

用选择性激光烧结技术制作陶瓷原件研究

陈思翰¹, 刘福兴²

(1. 龙华科技大学工程技术研究所, 33306, 台湾桃园; 2. 龙华科技大学机械工程系, 33306, 台湾桃园)

摘要: 利用选择性激光烧结快速成型技术,在自行开发的快速成型机上以 CO_2 激光对 SiO_2 浆料进行烧结,经由层状堆栈加工后,制备出了外形复杂的三维 SiO_2 陶瓷喷嘴生坯.利用扫描式电子显微镜和能谱分析仪对生坯进行了微观结构和成分分析,结果显示:在激光功率为 7 W、扫描速度为 160 mm/s 和激光扫描分辨率为 250 次/(25.4 mm)的优化条件下, SiO_2 粉末可激光烧结形成的最小层厚为 100 μm ,且层堆栈情况良好,没有分层现象,可制造出纯 SiO_2 陶瓷喷嘴,抗弯强度接近最大值.

关键词: 激光烧结;快速成型;二氧化硅;陶瓷

中图分类号: TQ174 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)11-0116-05

Ceramic Prototype Fabrication Using Selective Laser Sintering

CHEN Ssu-Han¹, LIU Fwu-Hsing²

(1. Graduate School of Engineering Technology, Lунghwa University of Science and Technology, Taoyuan, Taiwan 33306;

2. Department of Mechanical Engineering, Lунghwa University of Science and Technology, Taoyuan, Taiwan 33306)

Abstract: Selective laser sintering technique is adopted to sinter SiO_2 slurry by CO_2 laser on a home-made rapid prototyping machine. A three-dimensional green body of a complex-shaped ceramic nozzle is constructed by layer-additive technology. SEM and EDS are used to analyze the microstructure and composition of the green body. The results show that the silica powder can be sintered to form green part with a smallest layer thickness of 100 μm under optimal conditions for laser power of 7 W, a scanning speed of 160 mm/s, and a scanning resolution of 250 dpi. Therefore, the pure ceramic nozzle with good layer addition and without layer separation is fabricated, whose bending strength approaches the maximum.

Keywords: laser sintering; rapid prototyping; silica; ceramic

快速成型集成了激光、数值控制、计算机及材料等多种技术,可依照 CAD 构建的几何图形制作出三维实体原型.快速成型使用层状堆栈加工法,能克服机加工方法难以实现的几何形状限制,实现自由形状实体的自动化制造^[1-3].

现有快速成型技术采用的材料多为高分子、金属、蜡、纸等种类,较少采用陶瓷材料,然而陶瓷材料具有高强度、耐磨耗、耐高温的特性,所以极具发展潜力.目前,常用的陶瓷材料快速成型方法有以下几种:①光固化成型(SLA),即以陶瓷粉末与感光树脂

混合物为原料,用紫外光照射陶瓷树脂,使液态树脂固化将陶瓷粉末黏结形成陶瓷原件^[3-4];②选择性激光烧结(SLS),即将陶瓷粉末被覆树脂再用激光照射树脂,树脂经激光烧结熔化后,黏结陶瓷粉末形成陶瓷原件^[5];③熔融沉积法(FDM),即主要以条状高分子材料和金属材料为原料,原料经过加热的挤压头后熔化,再依照所设计的路径制作出各种外形的高分子复合材料原件^[6].

上述快速成型技术在制作陶瓷原件时,多需添加有机黏结剂来辅助成型,且制成三维生坯后,需经

收稿日期: 2011-04-11. 作者简介: 陈思翰(1986—),男,硕士生;刘福兴(联系人),男,副教授. 基金项目: 台湾科学委员会专题研究计划资助项目(NSG-99-2221-E-262-003).

