

DOI: 10.7652/xjtuxb201610022

空心涡轮叶片陶瓷铸型微细结构 负压吸注充型工艺研究

杨强^{1,2}, 鲁中良^{1,3}, 李振发¹, 苗恺^{1,3}, 李涤尘^{1,2}

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安交通大学高端制造装备协同
创新研究中心, 710049, 西安; 3. 北京航空航天大学先进航空发动机协同创新中心, 100191, 北京)

摘要: 为了提高在基于光固化成型技术的空心涡轮叶片型芯、型壳一体化陶瓷铸型制造方法中陶瓷浆料对微细复杂结构的充型能力和铸型结构的完整性,提出了负压吸注凝胶注模工艺方法。以某型号空心涡轮叶片的冷却通道微孔为研究对象,利用细长管道充型原理,分析了凝胶注模工艺制造陶瓷铸型的充型行为。采用仿真分析的方法,在不同进出口压力差下,对冷却通道微孔简化模型负压吸注的充型情况进行模拟仿真,得到合理的负压吸注进出口压力差参考值,通过负压吸注实验和工业微米 X 射线成相系统检测对仿真结果进行验证。最后,分析了负压吸注工艺对陶瓷铸型性能的影响。研究表明:当氧化铝基陶瓷浆料固相体积分数为 60%、负压吸注的进出口压力差为 0.03 MPa 时,可实现空心涡轮叶片冷却流道微孔结构的凝胶注模完整无缺陷充型,并且可以提高陶瓷铸型坯体的致密度和强度。

关键词: 光固化成型技术;空心涡轮叶片;冷却微孔;负压吸注;陶瓷铸型

中图分类号: V254.2;TG221 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)10-0147-06

Gelcasting Filling for Small Structure of Hollow Turbine Blade Ceramic Mold

YANG Qiang^{1,2}, LU Zhongliang^{1,3}, LI Zhenfa¹, MIAO Kai^{1,3}, LI Dichen^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Collaborative Innovation Center of High-End Manufacturing Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Co-Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: To improve the filling capacity of slurry and integrity of ceramic mold in process of fabricating the integral ceramic mold based on stereolithography, a negative pressure injection method is proposed, which focuses on small cooling holes of hollow turbine blade. The gel-casting filling process is investigated following the filling principle for a long and thin tube. A numerical simulation is carried out to reveal the effect of negative pressure injection on the mold filling capacity of slurry in small and complex structures, and the suitable pressure difference between the import and export is obtained. The negative pressure injection experiment and industrial CT detection are performed to verify the simulation results. The effect of negative pressure injection on the performance of ceramic mold is analyzed. It is found that the small cooling holes of hollow turbine blade can be duplicated without defects when the solid loading of alumina ceramic slurry possesses 60% and the pressure difference between the import and export

收稿日期: 2016-03-22。 作者简介: 杨强(1987—),男,博士生;鲁中良(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家“973 计划”资助项目(2013CB035703)。

网络出版时间: 2016-07-14 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160714.1738.024.html>

reaches 0.03 MPa, and the density and strength of the green ceramic mold can be improved.

Keywords: stereolithography; hollow turbine blade; cooling hole; negative pressure injection; ceramic mold

空心涡轮叶片是航空发动机的关键零部件,因其结构复杂、精度要求高而难以制造,被誉为“王冠上的明珠”^[1-2]。随着航空发动机推重比的不断提高,涡轮叶片的工作温度随之升高,为了满足叶片的工作要求,采用大量的复杂冷却结构,尤其是微细冷却流道和气膜孔结构^[3-4],在提高涡轮叶片冷却效率的同时也加剧了叶片的制造难度。基于光固化成型技术的型芯、型壳一体化陶瓷铸型制造方法,结合了光固化快速成型技术和凝胶注模技术,可实现空心涡轮叶片陶瓷铸型的整体式制造,不仅可以实现叶片内部复杂结构的成形,而且可以有效避免传统熔模铸造在型芯、型壳装配过程中产生的误差,同时缩短了制造周期,降低了制造成本^[5-8]。

