

# 激光冲击强化对激光焊接件气蚀行为的影响

张磊<sup>1</sup> 罗开玉<sup>1,2</sup> 鲁金忠<sup>1</sup> 张永康<sup>3</sup> 冯爱新<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

<sup>2</sup>镇江惟真激光技术有限公司, 江苏 镇江 212013

<sup>3</sup>东南大学机械工程学院, 江苏 南京 211189

<sup>4</sup>温州大学机电学院, 浙江 温州 325035

**摘要** 采用高能激光束对厚板激光焊接件进行激光冲击强化(LSP)处理,并利用 X 射线衍射仪(XRD)、显微硬度仪、高精度电子天平和扫描电镜(SEM)观察分析手段研究了激光冲击强化对激光焊接件抗气蚀性能的影响。试验结果表明,增加激光冲击强化脉冲能量气蚀后,激光焊接件马氏体强度相对提高、马氏体剥落得到抑制,表面和横截面硬度增加,累积质量损失和表面气蚀破坏面积减小。随着激光能量的增加,马氏体晶粒细化,气蚀后表面起伏组织变浅、变疏,表面裂纹萌生扩展得到减缓抑制,因此激光焊接件抗气蚀性能增强。另外,激光焊接件焊缝区的抗气蚀性能优于热影响区(HAZ)的抗气蚀性能。

**关键词** 激光技术;激光冲击强化;抗气蚀性能;激光焊接件

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0203001

## Effects of Laser Shock Processing on Cavitation Erosion Resistance of Laser Weldments

Zhang Lei<sup>1</sup> Luo Kaiyu<sup>1,2</sup> Lu Jinzhong<sup>1</sup> Zhang Yongkang<sup>3</sup> Feng Aixin<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

<sup>2</sup> V-Zenith Laser Technology Company, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

<sup>3</sup> School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China

<sup>4</sup> College of Mechanical & Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

**Abstract** Effects of laser shock processing (LSP) on cavitation erosion behaviors of ANSI 304 stainless steel thick sheets treated by laser welding are investigated. Mechanical properties and microstructure of laser weldments are measured and observed by X-ray diffraction (XRD), microhardness, electronic balance and scanning electron microscope (SEM) tests in order to investigate cavitation erosion resistance of laser weldments. Results show that with the increment of LSP pulse energies after cavitation erosion, the martensite intensity is improved relatively and the removal of martensite is restrained, the hardness increases, and the cumulative mass loss and damaged surface areas of laser weldments decrease. Meanwhile, the martensite grains are fined, and undulations and upheavals become shallower and sparser, and the growth and propagation of the cracks on the surface are restrained. Thus, cavitation erosion resistance of laser weldments is enhanced. In addition, cavitation erosion resistance of laser welding zone (LWZ) is better than that of heat-affected zone (HAZ).

**Key words** laser technique; laser shock processing; cavitation erosion resistance; laser weldments

**OCIS codes** 120.6650; 140.3390; 350.3390; 350.3850

**收稿日期:** 2012-08-23; **收到修改稿日期:** 2012-10-04

**基金项目:** 国家自然科学基金(51105179, 51275220, 51175237)、江苏省研究生培养创新工程(CXZZ11\_0546)、江苏省自然科学基金(BK2010352, BK2011478)、中国博士后科学基金第五批特别资助(2012750465)、江苏省高校科研成果产业化推进项目(JHB2011-38)中国博士后科学基金(20110491349)和江苏省博士后基金(1101018B)资助课题。