网络出版时间: 2011-09-01

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110901.1128.001.html>

烧结处理才能成为纯陶瓷原件,而在加热去除有机黏结剂时,可能会造成孔隙增加,并产生较大的收缩及变形.如果使用传统陶瓷加工方法,则需依靠模具把陶瓷粉末加压形成陶瓷生坯,再加热烧结成陶瓷产品,这样需要额外制作模具,且不易生产外形复杂的原件,所以不利于新产品的开发与设计.因此,这些技术仍有改良空间.本文基于激光烧结快速成型技术,采用 SiO_2 粉末为原料与 SiO_2 溶胶混合成浆料,以 CO_2 激光为加热源,使 SiO_2 溶胶产生固化效应,将 SiO_2 粉末结合成三维生坯,探索制作陶瓷喷嘴生坯的可行性^[7-8].

1 陶瓷激光固化法原理

本研究采用的加工方式称为陶瓷激光固化法,是利用激光能量对材料进行选择性的烧结,使 SiO_2 溶胶产生不可逆的凝胶效应,此效应使 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 胶体粒子均匀地分布在溶液中形成溶胶,而溶胶中的胶体粒子经过水解与缩合反应,聚合形成类似高分子聚合物的立体结构^[7].在缩合反应过程中所发生的脱水反应,是利用激光所产生的热能完成的.

依据凝胶效应发展出的这种快速成型加工方式,是将微米级 SiO_2 粉末与内含纳米级 SiO_2 微粒的溶胶混合成浆料后,通过 CO_2 激光加热将 SiO_2 溶胶中的水分蒸发,使得 SiO_2 浆料结合成生坯.由于激光只是将浆料中的水分蒸发,所以生坯的变形量很小,且陶瓷粉末对 CO_2 激光的吸收率可达 95% 以上,所以这种加工方式可大幅降低能量的损耗.

用陶瓷激光固化法制作陶瓷生坯的工艺,包括模型设计、浆料混合、铺设浆料、激光扫描、平台下降及余料清除等六大步骤,具体过程详述如下(参见图 1).

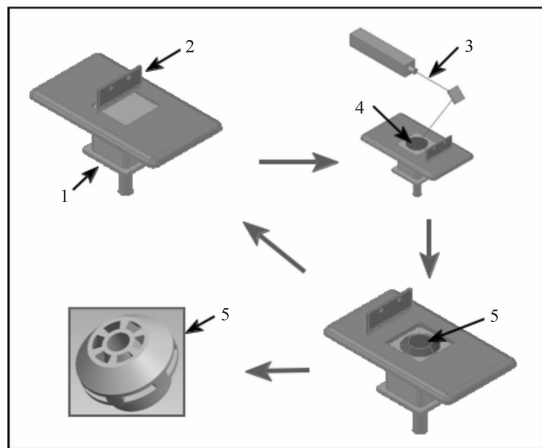
(1)模型设计:首先使用三维 CAD 软件(Pro/Engineering)绘制出所设计的三维模型.

(2)浆料混合:将 SiO_2 粉末及 SiO_2 溶胶 2 种材料依质量比 60 : 40~70 : 30 混合,并均匀搅拌成 SiO_2 陶瓷浆料.

(3)铺设浆料:将浆料铺设于升降平台与刮料板之间的区域,待浆料完成进料后,利用刮料板将超过单层厚度的浆料刮除,使得每层浆料厚度一致.

(4)激光扫描:以 CO_2 激光光束依照所需的二维图形选择性扫描浆料层,使区域内的 SiO_2 粉末相互结合在一起.

(5)平台下降:扫描完一层后,升降平台下降单一层厚的高度(100 μm),之后重复步骤(3)~(5),



1:升降平台; 2:刮料板; 3:CO₂ 激光束;

4:成型区域; 5:生坯

图 1 陶瓷激光固化法制作流程图

直至使浆料层黏结成为生坯;选择适当的激光功率与扫描速度使浆料层与层之间相互连结,进行叠层加工形成三维生坯.

