

先进陶瓷丛书

丛书主编 尹衍升

# 先进结构陶瓷 及其复合材料

尹衍升 陈守刚 李 嘉 编著



化学工业出版社

先进陶瓷丛书

# 先进结构陶瓷及其复合材料

丛书主编 尹衍升

尹衍升 陈守刚 李 嘉 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系《先进陶瓷丛书》之一,在综述国内外先进结构陶瓷及其复合材料研究现状的基础上,从材料学的角度,分别阐述了其结构、性能、特点及其应用,并在此基础上结合作者多年的研究成果全面系统地介绍了铁-铝金属间化合物/氧化锆陶瓷基结构复合材料的设计、制备、组织结构、性能及其相互关系等方面的研究成果,并对该类复合材料的强韧化机制进行了分析总结。

本书内容全面,结构完整,可供从事陶瓷和复合材料研究、生产及其应用开发的科技人员参考,亦可作为有关材料专业研究生用教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

先进结构陶瓷及其复合材料/尹衍升,陈守刚,李嘉  
编著. —北京:化学工业出版社,2006.6

(先进陶瓷丛书)

ISBN 7-5025-9015-3

I. 先… II. ①尹…②陈…③李… III. ①特种陶瓷  
②陶瓷复合材料 IV. TQ174.75

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第071119号

---

先进陶瓷丛书

### 先进结构陶瓷及其复合材料

丛书主编 尹衍升

尹衍升 陈守刚 李嘉 编著

责任编辑:窦臻 李晓文

责任校对:洪雅姝

封面设计:张辉

\*

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)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

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

\*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 19¼ 字数 394千字

2006年10月第1版 2006年10月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-9015-3

定价:39.00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

## 《先进陶瓷丛书》序

从远古时期到现在以至未来，材料的发展总是与人类文明的发展息息相关，这一点在现代技术发端以前往往表现得不明显，原因是在那以前材料与技术往往是同步发展的，有时材料的发展还要超前一些，因而材料的作用往往被淡化了。当今时代，尤其是进入 21 世纪以后，许多前沿技术和尖端技术的发展都要受到材料技术发展的制约，材料技术成为解决众多科学问题和发展问题的瓶颈，例如，能源技术、超导技术、航空航天技术、生命科学、生物技术、信息技术、纳米技术的实现和应用等的突破，往往都要决定于材料技术的进步。可以毫不夸张地说，当今材料技术的发展在某种程度上影响了人类文明发展的进程。

先进陶瓷，脱胎于古老的传统陶瓷，除继承了传统陶瓷无可替代的优异性能之外，又具备各种各样奇妙的结构特性和功能特性，使得先进陶瓷成为许多前沿技术领域中的关键材料，能在各种苛刻的极限环境条件下发挥重要作用，是有机高分子材料和金属材料所不可比拟的。当今社会，先进陶瓷及其技术已经渗透到各行各业，每一个从事科学研究和关心科学发展的人，不可不去了解先进陶瓷。

最近几十年，各种先进的制备工艺和技术不断发展，纳米技术也深入到先进陶瓷科学中，使得先进陶瓷的品种不断增多，结构不断改进，质量不断提高，应用不断扩大，性能更加优越。材料的发展已由传统的炒菜式研究逐渐过渡到材料设计研究。材料设计研究方法的运用，使得材料研究的空间扩大，材料研究的进程加快，材料技术的发展正在向着它的理想目标迈进，即根据预定的性能要求，设计材料组成和结构，并通过一定工艺实现这些组成和结构，随心所欲地满足人类对材料性能的要求。

在这个大背景下，为了给先进陶瓷研究工作者和无机材料专业的教师及学生（本科、研究生）提供一套完整的、最新颖的参考书，同时为从事先进陶瓷制备的一线工作者提供一套较为完备的工艺参考材料，我们编著了这套《先进陶瓷丛书》，包括《先进陶瓷导论》、《先进结构陶瓷及其复合材料》、《先进陶瓷制备工艺》、《磁性陶瓷》、《电子陶瓷》、《光功能陶瓷》共六个分册。各分册的作者，都是长期从事陶瓷生产、研究和教学工作的专家、教授和学者，具有扎实的理论知识和丰富的实

