

激光烧结导电路路的气孔抑制

陈天宇, 顾明飞

引用本文:

陈天宇, 顾明飞. 激光烧结导电路路的气孔抑制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(9): 1958–1966.

CHEN Tian-yu, GU Ming-fei. Stoma suppression of laser sintering conductive circuit[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1958–1966.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202809.1958>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微流体脉冲惯性喷射技术制备微电极

Fabrication of microelectrodes based on microfluidic pulse inertial jetting technology

光学精密工程. 2015, 23(10z): 291–296 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152313.0291>

射频识别标签天线的按需微喷射制备

Fabrication of RFID tag antennas based on drop-on-demand technology

光学精密工程. 2016, 24(1): 73–82 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162401.0073>

选区激光熔化成形W–Ni–Cu的成形工艺及热物理性能

Process parameters and thermal physical properties of W–Ni–Cu composite fabricated using selective laser melting

光学精密工程. 2019, 27(5): 1024–1032 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192705.1024>

蓝光辐照对PET和SiO₂基石墨烯导电性能的影响

Electrical conductivity of graphene film electrodes on PET and SiO₂ substrate under blue light irradiation

光学精密工程. 2016, 24(10s): 162–168 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162413.0162>

变能量激光选区熔化IN718镍基超合金的成形工艺及高温机械性能

Forming process and high-temperature mechanical properties of variable energy laser selective melting manufacturing IN718 superalloy

光学精密工程. 2015, 23(6): 1695–1704 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152306.1695>

文章编号 1004-924X(2020)09-1958-09

激光烧结导电线路的气孔抑制

陈天宇*, 顾明飞

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 针对激光烧结导电线路内部会产生大量气孔阻碍导电性能进一步提升的问题, 通过单因素试验研究工艺参数对导电线路形貌变化的影响规律, 明确导电线路的烧结特性后提出了变参数的烧结方法来抑制气孔成形。该方法首先依据烧结导电线路时发生的形貌变化来选取满足条件的烧结参数, 然后通过单因素试验确定最优烧结方式, 最后检测最优方式烧结后导电线路的气孔情况和微观组织来验证和分析该方法的有效性。结果表明, 激光功率显著影响导电线路的形貌变化, 低功率烧结时导电线路体积收缩, 高功率烧结时导电线路体积膨胀, 基于导电线路烧结特性形成的最优烧结方式不仅能够有效抑制气孔成形, 而且提高了 35.6% 的导电性能。该研究基于烧结工艺方法来获得气孔较少、导电性能良好的导电线路, 对电子产品中成形质量优良的导电线路具有积极意义。

关键词: 激光烧结; 形貌变化; 变参数烧结; 抑制气孔; 导电性能

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202809.1958

Stoma suppression of laser sintering conductive circuit

CHEN Tian-yu*, GU Ming-fei

(School of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: cty15061772687@sina.com

Abstract: To reduce the large number of stoma generated inside a conductive circuit during laser sintering, which impede further improvements in conductivity, a single factor test was conducted to study the influence of process parameters on the morphology change of a conductive circuit. Once the sintering characteristics of the conductive circuit were determined, a sintering method with variable parameters was proposed to suppress the formation of stoma. The proposed method first selects the sintering parameters that meet the requirements according to the morphological change of the conductive circuit, then determines the optimal sintering method through the single-factor test method. Finally, the stoma and microstructure of the conductive circuit sintered by the optimal method are detected and the effectiveness of the method is analyzed. The results show that laser power significantly affects the morphology of the conductive circuit; the volume of the conductive circuit shrinks during low-power sintering and expands during high-power sintering. The optimal sintering method, based on the sintering characteristics of the conductive circuit, effectively suppresses the formation of stoma, improving the conductivity by 35.6%. The results of this study, based on a sintering process that yielded a conductive circuit with fewer stoma and increased

收稿日期: 2020-03-10; 修订日期: 2020-04-29.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2017YFB110300); 江苏省重点研发计划资助项目 (No. BE2018010)

conductivity, are significant for conductive circuit performance and can confer excellent forming qualities to electronic products.

Key words: laser sintering; morphology change; variable parameter sintering; suppression of stomata; electrical conductivity

1 引言

近年来,由金属纳米颗粒制备的导电浆料因良好的导电性能和所需烧结温度较低,成为电子产品中导电路理想的功能性材料。目前,已有学者将导电浆料应用于三维结构电子^[1]、柔性电子^[2-7]、封装电子^[8-9]等领域,来实现电子元器件间的电气互连,显示出巨大潜能和广阔的商业化应用前景。喷射打印导电浆料后金属颗粒被有机物包裹未能形成导电通路,需要使用激光束烧结导电浆料引起有机物的分解和挥发,促使金属颗粒相互接触后,导电路才具备导电功能,所以激光烧结导电浆料^[10-16]是制造电子产品的高新技术。

