

文章编号: 2095-4980(2019)04-0647-06

激光加工参数对球形频率选择表面质量的影响

邢校菖¹, 姜开宇^{1*}, 赵 骥², 方家萌¹

(1.大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2.微刻(北京)科技有限公司, 北京 100089)

摘 要: 通过运用激光加工的方法在三维半球壳表面加工孔径十字环形频率选择单元, 探讨激光加工相比其他加工手段的优势和不同激光加工工艺参数对十字环形频率选择单元加工质量的影响。对球形曲面频率选择单元加工工艺方法进行分析, 介绍激光加工中出现的加工缺陷, 并根据缺陷的特点提出参数化表征量; 对实验件进行单因素参数试验, 分析标刻单元加工质量变化规律并找到合理参数范围; 最后, 根据合理参数范围做参数化试验, 探讨加工质量的改进效果。实验结果表明: 振镜式激光加工速度相较于普通数控加工系统提高了15倍左右, 加工缺陷占比可控制在5%以内。

关键词: 十字环形频率选择单元; 加工工艺; 激光标刻; 加工参数

中图分类号: TN249; TN957.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201904.0647

Effect of laser processing parameters on the surface quality of spherical Frequency Selective Surface

XING Xiaochang¹, JIANG Kaiyu^{1*}, ZHAO Ji², FANG Jiameng¹

(1.School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;

2.Micro Carved(Beijing) Technology Co., Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: A cross-loop slot frequency selection element is developed on the surface of three-dimensional hemispherical shell by laser processing. Advantages of laser processing compared with other processing methods and the influence of laser processing parameters on the machining quality of the cross-loop slot frequency selection element are discussed. Firstly, processing method of the frequency selection element of the spherical surface is analyzed, processing defects in laser processing are introduced, and the parametric characterization is put forward according to the characteristics of the defects. Then, single factor experiments are carried out on the experimental parts, the change rules of the processing quality of the cutting unit are analyzed, and the reasonable parameter range is obtained. Finally, parametric tests are carried out according to the reasonable parameter range, and the improvement effect of the machining quality is discussed as well. Experimental results indicate that the galvanometer laser processing speed is 15 times higher than that of ordinary computer numerical control machining system, and the processing defects account for 5% or less in control.

Keywords: cross-loop slot frequency selection element; processing technic; laser marking; processing parameter

频率选择表面(Frequency-Selective Surfaces, FSS)是基于散射单元在平面或共形面上的双周期排列。由于它固有的频率选择特性, FSS 可广泛用于通信系统和雷达系统, 尤其是在不可展表面排布频率选择单元有很大的研究意义和实用价值^[1-2]。不可展 FSS 常规的制作工艺有制作掩膜曝光^[3]、曲面薄膜分片转移方法^[4]、局部热压分片成型^[5]、数控机床机械铣削加工^[6-8]、激光加工等方法^[9]。

掩膜曝光法加工工艺成熟, 操作流程固定, 但工艺流程繁琐, 掩膜精确度不高, 批量化生产很难; 曲面薄膜

收稿日期: 2017-12-24; 修回日期: 2018-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475071)

*通信作者: 姜开宇 email:jiangky@dlut.edu.cn

分片转移方法和局部热压分片成型都是通过将二维 FSS 表面张铺或热压到三维不可展曲面上, 当在大曲率曲面加工时, 会导致分片连接处电连接的断开严重, 同时畸变误差也会增大; 五轴数控机床的加工精确度会有所提高, 但加工中存在残余应力、走刀误差、刀具尺寸要求等诸多不可控因素, 将破坏加工件基体, 影响其电磁特性。

由于五轴控制系统的高精确度、高效率优势, 五轴联动激光加工数控系统应运而生^[10]。这种系统将原有五轴机械数控系统中刀具部分改进为激光头, 避免了原有刀具接触式加工的劣势, 同时结合了五轴控制系统精确度高的特点。但这种加工系统成本很高, 加工走刀程序复杂, 加工效率较低。为此提出运用振镜激光器外加伺服系统来完成不可展 FSS 的加工。振镜激光器具有高速加工的优势, 同时伺服系统的 z 向焦距调控满足一定精确度要求。运用此系统来探讨激光的高效加工和不同激光参数下对加工质量的影响。

