

应用技术

## 激光表面微织构工艺试验及应用研究

张培耘, 华希俊, 符永宏, 尹必峰

(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

**[摘要]** 在声光调 Q 二级管泵浦固体光源 Nd:YAG 激光器基础上,采用“单脉冲同点间隔多次”激光微加工工艺,对 45<sup>#</sup> 钢试样表面进行激光微织构加工。分析了离焦量、泵浦电流、重复频率及重复次数对微织构形貌的影响规律。工艺试验表明,微凹腔的直径和深度随着泵浦电流的增大而增大,随着重复频率的增加呈减小的趋势,微凹腔深度随脉冲次数的增加呈近似线性增加,而微凹腔直径呈缓慢减小趋势。通过对某型号四缸汽油机的台架性能试验研究,表明与传统平顶机械珩磨相比,采用激光珩磨技术的汽油机油油耗要比原机降低 56%,燃油消耗降低 1.94%~4.5%。

**[关键词]** 脉冲激光;激光表面微织构;激光珩磨;摩擦学性能

**[中图分类号]** TH117.1; TG156.99

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2013)05-0055-04

## Experimental Investigations on Laser Surface Micro-texturing Technology and Application

ZHANG Pei-yun, HUA Xi-jun, FU Yong-hong, YIN Bi-feng

(Mechanical Engineering College, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**[Abstract]** The 45<sup>#</sup> steel sample surfaces were textured with single pulse interval laser micro-machining method by a Q switched diode-pumped solid-state Nd:YAG laser. The effect of the defocus diversity, pump currents, repetition frequency and repetition times on micro-machining profile was discussed. The test shows that the dimple diameter and depth increase while pump currents are increased. The dimple diameter and depth decrease while laser repetition frequency is increased. The dimple depth increase linearly and the dimple depth decrease slowly, while laser pulse repetition times are increased. With the laser texturing of the four cylinder-bore surfaces of the Gasoline Engine, the fuel consumption is reduced by 1.94%~4.5% and the oil consumption is reduced by 56%, comparing with traditional plateau honing technology.

**[Key words]** pulse laser; laser surface micro-texturing; laser honing; tribological performance

近年来,为了改善一些重要摩擦副的摩擦学性能,对激光表面织构技术(Laser Surface Texturing, LST)的研究日益受到重视<sup>[1]</sup>。该技术具有加工速度快、对环境无污染以及表面微织构控制能力优良等特点。利用该技术可在摩擦副表面加工出一定分布的微腔或微槽,在完全液体或混合润滑情况下,可起到微动压轴承的作用。在边界摩擦情况下可起到贮存润滑油的作用,同时,对于液体润滑和干摩擦情况,均能起到收集磨粒的作用<sup>[2-3]</sup>。20 世纪 90 年代,随着声光调 Q 技

术的不断成熟和二极管泵浦光源的产生,二级管泵浦固体光源(DPSS)YAG 激光器,具有结构紧凑、平均功率高、稳定可靠、操作简便、光束模式好,可实现多次倍频等一系列突出优点,已成为金属材料微细加工最为现实和可能的选择<sup>[4-6]</sup>。德国 Gehring 公司 Klink U 等人提出了激光珩磨技术,就是利用具有一定能量密度的激光束,在气缸内孔表面,加工出与气缸润滑减摩性能要求相匹配的珩磨网纹沟槽,并在 AVL58 型发动机上进行了效能试验。结果表明,发动机磨损量、机油

**[收稿日期]** 2013-04-02; **[修回日期]** 2013-05-27

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(51175233);江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2010068);江苏省科技支撑计划项目(BE2010060);江苏省高校自然科学基金研究计划(07KJD460035);镇江市工业科技支撑计划(GY2012039)

**[作者简介]** 张培耘(1965—),女,讲师,主要研究方向为激光微织构技术与摩擦学设计。

耗、污染排放都明显下降<sup>[7]</sup>。Ramos J A, Chen K 等人<sup>[8-9]</sup>先后开展了激光加工工艺规律及影响因素方面的研究。刘志勇等人研究了钛合金表面织构的光纤激光加工多参数的耦合作用,提出了一套适用于凹坑形和凹槽形两种表面图案的理想工作参数组合<sup>[10]</sup>。符永宏等人采用半导体泵浦 YAG 可倍频激光器,在灰铸铁摩擦副表面进行微观几何形貌的加工试验研究,并分析了脉冲激光与金属材料相互作用的机理<sup>[11]</sup>。