研究激光烧结导电路的导电性能对电子产品有重要意义,在不合理的参数烧结后导电路的电阻较大会导致设备中不必要的功率损耗,在电池电量有限的前提下势必会影响电子产品的续航能力。Bai^[17]通过对纳米银浆的有机成分开展热重分析,得出结论:在高的烧结温度下有机物才能够有大量的热分解,因此采用高能量密度的激光束来烧结导电路更有优势,但这也带来一些问题。Niittynen 等^[18]和 Niizeki 等^[19]通过扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscopy, SEM)观察激光烧结的试样,发现内部存在大量气孔并且孔隙率很高。有学者初步解释了导电路气孔的成形机理,Ermak 等^[20]认为激光烧结导电银浆时最表层迅速形成致密的金属层,在金属层形成后分解的有机物很难挥发出去,所以滞留在内部形成气孔。而电子运动经过气孔时需要“跳跃”至相邻的银颗粒结构,使得电子运动效率降低^[21],因此产生的气孔会阻碍导电性能进一步提升,有必要开展抑制气孔成形的研究。

针对激光烧结导电路产生气孔的问题,Ermak 等^[20]研究表明在相同烧结条件下更低的

有机物含量和更薄的油墨层厚会获得更低的电阻率,因此推测通过减少有机物的含量或者沉积更薄的导电银浆能够产生更少的气孔,但是从材料和沉积端来抑制气孔成形的想法并未进一步验证。Kwak 等^[22]使用光子从背面烧结印刷在透明基板上的银线,通过“自下而上”的热传导方式能够使有机物分解产生的气体顺利挥发从而获得无气孔的银线,但是使用光子背面烧结银线的方法对基体的透光率有特殊要求,从而限制了该方法的应用领域,所以上述抑制气孔产生的方法均存在局限性,需探究更优的烧结方法来抑制导电路的气孔成形。

本文首先开展激光烧结导电路实验,从导电路横截面气孔情况分析形貌变化与工艺参数的关系,然后结合导电路的烧结特性提出变参数的烧结方法开展气孔抑制研究,最后确定最优烧结方式后验证和分析该方法抑制导电路气孔成形的有效性。

2 实验

2.1 材料与设备

实验采用导电银浆(NT-ST60S,中科纳通电子技术有限公司)作为导电路材料,其具体性能如表1所示。采用耐热性能优异的聚醚醚酮(PEEK)作为沉积导电路的基体材料,可以有效减轻激光烧结对基体造成的热损伤。采用自动喷射系统(Nordson EFD,美国)在基体上喷射形成长度为30 mm的导电路,喷射系统的基本参数设置如表2所示。导电路喷射成形后,采用连续二极管激光(IRM808TA-6000FC, Shanghai Laser & Optics Century Co. Ltd)提供的进行烧结,该激光波长为808 nm,焦距为10.5 mm,光斑直径为180 μm。烧结时,调整准直镜高度使导电路上表面处在焦距面,以获得足够的激光能量。

表1 导电银浆性能

Tab. 1 Property of conductive silver paste

Property	Viscosity/(mPa · s)	Particle size/μm	Ag content/%	C content/%	O content/%	Si content/%
value	82 500	0.5~1.5	50.52	29.76	18.72	1.00

表 2 喷射系统基本参数设置

Tab. 2 Basic parameter setting for injection system

Parameter	Nozzle diameter/ μm	Nozzle height/mm	Nozzle moving speed/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	Firing pin angle/ $(^\circ)$	Fluid pressure/kPa	Valve pressure/kPa	Nozzle temperature/ $^\circ\text{C}$	Firing pin frequency/Hz
Value	200	2	15	630	400	520	60	25

使用激光共聚焦显微镜(VK-X100, Keyence, 日本)分别采集导电路径沉积和烧结后标记处的三维形貌,使用分析软件(VK-X Series)对采集的三维形貌进行测量得到标记处的横截面积数据(S)。使用场发射环境扫描电镜(FEI Quanta 250F, 美国)观察导电路径横截面的气孔情况和微观组织,能谱仪(EDS)分析导电路径表面和内部元素含量。通过直流低电阻测试仪(HPS2512B, 海尔帕)测量烧结后导电路径的电阻。

2.2 实验设计

选择激光功率(P)和扫描速度(V)两个因素,开展激光烧结导电路径的单因素实验,共 16 组,每组实验重复 3 次,具体参数如表 3 所示。

表 3 激光烧结导电路径实验参数设置

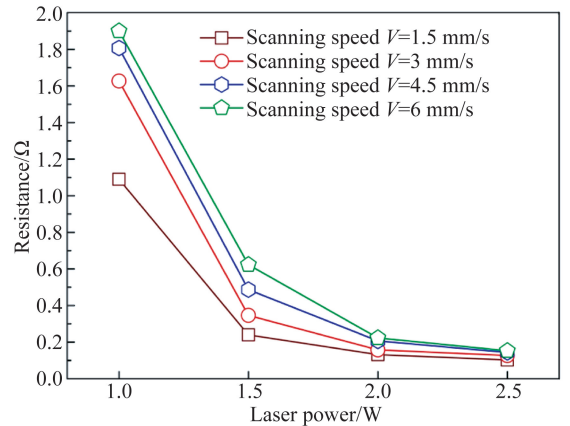
Tab. 3 Experimental parameter setting for laser sintering conductive circuit

