

文章编号:1000-582X(2002)02-0060-03

# 氧化锆力学性能和热学性能的综合分析\*

周泽华<sup>1</sup>,丁培道<sup>2</sup>,陈蓓<sup>2</sup>,易于<sup>1</sup>

(1. 重庆大学机械工程学院,重庆 400044;2. 重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400044)

**摘要:**研究了1580℃×1h常压烧结下,氧化钇含量的变化对氧化锆陶瓷的力学和热学性能的影响。结果显示:当氧化钇含量为3.0% mol时,1580℃×1h常压烧结的氧化钇稳定氧化锆陶瓷的综合力学性能达到最佳;对于不同相组成的同一种材料而言,材料的抗热震性可简单表述为抗弯强度和线膨胀系数的函数,本实验中材料最佳的抗热震性出现在氧化钇含量为2.5% mol时。因此,在实际材料设计时,必须考虑具体的工况需求,获得合理的力学性能与热学性能的搭配。

**关键词:**四方相;相变增韧;热膨胀系数

**中图分类号:**TB 321

**文献标识码:**A

氧化锆是一种常用的氧化物陶瓷,其韧性非常好。由于它的耐火度高,比热及导热系数小,是理想的高温绝缘材料,同时其综合机械性能较好,化学稳定性高,高温时仍能抗酸性和中性物质的腐蚀,因此,氧化锆被用来制作成耐磨刀片、冶炼用的坩锅及耐钢水的保护材料,在工具和耐火材料领域得到了较为普遍的应用<sup>[1]</sup>。

作为氧化锆陶瓷的稳定剂,氧化钇的含量变化对氧化锆的性能影响已经有了一定的研究,但是将烧成体的热学性能与力学性能结合在一起的研究还不多见,而在工程应用中,常常要求材料在保证足够的抗热震性能的同时,必须具备足够的机械性能。因此,通过对稳定剂氧化钇含量变化的研究,将氧化锆的热学性能与力学性能有机地结合在一起,分析烧成体组织结构的变化,对氧化锆在结构陶瓷领域的应用具有实际的意义。

## 1 实验方法

实验所用粉料为:日本产HSY氧化锆粉,平均颗粒度为0.36 μm;香港产氧化钇粉,平均颗粒度为0.40 μm。粉料经球磨混合、造粒、成型及排胶后,于1580℃、保温1h常压烧结。

实验用TG328A型化学分析天平称量烧成体重量,并用排水法计算烧成体密度,用WE-5型液压力万能试验机、三点抗弯法测量烧成体的抗弯强度,用MITUTOYO AVK-CL维氏硬度计测量材料的硬度并根据压痕法计算材料的断裂韧性,用DU PONT 2000型

热分析仪测量材料的线膨胀系数(0~800℃),用AMRAY 1000B型扫描电镜进行样品断口形貌观察。

## 2 实验结果

### 2.1 实验数据

由表1中可以看出,随着氧化钇含量的增加,材料的密度、硬度和断裂韧性都有所提高,当氧化钇含量3.0% mol时,HSY材料在1580℃烧结后的综合力学性能达到最佳,氧化钇含量增加到3.5% mol时,除硬度外,材料的力学性能急剧下降。而随着氧化钇含量的增加,材料的线膨胀系数呈递增趋势。

表1 氧化钇含量对HSY1580℃烧结后性能的影响

材料	HSY -2.0	HSY -2.5	HSY -3.0	HSY -3.5
氧化钇含量/mol	2.0	2.5	3.0	3.5
密度/g·cm <sup>-3</sup>	5.97	5.97	6.01	5.98
硬度 HV/GPa	14.24	14.37	14.84	14.76
断裂韧性 K <sub>IC</sub> /MPa·m <sup>1/2</sup>	5.17	5.90	6.73	4.06
抗弯强度/MPa	553	627	692	473
线膨胀系数 /10 <sup>-6</sup> mm·℃ <sup>-1</sup>	6.6	7.1	8.0	9.3

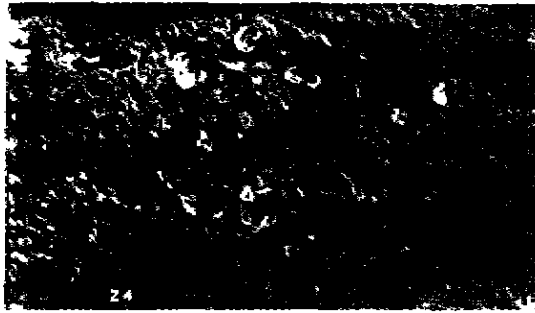
### 2.2 显微形貌和物相分析

从图1的断口形貌可以看出:当氧化钇含量为3.0% mol时,断口明显呈韧窝状,表明材料具有较高的韧性;而当氧化钇含量为3.5% mol时,可清晰地看见一条很长裂纹的扩展路线和裂纹源,此时材料的韧

