

引用格式: 范红娜, 许西庆, 李鑫, 等. 氧化铝改性硅基陶瓷型芯制备及结晶动力学[J]. 材料工程, 2024, 52(5): 212-217.
FAN Hongna, XU Xiqing, LI Xin, et al. Preparation and crystallization kinetics of silica-based ceramic cores modified by alumina[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(5): 212-217.

氧化铝改性硅基陶瓷型芯制备及 结晶动力学

Preparation and crystallization kinetics of silica-
based ceramic cores modified by alumina

范红娜¹, 许西庆^{2*}, 李鑫¹, 齐长见¹, 李敏敏¹, 韩委委¹

(1 中航装甲科技有限公司, 天津 300399; 2 长安大学
材料科学与工程学院, 西安 710061)

FAN Hongna¹, XU Xiqing^{2*}, LI Xin¹, QI Changjian¹,
LI Minmin¹, HAN Weiwei¹

(1 AECC Aegis Advanced Protective Technology Co., Ltd.,
Tianjin 300399, China; 2 School of Materials Science &
Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

摘要: 氧化铝是硅基陶瓷型芯中的常用矿化剂, 但其对石英析晶的促进或抑制作用却存在两种相反的结论。为探究不同氧化铝添加剂对硅基陶瓷型芯性能与析晶行为的影响, 分别采用高纯氧化铝、普通氧化铝作为矿化剂, 制备氧化铝改性硅基陶瓷型芯。高纯氧化铝粉对方石英的析晶起到抑制作用, 而普通氧化铝粉反而促进方石英的析晶。普通氧化铝粉比高纯氧化铝粉含有更多的碱金属、碱土金属氧化物杂质, 这些氧化物作为网络修饰体降低结晶活化能, 促进方石英的析晶。两种氧化铝矿化剂对型芯的线收缩率、致密化和力学性能影响表现出很大差异。由于普通氧化铝粉促进方石英析晶和烧结致密化, 显著提高型芯的抗蠕变能力。当普通氧化铝粉加入量为 5% (质量分数) 时, 陶瓷型芯表现出良好的综合性能, 其收缩率为 0.63%, 室温弯曲强度为 20.2 MPa, 1540 °C/0.5 h 双支点挠度为 0.23 mm, 可满足精密铸造对型芯的要求。

关键词: 氧化硅; 陶瓷型芯; 氧化铝; 结晶活化能; 性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2022.001057

中图分类号: TQ174.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2024)05-0212-06

Abstract: Alumina is a common mineralizer in silica-based ceramic cores, but its promotion or inhibition effects on the crystallization of fused-silica are in contrary conclusions. To explore the effects of different alumina mineralizers on the property and crystallization behavior of silica-based ceramic cores, silica/alumina ceramic cores were fabricated using high-pure alumina and common commercial alumina powders as mineralizers, respectively. The high-pure alumina powders hinder the crystallization of cristobalite, but the common alumina powders promote the crystallization behavior. The common alumina powders have larger amounts of impurities than that of high-pure alumina powders, including alkali oxides and alkaline-earth oxides, which highly decrease the crystallization activation energy and promote the crystallization of cristobalite. There is significant difference in the effects of two alumina mineralizers on the linear shrinkage rate, densification, and mechanical properties of ceramic cores. Due to the common alumina powders promoting the crystallization and sintering densification of silica glass, the resistance of creep deformation is improved. When the content of common alumina powders is 5% (mass fraction), the ceramic cores exhibit superior performance, including linear shrinkage of 0.63%, room-temperature flexure strength of 20.2 MPa, and deflection of 0.23 mm via double cantilever beam method at 1540 °C/0.5 h, meeting the requirement for precision casting.

