

文章编号: 1000-8055(2025)09-20240343-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20240343

涡轮叶片高温薄膜传感器喷墨打印 制造方法研究

刘龙斌^{1,2}, 张梦森^{1,2}, 陈翔宇^{1,2}, 朱剑琴^{1,2}, 邱璐^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘要: 相较于溅射沉积、离子束蒸发等薄膜制造方法, 采用喷墨打印直写沉积原位制造三维曲面高温多层薄膜传感器线路更为简单高效。提出一种利用喷墨打印技术精准制造薄膜传感器的方法, 探究了墨水特性、打印参数、烧结参数等因素对薄膜沉积质量的影响规律, 获得了陶瓷及镍基合金基底上高质量、高性能的薄膜线路。对薄膜传感器进行室温至1100℃的标定测试, 其平均赛贝克系数为46.8 μV/℃, 升降温段热电特性曲线的重复率为99.96%, 测量误差为±0.21%。

关键词: 喷墨打印制造; 涡轮叶片; 高温薄膜传感器; 纳米微粒烧结; 高温温度测量
中图分类号: V231.1 文献标志码: A

Study on the inkjet printing manufacturing method of high-temperature thin-film sensors for turbine blades

LIU Longbin^{1,2}, ZHANG Mengsen^{1,2}, CHEN Xiangyu^{1,2}, ZHU Jianqin^{1,2}, QIU Lu^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Thermodynamics, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Compared with methods such as sputter deposition and ion beam evaporation, inkjet printing offered a simpler and more efficient approach to directly deposit conformal multilayer high-temperature thin-film sensor circuits onto three-dimensional curved surfaces. A method for precisely manufacturing thin-film sensors using inkjet printing technology was proposed. The effects of nano-ink properties, as well as printing and sintering parameters, on the quality of film deposition were systematically investigated. Results demonstrated that high-quality, high-performance thin-film circuits can be successfully fabricated on ceramic or superalloy substrates. The thin-film sensor was calibrated up to 1100 °C, with the mean Seebeck coefficient measured at 46.8 μV/°C. The repeatability of the fitted thermoelectric curves reached 99.96%, and temperature measurement error was ±0.21%.

Keywords: inkjet printing manufacturing; turbine blades; high-temperature thin film sensors; nanoparticle sintering; high-temperature measurement

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52476047); 国家自然科学基金青年学生基金项目(博士研究生)(523B2055)

作者简介: 刘龙斌(2000—), 男, 硕士生, 研究方向为航空发动机热防护。E-mail: longbinliu@buaa.edu.cn

通信作者: 邱璐(1988—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 研究方向为航空发动机热防护。E-mail: luqiu@buaa.edu.cn

引用格式: 刘龙斌, 张梦森, 陈翔宇, 等. 涡轮叶片高温薄膜传感器喷墨打印制造方法研究[J]. 航空动力学报, 2025, 40(9): 20240343. LIU Longbin, ZHANG Mengsen, CHEN Xiangyu, et al. Study on the inkjet printing manufacturing method of high-temperature thin-film sensors for turbine blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, 40(9): 20240343.

航空发动机是重要的国防战略装备, 涡轮叶片是其中的高温关键部件^[1-2]。目前, 先进发动机的涡轮前温度超过 1 800 °C^[3], 远高于镍基单晶高温合金叶片的熔点(1 260~1 380 °C)^[4]。为保证涡轮叶片稳定可靠工作, 高效的冷却设计至关重要, 其需要丰富且精确的温度数据作为支撑。因此, 涡轮叶片表面温度的测量是一项关键技术。

传统的涡轮叶片温度测量技术主要有示温漆^[5-7]、光学测温法^[8-9]以及晶体温度传感器^[10]等。示温漆操作便捷, 但其测量精度有限且无法实时监测温度; 光学测温法是一种非接触式测量方法, 具有较高测量精度, 但其在高温高速气流通道内进行测量时需要复杂的配套系统; 晶体温度传感器精度高, 但其应用可能会对叶片结构造成破坏, 且仅能测到最高温度。相比之下, 薄膜传感器以其微型化、快速响应、非侵入、可测量过渡态温度演化等优点, 成为涡轮叶片温度测量的理想解决方案。

美国国家航空航天局^[11]早在 1981 年采用溅射沉积技术在涡轮叶片表面制备了 Pt/Pt-10%Rh 薄膜热电偶, 测温上限为 977 °C, 验证了薄膜传感器在涡轮叶片测温中的可行性。此后, 各研究机构研发了 TiC/TaC^[12]、ITO/Pt^[13]、In₂O₃/ITO^[14]等材料的高温薄膜热电偶, 其测温上限分别为 1 100、1 500、1 200 °C。其中, 基于 In₂O₃、ITO 等半导体热电材料的薄膜热电偶可用于陶瓷基复合材料 (ceramic matrix composite, CMC) 叶片的温度测量, 解决了传统金属热电偶在 CMC 组件上应用受限的问题^[15]。此外, 国内的诸多研究机构在薄膜传感器制备及其性能的研究上取得了积极进展。薄膜传感器的制造大多采用射频磁控溅射、离子束蒸发等薄膜沉积技术^[16-21], 其制造过程中需要掩膜覆盖线路以外的表面, 且需要在真空等特殊环境中完成制造。此外, 薄膜沉积的加工时间较长, 单层薄膜沉积通常需要 1~5 h^[22-24]。

近年来, 直写沉积技术逐渐被用于高温薄膜传感器的制造。国内外研究学者采用激光辅助直写沉积^[25]、电子束直写沉积^[26]等技术, 完成了 Pt/Pt-Rh、ITO/Pt 等薄膜传感器的制造。相较于上述直写沉积技术, 喷墨打印直写沉积技术在柔性电子^[27-28]、生物医药^[29-31]等领域已有广泛应用, 其制造工艺简单、成本低、线路制造能力强、薄膜性能调控灵活性高、兼容三维复杂曲面共形薄膜制造, 是一种理想的曲面多层薄膜传感器原位制

造技术^[32]。然而, 目前其主要用于工作在相对较低温度 (<400 °C) 的功能器件制造, 尚未见到采用喷墨打印技术制造涡轮叶片高温薄膜传感器的相关研究和应用报道。若将喷墨打印直写沉积技术应用于高温涡轮叶片温度测量, 还需解决功能墨水制造、功能材料沉积特性调控、纳米微粒烧结、界面应力调控等关键技术。

