

专题——激光表面改性技术

TC17 钛合金激光冲击温强化的数值模拟研究

孙博宇¹, 乔红超¹, 陆莹¹, 赵吉宾¹, 吴嘉俊^{1,2}, 胡太友^{1,2}

(1.中国科学院沈阳自动化研究所 装备制造技术研究室, 沈阳 110016;

2.中国科学院大学 计算机与控制学院, 北京 100049)

摘要: **目的** 掌握激光冲击温强化温度对强化效果的影响规律 **方法** 通过有限元模拟的方式, 对 TC17 钛合金激光冲击温强化温度对残余应力和塑性变形的影响进行了初步研究。 **结果** 随着温度的增加, 残余应力先增加后减少, 当温度为 200 °C 时, 表面和深度方向的残余应力最大, 此时基体最大残余应力达到 -238 MPa。随着温度的增加, 塑性变形先增加后减少, 当温度为 200 °C 时, 塑性变形量达到最大。不同冲击顺序会影响材料的流动方向, 后冲击的激光使材料向先冲击激光留下的凹坑运动, 从而影响材料的表面形貌。仿真分析与验证实验的最大残余应力相差 < 5%, 从侧面证明了仿真结果的准确性。 **结论** 温度是影响激光冲击温强化效果的重要因素。TC17 钛合金在 200 °C 时的强化效果最好, 所研究的模拟方法为激光冲击强化温度仿真提供了一种新思路。

关键词: 激光冲击温强化; TC17 钛合金; 动态应变时效; 残余应力; 塑性变形; 有限元模拟

中图分类号: TG146.2+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)03-0001-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.03.001

Numerical Simulation of TC17 Titanium Alloy Strengthened by Warm Laser Shock

SUN Bo-yu¹, QIAO Hong-chao¹, LU Ying¹, ZHAO Ji-bin¹, WU Jia-jun^{1,2}, HU Tai-you^{1,2}

(1.Equipment Manufacturing Technology Lab, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2.School of Computer and Control Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: The work aims to grasp law of influence of laser shock processing temperature on processing effect. The influence of laser shock processing temperature on residual stress and plastic deformation of TC17 titanium alloy was preliminarily studied in the method of finite element simulation. With the increase of temperature, the residual stress firstly increased and then decreased. At the temperature of 200 °C, the residual stress on the surface and in depth direction was the maximum, the maximum residual stress of material is -238 MPa. With the increase of temperature, the plastic deformation firstly increased and then decreased. At the temperature of 200 °C, the plastic deformation reached the maximum. Different

收稿日期: 2017-10-08; 修订日期: 2017-11-10

Received: 2017-10-08; **Revised:** 2017-11-10

基金项目: 国家基金委-辽宁省联合基金 (U1608259); 国家重点研发计划 (2016YFB1102704); 国家自然科学基金 (51501219); 国家科技支撑计划 (2015BAF08B01-01)

Fund: Supported by NSFC-Liaoning Province United Foundation (U1608259), National Key Development Program (2016YFB1102704), National Natural Science Foundation of China (51501219), Project Supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAF08B01-01)

作者简介: 孙博宇 (1992—), 男, 硕士, 主要研究方向为激光加工。

Biography: SUN Bo-yu(1992—), Male, Master, Research focus: laser processing.

通讯作者: 赵吉宾 (1970—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为激光加工。

Corresponding author: ZHAO Ji-bin (1970—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: laser processing.

shock order would affect flow direction of material. Later-impacting laser would cause the material to complete pit movement, which would affect surface morphology of the material. Difference in maximum residual stress between simulation analysis and confirmatory experiment was less than 5%, thus accuracy of the simulation results was proved from another side. Temperature is an important factor that affects effect of laser shock processing. For TC17 titanium alloy, the best processing effect is achieved at 200 °C for warm laser shock processing, and simulation method provides a new idea for laser shock processing simulation.