**作者简介:** 张磊(1987—),女,博士研究生,主要从事激光冲击强化方面的研究。E-mail: zz87jy@yeah.net

**导师简介:** 张永康(1963—),男,博士,教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: zykseu@163.com

# 1 引 言

新能源日益成为人们关注的焦点,用天然气代替燃油,有利于减少污染、节省能源。通过压缩冷却,天然气在 $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 形成液化天然气(LNG)<sup>[1]</sup>。ANSI 304 不锈钢由于机械性能良好、价格便宜,在 LNG 设备中大量使用<sup>[1,2]</sup>。但在 LNG 设备运行过程中,不锈钢表面会出现气蚀现象,尤其是焊接件,气蚀导致材料表面剥落,降低设备使用寿命<sup>[3,4]</sup>。研究该失效行为,发现在气蚀过程中会发生  $\gamma$  奥氏体到  $\epsilon$  马氏体相变过程,由于马氏体大量断裂剥落<sup>[3]</sup>,导致材料失效;若材料内部晶粒细化,则能有效抑制裂纹扩展,增强表面性能,提高材料抗气蚀能力<sup>[5]</sup>。

众所周知,激光冲击强化(LSP)是一项先进的表面处理技术。激光作用于材料表面详细过程可见

文献[6~8]描述。经 LSP 处理,材料机械性能,如拉伸性能、疲劳性能<sup>[6,8]</sup>、摩擦磨损性能<sup>[9]</sup>、抗腐蚀性<sup>[10]</sup>等,能在一定程度上有所提高。因此,有必要将高能 LSP 用来提高焊接件抗气蚀性能。本文从材料机械性能和微观结构入手,研究 LSP 对 ANSI 304 不锈钢厚板激光焊接件抗气蚀性能的影响。

## 2 实验方案

### 2.1 激光焊接过程

用 YLS-4000 光纤激光器(IPG,USA)对 5 mm 厚 ANSI 304 不锈钢厚板进行对接焊,深度方向上全部均匀焊透,焊接参数见表 1。激光焊接具有高能量密度和低热量耗费特点,因此激光焊接件的热影响区(HAZ)很小,位于焊缝区(LWZ)和母材(BM)之间。

表 1 激光焊接参数

Table 1 Welding parameters selected

Laser type	Laser power $P$ /kW	Welding speed $v$ /( $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Defocusing distance $\Delta f$ /mm	Spot diameter of laser beam /mm	Shielding gas He:Ar
Fiber laser	4	35	-3	0.27	1:1

### 2.2 激光冲击强化过程

首先对激光焊接件 20 mm×15 mm 的这个表面进行打磨和抛光;接着用江苏大学调 Q Nd:YAG 激光器(GAIA-R, THALES)对该表面进行 LSP 处理,该表面为工作面,后面气蚀试验与分析针对该工作面进行;最后,将经过 LSP 处理后的激光焊接件用去离子水清洗并放入乙醇超声波去油污。

LSP 处理的具体参数:激光器波长为 1064 nm,脉宽为 15 ns,激光光斑为 3 mm,重复频率为 1 Hz,搭接率为 50%。实验采用两种脉冲能量,即 6 J 和 9 J。为提高对激光脉冲能量的吸收效率,防止试样表面被激光烧蚀,用 0.1 mm 厚铝箔作为吸收层紧紧粘附在激光焊接件工作面上;选用 1~2 mm 厚水膜作为约束层,增加激光冲击波的峰值压力、脉冲和作用时间<sup>[11]</sup>。

### 2.3 气蚀试验

将未经 LSP 处理、经 6 J LSP 处理和经 9 J LSP 处理的激光焊接件进行气蚀试验。气蚀试验主要设备是超声振动粉碎仪,试验参数见表 2。将不锈钢变幅杆尖端浸入去离子水中,激光焊接件的工作面与变幅杆尖端间接接触,之间距离为 10 mm。

### 2.4 试验结果分析手段

用 X 射线衍射仪(XRD, D/Max-2500/pc type)、显微硬度计(HXD-1000 TMSC/LCD)、高精

表 2 气蚀试验参数

Table 2 Testing parameters in cavitation erosion tests

Diameter of vibrating horn / mm	Frequency / kHz	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Total testing time /h
12	19~21	20	at least 6

