

尹衍升 李嘉 著

氧化锆陶瓷 及其复合材料



化学工业出版社

氧化锆陶瓷及其复合材料

尹衍升 李 嘉 著

化学工业出版社

·北 京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

氧化锆陶瓷及其复合材料/尹衍升, 李嘉著. —北京:
化学工业出版社, 2003.12
ISBN 7-5025-5096-8

I. 氧… II. ①尹…②李… III. 氧化锆陶瓷-陶
瓷复合材料 IV. TQ174.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 000470 号

氧化锆陶瓷及其复合材料

尹衍升 李嘉 著

责任编辑: 叶铁林

文字编辑: 管景岩

责任校对: 吴桂萍 马凤英

封面设计: 于兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 9¼ 字数 242 千字

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5096-8/TQ·1893

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

ZrO₂ 相变增韧陶瓷及其相变增韧效应在改善陶瓷室温脆性方面具有划时代意义，其中，四方氧化锆陶瓷(TZP)和 ZrO₂ 增韧 Al₂O₃(ZTA)是两类经典之作。近年来，利用金属间化合物对陶瓷进行增韧取得了较好的效果。Fe₃Al 金属间化合物具有长程有序的特殊结构，其高温强度、高温蠕变和抗氧化耐腐蚀性能优于大部分金属材料，韧性优于陶瓷材料，因此认为它是介于高温合金与陶瓷之间的一种新型高温结构材料。Fe₃Al 较 ZrO₂ 高的韧性、与之相近的热膨胀系数、较高的热导率及金属间化合物所特有的在一定温度范围内强度随温度升高的特性，可望在补强增韧的同时改善 ZrO₂ 的中低温抗热震性。同时，ZrO₂ 可在一定程度上改善 Fe₃Al 的硬度和耐磨性，达到优势互补。目前，世界各工业发达国家均投入大量的人力与资金进行陶瓷及其复合材料的研究，我国也在国家自然科学基金、“863”等高新技术研究发展计划中将金属间化合物及其陶瓷复合材料研究列入研究计划。同时，许多高等院校和科研单位相继为本科生、研究生开出了有关内容的课程。但是目前国内外尚未见到专门对金属间化合物/氧化锆陶瓷复合材料从成分、结构、制备、性能及其应用等方面进行系统论述的专著或教材，无论从新材料研究还是从教学需要来看，都急需一部有关该研究的专门论著。

该书作者尹衍升教授、李嘉博士等人结合多年来对金属间化合物和氧化锆陶瓷材料的研究，在对其晶体结构、制备工艺、物理和力学性能及其组织结构等方面进行了较系统探索的基础上完成了手稿，这也是他们对多年来研究成果的一个总结。

尹衍升教授是东南大学博士、大连理工大学博士后，现为中国

海洋大学材料学院院长，教授、博士生导师，先后获得国家发明二等奖1项、省部级奖励多项，享受国务院特殊津贴。

李嘉博士毕业于山东大学，现为济南大学材料学院副教授、山东大学博士后，多年从事氧化锆陶瓷及其复合材料研究和制备。先后在国内外著名刊物上发表相关论文20余篇，获得省级奖励2项、山东省科技进步二等奖1项、教育部科技进步二等奖1项。

该书作者既从事理论研究，又注重应用开发，因而该书具有重要的理论参考价值和应用指导价值，相信他们的著作会得到广大材料科技工作者的欢迎。祝愿作者再接再厉，取得更好的研究成果。

