

文章编号 1004-924X(2016)01-0094-08

## 工程塑料表面金属覆层的激光定域精细去除

贾振元\*, 赵 凯, 刘 巍, 丁立超

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**结合激光刻蚀手段与数控加工技术,提出了一种基于数控激光铣削的工程塑料表面金属覆层定域精细去除方法。考虑不同位置的零件对加工质量的要求不同,通过激光烧蚀实验结果得到了保证图形边缘质量的精密切边加工工艺并确定了相应的工艺参数。开发了基于实际进给速度自适应调整激光能量的覆层金属定厚度高效去除技术,完成了图形内部余量的去除,解决了机床实际进给速度受动态性能限制无法达到预设值而导致的目标材料过烧蚀问题。最后,以典型零件复合式三维信号发送/接收器为例,通过对工件图形分区变参数加工验证了所提出的方法的可行性。实验结果表明:采用基于数控激光铣削的金属覆层定域精细去除技术能够完成典型样件的精密加工,加工的三维金属图形衔接精准,边缘光顺整齐,热影响区范围小,能够满足该类零件高质高效的制造要求。

**关键词:**激光铣削;数控加工;精密加工;金属覆层;工程塑料

**中图分类号:**TG665 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162401.0094

## Localized and precision removal of metal coating on engineering plastics using NC laser milling

JIA Zhen-yuan\*, ZHAO Kai, LIU Wei, DING Li-chao

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology  
of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

\* Corresponding author, E-mail: jzyxy@dlut.edu.cn

**Abstract:** In combination of laser etching and numerical control (NC), a localized and precision removal technology for metal coating on engineering plastics was proposed based on numerical control (NC) laser milling. As different positions of the parts require different qualities, a precise processing technology was presented through study and analysis of laser ablation experiments to guarantee the quality of figure edge and corresponding technological parameters were determined. Then, the removal technology for the metal coating with a constant depth was developed by adaptive controlling the laser fluence on the basis of the practical feed speed, by which the allowance within the pattern was removed and the over-ablation problem of the processed materials caused by that the machine feed speed can not reach to a preset value was solved. Finally, a compound three-dimension signal transmission/receiver was taken as an example, the feasibility of the proposed method was verified by processing the part pattern regionally. Processing results show that the compound three-dimension signal transmission/receiver has been processed precisely with the localized and precision removal

收稿日期:2015-06-20;修订日期:2015-07-23.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2014CB46503);创新研究群体科学基金资助项目(No. 51321004)。

technology based on numerical control (NC) laser milling. The join of the plane part and the conical part is accurate, the neat micro-strip edge is smooth and almost no heat affected zone. The results meet the requirements of manufacturing the part with high quality and high efficiency.

**Key words:** laser milling; Numerical Control (NC) machining; precision machining; metal coating; engineering plastic

## 1 引言

随着航空、航天和其他高端装备制造领域对关键零部件高性能、轻质化、小型化及低损耗等要求的不断提高,通过在工程塑料表面覆盖功能化金属图形制备的电子器件逐渐为提升装备性能的重要方式<sup>[1-2]</sup>,如航天器固面天线反射器<sup>[3]</sup>、超宽频信号发送/接收器<sup>[4]</sup>和各类电涡流传感器等。该类零部件的制造可通过在塑料基底表面直接涂覆功能化金属图形或整体金属化后再定域去除非功能区金属来实现。然而,构成这类零件的基体结构件和表面金属图形材料在物理、化学、力学性能方面差异较大;零件表面金属图形尺寸跨度大且对形状位置精度要求较高;工件外形复杂,多为非平面甚至是具有复杂自由曲面的三维结构;金属图形边缘质量要求较高。当对该类零件进行制造时,需同时满足功能图形的加工精度和质量要求,使加工难度增大。

以航空航天设备中典型零件复合式三维信号发送/接收器的制造为例,目前的制造方法主要包括掩膜法、微带粘贴法和以激光刻蚀技术为核心的激光加工法等。其中掩膜法适合于表面可展开为平面结构的信号发送/接收器的制作,如圆柱体、锥体等可用掩膜光刻法,但该方法存在掩膜拼接错位、定位不准等问题。而表面展开不是平面的信号发送/接收器,通常使用分体加工后再采用粘贴法,但由于存在手工操作,该方法所制得的零件成品率低、一致性差,一旦使用过程中金属线剥离,将严重影响通讯信号<sup>[5]</sup>。

