

氧化铝基陶瓷型芯溶失性的研究进展

罗 凌 芦 刚 严青松 占红星 黄普英  
(南昌航空大学轻合金加工科学与技术国防重点学科实验室)

摘 要 介绍了涡轮空心叶片用铝基陶瓷型芯的应用背景,探讨了铝基陶瓷型芯强化及溶失性能的重要意义。阐述了造型材料、成孔剂、脱芯方法对氧化铝基陶瓷型芯溶失性能增强的研究现状,并展望了铝基陶瓷型芯未来发展面临的挑战。

关键词 空心叶片;铝基陶瓷型芯;溶失性能

中图分类号 TG249.5 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Alumina-based Ceramic Cores' Dissolution

Luo Ling, Lu Gang, Yan Qingsong, Zhan Hongxing, Huang Puying

(National Defense Key Discipline Laboratory of Light Alloy Processing Science and Technology,  
Nanchang Hangkong University)

Abstract: The application background of aluminum-based ceramic cores for turbine hollow blades was described, and the important significance of aluminum-based ceramic core strengthening and melting loss performance was expacnded. The research status of alumina-based ceramic core dissolution loss enhanced by molding materials, pore-forming agents and core removal methods were described. The challenges to the future development of alu-minum-based ceramic cores were prospected.

Key Words: Hollow Blade, Aluminum-based Ceramic Core, Dissolution Loss Performance

目前,先进航空发动机涡轮前温度要求越来越高,空心叶片的耐高温性能要求也随之提高,高温合金的承

温能力有限,通过优化合金材料来提高叶片的承温能力效果并不明显<sup>[1]</sup>。涡轮发动机用叶片的冷却结构已从

收稿日期:2020-09-18;修改稿收到日期:2020-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51861027);江西省优势科技创新团队重点资助项目(20181BCB19001)

第一作者简介:罗凌,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail: 1146670581@qq.com

通信作者:芦刚,男,1982 年出生,副教授,南昌(330063), E-mail: aimulalg@163.com

引用格式:罗凌,芦刚,严青松,等. 氧化铝基陶瓷型芯溶失性的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021,41(3):305-309.  
LUO L, LU G, YAN Q S, et al. Research progress in alumina-based ceramic cores' dissolution[J]. Special Casting &. Nonferrous Alloys, 2021,41(3):305-309.

[46] STÖBENER K, LEHMHUS D, AVALLE M, et al. Aluminum foam-polymer hybrid structures (APM aluminum foam) in compression testing[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(21): 5 627-5 641.

[47] DUARTE I, OLIVEIRA M S A. Aluminum Alloy Foams: Production and Properties[M]. Powder Metallurgy: In Tech., 2012.

[48] LEHMHUS D, BAUMEISTER J, STUTZ L. Mechanical characterization of particulate aluminum foams-Strain-rate, density and matrix alloy versus adhesive effects[J]. Advanced Engineering Materials, 2010, 12: 596-603.

[49] KOVAČIĆ A, REN Z. On the porosity of advanced pore morphology structures[J]. Composite Structures, 2016, 158: 235-244.

[50] WANG Y L, GUO Q Y, WANG L C, et al. Evaluation of compression performance of APM aluminum foam-polymer filled pipes prepared via different epoxy resin bonding processes[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019(9): 1-10.

[51] WANG Y L, WANG L C, XU H, et al. Preparation and compressive properties of advanced pore morphology (APM) foam elements[J]. Physics and Engineering of Metallic Materials, 2019, 38: 383-390.

[52] DUARTE I, VESENJAK M, KRSTULOVIĆ-OPARA L, et al. Compressive performance evaluation of APM (Advanced Pore Morphology) foam filled tubes[J]. Composite Structures, 2015, 134: 409-420.

[53] KWEON J H, JUNG J W, KIM T H, et al. Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding[J]. Composite Structures, 2006, 75(1-4): 192-198.

[54] 郭养毓. 泡沫铝复合结构制备工艺及力学性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.

[55] HOHE J, HARDENACKE V, FASCIO V, et al. Numerical and experimental design of graded cellular sandwich cores for multi-functional aerospace applications[J]. Materials &. Design, 2012, 39: 20-32.