Experiment number	Laser power/W	Scanning speed/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	1	1.5
2	1	3
3	1	4.5
4	1	6
5	1.5	1.5
6	1.5	3
7	1.5	4.5
8	1.5	6
9	2	1.5
10	2	3
11	2	4.5
12	2	6
13	2.5	1.5
14	2.5	3
15	2.5	4.5
16	2.5	6

3 实验结果与分析

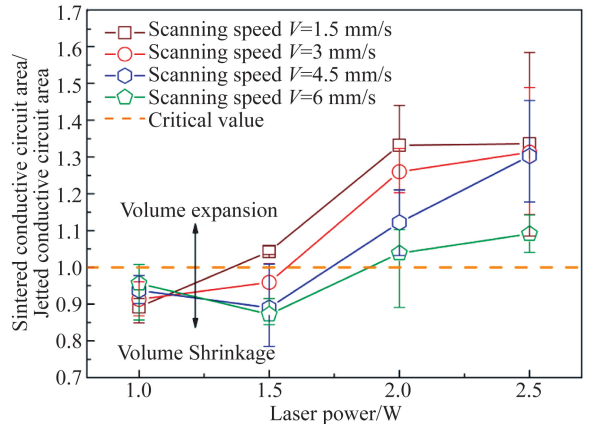
3.1 烧结参数对形貌的影响

如图 1(a)所示,导电路径的电阻值随着激光功率的增加而减少,并且在功率相同时随着扫描速度的上升而增大。将导电路径烧结后和喷射后的横截面积(S)折合成比值的形式,以此判断导电路径在各激光工艺参数烧结时发生的形貌变化,如图 1(b)所示。



(a) 导电路径电阻与工艺参数的关系

(a) Relationship between resistance of conductive circuit and process parameters



(b) 导电路径形貌变化与工艺参数的关系

(b) Relationship between morphology change of conductive circuit and process parameters

图 1 激光烧结导电路径实验结果

Fig. 1 Experimental results of laser sintered conductive circuit

当激光功率为 1 W 时,导电路径体积发生收缩,并且收缩的程度随扫描速度的下降而增大。当激光功率为 1.5 W 时,除了扫描速度为 1.5 mm/s 时导电路径体积发生膨胀,其他扫描速度均发生收缩,并且收缩的程度与扫描速度呈正相关关系。当激光功率为 2 W 和 2.5 W 时,导电路径的体积均发生显著的膨胀,并且随着功率的增加导电路径的体积膨胀趋势趋于平缓。该功率区间中激光束的扫描速度越慢,导电路径的膨胀程度越大。

图 2(a)和 2(b)表明,使用低功率激光烧结合导电路径时表面金属层致密度较低,热分解的有机物能够顺利地挥发,相应的导电路径体积发生收缩,此时内部未产生气孔。表 4 中试样 1 和 2 表明,降低扫描速度只能轻微增加有机物分解和挥发的量,相应的导电路径的收缩程度随着扫描速度的下降而增大,此时有机物含量仍旧较高所以导电性能不理想。图 2(c)和 2(d)表明,当激光功率相同时,较低的扫描速度使得表面趋于致密化,分解的有机物只有少部分无法挥发形成气孔,导致导电路径体积膨胀,而其他扫描速度时导电路径表面的致密程度相对较低,分解的有机物大部分能够挥发导致导电路径体积收缩。表 4 中试样 3 和 4 显示各元素含量差异较小,表明在该功率尽管较快的扫描速度能够分解的有机物较少,但是导电路径表面的致密程度随着扫描速度的上升逐渐降低,因此在高扫描速度时有机物的挥发难度

较低,即高扫描速度比其他扫描速度能够挥发更多的有机物,从而导致收缩程度随着扫描速度的上升而增大。图 2(c)和 2(e)表明,当扫描速度相同时气孔随激光功率的增加而增多。表 4 中试样 3 和 5 表明更高功率的激光束引起有机物迅速而剧烈的分解,有机物分解的量更多,同时导电路径表面的金属化速率和致密程度较高,有机物分解产生的气体在金属化完成后较难挥发出去,所以形成了更多的气孔,相应的导电路径的膨胀程度随激光功率的增加而增大。图 2(e)和 2(f)表明在高功率的情况下气孔随激光束扫描速度下降而增多,表 4 中试样 5 和 6 表明激光束功率相同时,扫描速度的下降延长了激光停留时间 $\tau^{[23]}$,此时热量的穿透深度 $l_{th}^{[23]}$ 相对较大能分解有机物的量更多,但因为挥发比较困难所以导电路径内部产生更多的气孔,相应的导电路径的膨胀程度随扫描速度的下降而增大。尽管高功率激光烧结合比低功率激光烧结合能够分解和挥发更多的有机物,从而使导电路径的性能更好,但是会产生大量气孔阻碍导电性能进一步提高。

图 3 表明,使用功率为 2.5 W 的激光束会对导电路径表面造成严重的热损伤,该功率下各扫描速度均会使导电路径表面出现凹陷,并且凹陷的程度随着扫描速度的上升而减少,分解的部分有机物可从凹陷区域中挥发,该功率烧结合的导电路径的膨胀程度减缓。

