中图分类号：　TQ174　　文献编号：　1005-1198 (2017) 04-0267-11
文献标识码：　A　　DOI：　10.16253/j.cnki.37-1226/tq.2017.06.001

综合评述

陶瓷增材制造

连　芩，武向权，田小永，李涤尘
西安交通大学 制造系统工程国家重点实验室，西安 710054

摘　要：陶瓷的脆性和高硬度使得传统陶瓷成型工艺不易制备具有复杂形状和结构的陶瓷制件。本文总结了目前发展较快的激光选区熔融、激光选区烧结、三维打印、立体光固化、自由挤出成型等增材制造工艺在陶瓷领域的研究进展。面向复杂结构和高性能陶瓷制品的定制化快速制造需求，陶瓷增材制造技术展现出极大优势，在传统陶瓷行业、生物医疗等领域得到了应用。但是，陶瓷增材制造仍面临着打印材料及大尺寸、高致密度复杂结构陶瓷零件制造等难题，这些也将是增材制造技术未来发展的重要研究方向。

关键词：3D 打印；增材制造；陶瓷

陶瓷增材制造以陶瓷粉体为基本原材料，制备出适应各类增材制造工艺的粉末、浆料、泥坯等形态的原材料，然后通过各种增材制造工艺以及相应辅助工艺，实现陶瓷零件的制造。陶瓷增材制造可用于传统陶瓷行业，实现复杂结构陶瓷制品的定制化快速制造；也可用于生物医疗领域，以生物陶瓷材料代替钛合金等金属材料，实现可降解、再生的植入物的制造；还可以进行高性能陶瓷功能零件的制造，拓宽工程陶瓷的应用领域[1]。

陶瓷传统成型工艺主要有注浆成型、压制成型等，或者将干压成型的陶瓷素胚经低温烧结后，利用数控机床通过机械切削加工成型，又称为 CAD/CAM 成型。但注浆成型易产生气泡，密度不均匀，制品机械性能较差。压制成型只适合于结构、形状较为简单的产品。CAD/CAM 成型加工速度较低，原料浪费严重。因此，陶瓷增材制造一旦能够在陶瓷制品领域得到大面积应用推广，将显著提高产品结构复杂程度，降低产品制作成本，缩短制造时间，快速实现规模化个性化产品的生产。

收稿日期：　2017–06–14　　**收到修改稿日期：**　2017–06–26
基金项目：　国家自然科学基金 (51323007)；陕西省科技项目 (2016KTZDGY07–01，2016GY–201)；广东省科技项目 (2016B090915002)。
第一作者：　连　芩 (1971 –), 女, 广东潮州人, 副教授。E-mail: lqiamt@mail.xjtu.edu.cn。
通讯作者：　李涤尘 (1964 –), 男, 河南郑州人, 教授。E-mail: dcli@mail.xjtu.edu.cn。

1 陶瓷增材制造工艺

陶瓷增材制造实际上是利用增材制造设备对陶瓷粉体或浆料等进行直接或间接成型的技术。

直接加工技术包括采用高能束 (如激光) 直接选择性熔化陶瓷粉末实现逐层成型 [即激光选区熔融 (Selected Laser Melting, SLM)] 和陶瓷浆料经立体光固化 (Stereo Lithography Apparatus, SLA) 或自由挤出成型 (Extrusion Free Forming, EFF) 成型素坯等。直接加工工艺的效率较高，以 SLM 为例，该工艺可得到具有高致密度和高力学性能的产品，但由于温度梯度控制难度较大等原因，零件内部残余热应力较大，制件尺寸也受到较大限制[2]。

间接加工工艺可采用的增材制造工艺方法较多，例如激光选区烧结 (Selected Laser Sintering, SLS)、三维打印 (Three–Dimensional Printing, 3DP)、立体光固化 (SLA)、自由挤出成型 (EFF) 等，分别以粉末、浆料、泥坯等形态的原材料制造出陶瓷素坯，经后续烧结工艺实现陶瓷零件的制造[3,4]。

1.1 三维打印

三维打印技术 (3DP) 通过向粉床中特定区域喷涂粘结剂以粘结粉体来实现一层的制造，然后在下降一层厚度的粉床中再平铺一层粉体，进行下一层的制造。这种技术制造完成的陶瓷素坯被包裹在粉床中，由于有了周围粉体的支撑作用，可以加工出复杂形状和悬垂结构而不用增加支撑结构。这一技术可以加工各种陶瓷粉体，应用范围包括铸造模具、型芯、生物陶瓷支架等。

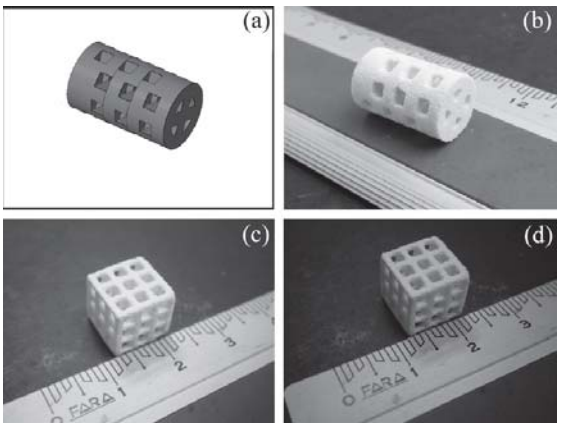

图 1 圆柱形和方形三维打印生物玻璃陶瓷制件[6]
Figure 1 Cylinder and cube bioglass ceramic parts fabricated by 3DP [6]

