

# 增材制造技术在单晶涡轮叶片成形中的应用现状

赵效忠, 程 涛, 李建华, 郑书亚

(辽宁航安型芯科技股份有限公司, 辽宁沈阳 110164)

**摘要:** 介绍了聚合物、陶瓷、金属和多材料增材制造技术在单晶涡轮叶片成形中的应用。增材制造与熔模铸造相结合提高了熔模铸造单晶叶片的柔性, 加速了叶片研制与生产过程; 特别是多材料增材制造技术的发展有望为实现陶瓷型芯、铸型的控形与控性相结合提供新途径, 而重熔一定向凝固技术的发展, 有望为单晶叶片成形提供新思路。但在陶瓷材料研究、工艺控制等方面, 仍面临诸多挑战。

**关键词:** 增材制造; 熔模铸造; 单晶涡轮叶片; 陶瓷材料

熔模精密铸造是先进航空航天武器装备、商业航天、民用航空等领域产品长寿命、低成本、轻量化、精密化成形发展方向的技术基础支撑<sup>[1]</sup>, 铸件尺寸精度高、表面质量好, 能大批量制造复杂结构单晶铸件的特点, 在单晶涡轮叶片制造中具有独特的优势<sup>[2]</sup>。但产品设计空间窄, 开发周期长, 生产工序多, 控制难度大, 更新换代慢, 制造成本高<sup>[3]</sup>。特别是对于浇注多层壁单晶叶片使用的陶瓷型芯, 由于形状复杂难以成形、结构精细易于变形、定位困难容易漂移, 很难保证叶片浇注合格率和服役寿命<sup>[4]</sup>。

增材制造具有自由设计、快速成形、大规模定制、废物最小化和成形多功能三维空腔结构件的优势。但是, 增材制造借助高能量源逐点逐层快速熔化、凝固并冷却, 难免出现层间熔合不良、成分偏析、台阶效应等问题, 导致气孔、变形等缺陷和物理性能各向异性<sup>[5]</sup>。研究表明, 增材制造镍基高温合金件的晶粒组织特征为以具有显著外延特性的柱状晶和等轴晶晶粒为主, 同时存在细晶区和粗糙蜂窝状晶区<sup>[6]</sup>。特别是单晶高温合金增材制造, 仍面临能量吸收机制、快速凝固模型、组织演化过程等应用基础研究深度不足和微区温度场难以精确控制等严峻挑战<sup>[7]</sup>, 而形成多晶微结构及产生次表层缺陷仍是增材制造单晶叶片的两大工艺局限性<sup>[8]</sup>。

增材制造与熔模铸造相结合, 优势互补, 各展所长, 既打破了传统铸造工艺束缚, 提高了铸造柔性, 又突破了增材制造工艺局限性制约, 成功应用于单晶涡轮叶片浇注。但是, 为解决陶瓷铸型变形、开裂问题, 提高尺寸精度及表面质量, 实现高效、低成本制备, 在材料体系选择及工艺性能改进方面尚存在诸多亟待解决的问题<sup>[9]</sup>。

## 1 蜡质或树脂型芯

### 1.1 蜡质或树脂型芯坯体

由可溶性蜡或其他易溶材料经3D打印的蜡质型芯制备陶瓷型芯的工艺过程如下所示<sup>[10]</sup>。将由有机黏结剂和陶瓷粉料配制的浆料注入内置蜡质型芯和浇道蜡件的模匣中, 如图1a所示; 浆料凝固后脱除蜡料, 制成陶瓷质型芯模腔, 如图1b所示; 向型芯模腔中注入陶瓷型芯浆料, 待浆料凝固后, 带模入窑烧结, 如图1c。不烧结的

作者简介:

赵效忠(1942-), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为特种陶瓷材料。  
电话: 13940584476, E-mail: Zhxizhong@aliyun.com

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)10-1235-09

收稿日期:

2022-12-20 收到初稿,  
2023-05-27 收到修订稿。

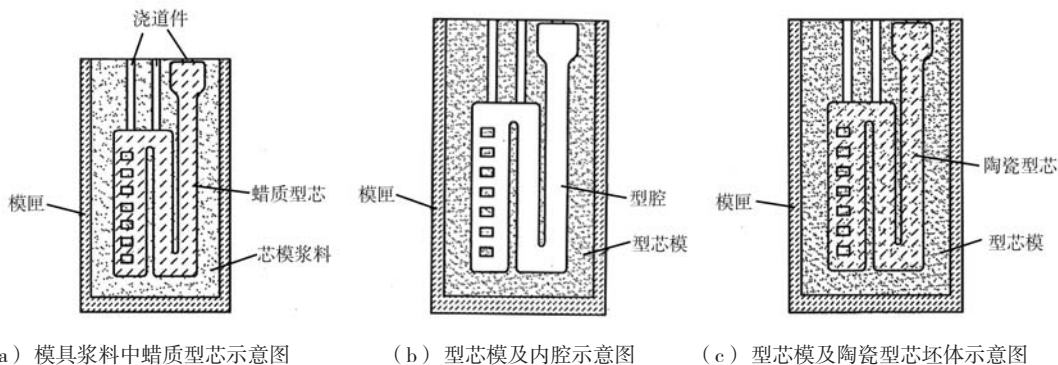


图1 蜡质型芯制备陶瓷型芯工艺过程

Fig. 1 Process of preparing ceramic core from wax pattern

型芯模粉料既能在型芯烧结过程中的近零强度温度区对型芯坯体起支撑作用，又便于最终从型芯上清除。

由易成形、低成本蜡质芯取代金属模具制备陶瓷型芯，工艺简单，响应速度快，适于新型号叶片试制。但要求浆料的流动性更好，以避免浇注不足而确保复型精度；固含量更高，以降低成形、烧结收缩而确保尺寸精度。