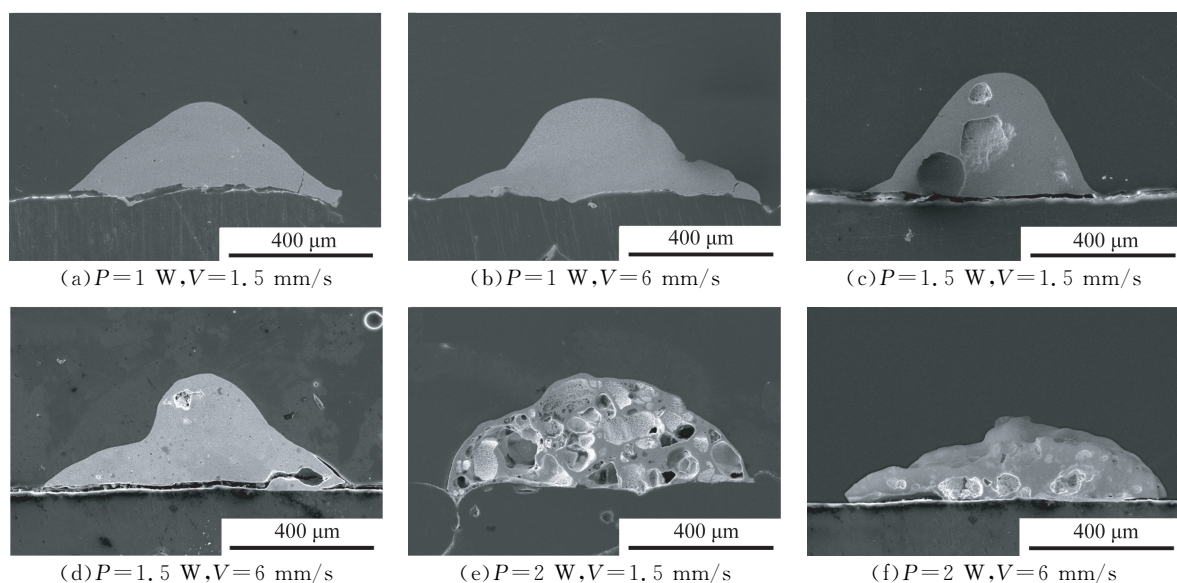


图 2 导电路径横截面 SEM 图片

Fig. 2 SEM images of cross section of conductive circuit

表 4 导电线路内部元素含量和电阻值

Tab. 4 Element content and resistance value of conductive circuit

Sample	Parameters used for sintering		Element/%				Resistance/ Ω
	P/W	$V/(mm \cdot s^{-1})$	Ag	C	O	Si	
1	1	1.5	56.98	24.56	16.57	1.89	1.090
2	1	6	53.49	27.51	17.13	1.87	1.780
3	1.5	1.5	60.43	24.47	13.41	1.68	0.240
4	1.5	6	58.74	24.06	15.38	1.82	0.623
5	2	1.5	73.40	14.13	10.86	1.61	0.156
6	2	6	62.73	19.42	16.22	1.62	0.223

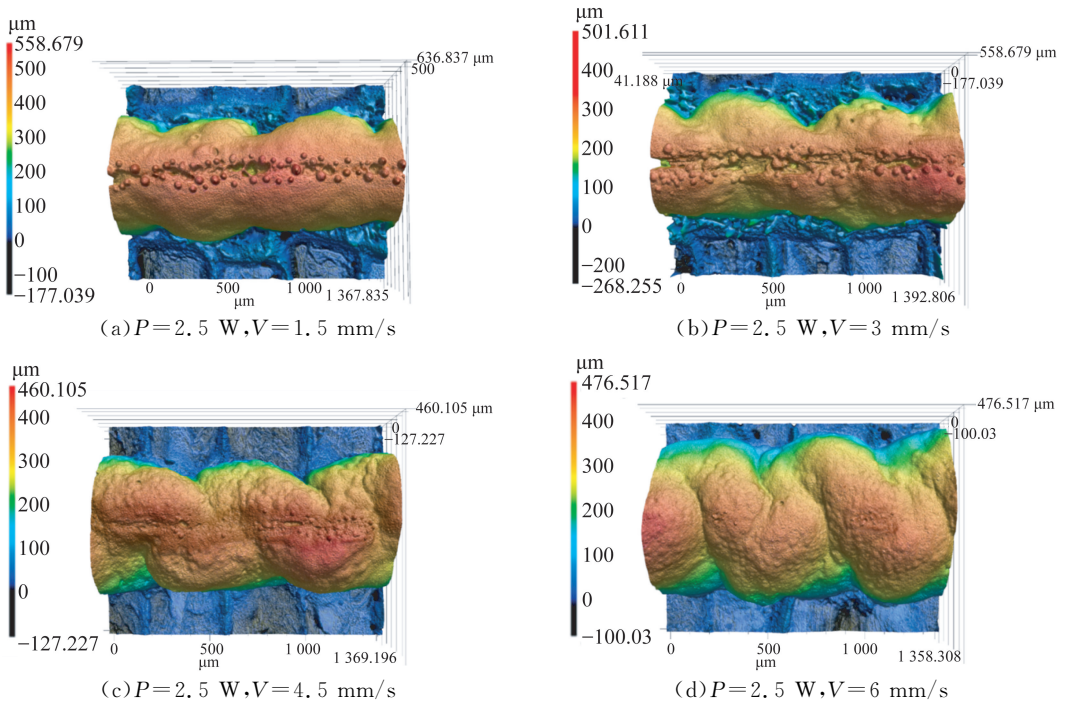


图 3 过功率激光束烧结导电线路的 3D 显示图

Fig. 3 Three-dimensional images of conductive circuit sintered by high-power laser beam