Key words: silica; ceramic core; alumina; crystallization activation energy; property

航空发动机被称为飞机的“心脏”,直接关系到一个国家的航空水平和军事实力^[1-2]。由于国内航空发动机起步较晚加之世界各国的技术封锁,航空发动机对于我国是一项卡脖子技术,自主研制高性能航空发动机是迫在眉睫的任务。衡量航空发动机的重要指标之一是推重比,航空发动机的高推重比是通过提高涡轮燃气温度来实现的^[3],叶片的耐高温性能成为推重比的关键。目前,最先进的航空发动机涡轮燃气温度已经接近各种合金的熔点^[4-5],因此要进一步提高涡轮燃气温度,各国科研机构更加关注于提高发动机叶片的散热能力,通过设计复杂内腔结构的发动机叶片来代替原来的实心叶片,使热量可以在冷空气穿过空心叶片时被带走,从而提高散热效率^[6]。

在空心叶片的发展历程中,其内腔结构越来越复杂,传统的电化学腐蚀和机械加工等方法很难满足复杂内腔空心叶片的成型,熔模铸造成为获得精确内腔结构的理想方法。陶瓷型芯^[7-9]在涡轮叶片的熔模铸造中提供精确复杂的内腔结构,其性能和质量将直接决定叶片铸件的尺寸精度、质量以及合格率,而且在后续浇铸与脱芯过程中,还面临着高温、未知应力以及金属液侵蚀等多种考验,对陶瓷型芯的热化学稳定性、耐高温、热膨胀系数、强度、抗蠕变性能、溶蚀性提出了严格要求,因此陶瓷型芯成为航空发动机制造的技术关键。

熔融石英具有热膨胀系数低、抗热震性优良、冶金化学稳定性强、烧结温度低等优点,且容易在强碱溶液中溶出^[10-11],是制备陶瓷型芯的理想材料,目前使用的陶瓷型芯 90% 以上是硅基陶瓷型芯^[7]。但是熔融石英高温稳定性不足,石英玻璃会在 1200 °C 以上由非晶态转变为晶态,析出方石英晶体,方石英又会在冷却过程中发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 相多晶型转变并伴随体积收缩,这一相变收缩会引发应力集中,形成大量裂纹,使型芯的强度降低。另一方面,析出的方石英晶体可抑制石英玻璃软化造成的黏性流动,使陶瓷型芯具有较高的高温抗蠕变性能,增加其尺寸稳定性。针对硅基陶瓷型芯的弱点,学者们通常加入方石英、莫来石、硅酸锆、纳米石英等矿化剂^[12-15]来改善氧化硅基陶瓷型芯的高温稳定性。一方面,矿化剂材料具有较高的耐火度,与熔融石英基体交叉互锁,形成复相陶瓷材料,从而改善型芯的高温性能;另一方面,矿化剂对方石英的析晶会产生影响,从而进一步改变陶瓷型芯的高温性能。

氧化铝是最常见的氧化物陶瓷之一,具有高熔点、优良的高温力学性能等优势^[16-17],可用作硅基陶瓷型芯的矿化剂以调节其高温性能。尽管氧化铝改性

硅基陶瓷型芯已有报道,但氧化铝对方石英析晶的促进^[18]或抑制^[19]作用却存在两种相反的结论,关于氧化铝/氧化硅陶瓷型芯的析晶机理有待深入研究。因此,本工作分别采用高纯度氧化铝、普通氧化铝粉作为硅基陶瓷型芯的矿化剂,研究不同种类氧化铝改性陶瓷型芯的结晶动力学,并探究氧化铝种类对陶瓷型芯结构性能的影响。

1 实验材料与方法

以熔融石英粉(SiO_2 , 连云港鑫海石英制品有限公司)为基体原料,以硅酸锆(ZrSiO_4 , 灵寿佳创矿产品加工厂)和氧化铝粉(Al_2O_3)为添加剂制备硅基陶瓷型芯,其中氧化铝粉分别采用高纯氧化铝粉(阿拉丁生化科技股份有限公司)和普通商业氧化铝粉(河南济源兄弟材料有限责任公司),原料信息如表 1 所示,两种氧化铝粉的成分如表 2 所示,对比可知两种氧化铝粉体颗粒尺寸相近,但杂质含量具有较大差异。