(编辑:栗万仲)

传统回流、对流、撞击孔、气膜冷却方式发展为高效发散气冷,陶瓷型芯可以使空心叶片形成复杂的内腔,改善叶片气冷结构从而提高叶片的冷却效率,显著提高涡轮前进口温度,得到重视<sup>[2,3]</sup>。

常用空心叶片陶瓷型芯主要有氧化硅基和氧化铝基陶瓷型芯;氧化硅基陶瓷型芯以石英玻璃为基体材料,当使用温度高于 1 550 ℃ 时,其高温性能明显下降,高温稳定性较差,易与型芯发生化学反应,因此氧化硅基陶瓷型芯不适合用于制备更高温度的单晶和共晶叶片<sup>[4]</sup>。氧化铝基陶瓷型芯以  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  作为基体材料,与氧化硅基陶瓷型芯相比,其具有更好的抗蠕变性能以及化学稳定性,与活性金属元素化学相容性好,使用温度也更高(最高可达 1 850 ℃),具有与氧化铝基陶瓷型壳相匹配的膨胀系数,能保证内腔结构复杂的定向柱晶及单晶空心叶片的尺寸精度与合格率,降低叶片的制造成本<sup>[5,6]</sup>。然而,氧化铝基陶瓷型芯基体材料化学性能稳定,常温、常压下难与酸碱腐蚀液发生反应,脱出性较差,限制了氧化铝基陶瓷型芯的广泛应用<sup>[7]</sup>。随着叶片结构的复杂化,氧化铝基陶瓷型芯也面临着更严格的要求,一般情况下,要求氧化铝基陶瓷型芯具有一定的高温强度,良好的尺寸精度以及良好的溶失性能,以确保铸造后型芯能被有效地脱除<sup>[8]</sup>。本课题从造型材料、成孔剂、脱芯方法等 3 个方面对氧化铝基陶瓷型芯溶失性的影响展开论述。

## 1 造型材料对型芯溶失性的影响

### 1.1 基体材料的粒度配比

氧化铝基陶瓷型芯基体为  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 晶体结构优于  $\text{SiO}_2$ , 热化学稳定性极好。基体在陶瓷型芯中占比较大,其粒度配比是影响陶瓷型芯性能的重要因素,会直接影响陶瓷型芯的烧结温度、烧结收缩、表面品质等。

近年来,研究者对氧化铝基陶瓷型芯基体材料的粒度配比对其溶失性的影响进行了研究,并且给出了合适的粒度配比。李风光<sup>[9]</sup>采用 180、250、325 目的白刚玉粉制备铝基陶瓷型芯,研究了白刚玉粉粒度比对铝基陶瓷型芯溶失性的影响,发现当 3 种目数的白刚玉粉的质量比为 6 : 3 : 1 时,型芯内部较多的粗颗粒之间形成孔隙,而细颗粒和中等颗粒由于不满足紧密堆积模型,降低了型芯的堆积致密度,增大了型芯的孔隙率,此时型芯的溶失性能最好,综合性能最佳。与曹腊梅等<sup>[10]</sup>、张国强等<sup>[11]</sup>研究结果一致。陶瓷型芯基体材料中较多的粗颗粒可以形成大量间隙,使得陶瓷型芯拥有较好的溶失性能,因此氧化铝基陶瓷型芯基体材料的配比应该以粗颗粒为框架,在后续的烧结过程中形成高温骨架,

细小颗粒填充于间隙处,形成紧密的堆积加固高温骨架,这样能使形成的氧化铝基陶瓷型芯既拥有良好的力学性能又具有较高的气孔率,保证后续的脱芯效果<sup>[12]</sup>。

### 1.2 造型材料的种类

很多研究者通过改变陶瓷型芯造型材料的种类来了解其对陶瓷型芯溶失性的影响,包括加入不同种类的氧化铝粉和添加矿化剂。矿化剂的引入对陶瓷型芯性能有着重要的影响,矿化剂添加量小,与基体材料有较好的相容性,可以在基体材料中均匀地分布<sup>[13]</sup>。常见的矿化剂有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{ZrO}$ 、 $\text{MgO}$  等,其含量、粒度也会对氧化铝基陶瓷型芯的溶失性产生一定的影响。

