致熔凝区含碳量较低,且该区域内晶粒尺寸粗大,导致最表层硬度稍低。随深度增加到相变硬化区(大于 0.2 mm),各微区

### 3.3 磨损性能

激光加工试样与常规处理试样的磨损性能比较如图 8 所示,在磨合磨损阶段(循环次数小于 12000),激光加工试样的磨损量高于常规处理试样。激光加

工试样表面粗糙度较大,刚开始只有极少的凸峰与配副导轨面接触,单位面积载荷及接触面间隙较大,不易形成润滑膜,局部表现为干摩擦,凸峰部分经受高压和往复周期性塑性变形而被撕裂、加工硬化形成磨粒<sup>[20]</sup>,且激光加工试样的最表层部分硬度稍低,不利于抵抗磨粒的压入刮伤,因而磨损量较大。

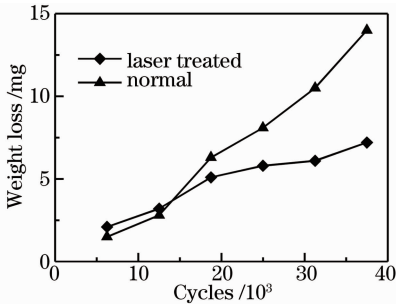


图 8 磨损性能的比较

Fig. 8 Comparison of wear behaviors

循环次数超过 18000 时,激光加工试样磨损量增加缓慢,而常规处理试样的磨损量增加明显,循环次数达 38000 时,常规处理试样的磨损量约为激光加工试样的 2 倍。两导轨面之间相对运动时主要表现为磨粒磨损和粘着磨损,而常规处理试样硬度随

深度增加有明显的下降趋势(图 7),其表面硬度较高部分被磨去后,磨粒更易压入表面,更易发生刮伤和材料的粘着与撕裂<sup>[21]</sup>,因而常规处理表面磨痕多而深,伴随材料粘着撕裂出现大量凹坑和裂纹[图 9(a)],磨损严重。激光加工试样经过磨合阶段后,表面凸峰被磨平,接触面积增大,使摩擦面之间形成良好的润滑条件,且随深度增加,硬度基本保持不变,其耐磨粒压入和刮伤性能仍然很好,因而磨损速率变缓。低磨损速率下易形成更细小的磨粒,聚集后粘附于硬度较高的表面上,减少了摩擦面间的直接接触而提高了其耐磨性<sup>[20-21]</sup>,同时避免形成完全的面面接触模式而为稳定润滑膜的形成及其厚度增加创造空间,由图 9(b)可见激光加工试样磨损表面磨痕少而浅。同时,快速冷却形成的大量超细化晶粒内部有比常规处理更多的晶界和更高的微观缺陷(马氏体中大量位错、孪晶和层错等)密度,均能阻碍裂纹形核及增加裂纹扩展所消耗的能量,从而具有较好的塑韧性,减少了材料内部沿裂纹断裂的倾向,且快速冷却后表面压应力较大<sup>[11]</sup>,进一步提高了耐撕裂能力,因而激光加工试样磨损表面极少有凹坑和裂纹[图 9(b)]。

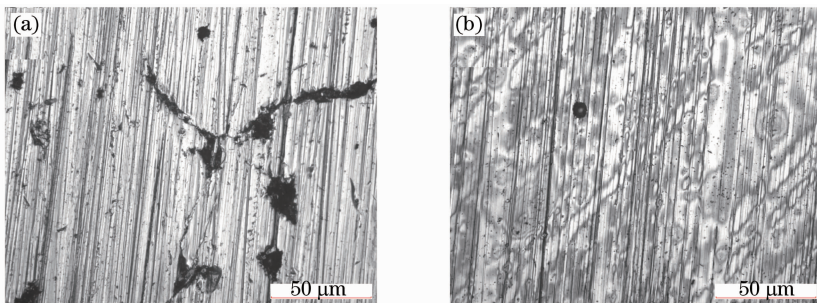


图 9 试样的(a)常规及(b)激光作用后的磨损表面

Fig. 9 Wear surfaces (a) of normal and (b) after laser processing for samples

## 4 结 论

1) 实验结果表明,电流对硬化深度影响最大,然后依次为扫描速度、脉宽和频率;优化后的激光加工参数分别为:扫描速度 0.25 mm/s,电流 150 A,脉宽 10 ms,频率 7 Hz。

