

# 激光冲击次数对高碳珠光体钢组织和显微硬度的影响

熊毅<sup>1,2</sup> 何红玉<sup>1</sup> 罗开玉<sup>3</sup> 郭志强<sup>1</sup> 卢艳君<sup>4</sup> 张凌峰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>河南科技大学材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471003  
<sup>2</sup>河南省有色金属材料科学与工程重点实验室, 河南 洛阳 471003  
<sup>3</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013  
<sup>4</sup>广州民航职业技术学院飞机维修工程学院, 广东 广州 510403

**摘要** 采用激光冲击强化技术对原始组织为层片状珠光体的高碳钢进行表面强化处理,借助扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)和显微硬度计等手段研究了激光冲击次数对高碳珠光体钢微观组织和硬度的变化规律。结果表明,原始珠光体组织经激光冲击后,渗碳体片层发生弯曲、断裂、球化,并且随着冲击次数的增加,冲击中心区域渗碳体球化程度加剧,溶解量也随之增加,过饱和的碳原子溶于铁素体基体中,导致其点阵常数增大。多次冲击后冲击中心区域材料表层的硬度从 300 HV(原始珠光体组织)分别增加至 333 HV(2 次激光冲击),353 HV(6 次)。

**关键词** 激光光学;激光冲击强化;珠光体钢;微观组织;点阵常数;显微硬度

**中图分类号** TN249;TG142.21 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0403006

## Effect of Laser Shock Processing Times on Microstructure and Microhardness of High Carbon Pearlitic Steel

Xiong Yi<sup>1,2</sup> He Hongyu<sup>1</sup> Luo Kaiyu<sup>3</sup> Guo Zhiqiang<sup>1</sup> Lu Yanjun<sup>4</sup> Zhang Lingfeng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China  
<sup>2</sup> Henan Key Laboratory of Advanced Non-Ferrous Metals, Luoyang, Henan 471003, China  
<sup>3</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China  
<sup>4</sup> Guangzhou Civil Aviation College, Aircraft Maintenance Engineering College, Guangzhou, Guangdong 510403, China

**Abstract** High carbon pearlitic steel is processed by laser shocking processing (LSP). The microstructure and hardness of high carbon pearlitic steel are examined using scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM) and microhardness tester. The results show that the cementite lamellae is bent, fractured and spheroidized after multiple LSP impacts. With increase of LSP times, the spheroidization of the cementite lamellae is aggravating at the center of the laser spot, and the dissolution of the cementite is increased, supersaturated carbon atoms are dissolved in ferrite, leading to the increase of the lattice parameters. Moreover, the microhardness increases with increase of LSP times. After multiple LSP impacts, the microhardness at the center of the laser spot increases from 300 HV to 333 HV (2 LSP impacts), 353 HV(6 LSP impacts).

**Key words** laser optics; laser shocking processing; pearlitic steel; microstructure; lattice parameters; microhardness

**OCIS codes** 140.3460; 160.3900

收稿日期: 2012-11-13; 收到修改稿日期: 2012-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(50801021,51105179)、河南省高等学校青年骨干教师资助项目(2011GGJS-070)及江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201204)资助课题。

