

文章编号: 1000-2278(2000)01-0046-05

## 二氧化锆陶瓷的相变增韧机理和应用

闫 洪 窦明民 李和平

(昆明冶金研究院)

### 摘 要

综合论述了国内外对  $ZrO_2$  陶瓷的相变增韧机理的研究,介绍了  $ZrO_2$  陶瓷的类型和性能以及在陶瓷和其它工业领域的应用前景。

关键词  $ZrO_2$  陶瓷,相变增韧

中图法分类号: TQ174.75 文献标识码: A

## TRANSFORMATION TOUGHENING MECHANISMS AND APPLICATION OF $ZrO_2$ CERAMICS

Yan Hong Dou Mingmin Li Heping  
(Kunming Metallurgical Research Institute)

### Abstract

The transformation toughening, mechanisms are surveyed for  $ZrO_2$  ceramics and introduces its types, properties, application in ceramics and other industrial fields.

**Keywords**  $ZrO_2$  ceramics, transformation toughening

### 1 前 言

$ZrO_2$  属于新型陶瓷,由于它具有十分优异的物理和化学性能,不仅在科研领域已经成为研究热点,而且在工业生产中也得到了广泛的应用,它是陶瓷材料、高温材料和功能材料的重要原料,在各种金属氧化物陶瓷材料中, $ZrO_2$  的高温热稳定性和隔热性能最好,适宜做陶瓷涂层和高温零部件。 $ZrO_2$  的热导率在常见的陶瓷材料中最低,而热膨胀系数又与金属材料较为接近,是重要的结构陶瓷材料; $ZrO_2$  特殊的晶体结构,使之成为重要的电子材料;良好的机械性能和热物理性能,使它能够作为材料中性能优异的增强相。目前,

在各种金属氧化物陶瓷中, $ZrO_2$  的作用仅次于  $Al_2O_3$ 。

相变增韧  $ZrO_2$  陶瓷是一种极有发展前途的新型结构陶瓷,其主要是利用  $ZrO_2$  相变特性来提高陶瓷材料的断裂韧性和抗弯强度,使其具有优良的力学性能,低的导热系数和良好的抗热震性。它还可以用来显著提高脆性材料的韧性和强度,是复合材料和复合陶瓷中重要的增韧剂。近十年来,具有各种性能的  $ZrO_2$  陶瓷和以  $ZrO_2$  为相变增韧物质的复合陶瓷迅速发展,在工业和科学技术的许多领域获得了日益广泛的应用。与此同时,有关  $ZrO_2$  相变的研究也受到了学术界的普遍重视,在固态相变研究领域占据了仅次于金属的重要地位。

收稿日期: 1999-11-16

基金项目: 云南省“九五”科技攻关项目(编号: 95C17-7)

作者简介: 闫 洪,男,38岁,昆明冶金研究院重点实验室高级工程师,650031

## 2 $ZrO_2$ 在陶瓷材料中的增韧补强机理

陶瓷材料具有优异的耐磨性、耐腐蚀性和高温性能,但是由于陶瓷固有的脆性,限制了其实际应用范围,因此,改善陶瓷材料的脆性,增大强度和提高了其在实际应用中的可靠性,成为其能否广泛应用的关键。围绕改善陶瓷材料的脆性和提高陶瓷材料的强度,近年来各国学者提出了各种  $ZrO_2$  的增韧补强机理,制备出各种高性能的陶瓷材料<sup>[1-3]</sup>。下面就国内外发展的增韧补强机理作一概述。

### 2.1 相变增韧机理

应力诱导相变增韧是利用应力诱导四方  $ZrO_2$  马氏体相变来改变陶瓷材料的韧性。 $ZrO_2$  在室温下为单斜晶系,当温度达到  $1170^\circ\text{C}$  时,由单斜晶系转化为亚稳态的四方晶型,在应力作用下,亚稳态的四方晶型  $ZrO_2$  可诱发相变重新转化为单斜晶型。在高温烧结时, $ZrO_2$  颗粒以四方相存在,而烧结致密后冷却时,四方相  $ZrO_2$  颗粒就要转变为单斜相颗粒。但这时周围的致密陶瓷基体束缚它的膨胀,因而相变也受到抑制。在室温时, $ZrO_2$  颗粒仍以四方相存在,它有一种力图膨胀而变成单斜相的自发倾向,在许多陶瓷基体中,分散了这种亚稳定的  $ZrO_2$  颗粒,会使陶瓷的韧性有极大提高,这是因为四方相  $ZrO_2$  颗粒是处在压应力状态,基体沿颗粒连线方向也是受到应力的。当外力作用时,陶瓷的内应力可使四方相的  $ZrO_2$  粒子解除约束,发生四方相  $ZrO_2(t-ZrO_2)$  转变成单斜相( $m-ZrO_2$ ) 的马氏体相变,引起体积膨胀。而相变颗粒的剪切应力和体积膨胀对基体产生压应变,使裂纹停止延伸,以致需要更大的能量才使主裂纹扩展。即在裂纹尖端应力场的作用下, $ZrO_2$  粒子发生四方相 $\rightarrow$ 单斜相的相变而吸收了能量,外力做了功,从而提高了断裂韧性。

