

引文格式: 朱凝恺, 李志, 陈思源, 等. 基于柔性导光臂系统的激光喷丸光斑几何敏感性研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(18): 25020373.

ZHU Ningkai, LI Zhi, CHEN Siyuan, et al. Study on geometric sensitivity of laser peening spots based on flexible light guide arm system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(18): 25020373.

基于柔性导光臂系统的激光喷丸光斑几何敏感性研究

朱凝恺^{1,2}, 李志^{1,2}, 陈思源¹, 江剑成¹, 林圳伟^{1,2}, 胡永祥¹

(1. 上海交通大学, 上海 200240;

2. 上海智能制造功能平台有限公司, 上海 201306)

[摘要] 基于柔性导光臂的激光喷丸系统因其对复杂结构的适应性而具有广阔发展前景, 然而现有柔性导光臂存在光斑畸变的问题, 导致强化后表面一致性下降。为明确光斑畸变对表面完整性的影响, 开展分区域单点喷丸与阵列扫描试验。结果表明, 光斑畸变主要来源于导光臂的镜片装配误差。光斑直径均值约为 1.48 mm, 区域间变化小于 0.05 mm。不同区域光斑椭圆度在 1.0~1.1 范围内波动。同一区域内单点喷丸凹坑深度与半高宽标准差分别为 0.15 μm 与 0.08 mm; 不同区域间凹坑深度 t 检验结果的 p 值远大于 0.05, 薄板试样的弧弓高集中于 0.28~0.32 mm, 表明柔性导光臂激光喷丸系统在当前的光斑畸变水平下, 可以保证加工的稳定性与一致性。试验结果为提升复杂构件在位强化场景中的激光喷丸加工一致性提供了解决方案。

关键词: 激光喷丸; 柔性导光臂; 光斑畸变; 表面完整性; 加工一致性

中图分类号: V26; TG668

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020373

Study on Geometric Sensitivity of Laser Peening Spots Based on Flexible Light Guide Arm System

ZHU Ningkai^{1,2}, LI Zhi^{1,2}, CHEN Siyuan¹, JIANG Jiancheng¹, LIN Zhenwei^{1,2}, HU Yongxiang¹

(1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Platform for Smart Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

[ABSTRACT] Laser peening systems based on flexible light guide arms hold great potential for development due to their adaptability to complex structures. However, existing flexible light guide arms suffer from spot distortion, leading to reduced surface uniformity after laser peening. To clarify the impact of spot distortion on surface integrity, single-point impact and array scanning experiments were conducted in distinct regions. The results indicate that spot distortion originates primarily from assembly errors in the light guide arm lenses. The average spot diameter is approximately 1.48 mm, with inter-area variation less than 0.05 mm. The ellipticity of the light spot fluctuates between 1 and 1.1 across different regions. Within the same region, the standard deviation of single-point impact pit depth and half-height width are 0.15 μm and 0.08 mm, respectively. The p -value from the t -test comparing pit depths across different regions is significantly greater than 0.05. The arc height of the thin plate specimens is between 0.28 mm and 0.32 mm, indicating that the laser peening system based on the flexible light guide arm can ensure processing stability and consistency at the current level of spot distortion. These findings provide a solution for enhancing the consistency of laser peening processing in in-situ laser peening scenarios for complex components.

Keywords: Laser peening; Flexible light guide arm; Spot distortion; Surface integrity; Processing consistency

收稿日期: 2025-11-19; 退修日期: 2026-01-30; 录用日期: 2026-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(U2570243); 国家科技重大专项(2025ZD1605400)

通信作者: 胡永祥, 教授, 博士, 研究方向为激光加工、激光喷丸/激光冲击强化、航空自动制孔工艺与装备。

在航空航天、轨道交通等高端装备领域,关键承载构件长期处于交变载荷、复杂介质耦合作用下,其表面性能直接决定装备的服役安全性与寿命。激光喷丸技术作为一种先进的无接触式材料表面强化手段,通过高能量密度激光脉冲作用于材料表面,诱导产生峰值可达数 GPa 的高强度冲击波^[1-2]。通过材料表层发生的塑性变形及引入的稳定残余压应力场,显著提升材料的硬度及疲劳寿命^[3-4]。凭借高能量密度、可控性强、无热影响区等优势,激光喷丸已成为解决关键构件表面强化难题的核心技术之一^[5]。

当前激光喷丸装备主要由激光器、光路传输系统、工作台及控制系统等部分组成,其光路设计直接影响加工精度与表面完整性。美国金属改进公司(MIC, Metal Improvement Company)在2011年提出了一种动态光路式的激光喷丸系统^[6],其激光指向精度受机器人轴关节尤其是腕关节精度的影响,当未进行适当的迭代标定过程以抵消影响时,常常导致激光光斑形状及位置偏差,影响最终强化效果;美国LSPT公司于2014年研制了一套固定光路式的激光喷丸装备^[7],加工时激光光路固定,机器人夹持待加工工件移动,从而完成加工过程。这种方式的加工坐标系须事先通过标定定位在机器人法兰中心,实际加工时的精度受到零件安装误差的影响,可能同时引入法向偏差与距离偏差。胡永祥^[8]和余雄超^[9]等提出了一种基于振镜的扫描光路式激光喷丸系统,由于激光从同一位置指向大幅面范围内的不同位置,不同位置处的激光入射角度与光程均发生变化,因此导致激光光斑形状尺寸与规划目标不一致。采用由一对凹柱面透镜组成的光斑调节模块对激光进行调整,最终实现激光光斑水平尺寸误差保持在7%以内,竖直尺寸误差在5%以内,面积误差在10%以内,但仍无法完全消除光路变化对光斑参数的影响。可见,当前激光喷丸装备的光路设计方案不可避免地会引入光斑形状及位置偏差,光斑几何参数变化成为亟待解决的关键问题。

近期,研究者为提高装备灵活性提出了柔性化方案,如Sano团队开发了将手指大小的激光头固定在六轴机器人上的微型激光喷丸系统,全系统仅20 kg,可在现场便携部署^[10]。导光臂技术近些年被引入激光喷丸领域,柔性导光臂可以将激光从固定激光源传输至移动的聚焦头,使激光束能够在空间任意位置和角度聚焦于工件表面^[11]。在另外一种实现方案中,激光通过柔性导光臂从激光器传输到光学聚焦单元,聚焦头上的透镜及滤网等部件由六自由度机器人夹持,实现了光束的可移动聚焦^[12]。冯爱新等^[13]提出,柔性导光臂装置包含多个可旋转关节,能够在空间任意位置点和角度调节光路,

