

# 深空探测卫星准直器跨尺度栅格结构的激光精密微焊接技术与装备

黄婷<sup>1\*</sup>, 杜伟哲<sup>1</sup>, 苏坤<sup>1</sup>, 张建超<sup>2</sup>, 李敬洋<sup>2</sup>, 祁俊峰<sup>2</sup>, 雷永平<sup>1</sup>, 武强<sup>1</sup>, 肖荣诗<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124;

<sup>2</sup>北京卫星制造厂有限公司, 北京 100190

**摘要** 深空探测是 21 世纪人类进行空间技术创新、太空资源探索与利用的重要途径, 准直器是深空探测器的关键部件。大深度、高空间分辨率栅格准直器的制造在国际上一直是个难题。本文以我国自主研制的硬 X 射线调制望远镜卫星(HXMT)中能望远镜高精度准直器为例, 介绍了自主研发的大深度、高空间分辨率准直器跨尺度栅格结构的激光精密微焊接制造方法、关键工艺技术及成套装备。对于壁厚为 70  $\mu\text{m}$ 、准直孔尺寸为 1.17 mm $\times$ 4.68 mm、深度为 67 mm 的钽片跨尺度栅格结构, 准直孔尺寸精度控制在 $\pm 20 \mu\text{m}$ 之内。

**关键词** 激光技术; 微细加工; 深空探测; 准直器; 跨尺度栅格; 激光精密焊接

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1002402

## 1 引言

深空探测是人类航天活动的重要方向和空间科学与技术创新、太空资源探索与利用的重要途径, 有助于人类对宇宙的起源、演变以及现状进行研究, 解决当天文学和物理学的重大前沿科学问题。1970 年美国发射“自由号”X 射线天文卫星, 开创了空间高能天文的新篇章<sup>[1]</sup>。时至今日, 世界各国都在不断推进高能天文的深空探测, 如美国的“钱德拉”X 射线空间望远镜(CXO)和核分光望远镜阵列高能天文卫星(NUSTAR)、欧洲的“牛顿”X 射线多镜面卫星(XMM)、日本的“天文-H”高能天文卫星(Astro-H)、国际 X 射线天文台(IXO)等<sup>[2]</sup>。深空探测也是我国航天工业的重要发展方向之一。当前我国深空探测以太阳系内空间为主, 主要包括月球、火星、金星、巨行星的卫星和彗星等, 兼顾宇宙空间的探索<sup>[3]</sup>。

准直器是深空探测器的关键部件, 如我国嫦娥月球探测器上的 X 射线谱仪中, 用于探测月球表面元素受激发产生 X 射线荧光, 确定月球表面主要元

素的含量和分布的即是带准直器的探测器阵列<sup>[4]</sup>。又如我国自主研制的第一颗硬 X 射线调制望远镜卫星(HXMT), 其主要科学目标是实现世界最高灵敏度和空间分辨率的硬 X 射线(20~250 keV)巡天, 发现大批超大质量黑洞和其他高能天体, 解析宇宙 X 射线背景等<sup>[5]</sup>。HXMT 所承载的有效载荷为带准直器的高能、中能、低能 X 射线望远镜以及空间环境监测器, 高精度的准直器是实现其科学目标的最为重要的部件之一。

本文首先介绍深空探测卫星准直器栅格制造技术的研究现状, 然后以 HXMT 中能望远镜高精度准直器为例, 介绍本课题组在准直器跨尺度栅格结构激光精密微焊接技术及装备开发方面取得的研究进展。

## 2 准直器原理及主要制造方法

准直器的功能是限制望远镜视场, 降低太空射线散射产生的本底, 从而提高探测器的灵敏度和分辨率。准直器的类型主要有多片式调制准直器<sup>[6-7]</sup>和一体式准直器<sup>[8-15]</sup>。多片式调制准直器的工作原

收稿日期: 2021-11-25; 修回日期: 2022-01-18; 录用日期: 2022-01-24

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104803)

通信作者: \*huangting@bjut.edu.cn; \*\*rsxiao@bjut.edu.cn

理是空间光被栅格挡光片调制,传输到下一片栅格挡光片的过程相当于低通滤波,如此反复通过所有栅格挡光片达到准直 X 射线的目的<sup>[16]</sup>。多片式调制准直器需要极高的装配精度,极易产生对准误差,从而对准直精度产生影响。一体式准直器根据结构不同分为一维栅格和二维栅格。一维栅格只能吸收一个方向的散射,因此应用于空间 X 射线探测的准直器通常采用二维栅格。

一体式二维栅格准直器的准直原理如图 1 所示。准直器栅格通常采用钼、钨、铅等高原子序数、大密度、可以吸收 X 射线的金属材料制造,来自各个方向的散射 X 射线中只有平行于准直器光轴的主辐射可以通过栅格,其余方向的 X 射线被栅格材料吸收,从而达到准直目的。

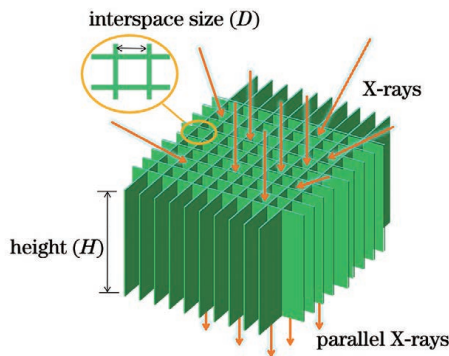


图 1 栅格准直器原理示意图

Fig. 1 Schematic of anti-scatter grid of collimator

二维栅格准直器的一个重要参数为栅格深宽比,即栅格高度  $H$  与栅格孔尺寸  $D$  的比值。随着深宽比的增加,能通过的 X 射线散射角度减小,探测器本底降低,准直器灵敏度和分辨率提高。另外,栅格壁应尽可能薄,以增加栅格孔的面积占比,提升准直器的效率。

