

陶瓷型芯颗粒级配控制及综合性能评定

牛书鑫¹, 骆宇时¹, 李 鑫¹, 杨永康², 许西庆²

(1. 北京航空材料研究所先进高温结构材料重点实验室, 北京100095;
2. 长安大学材料科学与工程学院, 陕西西安710061)

摘要: 陶瓷型芯在空心涡轮叶片铸造中用于形成复杂内腔结构, 其综合性能要求严苛。基于不同粒度的熔融石英粉进行颗粒级配, 探究了陶瓷型芯物相组成与微观结构的演变规律, 并进行了综合性能评定。适量的细粉可以填充在石英粗颗粒的骨架结构中, 提高强度的同时保持低收缩。过多细粉会包围粗粉并破坏粗粉骨架结构, 导致收缩率剧增, 形成的致密结构不利于型芯的溶蚀性, 且过多晶界会导致蠕变增加。基于雷达图确定, 熔融石英细粉含量为30%的陶瓷型芯表现出优异的综合性能, 浆料充型参数498 mm, 型芯线收缩率为0.24%, 表观气孔率为32.3%, 表面粗糙度为1.2 μm , 高温蠕变为0.76 mm, 常温强度为21.2 MPa, 溶蚀率为0.65 g/min。

关键词: 陶瓷型芯; 颗粒级配; 骨架结构; 雷达图; 综合性能

作者简介:

牛书鑫(1987-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为陶瓷型芯、航空涡轮叶片铸造。E-mail: shuxinniul23@163.com

通信作者:

许西庆, 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: xiqingxu@chd.edu.cn

中图分类号: TG222

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

03-0350-07

基金项目:

国家自然科学基金(52102062); 陕西省重点研发计划(2024GX-YBXM-352)。

收稿日期:

2024-10-23 收到初稿,

2024-12-02 收到修订稿。

航空涡轮发动机作为飞机的心脏部件, 推动航空器前进, 代表国家制造业的最高水平^[1]。涡轮发动机的燃烧室中流出高温高压燃气, 由内能转化为机械能, 推动涡轮叶片旋转, 因此涡轮的燃气温度直接决定发动机的动力。目前高性能发动机的燃气温度已经达到大多数合金材料的耐温极限, 空心冷却技术成为降低叶片温度的重要途径, 通过在叶片中设计复杂的内腔作为气冷结构, 提高冷却效率^[2-3]。

陶瓷型芯^[4-6]在涡轮叶片的精密铸造中形成铸件的内部形状, 对铸件壁厚的均匀程度、空心叶片内腔结构的复杂程度和精密性起到决定性作用。随着涡轮叶片的气冷结构不断更新换代, 陶瓷型芯结构日益复杂, 对陶瓷型芯的综合性能提出越来越高的要求。型芯在熔模铸造中遭受严苛的环境考验, 例如: 金属热液的冲击、长时间的高温环境^[7], 要求型芯要具有良好的耐高温性和热化学稳定性、小的热膨胀系数、良好的抗高温蠕变性能、较好的机械强度、良好的溶出性和光洁的表面^[8-9]。熔融石英玻璃具有小的线膨胀系数, 较好的尺寸稳定性且容易被碱金属盐侵蚀而脱芯, 因而在陶瓷型芯的基体材料中应用最广泛^[10-12]。

然而, 硅基陶瓷型芯的性能之间存在相互矛盾。例如, 烧结中的低收缩率是保证尺寸精度的重要条件, 且高气孔率有利于陶瓷型芯的脱芯过程, 但这些容易导致石英颗粒之间结合过差, 弱化陶瓷型芯的力学性能^[13]; 此外, 方石英含量的增多可改善硅基型芯的高温力学性能, 但不利于陶瓷型芯的脱芯过程^[14]。陶瓷型芯性能的平衡控制及综合评价是提高陶瓷型芯工程应用可靠性的关键。雷达图分析法^[15-16]是对材料性能或产品质量进行综合评定的常用方法, 通过对比检测对象的多项指标, 可清晰展示产品性能全貌, 为后续工艺改进提供依据。然而, 雷达图分析法在陶瓷型芯领域鲜有报道。