KEY WORDS: warm laser shock processing; TC17 titanium alloy; dynamic strain aging; residual stress; plastic deformation; finite element modeling

TC17 材料是一种 α - β 型双相钛合金, 由于具有强度高、断裂韧性好、淬透性高和锻造温度范围宽等诸多优点, 被广泛应用于航空发动机叶片、转子轴等航空部件制造领域^[1]。航空发动机工作环境较为恶劣, 为保证发动机的使用寿命, 对其关键部件的性能, 尤其是疲劳性能提出了非常高的要求^[2]。

激光冲击强化 (LSP) 是一种常用的表面强化方法, 其通过功率密度为 GW/cm^2 量级、脉冲宽度为 ns 量级的强激光辐照材料表面, 产生 GPa 量级的冲击波来提高金属材料的硬度、强度、耐磨性和耐腐蚀性。其在材料表面形成一定的残余压应力, 能够有效改善金属材料的抗疲劳断裂性能^[3,4]。但是有大量研究表明, 激光冲击强化形成的残余压应力在高温工作环境下会发生应力释放。Altenberger 等人^[5]对激光冲击强化后的 AISI 304 不锈钢和 Ti64 钛合金的微观组织演变进行研究, 发现 550 ~ 600 °C 时的表面残余压应力与常温下的接近, 激光冲击强化改善效果大幅下降。为了解决这一问题, 2010 年, Ye 等人^[6]提出了将激光冲击强化和动态应变时效相结合的新工艺, 有效地增加了激光诱导残余压应力的高温稳定性, 能够较好地提高交变载荷下的疲劳寿命。2013 年, 孟宪凯等人^[7]对激光温强化进行了有限元仿真, 并进行了实验验证。结果表明, 温强化具有更好的效果。但作者仅对单点冲击进行了仿真, 并没有考虑搭接冲击情况, 工程意义稍显不足。

本文以 TC17 钛合金为研究对象, 通过有限元仿真的方法, 研究搭接冲击下温度对激光冲击温强化残余应力和表面形貌的影响, 分析残余应力在表面和深度方向的分布情况, 并通过实验对仿真结果进行了验证。

1 激光冲击温强化技术

1.1 简介

激光冲击强化技术是一种高效利用激光诱导等离子体冲击波的表面改性技术, 其强化原理如图 1 所示^[8]。利用高功率短脉冲的激光轰击金属材料表面吸收层, 吸收层材料吸收激光能量, 并且在很短时间内气化电离成等离子体状态, 该等离子体会继续吸收能

量并快速膨胀。由于受到外层约束层的约束, 等离子体形成的高压冲击波向基体内部传播。冲击波的力学效应在材料表层处产生塑性变形, 使表层材料的微观组织发生变化, 并能形成较深的残余压应力层, 从而显著提高金属材料的疲劳寿命和耐腐蚀、抗磨损性能。

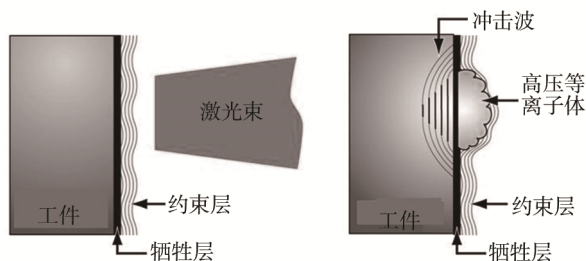


图 1 激光冲击强化原理示意图^[8]

Fig.1 Schematic diagram of laser shock processing^[8]

在 20 世纪 90 年代, 法国学者 Fabbro 提出了一种冲击波压力的计算模型, 该模型能够较好地反映爆轰波峰压随能量变化的规律, 是最常用的冲击波压力模型。激光诱导等离子体冲击波压力强度计算公式见式 (1—3)。

$$P_0 = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{ZI_0} \quad (1)$$

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{4E}{\pi d^2 \tau} \quad (3)$$

式中: α 为等离子体热能占内能的比例系数, 取 0.1; Z 为基体和约束层的折合声阻抗, Z_1 和 Z_2 分别为 TC17 基体和玻璃约束层的声阻抗; I_0 为激光功率密度; E 为激光能量; d 为光斑直径; τ 为脉冲宽度。本文仿真和实验所用参数为: 激光能量 4 J、光斑直径 3 mm、脉冲宽度 14 ns。

