

分层挤出成形陶瓷型壳的表面粗糙度研究

王盼龙, 杨力, 杨致远, 彭子伟, 樊自田

(华中科技大学材料科学与工程学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 熔模铸造在进行金属浇注之前, 通常要经过蜡模压制、蜡模组树、蜡模沾浆、型壳脱蜡、型壳焙烧等工序制备陶瓷型壳, 而采用分层挤出成形技术直接成形陶瓷型壳, 可大大简化熔模铸造的工艺流程。本文基于氧化铝陶瓷浆料, 主要研究了分层挤出成形关键工艺参数(喷嘴直径、挤出层高和成形角度)对陶瓷型壳表面粗糙度的影响, 构建了挤出成形陶瓷型壳的表面粗糙度数学模型, 并采用涂层后处理工艺进一步降低了陶瓷型壳的表面粗糙度。结果表明: 采用分层挤出成形技术, 当喷嘴直径为0.26 mm、挤出层高为0.2 mm、成形角度为90°时, 试样表面粗糙度 R_a 最低为(12.9 ± 0.9) μm, 施加涂层后, 表面粗糙度 R_a 可降低至6.3 μm以下。

关键词: 分层挤出成形; 工艺参数; 表面涂层; 陶瓷型壳; 熔模铸造

作者简介:

王盼龙(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为3D打印快速铸造技术。E-mail: wangpl1999@163.com

通讯作者:

杨力, 男, 博士。E-mail: lyangcl@hust.edu.cn

中图分类号: TG249.9;
TG84

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)
06-0818-07

基金项目:

国家自然科学基金项目资助(52205365, 52275334, 51775204)。

收稿日期:

2023-10-23 收到初稿,
2023-12-07 收到修订稿。

熔模铸造常用来制作结构复杂的高精度零件, 如飞机发动机的空心涡轮叶片^[1-2]。熔模铸造技术由失蜡法发展而来, 即先用易熔材料(蜡料)制成可溶性的模型, 在其上涂覆若干层特制的耐火涂料, 经过干燥和硬化形成一个整体型壳后, 再用蒸汽或热水从型壳中熔掉蜡模, 铸型或型壳经焙烧后, 浇注金属液到陶瓷型壳中, 冷却凝固后得到铸件^[3]。可见熔模铸造存在工艺过程复杂、生产周期长、设备成本高等缺点^[4]。如果可以省去制备蜡模的步骤而直接成形陶瓷型壳, 将极大缩短铸件的制备流程。近年来, 快速发展的增材制造技术为这一问题提供了一种新的解决方案^[5-7]。

目前可用于制备陶瓷型壳的快速成形技术主要有: 分层挤出成形技术^[8]、激光选区烧结技术^[9]、粘结剂喷射技术^[10]和立体光固化技术^[11]等。分层挤出成形技术通过控制喷嘴挤出凝胶态浆料并在室温下快速凝固来成形构件。与其他快速成形技术相比, 分层挤出成形的优势在于不需要引入紫外光、激光照射, 浆料固含量高, 能够在常温条件下成形具有复杂三维结构的陶瓷制品, 而且分层挤出成形本身的设备简单, 维护方便, 构建和使用的成本很低^[12-13]。因此, 采用分层挤出成形技术制备陶瓷型壳具有较好发展前景。

目前有许多关于分层挤出成形陶瓷型壳的表面粗糙度研究, 比如开发新的浆料体系、开发不同种类的高分子粘结剂和纳米添加剂、改进机械设备、优化工艺参数等^[14-15], 但均未能将陶瓷制品表面的表面粗糙度 R_a 降低至10 μm以下。

因此, 本文基于氧化铝陶瓷分层挤出成形技术, 对不同喷嘴直径、挤出层高和成形角度下陶瓷型壳的表面形貌进行了测试和分析, 同时构建了工艺参数与表面粗糙度之间的理论模型, 最后使用涂层后处理工艺进一步降低了陶瓷制品的表面粗糙度。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

关于陶瓷浆料的配制, 使用 Al_2O_3 粉末作为浆料的骨料, Al_2O_3 平均粒径 $D_{50}=9.74 \mu m$,

经XRD分析仅检测出 Al_2O_3 相,如图1所示。使用质量分数为10%的聚乙烯吡咯烷酮(PVP-k60)水溶液作为粘结剂,冰醋酸作为分散剂,正辛醇作为消泡剂。关于

表面涂料的配制,使用 Al_2O_3 和 SiO_2 粉末作为涂料的基本成分,使用PVP水溶液作为粘结剂,使用膨润土作为悬浮剂和触变剂,使用 CaCO_3 粉末作为造孔剂。

