

工艺参数对激光冲击微造型效果的影响

黄志辉 刘会霞 沈宗宝 李 品 胡 杨 刘 辉 杜道忠 王 霄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 激光表面织构(LST)是一种广泛应用的表面微造型方法,然而其主要缺点是消融过程会导致材料熔化、断裂以及改变表面微观组织。基于激光冲击强化(LSP)技术在 Al7075 表面开展微凹坑造型研究,其特点是既能克服激光表面织构的缺点,又能继承激光冲击强化的优点。使用 AxioCSM700 真彩色共聚焦扫描显微镜和 Veeco WYKO 表面形貌仪观察微凹坑的几何形貌,用 HXD-1000TMSC/LCD MH-VK 双压头显微硬度计测量微凹坑的内部以及周围表面的硬度。实验结果表明,微凹坑的直径和深度随激光的脉冲能量、冲击次数、离焦量、约束层 K9 玻璃厚度的变化呈现一定的变化规律;微凹坑的影响区域,沿着凹坑径向方向硬度逐渐增加,中心位置硬度最大,这有利于提高材料的抗磨损能力。

关键词 激光技术;激光冲击强化;表面微造型;微凹坑;硬度

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0503004

Process Parameters Analysis on Surface Texturing under Laser Shock Peening

Huang Zhihui Liu Huixia Shen Zongbao Li Pin Hu Yang

Liu Hui Du Daozhong Wang Xiao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract Laser surface texturing (LST) is widely used in surface micro-forming, but its main problem is that the ablation process causes melting, cracking and changing of the surface microstructure. By using laser shock processing (LSP) micro dents are fabricated on Al7075 surface, which not only overcomes the weakness of LST, but also inherits the advantage of LSP. Choosing AxioCSM700 true color confocal scanning microscopy and Veeco WYKO surface morphology, the geometry morphology of micro dents are observed. With HXD-1000TMSC/LCD MH-VK double press heads, the interior and surface micro-hardness of micro dents are measured. Experimental results show that the diameter and the depth of micro dents change with laser pulse energy, the times of laser shock, focal length and thickness of confined layer K9 glass. The hardness of micro dent increases gradually along radial direction and the biggest hardness occurs in the center, which effectively improves the wear resistance of material.

Key words laser technique; laser shock processing; surface micro-forming; micro dents; hardness

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 240.6700; 350.3390

1 引 言

合理的表面微造型在摩擦领域中能有效提高负载能力、抗磨损能力和减小摩擦系数,它还有储存润滑油为表面提供润滑、容纳磨屑以及减少表面吸附力的作用^[1,2]。激光表面织构(LST)技术是目前表面微造型领域颇为成功的造型方法,LST 是利用聚

焦后的激光束照射到工件表面产生较高功率密度的激光,在极短的时间内使材料发生熔化、气化,最终在物体表面构造出微米甚至纳米级的微细形貌或图案。利用 LST 技术实现微凹坑造型的主要优点是:无接触加工、激光的功率密度高、加工速度快、效率高、热变形小、无污染,易实现自动化,易控制微造型

收稿日期: 2012-01-04; **收到修改稿日期**: 2012-02-17

作者简介: 黄志辉(1986—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击微造型方面的研究。E-mail: h409642075@126.com

导师简介: 刘会霞(1964—),女,博士,教授,主要从事激光加工和表面微细造型数值模拟和实验、逆向工程、数字化设计与制造技术等方面的研究。E-mail: lhx@ujs.edu.cn

的形状和尺寸^[1~5]。但是这种技术的主要问题是消融过程会导致材料熔化、断裂以及改变表面微观组织,这种表面质量的改变存在的风险是会缩短材料的疲劳寿命^[1,6,7],因此需要探索一种新的构造微凹坑的方法来避免材料损伤,并延长材料的疲劳寿命。

