

# TC4 钛合金激光冲击强化与喷丸强化的 残余应力模拟分析

蒋聪盈<sup>1</sup>, 黄露<sup>2</sup>, 王婧辰<sup>1</sup>, 高玉魁<sup>1</sup>, 仲政<sup>1</sup>

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

**摘要:** 目的 通过对激光冲击强化和喷丸强化后的试样进行残余应力测试分析, 得出两种工艺在残余应力形成机理、残余应力层深以及残余应力均匀性等方面的差异。方法 一方面采用有限元方法模拟激光冲击强化及喷丸强化的过程, 将材料在两种强化冲击下的响应进行对比, 研究残余应力的形成过程, 并对残余应力场的分布规律进行总结分析。另一方面, 分别用两种强化技术处理 TC4 钛合金的表面, 并用剥层 X 射线衍射实验测试材料表层的残余应力。最后将实验结果与测试结果进行对比, 验证有限元模拟的有效性。结果 当这两种强化效果产生 -500 MPa 的表面平均残余应力时, 激光冲击强化后的 TC4 钛合金表层残余压应力层深度可达 0.6 mm 以上, 而喷丸强化后的 TC4 钛合金表层残余压应力层深度只有 0.15 mm 左右。结论 由于诱发材料塑性变形的机制不同, 激光冲击强化往往能获得比喷丸强化更好的残余压应力深度, 同时激光冲击强化的材料的表面残余应力分布也比喷丸强化的材料更均匀。

**关键词:** 激光冲击强化; 喷丸强化; 表层改性; 数值模拟; 残余应力; 延寿

**中图分类号:** TG668; TG115.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2016)04-0005-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.002

## Simulation Analysis of the Residual Stress Field of TC4 Ti Alloy under Laser Shock Peening and Shot Peening

JIANG Cong-ying<sup>1</sup>, HUANG Lu<sup>2</sup>, WANG Jing-chen<sup>1</sup>, GAO Yu-kui<sup>1</sup>, ZHONG Zheng<sup>1</sup>

(1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

**ABSTRACT:** **Objective** By measure of the residual stress of Laser shock peening (LSP) and shot peening (SP) tests, the differences between LSP and SP in formation mechanism, depth layer and uniformity of residual stress were found out. **Methods** On one hand, finite element method (FEM) was used to simulate the process of LSP and SP. The mechanical behaviors of TC4 under LSP and SP were compared. In addition, the formulation of residual stress was studied and the law of the residual stress was summa-

收稿日期: 2016-03-23; 修订日期: 2016-04-02

Received: 2016-03-23; Revised: 2016-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372226); 航空科学基金项目(2014ZE38008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (11372226), Aeronautical Science Foundation of China (2014ZE38008) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities

作者简介: 蒋聪盈(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究钛合金的表层改性。

Biography: JIANG Cong-ying (1991—), Male, Master graduate student, Research focus: surface layer modification of titanium alloy.

通讯作者: 高玉魁(1973—), 男, 河南人, 博士, 教授, 主要研究表层改性及疲劳断裂等。

Corresponding author: GAO Yu-kui (1973—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: surface layer modification, fracture and fatigue.

rized. On the other hand, the residual stress of TC4 which had been treated with SP and LSP was measured using the 2-D X-ray method. Eventually, the result of experiment was compared with the result of simulation, and the effectiveness of FEM simulation was confirmed. **Results** The results showed that when both methods caused  $-500$  MPa residual stress on the surface of TC4, the depth of compressed residual stress caused by LSP could reach  $0.6$  mm, while the depth of compressed residual stress caused by SP was only  $0.15$  mm. **Conclusion** Because the mechanism of causing plastic deformation was different, LSP could cause deeper compressed residual stress. Meanwhile, the distribution of residual stress caused by LSP was more uniform than that caused by SP when the fraction of coverage was  $100\%$ .