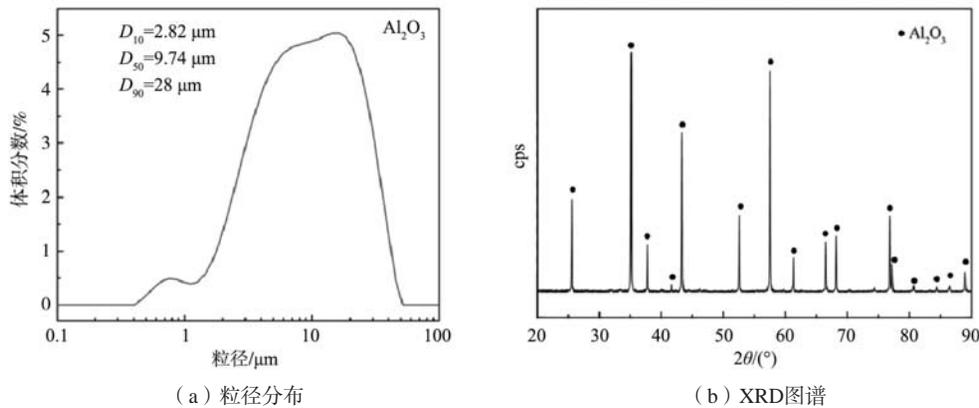


图1 Al_2O_3 粉末的粒径分布及XRD分析

Fig. 1 Particle distribution and XRD analysis of Al_2O_3 powder

1.2 试验方法

分层挤出成形制备低表面粗糙度陶瓷型壳的工艺流程如图2所示。第一步,按比例依次向容器中加入PVP水溶液、 Al_2O_3 粉末、冰醋酸和正辛醇,并加入高纯度氧化锆球,使用行星磨(QM-3SP2)研磨4 h以上,获得分散均匀的陶瓷浆料,使用分层挤出成形装置制备陶瓷型壳,型壳模型的长宽高尺寸为60 mm × 60 mm × 25 mm,如图2所示。第二步,将陶瓷型壳

置于50 °C烘干箱中干燥2 h,随后放入烧结炉(KSL-1700X)中,先以2 °C/min升温至400 °C并保温30 min,除去型壳中的有机物,再以3 °C/min升温至1 300 °C并保温60 min,最后随炉冷却完成陶瓷型壳烧结。第三步,采用浸涂的方式对陶瓷型壳表面涂敷涂层。第四步,将带有涂层的陶瓷型壳置于25 °C烘干箱中干燥2 h,随后放入烧结炉中,按第二步中描述的温度曲线进行烧结,最终获得低表面粗糙度的陶瓷型壳。

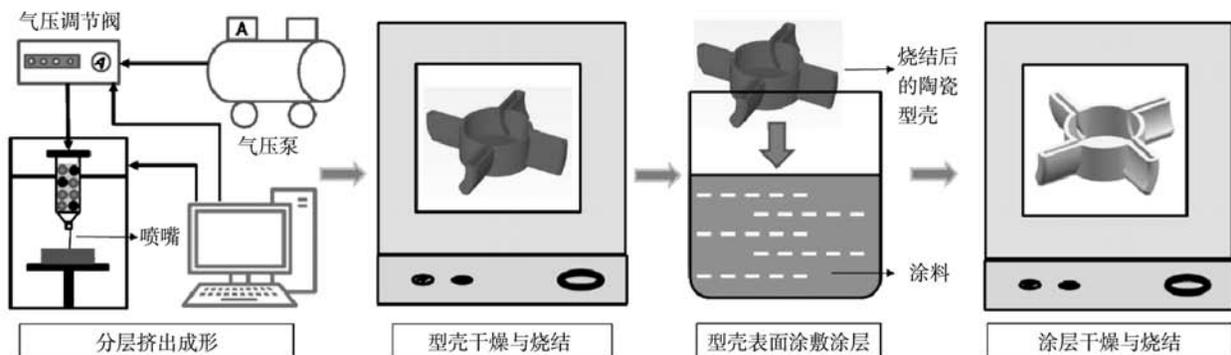


图2 分层挤出成形低表面粗糙度陶瓷型壳的工艺流程

Fig. 2 Technological process of low surface roughness ceramic parts based on layered extrusion forming

使用激光粒度分析仪(MS3000)检测粉末材料的粒度分布。使用粗糙度测试仪(JD520)测量陶瓷试样的表面粗糙度。使用超景深三维显微镜(VHX-1000C)对陶瓷试样烧结后的表面轮廓起伏进行了测试表征。使用光学显微镜(Stemi508)对陶瓷试样的表面形貌进行了观察分析。

