

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2017.04.001

陶瓷增材制造技术研究进展

伍海东, 刘伟, 伍尚华, 周茂鹏
(广东工业大学机电工程学院, 广东 广州, 510006)

摘要: 陶瓷材料以其优异的力学性能、化学稳定性能、高温性能等被广泛应用于各种场合。然而, 其固有的高强度、高硬度等性能却给陶瓷零件的成型带来了许多困难。将增材制造技术引入到陶瓷成型中将能有效克服上述困难, 并为陶瓷材料复杂成型工艺提供了全新的可能性。目前主流的陶瓷增材制造技术主要分为基于激光技术的快速成型技术, 基于挤出技术的快速成型技术和基于数字光处理的快速成型技术三类。本论文以上述增材制造技术种类为角度, 详细综述了几种常见陶瓷增材制造技术的研究现状与进展, 系统比较了各项技术在陶瓷领域应用的优缺点, 并对今后陶瓷增材制造技术的发展进行了展望。

关键词: 增材制造; 陶瓷

中图分类号: TQ174.75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2278(2017)04-0451-09

Research Progress of Additive Manufacturing Technology for Ceramic Materials

WU Haidong, LIU Wei, WU Shanghua, ZHOU Maopeng
(Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: Ceramic materials, with their excellent mechanical properties, chemical stability, high temperature properties, are widely applied to various occasions. However, the properties mentioned above have brought many difficulties to shape ceramic parts. The difficulties will be overcome when the additive manufacturing technique is introduced into ceramic shaping process, which also provides a new possibility for ceramic shaping process. The current additive manufacturing techniques are mainly divided into three categories: laser processing-based, extrusion-based, and digital light processing-based. In this paper, the research status and progress of ceramic additive manufacturing technique are carefully reviewed. The advantages and disadvantages of the ceramic additive manufacturing technique are also discussed, and finally the development of the technique is explored.

Key words: additive manufacturing; ceramic

0 引言

陶瓷材料具有强度硬度高、化学稳定性好、高温性能优良等优点, 目前已在化工、军工、机械、电子、半导体、航天航空等行业中得到了广泛的应用。然而, 陶瓷所固有的高强度、高硬度等性能却给陶瓷零件的成型带来了许多困难。传统的陶瓷成型工艺如注浆成型、干压成型、热压铸成型、凝胶注模等在制备陶瓷零部件存在成本高、周期长、复杂形状难以成型等缺陷大大地限制了高技术陶瓷的推广与应用。

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术是采用材料逐渐累加的方法制造实体零件的技术, 相对于传统的材料去除—切削加工技术, 是一种“自下而上”的制造方法。和传统成型工艺相比, 增材制造技术具有以下优点: (1)可以制造任意复杂形状零件(2)制造速度快、制造周期短; 这些优点能有效克服传统陶瓷制造工艺的缺点, 因此, 将增材制造技术引入陶瓷零件的成型, 能为陶瓷材料复杂成型工艺提供全新的可能性。

增材制造技术自应用以来, 主要用于塑料和金属的成型。直到20世纪90年代末, 选择性激光烧结

收稿日期: 2017-03-18。

修订日期: 2017-04-15。

基金项目: 广东省引进领军人才专项资金(400120001); 广东省高等学校科技创新重点项目(501120024)

通信联系人: 刘伟(1987-), 男, 博士, 副教授
伍尚华(1963-), 男, 博士, 教授。

Received date: 2017-03-18

Revised date: 2017-04-15

Correspondent author: LIU Wei(1987-), male, Ph.D., Associate professor.
WU Shanghua(1963-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: 317127238@qq.com
swu@gdut.edu.cn

(SLS)、立体光刻成型(SLA)、熔融沉积成型(FDM)等先后被用于陶瓷零件的成型。这些陶瓷增材制造技术大体可分为以下三类;第一类基于激光技术的陶瓷增材制造技术,第二类是基于喷墨挤出技术的陶瓷增材制造技术,第三类是基于数字光处理技术的陶瓷增材制造技术。这些成型方法的出现,拓展了增材制造技术在陶瓷领域的应用。

本文从上述增材制造技术分类角度出发,对增材制造技术在陶瓷领域的发展和特点作了详细的综述。

1 基于激光技术的陶瓷增材制造技术

基于激光技术的陶瓷增材制造技术(Laser Rapid Prototyping: LRP)通常有以下几种,如立体光固化(SLA)技术;选择性激光烧结(SLS)技术;激光近形(LENS)技术;激光薄片叠层制造(LOM)技术。1.1 分层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM)

分层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM)成型原理是利用激光器在x-y面切割出单层轮廓,随后下移z轴平台,铺上新一层材料,再进行切割,层间采用粘接剂或热压焊合进行粘接^[1]。虽然基于流延薄片的LOM技术易于制作大尺寸零件,成型速度较快,且非常适合制造层状复合材料^[2-5],但是,LOM技术存在切割余料难以回收,精度不高等缺点,且其制造出的坯体烧结后致密度较低。因此,研究者基于分层实体制造技术主要对成型工艺的优化、制造精度提高及如何提高致密性进行了研究。