激光冲击强化(LSP)是一种卓有成效的材料改性技术。目前关于LSP的绝大多数实验研究在于材料改性和表面残余应力,实验表明LSP不但会在材料表面产生残余压应力(其影响深度可达1 mm左右),而且有助于提高材料的屈服强度、硬度和抗疲劳性能^[8~10]。近来也有很多研究利用有限元模型来模拟冲击变形和预测残余应力,为LSP的研究提供了更为便捷的方法^[11,12]。LSP在材料表面改性过程中不可避免地会产生微凹坑,但是很少有人利用LSP技术专门按设计需求来制造微凹坑以改善材料的摩擦学性能。美国阿拉巴马州塔斯卡卢萨大学的R. Caslaru^[7]研究了激光冲击Ti-6Al-4V和Al-6061-T6微凹坑的特性以及阵列凹坑对摩擦性能的影响。结果表明结合LSP技术构造微凹坑使材料表面产生塑性变形是一个机械过程,不仅不改变材料表面质量,而且有利于摩擦学性能的提高,这种技术扩展了LST的制造方法。然而激光冲击微凹坑的研究刚刚起步,而且涉及很多复杂的科学领域,如激光物理、传热学、等离子体物理学、热力学、气体动力学、流体力学、材料力学、固体材料的光学性质等方面,要研究的问题还很多。本文使用德国Innolas Gmbit公司的Spitlight 2000 THG脉冲激光器冲击Al7075材料,对微凹坑成型机理与制造工艺进行研究,研究了激光的脉冲能量、冲击次数、离焦量、约束层K9玻璃的厚度对激光冲击微凹坑形貌的影响,同时测量了微凹坑影响区域的硬度变化情况。

2 激光冲击微凹坑的造型原理

图1是激光冲击微凹坑的实验光路示意图。激光从激光器水平射出,经过一个45°平面镜将光路反射成竖直向下,再经过一个凸透镜聚焦,穿过约束层最终照射到覆盖在工件表面的吸收层。吸收层为一层不透明的薄面,典型的吸收层有黑漆、铝箔和黑色绝缘胶布,当高功率密度的激光束(大于 10^8 W/cm²)辐照到吸收层表面时,会使吸收层发生爆炸性气化,激光气化吸收层从而产生等离子体,等离子体会沿着激光冲击相反的方向扩散,此时吸收层上面的约束层会约束等离子体的扩散,典型的约束层有

K9玻璃或者水,这样等离子体又被约束层约束着,从而使迅速扩张的等离子体反向产生反冲压力波,可高达约吉帕数量级的压力,一旦压力超过了工件的动态屈服极限,就会在材料表面产生塑性变形从而形成凹坑。这个塑性变形是一个机械过程,因此不改变材料的表面质量^[13]。LSP技术提高材料的表面性能主要关注的是表面完整性,如残余应力、表面硬度、表面轮廓、粗糙度、显微组织结构等表面状态^[14],而表面微造型主要关注的是按设计需求来制造一定几何形状的形貌。总之,结合LSP技术对材料表面微造型,既保证了材料表面完整性,又可以按设计需求制造表面微造型。

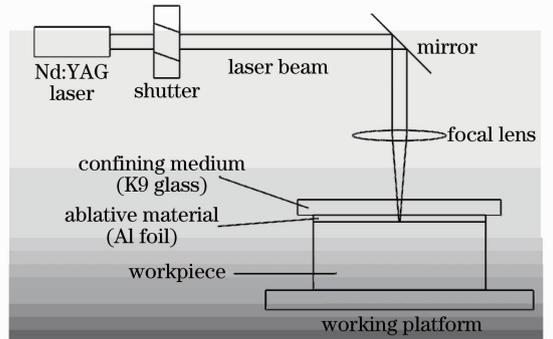


图1 实验光路图

Fig. 1 Layout of the experiment

3 激光冲击微凹坑实验

3.1 实验准备

实验采用Al7075作为样品,尺寸20 mm×20 mm×4 mm,它广泛应用于工业的各个领域。为了提高表面光滑质量,样品先用不同的砂纸经过三个阶段的打磨,分别用600、800、1200目(23, 18, 12.4 μm)的砂纸打磨,最后再用抛光机在低的打磨速度下完成最后的抛光处理,材料表面达到镜面效果,这样的表面粗糙度 R_a 可低于0.06 μm。实验使用德国Innolas Gmbit公司的Spitlight 2000 THG脉冲激光器,激光器的主要技术参数见表1,实验选用波长1064 nm,激光束使用100 mm长的凸透镜聚焦,每组实验用K9玻璃作为约束层,铝箔作为吸