### 2.2 微裂纹的增韧机理

微裂纹增韧是多种陶瓷材料的一种增韧机理。由于大多数情况下陶瓷体内存在裂纹,当受外力或存在应力集中时,裂纹会迅速扩展,致使陶瓷受到破坏,因此,防止裂纹扩展,消除应力集中是提高陶瓷强韧性的关键。 $ZrO_2$  在由四方相向单斜相转变时,相变出现的体积膨胀也导致微裂纹。这样不论是陶瓷在冷却过程中产生的相变诱发微裂纹,还是裂纹在扩展过程中其尖端区域形成的应力诱发相变导致的微裂纹,都将起到分散主裂纹尖端能量的作用,从而提高了断裂能,即微裂纹增韧。

当陶瓷材料受到张应力的作用时,在主裂纹的尖端形成塑性区,在塑性区内,原先存在大量的微裂纹发生延伸,增加许多新的裂纹表面,吸收大量的弹性应变能,从而引起陶瓷断裂韧性的增加。另外,在张应力作用下,延伸后形成的较大微裂纹将与主裂纹汇合,导致主裂纹的扩展路径发生扭曲和分叉,增加裂纹的扩展路径,吸收更多的弹性应变能,从而导致材料断裂韧性的进一步提高。

### 2.3 弥散增韧机理

弥散增韧主要是在陶瓷基质中加入第二相  $ZrO_2$  粒子,这种颗粒在基质材料受拉伸时阻止横向截面收缩。而要达到和基体相同的横向收缩,就必须增加纵向拉应力,这样就使材料消耗了更多的能量,起到增韧作用。同时,高弹性模量的颗粒对裂纹起钉扎作用,使裂纹发生偏转绕道,耗散了裂纹前进的动力,也起到增韧作用。另外,颗粒的强化在于颗粒与基体的热膨胀失配,使外加载荷重新分配,提高承载能力,防止基体内位错运动,以达到强化的目的。

$ZrO_2$  增韧陶瓷为多相结构, $ZrO_2$  呈微细的分散相弥散分布在被韧化的陶瓷基质中, $ZrO_2$  颗粒尺寸和分布对陶瓷基体韧性影响较大。只有  $ZrO_2$  弥散粒子的直径小于室温相变临界颗粒直径(一般 $< 1\mu\text{m}$ ) 时,使陶瓷基体内储存着相变弹性应变能,导致其韧性和强度均有不同程度提高。另外,最佳的  $t-ZrO_2$  体积分数,均匀的  $t-ZrO_2$  弥散程度以及陶瓷基体和  $ZrO_2$  颗粒热膨胀系数的匹配都在陶瓷增韧中是必不可少的。

## 3 $ZrO_2$ 陶瓷的相变规律和机制

陶瓷中较典型的马氏体相变为  $ZrO_2$  中四方相 $\rightarrow$ 单斜相( $t\rightarrow m$ ) 转变,它是通过无扩散剪切变形来实现的,因此被认为属于马氏体相变类型的固态相变。人们在研究纯  $ZrO_2$  的相变动力学时发现, $t\rightarrow m$  相变不仅具有变温特征,而且存在等温转变现象。当  $ZrO_2$  晶体尺寸 $< 1000\text{\AA}$  或  $ZrO_2$  中存在某种晶体缺陷时,其等温转变就发生,这是由于  $t$  相晶粒尺寸太小,不能形成足够大的  $m$  相晶核,在等温过程中, $t$  相晶粒逐渐长大,使  $m$  相能够在  $t/m$  相界上不断形核长大,由此呈现等温特征。

