



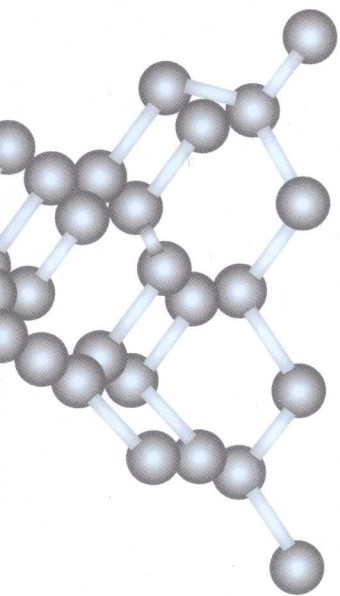
北京市高等教育精品教材立项项目


# 无机非金属材料 工艺学

周张健 | 主编

赵海雷 连芳 | 副主编

INORGANIC  
NON-METALLIC  
MATERIALS



 中国轻工业出版社

北京市高等教育精品教材立项项目

# 无机非金属材料工艺学

周张健 主编

赵海雷 连芳 副主编

 中国轻工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

无机非金属材料工艺学/周张健主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2010.1

北京市高等教育精品教材立项项目

ISBN 978-7-5019-7120-6

I. ①无… II. ①周… III. ①无机材料: 非金属材料-工艺学-高等学校-教材 IV. ①TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 155493 号

责任编辑: 李建华 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 锋尚设计  
版式设计: 王超男 责任校对: 燕杰 责任监印: 张可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印刷: 北京京都六环印刷厂

经销: 各地新华书店

版次: 2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 25.75

字数: 593 千字

书号: ISBN 978-7-5019-7120-6 定价: 50.00 元

邮购电话: 010-65241695 传真: 65128352

发行电话: 010-85119835 85119793 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: [club@chlip.com.cn](mailto:club@chlip.com.cn)

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

71206J1X101ZBW



## 内 容 提 要

《无机非金属材料工艺学》以无机非金属材料二级学科为专业方向，打破传统的各类无机非金属材料工艺学课程框架，在系统建立新型无机非金属材料工艺学课程体系的教学改革思想指导下设立。本书以工艺、结构与性能之间的关系为主干，以“无机非金属材料”基本概念—原料及预处理—成型—烧成—性能为线索，突出反映无机非金属材料共性工艺技术，同时注重体现学科前沿以及发展动向。《无机非金属材料工艺学》主要内容包括：无机非金属材料的定义与分类；无机非金属材料常用原料，纳米粉体原料及其表征评价；原料的合成及预处理；无机非金属材料的配料计算及坯料处理；坯体的成型；无机非金属材料的烧成及显微结构的形成；无机非金属材料的性能与结构、工艺之间的关系；无机非金属材料新进展等方面。本书各章节中的许多内容已在北京科技大学材料学院的本科教学中试用，并汲取了试用过程中各界同行和学生提出的宝贵意见与建议。

通过本课程的学习，加强学生的基础知识，拓宽知识面，使学生全面系统地掌握无机非金属材料的制备原理、生产过程的共性与个性问题，理解工艺因素对无机非金属材料产品性能与结构的影响，能够从技术与经济的角度分析各类无机非金属材料生产中出现的问题并提出改进生产的方案，培养智能型和复合型人才。

本书可作为材料科学与工程专业或无机非金属材料专业的学生学习无机非金属材料工艺技术的教材或教学参考书，也可供无机非金属材料科技工作者、工程技术人员参考。

## 前言

无机非金属材料是三大支柱材料之一，是我国重点发展的产业方向，在国民经济的各个领域占有十分重要的战略地位。《无机非金属材料工艺学》是继固体材料结构基础、无机材料物理化学等课程之后为无机非金属材料专业开出的一门专业基础课。本教材根据教育部面向 21 世纪材料类专业课程体系改革的要求，以无机非金属材料二级学科为专业方向，打破传统的课程体系，全面系统地建立新型无机非金属材料工艺学的课程体系的教学改革思想而编写。传统的无机非金属材料工艺学课程分别由《水泥工艺学》、《陶瓷工艺学》和《玻璃工艺学》等彼此独立的分散体系为主组成，虽重视了每个体系的独立与完整性，但忽视了在无机非金属材料体系下的统一性。目前，材料研究与应用领域学科间的交叉渗透日渐发展，材料功能也由单一向多功能发展。另外，虽然根据无机非金属材料种类的不同和性能要求的不同，各种无机非金属材料的生产方法有很大差异。但从整个无机非金属材料的生产过程来讲，其制备过程又有着很多共性的地方。因此，本书打破界限，突出无机非金属材料共性的工艺技术，并反映学科发展前沿和动向。通过本课程的学习，加强学生的基础知识，拓宽知识面，使学生全面系统地掌握无机非金属材料的制备原理、生产过程的特性和个性问题，理解工艺因素对无机非金属材料产品性能与结构的影响，能够从技术与经济的角度分析各类无机非金属材料生产中出现的问题并提出改进生产的方案，培养智能型和复合型人才。本教材特点如下：

