

引用格式: 薛成, 雷敦财, 颜雪源, 等. 激光冲击强化加工路径对齿轮钢表面力学性能影响规律研究[J]. 航空材料学报, 2025, 45(1): 62-69.

XUE Cheng, LEI Duncai, YAN Xueyuan, et al. Influence of multi-point laser shock peening process on surficial mechanical properties in gear steels[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2025, 45(1): 62-69.

激光冲击强化加工路径对齿轮钢表面力学性能影响规律研究

薛成^{1*}, 雷敦财¹, 颜雪源², 臧顺来², 董红涛¹, 游志伟¹

(1. 中国航发湖南动力机械研究所 机械系统研究部, 湖南 株洲 412000; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049)

摘要: 对于齿轮类航空发动机附件传动系统零件, 复杂的工作环境对齿轮表面抗疲劳和耐磨性能提出更高要求。激光冲击强化技术通过使材料表面发生剧烈塑性变形, 引入残余压应力, 同时提升表面硬度。均匀的残余应力场和表面硬度分布对提升零件疲劳寿命和耐磨性尤为重要, 因此, 如何获得均匀的残余压应力场和硬度分布, 是激光冲击强化工艺研究的一个重要方面。本工作提出一种4层搭接激光冲击强化加工路径方案, 采用有限元数值模拟和实验相结合方法, 分析激光冲击强化后残余应力和显微硬度力学性能参数的特征。采用有限元数值模拟方法, 对多点冲击9310齿轮钢材料的残余应力空间分布均匀性进行研究。采用实验方法, 分析激光能量和冲击次数对9310齿轮钢材料残余应力和显微硬度的影响。结果表明, 4层搭接激光冲击强化加工路径方案, 能够获得较均匀的表面残余压应力场; 随着激光能量和冲击次数增加, 表面残余应力和显微硬度也随之增大, 但增加幅度会减少, 表现出一定饱和趋势。

关键词: 激光冲击强化; 有限元法; 残余应力; 多点冲击

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2023.000212

中图分类号: V261.8

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2025)01-0062-08

Influence of multi-point laser shock peening process on surficial mechanical properties in gear steels

XUE Cheng^{1*}, LEI Duncai¹, YAN Xueyuan², ZANG Shunlai², DONG Hongtao¹, YOU Zhiwei¹

(1. Mechanical Systems Research Department, AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412000, Hunan, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For the gears of aero-engine accessory system, the complex working environment requires high fatigue resistance and wear resistance on the gear surface. Laser shock peening technology introduces residual compressive stress and high micro-hardness by severe plastic deformation on the material surface. A more uniform residual stress field and hardness distribution are crucial to improve the fatigue life and wear resistance of the parts. Thus, it is an important topic to investigate how to obtain a uniform residual stress field and hardness distribution by optimizing the technical parameters of laser shock peening. In this paper, a four-layer overlapping laser shock peening path scheme is proposed, and the spatial distribution characteristics of residual stress and micro-hardness after laser shock peening are analyzed by the finite element numerical simulation and experiment. Using finite element numerical simulation method, the spatial homogeneous distribution of the residual stress field after the multi-point laser shock peening is studied. The effects of laser energy and impact times on the residual stress and micro-hardness of gear steel are experimentally investigated. The results show that the proposed four-layer overlapping laser shock peening path scheme can obtain a more uniform surface residual compressive stress field. With the increase of laser energy and impact times, the surface residual stress

and micro-hardness also increase, but the increase magnitude will decrease, showing a certain saturation trend.

Key words: laser shock peening; finite element method; residual stress; multi-points shock

齿轮作为航空发动机重要的附件传动部件,复杂的工作环境对其表面抗疲劳和耐磨性能要求较高^[1-3]。通常零件的磨损性能受表面状态影响,硬度作为衡量材料表面状态的综合性能指标,提高零件表面硬度对耐磨性能有重要意义^[4-5]。在材料表面或次表面上引入残余压应力场,一定程度上可以控制裂纹萌生和裂纹扩展,延长零件疲劳寿命^[6-7]。激光冲击强化是利用短脉冲激光诱导冲击波,在金属零件表面引入残余压应力场提升零件疲劳寿命的表面处理技术^[8-9]。同时激光冲击强化过程产生的剧烈塑性变形也会提升材料表面硬度,进而提升零件耐磨性能。