为了适应不同摩擦工况对表面织构的形状及尺寸要求,文中开展了激光微织构工艺参数对微凹腔织构形貌参数影响规律的研究,并通过发动机台架综合性能试验,进一步分析激光微织构技术的应用前景。

## 1 试样准备和加工设备

采用 45# 钢作为工艺试样的材料。试样呈圆盘状,其直径为 110 mm,厚度为 10 mm。并控制表面粗糙度  $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ 。在激光表面织构工艺试验前,试样表面需经研磨抛光,并采用无水乙醇进行去污处理。采用自主研发的激光微加工系统(根据“单脉冲同点间隔多次”激光微织构工艺,选用二极管泵浦 Nd:YAG 激光器,其光束模式为 TEM00,采用声光调 Q 控制产生脉冲激光,激光波长为 532 nm,调 Q 重复频率为 1~50 kHz。光束质量系数  $< 2$ ,发散角  $< 3 \text{ mrad}$ ),加工出的凹腔微织构表面如图 1 所示。其它仪器设备有 P1000 型激光功率计、美国产 WYKO-NT1100 表面形貌三维测量仪、超声波清洗装置等。在形貌测试前,需通过超声清洗表面。

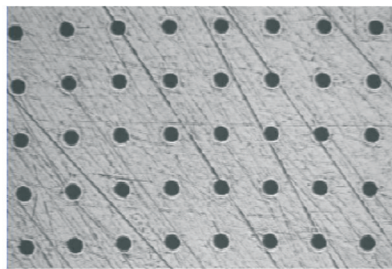


图 1 凹腔微织构表面

Fig. 1 Surface with micro-dimples

## 2 试验结果与分析

### 2.1 工艺参数对微凹腔织构形貌影响

#### 2.1.1 离焦量

在激光头聚焦透镜焦距为 60 mm,重复频率为 800 Hz,泵浦电流为 20 A,脉冲重复次数为 5 次,辅助气体为氮气,压力为 0.15 MPa 的条件下,研究分析激光头

到工件表面的距离变化对凹腔加工形貌的影响。激光头到工件表面距离  $L$  分别为 1, 1.6, 2 mm 时,所测得的微凹腔形貌如图 2 所示。随着距离的增大,凹腔直径和深度均呈减小趋势,其中凹腔深度减小较快,而凹腔直径减小稍慢(如图 3 所示)。这是由于随着激光头与工件距离的增加,聚焦透镜焦点与试样加工表面之间的距离逐步增大,即离焦量随之增大,造成激光作用区域平均功率密度下降,从而使凹腔深度和直径均变小。由于光斑直径变化不大,所以凹腔直径减小稍慢。

