

激光冲击处理对 X80 管线钢焊接接头 拉伸性能的影响

孔德军 龙丹 吴永忠

(常州大学机械工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要 利用激光冲击波对 X80 管线钢焊接接头表面进行了强化处理,通过拉伸实验对激光冲击处理前后焊接接头试样拉伸力学性能进行了分析,用扫描电镜和能谱分析仪观察了其断口形貌与化学成分组成,并对其断裂机理进行了探讨。实验结果表明,原始状态的 X80 管线钢焊接接头具有连续屈服特征,无明显的屈服平台,延伸率比较高,拉伸断口出现明显的分层开裂;激光冲击处理后 X80 管线钢焊接接头的强度并未得到加强,韧窝尺寸与深度变大,其断裂拉伸性能得到改善。

关键词 激光技术;激光冲击处理;X80 管线钢;焊接接头;慢拉伸试验;断口形貌

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.1103007

Effects of Laser Shock Processing on Tensile Properties of X80 Pipeline Steel Welded Joints

Kong Dejun Long Dan Wu Yongzhong

(College of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213016, China)

Abstract The surface of X80 pipeline steel welded joints is processed with laser shock wave, the tensile mechanical properties of the welded joints before and after laser shock processing (LSP) are analyzed with tensile tests. The fracture morphologies and the distributions of chemical components are observed with scanning electric microscope (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) respectively, and the fracture mechanism of X80 pipeline steel welded joints is discussed. The results show that the X80 pipeline steel welded joints in primitive state have the continuous yield feature, without obvious yield flat, the elongation rate is higher, and the tensile fracture appears the clear delaminated cracking; the strength of X80 pipeline steel welded joints by LSP has not increased, the dimple size and depth become bigger, that improves the tensile properties of the fractures.

Key words laser technique; laser shock processing; X80 pipeline steel; welded joint; slow strain test; fracture morphology

OCIS codes 140.3540; 140.3538; 140.3580; 140.3390; 350.3850

1 引言

石油天然气需求量的增加,使得输送效率、管道的输送压力和管径不断增大,从而要求管材强度和拉伸性能也相应提高。管材力学性能是管道设计和安全评定最基本的指标,因此,对高强度、高韧性管线钢的抗拉性能研究至关重要^[1]。在国内,X70 级管线钢已经在西气东输重大工程中得以广泛应用,X80 级管线钢在西气东输复线中得到了应用^[2~4],

而高强度、高韧性管线钢焊管是通过板材成型与焊接形成的。因此,焊接工艺常常使焊接接头的组织性能劣化及产生缺陷,使焊接缺陷处成为整个压力管道中最薄弱的部位,易产生裂纹起裂、扩展甚至失稳断裂。目前主要通过焊后热处理或应变硬化得以强化,如喷丸、超声波、爆炸、碾压、锤击等方法改善焊接接头的性能^[5,6],锤击、碾压、爆炸在复杂结构中利用不太理想,超声冲击处理和激光冲击处理

收稿日期: 2011-06-14; 收到修改稿日期: 2011-08-24

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2009104)、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX11-0389)资助课题。

作者简介: 孔德军(1966—),博士,副教授,主要从事管线钢焊接接头激光表面改性处理方面的研究。

E-mail: kong-dejun@163.com

(LSP)却是两种大有前景的焊后处理工艺^[7,8]。激光冲击处理使得材料表面发生塑性变形,表面粒子细化,消除焊接接头的表面缺陷和产生压残余应力^[9]。关于激光冲击处理在 X80 管线钢焊接接头上的应用国内外尚未报道,因此,有必要对此进行探索性研究。本文利用激光冲击波对 X80 管线钢焊接接头进行了强化处理,通过扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)分析手段,对其常温拉伸断口的形貌、显微组织、夹杂物等进行观察分析,探讨了拉伸断口形成的原因,并对其强化处理机理进行了讨论。