3.2 变参数烧结的方法

单次烧结带来的热量只能分解和挥发有限的有机物,因此导电性能不理想,可对导电线路进行多次烧结以提高导电性能。而导电线路表面形成的致密金属层首先会阻碍有机物挥发形成大量气孔,其次该金属层会反射激光束的能量,这会使得后续的烧结能量不能有效地传导造成能量的浪费,因此只有使用合适的激光能量进行多次烧结才能够增加有机物分解的量,并且使分解的有机物在多次烧结过程中持续地挥发。

低功率激光烧结导电线路尽管内部未形成气孔,但是导电性能不理想,高功率激光烧结导电线路尽管导电性能较理想,但是内部会形成大量气孔,因此可利用导电线路在低和高功率激光束下

的烧结特性,结合两者的优势采用变参数烧结方法来抑制气孔成形。

导电线路发生的形貌变化可作为判断气孔的宏观依据,因此可依据形貌变化来选取烧结的能量密度。在激光参数($P=1.5 W, V=6 mm/s$)烧结后导电线路的体积收缩程度比其他参数更大,表明使用该参数的激光束来烧结导电线路时,能够在不使表面形成致密金属层的前提下最大程度地分解和挥发有机物,并且后续使用该参数多次烧结能够使有机物不断的挥发,所以选用该参数作为激光束烧结的低能量密度 E_L 。因为功率为 $2.5 W$ 的激光束会对导电线路的形貌产生热损伤,所以选取较低功率的参数($P=2 W, V=1.5 mm/s$)作为激光束烧结的高能量密度 E_H 。

分阶段对导电路径进行烧结,第一阶段调整低能量密度激光束的持续时间来烧结合导线路,第二阶段控制高能量密度激光束的持续时间以避免对导电路径形貌产生严重的热损伤使之失效。根据激光束面能量密度公式(1)得 E_L 和 E_H 分别为 138.88 J/cm^2 和 740.74 J/cm^2 ,分别使用低能量和高能量的激光束来往复烧结合导线路,变化的低能量烧结合次数搭配固定的高能量烧结合次数形成的烧结合方式如表 5 所示,表中 T_L 和 T_H 是由式(2)得出的,分别代表低、高能量密度激光烧结合时对应的激光持续时间。各烧结合方式重复 3 次,最终以导电性能为指标确定最优的烧结合方式:

$$E_{\text{AED}} = \frac{P}{V \times d}, \quad (1)$$

$$T_D = \frac{L}{V} \times S_T, \quad (2)$$

其中: d 为激光束光斑直径, T_D 为激光持续时间, L 为导电路径长度, S_T 为烧结合次数。

表 5 烧结合方式

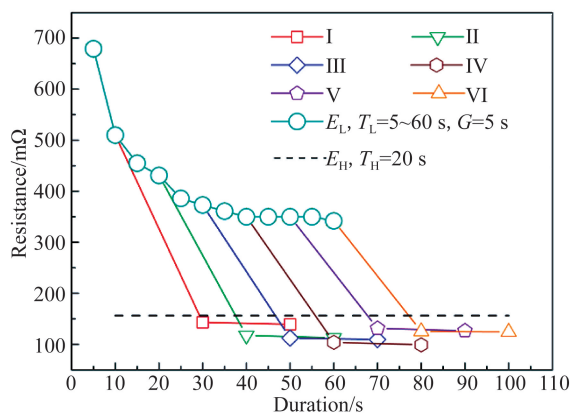
Tab. 5 Sintering methods

Sintering method	E_L sintering times- T_L /s	E_H sintering times- T_H /s
I	2~10	
II	4~20	
III	6~30	
IV	8~40	2~40
V	10~50	
VI	12~60	