表1 激光器技术参数

Table 1 Laser equipment technical parameters

Wavelength / nm	Pulse length / μJ	Pulse duration / ns	Frequency / Hz
1064/532/355	80~2000	8	1~10
Energy stability	Direction stability / mrad	Divergence angle / mard	Laser spot (out) / mm
<±1%	±0.25	<0.5	9

收层,铝箔的厚度约为 0.08 mm。实验装置如图 2 所示。



图 2 实验装置

Fig. 2 Equipment of experiment

3.2 实验设计

为研究激光冲击工艺参数对微凹坑的影响,实验主要分为 4 组:1) 选用能量为 565、675、835、1020、1200、1380 mJ 的激光对样品单次冲击。2) 选用能量为 565 mJ 和 675 mJ 的激光对样品多次冲击,由于过大的能量对样品多次冲击,不但会烧蚀铝箔,也容易冲坏 K9 玻璃,因此选择能量小的两组。3) 改变离焦量,选用能量为 565、835、1200 mJ 的激光对样品单次冲击;4) 改变约束层 K9 玻璃的厚度,选用能量为 565、835、1200 mJ 的激光单次冲击。分别测量凹坑的直径和最大深度,为取得实验结果的可重复性,每种参数冲击 4 个凹坑,然后测量凹坑的平均

特性。

为研究经过激光冲击之后材料的硬度变化,设计了 3 组实验,每组实验对应不同能量,测量冲击之后微凹坑的内部以及周围表面的硬度变化。实验采用 HXD-1000TMSC/LCD MH-VK 双压头显微硬度计,选择 HV 压头,加载实验力 25 g,测量沿着微凹坑的径向方向微凹坑内部以及周围的硬度。压头的尺寸大约为 25 μm 。

4 实验结果与分析

以 565 mJ 为例,图 3(a)、(b)为冲击之后微凹坑用真彩色共聚焦材料显微镜 Axio CSM700 拍摄

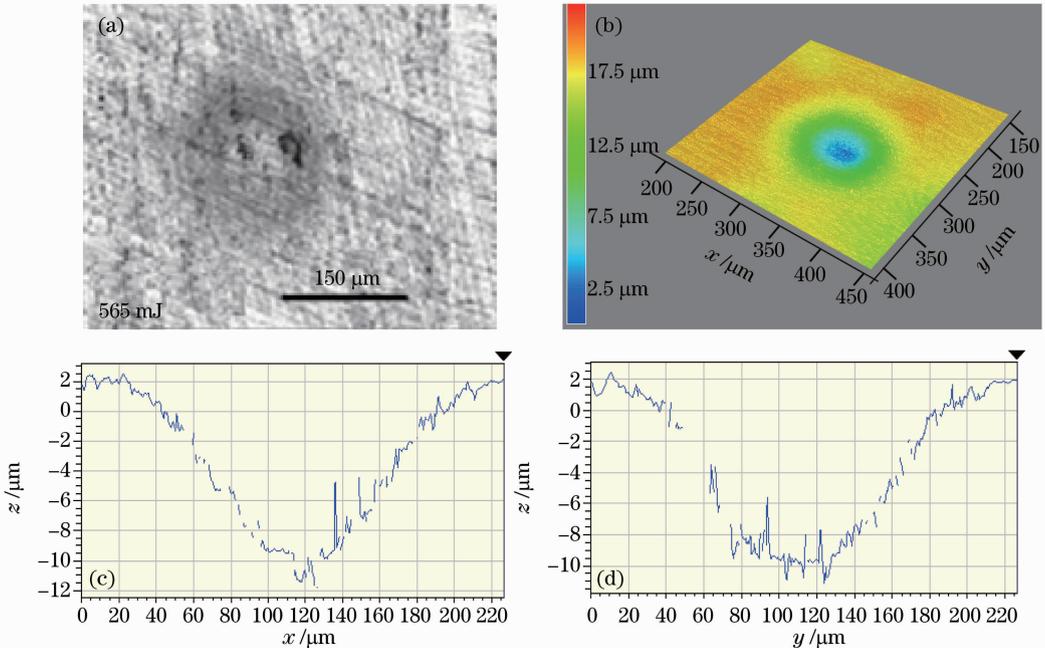


图 3 微凹坑的形貌。(a)、(b)微凹坑的三维形貌;(c)微凹坑 x 方向二维尺寸;
(d)微凹坑 y 方向二维尺寸

Fig. 3 Profile of micro dent. (a) and (b) 3D profile of micro dent; (c) 2D dimension of micro dent along x direction; (d) 2D dimension of micro dent along y direction