杨东野<sup>[14]</sup>采用电熔刚玉粉、多孔型  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉和电熔莫来石粉作为基体材料制备铝基陶瓷型芯,经焙烧后型芯内部形成了大量孔洞,型芯孔隙率约为 40%,有较好的脱芯性能和较低的热膨胀系数,通过加入多种粉料烧结后形成不同大小的颗粒,大颗粒形成框架,小颗粒作为粘结剂填充在大颗粒之间,型芯的高温强度也能得到保证。王宝全等<sup>[15]</sup>、SHABANI S 等<sup>[16]</sup>、刘孝福等<sup>[17]</sup>、ZHAO Z J 等<sup>[18]</sup>研究了矿化剂对铝基陶瓷型芯溶失性能的影响,表 1 为氧化铝基陶瓷型芯强化试验结果。从表 1 可知,氧化铝基陶瓷型芯加入矿化剂后的孔隙率较高,线收缩率较低并且拥有足够的室温抗弯强度。王宝全等<sup>[15]</sup>和刘孝福等<sup>[17]</sup>认为,氧化硅和锆英粉的加入都会在高温下产生较多高活性  $\text{SiO}_2$  并形成玻璃相,玻璃相会与型芯基体材料发生反应,消耗玻璃相并产生体积效应,导致型芯体积变小,显孔隙率增大,溶失性能增强。继续增大矿化剂含量,型芯孔隙率会呈现先增大后减小的趋势,这是因为高活性  $\text{SiO}_2$  含量不断增加,玻璃相的消耗速率小于生成速率,造成过剩并在随后的冷却过程中析出,填充在颗粒间的孔隙中,促进型芯的致密化,从而导致溶失性能下降。SHABANI S 等<sup>[16]</sup>加入  $\text{MgO}$  作为矿化剂,发现  $\text{MgO}$  会与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  发生反应生成镁铝尖晶石薄层,引起陶瓷的膨胀,导致微裂纹产生,增加了陶瓷型芯的孔隙率。另外, $\text{MgO}$  颗粒对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的长大有抑制作用,而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒无法正常长大导致型芯内部粉料颗粒之间的孔隙不能被有效地填补,使得型芯的孔隙率增大,脱芯液能更大程度与型芯表面接触反应,提高了氧化铝基陶瓷型芯的溶失性能。ZHAO Z J 等<sup>[18]</sup>以  $\text{Y}_2\text{O}_3$  为矿化剂,研究发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉在高温下和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  反应生成了 YAG 相,存在的 YAG 颗粒会增加  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒之间的扩散阻力,导致孔径的大小和数量增加,因此孔隙率增加。当  $\text{Y}_2\text{O}_3$  含量达到一定量时,颗粒之间的孔被大量的 YAG 颗粒填充,陶瓷型芯的孔隙率反而下降。

表 1 氧化铝基陶瓷型芯陶芯强化性能<sup>[15~18]</sup>

Tab.1 The optimum addition of mineralizers and the ceramic core strengthening performance of aluminum-based ceramic core<sup>[15~18]</sup>

| 矿化剂                           | 最佳加<br>入量/% | 烧结<br>温度/℃ | 室温抗弯<br>强度/MPa | 表观孔<br>隙率/% | 烧结收<br>缩率/% |
|-------------------------------|-------------|------------|----------------|-------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>              | 10          | 1 500      | 63             | 35.5        | 1.1         |
| MgO                           | 4           | 1 400      | 40             | 30          | 2           |
| Zr 粉                          | 10          | 1 350      | 36.02          | 38.7        | 0.44        |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9           | 1 600      | 53.5           | 33.9        | 1.0         |

加入矿化剂可以提高陶瓷型芯的室温抗弯强度,并且矿化剂与基体材料在高温烧结过程会发生反应,产生新相并伴随着体积效应,抵消烧结时产生的收缩效应,增大陶瓷型芯的孔隙率<sup>[15~18]</sup>。这些矿化剂在后续的脱芯过程中会优先与脱芯液发生反应,产生流动通道,脱芯液可以沿着这些通道有效地接触型芯表面,增强了腐蚀作用,提高了型芯的溶失性能。

2 成孔剂对型芯溶失性的影响

在陶瓷原料中加入有机氧化物作为成孔剂,可以有效地提高陶瓷型芯内部的孔隙率,增强陶瓷型芯的溶失性。这些成孔剂影响陶瓷型芯孔隙率的原因可以分为两类:一类是高温不稳定物质,如纤维、淀粉、石墨等,在陶瓷型芯烧结过程中会烧失形成孔隙,且不会产生有害气体;另一种成孔剂具有较好的热稳定性,如树脂类添加物,会在陶瓷型芯高温焙烧时形成稳定的石墨结构,阻碍陶瓷型芯的烧结来降低型芯的高温剩余强度,使型芯容易脱除<sup>[19]</sup>。