作者简介: 熊毅(1975—),男,博士,副教授,主要从事钢的超细化及其组织性能表征、激光冲击强化等方面的研究。

E-mail: xy\_hbdy@163.com

## 1 引 言

激光冲击强化(LSP)是一种在超高应变速率下( $10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ )对材料表面进行强化处理的技术<sup>[1~3]</sup>,能显著改善材料的机械性能,特别是能显著延长材料的疲劳寿命并提高抗应力腐蚀性能。由于其具有非接触、无热影响区、可控性强和强化效果显著等特点,可快速、高效地对金属零部件进行表面强化而难以用其他技术进行强化的局部区域进行处理。激光冲击强化技术多用在不锈钢<sup>[4]</sup>、钢铁<sup>[5]</sup>、镁合金<sup>[6]</sup>、铝合金<sup>[7]</sup>、钛合金<sup>[8]</sup>和铜合金<sup>[9]</sup>等方面,可以使材料的硬度、强度和疲劳寿命等方面大大提高并且达到良好的强化效果,该技术在核电、航空、航天、船舶、汽车及机械制造等工业领域都有着广阔的应用前景。然而目前对于激光冲击强化技术的大量实验研究集中在冲击波对材料力学性能的改变<sup>[10,11]</sup>以及冲击过程的数值模拟<sup>[12,13]</sup>方面,而对于激光冲击过程中随着冲击次数的增加,材料微观组织的演变以及亚结构的形成方面尚缺乏系统而深入的研究。鲁金忠等分别对LY2铝合金<sup>[7,14]</sup>和ANSI 304不锈钢<sup>[15,16]</sup>进行了单次和多次激光冲击处理,结果表明多次激光冲击其晶粒细化能力明显高于单次冲击;北京航空制造工程研究所许海鹰等<sup>[17]</sup>对TC4钛合金钨极惰性气体(TIG)焊焊缝进行了激光冲击强化处理,随着冲击次数的增加,焊缝的组织性能得到明显改善。高碳珠光体钢由于其具有高强度和高硬度而在工业上应用广泛,激光冲击处理可显著改善其表面性能,明确高碳珠光体钢随冲击次数的增加其微观组织的演变及相应性能指标的变化规律,为拓宽高碳钢在工业领域的使用范围提供技术支持。

## 2 试验材料与方 法

试验所用材料为普通商用T8钢,试样尺寸为 $\phi 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。变形前将T8钢放入 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热处理炉中保温30 min,完全奥氏体化后迅速放入 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 的盐浴炉中保温30 min,以确保珠光体转变完全,随即水冷至室温。将试样表面进行机械研磨,逐级打磨至镜面光滑,然后进行激光冲击处理实验。

采用Gaia-R系列高能量脉冲Nd:YAG激光器对试样进行表面强化处理,激光光斑直径为3 mm,激光波长为1064 nm,脉宽为10 ns,重复频率为1 Hz,激光脉冲能量为6 J。采用厚度为0.1 mm的美国3M公司专用铝箔粘贴在试样的抛光面,作为

激光能量的吸收层,利用流水作为激光冲击时的约束层,流水厚度控制在1~2 mm之间。在试样背面涂一层硅油作为吸波层以防止冲击波从试样背面反射回去形成拉力波而对试样造成破坏。在多次激光冲击的过程中,每冲击一次将吸收层铝箔替换一次。

采用线切割机将试样沿轴向中心剖开制备金相试样,机械抛光后用4%硝酸酒精进行深侵蚀,利用QUANTA FEG 650型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察纵截面的微观组织形貌,电子加速电压为20 kV;同时沿轴向中心在HV-1000A型显微硬度计上每隔0.2 mm左右测量试样的硬度变化情况,载荷为200 g,加载时间为10 s,卸载时间为5 s,每个部位都选取5个不同的点来测量,然后求其算术平均值即为该处的硬度值。珠光体中铁素体点阵常数的测定在D8 ADVANCE型X射线衍射仪(XRD)上进行,管电压为35 kV,管电流为40 mA,采用 $\text{CuK}\alpha$ ( $\lambda = 0.15406 \text{ nm}$ )辐射,接收狭缝宽为2 mm。各衍射峰的准确位置用半峰全宽定峰方法确定。

制备金相试样的同时在冲击中心区域用线切割方法切取约0.5 mm的薄片,机械减薄至 $40 \text{ }\mu\text{m}$ 后在电解液为冰醋酸和体积分数为7%高氯酸的混合溶液中进行双喷电解减薄,电解电压30 V,电流50 mA,减薄过程中采用液氮进行冷却,温度不高于零下 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在JEM-2010型透射电子显微镜(TEM)上进行精细组织的观察,电子加速电压为200 kV。

## 3 结果与讨论

### 3.1 显微硬度分析

高碳珠光体钢经相同冲击能量,分别进行2、6次激光冲击后显微硬度的变化曲线如图1所示。可以看出,原始珠光体组织经激光冲击后的显微硬度均随着激光冲击次数的增加而增加,冲击中心区域的显微硬度最大,远离冲击中心区域,显微硬度值越小。这是由于激光能量呈高斯分布<sup>[18]</sup>,导致激光诱导的应力也大体呈高斯分布,在冲击中心区域材料的塑性变形程度也最为剧烈,相应的形变强化程度也最大,因此对应的硬度值明显高于其它区域。随着激光冲击次数的增加,塑性变形程度逐渐向纵深发展,硬度值的增加趋势较为缓慢。激光冲击2次后冲击中心区域的显微硬度由冲击前的300 HV增至333 HV,增幅约为11%,而激光冲击6次后冲击中心区域的显微硬度值相对2次冲击试样而言,硬度值虽然也呈增加趋势,但增幅明显放缓,由