在成型工艺方面,Zhang Yumin^[6,7]通过roll-forming technique制备了0.7 mm Al_2O_3 薄片,并通过LOM成型工艺制备了 Al_2O_3 陶瓷坯体,经过无压烧结最终获得了相对密度为97.1%的 Al_2O_3 陶瓷样品。但是,主要研究的是陶瓷薄片,大大限制了其应用。因此,必须对陶瓷厚坯的脱脂进行研究。Anirban Das^[8]利用流延法制备了 Al_2O_3 陶瓷薄片,随后对LOM技术成型的 Al_2O_3 陶瓷厚坯脱脂进行了研究,并建立了基于有机物含量的脱脂模型,拓展了LOM技术的应用范畴。

为了提高LOM技术的制造精度,减小制造过程中出现的台阶效应,Klosterman D.A^[9]等提出了曲面陶瓷片工艺,具体通过采用陶瓷带和纤维预浸料作为原料,在曲面层的基础上,制备曲面结构。从而提高陶瓷件的制造精度。

为了提高其致密度,进而提高其性能,研究者们分别从优化制造工艺及坯体后处理工艺方面改善烧结后陶瓷的性能。Klosterman and Chartoff^[10]详细研究了SiC和树脂复合材料的三种层间特性,并利用LOM技术成功制备出了与传统方法性能相似的SiC陶瓷。Liu Shihao^[11]利用水基流延成型技术制备出固含量为48.7 vol.%陶瓷坯体,随后将坯体切割并经过冷等静压,压力为50 MPa,时间为2 min,最后经过无压烧结成功制备出致密度高达93.7%的复杂形状 Si_3N_4 陶瓷。此外,Rodrigues^[12]等比较了 Si_3N_4 陶瓷和经过前驱体浸渗的 Si_3N_4 陶瓷的性能,结果发现,利用LOM技术制备的 Si_3N_4 陶瓷性能与传统成型方法制备出 Si_3N_4 陶瓷的性能类似。

1.2 光固化成型技术(stereolithography, SLA)

光固化成型技术(stereolithography, SLA)的原理图如图1所示,其基本原理是通过计算机控制特定波长的紫外光束选择性照射到光敏树脂上固化形成单层轮廓,下移工作平台使光敏树脂重新涂覆于表面,继续进行下一层固化,如此循环,获得最终零件的实物模型^[19]。

由于光固化成型技术(SLA)相对于其他的增材制造技术而言^[13],在制备复杂形状、高精度大型零部件有较大优势,但是,浆料的粘度及粉体固含量对成型精度及致密化有较大影响。为了获得性能优异的陶瓷材料,非常有必要对陶瓷浆料的制备,成型工艺参数优化及坯体脱脂烧结三个方面进行深入研究。

在优化陶瓷浆料制备工艺方面,例如:周伟召等^[14]详细研究了分散剂、固相含量、粒径、单体浓

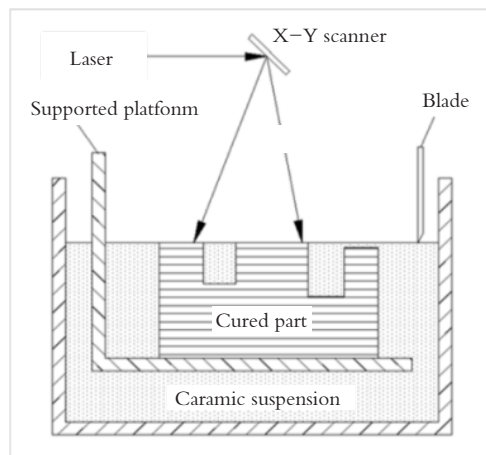


图1 光固化成型原理示意图^[19]

Fig.1 Schematic diagram of stereolithography

度、温度及稀释剂对陶瓷浆料粘度的影响, 确定了最佳分散剂、稀释剂含量。成功的开发出一种新的基于硅溶胶的水基陶瓷浆料, 制备出了固含量高达50 vol.%的陶瓷浆料。M. Ramzi Ben Romdhane等^[15]通过优化添加含有羧基的共聚物, 制备出了固含量高达50 vol.%的陶瓷浆料。

在成型过程中, 陶瓷颗粒对激光具有散射作用, 严重影响了高精度陶瓷的制造, 因此, 必须对陶瓷颗粒散射造成的影响进行研究, 提高精度^[18]。Cheng Sun等^[16]研究了 SiO_2 、 Al_2O_3 和PZT粉末特性对陶瓷浆料及其微光固化成型的影响。粉末与溶液的相对折射率、粉末粒径分布等会影响固化深度。此外Y. Abouliatim等^[17]采用库贝尔卡-芒克模型对 Al_2O_3 陶瓷浆料的光学特性进行研究, 研究指出UV灯和 Al_2O_3 陶瓷浆料的主要作用是散射。因此, 为了获得高精度的陶瓷坯体, 必须对散射所造成的影响进行预测。

为了获得高性能的陶瓷零部件, 周茂鹏等^[19]通过优化干燥及脱脂工艺, 该方法具体通过采用PEG作为液体介质的液体干燥法及真空/气氛—空气二步脱脂法, 在陶瓷粉体仅为30 vol.%的情况下, 制备出了无缺陷的, 几乎完全致密的 Al_2O_3 陶瓷刀具样品(图2所示)。由于粉体在分散过程中, 很难达到完全分散, 为了解决这种因粉体团聚及烧结后继续致密的问题, Zak C. Eckel等^[20]采用液相陶瓷前驱体作为单体, 采用光固化成型制备出大晶阵和蜂窝状陶瓷前驱体聚合物, 在1000 °C的氩气气氛裂解后, 获得致密的显微结构。这种利用前驱体而不是粉末能够有效避免团聚等对陶瓷成型及性能影响。其所制备的 SiOC 陶瓷是具有密度相近的商业泡沫陶瓷十倍的强度。