2.1 纤维

纤维增强陶瓷基复合材料(FRCMC)作为一种新兴的结构材料,相比基于颗粒的陶瓷型芯,具有耐高温、耐化学腐蚀、抗高温蠕变等特点,在服役环境恶劣的情况下仍然能保持优异的性能。纤维的加入会影响型芯的微观结构,主要机制有纤维拔出、纤维断裂和纤维周围产生的微裂纹,图 1 为纤维增强陶瓷基复合材料断裂过程示意图<sup>[20]</sup>。

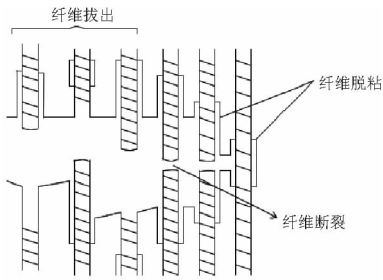


图 1 纤维增强陶瓷基复合材料断裂过程示意图<sup>[20]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of the fracture process of fiber reinforced ceramic matrix composites<sup>[20]</sup>

ISOBE T 等<sup>[21]</sup>将碳纤维和尼龙纤维加入到氧化铝陶瓷型芯浆料中,通过挤压成形制备出了多孔氧化铝陶瓷型芯。张睿等<sup>[22]</sup>添加 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纤维制备氧化铝基陶瓷型芯,研究了纤维含量对型芯性能的影响,发现随着 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纤维含量增加,型芯的气孔率显著升高,在碱溶液中的侵蚀速率也增大,但是随着烧结温度升高,型芯的堆积密度逐渐增加,促进了型芯的致密化过程,试样难以被碱溶液侵蚀。JIANG W 等<sup>[23]</sup>研究了 SiO<sub>2</sub> 纤维对氧化铝基陶瓷型芯溶失性的影响,通过 SEM 观察发现纤维的加入会减小陶瓷型芯材料颗粒之间的接触表面积,型芯烧结的驱动力也随之增加,阻碍了型芯的致密化,增大了型芯的孔隙率。

通过在陶瓷型芯中添加纤维,纤维的拔出与断裂都会吸收大量的断裂能,有利于提高陶瓷基复合材料的强度和韧性<sup>[24]</sup>。在后续脱芯过程中,纤维会先行脱除,在陶瓷型芯材料中形成更多通道,使得脱芯液与型芯表面的接触面积增大,纤维的脱除还会使周围附着的氧化铝颗粒之间的粘合强度变弱,溶失性能增强。目前国内外关于纤维增强铝基陶瓷型芯的研究报道很少,值得进一步深入研究。

2.2 树脂类添加物

刘立平等<sup>[25]</sup>将酚醛(PF)树脂和聚苯乙烯(DM)树脂加入铝基陶瓷型芯中,研究其对陶瓷型芯溶失性能的影响,发现树脂可以作为粘结剂使基体材料附着在一起,经过高温烧结后,树脂分解并转变成稳定的石墨结构,分割了玻璃相,阻碍了颗粒的烧熔长大,陶瓷型芯的高温残余强度下降 70% 左右,使得陶瓷型芯的溶失性能增强,易于脱除。杨治刚等<sup>[26]</sup>以氧化铝粉末为基体,加入硅树脂粉末制备铝基陶瓷型芯,经过分析得出硅树脂在高温下裂解生成晶态 SiO<sub>2</sub>,与氧化铝基体反应生成莫来石相,产生体积效应,提高型芯的线膨胀系数,有利于陶瓷型芯形成较高的孔隙率,并且硅树脂在裂解和交联过程中会释放出气体,增加陶瓷型芯的孔隙率达到 36.5%。尽管上述研究并没有进行脱芯试验,孔隙率作为表征型芯溶失性能的重要特征之一,可以推断树脂类添加物对铝基陶瓷型芯的溶失性能具有一定的增强作用。

3 脱芯方法对型芯溶失性的影响

陶瓷型芯经过高温烧结及合金浇注后,致密化程度较高,颗粒间的结合牢固,型芯能否从铸件中成功脱除十分关键,因此研究者在陶瓷型芯脱芯方法领域进行了大量研究,希望通过优化脱芯方法来提高脱芯效果和脱芯效率<sup>[27]</sup>。脱芯方法可分为物理脱芯、化学脱芯、物

