

引文格式: 田子航, 孙博宇, 金丹, 等. 激光冲击强化对TC11钛合金应力松弛特性的影响[J]. 航空制造技术, 2025, 68(13): 100–105.
TIAN Zihang, SUN Boyu, JIN Dan, et al. Effect of laser shock peening on stress relaxation characteristics of TC11 titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(13): 100–105.

激光冲击强化对TC11钛合金应力松弛特性的影响*

田子航^{1,2}, 孙博宇², 金丹¹, 乔红超², 闵业钊²

(1. 沈阳化工大学, 沈阳 1100142;

2. 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)

[摘要] 为探究 TC11 钛合金的应力松弛特性, 本文采用有限元方法模拟激光冲击强化及应力松弛过程, 分析功率密度、冲击次数和温度对 TC11 钛合金应力松弛的影响。采用 SIA-LSP-23 系列激光冲击强化系统和 KSL-1700X-A2 型高温炉进行激光冲击强化和应力松弛试验。温度 573 K、功率密度 5.09 GW/cm²、冲击 1 次和 3 次时, 残余应力试验数据和仿真结果误差均小于 5%, 模拟值与试验值吻合较好。在松弛温度为 573 K 时, 功率密度的增加对应力松弛极限的提升效果比冲击次数的影响更显著, 但应力松弛极限上升到 159.5 MPa 后基本不再变化, 且应力松弛极限随温度升高而减小。

关键词: 激光冲击强化(LSP); TC11 钛合金; 残余应力场; 应力松弛; 数值模拟

中图分类号: V25; TG17

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.13.100

Effect of Laser Shock Peening on Stress Relaxation Characteristics of TC11 Titanium Alloy

TIAN Zihang^{1,2}, SUN Boyu², JIN Dan¹, QIAO Hongchao², MIN Yezhao²

(1. Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 1100142, China;

2. Equipment Manufacturing Technology Department, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

[ABSTRACT] This paper aims to explore the stress relaxation characteristics of TC11 titanium alloy. The finite element method was adopted to simulate the laser shock peening and stress relaxation processes, and to analyze the influence of power density, number of impacts, and temperature on the stress relaxation of TC11 titanium alloy. The SIA-LSP-23 series laser shock peening system and the KSL-1700X-A2 high-temperature furnace were used to conduct laser shock peening and stress relaxation tests. When the temperature was 573 K, the power density was 5.09 GW/cm², and the number of impacts was 1 or 3, the error between the experimental data and the simulation results was less than 5%, indicating a good agreement between the simulated and experimental residual stress values. At a relaxation temperature of 573 K, an increase in power density had a greater effect on improving the stress relaxation limit than the number of impacts. However, the stress relaxation limit basically stopped changing after reaching 159.5 MPa, and it decreased as the temperature increased.

Keywords: Laser shock peening (LSP); TC11 titanium alloy; Residual stress field; Stress relaxation; Numerical simulation

第四代、第五代战斗机的航空发动机叶盘等部件在工作时需长期承受高温、高压及高应力作用, 因此对于制造发动机叶盘等零部件的材料性能提出了较高的要求^[1]。TC11 属于双相钛合金, 具有密度低、比强度高、