在  $Y_2O_3-ZrO_3$  陶瓷中,加入其它稳定剂,如  $CeO_2$ 、 $MgO$ 、 $TiO_2$  均能提高  $t$  相稳定性,降低相变速率和相转变量,阻碍等温相变发生。晶粒尺寸或增加  $Y_2O_3$  含量均有效降低  $t\rightarrow m$  相变速率和相变数量。 $Y_2O_3-ZrO_2$

陶瓷的  $t \rightarrow m$  等温相变是一种受氧离子短程扩散控制的类贝氏体相变,氧空位与氧离子组成的集团使氧离子容易扩散,促使  $t \rightarrow m$  等温相变。在相变过程中,  $Zr^{4+}$  作切变运动,氧离子作短程扩散,相变速率受氧离子扩散所控制。相变存在着氧离子—空位的扩散,这使得掺杂离子或氧离子可能在  $m$  相晶胞中进行某些择优排列,并导致  $Zr-O$  配位层中过饱和的氧空位数量减少,降低四方相的稳定性,从而发生  $t \rightarrow m$  相变。而在  $8\text{mol}\% \text{CeO}_2-Zr\text{O}_2$  陶瓷中,  $t \rightarrow m$  转变可以在等温和变温条件下交替进行,在  $400^\circ\text{C}$  以下等温时,已有部分  $t$  相在快冷过程中发生  $t \rightarrow m$  相变;在  $400^\circ\text{C}$  以上等温时,随着温度的升高,相变孕育期显著增加,相转变量减少<sup>[4-6]</sup>。

## 4 $Zr\text{O}_2$ 陶瓷的种类和应用

### 4.1 $Zr\text{O}_2$ 增韧 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷刀具

一般说来,当  $Zr\text{O}_2$  从高温降至  $1100^\circ\text{C}$  附近时,将会从四方相转变为单斜相,同时发生体积膨胀。但当  $Zr\text{O}_2$  颗粒细分散在陶瓷基体中时,它的相变膨胀就受到基体的约束,相变也就受到抑制,使相变温度向低温方向移动。当  $\text{Al}_2\text{O}_3$  热膨胀系数比较大时,在烧结后冷却时对分散于其中的  $Zr\text{O}_2$  颗粒的相变有较好的抑制作用,因而相变增韧作用是比较有效的。此外,对于同样的基体,  $Zr\text{O}_2$  颗粒越小,从四方相转变为单斜相的温度就越低。对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  中含有  $15\% \text{ZrO}_2$  的材料,当  $Zr\text{O}_2$  颗粒为  $0.7\mu\text{m}$  时,相变温度约为  $350^\circ\text{C}$ ;当  $Zr\text{O}_2$  颗粒小于  $0.5\mu\text{m}$  时,相变温度等于室温。即烧结冷却至室温后,其中弥散的  $Zr\text{O}_2$  颗粒仍保持四方相。这种亚稳定的四方相  $Zr\text{O}_2$  颗粒总是力图相变,同时体积趋于膨胀,这是由于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基体紧紧地束缚着它才没有实现而已。一旦陶瓷受到外力作用,基体中就会出现应力场,减轻了对  $Zr\text{O}_2$  颗粒的束缚,从而使颗粒得以相变和体积膨胀,这个过程消耗了一部份能量,只有给予更高的应力,才能使裂纹继续扩展直到断裂。因此,  $Zr\text{O}_2$  颗粒的加入提高了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的断裂韧性。  $Zr\text{O}_2$  增韧  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷 (ZTA) 的抗弯强度、断裂韧性和耐热冲击温度有很大提高,美国和瑞典研制的  $Zr\text{O}_2$  增韧陶瓷刀片具有相当高的刀刃强度和耐磨性,用于加工合金钢时,粗车速度可达到  $3.3$  米/秒,精车速度为  $15$  米/秒。它可以在高于硬质合金刀具  $4 \sim 5$  倍的切削速度下加工高温合金<sup>[7-8]</sup>。