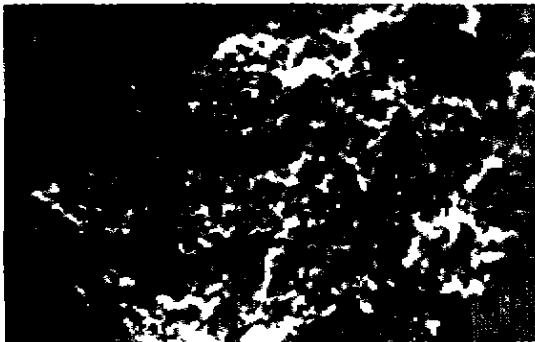
\* 收稿日期:2001-10-08

作者简介:周泽华(1969-),男,上海人,重庆大学讲师,博士生,从事陶瓷材料研究。

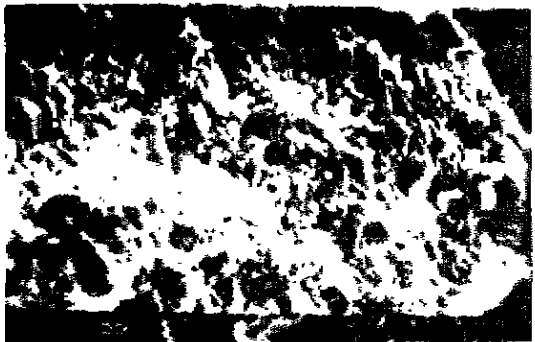
性极差。



a) HSY-2.0 2000x



b) HSY-2.5 2000x



c) HSY-3.0 2000x



d) HSY-3.5 2000x

图1 不同氧化钇含量的HSY材料  
1580℃烧结后的断口形貌

### 3.1 力学性能

如果氧化锆材料中未加稳定剂,在1120℃左右将发生四方相t与单斜相m的可逆相变。通过添加一定氧化钇等稳定剂,由于Y<sup>3+</sup>与氧化锆中Zr<sup>4+</sup>离子半径相似,Y<sup>3+</sup>离子在高温下进入ZrO<sub>2</sub>晶格取代Zr<sup>4+</sup>离子,形成置换式固溶体,这样在基体周围就相当于有一个大的缺陷,它将大大降低氧化锆t→m相变的温度,使四方相在较低的温度下、甚至室温下得以保留。相变温度的降低与氧化钇的添加量的关系非常密切。

氧化锆t→m相变对材料的增韧作用是:当室温下四方相受到外力作用时,小于临界相变尺寸的亚稳四方相发生向单斜相转变的马氏体相变,其相变速度比裂纹扩展速度大得多,且伴随着体积变化,因而吸收了断裂能,使断裂难以扩展成长裂纹,同时体积变化产生的微裂纹也吸收了主裂纹能量,阻碍了主裂纹的扩展,因此,随着四方相含量的增加,材料的断裂韧性有较大的增加,同时强度也有所增加<sup>[1]</sup>。

由此可见,随着氧化钇含量的增加,烧成体中物相逐渐发生变化,随着单斜相的减少,四方相的增加,材料的相变增韧作用增强,因此材料的强度和韧性都有一定的提高;当烧成体完全由四方相组成时,可相变的四方相明显增加,材料的断裂韧性达到最大,因此断口为明显的韧窝状;随着氧化钇含量的进一步增加,材料中出现一定的立方相时,由于立方相的强度和韧性均较差,同时可相变量减少,在外应力的作用下,基体内主裂纹的扩展未受到相变的约束,材料的强度,特别是材料的断裂韧性急剧下降。至于材料的硬度,则主要取决于其晶体结构中质点间化学键的性质和材料自身的内部缺陷,因此,在材料烧结基本致密的前提下,氧化钇含量对材料的硬度影响不大。

### 3.2 热学性能

材料的热学性能主要包括热容、导热率、热膨胀系数及抗热震性。其中抗热震性是评价耐火材料服役时的极其重要的指标,可通过下式来表述<sup>[2-6]</sup>:

$$R = \sigma(1 - \mu)/E \cdot \alpha \quad (1)$$

$$R' = R \cdot (K/\rho c)^{1/2} \quad (2)$$

式中:R—急热急冷时的抗热震系数;R'—以一定速度加热冷却时的抗热震系数; $\sigma$ —断裂强度; $\mu$ —泊松比;E—弹性模量; $\alpha$ —热膨胀系数;K—导热系数; $\rho$ —密度;c—热容。