2 结果与讨论

2.1 工艺参数对陶瓷型壳表面粗糙度的影响

前期研究发现,喷嘴直径与挤出层高对陶瓷试样的表面粗糙度影响最大,当层高设置约为喷嘴直径的70%~80%时,陶瓷试样的成形效果最好^[12]。因此本文优先选择了比0.41 mm更小的三种微细喷嘴进行氧化铝

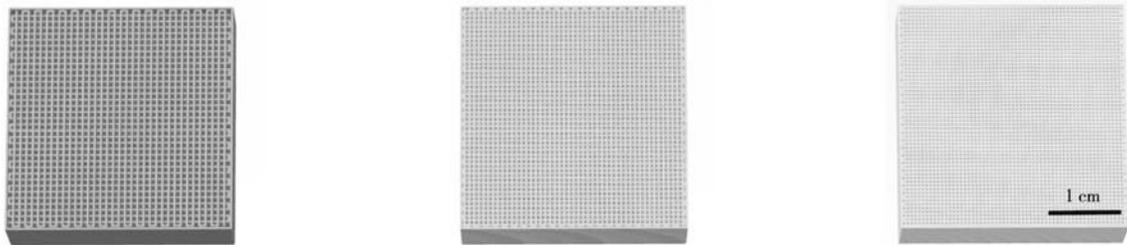
陶瓷浆料的挤出。为了便于分层切片，选取喷嘴直径与挤出层高的对应关系如表1所示。

表1 相对应的喷嘴直径和层高
Table 1 Nozzle diameter and corresponding layer height

喷嘴直径/mm	层高/mm
0.34	0.25
0.26	0.2
0.21	0.15

制备出分散均匀的陶瓷浆料后，使用三种微细喷嘴进行陶瓷网格试样的成形，网格试样模型均为30 mm × 30 mm × 10 mm的块状长方体，如图3所示。对成形

干燥后陶瓷网格试样的表面和断口形貌进行观察，结果如图4所示。从图4a和b可以看出，当喷嘴直径和挤出层高分别为0.34 mm和0.25 mm、0.26 mm和0.2 mm时，成形的网格试样孔隙大小一致、无变形，浆料丝材的截面形状均匀；当跨距明显大于浆料丝材直径时，也未出现明显的坍塌变形。从图4c看出，当喷嘴直径和挤出层高分别为0.21 mm和0.15 mm时，成形的网格试样表面孔隙出现一定程度的变形，孔隙大小不再保持一致，断口处出现了丝材轻微坍塌的缺陷，另外当成形层高设置为0.15 mm时，相同形状的试样成形所需要的时间明显增加。综合考虑，选择喷嘴直径与层高分别为0.34 mm和0.25 mm、0.26 mm和0.2 mm来研究成形倾斜角度对陶瓷试样表面粗糙度的影响。