333 HV(2次)增至353 HV(6次),增幅约为6%。其原因可能是因为变形初期以位错增殖为主,由于金属表层承受激光冲击时发生了剧烈的塑性变形,位错大量增殖,位错运动加剧,形成高密度位错,进而形成大量的位错缠结,导致显微硬度的增加;随着激光冲击次数的增加,渗碳体片层发生扭折、弯曲以及断裂的同时还不断进行着球化,渗碳体片层的球化则导致显微硬度的下降。因此在加工硬化和渗碳体球化软化的综合作用下,冲击中心区域的显微硬度呈缓慢上升趋势。

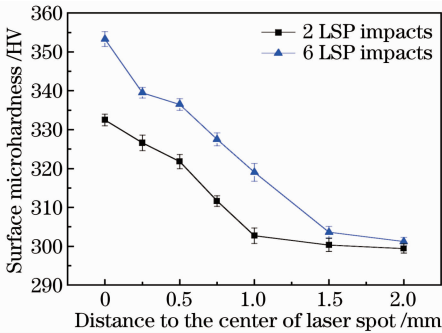


图1 激光冲击不同次数后冲击区域显微硬度分布图

Fig.1 Distributions of microhardness in the LSP region as a function of LSP time

### 3.2 XRD 分析

原始珠光体钢激光冲击2、6次后试样的XRD如图2所示。

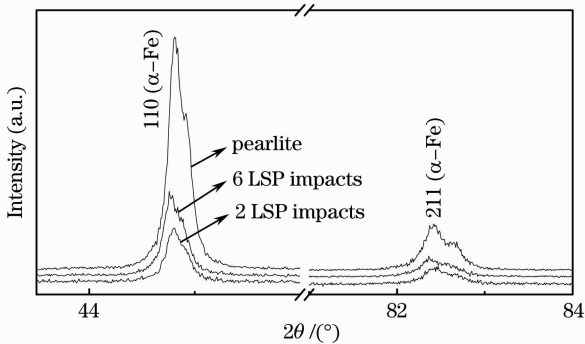


图2 激光冲击不同次数后铁素体衍射峰位的变化

Fig.2 XRD peak position of  $\alpha$ -Fe in pearlitic structure as a function of LSP time

从图中可以看出,与激光冲击前的原始珠光体钢试样相比,经不同冲击次数后铁素体衍射峰均发生不同程度左移,并且随着激光冲击次数的增加,峰位左移程度逐渐加剧。原始珠光体中铁素体点阵常数为0.285704 nm,激光冲击2、6次后铁素体点阵常数值分别为0.285925 nm和0.286404 nm,铁素体的点阵常数随激光冲击次数的增加而显著增加。根据铁素体点阵常数与碳含量的关系式<sup>[19]</sup>,可计算

出铁素体中过饱和的碳含量。当冲击次数为2、6次时,铁素体中的碳含量(质量分数)分别为0.06%和0.19%。这主要是由于渗碳体的溶解导致铁素体中过饱和碳含量的增加,从而导致铁素体点阵常数增大,并且随着激光冲击次数的增加,渗碳体的溶解量逐渐增大,因而铁素体峰位左移程度也更明显。类似的现象在重度冷轧珠光体钢<sup>[20,21]</sup>中也可观察到,究其原因是因为激光冲击强化也为冷加工工艺<sup>[22,23]</sup>,在强激光诱导冲击波超高应变率极端变形条件下,渗碳体片层以弯曲、扭折、断裂、球化甚至是部分溶解的方式来协调铁素体基体的剧烈塑性变形。而重度冷轧变形则是在低应变率大应变条件下,渗碳体片层发生严重塑性变形进而引发渗碳体片层的部分溶解,在该变形过程中,渗碳体片层没有球化现象的发生。