目前深空探测卫星准直器主要采用框架式结构,壁厚较大的内部栅格框架和外壁通过铸造或激光增材制造等方法成形为一个整体,然后在栅格框架上加工微槽,垂直插入钨片或钼片构成准直器本体。美国的钱德拉 X 射线空间望远镜、欧洲的 XMM 牛顿望远镜及美国 Swift 硬 X 射线卫星的前端聚焦系统的栅格结构均采用这种方法制造,但无法获知具体的制造工艺技术细节。国内清华大学也曾开展过这方面的研究,但未见相关应用报道<sup>[17]</sup>。采用这种方法制造的准直器的栅格框架壁较厚,准直器的占空比和效率受限。

此外,准直器栅格结构的制造方法还包括 LIGA、电火花线切割等,如图 2 所示。LIGA 采用光刻、电铸和铸塑三个工艺步骤制造二维栅格结构<sup>[8-12]</sup>。LIGA 工艺设备成本高,工序复杂,所制造的栅格高度小,需要采用高精度定位销进行多层堆叠才能达到所需高度。英国卢瑟福实验室采用 LIGA 技术制造 X 射线准直器,并将其用于欧空局探月卫星 SMART-1 上的 X 射线能谱测量。但是

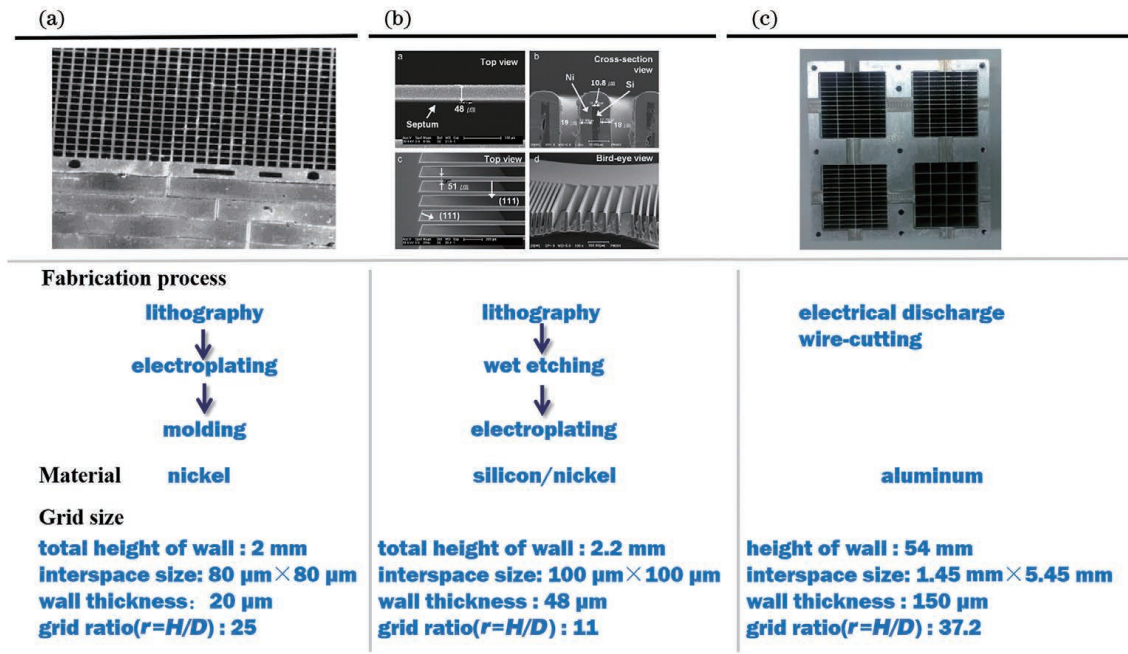


图 2 几种栅格准直器制造工艺方法。(a) LIGA 方法<sup>[8]</sup>; (b) 光刻-湿法刻蚀-电铸方法<sup>[13]</sup>; (c) 电火花线切割方法<sup>[15]</sup>

Fig. 2 Manufacturing technique for collimator grid structures. (a) LIGA method<sup>[8]</sup>; (b) lithography-wet etching-electroplating method<sup>[13]</sup>; (c) electrical discharge wire-cutting method<sup>[15]</sup>

准直器精度无法达到1角分的要求,且加工周期过长,完成单体准直器的加工需要15个月。采用光刻、湿法刻蚀和电铸工艺制造二维栅格结构<sup>[13-14]</sup>,相较于LIGA工艺,设备成本降低,但同样具有工艺复杂,所制造的栅格高度小等缺点。利用精密线切割加工直接切出准直器栅格,制造周期非常长、成本非常高,而且所加工的栅格壁厚受限,随着壁厚减小,加工更加困难<sup>[15]</sup>。

