

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2024.01.008

## 稀土氧化镨对氧化镁陶瓷性能的影响

狄玉丽, 何霞, 邹阳雪, 王城, 黄海燕\*

(西昌学院理学院, 四川 西昌 615013)

**摘要:**为探究添加不同质量分数的稀土氧化镨( $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ )对氧化镁( $\text{MgO}$ )陶瓷材料烧结、硬度及抗热震性能的影响,采用 $\text{MgO}$ 粉末为原料, $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ 作为添加剂,聚乙烯醇(PVA)为黏结剂,干压成型后常压烧结制得氧化镁陶瓷材料;其成型烧结温度为 $1580^\circ\text{C}$ 并保温3h,然后检测 $\text{MgO}$ 陶瓷的物相、烧结性能、硬度、表面形貌及抗热震性能。结果表明: $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ 对 $\text{MgO}$ 陶瓷材料的烧结性能(密度和收缩率)有一定增强效果但增幅不大,而对 $\text{MgO}$ 的硬度和抗热震性增强效果显著;当稀土 $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ 的添加量为8%时, $\text{MgO}$ 陶瓷的洛氏硬度和抗热震次数最高,分别为60.1 HRA和17次。

**关键词:**氧化镁陶瓷;稀土氧化物;氧化镨;烧结性能;抗热震性能

中图分类号:TQ174.758.11 文献标志码:A 文章编号:1673-1891(2024)01-0056-09

## Effects of Praseodymium Oxide on Properties of Magnesia Ceramics

DI Yuli, HE Xia, ZOU Yangxue, WANG Cheng, HUANG Haiyan\*

(School of Science, Xichang University, Xichang 615013, Sichuan, China)

**Abstract:** Magnesia ceramics is made from magnesium oxide ( $\text{MgO}$ ) powder as raw material, rare earth praseodymium oxide ( $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ ) as additive, and polyvinyl alcohol (PVA) as binding agent, through dry-pressing molding and pressureless sintering methods. We investigated the crystal phase, sintering properties, hardness, morphology and thermal shock resistance properties of  $\text{MgO}$  ceramics, which was made at the sintering temperature of  $1580^\circ\text{C}$  for 3 h. The  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  was added for investigation into the effect of different contents of RE oxides on sintering, hardness, and thermal shock resistance of  $\text{MgO}$  ceramics. The results showed that the  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  had certain enhancement effect on the sintering properties (density and shrinkage ratio) of  $\text{MgO}$  ceramics but not very much; however, the hardness and thermal shock resistance of  $\text{MgO}$  were significantly enhanced, and when the added  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  content was 8%,  $\text{MgO}$  ceramics enjoys the optimal hardness and thermal shock resistance properties, which were 60.1 HRA and 17 times, respectively.

**Keywords:** magnesia ceramics; rare earth oxide; praseodymium oxide; sintering properties; thermal shock resistance

### 0 引言

氧化镁( $\text{MgO}$ )陶瓷因具有高硬度、高熔点

( $2800^\circ\text{C}$ )、较好的传导性、机械强度、耐高温性、化学性质稳定等优点,可用作冶炼金属用的坩埚、热电偶套管、防辐射窗口材料等。但其热膨胀系数较

收稿日期:2023-10-27

基金项目:四川省粉末冶金工程技术研究中心开放基金课题项目(SC-FMYJ2021-12);西昌学院博士科研启动项目(YBZ202143);凉山州科技局项目(22ZDYF0190、21ZDYF0202)。

作者简介:狄玉丽(1986—),女(彝族),四川雷波人,讲师,博士研究生,研究方向:多孔金属材料、稀土材料,e-mail:330477938@qq.com。

\*通信作者:黄海燕(1982—),女,四川西昌人,副教授,硕士,研究方向:化学、天然产物,e-mail:34362380@qq.com。

大( $14 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $0 \sim 1500^\circ\text{C}$ ), 烧结性能差, 导致抗热震性能较差, 极大地限制了 MgO 陶瓷坩埚的使用<sup>[1-2]</sup>。稀土氧化物因具有较高的熔点、沸点、稳定性和高温挥发性弱而被广泛作为添加剂应用于陶瓷材料中。早在 20 世纪 90 年代, 就有研究者将稀土氧化物作为添加剂掺杂至钛酸钡基陶瓷中, 发现稀土氧化物可改善陶瓷材料的介电特性, 使陶瓷介电常数增加, 介电损耗明显减少, 热稳定性得到提高<sup>[3]</sup>。近 10 年来, 较多研究者将稀土氧化物加入氧化铝<sup>[4-8]</sup>、氮化硅<sup>[9-12]</sup>、氧化锆<sup>[13-15]</sup>、电子陶瓷<sup>[16-19]</sup>、陶瓷涂层<sup>[20-22]</sup>中研究稀土的作用机理。稀土氧化物的加入可降低陶瓷的烧结温度并改善陶瓷的形貌和显微结构, 主要通过细晶强化、净化晶面、固溶强化、弥散强化等作用改善陶瓷材料的综合性能<sup>[23-27]</sup>。