近 20 年,国内外学者对激光冲击强化工艺的有限元数值模拟和实验进行了广泛研究。对于激光冲击强化有限元数值模拟的研究分为两个方面。一是如何获得稳定和准确的有限元数值模拟结果,Zhou 等^[10]研究激光冲击强化模拟中网格尺寸对残余应力和等效塑性应变分布的影响。二是利用有限元数值模拟方法,研究激光冲击强化的激光参数、涂覆层结构、加工路径等技术参数对强化效果的影响。Kim 等^[11]提出一种激光冲击强化有限元方法,讨论了求解时间、稳定极限、动态屈服应力、峰值压力、压力脉冲持续时间、激光光斑尺寸等多个激光冲击强化有限元数值模拟参数对强化效果的影响。目前,激光冲击强化工艺有限元数值模拟多以替代实验进行工艺参数影响规律研究为目的,降低实验成本和时间。通常为了保证工艺参数准确,有限元数值模拟优化的激光冲击强化工艺参数仍需进行实验综合验证。

由于激光光束横截面一般为圆形光斑,待激光冲击强化区域面积通常远大于光斑直径,为此在激光冲击强化时,激光光斑需要在待强化区域进行多次冲击,这需要对激光光斑间搭接、激光能量、冲击次数等激光冲击强化加工路径方案进行研究。在激光冲击强化加工路径方案的实验研究方面,国内外学者主要研究激光光斑间搭接、激光能量等对材料表面粗糙度、硬度、疲劳性能、磨损性能等完整性指标的影响。Salimianrizi 等^[12]用实验方法研究光斑搭接率对材料表面粗糙度的影响,研究发现,搭接率从 20% 增加到 50%,表面粗糙度降低,由于多次激光照射,导致材料表面烧蚀,搭接率增

加到 70% 时,表面粗糙度急剧增加。Peng 等^[13]通过实验测得 9310 钢齿轮经激光冲击强化的弯曲疲劳性能,发现激光冲击强化可以在齿轮根圆角上产生理想的残余应力分布,当激光能量为 7 J 时,表面压应力高达 682.2 MPa,齿轮弯曲疲劳极限提高 8.3%。Pavan 等^[5]对激光冲击残余应力场中疲劳裂纹扩展进行研究,结果表明,激光冲击强化在试样中形成残余应力场,裂纹生长速率显著降低,材料的疲劳寿命提高 4 倍。Trdan 等^[14]研究发现,具有最佳工艺参数的激光冲击强化降低摩擦因数和磨损速率,从而降低附着力和磨损度。Arpith 等^[15]研究激光冲击强化工艺参数对摩擦因数和表面硬度的影响。摩擦因数随激光能量增加而降低,直至达到阈值强度,此后随激光能量增加而增加;表面硬度随激光能量增加而增大,直至达到饱和。对较高强度齿轮钢材料的激光冲击强化,虽然可通过提高激光能量方式获得更大表面残余压应力,但高激光能量会导致材料表面形貌发生较大变化^[16]。因此,如何在适当的激光能量下,通过改变激光冲击强化加工路径方案,使表面残余压应力与表面形貌达到最佳状态,这对较高强度材料的激光冲击强化工艺研究尤为重要。由于疲劳和耐磨性能与激光冲击强化后材料的残余应力场和硬度密切相关,因此,开展激光冲击强化加工路径方案对强化后材料残余应力和显微硬度影响的研究,为后续疲劳和耐磨性能评价提供具有应用价值的指导。

本工作对 9310 齿轮钢的激光冲击强化工艺进行有限元数值模拟和实验研究,提出一种 4 层搭接激光冲击强化加工路径方案,探讨激光冲击强化加工路径参数(包括激光能量和冲击次数)对 9310 齿轮钢表面力学性能的影响。采用有限元数值模拟方法,对激光冲击强化光斑搭接方案的残余应力空间分布特征进行分析。采用实验方法,研究激光能量和冲击次数对 9310 齿轮钢残余应力和显微硬度的影响。该研究对较高强度齿轮钢的激光冲击强化工艺设计具有借鉴意义。

1 数值模拟研究

1.1 模型和参数设置

有限元模型几何尺寸如图 1(a)所示,整体尺

寸为 15 mm×15 mm 的正方形,厚度为 4 mm。其中,中间区域设置成有限单元网格,尺寸大小为 10 mm×10 mm,为了防止应力波在界面处反射,与有限单元连接部分设为无限单元,有限单元与无限单元区域划分如图 1(b)所示。