针对上述问题, 本研究提出一种喷墨打印直写沉积的高温共形薄膜传感器通用制造方法, 并进一步探究功能墨水可打印性、喷墨打印沉积和纳米微粒薄膜烧结等关键因素对薄膜传感器性能的影响规律, 制造可工作在 1 100 °C 的高温多层薄膜传感器, 并对其热电性能进行测试。

1 喷墨打印制造

1.1 喷墨打印基本原理

基于喷墨打印的涡轮叶片薄膜传感器制造技术的基本原理如图 1 所示。薄膜传感器的喷墨打印制造过程主要包含以下 3 个关键步骤: 功能墨水制造、精准喷墨打印按需沉积和纳米微粒薄膜沉积层烧结, 如图 2 所示。

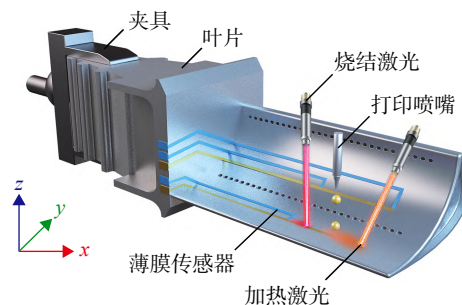


图 1 涡轮叶片高温薄膜传感器喷墨打印制造概念图

Fig. 1 Schematic diagram of inkjet printing manufacturing for high-temperature thin-film sensors on turbine blades

首先, 将传感器材料制成纳米微粒, 并将其分散在溶剂中形成稳定的胶体分散体系, 即功能墨水。其次, 通过喷墨打印沉积设备将功能墨水从喷嘴喷出形成微小墨滴, 并将其沉积在待测物体表面, 待溶剂蒸发后形成纳米微粒沉积层。最后, 采用马弗炉或高能激光将纳米微粒沉积层烧结, 形成连续、致密的薄膜。

1.2 高温薄膜传感器喷墨打印制造方法

1.2.1 功能墨水制造

将各材料制成纳米微粒 (粒径分布范围为 30~100 nm), 并将其以 10% 的质量分数分散在由乙二醇 (ethylene glycol, EG) 和异丙醇 (isopro-

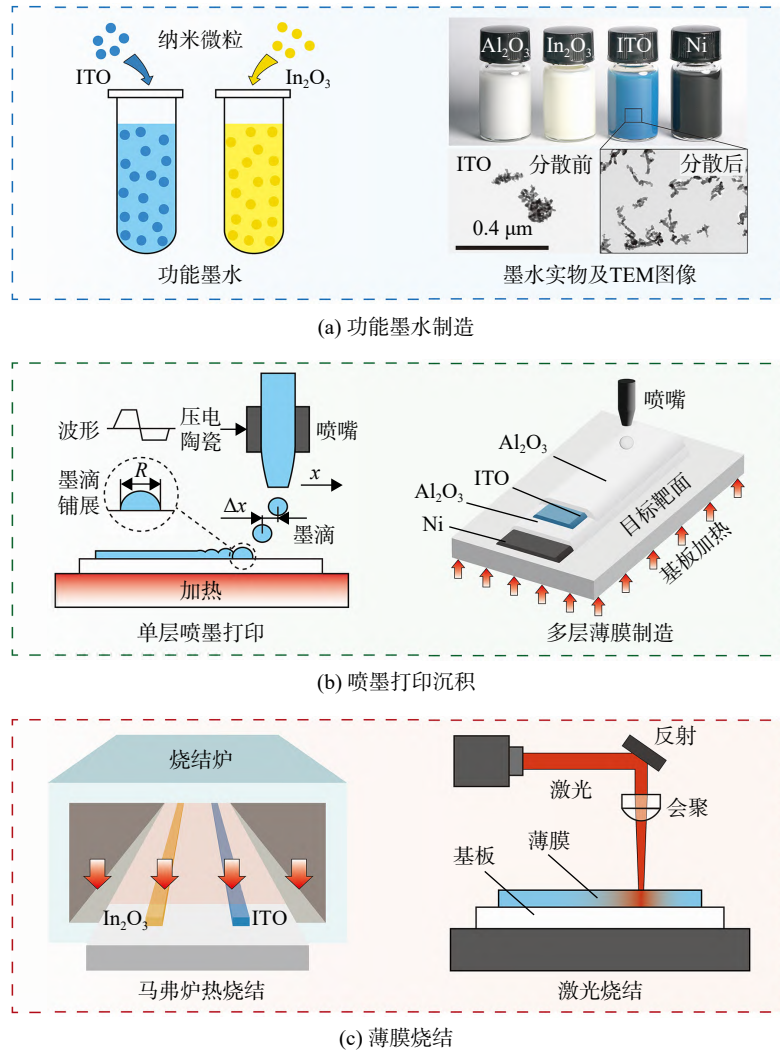


图2 薄膜传感器喷墨打印制造过程

Fig. 2 Inkjet printing manufacturing process of thin-film sensors

pyl alcohol, IPA)组成的二元混合溶剂中,其中EG与IPA的溶剂质量比例 α 为0.5~1.0。为了提升墨水的均匀性和稳定性,将混合好的纳米微粒墨水置于超声波破碎机(Scientz-II D,新芝公司,中国)中进行超声分散,分散过程中采用恒温水浴循环系统将墨水温度保持在10℃以防止溶剂挥发。完成超声分散后,采用PTFE(聚四氟乙烯)滤膜对墨水进行过滤(过滤后墨水溶质质量分数变为 $(8.7\pm 0.5)\%$),将墨水中的大微粒、团聚微粒和其他杂质滤除,以防止在打印过程中堵塞喷头。最终,获得分散均匀且具有高稳定性的多种功能墨水,如图2(a)所示。