理-化学脱芯。物理脱芯是指利用一些机械手段如振动、超声波、喷砂使型芯脱出,但是容易使型芯断裂,通常用于横截面积较大的型芯。化学脱芯是通过型芯组成成分与脱芯化学介质发生反应使型芯溶解,常用的脱芯化学介质包括无机酸、有机酸、铵盐、碱、氟化物等。BEALS J T 等<sup>[28]</sup>采用由 40%~60% 的硝酸和 3%~10% 的硫酸组成的水溶液对硅基陶瓷型芯进行脱芯,通过两次循环脱芯可以去除大部分型芯。化学脱芯通常应用于硅基陶瓷型芯、镁基陶瓷型芯的脱芯,而铝基陶瓷型芯的基体材料不易与化学介质发生反应,且随着叶片内腔结构和型芯的复杂化,单一的化学脱芯难以取得理想脱芯效果,而物理-化学脱芯结合了二者的优点,逐渐成为铝基陶瓷型芯脱芯的主要手段,广泛地应用于生产实践中。

陶瓷型芯的脱出是通过脱芯液对型芯材料颗粒间连接处的腐蚀破坏来实现的,基于这个机理,许多研究者研究了脱芯液对铝基陶瓷型芯的腐蚀行为。王宝生等<sup>[29]</sup>使用装有熔融 KOH 溶液的压力脱芯设备对型芯进行 4~10 h 碱煮,发现在常压下,碱液和型芯内部接触不充分,脱芯效率缓慢,当压力为 0.3 MPa 时,脱芯速率才开始迅速上升。赵中亮<sup>[30]</sup>、李彪等<sup>[31]</sup>、GAO Z F 等<sup>[32]</sup>、ZHANG H 等<sup>[33]</sup>通过设计脱芯试验研究了脱芯工艺参数对氧化铝基陶瓷型芯溶失性能的影响,表 2 为脱芯工艺参数及脱芯效果。

表 2 脱芯工艺参数对型芯溶失性能的影响<sup>[30~33]</sup>

| Tab.2 The influence of different parameters of core removal process on the dissolution loss performances of alumina-based ceramic cores <sup>[30~33]</sup> |          |            |                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|---------------------------|
| 碱液溶度                                                                                                                                                       | 最佳脱芯温度/℃ | 最佳脱芯压力/MPa | 脱芯效果                      |
| 70% 的 KOH 溶液                                                                                                                                               | 380      | 18         | 型芯脱除长度为 8.6 cm,40 h 内可脱除  |
| 70% 的 KOH 溶液                                                                                                                                               | 390      | 25         | 脱芯率可达到 55.8%,3 次脱芯循环可脱除型芯 |
| 67% 的 KOH 溶液                                                                                                                                               | 200      | —          | 腐蚀 2.5 h 后型芯质量损失为 55.99%  |
| 50% 的 NaOH 溶液                                                                                                                                              | —        | —          | 腐蚀 2.5 h 后型芯质量损失为 84.21%  |
| 70% 的 KOH+10% 的 KCl 溶液                                                                                                                                     | 220      | —          | 脱芯速率可达 10.46%/h           |

温度是影响脱芯速率的主要因素,可增大脱芯界面化学反应速率常数。压力为影响脱芯速度的次要因素,需要在一定脱芯温度下才会对型芯的脱除产生影响。在试验中一般采用 70% 的 KOH 溶液或 50% 的 NaOH 溶液作为脱芯液,在相同的温度和浓度条件下,NaOH 溶液比 KOH 溶液的腐蚀效果更好。提高脱芯效率最主要的途径是增加脱芯液的交换速率、增大脱芯液和型芯表面的接触面积,然而随着脱芯时间延长,脱芯效率

会下降,这是因为脱芯过程中产生的难溶物堆积在气孔处,阻碍了脱芯反应的继续。ZHANG H 等<sup>[33]</sup>还发现加入溶质添加剂 KCl 和乙醇可以提高碱液的沸点,高温时产生沸腾效应从而提高脱芯效果。KRUGLOV E P 等<sup>[34]</sup>将羧酸作为表面活性剂加入到 KOH 和 NaOH 的混合溶液中,经过 20 h 的脱芯后型芯被成功脱除且叶片没有产生腐蚀和裂纹缺陷。

