

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.04.06

增材制造复合压电陶瓷工艺研究

张子佳¹, 倪江涛¹, 张文奇¹, 李亚涛¹, 曾 勇², 董 鹏^{1*}

1. 首都航天机械有限公司, 北京 100076

2. 北京工业大学 物理与光电工程学院, 北京 100124

摘要: 陶瓷材料因具有高强度、低密度、耐高温及耐腐蚀等优异性能, 在航空航天领域具有广阔的应用前景。针对传统成形工艺在制备复杂结构陶瓷零件的局限性, 本文研究了钛酸钡(BT)/羟基磷灰石(HA)复合压电陶瓷的还原光聚合(Vat Photopolymerization, VPP)增材制造工艺。通过优化陶瓷粉体配比、光敏树脂组成及添加剂含量, 成功制备了体积分数为40%、兼具高固含量与高分散性的BT/HA复合压电陶瓷浆料, 其中BT与HA的体积比为4:1。基于比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律, 预测并分析了该浆料的最优打印工艺参数, 并制备出成形质量良好的BT/HA复合陶瓷坯体。结果表明, 所成形坯体的最小结构特征尺寸可达100 μm , 悬臂梁结构的最大无支撑跨距为10 mm。

关键词: 增材制造; 复合压电陶瓷; 陶瓷浆料; 还原光聚合; 比尔-朗伯定律

中图分类号: TM282 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)04-0052-08

Research on Additive Manufacturing Process of Composite Piezoelectric Ceramics

ZHANG Zijia¹, NI Jiangtao¹, ZHANG Wenqi¹, LI Yatao¹, ZENG Yong², DONG Peng^{1*}

1. Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China

2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: Ceramic materials exhibit broad application prospects in the aerospace field due to their excellent properties such as high strength, low density, high temperature resistance, and corrosion resistance. To address the limitations of traditional forming methods in fabricating ceramic parts with complex structures, this paper investigates the Vat Photopolymerization (VPP) additive manufacturing process of barium titanate (BT)/hydroxyapatite (HA) composite piezoelectric ceramics. By optimizing the ceramic powder ratio, photosensitive resin composition, and additive content, a BT/HA composite piezoelectric ceramic slurry with a solid loading of 40 vol%, characterized by high solid content and high dispersibility, was successfully prepared, wherein the volume ratio of BT to HA is 4:1. Based on the Beer-Lambert law, the optimal printing process parameters of the slurry were predicted and analyzed, and BT/HA composite ceramic green bodies with good formability were fabricated. The results show that the minimum structural feature size of the obtained green bodies reaches 100 μm , and the maximum unsupported span of the cantilever beam structure is 10 mm.

Keywords: additive manufacturing; composite piezoelectric ceramics; ceramic slurry; reductive photopolymerization; Beer-Lambert law

引用格式: 张子佳, 倪江涛, 张文奇, 等. 增材制造复合压电陶瓷工艺研究[J]. 电焊机, 2026, 56(4): 52-59.

Citation: ZHANG Zijia, NI Jiangtao, ZHANG Wenqi, et al. Research on Additive Manufacturing Process of Composite Piezoelectric Ceramics[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(4): 52-59.

收稿日期: 2025-12-24 修回日期: 2026-01-30

作者简介: 张子佳(1998—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事增材制造研究。E-mail: 18832287782@163.com。

通讯作者: 董 鹏, E-mail: dp830130@163.com。

0 引言

压电陶瓷是一种可以实现力-电性能相互转化的功能陶瓷材料,在传感、超声成像和水下探测等众多领域表现出巨大的潜力,是航空航天领域中不可缺少的一类先进材料^[1-2]。由于传统的压电陶瓷材料中含有多种有毒、有害的成分,对人类和生态环境造成了极大的威胁,因此近年来环境友好的BT/HA复合压电陶瓷制备研究备受关注。传统的干压、注射成形方式在制备一些形状较为复杂的陶瓷时存在较多局限性^[3-5]。近年来随着增材制造技术的发展和在各领域的应用^[6-8],陶瓷的制造方式得以拓展,陶瓷增材制造技术正在被逐渐开发^[9]。