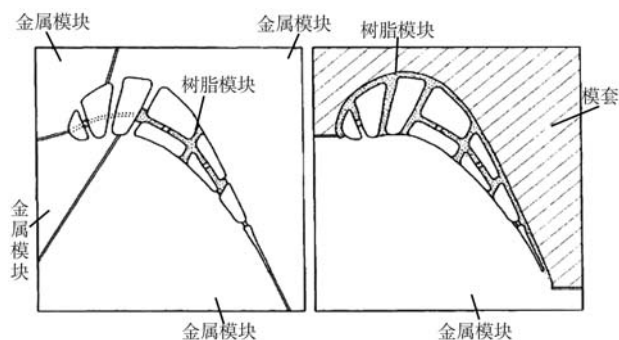
以热固性或热塑性树脂经立体光固化或熔丝制造工艺技术成形的树脂芯为前驱体，制备夹套芯的工艺过程为<sup>[11]</sup>：在树脂芯表面电镀镍、钴、铁等金属材料制成金属芯套；脱除芯套中的树脂芯，注入陶瓷浆料，干燥后制成夹套芯，如图2b；夹套芯按常规工艺制成图2a所示的芯壳组合后，芯套材料在叶片浇注过程中被合金液吸收，由陶瓷内芯形成叶片内腔。对于某型动叶片使用的夹套芯，内芯特征宽度约0.50~10.16 mm，芯套壁厚约0.13~2.54 mm。

夹套芯制备速度快、成本低。芯套的使用，简化了型芯制备工艺，解决了异形变截面、扭曲、细长型芯制备难题。夹套芯强度高，便于牢固定位，可用于

长度达101.6 cm的燃机叶片浇注。

### 1.2 树脂模块及型芯、铸型、叶片树脂模

图3所示的组合式陶瓷型芯成形模由快速原型技术成形的一次性树脂模块与金属模块组装而成<sup>[12]</sup>。树脂模块用于形成形芯坯体内表面（图3a），或型芯坯体内表面及大部分外表面（图3b）。为增强树脂模块承压能力，宜外加模套固定。注入模中的陶瓷浆料凝固后，将包括树脂模块在内的型芯坯体与金属模块分离。脱除树脂模块后，经烧结制成双层壁陶瓷型芯。



(a) 组合式型芯成形模示意图1 (b) 组合式型芯成形模示意图2

图3 组合式型芯成形模示意图

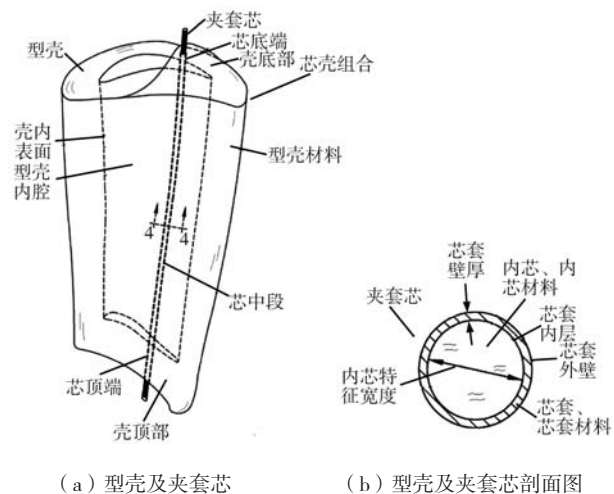
Fig. 3 Schematic diagram of composite core die

组合成形模的使用，克服了用金属模成形双层壁型芯的脱芯难题，发挥了金属模块可重复使用的优势，而且，树脂模块适于低成本大批量生产、便于结构设计的改进及成形模的迭代更新。

由有机聚合物经快速成形技术成形的一次性型芯成形模如图4所示<sup>[13]</sup>，其结构设计特征是：

(1) 将横截面为圆形或椭圆形、壁厚0.1~0.5 mm的多个空心管基本同轴对齐，布设成翼型横截面形状。

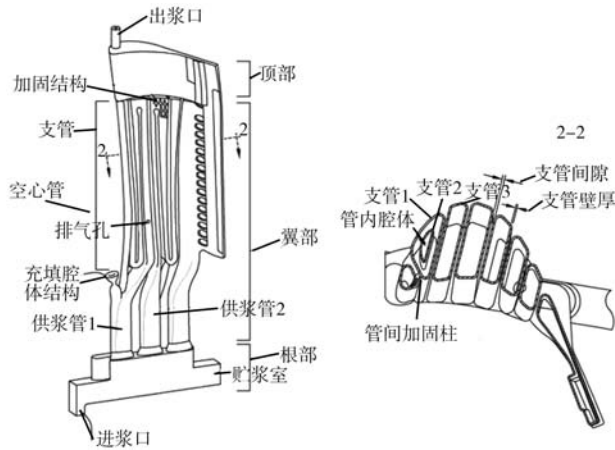
(2) 管间设置尺寸 $\geq 0.025$  mm的间隙，以避免成形时相邻支管合并，并便于脱模时聚合物烧失；管间设置截面呈圆形，直径 $\geq 0.5$  mm的加固柱，以



(a) 型壳及夹套芯 (b) 型壳及夹套芯剖面图

图2 型壳及夹套芯示意图

Fig. 2 Schematic diagram of shell and jacketed core



(a) 一次性型芯成形模示意图 (b) 一次性型芯成形模剖面图  
图4 一次性型芯成形模透视图

Fig. 4 The perspective view of a disposable core die

防止注浆时支管变形；在支管易变形部位增设厚度0.125~0.625 mm的加固结构，以增大型芯模刚度；在管壁上设置直径0.1~0.25 mm的排气孔，以排除管内气泡，降低内压，防止浇不足，并阻挡浆料逸出。

