

先进陶瓷丛书

丛书主编 尹衍升

先进陶瓷制备工艺

王 昕 田进涛 编著



化学工业出版社

先进陶瓷丛书

丛书主编 尹衍升

先进陶瓷制备工艺

王 昕 田进涛 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书以材料制备基础知识与理论为基础,针对先进陶瓷粉体、先进陶瓷固体材料、先进陶瓷复合材料等,系统地介绍了国内外常用及最新前沿制备技术与工艺,包括制备原理、工艺路线、技术特点、实用举例。先进陶瓷粉体制备技术既涉及常用粉体制备技术,又涵盖了纳米陶瓷粉体制备技术。先进陶瓷固体材料制备技术是全书的重点,本书从粉体预处理、固体成型、固体烧结三个方面进行了详细介绍。本书最后对先进陶瓷复合材料、多孔材料以及先进陶瓷的加工等技术进行了介绍。

本书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,也可作为大专院校材料及相关专业的教材或学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

先进陶瓷制备工艺/王昕,田进涛编著. —北京:化学工业出版社,2009.1

(先进陶瓷丛书)

ISBN 978-7-122-03865-4

I. 先… II. ①王…②田… III. 陶瓷-生产工艺 IV. TQ174.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第160064号

责任编辑: 窦 臻

文字编辑: 林 媛

责任校对: 宋 夏

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张13 字数273千字 2009年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

《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的努力！

丛书主编识

前 言

陶瓷是一种与人类生活和生产密切相关的材料，包括传统陶瓷和先进陶瓷。较之以天然硅酸盐矿物为原料经过粉碎加工、成型、烧结等过程得到的传统陶瓷制品，先进陶瓷是采用纯度很高的人工合成化合物，通过恰当的结构设计、精确的化学计量、合适的成型方法和烧成制度，并经过加工处理得到的高性能陶瓷。由于在原材料、制备工艺、制品微观结构和性能等方面的先进性，先进陶瓷材料在性能的综合性、实用性、可设计性方面具有很大的发展潜力，虽然其整个发展历史只有半个多世纪，但其优异的力学性能和各种光、电、声、磁性能，已在各个行业领域如石油、化工、钢铁、电子、纺织和汽车等行业以及航空、航天等高科技领域都有着广泛的应用前景。

对于给定的材料，其性能往往取决于内部结构。只有改变了材料内部结构才能达到改变或控制材料性能的目的。材料的制备技术与工艺常常对材料的结构进而对性能起着决定性的作用。一般来讲，基于经验性的传统陶瓷的制备工艺比较稳定，侧重于效率及制品质量控制，对材料显微结构的要求并不十分严格。先进陶瓷材料的制备技术是在传统陶瓷制备技术的基础上不断探索总结而发展起来的，其在粉体制备、成型与烧结方面采取了许多特殊的措施进行材料显微结构的控制，以期获得性能优异的先进陶瓷制品。特别是，对先进陶瓷而言，由于烧结过程伴随有致密化、晶粒生长、晶界形成、气孔尺寸变化等多个因素，并且这些因素之间相互干扰，使得最后烧成品的性能不仅与烧结过程有关，而且也与烧前生坯及粉体性能有密切关系，从而赋予先进陶瓷材料性能对制备技术与工艺的很强依赖性。

鉴于先进陶瓷材料的性能极大地依赖于其制备技术与工艺，笔者结合多年从事先进陶瓷材料研究的实践与成果，在参考国内外相关领域研究成果的基础之上，编著了本书。本书第1章概述了传统陶瓷、先进陶瓷及其制备方法。第2章介绍了陶瓷制备技术基础知识，包括晶体学知识、相图与相变、扩散、胶体化学等基础知识及其在先进陶瓷制备过程中的作用，为后续的内容介绍奠定了理论基础。第3章在介绍粉体特性与表征知识基础之上，详述了先进陶瓷粉体制备技术，特别是纳米陶瓷粉体的制备技术与工艺。第4章的先进陶瓷固体材料制备技术是本书的重点，分别从粉体预处理、固体成型、固体烧结三个方面进行了相关制备技术与工艺的详细介绍。在第5章、第6章分别对先进陶瓷复合材