VPP技术又称为立体光刻技术(Stereo Lithography, SL),是借助计算机来控制设备的曝光参数将光敏材料原料凝固成形,得到最终产品。该技术有很多分类,如立体光刻成形技术(Stereo Lithography Appearance, SLA)、掩模投影立体光刻(Mask Projection Stereo Lithography, MPSL)、微立体光刻(Micro Stereo Lithography, μ SL)和双光子聚合(Two-Photon Polymerization, TPP)等。具有成形速度快、成形精度高、固化速率快、成本低、能够成形复杂陶瓷结构等特点,是一种理想的复杂结构陶瓷的制备技术^[10]。在使用VPP技术打印制备陶瓷时,陶瓷样件最终成形质量主要受陶瓷浆料质量及曝光成形工艺等多方面影响。预制陶瓷浆料的固含量、黏度、固化特性以及固化光源的曝光参数都是影响坯体打印质量的关键因素,使用未优化的成形参数会导致陶瓷坯体出现分层、变形等缺陷^[11-12]。

制备高固含量、低粘度的光敏陶瓷浆料是陶瓷

成形的首要步骤,高固含量的光敏陶瓷浆料可减小陶瓷坯体后期热处理过程中的体积收缩,增强陶瓷力学性能,提高陶瓷的相对密度,但同时固含量的升高也会导致浆料粘度增加,从而影响陶瓷打印过程顺利进行。因为陶瓷浆料可以看作固液两相的流体,所以当陶瓷粉体体积和树脂总体积相近时,此时浆料固含量最高。如果陶瓷粉体体积过小会导致脱脂后零件坍塌,如果陶瓷粉体体积过多会导致树脂无法完全将其包裹从而发生颗粒团聚而降低最终烧结后陶瓷的性能。最终优化后的陶瓷浆料需要具有良好的固化能力,内部陶瓷颗粒要均匀稳定分布,脱脂烧结后不坍塌,可以成形。因此要获得高固含量、低黏度、固化能力合适且稳定的浆料是陶瓷成形的前提。陶瓷浆料一般包含陶瓷粉体,光敏树脂,添加剂。陶瓷粉体一般为微纳米粉体颗粒。光敏树脂包含树脂和光引发剂,可以通过发生光固化反应将陶瓷粉体结合在一起,陶瓷浆料决定了打印结束后坯体的各项性能。添加剂包括分散剂以及增稠剂等,对调节浆料的稳定性和流变性起到重要作用^[13-14]。

1 试验及方法

1.1 试验材料

本实验中所使用材料如表1所示,本实验采用的BT压电陶瓷粉末是中国金属冶金研究总院研制的高纯AR级粉末,粒径为400 nm,粉末具有纯度高、粒径分布均匀、比表面积大等优点。HA陶瓷粉末为北京迈瑞达科技有限公司购买,纯度为99.9%,粉末粒径为5 μ m。

表 1 试验材料
Table 1 Experimental materials

材料名称	纯度	作用	生产厂家
钛酸钡(BT)	AR	粉体	中国金属冶金研究总院
羟基磷灰石(HA)	99.9%	粉体	北京迈瑞达科技有限公司
三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)	85.0%	树脂	北京虹湖联合化工产品有限公司
1,6-己二醇二丙烯酸酯(HDDA)	90.0%	树脂	北京虹湖联合化工产品有限公司
4-二甲氨基苯甲酸乙酯(EDB)	98.0%	光引发剂	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
BYK111	98.0%	分散剂	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
BYK410	99.0%	增稠剂	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
KH570	99.0%	表面活性剂	上海阿拉丁生化科技股份有限公司

选用三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)、1,6-己二醇二丙烯酸酯(HDDA)作为光敏树脂单体,两种树脂具有优异的光聚合反应活性和高打印精度。选用BYK111作为分散剂,BYK410作为增稠剂,KH570作为表面改性剂对粉末进行分散或改性处理。选用4-二甲氨基苯甲酸乙酯(EDB)作为450 nm近紫外波段范围的光引发剂。

VPP技术增材制造设备采用奥地利Lithoz公司研发的设备CeraFab 7500,如图1所示。设备内部主要由成形平台、料盘以及刮刀组成。设备成形尺寸为 $76 \times 43 \times 170 \text{ mm}^3$,光源波长为450 nm,打印层厚在25~100 μm 可调节,平面分辨率可达40 μm ,曝光功率密度最高可达 92 mW/cm^2 。该设备具有成形速度快,成形精度高,可以成形高复杂度几何零件的优势。将设计好的模型以STL格式导入到与CeraFab 7500打印机配套的CeraFab-DP软件中,设置不同打印参数并进行切片处理。将浆料倒入料盘中,之后将打印平台下降至料盘上,观察打印平台压出的痕迹,并通过调整螺丝将平台调平,全部参数调整完毕后开始打印。