1.2 机理分析

激光冲击温强化是一种结合激光冲击和动态应变时效的新兴加工方式。Ye 等人^[9]研究了激光冲击温强化对 AISI4140 钢疲劳寿命的影响, 发现和激光常温冲击强化相比, 对基体进行预热后再冲击可以使

材料引入更为复杂的位错形态,具体表现为形成高密度的位错和复杂的位错缠结,因此可以认为表面发生动态应变时效对强化过程中的微观组织变化和残余应力维稳起到积极作用,极大地提高了高温及交变载荷条件下的疲劳寿命。周建忠^[10]对 IN718 镍基合金激光冲击温强化的温度进行了研究,发现后续高温测试试验中,加工温度为 260 ℃时,残余应力随着时间增加的降低速度最慢,材料具有较好的稳定性。因此,激光冲击温强化可以提升位错的密度和稳定性,形成稳定的位错结构,从而获得比常温强化更好的效果。而位错的密度又与材料的阻尼密切相关,根据 G-L 理论^[11],无论材料是处于高应变区还是低应变区,材料的阻尼性能和位错密度均成正比。这为仿真中阻尼的设置提供了理论依据,从而能够更好地分析激光温

强化的过程。

2 模拟方案

2.1 有限元仿真流程

由于激光温冲击强化是一个热-机耦合的瞬时动态过程,所以先在 ABAQUS/Explicit 模块进行分析计算,动态分析计算时间为 5000 ns,远大于冲击波加载时间。之后导入到 ABAQUS/Standard 模块进行静态回弹计算,得到单次冲击残余应力场和残余应变场的分布规律。由于实验中激光器的频率为 2 Hz,因此回弹时间设置为 0.5 s。在得到单次冲击的结果之后,将数据导入原模型中重复上述过程,直到最终得到搭接模拟结果,具体过程如图 2 所示。

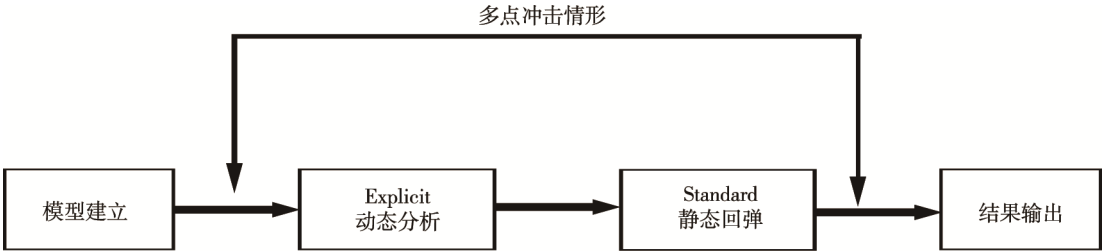


图 2 模拟过程图
Fig.2 Simulation process diagram

2.2 TC17 材料的本构模型

由于 J-C 模型能够较好地反映材料温度软化效应,因此采用 J-C 模型作为激光温冲击下材料动态响应的本构模型。J-C 模型参数参考王宝林等人研究成果^[12],部分常温参数如表 1 所示,剩余的高温参数参考中国航空材料手册第 4 卷^[13]。

表 1 TC17 钛合金模型参数表
Tab.1 Parameters of TC17 alloy model

参数	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	熔点 $t/^\circ\text{C}$
数值	4680	11 5800	0.29	1675

2.3 有限元模型及材料阻尼的建立

有限元模型和冲击顺序如图 3 所示,建立尺寸为 10 mm×10 mm×2 mm 的立方体 9 点搭接冲击的 1/4 模型,搭接率为 50%。上表面冲击区域及其附近的网格尺寸为 0.1 mm,由于残余应力在深度方向的变化幅度较大,为了更准确地得到分析结果,将深度方向的网格尺寸设置为 0.03 mm,下边界条件采用底面全约束。整个部件由 223780 个 C3D8R 类型网格组成。