(3) 在支管1内，由同轴贯穿支管2形成管内腔体，借以增大浆料固化时暴露在热空气中的表面积，并调整管间横截面配置。通过腔体尺寸调控，减小壁

厚差，缩小浆料固化收缩差，以减少坯体变形、开裂。

(4) 在供浆管凸端与支管间设置充填腔体结构，便于排除注浆时模内凸端部位气囊，并接收少量余浆，以避免浇不足。

一次性型芯模结构的改进，为减少型芯浇不足、变形、开裂缺陷提供了有力的保证，但加固结构、腔体结构的设置也可能增大后续清除难度及型芯坯体坍塌风险。

图5所示是由光固化技术成形的整体树脂原型制备整体陶瓷铸型并浇注涡轮叶片的工艺流程。研究表明<sup>[3, 14]</sup>：光固化成形技术与凝胶注模成形工艺的结合，为整体陶瓷铸型的制备提供了一条简捷自由成形新途径，减小了型芯偏移，方便了芯、壳间气膜孔的直接形成，实现了铸型树脂模向金属叶片的快速转换。近年来，雾化覆膜技术的应用消除了树脂原型的台阶缺陷、真空冷冻干燥技术的应用实现了铸型湿坯无缺陷快速干燥、有机陶瓷先驱体中温强化和莫来石高温强化体系的建立调控了铸型的中、高温强度、“近零烧结收缩”材料体系的构建将铸型烧结收缩控制在小于0.1%<sup>[15]</sup>。随着制备工艺的不断改进，整体铸型在复杂结构空心涡轮叶片研制中的优势更为显著，可缩短涡轮叶片研发周期60%~80%，节约研发成本60%以上。

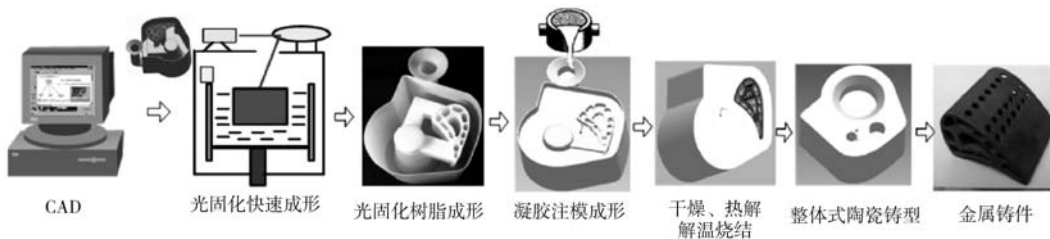


图5 整体式陶瓷铸型间接自由成形工艺流程

Fig. 5 An indirect solid freeform fabrication process for integral ceramic mold

整体铸型的制备，实现了芯/壳材料同质化，解决了芯/壳热胀失配难题，提高了型芯在型壳内定位的精确性和牢固度，但也面临陶瓷材料选择的新挑战。与氧化铝基陶瓷相比，氧化硅基陶瓷的优点是脱芯易、速度快，脱芯速率是氧化铝基陶瓷的10~15倍，且抗热震性较好，缺点是高温软化严重，收缩较大，强度较低<sup>[16]</sup>。显然，使用硅基材料时型壳高温结构稳定性较差，使用铝基材料时型芯溶出较难。为满足整体铸型制备需要，陶瓷新材料系统的研发已刻不容缓。

图6所示为采用立体光刻技术成形的叶片树脂模，内设主冷却通道和次级微通道腔体，在通道壁设置多排冲击冷却孔<sup>[17]</sup>。向置于金属外型模中的叶片树脂模内腔注入陶瓷型芯浆料，经加热固化后，按常规制壳工艺在叶片树脂模上制备型壳坯体。脱脂后经

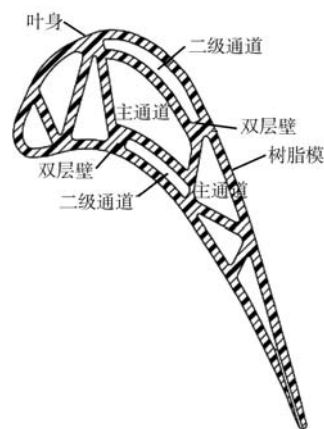


图6 叶片树脂模径向剖视图

Fig. 6 Radial sectional view of turbine blade synthetic pattern

870~1 100 °C焙烧，制成可用于浇注双层壁叶片的铸型。

由叶片树脂模制备铸型，与传统制备工艺相比，无需使用金属型芯模具和外形模，能在叶片内壁直接形成冲击冷却孔，但树脂模膨胀系数较大，制壳时易于胀壳，而且仍然需要复杂的后续操作工序。

## 2 陶瓷增材制造

陶瓷增材制造分直接增材制造和间接增材制造两种。直接增材制造虽已见报道，例如<sup>[18]</sup>，在已烧结的型芯主体件上，通过高能光束将送入熔池的陶瓷粉料熔化，直接制成多层壁陶瓷型芯附件，实现了“成形→烧结”一体化。但陶瓷材料熔点高、脆性大，成形时铺料不均、熔池失稳等，导致单一陶瓷材料直接成形极易产生裂纹，表面精度也无法满足浇注使用要求<sup>[19]</sup>。因此，陶瓷增材制造一般采用间接法，粉料成形借助于黏结剂的熔化与凝固。按黏结剂添加方式，分为采用机械混合法的陶瓷树脂浆料和包覆法的树脂覆膜粉料两种。