激光光束直径由激光器和光路系统决定,本激光冲击强化实验中,激光光束直径约为 3 mm。对于圆柱形激光光束,当光束垂直照射到平面上,光

斑形状为圆形;当光束倾斜照射到平面上,光斑形状为椭圆形;当光束照射到曲面上,光斑形状为空间曲线。本工作采用 5 J 激光能量的激光光束垂直单次冲击 9310 齿轮钢试样,试样表面留下直径约为 2.2 mm 的可见圆形痕迹(即发生塑性变形的圆形区域直径)。因此,后续有限元数值模拟和激光冲击强化实验中,激光光斑的搭接率为直径 2.2 mm 的圆形痕迹的搭接率。

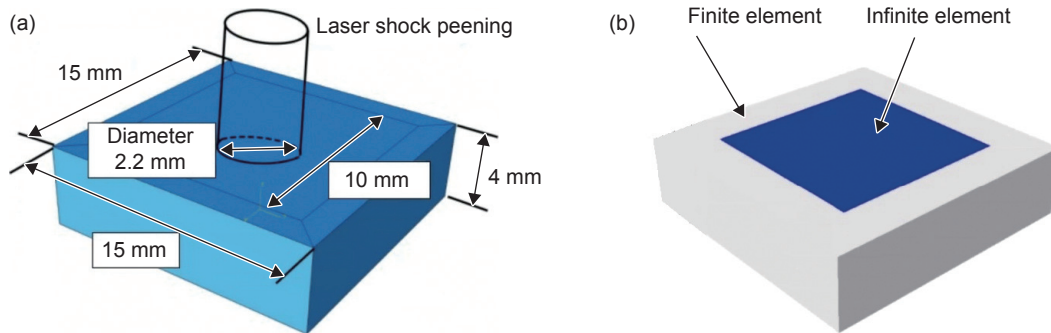


图 1 激光冲击强化有限元模型 (a)几何尺寸;(b)有限单元与无限单元的区域划分
Fig. 1 Finite element model of laser shock peening (a) geometrical dimension;
(b) domains division of finite and infinite elements

在有限元数值模拟过程中无法直接定义激光诱导的冲击波压力载荷,本工作通过 Abaqus 软件子程序接口 vload 定义冲击波压力载荷的空间分布和时间演化。将激光光束诱导的冲击波转换为施加在材料表面的圆形压力载荷,由圆心向边缘的压力载荷空间分布满足高斯分布规律,且该空间压力随着时间变化。根据 Fabbro 等研究结果,激光诱导的冲击波作用时间大约为激光脉宽的 2~3 倍,甚至更长。激光冲击强化压力也随空间变化,即激光冲击时压力是时间和空间的函数,激光冲击强化压力沿光斑径向的变化按式(1)计算^[17]:

$$P(r,t) = P(t) \exp\left(-\frac{r^2}{2R_0^2}\right) \quad (1)$$

式中: R_0 为激光束半径; r 为该空间位置到激光束中心的距离; $P(t)$ 为压力随时间的变化关系。

有限元数值模拟中压力随时间变化曲线如图 2 所示,该幅值曲线为本工作所用激光冲击强化的激光器参数,即与实验所用激光器参数一致。图 2 中幅值曲线与峰值压力 P_0 的乘积为压力随时间的变化关系 $P(t)$ 。

Johnson-Cook(JC)模型是最为常用的反映材料动态性能的本构模型,国内外关于高速冲击、爆炸冲击、弹丸侵彻等大应变率的仿真均广泛采用此模型。对于激光冲击强化这种大应力大应变率的

行为,JC 模型是适用的,JC 模型流动应力如式(2)所示:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2)$$

式中: A , B , n 和 C 为 JC 模型 4 个材料参数,其中 A 是屈服应力, B 与 n 表示加工硬化效应, C 表示应变速率效应。有限元数值模拟 9310 齿轮钢的 JC 本构模型材料参数为: $A=1102$ MPa, $B=1064$ MPa, $n=0.2$, $C=0.01$ ^[13]。

