

文章编号:1007-1180(2011)11-0008-05

激光加工技术在空间光机结构制造中的应用

张 雷, 姚劲松, 邢利娜, 贾继强, 金 光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 光机结构是空间遥感器的重要组成部分, 其结构特性直接决定了遥感器的成败。大型遥感器光学系统要求光机结构加工精度高、刚度高、稳定性高, 随着光机结构尺寸增大, 其制造难度也越来越大。本文以某遥感器结构件为研究对象, 分析了光学系统对大型光机结构的要求, 阐述了现有加工手段的应用情况, 讨论了目前光机结构制造过程中存在的周期长、工艺过程复杂、可重复性差、加工成本高等缺点。目前, 激光加工技术已经日益成熟, 本文从激光快速成型、激光切割、激光焊接、激光修复、激光表面处理等 5 个方面探讨了激光加工技术在空间遥感器光机结构加工领域应用的可行性。通过分析可知, 使用激光加工技术将大大提高光机结构的生产效率, 缩短产品研发周期, 并有利于保证产品质量和可靠性, 同时对改进遥感器光机结构制造工艺和扩大激光加工技术的应用领域具有重要意义。

关键词: 光机结构; 激光加工技术; 制造工艺; 可行性

中图分类号: V243.5

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112811.0008

Application of Laser Processing Technology to Manufacturing Space Opto-mechanical Structures

ZHANG Lei, YAO Jin-song, XING Li-na, JIA Ji-qiang, JIN Guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: Optical and mechanical structures including supporting structures and optical elements are important parts of large space remote sensors, their characteristics determine the imaging quality of remote sensors. So, to meet the

*基金项目: 国家863计划项目 (No.2007AA12Z113)

requirements of optical systems of large space remote sensors, high precision, high stiffness and high stability are needed. At the same time, as the size of optical and mechanical structure is larger, the manufacture difficulty degree is higher. In this paper, the structures of a large space remote sensors were studied. The requirements of the optical system were analyzed, the application of the existent processing means was described, and the shortcomings in the manufacturing process, such as long period, complex process, poor reproducibility and high cost were discussed. At present, laser processing technology has become increasingly mature. Laser rapid prototyping, laser cutting, laser welding, laser repairing and laser surface treatment were described in this paper to discuss the application feasibility in the manufacturing of optical and mechanical structures. The results showed that it could improve production efficiency, reduce development period and assure quality and reliability, and it was important to make the manufacturing process of the optical and mechanical structures in space remote sensors better and expanded the application field of laser processing technology.

Keywords: optical and mechanical structure; laser processing technology; manufacturing process; feasibility

1 引言

遥感器光机结构良好的力学特性是遥感器获得良好图像的保证。随着空间科学技术的发展,我国空间遥感器正向着高分辨率、长焦距、大型化的方向发展,遥感器光学系统对光机结构的要求也愈加严格。新材料和新的加工技术已越来越多地应用到空间遥感器光机结构的研制过程中。由于光机结构用途的特殊性,所选择的材料和结构形式与常规机械构件往往差别较大,相应的加工方式与普通机械加工也有所不同。目前,光机结构主要通过铸造、切割、铣磨成型,通过精密机械切削、精密磨削、高速加工、超声加工和人工研磨等完成精加工。随着光机结构尺寸增大和精度的提高,其制造难度也越来越大,现有光机结构制造手段已逐渐不能满足遥感器发展的要求^[1]。

激光加工技术是一种将光、机、电技术相结合的先进制造技术,具有与工件之间无接触、热影响小、加工过程易于控制、速度快、生产效率高等特点。目前,激光加工已广泛应用于航空、航天、造船、汽车制造、电子、医疗等领域。在发达国家,50%~70%的汽车零件采用激光加工。在我国,华中科技大学激光技术国家重点实验室的江超等人探讨

了激光微加工应用于光学材料的可能性,哈尔滨工业大学精密工程研究所的赵清亮等人研究了飞秒激光加工 SiC 的相关课题,清华大学的杨金龙教授组织开展了激光加工陶瓷坯体工艺方面的研究^[2-4]。但是,我国还没有将该技术应用到空间遥感器精密光机结构加工中的先例。本文从光学系统对光机的要求和现有加工手段出发,分析了现有制造技术存在的一些缺点,探讨了利用激光加工空间光机结构的可行性。