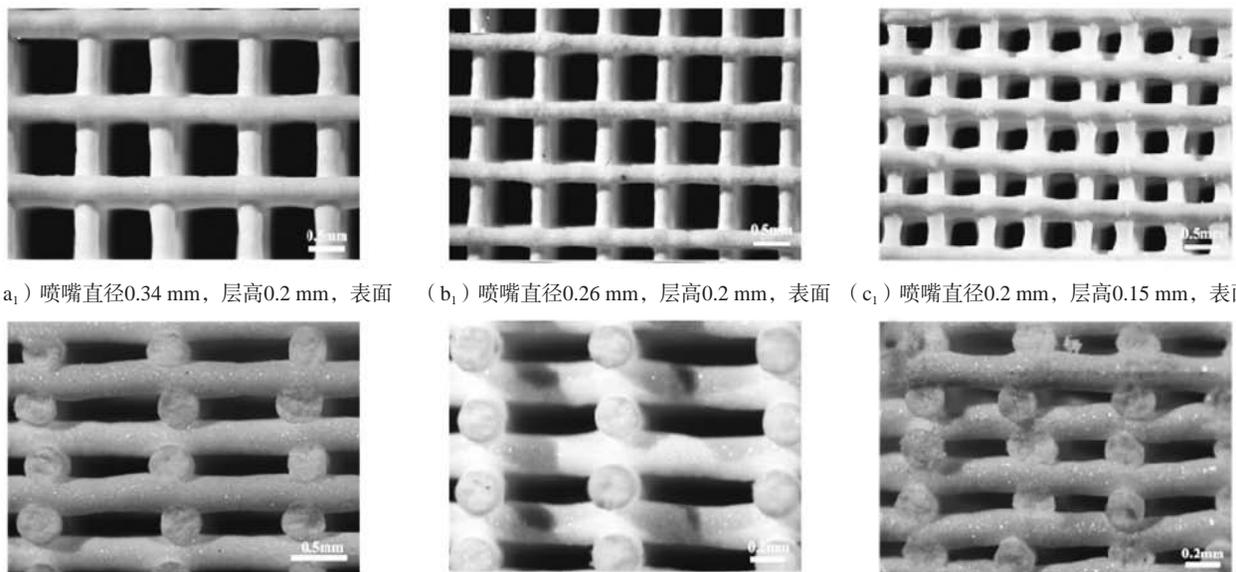
(a) 喷嘴直径0.34 mm，层高0.25 mm

(b) 喷嘴直径0.26 mm，层高0.2 mm

(c) 喷嘴直径0.21 mm，层高0.15 mm

图3 不同喷嘴直径及层高下陶瓷网格试样模型

Fig. 3 The models of the lattice structures with different nozzle diameters and layer heights



(a₁) 喷嘴直径0.34 mm，层高0.2 mm，表面

(b₁) 喷嘴直径0.26 mm，层高0.2 mm，表面

(c₁) 喷嘴直径0.2 mm，层高0.15 mm，表面

(a₂) 喷嘴直径0.34 mm，层高0.2 mm，断口

(b₂) 喷嘴直径0.26 mm，层高0.2 mm，断口

(c₂) 喷嘴直径0.2 mm，层高0.15 mm，断口

图4 不同喷嘴直径及成形层高下陶瓷网格试样的光学图片

Fig. 4 Optical images of the lattice structures with different nozzle diameters and layer heights

分层挤出成形技术通过“逐层叠加”来成形试样，试样的倾斜角度会影响相邻两“层”间的水平偏移，进而影响试样竖直面的表面粗糙度。为了研究不同倾斜角度下陶瓷试样的表面粗糙度，设计了倾斜角

