

陶瓷型芯型壳激光增材制造研究进展

孙冬^{1,2}, 陈双^{1,2}, 史玉升^{1,2*}, 闫春泽^{1,2}, 吴甲民^{1,2}, 文世峰^{1,2}

¹华中科技大学材料科学与工程学院材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

²增材制造陶瓷材料教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 空心涡轮叶片是燃气轮机热端的关键零部件,其结构十分复杂,制造难度极大。陶瓷型芯型壳是用于涡轮叶片铸造的重要部件,随着燃气轮机的热端工作温度逐渐升高,所需要的叶片结构也更加精细,传统的精密铸造工艺已经无法满足叶片快速升级换代的需求。激光增材制造技术无需模具,可以加速新产品的研发,缩短制造周期,满足个性化需求。目前可用于型芯型壳制造的激光增材制造技术主要有激光选区烧结和立体光刻两大类。主要介绍了这两大类激光增材制造技术在陶瓷型芯型壳制备方面的应用,从材料配方、素坯成形、后处理烧结等多个方面综述了当前国内外的最新研究进展,探讨了两类技术各自的优势、目前存在的问题以及未来发展的趋势。

关键词 激光技术; 增材制造; 空心涡轮叶片; 陶瓷型芯型壳; 激光选区烧结; 立体光刻

中图分类号 TQ174.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1202002

1 引言

燃气轮机是 21 世纪最具市场前景的第三代动力机械^[1],以天然气为清洁能源的重型燃气轮机具有效率高、排放低、调峰能力强等优点,在联合循环发电、舰船动力等方面有着广泛的应用,且在全球制造业中占有举足轻重的地位。涡轮叶片作为燃气轮机热端的关键零部件,在工作中需要承受高温燃气的冲击,这对涡轮叶片的金属质量和尺寸精度提出了极其严苛的要求^[2]。提升燃气轮机工作效率的关键在于提高涡轮热端的燃气温度,目前 F 级重型燃气轮机的燃气温度为 1400 °C, G/H/J 级燃气轮机的燃气温度已经达到 1500~1600 °C,未来随着工业需求的进一步增加,重型燃气轮机的燃气温度将达 1700 °C 以上^[3]。然而这一目标的实现不能仅仅依靠提高涡轮叶片材料的耐高温性能,改进叶片内部中空的气冷结构,提高冷却效率,已成为提升涡轮叶片性能的有效途径^[4]。因此,随着燃气轮机热端工作温度的逐渐升高,叶片结构变得更加精细、复杂,如图 1 所示。

空心叶片目前主要采用精密铸造技术成形,其

关键是制备出具有复杂结构的陶瓷型芯、型壳,如图 2 所示。型芯的传统制备工艺是:首先将陶瓷粉料与矿化剂、增塑剂(一般为各种蜡)混合后制成浆料,然后采用热压铸在适当的压力和温度下将浆料注入到金属的型芯模具中成形,经过脱模、校正后放入高温炉中焙烧强化,最后得到陶瓷型芯。型壳的制备需借助蜡型,蜡型的制作工艺是将制备好的型芯放入蜡型模具中,经过注蜡得到与最终叶片形状相同的蜡型。在蜡型上反复浸涂陶瓷浆料并撒砂干燥形成一定厚度的陶瓷外壳,然后使用高温蒸汽将型壳与型芯之间的蜡型去除,并对陶瓷外壳进行焙烧,最终留下的即为由型芯和型壳组合而成的型芯型壳一体件^[7-8]。

然而,随着燃气轮机工作温度的增高,叶片内腔的气冷结构变得更加复杂,陶瓷型芯型壳也向形状更复杂、尺寸更精细的方向发展^[4]。传统精密铸造法在制备复杂陶瓷型芯型壳时,工艺流程长、成本高、成品率低,且某些复杂结构无法成形,已无法满足空心叶片更新换代的需求,亟需新的技术来提升陶瓷型芯型壳的研发效率,加快空心叶片的迭代更新。

增材制造技术无需模具即可成形复杂零件,从

收稿日期: 2022-01-11; 修回日期: 2022-02-11; 录用日期: 2022-03-07

基金项目: 国家两机重大专项(2017-VII-0008-0102)

通信作者: *shiyusheng@hust.edu.cn

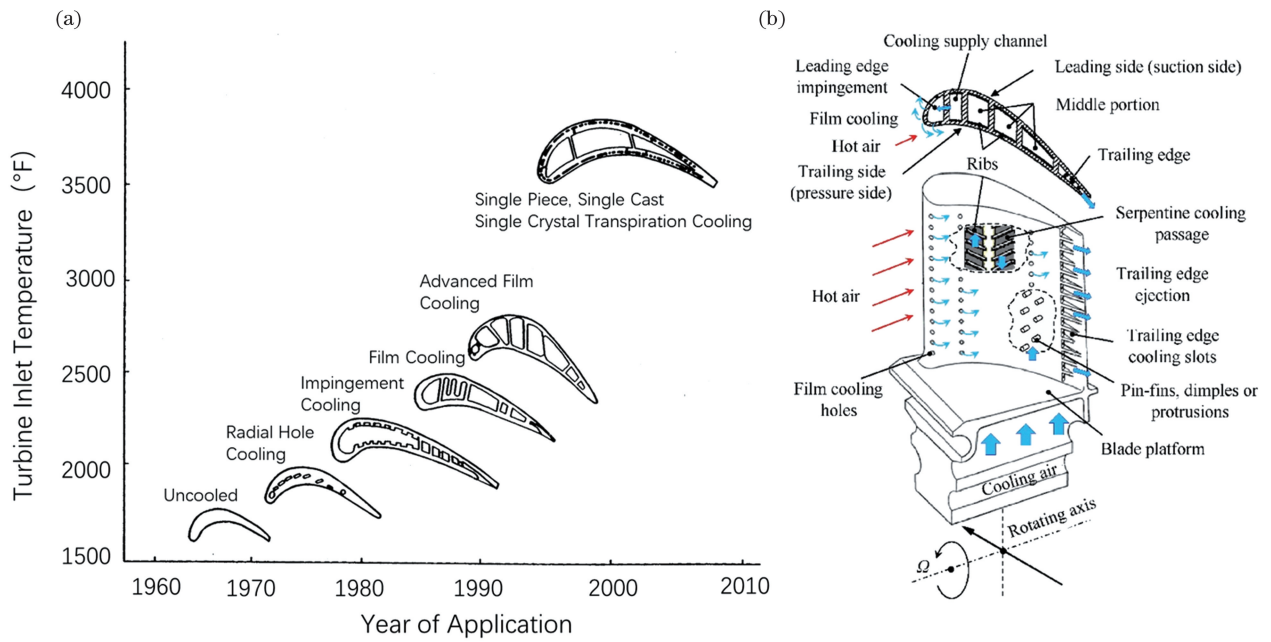


图 1 涡轮叶片内腔结构。(a) 涡轮叶片内腔结构的发展趋势^[5]；(b) 典型的燃气轮机涡轮叶片的内部气冷结构^[6]

Fig. 1 Internal structure of turbine blades. (a) Development trend of turbine blade internal structure^[5] ; (b) typical gas-cooled structure inside gas turbine blades^[6]

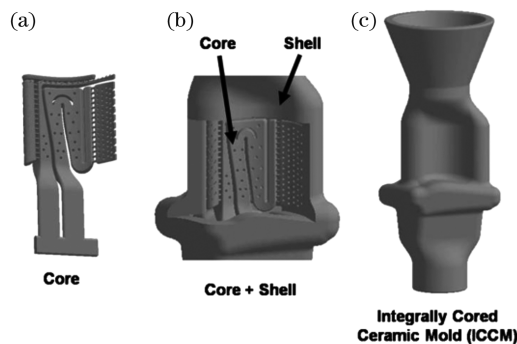


图 2 高温合金叶片铸造用陶瓷型芯型壳的设计^[9]。(a) 复杂冷却流道的陶瓷型芯；(b) 一体化陶瓷型芯型壳截面图；(c) 一体化陶瓷型芯型壳外形图

Fig. 2 Design of ceramic core/shell for superalloy airfoil^[9]. (a) Ceramic core for complex internal cooling passages; (b) cross-section of integrally cored ceramic mold; (c) profile of integrally cored ceramic mold

而简化工艺,尺寸精度更易于控制。该技术在航空发动机和燃气轮机关键零部件制造方面有着十分显著的优势^[10-12],有望加速新产品的研发,缩短制造周期。在国外,德国和英国率先将增材制造技术引入精密铸造过程中,解决了传统熔模铸造法工艺周期长、成本高等问题^[13]。而在国内,从 20 世纪 90 年代起,华中科技大学、西安交通大学、清华大学等单位在铸造用陶瓷型芯、型壳的增材制造技术上开展了大量的研究^[14]。目前,用于陶瓷型芯、型壳制备

的增材制造工艺主要为激光选区烧结 (Selective Laser Sintering, SLS) 和立体光刻 (Stereolithography Apparatus, SLA) 技术,因此本文聚焦于这两种技术在陶瓷型芯、型壳制备中的应用,从材料配制、增材制造工艺和后处理工艺方面综述了研究现状,探讨了两类技术各自的优势、目前存在的问题以及未来发展的趋势。

2 激光选区烧结

2.1 工艺原理及工艺路线

2.1.1 SLS 打印参数对型芯型壳成形的影响

SLS 是增材制造技术的重要分支之一,于 20 世纪 80 年代由 Carl 提出^[15]。该技术采用激光作为能源,所加工的原材料为粉末,其工作原理如图 3 所示,根据三维模型,选择地烧结固体粉末,逐层固化叠加成形三维实体零件。陶瓷材料由于其本身固有的特性,如熔点高、脆性高,单一的陶瓷材料直接成形极易产生裂纹,并且表面精度也无法满足型芯型壳的需求。因此,对于陶瓷型芯型壳的增材制造,通常采用的是间接成形工艺,以陶瓷颗粒材料作为基体材料,以环氧树脂、尼龙、酚醛树脂等低熔点材料作为黏结剂,在激光束扫过的区域,黏结剂受热熔融并与陶瓷粉末黏结,而在未被激光照射的区域,粉末仍然呈现为均匀且松散的状态。SLS 制备陶瓷型芯型壳的工艺主要包括两部分工序,即打印成形和后处理烧结。