3.3 导电路径气孔抑制研究

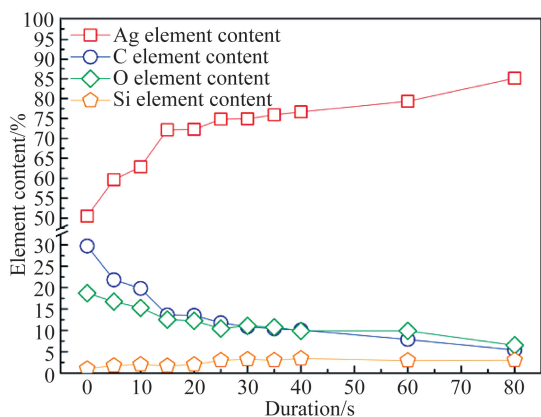
图 4(a)表明增加 E_L 激光的持续时间,导电路径的电阻值先显著下降然后趋于稳定,再使用 E_H 激光束烧结合后,大幅提高了导电性能。在 I~IV 的烧结合方式下, E_L 烧结合的持续时间越长, E_H 烧结合能够提升导电性能的幅度就越大;在 V~VI 的烧结合方式下,随着 E_L 烧结合持续时间过多, E_H 烧结合提升的导电性能幅度减少。各烧结合方式与 E_H 烧结合 20 s 相比均能够一定程度提升导电路径的导电性能,以电阻值为指标确定最优的烧结合方式为 IV,即先使用 $E_L = 138.88 \text{ J/cm}^2$, $T_L = 40 \text{ s}$ 的激光束烧结合后再使用 $E_H = 740.74 \text{ J/cm}^2$, $T_H = 40 \text{ s}$ 的激光束来烧结合导电路径。图 4(b)表明使用最优方式烧结合时,增加 E_L 烧结合的持续时间会使得导电路径表面的有机物成分逐渐减少,金属层的致密程度先显著上升然后趋于稳定,该

过程中随着金属层逐步致密导致被反射的激光束能量逐渐增多,能够被导电路径吸收的能量逐渐减少,相应的有机物分解的量逐渐减少并且银颗粒的烧结合进展缓慢。 E_L 激光束烧结合 40 s 后金属层的致密程度达到该能量密度的峰值,这验证了图 4(a)中继续增加 E_L 烧结合持续时间已不能提升导电性能,即 40 s 为最理想的烧结合持续时间。



(a) 各方式烧结合导电路径的电阻值与烧结合持续时间的关系

(a) Relationship between resistance value and duration of sintered conductive circuit with various methods



(b) 最优方式烧结合导电路径表面元素含量与烧结合持续时间的关系

(b) Relationship between surface element content and duration of sintered conductive circuit with optimal methods

图 4 变参数烧结合导电路径实验结果

Fig. 4 Experimental results of sintering conductive circuit with variable parameters

图 5 表明, E_L 激光束烧结合 5 s 后导电路径内部仅产生少量气孔,烧结合 40 s 后导电路径内部明显产生更多的气孔,最后使用 E_H 激光束烧结合 40 s 后导电路径内部气孔显著增加;但是与 E_H 激光束烧结合 20 s 相比,该方法产生的气孔更少,因此该方法能够有效抑制导电路径内部的气孔成形。

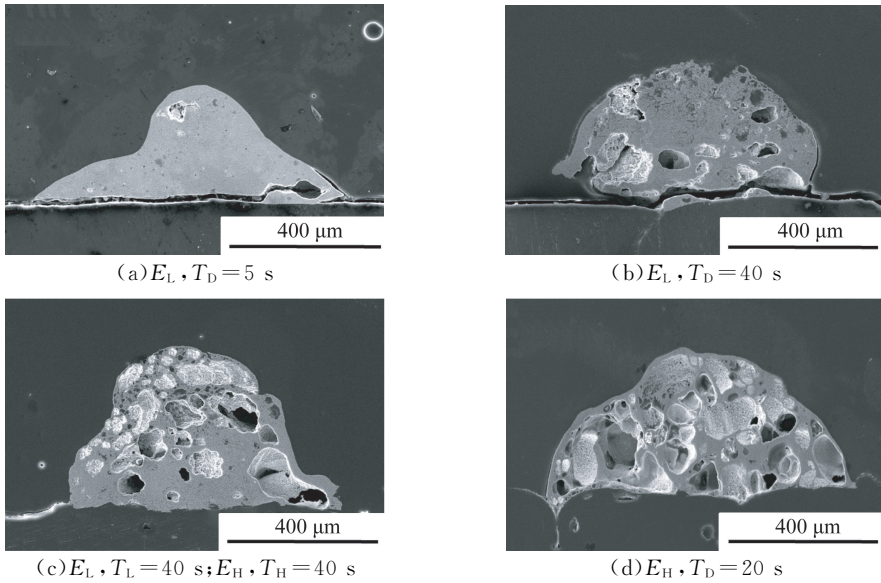


图 5 最优方式与高能量密度烧结导电路横截面的 SEM 图

Fig. 5 SEM images of cross section of conductive circuit sintered with optimal way and high energy density

表 6 表明,使用 E_L 激光烧结 40 s 能够将导电路内部有机物含量降至较低水平,此时有机物挥发的程度几乎已经与 E_H 烧结 20 s 相当,再使用 E_H 激光烧结 40 s 导电路能够进一步热分解剩余的有机物,部分分解的有机物被表面致密金属层阻碍未能挥发导致导电路内部气孔增加,此时内部有机物含量已明显少于 E_H 烧结 20 s 的导电路,并且提高了 35.6% 的导电性能。

表 6 最优方式和高能量密度烧结后导电路内部元素含量和电阻

Tab.6 Element content and resistance of conductive circuit sintered by optimal way and high energy density

Element/%	$E_L, T_D=5\text{ s}$	$E_L, T_D=40\text{ s}$	$E_L, T_L=40\text{ s};$ $E_H, T_H=40\text{ s}$	$E_H, T_D=20\text{ s}$
Ag	58.74	74.29	79.64	73.40
C	24.06	12.11	9.21	14.13
O	15.38	11.31	9.45	10.86
Si	1.82	2.28	1.67	1.61
Resistance/mΩ	670	350	99	156