耐腐蚀、耐高温等优良特性, 被广泛用于制造叶盘、叶片、鼓筒以及飞机结构件等^[2]。

在服役过程中, 叶片在交变载荷及振动载荷等作用下, 经常会出现疲劳断裂等问题。在不改变基体材料性

* 基金项目: 国家自然科学基金(11102119)。

能的前提下,采用表面强化技术是提高材料抗疲劳性能的重要途径。激光冲击强化(Laser shock peening, LSP)技术是一种通过冲击波提升材料表面性能的新型表面强化技术^[3],其强化过程不受工件几何结构的限制,可实现对材料性能指标的精确控制。在冲击波的作用下,金属材料表层发生高应变率塑性变形,形成硬化层,在激光能量、吸收层和激光光斑等因素的影响下,材料表面塑性变形影响表面残余应力分布。Sun等^[4]利用LSP技术将2319铝合金表面的拉应力转变为残余压应力,并且残余应力深度大约为0.8 mm,这有利于降低裂纹的萌生和扩展。Akhtar等^[5]通过正交试验发现,松弛速率依赖于晶粒尺寸,且随晶粒尺寸的增加而增大。自从苟磊等^[6]运用Abaqus有限元软件对冲击波在2024-T351铝合金内的传播行为展开分析后,采用多点连续动态冲击仿真策略的数值模拟技术便成为研究LSP的一种有效手段。赵鹏等^[7]利用Abaqus有限元软件分析温度对高温压弯蠕变的影响,经700℃处理600 s后,TC4钛合金的残余应力已经降低到趋于稳定的极限值。LSP后在材料表面形成的残余压应力抑制了表面裂纹的萌生和扩展,从而延长了疲劳寿命。然而残余应力场在整个疲劳寿命期间并不稳定,残余应力在温度、循环载荷以及振动载荷等各种作用下会松弛和重新分布^[8]。开展LSP对TC11钛合金试件的应力松弛特性研究,对该合金的性能强化及工程应用具有重要意义。

本文通过有限元数值模拟方法,研究了LSP参数对TC11钛合金应力松弛过程的影响,分析不同冲击参数和温度条件下的应力松弛机理,并与试验结果进行对比分析,验证了数值模拟方法的准确性。

1 试验及数值模拟

1.1 试验材料

试验材料为TC11钛合金,尺寸为20 mm×20 mm×4 mm,化学成分见表1。屈服强度 $\sigma_{0.2}$ =991 MPa,抗拉强度 σ_b =1102 MPa,弹性模量 E =123 GPa,泊松比 ν =0.3。

1.2 试验方案

LSP试验采用SGR Extra-20 Nd:YAG Q-Switched激光器,选用厚度为2 mm均匀流动的去离子水作为约束层,选择100 μm厚的黑胶带作为吸收保护层,脉冲激光能量为8 J,激光波长为1064 nm,激光脉宽为20 ns,

重复频率为1 Hz,激光光斑直径为3 mm,光斑的搭接率为50%。采用KSL-1700X-A2型高温炉对LSP后的试样进行应力松弛,并在同一位置测量样品的表面残余应力。

1.3 残余应力检测

采用基于 $\sin 2\psi$ 法的Proto-LXDR应力测量系统对残余应力进行测试。X射线源为Cu-K α 射线,X射线束直径为1 mm,衍射晶面为{213},衍射角的扫描角范围为142°。测试应力方向与测量系统的 ψ 平面平行。

1.4 数值模拟方法

1.4.1 有限元模型及计算参数

采用有限元分析软件Abaqus对TC11钛合金进行LSP和应力松弛模拟。TC11钛合金靶材尺寸为20 mm×20 mm×4 mm,单元类型为C3D8R,单元尺寸为0.125 mm×0.125 mm×0.08 mm。激光冲击路径和划分网格后的有限元模型如图1所示。

1.4.2 材料本构模型及其参数

Johnson-Cook模型在LSP中被广泛使用^[9],该模型可以用来描述金属材料在短脉冲、高载荷作用下的动态应力-应变响应。在Johnson-Cook模型中,流动应力被分为3个不相关的部分:应变硬化、应变率强化和高温软化。Johnson-Cook模型表示为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \left(\ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (1)$$

式中, σ 为材料中的流动应力; ε 为等效塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考塑性应变率; A 、 B 和 n 为硬化系数; C 为应变率敏感系数; T_r 为室温; T_m 为熔点; m 为热软化指数。

基于应力松弛极限和时间硬化理论的Maxwell模型可以准确描述合金的松弛行为^[10],该模型表述为

$$\sigma' = \sigma_0 + \sum_{i=1}^j A_i \left(e^{-\frac{t^{m'}}{B_i}} - 1 \right) \quad (2)$$

式中, σ' 为瞬时应力; σ_0 为初始应力; t 为任意松弛时刻; A_i 和 B_i 为拟合参数; m' 为时间硬化指数; i 、 j 为多项式次数。

1.4.3 冲击波模型及其参数

冲击波在约束模型下的峰值压力估算公式为^[11]

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0} \quad (3)$$

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (4)$$

表1 TC11钛合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of TC11 titanium alloy (mass fraction)