图7为组合式多层壁型芯，其中，包含凹槽及薄片状跨接端的尾缘件由硅基型芯浆料采用光固化技术成形，含有细长凹槽和腔体的主体件由铝基浆料采用常规成形技术成形<sup>[20]</sup>。型芯件间在烧结前或烧结后通过多对凹→穴、凸端连接或黏结，经后续热处理形成牢固的三维互锁接头。光固化成形技术的应用，提高了型芯尾缘件的合格率和尺寸形位精度，对提高叶片冷却效率有重要意义。

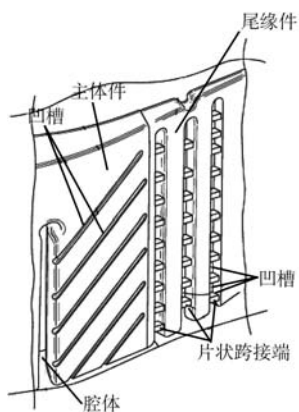


图7 组合式多层壁型芯示意图

Fig. 7 Schematic diagram of combined multi-wall core

陶瓷树脂浆料经倒置式光固化成形的分体式芯/壳结构包含各自的型芯件、型壳件、成孔柱及互锁件，如图8。经相应的榫槽式或燕尾式互锁件连接，烧结制成整体芯/壳<sup>[21]</sup>。

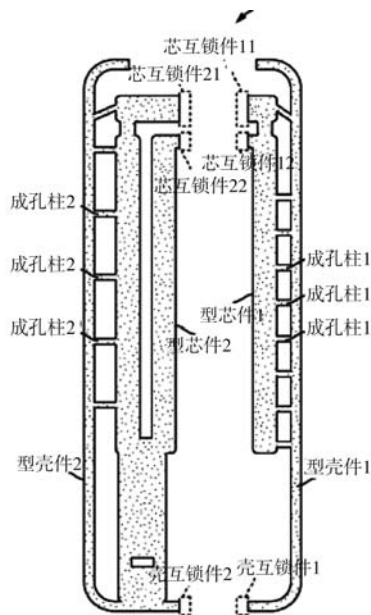


图8 分体式芯/壳组件

Fig. 8 Two-part core-shell assembly

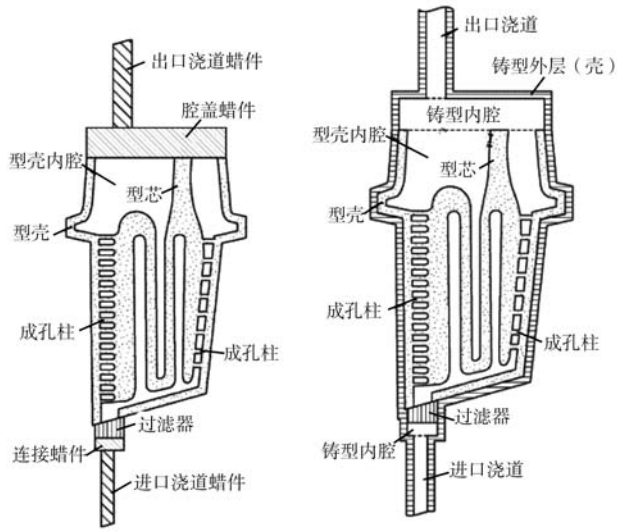
铺料层更薄、成形精度更高的倒置式光固化成形装置的使用，为无需使用支撑结构就能制备芯/壳之间的成孔柱创造了条件。成孔柱截面多为圆柱形或椭圆形，可以是弯曲的或非线性的，柱长度取决于叶片壁厚，约0.7~1.0 mm。成形时，成孔柱可位于芯/壳的任意位置，利于提高型芯定位的精准性和牢固性；脱芯时将率先溶出为脱芯提供辅助通道；溶出后能在叶片表面形成横截面积0.05~0.10 mm<sup>2</sup>、孔间距为孔径的4~7倍、孔与叶片表面交角10°~20°的喷射冷却孔，成功地解决了在叶片表面的任意部位直接形成由常规钻孔技术难以加工的冷却孔难题。

图9a为陶瓷树脂浆料经光固化技术成形的陶瓷型芯/薄壁壳/过滤器整体件与浇道蜡件、腔盖蜡件组合后形成的组合体<sup>[22]</sup>。采用常规制壳或其他工艺，在组合体上形成铸型外层，经蜡件脱除、脱脂烧结，制成包含金属液浇注通道及整个金属液腔体的铸型，如图9b。采用本方法制备铸型的特点是：

(1) 光固化技术仅用于芯/壳/过滤器整体件成形，缩短了坯体成形时间，并为使用不同陶瓷材料、采用不同工艺方法制备铸型外壳留有操作空间。

(2) 铸型外壳材料除常用的陶瓷材料外，也可选用导热性不同的氧化锆、氧化钇、氮化铝及碳化硅等，便于对不同部位材料导热率及孔隙率的设定、气隙或散热结构的设置及外层厚度的调控，以满足单晶叶片浇注对型壳不同部位的导热率要求。

由光敏树脂单体、光引发剂、陶瓷粉料和成孔剂配制的陶瓷树脂浆料，经立体光刻成形制成整体陶瓷芯/壳坯体后，成孔剂经150~250 °C升华与蒸发，树脂

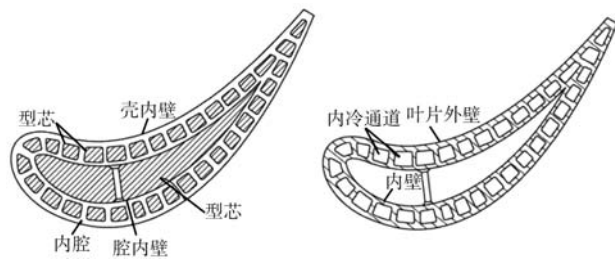


(a) 整体芯/壳/过滤器与蜡件组合体示意图 (b) 整体陶瓷铸型示意图

图9 整体芯/壳/过滤器与蜡件组合体和整体陶瓷铸型

Fig. 9 Integrated core-shell-filter with wax gate assemble and ceramic shell mold