1.3 选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)

选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)其原理是将待成型粉末放均匀平铺一层的厚度后, 在计算机的控制下, 按照截面轮廓, 利用高功率激光将粉末熔化或烧结, 当该层扫描完毕后, 将平台下移一个层的厚度, 再继续上述步骤, 直至获得三维结构的零件实体^[21]。由于SLS成型要求粉末流动性好, 然而, 粉末粒径较大会导致粉末堆积松散, 不易烧结致密。因此, 科研工作者主要对高性能结构陶瓷制备工艺和多孔生物支架制备方面进行了深入探讨。

K. Shahzad^[22]等详细研究了激光扫描参数, 如激光功率、激光扫描速度及激光扫描间距对 Al_2O_3 陶瓷坯体的影响, 通过优化成型参数, 最终制备出无缺陷的陶瓷样品, 但致密度较低, 仅为50%。为了提高陶瓷的密度及性能。Kai Liu^[23,24]通过采用PVA和环氧树脂E06为添加剂, 采用SLS间接成型技术, 其采用的激光器功率为55 W, 波长10.6 μm , 激光直径为200 μm , 层厚为150 μm , 通过调整扫描速度、扫描间距及激光器功率, 成功的制备出50 mm x10 mm x10 mm的方块, 并通过冷等静压及无压烧结成功制备出了致密度为92% Al_2O_3 的陶瓷样品。Khuram^[25]等以聚丙烯为粘结剂, 利用间接SLS技术制备出 ZrO_2 坯体, 然后分别通过压力浸渗和温等静压, 最后在空气中烧结, 制备出了致密度为85% ZrO_2 陶瓷样品。

此外, 在生物支架的制备上。Kolan等^[26]制备了孔隙率为50%, 孔径为300–800 μm 的生物支架。K.H.Tan^[27]等通过控制有机物的含量制备了孔隙结构可控和形状复杂的生物支架, 并拓展了如PEEK等非传统材料的应用范围。

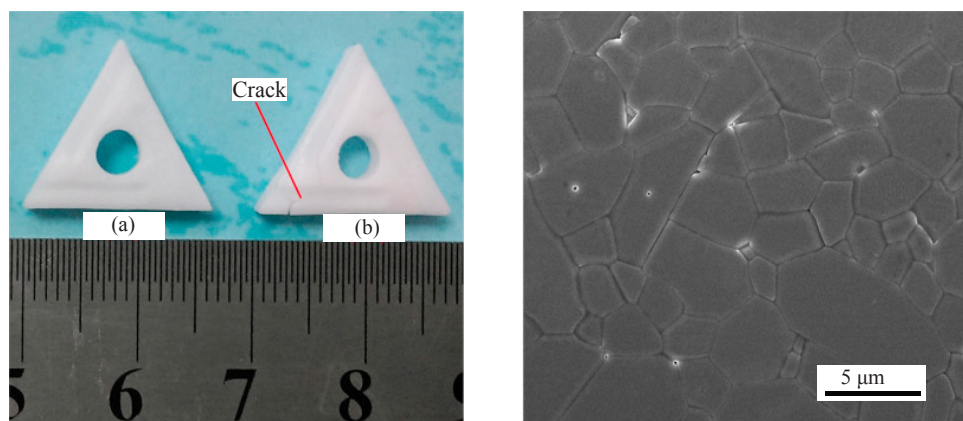


图2 烧结后的氧化铝陶瓷样品及显微结构^[19]

Fig. 2. The microstructure and sintered body of alumina ceramics

1.4 激光近形技术(Laser Engineered Net Shaping, LENS)

激光近形技术(Laser Engineered Net Shaping, LENS)是一种将激光选区烧结(SLS)与激光熔覆成形(LCF)技术结合起来的新型增材制造技术,主要特点在于采用高功率(几千瓦甚至是十几千瓦,而一般SLS的激光功率只有50瓦)的激光器将粉末熔化,并且是边成型边送粉^[28-29]。但是,由于是直接熔化粉末,内应力比较大,在成型后的陶瓷坯体中可能存在微裂纹,容易引起样品开裂。因此,研究者们主要对成型工艺的优化及减少裂纹等方面展开研究。

Vamsi Krishna Balla^[30]等通过优化工艺,制造出了致密度为94%,晶粒尺寸为6.6 μm ,硬度为1556 Hv,韧性为2.1 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 的 Al_2O_3 陶瓷,将样品分别在1000 $^\circ\text{C}$ 和1600 $^\circ\text{C}$ 保温5 h进行热处理后,通过比较发现,经过热处理后的 Al_2O_3 陶瓷密度,硬度及韧性均增大。牛方勇^[31]等制造了 Al_2O_3 陶瓷,并建立了相关的LENS模型来预测激光功率,实验结果表明,采用该模型所制造出的 Al_2O_3 部件拥有较为良好的尺寸精度。吴东江等^[32,33]针对 ZrO_2 -13% Al_2O_3 及 Al_2O_3 /SiC 复相陶瓷材料开展了LENS实验,着重分析了成形工艺、成形件气孔、裂纹缺陷的产生及改善。采用LENS方法成形不同颜色的 Al_2O_3 陶瓷件,可以对比分析成形件的微观差异,并以此为依据优化工艺方案,改善成形件质量^[34]。