使用 Rayleigh 阻尼模型参数 α 、 β 设置材料的阻尼。周建忠^[11]系统地研究了激光温强化 TC4 合金阻

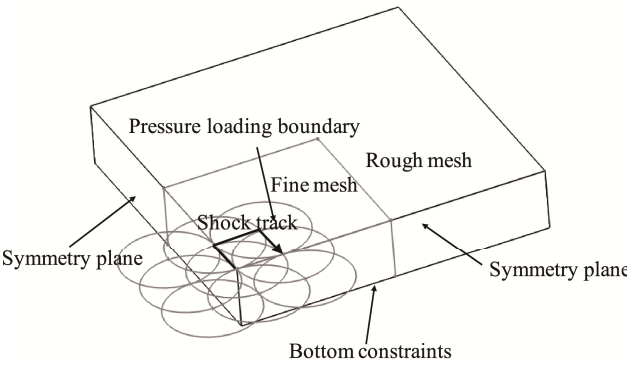


图 3 3D 模型示意图
Fig.3 Schematic diagram of 3D model

尼比的变化,发现随着温度的增加,TC4 在动态应变时效下形成的高密度位错可以使阻尼比增加。由于 TC4 与 TC17 均为双相钛合金,有一定相通性,因此本文选用 TC4 的阻尼比线性插值结果作为 TC17 的阻尼比进行计算分析。使用 abaqus 模态分析求解模型前两阶频率,利用结构总阻尼比 ζ 和前两阶频率根据公式(4)求出近似的 α 和 β 值,然后将其输入 ABAQUS 软件中进行分析。

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\omega_1} + \frac{\beta\omega_1}{2} = \frac{\alpha}{2\omega_2} + \frac{\beta\omega_2}{2} \tag{4}$$

式中： ω_1 和 ω_2 分别为结构的一、二阶频率。

2.4 激光冲击波的时空分布

本次验证实验所用激光器的激光能量在空间上呈现近高斯分布,因此仿真中激光冲击波压强的空间分布也为高斯分布。冲击波压强随空间坐标变化公式如式(5)所示。

$$P(x, y, t) = P_0(t) \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2R^2}\right] \quad (5)$$

式中: (x, y) 为以冲击区域正中心为基点的任一点的坐标, $P_0(t)$ 为随时间变化的峰值压力值, R 为冲击区域半径。

对于冲击波时间上的分布,有学者研究表明^[14,15]冲击压力波脉宽大约是激光脉冲脉宽的2~3倍。本文中的激光器脉宽为14 ns,建立的冲击波时间分布模型如图4所示^[16]。

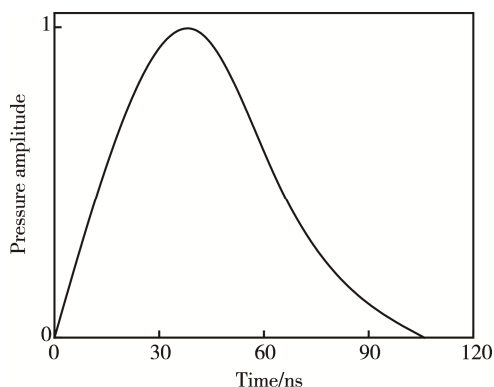


图4 冲击波压力幅值-时间曲线

Fig.4 Shock wave pressure amplitude-time curve

3 结果及分析

3.1 温度对残余应力场分布的影响

图5为不同温度激光冲击温强化后深度方向的残余应力场分布。从图中可知,残余应力场的影响深度在0.3~0.4 mm,且随着温度的增加,最大残余压应力先增大后减少。当温度为200℃时,残余压应力达到最大,为-238 MPa。而残余应力场的影响深度随温度的变化虽然也符合上述规律,但不是非常明显。分析原因可知,温度增加产生的软化效应导致材料的动态屈服极限降低,在相同冲击力的作用下使材料获得了更大的残余压应力和更深的塑性变形。但是,当温度超过200℃时,动态应变时效的影响程度增加,使材料的阻尼增加,冲击波的强化效果降低。

图6为不同温度激光冲击温强化后表面方向的残余应力场分布。从图中可知,搭接情况会影响残余应力场的分布,中间光斑附近会比两次光斑处形成更大的残余压应力。且随着温度的增加,最大残余压应力先增大后减少。当温度为200℃时,残余压应力达到最大;当温度超过200℃时,表面残余压应力会有

