

## 基于选择性激光烧结的结构电路一体化技术研究

张 鑫<sup>1</sup>, 李 冬<sup>1,2</sup>, 赵剑峰<sup>1</sup>, 谢德巧<sup>1</sup>,  
梁绘昕<sup>1</sup>, 沈理达<sup>1</sup>, 田宗军<sup>1</sup>

(1.南京航空航天大学机电学院,南京,210016;

2.中国航空工业集团公司济南特种结构研究所,济南,250023)

**摘要:** 为了实现结构电路一体化部件的快速制造,本文提出将增材制造技术与结构电路一体化技术相结合。传统结构电路一体化工艺基于注塑成形技术,成本高、周期长,难以实现快速制造与迭代设计。本文提出基于选择性激光烧结(Selective laser sintering,SLS)技术,开展结构电路一体化的制造工艺研究,该技术具有成型速度快、精度高等特点。尝试以激光烧结方式实现成形,随后进行激光活化和化学镀。试验结果表明可以在成形件表面快速制造出具有优良导电性能的镀铜区域。

**关键词:** 结构电路一体化;选择性激光烧结;聚苯乙烯;激光活化;化学镀

**中图分类号:** TG665;TN249

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2020)01-0087-06

## Preparation of Intergrated Structure and Circuit Based on Selective Laser Sintering

ZHANG Xin<sup>1</sup>, LI Dong<sup>1,2</sup>, ZHAO Jianfeng<sup>1</sup>, XIE Deqiao<sup>1</sup>, LIANG Huixin<sup>1</sup>,  
SHEN Lida<sup>1</sup>, TIAN Zongjun<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composites, Jinan, 250023, China)

**Abstract:** In order to realize the rapid manufacturing of the integrated components of the structure and circuit, this paper proposes the combination of the additive manufacturing and the integrated structure and circuit technology. Traditional integrated structure and circuit process is based on injection molding, which has high cost and long cycle, so it is difficult to realize rapid manufacturing and iterative design. In this paper, based on selective laser sintering (SLS), the fabrication process of integrated structure and circuit is explored. SLS has the characteristics of fast forming speed and high precision. SLS is used to realize forming, then laser activation and electroless plating are carried out. The experimental results show that the copper plating area with excellent electrical conductivity can be rapidly fabricated on the formed part surface.

**Key words:** integrated structure and circuit; selective laser sintering (SLS); polystyrene; laser activation; electroless plating

结构电路一体化技术是指在注塑成形的高分子材料壳体表面,制作有电气功能的导线、图形等,从而将普通电路板具有的电气互连功能、支承元器件功能和壳体的支撑、防护等功能集成于一体,形

**基金项目:** 国家重点研发计划(2018YFB1105400)资助项目;国家自然科学基金(51475238,51605473)资助项目;江苏省科技支撑(BE2016010-3)资助项目;江苏省自然科学基金(BK20161476)资助项目。

**收稿日期:** 2019-04-28; **修订日期:** 2019-10-20

**通信作者:** 赵剑峰,男,教授,博士生导师, E-mail: zhaojf@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 张鑫,李冬,赵剑峰,等. 基于选择性激光烧结的结构电路一体化技术研究[J]. 南京航空航天大学学报,2020,52(1):87-92. ZHANG Xin, LI Dong, ZHAO Jianfeng, et al. Preparation of intergrated structure and circuit based on selective laser sintering[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1):87-92.