表 1 实验原料信息

Table 1 Experiment information of raw materials

Raw material	Chemical formula	Purity/%	Mean particle size/ μm
Fused silica	SiO_2	>99.95	30.57
High-pure alumina	Al_2O_3	>99.9	15.4
Common alumina	Al_2O_3	>95	15.7
Zircon	ZrSiO_4	>99	20

表 2 氧化铝粉体的成分及含量

Table 2 Compositions and contents of alumina powders

Raw material	Mass fraction/%						
	Al_2O_3	SiO_2	Na_2O	K_2O	Fe_2O_3	CaO	MgO
High-pure alumina	99.5	0.3	0.1	0.02	0.05	0.02	<0.01
Common alumina	97.92	1.2	0.53	0.37	0.08	0.16	<0.1

为了对比不同氧化铝粉对陶瓷型芯性能及析晶行为的影响,本工作选用三种配方,配方 A0 为 95% (质量分数,下同)熔融石英粉和 5% 硅酸锆粉,配方 CA1 为 90% 熔融石英粉、5% 硅酸锆粉和 5% 普通氧化铝粉,PA2 为 90% 熔融石英粉、5% 硅酸锆粉和 5% 高纯氧化铝粉。将上述粉体与增塑剂均匀混合后,通过热压注成型获得 120 mm×10 mm×4 mm 的条形坯体,以 1190 °C/6 h 的条件在马弗炉中进行烧结,然后先后在聚乙烯醇溶液和正硅酸乙酯溶液中强化得到陶瓷型芯。

对试样采用 S4800 型扫描电子显微镜(SEM)测

试以明确其断口形貌,采用 D8 型 X 射线衍射仪(XRD)分析陶瓷型芯的物相组成,采用 STA449F3 型差示扫描量热(DSC)分析陶瓷型芯在升温过程中的热量变化。

根据标准 HB5353.2—2004,使用千分尺测定陶瓷型芯烧结前后的尺寸,计算试条在烧结中的收缩率;根据标准 ASTM B962—2015,采用 HMOR15 300P 型电子万能材料试验机进行三点弯曲测试;根据标准 HB5353.4—2004,采用双悬臂梁法测试型芯试棒的高温蠕变,测试条件为 1540 ℃/30 min。

2 结果与分析

对不同陶瓷型芯进行 XRD 测试(图 1),对于未加入氧化铝粉的 A0 陶瓷型芯,其 XRD 谱图中检测到了硅酸锆(PDF No. 83-1376)和方石英(PDF No. 27-0605)的衍射峰,表明烧结后的陶瓷型芯中有少量石英玻璃转化为方石英相。对于含有 5% 普通氧化铝粉的 CA1 陶瓷型芯,除检测到氧化铝相(PDF No. 75-1863),其方石英的含量有所增大,表明普通氧化铝粉促进了方石英的析晶。而加入 5% 高纯氧化铝粉后,PA2 陶瓷型芯的方石英衍射峰却明显减弱,表明高纯氧化铝粉抑制了方石英的析晶。利用 K 值法^[20]得到 A0,CA1,PA2 三种陶瓷型芯的方石英含量分别为 4.6%,8.3% 和 2.4%。

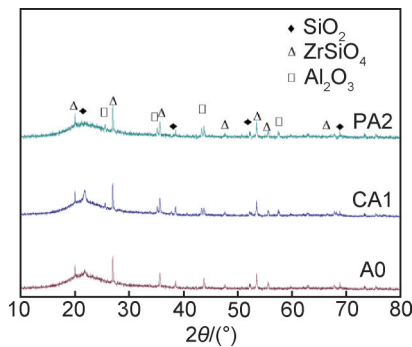


图 1 不同陶瓷型芯的 XRD 谱图
Fig. 1 XRD patterns of ceramic cores

对陶瓷型芯进行 DSC 测试,升温速率为 10 ℃/min,结果如图 2 所示。A0 陶瓷型芯在 1377.9 ℃呈现出放热峰,对应方石英的析晶温度。含 5% 普通氧化铝粉的 CA1 陶瓷型芯,其方石英析晶温度降低至 1361.8 ℃,对于含 5% 高纯氧化铝粉的 PA2 陶瓷型芯,其方石英析晶温度升高至 1401.6 ℃,表明高纯氧化铝抑制熔融石英的析晶而普通氧化铝促进熔融石英的析晶,这与 XRD 谱图结论相一致。值得注意的