本文采用热压注法制备硅基陶瓷型芯, 基于熔融石英粉的颗粒级配对型芯进行结构与性能调控, 并利用雷达图分析法对型芯性能进行综合评定, 以期对硅基陶瓷型芯的性能平衡控制及优化提供新的方法。

1 试样制备与方法

1.1 样品制备

本试验的基体材料采用两种不同粒径的熔融石英粉，矿化剂采用莫来石粉末，各种陶瓷粉体的具体

信息如表1所示。将三种粉体混合，其中莫来石粉的质量分数为15%，熔融石英细粉的占陶瓷粉体总量的10%~50%，其余为熔融石英粗粉，混合粉体的颗粒尺寸分布如图1所示。

表1 原材料信息
Tab. 1 Information of the raw materials

原料	化学式	平均粒径/ μm	纯度/%	产地
熔融石英粗粉	SiO_2	33.7	>99.95	江苏东海
熔融石英细粉	SiO_2	6.8	>99.95	江苏东海
莫来石粉	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	36.2	>95	江苏常州

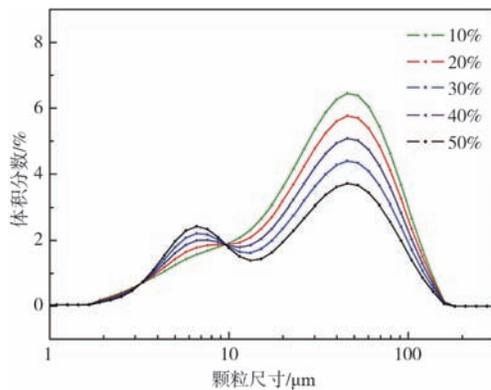


图1 不同熔融石英细粉含量陶瓷粉体的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of ceramic powders with different contents of fused silica fine powders

称取石蜡、蜂蜡、聚乙烯，质量比为93:5:2，90℃加热为熔融态并搅拌混合均匀作为增塑剂。按照表2中比例称取粉体加入到熔融的增塑剂中，陶瓷粉料与增塑剂的质量比为78:22，将陶瓷粉体与增塑剂的混合料在真空中搅拌12 h。对上述浆料进行热压注成形，条件为110℃/3 MPa/10 s，得到120 mm×10 mm×4 mm的条形坯体，通过马弗炉在1 190℃烧结6 h，得到陶瓷型芯。

1.2 表征与测试

采用NDJ-8S型运动黏度计测试浆料的黏度，取90℃的浆料于量杯，将测试转子放入浆料中，待转子在浆料中均匀转动后测试得到其运动黏度值。在110℃/3 MPa条件下将陶瓷浆料注入阿基米德线模具中，得到阿基米德螺旋线长度记作浆料的充型参数。烧结后样品的气孔率与密度利用阿基米德法测定。利用激光共聚焦显微镜(OLS5000，日本Olympus株式会社)测定样品的粗糙度。陶瓷型芯的收缩率通过测量烧结前后的陶瓷型芯的尺寸进行计算。

使用电子万能材料试验机(WDW-GD，济南新试金试验机有限责任公司)基于三点弯曲法测定陶瓷型

芯的室温和高温(1 540℃)抗弯强度，测试样品的尺寸为60 mm×10 mm×4 mm，跨距为30 mm。根据HB 5353.4~2004标准进行高温挠度测试，所采用的方法为双支点悬臂梁法，测试试样尺寸为120 mm×4 mm×2 mm。所采用的设备为额定功率为25 kW的马弗炉。在1 540℃保温30 min，测量试样悬臂下垂高度，为试样高温挠度。将陶瓷型芯试件用电子天平称量，记录其质量，将整个试样放入36%的KOH溶液中煮沸，记录型芯试件完全溶解所需要的时间，计算单位时间的溶解量作为其溶蚀率。上述测试中每组取至少5个样品的平均值。

采用MASRER SIZER2000型激光粒度分析仪对陶瓷粉料进行粒度分析，使用扫描电子显微镜(SEM，S4800，日本Hitachi株式会社)研究了陶瓷型芯的微观结构，并用X射线衍射分析(XRD，D8 Advance，美国Bruker公司)探究物相组成，使用的X射线波长为0.154 nm。