ExOne 公司利用其专利粉体和粘结剂，用 3DP 技术进行砂型铸造，用于铸造发动机缸体。Cesaretti 等人[5]开发了直接利用月球土壤并且能在真空环境中打印建筑物的三维打印技术 D–Shape。Azocca 等人[6]研究了利用陶瓷前驱体聚合物作为粘结剂的生物玻璃陶瓷三维打印技术，制得了具有良好细胞相容性和无细胞毒性的生物陶瓷 (图 1)，孔隙率为 67 vol%，双轴弯曲强度为 6 MPa。

1.2 直接喷墨打印技术

直接喷墨打印技术 (Direct Inkjet Printing, DIP) 是采用陶瓷浆料替代墨水，将传统的喷墨打印机改造后把陶瓷浆料喷射出来堆积成型的一种工艺。

Ebert 等人[7] 配制了 27 vol% 的氧化锆陶瓷浆料，研究了氧化锆牙冠的 DIP 工艺，并制造出了

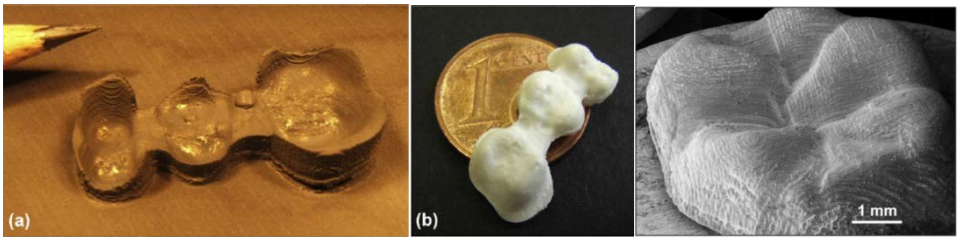

图 2 DIP 工艺 (a) 所采用的炭黑支撑[8]及 (b) 所制备的陶瓷零件[9]
Figure 2 (a) Carbon black support structure [8] and (b) ceramic part [9] fabricated by DIP

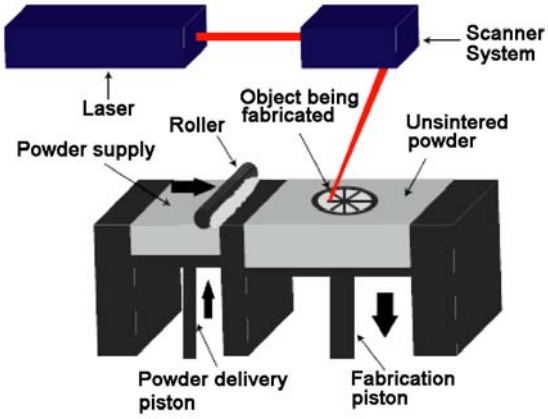

图 3 选区激光烧结成型原理图[10]
Figure 3 Schematic of SLS/SLM [10]

高强度的陶瓷零件。Özkol 等人[8,9]通过对 22 vol% 和 27 vol% 两种氧化锆陶瓷浆料的对比研究，从粒径、Zeta 电位、粘度、表面张力、Ohnesorge 数以及液滴的分布、形状等因素分析，总结了氧化锆陶瓷浆料的配制方法，制造出相对密度达 96%、抗弯强度达 834 MPa 的陶瓷零件(图 2)。DIP 工艺制造出的陶瓷零件精度尚可，力学强度较高，但成型时需要用炭黑材料制作支撑，如图 2 (a) 所示[8]，工艺过程比较复杂，周期较长。

1.3 激光选区烧结/熔融

选区激光烧结工艺 (SLS) 的基本原理如图 3 所示[10]，其优点在于无需设计支撑结构，材料利用率高，适用于多种材料，如陶瓷、尼龙、合成橡胶或金属等。该工艺缺点在于成型原形表面粗糙，而且精细结构不易实现；原形件疏松多孔，需要进行后处理，且后处理的工艺比较复杂[11]。

按照成型原理，该技术可分为两种方式，一种为直接方式，另一种为间接方式。直接方式在粉体中不添加粘接剂，利用激光的能量完成陶瓷材料粉体间的局部致密化过程。间接方式需要在粉体中添加粘接剂，激光将低熔点的粘结剂熔化，而后粘结剂将陶瓷粉体粘结成型。

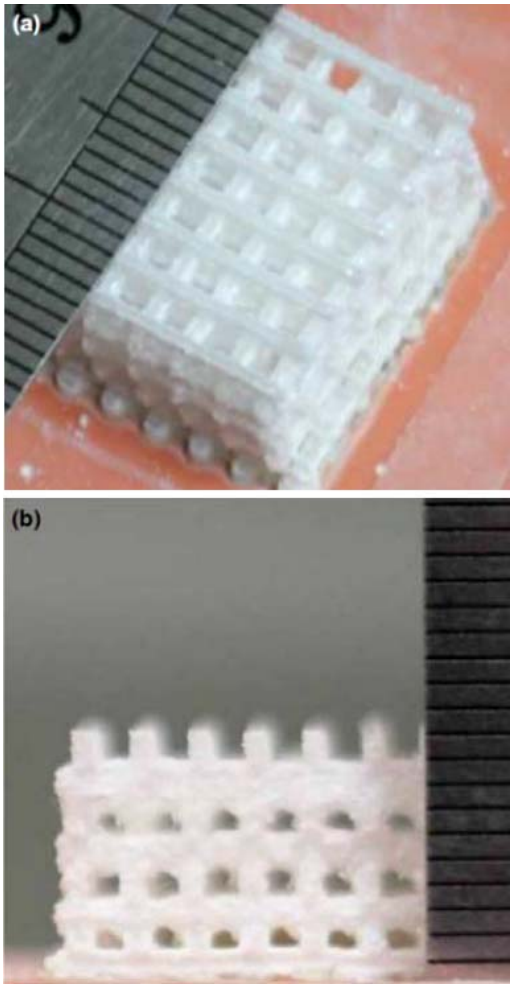

图 4 氧化锆硅酸钙复合多孔陶瓷零件[13]
Figure 4 Porous zirconia / calcium silicate composite ceramic part [13]