凝胶注模是一种新型的近净尺寸陶瓷原位成形技术,可以成形具有复杂结构的陶瓷零部件,且成形坯体组织均匀性好、强度高,广泛应用于航空航天、生物制造、快速模具等领域^[9-12]。在采用凝胶注模成形空心涡轮叶片陶瓷铸型的过程中,陶瓷浆料在树脂模具中的充型是一个关键环节,其充型质量将对整个空心涡轮叶片陶瓷铸型的复形质量产生直接影响。然而,空心涡轮叶片结构复杂,内部微细结构较多,在陶瓷浆料的充型过程中,依靠陶瓷浆料自身的重力作用仅能满足结构简单、尺寸较大零件的充型要求,对于空心叶片中的一些微细结构,则难以实现完整的充型,导致陶瓷铸型最终存在结构缺陷,不能达到空心涡轮叶片精密铸造的要求。

本文针对这一问题,分析了基于光固化成型技术的空心涡轮叶片陶瓷铸型微细结构凝胶注模的充型特征,提出了利用负压吸注工艺提高陶瓷浆料充型能力,实现对微细结构进行完整充型的方法。以冷却流道微孔结构为例,仿真分析了微细结构能够实现完整充型的合理压差。最后,通过负压吸注工艺,成功制备了具有完整冷却流道微孔结构型芯的空心涡轮叶片陶瓷铸型。

1 陶瓷铸型微细结构充形特征

在凝胶注模充型过程中,影响微细结构充型完整性的主要因素可以归结为两个方面:一方面陶瓷浆料的黏度和流变特性会直接影响陶瓷浆料的流动性,从而影响其充型能力^[13-14];另一方面陶瓷浆料的

充型动力会影响浆料在树脂模具中的充型速率,从而影响到陶瓷浆料的充型能力。参照本课题组前期的研究,可制备出固相体积分数为60%、表观黏度小于0.25 Pa·s、具有良好流动性的陶瓷浆料^[15-17]。然而,在使用此陶瓷浆料制造空心涡轮叶片陶瓷铸型的过程中,发现在叶片的冷却流道微孔结构等微细处仍然存在因充型不足或者夹气等原因造成的结构缺陷,因此提高浆料的充型动力成为解决这一问题的新思路。

陶瓷浆料在微细结构中的流动可以看作是在细长管道中的流动,如图1所示。陶瓷浆料在充型动力 P 的作用下充填树脂模具型腔的过程中,前端受到了一系列的阻力,主要包括:模具内空气产生的压力,细小结构内的表面张力引起的毛细阻力以及浆料与模具内壁的摩擦力。

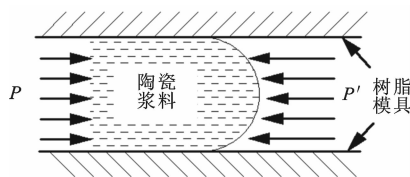


图1 陶瓷浆料在管道中的充型示意图

因此,陶瓷浆料能够完成流动充型需满足的条件为

$$P \geq P_1 + P_2 + f \quad (1)$$

式中: P 表示陶瓷浆料充型的动力,包括陶瓷浆料浇注过程中在重力作用下的液位压力和外力场形成的压力(如加压、真空、离心等); P_1 为模具内气体产生的压力; P_2 为陶瓷浆料表面张力形成的毛细阻力; f 为陶瓷浆料与模具表面摩擦以及其他因素形成的阻力。

由式(1)可以看出,由于 P_2 与 f 需要从陶瓷浆料或者树脂模具的本身性质上做出改变才能改变,因此这两个因素的改变比较困难。减少出口端的气体压力 P_1 可以相对提高浆料的充型动力 P 。因此,本文提出了负压吸注的工艺方法,通过在浆料出口端抽真空减小出口端的气体压力 P' ,在浆料进出口两端形成压力差来提高浆料的充型动力,以提高浆料在微细结构处的充型能力。