1.2 多点激光冲击强化加工路径方案

为获得均匀的材料表面力学性能,需对激光冲击强化加工路径进行规划。由于激光光束为圆柱形,且光束的能量分布为中心区域能量强、边缘部

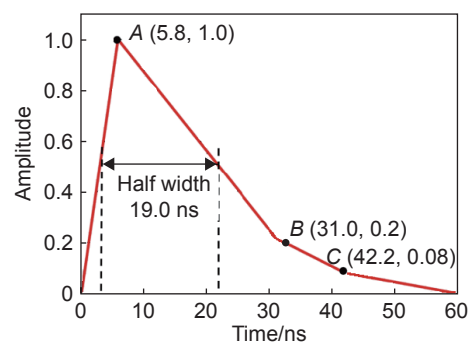


图 2 有限元数值模拟冲击波压力随时间变化曲线
Fig. 2 The curve of the peak pressure with time in the finite element simulation

分能量弱的高斯分布。为使其尽量均匀覆盖被冲击材料表面,需在多次冲击强化之间进行冲击区域的搭接。图3为本工作提出的激光冲击强化加工

路径方案。根据试样的几何特征定义直角坐标系 xyz ,其中 oxy 面与待强化表面重合, z 轴垂直于待强化表面,激光光束垂直于待强化表面。

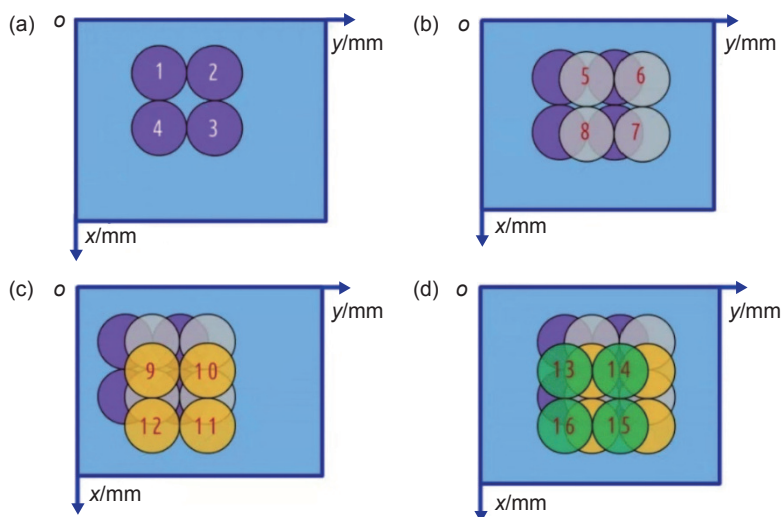


图3 多点激光冲击强化加工路径方案 (a)第1层冲击;(b)第2层冲击;(c)第3层冲击;(d)第4层冲击

Fig. 3 Overlapping scheme of multi-point laser beam peening (a) the first beam; (b) the second beam; (c) the third beam; (d) the fourth beam

对被冲击区域的强化需要进行4层冲击覆盖,第1层冲击按照图3(a)所示,其中1、2、3和4表示激光冲击强化顺序,即先对位置1进行冲击强化,之后激光光束沿着 y 轴正向移动一个光斑直径(2.2 mm)距离,再对位置2进行强化,依次进行。在第2层冲击中,其光斑的移动路径与第1层相同,唯一区别在于起始点位置相对于第1层起始点来说,光斑沿着 y 轴正向偏移光斑半径距离。类似地,第3层与第4层冲击中,光斑移动路径与上一层均相同,区别还是在于起始点偏移光斑半径距离。

2 实验研究

2.1 实验材料

本工作以9310齿轮钢为实验材料,热处理状态为正火与回火相结合,9310齿轮钢热处理后基本力学性能为:弹性模量 $E=207$ GPa,泊松比 $\nu=0.3$,密度 $\rho=7.84$ g/cm³,抗拉强度 $\sigma_b \geq 1079$ MPa。图4为9310齿轮钢热处理后的微观组织,可以看出,热处理后9310齿轮钢的组织由大量白色铁素体、少量分布铁素体之间的低碳马氏体和呈颗粒状分布在晶界和晶内的碳化物组成。

2.2 实验条件

激光冲击强化实验在西安天瑞达光电有限公

司进行,实验设备如图5所示。实验在YD60-M165设备系统上进行,该系统主要由高性能脉冲激光器、控制系统、水约束系统、吸收保护层及监控系统组成。其中激光器为Nd:YAG型高能激光器,能量呈高斯分布,冲击强化过程中激光束处于固定状态,多自由度机械臂可以控制夹持试样连续移动,按照规划路径实现整个强化过程。采用水作为吸收保护层,防止9310齿轮钢表面在强化时与高能激光直接接触。本工作采用3、4 J和5 J三种激光能量对9310齿轮钢进行实验。激光脉宽20 ns,波长1064 nm,光斑搭接率(光斑搭接距离与光斑半径比率)为50%,激光能量为5 J时,光斑直径为2.2 mm,即图3中第2层相对第1层平移