图 5 SLS 工艺成型氧化锆陶瓷零件[14]
Figure 5 Zirconia ceramic parts fabricated by SLS [14]

Lomberg 等人[12]采用选区激光烧结工艺成型制造了应用于氧化物固体燃料电池的氧化锆薄片。Shuai 等人[13]在其研究中将硅酸钙 ($CaSiO_3$) 与氧化锆粉分别按照质量比 10%、20%、30%、40% 混合，然后采用选区激光烧结工艺制造了具有良好生物相容性的多孔陶瓷骨支架，如图 4 所示。史玉升等人[14]将尼龙 12 与氧化锆混合的粉末材料成

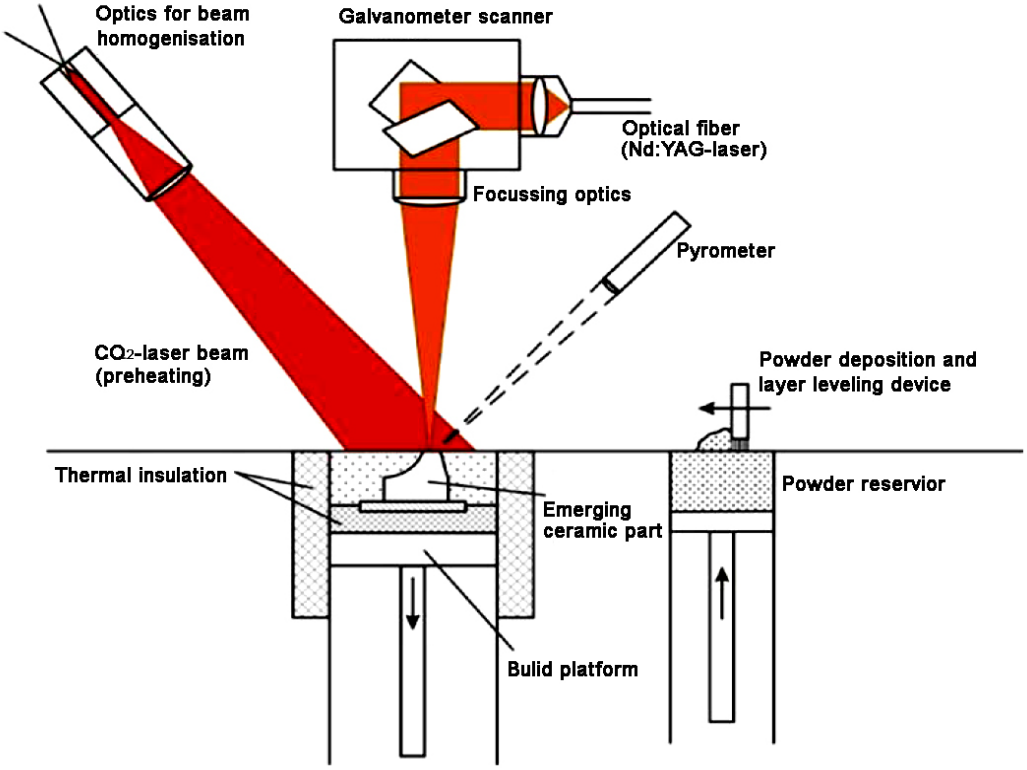

图 6 SLM 原理图[15]
Figure 6 Schematic of SLM [15]

图 7 SLM 工艺成型的陶瓷件[15]
Figure 7 Ceramic parts manufactured by SLM [15]

型陶瓷素坯，经过冷等静压和脱脂烧结制成了氧化锆陶瓷零件 (图 5)，相对密度达 97%，维氏硬度值 1180 HV1。

选区激光熔融法 (SLM) 与选择激光烧结工艺略有不同，工作原理如图 6 所示[15]。Wilkes 等人[15]研究了 SLM 成型氧化锆和氧化铝混合材料的工艺，分析了预热温度和扫描参数等因素对于陶瓷零件成型的影响，研究证明 SLM 工艺可以制造出几乎完全致密且不需要烧结工艺和后处理的陶瓷零件 (图 7)。

激光选区烧结技术加工陶瓷零件是陶瓷增材制造技术应用比较成熟的工艺。激光选区烧结技术受到了各发达国家的重视，很多国家都发展了自己的产业。

1.4 叠层制造

叠层制造技术 (Laminated Object Manufacturing , LOM) 利用薄层材料，用激光器在每一层上切割出零件分层后的轮廓，在想去除的区域切割出方格。然后利用热辊压将涂有粘接剂的这一层薄层材料粘接到前一层上。在加工完整个零件后，去除切割出方格的区域，即得到加工的零件。这种技术可以用带状的陶瓷素坯作为薄层材料，通常应用于电子陶瓷领域。

Kechagias [16] 研究了层厚、加热温度、加热速度、激光扫描速度、进给速度、平台速度等工艺参数对 LOM 制造的零件 *z* 方向上粗糙度的影响，结果表明加热温度、层厚和扫描速度对粗糙度的影响更为显著。Gomes 等人[17]采用水基流延成型制成 LiO_2–ZrO_2–SiO_2–Al_2O_3 (LZSA) 玻璃陶瓷薄层，根据干燥后薄层的均匀性及厚度参数来调节 LOM 制造工艺参数，最终制成了玻璃陶瓷零件 (图 8)；零件的几何结构在 *x*–*y* 方向上具有较好精度，但在 *z* 方向可见明显变形。