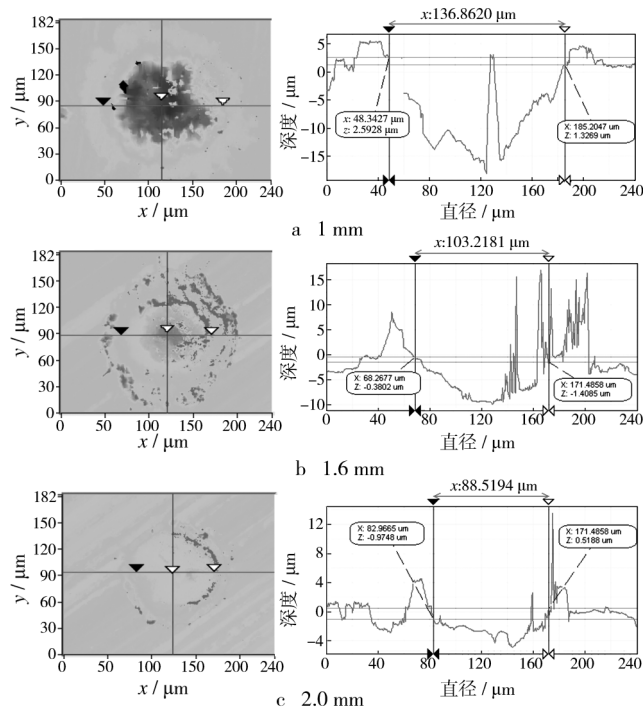


图 2  $L$  不同时微凹腔加工形貌

Fig. 2 Micro-dimple morphology machined under different  $L$

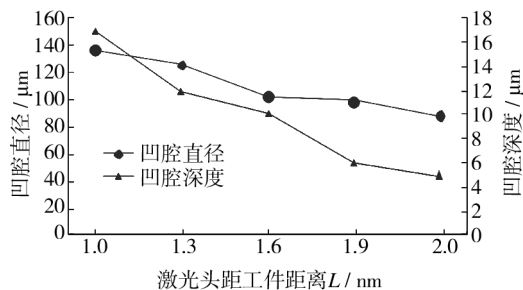


图 3  $L$  变化对凹腔直径/深度的影响

Fig. 3 The relation between dimple diameter/depth and  $L$

#### 2.1.2 泵浦电流

重复频率为 1600 Hz,脉冲重复次数为 4 次,辅助气体为氮气,压力为 0.15 MPa,  $L=0.6 \text{ mm}$  的条件下,在不同泵浦电流时( $I=17 \text{ A}$ ,  $I=19 \text{ A}$  和  $I=20 \text{ A}$ ),试样表面微凹腔形貌参数如图 4 所示。在一定试验条件下,微加工凹腔直径和深度均随着泵浦电流增加而增大(如图 5 所示)。这是由于随着激光泵浦电流的增

大,激光功率密度随之增大,因而单脉冲烧蚀产生凹腔的深度和直径均增大。

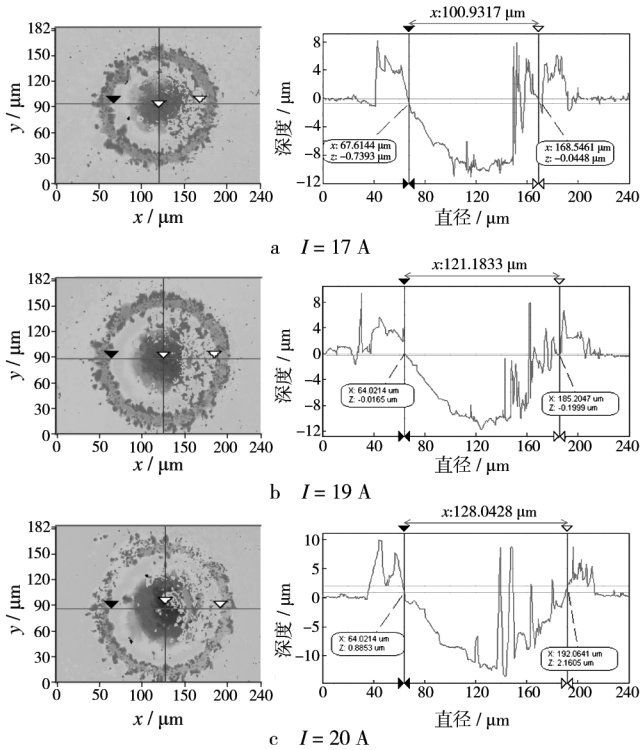


图 4 不同泵浦电流时微凹腔加工形貌

Fig. 4 Micro-dimple profile machined under different  $I$

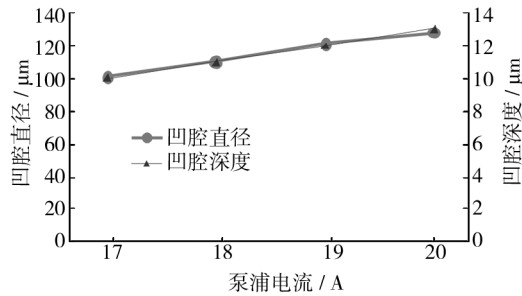


图 5 泵浦电流变化对凹腔直径和深度的影响

Fig. 5 The relation between dimple diameter/depth and  $I$

2.1.3 脉冲重复频率

在泵浦电流为 17A,脉冲重复次数为 4 次,辅助气体为氮气,压力为 0.15 MPa 的条件下,重复频率  $f$  在 500 ~ 8500 Hz 范围变化时,试样表面微凹腔形貌的变化如图 6 所示。当  $f=8500$  Hz 时,不但没有加工出微凹腔,反而出现凸起高度为 1.6  $\mu\text{m}$  的毛化形貌。这是由于随着重复频率的大幅提高,单个激光脉冲的脉冲峰值功率大幅减小,材料表面达不到汽化蚀除温度,只是产生微区的熔化和凝固。