Ti	Al	Mo	Zr	Si	Fe	O	N	C	H	V
余量	6.65	3.36	1.64	0.28	0.14	0.147	0.004	0.011	<0.0006	4.05

式中, P_{\max} 为峰值压力, GPa; α 为内能与热能比值, 取 0.25; Z 为约束层材料和靶材之间的冲击波声阻抗, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; Z_1 、 Z_2 分别为靶材和约束层水的声阻抗值; I_0 为激光功率密度, $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$, 计算公式为

$$I_0 = \frac{4\gamma E}{\pi d^2} \quad (5)$$

式中, γ 为等离子体的等熵指数, 通常取 0.7; d 为光斑直径, mm; E 为激光能量, J; τ 为激光脉宽, $\tau=20 \text{ ns}$ 。

当激光辐射到材料表面时, 其有效辐照面积与光斑大小有直接关系, 冲击压力的空间分布状态与材料表面冲击效果有关。Zhang 等^[12]认为, 激光功率密度的空间分布与激光冲击波压力的空间分布规律基本一致, 因此冲击压力的空间呈高斯分布, 其表达式为

$$P(r, t) = P(t) \exp\left(-\frac{r^2}{2R^2}\right) \quad (6)$$

式中, P 为瞬时压力, GPa; r 为光斑内某一点到光斑中心的距离; R 为光斑半径。光斑内任意一点的激光功率密度和冲击波压力与该点到光斑中心的距离呈负相关, 其空间分布状态如图 2 所示。

2 仿真结果及分析

2.1 功率密度对应力松弛的影响

在光斑直径 3 mm、搭接率 50%、冲击次数 1、应力松弛温度 573 K、时间 7200 s 条件下, 研究不同激光功率

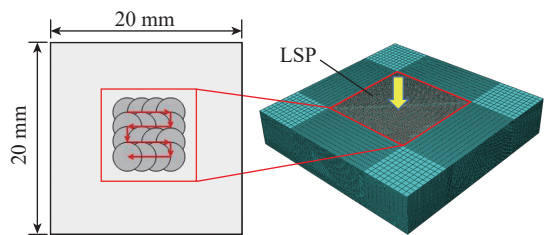


图 1 激光冲击路径及网格面划分
Fig.1 Laser shock path and mesh surface division

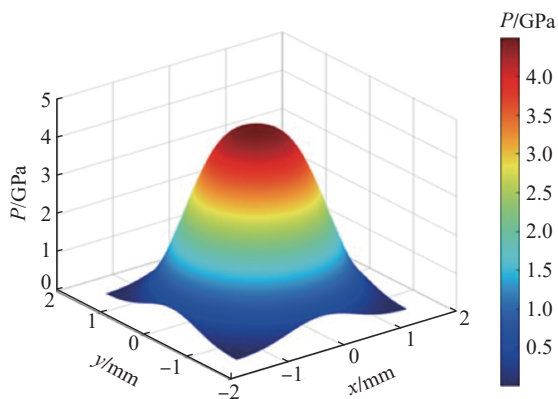


图 2 冲击波压力空间分布
Fig.2 Spatial distribution of shock wave pressure

密度对冲击效果和应力松弛的影响, 选取激光功率密度 5.09 GW/cm^2 、 6.36 GW/cm^2 、 7.64 GW/cm^2 和 8.91 GW/cm^2 进行模拟, 图 3 为残余应力提取点。

应力松弛过程中深度方向上的残余应力随时间的变化如图 4 所示。LSP 过程中, 材料表面发生塑性变形, 该塑性变形受到材料内部反作用力的约束, 二者相互作用下, 塑性变形区域产生的残余压应力, 与材料内部的拉应力共同构成沿深度方向分布的残余应力场。从图 4 可以看出, 材料内部的拉应力区域厚度随着时间的增加逐渐降低, 表面的塑性变形向弹性变形转化, 导致残余压应力降低, 形成应力松弛。当应力松弛进行到 1730 s 后, 材料内部的拉应力厚度不再明显降低, 残余应力趋近应力松弛极限。

