

激光刻蚀技术及其在航天器天线制造中的应用

杨建平 陈学康 吴 敢 王 瑞 曹生珠

(兰州空间技术物理研究所表面工程技术重点实验室, 兰州 730000)



摘要: 以可实现频率复用、高灵敏度和低噪声的航天器先进固面天线反射器(极化和频率敏感反射器等)为例,主要介绍了利用镀膜/激光刻蚀技术进行反射器表面高精度金属薄膜图形制作过程中的关键技术问题和解决措施,同时简要介绍了已尝试过的三维曲面高精度薄膜图形制作技术和激光刻蚀技术的现状和发展方向。

关键词: 激光刻蚀; 三维薄膜图形; 航天器; 天线反射器

Laser Ablation and Its Application in Fabrication of Spacecraft Antennas

Yang Jianping Chen Xuekang Wu Gan Wang Rui Cao Shengzhu

(Science and Technology on Surface Engineering Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract: Advanced antenna reflectors(such as polarization sensitive surface PSS and frequency selective surface FSS) are taken as examples, which can achieve frequency reuse, high sensitivity and low noise. The crucial technical problems and solving methods in the process of fabricating metallic pattern by laser ablation on composite antenna reflector are described, and actuality and development of 3D metallic film pattern and laser ablation technologies are also introduced.

Key words: laser ablation; 3D metallic film pattern; spacecraft; antennae reflector

1 引言

复杂曲面的结构功能一体化部件越来越成为航空、航天和其它国防领域中的重要构件形式,在复杂曲面零部件表面高效率、高精度地制造大幅面、复杂图形微结构已成为重要的技术需求^[1]。这种大幅曲面上高精度图形结构的一个重要的应用是先进形式的航天器固面天线反射器(极化敏感和频率敏感反射器等)制造。这类天线能够很大地提高卫星等的通讯信噪比,实现频率复用,是目前卫星先进程度的重要指标之一^[2, 3]。装备有这种天线的卫星,将有更高的灵敏度、更低的噪声,对导航、通讯、深空探测等信号很弱或距离非常远的应用具有关键性意义。

先进的航天器固面天线反射器通常采用抛物面、双曲面等一些不可展开的三维空间曲面,其表面是根

据功能需要按照一定规律排布的高精度金属图形阵列。反射器壳体一般采用对电磁波具有高电磁波通透性的芳纶(如 Kevlar)等复合材料蜂窝板结构^[4]。构成这类天线反射器的结构材料和表面功能图形材料在热、力学性能方面有很大的差异。要求对这类材料组合体系实现高精度的加工,还必须同时满足功能层的加工精度和结构材料不损伤的要求。

2 反射器曲面上薄膜图形制作技术

对于各类先进固面天线反射器表面金属薄膜图形的加工任务,其共同的特点是:要求既大又精的跨尺度制造,固面天线反射器的口径一般从 0.3~3m 不等,而图形的精度一般要求达到 10 μ m 的量级;高复杂程度的工件外形,如极化敏感天线的前反射器通常

作者简介:杨建平(1974-),高级工程师,物理电子学专业;研究方向:激光刻蚀加工技术。

收稿日期:2011-06-01

为旋转抛物面上非轴对称切割下来的一部分,而且可能需要针对天线覆盖区域增加赋型设计,使反射器的面型更加复杂且无法用数学公式来表达,通常是用一组三维的曲面数据点云来表示;工艺要求苛刻,受到很多条件的限制,尤其是对工艺兼容性和在无损加工方面的要求。这类反射器一般是采用复合材料蜂窝板结构热压成型的薄壳体,常规的机械加工无法对其表面的微米量级的金属层进行加工而不损伤基底,复合材料的吸湿性强,蜂窝结构更会残留液体,使用腐蚀液的湿法光刻工艺将无法使用,复合材料热压结构不能耐受高温。这些限制条件使目前大部分的加工技术无法用于反射器表面金属图形的制作。因此,曲面高精度金属薄膜图形结构制作技术已成为高性能天线技术的瓶颈。