1.5 自由挤出成型

自由挤出成型技术 (EFF) 通过喷嘴将粘度较高的陶瓷与胶体混合材料挤出，而后按照每一层的路径进行成型，逐层制造。不同的混合材料需要利用不同的方式固定挤出后的形状，然后再进行后处理得到陶瓷零件。这种技术需要对混合材料的粘度进行控制，以得到连续可控的挤出过程，混合材料的成分对于最后成型的零件质量有很大的影响。

Rueschhoff 等人[18]采用高固相含量 (51 vol% ~ 58 vol%) 的水基氧化铝陶瓷浆料 (浆料的粘度范围为 10 Pa·s ~ 20 Pa·s) 进行了挤出式成型实验 (图 9)，得出最佳挤出端口直径为 1.25 mm，最终烧结制品的致密度高于理论密度的 98%，晶粒尺寸在 3.2 μm 到 3.7 μm 之间，弯曲强度在 134 MPa 到 157 MPa 之间。实验证明 51 vol% ~ 58vol% 的不同固相含量并不影响最终的烧结质量，但仍存在着制造精度不高、工艺参数受制于水基浆料流变性的问题。

1.6 立体光固化

1996 年，Griffith 和 Halloran 首先提出了将光固化成型技术和陶瓷制造工艺相结合的思想，并进

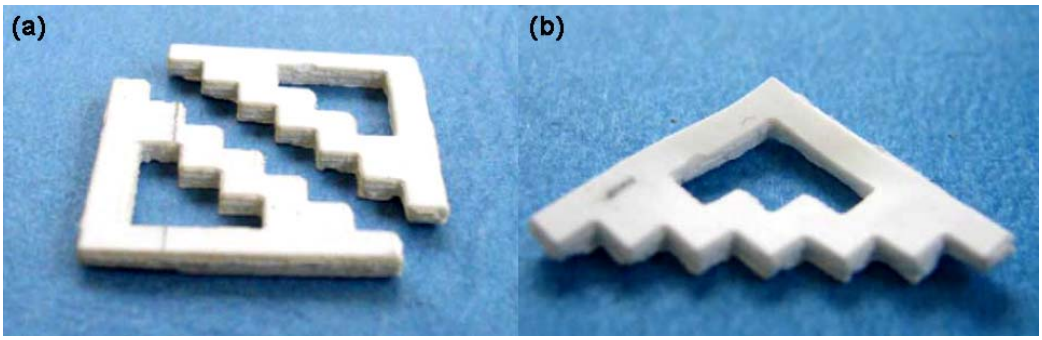

图 8 LOM 工艺成型的 LZSA 玻璃陶瓷：(a) 素坯；(b) 烧结件[17]
Figure 8 (a) Green part and (b) sintered part of LZSA glass-ceramic formed by LOM [17]

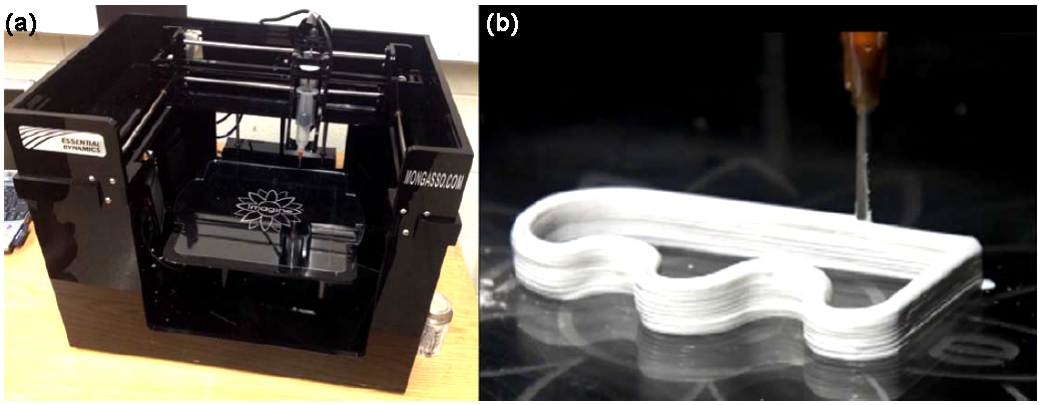

图 9 (a) 自由挤出成型设备和 (b) 水基浆料打印过程 [18]
Figure 9 (a) Equipment of EFF and (b) printing process of aqueous slurry [18]

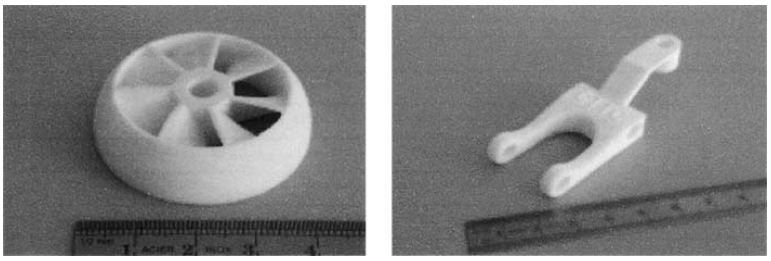

图 10 光固化成型的氧化铝陶瓷零件[19]
Figure 10 Alumina parts fabricated by stereolithography [19]

