氧化钙对锆酸钡陶瓷型芯性能的影响

张婷婷，王泽丽，张家琪，孙健新，秦胜建，
秦国强，于　刚，吴红亚，杨治刚
（石家庄铁道大学材料科学与工程学院，超材料与微器件河北省工程研究中心，河北石家庄 050043）

摘要：陶瓷型芯是制备空心涡轮叶片的关键材料，其性能会影响叶片品质和成品率。目前，现有氧化硅和氧化铝陶瓷型芯已不能满足更高温度合金叶片的铸造需求，新体系陶瓷型芯的研究迫在眉睫。本研究制备了锆酸钡基型芯材料，探索了氧化钙含量及烧结温度对锆酸钡-氧化钙复合型芯结构、力学性能和腐蚀脱除性能的影响。结果表明，烧结温度一定时，随着氧化钙含量的增加，型芯烧结失重率也增加，气孔率先增加后降低，体积密度和抗弯强度则先降低后增加。烧结温度对型芯烧结失重率的影响较小，随着烧结温度的升高，气孔率整体呈减小趋势，体积密度和抗弯强度总体呈增大趋势。型芯脱除速率均随烧结温度的升高而降低，添加氧化钙也会降低脱除速率。通过综合分析，氧化钙添加量为10%、烧结温度为1 600 ℃时，锆酸钡-氧化钙复合型陶瓷型芯材料的性能较为优异，其烧结失重率为4.22%，气孔率为12.1%，体积密度为4.72 g/cm^3，抗弯强度可达66.15 MPa。

关键词：陶瓷型芯；锆酸钡；氧化钙；烧结温度；性能调控；型芯脱除；复合陶瓷
中图分类号：TQ174.75；V232.4；TG249.5　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1113-07
DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0142

Effect of Calcium Oxide on Properties of Barium Zirconate Ceramic Core

ZHANG Ting-ting, WANG Ze-li, ZHANG Jia-qi, SUN Jian-xin, QIN Sheng-jian,
QIN Guo-qiang, YU Gang, WU Hong-ya, YANG Zhi-gang
(School of Materials Science and Engineering, Engineering Research Center of Metamaterials and Microdevices, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China)

Abstract: Ceramic core is the key material of preparing hollow turbine blade, and its performance affects the quality and yield of the blade. At present, the existing silica and alumina ceramic cores cannot meet the requirements of casting alloy blades at higher temperatures, it is urgent to develop new system of ceramic cores. In this study, the ceramic cores based on barium zirconate were prepared, and the effects of calcium oxide content and sintering temperature on the structure, mechanical properties and leachability of the barium zirconate-calcium oxide composite cores were explored. The results show that, at a certain sintering temperature, with the increase of calcium oxide content, the core weight loss rate increases, the porosity first increases and then decreases, and the bulk density and the flexural strength first decrease and then increase. Sintering temperature has a relatively minor effect on the mass loss of the core, with the increase of sintering temperature, the porosity decreases, and the bulk density and the flexural strength increase. The core removal rate decreases with the increase of sintering temperature, and the addition of CaO can reduce the removal rate, too. Through comprehensive analysis, when the calcium oxide content is 10% and the sintering temperature is 1 600 ℃, the barium zirconate-calcium oxide composite ceramic core material exhibits relatively excellent properties, with sintering weight loss rate of 4.22%, porosity of 12.1%, bulk density of 4.72 g/cm^3, and the flexural strength can reach 66.15 MPa.
Key words: ceramic core; barium zirconate; calcium oxide; sintering temperature; property regulation; core removal; composite ceramic

基金项目：河北省自然科学基金项目（E2025210108）；石家庄铁道大学基本科研业务费项目（ZQK202501）。
收稿日期：2026–04–09 收到初稿，2026–04–29 收到修订稿。
作者简介：张婷婷（2000–），女，硕士生，主要研究方向为陶瓷型芯材料制备及性能研究。E-mail：15731856371@163.com
通信作者：杨治刚，男，副教授，硕士生导师。E-mail：yangzhigang@stdu.edu.cn
引用格式：张婷婷，王泽丽，张家琪，等 . 氧化钙对锆酸钡陶瓷型芯性能的影响 [J]. 铸造，2026，75（10）：1113–1119.
Zhang Tingting，Wang Zeli，Zhang Jiaqi，et al. Effect of calcium oxide on properties of barium zirconate ceramic core [J]. Foundry，2026，75（10）：1113–1119.