1.2.2 喷墨打印沉积

墨水制备完成后,使用喷墨打印系统将其沉积到陶瓷及镍基合金等多种目标靶面上,分别打印出Ni、 Al_2O_3 、ITO和 In_2O_3 薄膜。在薄膜沉积

前对靶面进行清洗,通过喷墨打印沉积设备实现在目标靶面上的图形线路精准沉积。通过调控横向点间距 Δx 、纵向点间距 Δy 以及打印速度 v_p ,实现不同形貌的薄膜。在本研究中,喷墨打印的速度选择范围为1~20 mm/s,横向与纵向点间距保持一致,选择范围均为0.02~0.10 mm,靶面温度选择范围为室温至200℃。为保证喷墨打印图案的精度,将喷头到靶面的距离控制在0.5 mm左右。选择内径为80 μm 的喷头,通过调节喷头压电陶瓷的输入波形,获得稳定的墨滴序列,墨滴接触目标靶面后的铺展直径 R 为 (0.118 ± 0.005) mm,墨滴蒸干后形成纳米微粒薄膜。制造多层薄膜传感器时,按照图2(b)所示的顺序逐层进行薄膜沉积,并在每层薄膜沉积完成后进行高温马弗炉热烧结或激光烧结处理以形成导电路径,之后进行下一层薄膜的打印及烧结。

1.2.3 薄膜烧结

本项研究工作采用马弗炉热烧结和激光烧结两种方式将纳米微粒沉积层致密化形成导电路径。热烧结在马弗炉中进行,需控制烧结温度、烧结时间和烧结环境。烧结温度 t_s 控制在 $600 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,保温段时间为 60 min ,在大气环境中进行。激光烧结采用 1064 nm 单模连续波激光器(MFSC75, Max Photonics, 中国),其激光功率和扫描速率均可调,由可编程振镜扫描仪系统(RC1001, 中国)控制。在烧结过程中,激光光斑直径 d_l 固定为 $350 \text{ }\mu\text{m}$,功率 P 范围为 $5 \sim 74 \text{ W}$,扫描速度 v_s 为 $5 \sim 25 \text{ mm/s}$,能量密度由 $E=P/(v_s d_l)$ 计算得到。经过烧结后,纳米微粒便形成了导电的传感器线路。

1.2.4 热电特性测试方法

传感器标定系统如图 3 所示。以陶瓷平板基底上的 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ 薄膜传感器标定为例,将试件测量端(热端)插入管式电阻炉均温段,参考端(冷端)置于标定炉以外,采用循环水浴对陶瓷平板参考端进行水冷,从而保证参考端温度稳定。使用 S 型标准热电偶和热电阻分别监测热端和冷端温度。炉腔温度依次从室温加热至 400 、 600 、 800 、 900 、 1000 、 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 这 6 个温度点,每个温度点保持 30 min 。完成 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度的标定后,逐步降至与加热段相同的温度点,并保持 30 min ,直至阶梯冷却至室温。上述升温及降温标定过程重复 3 次,用以评估薄膜传感器热电特性的稳定性和重复性。

1.3 薄膜传感器结构

如图 2(b)所示,镍基高温合金基底上的薄膜传感器一般为 4 层结构:过渡层、绝缘层、功能层和保护层。其中,过渡层由镍(Ni)纳米微粒制造,用于减小因热膨胀不匹配引起的内应力,改善金属平板与上层结构的黏接性;绝缘层由氧化铝

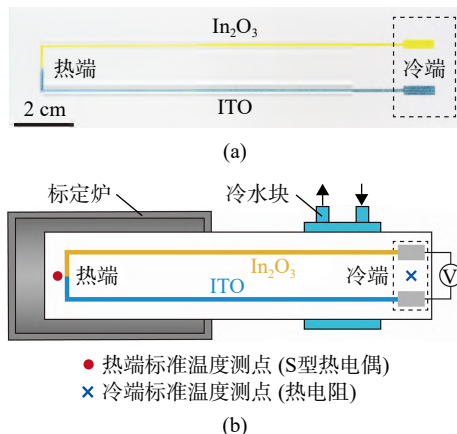


图 3 薄膜传感器热电特性测试

Fig. 3 Thermoelectric characteristic testing of thin-film sensors

(Al_2O_3) 构成,防止传感器被导电基底短路;功能层使用 In_2O_3 和 ITO 作为传感器电极材料;保护层同样采用 Al_2O_3 ,用于防止传感器在高温条件下的氧化和破坏。此外,在陶瓷基底上制造 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ 等半导体薄膜传感器时,由于基底与传感器热膨胀系数接近且绝缘,则可省去过渡层和绝缘层。

2 结果与讨论

2.1 墨水制备方法及其打印特性

本研究开发了适用于喷墨打印的薄膜传感器功能材料纳米微粒墨水。由于分散于有机溶剂的纳米微粒容易沉降,需通过对有机溶剂的优选来减缓颗粒沉降速度,提高墨水稳定性。胶体体系中粒子在分散溶剂中的沉降速度可由 Stokes 公式计算得到:

$$u = \frac{2r^2(\rho - \rho_0)g}{9\mu_0} \quad (1)$$

其中 u 为微粒沉降速度, r 为微粒半径, μ_0 为溶剂黏度, ρ 为微粒密度, ρ_0 为溶剂密度, g 为重力加速度。从表 1 中可以发现,甘油和乙二醇在悬浮稳

表 1 有机和无机溶剂的物性参数和沉降速度

Table 1 Physical parameters and sedimentation rates of organic and inorganic solvents

溶剂	沸点/ $^\circ\text{C}$	黏度/ $(\text{mPa}\cdot\text{s})$	密度/ (g/cm^3)	表面张力/ (mN/m)	介电常数/ $(\text{C}^2/(\text{N}\cdot\text{M}^2))$	沉降速度/ (nm/s)	安全性
水	100	1.01	1.00	72.8	78.5	10.78	无毒性
甲醇	65	0.59	0.79	22.6	32.7	18.70	刺激性
乙醇	78	1.07	0.79	22.3	24.5	10.35	低毒性
乙二醇	197	17.66	1.11	46.5	37.0	0.60	无毒性
异丙醇	82	2.40	0.78	21.3	17.9	4.64	低毒性
正己醇	157	5.20	0.82	27.9	13.3	2.13	低毒性
甘油	291	56.00	1.26	61.9	56.2	0.18	低毒性
环己烷	81	0.89	0.78	24.4	1.2	12.50	刺激性