如图 7 所示,随着重复频率范围的增大,凹腔直径和深度呈减小的趋势。因为随着重复频率增大,脉冲峰值功率下降,单个凹腔每次获得的脉冲能量随之减小,因而加工凹腔直径和深度均会减小。

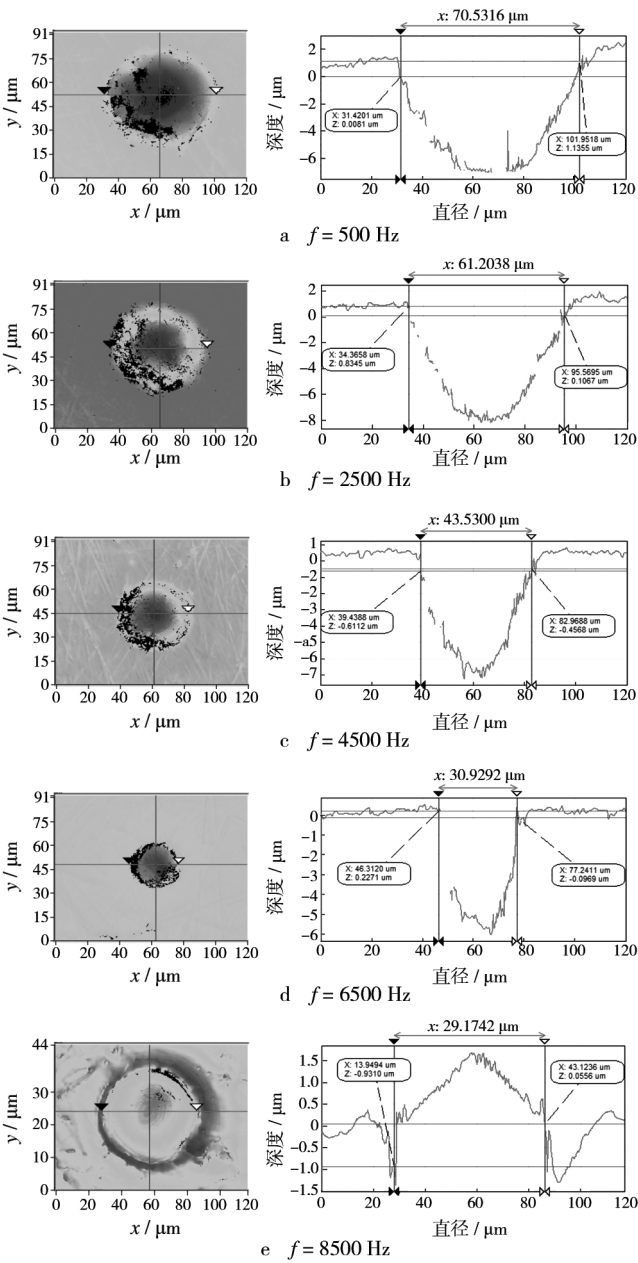


图 6 不同重复频率( $f=500 \sim 8500$  Hz)时微凹腔加工形貌

Fig. 6 Micro-dimple profile machined under different  $f$

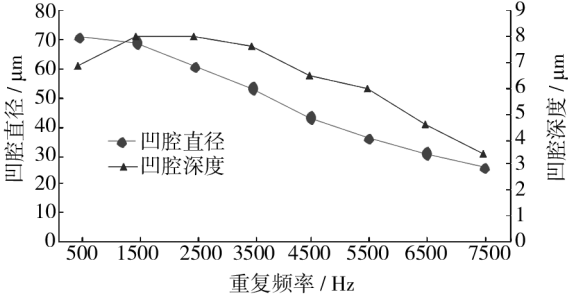


图 7 重复频率变化对凹腔直径和深度的影响

Fig. 7 The relation between dimple diameter/depth and  $f$

2.1.4 脉冲重复次数

脉冲重复次数是影响凹腔深度的重要因素,必须保证多次脉冲加工时,凹腔的开口直径具有良好的一

致性。在泵浦电流为 16 A, 重复频率为 1600 Hz, 辅助气体为氮气, 压力为 0.15 MPa 条件下, 不同脉冲重复次数(3~30 次)下加工凹腔的形貌如图 8 所示。