(6)余料清除:经激光束扫描的部分会形成三维结构,未经激光束扫描的部分依然保持其浆料层状态,将完成叠层的生坯取出用水冲洗,清除生坯上未成型的浆料,即可获得最终的生坯原型.

2 陶瓷激光固化法设备介绍

运用陶瓷激光固化法,将图 1 所示的加工方式应用于 SiO_2 浆料,制作出每层厚度为 100 μm 、外形尺寸为 20 mm×20 mm×2 mm 的 SiO_2 生坯试片和喷嘴.制作时所使用的快速成型实验机如图 2 所示,主要包含铺料系统和激光扫描系统.铺料系统由刮料平台、刮料板和升降平台组成.刮料平台为铺料时的基准面,刮料板由滚珠导螺杆、滑块与导轨所组成的传动机构带动,升降平台控制每一层的堆栈高度,其中刮料板与升降平台均由五相步进电机驱动.激光扫描系统由 CO_2 激光器与激光扫描头组成,扫描头内含光学扫描机构、反射镜及聚焦镜等,其中光学扫描机构由 2 个精密的高速摆动电机驱动 2 个反射镜来控制 X、Y 方向的旋转角度,从而控制激光的扫描路径. CO_2 激光器的功率为 25 W,激光功率在 2~25 W 范围内连续可调,光斑直径 $D=0.4$ mm,光波波长 $\lambda=10.64$ μm ,焦距 $L=150$ mm,激光扫描速度在 5~1 000 mm/s 范围内连续可调.用此实验机制作 SiO_2 生坯试片,以不同的激光功率和激光扫描分辨率进行实验,探讨生坯试片是否成型,并观察

其抗弯强度的变化,再利用扫描电镜(SEM)、能谱分析仪(EDS)观察其微观结构和成分.



图2 陶瓷激光固化法快速成型实验机

3 实验结果与分析

生坯是否成型与陶瓷固化深度和激光功率密度有关.激光功率密度与激光功率、扫描速度及扫描间距之间的关系如下^[7,9]

$$P_d = \frac{P}{V_s H_s}$$

式中: P_d 表示激光功率密度(J/mm^2); P 表示激光功率(W); V_s 表示激光扫描速度(mm/s); H_s 表示激光扫描间距(mm).

本研究所用快速成型实验机上的激光扫描头还有另外一个控制参数——激光扫描分辨率,它表示在每英寸(25.4 mm)长度中激光的激发次数,在激光功率、扫描速度及扫描间距相同的情况下,扫描分辨率与激光功率密度成正比.进行实验时,扫描间距是固定值(0.1 mm),将激光扫描速度设定为160 mm/s,然后调整激光功率与激光扫描分辨率,以改变材料吸收的激光功率密度.如此,激光功率和扫描分辨率即为决定 SiO_2 生坯是否能够成型的主要加工参数.

3.1 激光功率的影响

激光功率是 SiO_2 浆料快速成型的一个重要控制因素.实验以不同的激光功率制作 SiO_2 生坯试片,并测量其平面度,获得激光功率与生坯试片平面度的对应关系,如图3所示.

使用三坐标测量仪在每一个试片上取9个测量点进行测量,获得其平面度的平均值.当激光功率小

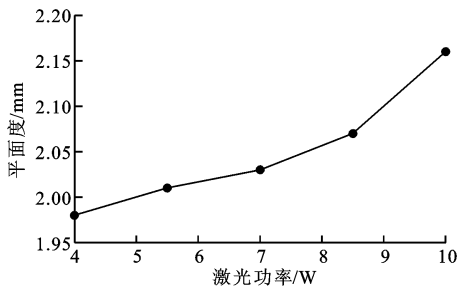


图3 激光功率对生坯平面度的影响

于4 W时,因激光功率不足, SiO_2 陶瓷浆料层被激光扫描加热使水分蒸发后, SiO_2 颗粒被 SiO_2 溶胶黏结成许多团簇状生坯组织,它们无法链接形成连续状态的组织,所以生坯试片层无法成型;当激光功率为4~7 W时,生坯试片层的平面度为1.98~2.03 mm;当激光功率为7~10 W时,平面度为2.03~2.16 mm;当激光功率大于10 W时,因激光功率密度过高,使生坯试片产生翘曲变形,导致刮料板容易刮伤生坯试片造成损坏,因此激光功率不可太大.在可成型的条件下,较低的激光功率可获得较佳的生坯平面度.