实现高功率冲击波在复杂结构上的传递。这些研究表明,柔性导光臂系统可在大型工件固定的情况下实现激光喷丸,大幅提高加工效率并扩展激光喷丸的适用范围,具备应用于大型构件在位强化场景的潜力。

尽管柔性导光臂系统为激光喷丸提供了更大的空间灵活性,但其复杂的光路传输可能对控制光斑的几何尺寸和位置精度提出挑战。在激光喷丸处理中,光斑形状、尺寸和位置对强化效果具有关键影响^[14]。合理的光斑形状与尺寸及合适的搭接率可以获得均匀的压应力分布^[15]。如果光斑几何参数发生偏差,可能导致覆盖率不足或应力分布不均,从而影响喷丸强化的一致性。因此,有必要研究柔性导光臂系统中光斑几何误差对强化效果的敏感性。

针对柔性导光臂激光喷丸加工,对光斑直径、形状及中心偏移等几何误差进行分析,通过试验评估不同区域加工结果的一致性与稳定性,以探讨光斑几何误差对激光喷丸效果的影响机理。

1 试验及方法

1.1 柔性导光臂激光喷丸系统

图1为柔性导光臂激光喷丸系统的组成示意图。该系统主要由高功率脉冲激光器、聚焦单元、柔性导光臂、六轴机器人及供水装置等部分构成。Nd:YAG激光器发出高能ns脉冲激光,经反射镜反射进入柔性导光臂。导光臂由6个关节臂组成,每个关节内安装反射镜以实现光路转向。聚焦激光头安装在六自由度机器人末端,通过计算机控制机器人可以将激光头定位到工件任意区域,透镜在聚焦点形成所需直径的圆形光斑。机器人重复定位精度为0.02 mm,而且可以编程控制其运动过程,满足复杂轨迹的扫描需求。系统配备的水供给装置在喷丸区域提供约束层,约束等离子体膨胀以提升

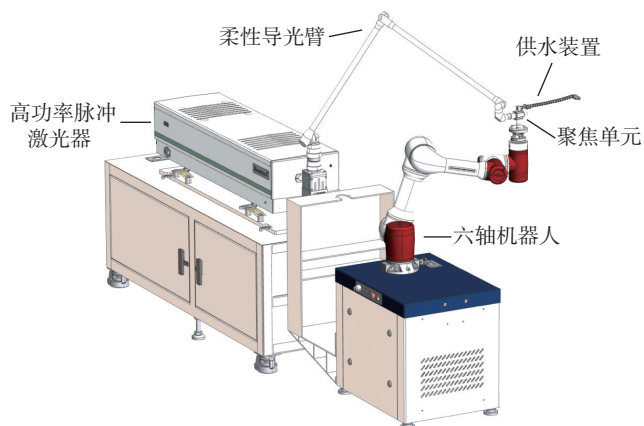


图1 柔性导光臂激光喷丸系统

Fig.1 Laser peening system based on flexible light guide arm

冲击压力。

系统的主要设备参数包括激光脉冲能量、脉宽、重复频率、光斑可调范围,导光臂的有效长度与运动范围,机器人的定位精度与运动精度等。以本系统为例,激光器激光脉冲能量区间为100~800 mJ,脉冲宽度为9 ns,重复频率为20 Hz,光斑直径区间为0.2~4.0 mm;导光臂单臂长度为0.7 m,双臂串联可实现1 m工作距离内的单次加工范围不小于500×500 mm²;六轴机器人定位精度为0.001 mm,重复定位精度为0.02 mm,可实现复杂三维扫描。综合上述设计可知,系统可以在工件固定的情况下,高效完成大面积或复杂结构的激光喷丸处理。

导光臂激光喷丸系统的光斑几何误差来源可能有:(1)机器人夹持的激光头末端姿态与加工靶面不完全垂直,激光斜向入射导致在加工靶面形成的光斑产生椭圆畸变。为验证激光光束与加工靶面的垂直度偏差水平,将激光光束聚焦于靶面上某一标志点,沿着当前工具坐标系的Z轴(即光束矢量方向)前后移动1 m,测量得到光斑中心与标志点的偏移量不超过1 mm,因此激光光束与加工靶面的垂直度偏差可由公式 $\arctan(1/1\ 000)=0.057^\circ$ 计算得到,可以认为当前姿态下激光光束已垂直于加工靶面,光束与靶面间的垂直度偏差并非光斑几何误差的显著影响因素。(2)导光臂内部镜片的安装误差及机器人姿态变化。柔性导光臂由多个关节臂和连接机构组成,各关节间的微小安装误差会累积,导致光路偏移,反射镜的安装精度也会影响光斑形状,同时加工过程中机器人的姿态变化会导致关节角度改变,各反射镜的误差累积造成激光光束传输方向偏移及激光光程变化,最终引入一定的光斑指向精度和几何尺寸的偏差。

为考察导光臂关节角度变化对激光光斑的影响,保持机器人夹持激光头位置不变,调整导光臂末端关节以90°为间隔旋转一周并单次出光,观察光斑位置和尺寸的变化情况,4个光斑中心的偏移量分别为2.0 mm、1.8 mm、3.0 mm、2.5 mm,椭圆度分别为1.02、1.08、1.05、1.04,如图2所示。可见,导光臂关节姿态变化显著改变了光束在内部的传输过程,造成光斑位置和尺寸变化,导光臂内部镜片安装误差及关节角度变化是光斑几何误差的主要影响因素。

1.2 导光臂二维误差模型

在激光器出光端至导光臂入口之间的直线光路段,沿设计光轴依次设置两个孔径约为1 mm的小孔光阑。两个光阑通过固定式精密光学支架安装,其轴线与系统设计光轴一致,并在结构上保证导光臂入口的几何中心与第2个小孔光阑的轴线同轴。两个光阑在系统

运行过程中保持固定,不参与任何运动,仅用于建立和约束系统的基准光轴。双小孔光阑用于实现激光光束的同轴度约束,其工作原理为:设第1个小孔光阑中心为 P_1 ,第2个小孔光阑中心为 P_2 ,则所有能够同时通过 P_1 与 P_2 的光线,必然共线于一条唯一确定的空间直线。该直线即为由双小孔光阑几何约束所确定的系统基准光轴,同时定义了激光光束在进入导光臂前的实际指向方向。任何相对于该基准光轴存在横向偏移或角度偏差的光束分量,均会在第2个小孔光阑处被部分或完全截断,从而显著削弱其通过能力。

在系统设计与装调过程中,通过高精度装夹与定位手段,将导光臂入口的机械中心与第2个小孔光阑的几何中心进行严格对准。当激光能够稳定、连续地通过两个小孔光阑时,可认为激光实际传播轴线已与双小孔光阑所定义的基准光轴重合。在此基础上,由于导光臂入口中心与第2个小孔光阑中心已实现精确对准,因此可进一步保证激光轴线、小孔光阑轴线及导光臂入口轴线三者一致,从而满足导光臂入射光路的同轴度要求,其原理如图3所示。