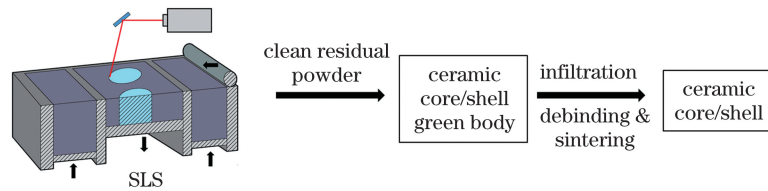
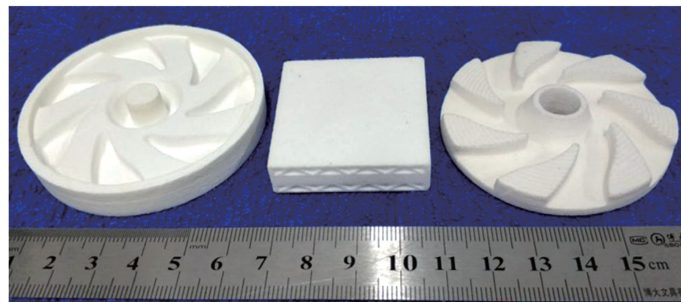


图 3 SLS 技术制备陶瓷型芯型壳

Fig. 3 Preparation of ceramic core/shell by SLS process

用于陶瓷 SLS 成形的一般为 CO_2 激光器或 Nd:YAG 激光器。SLS 打印参数包括激光功率、扫描速度、扫描间距、打印层厚等。陶瓷型芯型壳结构复杂,含有很多孔洞以及沟槽结构,最薄处的厚度仅有 1 mm 左右,因此素坯成形要求是在保证成形精度的前提下尽可能提升素坯的强度,以确保型芯型壳的素坯能够顺利从粉床中取出、清理、运送以及进行后续的烧结处理。在材料组分和配比确定的情况下,当激光功率越高,扫描速度越慢,扫描间距越小以及打印层厚越薄时,材料中的黏结剂熔化越充分,且紧密黏结陶瓷颗粒,打印件的素坯强度得到最大

程度的提升。但激光功率过高和扫描间距较低时,粉床的温度会过高,出现 XY 方向的过烧结现象,堵塞型芯与型壳之间的间隙。而层厚过小和扫描速度过慢时,打印效率降低,并且产生 Z 方向的过烧结现象。为了提升素坯件的打印质量,当前常用的方法是:在确定材料配方的前提下,通过设计正交实验以筛选优化打印参数^[16]。华中科技大学的史玉升团队通过优化 SLS 打印参数,实现了 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 陶瓷的精密成形,得到的陶瓷样品具有较小的收缩率 ($< 1\%$) 和光滑的表面形貌 (表面高度差 $< 170 \mu\text{m}$),如图 4 所示^[17]。

图 4 SLS 打印的 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 陶瓷件^[17]Fig. 4 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ceramic parts prepared by SLS^[17]

2.1.2 SLS 工艺存在的问题

在 SLS 成形型芯型壳的工艺路线中,当前最主要的问题在于很难实现多材料的同时打印。对于常规的 SLS 设备,打印材料都是事先装入供粉缸中,在打印过程中,每一层的打印都是辊子将粉末从供粉缸送到成形缸并铺平,然后进行激光扫描,而供粉缸一般只能装填单一的打印材料。虽然有研究人员通过在打印途中给供粉缸换粉的方法,实现了 Z 轴方向的多材料打印,但对于 X, Y 轴方向的多材料打印,需要实现同一平面内的精确送粉,目前仍然未出现成熟的技术方案。

2.2 材料配方对型芯型壳性能的影响

2.2.1 材料体系的基本组成

由于 SLS 的成形原理以及陶瓷材料本身固有特性的原因,单一陶瓷材料配方无法直接用于 SLS 成形,最终用于 SLS 成形的材料为多种粉末材料按照一

定比例混合而成。按照各组分的质量比例可以分为三大类材料,耐火基体材料、黏结剂以及改性添加剂。

耐火基体材料是混合粉末的主要成分,质量分数为 $80\% \sim 85\%$,基体材料主要有石英玻璃、电熔刚玉、锆英石等陶瓷粉末^[18],在高温条件下,这些材料的物理化学性质稳定、强度适中、不与金属发生反应,是用于制作型芯型壳的理想材料。用于 SLS 成形的基体材料都应该提前制备成微米级球形粉末^[19],方便逐层成形过程中用辊子或刮刀刮平或压实。陶瓷型芯型壳材料由于其功能特性,对粉末堆积密度有着特殊的要求,型芯型壳既要有足够的强度也要有一定的孔隙率,以保证在高温合金浇铸时不会产生变形以及浇铸完成后方便脱除^[20-21],以氧化铝基型芯为例,型芯的孔隙率保持在 $35\% \sim 50\%$ 比较合适^[22]。

适用于 SLS 成形的黏结剂需要具有熔点低、润

湿性好、液相黏度低等特点,在被激光熔化后具有较好的流动性。目前常用于 SLS 成形的黏结剂包括无机黏结剂(如 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 B_2O_3 等)^[23-24],有机黏结剂(如环氧树脂、尼龙、酚醛树脂等)^[25-27]和低熔点金属黏结剂(如 Al 粉等)。有机黏结剂一般可以通过高温脱脂炉分解脱除,而无机黏结剂和金属黏结剂无法通过热处理工艺完全去除,只能残留在基体中或与基体粉末材料发生反应形成新材料。

改性添加剂是为了弥补主要成分在制备工艺或使用性能方面的某些不足而特意添加的少量组分,一般质量分数在 5% 以下,但性能改善效果明显,通常有成孔剂、助熔剂、矿化剂、烧结收缩补偿剂等。吴笑非等^[28]将不同粒径莫来石粉加入到硅基陶瓷型芯中,发现添加粒径为 19 μm 的莫来石粉后陶瓷型芯表现出最优的综合性能。李鑫等^[29]将金属铝粉加入到硅基型芯中,在烧结过程中铝粉受热氧化形成 Al_2O_3 ,可以抑制陶瓷型芯的烧结收缩和铸造收缩,起到烧结收缩补偿剂的作用。Zhang 等^[30]向 Y_2O_3 型芯中添加 CaO,提升了型芯的溶出性。

2.2.2 当前材料体系存在的问题

在 SLS 成形陶瓷型芯型壳的工艺路线中,其材料问题主要集中在基体陶瓷材料粉末粒度的控制和黏结剂的添加含量上。粉末粒度的控制对素坯成形以及后面的烧结处理都至关重要,粒度控制既包括粉末粒径的控制也包括各个粒径粉末的质量分数的控制。在素坯成形阶段,粉末粒径越大,粉床的流动性越好,越利于打印过程中均匀铺粉,但过大的粉末粒径会导致素坯表面粗糙度变差,成形的素坯孔隙率提升,相应的素坯强度也会变低。一般而言,粉末的最大粒径取决于陶瓷型芯的形状复杂程度和断面尺寸大小,最大粒径一般要小于层厚的十分之一^[31]。当前用于 SLS 成形的主流配粉工艺是通过级配的方法将粒径不同的粉末按一定的比例进行混合,在陶瓷结构中,大颗粒粉末为主体形成基本的骨架,小颗粒粉末填充在骨架孔隙中,提升密度堆积,加固骨架。Yang 等^[32]通过调整 CaZrO_3 粉末的粒径比例,提升了粉末的烧结活性,从而提升了陶瓷型芯的致密度和抗弯强度。黏结剂的含量对素坯成形精度的影响巨大,当黏结剂添加量不足时,陶瓷基体颗粒间的黏结不完全,容易在坯体中产生开裂、分层等缺陷。但当黏结剂过量时,一方面在 SLS 成形过程中会释放大量的热量,出现翘曲、过固化等现象,影响素坯精度,需要在打印过程中实时监测零件温度场的变化,通过调整打印参数降低瞬时放热量,提

升素坯的成形精度^[33],另一方面在黏结剂去除和炉内烧结的过程中,会导致基体收缩较大,造成变形和开裂。因此,黏结剂用量的标准就是在不影响素坯强度和打印精度的前提下含量越小越好^[34]。

2.3 后处理工艺对型芯型壳性能的影响

SLS 成形的陶瓷型芯、型壳的后处理工艺包括清粉、浸渗、脱脂、烧结。清粉是后处理的第一个环节,型芯型壳的形状十分复杂,内部是含有冷却流道的内腔结构,并且结构十分狭小,需要高压气枪和高速吸尘器的配合使用才能将多余的粉末清理干净。

脱脂是为了去除素坯中的高分子黏结剂,一般采用热脱脂技术,可将黏结剂高温分解,为高温烧结作准备。影响脱脂效果的参数包括脱脂温度、升温速度和保温时间。脱脂温度取决于黏结剂的热分解温度,可以通过热重分析法(TGA)测得,脱脂温度一般设置略高于热分解温度,以保证黏结剂能够充分分解气化。由于黏结剂分解后基本上都是以气体的形式逸出,如果升温速度过快,则短时间内会产生大量气体,素坯极易产生微裂纹,这些微裂纹在烧结过程中会被放大,形成烧结缺陷^[35]。除此之外,还需要根据烧结件的尺寸结构严格控制升温速度以及各阶段的保温时间。

与传统工艺和其他增材制造工艺不同,由于 SLS 对粉床的流动性和堆积密度有限制,得到的素坯往往堆积密度较低,烧结活性不高;另一方面在脱脂过程中,环氧树脂分解后会留下孔隙(图 5),而由于脱脂温度相对较低,陶瓷基体材料在此阶段不会发生任何变化,无法形成烧结骨架,而孔隙的形成会降低素坯的强度,容易使型芯型壳件发生溃散和塌陷。为了保证素坯件在烧结过程中的基本形状和尺寸,通常会在脱脂前引入浸渗工艺,即往陶瓷素坯件中渗入溶胶,以增强陶瓷颗粒间的相互作用力,防止脱脂过程中产生崩溃的现象。在脱脂以及初次烧结完成后,也可以再次进行浸渗和烧结。通过填补陶瓷颗粒间的空隙,增加致密度,进一步提升强度。常用的浸渗液具有以下属性:在常温下为液态,在高温条件下可以转变为固态,且转变不可逆;浸渗液具有较好的流变性能,可以浸渗到陶瓷坯体的空隙中。常见的浸渗液包括硅溶胶、氧化铝溶胶和水玻璃等。Shahzad 等^[36]采用压力浸渗法将 Al_2O_3 悬浮液渗入到 SLS 成形的 Al_2O_3 陶瓷中,处理后的素坯密度从 34% 提升到 53.7%,烧结后的致密度也从 38.5% 提升到 64%。而 Lee 等^[37-38]分别采用 SiO_2 溶胶、 Al_2O_3 溶胶对 SLS 成形的 Al_2O_3 - $\text{Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$

