

凝胶注模空心叶片氧化铝基陶瓷 铸型的中温强度

Medium Temperature Strength of Alumina-
based Ceramic Mold of Hollow Turbine
Blade Manufactured by Gelcasting

荆 慧^{1,2}, 鲁中良^{1,2}, 苗 恺^{1,2}, 田国强¹,
庞师坤^{1,2}, 董 茵³, 李涤尘¹

(1 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安
710049; 2 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

3 西安中航动力精密铸造有限公司, 西安 710021)

JING Hui^{1,2}, LU Zhong-liang^{1,2}, MIAO Kai^{1,2}, TIAN Guo-qiang¹,
PANG Shi-kun^{1,2}, DONG Yin³, LI Di-chen¹

(1 State Key Laboratory of Mechanical Manufacture System
Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2 Collaborative Innovation Center of Advanced Aero-engine,

Beijing 100191, China; 3 Xi'an Zhonghang Power Precision
Casting Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

摘要: 使用聚酰亚胺和磷酸铝作为黏结剂, 基于三点抗弯强度测试、热重-差热分析、X 射线衍射和扫描电镜分析, 研究含黏结剂标准试样的抗弯强度、热失重行为、预烧后的物相变化以及显微结构。结果表明: 500℃之前, 聚酰亚胺通过熔融交联对氧化铝等陶瓷颗粒产生黏结作用, 坯体 300℃强度由 3MPa 提高到 5MPa 以上; 升温至约 500℃(升温速率为 30℃/h), 聚酰亚胺基本烧失, 对氧化铝基陶瓷铸型增强作用消失。三种磷酸铝(正磷酸铝、偏磷酸铝、磷酸二氢铝)可分别将坯体 500℃的“零强度”提高至 0.2、0.2MPa 和 0.8MPa。通过浸渍磷酸二氢铝, 成功制备无断芯和偏芯缺陷的空心涡轮叶片一体式陶瓷铸型。

关键词: 凝胶注模; 空心叶片; 陶瓷铸型; 中温强度; 黏结剂

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2015.04.001

中图分类号: TQ174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2015)04-0001-07

Abstract: Using polyimide and aluminum phosphate as binders, the bending strength, thermal mass loss behavior, phase transformation after sintering and microstructure of the specimens were researched, by three point bending strength test, TG-DSC, XRD and SEM method. The results show that the polyimide produces binding effect by melting and crosslinking under 500℃, strength of specimens increases from 3MPa to more than 5MPa; while the strengthening effect vanishes, after polyimide is burned out at about 500℃ (heating rate: 30℃/h). The three aluminum phosphates (aluminum orthophosphate, aluminum metaphosphate and aluminum dihydrogen phosphate) increase the medium temperature bending strength (from almost zero to 0.2, 0.2MPa and 0.8MPa respectively) at 500℃. The strengthening effect of aluminum dihydrogen phosphate is the best, while aluminum orthophosphate and aluminum metaphosphate are equivalent. By infusing with dihydrogen phosphate solution, integral ceramic mold is fabricated successfully without shifting and fracture of cores.

Key words: gelcasting; hollow blade; ceramic mold; medium temperature strength; binder

空心涡轮叶片是航空发动机、燃气轮机的关键部件之一。传统的空心涡轮叶片熔模铸造方法包括预制

型芯、蜡模制备和型壳制备三个主要流程。蜡模制备过程中, 预制型芯与蜡模模具装配过程中易产生误差。

基于光固化快速成型的空心涡轮叶片整体式陶瓷铸型制造方法,有效地克服了熔模铸造方法固有的缺陷,其主要工艺流程为^[1]:光固化成型空心叶片陶瓷铸型的树脂模具;凝胶注模成型整体式陶瓷铸型素坯;冷冻干燥后脱脂烧结。其中,凝胶注模技术是美国橡树岭国家重点实验室发明的一种新的近净成型技术^[2-4],可成型各种复杂形状和尺寸的陶瓷零件^[5,6]。在陶瓷铸型脱脂过程中,有机凝胶在低温区间($<500^{\circ}\text{C}$)分解烧失,而此时的陶瓷坯体尚未开始烧结并建立强度,极易产生开裂缺陷^[7]。此外,陶瓷铸型的型芯多为悬臂结构,在重力和热应力作用下,脱脂过程中,型芯因强度不足容易断裂和偏移。通过添加耐高温黏结剂,可以提高坯体在脱脂过程中的强度,以保证铸型的结构完整性。