所用导光臂的尺寸参数如图4所示,其中各反射镜之间的长度均已标注。为分析导光臂在折线光路平面内的误差来源与传递规律,本研究在二维几何光学框架下建立反射镜装配误差的一阶线性模型。由上述分析可知,导光臂入口处激光光束中心与入口机械中心同轴,即入口不引入位置偏差与角度偏差,因此误差仅来源于后续各级反射镜的装配误差,包括镜面姿态误差与镜面位置偏差。

为便于后续分析,对模型作以下假设与状态量定义^[16]。

(1)在折线光路所在平面内进行二维近轴分析,光束用中心光线表示;所有误差为小量,满足 $|\delta\theta| \ll 0.1$,

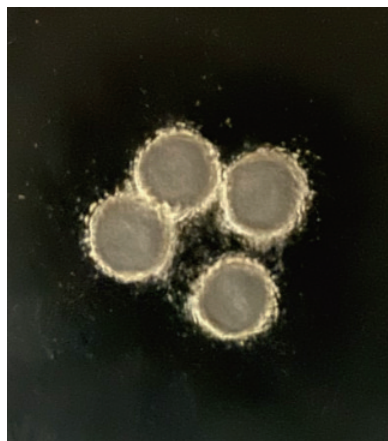


图2 导光臂不同关节位置的光斑畸变
Fig.2 Distortion of light spot at different joint positions of light guide arm

保留一阶项。

(2) 导光臂由 N 片平面反射镜串联构成, 相邻镜面之间为直线传播段; 第 i 段名义等效光程长度记为 L_i 。

(3) 入口同轴条件: 入口误差为 0, $\delta y_0 = 0, \delta \theta_0 = 0$ 。

(4) 第 i 片镜面的装配误差在二维平面内等效为两类: 镜面倾角误差 $\delta \alpha_i$, 即镜面绕出平面轴的微小转角; 镜面横向位置偏置 $\delta y_{m,i}$, 即镜面反射点相对名义位置的等效横向偏移。

为描述误差传播, 在每段光路建立局部坐标系 Σ_i : (x_i, y_i) , 其中, x_i 沿名义传播方向, y_i 为横向传播。定义光线在第 i 段的误差状态为

$$\mathbf{s}_i = \begin{bmatrix} \delta y_i \\ \delta \theta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, δy_i 为横向位置偏差; $\delta \theta_i$ 为相对名义传播方向的角度偏差。

光线在第 i 段传播 L_i 到达第 i 面镜前(上标“-”)时, 在小角度近似的条件下满足

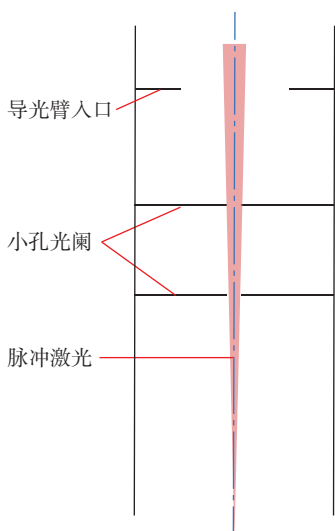


图3 小孔光阑同轴度保证原理

Fig.3 Principle for ensuring coaxiality of small aperture stop

$$\delta y_i^- = \delta y_{i-1}^+ + L_i \delta \theta_{i-1}^+ \quad (2)$$

$$\delta \theta_i^- = \delta \theta_{i-1}^+$$

矩阵形式为

$$\mathbf{s}_i^- = \mathbf{P}(L_i) \mathbf{s}_{i-1}^+, \mathbf{P}(L_i) = \begin{bmatrix} 1 & L_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{P}(L_i)$ 为传播矩阵, 描述光束在两片反射镜之间传播的误差变化情况。

式(3)表明, 传播段不会改变角度偏差, 但会将角度偏差按距离 L_i 线性累积为位置漂移。

在二维近轴条件下, 平面镜反射使相对名义轴的角度偏差发生符号翻转, 表示为

$$\delta \theta_i^+ = -\delta \theta_i^- \quad (4)$$

当镜面存在微小倾角误差 $\delta \alpha_i$ 时, 由反射几何关系可知, 反射光线的方向偏转为镜面转角的 2 倍, 因此得到

$$\delta \theta_i^+ = -\delta \theta_i^- + 2\delta \alpha_i \quad (5)$$

镜面安装偏心等因素会导致反射点横向偏移, 二维等效为横向位置偏置 $\delta y_{m,i}$, 即

$$\delta y_i^+ = \delta y_i^- + \delta y_{m,i} \quad (6)$$

综上, 第 i 片镜面的反射过程可统一表示为

$$\mathbf{s}_i^+ = \mathbf{R} \mathbf{s}_i^- + \mathbf{w}_i, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{w}_i = \begin{bmatrix} \delta y_{m,i} \\ 2\delta \alpha_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $\mathbf{R}$ 为反射矩阵, 描述理想平面镜反射造成的角度变化; $\mathbf{w}_i$ 为第 i 级反射镜误差项。

将传播与反射组合, 则第 i 级(第 i 段传播+第 i 片镜面反射)满足以下条件。

$$\mathbf{s}_i^+ = \mathbf{R} \mathbf{P}(L_i) \mathbf{s}_{i-1}^+ + \mathbf{w}_i = \mathbf{M}_i \mathbf{s}_{i-1}^+ + \mathbf{w}_i$$

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{R} \mathbf{P}(L_i) = \begin{bmatrix} 1 & L_i \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{M}_i$ 为单级光路传递矩阵, 表示光束经过第 i 段传播距离 L_i , 再经过第 i 个反射镜后的整体误差传递关系。

递推展开至末端第 N 片镜面后, 可得末端误差状态为

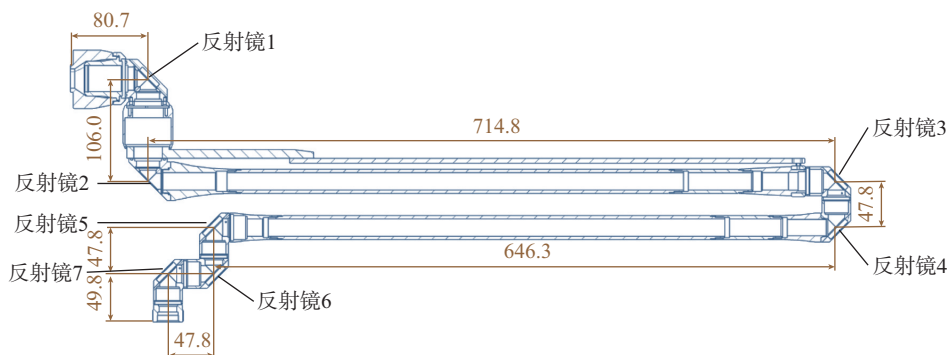


图4 导光臂尺寸参数(mm)