为了提高 MgO 陶瓷材料的抗热震性能, 许多学者做了相关研究。张骋等<sup>[28]</sup>以 CaO、混合稀土氧化物、ZrO<sub>2</sub> 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO 为添加剂研究了 MgO 陶瓷的抗热震性, 得出添加稀土氧化物并在 1640 °C 烧结制得的 MgO 陶瓷具有较好抗热震性。薛宗伟等<sup>[29-30]</sup>将 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 ZrO<sub>2</sub>+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 作为添加剂成功制备出氧化镁陶瓷, 而加入稀土或复合稀土的氧化镁陶瓷抗热震性能得到显著提高, 其中当 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加量为 2%, 1450 °C 烧结制得氧化镁陶瓷抗热震次数为 11 次。于恣等<sup>[31]</sup>将 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加至氧化镁, 当添加量为 1%、1640 °C 烧结所得氧化镁相对密度为 99.72%; 而当添加量为 2%, 1560 °C 烧结所得氧化镁热震后(2 次 1100 °C 水冷热循环)的残余耐压强度为 58 MPa。Jin 等<sup>[32]</sup>以不同粒径的氧化镁粉末为原料, 以 CeO<sub>2</sub> 为添加剂, 在常压、1600 °C 温度烧结 2 h, 成功制备了氧化镁陶瓷材料, 结果表明, CeO<sub>2</sub> 明显促进了氧化镁的烧结致密化, 密度值高达 3.48 g/cm<sup>3</sup>, 而孔隙率只有 0.35%。目前将稀土氧化物作为添加剂加入 MgO 陶瓷材料中较多为 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CeO<sub>2</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等稀土氧化物<sup>[1,30,33-34]</sup>, 而对其他稀土氧化物的研究则相对较少。但文献调研发现, Cao 等<sup>[35]</sup>将 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 添加至采用

常规固态烧结工艺制备的 ZnO 基变电阻材料, 此外还添加了 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Co<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 发现只有掺杂 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 才能在氧化锌晶界形成双肖特基势垒, 从而增强材料的微观结构和电学性能。Tamizh 等<sup>[36]</sup>采用溶胶-凝胶法合成了 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>-MgO 纳米复合材料, 材料呈薄片状和片状, 对于镨浓度较高的样品, 介电常数和交流电导率均较高。Inoue 等<sup>[37]</sup>在空气中烧结制备了掺杂氧化镨(摩尔百分比为 0.5% 和 0.1%)的低密度氧化锌陶瓷, 发现 Pr 在 +3~+3.87 价与 ZnO 材料晶界附近增强锌空位受体密切相关的缺陷复合物交换从而有利于提高热电功率。综上, 稀土氧化镨作为添加剂加入时可提高基体材料的微观结构和电学性能, 若将其作为添加剂加至 MgO 陶瓷材料中, 如能增强 MgO 陶瓷的微观结构, 则可能会增强其抗震性能和烧结性能。因此, 本文通过常压烧结法制备氧化镁陶瓷, 并且添加轻稀土氧化镨(Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>), 探究其对 MgO 陶瓷的烧结、硬度及抗热震性能的影响及其增强机理, 并为陶瓷材料抗热震性能研究领域提供氧化镨增强效果的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试样的制备

本文采用轻质 MgO 粉末( $\omega \geq 98.5\%$ , 微米级)为主要原料, 聚乙烯醇(PVA,  $\omega \geq 98.0\%$ )为黏结剂(固定添加量为 1%), 使用压片机干压成型后在 1580 °C 温度下保温烧结 3 h 制得 MgO 陶瓷材料。选择如表 1 中不同添加量的稀土氧化镨(Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>,  $\omega \geq 99.9\%$ )作为添加剂加入原料中制备氧化镁, 并且探究其对 MgO 的性能影响。本试验工艺流程包括混料、压制、烧结、检测 4 大步骤, 如图 1 所示。详细步骤如下: 根据表 1 所示称取各种配比质量的原料放入球磨机(XQM-变频行星式)中混合均匀, 设置球磨转速 200 r/min, 混合 30 min。然后将混合均匀的粉末在压片机(YP-30T 型)下压制成型, 成型压制压强为 242 MPa, 保压时间 3 min。压制出

2 种尺寸试样:  $\Phi 20$  mm 试样主要用于检测密度、体积收缩率、硬度和抗热震性能等;  $\Phi 5$  mm 试样主要用于检测表面形貌观察(扫描电镜 SEM 检测)及能谱分析(能谱分析仪 EDS 检测)。压制成坯后试样放置于马弗炉中进行烧结成型,使用烧结曲线