### 3 准直器栅格结构激光微焊接工艺技术研究

大深度、高空间分辨率栅格准直器的制造在国际上一直是个难题。我国自主设计的硬X射线调制望远镜卫星的中能望远镜高精度准直器由铝合金框本体和插装于本体上的若干钽栅格单元组成,其中栅格壁厚为70 μm,准直孔尺寸为1.17 mm×4.68 mm,深度为67 mm<sup>[18]</sup>。根据准直器的组成和结构特点,栅格单元的制造采用两个相互正交排列的钽片互插和激光焊接交叉点的技术方案,制造工艺流程如图3所示,包括钽片加工、栅格单元装配与焊接、将栅格单元插装到准直器外框本体中。本文仅介绍栅格单元激光焊接方面的相关内容。

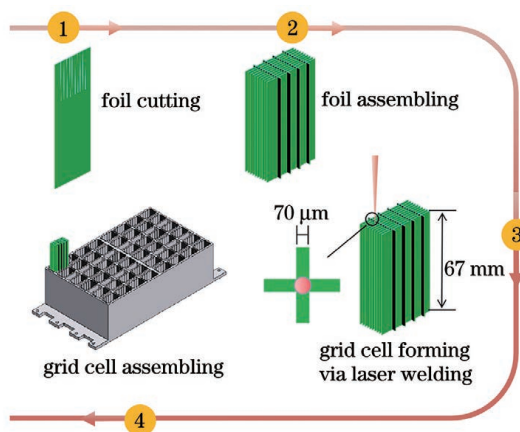


图3 准直器总体制造工艺流程

Fig. 3 Schematic of manufacturing flow for the collimator

#### 3.1 焊接工艺参数优化

准直器栅格结构极高的精度要求以及复杂的力、热、辐射等应用环境条件,对焊点尺寸、性能及焊接变形提出了严格要求。同时,准直器涉及的栅格单元和焊点数量众多(焊点数量总计6万余个),对焊接工艺的冗余度、稳定性要求也非常高。因此,必须精确控制焊接能量,同时又要有一定的工艺窗口范围。

准连续(QCW)光纤激光器是近年来迅速崛起的一种特殊形式的激光器,兼具连续光纤激光器和脉冲激光器的特点,通常是采用脉冲信号控制泵浦源电源的方式获得不同时间域特性的激光输出,因此激光的时域稳定性非常高,同时输出脉冲重复频率和脉冲宽度可控范围大,在激光精密焊接等领域具有良好的应用前景<sup>[19]</sup>。栅格单元的激光焊接采用IPG公司生产的YLM-150/1500-QCW准连续光纤激光器和自主研发的三维动态聚焦扫描振镜系统,焊接过程采用氩气保护。激光器波长为1070 nm,连续运转最大输出功率为150 W,脉冲运转最高脉冲功率为1500 W,脉冲宽度和功率可连续调节。振镜系统f-θ镜的焦距为255 mm、聚焦光斑直径为40 μm。激光焊接时的焊缝成形质量及组织性能与激光能量密切相关,调整激光能量的时空特性可以调控焊缝成形质量<sup>[20]</sup>。本实验通过改变激光脉冲宽度和功率来调整激光能量,研究激光脉冲宽度和功率对焊缝成形质量的影响,优化焊接工艺参数。图4所示为几种典型脉冲宽度和功率时的焊点形貌。可以看到,当激光功率为180~220 W、脉冲宽度为6~10 ms时,焊点饱满,成形良好,尺寸适中。当激光能量过低时,焊点尺寸过小,工艺冗余度差,易出现熔合不良现象。而当激光能量过高时,一方面焊点尺寸过大,影响准直器占空比,降低准直器效率;另一方面,焊接变形增加,栅格尺寸精度难以保证。

#### 3.2 焊接变形有限元分析

借助ABAQUS有限元计算工具,采用半球状焊接热源模型,考虑材料的非线性和结构的非线性,建立激光点焊热-力顺序耦合数值模型,提取焊点部位焊后残存固有应变作为初始位移载荷,进行弹性特征值失稳分析,研究栅格单元激光焊接变形发展规律,为优化栅格单元激光焊接制造工艺提供指导。在进行栅格单元激光焊接变形发展规律有限元分析之前,先通过实验确定点焊热源模型相关参数,然后进行单点焊接变形规律的有限元分析及实验验证,以确定有限元分析的有效性。

以十字交叉点焊结构数值模型为基础,建立整个栅格单元结构全过程失稳分析的有限元模型。在图5(a)所示模型中Y方向4个金属薄片的排列间隔为1.17 mm,Z方向4个金属薄片的排列间隔为4.68 mm,4个纵向构件和4个横向构件相互交叉固定,形成9个长和宽分别为1.17 mm和4.68 mm的长方形栅格。相对于焊点大小,整体栅格单元结构尺寸较大,模型中仅在焊点附近采用了较密的网