鉴于该类零件的重要作用及特种加工技术和数控技术的迅速发展,人们尝试利用激光刻蚀技术制造金属微带图形。该方法通过高能脉冲激光使基底材料表面涂覆的金属迅速蒸发气化,并通过控制激光或工件的相对运动轨迹形成所需金属功能图形<sup>[6]</sup>。可以有效避免掩膜法和粘贴法两种加工方式所带来的拼接或粘贴误差。叶匀分等采用激光刻蚀技术在聚四氟乙烯、聚酰亚胺和环氧

树脂基底上制作了圆锥曲面微带天线,摆脱了掩膜的束缚<sup>[7]</sup>。杨建平等利用激光照射下基底材料与表面金属热物性相差较大而发生固相分离的方式制作了固面天线反射器<sup>[8]</sup>。但利用以上方法进行加工时,加工的图形相对简单,且仅实现了厚度为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的金属覆层去除。当进行较厚金属膜去除时,激光能量的增加及作用时间延长,将导致基底过烧蚀及边缘出现热影响区(HAZ)、重铸层等问题。

在激光光源的选择方面,皮秒及飞秒激光器虽然加工质量较好,但激光器本身成本高、尺寸大、不易集成,且总功率小将导致加工效率低,故现阶段还不具备工业推广能力<sup>[9-10]</sup>。因此为提高加工效率并降低成本,可采用具有较高激光功率的纳秒级激光器,并采用较高进给速度以提高材料去除率<sup>[11-12]</sup>。然而由于受机床动态性能制约,当待加工零件存在局部几何突变时,实际进给速度常常无法达到预设值,且难以进行预测<sup>[13]</sup>。以加工螺旋带线中心区域为例,越接近图形中心,曲率越大,机床进给速度越难以达到较高的预设值。此时如果激光输出能量不变,将导致材料过烧蚀,且产生极大的热影响区。因此需要激光能量随实际进给速度实时自适应调整以实现烧蚀深度恒定。

针对以上问题,本文基于零件整体制造思想,提出了图形边缘与图形内部分区域变参数的覆层金属定域去除加工方法。针对质量要求高的图形边缘及尺寸微小区域,提出低能量、低进给、高重频的图形边缘无热影响区精密加工方法。针对质量要求略低、加工效率要求较高的图形内部,提出了保证烧蚀深度恒定的激光能量随进给速度自适应调整的数控激光加工方法。实现了典型样件三维信号发送/接收器的精密加工。

## 2 实验材料及装置

典型的工程塑料基底可采用如聚四氟乙烯、聚酰亚胺、环氧树脂等绝缘材料,其中聚酰亚胺

(PI)是目前最耐高温的工程塑料,且具有良好的耐辐射性能、高介电强度及低介电系数等优良电性能,此外还具有优良的机械性能。基底整体铜化的步骤为:通过磁控溅射在 PI 基底表面形成约  $0.5\ \mu\text{m}$  的薄铜层,然后采用电镀工艺加厚至  $10\ \mu\text{m}$ 。图 1 所示为覆铜 PI 板。