料、多孔材料的制备技术与工艺进行了介绍，第7章介绍了先进陶瓷的加工技术。

笔者在充分调研相关资料的基础之上，对本书的编著进行了细致的规划与设计。在全书框架结构的安排上，本书开篇介绍了与材料制备密切相关的基础知识与理论，为后续制备技术的介绍奠定基础；在制备技术内容的取舍方面，本书既介绍了一般常用制备技术及其原理与特点，又详细介绍了国内外相关领域的最新前沿制备技术细节及其特点；在制备技术介绍的细节方面，本书尽可能地遵循了制备原理、工艺路线、技术特点、实用举例的行文思路，并尽可能地配以原理示意图、工艺路线图等；在全书内容的语言表述方面，在保持科学术语的正确性与严谨性的前提之下，力求做到内容阐述深入浅出、语言表述精练简洁。因此，本书具有理论与实践并重、知识体系介绍全面、内容阐述思路清晰、语言表述精练简洁的特点。本书可用于大专院校材料及邻近专业的教师或学生作为教材或学习参考书，也可作为相关领域科研及工程技术人员从事科学研究、工程开发的参考用书。

本书在编著过程中参考了大量国内外相关研究领域的研究成果（见参考文献），在此谨向本书所引用参考文献的原作者表示敬意和感谢。同时，在本书编著过程中，多位同行专家提出了宝贵意见，多位研究生参与了资料收集与整理工作，特向他们表示衷心感谢。由于笔者的理论与实践水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请各位读者批评指正。

王 昕 田进涛

2008年10月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 陶瓷材料概述	1
1.1.1 陶瓷的概念及分类	1
1.1.2 传统陶瓷材料	1
1.1.3 先进陶瓷材料	3
1.1.4 常见先进陶瓷材料简介	5
1.2 陶瓷材料制备技术概述	8
1.2.1 传统陶瓷材料制备技术	8
1.2.2 先进陶瓷材料制备技术	10
1.2.3 陶瓷材料的加工	11
参考文献	14
第 2 章 陶瓷制备基础知识	16
2.1 晶体结构与晶体缺陷	16
2.1.1 晶体学基础知识	16
2.1.2 晶体结构	18
2.1.3 晶体缺陷	20
2.1.4 晶体缺陷在先进陶瓷材料制备过程中的作用	22
2.2 相图与相变	22
2.2.1 热力学基础知识	22
2.2.2 相图	23
2.2.3 相变	25
2.2.4 相图与相变在先进陶瓷材料制备过程中的作用	27
2.3 扩散	27
2.3.1 扩散定律及其方程	27
2.3.2 扩散机制及扩散系数	28
2.3.3 影响扩散的因素	29
2.3.4 扩散在先进陶瓷材料制备过程中的作用	30
2.4 胶体化学	31
2.4.1 胶体化学基础知识	31
2.4.2 陶瓷浆料的胶体性质	33
2.4.3 胶体化学在先进陶瓷材料制备过程中的作用	34
参考文献	35

第 3 章 先进陶瓷粉体制备技术	36
3.1 先进陶瓷粉体的特性	36
3.1.1 陶瓷粉体的概念及分类	36
3.1.2 先进陶瓷粉体的基本特性	36
3.1.3 纳米陶瓷粉体的特性	38
3.2 先进陶瓷粉体的表征	39
3.2.1 粒度及其分布	39
3.2.2 显微形貌分析	44
3.2.3 成分及物相分析	46
3.3 先进陶瓷粉体的制备技术	48
3.3.1 机械法	48
3.3.2 物理法	50
3.3.3 化学法	52
3.3.4 纳米陶瓷粉体的制备技术	60
3.3.5 陶瓷粉体的表面修饰	66
参考文献	68
第 4 章 先进陶瓷固体材料制备技术	70
4.1 陶瓷粉体预处理	70
4.1.1 粉体清洗	70
4.1.2 粉体预烧	70
4.1.3 配料及混合	71
4.1.4 坯料塑化	71
4.1.5 造粒	72
4.2 固体成型	73
4.2.1 干法成型	73
4.2.2 湿法成型	79
4.2.3 原位凝固成型	94
4.2.4 快速无模成型	103
4.2.5 成型技术展望	113
4.3 固体烧结	114
4.3.1 烧结基础知识	114
4.3.2 晶粒生长与二次再结晶	124
4.3.3 常压烧结	127
4.3.4 压力烧结	129
4.3.5 反应烧结	130
4.3.6 气氛加压烧结	132