**KEY WORDS:** laser shock peening; shot peening; surface layer modification; numerical simulation; residual stress; prolong life

TC4 钛合金具有较高的比强度、较好的耐腐蚀性、热稳定性以及生物相容性,被广泛运用于航空航天、生物工程、能源化工等领域<sup>[1]</sup>。TC4 钛合金材料在服役期间,疲劳是主要的失效原因之一,疲劳裂纹往往在表面萌生,因此 TC4 钛合金的表面状态对疲劳寿命有着重要的影响<sup>[2-3]</sup>。对 TC4 钛合金零件进行表层改性,能有效提高它的疲劳强度,延长它的服役时间。

激光冲击强化和喷丸强化是两种广泛运用的表层改性技术,二者各有其优势<sup>[4-6]</sup>。激光冲击强化的原理是:激光束穿过棱镜后射向金属表面的吸收涂层,涂层在吸收激光束的能量后产生高压的等离子体,该等离子体在约束层的约束下,产生高强度冲击波,使材料表层产生向两侧的塑性应变,当冲击波结束后,由于材料内部的自平衡作用,表面形成一层压缩残余应力层<sup>[7]</sup>。喷丸强化的原理为:丸粒高速撞击材料的表层,使得材料表层发生向两侧的塑性变形,撞击结束后,材料内部自平衡作用使得其表层产生残余压应力<sup>[2]</sup>。总而言之,这两种表层改性方法都会使材料表层产生向两侧的塑性变形,进而引入残余压应力,最终提高材料的抗疲劳性能。

激光冲击强化和喷丸强化在强化原理上有着相似之处,但是强化效果却不同,特别在强化后的残余应力场分布上有着较大的差别。文中采用 ABAQUS 软件进行数值模拟,并结合实验,研究探讨两种表层改性技术的异同。

## 1 数值模拟

### 1.1 激光冲击强化的有限元模型

1999 年,美国学者 William Braisted 和 Robert Brockman 首次使用 ABAQUS 软件模拟分析激光冲击,并将模拟结果和实验结果进行比较,验证了激光冲击数值模拟的可行性<sup>[8]</sup>。激光冲击强化的过程包括两部分:

第一部分为激光冲击的过程,在这个过程中,激光诱导冲击波形成,从而使材料表层产生永久塑性变形;第二部分为材料的自平衡过程,塑性变形会使材料表面产生残余压应力。在用 ABAQUS 软件对激光冲击强化进行模拟时,也将强化过程分成两部分。激光冲击过程是一个高应变率的瞬时过程,其应变率可以达到  $10^6$  以上<sup>[9]</sup>,因此用 ABAQUS/Explicit 显式算法进行模拟较为合适。相应地,ABAQUS/Standard 隐式算法适用于模拟材料的自平衡过程。

K. Ding 和 L. Ye 在 2006 年进行三维激光喷丸仿真模拟研究时,提出了一种有限元-无限元混合的激光冲击强化  $1/4$  靶材模型<sup>[10]</sup>。文中参照其方法,建立了 TC4 钛合金的激光冲击强化模型,如图 1 所示。为了提高计算效率,有限元模型为靶材的  $1/4$ ,其尺寸为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ,并在对称面上设置对称边界条件。材料表面为自由表面,因此在上表面不设置边界条件。在材料的其他面上,用无限元网格包围有限元网格,两者的边界上用 tie 功能连接。无限元网格能吸收应力波,从而防止应力波在边界上反弹,引起材料内部应力场紊乱。全部模型包含了 26 025 个节点,21 580 个 C3D8R 有限元网格以及 880 个 CIN3D8 无限元网格。

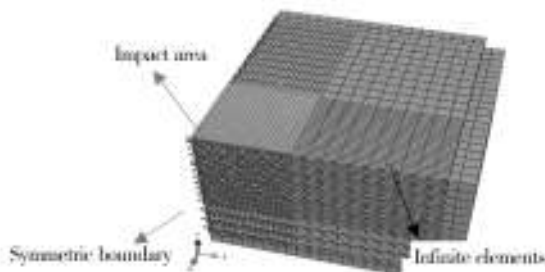


图1 激光冲击强化有限元模型

Fig. 1 Finite element model of LSP

Fabbro 等<sup>[11]</sup>对激光冲击强化过程中的压力变化进行了一系列实验和理论推导,提出了靶材表面压力随时间变化的高斯曲线。文中在其研究结果的基础