践经验。书中凝聚了他们辛勤的劳动和闪光的智慧，相信该丛书的出版将对我国先进陶瓷的研究、生产和发展起到有益的促进作用，这将是令编者感到欣慰的。

先进陶瓷的种类很多，涉及诸多领域，目前出版的这套丛书，远未涵盖先进陶瓷的方方面面，我们将继续关注各种先进陶瓷的发展技术，使得这套丛书不断完善，同时也希冀业内专家同仁，不吝赐教，共同为我国先进陶瓷科学与技术的发展做出不懈地努力！

**丛书主编识**  
**2006年6月**

# 前 言

结构陶瓷主要是指在先进陶瓷中发挥其力学、热、化学等效能的一大类材料。由于它们具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损、耐冲刷等一系列优异性能，可以承受金属材料 and 有机高分子材料难以承受的苛刻工作环境，因而成为许多新兴科学技术得以实现的关键。结构陶瓷往往在高温下作为结构材料使用，因而常称之为高温结构陶瓷或工程陶瓷，是先进陶瓷的重要生长点之一。高温结构陶瓷大致可分为两大类，一类是在大热流和 1500℃ 高温下作短时间（几秒到几十分钟）使用；另一类是在中等热流和 1200℃ 以上的高温下长时间（几百到数千小时）使用。前者用于如洲际导弹的端头、回收人造卫星的前缘、火箭尾喷管喉衬和航天飞机外蒙皮等；后者主要用于能源工程，作为各种新型热机（燃气轮机、绝热柴油机和斯特林发动机）中的耐热、耐磨部件，如燃烧室、活塞顶、涡轮转子、汽缸套以及广泛用于汽车、机械、石油化工、纺织等工业领域的耐热、耐磨损、耐腐蚀部件，如各种泵用的密封材料、轴承及轴套等。

结构陶瓷具有较高的室温强度，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，如用作拉丝模、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，但陶瓷材料所固有的脆性限制了它的规模开发和应用。

复合化是满足此条件的有效途径。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先进结构陶瓷及其复合材料的专著与教

材。因此无论从科研成果总结还是从教学角度，编著这样一部《先进结构陶瓷及其复合材料》都是很有必要的。本书在综述先进结构陶瓷及其复合材料研究现状的基础上，从材料学的角度，分别阐述了其结构、性能和特点，对复合材料的强韧化机制进行了分析总结。考虑到金属间化合物/陶瓷基结构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，所以书中难免有些不足或不当之处，在此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（编号：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；在撰写期间得到了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中国海洋大学材料学院、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。

作 者

2006年6月于中国海洋大学

# 目 录

0 绪论 .....	1
0.1 先进结构陶瓷 .....	1
0.1.1 概述 .....	1
0.1.2 先进结构陶瓷的评价技术及发展趋势 .....	5
0.1.3 结构陶瓷研究需要考虑的问题 .....	6
0.2 陶瓷复合材料的研究现状及发展趋势 .....	7
0.2.1 陶瓷复合材料的研究现状 .....	7
0.2.2 陶瓷复合材料的发展趋势 .....	7
0.2.3 陶瓷复合材料的剪裁与设计 .....	8
0.2.4 纳米陶瓷复合材料 .....	8
参考文献 .....	8
第1章 氧化锆陶瓷概述 .....	9
1.1 氧化锆陶瓷的类型、性能、特点及应用 .....	9
1.1.1 氧化锆增韧陶瓷 .....	13
1.1.2 部分稳定氧化锆 .....	13
1.1.3 四方氧化锆多晶体 .....	14
1.1.4 氧化锆超塑性陶瓷 .....	14
1.1.5 氧化锆传感器 (PZT 压电陶瓷) .....	15
1.1.6 氧化锆高温发热体 .....	16
1.1.7 氧化锆离子导电材料 .....	16
1.1.8 氧化锆及磷酸锆生物陶瓷 .....	16
1.1.9 氧化锆压电衬槽 .....	16
1.2 氧化锆陶瓷的组成与性能的关系 .....	17
1.2.1 氧化锆添加含量对复合体基体力学性能的影响 .....	17
1.2.2 氧化锆增韧陶瓷微观结构与断裂行为的关系 .....	17
1.3 氧化锆陶瓷的发展趋势及存在问题 .....	18
1.3.1 Y-TZP 陶瓷的缺陷 .....	18
1.3.2 改进措施 .....	22
1.3.3 氧化锆陶瓷的应用 .....	23
1.3.4 氧化锆陶瓷的发展趋势 .....	27