2 试验结果及分析

2.1 浆料性能

不同颗粒级配陶瓷型芯浆料的粘度与充型性如图2所示。随着细粉含量的增加，浆料粘度先降低后升高，当

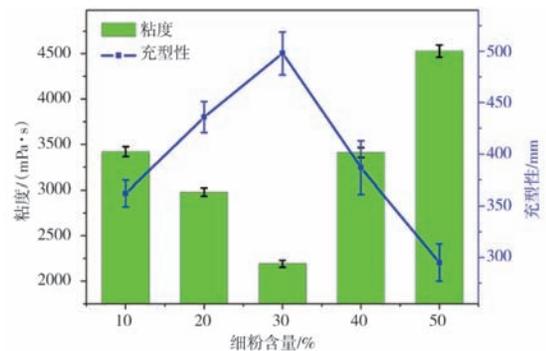


图2 熔融石英细粉含量对陶瓷浆料粘度与充型性的影响

Fig. 2 Effect of fused silica fine powder content on the viscosity and filling ability of ceramic slurries

细粉含量为30%时,浆料粘度达到最低值2 190 mPa·s。在粗颗粒中加入一定量的细颗粒时,细颗粒可以均匀地分布在粗粉颗粒的间隙中,增加陶瓷颗粒的堆积率,减少粗颗粒之间的机械碰撞和摩擦^[17]。因此随着熔融石英细粉含量由10%增大至30%,浆料的粘度由3 420 mPa·s降低至2 190 mPa·s,增加流动性。随着细粉含量继续增加,粗粉颗粒的间隙不足以容纳过量的细粉,导致陶瓷颗粒堆积体积增大,且粉体表面能显著提升,表面电荷也会逐渐增多,在表面电荷的作用下,形成更强的空间电荷,从而阻碍浆料的流动^[18]。随着细粉含量进一步增大至50%时,浆料粘度提升至4 530 mPa·s。热压注过程中,陶瓷浆料依靠压力和自身流动性有效填充流道,较高的粘度不利于浆料在热压注过程中充型,因而随着细粉含量的增加,浆料的充型性表现出先增大后降低的变化,当细粉含量为30%时,浆料充型参数达到498 mm。

2.2 型芯物相与微观结构

对不同配比的陶瓷型芯样品进行X射线衍射分析,如图3所示。对比发现随着细粉含量变化,莫来石(PDF#15-0776)衍射峰的强度基本不变,表明石英玻璃粉的粒度分布对莫来石相含量基本没有影响。另一方面,随着石英玻璃细粉颗粒增多,陶瓷型芯试样中方石英(PDF#27-0605)特征峰明显增强,表明石英玻璃细粉在烧结过程中更易于形成方石英相。利用K值^[19]法计算了方石英的析出量,当细粉含量为10%时,方

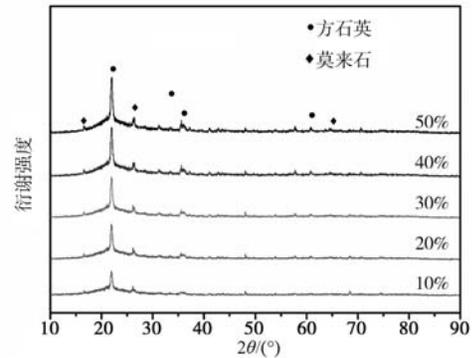


图3 不同细粉含量陶瓷型芯的物相组成

Fig. 3 Phase composition of ceramic cores with different contents of fused silica fine powders

石英析出量处于较低水平,仅为8.3%。随着石英细粉含量的增加,粉体的比表面积增大,为方石英析晶提供更多的异相形核点位,因而对方石英的析晶起到显著促进作用,当细粉含量为50%时,方石英含量达到24.2%。

图4为采用不同粗细颗粒配比的石英玻璃粉制备的陶瓷型芯断面微观结构。在细粉含量为10%的样品中,可以看到大量的粗颗粒相互堆叠,构成型芯的基础骨架。然而,由于这些大颗粒间空隙较大且连接不够紧密,形成的骨架松散,即便断裂模式以穿晶断裂为主,整体结合强度仍显不足。随着配方中细粉比例的增加,型芯的微观结构逐渐趋向于致密化。当细粉含量为30%时,粗细颗粒的配比达到最优状态,粗颗粒作

