

大型工件扫描式激光喷丸系统研制*

余雄超, 胡永祥, 姚振强

(上海交通大学机械与动力工程学院机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

[摘要] 对大型工件扫描式激光喷丸系统进行研制, 主要目的是解决激光喷丸针对大型工件的应用问题以及实现工艺过程中激光光斑质量的良好控制。其主要包含作为激光光源的高能量纳秒激光器模块、对激光光斑的尺寸和形状进行调整控制的光斑调节模块、导引激光进行大幅面扫描的两轴振镜模块以及装夹工件并对工件施加弹性预弯的柔性预应力夹具模块。在此基础上结合激光喷丸的工艺特点进行系统的控制流程规划。对制备的系统样机进行激光喷丸光斑质量控制的试验验证, 结果表明, 通过基于正交柱面透镜组的光斑调节模块的调整, 所形成的光斑基本符合规划的目标参数要求, 光斑的尺寸与形状质量可实现良好的控制。

关键词: 激光喷丸; 扫描光路; 柱面透镜; 光斑形状; 畸变校正

Development of Laser Peening Scanning System for Large Workpieces

YU Xiongchao, HU Yongxiang, YAO Zhenqiang

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] A laser peening scanning system for large workpieces is developed to apply in large workpieces laser peening and to control the laser spots quality in the process. It is composed of a high-energy nanosecond laser as the laser source, a laser spot adjusting part to control the shape and size of the laser spots, a two-axis galvanometer part to guide the scanning laser and a flexible pre-bending fixture to fix and elastically pre-bend the workpiece. Based on the characteristic of laser peening, the control process of the system is designed. An experiment to verify the laser spot quality control ability of the system is conducted. It is concluded that corrected by the laser spot adjusting part based on a pair of orthogonal cylindrical lenses, the laser spots on the workpiece generally meet the proposed demand and their sizes and shapes are well controlled.

Keywords: Laser peening; Scanning optical system; Cylindrical lens; Spot shape; Distortion correction

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.07.084

激光喷丸工艺以高能短脉冲激光辐照工件表面, 形成一定大小与形状的激光光斑, 与吸收层作用后产生幅值极高的瞬态冲击压力使工件表层发生局部塑性应变, 形成沿工件深度方向不均匀的残余压应力场, 从而实现工件的强化或成形^[1]。与传统的机械喷丸相比, 激光喷丸产生的残余压应力场幅值更高、深度更大, 因而具有更强的强化效果与成形能力, 可应用于大型风扇叶片叶缘强化、整体壁板复杂形状无模成形等复杂加工场合^[2]。

常用的激光喷丸系统一般采用固定不动的光路传导激光, 由机械臂等运动机构夹持工件按照规划的路径运动^[3]。其光路简单, 但是运动机构的承载能力所限,

难以应用于大型工件的加工。采用动态扫描光路传导激光是解决此问题的重要途径, 可允许难以移动的大型工件固定不动, 通过调整光路使激光脉冲按照规划的路径依次对工件上的各点进行扫描式激光喷丸。其光路相对复杂, 且需要在激光喷丸的过程中不断进行精确的调整。

动态扫描光路有多种导光与扫描的形式。其中, 光纤式系统利用光纤导光配合整体运动喷丸头进行激光喷丸扫描, 对工件表面形状适应性强, 但是可承受的激光能量密度阈值较低^[4]。飞行光路式系统利用一对可沿平面两轴移动的反射镜导光进行激光喷丸扫描, 结构与控制相对简单, 但是设备体积大, 灵活性低^[5]。而反射镜旋转式系统则是通过反射镜的俯仰和偏转运动改

* 基金项目: 航天先进技术联合研究中心技术创新项目(USCAST2015-26); 国家重点研发计划项目(2016YFB1102705)。

变激光出光的方向,进行激光喷丸扫描,其体积小、灵敏度高、布置灵活、可实现高能量激光脉冲的传递,在3者中最具工程上的优势。反射镜旋转式的扫描系统有振镜、万向镜、多面转镜等,其中振镜的研究与应用在国内最为成熟^[6]。美国MIC公司于2010年利用万向镜动态扫描系统设计出一套大型工件激光喷丸扫描设备,并已投入了生产应用^[7]。但是在国内,此类系统还未见有研究报道。由于激光喷丸工艺利用离焦的光斑工作,对光斑的形状与尺寸有较为严格的要求,而反射镜旋转式系统一般会使激光倾斜入射工件表面,使圆形光斑的形状发生椭圆畸变,从而改变光斑的作用区域及其平均功率密度,对加工精度产生不良的影响。这种畸变的校正对加工精度的提升有着重要的意义,是这类系统设计必须解决的一个重要问题。