### 3.3 微观组织演变

原始珠光体组织激光冲击处理前后的SEM和TEM电镜组织形貌如图3所示。

图3(a)、(b)所示为原始层片状珠光体组织的SEM和TEM照片。从图中可以看出,珠光体层片排布较为规整,排布方向基本平行,珠光体片层间距均匀,其中层片间距约为150 nm,渗碳体片层的厚度约为30 nm。图3(c)~(f)为高碳珠光体钢激光冲击处理不同次数后的组织形貌照片,可以看出激光冲击处理后珠光体钢中组织的形态变化主要表现为渗碳体片层的变形。图3(c)为激光冲击2次的SEM组织形貌,冲击方向自上而下;渗碳体片层经2次冲击后,渗碳体的层片间距明显减小[图3(c)中的A区域],部分渗碳体以周期性剪断变形为主[图3(c)中的B区域],为了协调铁素体基体的变形,大量渗碳体片层发生了弯曲、扭折[图3(c)中的C区域];局部渗碳体片层发生了完全断裂,渗碳体形态主要以短棒状形式存在[图3(c)中的D区域];少量断裂的渗碳体片层开始发生球化[图3(c)中的E区域]。图3(e)则为高碳珠光体钢激光冲击6次后的SEM组织形貌,冲击方向与图3(c)一致;随着冲击次数的增加,渗碳体片层发生弯曲、扭折的情况进一步加剧[图3(e)中的A区域];渗碳体片层发生断裂的程度也急剧增加[图3(e)中的B区域];局部出现了球化完全的颗粒状渗碳体。

原始珠光体组织激光冲击2次后的TEM组织照片如图3(d)所示。从中可以看出,渗碳体片层开始发生弯曲,断裂,球化,主要以短棒状形式存在,且依稀可以看出原始渗碳体片层的排布方向[图3(d)

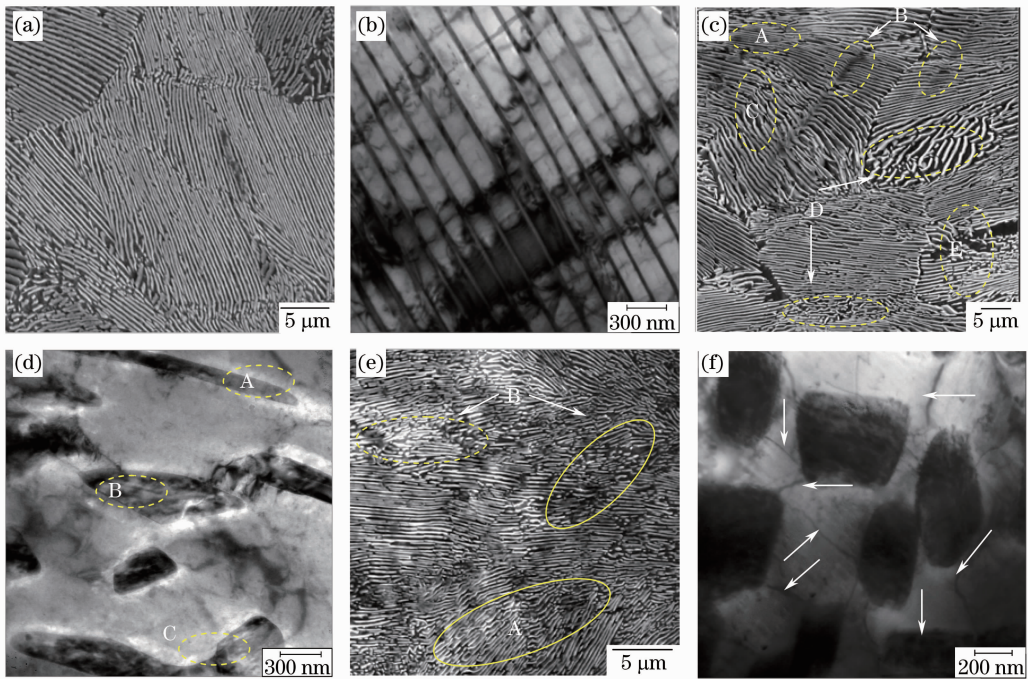


图3 高碳珠光体钢激光冲击前、后的 SEM 和 TEM 组织形貌。(a), (b)激光冲击前;(c), (d) 2次激光冲击;  
(e), (f) 6次激光冲击

Fig. 3 Typical SEM and TEM images of high carbon pearlitic steel before and after LSP. (a), (b) before LSP;  
(c), (d) 2 LSP impacts; (e), (f) 6 LSP impacts