图 5 为 P' 点在不同功率密度下, 压应力随时间的变化曲线。可以看出, 在 5000 s 内残余压应力逐渐降低, 5000 s 后达到松弛极限。当功率密度由 5.09 GW/cm^2 增加至 8.91 GW/cm^2 , 应力松弛极限由 109.5 MPa 提升到 159.5 MPa。当功率密度由 7.64 GW/cm^2 提高到 8.91 GW/cm^2 , 应力松弛极限提升幅度仅为 8.06%, 达到饱和。为了更深入地分析功率密度对应力松弛的影响, 将压应力-时间曲线进行微分, 得到不同功率密度下应力松弛速率随时间的变化关系, 如图 6 所示。应力松弛可分为两个阶段, 第 1 阶段内残余应力快速下降, 为应力松弛的主要阶段, 但应力松弛速率不同。随着初始残余压应

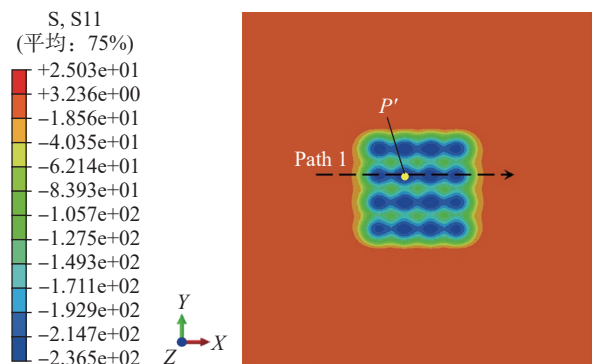


图 3 残余应力提取点
Fig.3 Residual stress extraction point

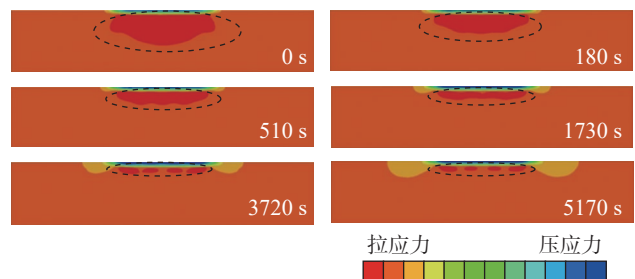


图 4 应力松弛中应力的传播
Fig.4 Stress propagation in stress relaxation

力的增加,其应力松弛速率的绝对值也逐渐增大,残余压应力的释放速度更快。1700 s后为第2阶段,应力松弛速率的绝对值快速降低到0.03 MPa/s以内,在这一阶段残余压应力以缓慢的速度释放,不同功率密度下的应力松弛速率曲线逐渐重合,以相同的趋势逐渐降低,在5000 s时,应力松弛速率都趋近0,残余压应力达到松弛极限。

2.2 冲击次数对应力松弛的影响

在光斑直径3 mm、搭接率50%、激光功率密度5.09 GW/cm²、应力松弛温度573 K、时间7200 s条件下,比较冲击次数对应力松弛的影响。如图7所示,不同冲击次数的应力松弛过程与图5中残余压应力的变化趋势一致,应力松弛极限由109.5 MPa提升到145.0 MPa。随着冲击次数增加,产生的反向稀疏波使表面塑性变形降低,导致表面残余压应力更早地达到饱和状态。因此,增加功率密度对提升材料表面残余压应力的效果更好。图8中应力松弛速率的绝对值也在1700 s时开始第2阶段的变化,此时的应力松弛速率绝对值同样降低到0.03 MPa/s。冲击3次、功率密度6.36 GW/cm²的表

面残余压应力的应力松弛量和应力松弛速率均保持一致,这说明应力松弛过程与晶粒细化程度相关。晶粒尺寸随着冲击次数和功率密度的增加而减小,塑性变形逐渐增强,LSP后的表面残余压应力增加^[13-14],但在应力松弛过程中,晶粒尺寸在高温作用下逐渐增大导致表面残余压应力降低到应力松弛极限^[15-16]。LSP后的晶粒细化程度越高,松弛后的应力松弛极限和应力松弛速率的绝对值也高。