为了解决这个加工技术的难题,目前已尝试过的三维曲面薄膜图形结构制作技术有以下几种:掩膜的方法,在工件表面涂敷一层薄膜作为掩模,利用三维曝光技术在曲面上制作出图形结构,在真空中沉积合适的金属薄膜后去除掩模层,在需要的位置保留金属薄膜形成图形结构。由于大尺度三维曝光设备的欠缺、光刻腐蚀的精度以及湿法刻蚀工艺对一些复合材料结构件不适用等限制,这种方法的应用几乎不可能;平面图形分块反贴,在基底(如柔性的聚酰亚胺薄膜等)上面利用光化学腐蚀的办法制作出金属图案,将基材分割成小条块状,合理安排条块之间的布局,通过反贴到曲面上获得希望的图形。对于抛物面、双曲面等一些不可展开的曲面,为了保证拼接的精度需要将分块做的很小。但分块越多拼接定位的难度和

工作量越大,光学定位控制粘贴的位置是一个无法实现高精度(一般在0.1mm量级)和非常耗时间的工作,而且很难保证拼接处电阻损耗在很低的范围内。为了保证高性能,高精度是核心要求,因此这种方法也就失去了意义;在制作反射面等结构的时候,用层压的办法预埋金属层形成所希望的图形。对于层压结构中金属层一般要求很薄,在曲面压制过程中受挤压的影响容易造成金属层偏移,定位精度更低,同样难以实现高精度的要求。而且不同材料粘接的层状结构由于应力的存在,在空间温度交变的环境中使用容易造成分层;利用镀膜加激光刻蚀的技术,在工件表面制备金属薄膜层并利用激光去除掉不需要的部分使其成为图形。可以说,在上述四种途径中,激光刻蚀是最具潜力的先进技术。

激光刻蚀技术是将脉冲激光刻蚀加工与先进的数控系统结合起来的一种柔性加工技术。它利用短脉冲、高峰值功率的激光脉冲使待刻蚀的材料表面局部迅速加热升温、熔化乃至汽化,可实现表层材料的精确去除^[5]。由于脉冲作用时间(激光脉冲宽度)很短(ns量级),在被刻蚀材料中形成的热影响区非常浅(微米量级),因此这种材料的去除是一种“准冷态”的加工,一个例子是这种方法可以在人的头发上刻蚀出文字而头发本身不被烧毁。激光刻蚀可以通过精确控制激光能量密度来控制刻蚀的深度,同时还具有非接触、不引入应力等特点。其次,可以通过计算机程序控制的五自由度激光刻蚀加工头,实现在任意复杂曲面上的精确定位和图形刻蚀,具有加工和定位精度高,可一次性完成曲面图形的刻蚀加工等特点。

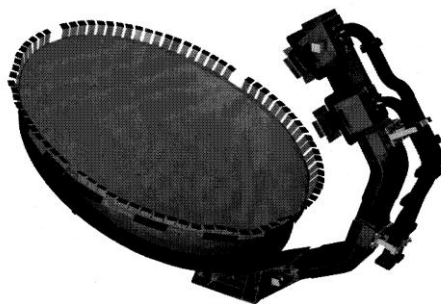
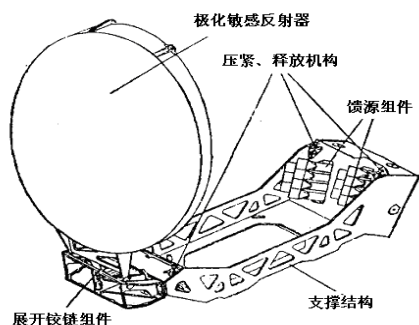