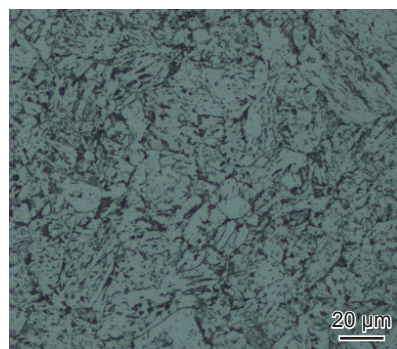


图4 9310齿轮钢热处理后的光学微观组织

Fig. 4 Optical microstructure of 9310 gear steel after the heat treatment

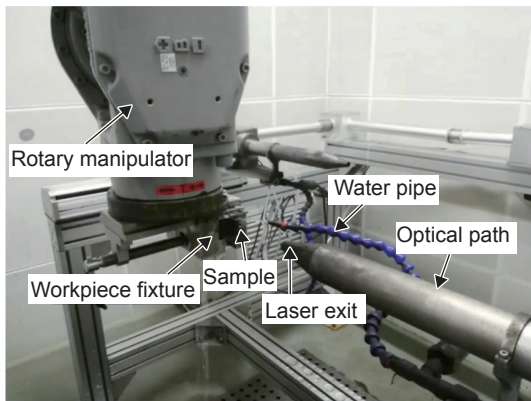


图5 激光冲击强化实验设备

Fig. 5 The equipment of laser shock peening

50% 的冲击强化痕迹直径为 2.2 mm。

按照 1.2 节的激光冲击强化加工路径方案, 1 次冲击, 共计 4 层 16 个冲击点 (图 3)。若进行 3 次冲击, 相当于对同一个区域进行 3 次 16 个点冲击, 即对被强化区域完成 48 个点冲击。

2.3 表面残余应力及显微硬度测试实验

表面残余应力实验使用 Proto LXR D 型 X 射线应力测试仪测试试样强化前后残余应力, 采用同倾固定测量方法进行残余应力测定。选用 Cr 材料作为靶头, 设定 X 管电压为 25 kV, 电流为 25 mA, 扫描步距为 0.1° , 采集时间为 1 s, 准直管直径为 2 mm。

采用 HXD-1000TMC/LCD 型显微硬度计测试 9310 齿轮钢横截面由表及里的显微硬度分布, 该硬度计将金刚石压头的压痕成像在计算机屏幕上, 实

验加载 500 g, 保载时间 15 s, 每 0.1 mm 测量 3 次, 计算平均值作为硬度值。

3 结果与分析

3.1 数值模拟结果与分析

从零件全生命周期来看, 激光冲击强化工艺的作用主要是在不影响零件使用功能的前提下, 尽可能提高零件疲劳寿命。一般认为, 表面状态变量如表面残余应力、显微硬度等这些中间变量较好, 即残余应力分布越均匀、残余压应力越大、表面硬度越高, 零件疲劳寿命越好。激光冲击强化后材料表面状态的评价可采用有限元数值模拟方法, 也可采用实验方法研究。本工作对残余应力分布均匀情况研究采用有限元数值模拟方法, 对残余压应力大小和显微硬度研究采用实验方法。有限元数值模拟的目的是评估采用的激光冲击强化加工路径方案形成的表面残余应力场空间分布是否均匀。图 6(a) 为等效塑性应变分布情况, 图 6(b) 和 (c) 为应力分量的表面和空间分布情况。可以看出, 等效塑性应变分布和应力分布存在一定程度数值波动, 但总体上相对均匀。对于空间应力分布, 实验测试涉及材料的剥离问题以及剥离过程中残余应力释放, 获得完整空间应力分布需要较大实验量。采用数值模拟方法, 可在较少时间成本下获得激光冲击强化加工路径方案的应力空间分布规律。