定性方面表现最佳。由于甘油的流变特性不符合喷墨打印要求(黏度需小于 20 mPa·s), 表面张力在 20~70 mN/m 之间, 所以选择乙二醇作为主溶剂。为了降低黏度以达到喷墨打印机的需求, 加入异丙醇作为副溶剂, 同时确保打印后的线路溶剂易于蒸发。

墨水的可打印性是其关键属性之一。在众多研究中, 普遍将无量纲数 Z 作为喷墨打印过程能否生成稳定墨滴的评判标准^[33], 其计算公式为:

$$Z = \frac{\sqrt{d\rho_h\sigma_h}}{\mu_h} \quad (2)$$

其中 ρ_h 是混合墨水的密度, σ_h 是混合墨水的表面张力, μ_h 是混合墨水的黏度, d 是墨滴的特征长度(取喷头内径)。当 Z 值在 1~10 之间时, 喷墨打印效果最佳, 可获得稳定墨滴; 当 Z 值小于 1 时, 无法生成墨滴; 当 Z 值大于 10 时, 则会生成卫星离散墨滴, 影响打印质量^[33]。如图 4(a) 所示, 以内径为 80 μm 喷头为例, 调整两种溶剂的质量比, Z 值从 14.32 变为 2.94。结果表明溶剂质量比例 α 为 0.3~1.0 时, Z 值均能满足大多数研究中提到的最佳打印区间。

如图 4(b) 所示, 针对不同溶剂比例的墨水, 通过调整压电陶瓷波形, 均可获得稳定墨滴, 墨滴大小相近, 但下落速度 v 差异大。此外, 本实验采用双极驱动方波, 其特点是电压在正负之间交替变化, 能够有效控制墨滴的形成和喷射, 减少残余振动和不必要的墨滴形成。

2.2 打印参数对线路沉积质量的影响

获得高质量沉积线路是制备高性能薄膜传感器的关键环节。如图 5 所示, 靶面温度(t_w)、打印横向点间距(Δx)及速度等参数会直接影响薄膜的连续性和均匀性, 进而影响传感器热电性能。因此, 为了实现高质量的薄膜线路沉积, 对喷墨打印参数的精确调控至关重要。如图 5(b) 所示, 不同打印横向点间距下的 ITO 沉积线路形貌存

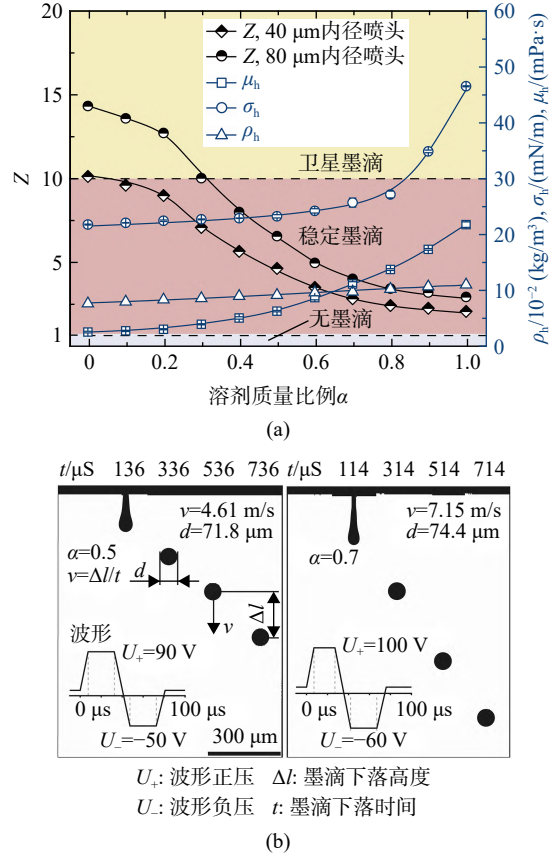
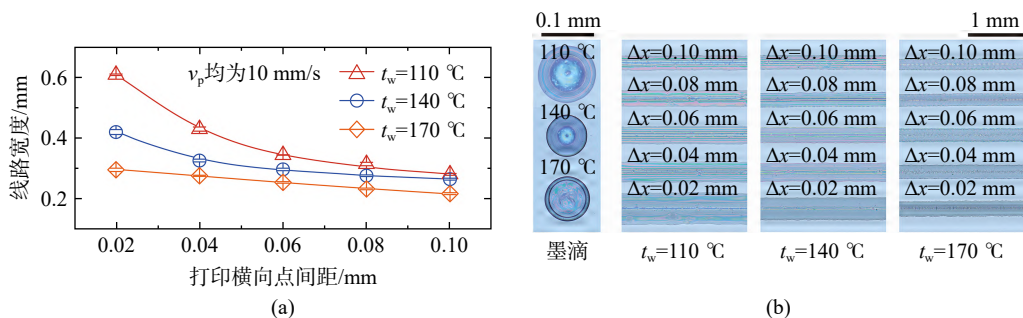


图 4 功能材料纳米微粒墨水特性
Fig. 4 Characteristics of functional nanomaterial ink

在明显差异。点间距较大时, 墨滴交融不足, 导致线路局部出现间断。随着打印横向点间距的减小, 相邻墨滴重叠增多, 沉积线路宽度增加, 线路的连续性和均匀性得到改善。然而, 过小的点间距会引发墨滴过度重叠, 在干燥过程中产生局部应力集中, 导致线路开裂。因此, 选择合适的点间距可确保线路连续均匀并减少开裂风险。

靶面温度(t_w)的变化对墨滴沉积模式和线路质量也有显著影响。图 5(a)~图 5(c) 分别展示了 ITO 线宽、沉积形貌、剖面高度随靶面温度变化的结果。随着靶面温度的升高, 单个墨滴在加热靶面上的沉积模式会从“宽咖啡环”逐渐过渡到均匀沉积, 随后在特定温度下转变为“窄咖啡环”