Fig.4 Dimensional parameters of light guide arm(mm)

$$\mathbf{s}_N^+ = \left(\prod_{i=1}^N \mathbf{M}_i \right) \mathbf{s}_0 + \sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=k+1}^N \mathbf{M}_i \right) \mathbf{w}_k \quad (9)$$

本研究中,入口同轴条件下 $\mathbf{s}_0=0$,因此末端误差仅由各镜面装配误差贡献,即

$$\mathbf{s}_N^+ = \sum_{k=1}^N \left(\prod_{i=k+1}^N \mathbf{M}_i \right) \begin{bmatrix} \delta y_{m,k} \\ 2\delta\alpha_k \end{bmatrix} \quad (10)$$

由此得到末端横向位置偏差 δy_{out} 与末端指向误差 $\delta\theta_{\text{out}}$ 的线性叠加关系为

$$\begin{aligned} \delta y_{\text{out}} &= \sum_{k=1}^N (a_k \delta y_{m,k} + b_k \delta\alpha_k) \\ \delta\theta_{\text{out}} &= \sum_{k=1}^N (c_k \delta y_{m,k} + d_k \delta\alpha_k) \end{aligned} \quad (11)$$

式中,系数 a_k 、 b_k 、 c_k 、 d_k 为第 k 级反射镜误差对末端光束状态的传递系数,其大小由各段名义等效光程长度集合 $\{L_i\}$ 决定,可由式(10)中的矩阵乘积直接计算得到。由图4可知,所用导光臂包含两段长度显著的直线光路,其等效光程可近似取为

$$L_{(\text{main},1)} \approx 714.8 \text{ mm}, L_{(\text{main},2)} \approx 646.3 \text{ mm} \quad (12)$$

其余连接段对应的光程相对较短,可按实际镜面中心到中心的距离计入 $\{L_i\}$ 。在该结构下,位于前级的镜面倾角误差 $\delta\alpha_k$ 将通过后续长光程段放大为末端位置漂移,表现为 δy_{out} 对前级 $\delta\alpha_k$ 更敏感。

在入口同轴条件下,末端出光误差完全由反射镜装配误差引起。二维模型表明:(1)镜面倾角误差以 $2\delta\alpha$ 形式直接引入指向偏差,并在后续传播中转化为随光程放大的位置漂移;(2)镜面位置偏置以横向偏置项直接叠加到光束位置误差项中;(3)由于导光臂存在两段长直线光程段(约714.8 mm与646.3 mm),前级镜面误差的下游放大效应显著,是末端光斑中心漂移的主要来源。

1.3 激光喷丸试验

导光臂系统的加工光斑会因内部光路变化而产生形状与尺寸上的畸变,即对于不同的空间位置,光斑几何参数并非完全一致。为研究不同空间位置处,光斑几

何参数改变对加工稳定性与表面完整性的影响,分别进行了用以确定不同空间位置光斑具体几何参数的无搭接阵列扫描试验,用以验证同一区域加工稳定性的单点喷丸试验,以及用以进一步验证不同区域间加工一致性的薄板变形试验。

1.3.1 试样制备

2024-T351 铝合金因高强度与优异的抗疲劳性能,被广泛应用于飞机关键结构件(如机翼蒙皮、机身框架及肋骨等)^[17]。本研究选用2024-T351航空铝合金板材作为试验材料,初始板材采用线切割工艺加工制成正方形试样,凹坑标定试样尺寸为100 mm×100 mm×6 mm,薄板变形试样尺寸为30 mm×30 mm×1 mm,如图5所示。2024-T351铝合金试样经加工后进行了退火处理,退火温度为190 °C,保温4 h后随炉冷却,以消除试样中的残余应力并确保试验材料性能的稳定性和一致性。为防止试样表层刮痕影响试验结果,在激光喷丸试验前,逐步采用400目、800目、1200目粒度的SiC砂纸充分打磨试样表面,之后采用0.03 μm氧化铝悬浊液进行精细抛光,完成后使用无水乙醇清洗并烘干,处理后试样表面粗糙度约为0.3 μm。

1.3.2 加工与测量

开展激光喷丸试验时,在试样表面覆盖一层厚度约0.2 mm的黑色胶带作为吸收层,同时覆盖厚度约1 mm的水膜作为约束层。开始加工前调整激光加工头末端位姿,沿光束方向(TCP的Z方向)移动激光加工头,前后移动1 m的情况下,光斑中心偏移不超过1 mm,此时即可认为激光光束已垂直于入射板面。实际加工时激光加工头在垂直光束方向的平面(TCP的XY平面)内移动,以保证激光加工头与板面间的距离恒定。使用光学三维形貌仪(Alicona InfiniteFocus G5plus, Bruker Alicona,奥地利)测量加工后试样的几何尺寸,其测量精度为:横向形貌分辨率0.64 μm,垂直测量分辨率20 nm,测量速度可达170万点/s,能够保证检测精度与测试效率。

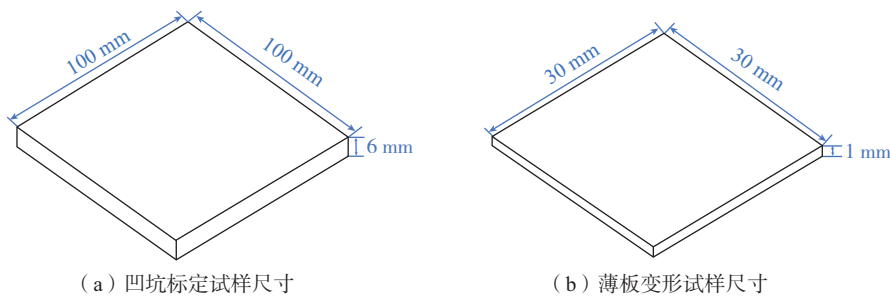


图5 2024-T351 铝合金试样尺寸示意图

Fig.5 Schematic of dimensions of 2024-T351 aluminum alloy specimen

(1) 阵列扫描试验。

在 500 mm×500 mm 加工范围内划分 9 个等间隔区域,在每个区域中心扫描 30 mm×30 mm 的阵列并统计该区域内光斑几何参数与相对偏移量,具体划分及扫描范围如图 6 所示。工艺参数设置为:激光能量 800 mJ,光斑直径 1.5 mm,搭接率 0,重复频率 20 Hz。统计同一区域内所有光斑痕迹的直径与长短轴,以确定光斑几何参数变化,并提取各光斑中心坐标与左上角光斑中心的 XY 方向距离,以统计相对偏移量。