2 实验方法

实验材料选用 X80 管线钢,其屈服强度与抗拉强度分别为 660 MPa 和 715 MPa,化学成分质量分数(%)为:C 3.5, Si 27.5, Cu 24.5, Ni 10.0, Mn 18.0, P 1.0, S 0.5, 余量 Fe。焊接方法为内焊双丝,外焊双丝的埋弧自动焊,采用 BHM-10 焊丝, SJ101-G 焊剂,焊接电流 680~920 A,电弧电压 32~38 V。慢拉伸试样如图 1 所示,2 个实验条件分别为:原始状态和激光冲击处理后。利用 THALES 型激光器对试样中部焊接接头进行表面改性处理,其工艺参数为:光斑直径 5 mm,功率 5 J,冲击次数 3,脉宽 12 ns。图 1 中试样焊接接头部位用 V 形块定位夹紧,每次冲击时旋转 60°,以保证焊接接头弧面功率密度一致。拉伸实验在 SERT-5000-D9H 型恒慢应变速率实验机进行,加载应变速率为 10^{-5} s^{-1} ,在试样标距内装加位移引伸计,以测量标距内的变形。在实验过程中,通过计算机数据采集系统,得出激光冲击处理后 X80 管线钢试样拉伸载荷-位移曲线,

将载荷-位移曲线转化为应力-应变曲线。试样拉断后,采用 JSM-6360LA 扫描电镜和配制的电子能谱仪分析断口形貌和化学元素的组成。

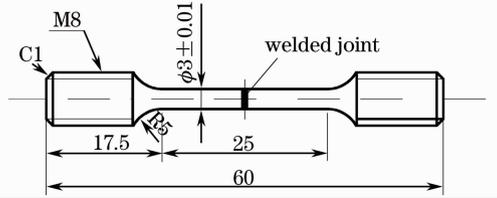


图 1 试样尺寸示意图(单位:mm)

Fig. 1 Sketch of the sample sizes (unit: mm)

3 实验结果与分析

3.1 表面形貌

图 2 为激光冲击处理前后 X80 管线钢焊接接头表面形貌。原始状态下管线钢焊接接头表面平整[图 2(a)],表面产生晶粒细化现象和残余应力场,有利于提高试样的拉伸力学性能^[10]。用 CXG12205A 型表面粗糙度测量仪测量其粗糙度 R_a 为 $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。强激光作用下 X80 管线钢表面发生较大的塑性变形,如图 2(b)所示,激光冲击所产生的冲击能量大多数转变为塑性能,表层组织发生明显的塑性变形,表面粗糙度 R_a 为 $1.3 \sim 3.2 \mu\text{m}$,激光冲击处理表面粗糙度下降了 1 个等级。这表明激光冲击处理后表面粗糙度有所上升,对拉伸性能有一定的影响。激光冲击处理虽然改善了材料表面力学性能,有利于提高材料的力学性能,但是表面粗糙度值的增加使 X80 管线钢焊接接头抗拉强度有所下降,需要通过后续表面抛光处理工艺,达到激光冲击处理提高 X80 管线钢焊接接头抗拉强度的效果。

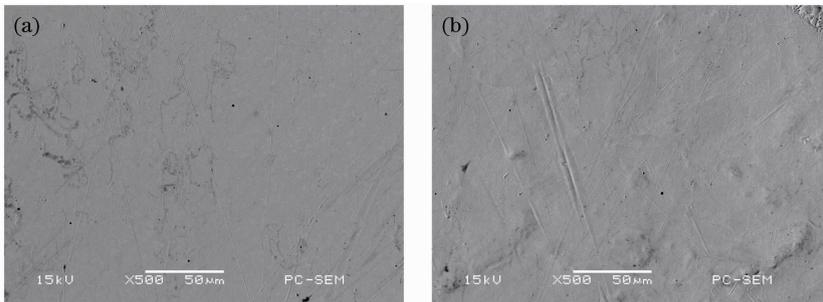


图 2 X80 管线钢焊接接头表面形貌。(a)原始状态;(b)激光冲击处理后

Fig. 2 Surface morphologies of X80 pipeline steel welded joints. (a) In primitive state; (b) after LSP

3.2 拉伸曲线

图 3 为 X80 管线钢原始焊接接头和激光冲击后焊接接头应力-应变曲线。拉伸过程分为 3 个阶段:1)起始直线为弹性变形阶段;2)弹性变形之后,材料没有明显的塑性变形,直接进入均匀变形阶段,

