涂层对材料挤出成形 Al_2O_3 陶瓷型壳表面精度的影响研究

杨　力，王盼龙，唐世艳，杨致远，刘菁非，赵建伟，徐子桢，樊自田

（华中科技大学材料科学与工程学院，材料成形与模具技术全国重点实验室，湖北武汉 430074）

摘要：采用材料挤出成形技术直接成形熔模铸造用陶瓷型壳，可大大简化熔模铸造制壳的工艺流程。然而，由于挤出技术“逐层叠加”的成形特征，所制备的陶瓷型壳表面存在较明显的层纹效应从而导致表面精度较差，难以满足熔模铸造陶瓷型壳的表面精度要求。因此，本文开发了一种适用于浆料挤出成形陶瓷件的表面涂层材料及其涂装工艺，主要研究了涂层对挤出成形Al_2O_3基陶瓷表面精度的影响及机理。结果表明：通过高温处理，涂层材料可以耐受1 500 ℃的高温，并且与基体结合良好，不开裂，不脱落；涂层使陶瓷件表面粗糙度*Ra*由12.5~30 μm降低至3.2~6.3 μm，极大改善了浆料挤出成形陶瓷件表面精度，基本满足熔模铸造的精度要求。

关键词：材料挤出成形；陶瓷型壳；熔模铸造；表面粗糙度；涂层

作者简介：
杨力（1991–），男，助理研究员，工学博士，主要研究方向为 3D 打印快速铸造技术。E-mail：lyangcl@hust.edu.cn
通信作者：
樊自田，男，教授，工学博士。E-mail：fanzt@hust.edu.cn

中图分类号：TG249.5
文献标识码：A
文章编号：1001-4977（2025）03-0269-10

基金项目：
国家自然科学基金（52205365，52275334，51775204）；湖北省博士后先锋人才跟踪支持项目（2024HBBHXF025）。
收稿日期：
2024–10–10 收到初稿，
2024–12–23 收到修订稿。

熔模精密铸造技术是制备高端高精度零件（如航空发动机叶片）的常用方法[1-2]。氧化铝（Al_2O_3）陶瓷因其优异的性能常被用于精密铸造陶瓷型芯（壳）的制备[3]。熔模铸造技术由失蜡法发展而来，即先用易熔材料（蜡料）制成可熔性的模型，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，浇注金属液得到铸件[4]。熔模铸造工艺具有铸件尺寸和表面精度高，可以制备结构复杂的铸件等优点，但也存在着工艺过程非常复杂，生产周期长，设备成本高等缺点[5]。如果可以省去制备蜡模的步骤直接成形陶瓷型壳，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[6-8]。

目前，可用于制备陶瓷型壳的快速成形技术主要有：浆料挤出成形技术、粉末床熔融技术、粘结剂喷射技术和立体光固化技术[9-15]。其中，浆料挤出成形技术通过控制喷嘴挤出凝胶态浆料，浆料在室温下快速凝固来成形零件。与其他快速成形技术相比，浆料挤出成形技术的优势在于不需要引入紫外光和激光照射，能够在常温条件下成形具有复杂三维结构的陶瓷制品，而且浆料挤出成形技术本身的设备简单，维护方便，构建和使用的成本低[16-19]。因此，采用浆料挤出成形技术制备陶瓷型壳具有较好的发展前景。

然而，由于浆料挤出成形 “逐层叠加”的特征，所制备的陶瓷型壳表面存在层纹缺陷，难以达到熔模铸造对型壳表面粗糙度的要求（*Ra*<6.3 μm）。目前有一些针对改善浆料挤出成形试样精度问题的研究，包括设计浆料配方，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（浆料挤出喷嘴的形状尺寸、浆料驱动模式、平台运动模式和挤出头个数等），优化工艺参数（挤出头内径、扫描速度、挤出压力、打印层高和烧结温度等）等[20-23]，但都未能将陶瓷制品的表面粗糙度*Ra*降低至10 μm以下。

本文首先使用浆料挤出成形技术制备Al_2O_3基陶瓷坯体，然后配制涂料并采用浸涂的方式将涂料涂挂至陶瓷坯体表面，经过干燥和高温烧结实现涂层与陶瓷基体的

良好结合，最终获得表面粗糙度*Ra*小于6.3 μm的陶瓷试样。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

以Al_2O_3粉末（≥99.5 wt.%）为坯体浆料的骨料，聚乙烯吡咯烷酮（PVP，≥99.5 wt.%）水溶液作为粘结剂，冰醋酸（≥99.5 wt.%）作为分散剂，正辛醇（≥99.5 wt.%）作为消泡剂，坯体浆料各组分含量详见表1。