中国科学院院士、山东大学教授



2003年10月

前 言

TZP陶瓷具有较高的室温强度和韧性[强度最高可达1.5GPa, 断裂韧性达 $15\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($2.5\text{mol Y}_2\text{O}_3$)], 其硬度、耐磨性和耐化学腐蚀性也较好, 常应用于严酷环境和苛刻负载条件, 如用做拉丝模、轴承、密封件和替代人骨, 以及发动机活塞顶、气门机构中的凸轮、玻璃纤维和磁带的切刀等。但遗憾的是, 除了陶瓷材料所固有的脆性之外, 应力诱导相变对温度的敏感性导致高温下 $t\text{-ZrO}_2$ 的稳定性增高, 从而导致相变增韧失效, 致使强度和韧性急剧下降, 加之在低温环境下时效导致强度和韧性下降(低温老化)及较差的抗热震性能等缺点, 大大削弱了其与传统金属材料竞争的优势, 限制了TZP的规模开发和应用。目前国内外针对TZP的弱点采取了一系列措施, 复合化是解决此问题的有效途径。然而作为陶瓷所固有的脆性以及随着温度升高相变增韧效应减小乃至消失所导致的强度和韧性下降, 限制了其大规模应用。现代材料科学技术的发展, 使金属、无机非金属和高分子材料之间的联系日益紧密, 彼此之间通过不同方式进行复合, 形成叠加或非线性等协同效用, 给新材料的研究带来前所未有的发展机遇。金属间化合物/陶瓷基结构复合材料就是近年来迅速发展起来的一种新型复合材料, 它的发展与金属间化合物和高技术陶瓷的发展密切相关。它不仅充分利用了金属间化合物比普通金属材料原子结合力强、高温强度高、耐腐蚀、抗氧化、弹性模量大、密度低等一系列优点, 以及比陶瓷韧性高、比高温合金密度低的半陶瓷特性, 而且还将陶瓷材料的坚硬、耐磨、耐高温、耐腐蚀、不老化等陶瓷的优良特性结合在一起, 成为目前复合材料研究的热点之一。但是到目前为止, 尚未见有从材料设计、制备、组织结构、力学性能及其相互关系等方面

系统介绍金属间化合物/氧化锆陶瓷基结构复合材料的专著与教材。因此无论从科研成果总结还是教学角度，编著这样一部《氧化锆陶瓷及其复合材料》都是很有必要的。本书在综述国内外金属间化合物与氧化锆陶瓷及其复合材料研究现状的基础上，从材料学的角度，分别阐述了铁铝金属间化合物与氧化锆陶瓷的结构、性能和特点，对该类复合材料的强韧化机制进行了分析总结。考虑到该类复合材料的研究尚属于一个较新的领域，有些研究有待深入，书中存在疏漏及不妥之处，敬请广大同行批评指正。

本书的主要研究工作是在国家自然科学基金 (No. 50242008) 的资助下完成的，该书的出版得到化学工业出版社的精心指导和组织，在撰写期间得到中国科学院院士蒋民华教授、国家自然科学基金委员会材料二处高瑞平研究员的指导及教育部材料液态结构及其遗传性重点实验室和山东省工程陶瓷重点实验室同事们提供的多方面帮助和支持，在此一并表示衷心感谢！

尹衍升 李 嘉

2003年7月于山东大学

目 录

第 1 章 氧化锆陶瓷概述	1
1.1 氧化锆陶瓷的类型、性能、特点及应用	1
1.1.1 氧化锆增韧陶瓷	7
1.1.2 部分稳定氧化锆	8
1.1.3 四方氧化锆多晶体	9
1.1.4 氧化锆超塑性陶瓷	9
1.1.5 氧化锆传感器	10
1.1.6 氧化锆高温发热体	11
1.1.7 氧化锆离子导电材料	12
1.1.8 ZrO_2 及 $Zr(HPO_4)_2$ 生物陶瓷	12
1.1.9 氧化锆压电衬槽	12
1.2 氧化锆陶瓷的组成与性能的关系	13
1.2.1 氧化锆添加量对复合体基体的力学性能有显著影响	13
1.2.2 ZrO_2 增韧陶瓷微观结构与断裂行为的关系	14
1.3 氧化锆陶瓷的发展趋势及存在问题	15
1.3.1 Y-TZP 陶瓷的缺陷	15
1.3.2 改进措施	20
1.3.3 氧化锆陶瓷的应用及发展趋势	22
参考文献	32
第 2 章 氧化锆陶瓷材料的结构与性能	37
2.1 晶体结构	37
2.2 晶体结合类型	39
2.2.1 晶体的结合能	40