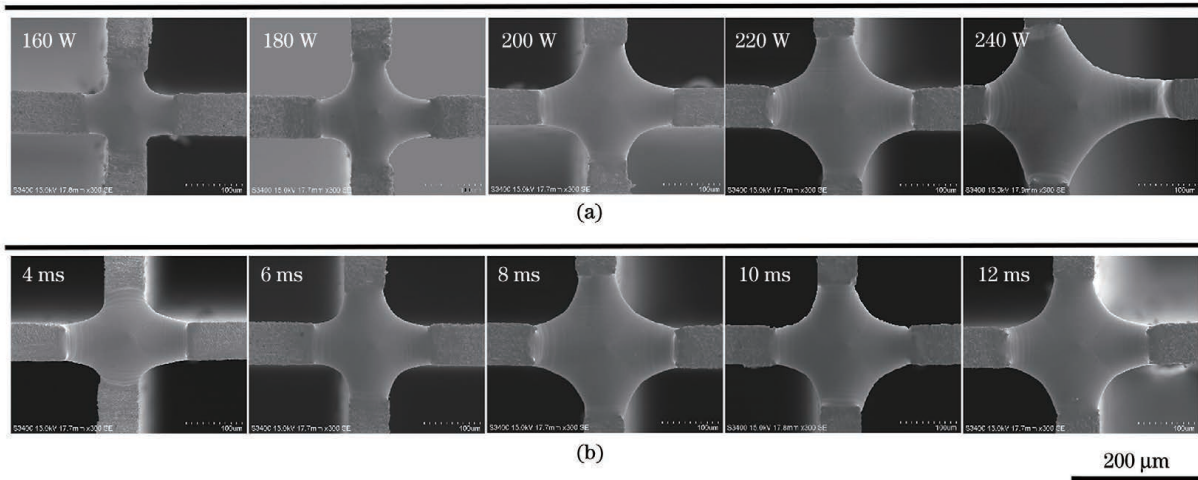


图 4 不同焊接条件下的焊点形貌。(a)脉冲宽度为 8 ms;(b)激光功率为 200 W

Fig. 4 SEM micrographs of laser welding spots under different welding conditions. (a) Pulse width is 8 ms; (b) laser power is 200 W

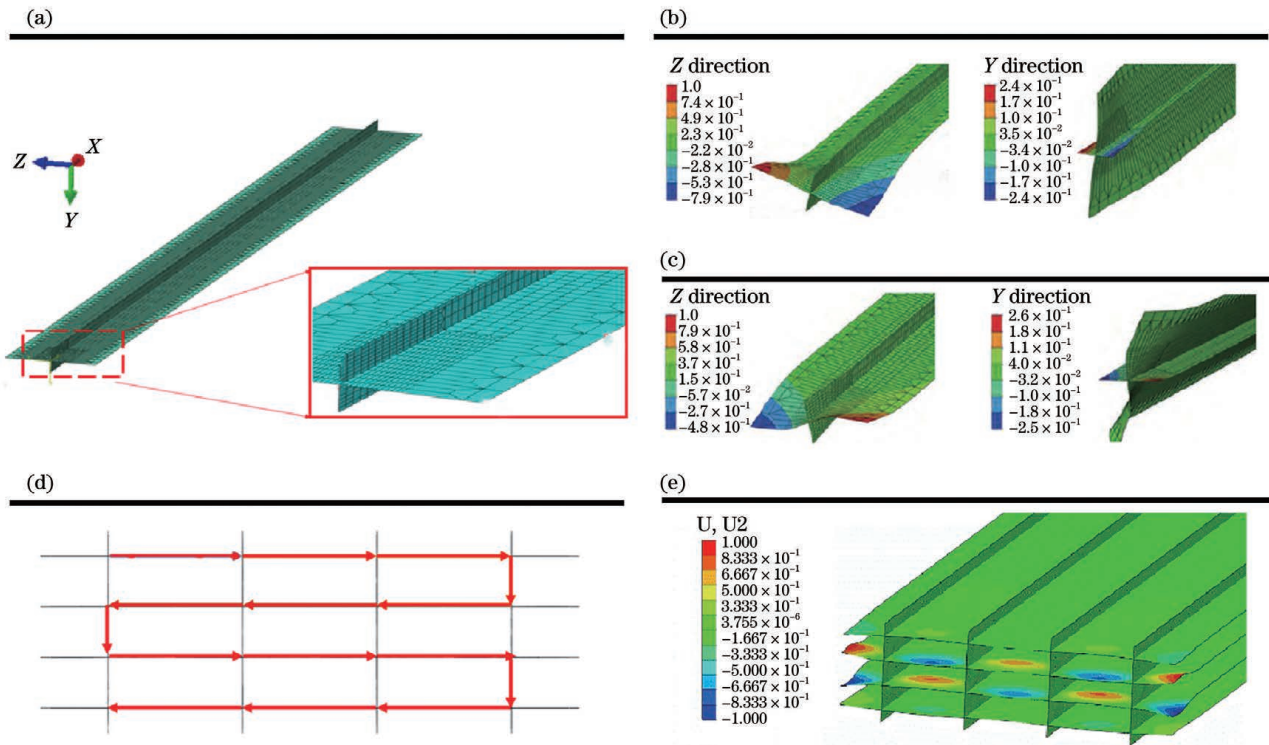


图 5 栅格单元结构激光点焊变形有限元分析。(a)十字交叉点焊结构数值模型;(b)(c)激光功率为 200 W 和 320 W 时十字交叉结构的屈曲变形;(d)(e)320 W 时栅格单元焊接顺序及其屈曲变形模式

Fig. 5 Finite element analysis of the deformation of laser spot welded grid cell. (a) Numerical model; (b)(c) buckling deformation at laser power of 200 W and 320 W; (d)(e) welding strategy and corresponding buckling deformation of the grid cell at laser power of 320 W

格,网格总数为 183224 个,节点总数为 113714 个。边界条件设定为施加在栅格结构底面十字交叉点边缘 4 个顶角点处的全约束。有限元计算中假设母材及焊缝为连续固体,塑性区材料行为服从塑性流动法则和硬化法则。热源分布函数为

$$q(x, y, z) = \frac{6\eta P}{\pi abc \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3X^2}{a^2} + \frac{-3Y^2}{b^2} + \frac{-3Z^2}{c^2}\right), \quad (1)$$