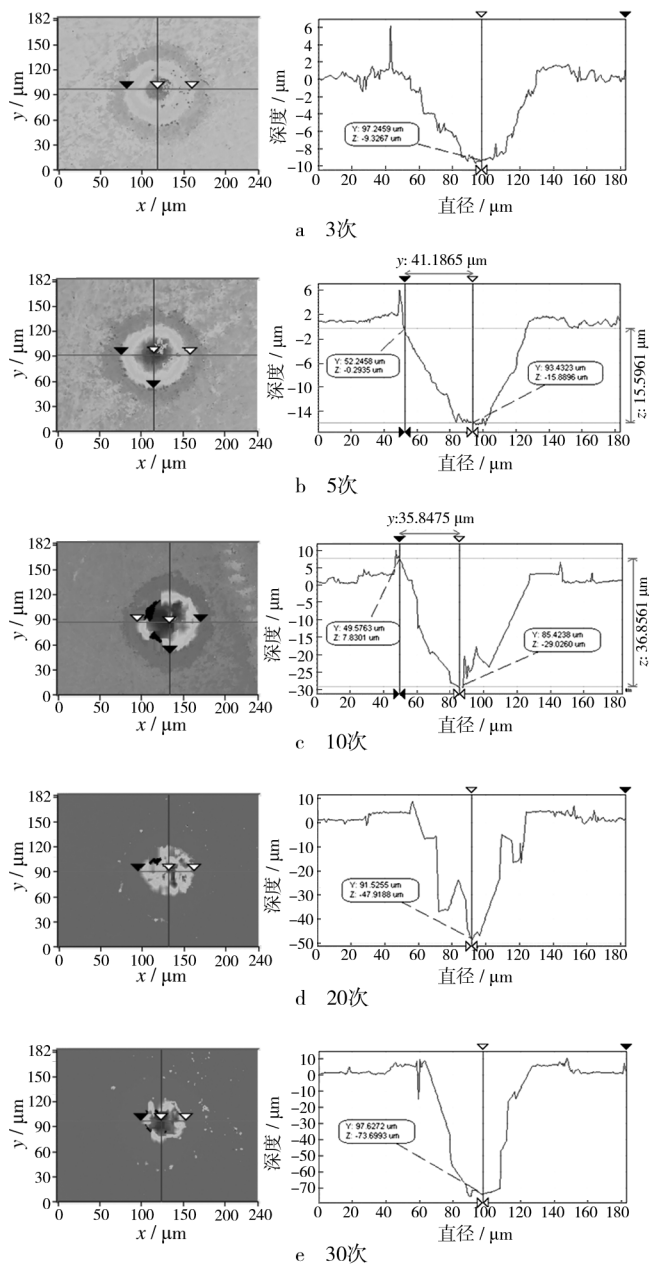


图 8 不同脉冲重复次数(3~30 次)时微凹腔加工形貌

Fig. 8 Micro-dimple profile machined under different repetition times

从图 9 可以看出:凹腔深度随脉冲数的增加均呈近似线性增加,而凹腔直径随着脉冲重复次数的增加呈缓慢减小趋势。在脉冲数较少(3~10 次)时,由于熔渣能及时排出,所以凹腔直径基本稳定。当脉冲数过大(大于 10 次)时,由于凹腔较深,熔渣不易及时排出,产生熔渣重铸现象,因而凹腔直径反而逐渐变小,加工质量也会变差,甚至出现凹腔深度变浅,残渣堆满凹腔的情况。由此可见,从加工质量和加工效率考虑,

脉冲重复次数均不宜过多。

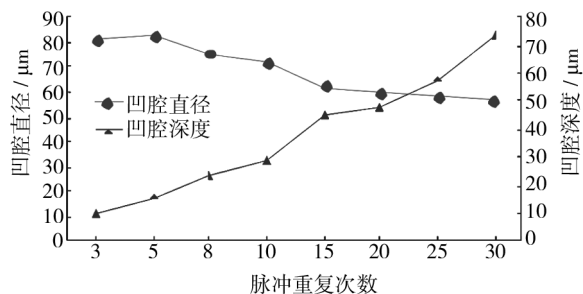


图 9 脉冲重复次数对凹腔直径和深度的影响

Fig. 9 The relation between dimple diameter/depth and repetition times

## 2.2 激光表面微织构技术的应用

对某型号四缸汽油机缸孔上、下止点之间区域进行激光珩磨加工。微凹腔织构形貌参数为:凹腔半径  $r_p$  为 30~40  $\mu\text{m}$ , 凹腔间距  $L=200 \mu\text{m}$ , 深度  $h_p$  为 3~5  $\mu\text{m}$ 。装机后发动机动力性能保持稳定,在不同工况条件下油耗降低 1.94%~4.5%,12 h 的机油消耗要比原机降低 24.1 g/h,降幅达 56%。