1 实验装置和实验方法

1.1 研究对象和实验装置

为研究激光伺服表面加工系统对不可展曲面的加工效果, 选定的不可展加工实验件为镀铝丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) 半球曲面壳。它由两部分组成: 外层为镀铝薄膜, 内层为 ABS 基体, 如图 1 所示。其内层 ABS 基体半球壳的外径 $R=50\text{ mm}$, 内径 $r=47\text{ mm}$, 外镀铝层厚度 $d=0.03\text{ mm}$ 。加工的“十”字环形频率选择单元的具体尺寸如图 2 所示。其中 $a=3\text{ mm}$, $a'=1.4\text{ mm}$, $b=2.5\text{ mm}$, $w=0.8\text{ mm}$ 。采用三维造型软件 (PTC Creo Parametric 3.0 M080) 在半球壳表面进行建模, 模型如图 3 所示。



Fig.1 Aluminized ABS hemispherical shell
图 1 镀铝 ABS 半球壳

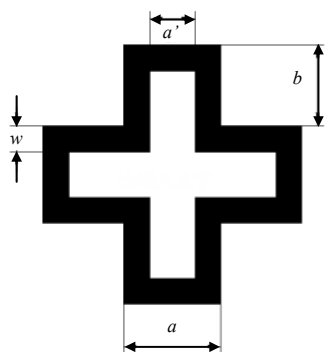


Fig.2 Dimensions of cross-loop element
图 2 “十”字形单元尺寸示意图

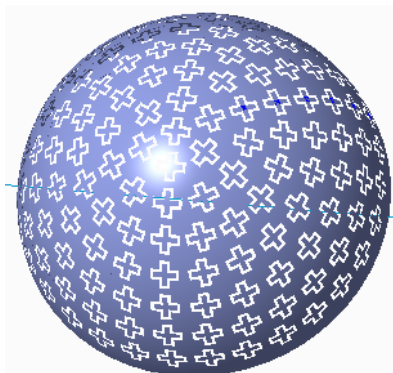


Fig.3 Diagram of 3D model
图 3 三维模型图

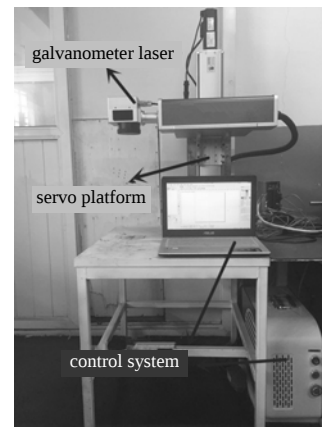


Fig.4 Laser processing system
图 4 搭建的激光加工系统

为更好地研究不可展曲面激光加工的加工特性, 自行搭建了激光伺服表面加工系统 (如图 4 所示)。该系统主要由振镜式激光器、伺服工作平台和控制系統 3 部分组成, 其主要参数如表 1 所示。

表 1 激光伺服表面加工系统各部分的主要参数

Table 1 Main parameters of each part of laser servo surface machining system

subsystem	parameters			
	maximum machining power/W	maximum scanning speed/(mm·s ⁻¹)	maximum frequency/kHz	repositioning precision/mm
galvanometer laser	30	4 000	80	—
servo control platform	—	—	—	±0.02

1.2 频率选择表面的激光高效加工方法

基于振镜式激光器加工二维平面和激光器固定焦距的加工特点, 将激光扫描范围内的曲面片根据其于激光加工头垂直距离高度差为焦距的特点, 沿 z 方向上进行逐层分类划分单元区域, 以每一圈频率单元阵列为一个单元区间。这样可以控制每个曲面子单元区间内的每一个频率单元沿 z 方向距离激光头的高度差始终为焦距值, 其加工示意图如图 5 所示。由于五轴联动激光加工数控系统的加工控制原理与五轴数控机床类似, 运用 Mastercam

软件对相同尺寸工件的五轴机床加工过程进行仿真。仿真结果表明:采用五轴数控系统加工类似的曲面 FSS 需 50 min 左右,而本实验中所采用的激光伺服表面加工系统在 3 min 之内就可以完成。