2 遥感器对光机结构的要求及传统加工技术

遥感器对光机结构的主要要求体现在以下几个方面:质量、接口的安装精度、刚度、强度、动态特性(如基频等)、长期稳定性等。本文以某遥感器支撑结构件为例进行说明,如图1所示。具体设计基本要求包括以下6个方面^[5]。

(1) 采用轻质的、刚度高、稳定性好的材料。遥感器常用光学元件材料包括 SiC、微晶玻璃、熔石英和铍等,主要机械结构材料包括钛合金、碳纤维、铝基复合材料和铝等。钛合金和铝基复合材料的比刚度均较高、工艺稳定,在遥感器结构中应用较为成熟,图1中构件采用钛合金材料。

(2) 质量要轻,满足减少发射成本、降低飞



图1 某遥感器钛合金支撑结构件

行器平台负载的要求。图1的埋块尺寸为280 mm×130 mm×120 mm, 最薄壁厚仅为2 mm, 质量仅1.2 kg。遥感器的反射镜外径达 $\Phi 650$ mm, 最薄壁厚仅4 mm, 质量仅19 kg。

(3) 加工精度要求高, 难度大。结构件的加工精度直接影响到遥感器的装调进度, 并且加工精度不高还将给遥感器带来残余应力, 不利于整个遥感器像质的长期稳定。图1中埋块要求平面度达到 $2\ \mu\text{m}$, 平行度达 $3\ \mu\text{m}$, 粗糙度达 $0.4\ \mu\text{m}$ 。

(4) 结构刚度和强度良好, 保证能适应严酷的运载力学环境, 保证光学元件面形精度和相对位置变化不超出允许值。

(5) 具有合理的动态刚度, 结构分系统要求图1中构件基频要达到800 Hz。

(6) 尺寸长期稳定性要好。要求加工过程应力小, 变形小。

机械结构件通过铸造、线切割、铣削、车削等工艺完成成型。SiC反射镜坯体的成型工艺主要有热压烧结、反应烧结、SiC和化学汽相沉积等^[6]。精密切削加工主要用于遥感器机械支撑结构中铜、铝、钛合金等相对较软金属的精密加工。磨削和超声加工技术可以实现钢、铝基复合材料等硬脆材料结构的高精度平面加工。机械研磨是遥感器支撑结构重要结构件的核心加工过程之一, 主要用于结构件最终的基准面、安装面等位置的精加工。利用现有加工技术完成了图1中结构件的加工, 其周期达8个月, 中间返工2次。可见, 传统加工技术的效率低, 不可控的因素较多, 无法满足现在航天遥感器型号越来越多、尺寸越来越大和研制周期越来越短的要求。

3 激光加工技术在光机结构研制中应用的可行性

3.1 激光加工技术的特点

激光加工是利用高强度的激光束, 经光学系统聚焦, 并将加工工件置于激光束焦点附近, 通过激光束与加工工件的相对运动来实现对加工工件的热加工。具有如下主要特点^[2-4]:

(1) 几乎所有的金属材料和非金属材料, 如钢材、陶瓷、玻璃、硬质合金及复合材料都可以加工;

(2) 激光加工为无接触加工, 激光与工件之间没有力的作用, 热影响小, 后续加工量小;

(3) 易于计算机控制, 可靠性和成品率高;

(4) 加工速度快, 可很方便地进行任何复杂形状的加工, 生产效率高, 节约能源;

(5) 加工精度高, 在一般情况下均优于其他传统的加工方法, 如电火花加工、金属丝线切割加工等。

3.2 主要激光加工技术

3.2.1 激光快速成形

激光快速成形技术的工作原理如图2所示, 其制造过程简化为零件的计算机设计、激光立体成形和少量后期处理三步, 具有产品研制周期短、加工速度快, 可实现制造的智能化和批量化, 产品的组织和性能优越, 可加工各种复杂零件等优点^[9]。以西北工业大学凝固技术国家重点实验室的黄卫东为代表的科研工作者致力于我国激光快速立体成形技术的研究工作, 目前已取得良好进展, 获得了形状较