4.3.7	等离子烧结	132
4.3.8	微波烧结	133
4.3.9	自蔓延高温烧结	135
4.3.10	爆炸烧结	136
	参考文献	137
第5章 先进陶瓷复合材料的制备技术		140
5.1	概述	140
5.1.1	先进陶瓷复合材料概念及分类	140
5.1.2	先进陶瓷复合材料性能特点及应用	141
5.2	先进陶瓷复合材料增强体的制备	142
5.2.1	碳纤维及其预成型体的制备	142
5.2.2	碳化硅及氧化铝纤维的制备	144
5.2.3	晶须的制备	144
5.3	先进陶瓷复合材料常用制备技术	145
5.3.1	粉末冶金法和浆体法	145
5.3.2	溶胶-凝胶法和聚合物先驱体热解法	145
5.3.3	反应烧结法和直接氧化法	147
5.3.4	熔体浸渗法	148
5.3.5	化学气相渗透法	148
5.3.6	先驱体转化-活性填料法	150
5.4	碳/碳复合材料制备	151
5.4.1	碳/碳复合材料制备技术	151
5.4.2	碳/碳复合材料的防氧化	153
	参考文献	154
第6章 先进陶瓷多孔材料制备技术		156
6.1	概述	156
6.1.1	先进陶瓷多孔材料及分类	156
6.1.2	先进陶瓷多孔材料性能特点及应用	156
6.2	先进陶瓷多孔材料制备技术	158
6.2.1	添加造孔剂法	158
6.2.2	有机泡沫体浸渍法	159
6.2.3	发泡法	161
6.2.4	溶胶-凝胶法	162
6.2.5	其它制备技术	165
6.2.6	常用多孔陶瓷材料制备技术比较	168
	参考文献	169

第7章 先进陶瓷材料加工技术	170
7.1 陶瓷材料的可加工性	170
7.1.1 陶瓷材料可加工性的影响因素	170
7.1.2 陶瓷材料可加工性差的理论基础	171
7.1.3 陶瓷磨削的材料去除机理	172
7.2 可加工陶瓷	176
7.2.1 可加工陶瓷研究背景及其进展	176
7.2.2 可加工陶瓷的性能	179
7.2.3 可加工陶瓷的可加工机理	180
7.2.4 可加工陶瓷的微观结构设计	181
7.2.5 陶瓷可加工性能的特征	182
7.3 先进陶瓷材料加工技术	183
7.3.1 传统机械加工技术	183
7.3.2 特殊加工技术	184
7.3.3 陶瓷的超精密加工技术	188
7.4 先进陶瓷材料的热处理	191
7.4.1 先进陶瓷的退火	191
7.4.2 先进陶瓷的化学热处理	192
参考文献	192

第 1 章 概 述

1.1 陶瓷材料概述

1.1.1 陶瓷的概念及分类

1.1.1.1 陶瓷的概念

陶瓷是一种与人类生活和生产密切相关的材料。随着生产力的不断发展和科学技术的不断提高,各个历史阶段赋予“陶瓷”的概念及范畴在不断变化,尤其是先进陶瓷出现后,侧重于传统陶瓷的定义已不再适用。从广义上讲,陶瓷材料是指除有机和金属材料之外的所有其它材料,即无机非金属材料。从狭义上讲,陶瓷材料主要指多晶的无机非金属材料,即经过高温热处理所合成的无机非金属材料。现代分析技术对陶瓷制品的分析结果表明:陶瓷是一种由若干晶相和玻璃相组成的混合物,其中的每一相都有许多不同的组成,这些组成主要属于无机非金属材料。因此,有些国家把由无机非金属材料作为基本组分组成的固体制品称作陶瓷。国际上常将无机非金属材料称为陶瓷材料。