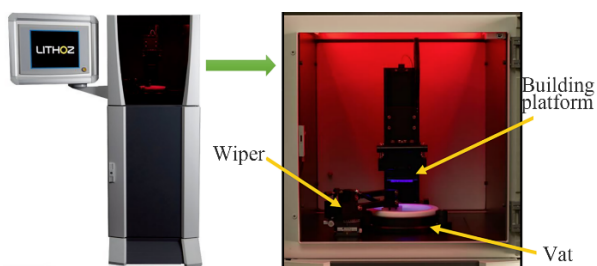


图1 CeraFab 7500 陶瓷增材制造设备

Fig. 1 CeraFab 7500 ceramic 3D printing equipment

1.2 试验方法

还原光聚合技术所需的陶瓷浆料为陶瓷粉体、光引发剂、活性稀释剂、分散剂等添加剂混合而成。而BT和HA两种材料物理性质差异较大,其中BT的密度为 6.02 g/cm^3 ,线性膨胀系数 $9.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,而HA密度为 3.16 g/cm^3 ,线性膨胀系数为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。Gittings等人探究了不同成分配比下BT/HA复合材料的电学性能并发现只有BT含量在80 vol.%及以上时复合材料才能在应力诱导下表现出压电电势^[15],所以采用80 vol.%的BT与20 vol.%的HA进行复合材料的制备。在陶瓷浆料调配中BT与HA的粉体配比、固相比、添加剂比例等因素对浆料的

分散性、时效性、流变性等具有较大的影响,进而影响到BT/HA复合陶瓷坯体的成形质量与烧结后的微观组织性能。因此,如何调配具有长时效的均匀分布、高固相比、低粘度BT/HA复合陶瓷浆料是控制陶瓷坯体质量的关键。

实验中向干净的球磨罐中放入适量氧化锆球,将一定量的无水乙醇和粘合剂体系以及称量好的一定比例的BT和HA粉体加入球磨罐中,加入表面活性剂KH570后密封后置于球磨机上以300 r/min的转速球磨4 h。将球磨好的粉末混料取出置于托盘中,在真空烘干箱中以70°C干燥12 h。将充分干燥的粉体倒入研钵中打散,然后将粉体过100目筛网得到表面改性的BT/HA复合陶瓷粉末。

以三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)和1,6-己二醇二丙烯酸酯(HDDA)丙烯酸单体为光敏原料,制备了光敏树脂的预混溶液。在此基础上将表面改性的BT/HA复合陶瓷粉末称重并添加到预混料中,添加适量的BYK111和BYK410分别作为分散剂和增稠剂。加入适量的4-二甲氨基苯甲酸乙酯(EDB)光引发剂,将制备得到的BT/HA复合陶瓷浆料在高速均质机中均匀混合后经三辊机研磨,再次放置到高速均质机中混合均匀并真空消泡得到可用于打印的BT/HA复合陶瓷浆料。分别测定不同质量分数BYK111分散剂下BT/HA复合陶瓷浆料的粘度和不同质量分数BYK410增稠剂下BT/HA复合陶瓷浆料的沉降情况,分析浆料的流变性及其稳定性对实验的影响。

图2为VPP技术增材制造BT/HA陶瓷的制备流程图。其工作原理是基于光敏浆料中的还原光聚合反应。当紫外光照射浆料时,照射区域内的浆料发生光聚合反应并固化成形。设备的工作过程为打印平台向下移动,其底部低于浆料槽内浆料的液位高度,之后投影装置将通过切片获得的图形投影到浆料槽的底部,通过光固化以形成附着到打印平台的固化层。然后投影装置关闭,打印平台向上移动,固化层从释放膜上拉开。最后浆料槽旋转,以便重新涂覆内部浆液。

将上述制备得到的BT/HA复合陶瓷光敏浆料添加到设备中,通过调节打印层厚、曝光时间、曝光能量等参数完成陶瓷坯体的打印工作,打印过程中

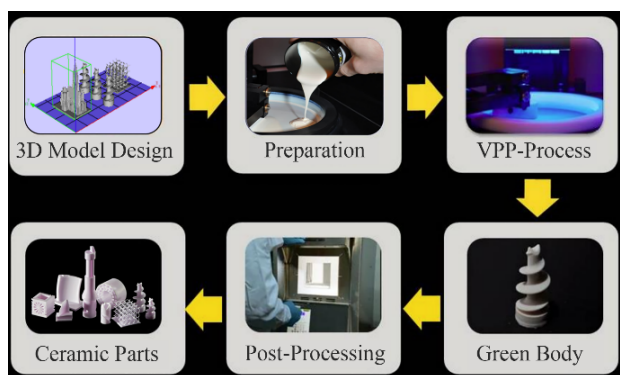


图2 VPP技术增材制造流程

Fig. 2 VPP technology additive manufacturing flowchart

的打印参数设置影响陶瓷坯体表面的成形质量和打印精度。本实验中综合考虑增材制造陶瓷的成形精度和速度,设置打印层厚为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。另外为了保证打印坯体与成形平台的充分结合,防止坯体在打印过程中脱落,对前5层的参数进行精细调节,适当加大了前5层的功率密度和曝光时间。