式中: $\eta$  为吸收率; $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别为半椭球的形状参数; $P$  为激光功率。根据焊点尺寸测量数据和仿真

计算结果,热源参数设定为  $\eta = 0.35$ 、 $a = b = 150 \mu\text{m}$ 、 $c = 380 \mu\text{m}$ 。

图 5(b)、(c)所示分别为采用特征值计算方法得到的脉冲宽度为 8 ms、激光功率为 200 W 和 320 W 的十字交叉结构单个焊点屈曲变形分布,其屈曲模态表现为焊点一侧上凸、一侧下凹的偏转变形,其中栅格孔长边(Z 方向)较短边(Y 方向)的变形更加明显,且激光功率越高,变形量越大。当激光功率为 200 W 时,两个方向的变形量最大值分别为  $5.56 \mu\text{m}$  和  $1.53 \mu\text{m}$ ;当激光功率为 320 W 时,两个方向的变形量最大值分别为  $7.48 \mu\text{m}$  和  $2.88 \mu\text{m}$ 。

对整个栅格单元而言,尽管最终的焊点位置是固定的,但不同的焊接顺序将改变焊接过程中各个固有应变区的相互耦合作用,进而影响最终的变形分布。采用图 5(d)所示的焊接顺序,激光功率为 320 W 时栅格单元最终变形模态见图 5(e)。由于多个焊点附近屈曲变形的相互耦合叠加,栅格单元中心区域的变形较边缘区域明显增大。

### 3.3 栅格单元装配与焊接一体化工装研制

有限元分析结果表明,准直器栅格单元激光焊接时极易产生失稳变形,为了保证准直孔的尺寸精度,激光焊接时必须采取有效的拘束措施。准直器栅格结构的制造,首先直接将两个方向的钽片垂直插装到带细缝的准直器本体方孔中,在装配钽片的同时,在栅格孔中插入事先加工好的有机玻璃块,支撑起栅格单元;然后将栅格单元两个端面的钽片交叉点焊接在一起,形成固定的栅格单元;最后采用化学溶剂将有机玻璃块腐蚀去除,形成最终的栅格孔。这种制造方法不仅产品精度难以保证,成品率低,而且工序复杂、制造成本极高。

本课题组设计并制造了一套栅格单元钽片互插装配、焊接及插装一体化工装。一体化工装在两个相互垂直的方向均具有平行细缝,将两个方向的钽片插装其中,且将钽片夹持在一体化工装的独立撑条之间,形成栅格结构,并进行焊接;完成栅格单元一个端面各交叉点的焊接后,将其整体导入另一个带细缝的一体化工装,焊接栅格单元另一个端面的钽片交叉点;之后连同一体化工装一起,将焊接好的栅格单元通过凸出于工装的钽片翅片插入并固定到准直器本体带细缝的方孔之中;最后拔出工装,完成栅格单元与准直器本体的插装。栅格单元焊接工艺流程如图 6 所示。采用一体化工装可以很好地控制装配误差和焊接变形,栅格结构准直孔尺寸精度可控制在  $\pm 20 \mu\text{m}$  之内,保证了产品精度,提高了成品

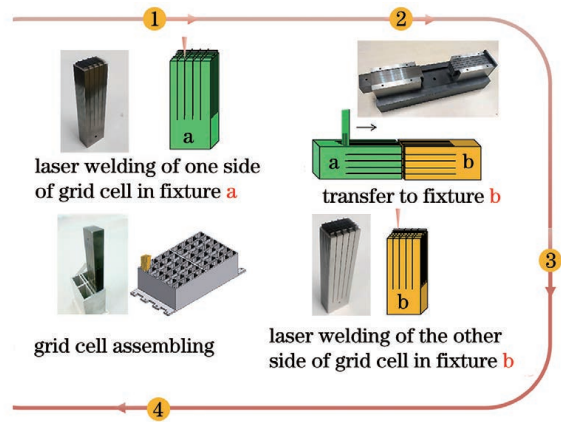


图 6 栅格单元焊接工艺流程

Fig. 6 Laser welding and assembling of grid cell

率,同时极大地降低了制造成本。

## 4 准直器跨尺度栅格结构激光精密微焊接装备研制

准直器栅格单元尺寸、准直孔尺寸和壁厚分别在厘米、毫米和微米量级,属于典型的跨尺度精密构件。但是,受限于加工方法和制造成本,钽片和工装的加工都存在一定的尺寸误差,使得装配后的栅格单元钽片交叉点位置(即焊接位置)存在  $\pm 20 \mu\text{m}$  之内的偏差。为了保障栅格结构激光焊接接头质量、控制焊接变形、提高焊接效率,一方面需要精确控制激光作用点的位置和输入的热量,另一方面需要实现激光束在不同焊点之间的快速跳转。为此,本课题组提出一种在线视觉检测定位、高精度动态聚焦扫描振镜与精密数控机床联动结合的技术方案,研制出准直器栅格单元精密激光焊接装备,该装备的组成原理如图 7(a)所示,主要部件包括 YLM-150/1500-QCW 准连续光纤激光器、自主开发的高精度动态聚焦扫描振镜系统、精密 X/Y 运动平台、Z 支撑架及运动轴、高精度 CCD 视觉检测系统、计算机控制系统等。自主开发的动态聚焦扫描振镜系统的光路设计结合了物镜前振镜扫描和物镜后振镜扫描的特点和优势,在二维振镜基础上增加了动态聚焦镜组,原理如图 7(b)所示,其中聚焦光斑直径为  $40 \mu\text{m}$ ,扫描范围为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ,最大扫描速度为 20 m/s、重复定位精度为  $5 \mu\text{rad}$ ,不仅实现了激光束在栅格单元钽片交叉点之间快速跳转的精确定位点焊,还可以根据需要快速变换焦点位置,改变光斑大小。