料经275~400 °C烧失，陶瓷料经700~1 000 °C焙烧，制成整体陶瓷芯/壳<sup>[23]</sup>，可用于多层壁叶片浇注，如图10。陶瓷粉料包括但不限于粒径1~100 μm的氧化铝、氧化钇、氧化铈、氧化锆、氧化镁和氧化钙；成孔剂可以是粒径1~100 μm的有机物，例如萘及萘化物、聚乙烯醇、乙酰丙酮铝等。



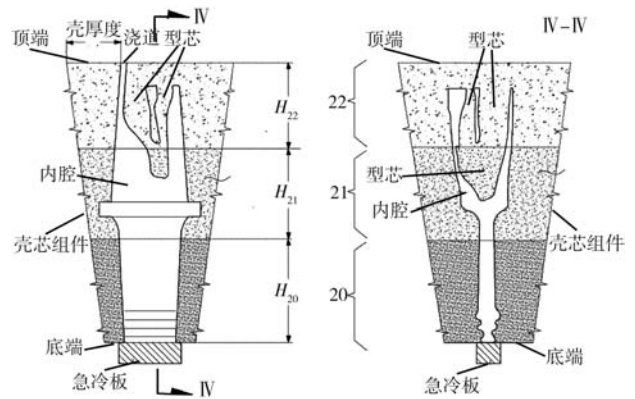
(a) 整体陶瓷芯/壳 (b) 多层壁叶片剖视图

图10 整体陶瓷芯/壳和多层壁叶片剖视图

Fig. 10 Cross sectional view of one-piece ceramic core/shell and multi-wall blade

与借助叶片树脂模制备整体铸型相比，陶瓷树脂浆料直接成形整体陶瓷芯/壳坯体工艺更简单。而且，高熔点陶瓷材料的选用有利于确保铸型高温结构稳定性，不同类别成孔剂的选能有效减少脱脂缺陷并改善型芯的退让性、脱芯性。然而，由粒径、密度不同的多种陶瓷、有机粉料制备低黏度、高固含量、高稳定性陶瓷树脂浆料的关键技术和由熔点高于2 000 °C的氧化物陶瓷粉料经低温焙烧制备单晶叶片浇注用整体芯/壳的核心技术，均值得高度关注。

直接使用金属激光熔化装置，将由环氧树脂、丙烯酸树脂等覆膜的粒径30~140目的陶瓷粉料成形为芯/壳组件坯体，经脱脂、焙烧，制成芯/壳组件<sup>[24]</sup>，如图11。在成形过程中，从底端到顶端可分段选用三种不同导热率的粉料，并逐层增大壳层壁厚，使组件导热率递减，利于确保固/液界面按预定方向推进，以减少冶金缺陷，提高叶片疲劳和蠕变强度。另外，组件Z轴方向多粉料成形，有利于增大导热率调控幅度。



(a) 陶瓷芯/壳纵剖面1 (b) 陶瓷芯/壳纵剖面2

图11 陶瓷芯/壳纵剖面示意图

Fig. 11 A schematic longitudinal sectional view of a ceramic shell and core

陶瓷光固化成形技术在陶瓷型芯、铸型制备方面已取得显著进展，但依旧面临控制尺寸精度、优化脱脂烧结工艺和控制裂纹变形等问题<sup>[25]</sup>。例如，由固含量60 vol%陶瓷光固化浆料成形，经1 300 °C/20 min烧结的整体硅基铸型，虽然没有裂缝缺陷，但径向和轴向成形收缩差大，分别为0.15% ± 0.4%和0.7 % ± 0.3%，烧结收缩大，分别为10.65% ± 0.05%和10.8% ± 0.1%，成为壁厚0.38~0.56 mm尾缘连接柱损毁的原因之一<sup>[26]</sup>。近期已成功通过单晶叶片浇注工艺验证的光固化成形复杂硅基陶瓷型芯，常温强度达18.4 MPa，尺寸偏差为± 0.2 mm，但1 500 °C/30 min挠度为7.48 mm<sup>[27]</sup>。

### 3 金属增材制造

由增材制造多晶结构金属叶片坯体，经制芯、制壳、重熔及定向凝固，制备单晶叶片的工艺过程包括<sup>[8]</sup>：

(1) 以镍基、钴基或铁基超合金粉为原料，采用选区激光烧结或熔融、直接金属沉积或电子束熔融等技术制备金属叶片坯体。其尺寸与外形接近于最终叶片，内设冷却通道腔体，在根部或顶端，多加叶片质量15%左右的合金材料。坯体为多晶结构，通常有玷污物、孔隙等次表层缺陷，孔隙体积约在1 vol%以下。

(2) 向金属坯体内腔注入陶瓷浆料, 经自行固化形成形芯坯体。

(3) 以金属坯体代替常规制壳过程中使用的蜡模, 制成厚约5~32 mm的陶瓷型壳坯体, 并在649~982 °C温度下经10~120 min焙烧, 制成包含陶瓷型芯和金属坯体的型壳中间组件, 如图12。制芯及制壳材料可以是常用陶瓷材料和钴或它们的组合。