成所谓一体化结构电路<sup>[1]</sup>。结构电路一体化技术的优势有:(1)集成度高,减少所需零件数量,减小体积,降低成本;(2)加工流程短,步骤较为简单,因而开发设计时间短,便于修正;(3)制造需求的原材料种类减少,较传统加工对环境更为友好。

简言之,这项技术就是将电路部分整合到机械结构上,这样可以有效减少传统排线带来的空间占用、导线易断路等问题。该工艺将机械部分与电气部分结合到一个部件上,给工业生产和组装提供了巨大的发展空间<sup>[2]</sup>。目前该技术已被较广泛地应用于医疗、通讯和汽车等领域,具体应用包括手机天线、牙科器具的高集成度电路板以及汽车方向盘电路等<sup>[3]</sup>。

近些年来,微小飞行器的快速发展也为结构电路一体化技术找到了一个新的应用领域,微小飞行器技术的关键就在于控制整个飞行器的质量,使用传统技术进行设计制造时,需要用导线来进行电气结构的连接,电路排线复杂易断,并且导线质量较大,不利于飞行器整体质量的控制。而使用结构电路一体化技术时,可以将导线做到结构件的表面,减轻质量的同时也优化了整体的结构,对于微小飞行器的设计制造意义重大。

但是在结构电路一体化技术中,成形方式一般是双组分注塑和热冲模压法,这两种方法完成成形都需要专用模具,之后才可以做出电路图案,并且注塑成形成本较高、成形周期长,且成形效果受限。所以需要找到一种新的成形方式来取代传统的注塑成形,如今最为方便快捷的成形方式是增材制造,增材制造中加工高分子材料的方式一般为选择性激光烧结(Selective laser sintering, SLS),因此尝试使用SLS来实现结构电路一体化技术中的成形工艺,这样一方面没有模具的限制,可以节约模具成本,另一方面又可以大大提高单次成形的效率,获得多样化的成形效果。

整个工艺分为两个部分:成形以及结构电路一体化功能尝试。成形选择了SLS,该方式是以二氧化碳激光器作为能源,利用计算机控制激光束在成形平面对铺好的基体粉末以一定的能量密度进行扫描烧结成形,层层堆积,最后形成立体成形件的过程。完成成形之后再通过激光活化以及化学镀的工艺在结构上制备出电路,以验证结构电路一体化功能,整体原理如图1所示。

## 1 试验思路及方法

试验主要分为3个步骤:选择性激光烧结成

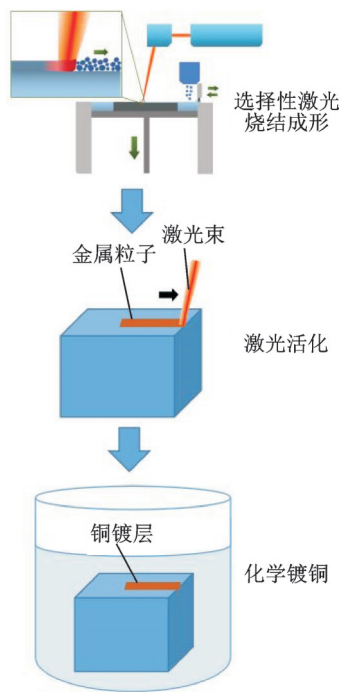


图1 结构电路一体化原理图

Fig.1 Diagram of integrated structure and circuit

形、激光活化和化学镀。第1步成形是将助剂粉末与基体粉末进行混合,再通过选择性激光烧结的方法对混粉进行烧结成形;第2步是在烧结成形的样件表面,使用激光绘制出需要的图案,实现激光活化;第3步是使用化学镀的手段在激光活化区域做出纯铜电路。

### 1.1 烧结成形

成形方式具体采用的是选择性激光烧结,该技术通过激光束产生高温使粉末原料表面熔融并相互粘结固化,其优点是材料适用性广泛、成形速度快、操作简便并且成形件无须支撑<sup>[4]</sup>,这个技术可以烧结非金属材料、复合材料和金属材料等,因此这个技术在3D打印技术里启用最广,前景也是最好的,并且使用该工艺做出的成形件可以直接用在一些工业产品上,这是其他的增材制造技术无法做到的<sup>[5]</sup>。