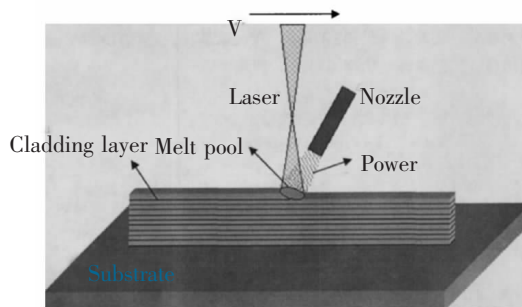


图2 激光快速成形原理示意图

为复杂的金属零件,且一些部件的综合力学性能同锻件相当,如图3所示。



图3 镍基高温合金双合金轴承座后机匣

3.2.2 激光精密切割

激光精密切割具有切口狭窄(最小可达0.1 mm)、边沿质量好、噪声小、节省材料、速度快、割缝粗糙度好的特点,可切割玻璃、金属、陶瓷等多种材料,已广泛应用于造船、汽车、化工等领域。滕杰等人研究了纯铝的切割工艺,切缝处的粗糙度达 $10\sim 20\mu\text{m}^{[10]}$ 。目前,激光精密切割在厚板切割方面取得新进展,CARROLL^[11]报道了5~6 kW COIL激光器切割A36低碳钢,最大切割厚度可达100 mm,切割速度为0.12~1.0 m/min,氧气辅助切割质量逊于氮气辅助切割。铝板切割深度可达41 mm,切割速度为0.03~1.50 m/min。

3.2.3 激光焊接

激光焊接(Laser welding)在20世纪70年代已取得快速进展,其中最有代表性的是激光深熔焊技术。激光深熔焊的原理如图4所示,当足够高功率密度的激光束作用在材料表面时,会在极短时间内使材料蒸发形成狭长的小孔,激光在小孔内部反射,能量被小孔完全吸收,使得小孔周围的材料快速熔化。随着激光束的移动,小孔也向前移动,小孔移开之后留下的熔融材料不断凝固,最终形成焊缝^[3,12]。该技术对焊件装配的精度要求高,激光能量利用较低,加工精度较低,常用于初加工或半精加工,但加工效率比传统焊接技术快很多,且焊点小、应力小。

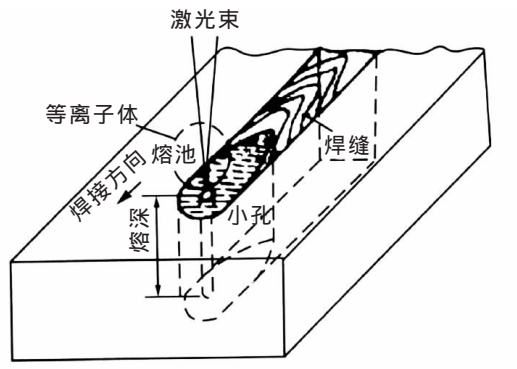


图4 激光深熔焊技术原理示意图

3.2.4 激光修复

激光成形修复技术和激光立体成形技术原理基本相同,侧重的方向有所不同。激光成形修复的技术原理是:以损伤零件为基体,通过计算机控制激光头、送粉喷嘴(或送丝头)和工作台按指定空间轨迹运动,在待修复区域逐层堆积粉末或丝材,最后生成与缺陷部位近形的三维实体,在不破坏零件本体性能的前提下,恢复零件的几何性能和力学性能,使损伤零件再次达到使用要求。该技术克服了传统修复技术的一些缺点,如结合力弱、修复位置难以控制等,可以获得较好的力学性能,不受零件复杂程度和厚度的限制^[13]。

3.2.5 激光表面改性技术

激光表面改性技术包括:激光表面相变硬化、激光表面合金化与熔覆、激光表面非晶化与微晶和激光冲击强化等。该技术可以增加零件表面的耐磨性能、耐热性能、抗疲劳强度与抗蚀性^[14]。

3.3 遥感器光机结构制造中的应用前景分析

(1) 采用激光快速成型技术进行预成型,图1中的结构件可以大大减少加工周期。很多高度轻量化的遥感器支撑结构件,如空心轴系、大型金属承力筒组件、离轴遥感器中大型钛合金安装基板等,均有采用该技术的潜力。