上,将压力-时间曲线简化为如图2所示的线性形式。图中 $t_0$ 表示脉宽, $P$ 表示峰值压力。模拟中,取脉宽为30 ns,峰值压力3500 GPa。

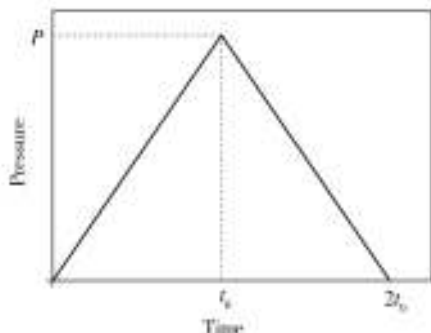


图2 激光冲击强化压力-时间曲线

Fig. 2 Temporal distribution of LSP pressure

激光冲击强化过程中,较高的应变率会引起材料的力学性能变化,因此用静态的力学本构方程来描述材料的物理属性是远远不够的。文中采用的 Johnson-Cook 模型是一种常用的动态强化模型,能反映出材料在高应变率下的力学性能变化。材料选取 TC4 钛合金,杨氏模量 $E=115$  GPa,密度 $\rho=4.4$  g/cm<sup>3</sup>,泊松比 $\nu=0.3$ ,Johnson-Cook 模型参数 $A=870$  MPa, $B=990$  MPa, $C=0.011$ , $m=1$ , $n=0.25$ <sup>[12]</sup>。

## 1.2 喷丸强化的有限元模型

与激光冲击强化相似,喷丸强化过程可以分为喷丸撞击过程 and 自平衡过程两个部分。两个过程分别用 ABAQUS/Explicit 显式算法和 ABAQUS/Standard 隐式算法进行分析拟合。

表面覆盖率是喷丸强化工艺中的一个重要参数,它指的是喷丸后合金材料表面上弹坑所占面积之和与材料表面积的比值<sup>[13]</sup>。为了模拟 100% 覆盖率的喷丸强化工艺,文中采用四层弹丸的叠加,建立了喷丸强化的 1/2 模型,如图3所示。模型中取弹丸直径为0.36 mm,定义 TC4 钛合金靶材的长度和宽度分别为12倍和6倍的弹丸半径,即2.16 mm和1.08 mm。由于模型为整体模型的1/2,文中在靶材与半球的对称面取对称边界条件,其余面设置位移边界条件,而材料的表面为自由表面。全部模型包含了114 257个节点以及100 010个C3D8R单元。

为保证与激光喷丸的对比性,喷丸强化和激光冲击强化的 TC4 钛合金材料属性一致。弹丸为铸钢丸,密度为7.8 g/mm<sup>3</sup>,弹性模量 $E$ 为210 GPa,泊松比 $\nu$ 为0.3,屈服强度为1693 MPa,初始入射速度为60 m/s。

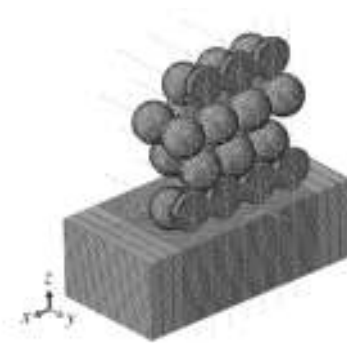


图3 喷丸强化有限元模型

Fig. 3 Finite element model of SP

## 2 实验测试分析

为了定量地评估表层改性后材料的强化效果,对 TC4 钛合金表面进行残余应力的测试是有必要的。X 射线衍射法是一种较成熟的材料表面残余应力无损检测技术,被广泛运用于工程与科学研究中<sup>[2]</sup>。文中采用  $\mu$ -X360n 型二维面探 X 射线衍射仪,结合电化学腐蚀抛光仪,测得应力在材料表层的分布梯度。

二维面探 X 射线衍射法采用二维探测器,可以接受一个面上 360° 的衍射光,通过对单次曝光得到的德拜环进行分析,就可以得到材料在  $\theta$  角上的残余应力<sup>[14-16]</sup>。其计算公式如式(1)和(2)所示,其中 $\varepsilon_\alpha$ 、 $\varepsilon_{\pi+\alpha}$ 、 $\varepsilon_{-\alpha}$ 、 $\varepsilon_{\pi-\alpha}$ 分别表示探测器接收到的四个探测方向上的应变, $\eta$ 、 $\psi_0$ 分别为测量试件的放置角与测试倾角。

$$a_1(0) = \frac{1}{2} [(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\pi+\alpha}) + (\varepsilon_{-\alpha} - \varepsilon_{\pi-\alpha})] \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta} \frac{1}{\sin 2\psi_0} \left[ \frac{\partial a_1(0)}{\partial \cos \alpha} \right] \quad (2)$$