2.2.2	陶瓷晶体结合的基本类型及特性	42
2.3	晶体的负电性	45
2.4	氧化锆陶瓷	46
2.4.1	单晶 ZrO_2 的晶体结构、多型体	46
2.4.2	氧化锆陶瓷的性能和应用	48
	参考文献	49
第3章	氧化锆陶瓷制备工艺	50
3.1	提炼氧化锆的方法	50
3.1.1	氯化 and 热分解法	50
3.1.2	碱金属氧化物分解法	50
3.1.3	石灰熔融法	50
3.1.4	等离子弧法	51
3.1.5	沉淀法	51
3.1.6	胶体法	52
3.1.7	水解法	53
3.1.8	喷雾热分解法	54
3.2	氧化锆陶瓷的粉料加工	55
3.2.1	氧化锆微细粉末的制备方法	57
3.2.2	微粉的干燥	67
3.3	氧化锆陶瓷的成型	69
3.4	氧化锆陶瓷的高温烧结过程中的热力学和动力学 问题	72
3.4.1	烧结初期的动力学特征	72
3.4.2	纳米陶瓷烧结特点	83
3.4.3	氧化锆的烧结工艺	87
3.5	氧化锆陶瓷的抗热震性及低温老化现象	89
3.5.1	氧化锆的抗热震性	89
3.5.2	氧化锆陶瓷的低温老化现象	93
3.6	氧化锆陶瓷的烧结体材料加工	97
3.7	材料专家系统设计	103

参考文献	105
第4章 氧化锆陶瓷复合材料	108
4.1 氧化锆陶瓷复合材料的研究现状与发展趋势	108
4.1.1 陶瓷材料的研究现状	108
4.1.2 复合陶瓷的发展	108
4.1.3 材料的剪裁与设计	109
4.1.4 纳米陶瓷	110
4.1.5 陶瓷基复合材料的强韧化研究	112
4.1.6 陶瓷及其复合材料发展趋势	115
4.1.7 金属间化合物/陶瓷基复合材料	118
4.1.8 对金属间化合物/陶瓷复合材料 (I/CMC) 发展趋势的几点认识	120
4.2 氧化锆陶瓷复合材料的研究方法	121
4.2.1 材料性能预测与设计	121
4.2.2 复合材料的相容性分析	125
4.2.3 复合材料的制备与性能研究方法	126
4.3 氧化锆/氧化铝陶瓷复合材料	128
4.4 氧化锆/碳化硅陶瓷复合材料	134
4.5 氧化锆/氮化硅陶瓷复合材料	137
4.6 氧化锆/碳化钛陶瓷复合材料	139
4.7 氧化锆/二硅化钼陶瓷复合材料	140
4.8 氧化锆增韧补强羟基磷灰石生物陶瓷复合材料	142
4.9 氧化锆增韧莫来石陶瓷复合材料	143
参考文献	146
第5章 铁铝金属间化合物氧化锆陶瓷复合材料	149
5.1 复合材料的化学相容性与理论设计	149
5.1.1 Fe-Al 金属间化合物的结构特点	149
5.1.2 Fe-Al 金属间化合物用做陶瓷材料增韧相的可能性	150
5.1.3 Fe-Al 金属间化合物的性能	152
5.1.4 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{ZrO}_2$ 陶瓷复合材料的化学相容性预测	159

5.2	Fe_3Al 的机械合金化合成制备	169
5.2.1	MA 过程中 $\text{Fe}-28\text{Al}$ 粉体的形貌与结构	170
5.2.2	球磨过程的显微硬度	175
5.2.3	低温退火过程中的有序转变	177
5.2.4	热压烧结 Fe_3Al 块体材料的微观结构与力学性能	182
5.3	$\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料致密化过程	188
5.3.1	原料和烧结	189
5.3.2	热压烧结致密化过程晶粒生长分析	191
5.3.3	晶粒生长与相对密度的相互关系的分析	195
5.3.4	热压过程的变形行为	197
5.4	$\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的力学性能及微观结构	203
5.4.1	$\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的力学性能	205
5.4.2	复合材料的断裂模式	208
5.4.3	复合材料的微观结构特点	209
5.4.4	$\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的界面结构	220
5.5	$\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的增韧机制	229
5.5.1	试样制备与测试	230
5.5.2	R 曲线的测定原理	231
5.5.3	$\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的增韧机理分析	233
5.5.4	R 曲线	235
5.5.5	相变增韧和桥联增韧对韧性的贡献	237
5.5.6	$\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料中闭合应力的计算	241
5.5.7	$\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料中残余应力对韧性的贡献	244
5.5.8	“晶内型” ZrO_2 、 Al_2O_3 颗粒对 Fe_3Al 的弥散强化	248
5.6	$\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的抗热震性能	253
5.6.1	复合材料的抗热震性能	255
5.6.2	$\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的抗热震参数的	