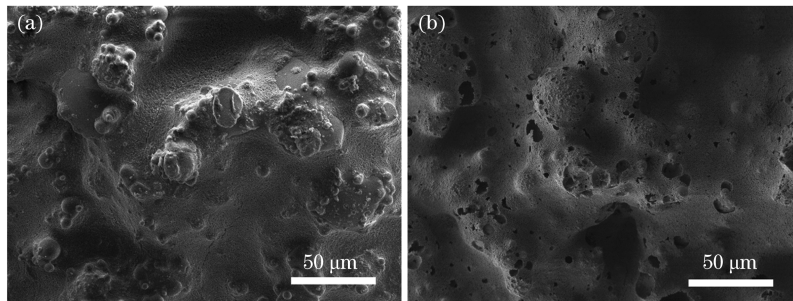


图 5 SLS 成形的氧化铝陶瓷零件表面形貌。(a)脱脂前;(b)脱脂后

Fig. 5 Surface morphology of alumina ceramic parts prepared by SLS. (a) Before debinding; (b) after debinding

进行浸渗,发现 SiO_2 溶剂由于在高温下与 Al_2O_3 反应生成了莫来石,得到的材料强度比单纯渗 Al_2O_3 的强度更高。Zheng 等^[39]研究了浸渗时间对 SiO_2 型芯性能的影响,通过真空浸渗法向氧化硅型芯浸渗纳米硅溶胶,通过参数优化最终得到合适的浸渗时间和烧结温度,得到的氧化硅型芯具有较低的线收缩率(0.6%)和优秀的高温抗蠕变性能(1550 °C下的蠕变量为 0.31 mm)。

高温烧结是将素坯在烧结炉中加热到低于其基本组分的熔点以下的某一温度时进行保温,使得陶瓷颗粒之间接触形成烧结颈,在体积扩散机制、表面扩散机制、蒸发凝聚机制、晶界扩散机制的联合作用下,烧结颈开始长大,而后经历连通孔洞闭合、孔洞圆化、孔洞收缩和致密化、孔洞粗化、晶粒长大等一系列过程,烧结成为多孔组织,此时烧结体已经具有一定的强度和密度。而与多数陶瓷材料对烧结的要求(即尽可能获得高的密度和强度)不同,陶瓷型芯壳对烧结的要求是在保证型芯变形尽可能小的前提下,兼顾烧结收缩、气孔率和烧结强度。目标是实现零收缩烧结,在保证足够强度的前提下,尽可能保留更多的气孔,以利于后续的金属浇铸和脱芯。魏倩等^[40]研究了烧结温度对氧化铝型壳性能的影响,研

究结果表明,适当提高烧结温度可以提高型芯壳的抗弯强度,但是过高的温度则会对高温蠕变性能和抗弯强度带来副作用。Pan 等^[41]讨论了保温时间对氧化铝陶瓷的影响,结果表明,随着保温时间的延长,层间间距减小,显气孔率下降。由于增材制造固有的各向异性,Z 轴方向的收缩率约为 X,Y 方向的 1.8 倍。

3 立体光刻

3.1 工艺原理及工艺路线

SLA 是一种以液态光敏材料作为成形材料的激光增材制造技术,具体成形原理为:材料在激光的辐照下发生化学反应转化为固态材料,进而逐层叠加成形^[42]。SLA 技术一般采用激光器配合振镜的方式进行扫描区域和路径的控制,激光光源一般采用 355~405 nm 的紫外波段,以点-线-面的形式完成对切片分层的曝光(图 6)。基于 SLA 技术,后续人们发展出了一种基于投影或掩模的数字光处理成形(Digital Light Processing, DLP)技术,可以实现面曝光成形。DLP 技术除了在光源和光路系统上与 SLA 技术有所区别外,其打印原材料和打印原理并无本质上的不同^[43],因此本文也将由 DLP 制备的陶瓷型芯壳列入讨论范围。

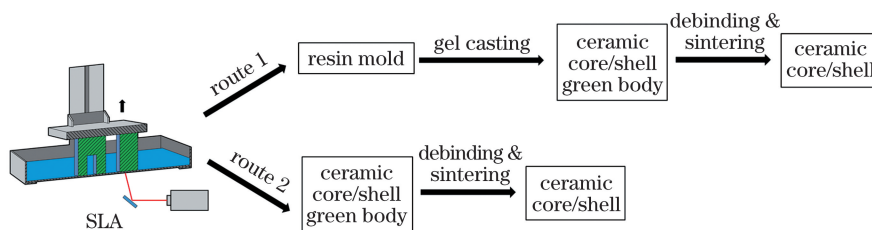


图 6 SLA 技术制备陶瓷型芯壳的两条主要工艺路线图

Fig. 6 Two main process routes for preparation of ceramic core/shell by SLA process

当前利用 SLA 技术制备陶瓷型芯壳主要有两条工艺路线。其一是首先采用 SLA 技术制造树脂模具,然后向树脂模具中浇铸陶瓷浆料以获得陶瓷型芯壳的素坯,随后对素坯进行烧结,得到所需

的型芯壳^[44]。其二是采用 SLA 技术,以光固化陶瓷浆料为原材料,直接成形得到陶瓷型芯壳素坯,经过脱脂烧结后,得到所需的型芯壳^[9]。两种工艺的具体工艺路线如图 6 所示。

3.1.1 SLA 打印参数对型芯型壳成形的影响

SLA 的打印参数与 SLS 类似,包括激光功率、扫描速度、扫描间距及打印层厚等,其中与激光相关的参数对打印的影响最大。激光在光敏树脂或者光固化陶瓷浆料中的入射强度与入射深度的关系服从比尔-朗伯定律^[45-46],即入射光强度随入射深度呈指数衰减。且由于光敏树脂与陶瓷粉体存在折射率差异,固-液界面处会对入射光产生散射,两者折射率差异越大,散射现象就越严重。对于 XY 方向的成形精度,SLA 设备的激光光斑尺寸一般为 0.06~0.12 mm,但考虑到陶瓷粉体对激光有散射作用,成形的最小线宽一般为 0.1~0.2 mm,对于 Z 方向,其成形精度一般由切片层厚决定,而切片层厚一般选取为 0.05~0.10 mm,均能满足高精度型芯/型壳的制备需求。SLA 技术在整体上具有比 SLS 技术更高的成形精度,且能够获得表面质量更好的坯体^[47],因此在制备应用于浇铸小尺寸高精度叶片的型芯型壳上更具优势。

3.1.2 SLA 工艺存在的问题

从成形原理的角度上来看,SLA+凝胶注模的工艺是先打印树脂模具,然后再注入陶瓷浆料进行成形。使用这种工艺可以在不同的区域注入不同材料组分的陶瓷浆料,从而实现多材料的成形,但依然存在着一个重大缺陷。随着型芯结构日趋复杂化和精细化,树脂模具中会出现很多悬臂结构,且多材料的分区流道设计也会增加树脂模具的复杂程度,而这些复杂结构要想通过 SLA 工艺成形,打印支撑结构是必不可少的。对于复杂的型芯型壳一体件树脂模具,内部的支撑结构是很难在后期进行清除的,因此当型芯型壳的结构更加精细复杂时,SLA+凝胶注模的工艺必然会遇到瓶颈。

而对于 SLA 直接成形型芯型壳工艺,其遇到的问题与 SLS 直接成形类似,在处理多材料的打印问题上仍然有很大的技术难度,当前华中科技大学的团队提出采用多液槽的方式进行打印,但打印过程中更换液槽会造成打印零件将其他液槽的浆料带入新液槽,从而产生浆料污染的问题,如何解决更换材料时的污染问题是 SLA 直接成形多材料型芯型壳的技术难点。

3.2 SLA 材料配方对型芯型壳性能的影响

3.2.1 材料体系的基本组成

在材料的种类上,由于传统陶瓷型芯型壳所使用的大多为氧化物陶瓷,SLA 所能成形的陶瓷种类与传统的型芯型壳材料区别不大,大部分传统型芯

型壳材料基本上都能通过 SLA 技术进行成形,但仍需要针对 SLA 技术的特性进行一定的调整。目前 SLA 所成形的型芯型壳陶瓷材料主要包括氧化硅和氧化铝及相应的复合材料。

由于工艺路线不同,具体涉及的材料组分及配方也有很大区别。在 SLA 成形树脂模具结合陶瓷凝胶注模的工艺路线中,SLA 成形材料一般为商业化的光敏树脂,经过多年的发展,其配方和性能已经十分成熟,根据不同性能要求可选择不同的树脂材料。用于浇铸的陶瓷浆料体系一般为凝胶注模体系,该工艺最早由美国橡树岭实验室提出,具体原理为采用浆料中的有机单体的聚合和交联反应实现浆料的固化,进而使陶瓷粉体能够被原地“黏结”在固化的浆料中,经过后续的脱脂和烧结处理得到所需的陶瓷件。根据溶剂的类型,凝胶注模浆料可分为水基浆料和溶剂基浆料,在型芯型壳的成形中一般采用水基浆料,而溶剂基浆料一般用于氯化铝等对水敏感的陶瓷体系中^[48]。

针对第二种工艺路线,即 SLA 直接成形陶瓷型芯型壳坯体,所需要的原材料是具有光敏特性的光固化陶瓷浆料,根据溶剂种类的不同也可以分为水基浆料和树脂基的浆料。水基浆料一般以水或水基溶液(如硅溶胶等)作为主体溶剂,加入水溶性有机单体(如丙烯酸胺)、交联剂(如 N,N'-亚甲基双丙烯酰胺)和水基光引发剂等使其具有光固化特性^[49-50]。树脂基浆料的体系可分为丙烯酸酯和环氧树脂及其复合体系,目前丙烯酸酯体系应用较为广泛,各类丙烯酸酯单体如 1,6-己二醇二丙烯酸酯(HDDA)、聚乙二醇二丙烯酸酯(PEGDA)、三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)等是常见的原材料。水基浆料的优点在于有机物的含量较低,在脱脂过程中不容易因为有机物分解过快而出现坯体开裂,缺点是坯体在成形后需要进行干燥,而干燥工艺不当时容易导致坯体变形。树脂基浆料的固化性能好,坯体的力学强度高且不易变形,缺点则是由于有机物含量高,在脱脂过程中坯体易开裂,因此难以制备壁厚较大的型芯型壳。