2.3 温度对应力松弛的影响

在光斑直径3 mm、搭接率50%、应力松弛时间7200 s、激光功率密度6.36 GW/cm²、冲击次数1次的条件下,比较不同温度对应力松弛的影响,如图9所示。可以看出,在表面残余压应力相同的情况下,随着温度的升高,应力松弛极限由132.2 MPa逐渐降低到104.3 MPa。并且在相同的温度梯度差下,应力松弛极限的降低幅度逐渐减小。应力松弛速率随时间的变化如图10所示,随着时间的增加,各温度下应力松弛速率均呈现降低的趋势。

对比图6和8可知,功率密度和冲击次数只能影响

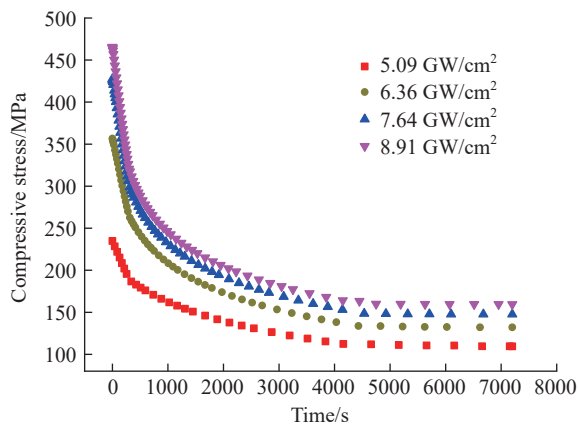


图5 不同功率密度下应力松弛曲线

Fig.5 Stress relaxation curves at different power densities

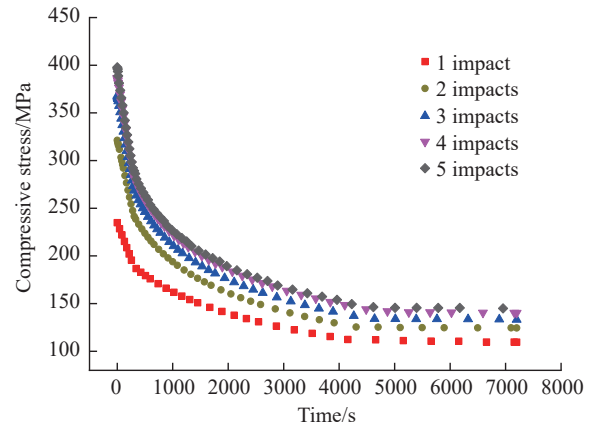


图7 不同冲击次数下应力松弛曲线

Fig.7 Stress relaxation curves at different number of impacts

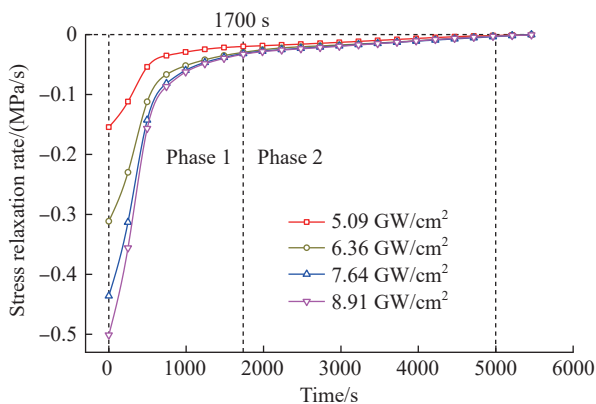


图6 不同功率密度下应力松弛速率曲线

Fig.6 Stress relaxation rate curves at different power densities

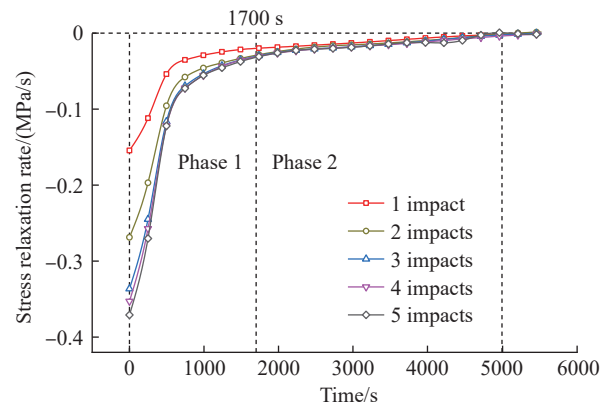


图8 不同冲击次数下应力松弛速率曲线