常用耐高温黏结剂可分为有机和无机两类,其中聚酰亚胺(Polyimide,PI)和磷酸铝具有良好的结合能力和耐高温性能。磷酸铝是一种性能优良的黏结剂,其在混凝土等浇注料、复合材料、高铬砖等耐火材料、熔模铸造加固涂料的制备以及陶瓷的制备中均有应用^[8-13]。在陶瓷烧结之前相当宽的温度范围内,磷酸铝结合耐火材料具有相当高的结合强度。国内外耐高温聚酰亚胺均已发展至第三代,可在 426°C 下长期使用^[14]。在加热过程中,聚酰亚胺会熔融交联形成网状结构,对陶瓷颗粒产生胶黏作用。聚酰亚胺以其优异的耐高温性能广泛应用于航空、航天领域^[15,16]。美国国家航空航天局、杜邦公司以及美国修斯飞机公司开发的一系列聚酰亚胺胶黏剂已在多种飞行器上得到应用^[17]。我国航天材料及工艺研究所已研制出耐 320°C 、 370°C 和 500°C 的聚酰亚胺树脂基复合材料^[18]。

本工作以聚酰亚胺和磷酸铝(正磷酸铝,偏磷酸铝,磷酸二氢铝)为黏结剂,研究其对凝胶注模陶瓷铸型中温强度的增强效果。通过热重-差热分析,探究聚酰亚胺对陶瓷铸型具有增强效果的温度区间;使用扫描电镜观察含有磷酸铝黏结剂的陶瓷试样,发现该黏结剂对陶瓷坯体中温强度的增强机理;通过XRD物相分析,判断出三种磷酸铝黏结剂在中温区间的物相组成。使用聚酰亚胺以及磷酸二氢铝黏结剂制造出质量较为理想的空心涡轮叶片陶瓷铸型。

1 实验

1.1 实验材料

本研究使用的基体材料为氧化铝粉末(平均粒径为 $40\mu\text{m}$),并且添加微量氧化镁(平均粒径为 $40\mu\text{m}$)和氧化硅(平均粒径为 20nm)作为矿化剂促进烧结。

凝胶体系选用单体丙烯酸胺(AM)和交联剂亚甲基双丙烯酸胺(MBAM),分散剂使用过硫酸钠(PAANa)。实验选用的黏结剂聚酰亚胺, AlPO_4 , $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 和 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 粉末的扫描电镜形貌如图1所示。可以看出,聚酰亚胺颗粒呈柱状,平均长度为 $50\mu\text{m}$,长径比约为5。 AlPO_4 和 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 颗粒呈球形,其中 AlPO_4 颗粒平均粒径为 $5\mu\text{m}$ 左右, $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 颗粒较小,为 $100\sim 200\text{nm}$ 。 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 具有较强的吸水性,室温下颗粒呈团聚状。

1.2 实验步骤

按一定比例称取 Al_2O_3 粉末,矿化剂MgO和 SiO_2 ,磷酸铝黏结剂(AlPO_4 或 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$)。由于 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 溶于水呈酸性,而分散剂聚丙烯酸钠(PAANa)在碱性环境下才具有较好的分散效果,因此难以直接向陶瓷浆料中加入 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 。实验采用 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 水溶液浸渍素坯(干燥后、烧结前的坯体)的方式间接加入 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 。由于 AlPO_4 和 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 的加入对陶瓷浆料的流动性具有一定的影响,相应实验组中仅微量添加。各实验组物料组成如表2所示。

以固相含量56%(质量分数,下同)计算,按质量比24:1称取有机单体(丙烯酸胺)和交联剂(亚甲基双丙烯酸胺),同适量分散剂(聚丙烯酸钠,添加量为陶瓷粉末质量的2%)溶于去离子水,配制有机物浓度为15%的预混液。将混合均匀的陶瓷粉末加入预混液中,在行星式球磨机中以 $360\text{r}/\text{min}$ 的转速球磨40min后得到低黏度、高固相的陶瓷浆料。

向浆料中依次加入催化剂(四甲基乙二胺)和引发剂(过硫酸铵),注入预先准备好的试样壳。经真空冷冻干燥后,得到标准试样素坯,其尺寸为 $60\text{mm}\times 10\text{mm}\times 4\text{mm}$ 。向空心涡轮叶片光固化树脂模具中浇注以上不同配方的陶瓷浆料,得到叶片陶瓷铸型素坯。

1.3 测试与表征

采用HSST-6003QP型全自动高温应力应变试验机进行三点抗弯强度的测试。试验机精度为 0.01MPa ,升温速率为 $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$,测量试样在室温, 300°C , 500°C , 700°C 和 900°C 下的三点抗弯强度。试样尺寸为 $60\text{mm}\times 10\text{mm}\times 4\text{mm}$,每种成分的试样测试6根,采用标准偏差。本工作通过试样的强度来表征叶片陶瓷铸型的强度;采用STA449C型热重分析仪对聚酰亚胺粉末进行热重-差热分析;采用SU-8010型场发射扫描电镜观察含磷酸铝试样在 500°C 烧结温度下的断面形貌;采用X'pert Pro型X射线衍射仪对 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$, AlPO_4 和 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 在 500°C 下的反应产物进行XRD分析;采用Y. Cheetah型微米X射线三