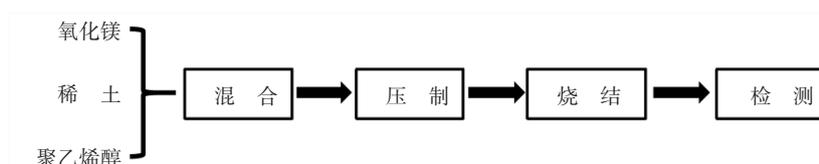


图 1 工艺流程图

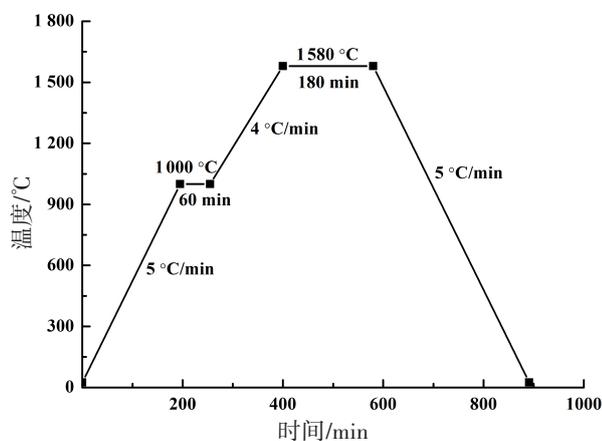


图 2 温度曲线图

## 1.2 性能检测及表征

采用激光粒度分布测量仪(GSL-101BI 型)对 MgO 和 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 进行粒度检测;使用游标卡对 MgO 坯样烧结前后试样进行直径和高度检测,每个尺寸在 3 个不同位置检测后平均使用,根据直径和高度计算试样体积,以此计算体积收缩率的前后变化;使用阿基米德原理来检测 MgO 的密度;使用洛氏硬度计(HR-150A 型)来测试试样的洛氏硬度值,每个硬度值为 5 次检测数值的平均值;根据 GB/T 3298—008《日用陶瓷器抗热震性能测定方法》<sup>[38]</sup>来测试 MgO 陶瓷的抗热震次数(抗热温度为 600 °C);使用 X 射线衍射仪(DX-2700 型)对试样进行物相检测后使用 Jade5.0 软件来进行相应的分析;使用场发射扫描电镜(FEI Inspect F50)观察 MgO 表面微观形貌及烧结情况。

如图 2 所示。

表 1 稀土添加量及试样编号

$\omega(\text{Pr}_6\text{O}_{11})/\%$	0	0.5	1	2	4	8	10
试样编号	P0	P005	P01	P02	P04	P08	P10

## 2 结果与分析

### 2.1 原料粒度检测结果

MgO 及稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的激光粒度检测结果如图 3 所示。如图 3 可知, MgO 粉末粒径尺寸范围为 0.2~2  $\mu\text{m}$ , 其中有 70.78% 的颗粒粒径为 0.5~1.0  $\mu\text{m}$ ; 另外稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 粉末粒径的尺寸范围为 0.5~20  $\mu\text{m}$ , 近 93% 的颗粒粒径分布范围为 2~15  $\mu\text{m}$ 。MgO 及稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 材料粒径都处于微米级范围, 通过加入微米级稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 考察其对氧化镁的性能影响。

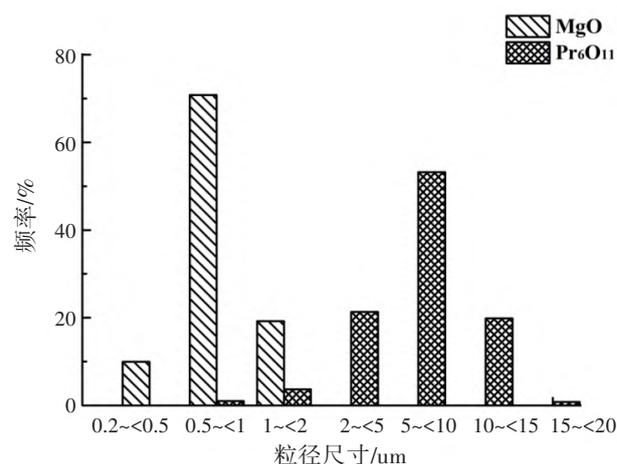


图 3 实验原料粒度分析结果

### 2.2 稀土对氧化镁陶瓷性能的影响

前期试验已确定 MgO 的最佳压制及烧结工艺为: 压制压强 242 MPa 并保压 3 min, 烧结温度 1 580 °C 并保温 3 h。在此工艺基础上, 选择稀土氧化物 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 加入原料中, 添加量分别为 0.5%、1%、

2%、4%、8% 和 10%, 并探究其对氧化镁陶瓷的性能影响。

### 2.2.1 氧化锆对氧化镁烧结性能的影响

检测 MgO 的相对密度及体积收缩率来探究 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 对 MgO 的烧结性能影响。由图 4 可知, 加入稀土后的 MgO 的体积收缩率较空白组相差并不是很大, 均在 44 % 左右。随着稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 质量分数的增加, MgO 的体积收缩率呈现先增后降的趋势, 并在

Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 质量分数为 2% 时, 体积收缩率最大 (46.21%), 较空白组增加 2.33%。而稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的加入对氧化镁的相对密度的影响趋势与其对氧化镁的体积收缩率的影响趋势一致, 呈现先增后减的趋势, 相对密度为 93.07%~95.27%, 同样在 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 添加量为 2% 时, 相对密度有最高值 (95.27%), 较空白组增加 1.02%。总体而言, 稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 对 MgO 的密度和体积收缩率的影响不是太大。

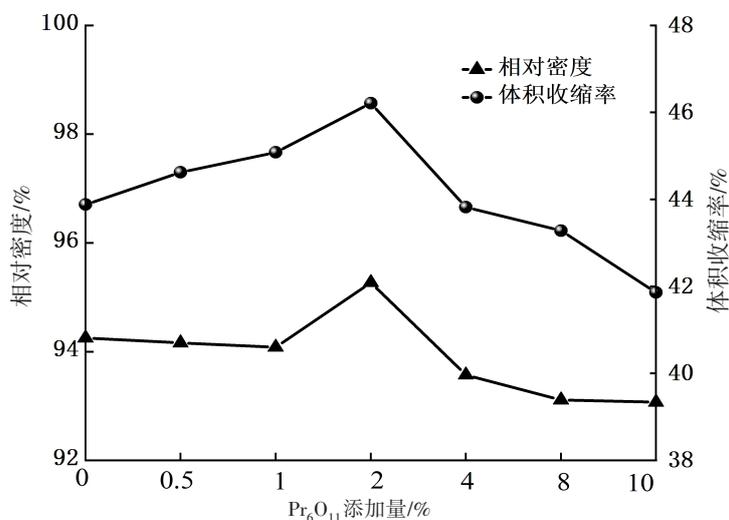


图 4 氧化锆对氧化镁的体积收缩率和相对密度的影响

### 2.2.2 氧化锆对氧化镁的硬度及抗热震性能影响

由图 5 可知, 随着 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 添加量的增加, MgO 的硬度值呈现先增后减又增加的趋势, 而其抗热震次数则呈现先增后减的趋势。可以看出微量稀土的加入在一定程度上提高了 MgO 的硬度值但其硬度值增加量较小, 只有达到一定量的添加量 ( $\omega \geq 4\%$ ) 才能大幅度提高氧化镁的硬度值。而随着稀土氧化物添加量的增加 MgO 陶瓷的抗热震次数得到明显提高且增幅显著 (>120% 以上)。此外, 稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的加入普遍增强了 MgO 的硬度值和抗热震性能, 其中当抗热震次数为最高值 17 次时, Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的添加量分别为 4% 和 8%。当 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的添加量为 4% 时 MgO 的硬度值为 43.7 HRA, 只较空白组增加 0.4 HRA。当 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的添加量为 8% 时 MgO 的硬度值为 60.1 HRA, 较空白组增加 16.8 HRA, 明显增强效果更好。综合来看, Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的最佳添加量为 8%, 此时

MgO 的硬度值和抗热震次数都最好。稀土氧化物的适量加入可细化晶粒从而增加陶瓷材料的致密性同时大量减少隐裂纹, 使其在热震中能有效阻止裂纹的扩展<sup>[39]</sup>, 从而达到提高陶瓷材料抗热震性能的作用。而当稀土氧化物过量加入时, 会促进陶瓷材料晶粒长大并与 MgO 陶瓷生成中间相, 其存在会导致降低陶瓷材料的抗热震性能<sup>[7]</sup>。

### 2.2.3 氧化锆对氧化镁表面形貌的影响

为了观察不同稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 添加量对 MgO 的表面形貌影响, 对少量 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 添加量 ( $\omega=0.5\%$ )、过量 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 添加量 ( $\omega=10\%$ )、最佳 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 添加量 ( $\omega=8\%$ ) 和空白 MgO 试样进行了 SEM 检测, 结果如图 6 所示。对比图 6 中的 SEM 图可知, 空白试样与加入稀土的 MgO 的烧结情况都较良好, 明显看出 MgO 微观表面形貌致密且无孔隙存在, 其区别在于晶粒的大小与结晶情况有所差异。