度分别为15°、30°、45°、60°、75°和90°的试样模型，如图5所示。

采用喷嘴直径与成形层高分别为0.34 mm和0.25 mm、0.26 mm和0.2 mm的工艺参数制备不同倾角的陶瓷试样，

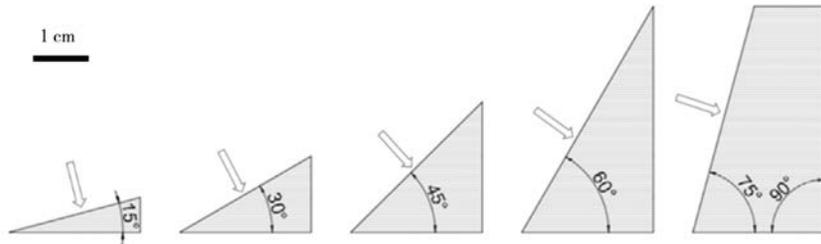


图5 不同倾角的试样模型

Fig. 5 Printing models with different inclination angles

并对不同倾斜角度陶瓷试样的表面进行观察，观察结果如图6所示。从图6可以看出，同一喷嘴直径与挤出层高下，随着成形角度的增大，试样层与层之间浆料

丝材的间距不断减小；同一倾斜角度下，喷嘴直径越小，相同放大倍数下可观察到的层数越多，这表明对于同一表面成形精度更高；试样倾角越大，表面越平整。

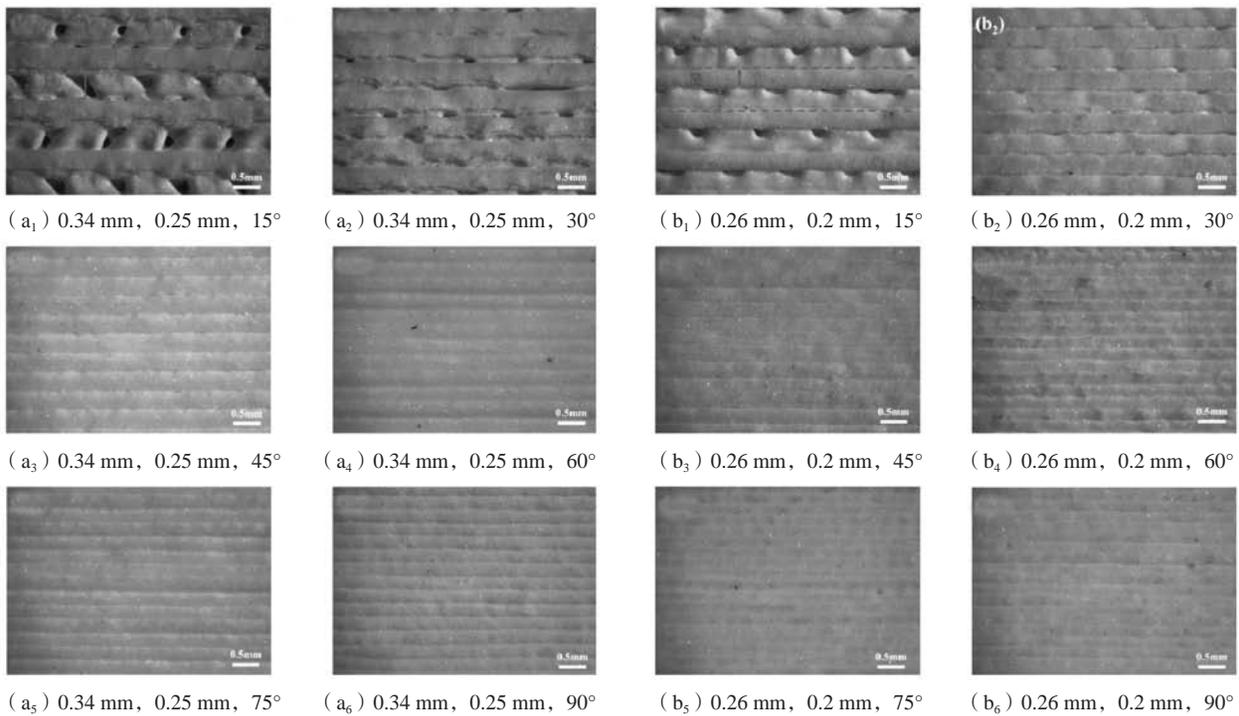


图6 不同倾角、喷嘴直径和层高下陶瓷试样的表面形貌

Fig. 6 Optical microscopic images of the ceramic green bodies with different inclination angles, nozzle diameters and layer heights

基于上述分析，确定喷嘴直径、挤出层高最优分别为0.26 mm、0.2 mm，并按该参数进行后续试验。对上述0.26 mm、0.2 mm参数下成形的斜面试样进行表面粗糙度 R_a 及表面最大高度差 R_z 测试，在陶瓷试样斜面上随机选取4 mm长度进行测试，多次测试取平均值结果如图7所示。陶瓷试样的 R_a 和 R_z 值随着成形倾角的增大而减小，当成形倾角从30°增加到90°时，陶瓷样品的 R_a 值从 $(29.6 \pm 0.9) \mu\text{m}$ 降低到 $(12.9 \pm 0.9) \mu\text{m}$ 。当试样成形倾角为15°时，由于试样表面粗糙度超过设备测量范围，图中未标出。同时挤出成形了50 mm × 10 mm × 10 mm的长方体试样，干燥烧结后在室温下测试其弯曲强度为40.5 MPa，烧结线收缩率为2.29 %。

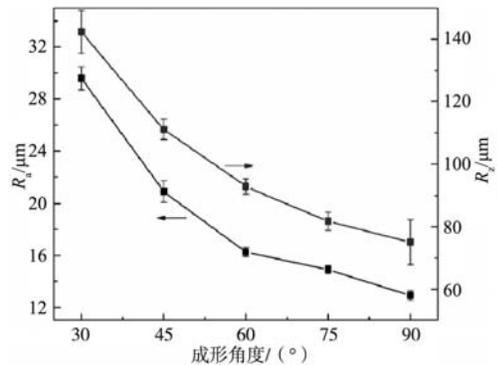
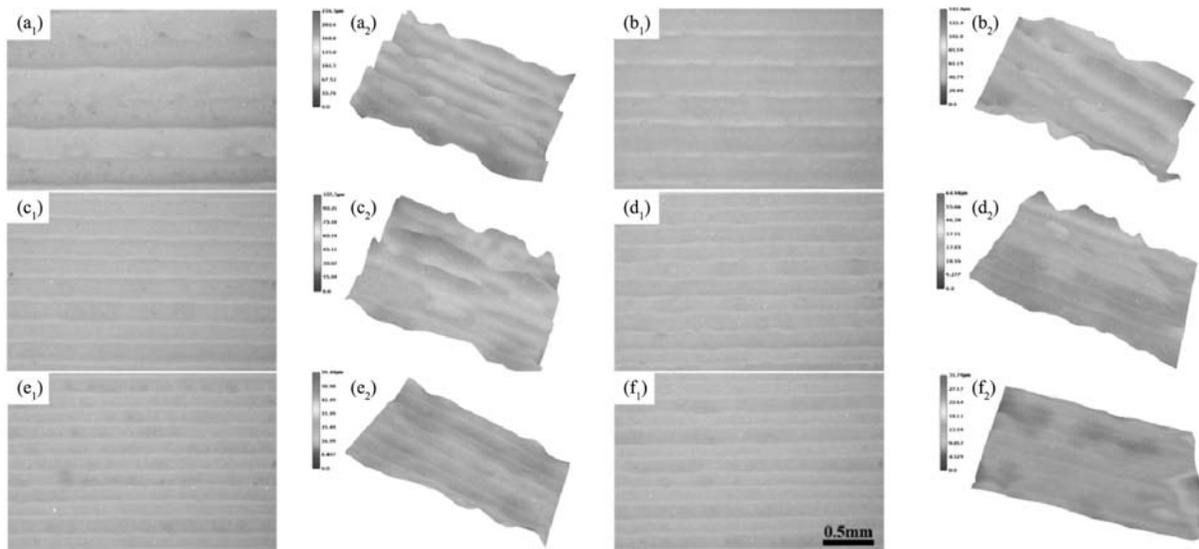