针对实际工艺需求,设计大型工件扫描式激光喷丸系统,对其原理与组成进行详细介绍,并根据系统的结构与激光喷丸的工艺特点规划系统运行的控制流程,最后对构建的系统样机进行光斑质量试验验证,结果表明系统在加工范围内形成的激光光斑满足质量要求。

1 系统原理与组成

所设计的大型工件扫描式激光喷丸系统以振镜实现动态扫描,在扫描过程中要求对激光光斑的位置、尺寸与形状进行准确的控制^[8]。如图1所示,大型工件扫描式激光喷丸系统由4大功能模块组成,分别是作为激光光源的高能量纳秒激光器模块、对激光光斑的尺寸和形状进行调整控制的光斑调节模块、导引激光进行大幅面扫描的两轴振镜模块以及装夹工件并对工件施加弹性预弯的柔性预应力夹具模块。

1.1 高能量纳秒激光器模块

高能量纳秒激光器是系统的激光光源。本系统采用的激光器是镭宝光电公司的SGR-Extra-15型Nd:YAG高能量纳秒激光器。该激光器以Nd:YAG晶体作为激活物质,通过5级放大后可以输出最大能量达到14J的1064nm红外激光,脉冲宽度为14.3ns。通过高能量的输出,可使激光照射在工件表面上的激光光斑具有 GW/cm^2 量级的峰值功率密度,以对工件形成足够的冲击压力,保证激光喷丸强化与成形的能力和效率;而纳秒级的脉宽在保证峰值功率足够大的同时也防止激光作用时间过长对工件产生不良的热影响。

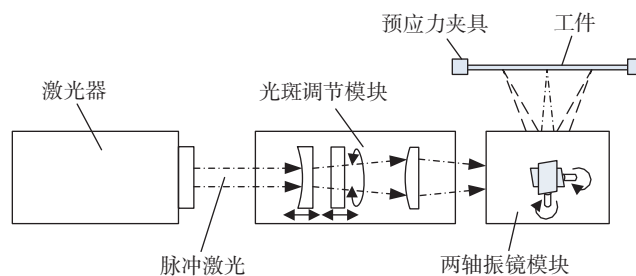
1.2 两轴振镜模块

两轴振镜模块用于导引激光进行大幅面扫描。如图2所示,该模块主要由两面可以旋转的反射镜——振镜组成,其旋转轴线相互正交,其转角分别决定激光在工作面上辐照位置的 x 坐标和 y 坐标,通过协调控制两

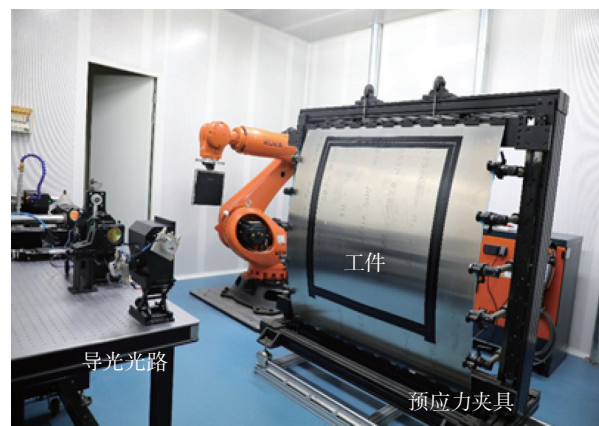
面反射镜的旋转可以在工作表面实现精确的激光扫描。本系统采用的是世纪桑尼公司的S-9650振镜系统,其最大扫描角度为 $\pm 12.5^\circ$,在1.2m的工作距离上,其平面扫描范围可以达到 $1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ 。而且,该系统具有 $8 \mu\text{Rad}$ 的重复定位精度,在1.2m的工作距离上激光光斑的重复定位误差在 $10 \mu\text{m}$ 以内,可以对激光的辐照位置进行精确控制。