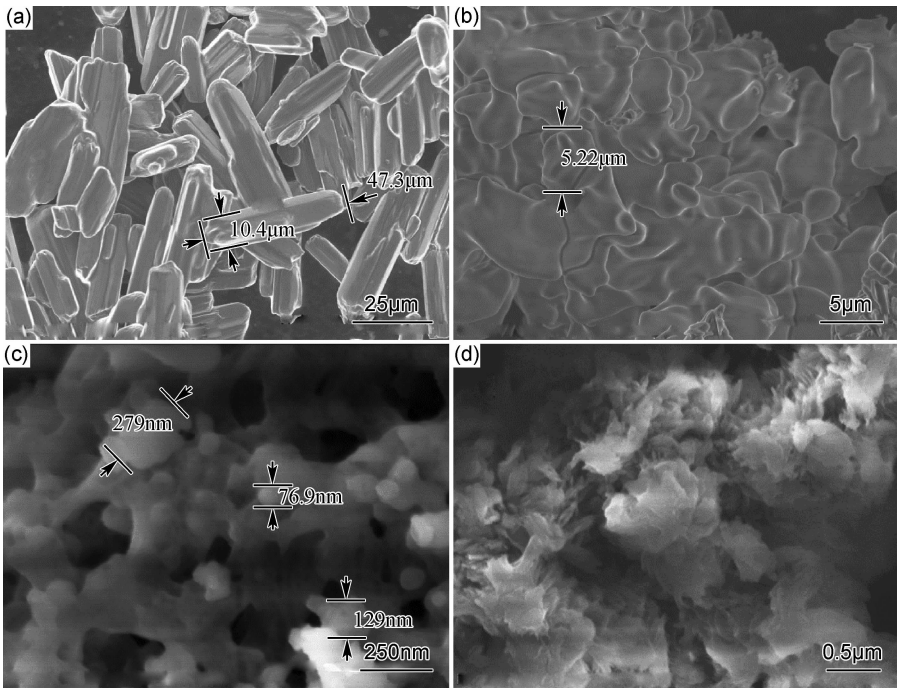


图 1 黏结剂的扫描电镜形貌
(a)PI;(b)AlPO₄;(c)Al(PO₃)₃;(d)Al(H₂PO₄)₃
Fig. 1 SEM images of the binders used in the experiment
(a)PI;(b)AlPO₄;(c)Al(PO₃)₃;(d)Al(H₂PO₄)₃

表 2 各实验组物料组成(质量分数/%)					
Table 2 Components in each experiment group					
(mass fraction/%)					
No.	Al ₂ O ₃	Mineralizer (MgO, SiO ₂)	PI	AlPO ₄	Al(PO ₃) ₃ Al(H ₂ PO ₄) ₃
1	96.0	4			
2	95.0	4	1		
3	94.5	4		1.5	
4	94.0	4		2	
5	93.0	4		3	
6	95.0	4			1
7	94.0	4			2
8	96.0	4			Infusing

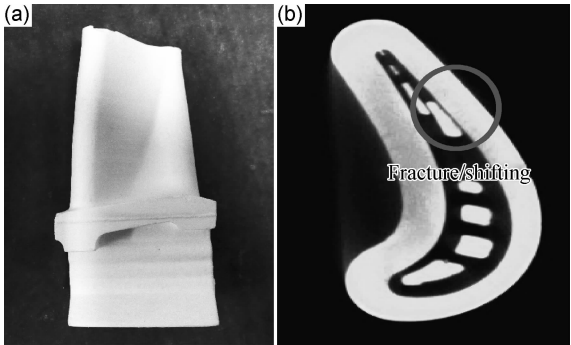


图 2 空心叶片陶瓷铸型及 CT 扫描缺陷
(a)陶瓷铸型;(b)型芯断裂及偏移缺陷
Fig. 2 Ceramic mold of hollow turbine blade and the defects showing in CT result
(a)ceramic mold;(b)core fracture and shifting defects

维成像系统对含不同黏结剂的陶瓷铸型进行 CT 结构分析。

2 结果分析

在脱脂过程中,叶片陶瓷铸型的摆放位置和重力的影响(重力方向和型芯排列方向不一致)以及复杂的热应力容易使型芯发生偏移和断裂。通过添加黏结剂,可以提高坯体中温区间的强度,改善铸型脱脂及烧结质量。脱脂后叶片陶瓷铸型及其缺陷如图 2 所示。

2.1 聚酰亚胺黏结剂增强效果

实验选用的凝胶体系为水系凝胶,而聚酰亚胺

是一种疏水性有机物,会影响陶瓷浆料的流动性。本实验将添加 1% 聚酰亚胺与不含黏结剂的坯体强度进行比较,以分析聚酰亚胺黏结剂的增强效果。试样在室温,300℃ 和 500℃ 的抗弯强度如图 3 所示。