是,在 1190 ℃烧结后的 XRD 谱图中检测到了方石英的存在,但是在 DSC 测试中方石英结晶温度超过 1300 ℃,明显高于 1190 ℃,这是由于 XRD 和 DSC 两种测试方式的升温机制差异,XRD 测试样品烧结条件为 1190 ℃保温 6 h,而 DSC 测试样品在加热中没有保温阶段。

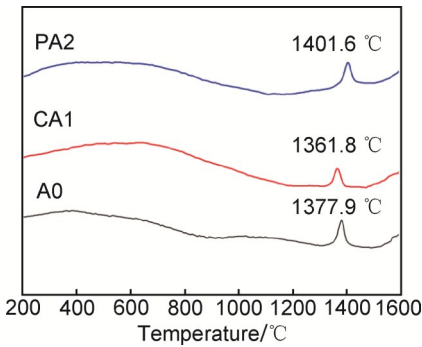


图 2 不同陶瓷型芯的 DSC 曲线
Fig. 2 DSC curves of different ceramic cores

熔融石英转变为方石英的过程中,需要外界为结构重排提供一定的能量,这一能量称为结晶活化能,所提供的能量越大,活化能越高,材料析晶能力越弱。因此,结晶活化能是反映玻璃析晶能力的重要判据。Kissinger 方程^[21]将结晶活化能表达如下

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p}\right) = -\frac{E_c}{RT_p} - \ln\left(\frac{E_c}{R}\right) + \ln\mu \quad (1)$$

式中: T_p 为 DSC 曲线中结晶放热峰的热力学温度; β 为 DSC 测试的升温速率; E_c 为结晶活化能; R 为气体常数; μ 为常数。根据 Kissinger 方程,以 $\ln(\beta/T_p)$ 为纵坐标,以 $1/T_p$ 为横坐标作图,进行线性拟合可计算出 E_c 值。

对陶瓷型芯进行 DSC 测试,升温速率分别为 5, 10, 15, 20 ℃/min,得到对应的结晶放热峰温度(表 3),对 $\ln(\beta/T_p)$ 与 $1/T_p$ 进行线性拟合(图 3),计算出不同陶瓷型芯的结晶活化能 E_c 。对于未加入氧化铝粉的 A0 陶瓷型芯,其结晶活化能为 1321.6 kJ/mol,含有 5% 普通氧化铝粉的 CA1 陶瓷型芯,其结晶活化能减少为 1177.9 kJ/mol,当氧化铝种类改为高纯氧化铝时,

表 3 不同升温速率下 DSC 测试中的结晶温度
Table 3 Crystallization temperatures in DSC curves with different heating rates

Sample	$T_p/^\circ\text{C}$			
	5 ℃/min	10 ℃/min	15 ℃/min	20 ℃/min
A0	1369.1	1377.9	1388.1	1396.5
CA1	1352.3	1361.8	1372.4	1382.5
PA2	1392.0	1401.6	1406.9	1417.6