试验使用的烧结材料是聚苯乙烯,属于高分子基材料,高分子基材料烧结质量好,需要的预热温度低,成形需要的激光能量较小,试验较为方便。设备为自行搭建的烧结打印机,采用上铺粉设计,成形尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,原理如图1所示,加工流程为:漏粉缸漏粉-刮刀铺粉-激光烧结-成形缸下降,如此循环直至成形完成。激光器选用的为二氧化碳激光器,波长10.6 μm,最大功率30 W;基体粉末选用的是200目(直径74 μm)

的聚苯乙烯粉末,粉末呈白色;助剂主要成分为磷酸铜,粉末为浅绿色,添加量10%;混粉使用行星式球磨机,自转公转速度均为200 r/min,正反转各10 min交替进行共60 min。混合均匀之后的粉末呈现浅绿色,显微镜观察显示助剂分布均匀。球磨前后对比如图2所示,最上面为助剂,中间为基体聚苯乙烯粉末,下面为球磨混合后的粉末。

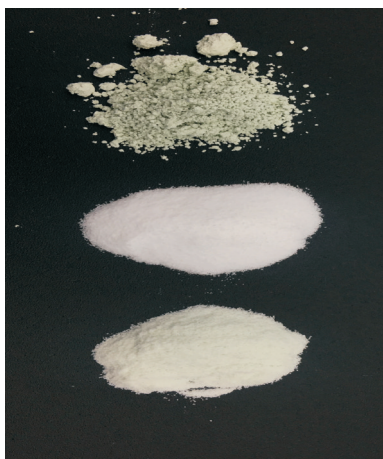


图2 粉末示意图

Fig.2 Pictures of three kinds of powder

选择性激光烧结过程中存在的最大问题是收缩和翘曲<sup>[6]</sup>,这两点缺陷也一直制约着这项技术的发展,缺陷产生根本原因是激光对粉末的加热不均匀,产生了较大的温度梯度,导致材料体系收缩的不一致<sup>[7]</sup>。为了解决这些缺陷主要采用的方法有更换基板材料和进行预热。加工材料是聚苯乙烯粉末,因此尝试使用了尼龙基板,同为高分子基材料之间会有较好的结合力,此外还在第1层采用了低速高功率的扫描策略以保证粉末完全熔融,这样烧结首层可以较好地粘附在基板表面,为接下来的成形垫定基础;此外在烧结过程中,使用远红外加热管对粉末进行预热,使粉末可以保持在熔点以下5~10℃,这样也有利于成形。

### 1.2 激光活化

使用激光对成形件表面进行粗化处理以方便后续化学镀时金属粒子沉积的过程叫激光活化<sup>[8]</sup>。进行激光活化的样件中含有一种特殊的有机金属化合物形态的添加物,本次试验即为磷酸铜,这种添加物在一定波长的聚焦激光束的照射下会分解产生金属原子,这些金属粒子即为还原铜的核子<sup>[9]</sup>。传统工艺中,需要对激光的功率、线速度以及脉冲频率进行合理选择,以此保证在活化过程中激光将基体材料烧蚀去除并且使得活化表面实现粗化<sup>[10]</sup>,但是对于选择性激光烧结打印的样件,由

于本身烧结成形的激光功率与活化功率接近,所以在激光活化的过程中会对样件表面进行二次熔融,而在传统工艺中激光活化是对表面材料进行烧蚀去除,两者的活化效果存在差异,因此需要通过试验进行验证。

选用的活化激光器为光纤激光器,中心波长1 064 nm,最大扫描速度为4 500 mm/s,最大功率为30 W,脉冲频率50 kHz,选择了多组参数对烧结成形件表面进行活化试验,主要调整了激光功率以及扫描速度,选择激光功率分别为最大功率的25%,50%,75%和100%,扫描速度分别为1 500,2 500,3 500和4 500 mm/s,组合共16组参数,使用这些参数对烧结件表面进行激光活化。