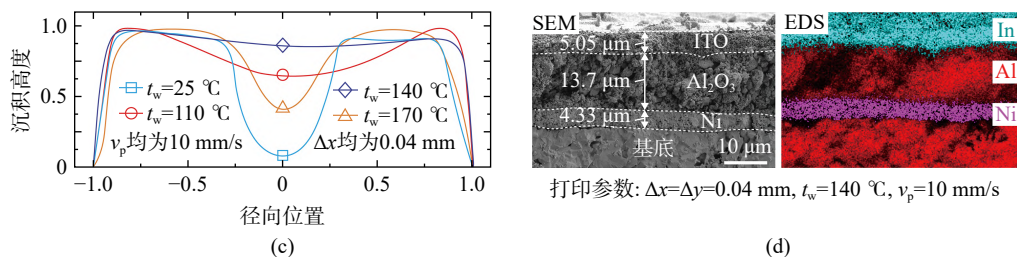


图 5 薄膜线路打印沉积特性

Fig. 5 Deposition characteristics of thin-film circuit printing

模式。随着靶面温度升高,溶剂蒸发加速,线路铺展范围减小,导致其宽度减小。当靶面温度为 110 °C 时,墨滴蒸发缓慢,形成宽线路且中间有明显空隙,这与“宽咖啡环”沉积模式相关。温度升高至 140 °C 时,墨滴蒸发速度加快,形成均匀且窄的线路,此时薄膜均匀性达到最佳状态。当温度进一步升高至 170 °C 时,墨滴迅速蒸发,导致融合不足,形成“窄咖啡环”堆叠的线路,薄膜均匀性略有下降。因此,在靶面温度为 140 °C 和打印横向点间距为 0.04 mm 的打印参数附近,可以实现高质量、高性能的薄膜沉积。

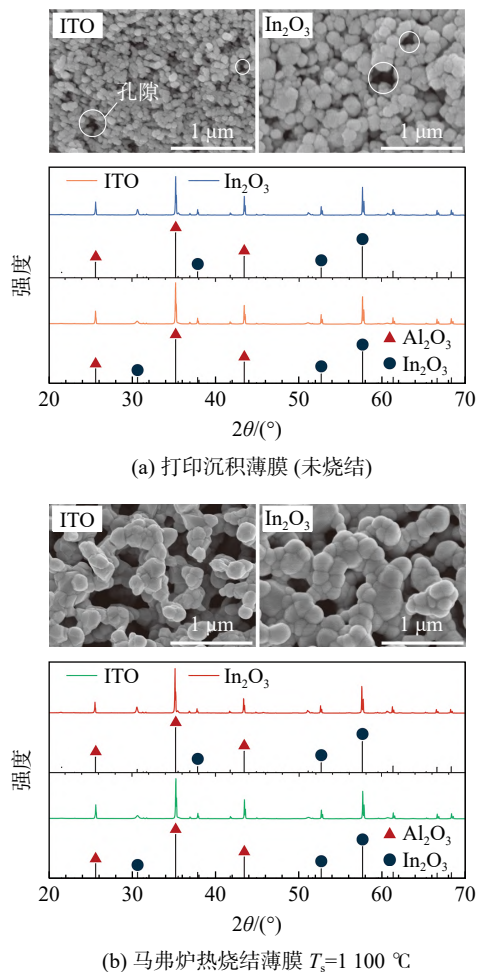
通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)和能量色散 X 射线光谱(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)对多层薄膜剖面进行表征,结果如图 5(d)所示。SEM 结果表明在陶瓷平板上成功沉积了结构完整且均匀的 Ni、 Al_2O_3 、ITO 多层薄膜,各层薄膜具有清晰的界面,其厚度分别为 4.33、13.7、5.05 μm 。EDS 结果进一步给出了元素空间分布情况,各元素的分布与薄膜结构位置相对应,表明沉积过程中不同材料层之间没有明显的扩散或混杂。这说明喷墨打印制备薄膜能够有效控制其层厚和元素分布。

2.3 烧结参数对薄膜晶相的影响

薄膜的晶相结构对其电学性能、机械性能及热稳定性能具有重要影响,而烧结参数显著影响薄膜的晶相结构及薄膜性能。为明确不同烧结处理对薄膜微观晶相结构的影响,对未烧结(沉积)薄膜、马弗炉热烧结薄膜与激光烧结薄膜进行了微观形貌与晶相表征。图 6(a)展示了纳米微粒沉积微观形貌,其中各微粒独立分布,相互没有连接且粒径较小(约 30~100 nm)。经两种烧结处理后,薄膜的晶粒明显增大、孔隙率显著降低,表面更加致密。ITO 薄膜晶粒在烧结后聚集形成了小团簇,每个团簇由 2~5 个晶粒构成,而 In_2O_3 晶粒则融合成了更大的块状结构,显示出了典型

的粗化生长特征,晶粒通过并入周围小晶粒而扩大。

为进一步了解薄膜 3 种状态下的晶相,借助广角 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)对两种薄膜进行检测,检测结果如图 6 所示。在 XRD 图谱中除了基底材料 Al_2O_3 的衍射峰之外,主要观察到了 In_2O_3 的衍射峰。然而,未观察到 SnO_2 的特征衍射峰,这与 ITO 中质量占比(不高于 10%)低的 Sn 元素相对应,说明 Sn 原子已充分掺杂入 In_2O_3 晶体中,形成稳定的固态熔体。XRD 分析显示,所观察到的衍射峰与标准卡片完全吻合,说明样品的成分和晶体结构符合材料的固有特性。



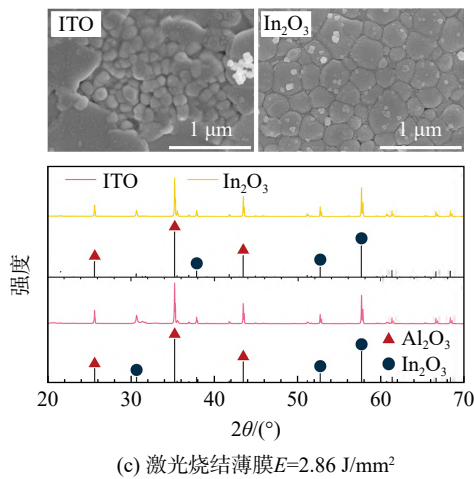


图 6 不同烧结状态下 ITO 和 In_2O_3 薄膜的 SEM 图像和 XRD 图谱, 打印参数为 $t_w=140\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta x=\Delta y=0.04\text{ mm}$, $v_p=10\text{ mm/s}$

Fig. 6 SEM images and XRD patterns of ITO and In_2O_3 films in different sintering states, with printing parameters of $t_w=140\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta x=\Delta y=0.04\text{ mm}$, $v_p=10\text{ mm/s}$