参考文献 .....	29
<b>第 2 章 氧化锆陶瓷材料的结构与性能 .....</b>	<b>33</b>
2.1 晶体结构 .....	33
2.2 陶瓷晶体结合类型与负电性 .....	35
2.2.1 晶体的结合能 .....	35
2.2.2 陶瓷晶体结合的基本类型及特性 .....	36
2.3 氧化锆陶瓷的结构与性能 .....	39
2.3.1 单晶 $ZrO_2$ 的晶体结构、多型体 .....	40
2.3.2 氧化锆陶瓷的性能和应用 .....	41
参考文献 .....	42
<b>第 3 章 氧化锆陶瓷制备工艺 .....</b>	<b>43</b>
3.1 氧化锆陶瓷的原料及提炼方法 .....	43
3.1.1 氯化热分解法 .....	43
3.1.2 碱金属氧化物分解法 .....	43
3.1.3 石灰熔融法 .....	43
3.1.4 等离子弧法 .....	43
3.1.5 沉淀法 .....	44
3.1.6 胶体法 .....	44
3.1.7 水解法 .....	45
3.1.8 喷雾热分解法 .....	45
3.2 氧化锆陶瓷的粉料加工 .....	46
3.2.1 共沉淀法 .....	47
3.2.2 溶胶-凝胶法 .....	50
3.2.3 乳浊液法 .....	52
3.2.4 蒸发法 .....	53
3.2.5 超临界合成法 .....	53
3.2.6 气相法 .....	54
3.3 氧化锆微粉的干燥 .....	55
3.3.1 直接高温煅烧 .....	55
3.3.2 冷冻干燥法 .....	55
3.3.3 超临界流体干燥 .....	55
3.3.4 溶剂置换干燥法 .....	56
3.3.5 喷雾干燥法 .....	56
3.4 氧化锆陶瓷的成型 .....	56
3.5 氧化锆陶瓷高温烧结过程中的热力学和动力学问题 .....	58

3.5.1	烧结初期的动力学特征 .....	58
3.5.2	纳米陶瓷烧结特点 .....	66
3.5.3	氧化锆的烧结工艺 .....	68
3.6	氧化锆陶瓷的抗热震性及低温老化现象 .....	70
3.6.1	氧化锆陶瓷的抗热震性 .....	70
3.6.2	氧化锆陶瓷的低温老化现象 .....	72
3.7	氧化锆陶瓷的烧结体材料加工 .....	75
	参考文献 .....	79
<b>第4章</b>	<b>氧化铝陶瓷概述 .....</b>	<b>81</b>
4.1	氧化铝陶瓷的类型和性能 .....	81
4.2	氧化铝陶瓷组成与性能的关系 .....	82
4.2.1	瓷料高温下的挥发 .....	82
4.2.2	原料杂质对瓷料性能的影响 .....	83
4.2.3	高铝瓷的组成和性能 .....	84
4.2.4	红紫色氧化铝瓷 .....	87
4.2.5	黑色 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷的组成和性能 .....	87
4.3	氧化铝陶瓷的应用、金属化及其发展 .....	89
4.3.1	氧化铝陶瓷的应用 .....	89
4.3.2	氧化铝陶瓷的金属化 .....	89
4.3.3	高铝瓷的现状与发展 .....	91
	参考文献 .....	94
<b>第5章</b>	<b>氧化铝陶瓷材料的结构与性能 .....</b>	<b>95</b>
5.1	氧化铝陶瓷的晶型转变 .....	95
5.1.1	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷 .....	95
5.1.2	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷 .....	95
5.1.3	$\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷 .....	96
5.2	氧化铝陶瓷中的离子排列 .....	98
5.3	氧化铝陶瓷的晶体缺陷 .....	100
5.4	制备过程中的物理化学 .....	101
5.4.1	氧化铝陶瓷增强铁-铝金属间化合物的界面润湿现象 .....	101
5.4.2	氧化铝陶瓷的热学性能和抗热震性 .....	103
	参考文献 .....	109
<b>第6章</b>	<b>氧化铝陶瓷的制备与加工 .....</b>	<b>110</b>
6.1	氧化铝陶瓷的原料 .....	110