图 8(a)所示为卫星准直器栅格结构超精密激光焊接装备整机。为了保障装备系统运行平稳可

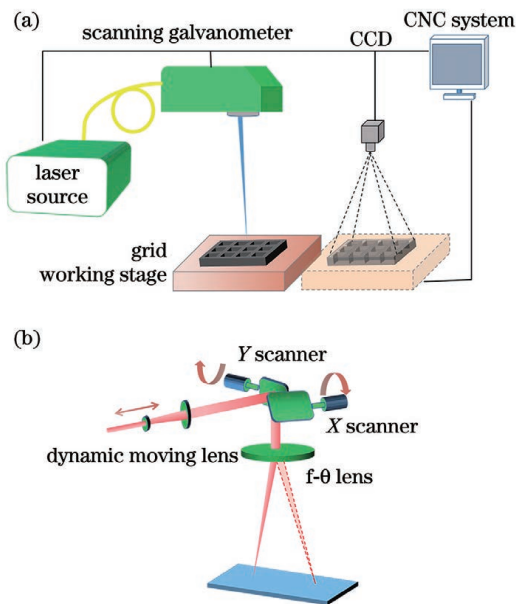


图 7 焊接装备组成及动态聚焦扫描振镜原理示意图。

(a) 焊接装备组成; (b) 动态聚焦扫描振镜

Fig. 7 Schematic of welding equipment and dynamic focusing galvanometer. (a) Welding equipment; (b) dynamic focusing galvanometer

靠, 采用大理石床身, 将 X/Y 运动平台固定在大理石平台上, Z 轴固定在大理石龙门横梁上。X/Y 运

动平台采用紧凑型十字交叉重叠式结构, 采用无铁芯直线电机作为驱动电机, 这种驱动方式具有传动精度高、驱动速度范围宽、零传动误差、零反向间隙、良好的加减速性能和较高的定位精度等优点, 同时还可以显著简化滑台机械结构设计, 减轻滑台移动部件的质量。考虑到栅格焊接点处于同一个平面上, 焊接时 Z 轴无需运动, 因此 Z 轴电机选用高精度自锁伺服电机。将动态聚焦扫描振镜主体部分安装在 Z 轴支架上。各轴均安装有非接触式光栅尺进行闭环控制, 以进一步提高机床运动精度。高精度视觉检测系统采用全景和近景双 CCD 布局, 全景 CCD 用于获取栅格单元的整体图像, 根据栅格单元结构尺寸, 推算出栅格各交叉点的大致坐标; 近景 CCD 用于获取栅格交叉点的图像, 确定焊点的精确位置, 判断焊点质量。

焊接过程如图 8(b) 所示。开始焊接前, 机床运动到高精度 CCD 视场下, 对焊接位置进行精确定位; 然后机床运动到高精度动态聚焦扫描振镜系统, 扫描振镜系统对激光束进行快速、精准的运动控制, 实现栅格单元各焊点的快速、精密焊接; 焊接完成后, 机床再次回到 CCD 视场下, 以对焊点质量进行检测和判别。图 8(c) 为准直器部件实物照片, 使

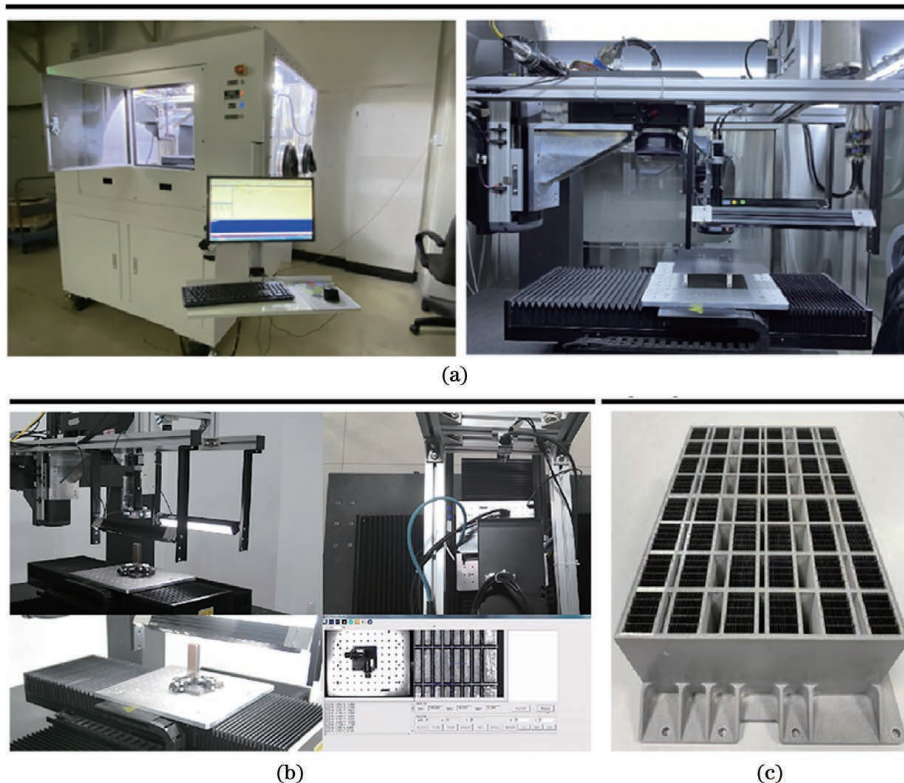


图 8 装备整机及准直器实物。(a) 装备实物; (b) 焊接过程; (c) 准直器部件

Fig. 8 Photos of laser precision welding equipment and collimator. (a) Welding equipment; (b) welding process; (c) collimator component