### 4.2 $Zr\text{O}_2$ 复合材料

由于相变带来体积的变化,因此,纯的  $Zr\text{O}_2$  是难以烧成致密陶瓷的,在烧结后冷却时,必然会由于四方相的相变而造成体积膨胀开裂。为了消除这种体积变化的破坏作用,最常用的办法就是在  $Zr\text{O}_2$  中加入适量的立方晶型氧化物稳定剂,如  $\text{MgO}$  和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  等。  $Zr\text{O}_2$  有三种晶型即立方结构 ( $c$  相)、四方结构 ( $t$  相) 和单斜结构 ( $m$  相),称为部分稳定氧化锆 (简称 PSZ)。在应力作用下发生  $t \rightarrow m$  马氏体转变称为“应力诱导相变”,这种相变过程将吸收能量,使裂纹尖端的应力场松弛,增加裂纹扩展阻力,从而实现增韧。部分稳定氧化锆的断裂韧性远高于其它结构陶瓷,并由此获得了“陶瓷钢”的称誉。  $\text{Mg-PSZ}$  是将含摩尔分数为  $6\% \sim 10\%$   $\text{MgO}$  的  $Zr\text{O}_2$  粉料成型后,在  $1700^\circ\text{C} \sim 1850^\circ\text{C}$  的温度范围内烧结,快速冷却至  $c+t$  双相区后等温时效,使  $t$  相在过饱和的  $c$  相中析出,所得到的  $\text{Mg-PSZ}$  陶瓷分为两类:一类是在  $1400^\circ\text{C} \sim 1500^\circ\text{C}$  处理后得到的高强型,抗弯强度为  $800\text{MPa}$ ,断裂韧性  $10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ;另一类是在  $1100^\circ\text{C}$  处理得到的抗热震型  $\text{Mg-PSZ}$ ,抗弯强度为  $600\text{MPa}$ ,断裂韧性达  $8 \sim 15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。四方多晶氧化锆陶瓷 (TZP) 可以看作是 PSZ 的一个分支,它在  $t$  相区烧结,冷却过程中不发生相变,室温下保持全部或大部份  $t$  相。  $\text{Y-TZP}$  以  $\text{Y}_2\text{O}_3$  为稳定剂,于  $1350^\circ\text{C} \sim 1450^\circ\text{C}$  烧成,由于  $t$  相含量很高,  $\text{Y-TZP}$  的强度可达到  $1000\text{MPa}$ ,断裂韧性可达到  $10\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  以上<sup>[9]</sup>。

因为在结构陶瓷中, PSZ 陶瓷的热传导系数最小,而热膨胀系数又比较大,所以用它制成发动机燃烧室的零部件有很好隔热性<sup>[10]</sup>。此外,  $Zr\text{O}_2$  复合材料还可用于水泵零件,如制成  $Zr\text{O}_2$  隔热垫圈,主要是因为  $Zr\text{O}_2$  在低温下是绝缘体能防止涡流损失,这样在磁体周围无热量产生,可省去冷却装置,减小磁耦尺寸,提高机械效率,节省电能<sup>[11]</sup>。

### 4.3 $Zr\text{O}_2$ 功能陶瓷

传感器是当今科技发展中的一个热门领域,它通过晶体的特殊性能 (如压电性能和铁电性等) 获得某种特殊的应用。氧化钇部分稳定氧化锆陶瓷具有较高的  $\text{O}^{2-}$  离子导电性,因此作为固体电解质得到广泛应用,例如,  $Zr\text{O}_2$  氧敏元件除了用于汽车作为氧气传感器外,还可用于高温炉、锅炉和炼钢炉等用来测量金属液内的氧含量。然而,未增韧的氧化钇稳定氧化锆的力学性能较低,尤其是抗热震性很差,不适应在温度高和温度变化剧烈等条件下工作。为了改变这种情况,制备出优质长寿命的传感器,就必须获得性能稳定可靠

的  $Y_2O_3-ZrO_2$  固体电解质材料, 即  $Y_2O_3-ZrO_2$  陶瓷不仅要求有高的  $O^{2-}$  离子电导率, 而且要求有高强度和高韧性。在氧化钇部份稳定氧化锆陶瓷中, 由于较高含量的四方相  $ZrO_2$  在冷却过程中发生马氏体相变, 因此, 陶瓷具有较高的抗弯强度和断裂韧性。 $ZrO_2$  陶瓷电导率的变化与陶瓷的相组成有关, 在加热过程中,  $Y_2O_3$  固溶到  $ZrO_2$  晶格中含量增加, 使得体系内氧离子空位数量增加, 并且氧离子空位逐渐从有序变为无序, 而非迁移离子维持原有晶格, 因而增加了  $Y_2O_3-ZrO_2$  陶瓷的电导率。