通过查阅资料可知,V 靶射出的 X 光会在 TC4 钛合金 103 衍射面上发生衍射,衍射角大约在 140°,能够被用来测试 TC4 钛合金的残余应力。图4是二维 X 射线衍射仪探测器接收到的 TC4 钛合金衍射峰图。

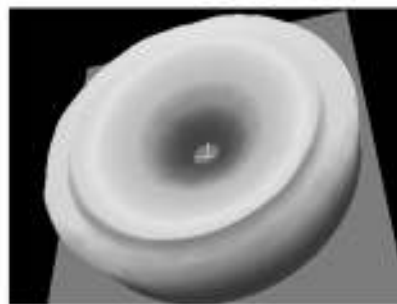


图4 TC4 钛合金二维面探 X 衍射德拜环

Fig. 4 Debye-Scherrer ring of TC4 Ti alloy

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 残余压应力深度

当材料表面残余压应力数值相同时,残余压应力层越深,则材料的抗疲劳性能越强。图5为激光冲击强化和喷丸强化后材料表层残余应力沿深度方向的分布。可以看到,在峰值压力为3500 MPa、脉宽为30 ns的方形光斑激光冲击强化下,TC4钛合金表面0  $\mu\text{m}$  处的残余应力值为-500 MPa左右。用60 m/s速度的铸钢丸在100%覆盖率下对TC4钛合金进行喷丸强化后,表面0  $\mu\text{m}$  处的残余应力值也能相应地达到-500 MPa。虽然两种强化效果可以使材料表面0  $\mu\text{m}$  处产生相差不大的残余应力值,但是喷丸强化后材料残余压应力层深度只有150  $\mu\text{m}$  左右,而激光冲击强化后材料残余压应力层深度可以达到喷丸强化的4倍。

激光冲击强化是利用高能的激光束瞬时激发出高压的等离子体,从而诱导材料表面产生高强度的应力波,进而引发材料表层的塑性变形。随着应力波在材料深度方向的传播,材料深度方向上也会产生相应

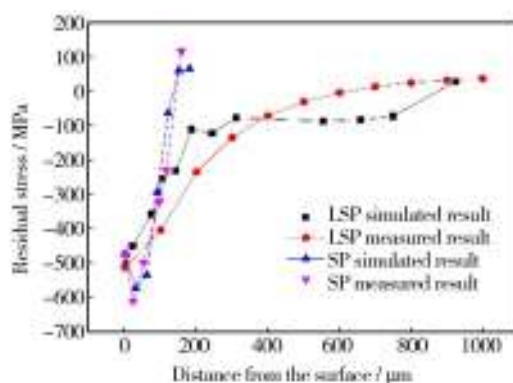


图5 激光冲击强化和喷丸强化后残余应力沿深度分布

Fig. 5 Distribution of residual stress along surface layer caused by LSP and SP

的塑性变形。与此同时,材料的塑性变形会吸收应力波的能量,直到应力波不能再使材料发生塑性变形。喷丸强化是利用丸粒与材料表层的接触碰撞,使得材料表层发生塑性变形。由于喷丸工艺本身的限制,丸粒不能整个嵌入到材料的表层中,因此它引起的塑性变形深度有限,这就限制了喷丸强化引发的残余压应力层的深度。由于两种强化工艺引发塑性应变的机制不同,因此引发的塑性变形深度存在差异。图6反映了