燃气轮机作为航空发动机的核心部件，推重比是评估其性能的重要参数之一[1-2]。提高涡轮燃气温度是增加航空发动机推重比的主要方式。目前高温合金叶片使用温度已接近极限[3]，许多学者开始关注具有高熔点、低密度和优良高温性能的难熔金属硅化物[4]。其中，Nb-Si基超高温合金综合性能优异，使用温度比镍基高温合金高200~300 ℃，是最有潜力的新型超高温材料[5]。考虑到Nb-Si基超高温合金的合金化元素以Ti、Al、Cr和Hf为主[6]，浇注时需避免陶瓷型芯与叶片发生反应。因此，需要寻求一种综合性能良好且浸出率高的陶瓷型芯。为了达到好的冷却效果，使用具有复杂内部空腔的空心叶片也是保障涡轮叶片服役性能的有效方法[7]。由于空心叶片内腔过于窄小且形状复杂，有时甚至无法干燥硬化，而陶瓷型芯适用于形成铸件内腔，近年来被广泛用于空心叶片的铸造。利用陶瓷型芯形成叶片内腔，可以为气冷技术提高涡轮叶片进口温度创造条件。随着涡轮叶片内部空冷结构的升级，陶瓷型芯的结构越来越复杂，这对其综合性能提出了更高的要求[8-9]。

目前，广泛应用的陶瓷型芯主要有SiO_2基陶瓷型芯和Al_2O_3基陶瓷型芯[10]。SiO_2基陶瓷型芯热膨胀系数较小，易于脱除，但在烧结过程中发生的相变易引发裂纹[11-13]，且在浇注过程中易与活泼化学元素反应，导致叶片缺陷[14]。Al_2O_3基陶瓷型芯具有优异的耐高温性能及化学稳定性[15]，能够制造出空心内腔表面品质良好的叶片，但烧结与脱芯难度大制约了其进一步发展[16-17]。锆酸钡（$BaZrO_3$）为立方钙钛矿结构，其熔点高达2 700 ℃，热膨胀系数小，热导率低，在极端热环境下力学性能和结构稳定性好，是一种新型熔炼用耐火材料[18]。张钊等[19]利用$BaZrO_3$坩埚进行钛镍合金真空感应熔炼，发现$BaZrO_3$材料与合金熔体润湿性较差，且未向熔体扩散，表现出高的热稳定性和较强的反应惰性。贺进等[20]以自合成的$BaZrO_3$粉体材料制成坩埚，在真空条件下熔炼TiAl合金，发现$BaZrO_3$对TiAl合金熔体具有良好的化学惰性。因此，本研究选用锆酸钡作为制备陶瓷型芯的材料。

在叶片铸造完成后，通常需要在酸或碱溶液中脱除陶瓷型芯，Nb基合金叶片材料在硝酸溶液中抗腐蚀能力最强[21]，故可以利用稀硝酸对锆酸钡进行腐蚀脱除。Kostov等[22]指出：氧化钙（CaO）对钛熔体呈现高热力学稳定性，并且它也是一种高稳定性耐火材料，这些优异的性能符合作为陶瓷型芯的标准。同时陶瓷型芯要具备良好的溶出性，而氧化钙具有很好的水和作用，因此本研究通过在锆酸钡基体中掺入氧化钙，探究不同氧化钙含量及烧结温度对锆酸钡-氧化钙复合型芯材料性能的影响，以及复合材料在稀硝酸中的腐蚀脱除性，以期获得性能优异的锆酸钡-氧化钙复合陶瓷型芯。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

选用铸造级锆酸钡粉体作为基体材料，其主要化学成分如表1所示。氧化钙规格为AR（分析纯，纯度≥98%），由天津市永大化学试剂有限公司提供。

表1 锆酸钡粉的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of the barium zirconate powder w_B/%

ZrO_2	BaO	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2
> 44	50~55	< 0.1	< 0.2	< 0.05	< 0.05