打印结束后将陶瓷坯体及成形平台一起取下,首先用薄刀片将样品及底板一起从成形平台上取下,然后用刀片将底层从陶瓷坯体上取出,向陶瓷坯体上滴加少许清洗液,然后用气枪中的压缩空气将陶瓷表面上多余的树脂和清洗剂清除,反复清洗之后将坯体放置陶瓷坯体干燥箱中进行恒温干燥。

2 结果与讨论

2.1 试验材料

2.1.1 陶瓷粉体研究

为了提高陶瓷浆料的固含量,应使陶瓷粉体在树脂中合理堆积分布,单一粒径的陶瓷粉体颗粒在树脂中堆积时会存在较大的空隙,无法提高陶瓷浆料的固含量,所以需要使用陶瓷粉体粒径级配技术在大颗粒陶瓷粉体的空隙中填充小颗粒陶瓷粉体,如图3所示。

由于BT和HA两种陶瓷粉末特性相差较大,在陶瓷烧结过程中,BT需要更高的烧结温度去形成稳定的四方相,而HA在较高温度下容易发生分解,综合考虑下本实验采用选择较小粒径的BT粉末和较大粒径的HA粉末进行BT/HA复合陶瓷粉末的初步制备,同时也可以有效提高粉体整体堆积密度。进

行双级配颗粒堆积时,粒径比值在5倍及以上时对提高堆积密度具有积极的影响,因此选用 400 nm 的BT陶瓷粉末和 $2\text{ }\mu\text{m}$ 的HA陶瓷粉末进行双级配并设置BT/HA的粉末体积比例为4/1。

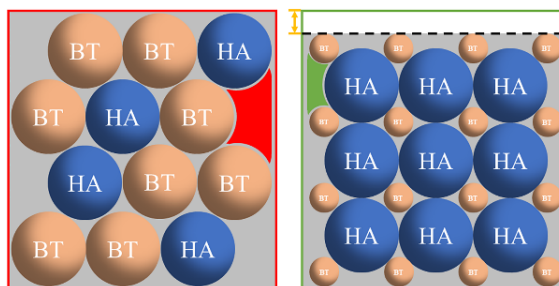


图3 BT/HA复合陶瓷粉末级配示意

Fig. 3 Schematic diagram of BT/HA composite ceramic powder grading

由于陶瓷粉体和树脂体系之间的低相容性会导致颗粒的团聚和沉淀,所以需要加入表面活性剂KH570对陶瓷复合陶瓷粉体进行表面改性处理,将陶瓷粉体由亲水性改为疏水性。将固定比例的BT/HA复合陶瓷粉末、氧化锆球、无水乙醇以及表面活性剂KH570放入球磨机中进行球磨处理,加入的氧化锆球与BT/HA复合陶瓷粉末为3/1,球磨时间为4 h,转速为 300 r/min 。球磨后将粉体进行干燥处理后研磨过筛。

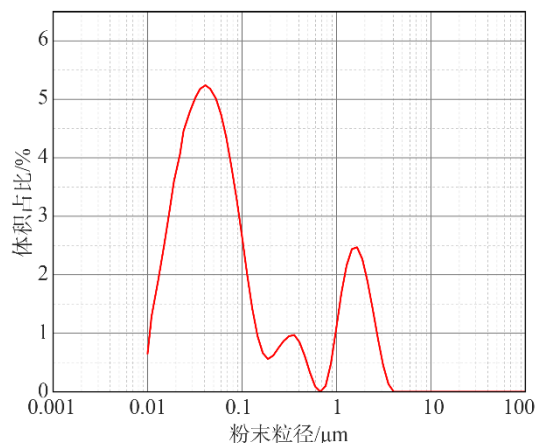


图4 BT/HA复合陶瓷粉末粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution diagram of BT/HA composite ceramic powder

经过球磨过筛后BT/HA复合陶瓷粉末的粒径分布如图4所示,粉末粒度主要分布在 $0.045\text{ }\mu\text{m}$,在 400 nm 和 $2\text{ }\mu\text{m}$ 可以观察到有一些较小的峰,分别为BT和HA。球磨可减少配置浆料过程中粉末团聚的现象,提高浆料的固含量。