1.1.1.2 陶瓷的分类

人们习惯将陶瓷分为两大类,即传统陶瓷和先进陶瓷。传统陶瓷是以天然硅酸盐矿物为原料(黏土、长石、石英等),经过粉碎加工、成型、烧结等过程得到的制品,因此又叫硅酸盐陶瓷。先进陶瓷是采用纯度较高的人工合成化合物(如 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 SiC 、 Si_3N_4 、 BN),通过恰当的结构设计,精确的化学计量,合适的成型方法和烧成制度,并经过加工处理得到的无机非金属材料。按照坯体吸水率不同,传统陶瓷可分为陶器(吸水率 $>8\%$)、炆器(吸水率 $0.5\% \sim 8\%$)和瓷器(吸水率 $<0.5\%$)三大类。由于组成、性能、工艺及用途各不相同,上述两大类陶瓷又可细分为许多品种,见表 1-1。

1.1.2 传统陶瓷材料

1.1.2.1 传统陶瓷发展简史

我国传统陶瓷生产不仅历史久远且成就辉煌。早在商代,我国就有了陶器,以彩陶文化和黑陶文化为史前代表;殷周时代,发明了釉料和釉陶,并出现了原始瓷器;东周时期出现了真正的瓷器,产品烧成温度较高;汉代出现了铅釉窑和青釉窑;到了东汉中后期出现了青瓷;唐代以越窑青瓷和邢窑白瓷及唐三彩为代表;宋代五大窑产品及高半透明度瓷器闻名于世,并出现兔毫、油滴等名贵瓷釉;南宋后,彩瓷发展很快;从明代开始,以景德镇为瓷业中心,以绢云母质瓷为代表;清代吸纳众家所长,出现了青花、粉彩、祭红等世人关注的名贵瓷釉;从清代至新中国成立前,我国陶瓷工业开始衰落,品种少、质量差、技术落后,部分技艺失传。

新中国成立后陶瓷工业受到了很大的重视,使陶瓷工业得到了恢复并迅速发展,产量较新中国成立前夕有了数十倍的增长,品种上更是推陈出新,百花齐放;

表 1-1 陶瓷的分类

普通陶瓷	特种陶瓷				
	按性能分类	按化学组成分类			
		氧化物陶瓷	氮化物陶瓷	碳化物陶瓷	复合陶瓷
日用陶瓷 建筑陶瓷 绝缘陶瓷 化工陶瓷 多孔陶瓷	高强度陶瓷 高温陶瓷 耐磨陶瓷 耐酸陶瓷 压电陶瓷 电介质陶瓷 光学陶瓷 半导体陶瓷 磁性陶瓷 生物陶瓷	氧化铝瓷 氧化锆瓷 氧化镁瓷 氧化铍瓷	氮化硅瓷 氮化铝瓷 氮化硼瓷	碳化硅瓷 碳化硼瓷	镁铝尖晶石瓷 锆钛酸铝钨瓷

陶瓷的生产方式也进行了多方面的技术革新，原料加工已基本上机械化，并部分自动化，成型已普遍推广机械滚压；干燥采用了定向集中气流强化干燥，并部分采用红外、微波等干燥新技术；烧成已普遍使用隧道窑、梭式窑、推板窑、辊道窑等并带不同程度的自控装置，燃料也因地制宜地用煤或煤气、重油、天然气、电、液化石油气等。总的来说，新工艺、新技术、新设备不断涌现，新品种、新造型、新装饰日新月异。

1.1.2.2 从传统陶瓷到先进陶瓷

在一个相当长的历史时期，陶瓷的发展主要靠工匠们技艺的传授，缺乏科学的指导，没有上升为一门科学。产品也主要是为了满足日用器皿和建筑材料的需要。20 世纪以来，高新技术迅猛发展，传统意义上的陶瓷已远远不能满足交通运输、化工冶金、能源、通信、电子学和航天发展所需的新材料。为了区别于传统概念上的陶瓷，人们把具有各种功能——机械、热、声、电、磁、光、超导等的陶瓷统称为先进陶瓷。