1.2 试样制备

将粒度为200目与300目的锆酸钡进行1∶1混合，通过加入不同质量分数（0、2.5%、5%、7.5%、10%）的氧化钙，配制得到锆酸钡-氧化钙复合粉料。将复合粉料进行湿法球磨，采用酒精作为球磨介质，粉料、球、酒精的比例为1∶2∶1。设定转速为550 r/min，球磨4 h。球磨完成后将粉料过筛并干燥，干燥后继续过筛。使用电子天平称量6 g干燥粉料，将其倒入研钵，向粉料中滴加1 mL 质量分数10%的PVB（聚乙烯醇缩丁醛）溶液，研磨混合均匀后将粉料倒入模具中压制成形。压片模具长40 mm、宽8 mm，内部材料为铁，外层为不锈钢，加压压力为20 MPa，保压时间为3 min。压制的试样如图1所示。随后对试样进行烧结，从初始温度以2 ℃/min升温至600 ℃，保温30 min；再从600 ℃以5 ℃/min的速率升至最终温度（1 300 ℃、1 400 ℃、1 500 ℃和1 600 ℃），保温2 h。

图1 氧化钙质量分数为10%的型芯试样

Fig. 1 Core samples with calcium oxide mass fraction of 10%

1.3 测试方法

采用阿基米德排水法测定试样气孔率和体积密度，浸液为酒精，计算公式如下：

$$P=\frac{M_2-M_0}{M_2-M_1}\times 100\% \quad (1)$$

式中：P为试样气孔率，%；M_0为试样干燥质量，g；M_1为饱和试样在酒精中的质量，g；M_2为饱和试样在空气中的质量，g。

$$\rho=\frac{M_0}{M_2-M_1}\times\rho_1 \quad (2)$$

式中：ρ为试样的体积密度，g/cm^3；ρ_1为酒精的密度，g/cm^3。

用精密电子天平测量试样烧结前后的质量，烧结失重率计算公式如下：

$$Z=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100\% \quad (3)$$

式中：Z为试样烧结失重率，%；m_1为试样烧结前的质量，g；m_2为试样烧结后的质量，g。

使用SGM-1000型数显工程陶瓷弯曲测试机测量试样的抗弯强度，加载速率为0.5 mm/min，试验机两个支点的跨距为30 mm。抗弯强度计算公式如下：

$$Q=\frac{3FL}{2BH^2} \quad (4)$$

式中：Q为抗弯强度，MPa；F为试样断裂时承受的最大载荷，N；L为跨距，mm；B为试样宽度，mm；H为试样厚度，mm。

将型芯浸入沸腾的10%（质量分数）HNO_3溶液中，每30 min称取一次质量，直至腐蚀完全，型芯的质量损失率计算公式如下：

$$X=\frac{m_1-m_0}{m_1} \quad (5)$$

式中：X为试样质量损失率，%；m_1为试样腐蚀前的质量，g；m_0为试样腐蚀后的质量，g。

采用德国Bruker D8 Advance型X射线衍射仪进行物相分析，测试选用Cu靶，扫描2θ范围为5°~90°，扫描速度为10（°）/min。利用Hitachi SU8010型场发射扫描电子显微镜对弯曲断口进行表征。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

图2为不同氧化钙含量试样的XRD谱图。可以看出，未添加氧化钙的试样中只含有$BaZrO_3$相。添加氧化钙后$BaZrO_3$的衍射峰向大角度方向偏移，并且随着氧化钙的增多，衍射峰的偏移量逐渐增大。

Ca^{2+}半径为0.1 nm，Ba^{2+}半径为0.135 nm，由式（6）可知，10%掺杂量的 CaO明显过量，部分已固溶到 $BaZrO_3$中，CaO与$BaZrO_3$形成有限固溶体[23]。由于Ca^{2+}半径小于Ba^{2+}，固溶导致$BaZrO_3$的晶格常数a减小，进而使晶面间距d减小，根据布拉格方程$2d\sin\theta=n\lambda$可知，θ值随之增大，因此衍射峰向大角度偏移。图2中并未检测到CaO，则是受 XRD检测限制所致[24]。