凝胶体系中的单体交联固化后,形成空间网状结构包裹陶瓷颗粒,从而使素坯具有一定的强度。聚酰亚胺以粉末形式添加,室温下对坯体的力学性能无明显影响。随着温度的升高,聚酰亚胺开始熔融交联,对坯体中的陶瓷颗粒起到一定的胶黏作用,300℃ 强度由 3MPa 提高至 5MPa 以上。温度升高至

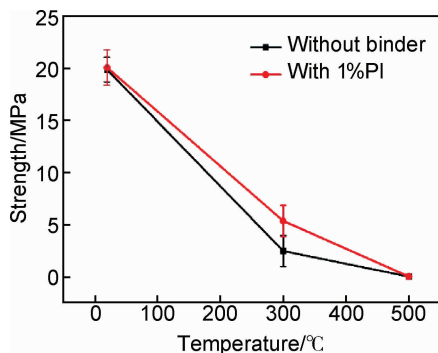


图3 含聚酰亚胺黏结剂和不含黏结剂陶瓷坯体抗弯强度对比

Fig. 3 Strength comparison of the ceramic body with and without PI

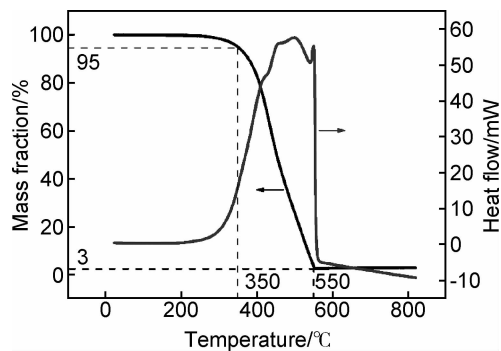


图4 聚酰亚胺热重-差热曲线

Fig. 4 TG-DSC curves of PI

500℃时,随着聚酰亚胺的烧失,其对坯体的增强作用已不明显。

对聚酰亚胺粉末以 30℃/h(与涡轮叶片陶瓷铸型升温工艺匹配)的升温速率进行热重-差热分析,热失重曲线如图 4 所示。可知,聚酰亚胺在 350℃时开始迅速热解,伴随有明显的吸热峰。550℃时,聚酰亚胺基本完全热解,DSC 曲线在 550℃以上时趋于平缓。在实验设定的升温速率下,350~550℃为聚酰亚胺集中烧失的温度区间。

2.2 磷酸铝黏结剂增强效果

2.2.1 中温强度分析

凝胶注模陶瓷坯体烧结过程中,升温至约 500℃(升温速率为 30℃/h)时,凝胶体系中的单体及交联剂已完全烧失,而 900℃以下,坯体尚未充分烧结。500~900℃为陶瓷坯体在脱脂过程中强度最低的区间,耐高温黏结剂可在一定程度上弥补陶瓷坯体在这一区间强度的不足,有效避免坯体的坍塌和开裂。基于以上分析,选择 500,700℃和 900℃这三个温度点测量“中温区段”坯体的抗弯强度,通过与未添加磷酸铝黏结剂的坯体进行比较,实验结果如图 5 所示。

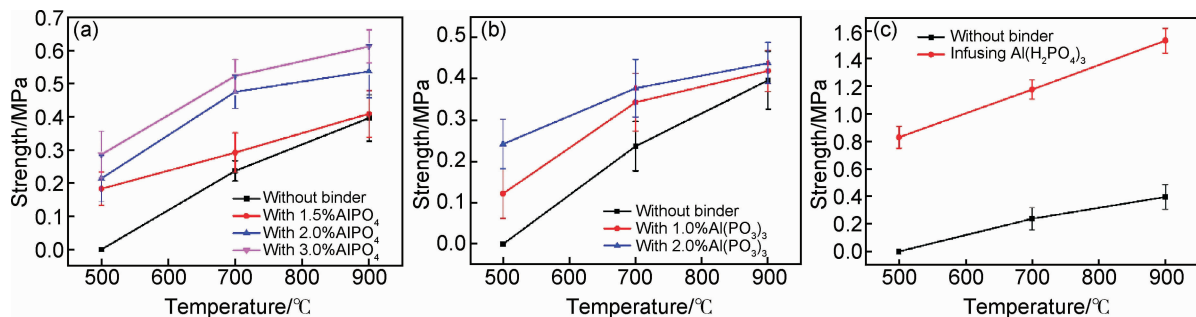


图5 含磷酸铝黏结剂和不含黏结剂坯体的抗弯强度对比

(a) AlPO_4 增强效果; (b) $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 增强效果; (c) $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 增强效果

Fig. 5 Strength comparison of the ceramic body with and without aluminum phosphate binder

(a) effect of AlPO_4 ; (b) effect of $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$; (c) effect of $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$