表1 坯体浆料各组分含量
Tab. 1 Formulation of ceramic slurry w_B/%

Al_2O_3	PVP水溶液	冰醋酸	正辛醇
84.0	15.6	0.39	0.01

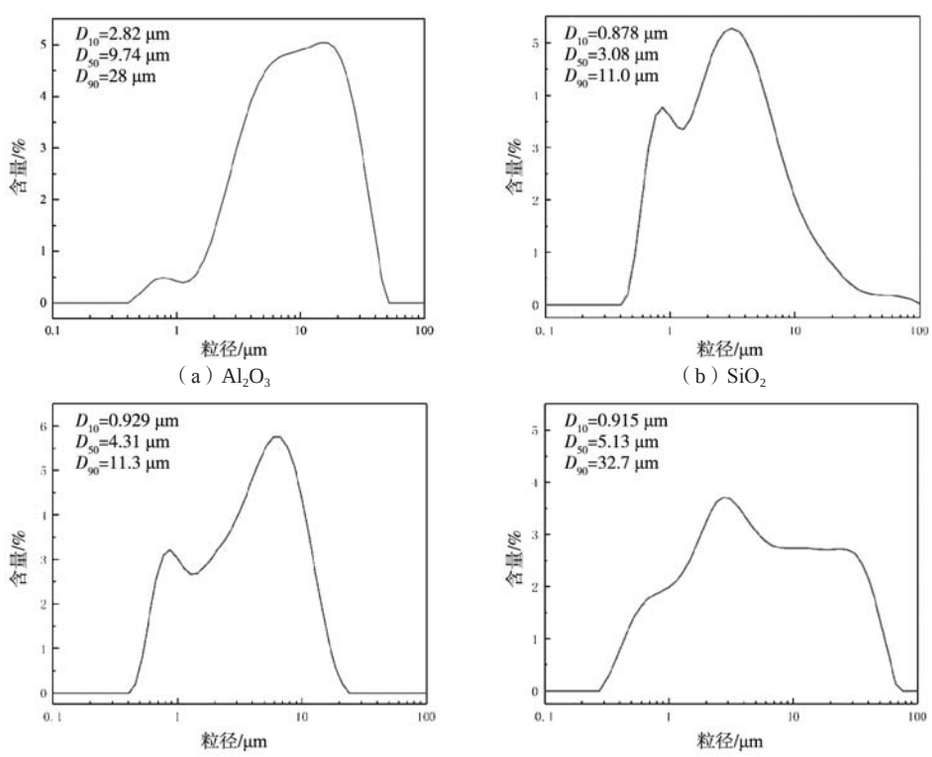
以Al_2O_3和SiO_2粉末（≥99.5 wt.%）为涂层涂料的基本成分，其中Al_2O_3作为耐火骨料，涂层在高温下烧结时，SiO_2部分熔融渗入Al_2O_3颗粒间隙，冷却凝固后与耐火骨料形成网状结合。PVP水溶液（10 wt.%）为粘结剂以增强涂层在室温下的结合强度，防止涂层在烧结前开裂剥落。膨润土为悬浮剂和触变剂，提高涂料对基体的吸附性。$CaCO_3$粉末（≥99.5 wt.%）为造孔剂，防止涂层高温烧结后收缩减薄。配制涂层浆料前，将膨润土（≥99.5 wt.%）与水按1∶9的质量比混合，静置12 h以上，使其充分吸水溶胀。水作为涂层浆料的溶剂。涂层浆料各组分含量详见表2。试验中使用的粉末材料粒度分布如图1所示。

表2 涂层浆料各组分含量
Tab. 2 Formulation of coating components w_B/%

Al_2O_3	SiO_2	$CaCO_3$	膨润土	PVP	水
12.5	24	4.5	1	1.5	56.5

1.2 试验流程

高表面精度陶瓷试样的制备流程（图2）包括：浆料挤出成形陶瓷坯体，坯体干燥烧结，坯体浸涂表面涂层，涂层干燥烧结。第一步，按比例向容器中加入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，使用行星球磨机充分研磨，获得分散均匀的陶瓷浆料，使用浆料挤出成形装置制备陶瓷部件坯体。第二步，将陶瓷坯体置于烘干箱中干燥，随后放入烧结炉中高温烧结，先以2 ℃/min升温至400 ℃并保温30 min，除去型壳中的有机物，再以3 ℃/min升温至1 300 ℃并保温60 min，随炉冷却完成陶瓷试样的烧结。第三步，按比例配制涂层浆料，采用浸涂的方



（a）Al_2O_3　（b）SiO_2　（c）$CaCO_3$　（d）膨润土

图1 粉末材料的粒径分布
Fig. 1 Particle size distributions of powder materials

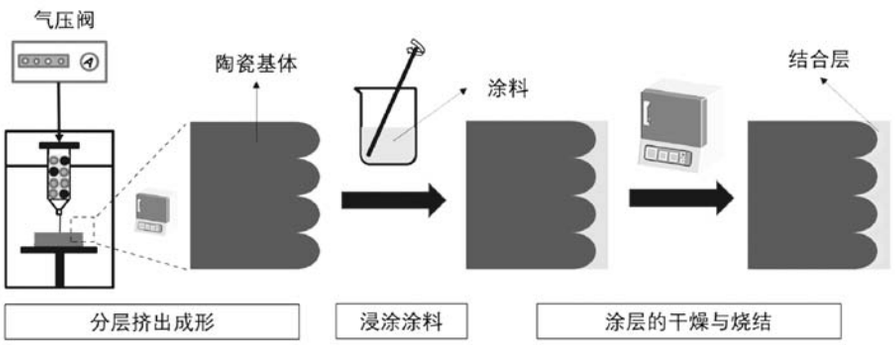


图2 浆料挤出成形高表面精度陶瓷的工艺流程

Fig. 2 Technological process of high precision ceramic parts based on material extrusion 3D printing

式将涂料涂挂至陶瓷坯体表面。第四步，涂层在室温下自然阴干后再于25 ℃烘干箱中干燥，放入烧结炉中进行烧结（烧结曲线同第二步），获得表面精度较高的陶瓷部件。

本文研究测试了涂层对陶瓷基体的润湿性，烧结后与基体的结合强度，对各角度（包括弧面）试样表面粗糙度的改善程度，以及涂层的耐高温性能，测试中使用0.26 mm直径的喷嘴和0.2 mm成形层高制备陶瓷试样。