### 1.3 化学镀

正如活化步骤中所说,激光活化过后活化区域有金属粒子析出,这些金属粒子可以作为化学镀的靶点,从而在表面化学镀上一层薄铜。化学镀铜是指在没有外界电流的情况下,利用基体表面的催化活性使溶液中的金属铜盐与还原剂发生氧化还原反应,从而在基体表面沉积出具有一定厚度的金属铜层的一种表面处理技术,因其没有外界电流,因此常又被称作不通电镀<sup>[11]</sup>。

标准的化学镀铜流程为粗化—催化—化学预镀铜—微蚀—预浸—离子钯—化学镍<sup>[12]</sup>,本次试验只进行到化学预镀铜步骤来验证该项工艺的可行性。化学镀试剂选用为自行配置的化学镀溶液,主要成分包括还原剂、络合剂、稳定剂和加速剂等,配置的溶液呈深蓝色,溶液呈碱性,pH约为11,其中还原剂主要是甲醛;络合剂主要是羟基乙酸、三乙醇胺;稳定剂主要包含二巯基苯并噻唑、五氧化二砷;加速剂则为氰化物、丙基腈和邻二氮杂菲等<sup>[13]</sup>。化学镀温度为43℃,加热方式选择了水浴加热,在这样的环境下进行化学镀尝试,化镀时间为2 h。

### 1.4 性能测试

性能测试不仅是对做出的电路性能进行评价,更是对这整套工艺的评价,因此需要测试的性能参数主要包括镀速以及导电性。

#### 1.4.1 镀速

镀速是评价结构电路一体化工艺的重要指标,较快的化学镀速可以较快完成预镀进行后续处理从而缩短整个工艺周期,传统的工艺流程中,化学镀的速度一般为5~10 μm/h。镀速测量是通过测量一定时间内化学镀样件前后的质量差确定镀层质量从而算出镀速,可以采用如下公式计算镀速 $v$



(单位为 $\mu\text{m}/\text{h}$ ),即

$$v = \frac{\Delta m \times 10^4}{\rho A t} \quad (1)$$

式中: $\Delta m$ 为样件前后质量差; $\rho$ 为铜的密度,为 $8.93 \text{ g}/\text{cm}^3$ ;  $A$ 为镀层面积; $t$ 为化学镀时间<sup>[14]</sup>。

#### 1.4.2 导电性

为了保证实用性,预镀出的纯铜电路需要在导电性上表现良好。对于电阻率的测量主要有两种方案:一种是直接使用数字式四探针测试仪对镀层的电阻率进行测量;另一种是测出镀出电路的电阻,利用电阻与截面积、长度之间的关系(式(2))进行计算,使用这两种方法对电阻率进行测量,对比结果。

$$\rho = \frac{RS}{L} \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为电阻率; $R$ 为电阻; $S$ 为截面积; $L$ 为长度。

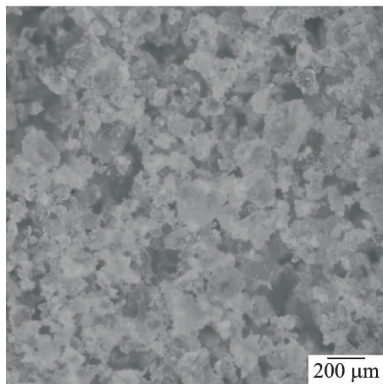
## 2 试验结果与分析

### 2.1 烧结成形

烧结成形打印立方体样件尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,如图3所示。样件表面较为粗糙,致密度较差,实际尺寸 $19.90 \text{ mm} \times 19.72 \text{ mm} \times 9.84 \text{ mm}$ ,X轴收缩率 $0.5\%$ ,Y轴收缩率 $1.4\%$ ,Z轴



(a) Macrostructure of the sintering surface



(b) Micrograph of the sintering surface

图3 SLS激光烧结表面的宏观以及显微图

Fig.3 Macrostructure and micrograph of the sintering surface

收缩率 $1.6\%$ 。由此可见,打印过程中虽然未产生翘曲,但收缩问题依然存在。

### 2.2 激光活化

在16组参数下的活化后的表面如图4所示。活化后的表面呈现深褐色,在较小的激光能量下,活化区域未发生熔融,表面依然比较粗糙,只是颜色产生了变化,如图4左上所示;在较大的激光功率下,表面完全熔融,因此表面反而较为光滑,如图4右下所示。