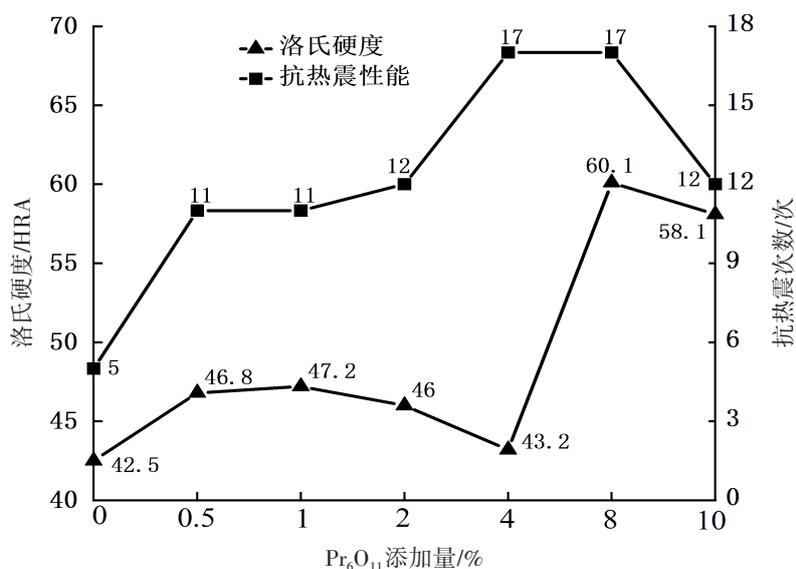


图 5 稀土对氧化镁抗热震及硬度的影响

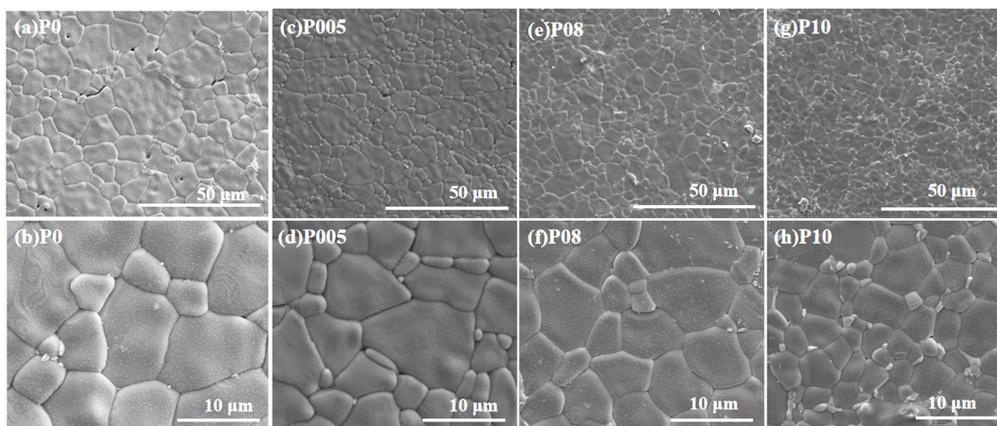


图 6 空白组及添加氧化锆的氧化镁 SEM 图片

当稀土加入量较少时(图 6(c)、6(d)), MgO 的晶粒明显较空白组的多许多,明显看到小晶粒界于大晶粒的晶界处。随着稀土氧化锆含量的增加,可看出 MgO 的晶粒得到了明显的细化,而稀土添加过量时( $\omega=10\%$ )可看出 MgO 的晶粒明显较氧化锆添加量  $\omega$  为 8% 的大许多,但晶粒还是较空白组要小些。为了对比 MgO 陶瓷的晶粒分布情况,使用 Nano Measurer 软件对低倍 SEM 图进行了相应的晶粒粒径分析,结果如表 2、图 7 所示。由表 2 可看出,加入稀土后同样倍数下的 SEM 图片晶粒粒径数明显成倍增加,且随着稀土的增加 MgO 晶粒较空白试样变小,P0、P005、P08 和 P10 的晶粒平均粒径分别为 8.75、5.81、3.36 和 4.77  $\mu\text{m}$ 。且图 7 中明显可看出

随着稀土的添加,晶粒粒径的分布尺寸范围较空白组变小,且当稀土氧化锆添加量  $\omega$  为 8% 时平均粒径最小且 77.84% 数量的晶粒分布在 1.1~4.4  $\mu\text{m}$  范围之内,而此时 MgO 的抗热震性能也最优异,表明  $\omega$  等于 8% 时为氧化锆的最佳添加量。而稀土添加量过多( $\omega>10\%$ )后 MgO 的晶粒随之增大,此时的 MgO 陶瓷表现出抗热震性能和硬度值降低的现象,但整体而言还是较空白组和 P05 的晶粒要小,从而其硬度值和抗热震性能也相对较好。综合以上可知稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的添加主要起到了细化 MgO 陶瓷晶粒的作用,且其性能随着稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 添加量的不同而随之变化。为了检测稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的分布情况,对其进行 EDS 检测分析(图 8),由图 8 可以看出,当 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 添

加量为 1% 时的试样检测出锆元素分布在试样表面且分布情况较均匀,表明氧化锆已成功加入 MgO 陶瓷中且分布较为分散均匀。

表 2 氧化镁陶瓷晶粒分布情况

试样编号	晶粒数	最大晶粒粒径/ $\mu\text{m}$	最小晶粒粒径/ $\mu\text{m}$	平均粒径/ $\mu\text{m}$
P0	110	22.81	2.70	8.75
P005	220	18.59	1.17	5.81
P08	564	10.56	0.82	3.36
P10	346	15.96	1.41	4.77