图1 东方红三号(左)和 Superbird-C(右)极化敏感天线反射器结构示意图

由于这些优点,镀膜/激光刻蚀加工技术在国外已应用到卫星天线制备等国防领域及武器系统。德国MBB公司在1990年就采用激光刻蚀技术为我国的东方红三号研制了直径2000mm的极化敏感天线反射

器^[6]。日本三菱机电1992年也采用分块激光直接刻蚀的方法为Superbird-C卫星研制了直径1.6m的极化敏感天线反射器^[7]。见图1。国内在激光刻蚀制造曲面薄膜图形技术方面的研究起步相对较晚。从上个世纪

80~90 年代开始,国内在三维薄膜图阵列的设计和制作等方面开展了研究。尝试过利用 5 轴的数控加工、平面图形反贴和层压结构等办法制作三维曲面图形结构,但在图形精度和应力控制方面遇到了很大的困难。近年来,华中科技大学等单位也陆续针对应用需求开始了激光刻蚀加工制作三维薄膜图形方面的研究。1999 年起,兰州空间技术物理研究所开始采用镀膜/激光刻蚀技术进行曲面金属薄膜图形结构刻蚀加工的研究工作,目前已经通过研究建立热物性相差很大的材料组合体系激光刻蚀过程物理过程模型,并解决了复合材料表面金属薄膜的低温沉积技术、既大又精的跨尺度激光刻蚀设备和相关工艺等技术问题。

3 曲面复合材料体系激光刻蚀中的关键技术问题

3.1 复合材料体系激光刻蚀机理

激光刻蚀也可以称为激光烧蚀,就是利用脉冲激光将材料表面迅速加热汽化,达到材料局部去除的过程。而天线反射器的加工过程是要把熔点相对较高的金属薄膜从不耐烧蚀的复合材料表面去除掉,而且不能损伤复合材料基底。与相对成熟的激光切割、焊接比较,激光刻蚀加工是一个尚未深入研究的领域。反射器采用的热物性差异大的金属薄膜/复合材料组合体系的激光刻蚀加工,则属于更为复杂的情况,目前还未见有专门的研究工作,而工程实践中这又是一个非常重要的问题。

用作反射器的复合材料结构件多为纤维增强树脂材料,而金属的熔点通常比复合材料的汽化点高很多。金属薄膜在刻蚀过程中被激光加热、熔化乃至汽化,其温度必定会达到或高于基底材料的汽化点。当刻蚀精度要求很高时,会带来一系列问题,主要有刻蚀效果差、金属薄膜的刻蚀边缘撕裂卷曲、基底材料烧蚀等。在工件由两种或以上热、光物性相差很大的材料组成时,问题会变得复杂,往往不能获得好的结果。在这种情况下,核心的问题是激光刻蚀的分辨率不仅仅由刻蚀系统的光学分辨率决定,而且也取决于薄膜被从基底上去除的物理机制。而对这一物理过程的理解,又反过来决定激光加工机的设计方案。因而,研究基于复合材料的金属薄膜激光去除机理,对于制造这类结构/功能一体化零部件具有指导意义。从更广泛的意义上说,类似的问题在其它场合也存在,比如用激光微刻蚀来制造柔性基底上的微电路和微机电系统(MEMS)的功能结构。激光刻蚀过程中的刻蚀