1.3 光斑调节模块

光斑调节模块用于会聚激光以及调整工件上光斑



(a) 系统结构示意图



(b) 系统实物图

图1 大型工件扫描式激光喷丸系统

Fig.1 Laser peening scanning system for large workpieces

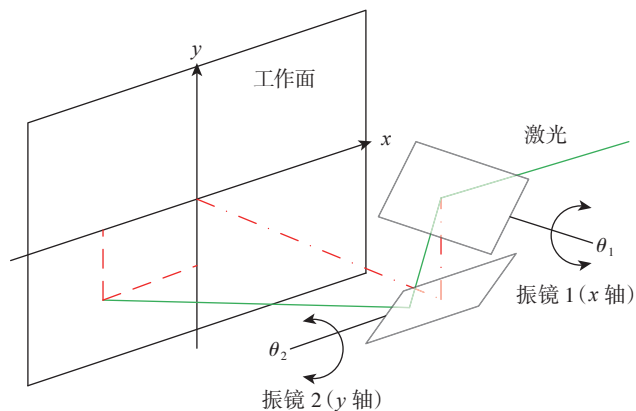


图2 两轴振镜模块原理图

Fig.2 Schematic of a two-axis galvanometer scanner part

的尺寸与形状,是一个特殊的动态聚焦模块。常规的动态聚焦模块由一面可调凹球面透镜和一面固定凸球面透镜组成,可以通过凹球面透镜沿系统光轴移动以调整光路焦距,具有克服振镜扫描聚焦误差以及控制激光光斑大小的功能。但是在基于振镜的激光喷丸扫描应用中具有一定的缺陷。在振镜扫描的过程中,激光一般会倾斜辐照工件,使工件上的光斑形状在某一方向被拉长,因而圆形光斑会畸变成近似椭圆形的形状,这种畸变在大光斑工作的激光喷丸工艺中尤为明显,会对工艺带来不可忽视误差。常规的动态聚焦模块由于使用球面透镜进行均匀的动态聚焦,不能改变光斑的形状,因此无法调整由此产生的椭圆畸变。而本系统的光斑调节模块则是为了克服此类光斑畸变而设计的一个非均匀动态聚焦模块。如图3所示,其由一对可调的凹柱面透镜和一面固定的凸球面透镜组成,其中这对可调的凹柱面透镜柱面母线保持正交,可以各自独立地沿光轴移动以及一起同步地绕光轴旋转。与球面透镜不同,柱面透镜是具有圆柱形表面的透镜,可以对光束的截面形状进行单方向的控制。因此,该模块中的一对凹柱面透镜配合固定的球面凸透镜,相当于组成两个相互正交的、分别只控制激光截面单一方向的、互相独立调焦的动态聚焦模块,可对激光截面两个相互正交的方向进行非一致的动态调焦,从而可以改变光斑的长宽比,实现光斑的形状调节。该光路具有3个独立控制参量,分别是一个旋转参量和两个位移参量。其中,一对凹柱面透镜的同步旋转角度决定激光截面长宽比的调整方向,这两个凹柱面透镜各自的位移决定激光截面两个方向上的焦距调整。通过合理规划这些控制参量,可以对激光截面形状的长宽比进行调整,预先通过激光截面的单向缩小抵消激光倾斜入射造成的截面单向扩大,从而校正激光光斑的椭圆畸变,使光斑的形状与尺寸满足工艺要求。通过对该模块的数学模型进行计算优化,选取焦距分别为 -451mm 和 -622mm 的凹柱面透镜,以及焦距为

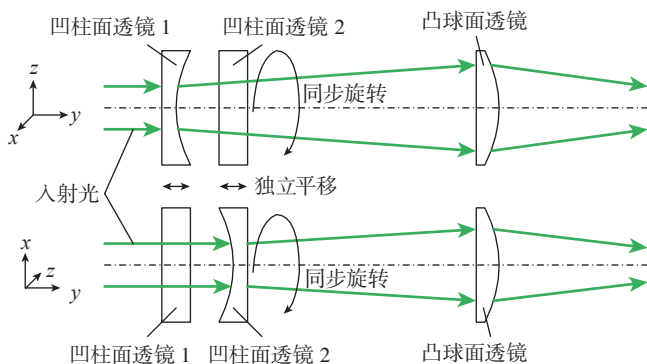


图3 光斑调节模块原理图

Fig.3 Schematic of a laser spot adjusting part

509mm的凸球面透镜构建光斑调节模块,理论上在两轴振镜模块的扫描范围内可以对光斑的形状畸变进行良好的校正,且同时具有克服振镜扫描聚焦误差以及控制激光光斑大小的功能。