### 2.2.4 稀土氧化锆对氧化镁物相的影响

使用 DX-2700 型 X 射线衍射仪检测 MgO 的物相,实验条件为:Cu K $\alpha$ 1 靶,步进扫描进行检测,步长设置为 0.02°,角度范围为 20°~90°,工作电压 40

kV,工作电流 30 mA。加入稀土氧化锆后检测物相并与空白组进行结果对比,并分析比较不同稀土氧化锆含量对 MgO 陶瓷的烧结及物相影响,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,P005 和 P01 MgO 陶瓷试样无法检测出稀土若加入稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的特征峰,而当其添加量多于 2% 后能检测出稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 的特征峰,但此时的特征峰通过 Jade5.0 软件分析可知并不是 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 而是 Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相,后者+3 价的 Pr 较前者的+4 价相比较更稳定而存在。空白试样的方镁石特征峰非常明显且尖锐,随着稀土 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub> 添加量的增多,方镁石特征峰的尖锐程度在降低,非方镁石相在逐渐增多。由于稀土氧化物与氧化镁会形成间隙型固溶体<sup>[31]</sup>使得方镁石相衍射峰逐渐降低,因此表明加入的 Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>

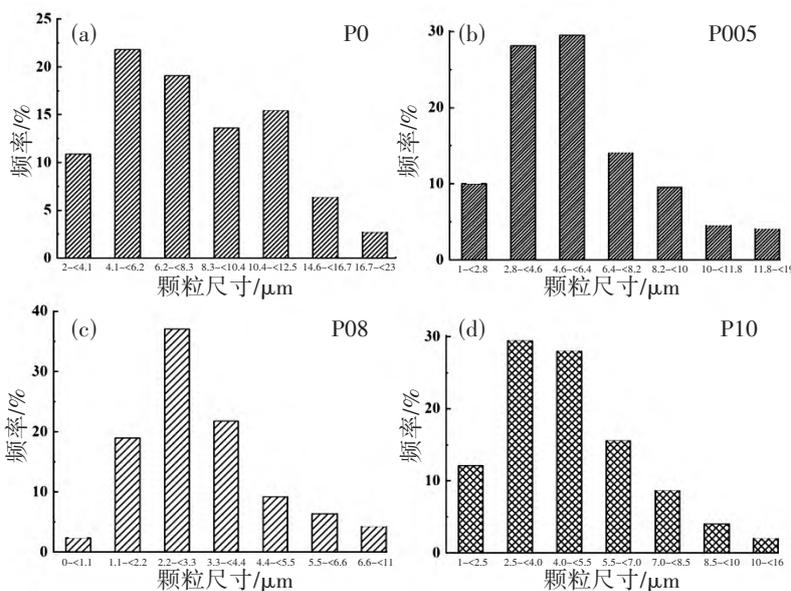


图 7 氧化镁晶粒分布尺寸范围

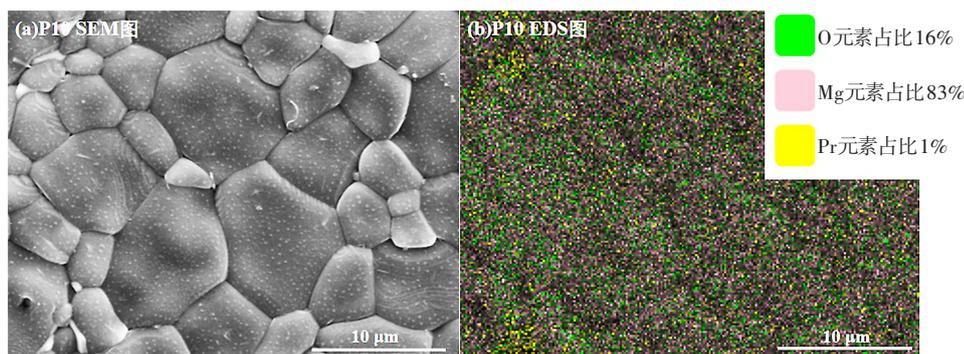


图 8 氧化锆加入量为 10% 时氧化镁的能谱面扫分析图

相在高温下形成  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  相并与氧化镁形成了固溶体从而降低的  $\text{MgO}$  的特征峰。根据结果可知,当  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  添加量达到一定量时,即在 4%~8% 范围时,  $\text{MgO}$  的抗热震性能也最好。但结合  $\text{MgO}$  的其他性能,选择添加量 8% 为最佳提高  $\text{MgO}$  抗热震性能的  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  添加量。