评定	256
5.6.3 R 曲线行为对材料抗热震性能的影响	257
5.6.4 压痕-淬冷法表征 $ZrO_2(3Y)/Fe_3Al$ 复合材 料的抗热震性能	259
5.6.5 用压痕-淬冷法表征抗热震性能的几点讨论	262
附录	267
参考文献	268

第 1 章 氧化锆陶瓷概述

1.1 氧化锆陶瓷的类型、性能、特点及应用

50 多年前, ZrO_2 在工业上的应用远远没有开发出来, 20 世纪 70 年代以后, 世界范围内都致力于 ZrO_2 陶瓷的研究, 原因是它在工程应用上显示出了比现代金属刚性件更优异的性能。

ZrO_2 陶瓷属于新型陶瓷, 由于它具有十分优异的物理、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, 是耐火材料、高温结构材料和电子材料的重要原料。在各种金属氧化物陶瓷材料中, ZrO_2 的高温热稳定性、隔热性能最好, 最适宜做陶瓷涂层和高温耐火制品; 以 ZrO_2 为主要原料的锆英石基陶瓷颜料, 是高级釉料的重要成分; 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, 成为重要的结构陶瓷材料; 特殊的晶体结构, 使之成为重要的电子材料; ZrO_2 的相变增韧等特性, 成为塑性陶瓷材料的宠儿; 良好的机械性能和热物理性能, 使它成为金属基复合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 的重要作用仅次于 Al_2O_3 。

自 Gupta 首次报道了四方氧化锆陶瓷 (TZP) 材料以来^[1,2], TZP 材料的研究一直方兴未艾。TZP 陶瓷是氧化锆增韧陶瓷 (ZTC) 中室温力学性能最高的一种材料, 其强度和断裂韧性分别可高达 1.5GPa 和 $15MPa \cdot m^{1/2}$ ^[3], 其硬度、耐磨性和耐化学腐蚀性也较好, 常被应用于严酷环境和苛刻负载条件, 如用做拉丝模、轴承、密封件和替代人骨, 以及发动机活塞顶、气门机构中的凸轮、玻璃纤维和磁带的切刀等^[4]。但遗憾的是, TZP 材料除了具

有陶瓷材料所固有的脆性之外，由于应力诱导相变对温度的敏感性，使高温下 $t\text{-ZrO}_2$ 的稳定性增高，导致相变增韧失效，致使材料的强度和韧性随温度上升而急剧下降^[5]。加之在低温环境下时效处理导致强度和韧性下降（低温老化）^[6]和较差的抗热震性能^[7]等缺点，大大削弱了其与传统金属材料竞争的优势，限制了其的规模开发和应用。目前国内外针对 TZP 的弱点采取了一系列措施，如利用高模量高强度的晶须、颗粒及片晶与 TZP 进行复合^[8~10]。这些措施虽在改善 TZP 材料中高温性能上取得了较好的效果，但往往伴随着室温力学性能的下降。寻求一种新的复合思路和方法，进一步改善 TZP 的综合性能，无疑对拓宽其应用领域，增加其与传统金属材料的竞争力具有重要意义。

高纯的氧化锆呈白色，较纯的 ZrO_2 呈黄色或灰色。 ZrO_2 化学性能稳定，除硫酸和氢氟酸外，对酸、碱及碱熔体、玻璃熔体和熔融金属具有很好的稳定性。热导率低、热稳定性好（部分稳定 ZrO_2 ）及高温蠕变小是 ZrO_2 陶瓷的最主要特征。 ZrO_2 陶瓷的热导率比其他陶瓷低得多。纯 ZrO_2 致密烧结体变形温度高达 $2400\sim 2500^\circ\text{C}$ ，一般工业纯 ZrO_2 生产的制品蠕变温度也达 2200°C 。所以 ZrO_2 陶瓷是高温隔热及结构材料的理想材料。 ZrO_2 陶瓷还具有极好的耐磨性，与 Al_2O_3 陶瓷相比，其磨损率为 $0:15$ ($\text{ZrO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$)。此外， ZrO_2 陶瓷化学性能稳定，还与多数熔融金属不浸润。 ZrO_2 熔点为 2715°C 。 ZrO_2 具有三种晶型：单斜、四方和立方，其密度分别为 $5.65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $6.10\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $6.27\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。可见温度越高，密度越大。因此，在同样质量下，温度越低，体积越大。实际上，人们对 ZrO_2 并不陌生，早在 20 世纪 70 年代就被用来作熔化玻璃、冶炼钢铁等的耐火材料^[12]，但用做结构材料则是在认识了 $m\rightarrow t$ 相变体积效应后的近 20 年的事^[13,14]。