此外,LENS技术还可以用来制造具有功能性的陶瓷,如Liu Weiping等^[35]通过控制不同的粉体控制器和优化制造工艺,制备了无缺陷的TiC/Ti功能梯度材料。和具有高含量TiC的均匀材料相比,梯度材料有效的阻碍了裂纹的扩展。Vamsi Krishna Balla等基于此项技术制备出具有良好的界面结构的YSZ梯度涂层,和传统的涂层制备方法相比,这种方法制备出的涂层具有更好的结合力,且这种梯度涂层可以减少界面残余应力。

2 基于喷墨挤出技术为基础的增材制造技术

基于喷墨挤出技术为基础的增材制造技术的共同点在于都是利用喷头作为工具。通过喷头挤出的材料可以是陶瓷-高分子的混合物,可以是粘结剂,也可以是陶瓷墨水。根据喷头挤出的材料不同,可以分为以下几种:熔融沉积成型技术(Fused Deposition Modeling, FDM)、三维打印技术

(Three-Dimensional Printing, 3DP)和喷墨打印技术(Ink-Jet Printing, IJP)。下面将详细介绍其原理及其在陶瓷中的发展状况。

2.1 熔融沉积成型(Fused Deposition Modeling, FDM)

熔融沉积成型(Fused Deposition Modeling, FDM)的成型原理为通过计算机控制,将陶瓷-高分子材料送入熔化器,在刚好高于其熔点的温度下将高分子材料熔化,再从喷嘴挤出至x-y平面形成单层轮廓,再通过控制z轴移动,即可实现三维部件的成型^[37]。所成型坯体经过排胶烧结后即可获得最终陶瓷部件。但是,具有适合粘度、强度以及粘接性能的陶瓷-高分子复合细丝难以制备,且成型精度较低。因此,目前主要研究集中如何制备优异的陶瓷-高分子复合细丝及成型工艺的优化上。

在成型工艺方面,如Rangarajan^[38]等研究了 Si_3N_4 的成型工艺。Ashwin Hattiangadi等^[39]探究了基于熔融沉积法的多孔陶瓷成型。Samar Jyoti Kalita等^[40]分别从支架的结构设计,PP-TCP复合细丝的处理和成型过程的控制等方面,具体分析了支架的物理特性,机械性能和生物相容性。Amit Bandyopadhyay等^[41]采用PZT粉末含量为50-55 vol.%的热塑性细丝进行FDM直接成型获得阶梯状结构的PZT陶瓷制件,同时,其制备的PZT制件具备优异的机电性能,十分适用于传感器中。Gwenae "lle M. Lous等^[42]利用FDM制备了陶瓷/树脂压电超声换能器,通过优化粉体处理工艺,烧结后的样品的致密度高达96%,且其性能与传统制造方法的结果很接近。

为了使陶瓷-高分子复合细丝具有更加适合的粘结性能,Sriram Rangarajan等^[43]详细研究了复合细丝的物理性质,流变特性及其机械性能。并且利用表面活性剂对粉体进行处理,最终对陶瓷复合细丝进行后处理,获得需要的参数性能。此外,为了避免必须制备细丝的麻烦,Anna Bellini^[44]等基于FDM技术开发出一种新型的挤出系统,这种挤出系统主要是由具有高精度定位系统的微型挤出机组成,并且用颗粒状材料代替细丝,这种替代,拓宽了FDM技术的应用范围。

2.2 三维打印(Three-Dimensional Printing, 3DP)

三维打印(Three-Dimensional Printing, 3DP)的基本过程是通过喷嘴在x-y面喷射粘接剂使粉末颗粒粘接在一起形成单层,再通过z轴控制下沉,然后重新铺料,再喷粘接剂,如此循环,即可获得三

维坯体^[2]。三维打印成型工艺的应用范围较广, 材料选择广泛, 但是其成型精度差, 表面比较粗糙, 制备出的零件致密度较低, 因此在不采取特殊方法(如后续浸渗等工艺)的情况下难以达到致密。科研工作者对3DP成型工艺展开研究并重点研究了后处理工艺。

Jooho Moon等^[45]认为用于陶瓷3DP技术的粘接剂必须能渗透进粉床中, 并且具备合适的表面张力以及粘度。Jaedeok Yoo^[46]等从理论和实验上详细研究了具有刻度的复合多层ZTA陶瓷特性及其制备工艺。

在成型精度方面, M Lanzetta等^[47]的研究证明了超薄层厚对于成型样品的精度和表面质量是有利的。Shu Cao等^[48]研究出一种基于double-smoothing的超薄层厚的方法, 使用该方法, 能够实现层厚为55 μm 的超薄层, 并且成型的坯体的致密度超过70%。在3DP成型工艺中, 限制其发展的最为主要的因素就是难以获得致密度较高的陶瓷零件, 对于提高致密度, 主要有以下三种方法^[49]:

第一种方法是通过添加烧结助剂, Fielding等^[50]在TCP中添加ZnO和SiO₂后, 将其致密度从90%提高到94%。第二种方法将3DP制备出的多孔坯体进行浸渗^[51], Beiya Nan等^[52]分别制备出TiC多孔陶瓷, 然后在1600 $^{\circ}\text{C}$ –1700 $^{\circ}\text{C}$ 下将硅熔化并渗透到孔中, 通过反应生成Ti₃SiC₂, TiSi₂和SiC复合陶瓷, 同时其抗弯强度、维氏硬度和电阻率分别达到293 MPa、7.2 GPa和27.8 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 。第三种方法就是对3DP制备出的样品在烧结前进行冷等静压或者温等静压处理。Yoo等^[53]将Al₂O₃陶瓷坯体进行温等静压处理后烧结, 获得了致密度为92%, 弯曲强度为324 MPa的陶瓷样品。

2.3 喷墨打印(Ink-Jet Printing, IJP)

喷墨打印(Ink-Jet Printing, IJP)的原理采用以热泡式喷墨打印和压电式喷墨打印为主的按需喷墨打印装置, 通过陶瓷粉与有机物等配成陶瓷墨水, 将其应用于陶瓷, 计算机精确控制墨水的滴落位置, 从而实现从点到面, 从面到体的三维成型^[54]。

喷墨打印(Ink-Jet Printing, IJP)技术虽然目前应用广泛, 但一般应用场合都是微型部件, 而且液滴精度较难控制, 同时其固含量一般较低, 成型过程需要较长时间干燥, 制造大型部件收缩率大、耗时长且精度难以保证。因此, 必须改进打印机的设备及陶瓷粉体在墨水中的分散体积分数, 以提高成型精度。

在成型精度控制方面, Rui Dou等^[55]对10 vol.% ZrO₂的墨水液滴进行研究, 发现干燥后容易产生偏析, 使液滴如咖啡斑一般, 严重影响成型精度, 添加10 wt.%的PEG有利于抑制偏析现象, 有利于提高其成型精度。然而此项精度受限于喷嘴的大小。因此, D. Z. Wang等^[56]通过采用电流体动力喷射墨水, 使液滴大小不再受限于喷嘴, 从而提高精度, 其采用10 vol.%的ZrO₂悬浊液沉积了100层, 经高温烧结后, 获得的壁厚为100 μm 的致密ZrO₂薄壁, 比普通喷头式喷墨打印壁厚少将近30%。

此外, C. Ainsley等^[57]人在高温下将Al₂O₃纳米粉溶解于石蜡中, 并对其进行球磨, 使Al₂O₃纳米粉均匀溶解于石蜡溶液中, 制得固含量为40 vol.%的浆料, 并利用压电式喷墨打印机制作出了小叶轮直径为28 mm。Tianming Wang等^[58]以石蜡油/蜡为介质配置了固含量高达40 vol.%的PZT浆料, 并成功采用喷墨打印的方式制备出陶瓷坯体, 随后进行脱脂和烧结, 获得无明显变形, 接近完全致密, 气孔率少于1%的PZT陶瓷。

3 基于数字光处理技术的增材制造技术

数字光处理技术(Digital Light Processing, DLP)的原理是先把影像信号经过数字处理, 然后再把光投影出来。其原理图如图3所示, 具体来说就是DLP投影技术应用了数字微镜晶片(DMD)作为关键处理元件以实现数字光学处理过程。这种基于数字光处理技术的增材制造技术和基于SLA的光固化成型技术极为相像, 但是, 它与SLA技术最大的区别是DLP为面成型, 成型速度快, 而SLA技术是逐点扫描, 成型速度慢。

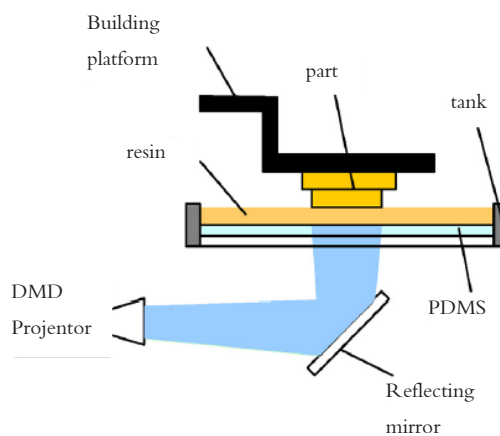


图3 基于DMD的增材制造技术示意图^[60]

Fig.3 Schematic diagram of additive manufacturing based on DMD device

DLP相对于其他增材制造技术,有以下几个独特的优势,(1)单层固化速度快,(2)成型精度高,(3)系统结构简单,易于实现。基于以上优点,DLP光固化成型技术作为一种新型的陶瓷增材制造技术在陶瓷制造过程中有着非常好的前景。目前对于DLP的光固化成型型技术研究还比较少。

Hamid Chabok等^[59]成功制备出精度较高的坯体,随后再以 $\text{Cu}_2\text{O}-\text{PbO}$ 为烧结助剂,采用溶胶凝胶法,在550℃排胶90 min,1150℃烧结90 min后得到烧结的PZT陶瓷,烧结后成品的收缩率大概为7~8%,相对密度最高达到80%。Song xuan等^[60]将陶瓷流延成型技术和自底向上的掩膜投影技术相结合,开发了一种新的基于光固化成型的掩膜投影技术(MIP-SL)如图4所示,详细研究了 Al_2O_3 陶瓷的成型工艺,成功的制备出致密度93%的 Al_2O_3 陶瓷,制备出的陶瓷坯体如图5所示。