2) 导轨试样经激光加工后,硬化区分为熔凝区和相变区,熔凝区分布有球状石墨,其组织为树枝状莱氏体;相变区为针状马氏体,较熔凝区晶粒尺寸更细小,分布更均匀。

3) 激光加工硬化区硬度(700~900 HV)较常规处理试样(450~720 HV)有显著提高,其梯度随深度分布基本无变化,不同激光加工参数对硬化区

硬度无影响。

4) 循环次数达 38000 时,常规处理试样的磨损量约为激光加工试样的 2 倍,同时激光加工试样表面磨痕少而浅且极少有凹坑和裂纹。

## 参 考 文 献

- Chen Jiangjin, Yang Chunhai. NC Machine Tool[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2012. 10-13.  
陈江进, 杨纯海. 数控机床[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2012. 10-13.
- Zhang Lingfeng, Xiong Yi, Zhang Yi, et al.. Microstructure of high manganese steel by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603025.  
张凌峰, 熊毅, 张毅, 等. 高锰钢在激光冲击作用下的微观特征[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603025.

- 3 Shao Dan, Hu Bing, Zheng Qiguang. Laser Advanced Manufacturing Technology and Equipment Integration [M]. Beijing: Science Press, 2009. 185-191.  
邵 丹, 胡 兵, 郑启光. 激光先进制造技术与设备集成[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 185-191.
- 4 Ren Xudong, Zhang Tian, Zhang Yongkang, *et al.*. Improving fatigue properties of 00Cr12 alloy by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2111-2115.  
任旭东, 张 田, 张永康, 等. 激光冲击处理提高 00Cr12 合金的疲劳性能[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2111-2115.
- 5 Liu Anmin, Previtali Barbara. Laser surface treatment of grey cast iron by high power diode laser[J]. Physics Procedia, 2010, 5(1): 439-448.
- 6 Jiang Yinfang, Lai Yanling, Zhang Lei, *et al.*. Investigation of residual stress hole on a metal surface by laser shock[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 2073-2079.  
姜银方, 来彦玲, 张 磊, 等. 激光冲击材料表面“残余应力洞”形成规律与分析[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2073-2079.
- 7 Lv You. Influence of laser surface melting on the micropitting performance of 35CrMo structural steel gears [J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 564(1): 1-7.
- 8 T Slatter, H Taylor, R Lewis, *et al.*. The influence of laser hardening on wear in the valve and valve seat contact[J]. Wear, 2009, 267(5-8): 797-806.
- 9 Hua Xijun, Fu Yonghong, Yuan Run, *et al.*. Experimental investigations on laser surface micro-texturing technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 177-181.  
华希俊, 符永宏, 袁 润, 等. 激光表面微造型工艺试验与应用 [J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 177-181.
- 10 G Ryk, I Etsion. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction [J]. Wear, 2006, 261(7-8): 792-796.
- 11 Grum Janez, Sturm Roman. Influence of laser surface melt-hardening conditions on residual stresses in thin plates [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 100-101(1-3): 455-458.
- 12 J Ruiz, V Lopez, B J Fernandez. Effect of surface laser treatment on the microstructure and wear behaviour of grey iron [J]. Materials and Design, 1997, 17(5-6): 267-273.
- 13 K Sridhar, V A Katkar, P K Singh. Dry sliding friction wear behaviour of high power diode laser hardened steels and cast iron [J]. Surface Engineering, 2007, 23(2): 129-141.
- 14 Yang Yuling, Dong Danyang. Laser Surface Modification and Application of Materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013. 20-21.  
杨玉玲, 董丹阳. 材料的激光表面改性技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013. 20-21.
- 15 K C Fan, Hsiming Chen, T H Kuo. Prediction of machining accuracy degradation of machine tools[J]. Precision Engineering, 2012, 36(2): 288-298.
- 16 S K Lee, J H Yoo, M S Yang. Effect of thermal deformation on machine tool slide guide motion [J]. Tribology International, 2003, 36(1): 41-47.
- 17 Hung Juipin, Lai Yuanlung, Lin Chingyuan, *et al.*. Modeling the machining stability of a vertical milling machine under the influence of the preloaded linear guide[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, 51(9): 731-739.
- 18 Yao Xingqun, Shu Xinfu, Xing Zebing. Study on growth mechanism of graphite nodule[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2000, 25(5): 74-78.  
姚幸群, 舒信福, 邢泽炳. 石墨球长大机制的探讨[J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25(5): 74-78.
- 19 Gustaf Ostberg. Perspectives on research on the formation of nodular graphite in cast iron[J]. Materials and Design, 2006, 27(10): 1007-1015.
- 20 B K Prasad. Sliding wear response of a cast iron under varying test environments and traversal speed and pressure conditions[J]. Wear, 2006, 260(11-12): 1333-1341.
- 21 B K Prasad. Sliding wear response of a grey cast iron: Effects of some experimental parameters [J]. Tribology International, 2011, 44(5): 660-667.

栏目编辑: 宋梅梅