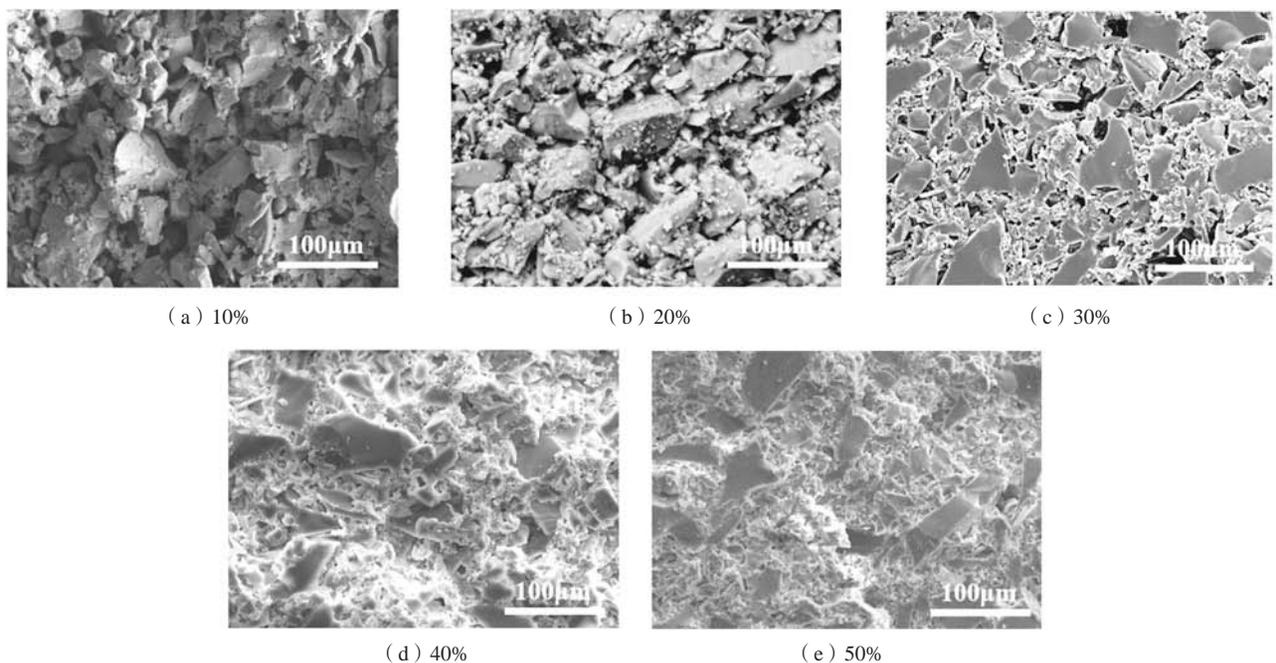


图4 不同细粉含量陶瓷型芯的断面微观结构

Fig. 4 Fracture microstructure imaged from ceramic cores with different contents of fused silica fine powders

为核心骨架, 提供了高温下的稳定性, 而适量的细颗粒填充了粗颗粒之间的间隙, 明显提高了堆积密度和结构的紧密度。同时, 其断裂模式依旧为穿晶断裂。然而, 当细粉含量进一步增加到40%, 过多的细粉包围粗粉并切断粗粉之间联系使粗粉孤立, 此时细粉之间的连接成为陶瓷型芯颗粒间的主要结合方式, 这种结构变化对陶瓷型芯的高温性能产生了负面影响。

2.3 型芯性能

图5为陶瓷型芯的线收缩率与表面粗糙度随着细粉比例增加的变化图。随着熔融石英细粉含量由10%增加至30%, 陶瓷型芯的线收缩率由0.18%增大至0.24%, 上升趋势微弱。而随着细粉含量由30%增加至50%, 陶瓷型芯的线收缩率迅速增大至0.98%。结合图4的SEM图可以得知, 当细粉含量为10%~30%时, 型芯中的粗颗粒形成的骨架结构有效阻碍了陶瓷型芯在烧结过程中的收缩, 随着细粉含量达到40%~50%, 过多的细粉包围粗粉并切断粗粉之间联系, 此时细粉之间的连接成为陶瓷型芯颗粒间的主要结合方式, 因此陶瓷的收缩率显著增大, 由于型芯结构的高度复杂性, 较大的收缩率在实际制备中会引起型芯发生形变和开裂^[20]。随着熔融石英细粉含量的增加, 陶瓷型芯的表面粗糙度呈现出先下降后升高的变化, 当细粉含量为30%时, 表面粗糙度达到最小值1.2 μm 。粗糙度的变化规律与图2中浆料粘度和充型性呈相似趋势, 表明浆料的粘度和充型参数是决定成形陶瓷型芯表面形貌的主要因素, 黏度的降低使得浆料注入模具后各处的固化情况改善, 因此成形的型芯样品表面粗糙度更低。