的三维图,图 3(c)、(d)为用 Veeco WYKO 表面形貌仪拍摄的凹坑沿着径向方向的尺寸的二维图,与去除材料而使凹坑边界断裂的 LST 相比,LSP 是在机械作用力下产生塑性变形,从而使凹坑的表面形貌具有很好的连续性。

4.1 不同脉冲能量对微凹坑的影响

图 4 为不同激光能量冲击作用下微凹坑的三维形貌,图 5 为微凹坑的直径和最大深度随激光能量

冲击的变化情况。由图 5(a)可以看出,随着能量的增加,微凹坑的径向方向上没有明显的变化,变化范围在 $10\ \mu\text{m}$ 之内,基本上维持在 $150\ \mu\text{m}$ 左右,可以认为在实验的激光能量范围内,激光能量不影响凹坑直径;由图 5(b)可以看出,随着能量的增加,微凹坑的深度先增加后逐渐减小,这可能是激光冲击产生的冲击波压力超过了材料屈服的某个饱和点,当超过这个饱和点时增加能量不会增加凹坑的深度^[13]。

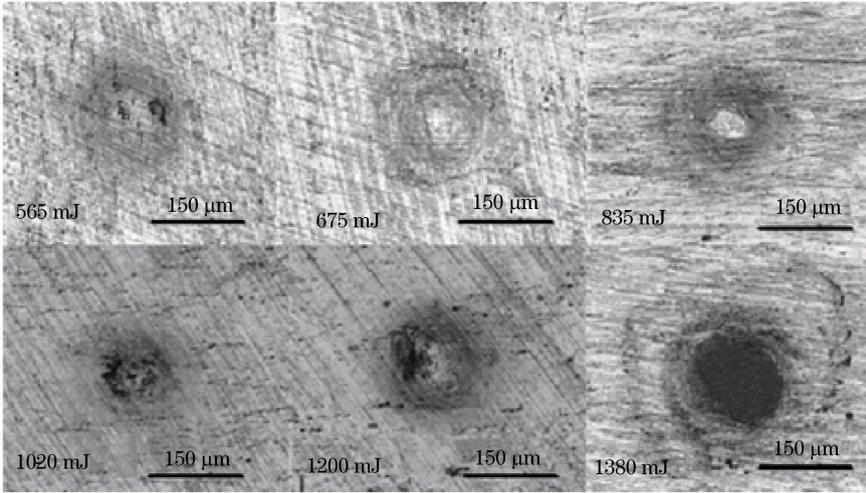


图 4 不同激光能量冲击下微凹坑的形貌

Fig. 4 Profile of micro dents of different laser energies

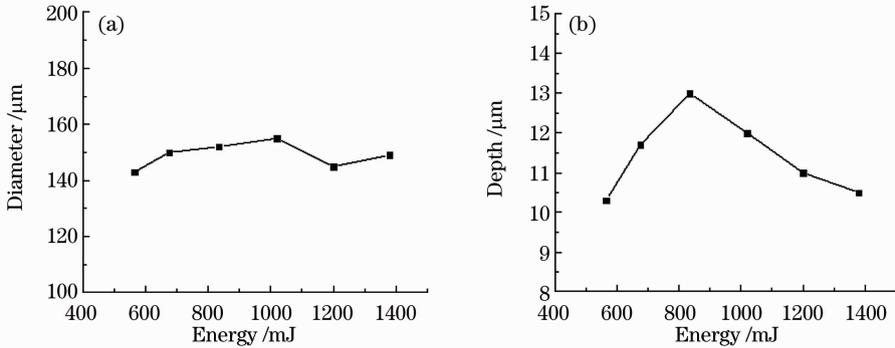


图 5 不同脉冲能量对微凹坑的影响。(a)微凹坑直径随能量的变化;(b)微凹坑深度随能量的变化

Fig. 5 Effects on micro dents by different pulse energies. (a) Effects on the diameter of micro dents by different pulse energies; (b) effects on the depth of micro dents by different pulse energies