度电子天平和扫描电镜(SEM)(JSM-7001F, JEOL, Japan)分析气蚀后未经 LSP 处理、经 6 J LSP 处理和经 9 J LSP 处理的激光焊接件的相变、表面和横截面硬度、累积质量损失和表面形貌。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 XRD 分析

图 1(a)~(c)分别是激光焊接件未经 LSP 处理、经 6 J 和 9 J LSP 处理气蚀后的表面 XRD 谱线图,其中  $2\theta$  为衍射角,即为 X 射线发生衍射后改变方向的角度。文献[3,12,13]指出经气蚀作用能够使奥氏体发生相变产生马氏体,随着气蚀过程进行这些马氏体会扭曲剥落,马氏体强度减弱。但比较图 1 发现随着激光能量增加, $\gamma$  奥氏体衍射强度降低, $\epsilon$  马氏体衍射强度升高。这是因为马氏体是在奥氏体晶粒内生成,而不会穿晶生长。LSP 处理前,激光焊接件受自身机械性能限制(如较低的硬度),粗大的马氏体易受气蚀破坏,持续的气蚀破坏

使得 $\epsilon$ 马氏体边缘扭曲剥落,马氏体强度减弱,这也是造成激光焊接件在气蚀后累积质量减少的原因。与未经LSP处理的激光焊接件相比,LSP处理能细化奥氏体晶粒,与此同时增强了在细化奥氏体晶粒内生成的更细化的马氏体,提高激光焊接件机械性能(如硬度增加、粗糙度降低),其中硬度增强是抗气蚀性能提高最主要的前提条件<sup>[14~16]</sup>,高硬度的激光焊接件经气蚀后出现的 $\epsilon$ 马氏体边缘不易发生扭曲剥落,产生的 $\epsilon$ 马氏体强度就不会减少,强度相对增加,激光能量越大, $\epsilon$ 马氏体强度越高。

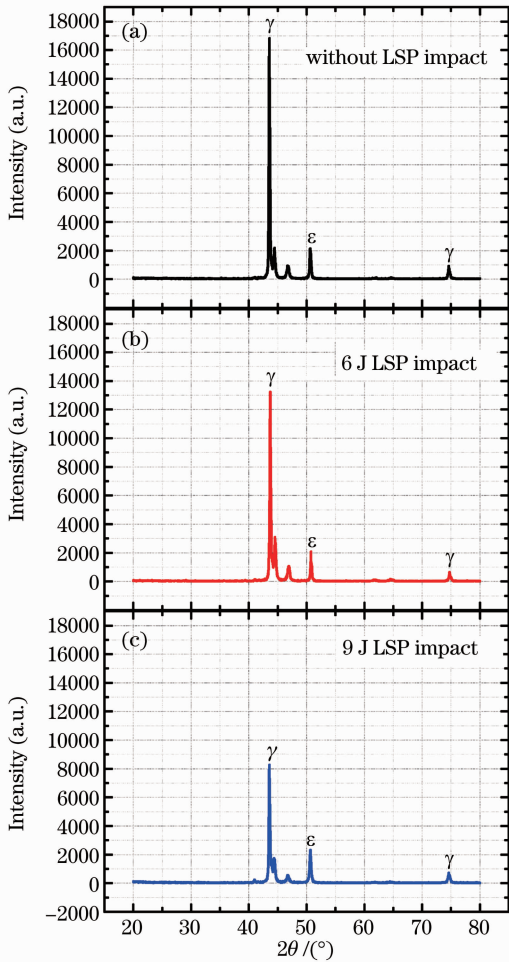


图1 激光焊接件LSP处理气蚀后的XRD表面谱线图

Fig.1 XRD spectra of laser weldments without and with LSP impacts after cavitation erosion