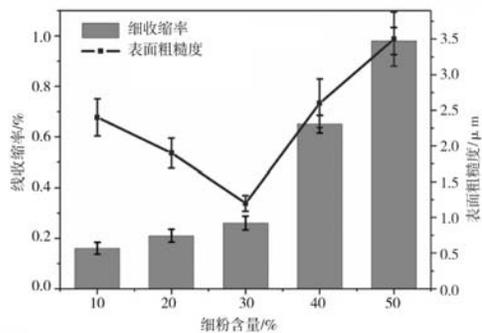


图5 不同细颗粒含量陶瓷型芯的线收缩率与表面粗糙度

Fig. 5 Linear shrinkage and surface roughness of ceramic cores with different contents of fused silica fine powders

不同细颗粒含量陶瓷型芯的气孔率与体积密度如图6所示, 当熔融石英细粉含量为10%~30%时, 陶瓷型芯的显气孔率和体积密度随细粉含量的变化趋势微弱, 气孔率数值由35.2%降低至32.3%, 体积密度由1.78 g/cm^3 增加至1.85 g/cm^3 。当细粉含量进一步增大至

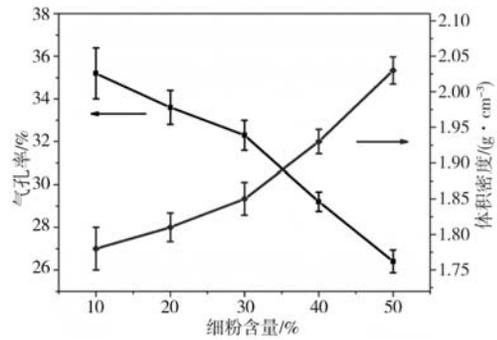


图6 不同细颗粒含量陶瓷型芯的气孔率与体积密度

Fig. 6 Porosity and bulk density of ceramic cores with different contents of fused silica fine powders

50%时, 气孔率迅速降低至26.4%, 体积密度也提升至2.03 g/cm^3 , 这一变化与收缩率的变化规律相似。当细粉含量低于30%时, 陶瓷型芯的烧结收缩不显著, 气孔率的降低主要来源于细粉颗粒与粗粉颗粒的紧密堆积, 在此期间粗粉颗粒形成骨架结构, 细粉颗粒对骨架中的空隙进行填充。而随着细粉含量高于30%, 细粉包裹粗粉使粗粉孤立, 粗粉间的骨架结构被破坏, 细粉间的结合造成大幅度的体积收缩, 导致致密度显著升高, 气孔率明显下降。

对不同细粉含量陶瓷型芯进行力学性能测试, 如图7所示。随着熔融石英细粉含量由10%增加至50%, 陶瓷型芯的常温强度由13.5 MPa增长至28.1 MPa, 高温强度由11.8 MPa提升至30.9 MPa, 高温弯曲强度均呈现出单调递增的变化, 且高温强度增长速率明显大于室温强度。一方面, 多孔陶瓷气孔率的升高会导致力学强度的下降, 结合图5和图6可知, 随着细粉含量增加, 陶瓷型芯收缩率增大, 气孔率降低, 因此承受载荷的有效截面积增大, 以至于陶瓷型芯的室温弯曲强度增大。另一方面, 由于细粉含量的增加促进了方石英的结晶, 提高了高温相含量, 使陶瓷型芯的高温弯曲