此外,  $ZrO_2$  陶瓷在加热感应炉中有重要作用, 普通电热元件由于抗氧化性能差, 在空气介质中的最高使用温度一般不超过  $1600^\circ C$ 。而  $ZrO_2$  不受氧化的影响, 可作为高温使用的电阻加热元件, 它一般应用于感应加热,  $ZrO_2$  感应炉能在短时间内使工作温度达到  $2300^\circ C$ , 在工作温度为  $1800^\circ C$  时, 使用寿命可达到 1 万小时以上。

#### 4.4 $ZrO_2$ 研磨介质

$t-ZrO_2$  多晶瓷在实验条件下, 由于磨损层发生了  $t-ZrO_2$  转变为  $m-ZrO_2$  的马氏体相变, 其磨料磨损率随施加载荷的增加反而减小, 耐磨性能优于  $Al_2O_3$  瓷, 因此  $ZrO_2$  作为研磨介质其磨损很低; 另一因素是它对分散剂有良好的抗化学侵蚀,  $ZrO_2$  作为分散剂和研磨介质主要用于含  $ZrO_2$  的高纯原材料的制备, 要求污染小的, 着色剂和高保真录像磁带粉末的球磨粉碎。用大小相同的  $ZrO_2$  和致密的  $Al_2O_3$  研磨剂进行对比实验表明, 在研磨锆英石砂时, 如果用  $Al_2O_3$  作研磨剂, 就需要 2 倍的研磨时间才能得到与使用  $ZrO_2$  作为研磨剂研磨一样的研磨细度, 因此, 使用  $ZrO_2$  研磨介质可缩短研磨时间, 减少介质的磨损和球磨机内衬材料的损失。 $ZrO_2$  材料还可以制作超细磨机的偏心片, 作为部分球磨介质对物料进行粉碎, 偏心片的作用是搅动球磨介质和翻动物料, 这种连续球磨机已用于超细锆基色料的粉碎, 球磨好的物料通过磨机内表面的细缝进行分级, 不能通过细缝的粗颗粒继续在磨机里粉碎, 直至达到细度要求。 $ZrO_2$  材料的韧性比  $Al_2O_3$  材料好, 因此不容易碎裂。

#### 4.5 $ZrO_2$ 热喷涂层和电镀层

氧化锆等离子喷涂粉是用于喷制高级热障涂层的重要材料。该热障涂层的隔热效果达到  $200^\circ C$  以上, 这是由于  $ZrO_2$  涂层具有低导热率、高热膨胀系数、优异的化学稳定性、抗高温氧化和抗热震动性所致。 $ZrO_2$  热障涂层是热喷涂应用中最广泛的项目之一, 在

许多限制热通量和需要局部空气冷却的设计中采用了这种涂层; 除了热障作用外, 氧化锆涂层还有辐射作用, 有利于提高燃烧效率, 热障涂层多应用在气体涡轮发动机和往复式发动机, 如在飞机发动机和航天工业中用于保护燃烧筒, 喷口末端壁、气路转换部件, 涡轮叶片转盘, 后燃烧器喷口和阻力板; 在汽车工业中, 汽车往复式发动机的涂层应用正在增加并成为迄今最大的新型应用领域。在其它工业涂层市场中的应用是发电蒸汽、燃气涡轮机、压缩机气缸、叶轮、高温支承和导向装置等<sup>[12-13]</sup>。

复合镀层由于在基体金属镀层中镶嵌了部份固体微粒分散相, 其性能得到了很大提高, 因此, 复合镀层近年来也成为人们研究的一个重点。在非晶态  $Ni-W$  合金电镀层中加入  $ZrO_2$  固体微粒, 获得的  $Ni-W-ZrO_2$  复合镀层的抗高温氧化试验表明, 随着镀层中  $ZrO_2$  微粒含量的增加, 复合镀层的抗高温氧化性能提高, 这是由于在复合镀层中,  $ZrO_2$  微粒弥散分布在  $Ni-W$  非晶态合金镀层表面, 对氧的扩散起到了阻碍作用, 并且由于镀层中  $ZrO_2$  微粒的弥散分布减少了基体镀层与氧接触的有效面积, 从而提高了复合镀层的抗高温氧化性。经过高温热处理后, 由于加入了  $ZrO_2$  微粒, 复合镀层的硬度可提高到  $HV1200$  左右, 说明  $Ni-W-ZrO_2$  复合镀层经  $500^\circ C \times 50h$  的高温氧化后, 仍具有比较高的硬度<sup>[14]</sup>。