可知,通过添加三种磷酸铝黏结剂,陶瓷坯体在中温区段(500~900℃)的抗弯强度均有不同程度的提高。通过浸渍的方法间接添加 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$,使陶瓷坯体的中温强度有了显著的提高。 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 的增强效果,在实验选用的三种磷酸铝中最佳,坯体 500℃的“零强度”提高至 0.8MPa。 AlPO_4 和 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 的增强效果相近,添加 2% AlPO_4 或 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 的坯体 500℃强度均可达到 0.2MPa 以上;随着 AlPO_4 和 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 含量的提高,陶瓷坯体的中温抗弯强度有所提高;MgO 等矿化剂的添加,促使坯体在中温区间开

始缓慢烧结,随着温度的升高,坯体强度略有提高。

磷酸铝胶黏剂通常用氢氧化铝与磷酸反应制得。以不同配比加入氢氧化铝与磷酸,可制得三种不同的磷酸铝,即正磷酸铝 AlPO_4 、磷酸氢铝 $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$ 和磷酸二氢铝 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 。制备磷酸铝黏结剂的反应程度可用中和度 n 来表示,即生成的磷酸铝黏结剂中 Al_2O_3 和 P_2O_5 的物质的量之比,中和度 $n = n(\text{Al}_2\text{O}_3) / n(\text{P}_2\text{O}_5) \times 100\%$ 。其中,正磷酸铝的中和度为 100%。中和度对磷酸铝黏结剂的胶黏性能影响很大,一般中和度在 33%~67%的磷酸铝黏结剂,具有较好的胶黏

性能^[21]。三种磷酸铝的胶黏性能各有差异,最为常用的是 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ ^[22],但其溶于水呈酸性,不利于低黏度、高固相陶瓷浆料的制备。 AlPO_4 的胶黏性能弱于 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$,但由于其难溶于水,便于向陶瓷浆料中直接添加。

2.2.2 微观形貌分析

500℃下不同成分陶瓷坯体的扫描电镜形貌如图 6 所示。可知,不含任何黏结剂的陶瓷坯体中,500℃

时随着原凝胶体系中有机的烧失,尚未形成烧结颈的陶瓷颗粒呈堆积状态(图 6(a))。在添加 AlPO_4 , $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 和 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 黏结剂的坯体中,均可观察到明显的网状结构粘附于陶瓷颗粒上(图 6(b)~(d))。通过浸渍的方式加入 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$,一方面可在脱脂过程中形成链状或网状的聚合物,对陶瓷颗粒产生胶黏作用,另一方面可提高陶瓷坯体的致密化程度,进一步提高陶瓷的力学性能。

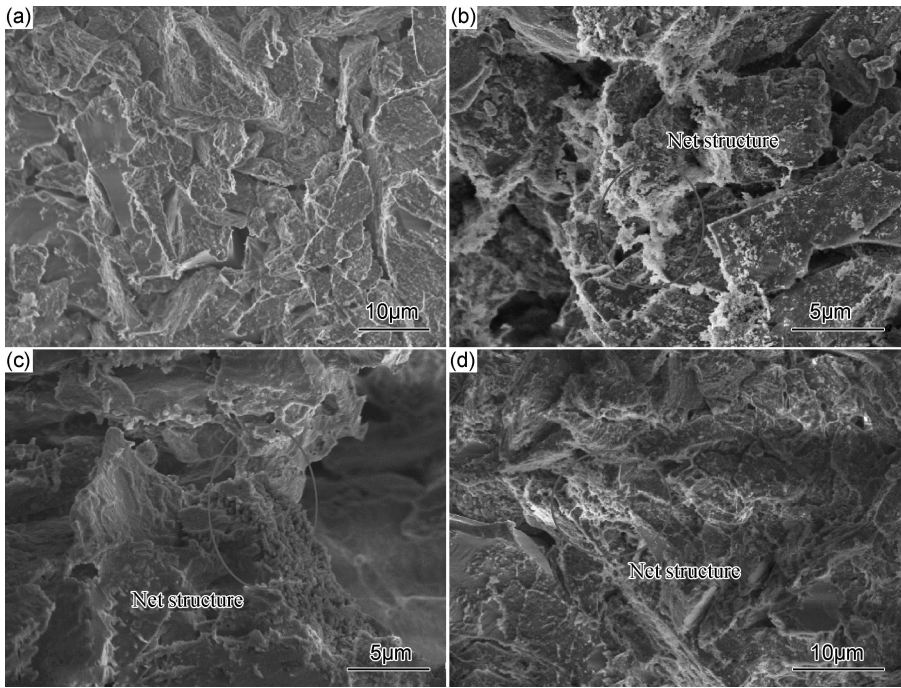


图 6 不同成分陶瓷坯体扫描电镜图
(a)无黏结剂;(b)添加 2% AlPO_4 ;(c)添加 2% $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$;(d)浸渍 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 水溶液
Fig. 6 SEM images of ceramic body with different components
(a)without binder;(b)2% AlPO_4 ;(c)2% $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$;(d)infusing $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$