一定程度下降,但是总体下降程度不大。原因是根据J-C模型计算,随着温度增加,材料的动态屈服极限减低,材料获得更大的残余压应力。但是,当温度超过200℃时,动态应变时效影响程度增加,使材料的阻尼增加,冲击波强化效果降低。图7为200℃时的表面残余应力仿真图,从图中可以看出,中间光斑的影响程度和范围比周围光斑大,分布规律符合光斑搭接情形。

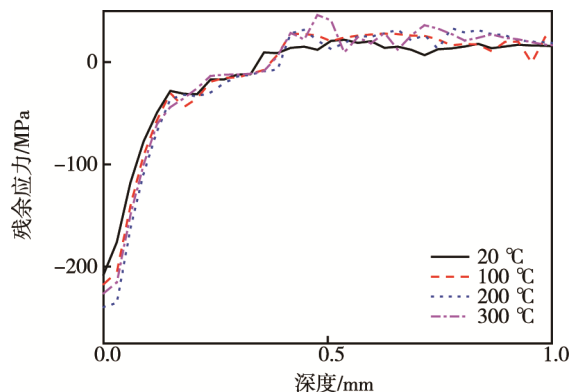


图5 不同冲击温度下深度方向残余应力场分布

Fig.5 Residual stress field distribution of different LSP temperature in depth direction

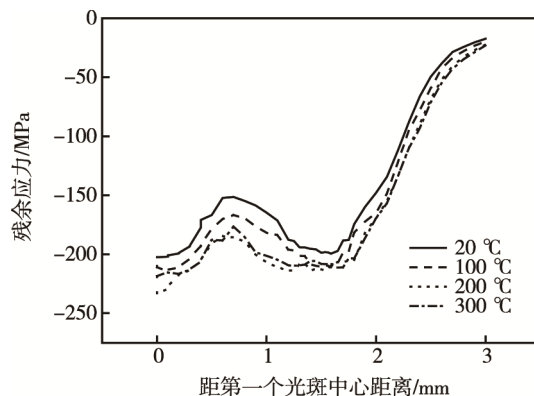


图6 不同冲击温度下表面残余应力场分布

Fig.6 Residual stress field distribution on surface at different LSP temperature

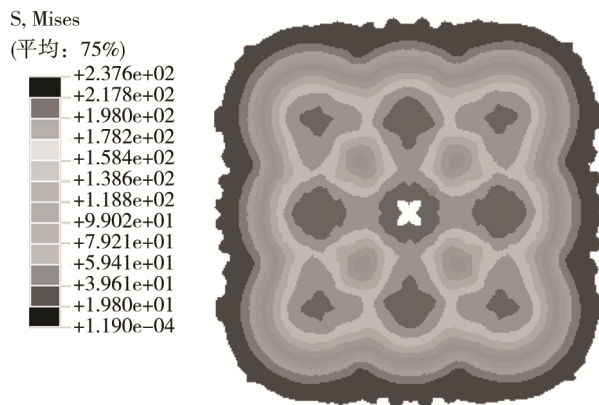


图7 200℃时表面残余应力分布图

Fig.7 Residual stress distribution on surface at 200℃

3.2 温度对表面形貌的影响

图 8 为不同温度激光冲击温强化后材料表面方向受冲击波影响的塑性变形量。从图中可知,在温度小于 200 °C 时,随着温度的增加,塑性变形量逐渐增大。当温度为 200 °C 时,塑性变形量达到最大,之后随着温度升高,塑性变形量基本不增加,并有降低趋势。这是因为随着温度增加,材料动态屈服强度减少并发生软化,使塑性变形量增加。但是阻尼的增加又会一定程度上减少材料的塑性变形量,因此出现了先增加后减少的趋势。图中还反映出了不同冲击顺序下表面形貌的变化,在图中 A 处,先冲击凹坑的高度变化趋势比后冲击凹坑右侧高度变化趋势平缓,说明后冲击的激光能量会影响现有的表面形貌,使材料向已有的凹坑运动。