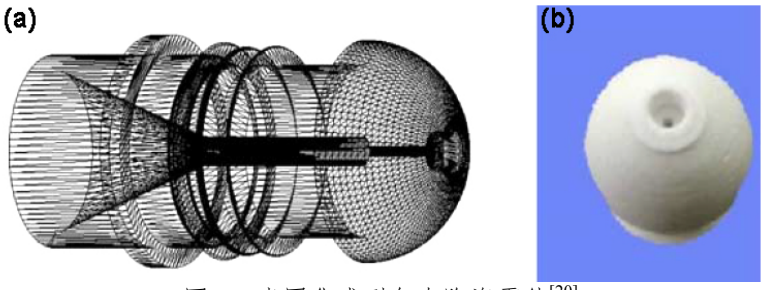

图 11 光固化成型复杂陶瓷零件[20]
Fig. 11 Complex ceramic part fabricated bystereolithography[20]

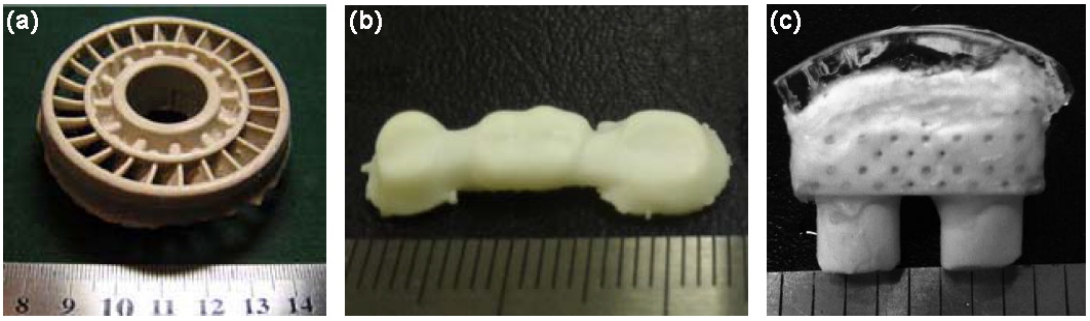

图 12 光固化成型陶瓷制件：(a) 二氧化硅叶轮[21]; (b) 氧化锆牙桥[24]；(c) 骨软骨组织工程支架[26]
Figure 12 Ceramic part fabricated bystereolithography: (a) silicon dioxide impeller [21] ; (b) Zirconia dental bridge [24]; (c) osteochondral scaffold for tissue engineering [26]

行了初步的实验验证[3]，即现在的光固化法 (SLA)。随后，陶瓷光固化成型工艺得到了广泛研究。SLA 的基本原理是采用光敏液体为原料，光敏液体经激光扫描，被扫描区的液体薄层产生光聚合反应，从而形成零件的一个薄层截面；然后逐层累加成为实体零件。所使用的可光固化陶瓷浆料一般根据预混液溶剂进行分类，分为树脂基陶瓷浆料和水基陶瓷浆料。

Chartier 等人[19]利用自制的 60 vol% 树脂基氧化铝陶瓷浆料成型得到的陶瓷零件 (图 10) 尺寸误差小于 0.5%，最高精度达 230 μm，平均强度为 275 MPa。Licciulli 等人[20]在氧化铝陶瓷浆料中加入有机金属化锆盐，成型的陶瓷零件 (图 11) 强度达到 175 MPa。

李涤尘等人[21–23]提出了一种基于硅溶胶的水基陶瓷浆料配制方法和光固化成型工艺，并研究了自制的水基陶瓷浆料的光固化成型机理，建立了分散剂用量和陶瓷固相含量对于浆料粘度以及光引发剂用量对于浆料光固化性能的影响规律。利用 SPS 光固化成型设备直接成型多种陶瓷零件 (如图 12 所示) 用于制造工业陶瓷制件和组织工程支架。特别是，利用光固化成型陶瓷制件制造了具有多种材料的骨软骨支架，在关节软骨和骨取得了良好的再生修复效果[24–28]。

Eckel 等人[29]采用树脂基可光固化陶瓷浆料，光固化成型网状和蜂窝状等复杂形状的陶瓷零件，如图 13 所示。通过对氧化硅、碳化硅、碳氧化硅等陶瓷零件的对比分析，发现碳氧化硅材料制造的蜂窝状陶瓷零件的力学性能是目前市售陶瓷零件的 10 倍，具有良好的力学强度和应用前景。

SLA 是目前应用最为广泛的一种快速原形制造工艺。相比于其他成型工艺，其主要优点在于成型精度较高，主要缺点是成型零件的孔隙率较大，相对密度不足。目前主要是通过合理的后期致密化处理加以克服。因此，陶瓷光固化成型工艺具有很强的应用价值。

1.7 面曝光光固化

面曝光光固化是一种面照射的光固化技术，又叫掩膜光固化 (Mask Stereolithography, MSL)、掩膜投影光固化 (Musk Projection Stereolithography, MPSL)、面成型快速制造 (Area-Forming Rapid Prototyping, AFRP) 等。它是一种一次性固化要成型零件整层图案的光固化技术。与激光扫描相比，这种技术具有分辨率高、固化厚度小、成型速度快、可以实现微型零件固化等特点。

维也纳技术大学从 2012 年开始发表了一系列基于面曝光技术的陶瓷光固化研究成果[30–35]，开发了生物玻璃 45S5、氧化铝、氧化锆、磷酸三钙等固相含量在 45 vol% ~ 50 vol% 之间的陶瓷浆料，制作出了各类多孔结构、高强度、高密度的陶瓷制件，相对密度可达 99.6% (图 14)。基于他们的研究成果， Homa 等人成立了 Lithoz 公司，专门从事高性能陶瓷原型件、微型件、复杂件的制造业务。

李涤尘等人[36,37]利用自制的面曝光光固化成型设备研究了面曝光技术分离方式和分离膜对加工过程中零件受力的影响，通过理论分析和成型实验对比了不同分离膜条件、直接抬起分离和倾斜分