#### 4.6 $ZrO_2$ 催化和封装材料

由于氧化锆的化学稳定性较好, 其表面具有酸性或碱性, 同时拥有氧化性和还原性。它又是 P 型半导体, 易于产生氧空穴, 作为催化剂载体可与活性组分产生较强的相互作用。因此近年来  $ZrO_2$  引起了催化领域学者的广泛兴趣, 在自动催化, 聚合和氧化反应催化及超强酸催化剂方面,  $ZrO_2$  均受到了特别的关注<sup>[15]</sup>。

陶瓷和金属的气密性封接是许多工业部门需要实施的一项工艺技术, 用氧化物进行封接是一个较新而且发展很快的技术。在合成封接材料时, 一个比较棘手的问题是如何改善封接材料对金属的浸润性, 只有浸润性好的封接料才能获得满足工艺技术所要求的气密性标准, 使用以机械力活化  $ZrO_2$  和  $SiO_2$  混合粉料合成  $ZrSiO_4$  作为封接料的添加物, 达到既能降低封接料的热膨胀系数, 又对铜及铜合金有良好浸润性的目的。实验表明, 单斜晶系  $ZrO_2$  和胶体  $SiO_2$  的混合料经 120 小时球磨活化后, 在  $1200^\circ C$  就反应生成超细的高活性  $ZrSiO_4$  粉料, 生成率达 95% 以上。合成粉料具有很高的表面活性, 作为添加剂可改善氧化物封接料的性能,

使之能对氧化铝瓷和铜合金进行质量良好的气密性封接<sup>[16]</sup>。

## 5 结束语

ZrO<sub>2</sub> 陶瓷突出的性能,使它成为目前使用面最广的氧化物陶瓷之一。在当前和相当一段时间内,ZrO<sub>2</sub> 陶瓷在性能方面向着高效率、高可靠和多功能方向发展。主要研究方向包括智能化敏感陶瓷及其传感器,具有机电耦合系数大、压电系数和居里温度高的压电陶瓷,重量轻、比弹性模大、高温热稳定性好、强度高和抗疲劳的复合材料以及超塑性陶瓷等。作为下世纪的新型陶瓷,ZrO<sub>2</sub> 已经引起人们的关注,随着科技的发展,ZrO<sub>2</sub> 陶瓷制品的应用,将会越来越广泛。

### 参 考 文 献

- 1 王黔平等. 马氏体相变与 ZrO<sub>2</sub> 增韧陶瓷. 中国陶瓷, 1994. 138(5): 45-49
- 2 王东升等. 四方氧化锆多晶瓷的磨料磨损. 硅酸盐学报, 1995. 23(5): 518-524
- 3 廖金带. 氧化锆质瓷. 陶瓷工程, 1994. 27(5): 50-54
- 4 摩树帜等. 热处理对 ZrO<sub>2</sub> 纳米粉末粒度和结构的影响. 稀有金属材料与工程, 1998. 27(5): 309-311
- 5 郑秀华. ZrO<sub>2</sub> 陶瓷中 t→m 等温相变. 材料科学与工程, 1999. 17(1): 75-79
- 6 牟 军等. 氧化锆增韧陶瓷的相变及相变增韧. 材料科学与工程, 1994. 12(3): 6-11
- 7 田增英等编. 精密陶瓷及应用. 北京: 科学普及出版社, 1993. 7: 150-153
- 8 孟国文等. 陶瓷中氧化锆的研究及应用现状. 材料导报, 1994. 8(4): 43-45
- 9 刘 茜等. 莫来石-氧化锆复合材料中氧化锆的强韧化机理. 硅酸盐学报, 1992. 20(4): 353-359
- 10 崔丽华等. 陶瓷发动机的现状及发展. 摩托车技术, 1998. 69(2): 4-5
- 11 贾成广等编著. 陶瓷基复合材料导论. 北京: 冶金工业出版社, 1998. 8: 196-198
- 12 邵刚勤. 氧化锆等离子喷涂粉末的研究动态. 材料导报, 1996. 93(4): 47-51
- 13 丁彰雄. 热障涂层的研究动态及应用. 中国表面工程, 1999. 12(3): 31-37
- 14 朱立群等. 电沉积 Ni-W 非晶态合金复合镀层的研究. 功能材料, 1999. 30(1): 85-87
- 15 杨广慧等. 纳米氧化锆的制备及应用. 化工新型材料, 1999. 27(5): 21-23
- 16 曹 建等. 机械活化合成超细 ZrSiO<sub>4</sub> 粉体及材料的应用. 中国陶瓷, 1997. 33(3): 16-18