Fig.8 Stress relaxation rate curves at different number of impacts

初始应力松弛速率,无法缩短应力松弛时间。这一结果与不同温度下位错的迁移率有关^[17-18],随着温度的升高,材料内原子内能越高,更多的滑移系被激活,削弱了裂纹尖端与位错的相互作用,有利于位错的滑移、攀移及原子扩散过程,所以温度越高应力松弛量越大,应力松弛越快。LSP后表面发生塑性变形导致应力分布不均匀,但在应力松弛过程中温度的作用下,晶粒尺寸和晶粒之间的应力趋向均匀分布。因此,残余压应力在第1阶段急剧减小,第2阶段内位错平缓运动,残余压应力缓慢释放。

3 试验结果及分析

为验证有限元模拟的准确性,设计并制备了与模拟模型尺寸相同的试件进行验证。试验所用激光功率密度为 5.09 GW/cm²,分别冲击 1 次和 3 次,应力松弛温度为 573 K。图 11 为单点冲击 3 次后凹坑的轮廓曲线, LSP 后形成 29 μm 的凹坑,与仿真凹坑深度 30.8 μm 相比,相对误差为 6.21%。图 12 为 LSP 和应力松弛的试件在深度方向上的显微硬度,应力松弛主要发生在距表

面 0.4 mm 内的塑性区域,应力松弛过程削弱了 LSP 试件的塑性变形,并使细化后的晶粒尺寸增加,从而导致显微硬度显著降低。图 13 和 14 分别为 LSP 和应力松弛后试件在表面和深度方向上残余应力的试验和仿真结果。经试验数据与仿真结果对比可知,各位置处有限元模拟值与试验结果吻合较好,误差均小于 5%,说明本文的有限元模型可以模拟 LSP 和应力松弛过程。