### 3.2 表面和截面硬度测量与分析

图2是未经LSP处理、经6 J LSP处理和9 J LSP处理气蚀后的表面硬度分布图。气蚀后,未经LSP处理的激光焊接件表面硬度最小,经9 J LSP处理的激光焊接件表面硬度最大。另外,焊缝区表面硬度最大,热影响区表面硬度最小。具体来看,未经LSP处理的激光焊接件母材表面平均硬度为

183.5 HV,热影响区表面平均硬度为159.5 HV,焊缝区表面平均硬度为203.0 HV;经6 J LSP处理的激光焊接件母材表面平均硬度值为246.8 HV,热影响区的表面平均硬度值为223.6 HV,焊缝区的表面平均硬度值为265.2 HV;经9 J LSP处理的激光焊接件母材表面平均硬度为283.9 HV,热影响区表面平均硬度为260.2 HV,焊缝区表面平均硬度为306.0 HV。硬度变化是反映材料强化能力的重要指标,硬度增加,抗气蚀能力增加<sup>[14~16]</sup>。随着激光能量提高,激光焊接件表面硬度增加,因此其抗气蚀性能提高。

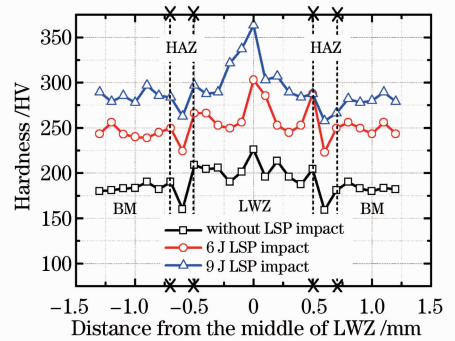


图2 激光焊接件未经LSP处理、经6 J LSP处理和9 J LSP处理气蚀后的表面硬度分布图

Fig.2 Surface hardness of laser weldments without and with LSP impacts after cavitation erosion

图3是激光焊接件各区未经LSP处理、经6 J LSP处理和9 J LSP处理气蚀后的横截面硬度分布曲线图。图3(a)是焊缝区横截面硬度分布曲线图,未经LSP处理气蚀后,焊缝区硬度值从表面203 HV开始随着深度增加而增加,到达234.04 HV后均匀分布。经6 J LSP处理气蚀后,焊缝区硬度值从表面265 HV增加到0.2 mm处271 HV;0.2~0.6 mm处缓慢降低,0.6~0.8 mm处迅速降低;超过0.8 mm趋于稳定,硬度值大约为238.72 HV。经9 J LSP处理气蚀后,焊缝区硬度值从表面306 HV增加到0.2 mm处312 HV;0.2~0.8 mm处缓慢降低,0.8~1.0 mm处迅速降低;超过1.0 mm趋于稳定,硬度值大约为235.54 HV。图3(b)是热影响区横截面硬度分布曲线图,未经LSP处理气蚀后,热影响区硬度值从表面160 HV增加到196.34 HV后趋于均匀分布。经6 J LSP处理气蚀后,热影响区硬度值从表面223.6 HV增加到0.2 mm处234.16 HV;0.2~0.6 mm处缓慢降低,0.6~0.8 mm处迅速降低;超过0.8 mm后均匀分布,硬度值为197.1 HV。经9 J LSP处理气蚀

后,热影响区硬度值从表面硬度值 260 HV 增加到 0.2 mm 处 280.0 HV; 0.2~0.8 mm 处缓慢降低, 0.8~1.0 mm 处迅速降低; 当超过 1.0 mm, 硬度均匀分布, 硬度值为 197.7 HV。图 3(c) 是母材横截面硬度分布曲线图, 截面硬度分布趋势与图 3(a) 和 (b) 类似, 未经 LSP 处理气蚀后, 母材硬度值从表面硬度 183 HV 增加到 0.2 mm 处 200.89 HV 后趋于均匀分布。经 6 J LSP 处理气蚀后, 母材硬度值从表面 236 HV 增加到 0.2 mm 处 245 HV; 0.2~0.6 mm 处缓慢降低, 0.6~0.8 mm 处迅速降低; 超过 0.8 mm 后均匀分布, 硬度值为 205.72 HV。经