4.2 冲击次数对微凹坑的影响

图 6 是测得的 565 mJ 和 675 mJ 激光能量多次冲击对微凹坑的影响,由于过大的能量对样品多次冲击,不但会烧蚀铝箔,也容易冲坏 K9 玻璃,因此选择能量小的两组。由图 6(a)可以看出,随着冲击次数的增加,微凹坑直径有一定的增加,增加幅度大约 $30\ \mu\text{m}$;由图 6(b)可以看出,随着冲击次数的增加,微凹坑的最大深度变化先有一段非线性的增加,之后不再明显增加,而是趋向平缓。这是由于激光冲击铝合金时,表面的应变率高达 $10^7\ \text{s}^{-1}$,在超高

应变率的外载荷作用下,材料内部的位错密度增加,塑性变形层的晶体被有效地细化,从而材料的微观硬度得到了提高^[15],最终导致之后的冲击变形越加困难。

4.3 改变离焦量对微凹坑的影响

图 7 是改变离焦量对微凹坑的影响,采用负离焦为 $-5\ \text{mm}$,选择 565、835、1200 mJ 的能量单次冲击。由图 7(a)可见,与同等能量焦点位置冲击下的凹坑相比,随着离焦量的增大,凹坑的直径增大,这是由于离焦量增大,激光聚焦到工件上的光斑直径

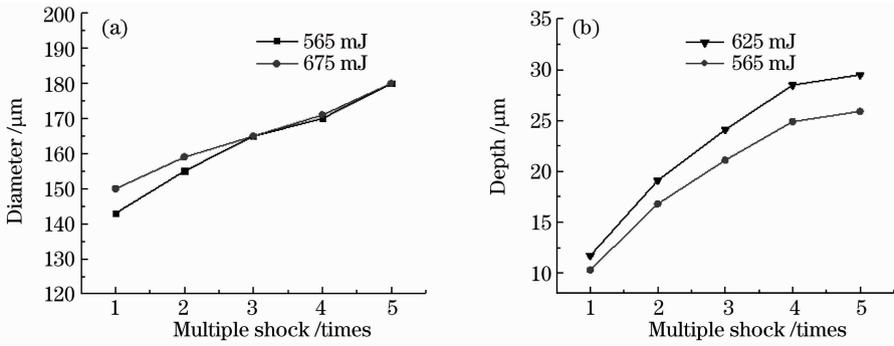


图 6 冲击次数对微凹坑的影响。(a)对直径的影响;(b)对深度的影响

Fig. 6 Effects on micro dents by multiple shock. (a) Effects on the diameter; (b) effects on the depth

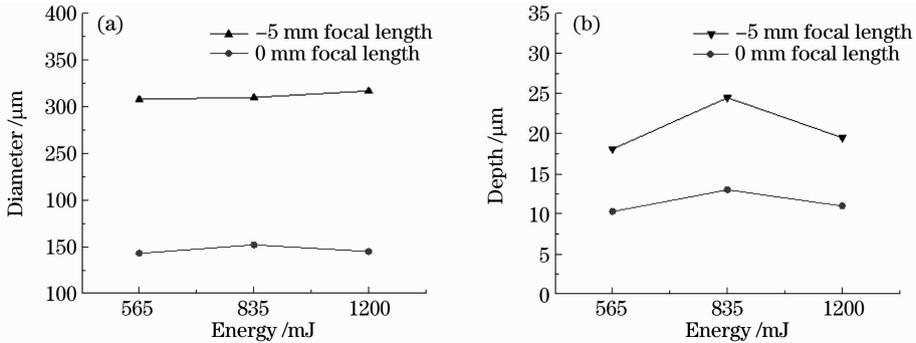


图 7 改变离焦量对微凹坑的影响。(a)对直径的影响;(b)对深度的影响

Fig. 7 Effects on micro dents by changing focal length. (a) Effects on the diameter; (b) effects on the depth

明显增大,在工件上的影响区域也随之增大;由图 7(b)可见,与同等能量焦点位置冲击下的凹坑相比,随着离焦量的增加,凹坑的深度增加,这是由于较大的光斑可以使冲击波在材料表面传播得更深,这比能量衰减对其影响更大^[16]。另外凹坑的深度也呈现出先增大后减小的趋势。