## 3 结论

1) 微凹腔的直径和深度随着泵浦电流的增大而增大,随着重复频率的增大呈减小的趋势,微凹腔深度随脉冲次数的增加呈近似线性增加,而凹腔直径呈缓慢减小趋势。通过选择合适的激光加工工艺参数,可加工出良好的表面微腔织构形貌。

2) 通过对汽油机缸孔激光珩磨的台架性能试验研究表明,与传统平顶珩磨技术相比,采用激光珩磨技术,在不同工况条件下油耗降低 1.94%~4.5%,机油消耗要比原机降低 56%,有利于减轻污染排放。

3) 激光微织构技术在提高缸套、凸轮、曲轴、齿轮和密封环等关键摩擦副表面润滑减磨性能方面具有良好的研究和应用前景。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] ETSION I. State of the Art in Laser Surface Texturing[J]. ASME J Tribol, 2005, 127: 248—252.
- [2] GOLLOCH R, MERKER G P, KESSEN U, et al. Functional Properties of Microstructured Cylinder Liner Surfaces for Internal Combustion Engines[J]. Tribol Test, 2005, 11(4): 307—324.

部则产生压应力。砂纸打磨后,试样表面形成了很多微小的划痕,而电解抛光正好优先溶解凸起的划痕两边,有效消除了其拉应力,而保留了较大的压应力。

这种压应力有利于提高材料抗 SCC 性能<sup>[8-9]</sup>。处于拉应力状态的微小划痕两侧是产生 SCC 的主要起始源<sup>[8]</sup>,如果通过电解抛光溶解这些高拉应力部位,可有效减少 SCC 的发生。目前各国核电站也采用压应力方法来预防 SCC 问题的发生,例如日本采用的高压水射流喷丸技术(WJP),即应用高压水射流去除或减小原始表面拉应力层,使金属表面产生压应力<sup>[9]</sup>。对比电解抛光和高压水射流喷丸后的表面应力状况(图 6)可知,电解抛光可在一定程度上达到相同的效果,即电解抛光可改善金属表面应力状态,使其表面原始拉应力状态变为压应力状态,从而抑制 SCC 问题的发生。

### 3 结论

1) AP1000 上封头 CRDM 管座用焊接镍基合金的适宜电解抛光工艺参数如下:电流密度 0.3 ~ 0.5 A/cm<sup>2</sup>,抛光时间 2 ~ 5 min。