2.1.2 光敏树脂研究

光敏树脂一般包含固化效果好起骨架支撑作用的多官能团树脂、流动性好提高陶瓷浆料固含量的低官能团树脂以及引发光聚合反应的光引发剂。一般来说树脂官能团越少则代表其分子链越短,该树脂的流动性越好。本实验选用六官能团的三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)树脂作为主要组成部分,选择双官能团的1,6-己二醇二丙烯酸酯(HDDA)将陶瓷浆料稀释。TMPTA与HDDA体系聚合反应如图5所示。先前实验证明,当HDDA含量超过40 vol.%后将不利于光聚合反应,因为HDDA的加入提高了光敏树脂的临界曝光值,增加了其固化所需要的能量,因此选择TMPTA/HDDA的体积比例为6:4。

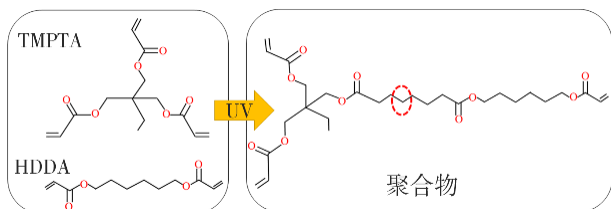


图5 TMPTA与HDDA体系聚合反应示意

Fig. 5 Schematic diagram of polymerization reaction between TMPTA and HDDA system

光引发剂是指能够在紫外光区(250~420 nm)或可见光区(400~800 nm)吸收特定波段的能量,从而生成自由基和阳离子进而引发单体聚合交联固化的化合物。针对CeraFab 7500陶瓷增材制造设备的打印波长,本实验选择4-二甲基氨基苯甲酸乙酯(EDB)作为光引发剂。先前实验证明光引发剂的含量在2~4 wt.%之间时,光聚合反应转换率出现峰值,如果超过这个含量,紫外光入射后光强会沿着其入射方向快速衰减,虽然在其光入射部位固化面积大,但是在固化深度方向效果会大大降低,入射部位的快速固化也会阻碍紫外光对更深位置的固化,导致坯体产生衍射以及层与层间结合力差的现象,所以选择的光引发剂含量为树脂的3 wt.%。将树脂与光引发剂按照配比放在均质机里面进行均质得到最终打印需要用的光敏树脂。

2.1.3 添加剂研究

(1)分散剂含量对浆料流动性的影响。

陶瓷颗粒在液体中分散具有自发聚集和沉积

的倾向,所以需要在浆料中添加分散剂。分散剂可以减少分散体系中固液两相粒子的团聚,使材料颗粒在介质中以悬浮状态均匀地分散。其作用机理包括静电位阻、空间位阻和静电稳定。陶瓷颗粒在浆料中的均匀分散是获得致密、少缺陷、高机械强度陶瓷烧结体的重要因素。分散剂可以使陶瓷颗粒不发生团聚,树脂得以与颗粒充分结合,提高浆料固含量。分散剂可以改善陶瓷粉末与光敏树脂之间的相容性,但分散剂的含量存在一个最小临界值,在这个最小临界值上,分散剂吸附在陶瓷粉体上,吸附层为单分子层,如果超过了这个临界值,可能会降低陶瓷浆料的分散效果,增加后处理的难度。因此为了探究最佳分散剂含量,分别制备了不同分散剂(BYK111)含量(0.5 wt.%、1.0 wt.%、1.5 wt.%、2.0 wt.%、2.5 wt.%、3.0 wt.%、3.5 wt.%、4.0 wt.%、4.5 wt.%、5.0 wt.%、6.0 wt.%、7.0 wt.%)的40 vol.%高固含量陶瓷浆料,陶瓷浆料粘度随剪切速率的变化如图6所示。随着分散剂含量的增加,浆料粘度先减小后增大,当分散剂含量为2.0 wt.%时,浆料粘度最低。