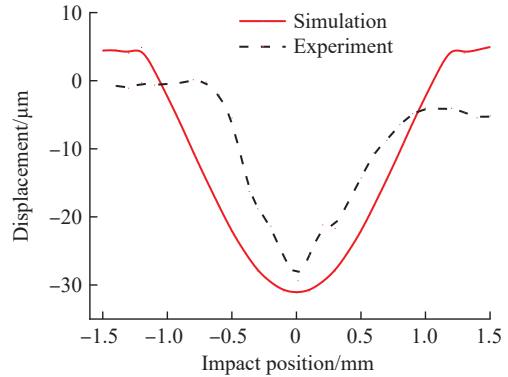


图 11 单点冲击成形验证

Fig.11 Single point impact forming verification

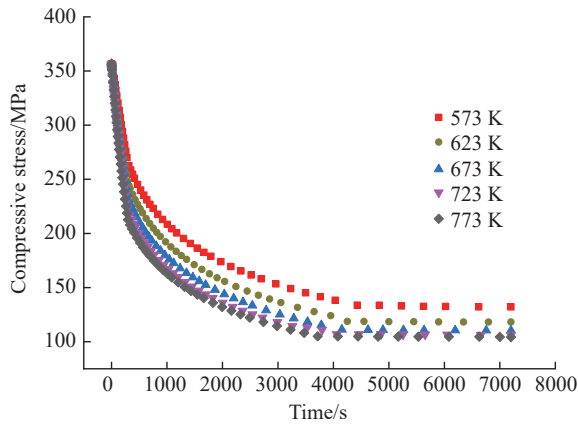


图 9 不同温度下应力松弛曲线

Fig.9 Stress relaxation curves at different temperatures

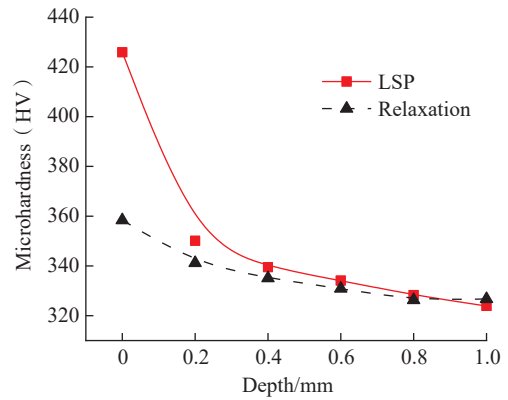


图 12 深度方向上的显微硬度

Fig.12 Microhardness in depth direction

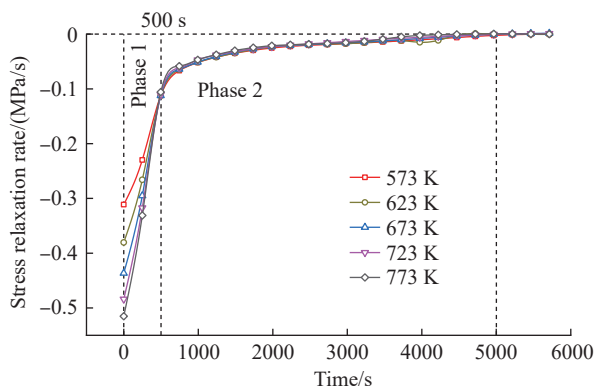


图 10 不同温度下应力松弛速率曲线

Fig.10 Stress relaxation rate curves at different temperatures

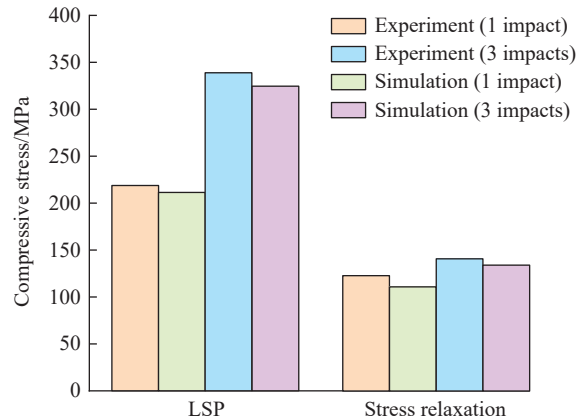


图 13 表面残余压应力

Fig.13 Surface residual compressive stress

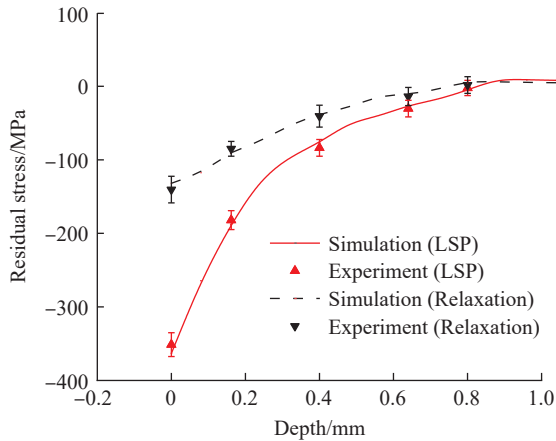


图 14 深度方向上的残余应力
Fig.14 Residual stress in depth direction

4 结论

(1) 在应力松弛过程中,深度方向上残余应力场的厚度先迅速减小,然后随着残余应力的释放,松弛速率逐渐降低,表面压应力趋近应力松弛极限。

(2) 在 573 K 条件下提高功率密度和冲击次数均可提升应力松弛极限和应力松弛速度,且应力松弛极限增加到一定阈值后不再变化。增加功率密度对应力松弛极限的提高效果更好。不同条件下 LSP 后的表面残余压应力相同,松弛后应力松弛极限和松弛速率曲线变化趋势一致,应力松弛效果取决于 LSP 后的晶粒细化程度。