6.2 氧化铝陶瓷的粉料加工 .....	111
6.2.1 原料的颗粒度与粉碎 .....	111
6.2.2 氧化铝粉料的活性及其表面能 .....	115
6.3 氧化铝陶瓷的成型 .....	119
6.3.1 氧化铝陶瓷粉料的配料与制备 .....	119
6.3.2 氧化铝粉料成型方案分类 .....	120
6.4 氧化铝陶瓷的高温烧结过程 .....	122
6.4.1 氧化铝陶瓷烧结概论 .....	123
6.4.2 氧化铝陶瓷的烧结工艺方法 .....	125
6.5 氧化铝陶瓷的加工 .....	127
6.5.1 氧化铝晶体的塑性变形 .....	127
6.5.2 氧化铝陶瓷材料的蠕变 .....	128
6.5.3 氧化铝陶瓷材料的普通加工工艺 .....	128
参考文献 .....	128
<b>第7章 氮化物陶瓷 .....</b>	<b>129</b>
7.1 氮化硅陶瓷 .....	129
7.1.1 概况 .....	129
7.1.2 粉体制备工艺 .....	129
7.1.3 氮化硅陶瓷制造工艺 .....	130
7.1.4 氮化硅纤维与氮化硅晶须 .....	131
7.1.5 氮化硅陶瓷的应用 .....	134
7.2 赛龙 .....	134
7.2.1 概况 .....	134
7.2.2 赛龙分类及其特性 .....	134
7.2.3 赛龙纤维 .....	136
7.3 氮化铝陶瓷 .....	136
7.3.1 概况 .....	136
7.3.2 氮化铝粉末制备 .....	137
7.3.3 氮化铝陶瓷的应用 .....	138
7.4 氮化硼陶瓷 .....	138
7.4.1 概况 .....	138
7.4.2 氮化硼粉末制备 .....	139
7.4.3 氮化硼陶瓷制造工艺 .....	140
7.4.4 氮化硼纤维 .....	140
7.4.5 氮化硼陶瓷的应用 .....	141
7.5 氮化钛陶瓷 .....	142

7.5.1	概况 .....	142
7.5.2	氮化钛粉末制备 .....	143
7.5.3	氮化钛陶瓷的用途 .....	144
	参考文献 .....	145
<b>第8章</b>	<b>氧化铝陶瓷复合材料</b> .....	<b>146</b>
8.1	陶瓷基复合材料概论 .....	146
8.1.1	陶瓷复合材料的剪裁与设计 .....	146
8.1.2	纳米级陶瓷复合材料 .....	147
8.1.3	陶瓷复合材料的强韧化研究 .....	147
8.1.4	陶瓷及其复合材料的发展趋势 .....	150
8.1.5	金属间化合物/陶瓷基复合材料 .....	152
8.2	铁-铝金属间化合物的特点 .....	153
8.2.1	铁-铝金属间化合物的结构特点 .....	153
8.2.2	铁-铝金属间化合物用作氧化铝陶瓷材料增韧相的可能性 .....	154
8.2.3	铁-铝金属间化合物的性能 .....	155
8.3	$\text{Fe}_3\text{Al}$ 的机械合金化合成制备 .....	160
8.3.1	机械合金化过程中 $\text{Fe-28Al}$ 粉体的形貌与结构 .....	162
8.3.2	球磨过程的显微硬度 .....	165
8.3.3	低温退火过程中的有序转变 .....	166
8.3.4	热压烧结 $\text{Fe}_3\text{Al}$ 块体材料的微观结构与力学性能 .....	170
8.4	铁铝金属间化合物/氧化铝陶瓷复合材料 .....	174
8.4.1	铁-铝/氧化铝复合材料制备 .....	174
8.4.2	铁-铝/氧化铝复合材料的组织及界面微结构 .....	179
8.4.3	氧化铝陶瓷基体的位错组态 .....	185
8.4.4	复合材料的界面润湿状况分析 .....	187
8.4.5	复合材料的界面微结构 .....	188
8.4.6	复合材料的调幅结构 .....	189
8.4.7	$\text{Fe}_3\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷复合材料的宏观性能预测及发展趋势 .....	189
8.5	钛-铝/氧化铝陶瓷基复合材料 .....	195
8.5.1	成分设计 .....	195
8.5.2	粉体制备 .....	195
8.5.3	烧结工艺 .....	195
8.5.4	材料性能 .....	195
8.5.5	复合材料的微观结构 .....	198
8.5.6	小结 .....	200
8.6	镍-铝/氧化铝复合材料 .....	201