(2) 单点喷丸试验。

在图 6 所示的每个划分区域粘贴凹坑标定试样进行单点喷丸试验,以评估导光臂系统在不同区域内加工的一致性和稳定性。激光器在试样表面依次发射脉冲 50 次,每次一个喷丸点,喷丸位置均匀分布在试样表面,如图 7 所示。工艺参数设置为:激光能量 800 mJ,光斑直径 1.5 mm,搭接率 0。测量加工后试样中每个凹坑的凹坑深度和半高宽,以评估同一区域内及不同区域间加工结果的一致性。

(3) 薄板变形试验。

为了进一步考察光斑几何误差对宏观变形的影响,进行了薄板弯曲变形试验。将 2024-T351 铝合金薄板试样粘贴于图 6 所示的各区域中心,对每个区域的薄板试样分别进行全覆盖激光喷丸处理,扫描路径如图 8 所示。工艺参数设置为:激光能量 800 mJ,光斑直径 1.5 mm,搭接率 20%,重复频率 20 Hz。随后测量各区域薄板试样在激光喷丸后产生的弧弓高(板面最大法向位移),以柱状图形式表示,用于评估区域间加工效果的差异。

2 结果与讨论

2.1 光斑几何参数与偏移量分析

为确定光斑形状尺寸误差对最终强化效果的影响,首先须确定导光臂激光喷丸系统在加工范围内,不同位置处加工光斑的几何尺寸变化情况。为便于提取光斑的几何特征,在划分的 9 个区域中心扫描 30 mm×30 mm 的区域,扫描过程搭接率设置为 0,以避免光斑互相重叠,统计阵列内的光斑直径与椭圆度参数,分析不同区域光斑几何尺寸变化情况,不同区域的光斑几何尺寸统计结果如图 9 所示。各区域测得的光斑直径均值约为 1.48 mm,标准差不超过 0.09 mm,表明系统在同一区域内聚焦稳定。不同区域的平均直径变化小于 0.05 mm,说明在不同空间位置处,光斑尺寸参数相对稳定。不同区域光斑的椭圆度分布在 1.0~1.1 之间,说明空间位置改变对光斑形状参数具有更显著的影响。

提取 30 mm×30 mm 区域内各光斑中心位置,并与

各光斑理论位置坐标作差,以统计其相对偏移量,结果如图 10 所示。从统计结果看,偏移量的平均值为 0.06 mm,标准差为 0.02 mm,最大值为 0.10 mm,所有数据点

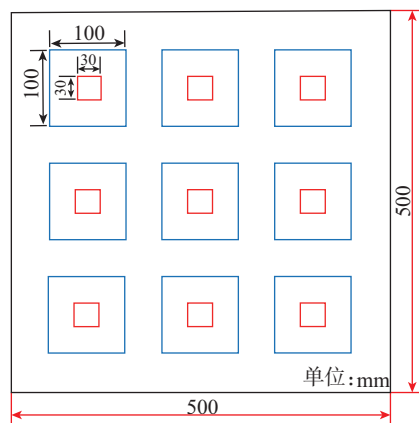


图6 区域划分(蓝)及光斑几何误差扫描范围(红)示意图

Fig.6 Schematic of area division (blue) and scanning range of spot geometry error (red)

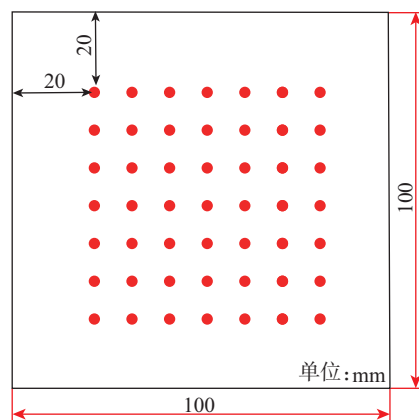


图7 单点喷丸位置示意图

Fig.7 Schematic of single point laser peening position

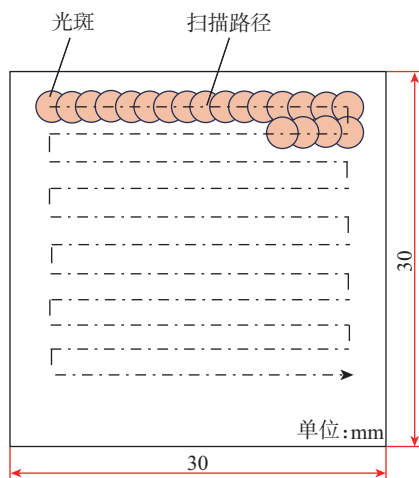


图8 薄板变形试样扫描路径示意图

Fig.8 Schematic of scanning path for thin plate deformation specimen

均落在 3σ 范围内,未出现明显离群点。从偏移量在平面内的分布情况来看,其整体呈离散分布特征,未观察到沿特定方向的系统性偏置或整体漂移趋势,表明系统在该区域内的指向误差不存在显著的方向相关性。进一步将光斑中心偏移量与对应光斑直径进行对比分析,结果显示偏移量与光斑直径的最大比值不超过7%,平均比值约为4%,说明系统的指向精度已经达到较好水平。

结合前文建立的二维几何误差传递模型可以看出,导光臂末端光斑中心偏移主要来源于各级反射镜装配倾角误差在长光程传播过程中的累积放大,其本质为光束主光线指向发生偏移;而光斑椭圆度反映的是光束横截面能量分布的非对称性,对镜面像散、表面形貌误差及光路口径截光等因素更敏感。从试验结果可以看出,尽管不同区域内存在一定程度的光斑中心偏移,但对应区域的光斑椭圆度始终保持在较低水平

(均不超过1.1),未出现明显的形状畸变或强烈的非对称分布。这表明在当前导光臂结构与装配精度条件下,光束在各级反射镜及臂体内部仍具有充足的口径裕量,未发生显著截光或强像散效应。因此,光斑中心偏移并未进一步诱发光斑形状的明显退化。进一步而言,上述结果说明在本系统中,光斑中心偏移量与光斑椭圆度之间不存在显著的正相关关系,即偏移量最大的区域并不必然对应最高的椭圆度。

2.2 单点喷丸凹坑分析

三维形貌仪测得各单点喷丸产生的凹坑形貌均为近似抛物线型。图11展示了典型的凹坑轮廓,其深度约为 $8.00\text{ }\mu\text{m}$,直径约为 1.50 mm ,半高宽约为 1.20 mm 。对比不同区域单点喷丸的凹坑形貌可知,其差异不大。