如图 1-1 所示， ZrO_2 共有三种晶型^[15]，在高温段 ($>2370^\circ\text{C}$) 为立方相，在中温段 ($1200\sim 2370^\circ\text{C}$) 为四方相，在低温段 ($<950^\circ\text{C}$) 为单斜相。 ZrO_2 的四方晶型相当于萤石结构沿着 C 轴伸长而变形的晶体结构，而单斜晶则为四方晶沿着 β 角偏转一个角度而成的。三种晶

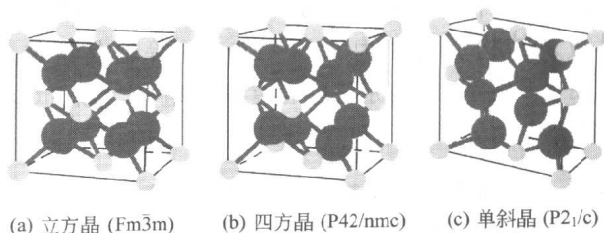


图 1-1 ZrO₂ 的三种晶型及相应的空间群^[15]

Fig. 1-1 Schematic representation of the three polymorphs of ZrO₂ and the corresponding space groups^[15]

型的 ZrO₂ 及含不同稳定剂的 ZrO₂ 的晶格常数见表 1-1^[16]。

表 1-1 三种晶型 ZrO₂ 及含不同稳定剂的 ZrO₂ 的晶格常数^[16]

Tab. 1-1 Lattice parameters of the three polymorphs of ZrO₂ and various ZrO₂-based alloy systems^[16]

材料类别	晶 格 参 数						
	a_m	a_t	a_c	b_m	b_t	c_m	β
单斜	5.118	—	—	5.214	—	5.383	81.2
四方	—	5.148	—	—	5.269	—	—
立方	—	—	5.080	—	—	—	—
9.4Mg-PSZ	5.117	5.077	5.080	5.117	5.183	5.303	98.91
8.4Ca-PSZ	5.156	5.094	5.132	5.191	5.18	5.304	98.8
12Ce-TZP	5.193	5.132	—	5.204	5.228	5.362	98.8
4.5Y-PSZ	—	5.116	5.130	—	5.157	—	—
3Y-TZP	—	5.102	—	—	5.176	—	—

ZTC 陶瓷有三种典型组织^[17]：① c-ZrO₂ 相基体上弥散分布着 t-ZrO₂ 的双组织，即 PSZ。② 细小的晶粒完全是 t-ZrO₂ 相，即 TZP。③ t-ZrO₂ 相作为增韧相分散到其他陶瓷基体，如 ZTA。其中 TZP 是 ZTC 材料中室温力学性能最高的一种材料（其力学性能见表 1-2^[18]），TZP 中又以 Y₂O₃ 作为稳定剂的 Y-TZP 应用最为广泛。TZP 材料的制备以相图（图 1-2）作指导^[19]，稳定剂 Y₂O₃ 的含量在 1.75%~3.5%（摩尔分数）范围变化。t-ZrO₂ 的含量取决

于组成、烧结温度和时间，一般在 60%~100% 之间变化。典型的 TZP 材料微观结构为粒径为 0.5~2 μm 的等轴晶组成的均匀组织^[20] (如图 1-3 所示)。当原料中含有异类组分 (如 SiO₂) 时，在界面上往往存在由异类组分和 Y₂O₃ 组成的玻璃相^[17]。

表 1-2 TZP 材料典型的物理性能^[18]
Tab. 1-2 Typical properties of TZP materials^[18]

项 目	Y-TZP	Ce-TZP
稳定剂含量(摩尔分数)/%	2~3	12~15
硬度/GPa	10~12	7~10
杨氏模量/GPa	140~200	140~200
弯曲强度/MPa	800~1300	500~800
断裂韧性/(MPa·m ^{1/2})	6~15	6~30
热膨胀系数/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	9.06~10.4	—
热导率/4.186W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹	2~3.3	—