奥地利的Lithoz公司成功开发了一种名为Lithography-based Ceramic Manufacturing(LCM)技术,实际上其本质上类似于DLP的光固化成型,并于2015年成功制备出相对密度达到99.3%,抗弯强

度在427 MPa的 Al_2O_3 陶瓷^[61]。

Erika Zanchetta等^[62]采用Lithoz公司所制造的设备,并利用光敏陶瓷前驱体预聚物结合DLP光固化成型成功制备出SiOC微型部件。

4 结束语

以上的论述总结了陶瓷增材制造技术的特点,主要讨论了近年来的研究重点,彰显了其在成型上的优势,取得了丰富的成果。但是,目前对于陶瓷增材制造技术还存在不足。例如:高精度、高性能 Si_3N_4 、 SiC 等非氧化物陶瓷的研究较少,此外,多功能复合陶瓷材料的研究几乎没有涉及。这将是今后很重要的一个研究方向。

参考文献:

- [1]PHAM D, GAULT R. A comparison of rapid prototyping technologies [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38(10-11): 1257-1287.
- [2]谢志鹏, 薄铁柱. 先进陶瓷快速无模成型技术的研究与进展 [J]. 中国陶瓷工业, 2011, 02: 16-21.
- XIE Z P, BO T Z. China Ceramic Industry, 2011, 02: 16-21.
- [3]sites by rapid prototyping technology [J]. Materials & Design, 2010, 31(2): 850-856.
- [4]KRUTH J P, LEU M C, NAKAGAWA T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1998, 47(2): 525-540.
- [5]周茂鹏. 基于光固化成型的氧化铝陶瓷致密化及其性能研究 [D]. 广东工业大学硕士学位论文.
- [6]ZHANG Y, HE X, HAN J, et al. Ceramic green tape extrusion for laminated object manufacturing [J]. Materials Letters, 1999, 40(6): 275-279.

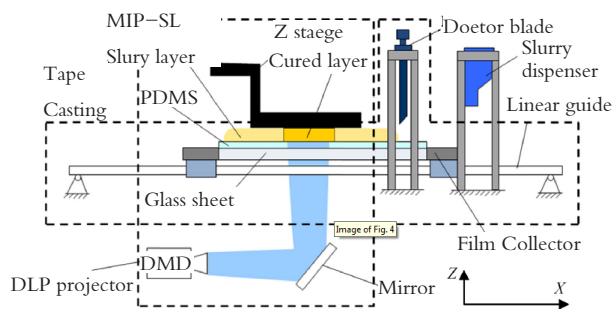


图4 基于光固化成型的掩膜投影技术^[60]

Fig. 4 Mask-image-projection-based stereolithography (MIP-SL) process by integrating ceramic tape-casting and bottom-up projection methods

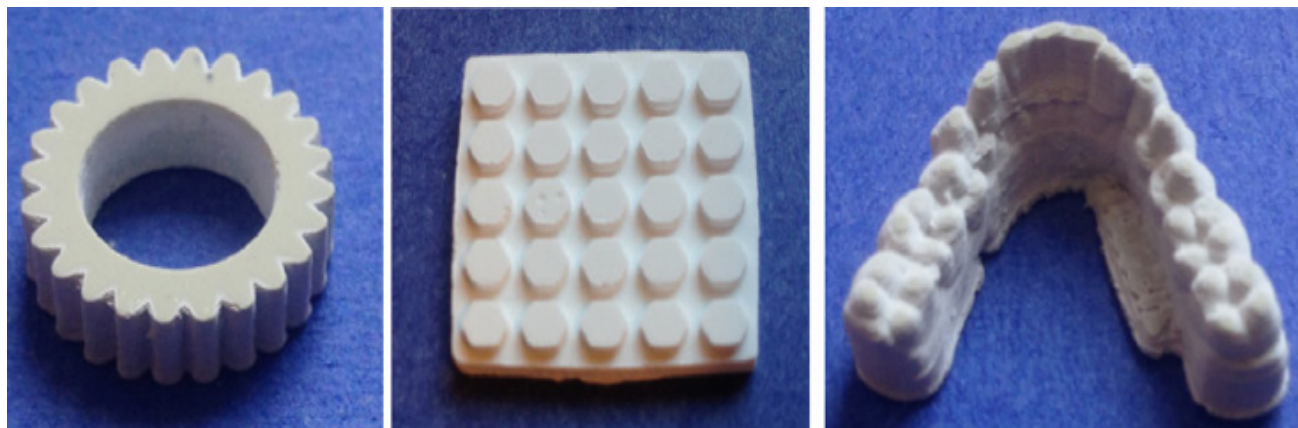


图5 基于MIP-SL技术制备的陶瓷坯体^[60]