3.2.2 当前材料体系存在的问题

在 SLA 成形树脂模具结合陶瓷凝胶注模的工艺路线中,其主要的材料问题集中在凝胶注模工艺中。目前,凝胶注模普遍采用自由基聚合的体系,存在有机单体具有毒性和氧阻聚等问题。常用的单体丙烯酸胺具有神经毒性,对操作人员的健康有着较大的威胁。虽然也可以采用丙烯酸羟乙酯^[51]、

N,N-二甲基丙烯酰胺(DMAA)/N,N-亚甲基双丙烯酰胺(MBAM)^[52]、甲基丙烯酰胺(MAM)/MBAM^[53]、天然多糖等无毒或低毒凝胶注模体系,但在成本和效果上仍与传统丙烯酰胺体系有较大差距,难以推广应用。此外,氧阻聚也是目前凝胶注模较难解决的问题^[54-57]。氧阻聚在凝胶注模中的常见表现为表面掉皮,影响陶瓷素坯的质量。加入聚乙二醇(PEG)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚丙烯酰胺(PAM)、聚环氧乙烷(PEO)等水溶性高分子助剂能够缓解氧阻聚导致的表面掉皮现象^[58]。目前在采用凝胶注模技术制备陶瓷型芯型壳的实践中,避免氧阻聚的较好方式为真空浇铸^[59],真空浇铸不仅有利于缓解氧阻聚问题,同时也有利于陶瓷浆料的充型^[60-61],避免了细小结构无法有效充型所产生的缺陷。

在 SLA 直接成形陶瓷型芯型壳的工艺路线中,其材料问题主要集中在陶瓷光固化浆料的性能上。不同于采用亚微米级或纳米级粉体制备的传统光固化浆料,面向型芯型壳的光固化浆料一般要求采用粒径较大的粉体,并且浆料也需要维持一定的固含量,以保障烧结后的型芯型壳具有合适的孔隙率及力学性能。一般来说,陶瓷浆料中的固含量越高,越有利于减小烧结收缩和提升烧结后陶瓷的性能^[62],然而当浆料固含量到达一定值后,浆料黏度随固含量的增加而急剧上升^[63],对成形和后处理带来不利的影响,因此需要在固含量和浆料黏度这两个方面进行协调。常用的陶瓷浆料固含量(体积分数)为 40%~60%,可以向浆料中添加分散剂以降低陶瓷

浆料的黏度^[64],常见的分散剂包括柠檬酸铵、聚丙烯酸盐(如聚丙烯酸钠和聚丙烯酸铵)、季铵盐、硅烷偶联剂及各种高分子分散剂(超分散剂)等。除了固含量之外,粉体粒径对浆料的稳定性也有很大影响,根据斯托克斯定律^[65],粉体的粒径越大,在重力作用下越容易发生沉降和偏析,导致浆料的稳定性变差。Bae 等^[66-67]对光固化浆料中的偏析现象进行了研究,并提出采用“偏析系数(β)”来表示浆料偏析的严重程度, β 大于 1 代表严重偏析, β 小于 1 代表少量或无偏析。他们认为当每层的成形时间小于沉降时间时,可以获得偏析程度低的坯体,且对于偏析系数低的体系($\beta=0.1$),其偏析程度受到粉体粒径(材料因素)、激光功率(设备因素)和分层厚度(设计因素)的影响(图 7)。除此之外,Chen 等^[68]的研究表明,经过级配的粉体制备的浆料黏度较小,在相同固含量下,浆料黏度随着细粉含量的提高而下降,当粗粉与细粉的质量比为 7:3 时达到最小值。除了光固化浆料以外,不具有自发流动性的陶瓷膏体也可以作为成形的原材料。采用膏体原材料可以在本质上解决浆料沉淀的难题,但膏体在制备、使用和清理^[69]等方面的易用性较差,且需要专门的成形装备来满足高黏度膏体涂布的要求^[70],打印过程中气泡难以完全排出,较低的刮刀移动速度也会降低成形效率,这些都制约了陶瓷膏体的应用。因此,如何在保证浆料高固含量及成形效果的前提下提高浆料成形和储存的稳定性,对于成形装备和材料而言都是需要解决的难题。

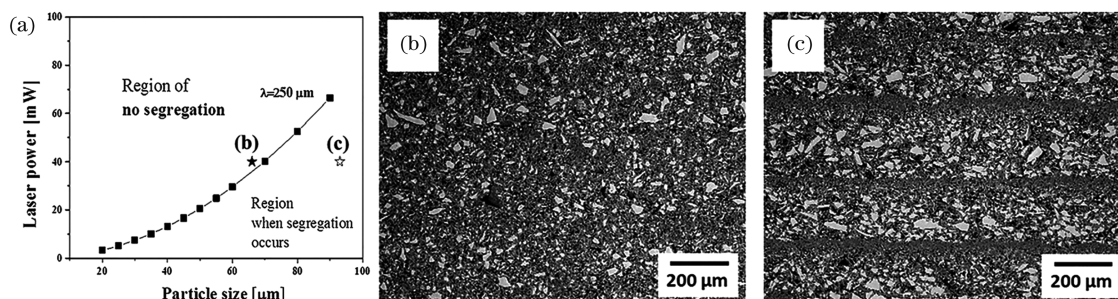


图 7 粒度分布对 SLA 制备的素坯分层偏析的影响^[66]。(a)产生分层偏析和无分层偏析的区域;(b)双峰分布的粉末;(c)粗粉

Fig. 7 Effect of particle size distribution on segregation in layers of green body fabricated by SLA process^[66].

(a) Regions representing segregation and no segregation in layers; (b) bimodal powder; (c) coarse powder

3.3 后处理工艺对型芯型壳性能的影响

3.3.1 SLA 成形树脂模具结合陶瓷凝胶注模

该工艺路线具体涉及树脂模具的后处理和凝胶注模得到的陶瓷坯体的后处理,其难点主要在于如何处理凝胶注模得到的陶瓷坯体。尽管凝胶注模工

艺中的有机物含量较低,在脱脂过程中产生的气体量相对较小,坯体不容易出现变形和开裂,但在从“湿坯”变为“干坯”的过程中,如何避免坯体的变形是需要考虑的问题,即干燥过程的控制非常重要。上文中提到,凝胶注模的浆料固化后,其坯体(湿坯)

经过加成和交联反应形成高分子网络黏结陶瓷粉体,其中包含大量不参与反应的溶剂相。为了使这些溶剂相能够从湿坯中可控脱出,常见方法是采用控温控湿、干燥剂(包括固体干燥剂和液体干燥剂)以及冷冻干燥等^[71-74]。尽管采用控温控湿或使用合适的干燥剂可以使坯体在干燥过程中的变形均匀且可控,但是在干燥过程中坯体仍会产生一定的收缩,在树脂硬质模具的阻碍下会出现开裂^[44]。冷冻干燥是将湿坯先进行冷冻处理,使湿坯中的溶剂相凝

固,然后再抽真空使溶剂相升华去除。由于冷冻干燥过程中不存在毛细力的作用,坯体在干燥过程中不会因为毛细力而收缩^[44,75-76],因此,冷冻干燥在凝胶注模陶瓷型芯/型壳的干燥中具有很大优势。西安交通大学基于该技术路线进行了深入研究,将坯体的干燥收缩控制为 0.2%~0.3%,有效避免了坯体在干燥过程中因收缩过大而出现开裂(图 8)。目前研究者基于冷冻干燥技术已经成功制备出完整无缺陷的陶瓷型芯型壳一体件,并进行了金属浇铸验证(图 9)。

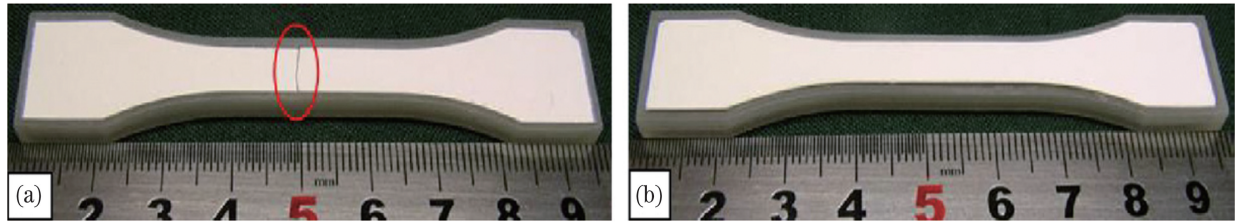


图 8 不同干燥条件下的坯体^[44]。(a)空气下干燥;(b)冷冻干燥

Fig. 8 Green bodies under different drying conditions^[44]. (a) Air drying; (b) freeze drying

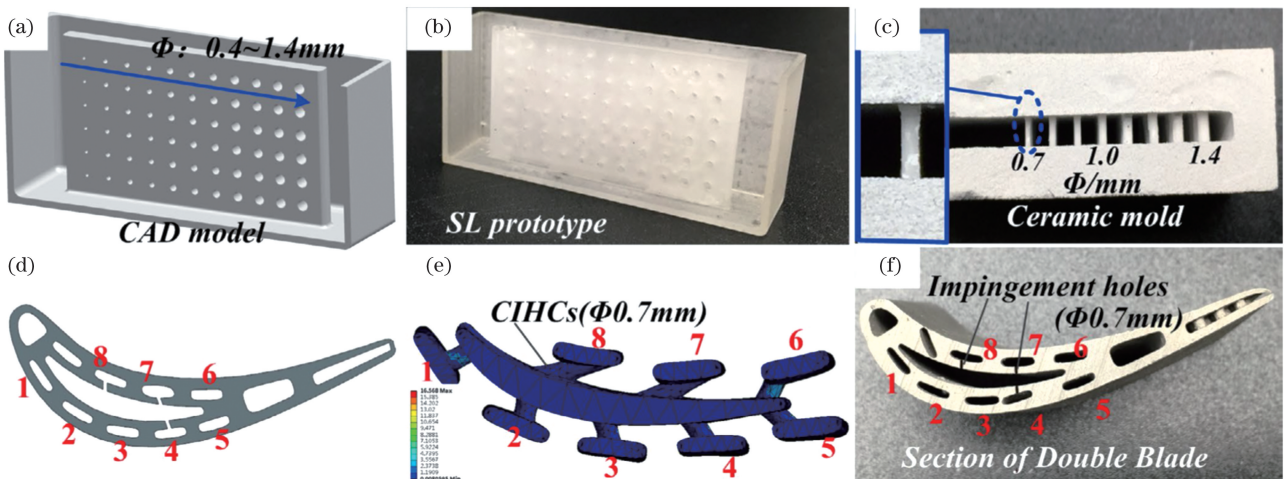


图 9 SLA+凝胶注模法制备陶瓷型芯型壳^[77]。(a)简化的含有冲击孔的陶瓷型芯 CAD 模型;(b)SLA 制备的含有冲击孔的陶瓷型芯原型;(c)含有冲击孔的陶瓷型芯;(d)双层壁叶片截面图;(e)有限元模拟的双层壁陶瓷型芯的变形;(f)制备的金属双层壁叶片截面