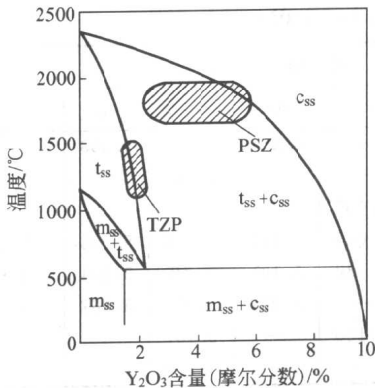


图 1-2 ZrO₂/Y₂O₃ 二元相图
中富 ZrO₂ 部分 (图中阴影部分
为商品工程陶瓷) 的组成^[19]

Fig. 1-2 ZrO₂-rich sections of the phase diagrams of ZrO₂-Y₂O₃ (Shaded areas indicate the compositions most commonly used for commercial engineering ceramics)^[19]

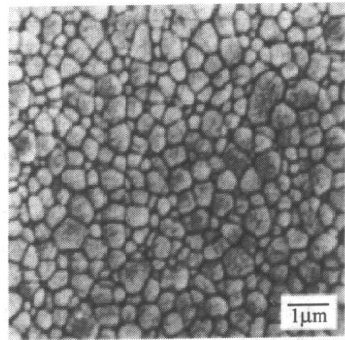


图 1-3 典型 2.5Y-TZP 的微观结构 (1400°C 烧结)^[20]

Fig. 1-3 Typical microstructures of 2.5Y-TZP sintering at 1400°C^[20]

Y-TZP 力学性能与稳定剂 Y_2O_3 的含量及 $t-ZrO_2$ 的晶粒尺寸及微观结构密切相关^[21~24]，两者通过影响 $t-ZrO_2$ 的可相变能力和相变区高度 h ，造成了不同 Y_2O_3 的含量及 $t-ZrO_2$ 的晶粒尺寸的 TZP 材料之间的性能差异。通过对晶粒尺寸、稳定剂含量的控制可获得较好的力学性能。稳定剂 Y_2O_3 含量是影响相变临界尺寸的主要因素，相变临界尺寸随着 Y_2O_3 含量的降低而降低，当 Y_2O_3 含量低于 $2mol$ 时，材料以 $m-ZrO_2$ 相为主，当 Y_2O_3 含量在 $2\% \sim 3\%$ （摩尔分数）之间时，则以 $t-ZrO_2$ 相为主，临界晶粒尺寸在 $1.0\mu m$ 左右，材料强度的峰值出现在 $2.5\% \sim 3\%$ （摩尔分数）之间，韧性峰值则在 2% （摩尔分数） Y_2O_3 左右。当稳定剂含量一定时，TZP 中决定相变增韧程度大小的可相变的 $t-ZrO_2$ 的体积分数取决于晶粒尺寸。如图 1-4 所示，随着晶粒尺寸增大，可相变的 $t-ZrO_2$ 体积分数增大，材料的断裂韧性随之增大^[22]。由此可见，晶粒尺寸较小（尤其是小于 $100nm$ ）的细晶 Y-TZP，由于 $t-ZrO_2$ 过于稳定，相变增韧效应下降，往往导致较低的断裂韧性。针对此问题，降低 TZP 中稳定剂 Y_2O_3 的含量，以降低相变临界尺寸，断裂韧性可达 $17MPa \cdot m^{1/2}$ ^[25]。此外，D. Casellas^[26] 通过对 Y-TZP 材料在 $1650^\circ C$ 热处理，得到 Y-TZP/PSZ 双相组织，稳定至室温的 $t-ZrO_2$ 的晶粒尺寸最大可达 $4\mu m$ ，相变高度和可相变体积分数显著提高。

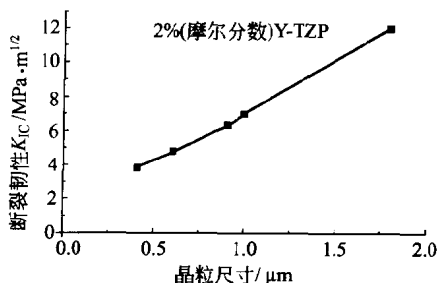


图 1-4 2Y-TZP 的晶粒尺寸与断裂韧性的关系^[22]

Fig. 1-4 The fractured toughness of 2Y-TZP as a function of the mean grain size^[22]