1.4 柔性预应力夹具模块

柔性预应力夹具用于大型工件的装夹与弹性预弯^[9]。在激光喷丸处理前对工件进行弹性预弯可以加强卸载后对工件施加的残余压应力,并可抑制工件的球面变形趋势,从而提升激光喷丸的加工效果^[10-11]。柔性预应力夹具的结构如图4所示,主要由上下挤压单元、轮廓控制单元以及压紧装置组成。上下挤压单元用于挤压工件,将工件弹性压弯。轮廓控制单元可根据规划轮廓构建离散化的预弯模具,并通过压紧装置将工件压紧。通过压紧装置和上下挤压单元的共同调整使工件贴合到轮廓控制单元构建的离散化模具上,即可使工件弹性预弯成规划的形状,以进行预应力激光喷丸处理。本夹具具有良好的柔性及通用性,可适用于加工面积从 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 到 $1200\text{mm} \times 1200\text{mm}$ 的板件的装夹,而且通过轮廓控制单元的调整,可以根据需要实现多种形状的弹性预弯。

2 系统运行控制流程

根据大型工件扫描式激光喷丸系统的原理及工艺特点,可规划出如图5所示的系统运行总体控制流程,分为3个阶段:

(1)准备阶段。首先,开启与初始化系统;然后,将工件安装到柔性预应力夹具上,并按照规划的轮廓进行

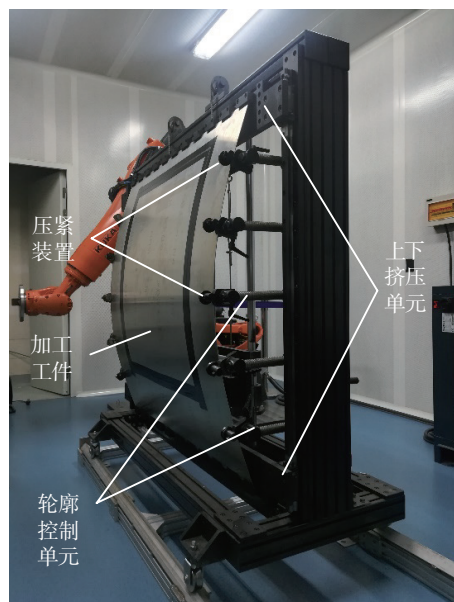


图4 柔性预应力夹具

Fig.4 Flexible pre-bending fixture

工件的弹性预弯；接着，系统对工件的位置进行标定，根据需要进行微调与校正；最后，获取工件的实际位置与轮廓，根据系统的数学模型离线规划激光喷丸过程的系统运动控制参数，生成加工文件；

(2) 实施阶段。将激光器开启，同时开启约束层水阀，将激光器设置于指示光模式，输入加工文件预览加工过程，确认无异常后，将激光器切换至外部触发模式，输入加工文件的数据，按照规划路径对目标区域进行激光喷丸处理，直至所有工作点激光喷丸完成；

(3) 结束阶段。卸下工件进行相应的检测，若发现异常需要再进行补偿加工处理，直至检测结果满足加工要求以后，关闭系统，加工完成。

在整个控制流程中，目标区域激光喷丸是核心环节，其具体控制流程如图6所示。首先，系统读取准备阶段生成的加工文件，确定下一个激光喷丸的位置，并获取该位置的控制参数；然后，根据控制参数依次进行两轴振镜模块与光斑调节模块的调整，使激光对准加工位置，并调整光斑的形状与尺寸使其满足要求；接着，等待激光脉冲的触发间隔时间，即可外部触发高能短脉冲激光，对该位置进行激光喷丸。对加工路径上的所有点位循环进行相同的操作，即完成目标区域的激光喷丸处理。

3 光斑质量试验验证

采用 1200mm × 1200mm、厚度 2mm 的 2024-T351 航空铝合金板件对系统进行激光喷丸试验，以验证系统加工中光斑质量的控制效果。如图7(a)所示，工件在柔性预应力夹具上装夹以后，粘贴作为激光喷丸吸收层的黑色胶带，在不施加约束层的条件下分别对工件上 A、B 两个区域进行激光喷丸。在本次试验 800mm × 800mm 的加工范围内，A 区域处于加工范围的中心，激光近似垂直入射该区域；而 B 区域处于加工范围的右上角，此区域激光倾斜入射。试验的目标为在工件表面形成 $\phi 4\text{mm}$ 的圆形光斑，且要求其面积误差 $\leq 5\%$ ，任意方向直径长度的偏差 $\leq 5\%$ 。