Fig. 9 Ceramic shell/core fabricated by SLA+gel casting^[77]. (a) CAD model of simplified ceramic impingement hole cores (CIHCs); (b) CIHCs prototype fabricated by SLA process; (c) CIHCs mold; (d) cross-section of double wall blade; (e) deformation of double-wall ceramic core from finite element simulation; (f) cross-section of fabricated metal double-wall blade

通过冷冻干燥得到的干坯还需要经过脱脂和烧结(也称为焙烧)处理才能获得最终的陶瓷型芯型壳。由于凝胶注模成形的陶瓷干坯中的有机物的含量相对较低,因此在脱脂过程中不容易产生微裂纹等缺陷。常用的脱脂工艺是在空气气氛下进行,以较低的升温速率(0.5~3 °C/min)升至 500~600 °C,然后保温 2 h,以保证有机物的完全去除。烧结工艺根据材料的不同会采用不同的烧结温度,氧化硅

基材料一般在 1200 °C 左右进行烧结,而氧化铝基材料一般在 1500~1600 °C 温度下进行烧结。

3.3.2 SLA 直接成形陶瓷型芯型壳坯体

SLA 成形的陶瓷素坯由陶瓷粉体及有机黏结剂(光敏树脂)构成,其后处理工艺包括脱脂和烧结处理,与凝胶注模成形的干坯以及 SLS 成形的素坯类似。但 SLA 成形的素坯中的有机物含量较高,且素坯孔隙率低,在脱脂过程中有机物分解产生的气

体难以排出,因此一般采用需要采用很低的升温速率来进行脱脂处理,必要时还要进行分阶段的保温^[78]。此外,由于增材制造逐层成形的特性,素坯的层间结合处往往是素坯中最脆弱的位置,因此脱脂产生的缺陷一般以层间裂纹为主,在应力较大时也会产生贯穿的裂纹^[79-80]。

在实际的处理中,坯体的壁厚越大、截面突变程度越大,越容易在脱脂过程中产生缺陷。较低的升温速率虽然可以减少产生缺陷的可能,但也会严重降低生产效率,一味地降低升温速率在实际生产过程中是不可行的。因此,高效地进行脱脂是 SLA 制备陶瓷型芯型壳亟待攻克的难题。对于脱脂缺陷的抑制,学者们进行了多种尝试。一种较为有效的方法是进行分步式的脱脂处理^[81-82],一般是先在真空或者惰性气氛下进行碳化处理,再在空气气氛下烧

除残碳。由于不同气氛下有机物裂解的产物有所不同,在惰性气氛下不会直接产生大量的气体产物,因此分步脱脂处理时的坯体损坏率较低。

在烧结方面,由于光固化陶瓷浆料中所使用的陶瓷粉体粒径一般小于传统型芯型壳用陶瓷粉体的粒径,粉体具有更大的比表面积和更好的烧结活性,因此需要适当调整对应的烧结温度,以确保烧结后的陶瓷型芯型壳具有合适的孔隙率及力学性能。Bae 等^[9]采用 SLA 技术成形的氧化硅型芯型壳一体件的烧结线收缩率为 10.7%,烧结后的一体件如图 10 所示。Li 等^[83]通过降低氧化铝型芯的烧结温度,获得了较低的烧结收缩率,在真空 1150 °C 下烧结线收缩率可低至 2.3%,2.4%,5.3%(分别对应 X、Y、Z 方向),烧结后的陶瓷抗弯强度为 33.7 MPa,满足陶瓷型芯型壳所需的低收缩率和强度。

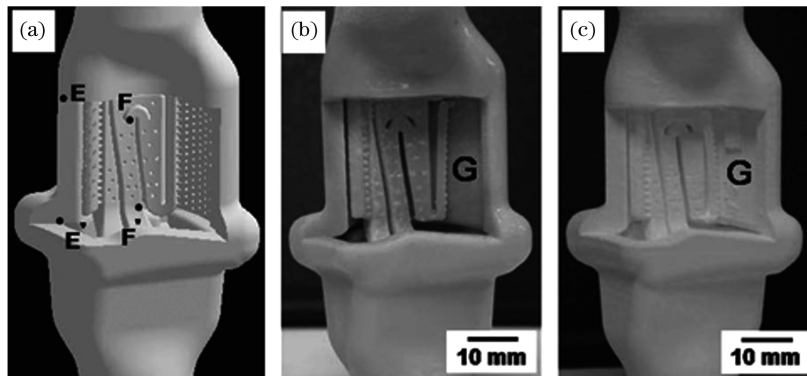


图 10 具有复杂空腔结构的空心叶片用陶瓷型芯型壳一体件^[9]。(a)三维模型;(b)素坯;(c)无裂纹的烧结型芯型壳

Fig. 10 Integrally cored ceramic mold for turbine airfoil with complex internal hollow structure^[9]. (a) Three-dimensional model; (b) green body; (c) sintered body without any cracks

需要指出的是,传统工艺以及 SLS 工艺成形的型芯型壳的烧结收缩率一般较小($<2\%$),而目前光固化制备的型芯型壳因为材料组分和烧结工艺上的差异,其烧结收缩率一般较大^[67,84-85]。较大的烧结收缩率一方面不利于保证型芯型壳的尺寸精度和形状精度,另一方面意味着在成形素坯时需要预留更大的补偿量,降低了设备成形空间的利用率和成形效率,增加的壁厚也给脱脂工艺带来更大的风险,导致最终成品率下降。此外,还有一点值得注意的是,由于光固化成形逐层成形的特性,层间结合程度弱于层内结合程度,素坯的烧结收缩存在各向异性,沿成形方向(Z轴)的收缩往往大于沿成形平面(X/Y轴)的收缩^[86],其倍数可达 1.5~2.0,因此需要在成形前提前设计好补偿。烧结收缩的各向异性会在一定程度上降低设备成形空间的利用效率,且会增加成形所需的时间,但目前尚无良

好的解决办法。

除了基本的脱脂和烧结处理外,还可以对型芯型壳进行强化处理,以提升型芯型壳的性能。常见的强化方法包括浸渗纳米溶胶(如硅溶胶、铝溶胶和钇溶胶等)、化学气相浸渗等。徐东阳等^[87]采用真空压力浸渗钇溶胶对凝胶注模的氧化铝预烧型芯进行处理,经过三次的钇溶胶浸渗处理后,在型芯内部生成了抗高温蠕变性能优良的钇铝石榴石相,因此型芯的软化点超过 1550 °C,显气孔率也保持在 40%以上,有利于后续的脱芯工序。刘涛等^[88]采用硅溶胶对氧化铝陶瓷型芯进行了强化处理,生成了莫来石网状结构,使得型芯的 1500 °C 高温强度可达 10 MPa 左右,满足空心涡轮叶片定向凝固过程对型芯高温强度的要求。

表面处理也是一种可选的后处理手段,其目的是减轻增材制造工艺带来的台阶效应,使得最终的

陶瓷型芯型壳具有更好的表面粗糙度。鲁中良等^[89]报道了一种采用液态石蜡对光固化树脂模具进行覆膜以改善其表面粗糙度的方法,表面粗糙度从 8~10 μm 降低至 1 μm ,且不会破坏模具内部细小的结构。魏挺等^[90]采用氧化硅无机浆料对脱脂后的硅基型芯素坯进行浸渗提拉处理,利用陶瓷浆料浸渗过程中优先在表面积突变处吸附的物理特性,削弱了逐层制造引起的台阶效应,有效改善了型芯的表面粗糙度。

4 传统工艺与激光增材制造工艺制备的型芯型壳性能对比

型芯型壳的性能一直是人们关注的重点。一般来说,陶瓷型芯型壳须具有以下性能:1)较低的烧结

收缩率,以保证型芯型壳的尺寸精度和形位精度;2)适当的室温力学性能,以保证搬运和操作过程中型芯型壳不会损坏;3)足够的高温性能,以保证铸造过程中型芯型壳不会破裂和变形,且具有适当的退让性;4)合适的孔隙率,以保证铸造时的透气性以及铸造后的脱芯性能。

采用激光增材制造技术制备与传统工艺制备的陶瓷型芯型壳材料的典型性能汇总于表 1 中。从表 1 中可以看出,由于采用了高固含量的浆料和与传统铸型材料粒径接近的陶瓷粉体,SLA 成形树脂模具+凝胶注模制备的型芯型壳性能与传统工艺下的相当,经过添加强化相或者经过浸渗强化处理后,SLA 和 SLS 直接成形的型芯型壳性能甚至能超过传统型芯材料的性能。在烧结收缩率方面,SLA 由

表 1 传统工艺与激光增材制造工艺得到的陶瓷型芯型壳的典型性能

Table 1 Typical properties of ceramic cores and shells prepared by conventional processes and laser additive manufacturing processes