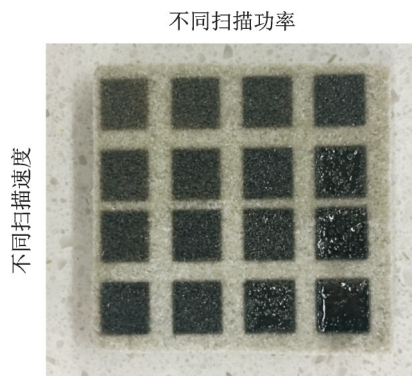


图4 活化表面

Fig.4 Surface after activation

参考传统工艺最优参数应为速度 $2500 \text{ mm}/\text{s}$ ,功率 $20 \text{ W}$ 左右,对图4中 $2500 \text{ mm}/\text{s}$ ,功率 $75\%$ 的实验组进行观察分析。通过SEM扫描电镜对活化区域进行观察,电镜图可以看出活化后的表面较为光滑平整,这与传统结构电路一体化工艺加工下的活化表面形貌有较大差异。传统活化工艺活化后的表面由于激光将基体材料烧蚀,表面产生了很多微小的凹坑从而使得表面整体较为粗糙<sup>[10]</sup>。此外为了验证激光活化过程是否将添加助剂分解,对表面做了能谱分析以分析其中元素,结果显示,活化后的表面大部分是铜元素,此外还有较多碳氧元素,碳氧应该来自于基体的高分子材料。大量的铜元素可以作为化学镀的靶点,因此理论上可以是实现化学镀铜,但是由于表面形貌与传统工艺相比未发生粗化,所以镀层与基体的结合力存在疑问。图5为活化区域的扫描电子显微镜图扫描电镜图以及能谱分析。

### 2.3 化学镀

对活化表面进行化学镀试验,使用同样的化学镀溶液以及环境进行,试验结果如图6所示。16个活化表面均有铜析出,但是铜层质量最好的是在 $100\%$ 激光功率以及 $3500 \text{ mm}/\text{s}$ 的扫描速度下的活化区域。