呈现变形硬化,这个阶段材料拉伸性能得到了强化;3)从最大拉力点到试样断裂,为局部变形阶段,表现为材料的断裂。由图 3 可知,激光冲击后的 X80 管线钢焊接接头拉伸曲线与原始焊接接头拉伸曲线十分接近,且都具有连续屈服特征,无明显的屈服平

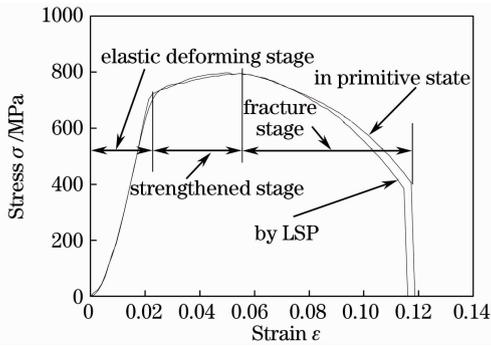


图3 应力-应变曲线

Fig. 3 Tensile curves of stress-strain

台,在断裂前产生明显的颈缩现象,这说明激光冲击

处理并未对 X80 管线钢焊接接头强度产生十分明显的影响。

表 1 为图 3 中拉伸曲线的实验结果。激光冲击处理后焊接接头对比原始状态焊接接头屈服强度 R_e 下降了 3.6%, 拉伸强度 R_m 上升了 0.3%, 延伸率 δ 提高了 12.64%, 断面收缩率 ψ 降低了 13%, 同时图 3 中内积功由 265 J 下降到 255 J (表 1), 这主要是由于激光冲击处理后表面粗糙度上升的缘故, 这表明激光冲击处理对其拉伸强度没有明显的提高, 但是 X80 管线钢焊接接头拉伸断裂方式得到了进一步的改善。

表 1 试样拉伸实验结果

Table 1 Results of tensile test for the samples

Sample state	Yield strength $R_e / (N/mm^2)$	Tensile strength $R_m / (N/mm^2)$	Reduction in cross-section $\psi / \%$	Elongation $\delta / \%$	Inner product power / J
In primitive state	750	795	11.87	64.00	265
After LSP	723	798	11.60	76.64	255

3.3 断口形貌

图 4 为试样拉伸断口形貌。激光冲击处理前后断口表面形态都是不规则的, 比较粗糙, 颜色灰暗, 有明显垂直于拉伸断口的分层开裂现象, 分层发生在试样的中心区域, 与轧制纵向平面平行, 周围还有大量的平行小裂纹。拉伸试样产生了宏观塑性变形, 断口颈缩现象十分明显。原始焊接接头断口分层开裂程度 [图 4(a)] 比激光冲击处理后焊接接头 [图 4(b)] 严重, 其颈缩深度低于激光冲击处理后焊

接接头颈缩深度, 这表明激光冲击处理增加了裂纹扩展阻力, 降低分层开裂程度, 提高了焊接接头断裂的延伸率。对比图 3 中断口三要素, 激光冲击处理后焊接接头纤维区、放射区、剪切唇 3 个区域比起原始焊接接头的更为直观、明显。激光冲击处理后纤维区呈现明显的“火山口”状, 且区域大于原始焊接接头, 纤维区越大, 说明激光冲击处理后焊接接头断裂形式得到了改善, 其拉伸性能得到了进一步的提高。

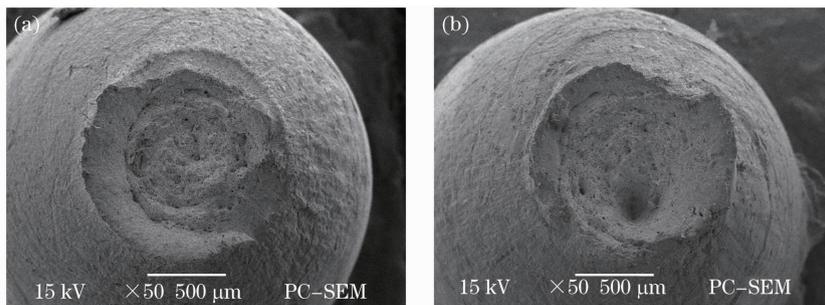


图 4 拉伸断口宏观形貌。(a)原始状态;(b)激光冲击处理后

Fig. 4 Macroscopic morphologies of the tensile fracture surface. (a) In primitive state; (b) after LSP