先进陶瓷整个发展史只有半个多世纪，但是由于一系列新材料的开发，各种功能的新材料层出不穷，为高科技和各个工业领域提供了一系列高性能材料。可从表 1-2 陶瓷中氧化铝含量的变化来看先进陶瓷的发展过程。

表 1-2 从氧化铝含量的变化看先进陶瓷的发展过程

名称	Al ₂ O ₃ 含量/%	材料性能	应用范围
传统材料	0~10	致密、脆、强度低	日用瓷、卫生瓷
耐火材料	30	多孔、强度低	窑炉内衬
工业瓷	30~40	致密、强度低	化工、分析
75% Al ₂ O ₃ 瓷	75	致密、强度一般	电子工业
95% Al ₂ O ₃ 瓷	95	致密、强度较高	电子工业、化学工业
99% Al ₂ O ₃ 瓷	≥99	高致密、高强度、耐腐蚀	电子、机械、化工

总的来说，陶瓷是一种既古老而又年轻的工程材料，陶瓷材料的发展经历了从陶器发展到瓷器，从传统陶瓷发展到先进陶瓷，从先进陶瓷发展到纳米陶瓷三次重

大飞跃（见图 1-1），而这三次飞跃只是中华文明史的一个缩影。

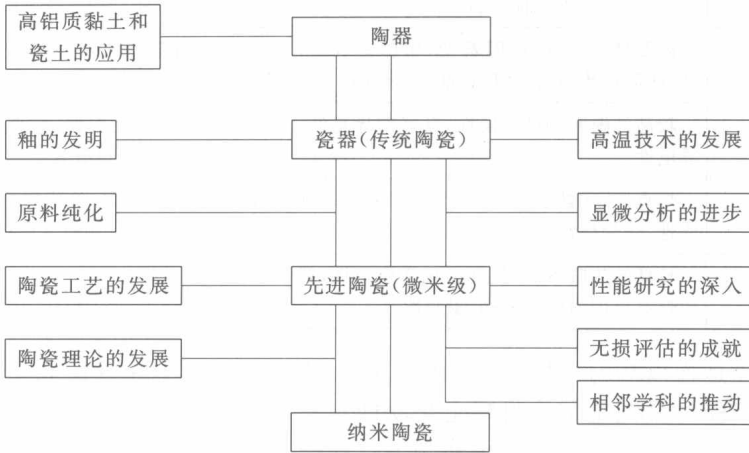


图 1-1 陶瓷研究发展的三个阶段

1.1.3 先进陶瓷材料

1.1.3.1 先进陶瓷材料概念及分类

先进陶瓷材料指用高纯人工合成的无机化合物为原料，采用精密控制工艺烧结而制成的高性能陶瓷，又称为高性能陶瓷、高技术陶瓷、精细陶瓷或特种陶瓷，是相对于传统陶瓷材料而言的。我国国家标准对精细陶瓷的定义是：经过精细控制化学组成、显微结构、形状及制备工艺，获得具有机械、热学、化学、电子、磁性、光学、生物及其复合工况下的某些高性能特性，并用于各种高技术领域的陶瓷材料。

按陶瓷的性能和使用功能来分类，先进陶瓷可分为结构陶瓷和功能陶瓷两大类。结构陶瓷是指具有力学和机械性能及部分热学和化学功能的新型陶瓷，适用于高温下使用的结构陶瓷又称为高温结构陶瓷，该类材料用于制作工业和技术领域的设备及部件，以充分发挥其耐高温、耐腐蚀，高强度、高硬度等优异性能。按结构陶瓷的组成，可将其分为氧化物、碳化物、氮化物、硼化物、硅化物等类型。表 1-3 从材料的组成、性能及应用等方面简要介绍主要类型结构陶瓷材料。