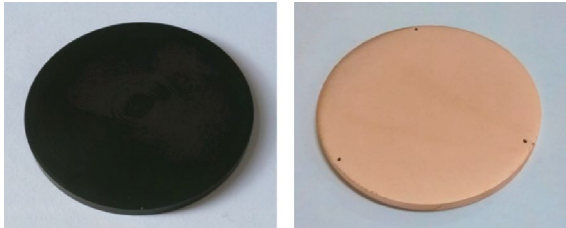


图 1 PI 基底及铜化后结果

Fig. 1 PI substrate and copper plating

实验在自主研发的五轴数控激光铣削机床上进行,如图 2 所示。该机床采用大族激光 DRACO 型端面泵浦激光器,激光波长为  $532\ \text{nm}$ ,激光能量密度为  $0\sim 25\ \text{J}/\text{cm}^2$ ,脉冲重复频率为  $10\sim 40\ \text{kHz}$ ,光斑尺寸为  $40\ \mu\text{m}$ ,脉冲宽度为  $10\ \text{ns}$ ,通过改变输入至激光器的模拟量控制信号可实现输出能量的控制。机床运动控制采用西门子 840D sl 数控系统,通过工作台带动工件运动来完成图形化加工。加工中通过向工件喷射空气以实现将加工过程产生的烧蚀产物和多余热量吹走,由于采用纳秒级脉冲激光加工时所产生的杂质及热量较小,因此采用的冷却空气压力为  $1\ \text{bar}$ 、流量为  $50\ \text{l}/\text{min}$ 。实验中采用不同加工工艺参数在覆铜聚酰亚胺材料上进行了直线、螺旋线等图形的加工实验,加工后通过超景深三维形貌仪 VHX-600E 进行零件表面形貌的观测。

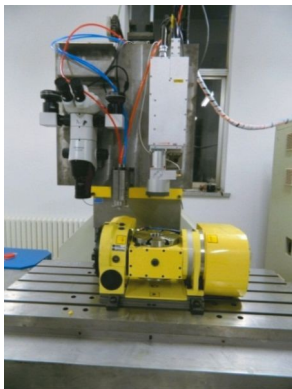


图 2 数控激光加工装置图

Fig. 2 CNC laser machining setup

### 3 保证图形边缘质量的激光加工工艺

相较于皮秒、飞秒级激光器,纳秒级脉冲激光器成本较低,体积小易于集成,且具有较大的功率,可以获得更高的材料去除率。然而在已有的文献中,利用纳秒级激光进行加工时,均存在热影响区、重铸层等问题,导致零件质量的降低<sup>[14-15]</sup>。而在零件制造过程中,对被去除的金属覆层边缘的质量要求要高于对其内部质量要求,为了保证零件的性能,对被去除图形的边缘及微小区域拟采用与内部不同的加工参数。在重复频率  $40\ \text{kHz}$  条件下通过微细直槽加工实验,得到当覆铜层被烧蚀完全后,烧蚀宽度和激光能量密度、机床进给速度之间的关系如图 3 所示。

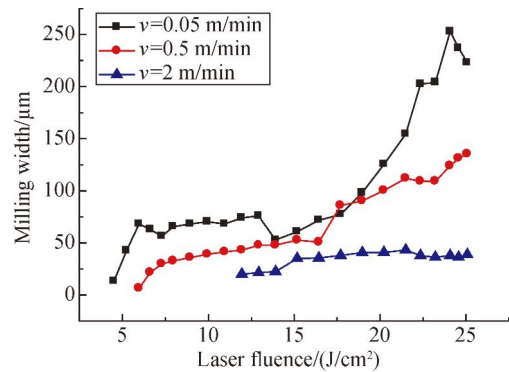


图 3 激光铣削后槽宽与激光能量密度,进给速度的关系  
Fig. 3 Relationship between milling width, laser fluence and feed rate

结果表明,进给速度越低激光烧蚀宽度越宽,其原因为当激光能量相同时,进给速度越低,在同一位的光斑重叠率越高,因而积聚的激光能量越多且传播越远,导致烧蚀宽度增大。此外,通过实验还可得到槽两边热影响区的宽度和激光能量密度、激光进给速度间的关系如图 4 所示。

由图 4 可知,随着进给速度的增加,热影响区宽度呈现先增大后减小的趋势。其原因为当进给速度极低时( $0.05\ \text{m}/\text{min}$ ),激光能量向工件水平方向的传播充分,致使原本在高速进给时形成的热影响区域转变为被充分烧蚀区域,因而烧蚀槽宽较宽但获得了最小的热影响区尺寸。随着进给速度的提升( $0.5\ \text{m}/\text{min}$ ),虽然仍有较多的激光能量沿水平方向传递,但由于单位时间同一位置光斑重叠率的降低,导致烧蚀不充分,热影响区宽

度急剧增加。当进给速度进一步提升(2 m/min)时,单位时间同一位置积聚的能量进一步减少,传递范围也随之减小,因而热影响区宽度开始降低,但此时由于烧蚀不充分现象仍然存在,影响区宽度相较 0.05 m/min 仍然较大。通过分析实验结果可知,当选择合适的低能量、低进给速度、高重复频率的工艺参数组合时,能够令纳秒级脉冲激光加工的图形边缘热映区宽度最小。同时由于单位脉冲去除量极小,使得轮廓一致度良好,无材料溅射问题,轮廓部位没有类似于毛刺的材料堆积产生。