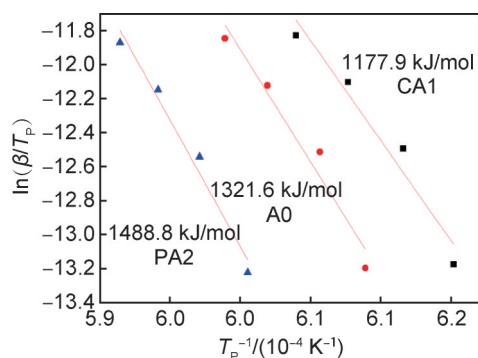


图3 不同陶瓷型芯的结晶活化能

Fig. 3 Activation energy for crystallization of the ceramic cores

PA2陶瓷型芯的结晶活化反而升高至1488.8 kJ/mol。

由于非晶相石英玻璃与方石英结构相近,石英玻璃在高温下可转化为晶相,析出方石英晶体。根据Uhlmann^[22]均相成核理论,石英玻璃在1300℃的成核酝酿期接近14 h,表明该条件下很难成核。然而,大多数石英玻璃的析晶温度低于1300℃,且析晶始于颗粒表面,表明异相成核是石英玻璃的主要析晶方式。当PA2陶瓷型芯中加入高纯氧化铝粉后,由于 Al^{3+} 具有大电荷、小体积、高电荷密度,能够显著屏蔽易极化的氧原子阻碍其运动,从而抑制石英玻璃的析晶;而且,氧化铝属于中间体氧化物,自身无法形成玻璃网络结构,但可以进入硅氧四面体网络结构,使断裂的网络结构重新连接,进一步抑制玻璃析晶。因此,高纯氧化铝粉的加入抑制了PA2陶瓷型芯的析晶。然而,由于CA1陶瓷型芯加入的普通氧化铝粉含有较多的碱金属、碱土金属氧化物杂质,由于其化学键较弱,Na—O单键强84 kJ/mol, K—O单键强54 kJ/mol, Ca—O单键强134 kJ/mol, Mg—O单键强154 kJ/mol,这些碱金属、碱土金属氧化物起到网络修饰体的作用,切断玻璃网络结构,降低玻璃的结晶势垒,因此普通氧化铝粉的加入促进了CA1陶瓷型芯的析晶。

图4为氧化铝对陶瓷型芯线收缩率与气孔率的影响,无氧化铝粉的A0陶瓷型芯烧结收缩率为0.54%,含5%普通氧化铝粉的CA1陶瓷型芯,其收缩率增大至0.63%,对于含5%高纯氧化铝粉的PA2陶瓷型芯,其收缩率反而降低至0.35%,表明普通氧化铝粉促进陶瓷型芯的烧结收缩,而高纯氧化铝抑制收缩。氧化铝对烧结收缩影响取决于两个方面:一方面,由于氧化铝耐火度高于氧化硅,氧化铝粉的加入提高了氧化硅陶瓷型芯的黏度,在烧结过程中阻碍了石英玻璃的扩散流动,因而降低了陶瓷型芯的烧结收缩率;另一方面,由于氧化铝中含有一定含量的 Na_2O ,

K_2O , CaO , MgO 等杂质,形成低熔点相,加速熔融石英的烧结致密化。由于高纯氧化铝粉的杂质含量很低,低熔点相对熔融石英的烧结致密化作用非常微弱,因而表现出抑制烧结;而杂质含量较高的普通氧化铝粉,低熔点相对烧结致密化的促进作用超过氧化铝对基体黏度的提高,因此表现为促进烧结。陶瓷型芯的气孔率变化与收缩率相反,未添加氧化铝粉的A0陶瓷型芯气孔率为30.4%,含有高纯氧化铝粉的PA2陶瓷型芯气孔率增大至36.8%,加入普通氧化铝粉的型芯气孔率则降低为27.5%。烧结程度是影响陶瓷型芯气孔率的首要因素,随着型芯烧结的进行,结构不断致密,粉体之间的气孔不断排出,间隙变小,使陶瓷型芯的气孔率不断降低,最终表现出的变化趋势为 $PA2 > A0 > CA1$ 。