精度是激光微刻蚀技术能否用于众多高要求技术的关键因素之一。

文献[8]提出了这类易烧蚀复合材料基底上金属薄膜的激光刻蚀物理机制,其物理图像见图 2。金属薄膜/复合材料这种组合材料体系在激光刻蚀过程中,金属薄膜被激光脉冲加热升温,当薄膜/基底界面处的温度高于基底复合材料的热分解温度时,金属薄膜与基底材料间的结合力消失,基底材料分解在薄膜与基底间形成气隙。这个气隙导致金属薄膜与基底间热导的突变,薄膜升温速率发生明显改变。基底分解产生的压力使金属薄膜出现固态剥离。这是易烧蚀材料基底上耐烧蚀材料体系在高峰值功率激光作用下独有的界面分离机制。此时由于激光能量呈高斯分布和光束辐照边缘区域的热扩散等因素影响,刻蚀区域边缘出现翻卷、毛刺等现象。当激光脉冲能量密度增加时,薄膜的熔化和界面发生汽化的时间均有提前,固态剥离的金属薄膜会被熔化、汽化,汽化的金属材料向各个方向飞溅,可能在基底表面产生反向沉积,薄膜刻蚀的边缘齐整程度有所好转。当激光脉冲能量密度足够高时,金属薄膜将被迅速加热,原位直接熔化、汽化,而此时基底易出现被烧蚀的情况。

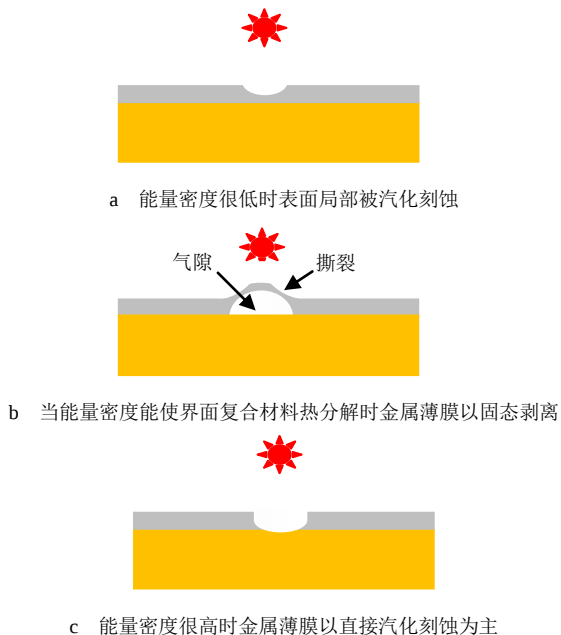


图 2 复合材料基金属薄膜激光刻蚀物理机制示意图

该研究工作表明,依据金属薄膜/易烧蚀复合材料体系激光刻蚀的物理过程模型,在合适的激光能量密度下可以通过固相分离的方式将金属薄膜完全去除而不损伤基底。这一机制的优点是可以完全、干净地剥离薄膜,无反向沉积等污染,这不仅仅适用于复合

材料基金属薄膜图形的刻蚀,在微制造等场合也将有非常重要的应用。同时依据这一薄膜/基底分离机制,采用波前衍射变换技术将刻蚀激光束能量密度分布整形成了具有“剪切功能”的能量密度分布方式。解决了在基底汽化压力下刻蚀区域边缘薄膜以“撕裂”的方式剥离的问题,形成了边缘锐利的刻蚀边界,所刻蚀图形的精度可达到 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内。需要进一步研究的方向是:获得更厚的金属层刻蚀加工能力。金属层具有良好的导热性能,在刻蚀比较厚的金属层时,由于热扩散等因素将使刻蚀的效果和分辨率大大降低。基于这类材料组合体系激光刻蚀过程的独有机制,利用整形技术获得更适合的光束能量剖面,将是提高刻蚀厚度的有效措施。

3.2 需要解决的技术问题

镀膜/激光刻蚀技术制造天线反射器功能图形的基本途径是镀膜加激光刻蚀。也就是先在反射器壳体上镀一层金属薄膜,然后用激光刻蚀掉不需要的部分,留下的部分形成所需要的金属薄膜图形。因此,需要解决复合材料工件表面金属化和曲面金属薄膜激光刻蚀加工等技术问题。