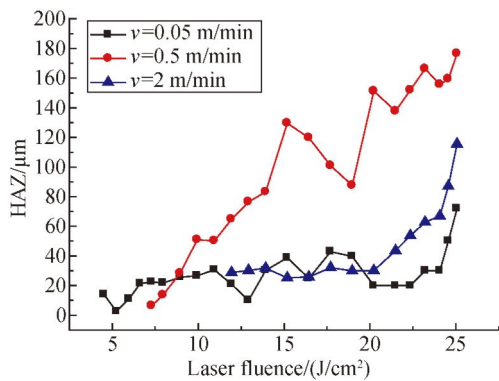


图 4 激光铣削后 HAZ 与激光能量密度,进给速度的关系

Fig. 4 Relationship between HAZ, laser fluence and feed rate

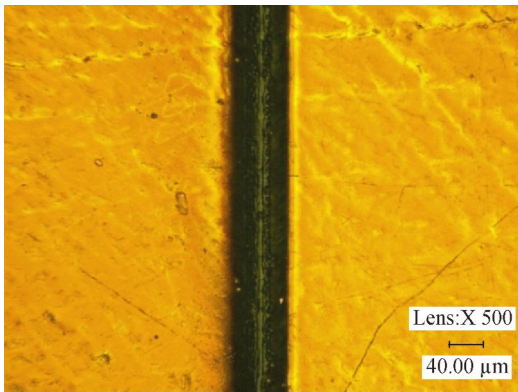


图 5 激光铣削微细直槽形貌

Fig. 5 Micrograph of groove after laser milling

最终选定的加工参数组合为激光能量密度 5 J/cm<sup>2</sup>,重复频率为 40 kHz,进给速度为 0.05 m/min,此时加工的微细直槽形貌(放大 500 倍)如图 5 所示,该微细直槽边缘基本无热影响区,利用该参数能够实现图形边缘及微小区域的精密加工。

## 4 激光能量自适应定厚度去除技术

激光高效加工时给定的机床进给速度较高,此时进给方向突变或持续沿大曲率图形变化时,由于受到数控机床自身驱动能力的约束,会导致实际进给速度无法达到预设目标,且实际进给速度根据图形的不同而呈现不可预测性。为解决这一问题,首先通过建立烧蚀深度预测模,建立特定烧蚀深度时激光能量与其他加工参数间的关系。然后,将激光进给速度设定为正常加工时可采用的最高速度,并在 CAM 软件中生成一套完整的加工代码。最后,通过研究基于数控系统的激光输出能量控制技术,在实时获取当前机床进给速度同时,计算出维持恒定烧蚀深度所需的激光能量,并将控制信号输出至激光控制器。实现在高速时(运动轨迹方向变化平缓的部位)增大能量、低速时(大曲率的部位)减小能量的激光能量自适应调整,实现在保证烧蚀深度的同时极大地提高加工效率。

### 4.1 激光能量与进给速度间函数关系建立

为了实现对去除量的精确控制,需建立纳秒级多脉冲激光烧蚀深度预测模型,利用该模型准确预测不同加工参数下的激光烧蚀深度,有效避免金属层材料残余或基底过度烧蚀。此外,还需建立覆层金属刚好去除时,激光能量与不同进给速度间的函数关系为:

$$F = f(H, v) = f(v). \quad (1)$$

由于所采用激光器脉冲宽度为纳秒级,因此其与目标相互作用的主要物理现象为热传递。热传递主要在材料内部发生,且传递深度  $l_T \approx \sqrt{4Dt_p}$  (其中  $D$  和  $t_p$  分别为热扩散率和脉宽)比光斑直径至少小 1 个数量级,因此激光脉冲能量在竖直方向传播的物理过程可通过一维热传递方程描述。为了估算不同能量下的烧蚀深度,首先要分析材料的烧蚀阈值  $F_{th}$  [16-17]:

$$\rho C_p (T_m - T_{amb}) l_T = (1 - R) F_{th}, \quad (2)$$

式中: $\rho$  为金属密度,  $C_p$  为比热容,  $T_m$  为金属熔点,  $T_{amb}$  为周围环境温度,  $R$  为金属对入射激光的反射率。根据热力学方程,单个脉冲作用时,激光能量到达材料表面后的热平衡状态为:

$$(\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_l \Delta H_{lv}) h = (1 - R)(F - F_{th}), \quad (3)$$