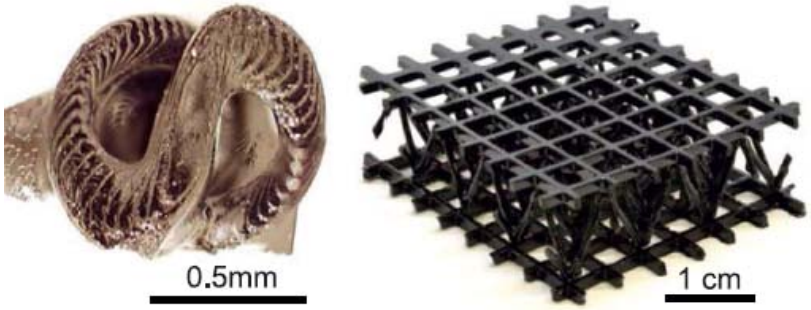

图 13 光固化成型陶瓷零件[29]
Figure 13 Ceramic parts fabricated bystereolithography [29]

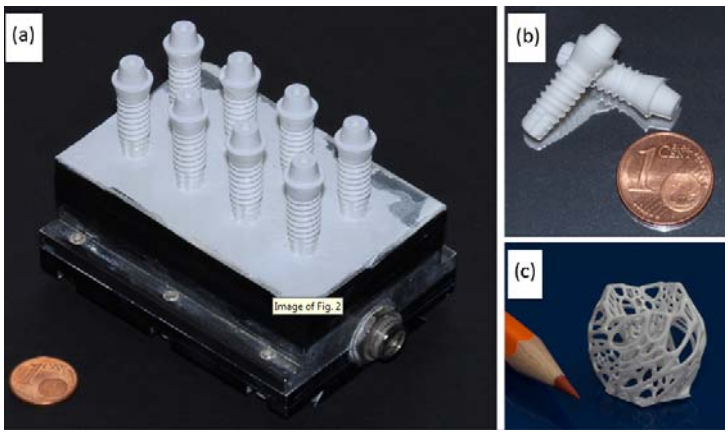

图 14 面曝光成型氧化锆陶瓷零件[32]
Figure 14 Zirconia ceramic parts fabricated by mask stereolithography [32]

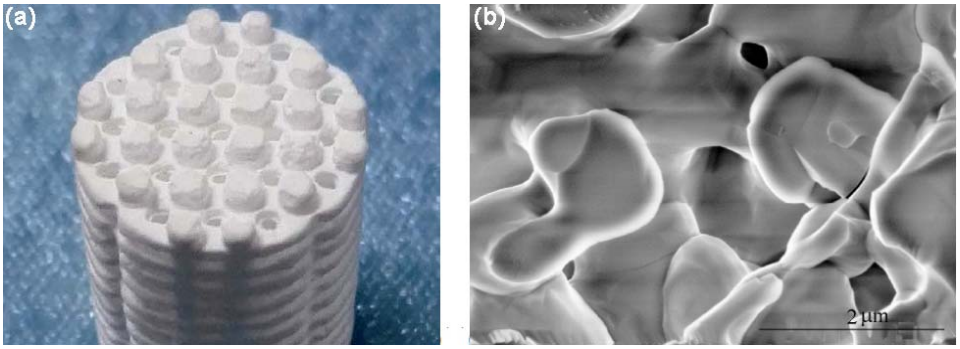

图 15 面曝光成型磷酸三钙陶瓷零件：(a) 外观；(b) 显微结构 [36]
Figure 15 Tricalcium phosphate part fabricated bymask stereolithograph: (a) appearance; (b) microstructure [36]

离的方式下分离力变化规律，为面成型工艺和设备研制提供理论依据。此外，他们还利用自制的丙烯酸酯基生物陶瓷浆料面曝光成型了多孔陶瓷支架 (图 15)，致密度为 84.8%，压缩强度为 66.38 MPa，相比点扫描式光固化成型生物陶瓷支架的力学性能提高了 2 倍以上。

近几年来国内出现了一些采用面曝光光固化技术进行陶瓷零件制造的公司，如北京十维科技、浙江讯实科技等，但目前仅见宣传资料，未见公开文献对其技术和制成的陶瓷零件进行详细介绍。

2 应用前景

实现高性能陶瓷制品的高效高精度制造是增材制造领域的研究热点与难点，限制陶瓷增材制造技术发展的瓶颈主要集中于大尺寸、高致密度复杂结构陶瓷零件的制造。

目前，陶瓷制品增材制造的市场需求可大致归纳为以下三个方面：

(1) 与传统陶瓷工艺相结合，实现复杂结构陶瓷制品的定制化快速制造。如日用陶瓷面临产业升级，如何应对多样化的市场需求、加快陶瓷产品开发速度、实现陶瓷产品的定制化制造是传统陶瓷行业面临的关键问题，如定制化陶瓷洁具、茶具、工艺品等，具有较大的市场需求，试验陶瓷制品的增材制造将带动传统陶瓷行业的升级转型。

(2) 具有生物活性的陶瓷制品制造。生物陶瓷相比金属材料具有较好的生物兼容性，有望用于生物医疗领域代替钛合金等金属材料，实现可降解、再生的植入物的制造；同时，经过高温烧结获得的生物陶瓷植入物具有较高的机械强度、硬度和压缩强度，极其稳定，在体内易于溶解，不易氧化、不易腐蚀变质，热稳定性好，便于加热消毒、耐磨、有一定润滑性能，不易产生疲劳现象，和人体组织的亲和性好，能够极好地满足植入要求。生物陶瓷材料增材制造工艺的发展，将带动活性植入物在高端医疗领域的突破发展。