### 3 结论

1) 在  $\text{MgO}$  陶瓷最佳烧结工艺条件下,加入不同含量的稀土  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  制得的  $\text{MgO}$  陶瓷,  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  的加入细化了  $\text{MgO}$  的晶粒并与  $\text{MgO}$  形成固溶体以增强  $\text{MgO}$  的性能,且  $\text{Pr}$  以 +3 价稳定存在。

2) 添加稀土  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  微量时  $\text{MgO}$  陶瓷的性能增强效果不明显,在当稀土  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  适量加入时能显著增强其硬度及抗热震次数,当  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  添加量范围为 4%~8% 时,  $\text{MgO}$  的抗热震性能最好,稀土过量氧化

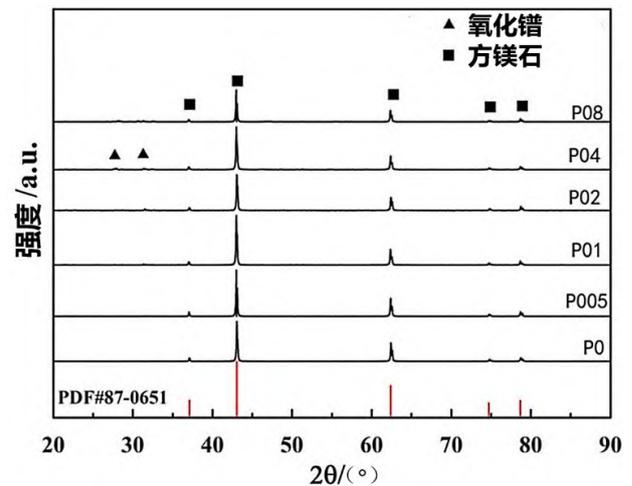


图9 加稀土氧化镧后的XRD结果

镁性能随之降低。

3) 当稀土  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  添加量为 4%~8% 时,  $\text{MgO}$  的抗热震次数都为 17 次,但综合考虑  $\text{MgO}$  的硬度值,8% 为最佳  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  添加量,此时  $\text{MgO}$  的硬度值为 60.1 HRA。

#### 参考文献:

- [1] 狄玉丽,杨安星,赵林,等.混合稀土  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  和  $\text{CeO}_2$  对氧化镁陶瓷硬度及抗热震性能的影响[J].西昌学院学报(自然科学版),2023,37(1):66-70+82.
- [2] 赵林,范潇方,狄玉丽.混合稀土  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  和  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  对氧化镁陶瓷材料密度及硬度的影响[J].科技视界,2021(18):141-143.
- [3] 包曼玲,陈彭英.稀土氧化物掺杂对钛酸钡陶瓷电容器性能的影响[J].无机材料学报,1987,2(3):285.
- [4] 杨尚余,邢学刚,张娇娇,等.稀土氧化物掺杂对氧化铝陶瓷力学性能和摩擦磨损性能的影响[J].功能材料,2018,49(6):190-195+200.
- [5] 付鹏,王伟,彭林林,等.复合稀土氧化物对氧化铝陶瓷耐磨性能的影响研究[J].陶瓷,2010(8):23-26.
- [6] RANI D A, YOSHIKAWA Y, HIRAO K, et al. Effect of rare-earth dopants on mechanical properties of alumina[J]. Communication of the American Ceramic Society, 2003, 87(2): 290-292.
- [7] WU T, ZHOU J, WU B, et al. Effect of rare-earth  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  on the wear resistance of alumina ceramics for grinding media[J]. Powder Technology, 2016, 303: 27-32.
- [8] FANG J, THOMPSON A M, HARMER M P, et al. Effect of yttrium and lanthanum on the final-stage sintering behavior of ultrahigh-purity alumina[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 8(8): 2005-2012.
- [9] LIU W, TONG W, LU X, et al. Effects of different types of rare earth oxide additives on the properties of silicon nitride ceramic substrates[J]. Ceramics International, 2019, 45(9): 12436-12442.
- [10] KAŠIAROV M, TATARKO P, BURIK P, et al. Thermal shock resistance of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -SiC ceramics with rare-earth oxide sintering additives[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(14): 3301-3308.
- [11] LIU N, ZHANG J, DUAN Y, et al. Effect of rare earth oxides addition on the mechanical properties and coloration of silicon nitride ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(4): 1132-1138.