图7 成形角度对陶瓷试样 R_a 和 R_z 的影响

Fig. 7 Effect of the printing inclination angle on R_a and R_z of the ceramic samples

图8为不同倾角的陶瓷样品在1 300 °C烧结60 min后的光学显微镜和超景深三维显微镜图像，更直观地展

示了陶瓷试样的表面形貌，可以看出，随着倾角的增大，陶瓷试样表面高度差减小，表面变得更加平滑。



(a) 15°; (b) 30°; (c) 45°; (d) 60°; (e) 75°; (f) 90°

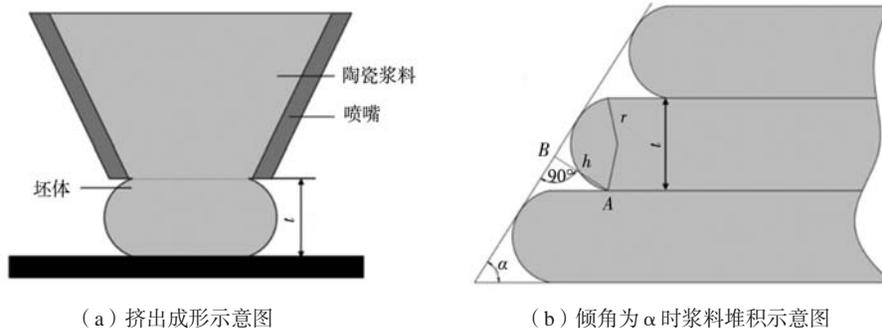
图8 在0.2 mm层高下不同倾角陶瓷试样的光学显微镜和超景深三维显微镜图像

Fig. 8 Optical microscopic and ultra-depth 3D microscope images of the ceramic samples under 0.2 mm layer height with different inclination angles

2.2 陶瓷型壳表面粗糙度与工艺参数间关系的数学模型

为了获得表面粗糙度 (R_a 、 R_z) 与关键工艺参数 (喷嘴直径、挤出层高和成形角度) 之间的关系，结

合上文测试结果，建立了如图9所示的数学模型。图9中A点为坯体轮廓的最低点之一，B点为坯体轮廓切线上一点， h 为A点到B点的垂直距离， t 为挤出层高， r 为陶瓷丝材截面端部圆弧的半径， α 为成形倾斜角度。



(a) 挤出成形示意图

(b) 倾角为 α 时浆料堆积示意图

图9 浆料堆积数学模型

Fig. 9 Mathematical model of the slurry accumulation

根据表面粗糙度的定义，表面轮廓中最高点与最低点的高度差 R_z 可以代表试样表面粗糙度的好坏，作一条直线与模型相切，图9中A点到B点的距离为试样表面的最大高度差 h ，那么就需要求出图9中 h 的大小。为了简化计算过程，假设沉积在基板上的陶瓷丝材截面端部为半径为 r 的圆弧形。在挤出层高为 t ，成形倾斜角度为 α 的条件下，通过几何计算得出 h 、 t 、 α 有式 (1) 所示的关系。

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{t^2}{4}} \sin \alpha + \frac{t}{2} \cos \alpha \quad (1)$$

当成形层高 t 一定时，浆料丝材截面端部的半径 r 即为固定值，此时从式 (1) 可以看出，当 $0^\circ < \alpha \leq 90^\circ$ 时， h 是 α 的减函数，即随着成形倾斜角度 α 不断增大， h 不断减小；当 α 为 90° 时， h 最小； α 接近于 0° 时，陶瓷型壳试样的表面粗糙度最大。

数学模型分析趋势与测试结果 (图7和图8) 保持一致，有助于预测不同工艺参数下挤压陶瓷件的表面粗糙度，对制备表面质量更好的陶瓷型壳具有一定的指导意义。

2.3 陶瓷型壳的表面涂层处理

熔模铸造通常要求陶瓷型壳的表面粗糙度 R_a 低于 $6.3\ \mu\text{m}$ ，因此本文提出了一种表面涂层后处理工艺，以求在优化工艺参数的基础上进一步提高分层挤出成形陶瓷件的表面粗糙度。