2.2.3 XRD 物相分析

AlPO_4 , $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 和 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 粉末 500℃ 的反应产物 XRD 分析如图 7 所示。可以看出,升温至 500℃ 时, AlPO_4 的 XRD 衍射图中出现其自身聚合物的衍射峰, $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 中晶相未发生变化, $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 基本完全转变为 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 。结合含三种磷酸铝坯体微观网状形貌,可判断含正磷酸铝坯体中网状结构为正磷酸铝聚合物;添加偏磷酸铝和磷酸二氢铝黏结剂坯体中的网状结构为偏磷酸铝聚合物。

当温度升至 500℃ 左右时, $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 产物变成链状的偏磷酸铝 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$ 。当温度升至 600℃ 左右时,链状结构的偏磷酸铝变成环状结构^[9]。无论是链状结构还是环状结构,其基本结构单元仍然为磷氧四面体,但是环状结构的偏磷酸铝是磷酸铝高温缩合的产物,为不具有晶状结构的玻璃体。这种网状结构会

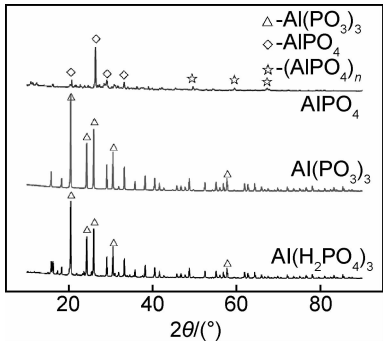
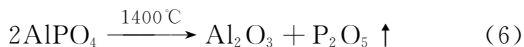
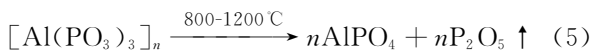
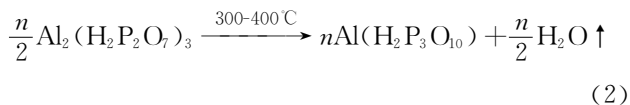
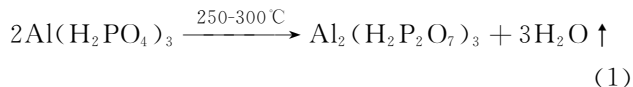


图 7 三种磷酸铝 XRD 衍射图谱
Fig. 7 XRD patterns of three kinds of aluminum phosphates

提高陶瓷坯体在脱脂过程中的强度。随着温度进一步提高,偏磷酸铝聚合物逐渐分解成 AlPO_4 和 P_2O_5 。1400℃ 时 AlPO_4 分解生成活性 Al_2O_3 和 P_2O_5 气体,

由于活性 Al_2O_3 的形成,促进了材料的高温烧结,还有助于改善坯体的高温强度。磷酸二氢铝加热反应过程如下^[9]



通过直接添加 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 加热过程中的中间产物 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$,在脱脂时会进一步形成网状偏磷酸铝聚合物,提高坯体的抗弯强度。 AlPO_4 在脱脂过程中会形成一定的正磷酸铝聚合物,其对陶瓷颗粒的粘附作用可提高坯体在中温区间的强度。

3 叶片陶瓷铸型制造实例

基于光固化快速成型的空心涡轮叶片整体式陶瓷铸型制造方法,用含不同黏结剂的配方制备了空心涡轮叶片的陶瓷铸型。陶瓷铸型素坯及烧结后的 CT 结果如图 8 所示。整个脱脂过程在脱脂炉中一次升温完成,工艺为:室温 $\sim 900^\circ\text{C}$, $30^\circ\text{C}/\text{h}$; 900°C ,保温 30min;随炉冷却。