3.2 激光扫描分辨率的影响

采用不同的激光扫描分辨率制作实验生坯试片.先由3.1节得到最佳激光功率7 W,再调整激光扫描分辨率,以获得激光扫描分辨率与生坯试片平面度(试片Z轴方向)之间的对应关系.如图4所示,当激光扫描分辨率小于150次/(25.4 mm)(即150 dpi)时,因激光功率密度不足,所以不易成型;当扫描分辨率为150~250次/(25.4 mm)时,平面度为2.03~2.05 mm;当扫描分辨率为250~350次/(25.4 mm)时,平面度为2.05~2.16 mm;当扫描分辨率大于350次/(25.4 mm)时,因激光功率密度过高,导致生坯试片层出现弯曲变形的现象,试片的4个角易向上翘曲,使得下一次铺料时翘曲部位会被刮料板刮到造成生坯试片层损坏.因此,在生坯试片可成型的前提下,较低的激光分辨率可获得较佳的平面度.

当激光功率或激光扫描分辨率过大时,制作出来的生坯试片平面度都较差,这是因为激光功率或激光扫描分辨率的增大都会使陶瓷粉末单位面积接受的能量增加,从而产生较大的热应力,严重时将造成生坯层翘曲变形,使得试片的平面度降低.因此,在制作生坯试片时应选择适当的激光功率和激光扫描分辨率,以保证快速成型件的尺寸精度.

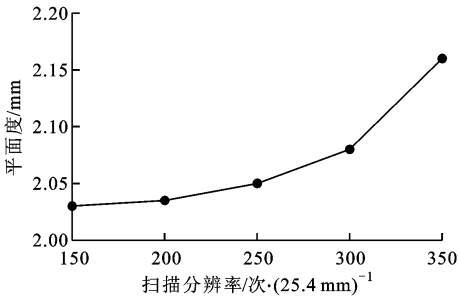


图 4 激光扫描分辨率对生坯平面度的影响

3.3 抗弯强度分析

在材料试验机上测试生坯试片的抗弯强度,试样尺寸为 35 mm×4 mm×3 mm,载荷施加速度为 1 mm/min. 抗弯强度的计算公式为

σ_b = 3PL / 2bh²

式中:σ_b 为抗弯强度(N/mm²);P 为试样破坏时的载荷(N);L 为试样跨距(mm);b 为试样宽度(mm);h 为试样高度(mm).

当激光功率小于 4 W 时,因激光功率较低,所以 SiO₂ 溶胶中的水分并未完全蒸发,导致结构较松散,所以无法成型. 当激光功率为 4~8.5 W 时,抗弯强度随着激光功率上升而增大,这是由于 SiO₂ 溶胶中的水分随着激光功率的增加蒸发得较完全. 抗弯强度在激光功率为 8.5 W 时达到最大值,但是当激光功率大于 8.5 W 后,平面度的变化量较大,且生坯会因为激光功率过大而产生裂痕,所以抗弯强度开始下降,如图 5 所示.