2 激光工艺参数对加工质量的影响分析

2.1 加工质量的表征

FSS 由有规则的频率选择单元周期性排列组成。影响 FSS 频率响应的因素有很多,主要包括频率选择单元的形状、尺寸、介质加载方式以及周期性排列方式等^[1]。对于孔径环形频率选择单元,环孔的形状、尺寸的差异决定了单个 FSS 的频率响应^[11-14]。本文对激光加工缺陷进行了分析,并提出了评定单个频率选择单元加工质量的表征量。

在激光加工过程中,主要存在 2 种单元缺陷:第一种是由于加工参数的影响导致加工单元有部分焦化,影响加工质量,如图 6(a)所示;第二种是由于激光加工中光斑在单元边界的有序性排列,出现“火柴头”现象,导致加工时会出现加工单元的畸变,如图 6(b)所示。

为表征环孔形状、尺寸的差异,引入透光率、畸变率,其表达式如下:

$$\alpha = \frac{A_1}{A} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{A' - A}{A} \quad (2)$$

式中: α 为透光率; γ 为畸变率; A_1 为单个加工单元

中光透过部分的像素值(面积); A 为理论设计单元的像素值(面积); A' 为激光扫描覆盖到的单个加工单元的像素值(面积)。

透光率的大小表征了加工中加工焦化部分的含量比值, α 越大,说明这部分缺陷越少。畸变率的大小表征了加工中出现的“火柴头”现象部分的含量比值, γ 越小,说明这部分缺陷越少。运用以上 2 个参数综合标定激光加工质量的好坏,即加工中的缺陷率。

采用激光加工功率、激光扫描速度、激光加工频率、线间距这 4 个典型加工因素,通过单因素实验分析其对加工质量的影响^[15],从而得到各单因素参数变化对加工质量的影响规律,找出加工单个频率单元透光率较高而畸变率较低的目标工艺参数。为排除加工工件几何结构的干扰,只选择图 3 中由球面顶端起第三层频率选择单元的加工结果进行研究分析。

2.2 各单因素参数的加工影响实验及分析

2.2.1 激光功率对加工质量的影响

加工单元的透光率、畸变率与激光功率的规律如图 7、图 8 所示。为方便数据曲线图的绘制,以理论功率值倍数为曲线图横坐标。由图 7~图 8 可知,随着功率的增大,透光率总体上呈现增长的趋势,畸变率呈现波动上升的趋势。可以看出,在功率为理论值的 1.125~1.175 倍时,综合加工的质量最好。这是由于镀的铝层对激光束具有一定的反射作用,有一部分能量存在损失。当能量未达到理论值的 1.100 倍时,不能完全刻蚀掉金属层,在功率参数为理论值的 1.150 倍左右时,正好可以补偿反射能量的损耗。当能量再增大时就会出现打焦、毛刺等现象,透光率下降,畸变率回升。

2.2.2 激光频率对加工质量的影响

在其他条件不变的情况下对激光脉冲频率进行单因素实验,如图 9、图 10 所示。由图 9~图 10 可知,随着频率的增大,透光率刚开始呈现增长的趋势,当频率达到 22.5 kHz 以后,透光率开始下降。畸变率在 25 kHz 以前呈现波动摇摆,在频率值为 20 kHz 时,畸变率达到最低;在频率值为 25 kHz 以后,畸变率开始下滑。可以看出,在频率在 22.5 kHz 左右时,综合加工的质量是最好的。

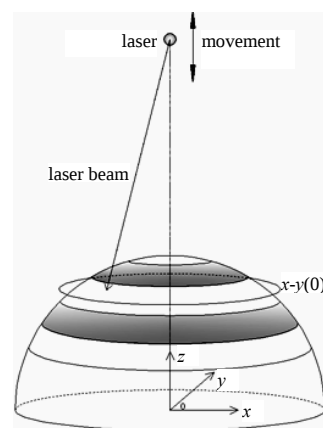
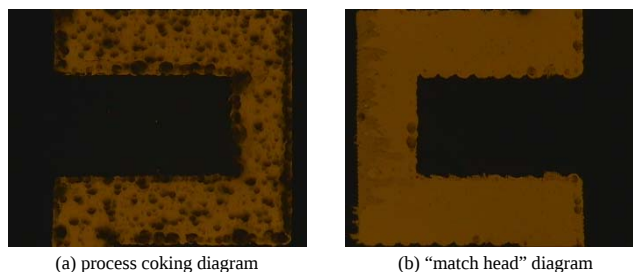