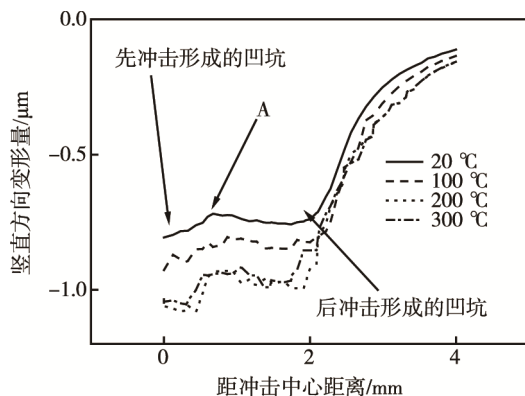


图 8 不同温度强化后材料的表面形貌

Fig.8 Surface morphology of material being processed at different temperature

4 实验验证

实验采用中科院沈阳自动化研究所自主研制的 SIA-LSP-1 型激光冲击强化设备。其中, YAG 脉冲激光器的最大脉冲能量 7 J、波长 1064 nm、脉宽 6 ~ 14 ns, 频率 2 Hz, 在工件表面形成直径为 3 mm 的光斑, 冲击温强化搭接率为 50%。采用线切割将 TC17 板材加工成尺寸为 20 mm×20 mm×2 mm 的试样, 对其进行机械研磨抛光至表面粗糙度 < 0.2 μm。接着在抛光面上覆盖一层铝箔胶带作为吸收层, 并将其固定在特制的高温激光冲击卡具上, 最后在其表面施加一层耐高温 K9 光学玻璃的约束层, 以阻碍冲击波向外扩散, 增强激光等离子体冲击波的作用效果。

激光冲击温强化加热系统是由四组电阻式加热棒组成, 温控范围为 20 ~ 300 °C, 温度梯度为 1 °C 可控。利用高温热像仪检测温度, 温度控制精度为 0.1 °C, 能够实现温度精确控制。通过实验研究不同温度激光冲击温强化对表面残余压应力的影响, 实验所用的试样和激光器的参数与仿真实验相同。

图 9 为实验与仿真最大残余压应力的对比。从图中可知, 两次实验的最大残余压应力值较为接近, 最大误差出现在 100 °C 时, 误差为 4.8%。此外, 两次实验的最大残余压应力值随温度变化规律也一致, 说明仿真结果具有一定的参考意义。

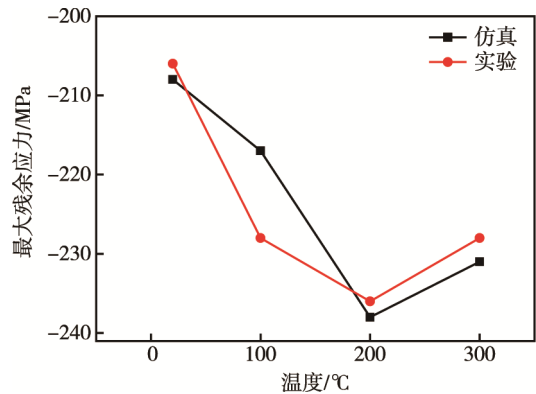


图 9 不同冲击温度下实验和模拟最大残余应力

Fig.9 Experimental and simulated maximum residual stress of different LSP temperature

5 结论

1) 通过设置材料的阻尼来模拟不同温度下材料动态应变时效。随着温度的增加, 材料深度和表面方向的残余应力及塑性变形量先增加后减少, 均在温度为 200 °C 时达到最大。不同冲击顺序会影响材料的流动方向, 后冲击的激光使材料向先冲击激光留下的凹坑运动, 从而影响材料的表面形貌。

2) 验证实验结果表明仿真与实验的残余应力相差 < 5%, 实验和仿真模拟结果具有较高的一致性, 仿真模拟结果具有一定的参考意义。仿真和实验结果均表明, TC17 钛合金在 200 °C 时的激光冲击强化效果最好。

参考文献:

- [1] 王学德, 杨磊, 周鑫, 等. 钛合金激光冲击强化层的残余应力及显微组织[J]. 机械工程材料, 2012, 36(4): 77-79.
WANG Xue-de, YANG Lei, ZHOU Xin, et al. Residual Stress and Microstructure of Laser Shock Peened Layer of Titanium Alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(4): 77-79.
- [2] 乔红超, 赵吉宾, 于彦凤. TC4 钛合金激光冲击强化参数及性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 139-144.
QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, YU Yan-feng. Analysis on Laser Processing Parameters and processing Effects of Laser Peening of TC4 Titanium Alloy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 139-144.