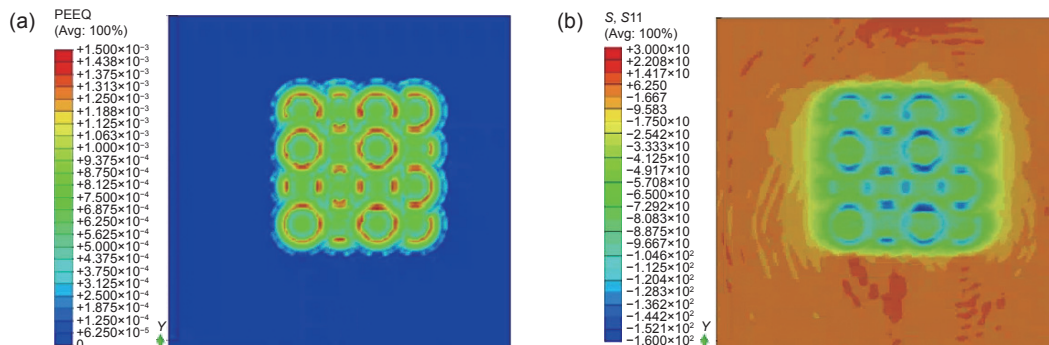


图6 多点激光冲击强化后等效塑性应变(a)和表面应力分布(b)

Fig. 6 Distributions of the equivalent plastic strain(a) and surface stress (b) after multi-point laser shock peening

3.2 实验结果与分析

不同激光能量对试样表面残余应力影响情况如图 7 所示, 其中缩写 3JT1、4JT1 和 5JT1 分别代表激光能量为 3、4 J 和 5 J, 冲击强化 1 次。从图 7 中可以看出, 基体材料表面残余压应力为 -32 MPa, 这可能来源于试样机械加工过程。激光冲击强化

后, 激光能量 3、4 J 和 5 J 对应的表面残余压应力分别为 -279 、 -318 MPa 和 -333 MPa, 随着激光能量增加, 表面残余压应力也随之增大。激光能量从 3 J 增加到 4 J, 表面残余压应力增加 13.9%; 而激光能量从 4 J 增加到 5 J, 表面残余压应力仅增加 4.7%。

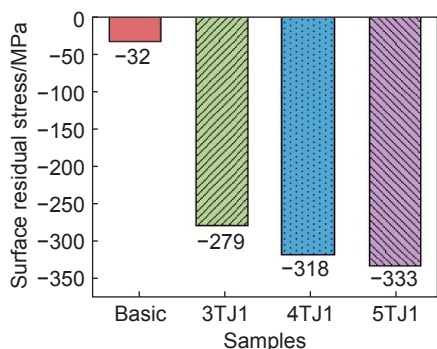


图 7 不同激光能量冲击的表面残余应力
Fig. 7 Surface residual stresses under different laser energy impacts

图 8 为不同激光能量冲击材料表面的显微硬度分布图。通过对比图 8 所示的激光冲击强化前后试样的显微硬度可以发现, 激光冲击强化后, 试样表层显微硬度最大, 经过激光冲击强化后, 试样表层显微硬度得到明显提高。9310 齿轮钢基体的显微硬度为 244.5HV, 当激光能量为 3、4 J 和 5 J 时, 试样经过激光冲击强化后显微硬度分别提高到 275.6、288.2HV 和 294.8HV, 比基体试样分别提高了 12.7%、17.9% 和 20.6%。当激光能量从 3 J 增加到 4 J 时, 表层显微硬度提高了 4.5%; 当激光能量从 4 J 增加到 5 J 时, 表层硬度则仅提高了 2.2%, 显微硬度增大和激光能量增加表现出非线性相关的特征, 这与残余压应力的情况相类似。由图 8 可以看出, 显微硬度在 200 μm 深度处出现迅速下降的情况。当激光能量为 3 J 时, 在 500 μm 深度处获得与基体相等的显微硬度。在激光能量为 4 J 和 5 J 时, 也观察到类似的变化趋势, 显微硬度影响层深度达到 600 μm。

选定激光能量为 5 J, 光斑搭接率为 50%, 光斑直径为 2.2 mm, 讨论激光冲击次数分别为 1、2 次

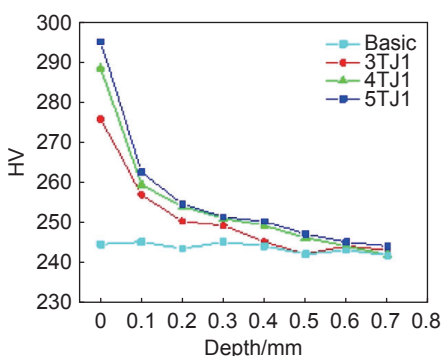


图 8 不同激光能量冲击不同深度处的显微硬度
Fig. 8 Micro-hardness at different depth of specimens under different laser energy impacts