(2) 激光切割可应用于遥感器机械和光学结构件的下料、外形加工等过程,可使生产效率提高3~5倍。

(3) 遥感器机械结构一般壁厚薄,要求焊接工

艺的焊点小、焊接强度高、焊接对周围热影响区小,特别适合采用激光焊接。遥感器中常用的钛合金在高温下具有极强的晶粒长大倾向,采用传统的焊接方法,焊接热影响区很大,焊缝内部晶粒粗化现象严重。因此,能量密度高、热输入低的激光焊接是获得遥感器高强度钛合金焊接构件的首选。

(4) 遥感器主要结构件均采用高度轻量化的结构形式,在加工过程中难免会出现一定的失误,以现有加工手段往往选择将这些半成品件或近终加工件报废,严重影响产品研制进度。激光成形修复技术可克服传统修复技术的多种不足,获得良好的组织和性能,使遥感器复杂结构件的修复成为可能。

(5) 遥感器运动部件中常采用钛合金等金属作为轴系材料,使用激光表面改性技术可以使构件表面形成渗氮的基体或化合物复合薄膜,可以大大提

高遥感器运动部件的使用寿命。

4 结 论

随着空间遥感技术的迅速发展,对光机结构的要求越来越苛刻,传统的铸造、铣削、切削和磨削等手段已不能满足加工周期和精度的要求。激光加工是一种新兴的先进技术,发展迅速,具有精度高、适用范围广、加工效率高等优点,在汽车、化工和电子等很多领域已得到广泛应用。将激光加工技术中快速成型、精密切割、焊接、修复和表面热处理应用到空间遥感器光机结构加工中可以大大提高加工效率和可靠性,并且可以实现某些大型光机结构件的高性能修复,对改进光机结构生产工艺、缩短遥感器研制周期具有积极意义。

参考文献

- [1] 陈长征,赵玲玲,刘磊,等.空间遥感器支撑桁架的模态计算与试验[J].光学精密工程,2007,15(8):1164-1169.
- [2] 宋威廉.激光加工技术的发展[J].激光与红外,2006,36(9):755-758.
- [3] 龚涛,缪凯,牟文广,等.激光加工技术在造船工业上的应用[J].武钢技术,2009,47(5):58-62.
- [4] 邱星武.激光技术在材料加工领域的发展及应用[J].稀有金属与硬质合金,2010,38(1):60-63.
- [5] 张雷,金光.同轴轻型空间遥感器支撑桁架的设计与试验[J].光学精密工程,2010,18(5):1009-1104.
- [6] 张舸,赵汝成,赵文兴.大尺寸轻型碳化硅质镜体的制造与材料性能测试[J].光学精密工程,2006,14(5):759-762.
- [7] 郑书友,冯平法,吴志军,等.超声加工技术的发展及其在航空航天制造中的应用潜能[J].航空制造技术,2009,14(13):51-54.
- [8] 张峰,徐领娣,范镡,等.表面改性非球面碳化硅反射镜的加工[J].光学精密工程,2008,16(12):2479-2484.
- [9] 黄卫东,林鑫.激光立体成形高性能金属零件研究进展[J].中国材料进展,2010,29(6):12-49.
- [10] 滕杰,王斌修.激光切割工业纯铝的工艺研究[J].制造技术与机床,2009,29(8):24-26.
- [11] Carroll L, Rothenflue J A. Experimental study of cutting thick aluminum and steel with a chemical oxygen-iodine laser using an N₂ or O₂ gas assist[J]. SPIE, 1997, 3092: 758-763.
- [12] 田锦,刘金合.钛合金激光焊接接头质量控制工艺的研究现状[J].热加工工艺,2008,37(7):93-98.
- [13] 林鑫,薛蕾,陈静,等.钛合金零件的激光成形修复[J].航空制造技术,2010,16(8):55-58.
- [14] 田永生,陈传忠,王德云,等.钛合金的激光表面处理研究进展[J].金属热处理,2005,30(8):29-34.

作者简介:张雷(1982-),男,山东菏泽人,博士、副研究员,硕士生导师,2008年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事光学仪器设计与分析研究。E-mail: zhangleisong@tom.com