激光冲击处理对其拉伸强度没有明显的提高, 但是 X80 管线钢焊接接头拉伸断裂方式得到了进一步的改善, 这可以从断口形貌得到证明, 图 5 为试样拉伸断裂后断口韧窝形貌。断口上有许多大小相间的韧窝, 其中部分韧窝在少量撕裂棱, 这表明断裂时焊接接头发生了严重的塑性变形。原始状态焊接

接头韧窝较小, 为等轴韧窝 [图 5(a)], 在韧窝周围零散的分布着显微细孔, 这可能是焊接残留的气体未排除所致^[11]。激光冲击处理后焊接接头断口韧窝尺寸和深度 [图 5(b)] 明显大于原始焊接接头断口的韧窝 [图 5(a)], 说明激光冲击处理提高了 X80 管线钢焊接接头的拉伸性能。

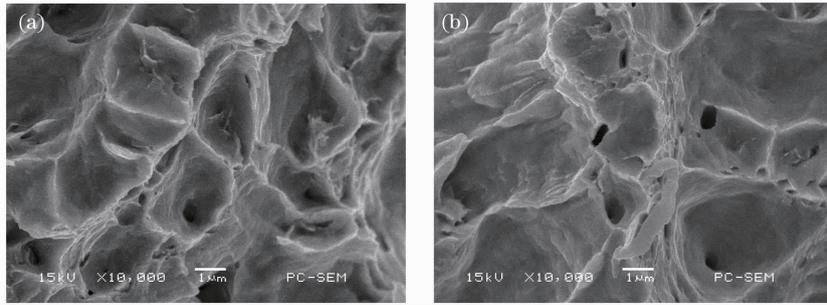


图 5 拉伸断口微观形貌。(a)原始状态;(b)激光冲击处理后

Fig. 5 Microcosmic morphologies of the tensile fracture surface. (a) In primitive state; (b) after LSP

3.4 断口 EDS 分析

图 6 为焊接接头断口 EDS 分析,其主要成分为 Fe、C、Si 等元素。原始状态化学元素质量分数(%)为:C 5.31、Si 0.35、Fe 94.34,如图 6(a)所示。经激光冲击处理后化学元素质量分数(%)为:C 3.54、Si 0.27、Fe 96.19,如图 6(b)所示。原始状态断口

的化学元素质量分数和激光冲击处理后基本一致,虽然激光冲击处理前后 C 和 Si 含量是有一些差别,但在一个合理的范围内。这表明激光冲击处理并未对 X80 管线钢焊接接头内部化学元素造成破坏,X80 管线钢焊接接头仍然保持原始状态优良的力学性能。

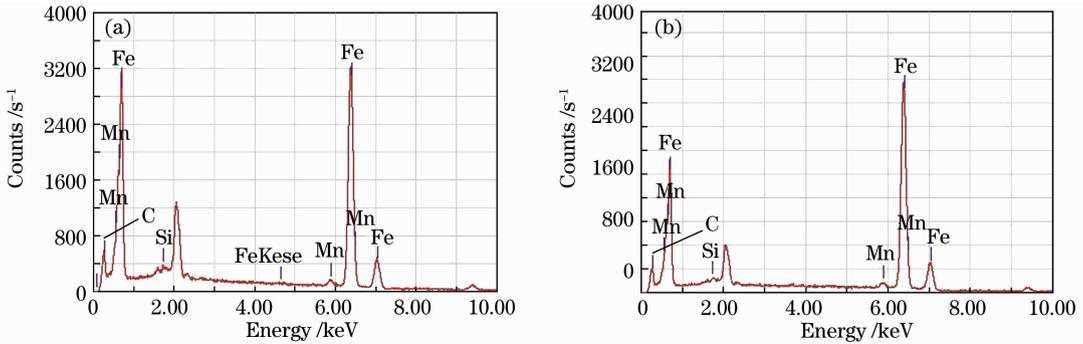


图 6 断口能谱分析。(a)原始状态;(b)激光冲击处理后

Fig. 6 Energy spectrum analysis of the fractures. (a) In primitive state; (b) after LSP