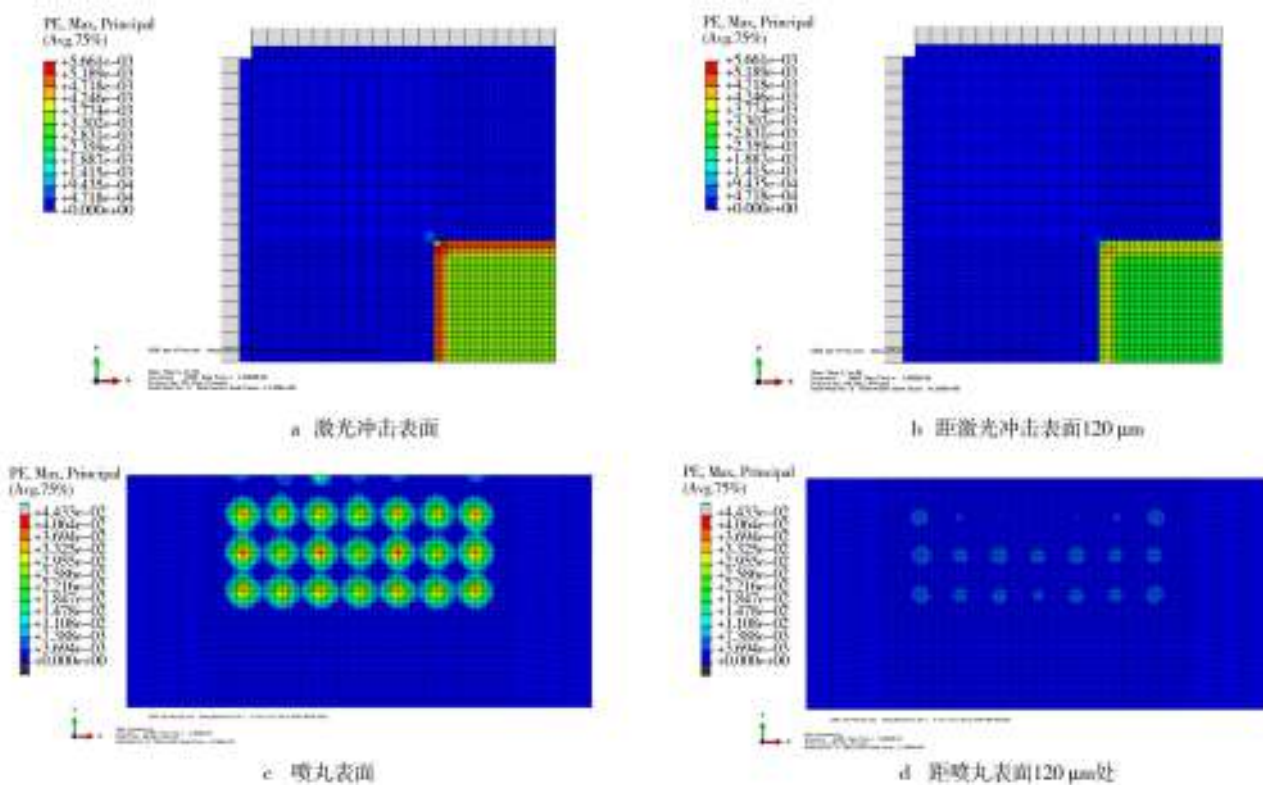


图6 激光冲击强化和喷丸强化后塑性应变分布

Fig. 6 Distribution of PE caused by LSP and SP; a) surface of LSP,

b) 120  $\mu\text{m}$  from the surface of LSP, c) surface of SP, d) 120  $\mu\text{m}$  from the surface of SP

两种强化工艺下 TC4 钛合金的塑性应变(PE)在离表面 0  $\mu\text{m}$  以及 120  $\mu\text{m}$  处的分布。在距离材料表面 120  $\mu\text{m}$  处,喷丸强化后的塑性应变几乎为 0(如图 6d 所示),而激光冲击强化后的塑性变形分量仍然有相对较大的数值(如图 6b 所示)。塑性变形会引起残余应力的形成,这就解释了为什么喷丸强化的残余压应力层深度不如激光冲击强化的残余压应力层。

### 3.2 残余压应力均匀性

疲劳裂纹往往从材料最薄弱的部分开始<sup>[2-3]</sup>,因此残余应力分布的均匀性也会影响材料的表层强化效果。激光冲击强化和喷丸强化后的 TC4 钛合金材料表面残余应力(S11)分布如图 7 所示。图 7 中两个强化区域的节点平均残余应力值都为 -500 MPa 左右,即图 6 的表面残余应力值。从图 7b 中可以看到,喷丸强化的残余应力分布不均匀,残余压应力的绝对值在丸粒撞击的凹坑处更大。特别是 A 点的残余应力为 +162 MPa,而 B 点的残余应力为 -846 MPa。总而言之,激光冲击强化可以得到比喷丸强化更加均匀的残余应力。