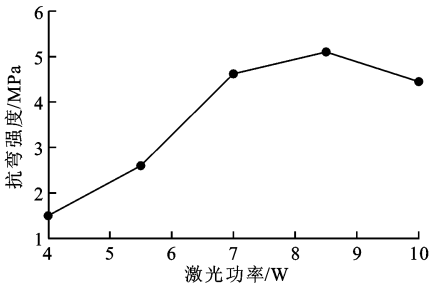


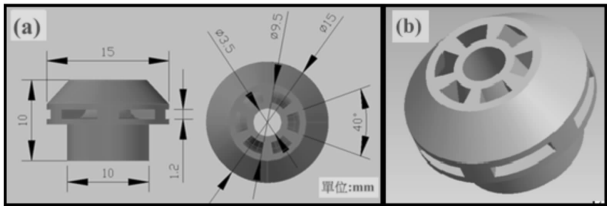
图 5 激光功率对生坯抗弯强度的影响

4 讨 论

由以上分析结果可知,在生坯可堆叠成型的前提下,较低的激光功率和激光扫描分辨率可获得较佳的平面度. 但是,过低的激光功率和激光扫描分辨率会导致不易成型,且生坯的抗弯强度较低,而过高的激光功率和激光扫描分辨率又会使刮料板刮伤试

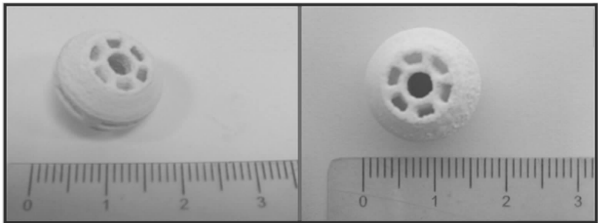
片,抗弯强度也会因此而下降. 为了兼顾生坯试片的平面精度且又不刮伤试片表面,根据实验结果确定的最佳激光加工参数为——激光功率 7 W,激光扫描分辨率 250 次/(25.4 mm),在此参数下制作出的三维喷嘴生坯的尺寸较精确.

因为采用 SiO₂ 陶瓷浆料作为快速成型材料,所以经过激光扫描的区域会产生固化效应,黏结形成固体状态,而未被激光扫描的部分依然保持原来的浆料状态. 由于浆料具有黏稠性,会产生某种程度的支撑效果,所以在一定范围内的突出悬臂不另外制作支撑结构也不会翘曲变形. 运用这种不需制作支撑层的特性,可构建出形状复杂的生坯原件. 喷嘴模型的尺寸及其外形如图 6 所示,每层的厚度为 100 μm,共计 100 层,制作时间为 2.5 h. 图 7 为运用上述最佳加工参数所制作的 SiO₂ 喷嘴生坯,喷嘴外形为通孔结构,采用本文所述的加工方式制作时,并不需要另外构建支撑结构,且可堆栈成型.

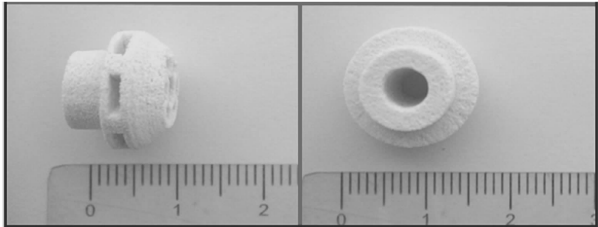


(a)详细尺寸图 (b)成品设计图

图 6 喷嘴模型设计图



(a)成品图 (b)顶视图



(c)侧视图 (d)底视图

图 7 SiO₂ 喷嘴生坯成品图

为了了解 SiO₂ 喷嘴生坯层与层之间的黏结情

况,采用 SEM 对喷嘴生坯的断面进行观察,结果如图 8 所示. 根据图 8 可以确认,生坯的层与层之间确实已黏结在一起,而且其层厚为 $100\ \mu\text{m}$,与铺设的浆料厚度吻合,由此可以证明,本铺料机构的精确度及激光加工参数设定值均能符合加工要求. 对喷嘴生坯进行能谱分析的结果如图 9 所示,可以确认此喷嘴生坯的成分只有 Si 和 O,由此可知本实验中 SiO_2 溶胶与 SiO_2 粉末黏结成型后,生坯成分为纯 SiO_2 陶瓷材料,没有其他成分存在,但表面有许多孔洞,用阿基米德法测量的孔隙率为 26.22%,所以实际应用时还必须进行研磨、熔渗和烧结等后处理.