Fig. 5 Green parts fabricated by the tape-casting-integrated MIP-SL process

- [7]ZHANG Y, HE X, DU S, et al. Al_2O_3 ceramics preparation by LOM (laminated object manufacturing) [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(7): 531–534.
- [8]DAS A, MADRAS G, DASGUPTA N, et al. Binder removal studies in ceramic thick shapes made by laminated object manufacturing [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2003, 23(7): 1013–1017.
- [9]KLOSTERMAN D A, CHARTOFF R P, OSBORNE N R, et al. Development of a curved layer LOM process for monolithic ceramics and ceramic matrix composites [J]. Rapid Prototyping Journal, 1999, 5(5): 61–71.
- [10]KLOSTERMAN D, CHARTOFF R, GRAVES G, et al. Interfacial characteristics of composites fabricated by laminated object manufacturing [J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 1998, 29(29): 1165–1174.
- [11]LIU S, YE F, LIU L, et al. Feasibility of preparing of silicon nitride ceramics components by aqueous tape casting in combination with laminated object manufacturing [J]. Materials & Design, 2015, 66: 331–335.
- [12]RODRIGUES S J. Solid freeform fabrication of functional silicon nitride ceramics using laminated object manufacturing [D]. University of Dayton, 2000.
- [13]GRIFFITH M L, HALLORAN J W. Freeform fabrication of ceramics via stereolithography [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1996, 79(10): 2601–2608.
- [14]周伟召. 复杂陶瓷零件光固化快速成型制造工艺研究[D]. 西安交通大学博士学位论文.
- [15]ROMDHANE M R B, BAKLOUTI S, BOUAZIZ J, et al. Dispersion of Al_2O_3 , concentrated suspensions with new molecules able to act as binder [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(9): 2723–2731.
- [16]SUN C, ZHANG X. The influences of the material properties on ceramic micro-stereolithography [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2002, 101(3): 364–370.
- [17]ABOULIATIM Y, CHARTIER T, ABELARD P, et al. Optical characterization of stereolithography alumina suspensions using the Kubelka–Munk model [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29(5): 919.
- [18]GENTRY S P, HALLORAN J W. Light scattering in absorbing ceramic suspensions: Effect on the width and depth of photopolymerized features [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(6): 1895–1904.
- [19]ZHOU M, LIU W, WU H, et al. Preparation of a defect-free alumina cutting tool via additive manufacturing based on stereolithography – optimization of the drying and debinding processes [J]. Ceramics International, 2016.
- [20]ECKEL Z C, ZHOU C, MARTIN J H, et al. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics [J]. Science, 2016, 351(6268): 58–62.
- [21]韩召, 曹文斌, 林志明, 等. 陶瓷材料的选区激光烧结快速成型技术研究进展[J]. 无机材料学报, 2004, 19(4): 705–713.
- HAN Z, CAO W B, LIN Z M, et al. Journal of Inorganic Materials, 2004, 19(4): 705–713.
- [22]SHAHZAD K, DECKERS J, BOURY S, et al. Preparation and indirect selective laser sintering of alumina/PA microspheres [J]. Ceramics International, 2012, 38(2): 1241–1247.
- [23]LIU K, SHI Y, LI C, et al. Indirect selective laser sintering of epoxy resin- Al_2O_3 , ceramic powders combined with cold isostatic pressing [J]. Ceramics International, 2014, 40(5): 7099–7106.
- [24]LIU K, SHI Y, HE W, et al. Densification of alumina components via indirect selective laser sintering combined with isostatic pressing [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(9–12): 2511–2519.
- [25]SHAHZAD K, DECKERS J, ZHANG Z, et al. Additive manufacturing of zirconia parts by indirect selective laser sintering [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(1): 81–89.
- [26]KOLAN K C, LEU M C, HILMAS G E, et al. Fabrication of 13–93 bioactive glass scaffolds for bone tissue engineering using indirect selective laser sintering.[J]. Biofabrication, 2011, 3(2): 25004–25013(10).
- [27]TAN K H, CHUA C K, LEONG K F, et al. Scaffold development using selective laser sintering of polyetheretherketone – hydroxyapatite biocomposite blends[J]. Biomaterials, 2003, 24(18): 3115–23.
- [28]KUMAR S, KRUTH J P. Composites by rapid prototyping technology [J]. Materials & Design, 2010, 31(2): 850–856.
- [29]邓琦林, 李延明, 冯莉萍, 等. 激光近形制造技术[J]. 电加工, 1999, 06: 37–40.
- DENG Q L, LI Y M, FENG L P, et al. Electromachining & Mould, 1999, 06: 37–40.
- [30]BALLA V K, BOSE S, Bandyopadhyay A. Processing of bulk alumina ceramics using laser engineered net shaping [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2008, 5(3): 234–242.
- [31]NIU F, WU D, ZHOU S, et al. Power prediction for laser engineered net shaping of Al_2O_3 ceramic parts [J]. Journal of