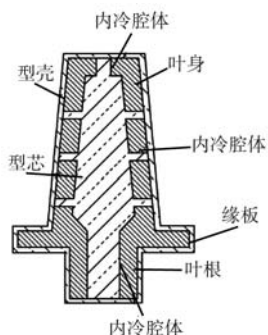


图12 中间组件剖视图

Fig. 12 Cross-sectional view of an intermediate component

(4) 经盖板将中间组件与选晶器及激冷板相连接, 如图13。

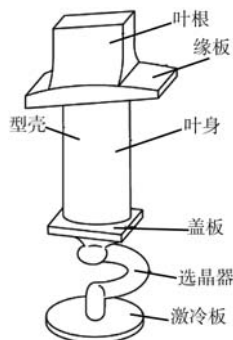


图13 连接选晶器组件透视图

Fig. 13 Perspective view of a component with a grain selector

(5) 以型壳为坩埚, 多晶叶片坯体经重熔-定向凝固, 以消除坯体内部与次表层缺陷, 转化成单晶结构。

由金属增材制造与重熔-定向凝固工艺相结合制备单晶叶片, 革新了熔模铸造工艺。主要反映在: 取消了陶瓷型芯预制工序, 代之以型芯浆料在叶片坯体内腔的原位固化; 取消了蜡模压制、组模工序, 代之以在叶片坯体上直接制壳并焙烧; 取消了坩埚制备、合金预熔及浇注工序, 代之以合金原位重熔并定向凝固。但是, 面临陶瓷材料必须同时满足合金重熔及定向凝固对坩埚、型芯和型壳的各项使用性能要求的问题, 也面临芯/壳坯料在制备与使用过程中收缩受阻以

及烧结程度、烧结强度及高温结构稳定性与金属坯体软化和合金重熔相匹配等新课题。

## 4 多材料增材制造

### 4.1 陶瓷-聚合物复合

根据叶片截面空心区和实心区形状, 采用激光选区烧结或熔融技术将由双供料系统分别送入的陶瓷粉料和蜡料, 成形为内含型芯坯体的蜡模<sup>[28]</sup>。陶瓷粉料中包括 $D_{50} < 100 \mu\text{m}$ 的石英玻璃粉, 型芯和蜡模局部厚度可小于0.5 mm。增材制造型芯/蜡模的特点是: 取消了型芯预制和蜡模压制工序, 有利于提高型芯在蜡模内的定位精度和蜡膜壁厚、轮廓精度。但台阶效应可能影响型芯和蜡模表面光洁度。

### 4.2 陶瓷-陶瓷复合

图14为陶瓷光固化技术成形的氧化钇涂层陶瓷型芯, 内设中空腔体<sup>[29]</sup>。基体材料可以是氧化硅, 氧化铝等, 面层材料为钇的氧化物或复合氧化物, 烧结温度制度为1 100~1 540 °C/约80 h。氧化钇面层厚度通常为0.13~2.54 mm, 视各部位热负荷不同而定。例如, 面层R部位厚度根据铸件CR部位的厚度作相应调整。中空腔体改善了型芯溶出性, 氧化钇面层增强了型芯与合金的化学相容性。

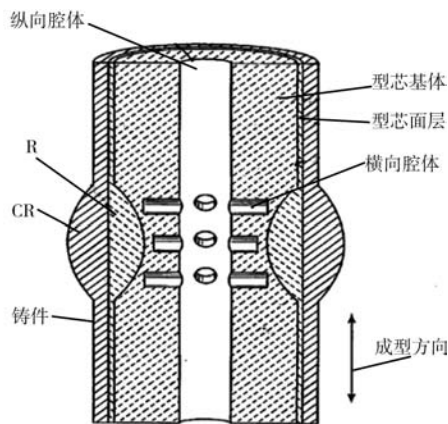


图14 陶瓷型芯示意性截面透视图

Fig. 14 Schematic sectional perspective view of ceramic core

### 4.3 陶瓷-高温合金复合

图15为采用立体光刻或激光净成形技术制备的型芯-叶片-型壳坯体组合体<sup>[30]</sup>。由陶瓷和合金粉料分别形成形芯、型壳坯体和叶片坯体。经烧结, 制成包含陶瓷型芯和金属叶片坯体的整体铸型。以型壳为坩埚, 经重熔-定向凝固制成单晶叶片。

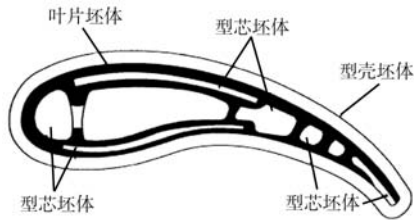


图15 整体芯/壳及叶片组合体横截面图

Fig. 15 Lateral cross-section view of core-shell-turbine blade assembly

#### 4.4 陶瓷-耐熔金属复合

陶瓷和耐熔金属材料经激光或电子束熔化增材制造的多芯结构如图16所示<sup>[31]</sup>。型芯包含多个用于形成叶片主冷却通道的实心、空心或网格结构的主干。主干上包含用于形成叶片冷却微通道的蒙皮芯，主干和蒙皮芯，还可包含内设多个茎节和分支的血管网络（vascular network）。