规划好系统控制参数，对工件进行无约束层激光喷丸。其中对 A 区域的激光喷丸通过常规动态聚焦模块进行调整，光斑的痕迹如图7(b)所示；对 B 区域的激光喷丸则分别通过常规动态聚焦模块和本系统基于正交柱面透镜组的光斑调节模块进行调整，光斑的痕迹分别如图7(c)和7(d)所示。利用体视显微镜测量光斑痕迹的轮廓尺寸，结果见表1。从试验结果可见，在 A 区域通过常规动态聚焦模块形成的光斑，其形状比较理想，根据体视显微镜的测量结果，其直径平均约为 4mm，偏差不超过 2%。而在 B 区域通过常规动态聚焦模块形

成的光斑，则由于激光倾斜入射而发生畸变，形成以红色箭头方向为长轴和短轴的椭圆，根据体视显微镜的测量结果，长轴平均尺寸近似 4mm，但是短轴平均尺寸约为 3.6mm，其偏差达到了 10%，不符合工艺要求。同样在 B 区域，通过本系统光斑调节模块形成的光斑，相比之下其短轴方向的尺寸得到扩大，从而使光斑的形状畸变得到校正，经体视显微镜测量，光斑在该方向的平均

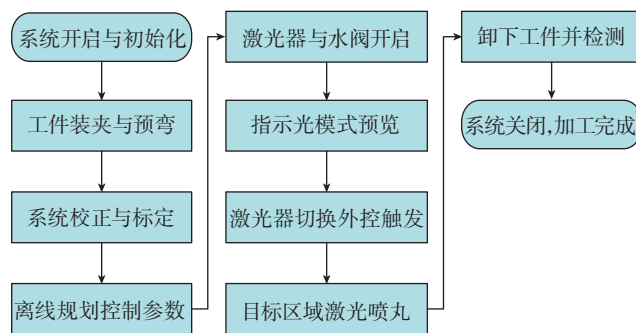


图5 大型工件扫描式激光喷丸系统控制总流程

Fig.5 General control process of a laser peening scanning system for large workpieces

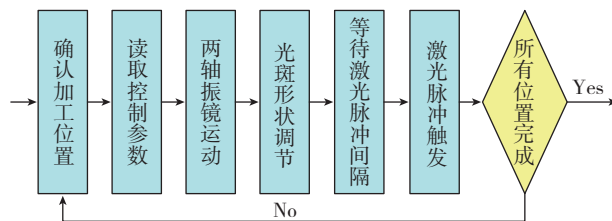


图6 目标区域激光喷丸控制流程

Fig.6 Control process of laser peening in target zone

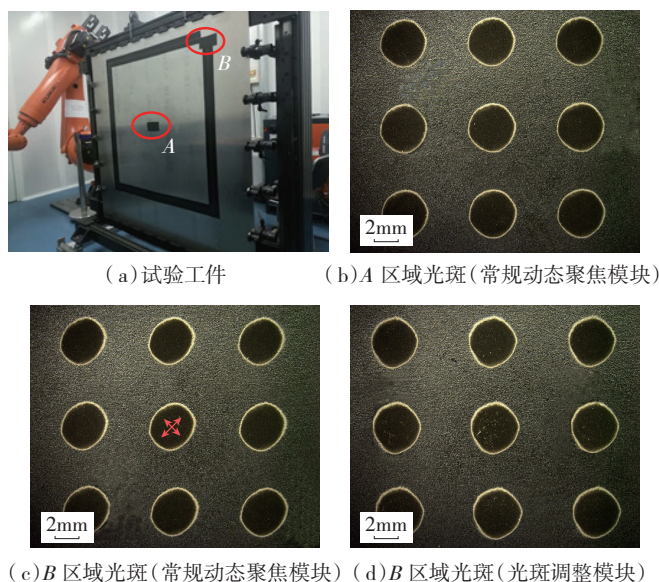


图7 试验光斑形状

Fig.7 Spot shapes in the test

表1 光斑尺寸测量结果 mm

参数	图 7 (b) 光斑尺寸		图 7 (c) 光斑尺寸		图 7 (d) 光斑尺寸	
	水平 方向	竖直 方向	长轴 方向	短轴 方向	图 7 (c) 长轴方向	图 7 (c) 短轴方向
测量值	3.90	4.04	4.03	3.51	3.85	3.91
	3.96	4.07	3.94	3.53	3.85	3.92
	3.98	4.05	3.97	3.57	3.79	3.89
	3.97	4.09	4.09	3.62	3.87	4.02
	4.00	4.09	3.98	3.56	3.92	4.04
	4.00	4.11	4.05	3.61	3.90	3.98
	3.96	4.04	4.02	3.73	3.81	4.09
	3.99	4.05	4.04	3.65	3.94	4.07
	4.02	4.11	4.12	3.65	3.90	3.96
	平均值	3.97	4.07	4.03	3.60	3.87
标准差	0.03	0.03	0.06	0.07	0.05	0.07