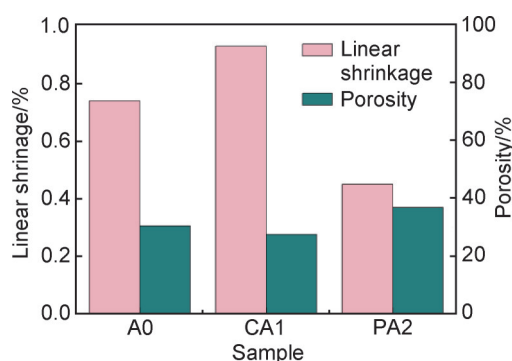


图4 不同陶瓷型芯的线收缩率与气孔率

Fig. 4 Linear shrinkage and porosity of different ceramic cores

图5为不同陶瓷型芯的断面SEM图,未添加氧化铝粉时,A0陶瓷型芯(图5(a))的微观结构较为疏松,颗粒之间具有较多的气孔。当采取5%的普通氧化铝粉作为矿化剂时(图5(b)),CA1陶瓷型芯结构致密程度增大,颗粒之间结合变得更为紧密,材料断裂能升高,这是由于普通氧化铝粉中的碱金属、碱土金属氧化物杂质形成低熔点相促进了熔融石英的烧结致密化,在一定程度上促进强化了颗粒间的结合。当陶瓷型芯中加入5%的高纯氧化铝时(图5(c)),PA2陶瓷型芯的致密度降低,颗粒间结合变弱,材料断裂能降低,这是由于高纯氧化铝粉中的碱金属、碱土金属离子杂质含量很低,氧化铝粉阻碍了陶瓷型芯的烧结致密化,因此降低了颗粒间的结合。

图6为陶瓷型芯的室温弯曲强度和高温挠度。对于未加入氧化铝粉的A0型芯,其弯曲强度为17.8 MPa,加入5%的高纯氧化铝粉体后,由于PA2型芯的烧结致密化在一定程度上受到阻碍,颗粒间结合减弱,因而室温强度降低至16.7 MPa,当采用普通氧化铝粉作为矿化剂时,由于CA1型芯的烧结致密化得到