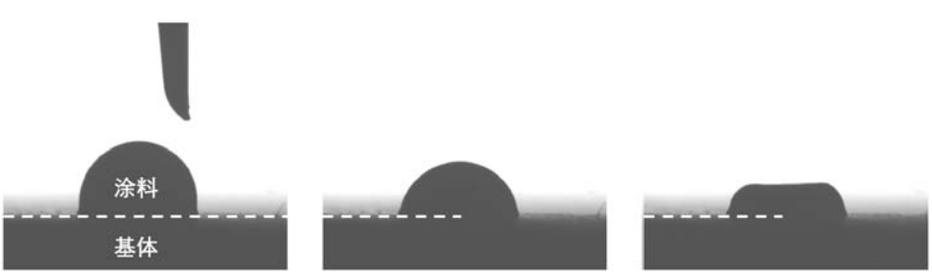
1.3 测试及表征

使用电烧结炉（KSL-1700X）对陶瓷试样进行高温烧结。使用激光粒度检测器（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。使用光学接触角测量仪（OCA20）测量涂层浆料与陶瓷基体之间的接触角。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。使用万能试验机对陶瓷涂层进行了抗压测试。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。使用环境扫描电子显微镜（Quanta200）对陶瓷试样的微观形貌和截面元素分布进行了分析表征。

2 结果与讨论

2.1 涂层与基体的润湿性、结合性及其耐高温性能

使用光学接触角测量仪测量涂层与陶瓷基体之间的接触角，结果如图3所示。涂料刚滴落至基体表面时，与基体的接触角约为101°，随着时间的增加，接触角迅速减小，10 s后涂料在基体表面流平固化。该现象说明涂料对陶瓷基体具有良好的润湿性，且干燥固化时间短，可以稳定附着于基体表面，有利于涂装工艺的实现。



（a）刚滴落　（b）5 s后　（c）10 s后

图3 涂料滴落至陶瓷基体表面图片

Fig. 3 Coating drops onto the surface of ceramic substrate

本文通过高温烧结实现涂层与基体的稳固结合。涂层的烧结过程包括脱水、造孔和熔融三个阶段。脱水阶段的温度为50~500 ℃，持续时间为0.5~4 h，此阶段通过缓慢加热去除涂层中的水分子，以防止后续高温阶段水分子剧烈气化导致涂层开裂。造孔阶段的温度为600~900 ℃，持续时间为0.5~2 h，此阶段$CaCO_3$受热分解生成CO_2气体，使涂层均匀分布微米级孔隙。熔融阶段温度为1 000~1 500 ℃，持续时间为0.5~2 h，此阶段SiO_2颗粒在高温环境下部分熔融，附着在Al_2O_3颗粒上，温度降低再结晶后形成牢固的联结网络，最后随炉冷却。根据上述原理设计如图4所示的烧结温度曲线，涂层与基体结合原理示意图如图5所示。

为了验证涂层与陶瓷基体的结合强度，对带有涂层的陶瓷试样进行了压缩试验。试样在压力作用下断

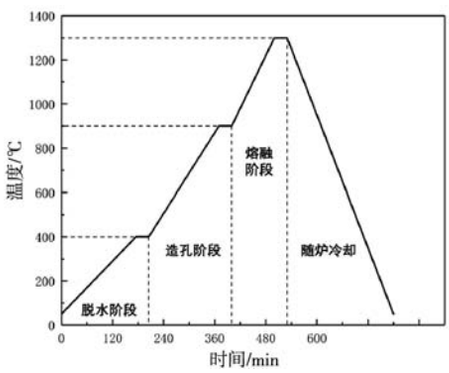


图4 烧结温度曲线

Fig. 4 Sintering temperature curve of the coating

裂后，得到的断口形貌如图6所示。试样受压断裂后，表面涂层与基体在结合界面处的开裂痕迹保持一致，在界面处没有开裂和脱落，说明涂层与基体具有良好的结合强度。

施加涂层后的陶瓷件或将用于高温金属液浇注，测试了涂层试样经过1 200~1 500 ℃高温处理后表面粗糙度值*Ra*的变化，结果如图7所示，高温烧结后陶瓷试样实物如图8所示。从图7和图8可以看出，采用自制涂层涂敷的陶瓷试样具有较稳定的粗糙度，表面精度大幅提高，在1 500 ℃保温30 min后维持稳定的层厚和强度，大幅降低陶瓷基体的表面粗糙度，涂层在高温烧结后也具有较好的稳定性。

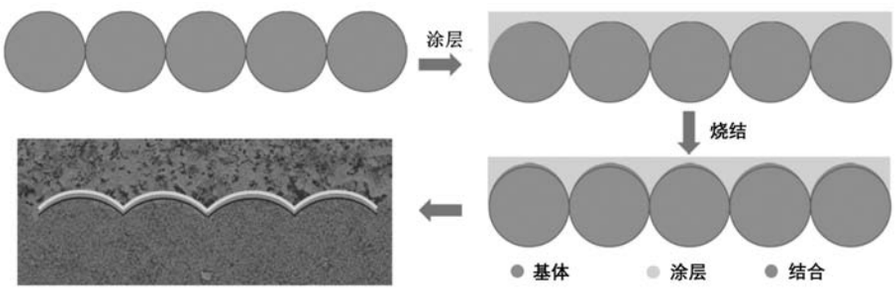
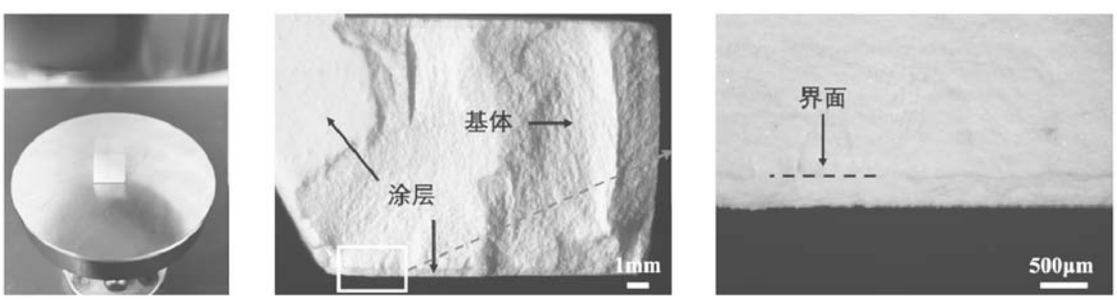