式中:  $\rho_s, \rho_L$  为金属的固态密度和液态密度,  $\Delta H_{sl}, \Delta H_{lv}$  为金属熔化焓和汽化焓,  $h$  为单脉冲激光烧蚀深度,  $F$  为入射激光能量密度。利用多脉冲激光加工时, 由于脉冲激光频率极高, 可达到几十 kHz, 因此, 在工件上的同一位置, 将会有大量激光脉冲对其进行烧蚀, 而该位置在激光光斑上的分布位置不同。设定激光进给方向为 X, 则激光加工可以表示为相邻激光光斑每次移动距离  $\Delta x$ , 则距离光斑中心  $n$  倍  $\Delta x$  位置处的单脉冲激光能量密度分布为:

$$F_n = F_0 \exp\left[-\frac{2(n\Delta x)^2}{\omega^2}\right], \quad (4)$$

其中:  $\omega$  为激光光斑半径,  $F_0$  为入射激光能量密度峰值, 则第  $n$  个脉冲激光在工件同一位置上的烧蚀深度为:

$$h_n(x) = \frac{(1-R) \left[ F_0 \exp\left[-\frac{2(n\Delta x)^2}{\omega^2}\right] - F_{th} \right]}{(\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_L \Delta H_{lv})}. \quad (5)$$

由于一个脉冲间隔时间足够纳秒级脉冲激光能量进行热传递, 且进给速度较高, 因此高效加工时, 材料移除率不会被前一个脉冲的作用影响。所有的烧蚀产物和多余热量可通过气流吹走。假设当厚度  $H$  的铜层全部被烧蚀掉需要  $n_{sum} = 2n_m + 1$  个脉冲, 则在同一位置沟槽的烧蚀深度为:

$$H = \sum_{-n_m}^{n_m} \frac{(1-R) \left[ F_0 \exp\left[-\frac{2(nv/f)^2}{\omega^2}\right] - F_{th} \right]}{(\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_L \Delta H_{lv})}, \quad (6)$$

其中:  $n$  为厚度  $H$  的覆铜层完全被去除所需脉冲个数,  $v$  为激光进给速度,  $f$  为脉冲重复频率。  $n_m$  为:

$$n_{sum} = 2n_m + 1 = 2 \times \sqrt{\frac{\omega^2}{2\Delta x^2} \ln \frac{F_0}{F_{th}}} + 1. \quad (7)$$

由此, 可推断出纳秒级多脉冲激光铣削深度和激光加工参数之间的关系, 并根据金属层厚度, 合理选择加工参数, 从而确保铜层的精确去除, 避免基底损伤。在实际加工过程中, 为了获得较高的加工效率, 激光器频率可选择最大值, 同时待去除金属层厚度由工件表面覆层厚度决定, 根据式(1)和(6), 可建立起去除量恒定时所需激光能量  $F_0$  与实际进给速度  $v$  间的函数关系:

$$F_0 = \frac{(\rho_s \Delta H_{sl} + \rho_L \Delta H_{lv}) H + F_{th}(1-R)}{(1-R) \sum_{-n_m}^{n_m} \exp\left[-\frac{2(nv/f)^2}{\omega^2}\right]}. \quad (8)$$

#### 4.2 基于数控系统的激光能量实时控制技术

常见的商业化数控系统一般针对多轴铣削加工机床方式配置, 并没有提供激光功率的输出接口, 不能通过加工代码直接调节输出能量大小。因此, 需研究专用的激光能量实时控制技术。现有激光器的能量可通过输入的模拟量控制信号进行控制, 而主轴变速在 G 代码中容易实现。因此拟将激光器类比为第二主轴(第一主轴可仍为常规铣削电主轴), 将激光器控制电压大小类比为第二主轴转速, 通过配置相关参数并设计专用电路, 使得在加工代码中通过改变“第二主轴转速”从而改变激光器控制电压, 实现激光输出能量与加工代码的整合。具体控制策略如图 6 所示。