中的 A 区域],同时断裂的渗碳体片尖端开始发生钝化,说明此时渗碳体已经开始发生球化(图 3 d 中的 B 区域),部分渗碳体片层发生弯曲断裂现象,且断裂后的渗碳体排列方式有不规则的趋势[图 3(d)中的 C 区域]。经 6 次激光冲击后,渗碳体片层断裂程度进一步加剧,与此同时渗碳体球化更加充分、完全,如图 3(f)所示,渗碳体片层形态消失完全,此时原始珠光体组织演变为颗粒状渗碳体分布于铁素体基体之上的超微细复相组织,渗碳体颗粒粒径约为  $0.25\ \mu\text{m}$ 。高碳珠光体钢在多次强激光诱导冲击波加载作用下,铁素体基体内增殖大量位错,位错密度显著加大,同时位错之间相互缠结程度加剧形成位错胞,位错胞进而演化为亚晶晶界[图 3(f)中箭头所示],从而导致铁素体基体细化,铁素体晶粒尺寸约为  $0.4\ \mu\text{m}$ ;球化的渗碳体颗粒弥散分布在铁素体基体中,从而使得位错在滑移过程中被球化完全的渗碳体颗粒所钉扎,在其周围形成了大量的位错塞积,有效地阻碍了位错的运动。在作者前期工作<sup>[24]</sup>中对高碳珠光体钢进行单次激光冲击后,获得的超细铁素体晶粒尺寸约为  $0.8\ \mu\text{m}$ ,由此可以得到,多次激光冲击能进一步细化铁素体基体,与文献[7,16]的实验结果较为吻合。

## 4 结 论

1) 原始珠光体组织经 LSP 后,渗碳体片层发生弯曲、断裂和球化,渗碳体部分溶解;随着冲击次数的增加,渗碳体的变形程度和溶解量进一步加剧。经 6 次激光冲击后,获得了由等轴铁素体晶粒和球化完全的渗碳体颗粒组成的超微细复相组织,其中等轴铁素体平均晶粒尺寸约为  $0.4\ \mu\text{m}$ ,球化完全的渗碳体颗粒粒径约为  $0.25\ \mu\text{m}$ 。

2) 经过 2、6 次激光冲击后铁素体的点阵常数从  $0.285704\ \text{nm}$ (原始珠光体组织)分别增至  $0.285925\ \text{nm}$ 和  $0.286404\ \text{nm}$ ;随着冲击次数的增加,铁素体衍射峰峰位左移程度明显。