图5 涂层与基体烧结结合原理图

Fig. 5 Schematic diagram of sintering principle of coating and substrate



（a）压缩测试　（b）整体断面图　（b）断面局部放大图

图6 试样压缩及断裂后截面形貌

Fig. 6 Sectional view of the coating sample after compression fracture

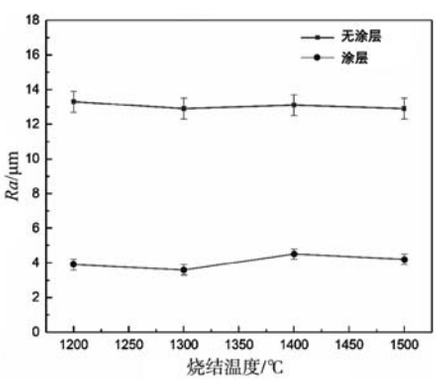


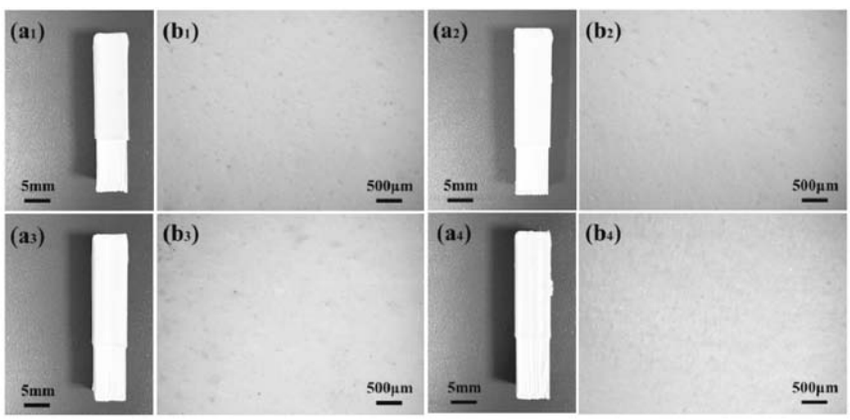
图7 不同烧结温度下涂层前后陶瓷的表面粗糙度

Fig. 7 Surface roughness of ceramics before and after coating at different sintering temperatures

2.2 涂层对陶瓷试样表面精度的影响

通过浆料挤出成形制备不同倾斜角度（15°、30°、45°、60°、75°、90°）的陶瓷试样，试样结构如图9所示。对试样施加表面涂层，经过1 300 ℃高温烧结后，试样表面粗糙度值（*Ra*）如图10所示。

从图10可以看出，对于不同倾斜角度的陶瓷试样，自制的表面涂层均显著降低了陶瓷试样表面*Ra*值。与初始试样相比，施加表面涂层后试样的*Ra*值降低了三到六倍。虽然施加涂层后试样的表面精度仍受初始基体表面精度的影响，但*Ra*值的波动范围可以稳定在±2 μm以内。从15°到90°，*Ra*值呈逐渐减小的趋势。对于倾角为90°的试样，其*Ra*值最小可达到3.6 μm。