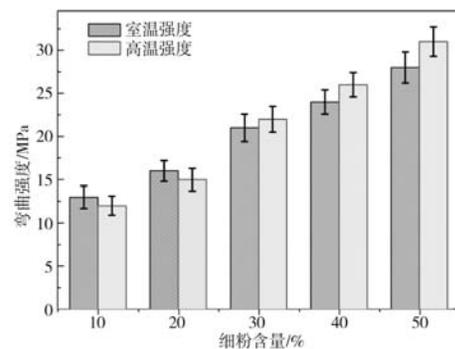


图7 不同细粉含量陶瓷型芯的弯曲强度

Fig. 7 Flexure strength of ceramic cores with different contents of fused silica fine powders

强度进一步增大,当细粉含量为30%~50%时,陶瓷型芯的强度超过室温强度。

由于硅基陶瓷型芯的烧结温度(1 200 ℃左右)明显低于铸造温度(1 540 ℃),硅基型芯在铸造前保温过程中能够自发析晶,转化为熔点高达1 723 ℃的方石英,在浇注温度下具有良好的高温结构稳定性,并且由于方石英析晶速率具有较好的可控性,在10~30 min内加热到1 300~1 600 ℃时,方石英含量可达60%~85%或更高,能为陶瓷型芯提供足够的高温抗折强度和抗高温蠕变能力^[21]。因此本文中细粉含量在30%、40%和50%时其高温强度大于室温强度可归结于较高的方石英含量有效提高了陶瓷型芯的高温力学性能。

如图8所示,随着熔融石英细粉含量的由10%增加至30%,陶瓷型芯的高温挠度由2.3 mm降低至0.76 mm,这是由于增加细粉的比例有助于减少显气孔率,提升型芯的整体致密度。这一变化增加了型芯在抵抗蠕变变形时的有效截面积,从而显著增强了其抗蠕变性能,表现为高温挠度的降低。随着细粉含量由30%进

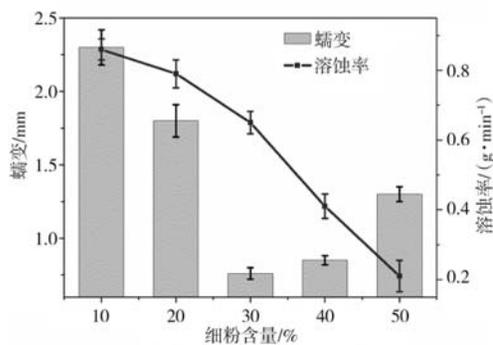


图8 不同细粉含量陶瓷型芯的高温挠度与溶蚀率

Fig. 8 High-temperature creep deformation and leaching rate of ceramic cores with different contents of fused silica fine powders

一步增加至50%,型芯的抗高温蠕变能力降低,高温挠度由0.76 mm增大至1.3 mm,这是由于细粉的进一步增加导致颗粒间的界面比例增大,界面表面能也随之升高。在高温环境下,过多的晶界促进了晶界黏性流动,反而削弱型芯的抗蠕变能力^[22],导致高温挠度逐渐增大。

随着陶瓷型芯中细粉含量的增加,样品的溶蚀率由0.86 g/min逐渐降低至0.21 g/min。一方面,随着细粉含量增加,陶瓷型芯气孔率降低形成更加致密的结构,因此直接减少了KOH溶液与型芯材料的接触面积,从而有效降低了型芯的溶解速率。另一方面,随着细粉含量的增加,方石英结晶更加明显,由于熔融石英玻璃处于比方石英具有更高的自由能、更容易被碱溶液腐蚀,因而石英玻璃的结晶导致陶瓷型芯的溶蚀率进一步降低。

2.4 综合性能评定

对不同细粉含量陶瓷型芯的性能进行归一化处理。对于正面特性指标,如充型性、气孔率、强度和溶蚀率,取5种样品中的最大值为1,最小值为0,根据公式(1)进行归一化处理:

$$y_i = \frac{x_i - m}{n - m} \quad (1)$$

式中: x_i 为一个样品中某个特性指标的测量值; m 为指标测量值的最小值; n 为指标测量值的最大值。

对于收缩率、粗糙度和高温挠度等负面特性指标,则对其抗收缩性、光滑度和抗蠕变性进行归一化对比,取样品中的最小值记作1,最大值记作0,再进行归一化处理,得到5种样品的归一化性能指标如表2所示。