Fig.5 Sketch map of machining
图 5 加工示意图



(a) process coking diagram
(b) "match head" diagram
Fig.6 Defect map of frequency selection unit for laser processing
图 6 激光加工的频率选择单元缺陷图

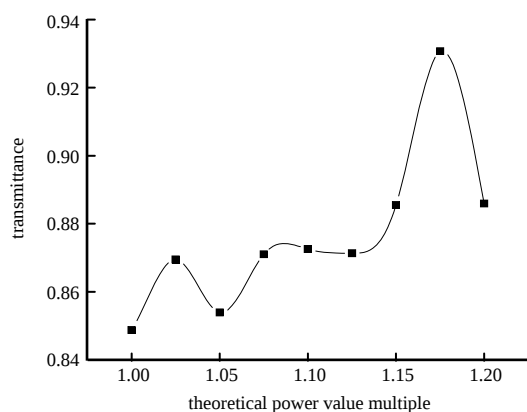


Fig.7 Transmittance at different power levels

图 7 不同功率下的透光率

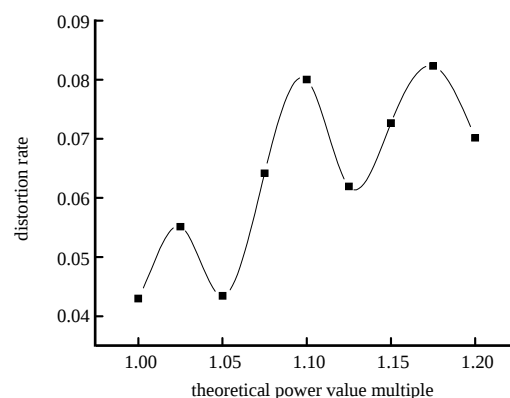


Fig.8 Distortion rate at different power levels

图 8 不同功率下的畸变率

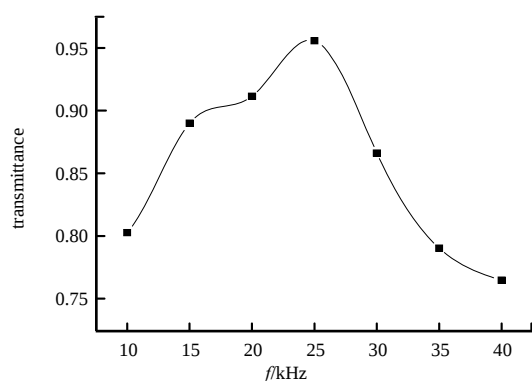


Fig.9 Transmittance at different frequencies

图 9 不同频率下的透光率

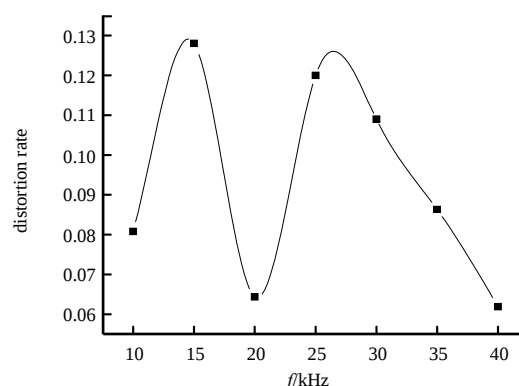


Fig.10 Distortion rate at different frequencies

图 10 不同频率下的畸变率

为解释以上现象,引入激光光斑重叠次数。激光光斑重叠次数 n 是指激光脉冲光斑在直线移动过程中内部区域的最大累加烧蚀次数^[16],其公式如下:

$$n = (d \times f) / v \quad (3)$$

式中: d 为聚焦激光束直径(mm); v 为激光扫描速度(mm/s); f 为激光加工频率(Hz)。

当光斑重叠次数 n 过大时,累积灼烧的区域能量会加大,从而导致标刻焦化和毛刺,影响加工质量。当光斑重叠次数 n 过小甚至小于 1 时,累积区域变小,甚至为 0,使得有些区域加工不到,出现残留铝片层,从而导致加工质量有所降低。本实验控制扫描速度为 1 000 mm/s,光斑大小为 0.05 mm,当频率值为 22.5 kHz 时, $n=1.125$ 。由以上数据分析可知,此时的加工效果会更好。