8.6.1 镍-铝/氧化铝复合材料的制备工艺研究 .....	202
8.6.2 镍-铝/氧化铝复合材料的性能与微观结构 .....	203
参考文献 .....	209
<b>第9章 氧化锆陶瓷复合材料 .....</b>	<b>214</b>
9.1 氧化锆陶瓷复合材料的研究方法 .....	214
9.1.1 复合材料的性能预测理论与方法 .....	214
9.1.2 材料性能预测的 EET .....	215
9.1.3 复合材料的相容性分析 .....	216
9.2 氧化锆/氧化铝陶瓷复合材料 .....	217
9.3 氧化锆/碳化硅陶瓷复合材料 .....	221
9.4 氧化锆/氮化硅陶瓷复合材料 .....	223
9.5 氧化锆/碳化钛陶瓷复合材料 .....	224
9.6 氧化锆/二硅化钼陶瓷复合材料 .....	225
9.7 氧化锆增韧补强羟基磷灰石生物陶瓷复合材料 .....	226
9.8 氧化锆增韧莫来石陶瓷复合材料 .....	227
9.9 铁铝金属间化合物/氧化锆陶瓷复合材料 .....	229
9.9.1 铁铝金属间化合物用作氧化锆增韧相的可能性 .....	229
9.9.2 $\text{Fe}_3\text{Al}/\text{ZrO}_2$ 陶瓷复合材料的化学相容性预测 .....	230
9.9.3 $\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料致密化过程 .....	234
9.9.4 $\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的力学性能 .....	244
9.9.5 $\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的微观结构特点 .....	248
9.9.6 $\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的界面结构 .....	257
9.9.7 $\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的增韧机制 .....	264
9.9.8 $\text{ZrO}_2(3\text{Y})/\text{Fe}_3\text{Al}$ 复合材料的抗热震性能 .....	281
参考文献 .....	290

# 0 绪 论

## 0.1 先进结构陶瓷

### 0.1.1 概述

结构陶瓷主要是指先进陶瓷中发挥其机械、热、化学等效能的一大类材料。由于它们具有耐高温、耐腐蚀、耐磨损、耐冲刷等一系列优异性能，可以承受金属材料 and 有机高分子材料难以承受的苛刻工作环境，因而成为许多新兴科学技术得以实现的关键。结构陶瓷往往在高温下作为结构材料使用，因而常称为高温结构陶瓷或工程陶瓷，是先进陶瓷的重要生长点之一。

按使用领域分类，结构陶瓷可分为：

- (1) 机械陶瓷，主要利用其高硬度、高耐磨特性，如机械零件、轴；
- (2) 热机陶瓷，又称发动机用陶瓷，主要利用其耐热、耐磨损及高强、高韧特性，如车用耐磨、轻量陶瓷部件、隔热、耐热部件、燃气轮机叶片、活塞顶、镶块等；
- (3) 生物化工陶瓷，利用耐腐蚀特性以及与生物团接触化学稳定性好等特性，如冶炼有色金属及稀有金属的坩埚、热交换器、生物陶瓷等；
- (4) 核陶瓷及其它，利用其特有的俘获和吸收中子特性，可作为各种核反应堆的结构材料使用，以及与人民生活相关的如陶瓷剪刀、无磁调试工具、高尔夫球杆以及陶瓷阀片及其组合件等。