4.4 改变 K9 玻璃的厚度对微凹坑的影响

图 8 是不同约束层厚度对微凹坑的影响,实验分别选用 1.00、1.56、1.69 mm 的 K9 玻璃作为约束层,选用 565、835、1200 mJ 的激光能量冲击,由

图 8(a)可见,随着约束层厚度的增加,微凹坑的直径变化不大。由图 8(b)可见,随着约束层厚度的增加,微凹坑的深度先增加后减小。由于增大约束层厚度能增加激光诱导的冲击波压力,但当约束层厚度超过一定值时,冲击波峰压趋于饱和。因过厚的约束层对激光的吸收和散射,反而会使激光诱导的冲击波峰压降低,从而影响冲击效果^[17]。可见在实验所选能量范围内,约束层从 1.00~1.69 mm 之间存在一个最佳的厚度,可以诱导最大的冲击波峰压,从而产生最深的凹坑。

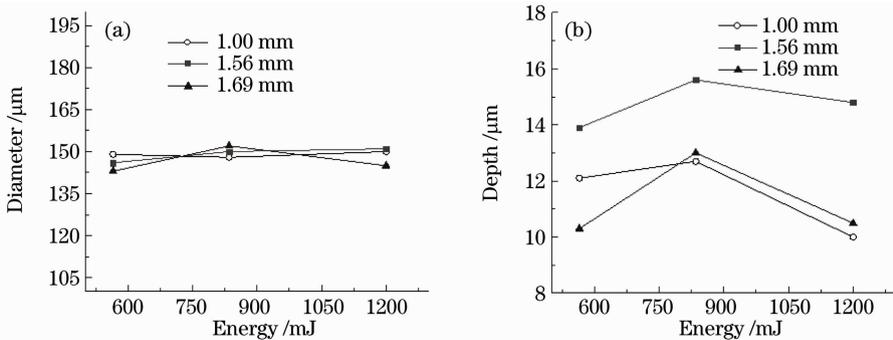


图 8 改变 K9 玻璃的厚度对微凹坑的影响。(a)对直径的影响;(b)对深度的影响

Fig. 8 Effects on micro dents by changing thickness of K9 glass. (a) Effects on the diameter; (b) effects on the depth

4.5 显微硬度

图 9 为沿着径向方向的压痕,图 10 为不同能量下显微硬度沿径向的变化。由实验结果可见,微凹坑的影响区域,沿着径向方向硬度逐渐增加,中心位置硬度最大,凹坑中心和基体的平均硬度分别为 220 HV 和 130 HV,中心的硬度比基体增加了 69%,现有研究表明,这将有效地增强材料的抗磨损能力,如 Caslaru 等^[13]做了冲击 Al6061-T6 的实验,结果增加 56%。



图 9 沿着径向方向的压痕

Fig.9 Indentation along radial direction

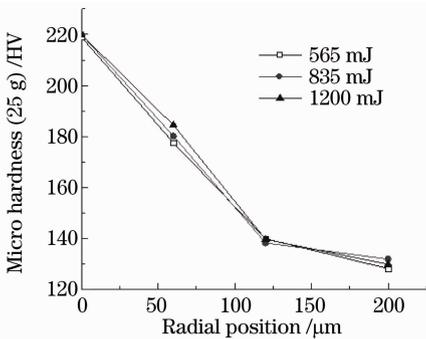


图 10 不同能量下的显微硬度

Fig.10 Microhardness of different pulse energies

5 结 论

对激光冲击微造型的机理进行了探讨,对激光冲击 Al7075 材料微凹坑工艺参数进行了实验研究,得到以下结论:1) 结合 LSP 技术进行表面微造型,既能提高材料的表面完整性,又能按设计需求制造一定尺寸形貌的凹坑;2) 在 565~1380 mJ 范围内,随着能量的增加,冲击的微凹坑的深度先增加后减小,直径没有明显的变化;3) 随着冲击次数的增加,微凹坑的深度先有一段非线性的增加,之后不再明显增加,而会趋向平稳,直径有小幅度的增加;4) 反向增加离焦量,与同等能量冲击下的凹坑相比,凹坑的直径增大,凹坑的深度增加,而且也呈现出凹坑深度先增大后减下的趋势;5) 约束层厚度在 1.00~