和 3 次时对残余应力场和显微硬度的影响。图 9 显示不同激光冲击强化次数下材料表面残余应力分布的情况, 其中缩写 5TJ1、5TJ2 和 5TJ3 分别代表激光冲击次数为 1、2 次和 3 次, 激光能量为 5 J。从图 9 中可以得到, 基体材料表面残余应力为 -32 MPa, 试样经过激光冲击强化, 激光冲击次数为 1、2 次和 3 次时, 对应的表面残余压应力分别为 -333、-367 MPa 和 -386 MPa, 冲击次数从 1 次增加到 2 次时, 残余压应力提高 10.2%, 冲击次数从 2 次增加到 3 次, 残余压应力则仅提高了 5.1%。这是由于齿轮钢的弹性模量和屈服强度较大, 随着激光冲击次数增加, 材料更容易发生硬化现象, 使得材料难以发生塑性变形。因此, 残余压应力值不会随着激光冲击次数增加而一直增大, 而表现出饱和趋势。

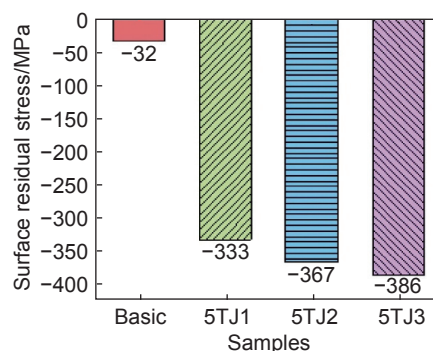


图 9 不同冲击次数的试样表面残余应力
Fig. 9 Surface residual stresses of specimens under different impact times

图 10 给出了不同次数激光冲击强化 9310 齿轮钢试样在不同深度的显微硬度值。由图 10 可以看出, 当激光冲击试样次数为 1、2 次和 3 次时, 表面显微硬度值分别为 294.8、299.1HV 和 306.1HV, 比基体试样分别提高了 20.6%、22.3% 和 25.2%。

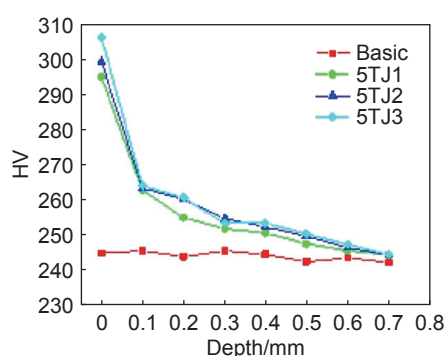


图 10 不同次数激光冲击强化试样不同深度的显微硬度
Fig. 10 Micro-hardness at different depth of specimens under different impact times

经过激光冲击的试样直到 600 μm 深度处显微硬度均高于未强化试样,这说明激光冲击强化的影响深度达 600 μm ;随着冲击次数的增加,硬度值随之增大,影响的深度也增加;当激光冲击试样 3 次时,最大硬度要高于其他冲击次数,但是增加冲击次数对影响层深度影响不明显。这是由于激光冲击强化后 9310 齿轮钢产生明显的硬化现象,冲击次数越多,产生硬化效果越明显,表现出饱和趋势。

4 结论

(1)采用有限元数值模拟方法,定义有限元模型几何尺寸与区域划分,确定激光光束能量空间分布随空间变化关系,得到有限元数值模拟中压力随时间变化曲线,最终确定激光冲击强化加工路径方案。

(2)激光能量为 3、4 J 和 5 J 冲击 1 次时,9310 齿轮钢表面残余压应力分别为 -279、-318 MPa 和 -333 MPa;激光能量为 5 J 冲击 2 次和 3 次时表面残余压应力分别为 -367 MPa 和 -386 MPa。随着激光能量和冲击次数的增加,表面残余压应力也随之增大,但增加幅度减少。

(3)9310 齿轮钢表面显微硬度为 244.5HV,激光能量为 3、4 J 和 5 J 时,激光冲击强化后表面显微硬度分别提高到 275.6、288.2HV 和 294.8HV,比基体试样分别提高 12.7%、17.9% 和 20.6%。冲击 1、2 次和 3 次表面显微硬度值分别为 294.8、299.1HV 和 306.1HV,比基体试样分别提高 20.6%、22.3% 和 25.2%,表现出与残余压应力相似的增长幅度。