表 1-3 结构陶瓷的主要种类、组成、性能及应用

分类	性能特点	应用范围
氧化铍陶瓷	具有良好的热稳定性、化学稳定性、导热性、高温绝缘性及核性能	散热器件、高温绝缘材料、反应堆中子减速剂、防辐射材料等
氧化锆陶瓷	耐火度高，比热容和热导率小，化学稳定、高温绝热性好	冶炼金属的耐火材料，高温阴离子导体，氧传感器，刀具等
氧化镁陶瓷	介电强度、高温体积电阻率高，介电损耗低，高温稳定性好	碱性耐火材料，冶炼高纯度金属的坩埚等
氧化铝陶瓷	硬度、机械高强度，良好的化学稳定性和透明度	装置瓷，电路板，磨具材料，刀具，钠灯管、红外检测材料，耐火材料等

续表

分类	性能特点	应用范围
氮化硅陶瓷	高温稳定性好,高温蠕变、摩擦系数、密度、热胀系数小,化学稳定性好,强度高	燃气轮机部件,核聚变屏蔽材料,耐热、耐腐蚀材料,刀具等
碳化硅陶瓷	较高的硬度、强度、韧性,良好的导热性、导电性	耐磨材料,热交换器,耐火材料,发热体,高温机械部件,磨料磨具等
氮化硼陶瓷	熔点高,比热容、热胀系数小,良好的绝缘性、化学稳定性,吸收中子和透红外线	高温固体润滑剂,绝缘材料,反应堆的结构材料,耐火材料,场致发光材料等
赛隆陶瓷(Sialon)	较低的热胀系数,优良的化学稳定性,高的低高温强度,很强的耐磨性	高温机械部件,耐磨材料等

功能陶瓷是指以非力学性能(如电、磁、热、化学、生物等性能)为主的陶瓷材料。有些陶瓷材料既是结构材料也是功能材料,如 ZrO_2 、 Al_2O_3 、 SiC 等。功能陶瓷制品具有品种多、应用广、更换频繁、体积小、附加值高等特点,主要有金属氧化物和Ba、Pb、Mg及Sr的钛酸盐等,表1-4简要介绍几种主要功能陶瓷。

表 1-4 功能陶瓷的主要种类、组成、性能及应用

分类	种类与性能	典型材料及组成	主要用途
电功能陶瓷	绝缘材料	Al_2O_3 , BeO , MgO , AlN , SiC	集成电路基片、高频绝缘陶瓷等
	介电陶瓷	TiO_2 , $LaTiO_3$, $Ba_2Ti_9O_{20}$	陶瓷电容器、微波陶瓷等
	铁电陶瓷	$BaTiO_3$, $SrTiO_3$	陶瓷电容器
	压电陶瓷	PZT, PT, LNN, $(PbBa)NaNb_3O_{15}$	超声换能器、谐振器、压电点火器、电动机、表面波延迟元件等
	半导体陶瓷	PTC($Ba-Sr-Pb$) TiO_3 NTC(Mn, Co, Ni, Fe, La) CrO_3	温度补偿和自控加热元件等 温度传感器、温度补偿器等 热传感元件、防火灾传感器等
	高温超导体陶瓷	CTR(V_2O_3)	超导材料等
磁功能陶瓷	软磁铁氧体	La-Ba-Cu-O Y-Ba-Cu-O	电视机、计算机磁芯、温度传感器、电波吸收器等
	硬磁铁氧体	Ba, Sr 铁氧体	铁氧体磁石等
	记忆用铁氧体	Li, Mn, Ni, Mg, Zn 与铁形成的尖晶石型铁氧体	计算机磁芯等
光功能陶瓷	透明氧化铝陶瓷	Al_2O_3	高压钠灯管等
	透明氧化镁陶瓷	MgO	特殊灯管、红外输出窗等
	透明铁电陶瓷	PLZT	光储存元件、光开关、光栅等
敏感陶瓷	湿敏陶瓷	$MgCr_2O_4-TiO_2$, $ZnO-Cr_2O_3$ 等	工业湿度检测等
	气敏陶瓷	SnO_2 , $\alpha-Fe_2O_3$, ZrO_2 , ZnO 等	汽车传感器、气体泄漏报警器等
生物化学功能	载体用陶瓷	Al_2O_3 瓷、 $SiO_2-Al_2O_3$ 瓷等	汽车尾气催化载体、化工催化载体、酵素固定载体等
	催化用陶瓷	氟石、过渡金属氧化物	接触分解反应催化等
	生物陶瓷	Al_2O_3 , $Ca_5(F, Cl)P_3O_{12}$	人造牙齿、关节骨等