针对物理-化学脱芯方法的特点,CONROY P L 等<sup>[35]</sup>使用脱芯液喷射的方法来对具有简单内腔的铸件进行脱芯,脱芯时将带有陶瓷型芯的叶片固定,周期性的喷射碱溶液,并利用压缩空气将周期内铸件中产生的反应产物吹除,使下一周期的碱溶液喷射在陶瓷型芯新断面上,从而达到快速脱芯的目的。其中脱芯液为 45% 的 KOH 溶液,温度为 100~150 ℃,喷射压力达 3 MPa,压缩空气压力为 0.6 MPa。SCHLIENGER M E 等<sup>[36]</sup>、MILIS D<sup>[37]</sup>通过在化学脱芯时交替改变压力来提高脱芯效果。将铸件放置在盛满脱芯液的特制密封容器中,脱芯液为 85% 的 KOH 溶液,温度为 220~250 ℃,容器中的系统需抽真空使得系统压力低于大气压,为 0.02~0.045 MPa,保压一段时间后再将压力升至标准大气压,如此交替改变系统的压力,可以有效地提高脱芯效率。王宝生等<sup>[38]</sup>通过安装超声波脱芯槽,将电能转换成超声波能,超声波的振动使得脱芯液和型芯表面接触更加充分,还可以加速脱芯时产生的反应物排出,取得了理想的脱芯效果。

4 结 语

铝基陶瓷型芯脱芯困难是制约铝基陶瓷型芯广泛应用的重要因素。随着大推重比航空发动机的发展,设计和研制出超气冷结构的单晶叶片成为了研究重点,铝基陶芯型芯相比于硅基陶瓷型芯具有更好的高温性能和力学性能,因此开发脱芯效果好、脱芯周期短的铝基陶瓷型芯成为未来涡轮空心叶片用铝基陶瓷型芯的发展趋势。铝基陶瓷型芯脱芯困难受限于其基体材料,通过优化造型材料及加入成孔剂来增大铝基陶瓷型芯的孔隙率,促进脱芯液与型芯表面的接触状况对铝基陶瓷型芯脱芯研究具有重要的意义。然而增强陶瓷型芯溶失性能,其高温性能会受到一定的影响,如何在保证型芯高温性能的同时又提高型芯的脱芯效果,有待深入研究。

参 考 文 献

[1] 顾国红,曹腊梅. 熔模铸造空心叶片用陶瓷型芯的发展[J]. 铸造技术, 2002(2): 81-83.  
[2] 刘小瀛,王宝生,张立同. 氧化铝基陶瓷型芯研究进展[J]. 航空制造技术, 2005(7): 26-29.