3.5 分析与讨论

3.5.1 断口杂质分析

激光冲击处理前后断口上都出现了杂质,能谱分析如图 7 所示,主要由 Fe、C、O、S、Mn、Si 等元素组成。原始状态断口杂质能谱分析如图 7(a)所示,其化学元素质量分数(%)为:Fe 94.66、C 4.07、O 0.21、S 0.85、Si 0.20。激光冲击处理后断口杂质能谱分析如图 7(b)所示,其化学元素质量分数(%)为:Fe 93.55、C 4.77、O 0.41、S 0.84、Si 0.44。激光冲击处理前后杂质的化学元素含量基本上是一致的,杂质主要来源于硫化物和氧化物,拉伸断裂的裂纹都是起源于焊接接头的杂质物,是拉伸断裂的主要来源。

3.5.2 分层断裂

在拉伸实验过程中,激光冲击处理前后的试样均发生颈缩现象,且激光冲击处理后颈缩面各变小,颈缩现象更加严重。当试样发生颈缩时,其在颈缩处应力由均匀分布变成不均匀分布,裂纹首先在应

力最大的部位萌生、扩展和长大^[12]。颈缩处中心区域为试样拉伸实验最薄弱区,此处裂纹扩展最快,导致试样中心出现宏观裂纹,最终表现为拉伸断口出现分层,如图 8 所示。由图 8(a)可知,原始状态拉伸断口在表层产生了分层,心部为韧性+脆性断裂。经激光冲击处理后断口在表层也产生了分层,但其心部为韧性断裂,如图 8(b)所示。这表明激光冲击处理没有改变断口的分层现象,但提高了心部的拉伸强度,有利于改善焊接接头的断裂方式。

4 结 论

1) 激光冲击处理后 X80 管线钢焊接接头延伸率提高了 12.64%,屈服强度断面收缩率有所下降,对其拉伸强度没有明显的提高。

2) 激光冲击处理后断口韧窝尺寸和深度变大,X80 管线钢焊接接头拉伸断裂方式得到了进一步的改善。

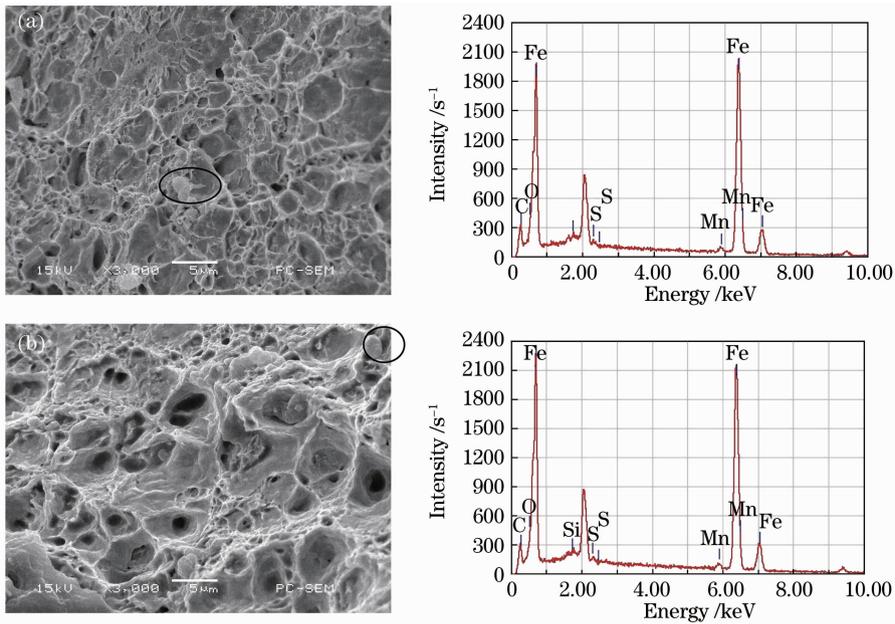


图 7 断口杂质与能谱分析。(a)原始状态;(b)激光冲击处理后

Fig. 7 Impurity and energy spectrum analysis of the fractures. (a) In primitive state; (b) after LSP