2.2.3 扫描速度对加工质量的影响

控制其他条件不变,对激光扫描速度进行单因素实验,结果如图 11、图 12 所示。

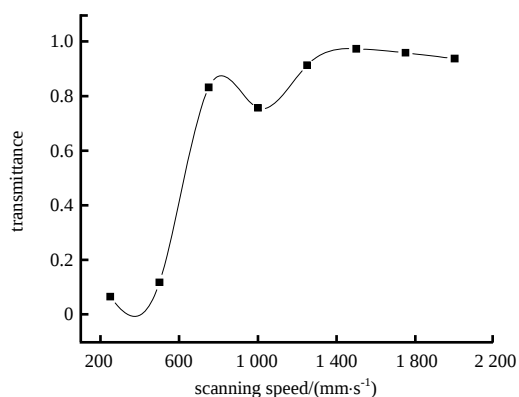


Fig.11 Transmittance at different scanning speeds

图 11 不同扫描速度下的透光率

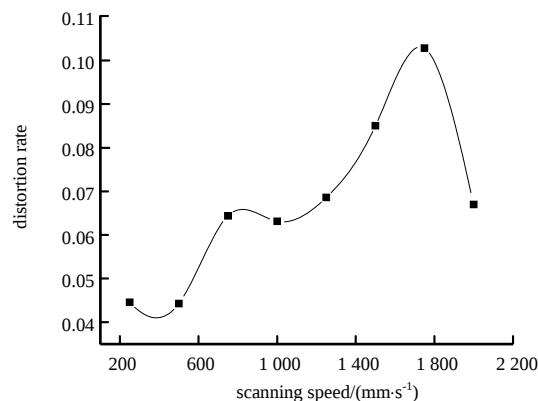


Fig.12 Distortion rate at different scanning speeds

图 12 不同扫描速度下的畸变率

由图 11~图 12 可知,随着扫描速度的增大,透光率刚开始呈现增长的趋势,当扫描速度达到 1 250 mm/s 以后,透光率基本持平。畸变率刚开始也呈现上升的趋势,当扫描速度达到 1 700 mm/s 以后,畸变率开始下降。可以看出,在扫描速度为 1 000~1 250 mm/s 之间时,这个区域透光性较高,畸变率大幅度下降,综合加工的质量最好。这是由于扫描速度过低时,单位面积上的光斑重叠次数会上升,从而导致打焦碳化,影响加工质量;当扫描速度逐次升高时,扫描的精确度会有所下降,导致畸变率陡然上升。

2.2.4 线间距对加工质量的影响

线间距是指两行相邻激光轨迹线之间的距离。在其他条件不变的情况下,对线间距进行单因素实验,结果如图 13、图 14 所示。由图 13~图 14 可知,随着线间距的增大,透光率刚开始呈增长趋势,当线间距达到 0.03 mm 以后,透光率基本持平,畸变率呈缓慢上升趋势。可以看出,线间距在 0.04 mm 左右时,透光率很高,畸变率基本不大,综合加工的质量最好。这是由于所用的激光器光斑大小为 0.05 mm 左右,当线间距过小时,也会出现纵向的光斑重叠堆积,导致单位加工面积上能量上升,出现打焦的缺陷;当线间距增大时,对透光率的影响会逐渐下降,边界的加工毛刺会增多,导致畸变率上升。