为此,设计与组装了一套简易的负压吸注凝胶注模实验装置,如图2所示,其中浆料的流动方向自

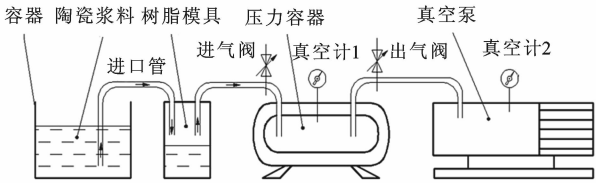


图 2 负压吸注的装置示意图

左向右。

2 凝胶注模负压吸注压差模拟

在负压吸注过程中,选择合适的进出口压差至关重要。进出口压差过低,会造成陶瓷浆料充型动力不足,从而导致浆料充型速度过慢,浇注操作时间过长,会出现树脂模具并未完整充型就已经开始聚合固化而不能继续充型的现象;进出口压差过大,则浆料的流动速率太快,在充型过程中易产生紊流,浆料会将尺寸较大的型腔充型完成后,就从出口流出,出现微细结构不能完全充型的现象。另外,树脂模具在较大的压差作用下也会发生一定的变形,从而影响陶瓷铸型坯体的尺寸精度,因此适当的进出口压差是负压吸注工艺的关键。

由于仅通过实验手段难以观察浆料充型的内部动态过程,不易确定浆料浇注所需的最优工艺参数,所以本文先通过模拟分析的方法来模拟浆料填充模具的动态过程,分析确定陶瓷浆料实际浇注过程中所需的压差,为具体的工程实验提供参考。

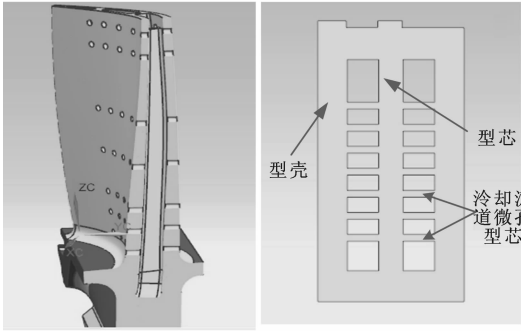
2.1 模型设计与网格划分

本文选取了空心涡轮叶片中的一种微细结构,也是叶片陶瓷铸型凝胶注模过程中充型最困难的部位——冷却流道微孔,来模拟陶瓷浆料在树脂模具内的充型过程。图 3a 为空心涡轮叶片型芯的 CAD 模型,其中有大量的冷却微孔结构,为方便计算,将其简化为二维模型,如图 3b 所示。其中左右流道为型壳,厚度为 6 mm,中间为冷却流道微孔型芯,型芯与型壳相连为一体,高度为 70 mm,冷却流道微孔的孔径为 1.5 mm,型壳壁厚为 6 mm。

对图 3b 所示的冷却流道微孔简化模型进行网格划分,选用八叉树方法生成网格。若网格划分得较大,则网格数量较少,计算速度较快,但却无法对模型中的微细结构进行准确模拟;若网格划分较细,则网格数量很多,计算速度很慢,会耗费大量时间。因此,参照模型最小尺寸结构进行网格优化,最终得到的网格数为 8 144。

2.2 材料、边界条件及算法设定

将上述网格划分后得到的网格文件导入到



(a)CAD 模型 (b)简化模型

图 3 叶片冷却流道微孔型芯 CAD 模型及简化模型

ANSYS Workbench 中,设定陶瓷浆料的入口、出口及型壳,设置模型下端为陶瓷浆料入口,上端为出口。陶瓷浆料在树脂模具中的流动可视为气液两相流,因此选取 Fluent 模块中的 VOF 多相流模型进行模拟计算,选择液相为基本相,气相为第二相,其各项主要参数如表 1 所示。

表 1 陶瓷浆料模拟计算参数

材料状态	重力加速度 / $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	密度 / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	黏度 / $\text{Pa} \cdot \text{s}$	表面张力 / $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
液相	9.8	2 700	1.10	0.072 75

边界条件入口设为压力入口、出口设为压力出口。时间步设为 0.1 ms,计算 20 000 步,观测空气相体积分数的云图,每 50 个时间步自动保存一次计算结果。假设陶瓷浆料在充型过程中,进料口与出料口两端的压力差始终保持一个定值,忽略其他外部因素的影响。另外,还模拟不同压差下陶瓷浆料在叶片冷却流道微孔中的充型情况。

2.3 模拟结果分析

对压差从 0.1 MPa 到 0.01 MPa,每隔 0.01 MPa 进行一次模拟,选取其中最具代表性的 4 组进出口压差 0.08、0.06、0.03、0.02 MPa 进行讨论。图 4~图 7 分别为不同进出口压差下在填冲时间(t)为 5 s 和 15 s 时的模拟云图,其中浅色为空气相,深色为陶瓷浆料液相,通过云图可以明显地看到浆料在树脂模型中的流动情况。