由上式可见,材料的抗热震性不仅与其热学性能有关,而且与材料的力学性能也有很大的关系。在耐火材料经常工作的急热急冷状况下(式1),导热系数及热容对抗热震性的影响很小,材料的热膨胀系数对抗热震性的影响就显得非常重要了;对于一般加热冷却速度下的抗热震性(式2),根据GRUNEISEN的推导<sup>[2]</sup>,同一种材料的热膨胀系数与其热容及导热系数均可表

## 3 结果分析及讨论

述为线性关系,因此,对于同一种材料的不同相组成的前提条件下,式(2)中的热容及导热系数同样可以表述为热膨胀系数的函数,即热容与导热系数对抗热震性的作用可以表述为一个常数,故其抗热震性仅与热学性能中的热膨胀系数有关。

事实上,材料的热容、导热及热膨胀等热学性能,都与材料中原子的热振动有关,即直接取决于晶格的振动。以热膨胀系数为例,材料的热膨胀系数取决于材料自身的相组成、相变及晶体缺陷等因素。因此,假设材料的弹性模量及泊松比均为常数,而材料的断裂强度与材料的抗弯强度成正比关系,公式 1.2 可简化为

$$R = A \cdot \sigma / \alpha \quad (3)$$

$$R' = B \cdot R \quad (4)$$

式中:  $A$ 、 $B$  均为常数。由此可见,对于不同相组成的同种材料而言,材料的抗热震系数与材料的抗弯强度成正比,而与材料的线膨胀系数成反比。

就本实验而言,材料的抗弯强度最大值与线膨胀系数的最小值并非在相同氧化钇含量时出现,比较后可以发现,氧化钇含量为 2.5% mol 时烧成体的  $\sigma/\alpha$  值最大,即此时材料的抗热震性最佳。

### 3.3 综合分析

根据上述分析,对于氧化钇稳定氧化锆陶瓷,本实验中材料的最佳力学性能出现在氧化钇含量为 3.0% mol 时,而最佳热学性能(主要是抗热震性)则出现在氧化钇含量为 2.5% mol 时。因此,对于氧化钇稳定的氧化锆陶瓷材料,必须考虑实际工作的工况条件综合分析,在满足最佳力学(热学)性能的同时,必然损失一定的热学(力学)性能。

## 4 结论

1) 氧化钇含量为 3.0% mol 时,1 580 °C × 1 h 常压烧结下氧化钇稳定氧化锆陶瓷的综合力学性能达到最佳,其断裂韧性可达 6.73 MPa · m<sup>1/2</sup>,烧结体断口呈明显韧窝状。

2) 对于不同相组成的同一种材料而言,材料的抗热震性可简单表述为抗弯强度和线膨胀系数的函数,即  $R = A \cdot \sigma/\alpha$  及  $R' = B \cdot R$ 。在本实验中,材料最佳的抗热震性出现在氧化钇含量为 2.5% mol 时。

3) 材料的最佳力学性能与热学性能所对应的氧化钇含量存在差异。因此,在实际材料设计时,须考虑具体的工况需求,获得合理的力学性能与热学性能的搭配。

### 参考文献:

- [1] 李世普.特种陶瓷工艺学[M].武汉:武汉工业大学出版社,1991.98-110.
- [2] 铃木弘茂编,工程陶瓷[M].陈世兴译.北京:科学出版社,1989.204-208.
- [3] 陈加庚.陶瓷材料抗热震断裂性和抗热震损伤性统一的理论[J].中国陶瓷,1995,31(5):31-34.
- [4] 范学运.提高瓷器热稳定性初探[J].陶瓷,1993,26(2):19-21.
- [5] WEN C J. Mechanical and Thermal Shock Properties of Size Graded MgO-PSZ Refractory [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2000,20:1 159-1 167.
- [6] 张彪.抗热震陶瓷材料的设计[J].硅酸盐通报,1995,3:35-40.

## Analysis of Mechanical and Thermal Properties of ZrO<sub>2</sub>

ZHOU Ze-hua<sup>1</sup>, DING Pei-dao<sup>2</sup>, CHEN Bei<sup>2</sup>, YI Yu<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Effects of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents on mechanics and thermal properties of ZrO<sub>2</sub> ceramics sintered at 1 580 °C × 1 h are studied. The results show that the best mechanical properties of ZrO<sub>2</sub> stabilized by Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> can be obtained when Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents are 3.0% mol; As for same sorts of materials with different phases, the thermal-shock resistance can be simply related with bending strength and string expansion coefficient, the best thermal-shock resistance can be obtained when Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents are 2.5% mol. Therefore, working conditions must be studied carefully so that ideal mechanical and thermal properties could be obtained together.

**Key words:** tetragonal; phase transformation-toughened; heat-expansion coefficient

(责任编辑 李胜春)