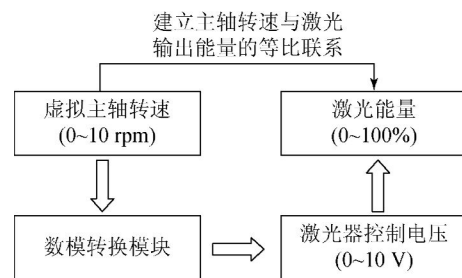


图 6 数控激光输出能量控制策略  
Fig. 6 CNC control strategy of laser fluence

基于安全的考虑, 在实际加工中出现主轴转速变动(在本文中相当于激光控制电压变动)时, 数控系统会让各个进给轴停止并等待主轴转速达到设定值后再恢复进给。而利用激光铣削进行高效去除时, 因机床动态性能有限, 实际进给速度是持续变化的, 为了保证去除厚度一致, 激光能量(虚拟主轴)需要根据实际进给速度进行调整。此时如仍采用原有控制方式, 则会导致机床进给一直处于加速与急停两种状态下而剧烈震荡, 无法正常完成加工。将数控系统中的“运动同步动作(Motion synchronous actions, MSA)”功能模块嵌入加工代码来解决该问题。MSA 模块具有同步执行处理程序段的能力, 通过定义各动作触发条件来启动同步动作功能, 这些条件将在插补周

期中被监控,并及时对事件做出反应。通过将 MSA 模块嵌入加工代码中,使得虚拟主轴转速(激光控制信号)跟随插补周期同步循环刷新,在保持进给速度的同时,实现激光能量与根据实际进给速度的实时自适应调节。

此外,为了实现激光束能够根据加工代码(G 代码)在指定位置输出或关闭,选取非加工指令 G0(快速移动)信号的上升沿或下降沿作为激光关断或触发的判断依据。基于实际进给速度的激光能量自适应调整具体实现过程如图 7 所示。

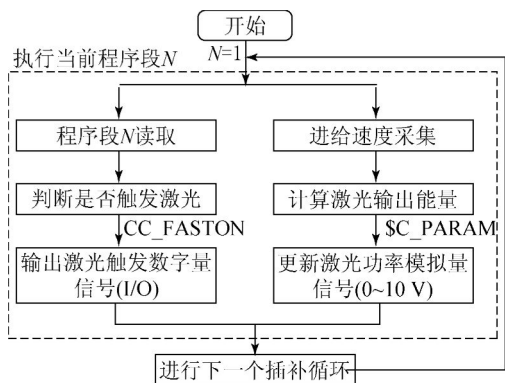


图 7 根据实际进给速度的激光能量自适应控制

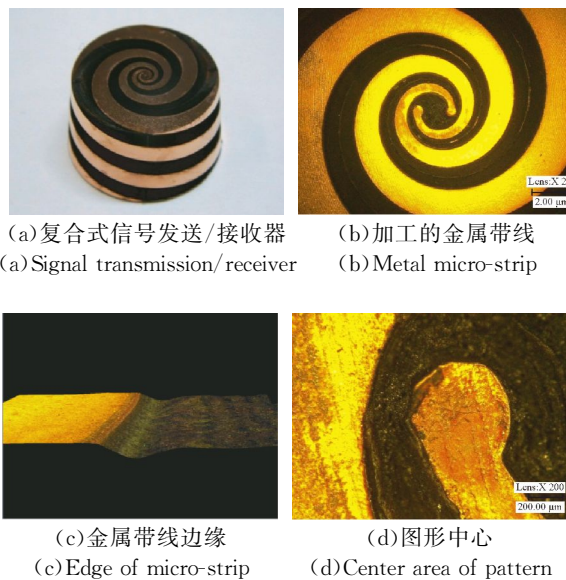
Fig. 7 Adaptive control of laser fluence based on actual feed rate in real-time

### 5 典型样件激光加工实验

基于以上研究,进行典型样件复合式三维信号发送/接收器的精密加工实验。该零件由平面等角螺旋金属带线和锥面等角螺旋金属带线组合得到,基底材料为聚酰亚胺,表面整体覆盖 10 μm 厚铜层,零件上表面直径为 30 mm,高为 19.8 mm,平面中心区域中的金属圆直径为 0.6 mm。鉴于该零件为立体三维结构,现有加工手段为在柔性覆铜板上对平面和锥面图形分别进行光刻,再粘贴至基底表面,并通过焊接连接。由于存在人工因素,因此存在拼接错位及图形扭曲等问题,零件制造成品率较低。