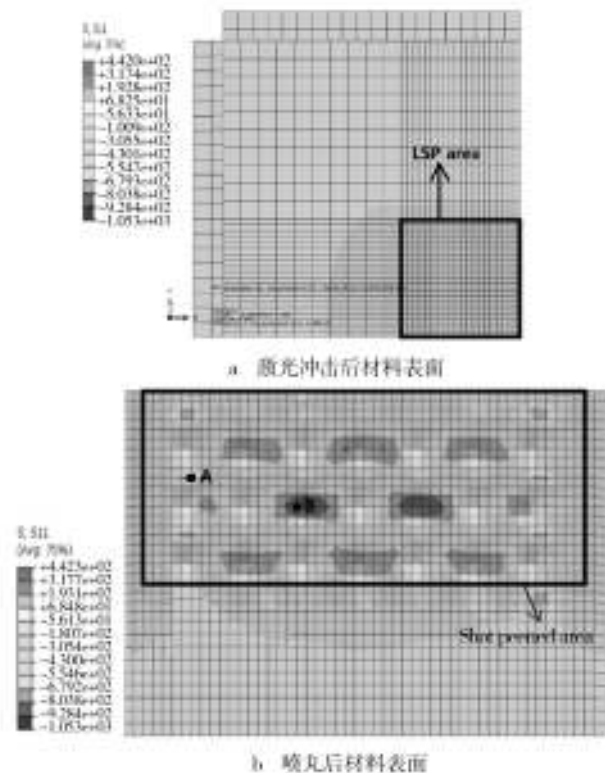


图 7 激光冲击强化和喷丸强化后材料表面残余应力分布  
Fig. 7 Distribution of residual stress on the surface of material caused by LSP and SP: a) surface of LSP material, b) surface of SP material

### 3.3 表面状态

喷丸强化和激光冲击强化都是通过产生塑性变形使材料表面产生残余的压应力,从而提高材料的抗疲劳性能。材料表面的塑性变形必然会使材料表面状态发生变化。特别是喷丸强化会使材料表面发生不均匀的塑性变形(如图 6c 所示),这使得材料表面的粗糙度增加。相对地,激光冲击强化对材料表面粗糙度的改变会小得多。

## 4 结论

1) 两种表层改性技术都是通过诱导材料表层发生塑性变形的办法,引入残余压应力,从而提高材料的抗疲劳性能,但是两者诱导塑性变形的机制不同。激光冲击强化是通过应力波的方法诱发塑性应变,而喷丸强化是通过碰撞和接触来诱发塑性应变。

2) 经峰值压力为 3500 MPa、脉宽为 30 ns 的方形光斑激光冲击强化后,TC4 钛合金表面残余应力值可以达到 -500 MPa 左右。用 60 m/s 速度的铸钢丸在 100% 覆盖率下对 TC4 钛合金进行喷丸强化后,也可以使材料表面产生 -500 MPa 左右的残余应力。但是前者引起的残余压应力层深度可达 0.6 mm 左右,是后者的 4 倍。

3) 激光冲击强化产生的残余应力在表层的分布比喷丸强化更均匀。

### 参考文献

- [1] 高玉魁. 喷丸强化对 TC4 钛合金组织结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010(9): 1536—1539.  
GAO Yu-kui. Effect of Shot-peening on Microstructure of TC4 Titanium Alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010(9): 1536—1539.
- [2] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.  
GAO Yu-kui. Surface Integrity Theory and Its Application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [3] SCHIJVE J. Fatigue of Structures and Materials [M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 2001.
- [4] 邹世坤, 巩水利, 郭恩明, 等. 发动机整体叶盘的激光冲击强化技术[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 601009.  
ZOU S K, GONG S L, GUO E M, et al. Laser Peening of Turbine Engine Integrally Blade Rotor [J]. Chinese Journal of Laser, 2011, 38(6): 601009.

(下转第 52 页)