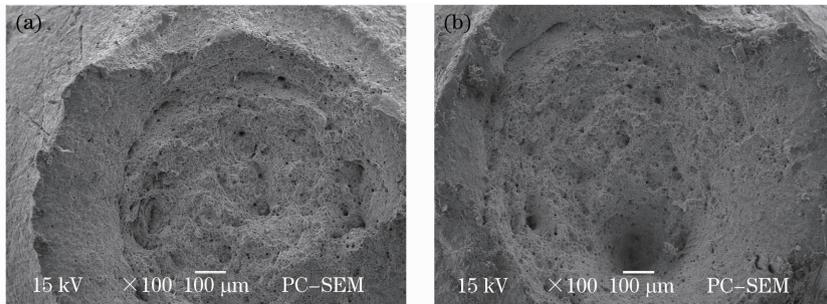


图 8 焊接接头断口分层现象。(a)原始状态;(b)激光冲击处理后

Fig. 8 Delamination phenomena of the fractures in the welded joints. (a) In primitive state; (b) after LSP

3) 焊接接头中杂质物为硫化物和氧化物,是 X80 管线钢焊接接头拉伸断裂的主要来源。

4) 激光冲击处理后焊接接头的断口分层现象没有得到改善,其心部获得了良好的拉伸性能,有利于改善焊接接头的断裂方式。

参 考 文 献

- 1 Wu Ming, Chen Xu, He Chuan *et al.*. Effect of CO₂ partial pressure on SCC behavior of welded X80 pipeline in simulated soil solution[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, **24**(1): 65~74
- 2 Y. S. Sang, H. Byoungchul, L. Sungbak *et al.*. Correlation of microstructure and Charpy impact properties in API X70 and X80 pipeline steels[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2007, **458**(1-2): 281~289
- 3 Y. S. Sang, H. Byoungchul, K. Sangho *et al.*. Fracture toughness analysis in transition temperature region of API X70 pipeline steels[J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2006, **429**(1-2): 196~204
- 4 H. Byoungchul, L. Sunghak, M. K. Young *et al.*. Analysis of abnormal fracture occurring during drop weight tear test of high toughness pipeline steel [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2004, **368**(1-2): 18~27

- 5 Li Zhanming, Zhu Youli, Wang Kan *et al.*. Analysis of strengthening mechanism of ultrasonic impact treatment of 2A12 aluminum alloy weld joint [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(9): 55~59
- 李占明, 朱有利, 王 侃 等. 2A12 铝合金焊接接头超声冲击强化机理分析[J]. *焊接学报*, 2008, **29**(9): 55~59
- 6 Zhao Hongyun, Zhang Guangchuan, Wu Jianqian *et al.*. Hardening process of welded joints of 400 MPa ultra fine grained steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2008, **33**(10): 91~94
- 赵洪运, 张广传, 吴剑谦 等. 400 MPa超细晶粒钢焊接接头的强化工艺研究[J]. *金属热处理*, 2008, **33**(10): 91~94
- 7 Li Zhanming, Zhu Youli, Xin Yi. Influence of ultrasonic impact treatment on fatigue properties of 2A12 aluminum alloy welded joints[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, **31**(2): 28~32
- 李占明, 朱有利, 辛 毅. 超声冲击处理对 2A12 铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2011, **31**(2): 28~32
- 8 Cao Ziwen, Zou Shikun, Liu Fangjun *et al.*. Laser shock processing on 1Cr11Ni2W2MoV martensite steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 316~320
- 曹子文, 邹世坤, 刘方军 等. 激光冲击处理 1Cr11Ni2W2MoV 不锈钢[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 316~320
- 9 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
- 10 Zhang Xingquan, He Guangde, Qi Xiaoli *et al.*. Investigation on contact fatigue strength of gear affected by laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3187~3191
- 张兴权, 何广德, 戚晓利 等. 激光冲击强化对齿轮接触疲劳的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3187~3191
- 11 Hu Zongwen, Wang Yuanqing, Shi Yongjiu *et al.*. Study on the fracture scanning of rail steel and thermit welding after the tensile test at low temperature [J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2009, **30**(2): 1~3
- 胡宗文, 王元清, 石永久 等. 低温下铁路钢轨钢材及铝热焊缝拉伸试件断口分析[J]. 低温建筑技术, 2009, **30**(2): 1~3
- 12 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): 0303002
- 许海鹰, 邹世坤, 车志刚 等. 激光冲击次数对 TC4 氩弧焊缝微结构及性能的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(3): 0303002

栏目编辑: 宋梅梅