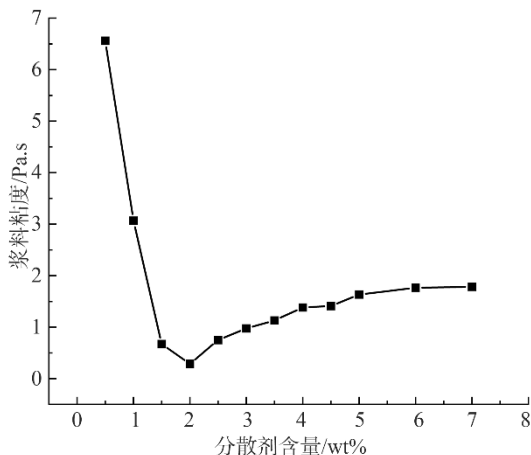


图6 不同分散剂含量对浆料粘度的变化

Fig. 6 Changes in viscosity of slurry with different dispersant contents

(2)增稠剂含量对浆料稳定性的影响。

陶瓷粉体在陶瓷浆料中受到重力,浮力,粘滞阻力等力的作用下可能会发生沉降,增稠剂可以有效减少陶瓷粉体的沉降。

将不同含量的增稠剂加入陶瓷浆料中进行沉降实验,定时记录陶瓷浆料中陶瓷颗粒的沉降情况,结果记录如图7所示。未加入增稠剂的浆料在



图7 不同增稠剂含量对浆料的沉降变化

Fig. 7 Effect of different thickener content on the settlement of slurry

第三天开始出现沉降,加入1.0 wt.%增稠剂的浆料在第14天出现少量沉降分层现象,加入1.5 wt.%和2.0 wt.%含量的增稠剂在14天内未出现明显的沉降分层现象,所以确定最佳增稠剂含量为1.5 wt.%。

2.2 打印工艺研究

还原光聚合增材制造时光源固化打印层,层与层结合成复杂的零件,每一层可以看作构成零件的基本单元,因此固化层的打印固化性能直接决定了最终陶瓷坯体的形状和性能。

2.2.1 VPP参数预测方法

VPP技术增材制造设备的打印参数包括打印层厚、曝光能量、曝光时间和曝光光强等。其中曝光能量=曝光强度×曝光时间,对于陶瓷浆料成型有着较大的影响。当曝光光强保持不变时,曝光时间越少浆料的固化深度较低,无法使每层浆料之间紧密地结合,会产生较为严重的分层现象,但是曝光时间过久会使得浆料固化在浆料盘上,或者从成型平台上掉落。为了研究优化陶瓷打印的曝光时间,设置曝光时间分别为1 s、2 s、3 s、4 s、5 s,并用游标卡尺测量其固化深度,得到曝光时间与固化深度之间的数据绘制出如图8所示的关系。

2.2.2 VPP参数预测公式

图9所示曝光时间与光固化层厚的曲线基本呈线性关系。根据Beer-Lambert定律^[16]分析曝光参数与固化厚度之间的关系。

$$C_d = S_d \ln\left(\frac{E_0}{E_c}\right) \quad (1)$$

式中 C_d 为固化厚度(单位: μm); S_d 为透射深度; E_0 为陶瓷浆料表面实际的曝光能量; E_c 为光固化陶瓷浆料的临界曝光能量(单位: mJ/cm^2)。根据不同曝光能量 E_0 条件下的固化厚度 C_d 来求出透射深度 S_d 和临界曝光能量 E_c 进而构建固化厚度预测公式。

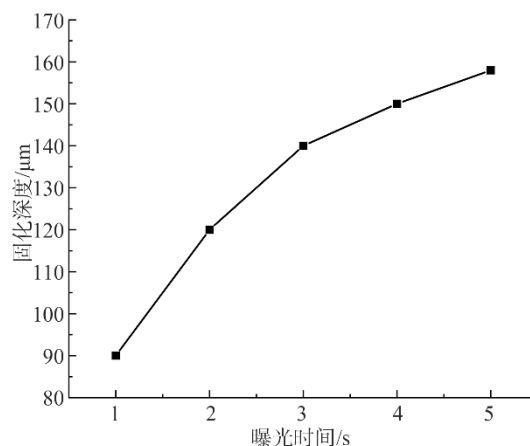


图8 曝光时间与固化深度关系

Fig. 8 Relationship between exposure time and curing depth

这些参数可以直观地反映出浆料对紫外光的吸收能力以及浆料固化的难易程度。根据曝光能量 E_0 和固化深度 C_d 计算得 E_c 为 $10.49 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 透射深度 S_d 为 $42.83 \mu\text{m}$ 。所以得到最终固化深度 C_d 与陶瓷浆料表面实际的曝光能量 E_0 之间的关系式:

$$C_d = 42.83 \ln\left(\frac{E_0}{10.49}\right) \quad (2)$$

根据Beer-Lambert定律对数据进行线性拟合,以 $\ln E_0$ 为横坐标,单层固化层厚作为纵坐标,拟合的曲线如图9所示。

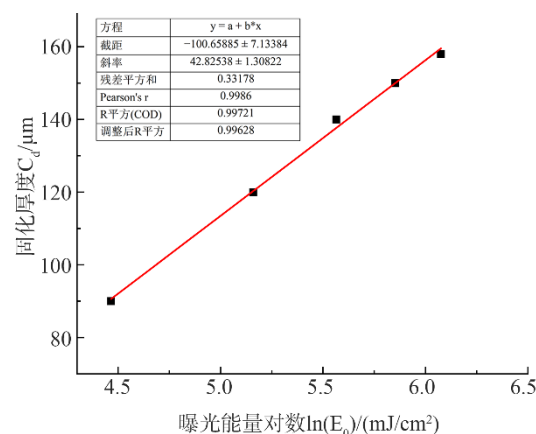


图9 固化方程拟合曲线

Fig. 9 Curing equation fitting curve

为满足打印需要,设置VPP打印层厚度为 $50 \mu\text{m}$, 底板曝光时间为1.5 s,固化厚度要达到打印层厚的2倍以上,所以选用单层曝光时间2.0 s,曝光光强为 $87 \text{ mW}/\text{cm}^2$,曝光能量为 $174 \text{ mJ}/\text{cm}^2$,如表2所示。

2.3 测试功能件打印研究

根据以上对复合压电陶瓷浆料体系的设计研

表2 打印参数

Table 2 Printing parameters

参数种类	参数大小
打印层厚/ μm	50
底板曝光时间/s	1.5
打印曝光时间/s	2
曝光功率/(mW/cm^2)	87
曝光能量/(mJ/cm^2)	174

究,最终以TMPTA/HDDA作为光敏树脂,加入陶瓷粉体和添加剂后均匀混合分散,得到固含量为40 vol.%的BT/HA复合压电陶瓷浆料。为了测试BT/HA复合陶瓷成形工艺的可靠性,设计并打印了测试功能件如图10所示。

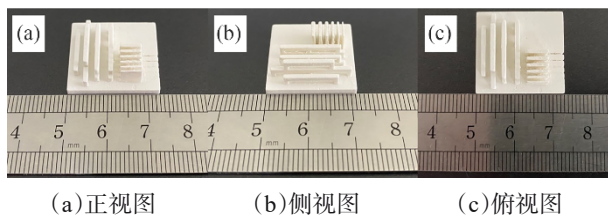


图10 测试功能件打印坯体示意

Fig. 10 Schematic diagram of printing blank for testing functional parts

测试功能件主要包括按照 $100\ \mu\text{m}$ 的梯度由 $100\ \mu\text{m}$ 向 $600\ \mu\text{m}$ 递增的薄板和缝隙以及按照 $1\ \text{mm}$ 的梯度由 $1\ \text{mm}$ 向 $10\ \text{mm}$ 递增的悬臂梁结构。图10分别为BT/HA复合陶瓷测试功能件成形坯体的正视图、侧视图以及俯视图,从图中可以看出BT/HA复合陶瓷在最佳浆料工艺参数和最佳打印工艺参数下成形效果良好,可以成形 $100\ \mu\text{m}$ 的坯体结构特征,在纯BT/HA复合陶瓷浆料支撑条件下打印的最大跨距可达 $10\ \text{mm}$ 。

3 结论

本研究主要通过对浆料工艺和打印工艺的研究成功制备了BT/HA复合陶瓷坯体,主要内容包括以下几点:

(1)研究了高固含量高分散性BT/HA复合陶瓷浆料的制备工艺。通过对陶瓷粉体,光敏树脂,添加剂的研究制备了体积分数为40 vol.%的BT/HA复合陶瓷浆料,其中陶瓷粉体BT/HA的体积比例为4:1,光敏树脂TMPTA/HDDA的体积比例为6:4,光

引发剂EDB含量为3 wt.%,分散剂BYK111含量为2.0 wt.%,增稠剂BYK410含量为1.5 wt.%。

(2)根据Beer-Lambert定律预测并分析了BT/HA复合陶瓷的打印成形工艺。通过改变打印曝光参数探究了曝光时间与固化层厚之间的关系。为了满足层厚 $50\ \mu\text{m}$ 的打印,设定单层打印曝光时间为1.5 s,单层曝光功率为 $87\ \text{mW}/\text{cm}^2$,曝光能量为 $174\ \text{mJ}/\text{cm}^2$ 。

(3)根据之前探索得到的最佳工艺参数制备出BT/HA复合陶瓷尺寸精准度测试件坯体,坯体成形结构特征可达 $100\ \mu\text{m}$,在纯BT/HA复合陶瓷浆料支撑条件下打印的悬臂梁结构最大跨距可达 $10\ \text{mm}$ 。

参考文献:

- [1] Elahi H, Munir K, Eugeni M, et al. A review on applications of piezoelectric materials in aerospace industry [J]. Integrated Ferroelectrics, 2020, 211(1): 25–44.
- [2] 吴甲民,陈敬炎,陈安南,等. 陶瓷零件增材制造技术及在航空航天领域的潜在应用[J]. 航空制造技术, 2017(10): 40–49.
- [3] WU J M, CHEN J Y, CHEN A N, et al. Additive manufacturing of ceramic components and its potential application in aerospace field [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(10): 40–49.
- [4] Xia S, Jun L, Hai-Long Z, et al. Gelcasting of aluminum nitride using a water-soluble copolymer [J]. Journal of Inorganic Materials, 2014, 29(3): 327–330.
- [5] Deville S, Saiz E, Tomsia A P. Freeze casting of hydroxyapatite scaffolds for bone tissue engineering [J]. Biomaterials, 2006, 27(32): 5480–5489.
- [6] Hausnerova B, Bleyan D, Kasparkova V, et al. Surface adhesion between ceramic injection molding feedstocks and processing tools [J]. Ceramics International, 2016, 42(1): 460–465.
- [7] 董鹏,梁晓康,赵衍华,等. 激光增材制造技术在航天构件整体轻量化制造中的应用现状与展望[J]. 航天制造技术, 2018(01): 7–11.
- [8] DONG P, LIANG X K, ZHAO Y H, et al. Research Status of Laser Additive Manufacturing in Integrity and Lightweight [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2018(01): 7–11.
- [9] 陈济轮,杨洁,于海静. 国外高能束增材制造技术应用现状与最新发展[J]. 航天制造技术, 2014(04): 1–4+10.

- CHEN J L, YANG J, YU H J. The Abroad Application and Latest Development of High-energy Beam Additive Manufacturing Technology [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(04): 1-4+10.
- [8] 李沛剑, 杜鹃, 倪江涛, 等. 激光选区熔化成形技术在航空航天领域应用现状[J]. 航天制造技术, 2023(05): 11-22.
- LI P J, DU J, NI J T, et al. Application status of laser selective melting forming technology in the aerospace field [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2023(05): 11-22.
- [9] 李涤尘, 鲁中良, 田小永, 等. 增材制造——面向航空航天制造的变革性技术[J]. 航空学报, 2022, 43(04): 22-38.
- LI D C, LU Z L, TIAN X Y, et al. Additive manufacturing—Revolutionary technology for leading aerospace manufacturing [J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2022, 43(04): 22-38.
- [10] Zhang F, Zhu L, Li Z, et al. The recent development of vat photopolymerization: A review[J]. Additive Manufacturing, 2021, 48: 102423.
- [11] 邢宏宇. 面向立体光刻3D打印的高固相含量陶瓷膏料配制方法及其成形性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- XING H Y. Study on Preparation method and forming properties of ceramic paste with high solid content for stereolithography 3D printing[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [12] Chartier T, Duterte C, Delhote N, et al. Fabrication of millimeter wave components via ceramic stereo and microstereolithography processes[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2008, 91(8): 2469-2474.
- [13] Tomeckova V, Halloran J W. Porous ceramics by photopolymerization with terpene—acrylate vehicles [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2012, 95(12): 3763-3768.
- [14] Leprince J G, Hadis M, Shortall A C, et al. Photoinitiator type and applicability of exposure reciprocity law in filled and unfilled photoactive resins[J]. Dental Materials, 2011, 27(2): 157-164.
- [15] Gittings J P, Bowen C R, Turner I G, et al. Characterisation of ferroelectric—calcium phosphate composites and ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(13-15): 4187-4190.
- [16] Fuwa K, Valle B L. The Physical Basis of Analytical Atomic Absorption Spectrometry. The Pertinence of the Beer-Lambert Law[J]. Analytical Chemistry, 1963, 35(8): 942-946.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第42页

- Manufacturing Science and Engineering, 2021, 143(4): 041011.
- [39] DU Y, MUKHERJEE T, DEBROY T. Physics informed machine learning and mechanistic modeling of additive manufacturing to reduce defects [J]. Applied Materials Today, 2021, 24: 101123.
- [40] KOVACHKI N, LI Z, LIU B, et al. Neural operator: learning maps between function spaces with applications to PDEs [J]. Journal of Machine Learning Research, 2023, 24(1): 89.
- [41] LI Z, ZHENG H, KOVACHKI N, et al. Physics-informed neural operator for learning partial differential equations [J]. ACM/IMS Journal of Data Science, 2024, 1(3): 1-27.
- [42] ROSOFSKY S G, AL MAJED H, HUERTA E A. Applications of physics informed neural operators [J]. Machine Learning: Science and Technology, 2023, 4(2): 025022.
- 编辑部网址: <http://www.71dhj.com>