9 J LSP 处理气蚀后, 母材硬度值从表面 273 HV 增加到 284 HV, 0.2~0.8 mm 处缓慢降低, 0.8~1.0 mm 处迅速降低; 超过 1.0 mm 后均匀分布, 大小为 207.1 HV。对比图 3(a)、(b) 和 (c) 发现, 随激光能量增加, 气蚀截面硬度值变大, 经 6 J LSP 气蚀后强化层为 0.8 mm 左右, 经 9 J LSP 气蚀后强化层大约为 1.0 mm; 另外, 焊缝区气蚀截面硬度值最高, 热影响区最低。综上所述, 在一定强化层内, LSP 能够提高激光焊接件气蚀截面硬度, 有利于增强激光焊接件抗气蚀性能。

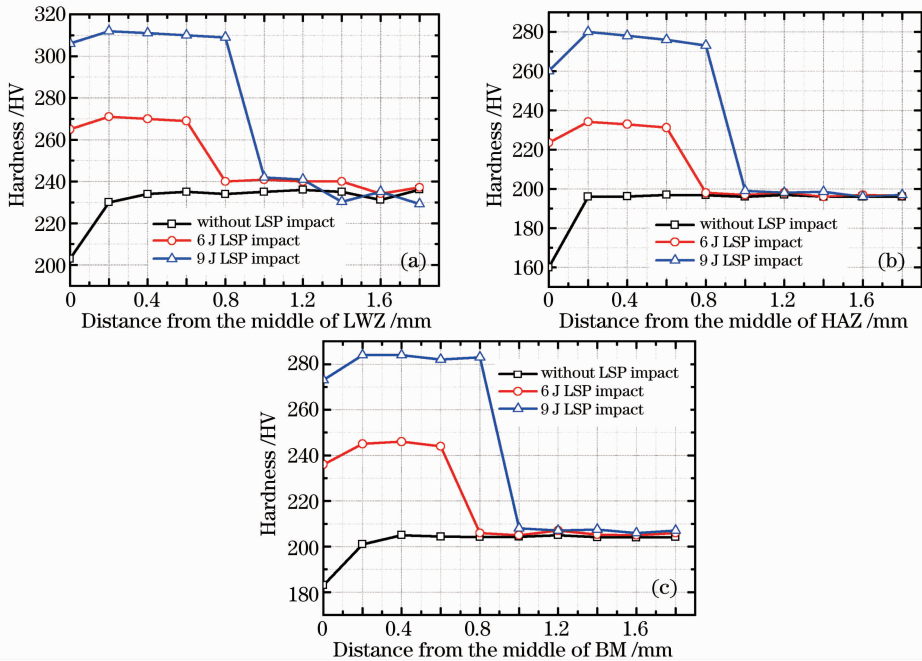


图 3 激光焊接件各区未经 LSP 处理、经 6 J LSP 处理和 9 J LSP 处理气蚀后的横截面硬度分布曲线图。

(a) 焊缝区; (b) 热影响区; (c) 母材

Fig. 3 Cross-sectional hardness of laser weldments without, with 6 J and 9 J LSP impacts after cavitation erosion. (a) LWZ; (b) HAZ; (c) BM

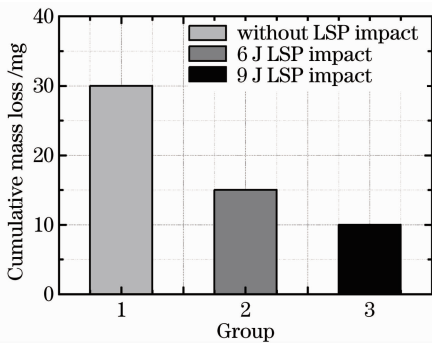


图 4 气蚀后激光焊接件未经 LSP 处理、6 J LSP 处理和 9 J LSP 处理后的累积质量损失图

Fig. 4 Cumulative mass loss of laser weldments without, with 6 J and 9 J LSP impacts after cavitation erosion