- [3] SEALY M P, GUO Y B, CASLARU R C, et al. Fatigue Performance of Biodegradable Magnesium-Calcium Alloy Processed by Laser Shock Peening for Orthopedic Implants[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 82: 428-436.
- [4] CARALAPATTI V K, NARAYANSWAMY S. Analyzing the Effect of High Repetition Laser Shock Peening on Dynamic Corrosion Rate of Magnesium[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 93: 165-174.
- [5] ALTENBERGER I, STACH E A, LIU G, et al. An In Situ Transmission Electron Microscope Study of the Thermal Stability of Near-surface Microstructures Induced by Deep Rolling and Laser-shock Peening[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48(12): 1593-1598.
- [6] CHANG Y, LIAO Y, CHENG G J. Warm Laser Shock Peening Driven Nanostructures and Their Effects on Fatigue Performance in Aluminum Alloy 6160[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2010, 12(4): 291-297.
- [7] 孟宪凯, 黄舒, 安中伟, 等. 激光温喷丸过程中冲击波压力的有限元分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(f06): 198-202.
- MENG Xian-kai, HUANG Shu, AN Zhong-wei, et al. Finite Element Analysis of Shock Wave Pressure Induced by Warm Laser Peening[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(f06): 198-202.
- [8] 乔红超, 赵吉宾, 陆莹. 激光诱导冲击波应用技术研究现状[J]. *表面技术*, 2016, 45(1): 1-6.
- QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, LU Ying. Current Status of Laser-induced Shock Wave Application Technology[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(1): 1-6.
- [9] YE C, SUSLOV S, KIM B J, et al. Fatigue Performance Improvement in AISI 4140 Steel by Dynamic Strain Aging and Dynamic Precipitation during Warm Laser Shock Peening[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(3): 1014-1025.
- [10] 周建忠, 韩煜航, 黄舒, 等. 不同工艺温度对 IN718 合金激光温喷丸后残余应力和纳米硬度的影响[J]. *中国激光*, 2015(7): 77-84.
- ZHOU Jian-zhong, HAN Yu-hang, HUANG Shu, et al. Effect of Different Process Temperatures on Residual Stress and Nano-hardness of Warm Laser Peened IN718 Superalloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015(7): 77-84.
- [11] 周建忠, 朱炜立, 孟宪凯, 等. 激光温喷丸 TC4 钛合金的阻尼特性研究[J]. *应用激光*, 2015, 35(1): 35-39.
- ZHOU Jian-zhong, ZHU Wei-li, MENG Xian-kai, et al. Study of TC4 Titanium Alloy Based on the Variation of Damping Properties Introduced by Warm Laser Peening[J]. *Applied Laser*, 2015, 35(1): 35-39.
- [12] 王宝林. 钛合金 TC17 力学性能及其切削加工特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- WANG Bao-lin. Study on the Mechanical Properties of Titanium Alloy TC17 and Characteristics in Machining [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [13] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- Editorial Board of China Aviation Materials Handbook. China Aeronautical Materials Handbook[M]. Beijing: China Standards Press, 2002.
- [14] 孙汝剑, 朱颖, 郭伟, 等. 激光冲击强化对 TC17 表面形貌及残余应力场影响的有限元数值模拟研究[J]. *塑性工程学报*, 2017, 24(1): 187-193.
- SUN Ru-jian, ZHU Ying, GUO Wei, et al. Effect of Laser Shock Processing on Surface Morphology and Residual Stress Field of TC17 Titanium Alloy by FEM Method[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2017, 24(1): 187-193.
- [15] PEYRE P, BERTHE L, SCHERPEREEL X, et al. Experimental Study of Laser-driven Shock Waves in Stainless Steels[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(11): 5985-5992.
- [16] ZHANG X, SHE J, LI S, et al. Simulation on Deforming Progress and Stress Evolution during Laser Shock Forming with Finite Element Method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 27-35.