表2 样品的归一化性能指标
Tab. 2 Normalized performance indicators of the samples

细粉含量/%	充型性	光滑度	抗收缩性	气孔率	室温弯曲强度	溶蚀性	抗蠕变性
10	0.33	0.48	1.00	1.00	0	1.00	0
20	0.69	0.70	0.94	0.82	0.20	0.89	0.32
30	1.00	1.00	0.88	0.67	0.53	0.68	1.00
40	0.45	0.39	0.40	0.32	0.73	0.31	0.94
50	0	0	0	0	1	0	0.65

采用雷达图对陶瓷型芯的7项性能进行对比,如图9所示。当细粉含量为10%时,陶瓷型芯在抗收缩性、气孔率和溶蚀性方面具有很好的优势,但在抗蠕变性和室温强度方面表现极差。当细粉含量为50%时,陶瓷型芯具有最佳的室温强度和较好的抗蠕变性,但其充

型性、光滑度、抗收缩性、气孔率和溶蚀性均达到最差。相比之下,细粉含量为30%的陶瓷型芯表现出了最优的综合性能,在充型性、抗蠕变性和光滑度方面呈现出最大优势,而在抗收缩性、气孔率和溶蚀性也有较好的表现。

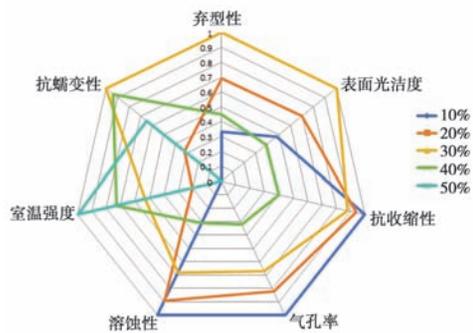


图9 不同细粉含量陶瓷型芯的综合性能对比

Fig. 9 Comparison in comprehensive performance between ceramic cores with different contents of fused silica fine powders

3 结论

本文采用以 $33.7\ \mu\text{m}$ 和 $6.8\ \mu\text{m}$ 两种粒度不同比例的熔融石英粉为原料, 基于颗粒级配探究了陶瓷型芯的微观结构与性能调控, 并利用雷达图分析法对型芯性能进行综合评定。主要结论如下。

(1) 细粉含量低于30%时, 熔融石英大颗粒相互堆叠形成骨架结构, 有利于抑制烧结收缩, 保持高气孔结构。适量细颗粒的加入可填充骨架结构的间隙, 在一定程度上提高堆积密度, 改善力学性能。细粉含量高于40%时, 过多的细粉包围粗粉并破坏粗粉骨架结构, 导致收缩率急剧增大, 尽管这种致密结构可提高陶瓷型芯的强度, 但不利于陶瓷型芯的溶蚀性, 且过多晶界也会导致抗高温蠕变性能变差。

(2) 当细粉含量为30%时, 细颗粒均匀地分布在粗粉颗粒的间隙中, 增加陶瓷颗粒的堆积率, 减少粗颗粒之间的机械碰撞和摩擦, 使得陶瓷浆料表现出最低的粘度和最佳的充型性, 进而使样品表现出最佳的表面光洁度。

(3) 基于雷达图分析法确定, 当熔融石英细粉含量为30%时, 陶瓷型芯表现出优异的综合性能, 线收缩率为0.24%, 表观气孔率为32.3%, 表面粗糙度为 $1.2\ \mu\text{m}$, 高温蠕变为 $0.76\ \text{mm}$, 常温高温强度分别为 $21.2\ \text{MPa}$ 和 $22.4\ \text{MPa}$, 溶蚀率为 $0.65\ \text{g/min}$ 。

参考文献:

- [1] 陈予恕, 张华彪. 航空发动机整机动力学研究进展与展望[J]. 航空学报, 2011, 32(8): 1371-1391.
- [2] CHEN M, QIU H, XIE W, et al. Research progress of continuous fiber reinforced ceramic matrix composite in hot section components of aero engine [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 678: 012043.
- [3] 崔慧然, 冯相如, 任建伟. 燃气轮机涡轮叶片制造工艺现状及发展方向 [J]. 铸造, 2022, 71(2): 143-150.
- [4] EHK A, HYP A, CLL B, et al. Single crystal casting of gas turbine blades using superior ceramic core [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 3348-56.
- [5] 穆岩, 王树森, 白炜琛, 等. 高温合金熔模精密铸造陶瓷型芯研究进展 [J]. 铸造技术, 2024, 45(6): 503-513.
- [6] FAN J, XU X, NIU S, 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(10): 4388-95.
- [7] 陈天赐, 李乔磊, 张辉, 等. 矿化剂对陶瓷型芯性能的影响 [J]. 铸造, 2022, 71(10): 1262-1270.
- [8] 许西庆, 杨永康, 李杰, 等. 空心叶片铸造用陶瓷型芯的3D打印及性能调控研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(6): 1583-1594.
- [9] 江红涛, 杨昕昊, 王秀峰. 黏结剂喷射制备陶瓷型芯抗弯强度、尺寸精度及表面质量影响因素的研究进展 [J]. 机械工程材料, 2024, 48(5): 8-14.
- [10] 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.
- [11] 王守兴, 李伶, 毕鲁南, 等. 大壁厚3D打印 SiO_2 陶瓷快速制备技术研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(6): 1943-1949.
- [12] 刘泳鸿, 玄伟东, 张强, 等. 碳化硼对硅基陶瓷型芯性能的影响研究[J]. 铸造, 2024, 73(4): 532-539.
- [13] LI Q, LIANG J, ZHANG Y, et al. Fused silica ceramic core based on network-structured zircon design via 3D printing [J]. Scripta Materialia, 2022, 208: 114342.
- [14] 牛书鑫, 许西庆, 李鑫, 等. 石英纤维增强硅基陶瓷型芯制备与性能[J]. 中国陶瓷, 2020, 56(9): 31-35.
- [15] 巩妮娜, 柳文淑, 蔡小宁, 等. 工程用水泥基复合材料抗拉及抗弯性能研究与评估[J]. 采矿与安全工程学报, 2024(5): 1-12.
- [16] 孙涛, 梁晋, 钟铃, 等. 一种改进雷达图法用于材料切削加工性综合评价[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(7): 1096-1101.
- [17] FAN J, FAN H, 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] LI X, SU H, DONG D, et al. Enhanced comprehensive properties of stereolithography 3D printed alumina ceramic cores with high

- porosities by a powder gradation design [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, 131: 264–75.
- [19] LI X, LIU Z P, NIU S X, et al. Controlled anisotropy in 3D printing of silica-based ceramic cores through oxidization reaction of aluminum powders [J]. *Ceramics International*, 2023, 49 (15) : 24861–24867.
- [20] QIAN C C, HU K H, LU Z G, et al. Volume shrinkage and conversion rate of Al_2O_3 ceramic stereolithography suspension polymerised by ultraviolet light [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2021, 267: 124661.
- [21] 赵效忠. 陶瓷型芯的制备与使用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [22] LI K W, JIANG W G, WANG S G, et al. Effect of specimen thickness on the creep deformation of a silica-based ceramic core material [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 763: 781–790.

Evaluation on Comprehensive Performance of Ceramic Cores with Controlled Particle Grading

NIU Shu-xin¹, LUO Yu-shi¹, LI Xin¹, YANG Yong-kang², XU Xi-qing²

(1.Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2.School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shanxi, China)

Abstract:

The investment casting of hollow turbine blades relies on the ceramic core to form the complex-shaped inner cavity, which imposes strict requirements on the comprehensive performance of the ceramic core. Fused silica powders with different particle sizes of were employed for particle gradation, the evolution of phase composition and microstructure of the ceramic cores were investigated, and the comprehensive performance was evaluated. Appropriate amounts of fine powder filled the skeleton structure of coarse particles, beneficial to mechanical property remaining a low shrinkage. Excessive fine powders would surround coarse powders and damage the skeleton structure of coarse powder, resulting in a sharp increase in shrinkage rate; the dense structure was not conducive to the leachability of ceramic cores, and excessive grain boundaries would lead to increased creep deformation. Based on the radar chart, the ceramic core with 30% fused silica fine powder showed excellent comprehensive performance, with slurry filling parameters of 498 mm, linear shrinkage of 0.24%, apparent porosity of 32.3%, surface roughness of 1.2 μm , high temperature creep of 0.76 mm, room temperature and high temperature strength of 21.2 MPa and 22.4 MPa, and dissolution rate of 0.65 g/min.

Key words:

ceramic core; particle grading; skeleton structure; radar chart; comprehensive performance