首先,复合材料反射器壳体表面金属薄膜的沉积问题。这层薄膜要与天线壳体附着牢固,能满足天线电气性能的要求,并且要能耐受空间强辐射环境。由于天线的尺寸可能会很大,这就要求能够用于大尺寸反射器金属化的大型镀膜设备。而且,天线壳体一般用纤维增强树脂材料制造,不能耐受高温。同时,天线壳体采用热压成型的蜂窝夹层结构,天线的面形精度要求很高,不允许镀膜时使用高温,以免引起材料破坏和面形精度降低。但是较高的温度对获得附着牢固和致密的金属薄膜是非常有利的,从获得高质量薄膜的角度又希望使用较高的温度。因此,这是一个明显的矛盾。解决这一问题可行的途径是在薄膜沉积前对复合材料表面进行原位活化处理,以增强薄膜与基底的结合力;再就是采用荷能离子沉积薄膜的技术,提高薄膜质量,例如电弧离子镀膜技术就具有这一特点。

对于复合材料的工件,为了满足激光刻蚀的要求,其表面的金属薄膜不能太厚,但需要满足电气性能(电磁波的反射/透射)要求;同时要求工件表面金属薄膜厚度非常均匀,降低薄膜厚度不均匀性对刻蚀造成的影响。天线反射器壳体通常使用的 Kevlar 纤维增强树脂材料不宜使用湿法的电镀等工艺金属化。因此,只能采用真空物理气相沉积的办法进行金属薄膜

沉积,包括磁控溅射、电弧离子镀膜技术等。为了解决薄膜附着力和镀膜温度的矛盾,需要通过提高基底表面活性等方法来增强薄膜与基底间的附着力,镀膜过程辅助以高能粒子来提高薄膜的结晶质量和致密度。电弧离子镀膜技术是一个比较好的选择,其优点是工作温度低、靶材离子化率高、镀层结合力高、沉积速度快、绕射性好、可镀的材料广泛等特点;比较适用于复合材料的金属化。对于大尺寸复合材料工件在真空沉积金属薄膜过程中的材料出气也是一个关键性的问题,对于出气率较高的材料可能引起金属薄膜的氧化等系列问题,影响金属层的电学性能。文献[9]报道了通过对上述技术问题的研究,采用低温电弧离子镀膜技术和材料预出气等工艺过程,较好地解决了各种尺寸的复合材料工件低温沉积金属薄膜的附着力和均匀性等技术问题。

其次,三维薄膜图形激光刻蚀加工系统的实现。作为刻蚀加工的“刀具”,首先需要解决的就是短脉冲、高峰值功率、高重复频率激光光源问题。这三个高要求的技术参数在同一台激光器上实现,实际上代表了这种类型激光器的前沿水平。激光器的选取必须考虑刻蚀金属薄膜的要求,同时兼顾工程实现上的可能性。为了能够汽化去除材料并获得很小的热影响深度,激光脉冲宽度应在纳秒量级或以下,且到达工件表面的峰值功率密度应该达到 $10^8\text{W}/\text{cm}^2$ 以上。对于高峰值功率激光的传输和光束的整形需针对性地进行抗损伤设计。对于大口径的反射器刻蚀过程时间可能很长,为了保证刻蚀结果和精度的一致性,对于激光器的可靠性要求很高,必须能够长时间连续满功率工作。

此外如前所述,根据加工范围和三维曲面图形加工的要求,需要一个五自由度和加工范围足够大的高精度数控激光加工系统,其定位精度要求全加工范围内在数十微米量级,而加工范围要达到米量级。无论从硬件和计算机控制软件方面来说,这都是目前要求最复杂的激光加工系统。从天线电气性能方面考虑,对激光刻蚀所形成的金属薄膜图形有相当高的精度要求,因此所使用的激光加工系统必须具有足够高的精度。这一点和大尺寸的要求又是互相矛盾的。小尺寸的加工系统容易实现高精度,而当尺寸很大时,实现高精度的加工系统要困难得多。最后,数控系统必须具有强大的数据处理能力,以快速处理海量的三维曲面空间坐标数据,并且与常用的机械设计软件兼

(下转第 62 页)