- [12] WANG Z H, BAI B, NING X S. Effect of rare earth additives on properties of silicon nitride ceramics[J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2014, 113(3): 173–177.
- [13] ZHEN Z, WANG X, SHEN Z, et al. Thermal cycling behavior of EB-PVD rare earth oxides co-doping ZrO<sub>2</sub>-based thermal barrier coatings[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(16): 23101–23109.
- [14] ZHANG C, LI C, SI X, et al. Rare earth oxide CeO<sub>2</sub> enhanced reactive air brazing of YSZ ceramics[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(23): 37127–37141.
- [15] 吴珊,姜兴振,黄志兵,等.氧化钪含量对氧化锆陶瓷力学性能及抗热震性的影响[J]. *广州化工*, 2013, 41(12): 66–68.
- [16] LI P, YANG H, KODAGODA A N, et al. Superior energy storage performance and ultrafast discharge of NBBT-based ceramics via introducing linear dielectric additives and rare earth oxides[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2023, 11(47): 16491–16500.
- [17] ZHAO Y, WANG L, HUANG R, et al. The correlation between the microstructure and macroscopic properties of (K, Na, Li) (Nb, Ta)O<sub>3</sub> ceramic via rare earth oxide doping[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(1): 2505–2510.
- [18] GUO J, ZHOU H, FAN T, et al. Improving electrical properties and toughening of PZT-based piezoelectric ceramics for high-power applications via doping rare-earth oxides[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6): 14254–14266.
- [19] HUANG Q, SI F, TANG B. The effect of rare-earth oxides on the energy storage performances in BaTiO<sub>3</sub> based ceramics[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(12): 17359–17368.
- [20] WANG X H, LIU S S, ZHANG M, et al. Effect of rare earth oxide on the microstructure and wear properties of in situ - synthesized ceramics-reinforced Fe-based laser cladding coatings[J]. *Tribology Transactions*, 2019, 63(2): 345–355.
- [21] ZHANG Z, LU X, HAN B, et al. Rare earth effect on the microstructure and wear resistance of Ni-based coatings[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 454–455: 194–202.
- [22] ZHANG Z, LU X, HAN B, et al. Rare earth effect on microstructure, mechanical and tribological properties of CoCrW coatings[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2007, 444(1–2): 92–98.
- [23] LI C, REN C, MA Y, et al. Effects of rare earth oxides on microstructures and thermo-physical properties of hafnia ceramics[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 72: 144–153.
- [24] HOSSAIN M K, RUBEL M H K, AKBAR M A, et al. A review on recent applications and future prospects of rare earth oxides in corrosion and thermal barrier coatings, catalysts, tribological, and environmental sectors[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(22): 32588–32612.
- [25] MAGNANI G, ANTOLINI F, BEAULARDI L, et al. Sintering, high temperature strength and oxidation resistance of liquid-phase-pressureless-sintered SiC - AlN ceramics with addition of rare-earth oxides[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, 29(11): 2411–2417.
- [26] WANG J, LIU C, ZHANG G, et al. Crystallization properties of magnesium aluminosilicate glass-ceramics with and without rare-earth oxides[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2015, 419: 1–5.
- [27] XIE W, FU Q, CHENG C, et al. Experimental and theoretical study on the effect of different rare-earth oxides on the high-temperature stability of SiO<sub>2</sub> glass at 1973K[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(15): 24371–24378.
- [28] 张骋,黄德信,徐兵,等.氧化镁陶瓷抗热震性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(S2): 1207–1209.
- [29] 薛宗伟,吴锋,李志坚,等.复合添加剂对氧化镁陶瓷抗热震性的影响[J]. *人工晶体学报*, 2018, 47(19): 1933–1937.
- [30] 薛宗伟,吴锋,李志坚,等.氧化钪对氧化镁陶瓷烧结和抗热震性能的影响[J]. *耐火材料*, 2019, 53(2): 96–100.
- [31] 于恣,罗旭东,张国栋,等.La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对氧化镁陶瓷烧结性能及抗热震性能的影响[J]. *人工晶体学报*, 2016, 45(9): 2251–2256.

- [32] JIN E, YU J, WEN T, et al. Effect of cerium oxide on preparation of high-density sintered magnesia from crystal magnesite [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(5): 9824–9830.
- [33] 狄玉丽, 赵星滔, 郑博, 等. 烧结工艺及  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  对氧化镁陶瓷烧结及抗热震性能的影响[J]. *稀土*, 2021, 42(1): 61–71.
- [34] 郑博, 赵星滔, 狄玉丽. 稀土  $\text{CeO}_2$  对氧化镁陶瓷烧结性能和抗热震性能的影响[J]. *科技资讯*, 2019, 17(26): 1–3.
- [35] CAO W, XIE X, WANG Y, et al. Effect of  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$  doping on the microstructure and electrical properties of ZnO varistors [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(18): 24777–24783.
- [36] TAMIZH SELVI K, ALAMELUMANGAI K, PRIYA M, et al. Studies on synthesis, structural, surface morphological and electrical properties of  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ -MgO nanocomposite [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016, 27(6): 6457–6463.
- [37] INOUE Y, OKAMOTO Y, MORIMOTO J. Thermoelectric properties of porous zinc oxide ceramics doped with praseodymium [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 43(1): 368–377.
- [38] GB/T 3298–2022, 日用陶瓷器抗热震性能测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [39] 张敬强, 荣守范, 宋晓刚. 稀土氧化物对氧化铝复相陶瓷显现结构与力学性能的影响[J]. *佳木斯大学学报(自然科学版)*, 2006, 24(1): 16–18+42.