在本研究中,采用单点喷丸凹坑几何参数的标准差对同一区域内多次单点喷丸结果的加工稳定性进行评估。一般认为,在激光喷丸加工中,当凹坑几何参数的标准差小于其平均值的10%时,可判定系统具有较好的加工稳定性。基于上述判据,分别计算同一区域内50次单点喷丸凹坑深度与半高宽的均值与标准差,统计结果如图12所示。结果表明,各区域凹坑深度的平均值集中在 $7.99\sim 8.01\text{ }\mu\text{m}$ 之间,标准差不超过 $0.15\text{ }\mu\text{m}$;凹坑半高宽的平均值分布在 $1.18\sim 1.23\text{ mm}$ 范围内,标准差约为 0.08 mm 。由此计算得到凹坑深度与半高宽的相对离散度分别约为1.9%与6.7%,均明显小于10%这一稳定性判据阈值。上述结果表明,在同一区域内进行多次单点喷丸的加工过程中,凹坑形貌尺寸波动较小,重复性良好,证实导光臂式激光喷丸系统在该区域具有较好的加工稳定性,能够稳定地控制单点喷丸效果。

在评估不同区域间单点喷丸加工后的结果是否存在显著差异时,由于样本数量有限,且整体数据可能不

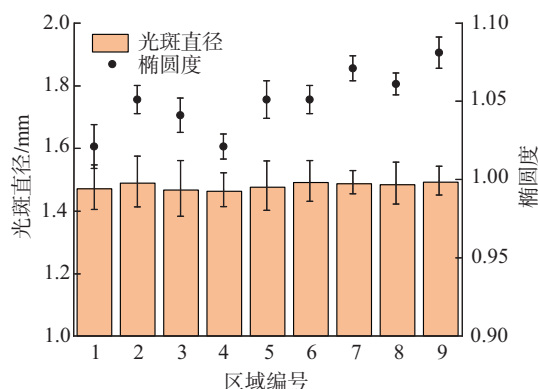
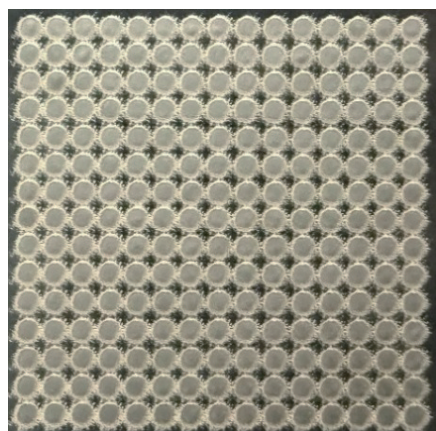
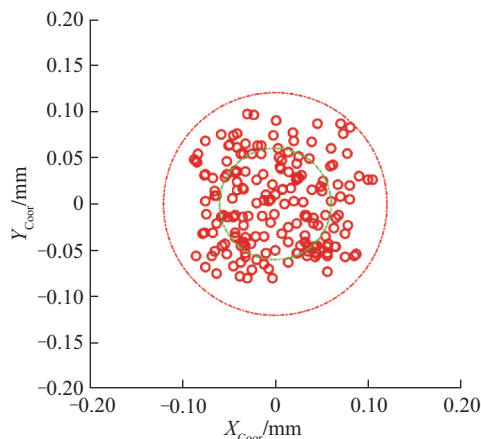


图9 不同区域中光斑直径和椭圆度统计结果

Fig.9 Statistical results of spot diameter and ellipticity in different regions



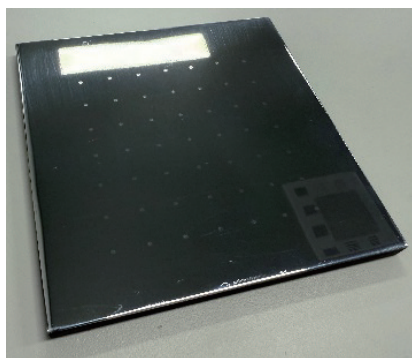
(a) 阵列扫描试验结果



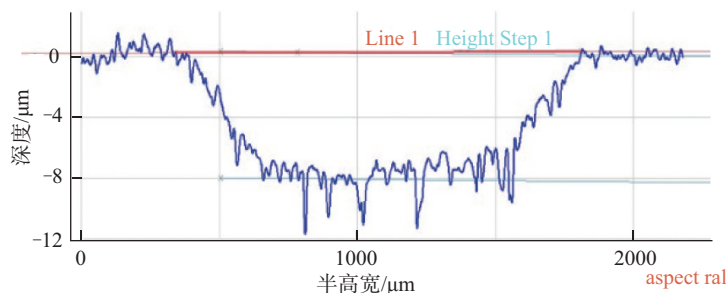
(b) 相对偏移量统计结果

图10 光斑中心偏移量统计结果

Fig.10 Statistical results of center offset of light spot



(a) 单点喷丸后的凹坑标定试样



(b) 典型凹坑测量结果

图11 单点喷丸后的凹坑形貌

Fig.11 Pit morphology after single point laser peening

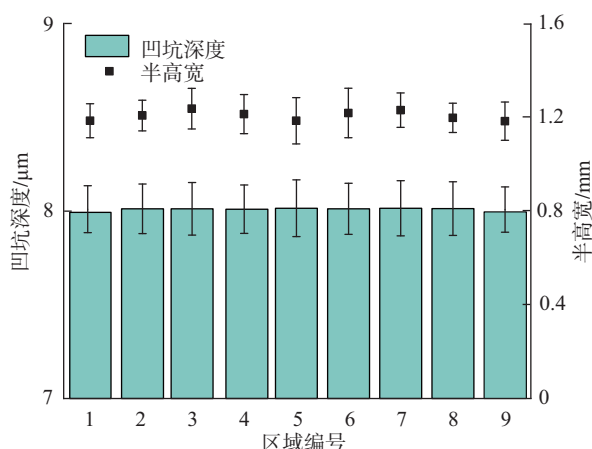


图12 凹坑深度和半高宽统计结果

Fig.12 Statistical results of pit depth and half-height width

完全符合正态分布,导致传统的基于正态分布假设的统计检验方法并不适用。 t 检验是统计学中常用的一种假设检验方法,广泛应用于定量资料的两组均数比较,尤其适用于小样本数据且数据分布不明确的情况^[18]。 t 检验可以分为独立样本 t 检验、配对样本 t 检验及单样本 t 检验等,本研究中采用独立样本 t 检验来比较不同区域间单点喷丸结果的均值差异,其主要目的是推断不同区域对应的总体均值是否存在显著差异,以此判断导光臂激光喷丸系统在不同区域的加工效果是否有明显不同。通过对不同区域间单点喷丸结果进行 t 检验,得到相应的检验结果,如图13所示。根据 t 检验的原理,如果 t 值对应的 p 值大于预先设定的显著性水平(通常为0.05),说明不同区域间单点喷丸结果的均值差异不显著,即各区域间的单点喷丸效果在统计学意义上是相似的;反之,如果 p 值小于显著性水平,则说明区域间的单点喷丸结果存在显著差异。由图13可知,不同区域间单点喷丸结果的 p 值远大于0.05,表明各区域间单点喷丸结果(凹坑形貌尺寸)不存在显著差异,进一步说明,导光