由模拟计算结果可以看出:当两端压差较大(进出口压差为 0.08 MPa)时,由于压差提供的压力远远大于陶瓷浆料所受的阻力,陶瓷浆料在内部的流动阻力小,填充快;但对于尺寸很小的结构,陶瓷浆料会在这些复杂细小结构部位形成紊流,反而使内部的流动阻力增大,充型过程缓慢,最终导致在冷却微孔结构处出现充型不足或夹气现象。当进出口压

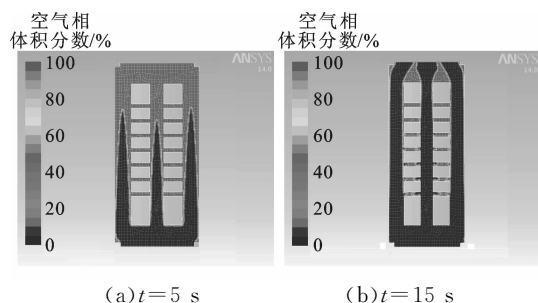


图4 压差为 0.08 MPa 浆料的充型情况

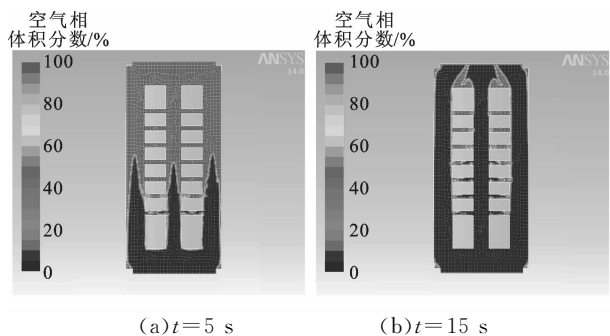


图5 压差为 0.06 MPa 浆料的充型情况

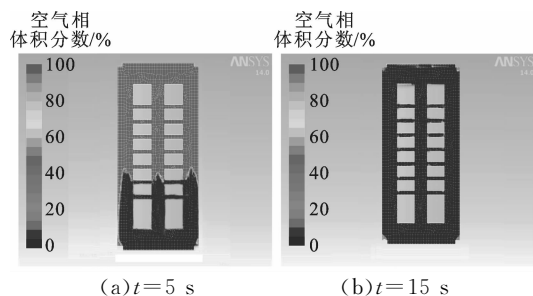


图6 压差为 0.03 MPa 浆料的充型情况

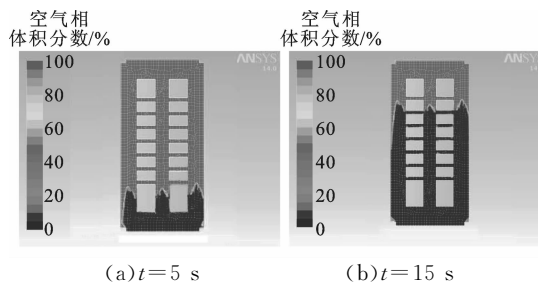


图7 压差为 0.02 MPa 浆料的充型情况

差为 0.06 MPa 时,浆料流速依然比较快,同样会在微细结构处形成紊流,造成铸型的复形缺陷。当两端压差较小(进出口压差为 0.02 MPa)时,陶瓷浆料在树脂模具内充型流动速度较慢。充型速度太慢,会造成还未完全充型浆料就开始发生凝胶固化,最终导致充型失败。当进出口压差为 0.03 MPa 时,陶瓷浆料在模型中的流动状况良好,浆料以稳定的层流状态进行充型,内部的冷却流道微孔结构实现了完整充型。因此,0.03 MPa 可作为负压吸注工

艺进出口压差的一个合理的参考值。

3 实验

为确定负压吸注过程中能够实现陶瓷铸型完整复形的合理进出口压差,仍需要具体的负压吸注实验来进行验证。利用本课题组前期研究制备的固相体积分数为 60% 的四级颗粒级配、黏度值为 $0.236 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的氧化铝基陶瓷浆料^[15-17],进行负压吸注实验。分别采用 -0.08 、 -0.06 、 -0.03 MPa 的压差,对冷却流道微孔简化模型和含有冷却流道微孔的真实叶片模型进行负压吸注凝胶注模实验。