1.69 mm 之间,随约束层厚度的增加,微凹坑的深度先增加后减小;6) 微凹坑的影响区域,沿着径向方向硬度逐渐增加,微凹坑中心位置的硬度最大,微凹坑中心的硬度比基体增加了 69%,能有效地增强材料的抗磨损能力。

参 考 文 献

- 1 I. Etsion. State of the art in laser surface texturing [J]. *J. Tribology*, 2005, **127**(1): 248~253
- 2 Li Dunqiao. Characterization of Surface Topography and Research on Tribological Properties of Laser Texturing Surface [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009. 1~3
李敦桥. 表面形貌表征及激光微造型表面摩擦特性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009. 1~3
- 3 Liu Huixia, Yang Shengjun, Wang Xiao *et al.*. Experiment study and numerical simulation of pulsed laser ablation crater [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 219~223
刘会霞, 杨胜军, 王 霄等. 脉冲激光烧蚀凹腔的实验分析及数值模拟[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 219~223
- 4 Yuan Chunjian. The Research of Friction and Wear on Laser Surface Micro Texturing on the Condition of Dry Friction [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. 8~13
袁春俭. 激光表面微造型在干摩擦条件下的摩擦磨损性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008. 8~13
- 5 Meng Xiaoxia. Research of Laser Machining and Friction and Wear on Regular Surface Micro Texturing [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007. 18~20
孟晓霞. 规则表面微造型的激光加工和摩擦磨损试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2007. 18~20
- 6 I. Jordanova, V. Antonov, S. Gurkovsky. Changes of microstructure and mechanical properties of cold-rolled low carbon-steel due to its surface treatment by Nd:glass pulsed laser [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, **153** (2-3): 267~275
- 7 R. Caslaru. Fabrication, Characterization, and Tribological Performance of Micro Dent Arrays Produced by Laser Shock Peening on Ti-6Al-4V Alloy [D]. Tuscaloosa: The University of Alabama, 2010. 16~18
- 8 B. P. Fairland, B. A. Wilcox, W. J. Gallagher *et al.*. Laser shock-induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum [J]. *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**(9): 3893~3895
- 9 Sang Yi. Simulation and Experiment Research of Fatigue Life Improvement of Titanium Alloy by Laser Shock Processing [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. 2~6
桑 毅. 激光冲击钛合金改善疲劳寿命的模拟与实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009. 2~6
- 10 Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *International J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 11 Y. B. Guo, R. Caslaru. Fabrication and characterization of micro dent arrays produced by laser shock peening on titanium Ti-6Al-4V surfaces [J]. *J. Materials Processing Technology*, 2011, **211**(4): 729~736
- 12 Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. 3-D FEM simulation of laser shock processing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, **201**(3-4): 1426~1435
- 13 R. Caslaru, M. P. Sealy, Y. B. Guo. Fabrication and characterization of micro dent array produced by laser shock peening on aluminum surfaces [J]. *Transactions of NAMRI/SME*, 2009, **37**: 159~166

- 14 Huang Shu, Zhou Jianzhong, Sun Yueqing *et al.*. Study on surface integrity of 6061-T6 aluminum alloy sheet after laser shot peening[J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(6): 450~455
黄 舒, 周建忠, 孙月庆 等. 激光喷丸强化 6061-T6 铝合金板料的表面完整性研究[J]. *应用激光*, 2007, **27**(6): 450~455
- 15 Lu Jinzhong, Luo Kaiyu, Feng Aixin *et al.*. Micro-structural enhancement mechanism of LY2 aluminum alloy by means of a single laser shock processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2662~2666
鲁金忠, 罗开玉, 冯爱新 等. 激光单次冲击 LY2 铝合金微观强化机制研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2662~2666
- 16 R. Fabbro, P. Peyre, L. Berthe *et al.*. Physics and application of laser-shock processing [J]. *J. Laser Applications*, 1998, **10**(6): 265~279
- 17 Zhou Jianzhong, Yang Jichang, Zhou Ming *et al.*. Experimental study on the effects of overlay properties on laser-induced shock waves[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11): 1041~1043
周建忠, 杨继昌, 周 明 等. 约束层刚性对激光诱导冲击波影响的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11): 1041~1043

栏目编辑: 宋梅梅