参考文献:

- [1] 陶春虎,钟培道,王仁智,等.航空发动机转动部件的失效与预防[M].北京:国防工业出版社,2000.
TAO C H, ZHONG P D, WANG R Z, et al. Failure analysis and prevention for rotor in aero-engine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [2] 刘滨春.航空齿轮疲劳失效机理探究[J].中国科技信息,2011(12):108-109.
LIU B C. Research of three basic fatigue failure modes for the aero-engine transmission gear[J]. China Science and Technology Information, 2011(12): 108-109.
- [3] 陈勇,臧立彬,巨东英,等.高强度汽车齿轮表面强化技术的研究现状和发展趋势[J].中国表面工程,2017,30(1):1-15.
CHEN Y, ZANG L B, JU D Y, et al. Research status and development trend on strengthening technology of high strength automobile gear surface[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 1-15.
- [4] LIU X D, SHANG D G, ZHANG L H, et al. Residual life prediction for healing fatigue damaged copper film by laser shock peening[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014, 37(4): 427-435.
- [5] PAVAN M, FURFARI D, AHMAD B, et al. Fatigue crack growth in a laser shock peened residual stress field[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 123: 157-167.
- [6] 李媛,何卫锋,周舟,等.变参数激光冲击 TC17 钛合金疲劳裂纹扩展特性[J].激光与红外,2017,47(10):1228-1233.
LI Y, HE W F, ZHOU D, et al. Fatigue crack propagation property of TC17 titanium alloy by laser shock peening[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(10): 1228-1233.
- [7] 李翔,何卫锋,聂祥樊,等.新型光斑搭接对平顶激光冲击钛合金力学性能的影响[J].中国表面工程,2019,32(1):38-47.
LI X, HE W F, NIE X F, et al. Effects of novel overlapping on mechanical properties of flat-topped laser shock peening titanium alloy[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(1): 38-47.
- [8] HU Y, YAO Z. Overlapping rate effect on laser shock processing of 1045 steel by small spots with Nd: YAG pulsed laser[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(8): 1517-1525.
- [9] 槐艳艳,赵吉宾,乔红超,等.薄壁钛合金 Ti17 激光冲击强化表面完整性研究[J].组合机床与自动化加工技术,2017(12):73-77.
HUAI Y Y, ZHAO J B, QIAO H C, et al. Investigation of laser shock peening on the surface integrity of Ti17 thin-walled titanium alloy[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2017(12): 73-77.
- [10] ZHOU W, REN X, YANG Y, et al. Finite element analysis of laser shock peening induced near-surface deformation in engineering metals[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 119: 105608.
- [11] KIM J H, KIM Y J, KIM J S. Effects of simulation parameters on residual stresses for laser shock peening finite element analysis[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(7): 2025-2034.
- [12] SALIMIANRIZI A, FOROOZMEHR E, BADOS-SAMAY M, et al. Effect of laser shock peening on surface properties and residual stress of Al6061-T6[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 77: 112-117.
- [13] PENG C, XIAO Y, WANG Y, et al. Effect of laser shock peening on bending fatigue performance of AISI 9310

- steel spur gear[J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 94: 15-24.
- [14] TRDAN U, SKARBA M, PORRO J A, et al. Application of massive laser shock processing for improvement of mechanical and tribological properties[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 342: 1-11.
- [15] ARPITH S, BO M, LIAO Y, et al. Surface characterization and tribological performance of laser shock peened steel surfaces[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 351: 188-197.
- [16] DAI F, ZHOU J, LU J, et al. A technique to decrease surface roughness in overlapping laser shock peening[J]. *Applied Surface Science* 2016, 370: 501-507.
- [17] KIM J S, NAM H S, KIM Y J, et al. Numerical study of laser shock peening effects on alloy 600 nozzles with initial residual stresses[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2017, 139(4): 041406.

收稿日期: 2023-12-01; 录用日期: 2024-02-04

基金项目: 两机重大专项

通讯作者: 薛成(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为航空发动机附件传动设计, 联系地址: 湖南省株洲市芦淞区太子路608所新区(412000), E-mail: 625599858@qq.com

(本文责编: 陈 卉)