3.1 冷却流道微孔结构简化模型负压吸注实验

针对上述冷却流道微孔结构的简化模型,首先采用光固化快速成型技术制造出树脂模具,如图 8a 所示。采用负压吸注工艺将制备好的陶瓷浆料充型至树脂模具中,待浆料固化成型后,冷冻干燥 48 h,再将陶瓷坯体放入脱脂炉中 950°C 脱脂,得到预烧的陶瓷坯体。最后,对该简化模型的预烧陶瓷坯体进行工业微米 X 射线成像系统(CT)检测,观察冷却流道微孔简化模型的浇注情况,检测结果如图 8b~8d 所示。

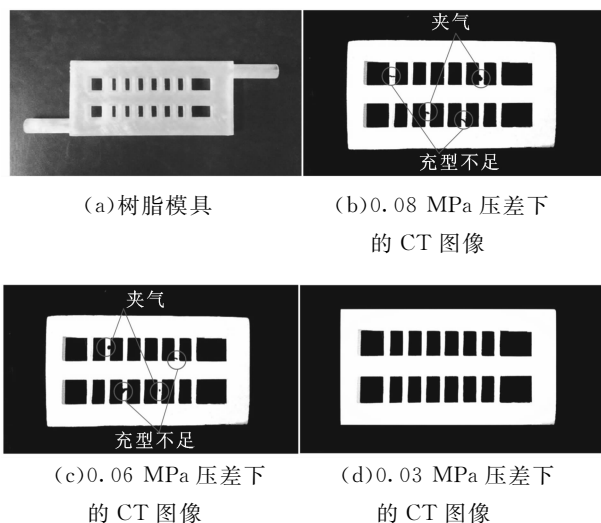


图8 冷却流道微孔结构的简化模型的负压吸注实验

由图 8 可以看出,冷却流道微孔简化模型的负压吸注充型实验结果与模拟分析结果相吻合。当压差为 0.08 MPa 和 0.06 MPa 时,在冷却微孔结构处均存在浇注不足和夹气现象造成的结构缺陷。当压差为 0.03 MPa 时,冷却流道微孔的简化模型浇注完整,无充型缺陷。

3.2 带有冷却流道微孔结构的叶片负压吸注实验

由冷却流道微孔简化模型的负压吸注实验可以看出,当进出口压差为 0.03 MPa 时,可以实现该简

化模型的无缺陷复形。为了验证这一压差和工艺下能否实现对含有冷却流道微孔的叶片陶瓷铸型的制造,本文选取了带有冷却流道微孔结构的叶片模型再次进行负压吸注实验,其中冷却流道微孔直径为 1.5 mm。

首先设计含有冷却流道微孔结构的叶片 CAD 模型,如图 9a 所示,然后再采用光固化快速成型技术制造出凝胶注模用的树脂模具,如图 9b 所示。

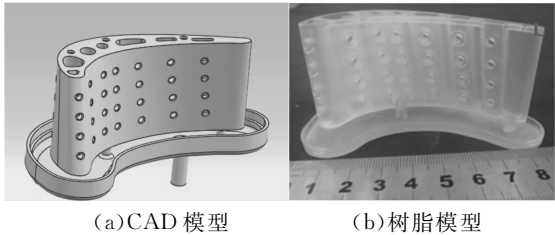


图 9 带冷却流道微孔叶片的局部 CAD 模型及其树脂模具

将上述制备好的氧化铝基陶瓷浆料,再次采用负压吸注工艺充型至叶片树脂模具中进行凝胶注模成型,待陶瓷浆料在树脂模具中固化成型后,冷冻干燥 48 h,再将陶瓷坯体放入脱脂炉中 950 ℃脱脂,得到预烧的陶瓷铸型坯体。最后,对叶片的预烧铸型进行工业 CT 检测,观察叶片及冷却流道微孔结构的充型情况,如图 10a~10c 所示。