2) 电解抛光对焊接镍基合金的不同粗糙度表面均有明显的改善作用,可使原始表面粗糙度降低 1 ~ 2 级,并且预打磨颗粒越细,电解抛光的效果越明显。

3) 电解抛光在一定程度上可改善焊接镍基合金的表面应力状态,使其表面原始拉应力状态变为压应力状态,从而抑制应力腐蚀开裂的发生。

### [参 考 文 献]

- [1] 候娟,彭群家,庄子哲雄,等. 镍基合金焊接过渡区微观结构及应力腐蚀行为研究[J]. 金属学报,2010,46(10): 1258—1266.
  - [2] LU B T, CHEN Z K, LUO J L, et al. Pitting and Stress Corrosion Cracking Behavior in Welded Austenitic Stainless Steel[J]. *Electrochimica Acta*, 2005, 50(6): 1391—1403.
  - [3] 柯伟. 现代腐蚀科学与防护技术的研发趋势与未来挑战[R]//中国腐蚀与防护学会三十周年学术会议报告集. 北京:中国腐蚀与防护学会,2009.
  - [4] 郝杰芬. 不锈钢电解抛光[J]. 表面技术,2000,29(3): 36—37.
  - [5] 杜炳志,漆红兰. 电化学抛光技术新进展[J]. 表面技术,2007,36(2): 56—58.
  - [6] 李光福,杨武. 核电站异材焊接件的破裂问题与应力腐蚀评价方法[J]. 核安全,2003(2): 37—40.
  - [7] DATTA M, VERCRUYSEE D. Transpassive Dissolution of 420 Stainless Steel in Concentrated Acids under Electropolishing Conditions[J]. *The Electrochemical Society*, 1990, 137(10): 3016—3023.
  - [8] MENG F J, WANG J Q, HAN E H, et al. Effects of Scratching on Corrosion and Stress Corrosion Cracking of Alloy 690TT at 58 °C and 330 °C [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51: 2761—2769.
  - [9] SAGAWA W, YOSHIKUBO F, MORINAKA R, et al. Application of Water Jet Peening (WJP) Technology to BWR Core Support Structures[J]. *Protection Science*, 2009, 7(4): 69—76.
  - [1] 候娟,彭群家,庄子哲雄,等. 镍基合金焊接过渡区微观结构及应力腐蚀行为研究[J]. 金属学报,2010,46(10): 1258—1266.
  - [2] LU B T, CHEN Z K, LUO J L, et al. Pitting and Stress Corrosion Cracking Behavior in Welded Austenitic Stainless Steel[J]. *Electrochimica Acta*, 2005, 50(6): 1391—1403.
  - [3] 柯伟. 现代腐蚀科学与防护技术的研发趋势与未来挑战[R]//中国腐蚀与防护学会三十周年学术会议报告集. 北京:中国腐蚀与防护学会,2009.
  - [4] 郝杰芬. 不锈钢电解抛光[J]. 表面技术,2000,29(3): 36—37.
  - [5] 杜炳志,漆红兰. 电化学抛光技术新进展[J]. 表面技术,2007,36(2): 56—58.
  - [6] 李光福,杨武. 核电站异材焊接件的破裂问题与应力腐蚀评价方法[J]. 核安全,2003(2): 37—40.
  - [7] DATTA M, VERCRUYSEE D. Transpassive Dissolution of 420 Stainless Steel in Concentrated Acids under Electropolishing Conditions[J]. *The Electrochemical Society*, 1990, 137(10): 3016—3023.
  - [8] MENG F J, WANG J Q, HAN E H, et al. Effects of Scratching on Corrosion and Stress Corrosion Cracking of Alloy 690TT at 58 °C and 330 °C [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51: 2761—2769.
  - [9] SAGAWA W, YOSHIKUBO F, MORINAKA R, et al. Application of Water Jet Peening (WJP) Technology to BWR Core Support Structures[J]. *Protection Science*, 2009, 7(4): 69—76.
- (上接第 58 页)
- [3] KLIGERMAN Y, ETSION I, SHINKARENKO A. Improving Tribological Performance of Piston Rings by Partial Surface Texturing[J]. *Transactions of the ASME Journal of Tribology*, 2005, 127(3): 632—638.
  - [4] GERBIG Y, DUMITRU G, ROMANO, et al. Effects of laser Texturing on Technical Surfaces[C]//*Surface Engineering 2002—Synthesis, Characterization and Applications*, 2003: 45—60. (余不详)
  - [5] MEIJER J. Laser Beam Machining (LBM), State of the Art and New Opportunities[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149: 2—17.
  - [6] VILHENA L M. Surface Texturing by Pulsed Nd:YAG Laser[J]. *Tribology International*, 2009, 42: 1496—1504.
  - [7] KLINK U. New Technologies of Honing[C]//*International Honing Conference*. Atlanta, Georgia, 1998. (余不详)
  - [8] RAMOS J A, ESTRELA R, PITARCH L V. Laser Micromachining of Metals[C]//*Proceedings of SPIE*, 1999. (余不详)
  - [9] CHEN K, YAO Y L. Process Optimization in Pulsed Laser Micromachining with Applications in Medical Device Manufacturing[J]. *Advanced Manufacturing Technology*, 2000, 16: 243—249.
  - [10] 刘志勇,罗柏文,夏毅敏,等. 钛合金表面织构的光纤激光加工多参数耦合研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2011,26(3): 36—38.
  - [11] 符永宏,华希俊,陶根宁,等. 摩擦副表面激光微造型工艺试验研究[J]. 应用激光,2006,26(5): 295—298.