Method	Feedstock	Sintering temperature / $^{\circ}\text{C}$	Sintering shrinkage	Porosity / %	Strength@room temperature /MPa	Strength /MPa (1550 $^{\circ}\text{C}$)	Reference No.
Hot die casting	Al_2O_3 (AC-1)	1450	2.1%	32-36	9.0-12.0	5.0-7.0	[7]
Hot die casting	Al_2O_3 (AC-2)	1450	<1%	-	9.0-11.0	6.0-8.0	[8]
SLA +gel casting	Al_2O_3	1550	-	41.35	-	4.61	[87]
SLA +gel casting	Al_2O_3	1400	0.36%	32.6	-	20.4	[91]
SLA	SiO_2	1300	4%(X/Y), 5.7%(Z)	33.5	12.1	-	[92]
SLA	SiO_2	1200	1.64%	39.5	20.38	21.43	[84]
SLA	Al_2O_3	1150	2.3%(X), 2.4%(Y), 5.3%(Z)	37.9	33.7	-	[85]
SLA	Al_2O_3	1280	2.1%(X), 2.3%(Y), 3.8%(Z)	37.6	24.0	-	[93]
SLA	Al_2O_3	1550	6.4%(X/Y), 11.4%(Z)	30.12	78.15	-	[68]
SLS	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	1600	-	12	38 ± 3.18	-	[40]
SLS	SiO_2	1200	0.6%	39	7.45	15.04	[39]

于目前普遍采用的粉末粒径比传统材料小,因此经过烧结之后的致密度和强度明显高于传统工艺得到的材料,收缩率也比传统材料大。而 SLS 成形技术由于采用的粉末粒径较大,得到的素坯具有较高的孔隙率,在烧结过程中收缩率较小,与传统型芯型壳

材料的收缩率接近。

表 2 比较了用于陶瓷型芯型壳制造的不同激光增材制造工艺路线的主要特征。值得指出的是,SLS 由于采用了粉末原材料,尽管成形精度和表面质量不如 SLA 技术,但成形过程中无需添加支撑结

构,在制备中大型陶瓷型芯型壳时优势较大。而 SLA 技术的两种工艺路线均受到液体原材料的制约,在成形过程中需要添加合适的支撑结构以保证

成形成功率,但在成形精度和表面质量等方面具有优势,因此 SLA 技术适用于制备中小型、具有精细复杂结构的陶瓷型芯型壳。

表 2 用于陶瓷型芯型壳制造的不同激光增材制造工艺路线的特征

Table 2 Characteristics of different laser additive manufacturing processes used for ceramic core/shell manufacturing

Characteristic	SLS	SLA+Gel casting	SLA
Precision	~ 500 μm	50–200 μm	50–200 μm
Size	100–1000 mm	50–600 mm	50–300 mm
Surface quality	Medium	High	High
Forming efficiency	High	Medium	Medium
Support need	No	Yes	Yes
Feedstock	Powder	Resin	Ceramic slurry
Feedstock recycle	Easy	Easy	Medium
Sintering shrinkage	Low	Low	High
Range of application	Medium-large turbine blade	Small-medium turbine blade	Small-medium turbine blade
Performance	Medium	High	High

5 结束语

激光增材制造技术在制备具有复杂结构的空心涡轮叶片铸造用陶瓷型芯型壳上具有很大优势,有望解决传统熔模铸造生产周期长、成品率低、制造成本高的问题,缩短新型叶片的研发周期,对我国自主研发高性能燃气轮机高端装备具有重要意义。激光选区烧结和立体光刻是适用于陶瓷型芯型壳制备的两种代表性的增材制造技术,由于其技术上的特征,分别在制备燃气轮机用大型叶片型芯型壳和涡轮发动机用小型叶片型芯型壳上各具优势。目前,我国在精密铸造的增材制造材料、成形装备、加工工艺以及型芯型壳性能等方面已经取得了一些研究成果,并成功进行了一些应用示范。为了推广增材制造技术在精密铸造领域中的应用,下述几个方面仍值得关注。

1)在增材制造陶瓷型芯型壳材料方面,亟须开发增材制造专用的陶瓷原材料。如 SLS 方面需要开发专用高性能复合粉材,粉材具有铺粉性能好、堆积密度高、成形精度高、成形翘曲小、成形后素坯强度高特点。在 SLA 光固化浆料方面,需要开发低黏度、高固含量且不易沉降的浆料体系,以改善浆料的储存性能。

2)在增材制造成形装备方面,亟须研发适用于陶瓷型芯型壳的多材料一体化成形装备以及专用的后处理装备。多材料一体化成形装备的开发需要解决多材料的精确去除和输送难题,并尽量避免多种

材料之间的混合污染。在 SLS 装备方面,可以采用基于微细管吸送粉的方式,利用传统铺粉辊实现型壳材料的铺设,通过微细管吸送粉完成形芯材料的输送。在 SLA 装备方面,可以改进多缸体之间的清洗机构,防止成形过程中浆料之间的互相污染。

3)在后处理工艺方面,需要研发适用于复杂陶瓷型芯型壳的高效自动化清理装备及更高效的清理方法。传统的清粉、清浆料往往需要人工精细操作,效率低且容易导致素坯损坏。在 SLS 方面,可以结合吹气、振动等多种方式提高清粉效率,且可以将清粉装置与成形装备集成,避免周转对素坯造成损坏。在 SLA 方面,可以开发适用于复杂陶瓷型芯型壳的易去除支撑结构,降低去除支撑时铸型损坏的风险。

4)在型芯型壳脱脂、烧结方面,需要研究更高效的脱脂方法以及多材料一体化烧结的相关工艺。目前尽管采用分步脱脂的方式取得了一定的成功,但在处理壁厚较大、形状突变较多的型芯型壳上仍存在易开裂的难题,因此需要研发溶剂预脱脂、超临界脱脂等新型脱脂方法。在烧结方面,需要研究多材料一体化烧结工艺,避免在烧结过程中由异质材料界面膨胀/收缩不匹配导致的开裂问题。

5)在型芯型壳性能方面,需要进一步提高陶瓷型芯型壳材料的高温性能如高温强度、抗高温蠕变性能等。在 SLS 方面,由于素坯的烧结性能差,需要研发高效的强化方法,提高型芯型壳的各项性能。在 SLA 方面,由于目前烧结收缩率较高,需要进一步地降低烧结收缩率,如进一步地提高浆料固含量、

采用粒径接近传统型芯型壳材料的粉体、加入具有膨胀效应的矿化剂等。

参 考 文 献

- [1] 范学领, 李定骏, 吕伯文, 等. 国之重器, 十载砥砺: 重型燃气轮机制造基础研究进展[J]. 中国基础科学, 2018, 20(2): 32-40.
Fan X L, Li D J, Lv B W, et al. Advances in the fundamentals of the manufacture of industrial gas turbine [J]. China Basic Science, 2018, 20(2): 32-40.
- [2] Pattnaik S, Karunakar D B, Jha P K. Developments in investment casting process: a review[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(11): 2332-2348.
- [3] 王铁军, 范学领, 孙永乐, 等. 重型燃气轮机高温透平叶片热障涂层系统中的应力和裂纹问题研究进展[J]. 固体力学学报, 2016, 37(6): 477-517.
Wang T J, Fan X L, Sun G, et al. The stresses and cracks in thermal barrier coating system: a review [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2016, 37(6): 477-517.
- [4] 曹腊梅, 薛明. 高温合金涡轮叶片近净形熔模精密铸造技术研发趋势[J]. 铸造, 2021, 70(2): 147-154.
Cao L M, Xue M. Research and development tendency of near net-shape investment casting technology for superalloy turbine airfoils[J]. Foundry, 2021, 70(2): 147-154.
- [5] O'connor K F, Hoff J P, Frasier D J, et al. Single-cast, high-temperature, thin wall structures and methods of making the same: US5295530 [P/OL]. 1996-06-03[2000-06-06]. <http://www.google.com/patents/US5295530>.
- [6] Han J C, Dutta S, Ekkad S. Gas turbine heat transfer and cooling technology[M]. Boston: CRC Press, 2012.
- [7] 曹腊梅, 杨耀武, 才广慧, 等. 单晶叶片用氧化铝基陶瓷型芯 AC-1[J]. 材料工程, 1997, 25(9): 21-23, 27.
Cao L M, Yang Y W, Cai G H, et al. Alumina-base ceramic core AC-1 for single crystal blades [J]. Journal of Materials Engineering, 1997, 25(9): 21-23, 27.
- [8] 薛明, 曹腊梅. 单晶空心叶片用 AC-2 陶瓷型芯的组织性能研究[J]. 材料工程, 2002, 30(4): 33-34, 37.
Xue M, Cao L M. Microstructure and properties of alumina based ceramic cores AC-2 for single crystal blades[J]. Journal of Materials Engineering, 2002, 30(4): 33-34, 37.
- [9] Bae C J, Halloran J W. Integrally cored ceramic mold fabricated by ceramic stereolithography [J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2011, 8(6): 1255-1262.
- [10] Tan C L, Weng F, Sui S, et al. Progress and perspectives in laser additive manufacturing of key aeroengine materials [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2021, 170: 103804.
- [11] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500002.
Gu D D, Zhang H M, Chen H Y, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500002.
- [12] 秦艳利, 孙博慧, 张昊, 等. 选区激光熔化铝合金及其复合材料在航空航天领域的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1402002.
Qin Y L, Sun B H, Zhang H, et al. Development of selective laser melted aluminum alloys and aluminum matrix composites in aerospace field [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1402002.
- [13] 孙长波, 尚伟, 周君华, 等. 激光快速成形与传统精铸技术的组合应用[J]. 航空制造技术, 2015, 58(10): 48-51.
Sun C B, Shang W, Zhou J H, et al. Integrated application of laser rapid prototyping and traditional investment casting technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(10): 48-51.
- [14] Tang S Y, Fan Z T, Zhao H P, et al. Layered extrusion forming: a simple and green method for additive manufacturing ceramic core [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9/10/11/12): 3809-3819.
- [15] Steen W M, Mazumder J. Laser material processing [M]. London: Springer, 2010.
- [16] Wei Q, Zhong J W, Xu Z L, 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.
- [17] Li C H, Hu L, Zou Y, et al. Fabrication of Al_2O_3 - SiO_2 ceramics through combined selective laser sintering and SiO_2 -sol infiltration[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2020, 17(1): 255-263.
- [18] 陈晓燕, 肖旅, 余建波, 等. 高温合金空心叶片用陶瓷型芯概述[J]. 铸造, 2016, 65(9): 868-873.
Chen X Y, Xiao L, Yu J B, et al. Review of ceramic cores in investment casting of superalloy hollow blades[J]. Foundry, 2016, 65(9): 868-873.