(3) 高性能陶瓷功能零件。陶瓷具有强度高、硬度高、防潮、耐磨、耐污、耐腐蚀、耐高温、易清洗、变形小、绝缘性好且具有一定的抗急冷急热性能等优点，在工程领域用途广泛。实现复杂结构陶瓷制品的增材制造将推动高性能陶瓷零件在航空航天、汽车、船舶等领域的广泛应用。比如采用陶瓷材料制作火箭燃烧罩、耐高温陶瓷叶片等关键零部件将产生不可估量的技术推动作用。

3 结束语

目前，由于增材制造陶瓷产品致密度、力学性能和精度都较低，在生物医学领域应用较广，但大规模工业应用仍然存在着极大的挑战。由于陶瓷材料本身具有脆性大、膨胀系数低的特点，所以

无论是选用直接成型还是间接成型，在制造较大的部件时还存在一定困难。直接成型法由于其效率高，产品致密度和力学性能好，对于陶瓷部件的制造具有更大的诱惑力。通过对陶瓷粉末进行预热可以减小在直接成型工艺中的热应力残留，提高产品力学性能。然而陶瓷材料熔点极高，预热温度通常高于 1000°C，对制造装备的要求很高。更重要的是，陶瓷烧结过程中所发生的物理化学变化复杂，且不同陶瓷材料烧结成型机理不尽相同，成型过程中各种工艺参数对最终产品性能的影响趋势难以确定，需要大量理论、实验研究对工艺参数进行优化。

因此，探索不同类型陶瓷材料成型机理、开发成型大尺寸、耐高温陶瓷制品的增材制造设备、实现大尺寸、高致密度、低内应力的陶瓷零件的增材制造成型，使制品致密度提升到 99%以上，力学性能接近传统工艺产品，才能够满足工业领域的要求，实现陶瓷增材制造的大规模工业应用。

参考文献

[1] ZOOCA A, COLOMBO P, GOMES CM, et al. Additive manufacturing of ceramics: issues, potentialities, and opportunities [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98 (7): 1983–2001.

[2] JUSTE E, PETIT F, LARDOT V, et al. Shaping of ceramic parts by selective laser melting of powder bed [J]. Journal of Materials Research, 2014, 29 (17): 2086–2094.

[3] GRIFFITH ML, HALLORAN JW. Freeform fabrication of ceramics via stereolithograph [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 79 (10): 2601–2608 .

[4] WINDSHEIMER H, TRAVITZKY N, HOFENAUER A, et al. Laminated object manufacturing of preceramic-paper-derived Si-SiC composites [J]. Advanced Materials, 2007, 19 (24): 4515–4519.

[5] CESARETTI G, DINI E, DE KESTELIER X, et al. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology [J]. Acta Astronautica, 2014, 93: 430–450.

[6] ZOCCA A, ELSAYED H, BERNARDO E, et al. 3D-printed silicate porous bioceramics using a non-sacrificial preceramic polymer binder [J]. Biofabrication, 2015, 7 (2): 025008.

[7] OZKOL E, EBERT J, UIBEL K, et al. Development of high solid content aqueous 3Y-TZP suspensions for direct inkjet printing using a thermal inkjet printer [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29 (3): 403–409.

[8] OZKOL E, ZHANG W, EBERT J, et al. Potentials of the “direct inkjet printing” method for manufacturing 3Y-TZP based dental restorations [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2012, 32 (10): 2193–2201.

[9] OZKOL E, HALLORAN J. Rheological characterization of aqueous 3Y-TZP inks optimized for direct thermal ink-jet printing of ceramic components [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2013, 96 (4): 1124–1130.

[10] GANERIWALA R, ZOHDI TI. A coupled discrete element-finite difference model of selective laser sintering [J]. Granular Matter, 2016, doi 10.1007/s10035-016-0626-0.

[11] 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.

[12] LOMBERG M, BOLDRIN P, TARIQ F, et al. Additive manufacturing for solid oxide cell electrode fabrication [J]. ECS Transactions, 2015, 68 (1): 2119–2127.

[13] SHUAI C, FENG P, YANG B, et al. Effect of nano-zirconia on the mechanical and biological properties of calcium silicate scaffolds [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2015, 12 (6): 1148–1156.

[14] 史玉升, 刘凯, 李晨辉, 等. 氧化锆零件激光选区烧结/冷等静压复合成形技术[J]. 机械工程学报, 2014, (21): 118–123.

[15] WILKES J, HAGEDORN YC, MEINERS W, et al. Additive manufacturing of ZrO_2-Al_2O_3 ceramic components by selective laser melting [J]. Rapid Prototyping Journal, 2013, 19 (1): 51–57.

[16] KECHAGIAS J. An experimental investigation of the surface roughness of parts produced by LOM