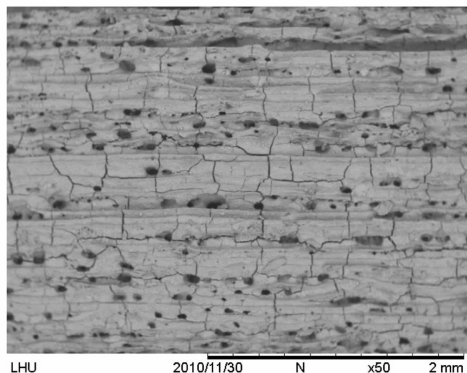


图 8 层堆栈的 SEM 图

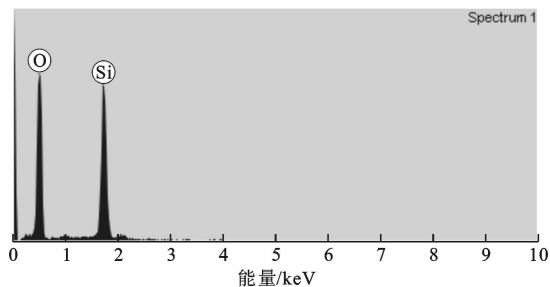


图 9 喷嘴生坯成分的能谱分析图

5 结 论

在适当的铺层厚度与加工参数(激光功率为 7 W,扫描速度为 $160\ \text{mm/s}$,激光扫描分辨率为 250 次/(25.4 mm))下,制作出了外形复杂的 SiO_2 陶瓷喷嘴生坯,且其层堆栈情况良好,没有分层现象,证实了本文方法的可行性. 能谱分析结果证实,本实验制作的生坯为纯 SiO_2 陶瓷材料,其抗弯强度接近最大值,但表面结构具有一定的多孔性,故需进行适当的熔渗和烧结等后处理才能加以应用.

参考文献:

- [1] KIM D S, BAE S W, CHOI K H. Development of industrial SFF system using dual laser and optimal process [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(6): 659-666.
- [2] 孙琨,方亮,叶庆光,等. 聚苯乙烯快速成形加工参数对表面粗糙度的影响[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 343-348.
SUN Kun, FANG Liang, YE Qingguang, et al. Influence of process parameters on surface roughness in rapid manufacturing for expandable polystyrene pattern [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(3): 343-348.
- [3] 丁浩,袁镇沪,卢秉恒,等. 基于光固化成型的功能零件无模具快速精密铸造工艺[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(12): 55-58.
DING Hao, YUAN Zhenhu, LU Bingheng, et al. Precision casting of functional metallic part by stereolithography [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(12): 55-58.
- [4] LICCIULLI A, CORCIONE C E, 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.
- [5] LIU Jie, ZHAN Biao, YAN Chunze, et al. The effect of processing parameters on characteristics of selective laser sintering dental glass-ceramic powder [J]. Rapid Prototyping Journal, 2010, 16(2): 24-35.
- [6] MOSTAFA N, SYED H M, IGOR S, et al. Study of melt flow analysis of an ABS-iron composite in fused deposition modeling process [J]. Tsinghua Science and Technology, 2009, 14(S1): 29-37.
- [7] LIU Fwu-Hsing, LIAO Yunn-Shiuan. Fabrication of inner complex ceramic parts by selective laser gelling [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30(16): 3283-3289.
- [8] LIU Fwu-Hsing. Manufacturing porous multi-channel ceramics by laser gelling [J]. Ceramics International, 2011, 37(7): 2789-2794.
- [9] 陈劲松. 激光烧结 WC 颗粒增强镍基合金块体成形实验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 868-872.
CHEN Jinsong. Experimental research on formation of laser sintering WC particles reinforced Ni-base alloy bulk [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3): 868-872.

(编辑 葛赵青)