需要指出的是随着科学技术的发展、新材料的不断出现,结构陶瓷与功能陶瓷的界限正在逐渐淡化,有些材料同时具备优越的结构性能与优良的功能。当然,结构陶瓷与功能陶瓷不可能截然分开,功能陶瓷在力学性能上亦有基本要求,有些结构陶瓷尚有其它功能特性,如碳化硅是常见的研磨材料,但亦可用其半导性作高温发热元件。

1.1.3.2 先进陶瓷材料特点及应用

先进陶瓷材料与传统陶瓷材料的差别主要体现在以下四个方面。

① 原材料不同。传统陶瓷是以天然矿物如黏土、石英和长石等不加处理直接使用;而先进陶瓷则使用经人工合成的高质量的粉体作起始材料。

② 结构不同。传统陶瓷材料的化学相组成复杂多样,杂质成分和杂质相众多而不容易控制,显微结构粗劣而不够均匀,且多气孔;而先进陶瓷的化学相组成较简单、明晰,纯度高,即使是复相材料,也是人为调控设计添加的,其显微结构一般均匀而细密。

③ 制备工艺不同。传统陶瓷用的矿物经过混合可直接用于湿法成型,烧结温度也较低,一般为 $900\sim 1400^{\circ}\text{C}$,而且烧结后一般不需要加工;而先进陶瓷用的高纯度粉体,必须加入有机的添加剂后才能干法或湿法成型,烧结温度也较传统的陶瓷材料高,一般在 $1200\sim 2200^{\circ}\text{C}$ 之间,且烧成后一般还需要再加工。

④ 性能不同。传统陶瓷和先进陶瓷材料性能有着很大的差异,不仅后者在性能上远优于前者,而且还具有传统陶瓷材料所没有的性能或用途。传统陶瓷材料一般限于日用和建筑使用,而先进陶瓷优异的力学性能特别是高温力学性能和各种光、电、声、磁的性能,在各个行业如石油、化工、钢铁、电子、纺织和汽车等以及高科技领域等都有着广泛的应用。

先进陶瓷的性能潜力很大,主要表现在以下三个方面:①许多先进陶瓷具有优异的多方面性能的综合;②许多先进陶瓷具有更多实用价值的功能,特别是电磁功能、化学功能、半导体功能;③适当改变组成和掺杂后,特种陶瓷的功能可以按人们的要求改变。另外,从资源上讲,特种陶瓷的主要原料是氧化铝、二氧化硅、氧化镁等。这些原料在地球上储量丰富,容易得到,价格便宜。而金属材料的Ni、Cr、Co等不仅价格贵,而且资源缺,远不如陶瓷材料应用前景广阔。

先进陶瓷应用范围广泛,作为结构材料可利用其热、力学、化学性能,用作耐磨损材料、高强度材料、耐热材料、硬质材料、耐冲击材料、低膨胀材料、隔热材料等结构材料;作为功能材料可利用其电、磁、声、光、催化、生物化学等性能,用作绝缘材料、电解质材料、压电材料、磁性材料、电子材料、生物医用材料、抗菌陶瓷材料等。随着先进陶瓷的不断开拓,多种新性能和新用途随之诞生,这类材料已成为解决能源、资源问题的重要材料,同时也是微电子、光通信、激光、生物、医学、海洋、宇航、环保、新能源、机器人等尖端技术、国防和国民经济发展中不可缺少的支撑材料。