（a）试样整体；（b）局部放大；（1）1 200 ℃；（2）1 300 ℃；（3）1 400 ℃；（4）1 500 ℃

图8 高温处理后涂层形貌

Fig. 8 Pictures of coating after high temperature test

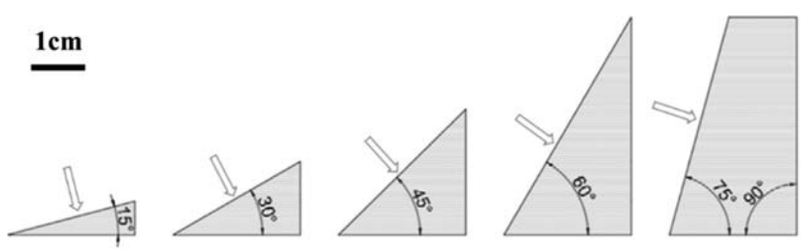


图9 不同倾斜角度的陶瓷试样模型

Fig. 9 Ceramic sample models with different inclination angles

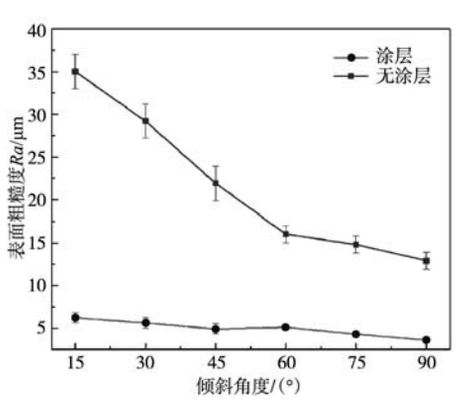


图10 涂层对不同倾角陶瓷试样表面粗糙度的影响

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

对于倾角为15°的试样，通过施加表面涂层可将其*Ra*值由35 μm降低至6 μm左右，显著改善陶瓷试样的表面粗糙度。

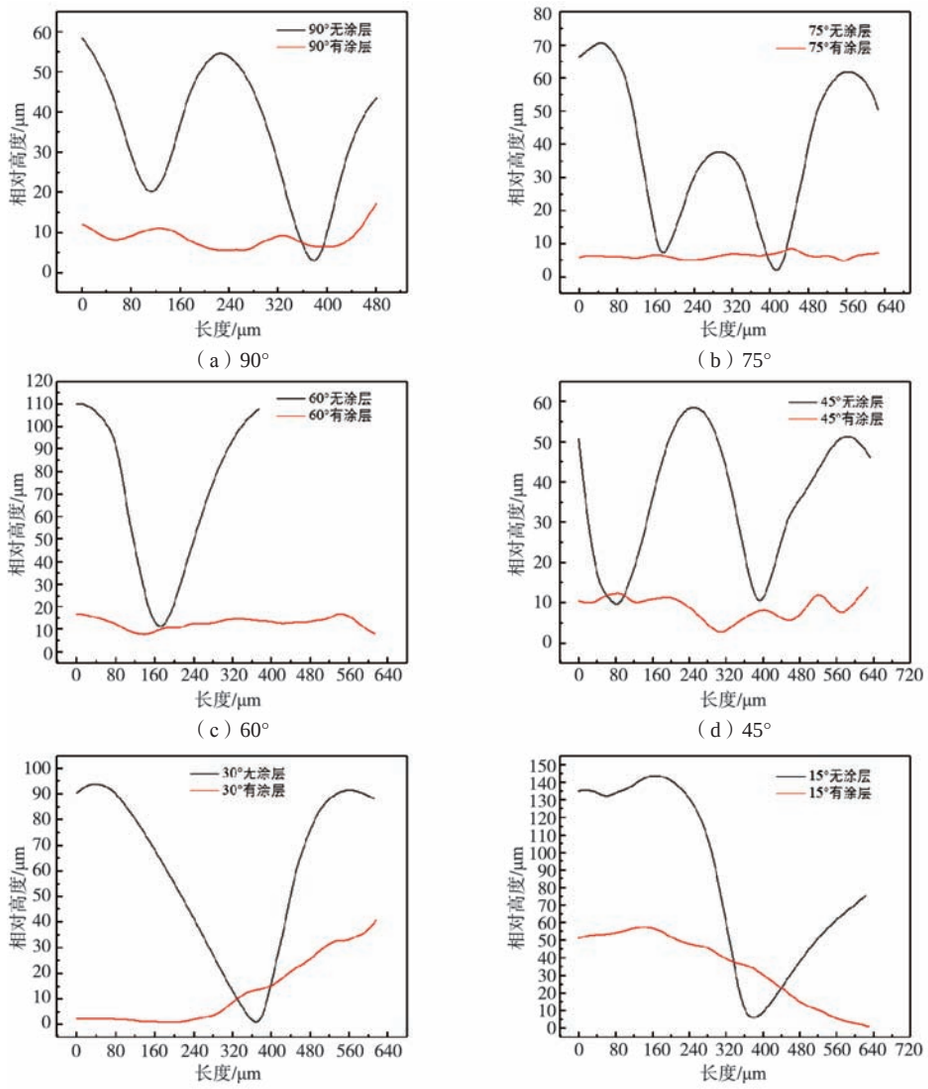
使用超景深三维显微镜测量了不同倾角陶瓷试样的表面轮廓线，并对施加涂层和未施加涂层的试样进行了对比，结果如图11所示。

从图11可以看出，在倾角15°~90°范围内，未施加涂层的陶瓷试样表面轮廓起伏明显，而施加涂层后陶瓷试样的表面轮廓线趋于平缓，这与图10的测试结果相符。另外，成形倾斜角度不同时，表面轮廓线的最高点与最低点之间的距离也符合图10趋势，即倾角越小，表面粗糙度越大。但当陶瓷基体表面轮廓起伏接近或超过涂层的厚度时，涂层对基体表面的优化效果变差。如图11（e）和（f）所示，当倾角分别为15°和30°时，逐层累加成形过程中，相邻两层间的水平偏移距离较大，导致涂层难以完全消除试样表面的层纹缺陷。

图12所示的超景深三维图像显示了涂层对陶瓷试样表面粗糙度的优化效果，另外图13显示了陶瓷基体与涂层界面处的形貌。从图13可以看出，陶瓷基体表面的波浪形层纹被涂层覆盖，涂层外侧则较为平缓，达到降低陶瓷试样表面粗糙度的效果。

2.3 涂层与基体的结合机理

为了研究涂层与挤出成形陶瓷的结合机理，对基体与涂层界面区域进行了EDS分析，如图14所示。从图14可以看出，涂层中的SiO_2并没有深入渗透到基材中，只是附着在基材表面。对涂层后陶瓷样品的横截面进行线扫描分析，结果如图15所示。从图15可以看出，涂层明显改善了浆料挤出成形试样的表面层纹效应，在成分测试中只存在铝和氧元素，涂层中有一定比例的Al_2O_3、SiO_2和$CaCO_3$，因此在成分测试中出现