图 6(a)表明,使用 E_L 激光束烧结后银颗粒因范德瓦尔斯/静电力凝聚在一起,此时银颗粒尺寸较小使得表面能较大,表面能提供的烧结驱动力使银颗粒发生重新排列,排列过程中银颗粒通过旋转和滑动排列成更稳定的状态,小颗粒中的原子凝聚在大颗粒表面^[24],但银颗粒间并没有开始致密化的实际接触,所以导电性能不理想。图 6(b)表明,增加 E_L 激光束烧结时间后银颗粒自身尚未发生明显的晶粒生长,但因为有机物大量挥发促使银颗粒间逐渐形成颈部连接导致结构趋于致密化,因此导电性能得到提高。图 6(c)表明,在 E_H 激光束烧结时会通过奥斯瓦尔德熟化^[25-26]触发晶界或晶格扩散,此时银颗粒间形成颈部连接,部分银颗粒达到熔融态进而聚结成更大的颗粒,最终形成网状结构为电子流动提供足够的通道,因此导电性能变得理想。

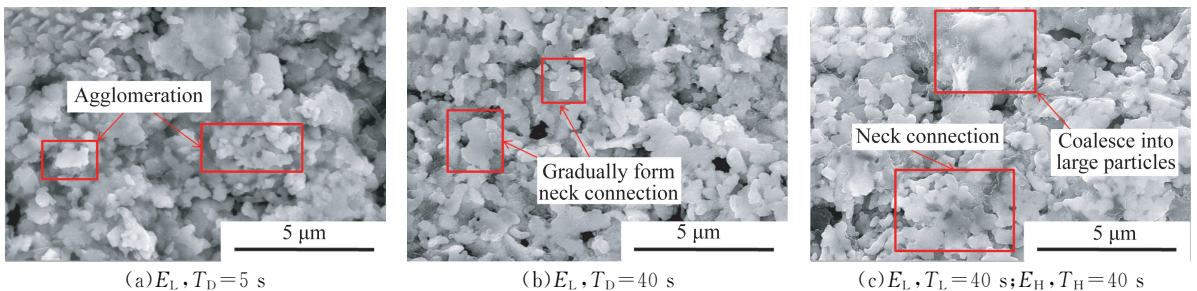


图 6 最优方式烧结后导电路内部的微观组织

Fig. 6 SEM images of internal microstructure of conductive circuit sintered by optimal method

4 结 论

本文针对高能量密度激光烧结合导线路内部会产生大量气孔的问题,首先开展激光烧结合导线路实验,分析导线路形貌变化与工艺参数的关系,然后基于导线路烧结合特性提出变参数烧结合的方法,进而开展抑制导线路气孔形成的研究。结果表明,烧结合过程中有机物的挥发和气孔的形成均会对导线路的形貌产生影响,当使用低功率激光束烧结合导线路时,表面金属层致密度较低,分解的有机物能够顺利挥发,从而导致体积发生收缩,此时扫描速度越快导线路体积的收缩程度越小。当使用高功率激光束烧结合导线路

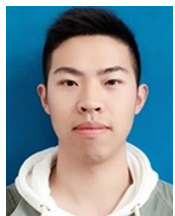
时,表面致密的金属层阻碍有机物分解产生的气体挥发,从而导致体积发生膨胀,此时扫描速度越慢导线路体积膨胀程度越大。依据导线路烧结合特性提出的变参数烧结合方法均能够在一定程度上提高导线路的导电性能,其中最优烧结合方式为先使用 $E_L = 138.88 \text{ J/cm}^2$, $T_L = 40 \text{ s}$ 的激光束烧结合,使大部分热分解的有机物持续地挥发,将导线路内的有机物含量降至低水平,然后使用 $E_H = 740.74 \text{ J/cm}^2$, $T_H = 40 \text{ s}$ 的激光束烧结合,进一步热分解有限的有机物,并且使银颗粒间达到理想的烧结合状态。该方法与 $E_H = 740.74 \text{ J/cm}^2$, $T_D = 20 \text{ s}$ 相比,不仅导电性能提高 35.6%,而且能够有效抑制气孔的产生。

参考文献:

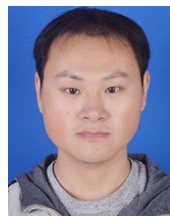
- [1] LOPES A J, MACDONALD E, WICKER R B. Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2012, 18(2): 129-143.
- [2] HONG S, YEO J, KIM G, *et al.*. Nonvacuum, maskless fabrication of a flexible metal grid transparent conductor by low-temperature selective laser sintering of nanoparticle ink [J]. *ACS Nano*, 2013, 7(6): 5024-5031.
- [3] ZHOU W P, BAI S, MA Y, *et al.*. Laser-direct writing of silver metal electrodes on transparent flexible substrates with high-bonding strength [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(37): 24887-24892.
- [4] KO S H, PAN H, GRIGOROPOULOS C P, *et al.*. All-inkjet-printed flexible electronics fabrication on a polymer substrate by low-temperature high-resolution selective laser sintering of metal nanoparticles [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(34): 345202.
- [5] YANG M, CHON M W, KIM J H, *et al.*. Mechanical and environmental durability of roll-to-roll printed silver nanoparticle film using a rapid laser annealing process for flexible electronics [J]. *Microelectronics Reliability*, 2014, 54(12): 2871-2880.
- [6] THEODORAKOS I, ZACHARATOS F, GEREMIA R, *et al.*. Selective laser sintering of Ag nanoparticles ink for applications in flexible electronics [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 336: 157-162.
- [7] YIN C, JIN H, ZHOU Z, *et al.*. Processing and electrical properties of sodium citrate capped silver nanoparticle based inks for flexible electronics [C]. 2017 18th International Conference on Electronic Packaging Technology, Harbin, China: ICEPT, 2017: 1572-1576.
- [8] MAEKAWA K, YAMASAKI K, NIIZEKI T, *et al.*. Drop-on-demand laser sintering with silver nanoparticles for electronics packaging [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, 2(5): 868-877.
- [9] 陈立国,姜勇涛,倪灯塔,等. MEMS热电堆芯片晶工艺参数的优化 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 137-145.
- CHEN L G, JIANG Y T, NI D T, *et al.*. Optimization of solid crystal processing parameters of MEMS thermopile chip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 137-145 (in chinese)
- [10] SKYLAR-SCOTT M A, GUNASEKARAN S, LEWIS J A. Laser-assisted direct ink writing of planar and 3D metal architectures [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of America*, 2016, 113(22): 6137-6142.
- [11] PENG P, HU A, ZHOU Y. Laser sintering of silver nanoparticle thin films: microstructure and optical properties [J]. *Applied Physics A*, 2012, 108(3): 685-691.
- [12] LIU W, WANG CH, WANG C Q, *et al.*. Laser sintering of nano-Ag particle paste for high-temperature electronics assembly [J]. *IEEE Transac-*

- tions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2017, 7(7): 1050-1057.
- [13] MAKRYGIANNI M, KALPYRIS I, BOUTOPOULOS C, *et al.*. Laser induced forward transfer of Ag nanoparticles ink deposition and characterization [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 297: 40-44.
- [14] YUNG K C, WU S P, LIEM H. Synthesis of submicron sized silver powder for metal deposition via laser sintered inkjet printing [J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(1): 154-159.
- [15] ZHAO P B, HUANG J Z, NAN J, *et al.*. Laser sintering process optimization of microstrip antenna fabricated by inkjet printing with silver-based MOD ink [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 275: 116347.
- [16] KIM M K, KANG H, KANG K, *et al.*. Laser sintering of inkjet-printed silver nanoparticles on glass and PET substrates [C]. *10th IEEE International Conference on Nanotechnology*, Seoul, Korea: IEEE, 2010: 520-524.
- [17] BAI G. *Low-temperature Sintering of Nanoscale Silver Paste for Semiconductor Device Interconnection* [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [18] NIITYNEN J, ABBEL R, MÄNTYSALO M, *et al.*. Alternative sintering methods compared to conventional thermal sintering for inkjet printed silver nanoparticle ink [J]. *Thin Solid Films*, 2014, 556: 452-459.
- [19] NIIZEKI T, MAEKAWA K, MITA M, *et al.*. Laser sintering of Ag nanopaste film and its application to bond-pad formation [C]. *2008 58th Electronic Components and Technology Conference*, Orlando, Florida, United States: ECTC, 2008: 1745-1750.
- [20] ERMAK O, ZENOU M, TOKER G, *et al.*. Rapid laser sintering of metal nano-particles inks [J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(38): 385201.
- [21] STEWART I E, KIM M J, WILEY B J. Effect of morphology on the electrical resistivity of silver nanostructure films [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(2): 1870-1876.
- [22] KWAK J H, CHUN S J, SHON C, *et al.*. Back-irradiation photonic sintering for defect-free high-conductivity metal patterns on transparent plastic [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(15): 153103.
- [23] PAENG D, YEO J, LEE D, *et al.*. Laser wavelength effect on laser-induced photo-thermal sintering of silver nanoparticles [J]. *Applied Physics A*, 2015, 120(4): 1229-1240.
- [24] LEE D, KIM D K, MOON Y, *et al.*. Effect of laser-induced temperature field on the characteristics of laser-sintered silver nanoparticle ink [J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(26): 265702.
- [25] ZENG P, ZAJAC S, CLAPP P C, *et al.*. Nanoparticle sintering simulations [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1998, 252(2): 301-306.
- [26] MAYO M J. Processing of nanocrystalline ceramics from ultrafine particles [J]. *International Materials Reviews*, 1996, 41(3): 85-115.

作者简介:



陈天宇(1996—),男,江苏江阴人,硕士研究生,主要从事激光烧结银浆成形导电路线性能方面的研究。E-mail: cty15061772687@sina.com



顾明飞(1996—),男,江苏盐城人,博士研究生,2017年于南京理工大学获得学士学位,主要从事激光烧结成形三维电路材料、工艺方面的研究。E-mail: gmf761220@outlook.com