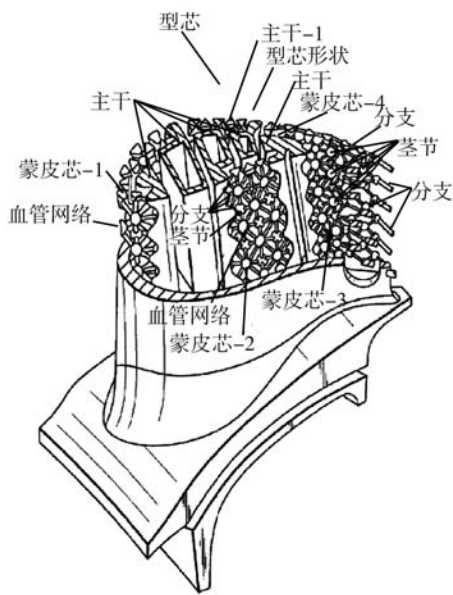


图16 陶瓷/耐熔金属多芯结构

Fig. 16 Ceramic/refractory metal multiple core geometries

陶瓷/耐熔金属多芯结构能满足对多层壁单晶叶片浇注适用性、热膨胀性、稳定性、可溶性和交货期的要求，其特点是：

(1) 利于整体气冷结构设计的调整与整体内冷主通道和次级微通道的制造，并形成内冷通道的径向和轴向锥度，以降低压力损失，优化热吸收、热传递及热对流效率，既能减小叶片、叶盘和推进系统重量，又能提高冷却效率。

(2) 便于形成由级进冲压、压印、电火花加工等常规机加工工艺无法制造而易于溶出的独特金属件结构，并直接在结构件表面形成防氧化涂层，消除金属

件和陶瓷件间的热胀失配，减少型芯各部位间的相对位移，确保叶片内、外壁厚精度，提高叶片结构强度。

(3) 便于在叶片内腔的任意部位形成内冷微型通道和气膜冷却孔，增强对叶片外部高热负荷部位的冷却，提高叶片温度均匀性。

#### 4.5 高温合金-耐熔金属复合

以高温合金粉和耐熔金属粉为原料，经金属增材制造成形为金属叶片坯体和型芯耐熔金属件组合体，内设用于形成形芯陶瓷件的腔体<sup>[30]</sup>，如图17。向腔体中注入陶瓷型芯浆料，经固化形成形芯陶瓷件坯体。在叶片坯体上采用常规制壳工艺制备陶瓷型壳坯体。经烧结，制成内含陶瓷-耐熔金属组合型芯和叶片坯体的整体铸型。

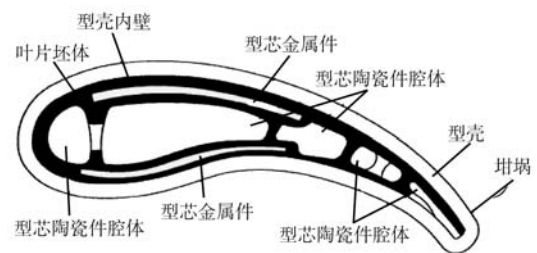


图17 叶片坯体-型芯金属件组合体横截面图

Fig. 17 Lateral cross-section view of blade body-metal core assembly

当金属叶片坯体表面轮廓不符合气动动力学质量要求时，可在陶瓷型芯件固化后，先在叶片坯体表面压制薄层蜡料，而后按常规工艺制壳，以有效提高叶片轮廓精度及表面质量。

#### 4.6 陶瓷-高温合金-耐熔金属复合

当单晶叶片在服役过程中因开裂、腐蚀需局部更换或因冷却特性、动力学特性需局部修理时，宜将待更换或修理部分从叶片上切下，并按如下工艺制备替换件：采用三供料系统供料，在用高温合金粉料制备叶片坯体的同时，用陶瓷粉料制备型芯陶瓷件坯体和型壳坯体，用钨或钼粉制备位于内冷主通道外侧的型芯金属件。经烧结后，形成内含陶瓷/耐熔金属组合型芯和叶片坯体的整体铸型<sup>[32]</sup>，如图18。经重熔并定向凝固，制成单晶叶片替换件。