按照最优工艺参数制备不同倾斜角度的陶瓷试样，并对试样施加表面涂层，经过 $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ 高温烧结后，测试获得试样的表面粗糙度值 R_a 如图10所示。对于不同倾斜角度的试样，表面涂层均显著降低了其 R_a 值。与初始试样相比，施加表面涂层后试样的 R_a 值降低至 $6.3\ \mu\text{m}$ 以下。虽然施加涂层后试样的表面粗糙度仍受初始基体表面粗糙度的影响，但 R_a 值的波动范围可以稳定在 $\pm 2\ \mu\text{m}$ 以内。从 15° 到 90° ， R_a 值呈逐渐减小的趋势。对于倾角为 90° 的试样，其 R_a 值最小可达到 $3.6\ \mu\text{m}$ 。对于倾角为 15° 的试样，通过施加表面涂层可将其 R_a 值由 $35\ \mu\text{m}$ 降低至 $6\ \mu\text{m}$ 左右。

使用光学显微镜直接观察陶瓷基体与涂层界面处的形貌，结果如图11所示。可以看到，陶瓷基体表面的阶梯状层纹被涂层覆盖，在外侧呈现出较为平整的

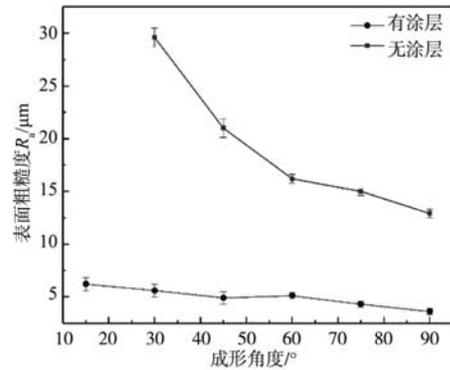
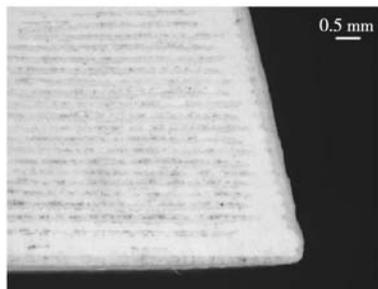


图10 涂层对不同倾角陶瓷试样表面粗糙度的影响

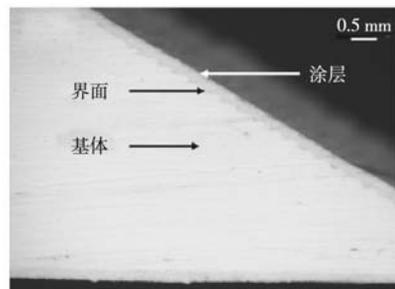
Fig. 10 Effect of the coating on surface roughness of the ceramic samples with different inclination angles

表面，成功达到降低陶瓷试样表面粗糙度的效果。

图12展示了涂层对分层挤出成形陶瓷型壳的实际涂覆效果，经过干燥烧结后带有涂层的陶瓷型壳表面质量良好，未出现涂层开裂、脱落等缺陷。涂层在陶瓷部件凸起、凹陷等部位过渡平滑，有效消除了表面的层纹效应。



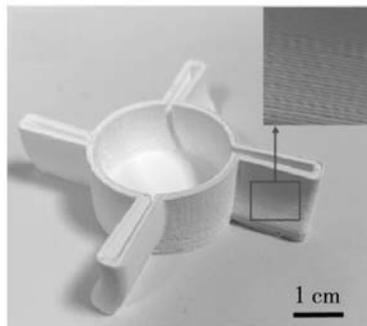
(a) 75°



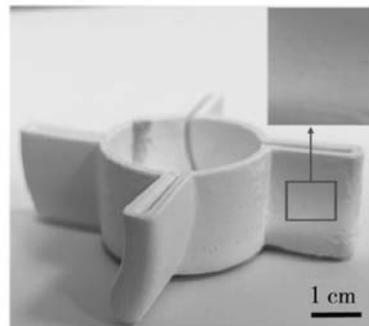
(b) 30°

图11 涂层与基体的界面形貌图

Fig. 11 Interface morphologies between coating and substrate



(a) 无涂层



(b) 有涂层

图12 简化叶轮陶瓷壳施加涂层前后的实物图

Fig. 12 Optical images of the ceramic parts specimens before and after coating

通过以上研究，成功通过分层挤出成形技术制备出低表面粗糙度的陶瓷型壳，研究结果有助于推进分

层挤出成形技术在铸造领域的应用。

3 结论

(1) 基于氧化铝陶瓷的分层挤出成形, 对不同喷嘴直径、挤出层高和成形倾角下陶瓷型壳的表面形貌进行了表征分析。结果表明: 当喷嘴直径为0.26 mm、层高为0.2 mm、成形倾角为90°时, 表面粗糙度 R_a 最低为 $(12.9 \pm 0.9) \mu\text{m}$ 。