按组分分类，结构陶瓷又可分为：

- (1) 氧化物陶瓷，如氧化铝陶瓷、氧化锆陶瓷、莫来石陶瓷、氧化钙陶瓷、氧化锶陶瓷、锆英石陶瓷等；
- (2) 氮化物陶瓷，如氮化硅陶瓷、赛龙 (sialon)、氮化铝陶瓷、氮化硼陶瓷等；
- (3) 碳化物陶瓷，如碳化硅陶瓷、碳化硼陶瓷等；
- (4) 硼化物陶瓷，如硼化物陶瓷、硼化锆陶瓷等。

由此可见，组成结构陶瓷的元素，如硅、硼、碳、氧、氮、铝均为地壳中含量最多的，这也是结构陶瓷用作发动机部件和取代镍、钴、铬等战略金属而显示其生命力的地方。

#### 结构陶瓷在国民经济中的地位和作用

与其它新材料一样，结构陶瓷已成为现代高新技术、新兴产业和传统工业技术改造的物质基础，也是发展现代军事技术和生物医学所不可缺少的材料。其主要作

用有以下几个方面。

(1) 对科学技术发展的作用 空间技术中宇宙飞船所需的热防护系统要求能承受高温和温度急变、隔热性好、强度高、质量轻、使用寿命长,在这方面,结构陶瓷占有绝对优势。从第一艘宇宙飞船起即开始使用的耐高温与低温的隔热瓦。发射和回收人造地球卫星用的碳-石英复合烧蚀材料等均为结构陶瓷。未来空间技术的发展将更依赖于新型结构材料的应用,要求其使用温度高、比强度大,在这方面结构陶瓷,尤其是陶瓷基复合材料和碳/碳复合材料远远优于其它材料(图 0-1),并正在迅速发展。

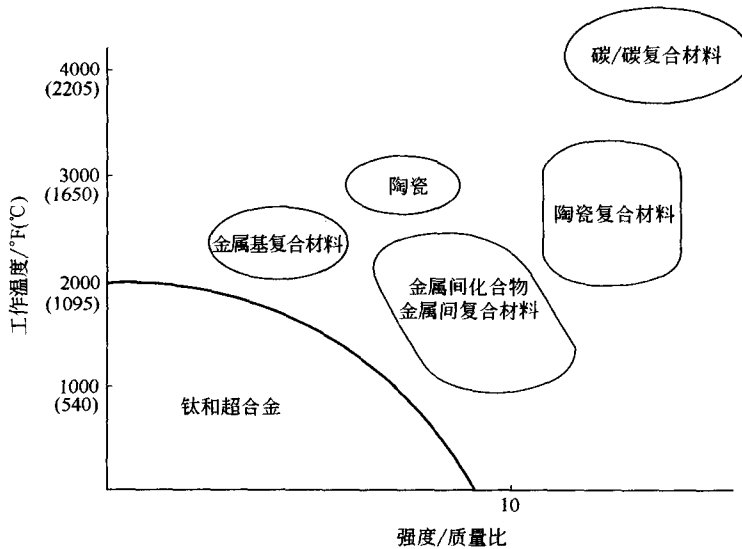


图 0-1 各种先进高温结构材料的使用温度与强度/质量比较

(2) 对建立和发展高新技术产业的作用 光通信工业是目前发展最为迅速的高新技术产业之一,它形成于 20 世纪 80 年代,全世界年产值已超过 30 多亿美元。其发展如此迅速,主要依赖于光纤损耗机理的研究以及光纤接头处结构材料的使用。以微电子技术为基础的电子工业,随半导体器件的高密度化和大功率化,单位面积的发热量也愈来愈大。以高密度组装的大规模集成电路为例,在一块  $1\text{m}^2$  的基板上,容纳 100 个晶体管,而每个晶体管耗电  $1\text{mW}$ ,则  $10\text{cm}^2$  的基板就耗电  $1000\text{W}$ ,所以散热是一大问题。80 年代中后期研制成功的高导热性的氮化铝 ( $\text{AlN}$ ) 和碳化硅 ( $\text{SiC-101}$ ) 基板材料,将逐步取代氧化铝基板。