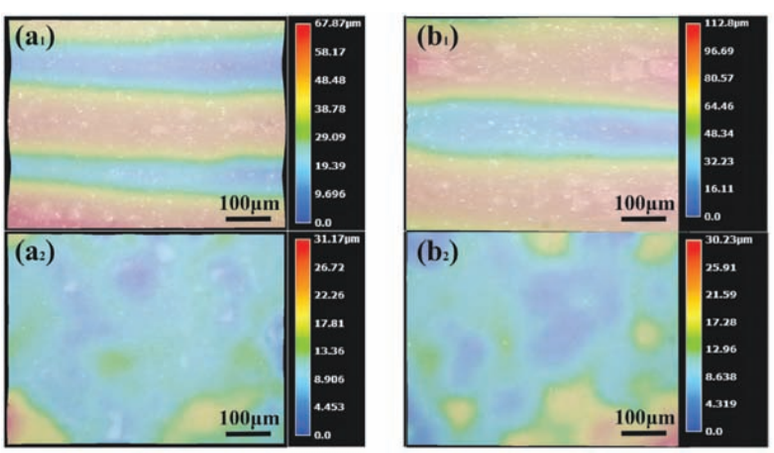
（a）90°　（b）75°

（c）60°　（d）45°

（e）30°　（f）15°

图11　不同倾角，有涂层和无涂层的陶瓷试样表面轮廓线

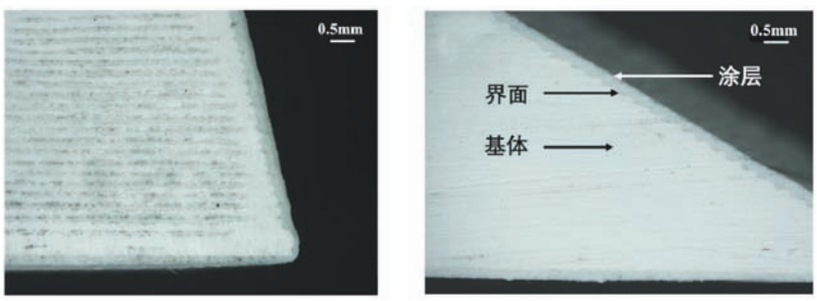
Fig. 11 Surface contour of Coated and uncoated ceramic sample with different inclination angles



（a）75°；（b）30°；（1）无涂层；（2）有涂层

图12　试样表面轮廓三维图像

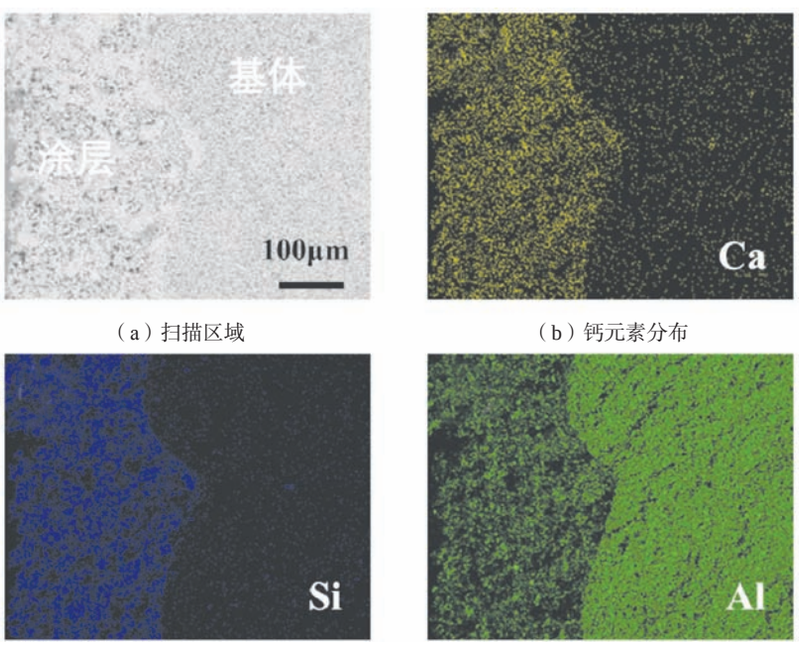
Fig. 12 Surface morphologies of ceramic sample after coating