- [19] Yves-Christian H, Jan W, Wilhelm M, et al. Net shaped high performance oxide ceramic parts by selective laser melting[J]. *Physics Procedia*, 2010, 5 (B): 587-594.
- [20] 伍林, 何建, 曾洪, 等. 硅基陶瓷型芯的制造工艺研究进展[J]. *东方汽轮机*, 2016(4): 54-59.
Wu L, He J, Zeng H, et al. Research progress of manufacturing process on silica-based ceramic core [J]. *Dongfang Turbine*, 2016(4): 54-59.
- [21] 王飞, 李飞, 余建波, 等. 空心叶片用陶瓷型芯脱芯工艺研究现状[J]. *中国材料进展*, 2019, 38(3): 264-270.
Wang F, Li F, Yu J B, et al. Research status on removal technology of ceramic core for hollow blades [J]. *Materials China*, 2019, 38(3): 264-270.
- [22] 王丽阁, 左彬, 朱广智, 等. 孔隙率对氧化铝基可溶陶瓷型芯性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2012, 32(5): 450-452.
Wang L G, Zuo B, Zhu G Z, et al. Effect of porosity on the properties of the soluble alumina based ceramic core [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2012, 32(5): 450-452.
- [23] Lakshminarayan U, Ogrydziak S, Marcus H L. Selective lasersintering of ceramic materials [EB/OL]. [2021-03-05]. <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/64235>.
- [24] Lakshminarayan U, Marcus H L. Microstructural and mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5$ and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{B}_2\text{O}_3$ composites fabricated by selective laser sintering [EB/OL]. [2021-03-04]. <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/64340>.
- [25] Liu K, Shi Y S, Li C H, 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.
- [26] Yan C Z, Shi Y S, Yang J S, et al. Preparation and selective laser sintering of nylon-12 coated metal powders and post processing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(17): 5785-5792.
- [27] Chen A N, Chen J Y, Wu J M, et al. Porous mullite ceramics with enhanced mechanical properties prepared by SLS using MnO_2 and phenolic resin coated double-shell powders [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(17): 21136-21143.
- [28] 吴笑非, 李鑫, 许西庆, 等. 不同粒度莫来石粉改性硅基陶瓷型芯的制备及性能[J]. *航空材料学报*, 2021, 41(4): 128-133.
Wu X F, Li X, Xu X Q, et al. Fabrication and properties of silica-based ceramic cores modified by mullite powders with different particle sizes[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2021, 41(4): 128-133.
- [29] 李鑫, 牛书鑫, 姚建省, 等. 金属 Al 粉对氧化硅基陶瓷型芯的性能及组织的影响[J]. *无机材料学报*, 2019, 34(2): 207-212.
Li X, Niu S X, Yao J S, et al. Effect of Al powder on property and microstructure of silica-based ceramic core[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2019, 34 (2): 207-212.
- [30] Zhang J B, Yu J B, Li Q, et al. Effect of CaO and SiO_2 on the properties of Y_2O_3 -based ceramic core materials[J]. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2021, 9(3): 1103-1113.
- [31] Shishkovsky I, Yadroitsev I, Bertrand P, et al. Alumina-zirconium ceramics synthesis by selective laser sintering/melting[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 254(4): 966-970.
- [32] Yang Z G, Li K L, Ma S Q, et al. Preparation, mechanical, and leaching properties of CaZrO_3 ceramic cores [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2021, 18(5): 1490-1497.
- [33] 解瑞东, 朱尽伟, 张航, 等. 激光增材制造温度场检测分析与控制综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 050003.
Xie R D, Zhu J W, Zhang H, et al. Review of detection, analysis and control of temperature field in laser additive manufacturing [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050003.
- [34] 樊自田, 黄乃瑜. 选择性激光烧结覆膜砂铸型(芯)的固化机理[J]. *华中科技大学学报*, 2001, 29(4): 60-62.
Fan Z T, Huang N Y. Mechanism of coated sand mold(core) hardened by selective laser sintering[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2001, 29(4): 60-62.
- [35] Enneti R K, Park S J, German R M, et al. Review: thermal debinding process in particulate materials processing [J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, 27(2): 103-118.
- [36] Shahzad K, Deckers J, Kruth J P, et al. Additive manufacturing of alumina parts by indirect selective laser sintering and post processing[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213 (9): 1484-1494.
- [37] Lee I. Densification of porous $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ ceramic composites fabricated by SLS process [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 1999, 18(19): 1557-1561.
- [38] Lee I. Infiltration of alumina sol into SLS processed porous $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_4\text{B}_2\text{O}_9$ ceramic composites [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2001, 20(3): 223-226.
- [39] Zheng W, Wu J M, Chen S, et al. Fabrication of

- high-performance silica-based ceramic cores through selective laser sintering combined with vacuum infiltration[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 48: 102396.
- [40] 魏倩, 许自霖, 许庆彦, 等. 烧结温度对氧化铝基陶瓷型壳显微组织及力学行为的影响[J]. *航空材料学报*, 2019, 39(2): 10-15.
- Wei Q, Xu Z L, Xu Q Y, et al. Effect of sintering temperature on microstructure and mechanical behavior of alumina-based ceramic shell by SLS[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(2): 10-15.
- [41] Pan Y, Li H, Liu Y S, et al. Effect of holding time during sintering on microstructure and properties of 3D printed alumina ceramics [J]. *Frontiers in Materials*, 2020, 7: 54.
- [42] Chen Z W, Li Z Y, Li J J, et al. 3D printing of ceramics: a review [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39(4): 661-687.
- [43] Chen F, Zhu H, Wu J M, et al. Preparation and biological evaluation of ZrO₂ all-ceramic teeth by DLP technology[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(8): 11268-11274.
- [44] Wu H H, Li D C, Tang Y P, et al. Rapid fabrication of alumina-based ceramic cores for gas turbine blades by stereolithography and gelcasting [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209 (18/19): 5886-5891.
- [45] Gentry S P, Halloran J W. Depth and width of cured lines in photopolymerizable ceramic suspensions[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, 33 (10): 1981-1988.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] Guo L, Yang J, Feng Y B, et al. Preparation and properties of AlN ceramic suspension for non-aqueous gel casting[J]. *Ceramics International*, 2016, 42(7): 8066-8071.
- [49] 周伟召, 李涤尘, 陈张伟. 水基陶瓷浆料的光固化特性及成形工艺参数选择[C]//第十三届全国特种加工学术会议. 北京: 中国机械工程学会, 2009: 499-504.
- Zhou W Z, Li D C, Chen Z W. Laser curing characteristics of aqueous ceramic suspension and selectance for process parameters [C] // The 13th National Academic Conference on Special Processing. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, 2009: 499-504.
- [50] 周伟召, 李涤尘, 陈张伟, 等. 陶瓷浆料光固化快速成形特性研究及其工程应用[J]. *航空制造技术*, 2010, 53(8): 38-42.
- Zhou W Z, Li D C, Chen Z W, et al. Curing behaviors of ceramic suspension in stereolithography and its engineering applications [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, 53(8): 38-42.
- [51] 蔡锴, 黄勇, 杨金龙. 低毒的丙烯酸羟乙酯聚合体系凝胶注模成型 Al₂O₃ 陶瓷[J]. *无机材料学报*, 2003, 18(2): 343-347.
- Cai K, Huang Y, Yang J L. Gelcasting of alumina with low-toxicity HEMA system [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2003, 18(2): 343-347.
- [52] 许海仙, 丘泰, 杨建, 等. DMAA 凝胶体系凝胶注模成型超细 ZrO₂ 陶瓷[J]. *无机材料学报*, 2011, 26 (10): 1105-1110.
- Xu H X, Qiu T, Yang J, et al. Gel-casting of fine zirconia using DMAA gel system [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2011, 26(10): 1105-1110.
- [53] 王月民, 刘军, 王超, 等. 压力对凝胶注模成型 95 氧化铝陶瓷性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2012, 31 (5): 1223-1227.
- Wang Y M, Liu J, Wang C, et al. Influence of pressure on properties of 95 alumina ceramics prepared by gelcasting forming [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2012, 31(5): 1223-1227.
- [54] Xiang J H, Huang Y, Xie Z P. Study of gel-tape-casting process of ceramic materials[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, 323(1/2): 336-341.
- [55] Zhang L, Yao Q, Yuan Z T, et al. Ammonium citrate assisted surface modification and gel casting of YAG transparent ceramics [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(17): 21921-21927.
- [56] Dendukuri D, Panda P, Haghgoie R, et al. Modeling of oxygen-inhibited free radical photopolymerization in a PDMS microfluidic device [J]. *Macromolecules*, 2008, 41(22): 8547-8556.
- [57] Tumbleston J R, Shirvanyants D, Ermoshkin N, et al. Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1349-1352.
- [58] 杨硕, 张大帅, 薛建强, 等. 低毒体系凝胶注模 ITO 靶材坯体的表面起皮现象与抑制研究[J]. *材料开发与应用*, 2020, 35(5): 54-58.
- Yang S, Zhang D S, Xue J Q, et al. Oxygen inhibition study on surface of ITO green body prepared by gel-casting with low toxicity system[J]. *Development and Application of Materials*, 2020, 35 (5): 54-58.