(3) 应力松弛速度随着温度的升高而加快,应力松弛极限随温度升高而减小,温度升高显著缩短了应力松弛第 1 阶段的时间,且不受功率密度和冲击次数的影响。

参考文献

- [1] 陆楷楠,陈伟,赵振华,等.激光冲击强化对TC11 抗外物损伤能力的影响[J].中国表面工程,2022,35(3):184-190.
- [2] LU Kainan, CHEN Wei, ZHAO Zhenhua, et al. Effect of laser shock process on resistance of TC11 to foreign object damage[J]. China Surface Engineering, 2022, 35(3): 184-190.
- [3] 沈淑馨,高旭,何蓓,等.显微组织对激光增材制造航空发动机用钛合金室温及中温拉伸性能的影响[J].航空科学技术,2022,33(9):66-76.
- [4] SHEN Shuxin, GAO Xu, HE Bei, et al. The effect of microstructure on room and medium temperature tensile properties of titanium alloy fabricated by laser additive manufacturing used in aeroengine[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(9): 66-76.
- [5] 乔红超,胡宪亮,赵吉宾,等.激光冲击强化的影响参数与发展应用[J].表面技术,2019,48(12):1-9,53.
- [6] QIAO Hongchao, HU Xianliang, ZHAO Jibin, et al. Influence parameters and development application of laser shock processing[J]. Surface Technology, 2019, 48(12): 1-9, 53.
- [7] SUN R J, LI L H, ZHU Y, et al. Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018,

747: 255-265.

- [5] AKHTAR M K, KHWAJA F A, BUTT M Z. Effect of grain size on the stress-relaxation rate in Ti-6.5 at% Nb alloy crystals[J]. Physica Status Solidi, 1994, 143(1): 59-63.
- [6] 苟磊,马玉娥,杜永.多点连续动态激光冲击强化残余应力场数值分析[J].航空动力学报,2019,34(12):2738-2744.
- [7] GOU Lei, MA Yu'e, DU Yong. Continuous dynamic numerical analysis of residual stress field under multi-point laser shock peening[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12): 2738-2744.
- [8] 赵鹏,吴为,付雪松,等.TC4 钛合金L型材高温弯曲蠕变的数值模拟研究[J].稀有金属材料与工程,2022,51(1):211-216.
- [9] ZHAO Peng, WU Wei, FU Xuesong, et al. Numerical simulation of high temperature bending creep of TC4 titanium alloy L profile[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(1): 211-216.
- [10] 陈源,李淑慧,李永丰,等.TA15钛合金应力松弛行为宏微耦合本构建模[J].机械工程学报,2022,58(12):64-74.
- [11] CHEN Yuan, LI Shuhui, LI Yongfeng, et al. Macro-Micro coupled constitutive modeling for stress relaxation behavior of TA15 alloy sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(12): 64-74.
- [12] CHEN M, NIU Q L, AN Q L, et al. Johnson-Cook constitutive equation for titanium alloy TC11[J]. Key Engineering Materials, 2013, 589-590: 140-146.
- [13] CUI X X, WU X D, WAN M, et al. A novel constitutive model for stress relaxation of Ti-6Al-4V alloy sheet[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 161: 105034.
- [14] FABBRO R, FOURNIER J, BALLARD P, et al. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry[J]. Journal of Applied Physics, 1990, 68(2): 775-784.
- [15] ZHANG W W, LAWRENCE YAO Y. Microscale laser shock processing—Modeling, testing, and microstructure characterization[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2001, 3(2): 128-143.
- [16] NIE X F, HE W F, ZANG S L, et al. Effect study and application to improve high cycle fatigue resistance of TC11 titanium alloy by laser shock peening with multiple impacts[J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 253: 68-75.
- [17] 陈正阁,武永丽,薛全喜,等.激光冲击强化对片层TC11 钛合金组织和性能的影响[J].表面技术,2022,51(7):343-352.
- [18] CHEN Zhengge, WU Yongli, XUE Quanxi, et al. Effect of laser shock peening on microstructure and properties of TC11 titanium alloy with lamellar microstructure[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 343-352.
- [19] SEMIATIN S L, BIELER T R. The effect of alpha platelet thickness on plastic flow during hot working of Ti-6Al-4V with a transformed microstructure[J]. Acta Materialia, 2001, 49(17): 3565-3573.
- [20] HO K C, LIN J, DEAN T A. Modelling of springback in creep forming thick aluminum sheets[J]. International Journal of Plasticity, 2004, 20(4-5): 733-751.
- [21] 罗经锋.TC4 钛合金薄板高温应力松弛与蠕变行为研究[D].上海:上海交通大学,2019.
- [22] LUO Jingfeng. Study on stress relaxation and creep behavior of TC4 titanium alloy sheet at high temperature[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [23] ZONG Y Y, LIU P, GUO B, et al. Investigation on high temperature short-term creep and stress relaxation of titanium alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 620: 172-180.

通信作者:金丹,教授,博士,研究方向为金属材料力学性能。

(责编 七七)