（a）75°　　（b）30°

图13　涂层与基体的界面图

Fig. 13 Interface diagram of coating and substrate

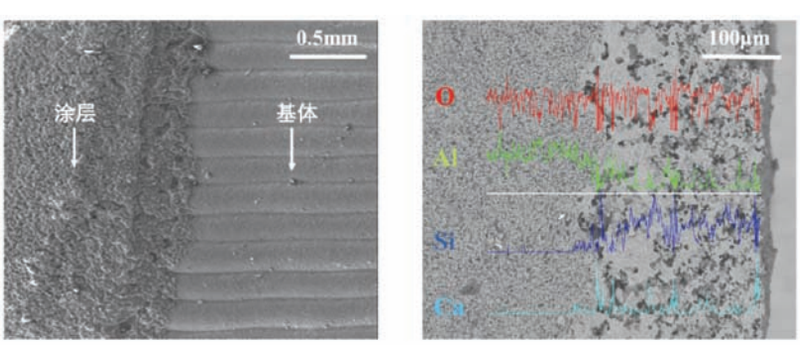


（a）扫描区域　　（b）钙元素分布

（c）硅元素分布　　（d）铝元素分布

图14　涂层与基体界面的面扫描分析

Fig. 14 Composition analysis of sample cross section



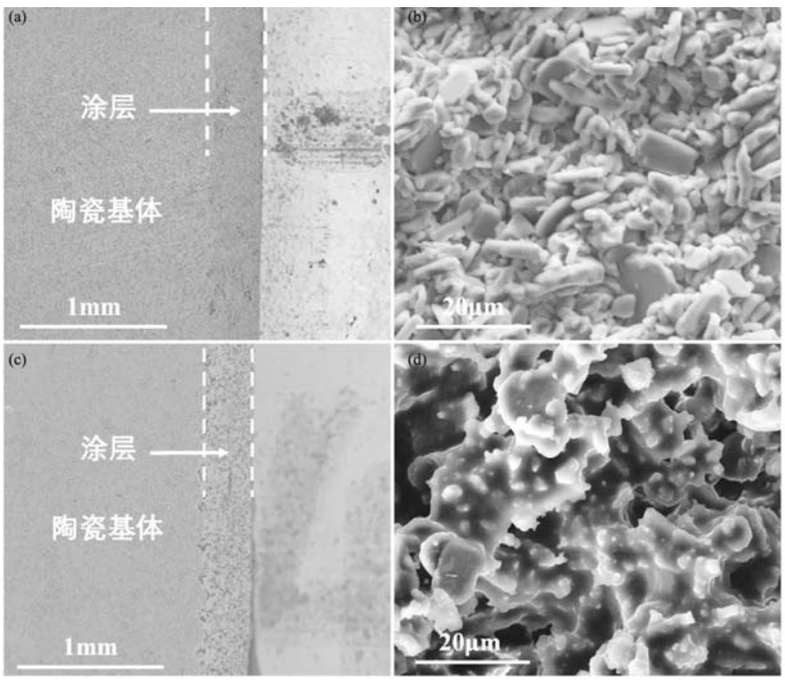
（a）表面　　（b）截面形貌及元素分析

图15　样品截面元素成分分析

Fig. 15 Element composition analysis of sample cross-section

了氧、铝、硅和钙四种元素。

图16为涂层处理后的陶瓷试样经1 300 ℃烧结前后试样外表面和截面的微观形貌。从图16可以看出，在高温烧结前，涂层中的Al_2O_3和SiO_2等粉末呈颗粒状，通过粘结剂相互粘结，此时涂层与基体间的结合强度较低。高温烧结过程中，Al_2O_3颗粒熔点较高充当稳定的耐火骨料；SiO_2颗粒熔点较低会部分熔融，渗入并包覆于Al_2O_3颗粒表面，待温度降低熔融的SiO_2重新凝



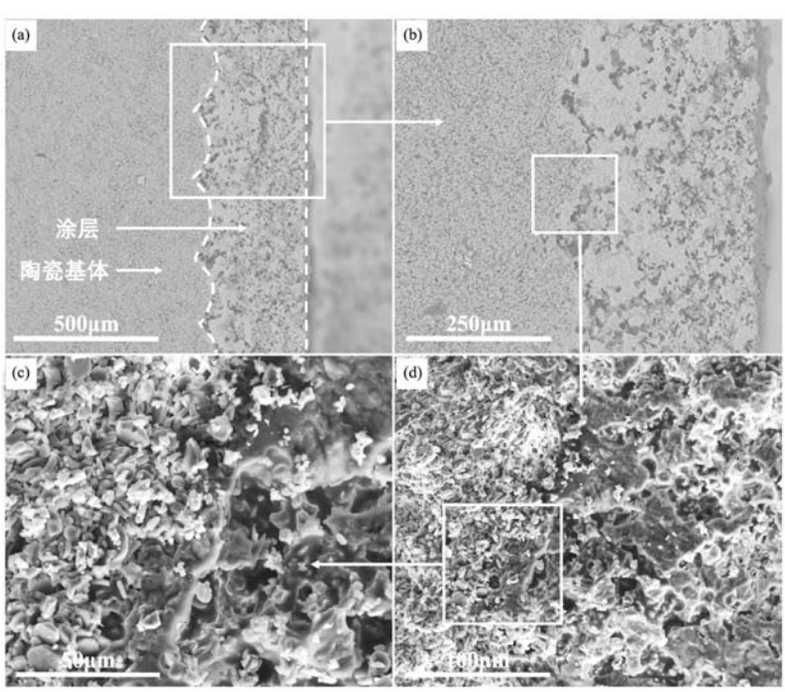
（a）烧结前；（b）烧结后；（1）截断面；（2）外表面

图16　烧结前后陶瓷试样的微观形貌

Fig. 16 Micromorphology of samples before and after sintering

固，与Al_2O_3颗粒形成稳定的网状连结。上述过程在涂层内部和与基体的交界处同时发生，即提高了涂层自身的强度，又与基体形成牢固的结合。另外，在高温烧结过程中，涂层中的$CaCO_3$会受热分解产生CO_2气体，在涂层中形成微小孔隙，这可以防止涂层在高温下过度收缩和变薄，有助于涂层保持稳定的厚度。

图17详细展示了高温烧结后涂层与基体结合部位的微观形貌。从图17（a）中可以看出，涂层覆盖至



（a）100倍；（b）200倍；（c）500倍；（d）1 000倍

图17　高温烧结后涂层与基体的结合界面

Fig. 17 Bonding between the coating and the substrate after sintering at high temperature

陶瓷基体表面的层纹上，形成非常平整的外表面。在更高的放大倍数下，可以看到涂层与基体之间没有明显的间隙，SiO_2不再呈颗粒状，而是填充包覆至Al_2O_3颗粒的间隙和表面。通过对微观形貌进行表征分析，验证了试验中涂层烧结机理的正确性以及涂层的合理性。