结构陶瓷传统上被认为是脆性的,不耐冲击,不宜作机械部件,这些缺点,经过近一二十年研究,已经有了显著的改进。现已形成包括氮化硅系统、碳化硅系统和氧化锆、氧化铝增韧系统的高温结构陶瓷及陶瓷基复合材料的两大系列的结构陶瓷,并作为热机部件、切削刀具、耐磨损面腐蚀部件进入机械工业、汽车工业、化学工业、造纸工业、纺织工业等传统工业领域,推动产品更新换代。

高温结构陶瓷在热机上的应用是 20 世纪 80 年代初中期兴起的陶瓷热的焦点。如图 0-2 所示, 高温燃气轮机的热效率和比功率随运行温度的升高而提高。曲线 4 是理想的无冷却的高温燃气轮机热效率曲线, 它的比功率和热效率均高于其它条件下的比功率和热效率。此外, 陶瓷部件还可降低热机重量、减少摩擦、耐磨损、耐腐蚀, 有利于减少燃料消耗, 提高使用寿命。至今虽然已有电热塞、涡流室镶块、涡轮增压器转子、排气管内衬等部件产业化, 但陶瓷热机仍处在研究发展阶段, 不仅要提高材料的韧性和强度, 而且还须保证长期反复使用的重复性、可靠性以及在成本效益上具有竞争力。

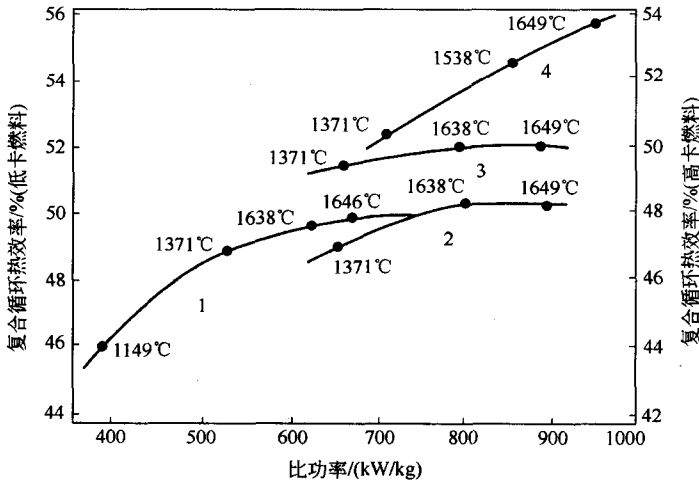


图 0-2 高温燃气轮机的热效率

回收废热的高温热交换器是高温结构陶瓷具有特色的一个重要应用。通常, 金属热交换器的工作温度只可使用在  $1100^{\circ}\text{C}$ , 燃料节省率仅为  $20\% \sim 30\%$ ; 而陶瓷热交换部件, 如碳化硅工作温度可提高至  $1370^{\circ}\text{C}$ , 燃料节省率高达  $50\%$ 。陶瓷耐腐蚀、耐磨损, 也可以用于含硫量高的腐蚀性环境。总之, 在热交换器这个领域中, 结构陶瓷应用前景诱人, 至今已在炼钢工业以及其它金属冶炼工业中使用。

高性能陶瓷刀具是首先商品化的一种结构陶瓷。由于美国成功用于高速切削、寿命延长而提高生产率, 每年节约成本达 12 亿美元, 预计到 2005 达 80 亿美元。用于机械、化工等方面的耐磨损、耐腐蚀部件, 例如密封环、轴承、喷嘴、内衬等也是结构陶瓷应用的主要领域。此外, 结构陶瓷用作金属热挤压模也显示其优越性。例如, 用部分稳定氧化锆制成的挤压模较之碳化物挤压模能使使用寿命提高  $350\%$ , 生产效率提高  $300\%$ , 而成本下降  $50\%$ 。