process [J]. Rapid Prototyping Journal, 2007, 13 (1): 17–22.
[17] GOMES CM, OLIVEIRA APN, HOTZA D, et al. LZSA glass-ceramic laminates: fabrication and mechanical properties [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 206 (1–3): 194–201.
[18] RUESCHHOFF L, COSTAKIS W, MICHIE M, et al. Additive manufacturing of dense ceramic parts via direct ink writing of aqueous alumina suspensions [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2016, 13 (5): 821–830.
[19] CHARTIER T, CHAPUT C, DOREAU F, et al. Stereolithography of structural complex ceramic parts [J]. Journal of Materials Science, 2002, 37 (15): 3141–3147.
[20] LICCIULLI A, CORCIONE CE, GRECO A, et al. Laser stereolithography of ZrO_2 toughened Al_2O_3 [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2005, 25 (9): 1581–1589.
[21] 周伟召. 复杂陶瓷零件光固化快速成形制造工艺研究[D]. 西安: 西安交通大学博士学位论文, 2010.
[22] CHEN Z, LI D, ZHOU W. Process parameters appraisal of fabricating ceramic parts based on stereolithography using the Taguchi method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B, 2012, 226 (7): 1249–1258.
[23] CHEN Z, LI D, ZHOU W, et al. Curing characteristics of ceramic stereolithography for an aqueous-based silica suspension [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B, 2010, 224 (4): 641–651.
[24] LIAN Q, SUI WQ, WU XQ, et al. Additive manufacturing of ZrO_2 ceramic dental bridges by stereolithography [J]. Rapid Prototyping Journal, 2017 (in press).
[25] LIAN Q, CHEN C, UWAYEZU MC, et al. Biphasic mechanical properties of in vivo repaired cartilage [J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12 (3): 473–482.
[26] 连芩, 庄佩, 边卫国, 等. 大尺寸关节支架的 3D 打印及应用[J]. 中国科学:信息科学, 2015, 45 (2): 248–258.
[27] ZHANG W, LIAN Q, LI D, et al. The effect of interface microstructure on interfacial shear strength for osteochondral scaffolds based on biomimetic design and 3D printing [J]. Materials Science and Engineering C, 2015, 46: 10–15.
[28] BIAN W, LI D, LIAN Q, et al. Design and fabrication of a novel porous implant with pre-set channels based on ceramic stereolithography for vascular implantation [J]. Biofabrication, 2011, 3 (3): 034103.
[29] ECKEL ZC, ZHOU C, MARTIN JH, et al. Additive manufacturing of polymer-derived ceramics [J]. Science, 2016, 351 (6268): 58–62.
[30] SCHWENTENWEIN M, HOMA J. Additive manufacturing of dense alumina ceramics [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2015, 12 (1): 1–7.
[31] GMEINER R, MITTERAMSKOGLER G, STAMPFL J, et al. Stereolithographic ceramic manufacturing of high strength bioactive glass [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2015, 12 (1): 38–45.
[32] MITTERAMSKOGLER G, GMEINER R, FELZMANN R, et al. Light curing strategies for lithography-based additive manufacturing of customized ceramics [J]. Additive Manufacturing, 2014, 1–4: 110–118.
[33] TESAVIBUL P, FELZMANN R, GRUBER S, et al. Processing of 45S5 bioglass® by lithography-based additive manufacturing [J]. Materials Letters, 2012, 74: 81–84.
[34] FELZMANN R, GRUBER S, MITTERAMSKOGLER G, et al. Lithography-based additive manufacturing of cellular ceramic structures [J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14 (12): 1052–1058.
[35] DOUGLASS MR, HATZENBICHLER M, GEPPERT M, et al. DLP-based light engines for additive manufacturing of ceramic parts [J]. SPIE Proceedings, 2012, 8254: 82540E.
[36] 杨飞, 连芩 , 武向权, 等. 陶瓷面曝光快速成形工艺研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53 (7): 138–144.
[37] WU X, LIAN Q, LI D, et al. Tilting separation analysis of bottom-up mask projection stereolithography based on cohesive zone model [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 184–196.

※ ※

Additive Manufacturing of Ceramics

LIAN Qin, WU Xiang-Quan, TIAN Xiao-Yong, LI Di-Chen

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China

Abstract: The brittleness and high hardness of ceramics pose a challenge for conventional forming method to manufacturing complex shape and structure ceramics. Additive manufacturing technology has the advantage and potential to meet the need of rapid manufacturing of customized complex and high-performance ceramics. In this paper, the methods and research progresses of some additive manufacturing techniques, including three-dimensional printing, direct inkjet printing, selective laser sintering/ melting, laminated object manufacturing, extrusion freeforming, stereolithography, are reviewed. Additive manufacturing of ceramics has applied into conventional industrial manufacturing process and biomedical field, such as biodegradable, regenerative bio ceramic implant. The high-performance function ceramics manufactured by additive manufacturing also widen the range of application of engineering ceramics. The additive manufacturing technologies of ceramics are still facing the problems of materials choosing, hard to printing large scale, high density, and high complex ceramic parts. These problems are the main research topics in the future.

Key words: 3D printing; Additive manufacturing; Ceramics

※ ※

第一作者连芩，女，1971 年生。现为西安交通大学机械工程学院副教授，博士生导师。研究方向为陶瓷增材制造技术与细胞打印技术。获 2014 年国家技术发明二等奖 (排名第五)。机械制造工艺协会理事、机械工程学会高级会员、国际仿生工程协会创始会员。主持与参与了 10 余项国家自然科学基金、国家 863 计划等项目。已发表论文 50 余篇，授权专利 10 余项。

通讯作者李涤尘，男，1964 年生。西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室主任，西安交通大学机械工程学院机械工程系主任，长江学者特聘教授，博士生导师，新世纪百千万人才。主要研究领域为增材制造 (3D 打印) 技术及生物制造技术，获得国家科技进步二等奖 1 项，2014 年国家技术发明二等奖 1 项 (排名第一)，2015 年度中国好设计金奖等。现为中国机械工程学会增材制造分会委员与总干事、全国增材制造标准化技术委员会委员、陕西省 3D 打印产业技术创新联盟副理事长、Journal of Bionic Engineering, Biofabrication, Frontiers of Mechanical Engineering in China 等国际期刊编委。主持与参与了 20 余项国家自然科学基金、国家 04 专项、973 计划等项目。发表论文 400 余篇，多次获得国际学术会议论文奖，出版中英文专著 (含章节) 10 余部，申报发明专利 60 余项。