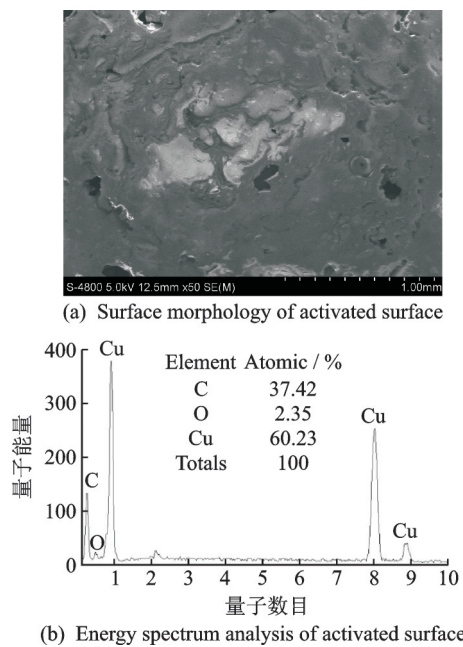


图 5 活化后的微观表面形貌与能谱分析图

Fig.5 Surface morphology and energy spectrum analysis of activated surface

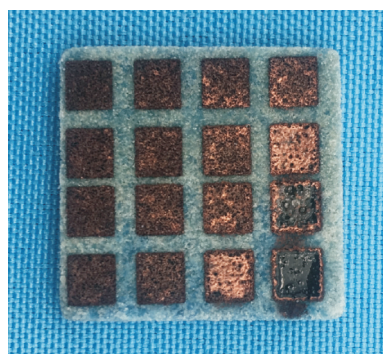


图 6 不同活化参数下的化学镀结果

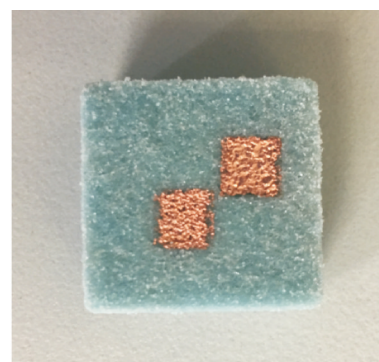
Fig.6 Clad layers under different activation parameters

使用该参数再次进行试验,试验结果表明在此活化参数下,依然有较好的铜镀层析出,结果如图 7 所示。对镀层进行扫描电镜观察,电镜图可以看出析出的铜质量较好,通过能谱分析表面析出的成分是纯铜,含有少量的碳氧元素,分析碳氧元素存在可能是因为能谱分析时扫描过深,扫至基体材料,基体材料为高分子聚合物,基本成分就为碳氢氧。

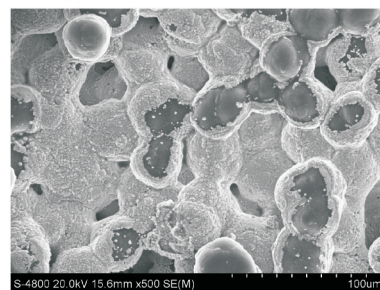
## 2.4 性能测试

### 2.4.1 镀速

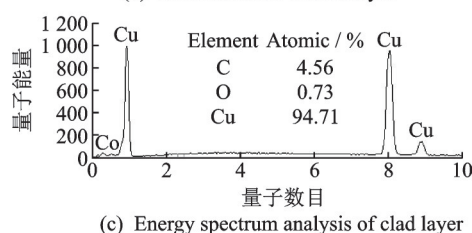
使用最优的激光活化参数做出 1 块  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  的正方形区域,活化参数为扫描速度为  $3\ 500\text{ mm/s}$ ,扫描功率为  $30\text{ W}$ ,脉冲频率  $50\text{ kHz}$ ,对活化区域进行化学镀,时间为  $2\text{ h}$ ,测 5 组数据,取  $\Delta m$  的平均值为  $0.003\ 4\text{ g}$ ,代入式(1)算出平均



(a) Macrostructure of clad layer



(b) Microstructure of clad layer



(c) Energy spectrum analysis of clad layer

图 7 化学镀铜的宏观微观表面形貌以及能谱分析

Fig.7 Macrostructure, microstructure and energy spectrum analysis of clad layer

化学镀速为  $7.61\ \mu\text{m/h}$ ,与传统工艺参数接近,且镀速较快。

### 2.4.2 导电性

铜的电阻率约为  $1.80 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{cm}$ ,预镀出电路的电阻率需要接近纯铜才可以保证较好的导电性,使用数字式四探针电阻率测试仪对镀层的电阻率进行测量,为防止存在随机误差,在最优活化以及化学镀工艺下做出 5 组样件,分别对 5 组样件的电阻率进行测量,5 组参数取平均值得出镀层电阻率约为  $8.30 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{cm}$ ,与纯铜在  $20\text{ }^\circ\text{C}$  的电阻率接近。

此外还采用了公式计算的方法来计算其电阻率,使用该工艺在烧结件表面做出  $5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的镀铜长条,计算得出镀层厚度约为  $3.8\ \mu\text{m}$ ,使用高精度数字万用表测量该段电阻为  $0.11\ \Omega$ ,代入式(2)计算得电阻率为  $8.36 \times 10^{-6}\ \Omega \cdot \text{cm}$ ,与四探针测量结果接近。因此可以证明,本试验制备的铜镀层具有较好的导电性,具备了结构电路一体化的功能性。