用 OPTIV 影像测量仪对准直器部件栅格特征尺寸进行测量,99%以上的准直孔尺寸偏差控制在 $\pm 20\ \mu\text{m}$ 之内,完全满足准直器使用性能要求。同时准直器部件通过了振动、噪声、热循环等环境试验考核,焊点质量可靠。

## 5 结 论

采用钼片装配、激光焊接与栅格单元插装一体化工装,优化焊接工艺和焊接顺序,可以实现大深度、高空间分辨率准直器栅格结构的激光精密焊接制造。对于壁厚为 $70\ \mu\text{m}$ 、准直孔尺寸为 $1.17\ \text{mm}\times 4.68\ \text{mm}$ 、深度为 $67\ \text{mm}$ 的钼片栅格结构,准直孔尺寸精度可以控制在 $\pm 20\ \mu\text{m}$ 之内。采用在线视觉检测定位、高精度动态聚焦扫描振镜与精密数控机床联动结合的技术方案,研制出准直器跨尺度栅格结构激光精密微焊接装备,实现了准直器跨尺度栅格结构的高效激光精密微焊接与检测。

## 参 考 文 献

- [1] 卢方军,徐玉朋,张帆,等.硬X射线调制望远镜卫星及其科学目标[J].现代物理知识,2016,28(4):4-11.  
Lu F J, Xu Y P, Zhang F, et al. Hard X-ray Modulation Telescope satellite and its scientific objectives[J]. Modern Physics, 2016, 28(4): 4-11.
- [2] 张双南.世界空间高能天文发展展望[J].国际太空,2009(12):6-12.  
Zhang S N. Development prospect of world space high energy astronomy[J]. Space International, 2009 (12): 6-12.
- [3] 欧阳自远,李春来,邹永廖,等.深空探测的进展与我国深空探测的发展战略[J].中国航天,2002(12):28-32.  
Ouyang Z Y, Li C L, Zou Y L, et al. Progress of deep space exploration and development strategy of deep space exploration in China[J]. Aerospace China, 2002(12): 28-32.
- [4] 王焕玉,张承模,陈勇.嫦娥一号卫星X射线成像谱仪系统[J].深空探测研究,2007(1):19-23.  
Wang H Y, Zhang C M, Chen Y. X-ray imaging spectrometer system of Chang'e-1 satellite[J]. Deep Space Exploration, 2007(1): 19-23.
- [5] 潘腾,卢方军,倪润立,等.硬X射线调制望远镜卫星系统设计与技术成就[J].航天器工程,2018,27(5):1-8.  
Pan T, Lu F J, Ni R L, et al. HXMT satellite system design and technical achievements[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(5): 1-8.
- [6] Bradt H, Garmire G, Oda M, et al. The modulation collimator in X-ray astronomy[J]. Space Science Reviews, 1968, 8(4): 471-506.
- [7] Hoekstra R, D'Arnaud T E, van Beek H F. Optical alignment of an X-ray collimator[J]. Applied Optics, 1981, 20(20): 3630-3634.
- [8] Tang C M, Stier E, Fischer K, et al. Anti-scattering X-ray grid[J]. Microsystem Technologies, 1998, 4(4): 187-192.
- [9] Kevin F, Bidhan C, Henry G, et al. Fabrication of two-dimensional X-ray antiscatter grids for mammography[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4145: 227-234.
- [10] Makarova O V, Yang G H, Tang C M, et al. Fabrication of collimators for gamma-ray imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5539: 126-132.
- [11] Cho H, Kim K, Lee B, et al. Physical characteristics of precise antiscatter grids fabricated with a sawing process for applications to digital X-ray imaging[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2008, 52(2): 243-248.
- [12] Makarova O V, Zyryanov V N, Divan R, et al. Fabrication of grids and collimators using SU-8 as a mold[J]. Microsystem Technologies, 2004, 10(6/7): 536-539.
- [13] Jeong D H, Kim J M, Noh D Y, et al. Micromachined anti-scatter grid fabricated using crystalline wet etching of (110) silicon and metal electroplating for X-ray imaging[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2011, 652(1): 846-849.
- [14] Lehmann V, Rönnebeck S. MEMS techniques applied to the fabrication of anti-scatter grids for X-ray imaging[J]. Sensors and Actuators A, 2002, 95(2/3): 202-207.
- [15] 杨三强,王冬,陆国栋,等.一体式栅格准直器线切割加工技术[J].金属加工(冷加工),2015(17):30-34.  
Yang S Q, Wang D, Lu G D, et al. Wire cutting technology of integrated grid collimator[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2015(17): 30-34.
- [16] 贾辉,姚勇,施伟杰.机械准直器的发展[J].光学技术,2007,33(S1):182-184.  
Jia H, Yao Y, Shi W J. The development of mechanical collimator[J]. Optical Technique, 2007, 33(S1): 182-184.
- [17] 钟敏霖,杨林,刘文今,等.激光快速直接制造W/Ni合金太空望远镜准直器[J].中国激光,2004,31(4):482-486.  
Zhong M L, Yang L, Liu W J, et al. Laser direct manufacturing W/Ni telescope collimation component