- the European Ceramic Society, 2014, 34(15): 3811–3817.
- [32] 吴东江, 杨策, 吴楠, 等. SiC 颗粒掺杂对激光直接成形 Al_2O_3 陶瓷裂纹敏感性的影响[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1551–1558.
- WU D J, YANG C, WU N, et al. Opt Prec Eng, 2012, 20(7): 1551–1558.
- [33] 吴东江, 卢卫峰, 陈云啸, 等. $\text{ZrO}_2 - 13\%\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷薄壁件激光近净成形实验[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 73–78.
- WU D J, LU W F, CHEN Y X, et al. China Journal of Lasers, 2012, 39(7): 73–78.
- [34] 吴东江, 孙贝, 牛方勇, 等. 激光近净成形不同颜色 Al_2O_3 陶瓷件微观组织及裂纹分析[J]. 硅酸盐学报, 2013, 12: 1621–1626.
- WU D J, SUN B, NIU F Y, et al. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 12: 1621–1626.
- [35] LIU W, DUPONT J N. Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping [J]. Scripta Materialia, 2003, 48(9): 1337–1342.
- [36] BALLA V K, BANDYOPADHYAY P P, BOSE S, et al. Compositionally graded yttria-stabilized zirconia coating on stainless steel using laser engineered net shaping (LENS) [J]. Scripta Materialia, 2007, 57(9): 861–864.
- [37] KRUTH J P, LEU M C, NAKAGAWA T. Progress in additive manufacturing and rapid prototyping [J]. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 1998, 47(2): 525–540.
- [38] RANGARAJAN S, QI G, VENKATARAMAN N, et al. Powder processing, rheology, and mechanical properties of feedstock for fused deposition of Si_3N_4 ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2000, 83(7): 1663–1669.
- [39] HATTIANGADI A, BANDYOPADHYAY A. Modeling of multiple pore ceramic materials fabricated via fused deposition process [J]. Scripta Materialia, 2000, 42(6): 581–588.
- [40] KALITA S J, BOSE S, HOSICK H L, et al. Development of controlled porosity polymer-ceramic composite scaffolds via fused deposition modeling [J]. Materials Science & Engineering C, 2003, 23(5): 611–620.
- [41] BANDYOPADHYAY A, PANDA R K, JANAS V F, et al. Processing of piezocomposites by fused deposition technique [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80(6): 1366–1372.
- [42] LOUS G M, CORNEJO I A, MCNULTY T F, et al. Fabrication of piezoelectric ceramic/polymer composite transducers using fused deposition of ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2000, 83(1): 124–28.
- [43] RANGARAJAN S, QI G, BANDYOPADHYAY A, et al. The role of materials processing variables in FDC process [J]. 1997.
- [44] BELLINI A, SHOR L, GUCERI S I. New developments in fused deposition modeling of ceramics [J]. Rapid Prototyping Journal, 2005, 11(4): 214–220.
- [45] MOON J, GRAU J E, KNEZEVIC V, et al. Ink-jet printing of binders for ceramic components [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2002, 85(4): 755–762.
- [46] YOO J, CHO K M, BAE W S, et al. Transformation-toughened ceramic multilayers with compositional gradients [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81(1): 21–32.
- [47] LANZETTA M. Improved surface finish in 3D printing using bimodal powder distribution [J]. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(3): 157–166.
- [48] CAO S, QIU Y, WEI X F, et al. Experimental and theoretical investigation on ultra-thin powder layering in three dimensional printing (3DP) by a novel double-smoothing mechanism [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220: 231–242.
- [49] ZOCCA A, COLOMBO P, GOMES C M, et al. Additive manufacturing of ceramics: Issues, potentialities, and opportunities [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98(7): 1983–2001.
- [50] FIELDING G A, BANDYOPADHYAY A, BOSE S. Effects of silica and zinc oxide doping on mechanical and biological properties of 3D printed tricalcium phosphate tissue engineering scaffolds [J]. Dental Materials Official Publication of the Academy of Dental Materials, 2011, 28(2): 113–22.
- [51] MOON J, CABALLERO A C, HOZER L, et al. Fabrication of functionally graded reaction infiltrated SiC-Si composite by three-dimensional printing (3DPTM) process [J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 298(1–2): 110–119.
- [52] NAN B, YIN X, ZHANG L, et al. Three – dimensional printing of Ti_3SiC_2 – based ceramics [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2011, 94(4): 969–972.
- [53] YOO J J, CIMA M J, KHANUJA S, et al. Structural ceramic components by 3D printing [J].
- [54] ATKINSON A, DOORBAR J, HUDD A, et al. Continuous ink-jet printing using sol-gel “Ceramic” inks [J]. Journal of Sol-gel Science and Technology, 8(1): 1093–1097.
- [55] Dou R, Wang T, Guo Y, Derby B. Ink-Jet Printing of Zirconia: Coffee Staining and Line Stability [J]. Journal of The American Ceramic Society, 2011, 94(11): 3787–3792.
- [56] WANG D Z, EDIRISINGHE M J, JAYASINGHE S N. Solid

- freeform fabrication of thin-walled ceramic structures using an electrohydrodynamic jet [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(5): 1727–1729.
- [57] AINSLEY C, REIS N, DERBY B. Freeform fabrication by controlled droplet deposition of powder filled melts [J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(15): 3155–3161.
- [58] WANG T, DERBY B. Ink-jet printing and sintering of PZT [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 88(8): 2053–2058.
- [59] CHABOK H, ZHOU C, CHEN Y, et al. Ultrasound transducer array fabrication based on additive manufacturing of piezocomposites [A]// *Proceedings of the ASME/ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation*, F, 2012.
- [60] SONG X, CHEN Y, LEE T W, et al. Ceramic fabrication using mask-image-projection-based stereolithography integrated with tape-casting [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 20: 456–464.
- [61] SCHWENTENWEIN M, HOMA J. Additive manufacturing of dense alumina ceramics [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2015, 12(1): 1–7.
- [62] ZANCHETTA E, CATTALDO M, FRANCHIN G, et al. Stereolithography of SiOC ceramic microcomponents [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(2): 370–376.