尺寸为 4mm 左右,虽然正交方向上的尺寸出现了约 3% 的偏差,但是依然保持在允许误差范围内,总体上光斑的形状与尺寸均满足要求。

4 结论

(1) 针对大型工件激光喷丸工艺的需求,设计了大型工件扫描式激光喷丸系统,其包括激光器、两轴振镜模块、光斑调节模块以及柔性预应力夹具 4 部分。在此基础上结合激光喷丸工艺特点规划系统运行的控制流程。

(2) 对该系统进行激光喷丸光斑质量控制试验,结果表明,对于激光倾斜入射引起的圆形光斑椭圆畸变,常规的动态聚焦模块无法进行校正,而本系统基于正交柱面透镜组的光斑调节模块则在光斑畸变校正和形状控制中取得良好的效果,可以按照规划的形状尺寸目标打出所需的光斑。

(3) 本系统的研制主要针对激光喷丸在大型工件上的应用。其通过两轴振镜模块实现大范围动态激光扫描,加工过程不需要移动工件,而且扫描的位置精度通过振镜本身的定位精度可以达到较高的水平,在对难以移动的大型工件进行激光喷丸处理或者是设备现场处理时具有明显的优势;同时,通过基于柱面透镜组的光斑调节模块,激光喷丸过程中光斑的形状与尺寸均可实现较为准确的控制,保证了工艺实现的准确性,使系统具有良好的工艺精度。本系统的研制可为激光喷丸设备的进一步发展提供一个良好的思路与借鉴。

参考文献

[1] DANE C B, HACKEL L, DALY J, et al. Shot peening with lasers[J]. *Advanced Material and Processes*, 1998, 153(5): 37-38.

[2] 曾元松, 黄遐, 李志强. 先进喷丸成形技术及其应用与发展[J]. *塑性工程学报*, 2006, 13(3): 23-29, 39.

ZENG Yuansong, HUANG Xia, LI Zhiqiang. The application and development of advanced shot peen forming technologies[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2006, 13(3): 23-29, 39.

[3] DULANEY J L. Laser peening process and apparatus: US5741559[P]. 1998-04-21.

[4] TAMURA M, KIMURA S, MOTORA Y, et al. Underwater laser processing apparatus and underwater laser processing method: US6946618[P]. 2005-09-20.

[5] CLAUER A H, DULANEY J L, LAHRMAN D F. Automated positioning of mobile laser peening head: US6867390[P]. 2005-03-15.

[6] 汪会清. 三维动态聚焦激光振镜扫描系统的研究与开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.

WANG Huiqing. Study and development of three-dimensional dynamic focusing laser galvanometer scan system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003.

[7] DANE C B, LAO E W H, FRITZ B, et al. Flexible beam delivery system for high power laser systems: US2011/0253690 [P]. 2011-10-20.

[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: 201510197097.4[P]. 2015-09-23.

HU Yongxiang, YU Xiongchao, YAO Zhenqiang, et al. An optical device and method for large workpieces laser peening forming: 201510197097.4[P]. 2015-09-23.

[9] 胡永祥, 余雄超, 姚振强, 等. 用于大型壁板工件喷丸成形的柔性预应力夹具: 201611180803.5[P]. 2017-05-24.

HU Yongxiang, YU Xiongchao, YAO Zhenqiang, et al. A flexible pre-stress fixture for large workpieces peening forming: 201611180803.5[P]. 2017-05-24.

[10] 方刚, 姚振强, 胡永祥. 激光喷丸成形板料预加载建模[J]. *机械设计与研究*, 2013, 29(2): 80-83.

FANG Gang, YAO Zhenqiang, HU Yongxiang. Modeling research for plate pre-loading of laser peening forming[J]. *Machine Design and Research*, 2013, 29(2): 80-83.

[11] HU Y X, LI Z, YU X C, et al. Effect of elastic prestress on the laser peen forming of aluminum alloy 2024-T351: Experiments and eigenstrain-based modeling[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 221: 214-224.

通讯作者: 胡永祥, 博士、副教授, 研究方向为激光喷丸强化与成形, E-mail: huyx@sjtu.edu.cn。

(责编 铃兰)