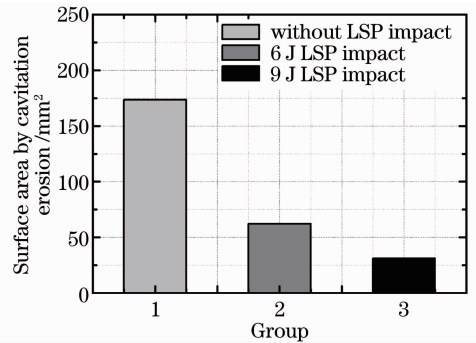


图 5 气蚀后激光焊接件未经 LSP 处理、6 J LSP 处理和 9 J LSP 处理后的表面气蚀破坏面积图

Fig. 5 Damaged surface area of laser weldments without, with 6 J and 9 J LSP impacts after cavitation erosion

### 3.3 累积质量损失结果与分析

图4是未经LSP处理、经6 J LSP处理和9 J LSP处理气蚀后的累积质量损失图。图5是未经LSP处理、经6 J LSP处理和9 J LSP处理气蚀后的表面气蚀破坏面积图。未经LSP处理的激光焊接件气蚀后累积质量损失是30 mg,表面气蚀破坏面积是173.66 mm<sup>2</sup>,占工作面面积的57.89%;经6 J LSP处理的激光焊接件气蚀后累积质量损失是15 mg,表面气蚀破坏面积是62.21 mm<sup>2</sup>,占工作面面积的20.74%;经9 J LSP处理的激光焊接件气蚀后累积质量损失是10 mg,表面气蚀破坏面积是30.98 mm<sup>2</sup>,占工作面面积的10.34%。随着激光能量增加,激光焊接件抗气蚀性能越明显,LSP处理能提高激光焊接件抗气蚀性能。

### 3.4 SEM观测与分析

图6是气蚀6 h后激光焊接件未经LSP处理、经6 J LSP处理和9 J LSP处理的表面破坏形貌SEM照片。经不同LSP处理,表面被气蚀破坏的程度不一样,未经LSP处理的起伏组织轮廓最为显著,如图6(a)所示,连接形成一条条解理台阶。经LSP处理后,表面起伏组织轮廓不明显,见图6(b)和(c),随激光能量增加,起伏组织轮廓越来越不明

显。气蚀对材料表面破坏发生的塑性变形是颗粒的微观变形,颗粒微观变形越剧烈,起伏组织越明显,说明气蚀越严重<sup>[3,17,18]</sup>。气蚀破坏通常会较早产生于较软的组织,由此也说明材料硬度越低,抗气蚀能力越差。具体来说,在气蚀过程中,未经LSP处理的材料表面马氏体分布不均,粗大的马氏体在原始奥氏体晶粒中生成,表面起伏组织明显,易发生应力集中促进裂纹的萌生并向内扩展,气蚀空泡溃灭时产生的水击压力反复冲击该局部区域,马氏体扭曲变形最后从表面剥落,导致马氏体强度变少,硬度降低,抗气蚀性能下降。经LSP处理后,材料表面马氏体均匀分布,晶粒细化、细小的马氏体在细化的奥氏体晶粒中生成,表面起伏组织不明显,防止应力集中减少甚至抑制裂纹萌生扩展,表面强韧性增加,马氏体不易剥落,由此马氏体强度相对高于未经LSP处理的马氏体强度。LSP处理能够强化晶界、细化组织<sup>[19]</sup>,增加材料硬度,有效地吸收和传递作用在表面的气蚀应力,提高材料强度,这种变化延迟表面材料进一步变形,增大裂纹扩展的阻力,提高焊接件抗气蚀能力。其中,经9 J LSP处理的效果最佳,整体改善激光焊接件抗气蚀性能。