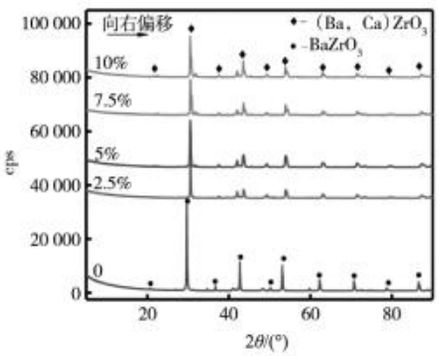


图2 不同氧化钙含量型芯试样的XRD谱图

Fig. 2 XRD patterns of the core samples with different CaO contents

$$\frac{r_{Ba^{2+}}-r_{Ca^{2+}}}{r_{Ba^{2+}}}\times 100\%=25.9\%>10\% \quad (6)$$

2.2 烧结失重率分析

图3为不同氧化钙含量试样在不同烧结温度下的烧结失重率。氧化钙含量一定时，随烧结温度变化，试样烧结失重率无明显变化。在同一烧结温度下，随着氧化钙含量的增加，试样失重率略有增加。这是由于氧化钙和锆酸钡之间发生化学反应，生成了（Ba，Ca）ZrO_3固溶体。同时，原料氧化钙会吸附空气中的水和CO_2，即使压制成形后，也会存在这种吸附现象。氧化钙的添加量越多，吸附的水和CO_2越多，烧结失重率也越大。烧结温度为1 300 ℃时，随着氧化钙添加量从0增至10%，试样烧结失重率从1.3%升高到4.0%；烧结温度为1 600 ℃时，随着氧化钙添加量从0增至10%，试样烧结失重率从1.52%升高到4.22%。

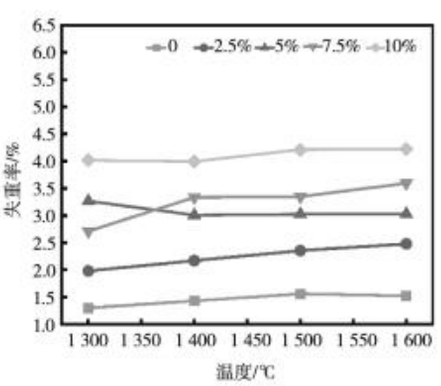


图3 不同氧化钙含量型芯试样在不同烧结温度下的烧结失重率

Fig. 3 Sintering weight loss rates of the core samples with different CaO contents sintered at different temperatures

2.3 气孔率和体积密度分析

图4为不同氧化钙含量陶瓷型芯在不同烧结温度下的气孔率。可以看出，在同一烧结温度下，随着氧化钙含量从0增加到5%，试样气孔率不断增加；氧化钙含量为0~5%时，随着烧结温度升高，试样气孔率变化幅度很小。氧化钙含量为7.5%时，随着温度从1 300 ℃上升至1 400 ℃，试样气孔率变化不大，在40%左右，温度继续升高到1 600 ℃，试样气孔率降至28%。氧化钙含量为10%时，随着烧结温度从1 300 ℃升高到1 600 ℃，气孔率从43.92%大幅降至12.10%。

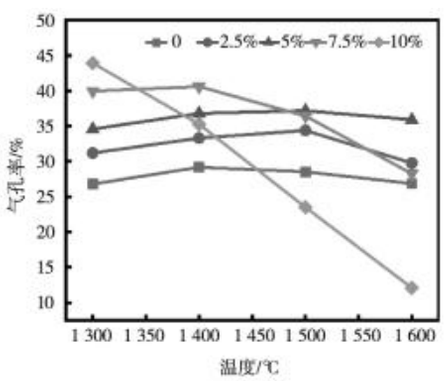


图4 不同氧化钙含量型芯试样在不同烧结温度下的气孔率

Fig. 4 Porosity of the core samples with different CaO contents sintered at different temperatures

图5为不同氧化钙含量试样在不同烧结温度下的体积密度。随烧结温度的升高，氧化钙含量为0、2.5%的试样，体积密度先增大后降低；氧化钙含量为5%和7.5%的试样，体积密度先降低后增加再降低；氧化钙含量为10%的试样，体积密度先增加后降低再增加，从3.4 g/cm^{3}增加到4.72 g/cm^3。总体来看，随着烧结温度从1 300 ℃升高到1 500 ℃，试样体积密度整体呈现增加的趋势。随烧结温度升高，原子扩散能量增强，烧结颈的形成和长大速度越快，颗粒间的结合面越多，