1.1.4 常见先进陶瓷材料简介

下面从材料的组成、工艺、结构、性能及应用等方面简要介绍几种主要类型的先进结构陶瓷材料和先进功能陶瓷材料。

1.1.4.1 先进结构陶瓷

(1) 氧化物陶瓷

① 氧化铝陶瓷 氧化铝主要有 α 、 β 、 γ 三种晶型，其中以 α 、 γ 两种晶型为原料最多， γ - Al_2O_3 在 1500°C 可转化为 α - Al_2O_3 ，几种晶型中， α - Al_2O_3 最稳定，机电性能最好，并适于做氧化铝瓷原料。氧化铝瓷具有高机械强度、高体积电阻率、良好的电绝缘性能、高强度、耐磨损、抗氧化等一系列特性，被广泛用作结构部件和功能装置瓷件，如机械、化工领域使用的耐磨耐腐蚀构件；坩埚、保护管、冶金工业中使用的耐火材料；基板、绝缘子、雷达天线罩、微波电解质等电子工业用瓷件。氧化铝陶瓷是研究较早、应用广泛且较成熟的新型陶瓷之一。

② 氧化锆陶瓷 氧化锆有三种晶型。常温下是单斜晶型，加热到 1170°C 左右变为四方晶型，并伴有7%左右的体积收缩；加热到 2370°C 左右转变为立方晶型，至 2700°C 左右熔融，上述变化是可逆转变。氧化锆具有熔点、硬度、强度和韧性好，比热容和热导率低，可形成氧空位缺陷固溶体等特点，被广泛用作结构陶瓷和功能陶瓷，如刀具、机械部件、高级耐火材料、高温阴离子导体、氧传感器等。但氧化锆陶瓷的一大缺点是高温下其强度和韧性严重衰减，使其在高温条件下应用受到限制。

③ 莫来石陶瓷 莫来石是 Al_2O_3 - SiO_2 二元系统唯一稳定的固溶体，其组成不确定，一般介于 $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 与 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 之间，通常认为莫来石化学计量式为 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 。莫来石具有高温力学性能好，热导率与热胀系数及密度低，抗蠕变性好等优点，缺点是常温力学性能差，且难烧结。莫来石陶瓷在高温结构陶瓷和耐火材料领域应用广泛并显示出良好的潜力。通过与其它陶瓷复合是提高其常温力学性能和扩大应用范围的主要途径之一。

(2) 非氧化物陶瓷 非氧化物陶瓷主要是指氮化物陶瓷、碳化物陶瓷、硼化物陶瓷和硅化物陶瓷。它们一般以强共价键结合，化学稳定性高，强度大，导热性好，有半导性，高温下易氧化分解等特点。常见的有碳化硅陶瓷、氮化硅陶瓷、氮化硼陶瓷、氮化铝陶瓷等。

① 碳化硅陶瓷 碳化硅(SiC)陶瓷有两种晶型，一种是 α - SiC ，属六方晶系，为高温稳定型；另一种是 β - SiC ，属等轴晶系，为低温稳定型。 β - SiC 在 $2100\sim 2400^\circ\text{C}$ 温度范围可以转化成 α - SiC 晶型。碳化硅最早主要用作耐火材料和磨料磨具，如炼钢用水口砖、炉内衬、窑具、砂轮等，后来又逐渐用于某些技术领域做高温结构材料或发热元件，如火箭尾气喷管、燃气轮机叶片、磁流体发电机的电极，电炉发热体等。

② 氮化硅陶瓷 氮化硅陶瓷除力学、热学性能优良外，其抗氧化温度可达 $1300\sim 1400^\circ\text{C}$ ，几乎不受酸碱和大部分熔融金属侵蚀，因此可用作高温结构部件、冶金工业用高级耐火材料、化工领域用耐腐蚀和密封部件以及机械加工工具等。

③ 氮化硼陶瓷 氮化硼(BN)的结构和某些性能与石墨相似，有六方和立方两种晶型。六方在 $350\sim 1800^\circ\text{C}$ 、 6.5MPa 条件下可转化为立方 BN ，硬度仅次于金刚石。六方为主晶相的 BN 材料具有可加工性和自润滑性，可作高温轴承等；热压 BN 材料导热性与不锈钢相近，膨胀系数低，抗热震性好，且绝缘性和化学稳定