基于以上研究,加工图形边缘和中心小区域时所采用加工参数为:激光能量密度 5 J/cm<sup>2</sup>,重复频率 40 kHz,进给速度 0.05 m/min。进行图形内部加工余量的高效去除时所用加工参数为重复频率 40 kHz,进给速度 2 m/min,激光能量根

据实际进给速度自适应调整,具体数值通过将材料参数、待去除铜层厚度等代入式(8)并进行计算后得到。加工后利用超景深显微镜对零件质量进行观察和检测,结果如图 8 所示。



(a)复合式信号发送/接收器 (b)加工的金属带线  
(a)Signal transmission/receiver (b)Metal micro-strip

(c)金属带线边缘 (d)图形中心  
(c)Edge of micro-strip (d)Center area of pattern

图 8 复合式三维信号发送/接收器质量检测结果

Fig. 8 Measurement results of compound three-dimension spiral signal transmission/receiver

其中图 8(a)所示为数控激光铣削加工的复合式三维信号发送/接收器零件,图 8(b)所示为加工得到的金属带线,图 8(c)所示为金属带线边缘形貌(放大 500 倍),图 8(d)所示为加工的图形中心(放大 200 倍)。从结果可知数控激光铣削能够完成复合式三维信号发送/接收器的精密加工,平面部分和锥面部分衔接精准,带线边缘光滑整齐,热影响区范围小。

### 6 结 论

为解决三维工程塑料表面金属覆层图形的精密加工难题,提出了基于数控激光铣削的定域精细去除方法。通过实验研究分析工艺参数对激光加工热影响区的影响规律,得到了微能量、低进给的图形边缘无热影响区加工方法并确定了相应的工艺参数,避免了轮廓部位出现类似于毛刺的材料堆积产生。开发了激光能量根据机床实际进给速度自适应调整的覆层金属定厚度高效去除技术,解决了数控激光加工中,机床实际进给速度受动态性能限制无法达到预设值而导致的材料

过烧蚀问题。基于以上研究,进行了复合式三维信号发送/接收器样件,零件上表面直径为 30 mm,高为 19.8 mm,图形中心区域金属圆直径为 0.6 mm。检测结果表明:加工出的平面螺旋