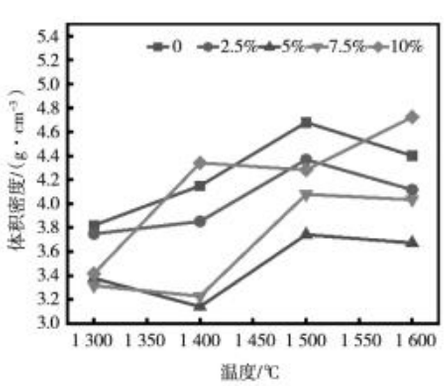


图5 不同氧化钙含量型芯试样在不同烧结温度下的体积密度

Fig. 5 Bulk density of the core samples with different CaO contents sintered at different temperatures

故而气孔减少，体积密度增加。

2.4 抗弯强度分析

图6为不同氧化钙含量陶瓷型芯在不同烧结温度下的抗弯强度。随烧结温度升高，氧化钙含量为0、7.5%和10%的试样抗弯强度增加，含2.5%和5%氧化钙的试样抗弯强度先降低后增加；烧结温度高于1 400 ℃时，各组试样的抗弯强度均随烧结温度的升高而增加。烧结温度为1 300 ℃时，由于试样烧结不充分，颗粒间结合力弱，致密度低，抗弯强度较低。随着温度升高，试样烧结程度加深，致密度增加，抗弯强度也不断增加。1 600 ℃时，不含氧化钙的试样抗弯强度高达72.36 MPa，氧化钙含量为10%的试样抗弯强度为66.15 MPa。

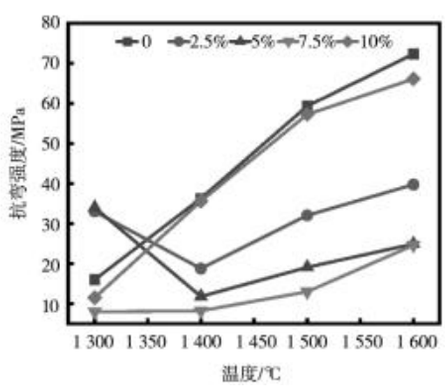


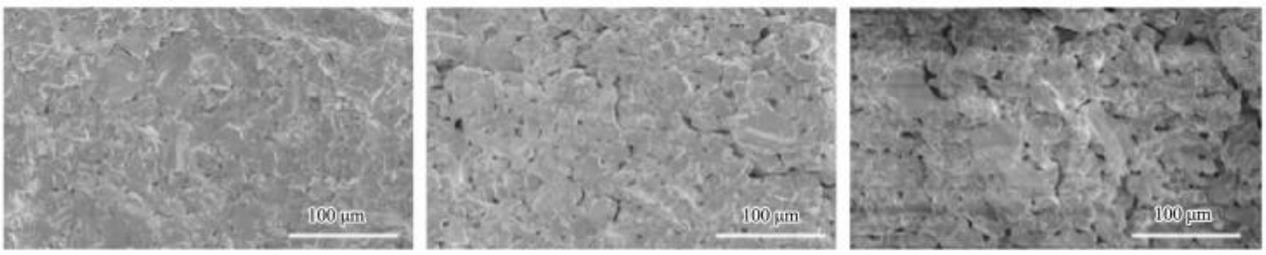
图6 不同氧化钙含量型芯试样在不同烧结温度下的抗弯强度

Fig. 6 Flexural strength of the core samples with different CaO contents sintered at different temperatures