- [59] 董斌超, 张舸. 超轻量化 SiC 反射镜的制备及性能[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2185-2191.
Dong B C, Zhang G. Fabrication and properties of ultra-lightweight SiC mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(8): 2185-2191.
- [60] 杨来侠, 郭丽萍, 韩香广. 凝胶注模氧化铝陶瓷浆料充型能力研究[J]. 铸造技术, 2013, 34(5): 587-589.
Yang L X, Guo L P, Han X G. Study on filling ability of gelcasting alumina ceramic slurry [J]. Foundry Technology, 2013, 34(5): 587-589.
- [61] 杨强, 鲁中良, 李振发, 等. 空心涡轮叶片陶瓷铸型微细结构负压吸注充型工艺研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(10): 147-152, 160.
Yang Q, Lu Z L, Li Z F, et al. Gelcasting filling for small structure of hollow turbine blade ceramic mold [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(10): 147-152, 160.
- [62] Hinczewski C, Corbel S, Chartier T. Ceramic suspensions suitable for stereolithography [J]. Journal of the European Ceramic Society, 1998, 18(6): 583-590.
- [63] Zhang K Q, Xie C, Wang G, et al. High solid loading, low viscosity photosensitive Al_2O_3 slurry for stereolithography based additive manufacturing [J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 203-208.
- [64] Liu Y, Cheng L J, Li H, et al. Formation mechanism of stereolithography of Si_3N_4 slurry using silane coupling agent as modifier and dispersant [J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 14583-14590.
- [65] Berg J C. An introduction to interfaces and colloids: the bridge to nanoscience [M]. Singapore: World Scientific, 2009.
- [66] Bae C J, Halloran J W. A segregation model study of suspension-based additive manufacturing [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(15): 5160-5166.
- [67] Bae C J, Ramachandran A, Halloran J W. Quantifying particle segregation in sequential layers fabricated by additive manufacturing [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(11): 4082-4088.
- [68] Chen S, Wang C S, Zheng W, et al. Effects of particle size distribution and sintering temperature on properties of alumina mold material prepared by stereolithography [J]. Ceramics International, 2022, 48(5): 6069-6077.
- [69] Schwarzer E, Götz M, Markova D, et al. Lithography-based ceramic manufacturing (LCM)-viscosity and cleaning as two quality influencing steps in the process chain of printing green parts [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(16): 5329-5338.
- [70] Hull C W, Newell K J. Recoating system for using high viscosity build materials in solid freeform fabrication: US06656410 [P]. 2003-12-02.
- [71] 王小锋, 王日初, 彭超群, 等. 凝胶注模坯体的液体干燥 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(12): 3374-3380.
Wang X F, Wang R C, Peng C Q, et al. Solvent drying of gelcasting green bodies [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(12): 3374-3380.
- [72] 厉彦刚, 王志义. 不同干燥方式对凝胶注模成形陶瓷坯体干燥过程的影响 [J]. 山东陶瓷, 2011, 34(6): 26-28.
Li Y G, Wang Z Y. Influences of different drying methods on the dehydration process of alumina green body fabricated by gel-casting [J]. Shandong Ceramics, 2011, 34(6): 26-28.
- [73] 刘飞, 鲁中良, 李振发, 等. 凝胶注模成型氧化铝基陶瓷坯体的冷冻干燥缺陷控制 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(1): 123-126, 132.
Liu F, Lu Z L, Li Z F, et al. Freeze-drying defect control of alumina-based ceramic body prepared with gel casting technology [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(1): 123-126, 132.
- [74] 白树钊, 鲁中良, 曹继伟, 等. 凝胶注模陶瓷素坯固体干燥剂干燥尺寸精度控制 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(2): 135-139.
Bai S Z, Lu Z L, Cao J W, et al. Dimensional accuracy control of gelcast ceramic green body during drying process with solid desiccant [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(2): 135-139.
- [75] Pikal M J, Shah S, Senior D, et al. Physical chemistry of freeze-drying: measurement of sublimation rates for frozen aqueous solutions by a microbalance technique [J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 1983, 72(6): 635-650.
- [76] Scherer G W. Theory of drying [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1990, 73(1): 3-14.
- [77] Chen Y, Lu Z L, Miao K, et al. Researches on the pyrolyzing strength of gelcasting Al_2O_3 -based ceramic molds for double-wall blade [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(12): 7564-7574.
- [78] Hua S B, Yuan X, Wu J M, et al. Digital light processing porous TPMS structural HA & akermanite bioceramics with optimized performance for cancellous bone repair [J]. Ceramics International, 2022, 48(3): 3020-3029.
- [79] Bae C J, Halloran J W. Influence of residual monomer

- on cracking in ceramics fabricated by stereolithography [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, 8(6): 1289-1295.
- [80] Johansson E, Lidström O, Johansson J, et al. Influence of resin composition on the defect formation in alumina manufactured by stereolithography [J]. *Materials*, 2017, 10(2): 138.
- [81] Li H, Liu Y S, Liu Y S, et al. Effect of debinding temperature under an argon atmosphere on the microstructure and properties of 3D-printed alumina ceramics[J]. *Materials Characterization*, 2020, 168: 110548.
- [82] Zhou M P, Liu W, Wu H D, 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, 42(10): 11598-11602.
- [83] Li H, Liu Y S, Liu Y S, et al. Influence of vacuum debinding temperature on microstructure and mechanical properties of three-dimensional-printed alumina via stereolithography [J]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2020, 7(1): 8-18.
- [84] Zheng W, Wu J M, Chen S, et al. Influence of Al_2O_3 content on mechanical properties of silica-based ceramic cores prepared by stereolithography [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, 10(6): 1381-1388.
- [85] Li H, Liu Y S, Liu Y S, et al. Evolution of the microstructure and mechanical properties of stereolithography formed alumina cores sintered in vacuum [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2020, 40(14): 4825-4836.
- [86] Manière C, Kerbart G, Harnois C, et al. Modeling sintering anisotropy in ceramic stereolithography of silica[J]. *Acta Materialia*, 2020, 182: 163-171.
- [87] 徐东阳, 李涤尘, 吴海华, 等. 钇铝石榴石对氧化铝基陶瓷型芯高温性能的影响 [J]. *航空材料学报*, 2011, 31(2): 67-71.
- Xu D Y, Li D C, Wu H H, et al. Effect of yttrium aluminum garnet on high-temperature properties of alumina-based ceramic cores [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(2): 67-71.
- [88] 刘涛, 鲁中良, 苗恺, 等. 面向空心涡轮叶片的氧化铝铝基陶瓷铸型高温强化制造 [J]. *航空学报*, 2014, 35(7): 2072-2080.
- Liu T, Lu Z L, Miao K, et al. High-temperature strengthening manufacturing of alumina-based ceramic molds used for hollow turbine blades [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(7): 2072-2080.
- [89] 鲁中良, 姜博, 周江平, 等. 基于光固化成型技术的空心叶片陶瓷铸型制造缺陷控制 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(21): 111-117.
- Lu Z L, Jiang B, Zhou J P, et al. Defects control of manufacturing ceramic mold of hollow turbine blade based on stereo lithography [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(21): 111-117.
- [90] 魏挺, 史见, 罗铭宇, 等. 一种硅基陶瓷型芯浆料及其应用: CN112500143A [P]. 2021-03-16.
- Wei T, Shi J, Luo M Y, et al. Silicon-based ceramic core slurry and application thereof: CN112500143A [P]. 2021-03-16.
- [91] Xu W L, Lu Z L, Tian G Q, et al. Fabrication of single-crystal superalloy hollow blade based on integral ceramic mold [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 271: 615-622.
- [92] Li H, Hu K H, Liu Y S, et al. Improved mechanical properties of silica ceramic cores prepared by 3D printing and sintering processes [J]. *Scripta Materialia*, 2021, 194: 113665.
- [93] Li H, Liu Y S, Liu Y S, et al. Influence of sintering temperature on microstructure and mechanical properties of Al_2O_3 ceramic via 3D stereolithography [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(2): 204-214.

Research Progress of Ceramic Cores and Shells Prepared by Laser Additive Manufacturing

Sun Dong^{1,2}, Chen Shuang^{1,2}, Shi Yusheng^{1,2}, Yan Chunze^{1,2}, Wu Jiamin^{1,2},
Wen Shifeng^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

² Engineering Research Center of Ceramic Materials for Additive Manufacturing, Ministry of Education, Wuhan 430074, Hubei, China

Abstract

Significance Gas turbine is the most promising device for power generation and ship power in this century due to its high efficiency and low emission. The hollow turbine blade with a complex structure is the key part of a gas turbine. The working temperature of the turbine blade is very high, which requires high metal quality and elaborate structures of turbine blades. High gas temperature means high working efficiency. With the further increase of industrial demand, the gas temperature of a turbine reaches more than 1700 °C. Therefore, the turbine blades with more delicate and complex hollow structures should be fabricated to improve the cooling efficiency. The ceramic cores and shells are important components for casting of superalloy turbine blades due to their high temperature capabilities and chemical inertness. The traditional methods to fabricate ceramic shells and cores are the investment casting method which is time-consuming, high cost, low yield, and not sufficient for the update-requirement of turbine blades. In order to overcome these problems, additive manufacturing (AM) has been gradually developed. The AM technology has been widely used in different fields such as medicine, engineering, and aerospace to fabricate delicate parts without any molds. It can save materials, accelerate the research of new products, and meet customized needs, thus greatly reducing fabrication costs. In the past few decades, dozens of AM technologies have been developed and each of them has its unique application fields. As for the fabrication of ceramic cores and shells, the most suitable laser-based AM technologies are selective laser sintering (SLS) and stereolithography apparatus (SLA).

Progress Different from other AM technologies, the most significant advantage of SLS is that it doesn't need any support during the fabrication process. Large-scale ceramic parts with precise structures can be fabricated by SLS. The preparation of ceramic cores and shells by the SLS process is shown in Fig. 3. First, the green bodies of ceramics are first built by the SLS equipment, and then the green bodies are infiltrated with silica sol or other materials which could fill the pores of ceramics to improve the density of green bodies. The organic binder in the green bodies can be removed through thermal decomposition at 600 °C and the green bodies are sintered at 1200–1600 °C to obtain the densified ceramic cores and shells. SLA has been known for several years as an AM technology to fabricate the polymer-based parts. This technology utilizes liquid photo-curable resin which can be cured under ultraviolet light or laser irradiation. At present, there are two main processes for preparing ceramic cores and shells by the SLA technology (Fig. 6). The first process combines SLA and gel-casting. A resin mold is first made by SLA and then the ceramic slurry is injected into the mold cavity to get the green body of ceramic core and shell. In the other process, the ceramic slurry and photo-curable resin are mixed and the ceramic green bodies are directly formed by SLA. Both of ceramic green bodies made by these two technologies have enough density so that the infiltration process is no longer required and the rest of the post-processing process including debinding and sintering are the same as that of SLS. Characteristics of different laser-based AM processes used for ceramic core and shell manufacturing are shown in Table 2. It can be concluded that both of two AM technologies have their own strengths and weaknesses. SLS has an advantage in manufacturing large size ceramic cores and shells, while the parts made by SLA have higher resolution.

Conclusions and Prospects In this review, the development of these two AM processes in the fabrication of ceramic cores and shells are introduced in terms of material preparation, green body fabrication, and post-processing. The advantages, weaknesses and future development of both two methods have been discussed.

Key words laser technique; additive manufacturing; hollow turbine blade; ceramic core and shell; selective laser sintering; stereolithography