臂激光喷丸系统虽然存在光斑几何尺寸的微小偏差,但对单点喷丸结果的影响并不显著,系统在不同区域都能较为稳定地实现单点喷丸加工,保证加工效果的一致性。

这些试验结果表明,导光臂激光喷丸系统虽然存在光斑几何尺寸的微小偏差,但对单点喷丸结果(凹坑形貌尺寸)的影响并不显著。

2.3 薄板变形分析

薄板试样在激光喷丸后产生拱形变形,弧弓高可反映区域强化程度,激光喷丸后的薄板试样如图14所示。图15给出了9个区域对应的弧弓高测量结果。可以看出,不同区域的弧弓高在0.28~0.32 mm之间波动,变化范围约为10%。此外,弧弓高结果的标准差也较小,未出现某一区域显著高于或低于其他区域的情况。这说明各区域的整体强化效果基本一致,光斑几何误差导致的局部能量分布变化未对宏观弯曲度产生显著影响。由此可推断,在当前光斑误差水平下,压应力引入的总强度变化不大,未对薄板试样的整体变形产生可见影响。

2.4 光斑几何误差影响分析

从物理机制角度分析,激光喷丸强化过程中,单点喷丸凹坑及宏观变形结果并非是对光斑几何形状的线性响应,而是由激光诱导等离子体约束膨胀产生的高幅值冲击波,作用于材料表层后形成的塑性变形结果而决定的。在该过程中,光斑几何参数主要通过影响单位面积内的能量密度分布参与强化,但当光斑直径与形状变化处于较小幅度时,其对冲击波峰值压力和作用时间的影响将被材料的弹塑性响应及冲击波在近表层的扩散过程平均化。因此,尽管不同空间位置处光斑存在一定程度的中心偏移及椭圆度变化,但在当前试验条件下,这种几何误差并未引起冲击载荷分布的显著畸变,最终表现为单点喷丸凹坑几何参数和宏观变形结果在统计意义上的一致性。

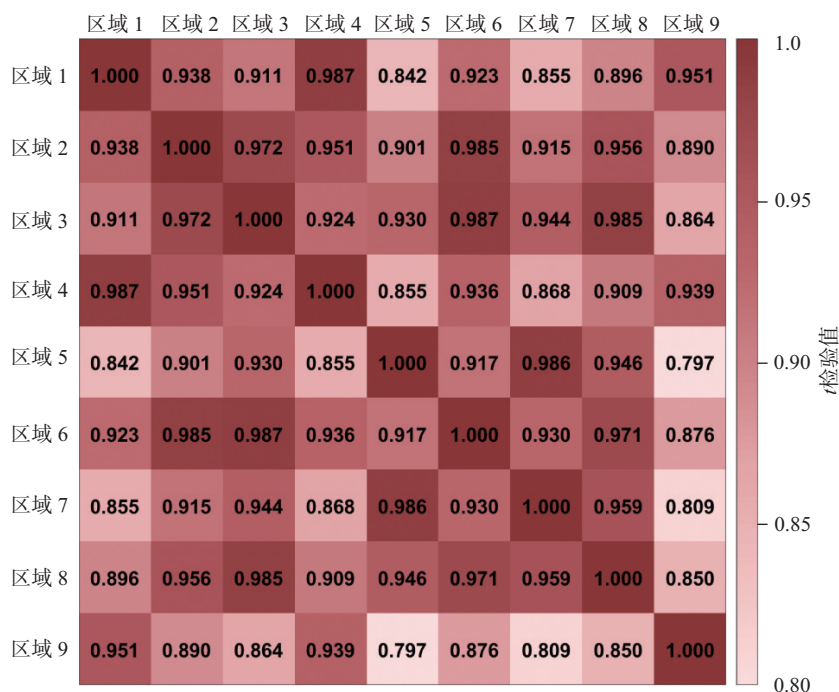


图 13 不同区域凹坑尺寸的 t 检验结果
Fig.13 t -test results of pit size in different regions

结合光斑几何参数的统计结果与喷丸试验响应可以进一步明确,在本研究所采用的工艺参数条件下,光斑几何误差对强化结果的影响具有明显的阈值特征。当光斑椭圆度控制在 1.1 以内、光斑中心偏移量不超过光斑直径 7% 时,单点喷丸凹坑深度与半高宽的相对离散度均保持在 10% 以内,不同空间区域间的喷丸结果亦未表现出统计学意义上的显著差异,表明在该误差区间内,光斑几何误差不会显著放大冲击载荷的不均匀性,可视为导光臂激光喷丸系统在当前工艺条件下的安全工作区间。

相较而言,光斑指向误差将直接导致喷丸点位偏移,进而破坏预设的能量叠加方式,对强化一致性产生更直接和显著的影响。因此,在系统误差控制与补偿资源有限的前提下,相较于对光斑几何形状与尺寸进行高精度补偿,优先对光斑指向误差进行建模与补偿,并保证激光能量输出的稳定性,将更有利于在加工效果与系统复杂度之间取得合理平衡。上述分析为导光臂激光喷丸系统误差控制策略中,不同误差源的优先级划分提供了试验依据。

3 结论

针对导光臂激光喷丸系统中存在的光斑几何误差,通过统计加工范围内不同区域的光斑几何参数变化并开展单点喷丸与薄板变形试验,分析了系统光斑几何误差来源,研究了系统当前光斑几何误差水平对