不同处理状态下的同种薄膜显示出一致的峰位置, 其中 In_2O_3 的最强衍射峰所对应的 2θ 均为 57.6° 。

以 ITO 薄膜为例, 其在沉积、热烧结和激光烧结这 3 种状态下的最强衍射峰的半峰宽分别为 0.097、0.084、0.077。晶粒大小可以通过谢乐公式来估算:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3)$$

其中 D 是晶粒平均尺寸, K 是形状因子(取 0.9), λ 是 X 射线波长(取 1.54 \AA), β 是衍射峰半高宽, θ 是布拉格角(取衍射角的一半)。通过计算得到 3 种状态下的晶粒尺寸分别为 88.9、102.7、112.1 nm。以上结果表明, 经过烧结处理后, 晶粒尺寸明显增大。XRD 与 SEM 的表征结果相一致, 马弗炉热烧结和激光烧结均可降低薄膜孔隙率并促进晶粒生长。

2.4 薄膜传感器热电特性

在陶瓷及镍基合金等多种目标靶面上均成功制备了 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ 薄膜传感器。为测试传感器性能, 选取陶瓷平板表面的单层传感器进行测试, 如图 3(a) 所示。图 7 为薄膜传感器热电特性测试结果。在高温炉中对其进行 3 次升降温的静态标定测试, 记录测试结果, 得到如图 7(a) 所示的

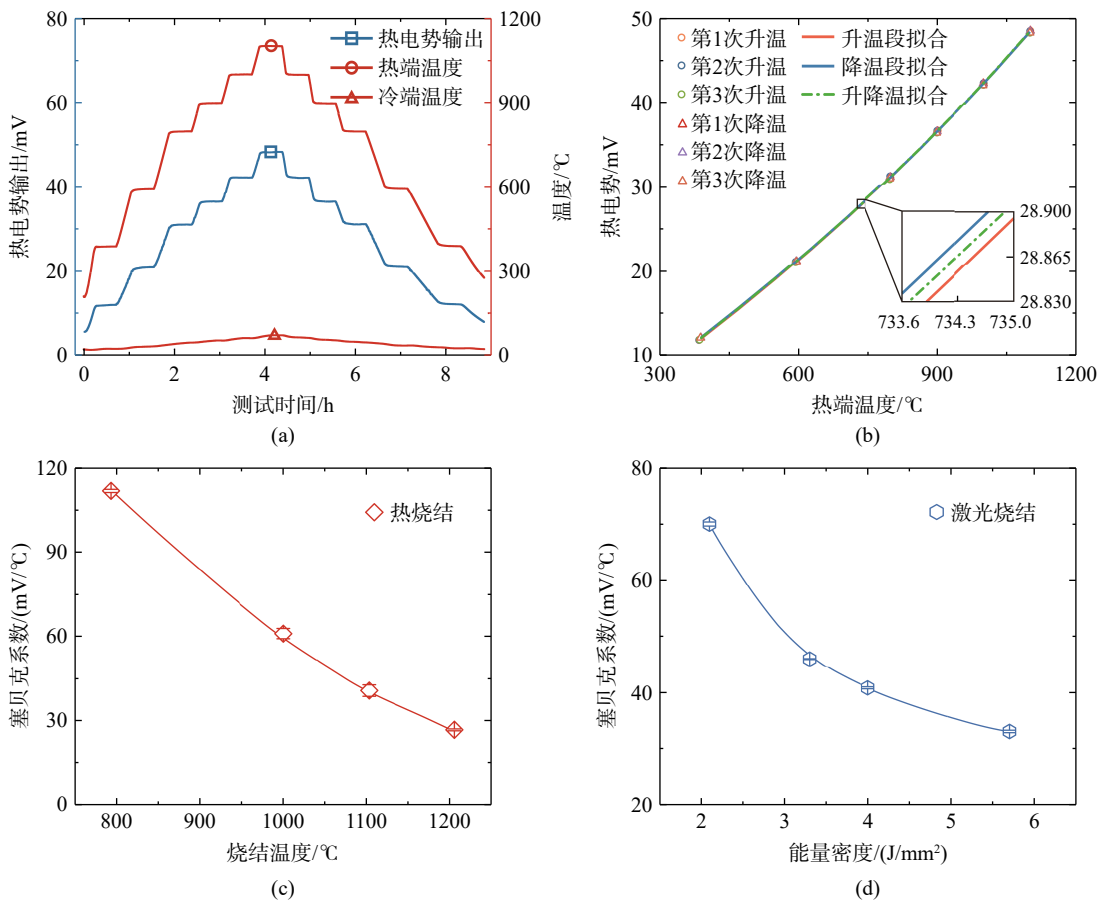


图 7 薄膜传感器热电特性测试结果

Fig. 7 Test results of the thermoelectric properties of the thin-film sensor

热电势输出及冷热端温度随时间变化的曲线。标定过程中,炉腔温度从室温逐步升至 400、600、800、900、1 000、1 100 °C,每个温度点保持 30 min,完成 1 100 °C 标定后,再逐级降温至各温度点并保持 30 min,最终冷却至室温,整个过程中热电势变化与冷热端温度的阶梯式变化呈现出良好的对应关系。在升温过程中,随着温度的上升,热电势输出逐渐增加;在保温阶段,热电势保持稳定,表明传感器在恒温条件下具有优异的热稳定性。为了描述薄膜传感器的热电势输出随冷热端温度的变化关系,采用三次多项式对实验结果进行拟合。假设在冷端温度为 0 °C 的条件下,传感器热电势 V 与热端温度 t_h 之间的关系为 $V=f(t_h)$ 。实际标定实验中,冷端温度为 t_c ,此时传感器热电势输出 V_{out} 为:

$$V_{out} = f(t_h) - f(t_c) = at_h^3 + bt_h^2 + ct_h - at_c^3 - bt_c^2 - ct_c \quad (4)$$

其中 a 、 b 、 c 为拟合系数。通过实验数据点对系数进行拟合,结果见表 2。利用均方误差 e 估计多次重复实验拟合曲线之间的偏差,其计算公式为:

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{1i} - V_{2i})^2} \quad (5)$$