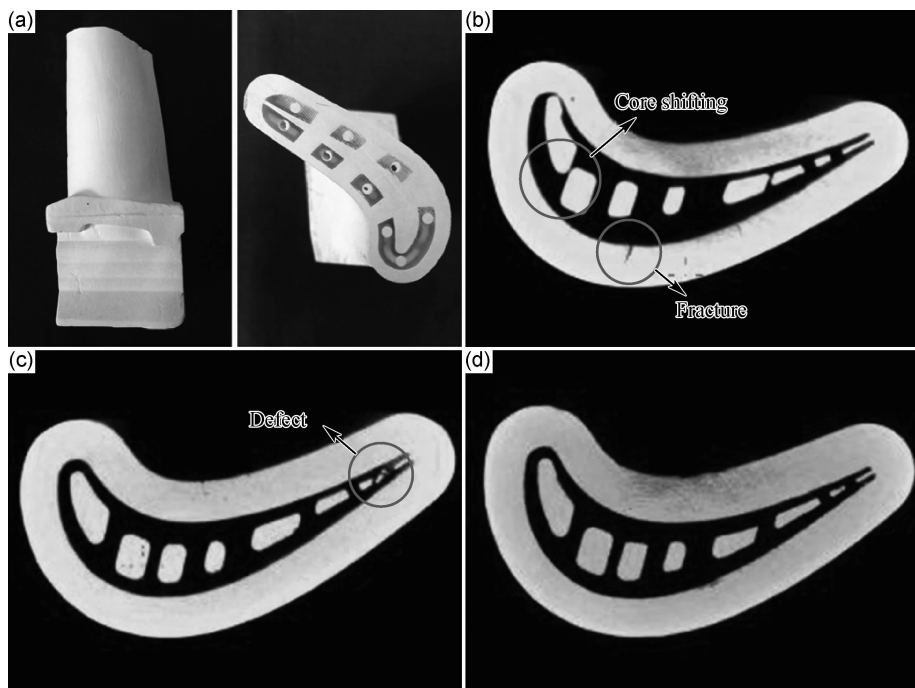


图 8 空心涡轮叶片陶瓷铸型素坯及烧结后 CT 图像

(a)空心涡轮叶片陶瓷铸型素坯;(b)不含黏结剂预烧坯体;(c)含 1%聚酰亚胺预烧坯体;(d)浸渍 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 预烧坯体

Fig. 8 Ceramic green body of hollow turbine blade and CT results after sintering

(a)ceramic green body of hollow turbine blade;(b)the mold without binder;(c)the mold with 1%PI;(d)the mold infused by $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$

由图 8(b)可知,不含黏结剂的铸型坯体中出现了严重的偏芯和裂纹。含 1%PI 的铸型中(图 8(c)),无明显偏芯和裂纹,但在尾缘排气边处有一定缺陷,PI 对中温强度的增强效果还难以满足需求。浸渍 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 的铸型(图 8(d))完整性良好,无明显裂纹和偏芯。

4 结论

(1)针对凝胶注模涡轮叶片氧化铝基陶瓷铸型,含聚酰亚胺(PI)的陶瓷铸型 300°C 时强度可达到 5MPa

以上,相比于无黏结剂坯体($<3\text{MPa}$)有所提高。约 500°C (升温速率为 $30^\circ\text{C}/\text{h}$) 时,聚酰亚胺基本烧失,对坯体无明显的增强作用。

(2)三种磷酸铝黏结剂均可提高陶瓷铸型在中温区间($500\sim 900^\circ\text{C}$)的抗弯强度。分别添加 2% AlPO_4 和 $\text{Al}(\text{PO}_3)_3$,坯体 500°C 强度可提升至 0.2MPa 以上。浸渍 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 可显著提高陶瓷铸型中温强度, 500°C 时强度可提升至 0.8MPa 以上。三种磷酸铝的增强相为链状或网状的偏磷酸铝或正磷酸铝聚合物。

(3)通过浸渍 $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 成功制备了完整性良好、无断裂和偏芯缺陷的空心涡轮叶片陶瓷铸型,相比于不添加黏结剂的陶瓷铸型质量明显改善。