本方法的优点为：单晶叶片替换件制备周期短，修复速度快；设计自由度高，便于按需定制；替换件零库存，修复成本低。

多材料增材制造突破了组件性能受制于单一材料结构的束缚，使组件的不同部位具备不同性能，为实现陶瓷型芯、型壳及铸型的控形与控性相结合创造了

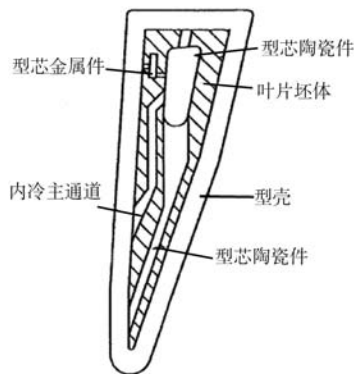


图18 替换件组合体截面图

Fig. 18 Lateral cross-section view of a replacement body assembly

条件。但多材料增材制造技术既面临不同材料熔点、导热率、润湿性、膨胀系数等物理性质差别过大的挑战，又面临预制系统完善、设备性能提升、结合界面及成形质量控制等方面的挑战<sup>[33]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 樊振中. 熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势 [J]. 航空制造技术, 2019, 62 (9): 38-52.
- [2] 张立同, 曹腊梅, 刘国利, 等. 近净形熔模精密铸造理论与实践 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [3] 李涤尘, 吴海华, 卢秉恒. 型芯型壳一体化空心涡轮叶片制造方法 [J]. 航空制造技术, 2009, 52 (3): 38-42.
- [4] LIANG G. Turbine blade with impingement cooling cavities and platform cooling channels connected in series: US8734108B1 [P]. 2014-5-27.
- [5] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 143: 172-196.
- [6] 袁战伟, 常逢春, 马瑞, 等. 增材制造镍基高温合金研究进展 [J]. 材料导报, 2022, 36 (3): 200-208.
- [7] 刘龙涛, 陈超越, 李霞, 等. 激光增材制造单晶高温合金研究进展 [J]. 精密成形工程, 2019, 11 (4): 73-80.
- [8] MCBRIEN J, CASTLE L K, SPANGLER B W, et al. Regenerating an additively manufactured component to cure defects and alter microstructure: US9364888B2 [P]. 2016-6-14.
- [9] 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.
- [10] BRENNEMAN R C, BULLIED S J. Apparatus and method for investment casting core manufacture: US10695826B2 [P]. 2020-6-30.
- [11] SIMPSON S F. Method and assembly for forming components having internal passages using a jacketed core: US10046389B2 [P]. 2018-8-14.
- [12] LEE C P, WANG H P, UPADHYAY R K, et al. Composite core die, methods of manufacture thereof and articles manufactured therefrom: US9566642B2 [P]. 2017-2-14.
- [13] DENNISON R R, HANET R P, KRUSE J C, et al. Disposable core die and method of fabricating a ceramic body: US10526251B2 [P]. 2020-1-7.
- [14] 吴海华, 黄川, 刘富林, 等. 复杂精密铸件整体式陶瓷铸型间接自由成形工艺 [J]. 铸造技术, 2015, 36 (2): 480-484.
- [15] 李涤尘, 鲁中良, 田小永, 等. 增材制造—面向航空航天制造的变革性技术 [J]. 航空学报, 2022, 43 (4): 525387.
- [16] 王权威, 王程冬, 鲁中良, 等. 面向单晶涡轮叶片的氧化硅基陶瓷型芯快速成形性能 [J]. 材料工程, 2022, 50 (7): 51-58.
- [17] WANG H P, LEE C P. Synthetic model casting: US7413001B2 [P]. 2008-8-19.
- [18] LEE C P, WANG H P. Ceramic cores, methods of manufacture thereof and articles manufactured from the same: US7938168B2 [P]. 2011-5-10.
- [19] 孙冬, 陈双, 史玉升, 等. 陶瓷型芯壳激光增材制造研究进展 [J]. 中国激光, 2022, 49 (12): 1-18.
- [20] KAMEL A, MERRILL G B. Turbine component casting core with high resolution region: US8813812B2 [P]. 2014-8-26.
- [21] DEINES J H, PRZESLAWSKI B D, MCCARREN M J, et al. Multi-piece integrated core-shell structure for making cast component: US20180161866A1 [P]. 2018-6-14.
- [22] YANG X, COLE M, BROWN M, et al. Additively manufactured casting core-shell mold with integrated filter and ceramic shell: US10974312B2 [P]. 2021-4-13.

## 5 结束语

增材制造技术在单晶叶片浇注中的应用, 显著缩短了叶片试制与生产周期, 利于有效控制叶片内腔形位精度、壁厚精度和轮廓精度, 实现等轴晶向单晶的结构转化, 便于实现型芯、型壳、铸型制备的控形与控性相结合, 其中重熔一定向凝固技术, 有可能发展成单晶叶片快速制造前沿技术。

为充分发挥增材制造技术优势、降低叶片生产成本、提高叶片服役寿命, 在成形基体材料方面, 急需进一步加强专用陶瓷新材料研究, 优化材料体系, 为芯/壳材料同质化创造条件; 进一步加强浆料制备、固化成形及脱脂烧结工艺研究, 以降低收缩、减小变形、调控强度、避免开裂。在确保铸型尺寸精度的同时, 提高高温结构稳定性、化学相容性、退让性、脱芯性及表面质量, 以满足高温合金单晶叶片浇注过程中不同阶段对不同部位的不同使用性能要求。



- [23] GOLD S A. Resin for production of porous ceramic stereolithography and methods of its use: US11230503B2 [P]. 2022-1-25.
- [24] KRALETI PK, MATTA NJ. Turbine blade manufacturing method: US10994439B2 [P]. 2021-5-4.
- [25] 陈超越, 殷宇豪, 徐松哲, 等. 航空发动机叶片用陶瓷型芯的光固化增材制造研究现状 [J]. 航空制造技术, 2022, 65 ( 1 ) : 67-76.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] O'CONNOR K F. Method of making a core/pattern combination for producing a gas-turbine blade or component: US5250136 [P]. 1993-10-5.
- [29] FRANK GR. Ceramic casting core made by additive manufacturing: US20150306657 [P]. 2015-10-29.
- [30] XU J Q. Method for forming components using additive manufacturing and re-melt: US9718127B2 [P]. 2017-8-1.
- [31] PROPHETER H T, MONGILLO J, DOMINIC J, et al. Additively manufactured core: US20160151829A1 [P]. 2016-6-2.
- [32] XU J Q. Method for forming a directionally solidified replacement body for a component using additive manufacturing: US9770758B2 [P]. 2017-9-26.
- [33] 王晓强, 文世峰, 周燕, 等. 多材料增材制造研究现状及展望 [J]. 电加工与模具, 2022 ( 2 ) : 1-14, 36.

---

## Application of Additive Manufacturing Technology to Molding of Single Crystal Turbine Blades

ZHAO Xiao-zhong, CHENG Tao, LI Jian-hua, ZHENG Shu-ya  
(Liaoning Hangan Core Technology Co., Ltd., Shenyang 110164, Liaoning, China)

### Abstract:

The application of polymer, ceramic, metal and multi-material additive manufacturing techniques to molding of single crystal turbine blades is introduced. The combination of additive manufacturing and investment casting improves the flexibility of investment casting single crystal blades, and accelerates the development and production process of blades. Especially, the development of multi-material additive manufacturing technology is expected to provide a new way to realize the combination of controlling shape and property for ceramic core and shell mold, and the development of remelting-directional solidification technology is expected to provide a new idea for the molding of single crystal blades. But there are still many challenges in ceramic materials research and process control.

### Key words:

additive manufacturing; investment casting; single crystal turbine blade; ceramic materials

---