综上所述，自制涂层对提高浆料挤出成形陶瓷表面精度具有显著作用，图18展示了涂层对浆料挤出成形陶瓷型壳试样的实际涂覆效果，表3所示为施加涂层后陶瓷型壳试样的内外表面粗糙度值。从图18可以看出，涂层在陶瓷部件凸起和凹陷等部位过渡平滑，有效消除了陶瓷部件内外表面的阶梯状层纹，再结合表3结果可以看出，陶瓷型壳各部位的表面粗糙度值差距较小，且均降低至6.3 μm以下，获得了内外表面精度都较高的陶瓷型壳试样。

（a）模型　（b）无涂层试样　（c）有涂层试样

图18　涂层前后对陶瓷型壳试样表面粗糙度的影响

Fig. 18 Effect of coating on surface roughness of ceramic shell samples

表3　陶瓷型壳试样的表面粗糙度

Tab. 3 Surface roughness of ceramic shell sample

测量部位	表面粗糙度Ra/μm							
	1	2	3	4	5	6	7	8
涂层处理	4.2	4.3	5.1	3.6	3.8	4.6	4.1	3.3

3　结论

（1）开发了一种用于浆料挤出成形陶瓷件的表面涂层材料，该涂料与Al_2O_3陶瓷基体具有较好的润湿性；涂层具有良好的耐高温和抗裂性能，在1 200~1 500 ℃高温环境下，涂层不会出现开裂、脱落和收缩减薄等问题。

（2）采用表面涂层方法，浆料挤出成形陶瓷件的表面粗糙度Ra可达3.2~6.3 μm，基本达到熔模铸造对陶瓷型壳的精度要求。此外，涂层中的SiO_2颗粒在高温环境下部分熔融，包覆至Al_2O_3颗粒表面，温度降低后SiO_2重新凝固，与Al_2O_3颗粒形成复杂的网状交联结构，实现了涂层与基体稳定良好结合。

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] VENKAT Y，CHOUDARY K R，CHATTERJEE D，et al. Development of mullite-alumina ceramic shells for precision investment casting of single-crystal high-pressure turbine blades [J]. Ceramics. International，2022，48（19），28199–28206.

[4] KANYO J E，SCHAFF N 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 樊自田，杨力，唐世艳. 增材制造技术在铸造中的应用 [J]. 铸造，2022，71（1）：1–16.

[8] 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.

[9] AN X L，LIANG J J，LI J G，et al. Sample selection for models to represent ceramic cores fabricated by stereolithography three-dimensional printing [J]. Journal of Materials Science & Technology，2022，121：117–123.

[10] DASTJERDI A A，MOVAHHEDY M R，AKBARI J. Optimization of process parameters for reducing warpage in selected laser sintering of

polymer parts [J]. Additive Manufacturing，2017，18：285–294.
[11] RODRIGUEZ-GONZALEZ P，ZAPICO P，ROBLES-VALERO P E，et al. Novel post-processing procedure to enhance casting molds manufactured by binder jetting AM [J]. Additive Manufacturing，2022，59：12.
[12] 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.
[13] 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.
[14] HUANG S，YE C，ZHAO H，et al. Additive manufacturing of thin alumina ceramic cores using binder-jetting [J]. Additive Manufacturing，2019，29：100802.
[15] 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.
[16] FEILDEN E，BLANCA E G T，GIULIANI F，et al. Robocasting of structural ceramic parts with hydrogel inks [J]. Journal of the European Ceramic Society，2016，36（10）：2525–2533.
[17] XIONG H W，CHEN H H，ZHAO L Z，et al. SiC_w/SiC_p reinforced 3D-SiC ceramics using direct ink writing of polycarbosilane-based solution：Microstructure，composition and mechanical properties [J]. Journal of the European Ceramic Society，2019，39（8）：2648–2657.
[18] 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.
[19] 李亚运，司云晖，熊信柏，等. 陶瓷3D打印技术的研究与进展 [J]. 硅酸盐学报，2017，45（6）：793–805.
[20] 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.
[21] 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.
[22] DEL-MAZO-BARBARA L，GINEBRA M. Rheological characterisation of ceramic inks for 3D direct ink writing：a review [J]. Journal of the European Ceramic Society，2021，41（16）：18–33.
[23] TANG S，YANG L，LI G，et al. 3D printing of highly-loaded slurries via layered extrusion forming：parameters optimization and control [J]. Additive Manufacturing，2019，28：546–553.

Study on the Effect of Coating on the Surface Accuracy of Al_2O_3 Ceramic Shell via Material Extrusion 3D Printing

YANG Li, WANG Pan-long, TANG Shi-yan, YANG Zhi-yuan, LIU Jing-fei, XU Zi-zhen, FAN Zi-tian
(School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract:
The ceramic shell for investment casting is directly formed by material extrusion 3D printing, which can greatly simplify the process flow of investment casting. However, due to the “layer-by-layer superposition” forming characteristic, the surface of the prepared ceramic shell has obvious laminar effect, which leads to poor surface accuracy, and it is difficult to meet the surface accuracy requirements of investment casting. Therefore, a surface coating material and its coating process suitable for slurry extrusion forming of ceramic parts were developed in this paper. The influence and mechanism of coating on the surface accuracy of Al_2O_3-based ceramics formed by slurry extrusion were mainly studied. The coating was firmly bonded with the substrate and that the coating did not crack and fall off at 1500 ℃. The coating reduces the surface roughness Ra of ceramic parts from 12.5-30 μm to 3.2-6.3 μm, which greatly improves the surface accuracy of ceramic parts formed by slurry extrusion and basically meets the accuracy requirements of investment casting.

Key words:
material extrusion 3D printing; ceramic shell; investment casting; surface roughness; coating

（编辑：刘冬梅，ldm@foundryworld.com）