- 境防腐蚀中的应用[J]. 表面技术, 2012, 41(1): 54—57.
- FANG Ai-cun, XIE Guang-sheng. Application of Micro-arc Oxidation Technology in Aluminum, Magnesium and Its Alloys against Corrosion in the Marine Environment[J]. Surface Technology, 2012, 41(1): 54—57.
- [7] 潘晓铭, 吴俊升, 肖葵, 等. 铝合金表面溶胶-凝胶防腐涂层研究进展及展望[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(12): 1045—1052.
- PAN Xiao-ming, WU Jun-sheng, XIAO Kui, et al. Progress and Perspectives of Sol-Gel Anticorrosion Coatings on Aluminum Alloy[J]. Corrosion and Protection, 2013, 34(12): 1045—1052.
- [8] MARTINS N C T, MOURA SILVA T, MONTEMOR M F, et al. Polyaniline Coatings on Aluminium Alloy 6061-T6: Electrosynthesis and Characterization[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55: 3580—3588.
- [9] SHABANI-NOOSHABADI M, GHOREISHI S M, BEHPOUR M. Electropolymerized Polyaniline Coatings on Aluminum Alloy 3004 and Their Corrosion Protection Performance[J]. Electrochimica Acta, 2009, 54: 6989—6995.
- [10] KAMARAJ K, SATHIYANARAYANAN S, VENKATACHARI G. Electropolymerised Polyaniline Films on AA 7075 Alloy and Its Corrosion Protection Performance[J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 64: 67—73.
- [11] BALASKAS A C, KARTSONAKIS I A, KORDAS G, et al. Influence of the Doping Agent on the Corrosion Protection Properties of Polypyrrole Grown on Aluminium Alloy 2024-T3[J]. Progress in Organic Coatings, 2011, 71: 181—187.
- [12] MERT B D, SOLMAZ R, KARDAS G, et al. Copper/Polypyrrole Multilayer Coating for 7075 Aluminum Alloy Protection[J]. Progress in Organic Coatings, 2011, 72: 748—754.
- [13] 刘万民, 何拥军, 李芝坛. 循环伏安法制备掺杂聚苯胺涂层的防腐性研究[J]. 表面技术, 2010, 39(3): 58—59, 84.
- LIU Wan-min, HE Yong-jun, LI Zhi-tan. Anticorrosion Performance of Doped Polyaniline Coating Prepared by Cyclic Voltammetry[J]. Surface Technology, 2010, 39(3): 58—59, 84.
- [14] KAMARAJ K, KARPAKAM V, SYED AZIM S, et al. Electropolymerised Polyaniline Films as Effective Replacement of Carcinogenic Chromate Treatments for Corrosion Protection of Aluminium Alloys[J]. Synthetic Metals, 2012, 162(5/6): 536—542.
- [15] JOHANSEN H D, BRETT M A, MOTHEO A J. Corrosion Protection of Aluminium Alloy by Cerium Conversion and Conducting Polymer Duplex Coatings[J]. Corrosion Science, 2012, 63: 342—350.
- [16] DEYAB M A. Corrosion Protection of Aluminum Bipolar Plates with Polyaniline Coating Containing Carbon Nanotubes in Acidic Medium inside the Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell[J]. Journal of Power Sources, 2014, 268(5): 50—55.

(上接第9页)

- [5] GAO Y K, WU X R. Experimental Investigation and Fatigue Life Prediction for 7475-T7351 Aluminum Alloy with and without Shot Peening-induced Residual Stresses[J]. Acta Materialia, 2011, 59(9): 3737—3747.
- [6] GAO Y K. Improvement of Fatigue Property in 7050-T7451 Aluminum Alloy by Laser Peening and Shot Peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(10): 3823—3828.
- [7] REN X. Laser Shocking Nano-crystallization and High-temperature Modification Technology[M]. [s.l.]: Springer, 2015.
- [8] BRAISTED W, BROCKMAN R. Finite Element Simulation of Laser Shock Peening[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(7): 719—724.
- [9] 周建忠, 叶云霞. 激光加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- ZHOU Jian-zhong, YE Yun-xia. Laser Processing Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [10] DING K, YE L. Simulation of Multiple Laser Shock Peening of a 35CD4 Steel Alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 178(1): 162—169.
- [11] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical Study of Laser-produced Plasma in Confined Geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68: 775.
- [12] SHIVPURI R, HUA J, MITTAL P, et al. Microstructure-mechanics Interactions in Modeling Chip Segmentation during Titanium Machining[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(1): 71—74.
- [13] MAJZOUBI G H, AZIZI R, NIA A A. A Three-dimensional Simulation of Shot Peening Process Using Multiple Shot Impacts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 164: 1226—1234.
- [14] SASAKI T. New Generation X-Ray Stress Measurement Using Debye Ring Image Data by Two-Dimensional Detection[J]. Materials Science Forum, 2014, 783: 2103—2108.
- [15] SASAKI T, HIROSE Y. X-ray Triaxial Stress Analysis Using Whole Diffraction Ring Detected with Imaging Plate[J]. Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, 1995, 61(590): 2288—2295.
- [16] SASAKI T, HIROSE Y. Single Incidence X-ray Stress Measurement for all Plane Stress Components Using Imaging Plate of Two-dimensional X-ray Detector[J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 1995, 44(504): 1138—1143.