(2) 建立了陶瓷型壳表面高度差与关键工艺参数(喷嘴直径、挤出层高、成形倾角)间的数学模

型。试样表面最大高度差 h 与层高 t 和倾角 α 的关系为:

$$h=r-\sqrt{r^2-\frac{t^2}{4}}\sin\alpha+\frac{t}{2}\cos\alpha$$

即在陶瓷浆料分层挤出成形过程中, 喷嘴直径和挤出层高越小, 成形倾角越大, 陶瓷试样的表面粗糙度就越小。

(3) 利用表面涂层成功将分层挤出成形陶瓷部件的表面粗糙度 R_a 降低至3.2~6.3 μm , 达到熔模铸造对陶瓷型壳的表面粗糙度的要求。

参考文献:

- [1] 樊振中, 徐秀利, 王玉灵, 等. 熔模精密铸造技术在航空工业的应用及发展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34 (3): 285-289.
- [2] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望 [J]. 铸造, 2012, 61 (4): 347-356.
- [3] KANYO J E, SCHAFFNER S, UWANYUZE R S, et al. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40 (15): 4955-4973.
- [4] 苏鹏, 刘鸿羽, 赵军, 等. 钛合金熔模铸造型壳制备技术研究现状 [J]. 铸造, 2012, 61 (12): 1401-1404.
- [5] 姜耀林, 邵中魁. 3D打印在快速熔模精密铸造技术中的应用 [J]. 机电工程, 2017, 34 (1): 48-51.
- [6] TANG Shiyan, YANG Li, FAN Zitian, et al. A review of additive manufacturing technology and its application to foundry in China [J]. China Foundry, 2021, 18 (4): 249-264.
- [7] 段望春, 高佳佳, 董兵斌, 等. 3D打印技术在金属铸造领域的研究现状与展望 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (12): 2895-2900.
- [8] TANG S, FAN Z, ZHAO H, et al. Layered extrusion forming-a simple and method for rapid prototyping ceramic core [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96 (9-12): 3809-3819.
- [9] WEI Q, ZHONG J, XU Z, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of ceramic shell moulds for investment casting of turbine blades by selective laser sintering [J]. Ceramics International, 2018, 44 (11): 12088-12097.
- [10] HUANG S, YE C, ZHAO H, et al. Additive manufacturing of thin alumina ceramic cores using binder-jetting [J]. Additive Manufacturing, 2019, 29: 100802.
- [11] 胡可辉, 吕志刚, 陆宽, 等. 复杂陶瓷型芯增材制造及浇注工艺验证 [J]. 机械工程学报, 2021, 57 (3): 227-234.
- [12] 唐世艳. 分层挤出成形铸造用陶瓷型芯的精度控制及特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [13] 杨力. 精密铸造陶瓷型/芯双头挤出直接成形的材料及精度研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [14] RAO R B, KRAFCIK K L, MORALES A M, et al. Microfabricated deposition nozzles for direct-write assembly of three-dimensional periodic structures [J]. Advanced Materials, 2005, 17 (3): 289-293.
- [15] 陈彦涛, 段国林. 浆料直写成形 ZrO_2 陶瓷制备及烧结 [J]. 中国陶瓷, 2021, 57 (2): 24-32.

Study on Surface Roughness of Ceramic Shell Prepared by Layered Extrusion Forming Technology

WANG Pan-long, YANG Li, YANG Zhi-yuan, PENG Zi-wei, FAN Zi-tian

(School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:

The ceramic shell in investment casting is typically prepared through a series of steps including wax mold pressing, wax mold tree assembly, wax mold stain slurry, mold shell dewaxing, and mold shell roasting. By utilizing layered extrusion forming technology, the ceramic shell can be directly formed, simplifying the process flow of investment casting significantly. This study focused on alumina ceramic paste and investigates the impact of key process parameters (nozzle diameter, extrusion layer height, and forming angle) on the surface roughness of the ceramic shell. A mathematical model for predicting surface roughness was established, and further reduction in surface roughness was achieved through post-treatment coating. Experimental results demonstrated that when using a nozzle diameter of 0.26 mm, an extrusion layer height of 0.2 mm, and a forming angle of 90°, the sample's surface roughness R_a reached its lowest value at $(12.9 \pm 0.9) \mu\text{m}$; after applying the coating treatment, this value was reduced to less than 6.3 μm .

Key words:

layered extrusion forming; process parameters; surface coating; ceramic shell; investment casting