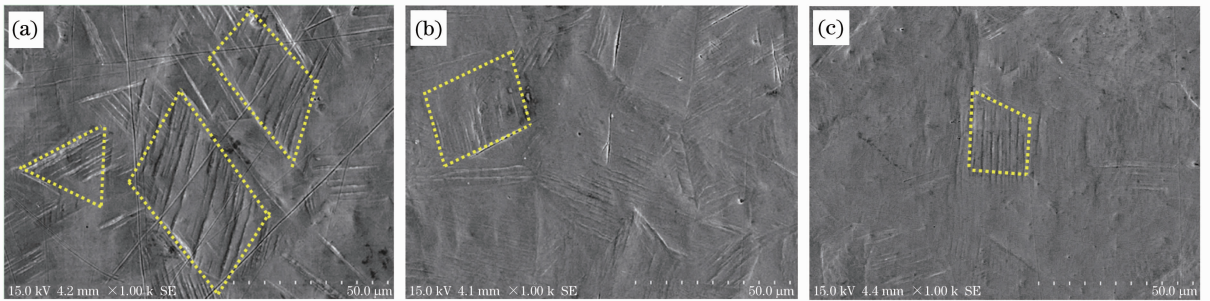


图6 激光焊接件LSP处理气蚀后的表面形貌SEM照片。(a)未经LSP处理;(b)经6 J LSP处理;(c)经9 J LSP处理

Fig. 6 SEM micrographs of surface morphologies after cavitation erosion. (a) Untreated laser weldments;

(b) LSP laser weldments with 6 J pulse energy; (c) LSP laser weldments with 9 J pulse energy

## 4 结 论

1) 采用激光冲击强化处理激光焊接件,气蚀后,激光脉冲能量增加,马氏体强度相对提高,马氏体剥落得到抑制,表面和横截面硬度增加,累积质量损失和表面气蚀破坏面积减小。

2) 随激光脉冲能量增加,马氏体晶粒细化,激光焊接件气蚀后表面起伏组织变浅变疏,表面裂纹萌生和扩展得到抑制。因此激光冲击强化能够提高激光焊接件抗气蚀性能。

## 参 考 文 献

- 1 J. H. Baek, Y. P. Kim, W. S. Kim *et al.*. Fracture toughness and fatigue crack growth properties of the base metal and weld metal of a type 304 stainless steel pipeline for LNG transmission [J]. *Int. J. Pressure Vessels Piping*, 2001, **78**(5): 351~357
- 2 K. Mukai, K. Hoshino, T. Fujioka. Tensile and fatigue properties of austenitic stainless steels at LNG temperature[J]. *Tetsu-to-Hagane*, 1979, **65**(12): 1756~1765
- 3 Lei Yucheng, Feng Lianghou, Zhao Xiaojun. Cavitation erosion behavior of an austenitic stainless steel[J]. *J. Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2006, **27**(3): 241~244  
雷玉成, 冯良厚, 赵晓军. 一种奥氏体不锈钢的空泡腐蚀行为[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2006, **27**(3): 241~244
- 4 G. Bregliozzi, A. Di Schino, S. I. U. Ahmed *et al.*. Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain

- sizes[J]. *Wear*, 2005, **258**(1-4): 503~510
- 5 Xu Guifang, Qin Minming, Lei Yucheng *et al.*. Cavitation erosion resistance of Fe-Cr-Ni-Co overlaying and remelting layer [J]. *Chinese J. Material Research*, 2011, **25**(1): 61~66  
徐桂芳, 秦敏明, 雷玉成等. Fe-Cr-Ni-Co 合金堆焊和重熔层的空蚀性能[J]. *材料研究学报*, 2011, **25**(1): 61~66
- 6 L. Zhang, K. Y. Luo, J. Z. Lu *et al.*. Effects of laser shock processing with different shocked paths on mechanical properties of laser welded ANSI 304 stainless steel joint [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2011, **528**(13-14): 4652~4657
- 7 Ren Xudong, Ruan Liang, Huangfu Yongzhuo *et al.*. Experimental research of laser shock processing 6061-T651 aluminum alloy during elevated temperature [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0303010  
任旭东, 阮亮, 皇甫喆卓等. 中高温条件下 6061-T651 铝合金激光冲击强化研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0303010
- 8 L. Zhang, J. Z. Lu, Y. K. Zhang *et al.*. Effects of different shocked paths on fatigue property of 7050-T7451 aluminum alloy during two-sided laser shock processing [J]. *Mater. Des.*, 2011, **32**(2): 480~486
- 9 Zhong Junwei, Lu Jinzhong, Luo Kaiyu *et al.*. Tribological behaviors of laser shock processing AISI 8620 steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0103001  
钟俊伟, 鲁金忠, 罗开玉等. AISI 8620 合金钢激光冲击强化层摩擦学特性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0103001
- 10 Ge Maozhong, Zhang Yongkang, Xiang Jianyun. Research on laser shock strengthening and stress corrosion cracking resistance of AZ31B magnesium alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2925~2930  
葛茂忠, 张永康, 项建云. AZ31B 镁合金激光冲击强化及抗应力腐蚀研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2925~2930
- 11 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
- 12 Z. Xiaojun, L. A. J. Procopiak, N. C. Souza *et al.*. Phase transformation during cavitation erosion of a Co stainless steel [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2003, **358**(1-2): 199~204
- 13 Y. G. Zhang, S. Z. Luo, W. Ke. Cavitation erosion-corrosion behaviour of CrMnB stainless steel overlay and 0Cr13Ni5Mo stainless steel in 0.5 M NaCl and 0.5 M HCl solutions [J]. *Tribol. Int.*, 2008, **41**(12): 1181~1189
- 14 X. Y. Li, Y. G. Yan, L. Ma *et al.*. Cavitation erosion and corrosion behavior of copper-manganese-aluminum alloy weldment [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 2004, **382**(1-2): 82~89
- 15 C. T. Kwok, H. C. Man, F. T. Cheng. Cavitation erosion and damage mechanisms of alloys with duplex structures [J]. *Mater. Sci. Engng. A*, 1998, **242**(1-2): 108~120
- 16 A. Krella, A. Czyniewski. Influence of the substrate hardness on the cavitation erosion resistance of TiN coating [J]. *Wear*, 2007, **263**(1-6): 395~401
- 17 Lei Yucheng, Qin Minming, Xu Guifang *et al.*. Cavitation erosion behavior of Cr-Ni-Co austenite deposited metal [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, **32**(6): 21~24  
雷玉成, 秦敏明, 徐桂芳等. Cr-Ni-Co 奥氏体堆焊材料的空泡腐蚀行为[J]. *焊接学报*, 2011, **32**(6): 21~24
- 18 Lei Yucheng, Li Tao, Qin Minming *et al.*. Cavitation erosion resistance of Co alloy coating on 304 stainless steel by TIG cladding [J]. *Trans. China Weld. Inst.*, 2011, **32**(7): 9~12  
雷玉成, 李涛, 秦敏明等. 304 不锈钢 TIG 熔覆钴合金涂层的耐空蚀性能[J]. *焊接学报*, 2011, **32**(7): 9~12
- 19 Luo Xinming, Ma Hui, Zhang Jingwen *et al.*. Surface nanocrystallization of austenitic stainless steel induced by laser shocking [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603028  
罗新民, 马辉, 张静文等. 激光冲击诱导的奥氏体不锈钢表层纳晶化[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603028

栏目编辑: 宋梅梅