### 3 结 论

本文尝试了将选择性激光烧结技术与结构电路一体化技术相结合,使用选择性激光烧结的方式对添加了助剂的聚苯乙烯粉末进行成形,尝试在烧结成形件的表面进行激光活化与化学镀,最终做出表面质量较好的镀铜层,并且镀层在镀速以及导电性方面均表现优良,可以进行实际应用。该项技术的验证,将会对传统的结构电路一体化技术进行优化,也将会给微型机器人、飞行器的减重以及结构设计优化带来新的思路,具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 刘新民, 刘越. MID工艺制程电路图案金属化工艺[J]. 电镀与涂饰, 2013(4): 32-35.  
LIU Xinmin, LIU Yue. Metallization technology for circuit patterns in MID process[J]. Electroplating & Finishing, 2013(4): 32-35.
- [2] ZHUO Y, ALVAREZ C, FELDMANN K. An integrated design system for molded interconnect devices (3D-MID) [C]//Digital Enterprise Technology. Boston, MA, US: Springer, 2007.
- [3] 曾祥斌, 杨汇鑫, 龙杰明, 等. 碱式磷酸铜的合成及其 LDS 功能研究[J]. 塑料工业, 2016, 44(2): 34-38.  
ZENG Xiangbin, YANG Huixin, LONG Jieming, et al. Study on synthesis of copper hydroxyphosphate and its properties of laser direct structuring[J]. China Plastics Industry, 2016, 44(2): 34-38.
- [4] KUMAR S. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach [J]. JOM, 2003, 55 (10): 43-47.
- [5] 许小曙. 尼龙材料的 SLS 成形技术[J]. 建设机械技术与管理, 2013(8): 74-75.  
XU Xiaoshu. Nylon material's SLS shaping technology [J]. Construction Machinery Technology & Management, 2013(8): 74-75.
- [6] WIEDEMANN B, DUSEL H, ESCH J. Investigation into the influence of material and process on part distortion[J]. Rapid Prototyping Journal, 1995, 1(3): 17-22.
- [7] 潘建新, 陈儒军. 基于 SLS 技术的烧结件变形控制研究[J]. 机械研究与应用, 2011(3): 172-174.  
PAN Jianxin, CHEN Rujun. Study on the deformation control of sintering workpiece based on SLS technology[J]. Mechanical Research & Application, 2011 (3): 172-174.
- [8] FRANKE J. Three-dimensional molded interconnect devices (3D-MID) [M]. Cincinnati, OH, USA: Hanser Publications, 2014.
- [9] 邢振发. 3D-MIDS 改性塑料的激光活化和金属化[J]. 印制电路信息, 2003(2): 37-38.  
XING Zhenfa. Laser activation and metallization of modified thermoplastics for 3D-MIDS[J]. Printed Circuit Information, 2003(2): 37-38.
- [10] KORDASS T, FRANKE J. Galvanic plating for 3D-MID applications [C]//International Spring Seminar on Electronics Technology. [S.l.]: IEEE, 2014: 491-495.
- [11] 姜晓霞, 沈伟. 化学镀理论及实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.  
JIANG Xiaoxia, SHEN Wei. The fundamental and practice of electroless plating [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [12] LI J, HAYDEN H, KOHL P A. The influence of 2, 2'-dipyridyl on nonformaldehyde electroless copper plating[J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(11): 1789-1795.
- [13] PARK S J, KO T J, YOON J, et al. Copper circuit patterning on polymer using selective surface modification and electroless plating[J]. Applied Surface Science, 2016, 396: 1678-1684.
- [14] 代竟雄, 钟良, 龚伟, 等. 基于激光活化的 ABS 塑料表面化学镀铜工艺[J]. 电镀与涂饰, 2017(19): 1039-1043.  
DAI Jingxiong, ZHONG Liang, GONG Wei, et al. Electroless copper plating on ABS plastic based on laser activation[J]. Electroplating and Finishing, 2017 (19): 1039-1043.

(编辑:刘彦东)