- [J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(4): 482-486.
- [18] 曹学蕾, 姜维春, 张万昌, 等. 硬 X 射线调制望远镜卫星中能望远镜设计与验证[J]. 航天器工程, 2018, 27(5): 127-133.  
Cao X L, Jiang W C, Zhang W C, et al. Design and verification of medium energy telescope onboard HXMT satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(5): 127-133.
- [19] 张汉伟, 洪哲健, 奚小明, 等. 准连续光纤激光器实现高亮度 8 kW 峰值功率输出[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2116001.  
Zhang H W, Hong Z J, Xi X M, et al. Quasi CW fiber laser achieves high brightness 8 kW peak power output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2116001.
- [20] 张迪, 赵琳, 刘奥博, 等. 激光能量对激光焊接接头熔化形状、气孔和微观组织的影响及其调控方法[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1502005.  
Zhang D, Zhao L, Liu A B, et al. Understanding and controlling the influence of laser energy on penetration, porosity, and microstructure during laser welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1502005.

## Laser Microwelding Technology and Equipment for Cross-Scale Collimator Grid of Deep-Space Exploration Satellite

Huang Ting<sup>1</sup>, Du Weizhe<sup>1</sup>, Su Kun<sup>1</sup>, Zhang Jianchao<sup>2</sup>, Li Jingyang<sup>2</sup>, Qi Junfeng<sup>2</sup>,  
Lei Yongping<sup>1</sup>, Wu Qiang<sup>1</sup>, Xiao Rongshi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

<sup>2</sup> Beijing Spacecrafts Manufacturing Factory, Beijing 100190, China

### Abstract

**Objective** Deep-space exploration is important to innovate space technology and explore space resources. A collimator is a key component of a deep-space probe; however, producing a high spatial resolution collimator is challenging. Currently, the deep-space exploration collimator grid is mostly composed of frames. Casting or laser additive manufacturing is used to build the inner grid structure, which is quite thick, as well as the entire outside wall. The grid frame is then used to create the microgrooves. Finally, the collimator grid is formed by inserting tungsten or tantalum foils into the microgrooves. Furthermore, collimator grid manufacturing technologies include LIGA and electrical discharge wire-cutting. These approaches may result in thick walls, limiting the collimator's duty ratio and efficiency, or result in a longer manufacturing period, higher cost, and a smaller grid height. The hard X-ray modulation telescope satellite (HXMT), which China developed independently, is used as an example to present our research progress on laser microwelding technology and equipment development for the cross-scale collimator grid, which is funded by the National Key Research and Development Program.

**Methods** The laser spot welding experiment was conducted first to identify the welding parameters based on the structural features of the HXMT collimator. The grid deformation finite element analysis was then performed to provide laser welding guidance. Finally, laser welding equipment was designed and validated to meet the grid cell laser welding requirements.

**Results and Discussions** The HXMT collimator is composed of an aluminum alloy frame with many tantalum grid cells placed into it. Laser spot welding junction points formed by two orthogonal arrays of tantalum foils are used to create the grid cell. The fabrication of tantalum foils, grid cell assembly and welding, and grid cell insertion into the collimator frame are all part of the manufacturing process (Fig. 3). For laser welding grid cells, an IPG YLM-150/1500-QCW quasicontinuous fiber laser and a self-developed three-dimensional (3D) dynamic focusing galvanometer are employed. With a beam diameter of 40  $\mu\text{m}$ , laser power of 180–220 W, and pulse width of 6–10 ms, a well-formed welding spot is created (Fig. 4). The results of the finite element analysis show that instability deformation is common during the laser welding of the collimator grid cell (Fig. 5). To address this issue, an integrated set combining tantalum foil assembly and collimator grid welding/insertion is developed (Fig. 6). The assembly error and welding deformation are well-controlled, resulting in the collimating hole's dimensions accuracy being within



$\pm 20 \mu\text{m}$ . The self-designed laser microwelding equipment consists primarily of a quasicontinuous fiber laser, a self-developed 3D dynamic focusing galvanometer, an  $X/Y$  motion platform with a  $Z$  support frame and motion axis, a CCD vision inspection system, and a computer control system, among other components (Fig. 7). Before welding, the stage moves to the CCD field of view to locate the welding point; next, the stage moves to the galvanometer, which can quickly and accurately regulate the movement of the laser beam, allowing for the rapid and precise welding of each grid cell's welding spot. After welding, the stage returns to the CCD field of view to detect and evaluate welding quality (Fig. 8).

**Conclusions** High-efficiency laser microwelding and detection of large depth and high spatial resolution collimator grid have been realized using linkage technology of online visual inspection, dynamic focusing galvanometer, and CNC machine as well as the development of an integrated set to combine tantalum foil assembly and collimator grid welding/insertion, as along with the development of laser microwelding equipment and welding process. The accuracy of collimating hole size can be controlled within  $\pm 20 \mu\text{m}$  for the tantalum collimator grid with  $70 \mu\text{m}$  wall thickness,  $1.17 \text{ mm} \times 4.68 \text{ mm}$  collimating hole size, and  $67 \text{ mm}$  depth.

**Key words** laser technique; microfabrication; deep-space exploration; collimator; cross-scale grid; laser microwelding