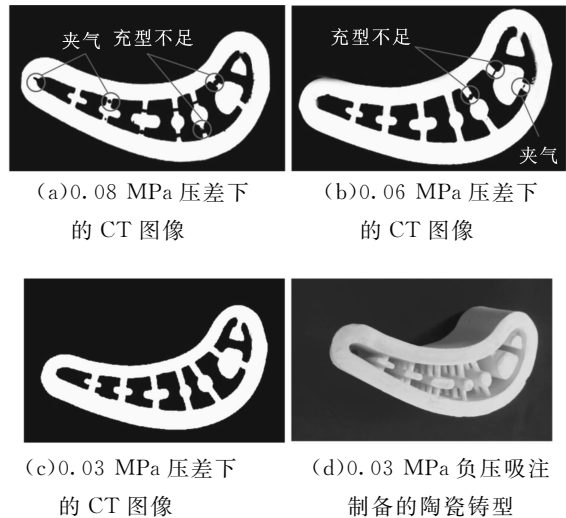


图 10 不同压差下负压吸注冷却流道微孔结构叶片的工业 CT 图

由图 10 可以看出,实验结果与模拟分析结果相符。当压差为 0.08 MPa 时,叶片尾缘与冷却流道微孔型芯处均存在因浇注不足和夹气现象造成的缺陷;当压差为 0.06 MPa 时,叶片的冷却流道微孔结构处也存在缺陷;当压差为 0.03 MPa 时,叶片及冷

却流道微孔结构均浇注完整,不存在充型缺陷,实现了叶片的完整复形。

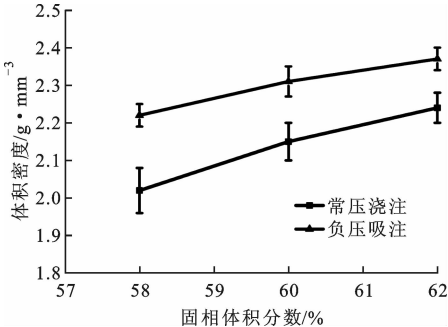
最终采用 0.03 MPa 的进出口压差,利用负压吸注工艺,成功制备出含冷却流道微孔结构的叶片陶瓷铸型,如图 10d 所示。陶瓷铸型坯体干燥、脱脂、烧结后,观察发现直径 1.5 mm 的冷却微孔陶瓷型芯全部完整,不存在因浆料充型不足或夹气现象造成的冷却微孔型芯断裂缺陷,且叶片的前缘与尾缘等部位也不存在裂纹等缺陷,陶瓷铸型的复形质量良好。

3.3 负压吸注对陶瓷铸型坯体性能的影响

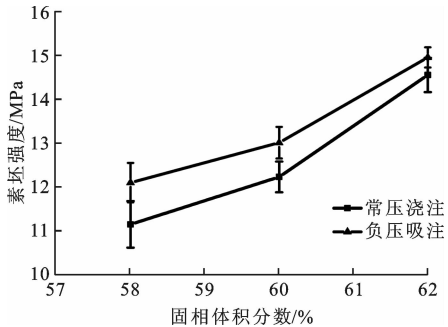
负压吸注工艺可以明显改善陶瓷浆料的充型和复形能力,减少充型不足和夹气现象的出现,提高陶瓷铸型的复形精度。但是,负压吸注工艺对凝胶注模陶瓷铸型性能的影响,同样是衡量负压吸注工艺能否成功应用于陶瓷铸型凝胶注模中一个重要因素。

为此制备了 3 种不同固相体积分数(58%, 60%, 62%)的氧化铝基陶瓷浆料,分别在负压吸注和常压浇注两种情况下获得实验试样,并采用阿基米德排水法测量成型后坯体的体积密度及显气孔率,采用三点抗弯实验法测量其抗弯强度。图 11 为负压吸注与常压浇注两种不同的浇注方式下陶瓷坯体的体积密度与素坯强度的对比情况。

由图 11 可以看出,采用负压吸注工艺之后,对于不同固相体积分数的陶瓷浆料所成型的坯体,其



(a)对体积密度的影响



(b)对素坯强度的影响

图 11 负压吸注工艺对陶瓷铸型坯体性能的影响

体积密度和素坯强度均有所提高。对于固相体积分数为60%的浆料,素坯的体积密度由 2.15 g/mm^3 提高到 2.31 g/mm^3 ,提高了7.4%,抗弯强度由 12.34 MPa 提高到 12.76 MPa ,提高了3.4%。由此可知,负压吸注工艺可提高陶瓷坯体的体积密度和抗弯强度,有利于提高陶瓷铸型的综合性能。