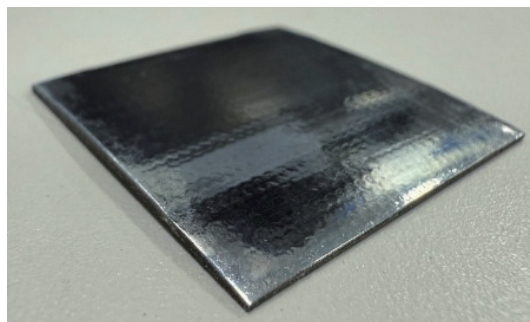


图 14 全覆盖激光喷丸后的薄板试样
Fig.14 Thin plate specimen after full-coverage laser peening

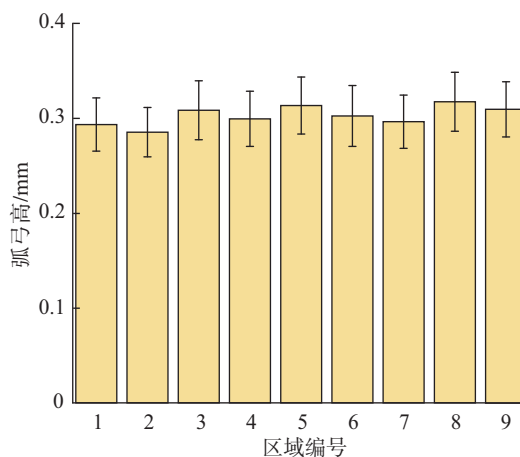


图 15 薄板试样弧高统计结果
Fig.15 Statistical result of arc height for thin plate specimens

最终强化效果稳定性与一致性的影响,主要结论如下。

(1) 导光臂激光喷丸系统中,导光臂内部反射镜的装配误差将引起不同空间位置处加工光斑的几何参数变化,不同区域光斑直径变化小于 0.05 mm,光斑椭圆度在 1.0~1.1 范围内波动,装配误差对光斑形状的影响更显著。

(2) 在激光喷丸加工中,单点喷丸凹坑几何参数的离散性可用于表征系统的加工稳定性。当标准差小于均值的 10% 时,可认为系统具有良好的加工稳定性。同一区域内 50 次单点激光喷丸试验结果表明,凹坑深度与半高宽的相对离散度分别约为 1.9% 与 6.7%,均小于 10% 的判据阈值,说明导光臂激光喷丸系统具有良好的加工稳定性。

(3) 不同区域单点激光喷丸凹坑深度与薄板试样的变形情况均无明显差别,表明导光臂激光喷丸系统当前的光斑几何误差对最终的强化结果无显著影响,可以保证加工的一致性。

参考文献

- [1] DENG W W, WANG C Y, LU H F, et al. Progressive developments, challenges and future trends in laser shock peening of metallic materials and alloys: A comprehensive review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 191: 104061.
- [2] WANG C, SHEN X J, AN Z B, et al. Effects of laser shock processing on microstructure and mechanical properties of K403 nickel-alloy[J]. Materials & Design, 2016, 89: 582–588.
- [3] LIAO Y L, SUSLOV S, YE C, et al. The mechanisms of thermal engineered laser shock peening for enhanced fatigue performance[J]. Acta Materialia, 2012, 60(13–14): 4997–5009.
- [4] LIAO Y L, CHENG G J. Controlled precipitation by thermal engineered laser shock peening and its effect on dislocation pinning: Multiscale dislocation dynamics simulation and experiments[J]. Acta Materialia, 2013, 61(6): 1957–1967.
- [5] CHEN S Y, LUO G H, JIANG J C, et al. Dynamic dislocation response in aluminum single crystals under multiple laser peening: A physics-based crystal plasticity study[J]. International Journal of Plasticity, 2025, 191: 104388.
- [6] DANE C B, LAO E W H, HARRIS F B, et al. Flexible beam delivery system for high power laser systems: US10072971[P]. 2018–09–11.
- [7] DULANEY J L, CLAUER A H, TOLLER S M. Laser peening process and apparatus with uniform pressure pulse confinement: US6049058[P]. 2000–04–11.
- [8] 胡永祥, 余雄超, 姚振强, 等. 一种用于大型工件激光喷丸成形的光路装置及方法: CN201510197097.4[P]. 2015–09–23.
- [9] HU Yongxiang, YU Xiongchao, YAO Zhenqiang, et al. An optical path device and method for laser shot peening forming of large workpieces: CN201510197097.4[P]. 2015–09–23.
- [9] 余雄超, 胡永祥, 姚振强. 大型工件扫描式激光喷丸系统研制[J]. 航空制造技术, 2018, 61(7): 84–88.
- [10] YU Xiongchao, HU Yongxiang, YAO Zhenqiang. Development of laser peening scanning system for large workpieces[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(7): 84–88.
- [10] SANO Y, SCHNEIDAU V. Downsizing for new flexibility in laser shock peening[J]. The Shot Peener, 2023: 6–12.
- [11] 宁英楠, 薛鹏波, 程江勇, 等. 一种移动光路式激光冲击强化设备: CN202410471906.5[P]. 2024–07–16.
- [11] NING Yingnan, XUE Pengbo, CHENG Jiangyong, et al. A mobile optical-path laser impact strengthening device: CN202410471906.5[P]. 2024–07–16.
- [12] 张文武, 王玉峰. 一种激光冲击强化方法与系统: CN201910344358.9[P]. 2020–10–30.
- [12] ZHANG Wenwu, WANG Yufeng. A laser shock strengthening method and system: CN201910344358.9[P]. 2020–10–30.
- [13] 冯爱新, 陈欢, 贾天代, 等. 适用于激光冲击波技术的导光臂: CN201710695515.1[P]. 2017–11–03.
- [13] FENG Aixin, CHEN Huan, JIA Tiandai, et al. Optical guide arm suitable for laser shock wave technology: CN201710695515.1[P]. 2017–11–03.
- [14] PAN X L, ZHOU L C, WANG C X, et al. Microstructure and residual stress modulation of 7075 aluminum alloy for improving fatigue performance by laser shock peening[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2023, 184: 103979.
- [15] 张志勇, 石如星, 殷立涛, 等. 激光喷丸搭接率对 300M 钢组织和性能的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 16–24, 5.
- [15] ZHANG Zhiyong, SHI Ruxing, YIN Litao, et al. Effect of laser shock peening lap rate on microstructure and properties of 300M steel[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 44(5): 16–24, 5.
- [16] LI W W, CHEN F, ZHANG K, et al. Analysis of misaligned optics effects on beam pointing stability in dual-pass optical system[J]. Physica Scripta, 2024, 99(3): 035502.
- [17] KHAN A S, LIU H W. A new approach for ductile fracture prediction on Al2024–T351 alloy[J]. International Journal of Plasticity, 2012, 35: 1–12.
- [18] 高艺祥, 杨民红, 李兰会. 独立样本 t 检验的 Excel 和 SPSS 分析[J]. 畜牧与饲料科学, 2018, 39(10): 79–82.
- [18] GAO Yixiang, YANG Minhong, LI Lanhui. Implementation of independent-sample t test by using excel and SPSS[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2018, 39(10): 79–82.

(责编 向阳)