3) 冲击中心区域显微硬度随冲击次数的增加而逐渐增加,经 2、6 次激光冲击后显微硬度从  $300\ \text{HV}$ (原始珠光体组织)分别增至  $333\ \text{HV}$ 、 $353\ \text{HV}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Xianqian, Huang Chengguang, Song Hongwei. Parameters analysis of residual stress induced by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2632~2637  
吴先前, 黄晨光, 宋宏伟. 激光冲击强化诱导的残余应力影响因素分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2632~2637
- 2 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
- 3 H. Zhang, C. Y. Yu. Laser shock processing of 2024-T62 aluminum alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1998, **257**(2): 322~327
- 4 Ma Zhuang, Li Yinghong, Zhang Yongkang *et al.*. Influence of laser shock processing on mechanical property of SUS304 steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2007, **28**(3): 102~105
- 马壮, 李应红, 张永康等. 激光冲击处理对 304 不锈钢力学性能的影响[J]. *材料热处理学报*, 2007, **28**(3): 102~105
- 5 Hua Yinqun, Chen Ruifang, Lu Miao *et al.*. Study on the experiment of 40Cr steel by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 495~498
- 花银群, 陈瑞芳, 路森等. 激光冲击强化处理 40Cr 钢的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 495~498
- 6 Zhang Yongkang, Pei Xu, Chen Jufang *et al.*. Phenomenon and analysis of periodic ripple structure on magnesium alloy surface induced by laser shock processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2613~2619
- 张永康, 裴旭, 陈菊芳等. 脉冲激光冲击镁合金表面产生周期性波纹结构的现象及分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2613~2619
- 7 J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang *et al.*. Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts [J]. *Acta Materialia*, 2010, **58**(11): 3984~3994
- 8 Ren Xudong, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Influence of laser-shock processing on fatigue life of titanium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, **17**(9): 1486~1489
- 任旭东, 张永康, 周建忠等. 激光冲击工艺对钛合金疲劳寿命的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2007, **17**(9): 1486~1489
- 9 J. Cai, S. Shekhar, J. Wang *et al.*. Nanotwinned microstructures from low stacking fault energy brass by high-rate severe plastic deformation[J]. *Scripta Materialia*, 2009, **60**(8): 599~602
- 10 C. S. Montross, T. Wei, L. Ye *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
- 11 Wang Huaming, Li Xiaoxuan, Sun Xijun *et al.*. Study of the surface mechanical properties of laser shock processed austenitic steel and Ni-based superalloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8): 756~760
- 王华明, 李晓轩, 孙锡军等. 激光冲击处理不锈钢及镍基合金后表面力学性能的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8): 756~760
- 12 Y. K. Zhang, J. Z. Lu, X. D. Ren *et al.*. Effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufacture by LY2 aluminum alloy [J]. *Materials and Design*, 2009, **30**(5): 1697~1703
- 13 Zhang Jie, Gu Xiang, Zhu Le *et al.*. Numerical simulation of fatigue life of 7050 aluminum alloy processed by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3192~3195
- 张洁, 顾祥, 祝乐等. 激光冲击强化 7050 铝合金疲劳寿命的数值模拟[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3192~3195
- 14 K. Y. Luo, J. Z. Lu, L. Y. Zhang *et al.*. The microstructural mechanism for mechanical property of LY2 aluminum alloy after laser shock processing [J]. *Materials and Design*, 2010, **31**(5): 2599~2603
- 15 K. Y. Luo, J. Z. Lu, L. Y. Zhang *et al.*. Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI 304 austenitic stainless steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, **528**(13-14): 4783~4788
- 16 J. Z. Lu, K. Y. Luo, Y. K. Zhang *et al.*. Grain refinement mechanism of multiple laser shock processing impacts on ANSI 304 stainless steel [J]. *Acta Materialia*, 2010, **58**(16): 5354~5362
- 17 Xu Haiying, Zou Shikun, Che Zhigang *et al.*. Influence of laser shock processing times on TC4 argon arc welding joint microstructure and properties [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 1~5
- 许海鹰, 邹世坤, 车志刚等. 激光冲击次数对 TC4 氩弧焊焊缝微结构及性能的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0303002
- 18 D. K. Cohen, B. Little, F. S. Luecke *et al.*. Techniques for measuring 1  $\mu\text{m}$  diameter Gaussian beams [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(4): 637~640
- 19 Z. Q. Lv, P. Jiang, Z. H. Wang *et al.*. XRD analyses on dissolution behavior of cementite in eutectoid pearlitic steel during cold rolling [J]. *Mater. Lett.*, 2008, **62**(17-18): 2825~2827
- 20 Sun Shuhua, Xiong Yi, Fu Wantang *et al.*. Microstructure changes of eutectoid pearlitic steel during cold rolling [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, **41**(3): 267~270
- 孙淑华, 熊毅, 傅万堂等. 共析珠光体钢在冷轧过程中的组织变化[J]. *金属学报*, 2005, **41**(3): 267~270
- 21 Fu Wantang, Xiong Yi, Zhao Jun *et al.*. Microstructure evolution of pearlite during severe cold rolling in eutectoid Fe-C alloys [J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2005, **21**(1): 25~27
- 22 X. Scherperreel, P. Peyre, R. Fabbro *et al.*. Modifications of mechanical and electrochemical properties of stainless steels surfaces by laser shock processing [J]. *Laser in Material Processing*, 1997, **3097**: 546~557
- 23 P. Peyre, R. Fabbro. Laser shock processing: a review of the physics and applications [J]. *Opt. & Quant. Electronics*, 1995, **27**(12): 1213~1229
- 24 Xiong Yi, He Tiantian, Zhang Lingfeng *et al.*. Microstructure evolution of eutectoid pearlitic steel after laser shock processing [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2010, **31**(11): 47~50
- 熊毅, 贺甜甜, 张凌峰等. 共析珠光体钢激光冲击处理后的组织演变[J]. *材料热处理学报*, 2010, **31**(11): 47~50