- [3] 张世东,张明俊,尚伟,等.单晶叶片用氧化铝陶瓷型芯显气孔率研究[J].铸造,2015,64(3):273-275.
- [4] GRESKOVICH, CHARLES D, DEVRIES, et al. Alumina-based ceramics for core materials; U.S. Patent No. 4156614[P]. 1979-05-12.
- [5] COBLE R L. Transparent alumina and method of preparation; US. 30226210[P].1962-03-07.
- [6] JOHNSON W C, STEI D F N. Additive and impurity distributions at grain boundaries in sintered alumina[J]. Chemischer Informationsdienst, 2010, 58(11-12): 485-489.
- [7] XU Z, ZHONG J, SU X, et al. Experimental study on mechanical properties of silica-based ceramic core for directional solidification of single crystal superalloy[J]. Ceramics International, 2017, 44(1): 394-401.
- [8] ZHU W J, TIAN G Q, LU Y, et al. Leaching improvement of ceramic cores for hollow turbine blades based on additive manufacturing[J]. Advances in Manufacturing, 2019, 7(4): 353-363.
- [9] 李风光. 高气孔率氧化铝基陶瓷型芯的制备与性能研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [10] 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(9):21-27.
- [11] 张国强,赵严,宁永权.不同颗粒级配电熔刚玉对多孔氧化铝基陶瓷型芯性能的影响[J].铸造技术,2012,33(11):1289-1291.
- [12] 王飞,李飞,刘和洲,等.高温合金空心叶片用陶瓷型芯的研究进展[J].航空制造技术,2009(19):60-64.
- [13] 王荣峰,刘志义,林茂,等.不同矿化剂对铝基陶瓷型芯性能的影响[J].材料导报,2012,26(20):115-118.
- [14] 杨冬野.高温合金叶片铸造用氧化铝陶瓷型芯充型性能的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [15] 王宝全,余建波,任忠鸣,等.多孔铝基陶瓷型芯的制备及其性能[J].无机材料学报,2012,27(3):239-244.
- [16] SHABANI S, NAGHIZADEH R, VOSTAKOLA M F, et al. The effect of MgO addition on the properties of alumina-based ceramic cores prepared via sol-gel process[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2020,30(4):1-11.
- [17] 刘孝福,娄延春,苏贵桥,等.锆英粉矿化剂对氧化铝基陶瓷型芯性能的影响[J].铸造,2015,64(10):994-1000.
- [18] ZHAO Z J, YANG Z G, YU Z H, et al. Influence of yttrium oxide addition and sintering temperature on properties of alumina-based ceramic cores[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2020, 17(2): 685-694.
- [19] 朱新文,江东亮,谭寿洪.多孔陶瓷的制备、性能及应用:(I)多孔陶瓷的制造工艺[J].陶瓷学报,2003(1):40-45.
- [20] 何新波,杨辉,张长瑞,等.连续纤维增强陶瓷基复合材料概述[J].材料科学与工程,2002,20(2):273-278.
- [21] ISOBE T, TOMITA T, KAMESHIMA Y, et al. Preparation and properties of porous alumina ceramics with oriented cylindrical pores produced by an extrusion method[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26(6): 957-960.
- [22] 张睿,覃业霞,杜爱兵,等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基陶瓷型芯材料性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2007,36(z1):675-677.
- [23] JIANG W, LI K, XIAO J, et al. Effect of silica fiber on the mechanical and chemical behavior of alumina-based ceramic core material[J]. Journal of Asian Ceramic Societies, 2017, 5(4): 410-417.
- [24] NIU S, XU X, LI X, et al. Microstructure evolution and properties of silica-based ceramic cores reinforced by mullite fibers[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020: 154 494.
- [25] 刘立平,沈其文.附加物对改善陶瓷型芯溃散性的作用[J].特种铸造及有色合金,1989(6):30-33.
- [26] 杨治刚,赵志佳,余建波,等.硅树脂添加量对氧化铝基陶瓷型芯性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2020,49(2):515-519.
- [27] 张湛.陶瓷型芯脱除工艺的研究[J].特种铸造及有色合金,1983(4):7-11.
- [28] BEALS J T, LOMASNEY G M, PARKOS J R J J. Method for casting core removal; U.S. Patent 7,243,700[P]. 2007-07-17.
- [29] 王宝生,成来飞,张立同,等.氧化铝基陶瓷型芯的脱芯工艺研究[J].铸造,2005,54(8):758-760.
- [30] 赵中亮.镍基单晶涡轮叶片用氧化铝陶瓷型芯脱除工艺研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.
- [31] 李彪,娄延春,于波,等.空心叶片氧化铝基陶瓷型芯高温高压脱芯工艺研究[J].铸造,2019,68(1):1-6.
- [32] GAO Z F, WANG B Q, YIN J, et al. Corrosion behavior of alumina-based ceramic core materials in caustic alkali solutions[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2019, 16(1): 335-345.
- [33] ZHANG H, LU Z, JI Z, et al. Basis for the alkaline removal process design of the alumina-based ceramic core[J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2017, 125(8): 616-622.
- [34] KRUGLOV E P, KOCHETOVA G K. Improvement of a technological process for ceramic core removal out of internal cavities of aircraft GTE turbine blade castings[J]. Russian Aeronautics, 2007, 50(2): 227-229.
- [35] CONROY P L, PIERSON H C, MCRAE M M. Method for removing cores from castings; U.S. Patent 6,241,000[P]. 2001-06-05.
- [36] SCHLIENGER M E, BALDWIN M D, EUGENIO A. Method and apparatus for removing ceramic material from cast components; U.S. Patent 6,739,380[P]. 2004-05-25.
- [37] MILLS D. Leaching of ceramic materials; U.S. Patent 5,332,023[P]. 1994-07-26.
- [38] 王宝生.氧化铝基陶瓷型芯的脱芯设备与工艺[D].西安:西北工业大学,2005.

(编辑:刘卫)

欢迎关注  
“特种铸造”  
微信公众号



- |        |         |        |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网  | ● 行业动态  | ● 联系我们 |
| ● 微商城  | ● 铸造前沿  | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例  | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂  | ● 产品库  |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库  |