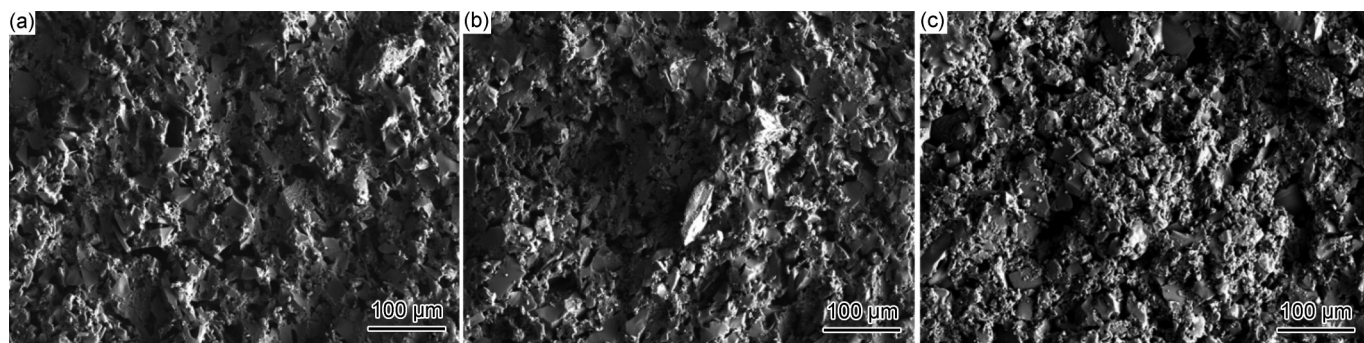


图5 不同陶瓷型芯断口SEM图

(a)A0;(b)CA1;(c)PA2

Fig. 5 SEM images of ceramic cores fracture surfaces

(a)A0;(b)CA1;(c)PA2

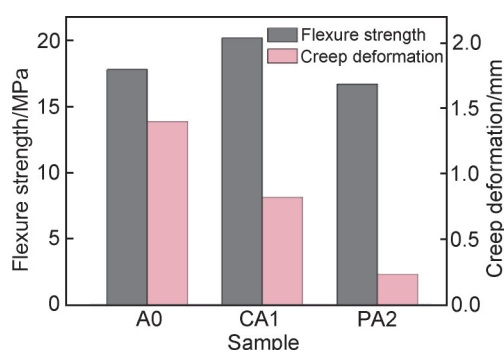


图6 陶瓷型芯的弯曲强度与高温蠕变

Fig. 6 Flexure strengths and creep deformations of ceramic cores

促进,颗粒结合增强,型芯室温强度增大至20.2 MPa。不含氧化铝矿化剂的A0陶瓷型芯在1540℃的挠度为1.4 mm,加入5%高纯氧化铝粉体后,由于氧化铝粉提高了石英玻璃的高温黏度,阻碍了高温黏流动,改善了型芯抗蠕变性能,其高温挠度减小至0.82 mm。当采取普通氧化铝粉矿化剂时,型芯的高温挠度进一步减小到0.23 mm,能够很好地满足精密铸造对型芯的性能要求,一方面,氧化铝颗粒作为高温相对体系黏度有所提高;另一方面,普通氧化铝促进了方石英析晶,由于方石英的熔点高于石英玻璃,方石英作为耐火相进一步提高了体系的高温黏度。

3 结论

(1)由于 Al^{3+} 高电荷密度能够屏蔽易极化的氧原子阻碍其运动,高纯氧化铝粉对方石英的结晶起到抑制作用;普通氧化铝粉反而促进方石英的析晶,这是由于普通氧化铝粉中含有更多的碱金属、碱土金属氧化物杂质,这些氧化物作为网络修饰体降低结晶活化能,促进方石英的析晶。

(2)两种氧化铝矿化剂对型芯的线收缩率、致密

化和力学性能影响表现出了很大差异。由于普通氧化铝粉促进石英玻璃析晶和烧结致密化,型芯高温挠度明显降低。

(3)当普通氧化铝粉加入量为5%时,陶瓷型芯表现出良好的综合性能,其收缩率为0.63%,室温弯曲强度为20.2 MPa,1540℃/0.5 h双支点挠度为0.23 mm,可满足精密铸造对型芯的要求。

参考文献

- [1] 薛然然,李凤超.微型涡轮喷气发动机发展综述[J].航空工程进展,2016,7(4):387-396.
XUE R R, LI F C. An overview on development of micro turbojet engines[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2016, 7(4): 387-396.
- [2] 赵云松,张迈,郭小童,等.航空发动机涡轮叶片超温服役损伤的研究进展[J].材料工程,2020,48(9):24-33.
ZHAO Y S, ZHANG M, GUO X T, et al. Recent progress in service induced degradation of turbine blades of aeroengine due to overheating[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(9): 24-33.
- [3] LU Z L, CAO J W, JING H, et al. Review of main manufacturing processes of complex hollow turbine blades[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2020, 8: 87-95.
- [4] 曹凯莉,杨文超,屈鹏飞,等. Ru对镍基单晶高温合金凝固特性、TCP相析出及蠕变性能影响的研究进展[J].材料工程,2022,50(1):80-92.
CAO K L, YANG W C, QU P F, et al. Research progress in effect of Ru on solidification characteristics, precipitation of topologically close-packed phases and creep property of nickel-based single crystal superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(1): 80-92.
- [5] 罗亮,肖程波,陈晶阳,等.工业燃气轮机涡轮叶片用铸造高温合金研究及应用进展[J].材料工程,2019,47(6):34-41.
LUO L, XIAO C B, CHEN J Y, et al. Research and application progress in casting superalloys for industrial gas turbine blades[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(6): 34-41.