参考文献

- [1] WU Hai-hua, LI Di-chen, GUO Nan-nan. Fabrication of integral ceramic mold for investment casting of hollow turbine blade based on stereolithography[J]. Rapid Prototyping Journal, 2009, 15(4): 232—237.
- [2] 李绍纯, 戴长虹. 陶瓷凝胶注模成型工艺的研究与发展[J]. 材料导报, 2005, 19(3): 44—46.
LI Shao-chun, DAI Chang-hong. Studies and developments of the gelcasting technique for ceramic[J]. Materials Review, 2005, 19(3): 44—46.
- [3] OMATETE O O, JANNEY M A. Gelcasting: from laboratory development toward industrial production[J]. J Eur Ceram Soc, 1996, 17(2): 407—413.
- [4] 金晓, 蔡锴, 刘炜, 等. 单体含量对凝胶注模工艺固化时内应力及坯体性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(5): 794—798.
JIN Xiao, CAI Kai, LIU Wei, et al. Effects of monomer content on internal stresses during solidification process and properties of green bodies by gelcasting[J]. Journal of Chinese Ceramic Society, 2011, 39(5): 794—798.
- [5] 周竹发, 王淑梅. 氧化铝陶瓷凝胶注模成型工艺的研究[J]. 材料工程, 2005, (7): 55—58.
ZHOU Zhu-fa, WANG Shu-mei. Study on the process alumina ceramics slurry by gelcasting[J]. Journal of Materials Engineering, 2005, (7): 55—58.
- [6] 贺卫卫, 汤慧萍. 凝胶注模成型技术在粉末冶金中的应用[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(增刊 3): 383—386.
HE Wei-wei, TANG Hui-ping. The application of gel-casting technique in powder metallurgy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(Suppl 3): 383—386.
- [7] CHEN Xiao-jie, LI Di-chen. Analysis of ceramic shell cracking in stereolithography-based rapid casting of turbine blade[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 55(5): 447—455.
- [8] 费洗非. 固体磷酸铝结合高强度刚玉浇注料的研制[J]. 耐火材料, 2003, 37(6): 345—347.
FEI Xi-fei. Development of high-strength corundum castable bonded with solid aluminum phosphate[J]. Refractories, 2003, 37(6): 345—347.
- [9] 刘振军, 岳春华, 张国宝, 等. 磷酸盐粘结剂在熔模铸造加固层涂料中的应用研究[J]. 铸造技术, 2006, 27(11): 1227—1230.
LIU Zhen-jun, YUE Chun-hua, ZHANG Guo-bao, et al. Study on the application of the phosphate binders in the reinforced layer slurry of investment casting[J]. Foundry Technology, 2006, 27(11): 1227—1230.
- [10] 刘贯军, 李文芳, 彭继华, 等. 硅酸铝短纤维增强 AZ91 复合材料的制备[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(11): 688—690.
LIU Guan-jun, LI Wen-fang, PENG Ji-hua, et al. Fabrication of alumina silicate short fibers reinforced AZ91 metal matrix composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2006, 26(11): 688—690.
- [11] 孙红刚, 耿可明, 刘运政, 等. 磷酸二氢铝对高铬耐火泥浆性能的影响[J]. 耐火材料, 2009, 43(5): 368—370.
SUN Hong-gang, GENG Ke-ming, LIU Yun-zheng, et al. Effect of aluminum dihydrogen phosphate on property of high chromium oxide mortar[J]. Refractories, 2009, 43(5): 368—370.
- [12] SAIKHOV T P, KAN V V, SAVATYUGINA T V, et al. Corundum filtering ceramic with phosphate binders[J]. Glass and Ceramics, 2008, 65(7—8): 278—281.
- [13] BEL'MAZ N S. Development of high-alumina ceramic concrete based on a composite binder[J]. Refractories and Industrial Ceramics, 2010, 51(1): 39—41.
- [14] 孙宏杰, 杨士勇, 范琳. 耐高温聚酰亚胺胶黏剂的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(6): 1—6.
SUN Hong-jie, YANG Shi-yong, FAN Lin. High-temperature resistant polyimide adhesives[J]. Aerospace Materials & Technology, 2007, 37(6): 1—6.
- [15] SERAFINI T T, DELVIGS P, LIGHTSEY G. Thermally stable polyimides from solutions of monomeric reactions[J]. J Appl Polym Sci, 1972, 16: 905.
- [16] PATER R H. Thermosetting polyimides: a review[J]. SAMPE J, 1994, 30(5): 29.
- [17] HERGENROTHER P M. The use, design, synthesis, and properties of high performance/high temperature polymers: an overview[J]. High Perform Polym, 2003, 15(1): 3—45.
- [18] 赵伟栋, 王磊, 董波, 等. PMR 型聚酰亚胺树脂基复合材料研究及应用[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(4): 1—5.
ZHAO Wei-dong, WANG Lei, DONG Bo, et al. PMR-type polyimide matrix composites and their applications[J]. Aerospace Materials & Technology, 2009, 39(4): 1—5.
- [19] 范琳, 陈建升, 胡爱军, 等. 高性能聚酰亚胺材料的研究进展[J]. 材料工程, 2007, (增刊 1): 160—163.
FAN Lin, CHEN Jian-sheng, HU Ai-jun, et al. Research development of polyamide with high performance[J]. Journal of Materials Engineering, 2007, (Suppl 1): 160—163.
- [20] HINKLEY J A, NELSON J B. Lifetime extrapolation of PMR-15 and LaRC(TM)-160 graphite composites[J]. J Adv Mater, 1994, 25(3): 45—48.
- [21] 杨文冬, 黄剑锋, 曹丽云, 等. 磷酸铝的制备及其应用[J]. 无机盐工业, 2009, 41(4): 1—3.
YANG Wen-dong, HUANG Jian-feng, CAO Li-yun, et al. Preparation and application of aluminum phosphate[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2009, 41(4): 1—3.
- [22] 贾江仪, 李洛利, 白剑伟. 磷酸二氢铝对 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系浇注料性能的影响[J]. 陶瓷, 2008, (5): 29—31.
JIA Jiang-yi, LI Luo-li, BAI Jian-wei. Effect of aluminum dihydrogen phosphate on properties of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ system castables[J]. Ceramics, 2008, (5): 29—31.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB035703)

收稿日期:2014-01-02;修订日期:2014-09-02

通讯作者:鲁中良(1978—),男,博士,副教授,研究方向:增材制造技术和空心涡轮叶片制造,联系地址:陕西省西安市咸宁西路 28 号西安交通大学快速成型中心(710049),E-mail:zllu_1@mail. xjtu. edu. cn