金属带线和锥面螺旋金属带线衔接精准,图形轮廓一致度良好,无材料溅射问题,带线边缘光滑整齐,热影响区范围小,能够满足通讯设备对零件制造质量的要求。

### 参考文献:

- [1] 张博明,刘双. 航天器多功能结构的研究现状及其应用前景[J]. 宇航学报,2007,28(2):493-497.  
ZHANG B M, LIU SH. Investigation on status and prospective application of composite multifunctional structures technology [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28 (2):493-497. (in Chinese)
- [2] 李秋玲,徐国兵. 超宽带螺旋天线的小型化设计[J]. 遥测遥控, 2011,2:14-19.  
LI Q L, XU G B. Miniature design of ultra-wideband spiral antenna [J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2011,2:14-19. (in Chinese)
- [3] 戚发轫, L. Laux, M. Reindl, 等. 东方红三号卫星的机械太阳阵和通信天线[J]. 中国空间科学技术, 1991,5:1-7.  
QI F R, LAUX L, REINDL M, *et al.*. Mechanical solar array and antenna for the Chinese DFH-3 satellite system [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1991,5:1-7. (in Chinese)
- [4] 朱玉晓,钟顺时,许赛卿,等. 小型化超宽带槽螺旋天线的设计[J]. 微波学报, 2009,1:39-41.  
ZHU X Y, ZHONG SH SH, XU S Q, *et al.*. Design of miniaturized super-broadband slot spiral antenna [J]. *Journal of Microwaves*, 2009,1:39-41. (in Chinese)
- [5] 章英琴. 某圆锥等角螺旋天线的制造技术[J]. 电子机械工程, 2010(2):50-52.  
ZHANG Y Q. Manufacture technology of a cone isometric helical antenna [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2010(2):50-52. (in Chinese)
- [6] 高阳,王德苗,董树荣,等. 陶瓷介质加载四臂螺旋天线[J]. 电子元件与材料, 2008,6:26-29.  
GAO Y, WANG D M, DONG SH R. Review on ceramic-loaded quadrifilar helix antennas [J]. *Electronic Components and Materials*, 2008, 6: 26-29. (in Chinese)
- [7] 叶匀分,朱荣林. 激光在曲面微带天线制作中的应用[J]. 中国激光,2003,4:361-363.  
YE J F, ZHU R L. Application of laser in the execution of microband antenna on curved surface [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 4: 361-363. (in Chinese)
- [8] 杨建平,陈学康,吴敢,等. 激光刻蚀技术及其在航天器天线制造中的应用[J]. 航天制造技术, 2011, 3:51-54,62.  
YAN J P, CHEN X K, WU G, *et al.*. Laser ablation and its application in fabrication of spacecraft antennas [J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2011,3:51-54,62. (in Chinese)
- [9] 左铁钊,陈虹. 21 世纪的绿色制造——激光制造技术及应用[J]. 机械工程学报,2009,10:106-110.  
ZUO T CH, CHEN H. Green manufacture in 21 century——laser manufacturing technology and application [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009,10:106-110. (in Chinese)
- [10] TRTICA M S, GAKOVIC B M, RADAK B B, 等. 纳秒、皮秒和飞秒激光脉冲对材料表面的改性(英文) [J]. 光学 精密工程, 2011, 19 (2): 221-227.  
TRTICA M S, GAKOVIC B M, RADAK B B, *et al.*. Material surface modification by ns, ps and fs laser pulses [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (2):221-227.
- [11] SHIN B S, OH J Y, SOHN H. Theoretical and experimental investigations into laser ablation of polyimide and copper films with 355-nm Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187(12):260-263.
- [12] 张菲,曾晓雁,李祥友,等. 355 nm 和 1 064 nm 全固态激光器刻蚀印刷线路板 [J]. 中国激光, 2008,10:1637-1643.  
ZHANG F, ZENG X Y, LI X Y, *et al.*. Laser etching and cutting printed circuit board by 355 nm and 1 064 nm diode pumped solid state lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 10: 1637-1643. (in Chinese)
- [13] 叶佩青,王仁彻,赵彤,等. 机床整机动态特性研究进展[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2012,12: 1758-1763.  
YE P Q, WANG R CH, ZHAO T, *et al.*. Recent research advances of whole machine tool dynamics [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2012,12:1758-1763. (in Chinese)

- [14] WINCO K C, YUNG J S, LIU H C, *et al.*. 355 nm Nd: YAG laserablation of polyimide and its thermal effect [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 101(1):306-311.
- [15] RACIUKAITIS G, BRIKAS M, GACYS P, *et al.*. Accumulation effects in laser ablation of metals with high-repetition-rate lasers [J] *High-Power Laser Ablation VII*, 2008.
- [16] 秦华, 郑荣儿, 傅汝康, 等. 潮湿环境对不同金属样品激光烧蚀阈值的影响[J]. *光电子·激光*, 2004, 6:698-701.
- [17] QIN H, ZHENG R E, FU R L, *et al.*. Influence of moist environment to laser ablation threshold of different metal samples [J]. *Journal of Optoelectronics • laser*, 2004, 6:698-701. (in Chinese)
- [17] 于鸿楠, 张德勇, 许龙江, 等. 用光偏转技术研究铜的激光烧蚀阈值[J]. *中国激光*, 2001, 12: 1089-1092.
- YU H N, ZHANG D Y, XU L J, *et al.*. Study on the laser ablation threshold of copper using laser beam deflection technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 12:1089-1092. (in Chinese)

## 作者简介:



赵凯(1986—),男,天津人,博士研究生,2009年于大连理工大学获得学士学位,主要研究方向为精密/特种加工、数字化控制、机电系统设计。E-mail: zkldut@163.com

## 导师简介:



贾振元(1963—),男,辽宁朝阳人,博士,教授,博士生导师,1980年、1984年、1987年于大连理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为精密/特种加工、精密测量、精密控制。E-mail:jzyxy@dlut.edu.cn