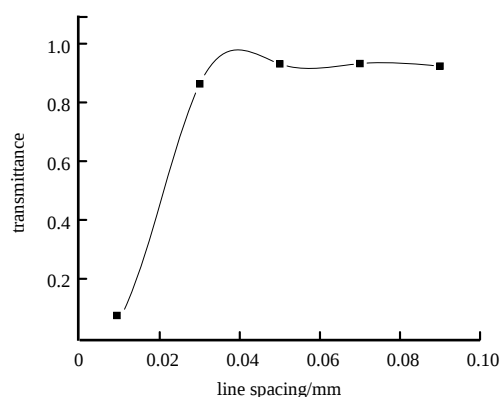


Fig.13 Transmittance at different line spacings

图 13 不同线间距下的透光率

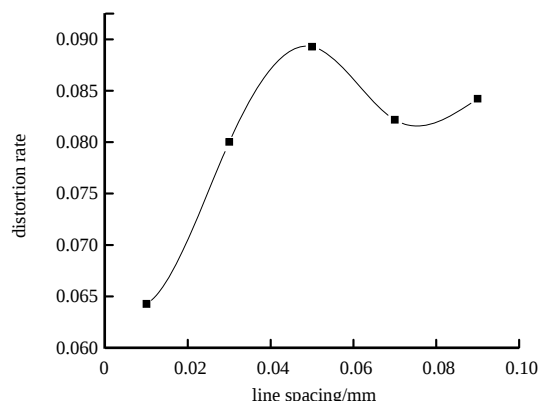


Fig.14 Distortion rate at different line spacings

图 14 不同线间距下的畸变率

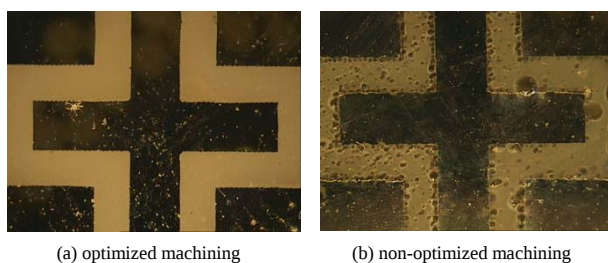
2.2.5 加工参数的优化

对本加工对象,在大量实验的基础上可以得出,在功率为理论功率值的 1.125~1.175 倍,频率值为 20~25 kHz,扫描速度为 1 000~15 00 mm/s,线间距为 0.03~0.05 mm 时,加工质量最为满意。为此,取这一范围的参数值加工的频率单元与原参数值频率单元进行比较,如图 15 所示。参数优化前后的透光率和畸变率比较如表 2 所示。图 16 为采用优化后的工艺参数加工的试件。

表 2 参数优化前后透光率与畸变率

Table 2 Transmittance and distortion rate before and after parameter optimization

	before	after
transmittance	0.78	0.96
distortion rate	0.07	0.02



(a) optimized machining (b) non-optimized machining

Fig.15 Machining elements before and after optimization

图 15 加工单元对比图

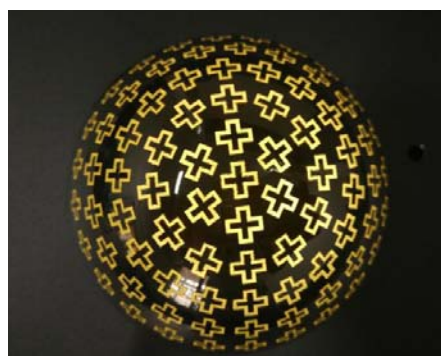


Fig.16 Complete drawing of the experiment piece

图 16 整体实验件加工完成图

3 结论

1) 通过对不可展 FSS 加工工艺的对比分析,采用自行搭建基于振镜式激光器的激光伺服加工系统加工不可展 FSS,可有效完成频率单元的加工。

2) 根据加工中存在缺陷类型的不同,运用透光率和畸变率这 2 个参数来综合标定 FSS 的加工缺陷率,为加工质量的量化处理提供了保障。

3) 通过单因素实验可得: 激光脉冲频率值为 20~25 kHz, 扫描速度为 1 000~1 500 mm/s, 线间距为 0.03~0.05 mm, 功率为理论功率值的 1.125~1.175 倍时, 可得到最佳的表面加工质量。

4) 采用优化后的工艺参数, 其加工缺陷率可控制在 5%之内, 即透光率大于等于 95%, 畸变率小于等于 5%。

参考文献:

- [1] 马金平,陈国瑞,李春晖. “十”字环形缝隙阵频率选择表面的频率特性研究[J]. 电子学报, 1997,25(4):125-127. (MA Jinping,CHEN Guorui,LI Chunhui. Study on frequency characteristics of frequency selective surface of cross ring slot array[J]. Acta Electronica Sinica, 1997,25(4):125-127.)
- [2] 高劲松. 基于立体打印技术制作曲面频率选择表面[J]. 实验室研究与探索, 2015,34(3):4-7. (GAO Jinsong. Manufacture of surface frequency selective surfaces based on stereo printing[J]. Laboratory Research and Exploration, 2015,34(3):4-7.)
- [3] DULL D L. Method for making precision radomes. United States patent:5650249[P]. 1997-7-22.
- [4] GREGOIRE D J. 3D conformal metasurfaces[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013(12):233-236.
- [5] WILLIAMS V G,MACFARLAND A B,SALADIN E C,et al. The reformed frequency selective surface:US7414593B2[P]. 2008.
- [6] 吕明云,祝明,王焕青,等. 复杂曲面FSS加工系统研究[J]. 航空学报, 2005,26(4):524-527. (LYU Mingyun,ZHU Ming,WANG Huanqing,et al. Study on FSS machining system of complex curved surface[J]. Journal of Aeronautics and Electronics, 2005,26(4):524-527.)
- [7] 王岳,祝明,王之栋,等. FSS曲面数字化加工系统及其关键技术的研究[J]. 微计算机信息, 2004,20(9):19-20. (WANG Yue,ZHU Ming,WANG Zhili,et al. Study on FSS curved surface digital machining system and its key technologies[J]. Microcomputer Information, 2004,20(9):19-20.)
- [8] 祝明,王焕青,王之栋,等. 复杂频率选择表面机器人数字化加工系统关键技术[J]. 航空制造技术, 2005(1):61-63. (ZHU Ming,WANG Huanqing,WANG Zhili,et al. Key technologies of complex frequency selective surface robot digital machining system[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2005(1):61-63.)
- [9] 方家萌. 不可展平率选择表面的加工方法研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016. (FANG Jiameng. Do not show flat rate of surface processing methods[D]. Dalian,China:Dalian University of Technology, 2016.)
- [10] 贺磊. 五轴联动激光加工机数控系统的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2011. (HE Lei. Research on numerical control system of five axes laser processing machine[D]. Xi'an,China:Xi'an University of Technology, 2011.)
- [11] 贾宏燕,高劲松,冯晓国. 新型单元的频率选择表面[J]. 光学精密工程, 2008,16(11):2076-2080. (JIA Hongyan,GAO Jinsong,FENG Xiaoguo. Novel element frequency selective surface[J]. Optics Precision Engineering, 2008,16(11):2076-2080.)
- [12] 王珊珊,高劲松,冯晓国,等. Y孔分形频率选择表面的设计[J]. 光学精密工程, 2011,19(5):959-966. (WANG Shanshan,GAO Jinsong,FENG Xiaoguo,et al. Design of Y hole fractal frequency selective surface[J]. Optics and Precision Engineering, 2011,19(5):959-966.)
- [13] 李小秋,高劲松. Y环单元FSS结构参数对频率特性的影响[J]. 光学精密工程, 2006,14(6):1070-1075. (LI Xiaoqi,GAO Jinsong. Y ring element influence of structural parameters of FSS on frequency characteristics[J]. Optics and Precision Engineering, 2006,14(6):1070-1075.)
- [14] 刘小明,俞俊生,陈晓东. 太赫兹波段频率选择表面的设计与测试[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):853-858. (LIU Xiaoming,YU Junsheng,CHENG Xiaodong. Design and measurement of terahertz Frequency Selective Surface[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):853-858.)
- [15] 赵帆. 振镜式激光打标系统及工艺参数分析[J]. 软件导刊, 2013,12(11):43-44. (ZHAO Fan. The galvanometer laser marking system and process parameter analysis[J]. Software Guide, 2013,12(11):43-44.)
- [16] 李建华,张郁天,伊焯,等. 激光标刻铝锭二维码图像灰度与加工参数计算模型[J]. 激光与光电子学进展, 2017,54(7):189-197. (LI Jianhua,ZHANG Yutian,YI Xuan,et al. Mathematical model of processing parameters and barcode image gray value marked by lasers on Aluminium ingot surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017,54(7):189-197.)

作者简介:



邢校菡(1992-), 男, 山西省平遥县人, 硕士, 主要研究方向为激光高效加工、曲面激光加工.email:1961361548@mail.dlut.edu.cn.

姜开宇(1971-), 男, 河南省洛阳市人, 副教授, 主要从事模具设计与制造、材料成型与加工、激光高效加工等方面的研究工作。