- [6] GUO Z, SONG Z, FAN J, et al. Experimental and analytical investigation on service life of film cooling structure for single crystal turbine blade[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 150: 106318.
- [7] 刘国库, 王威. 航空发动机叶片制造及再制造技术研究[J]. *科技创新与应用*, 2022, 12(33): 145-148.
- LIU G K, WANG W. Research on aeroengine blade manufacturing and remanufacturing technology[J]. *Technology Innovation and Application*, 2022, 12(33): 145-148.
- [8] 王权威, 王程冬, 鲁中良, 等. 面向单晶涡轮叶片的氧化硅陶瓷型芯快速成形性能[J]. *材料工程*, 2022, 50(7): 51-58.
- WANG Q W, WANG C D, LU Z L, et al. Performance of silicon oxide-based ceramic cores made by rapid prototyping for single crystal turbine blades[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, 50(7): 51-58.
- [9] FAN J X, XU X Q, NIU S X, et al. Anisotropy management on microstructure and mechanical property in 3D printing of silica-based ceramic cores[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, 42: 4388-4395.
- [10] LU G, CHEN Y, YAN Q, et al. Investigation of microstructure and properties in short carbon fiber reinforced silica-based ceramic cores *via* atmosphere sintering[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41: 7339-7347.
- [11] GROMADA M, SWIECA A, KOSTECKI M, et al. Ceramic cores for turbine blades *via* injection moulding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 220: 107-112.
- [12] XU X, NIU S, WANG X, et al. Fabrication and casting simulation of composite ceramic cores with silica nanopowders[J]. *Ceramics International*, 2019, 45: 19283-19288.
- [13] 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.
- [14] NIU S, XU X, LI X, et al. Enhanced properties of silica-based ceramic cores by controlled particle sizes of cristobalite seeds[J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2019, 118(7): 403-408.
- [15] 李鑫, 刘晓光, 唐定中, 等. 硅酸锆粒度对氧化硅基型芯性能的影响[J]. *人工晶体学报*, 2013, 42(5): 911-914.
- LI X, LIU X G, TANG D Z, et al. Influence of particle size of zirconium silicate on the properties of silica-based ceramic core[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2013, 42(5): 911-914.
- [16] 林洪玉, 李晓鸿, 陈璐, 等. 硅溶胶添加对氧化铝多孔陶瓷烧结性能的影响[J]. *材料工程*, 2021, 49(5): 151-156.
- LIN H Y, LI X H, CHEN L, et al. Effect of silica sol addition on sintering properties of porous alumina ceramics[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2021, 49(5): 151-156.
- [17] FAN J X, FAN H N, SONG Z, et al. Thermal-shock stable Al_2O_3 crucible for superalloy smelting through slip casting with particle gradation[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(6): 8762-8771.
- [18] LIANG J J, LIN Q H, ZHANG X, et al. Effects of alumina on cristobalite crystallization and properties of silica-based ceramic cores[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(2): 204-209.
- [19] CHEN X, ZHENG W, ZHANG J, et al. Enhanced thermal properties of silica-based ceramic cores prepared by coating alumina/mullite on the surface of fused silica powders[J]. *Ceramics International*, 2020, 46: 11819-11827.
- [20] WANG H Z, ZHANG Y, CHEN J. K value method calculation of crystallization of porous silicon-based ceramic cores and the corresponding performance analysis, *Rare Metal Materials And Engineering*[J]. 2013, 42: 535-537.
- [21] REYES E A A, DREW R A L. Kinetic study of amorphous yttria-alumina fibers using differential thermal analysis[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, 86(1): 43-48.
- [22] UHLMAN A R. Crystallization and melting in glass forming systems[M]. New York: Plenum Press, 1969: 172-197.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52102062)

收稿日期: 2022-12-06; 修订日期: 2024-02-21

通讯作者: 许西庆(1990—), 男, 副教授, 博士, 主要从事陶瓷型芯制备及涡轮叶片铸造, 联系地址: 陕西省西安市雁塔区长安中路75号长安大学小寨校区(710061), E-mail: xiqingxu@chd.edu.cn

(本文责编: 齐 新)