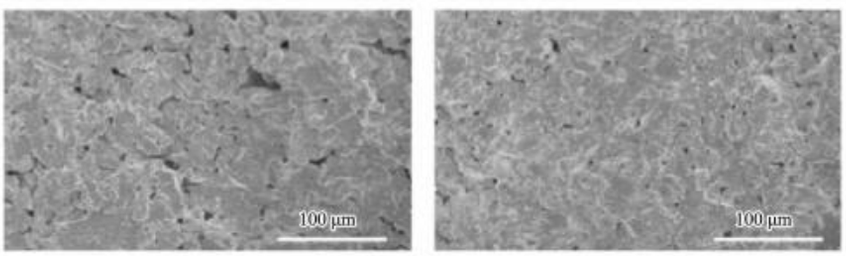
2.5 断口分析

图7为烧结温度1 600 ℃下不同氧化钙含量试样的断口形貌。可以看出，未添加氧化钙时，大部分颗粒熔融在一起，无明显晶界，断裂方式以穿晶断裂为主。当氧化钙添加量为2.5%时，大颗粒之间出现了一些小颗粒，晶界明显。随着氧化钙添加量继续增加，晶粒尺寸有所减小，形状变得极不规则，结构疏松多孔，此时断裂方式以沿晶断裂为主。当氧化钙添加量为10%时，氧化钙颗粒间形成相对紧密的连接，结构又变得致密。这也是抗弯强度和体积密度降低后又升高的原因。

图8为不同烧结温度下氧化钙添加量10%试样的断口形貌。可以看出，断口显微结构以粗颗粒为骨架，细颗粒填充在粗颗粒之间的孔隙中。1 300 ℃烧结温度下，颗粒间的连接区域中孔隙较多，结构疏松。随着烧结温度升高，颗粒之间形成烧结颈，连接区域变得致密，孔隙数量和尺寸减小，组织更加致密。



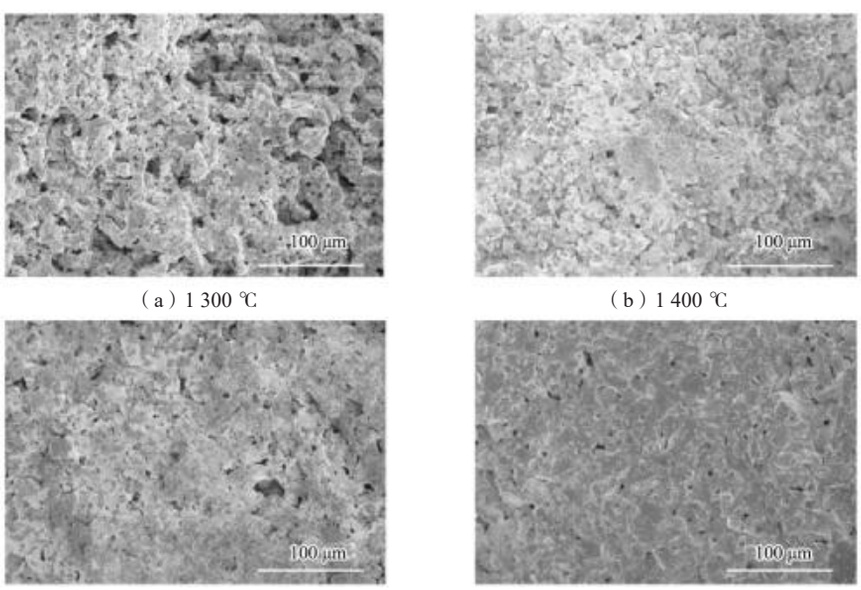
（a）0　（b）2.5%　（c）5%



（d）7.5%　（e）10%

图7　不同氧化钙含量型芯试样的断口形貌

Fig. 7 Fracture morphologies of the core samples with different CaO contents



（a）1 300 ℃　（b）1 400 ℃

（c）1 500 ℃　（d）1 600 ℃

图8　不同烧结温度下型芯试样的断口形貌

Fig. 8 Fracture morphologies of the core samples sintered at different temperatures

2.6　腐蚀脱除性能分析

图9为不同烧结温度下，氧化钙添加量10%的试样在沸腾HNO_3溶液中浸泡不同时间后的质量损失情况。可以看出，型芯腐蚀脱除速率随烧结温度的提高而降低，这主要是因为烧结温度越高，试样结构越致密，腐蚀越困难。

图10为烧结温度1 600 ℃下，不同氧化钙含量试样在沸腾HNO_3溶液中浸泡不同时间后的质量损失情况。可以看出，当氧化钙添加量为2.5%时，型芯腐蚀脱除速率最低，这可能是因为相比锆酸钡，氧化钙更难以与稀硝酸发生反应。当氧化钙添加量为5%时，试样内部疏松多孔，溶液与锆酸钡反应面积增加，腐蚀速率提高。当氧化钙添加量增加为10%，试样结构又变得致密，腐蚀脱除速率下降。图11为含氧化钙试样在HNO_3溶液中腐蚀产物的XRD谱图，可以看到腐蚀产物中存在$Ba(NO_3)_2$相，该相是$BaZrO_3$与HNO_3发生化学反应生成的。