其中 n 是数据点数量, V_{1i} 是第 i 条拟合曲线的计算值, V_{2i} 是第 i 次实验的测量结果。利用均方误差来定义重复率 A ,以评估不同循环条件下热电特性的重复性,其计算公式为:

$$A = \left(1 - \frac{e}{V_{max} - V_{min}}\right) \times 100\% \quad (6)$$

其中 V_{max} 和 V_{min} 分别是输出的最大值和最小值。此外,采用标准偏差 ε 来定义实验测量误差,其计算公式为:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [V_i(t) - \overline{V}(t)]^2}{n}} \quad (7)$$

其中 $V_i(t)$ 是热电势输出的实际测量值, $\overline{V}(t)$ 热电势输出的平均值。利用标准偏差来计算实验相对测量误差 B ,以评估测量结果的准确性,其计算公式为:

$$B = \frac{\varepsilon}{V_{max}} \times 100\% \quad (8)$$

其中 $\overline{V_{max}}$ 是最大输出的平均值。根据表 2 计算结果绘制了如图 7(b) 所示的薄膜传感器热电特性曲线,薄膜传感器在 3 次标定测试中的升温段和降温段的热电特性曲线高度重合,重复率为 99.96%,最大测量误差为 $\pm 0.21\%$,验证了薄膜传感器在多次升降温循环中的高稳定性和精度。该实验结果为薄膜传感器的高温应用提供了可靠依据。

薄膜传感器的热电特性可以通过塞贝克系数来衡量,这一系数是评估材料在温差存在时产生电动势能力的重要指标。塞贝克系数 S 的计算公式为:

$$S = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (9)$$

其中 ΔV 是传感器冷热两端产生的电势差, Δt 是传感器冷热两端的温度差。计算得到该传感器的塞贝克系数为 46.8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,热电特性良好。

表 2 薄膜传感器热电特性曲线三次多项式拟合结果及其重复率

Table 2 Cubic polynomial fitting results of the thermoelectric characteristic curves of the thin-film sensor and their repeatability

三次多项式拟合	$a/10^{-9}$	$b/10^{-5}$	c	e	$A/\%$
升温段拟合(3组测试结果)	-2.78	2.22	0.024 5	0.012 4	99.97
降温段拟合(3组测试结果)	-1.84	2.01	0.025 8	0.006 7	99.98
升降温拟合(6组测试结果)	-2.35	2.12	0.025 1	0.013 4	99.96

此外,从图 7(c)~图 7(d)可以看出,随着烧结合温度的升高或激光能量密度的增加,塞贝克系数逐渐减小。当烧结合温度由 1 200 °C 降低至 800 °C 时,塞贝克系数提升至 3.97 倍。当激光能量密度由 5.7 J/mm² 降低到 2.1 J/mm² 时,塞贝克

系数提升至 2.12 倍。以上现象可能是由于烧结合后的薄膜晶相发生了变化。晶粒生长和薄膜均质化减少了晶界数量,从而降低了电子的散射效应。此外,高温或高能量密度处理降低了材料中的缺陷浓度,进而降低了载流子浓度,削弱了载流子

散射, 最终导致塞贝克系数的降低。该结果表明了烧结处理及其参数对薄膜传感器热电性能存在重要影响。

3 结论与展望

本研究利用喷墨打印方法制造了适用于航空发动机涡轮叶片的高温共形薄膜传感器, 探究了墨水特性、打印参数、烧结参数对喷墨打印薄膜微观特性及宏观性能的影响规律, 获得了 1 100 °C 下稳定工作的传感器, 主要研究结果总结如表 3 所示。主要结论如下:

1) 墨水流动特性和打印参数是影响薄膜沉积质量的关键因素。通过调控混合溶剂质量比例、靶面温度、点间距以及打印速度, 获得了 Z 值为 2.94~14.32 的稳定墨水和薄膜线路最佳打印参数 ($t_w=140$ °C, $\Delta x=\Delta y=0.04$ mm), 实现了高质量、高性能的沉积薄膜。

2) 热烧结温度和激光烧结能量密度对薄膜

传感器的热电性能有显著影响。随着烧结温度或激光能量密度的增加, 塞贝克系数逐渐减小。微观表征结果表明, 随着烧结温度和激光能量密度的升高, 薄膜孔隙率降低。传感器在 1 100 °C 热烧结温度下的塞贝克系数为 46.8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。

3) 薄膜传感器的热电特性在多次测试中表现出高重复性。传感器在 3 次升降温静态标定测试中的热电特性曲线的重复率为 99.96%, 测量误差为 $\pm 0.21\%$ 。

为进一步推进该技术的成熟与应用, 未来工作展望如下: 一是进一步提升传感器温度测量的上限, 通过工艺方案优化获得能够在更高温度下稳定工作的传感器; 二是进一步开展强瞬变热冲击、振动等极端环境下传感器生存力考核验证, 并根据考核情况对器件电学和力学性能进行优化; 三是进一步完善共形传感器的曲面制造、标定、引线等配套解决方案, 解决传感器应用中的技术问题。

表 3 喷墨打印各步骤中的影响因素及其研究结果总结

Table 3 Summary of influencing factors and research findings for each step in inkjet printing

关键步骤	影响因素	主要研究结果
功能墨水制造	溶剂种类	乙二醇、异丙醇作为主、副溶剂可提升墨水稳定性及可打印性
	溶剂比例	乙二醇和异丙醇质量比例范围为 0.3~1.0 时, Z 值满足最佳打印区间
	压电陶瓷波形	调整压电陶瓷波形可获得稳定、规则的球形墨滴
喷墨打印沉积	靶面温度	靶面温度影响咖啡环效应, 均匀沉积的靶面温度为 140 °C
	打印横向点间距	点间距过大或过小导致线路间断或开裂, 最佳点间距为 0.04 mm
微粒薄膜烧结	热烧结温度	薄膜传感器塞贝克系数随烧结温度的增加而减小
	激光烧结功率	薄膜传感器塞贝克系数随激光能量密度的增加而减小

参考文献:

- [1] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
LIAN Xiaochun, WU Hu. Aeroengine principle[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005. (in Chinese)
- [2] SCHOBELI M T. Gas turbine engines, design and dynamic performance[M]//Turbomachinery Flow Physics and Dynamic Performance. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012: 473-512.
- [3] GIALANELLA S, MALANDRUCCOLO A. Gas turbine aero-engines[M]//Aerospace Alloys. Cham, Swiss: Springer International Publishing, 2019: 17-39.
- [4] REED R C. The superalloys: fundamentals and applications[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.
- [5] LI Yang, LI Zhimin. The research of temperature indicating paints and its application in aero-engine temperature measurement[J]. Procedia Engineering, 2015, 99: 1152-1157.
- [6] FEIST J P, HEYES A L, NICHOLLS J R. Phosphor thermometry in an electron beam physical vapour deposition produced thermal barrier coating doped with dysprosium[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2001, 215(6): 333-341.
- [7] YAÑEZ GONZALEZ A, PILGRIM C C, FEIST J P, et al. On-line temperature measurement inside a thermal barrier sensor coating during engine operation[J]. Journal of Turbomachinery, 2015, 137(10): 101004.
- [8] ELDRIDGE J I, BENCIC T J, ALLISON S W, et al. Depth-penetrating temperature measurements of thermal barrier coatings incorporating thermographic phosphors[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2004, 13(1): 44-50.
- [9] JENKINS T P, HESS C F, ALLISON S W, et al. Measurements of turbine blade temperature in an operating aero engine using thermographic phosphors[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(4): 044003.
- [10] WANG Yutian, ZHU Yongjing. Temperature and displacement measurement system with fiber optic sensors for turbine blades[C]//Third International Symposium on Precision Mechanical Measurements. Bellingham, US: SPIE, 2006, 6280: 333-338.
- [11] GRANT H P, PRZYBYSZEWski J S, CLAING R G. Turbine

- blade temperature measurements using thin film temperature sensors[R]. NASA-CR-165201, 1981.
- [12] VEDULA R. Materials for high temperature thin film thermocouple applications[D]. Blacksburg, US: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [13] GREGORY O J, YOU Tao. Ceramic temperature sensors for harsh environments[J]. IEEE Sensors Journal, 2005, 5(5): 833-838.
- [14] TOUGAS I M, AMANI M, GREGORY O J. Metallic and ceramic thin film thermocouples for gas turbine engines[J]. Sensors, 2013, 13(11): 15324-15347.
- [15] RIVERA K, GREGORY O J. ITO: SiC ceramic matrix composite thermocouples for engine components[J]. IEEE Sensors Letters, 2020, 4(5): 2500404.
- [16] LIU Yantao, REN Wei, SHI Peng, et al. Preparation and thermal volatility characteristics of $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ thin film thermocouple by RF magnetron sputtering[J]. AIP Advances, 2017, 7(11): 115025.
- [17] LIU Yantao, REN Wei, SHI Peng, et al. A highly thermostable $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ITO}$ thin film thermocouple prepared via screen printing for high temperature measurements[J]. Sensors, 2018, 18(4): 958.
- [18] LI Shuimin, ZHANG Zhongkai, LEI Jiaming, et al. Screen printing silver shielded ITO- In_2O_3 thin-film thermocouples for electromagnetic interference reduction[J]. IEEE Sensors Letters, 2024, 8(8): 2502204.
- [19] CHEN Yin, JIANG Hong, JIANG Shu, et al. Thin film thermocouples for surface temperature measurement of turbine blade[J]. Advanced Materials Research, 2013, 873: 420-425.
- [20] XU Lida, ZHOU Xiong, ZHAO Fuxin, et al. Rapid laser fabrication of indium tin oxide and polymer-derived ceramic composite thin films for high-temperature sensors[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 658: 913-922.
- [21] HAI Zhenyin, SU Zhixuan, GUO Maocheng, et al. Utilizing screen printing technology to fabricate tungsten-rhenium thick film thermocouples with a maximum temperature limit of 1 600 °C[J]. Measurement, 2025, 239: 115454.
- [22] WOHLMUTH W, ADESIDA I. Properties of RF magnetron sputtered cadmium-tin-oxide and indium-tin-oxide thin films[J]. Thin Solid Films, 2005, 479(1/2): 223-231.
- [23] SHAJAN N T, BHARATHI MOHAN D. RF magnetron sputtering of Zn_2SnO_4 thin films: optimising microstructure, optical and electrical properties for photovoltaics[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2024, 35(12): 1-18.
- [24] ZHAO Changjiang, ZHAO Leran, LIU Juncheng, et al. Effect of sputtering power on the properties of SiO_2 films grown by radio frequency magnetron sputtering at room temperature[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(15): 1-13.
- [25] XIE Shanghang, ZHU Jin, JIANG Hongchuan, et al. Preparation and properties of high-temperature transient thin-film thermopile heat flux sensor[J]. Journal of Electronic Materials, 2025, 54(1): 361-369.
- [26] GREGORY O J, BUSCH E, FRALICK G C, et al. Preparation and characterization of ceramic thin film thermocouples[J]. Thin Solid Films, 2010, 518(21): 6093-6098.
- [27] CAREY T, CACOVICH S, DIVITINI G, et al. Fully inkjet-printed two-dimensional material field-effect heterojunctions for wearable and textile electronics[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1202.
- [28] NAYAK L, MOHANTY S, NAYAK S K, et al. A review on inkjet printing of nanoparticle inks for flexible electronics[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(29): 8771-8795.
- [29] KUMAR P, EBBENS S, ZHAO Xiubo. Inkjet printing of mammalian cells-Theory and applications[J]. Bioprinting, 2021, 23: e00157.
- [30] ARRABITO G, PIGNATARO B. Inkjet printing methodologies for drug screening[J]. Analytical Chemistry, 2010, 82(8): 3104-3107.
- [31] GBURECK U, HÖLZEL T, DOILLON C J, et al. Direct printing of bioceramic implants with spatially localized angiogenic factors[J]. Advanced Materials, 2007, 19(6): 795-800.
- [32] ZHANG Guanguang, ZHANG Jianhua, QIU Tian, et al. Fabrication of flexible electrochromic film based on amorphous isopolytungstate by low-temperature inkjet-printed process with a solution crystallization kinetic-controlled strategy[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 427: 131840.
- [33] JANG D, KIM D, MOON J. Influence of fluid physical properties on ink-jet printability[J]. Langmuir, 2009, 25(5): 2629-2635.

(编辑:陈 越)