4 结 论

(1)提出了利用负压吸注工艺改善凝胶注模陶瓷浆料充型能力的方法,得到了合理的进出口压差参数。对于固相体积分数为60%的氧化铝基陶瓷浆料,进出口压力差为 0.03 MPa 时,可实现空心涡轮叶片陶瓷铸型微细结构(如冷却流道微孔等结构)的无缺陷复型,提高了陶瓷铸型的复形精度。

(2)在进出口压差为 0.03 MPa 时,陶瓷坯体的致密度和抗弯强度均得到提高,有利于提高陶瓷铸型的综合性能。实验表明,对于固相体积分数为60%的氧化铝基陶瓷浆料,在采用负压吸注工艺后获得的陶瓷铸型素坯较之常压下浇注的素坯体积密度提高了7.4%,素坯强度提高了3.4%,有利于制造出综合性能更加良好的陶瓷铸型。

(3)空心涡轮叶片具有复杂的微细内部结构,其凝胶注模充型过程非常复杂,本文以简化模型开展的充型模拟具有一定的局限性,因此真实空心涡轮叶片的充型模拟将有待进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 陈荣章. 航空铸造涡轮叶片合金和工艺发展的回顾与展望[J]. 航空制造技术, 2002(2): 19-23.
CHEN Rongzhang. Review and prospect of developments of cast superalloys and technology of aeroengine turbine blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2002(2): 19-23.
- [2] 康海峰, 李飞, 赵彦杰, 等. 高温合金空心叶片精密铸造用陶瓷型芯与型壳的研究现状[J]. 材料工程, 2013(8): 85-91.
KANG Haifeng, LI Fei, ZHAO Yanjie, et al. Research status on ceramic cores and shells for superalloy hollow blades investment casting[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(8): 85-91.
- [3] GOLDSTEIN R J, JIN P. Film cooling downstream of a row of discrete holes with compound angle[J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(2): 222-230.
- [4] MAITEH B Y, JUBRAN B A. Effects of pressure gradient on film cooling effectiveness from two rows of simple and compound angle holes in combination[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(9): 1457-1469.
- [5] 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(3): 36-42.
LI Dichen, WU Haihua, LU Bingheng. Shaping method of hollow turbine blades with integral shelled core ceramic mold[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(3): 36-42.
- [6] WU H, LI Dianrong, TANG Y, et al. Rapid casting of hollow turbine blades using integral ceramic moulds[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part B Journal of Engineering Manufacture, 2009, 223(6): 695-702.
- [7] WU Haihua, LI Dichen, CHEN Xiaojie, et al. Rapid casting of turbine blades with abnormal film cooling holes using integral ceramic casting molds[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(1/2/3/4): 13-19.
- [8] 刘涛, 鲁中良, 苗恺, 等. 面向空心涡轮叶片的氧化铝基陶瓷铸型高温强化制造[J]. 航空学报, 2014, 35(7): 2072-2080.
LIU Tao, LU Zhongliang, MIAO Kai, 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.
- [9] OMATETE O O, JANNEY M A, STREHLOW R A. Gelcasting: a new ceramic forming process[J]. American Ceramic Society Bulletin, 1991, 70(10): 1641-1649.
- [10] 李县辉, 燕青芝, 韩永军, 等. 结构陶瓷凝胶注模技术研究进展[J]. 陶瓷学报, 2014, 35(3): 243-248.
LI Xianhui, YAN Qingzhi, HAN Yongjun, et al. Research and development of gelcasting for structural ceramics[J]. Journal of Ceramics, 2014, 35(3): 243-248.
- [11] 李祥, 王成焘. 基于增材制造和凝胶注模成型技术的多孔生物陶瓷支架制备与表征[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志, 2013, 5(1): 35-39.
LI Xiang, WANG Chengtao. Preparation and characterization of porous bioceramic scaffold based on additive manufacturing and gel-casting technology[J]. Chinese Orthopaedic Journal of Clinical and Basic Research, 2013, 5(1): 35-39.
- [12] ZHUANG Mengmeng, WANG Mingchao, ZHAO Yingna, et al. Fabrication and high-temperature properties of Y-TZP ceramic helical springs by a gel-casting

(下转第160页)