(3) 在节约资源和节能方面的作用 能源是国家的命脉, 节约资源和节能是 21 世纪人类面临的两大问题之一, 在这方面, 高性能结构陶瓷正在发挥日益重要的作用。使用先进陶瓷热交换器, 例如碳化硅热交换器工作温度可在  $1100^{\circ}\text{C}$  以上,



与传统的金属热交换相比可降低燃料消耗 40%~50%；陶瓷发动机将可节约燃料 10%~20%。目前正努力将先进结构陶瓷部件用于发电用的燃气轮机的转子、定子和燃烧室等部位，以求取得更大的节能效果。

(4) 在巩固国防、发展军用技术方面的作用 国防工业、军用技术历来是新材料、新技术的主要推动者和相应用者。在 20 世纪 80 年代末的海湾战争中，多国部队获胜的一个重要因素就是高技术武器装备的大量广泛应用。在武器和军用技术的发展方面，高性能结构陶瓷占有举足轻重的作用，往往成为发展军用技术的支撑材料和先导材料。在无机结构材料方面，马赫数大于 2 超音速飞机，其成败将取决于具有高韧性和高可靠性的结构陶瓷和陶瓷纤维补强的陶瓷基复合材料的研制成功和应用。为此美国国防部从 20 世纪 70 年代末起迅速增加陶瓷基复合材料研究发展经费，使其在全部复合材料研究发展经费中所占的比例从以往的 6% 猛增至近几年的 42%。以氧化铝陶瓷为代表的陶瓷装甲可以抵御穿甲弹的破坏，在美国已用于装备直升机，现正扩展至军用车辆和制成防弹衣；另外，各种导弹和飞船用的端头帽，如具有中国特色的碳-石英抗烧蚀用端头帽是最为成功使用的陶瓷基复合材料之一。

(5) 在生物医学方面的地位和作用 用于生物医学方面的结构陶瓷通常称之为生物陶瓷。一方面须满足相应人体组织或器官功能的要求，另一方面又须与周围组织的生理、生化特征相容。碳、氧化铝、羟基磷酸钙及其复合材料已应用于牙齿种植、人工膝关节等。日本精细陶瓷联合调查委员会曾预测，20 世纪 90 年代以后日本生物陶瓷市场年增长率为 36%，居各种无机材料之首。这是因为随着人们生活提高，对生物陶瓷的需求将日益增加的缘故。值得注意的是，生物陶瓷另一类很重要的应用是用作药物载体，或具有某种治疗功能的材料，这是 20 世纪 80 年代出现的新型药物缓释系统载体，并已在临床研究中试用。

#### 结构陶瓷的发展趋势和市场预测

结构陶瓷的致命缺点是脆性、低可靠性和重复性差。近一二十年围绕这些关键问题开展了深入的基础研究，取得了突破性进展。纵观结构陶瓷研究现状及其发展趋势有以下方面。

(1) 多相复合陶瓷 当前结构陶瓷研究与开发已从原先倾向于单相和高纯度的特点向多相复合的方向发展。其中包括纤维（或晶须）补强的陶瓷基复合材料；自补强复相陶瓷，亦称为原位生长复相陶瓷；梯度功能复合陶瓷以及纳米复相陶瓷，例如，SiC-TiC 纳米复合陶瓷的断裂韧性可达  $16\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，与铸铁的韧性相当； $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC 纳米复合陶瓷在  $1100^\circ\text{C}$  仍保持  $1500\text{MPa}$  的高强度。结构陶瓷的研究与开发正在从目前微米级的尺度（从粉体到显微结构）向纳米级尺度发展。其晶粒尺寸、晶界宽度、第二相分布、气孔尺寸以及缺陷尺寸都属于纳米量级。为了得到纳米陶瓷，必须制备相应的，甚至更细的陶瓷粉末，一般的制备方法已不能适应，从而使化学沉淀法、金属有机化合物水解法、化学气相反应法等新的粉料制备方法应运而生。由于纳米陶瓷晶粒细化有助于晶粒间的滑移，因而使材料具有超塑性行为。也因晶粒细化从而会引起材料中内在气孔或缺陷尺寸减少，当气孔或微缺陷尺