3　结论

为获得性能优异的锆酸钡-氧化钙复合型陶瓷型

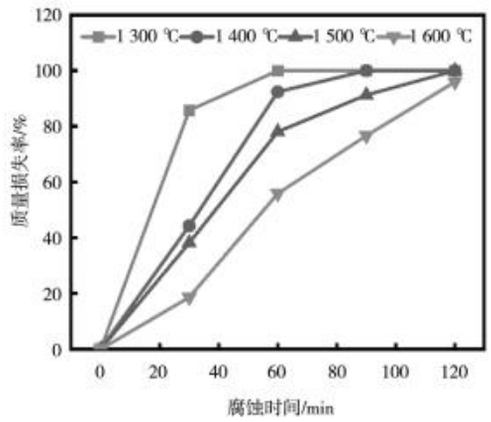


图9　不同烧结温度下试样在沸腾HNO_3溶液中腐蚀不同时间的质量损失率

Fig. 9 Mass loss rates of the samples sintered at different temperatures after corrosion in the boiling HNO_3 solution for different times

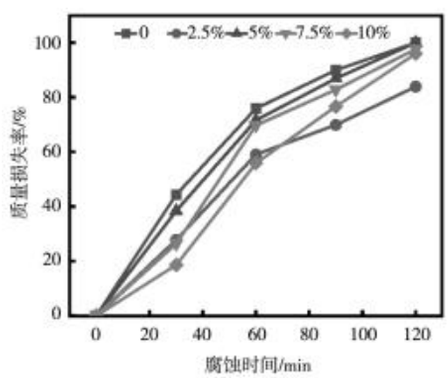


图10　不同氧化钙含量试样在沸腾HNO_3溶液中腐蚀不同时间的质量损失率

Fig. 10 Mass loss rates of the samples with different CaO contents after corrosion in the boiling HNO_3 solution for different times

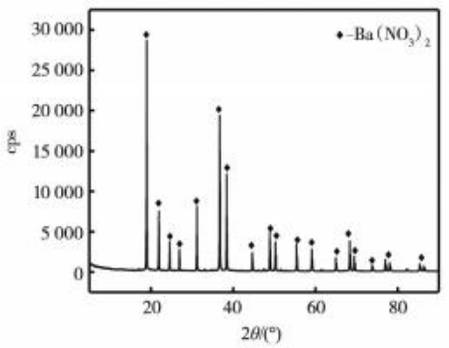


图11　试样腐蚀产物的XRD谱图

Fig. 11 XRD pattern of corrosion product of the samples

芯，研究了不同氧化钙含量和烧结温度对复合陶瓷型芯的烧结失重率、抗弯强度、体积密度、气孔率以及微观结构的影响；选用稀硝酸作为腐蚀溶液，研究了复合陶瓷型芯的腐蚀脱除情况。主要结论如下：

（1）烧结温度一定时，随着氧化钙含量的增加，陶瓷型芯烧结失重率增加，气孔率先增加后降低，体积密度和抗弯强度先降低后增加。

（2）烧结温度对型芯的烧结失重率影响较小，随着烧结温度的升高，试样气孔率整体呈减小趋势，体积密度逐渐增大，抗弯强度总体也呈增大趋势。

（3）型芯的腐蚀速率均随烧结温度的提高而降低，添加氧化钙会降低其腐蚀速率。

（4）氧化钙添加量为10%、烧结温度为1 600 ℃时，可获得性能较为优异的锆酸钡-氧化钙复合陶瓷型芯，其烧结失重率为4.22%，气孔率为12.1%，体积密度为4.72 g/cm^3，抗弯强度可达66.15 MPa。

参考文献：

[1] Niu Shuxin，Li Shiyuan，Li Xin，et al. Silica-based ceramic cores with collaborative optimization on shrinkage and mechanical property through in-situ mullite whiskers [J]. Ceramics International，2025，51（23）：40708–40713.

[2] 梁启如，吴玉胜，刘孝福，等. 航空发动机涡轮叶片铸造用陶瓷型芯研究进展 [J]. 铸造，2018，67（9）：790–793.

[3] 傅恒志. 未来航空发动机材料面临的挑战与发展趋向 [J]. 航空材料学报，1998（4）：54–63.

[4] 马勤，阎秉钧，康沫狂，等. 金属硅化物的应用与发展 [J]. 稀有金属材料与工程，1999，28（1）：11–14.

[5] Bewlay B P，Jackson M R，Subramanian J P R. A review of very-high-temperature Nb silicide-based composites [J]. Metallurgical & Materials Transactions A，2003，34（10）：2043–2052.

[6] 高丽梅，郭喜平. 超高温铌硅化物基自生复合材料的成分设计及性能特点 [J]. 材料导报，2005（7）：72–75.

[7] Kanyo J E，Schaffoner S，Uwanyuze R S，et al. An overview of ceramic molds for investment casting of nickel superalloys [J]. Journal of the European Ceramic Society，2020，40（15）：4955–4973.

[8] Xu Xiqing，Niu Shuxin，Wang Xingang，et al. Fabrication and casting simulation of composite ceramic cores with silica nanopowders [J]. Ceramics International，2019，45（15）：19283–19288.

[9] Zhang Yuzhen，Duan Wenyan，Gu Yue，et al. Manufacturing process of water-soluble salt-based ceramic cores based on vat photopolymerization [J]. Journal of Advanced Ceramics，2024，13（5）：652–665.

[10] Yang Kun，Li Qiaolei，Chen Tianci，et al. High-performance 3D-printed Al_2O_3 cores for low-temperature sintering [J]. Ceramics International，2023，49（22）：36894–36906.

[11] Zhou Xu，Xuan Weidong，Chen Dingming，et al. Preparation and properties of composition regulated ternary SiO_2-Al_2O_3-ZrO_2 ceramic cores [J]. Ceramics International，2026，52（3）：3989–3999.

[12] Li Kaiwen，Jiang Weiguo，Wang Shaogang，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.

[13] Liu Yi，Li Bingsheng，Shu Xiaoyan，et al. Low-sintering-

temperature borosilicate glass to immobilize silver-coated silica-gel with different iodine loadings [J]. Journal of Hazardous Materials，2021，403：123588.

[14] Xuan Weidong，Du Lufa，Song Ge，et al. Some new observations on interface reaction between nickel-based single crystal superalloy CMSX-4 and silicon oxide ceramic core [J]. Corrosion Science，2020，177：108969.

[15] 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.

[16] Liu Xiaofu，Guo Xinli，Shui Guoyan，et al. Properties of alumina-based ceramic cores [J]. China Foundry，2021，18（6）：593–598.

[17] 张强，丁方政，玄伟东，等. 矿化剂对陶瓷型芯组织和性能调控研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金，2025，45（2）：179–186.

[18] 王丽丽，李嘉荣，唐定中. 矿化剂氧化铝的形貌对二氧化硅基陶瓷型芯性能的影响 [J]. 航空材料学报，2015，35（1）：8–12.

[19] 张钊，朱凯亮，刘岚洁，等. $BaZrO_3$坩埚的制备及与钛合金熔体的界面反应 [J]. 硅酸盐学报，2013，41（9）：1278–1283.

[20] 贺进，魏超，李明阳，等. $BaZrO_3$耐火材料与TiAl合金熔体的界面反应 [J]. 中国有色金属学报，2015，25（6）：1505–1511.

[21] Graham R A，Sutherlin R C，Chang W. Niobium and niobium alloys in corrosive applications [C]// Niobium：Science & Technology. Florida：TMS，2001：337–355.

[22] Kostov A，Friedrich B. Predicting thermodynamic stability of crucible oxides in molten titanium and titanium alloys [J]. Computational Materials Science，2006，38（2）：374–385.

[23] Ma J，Lim L C. Effect of particle size distribution on sintering of agglomerate-free submicron alumina powder compacts [J]. Journal of the European Ceramic Society，2002，22（13）：2197–2208.

[24] Zevin L，Kimmel G. Quantitative X-ray diffractometry [M]. New York：Springer，1995：10–20.

（编辑：王杰，wj@foundryworld.com）