(1) 本教材打破传统的各类无机非金属材料工艺学之间的界限，以工艺、结构与性能之间的关系为主干，建立以“无机非金属材料”基本概念—原料及预处理—成型—烧成—性能为主要内容，突出反映无机非金属材料共性的工艺技术的教材体系。

(2) 本教材打破传统无机非金属材料 and 特种无机非金属材料之间的界限，综合反映无机非金属材料的工艺过程，使同学们在学习过程中对传统无机非金属材料 and 特种无机非金属材料的工艺过程有一个整体了解，并能对两者的工艺差别做一些比较。

(3) 本教材在每一章节后都附有习题，同时配备多媒体课件，帮助学生更好的学习。

(4) 本课程的特点是知识点多而散。本教材注重基本原理、共性技术等内容的介绍，化繁为简，同时在各部分内容给出推荐参考资料，引导学生在课下进一步查阅相关文献，拓展知识面。

(5) 本教材充分反映学科的发展前沿和发展趋势，例如绿色制造技术、纳米技术等。注重启发学生把握学科发展方向的能力和创新能力。

无机非金属材料，其内涵十分宽广，一些领域发展十分迅速。本书是在积累多年的科研成果、教学经验和自编讲义基础上编写而成。在编写过程中，参考了国内外大量的学术论文、教材专著以及网上资料，在此谨向这些作者表示衷心的感谢。本书配套多媒体课件，可通过北京科技大学本科教学网站参阅，或与编者联系（电子邮件 [zhouzhj@mater.ustb.edu.cn](mailto:zhouzhj@mater.ustb.edu.cn)）。北京科技大学材料学院博士生李明、谈军，硕士生屈丹丹参与制作了部分视频和多媒体课件。宁波东亚密封件厂提供了部分视频资料。北京科技大学李福鑫教授对本书逐字逐句进行了审定，并提出了宝贵的修改补充意见。本书的出版得到北京高等教育精品教材建设项目的资助，中国轻工业出版社的指导和关心，以及北京科技大学教务处、材料学院和无机非金属材料系的多方面帮助和支持，在此一并表示衷心的感谢！

无机非金属材料工艺学涉及的知识面相当广泛，限于编者的学识水平，书中不妥之处在所难免，敬请广大读者不吝赐教。

编者

2009年7月

于北京

# 目录

1	<b>第 1 章 绪论</b>
1	1.1 无机非金属材料的定义、分类与特点
2	1.2 典型无机非金属材料简介
2	1.2.1 陶瓷
7	1.2.2 玻璃
9	1.2.3 水泥
12	1.3 无机非金属材料的发展史
13	1.3.1 玻璃发展简史
14	1.3.2 水泥发展简史
15	1.3.3 陶瓷在中国的发展历史
19	1.4 无机非金属材料的发展趋势
22	1.5 无机非金属材料工艺的共性与个性及其研究内容
25	<b>第 2 章 无机非金属材料常用原料及其预处理</b>
25	2.1 天然原料
26	2.1.1 黏土类原料
41	2.1.2 石英类原料
44	2.1.3 长石类原料
46	2.1.4 碳酸盐类原料
49	2.1.5 其他矿物岩石原料
55	2.2 化工原料
55	2.2.1 氧化物原料
60	2.2.2 非氧化物原料
69	2.3 工业废弃物原料
70	2.3.1 粉煤灰
70	2.3.2 煤矸石
71	2.4 原料的标准化
72	2.5 原料的预处理
72	2.5.1 原料的精选
74	2.5.2 原料的破碎与研磨
79	2.5.3 原料的烘干和预烧
79	2.5.4 原料的输送与储存
82	<b>第 3 章 超细粉体的合成与表征</b>
83	3.1 纳米粉体原料
84	3.1.1 纳米科技与纳米材料
85	3.1.2 纳米粉体原料的特性

88	3.2 超细（纳米）粉体的合成
89	3.2.1 固相法
95	3.2.2 液相法
101	3.2.3 气相法
103	3.3 粉体的表征与评价
104	3.3.1 粉体颗粒的形态及粒度与粒度分布
110	3.3.2 粉体的表面特性
111	3.3.3 粉体的团聚与分散
116	<b>第4章 配料计算及坯料处理</b>
116	4.1 无机非金属材料的组成及配方计算
116	4.1.1 普通陶瓷坯体（釉料）的组成及配方计算
124	4.1.2 特种陶瓷坯体的组成及配方计算
125	4.1.3 玻璃化学组成的设计及配料计算
131	4.1.4 普通硅酸盐水泥熟料的组成及配方计算
137	4.1.5 复合硅酸盐水泥的组成及配方计算
140	4.2 坯料的制备与处理
140	4.2.1 混料
141	4.2.2 泥浆的脱水
141	4.2.3 坯料的塑化
142	4.2.4 泥浆的悬浮
143	4.2.5 坯料的陈腐和真空处理
144	4.2.6 造粒
147	<b>第5章 成型工艺</b>
147	5.1 注浆成型及胶态成型
147	5.1.1 泥浆的成型性能
152	5.1.2 注浆成型方法
163	5.2 可塑成型
163	5.2.1 塑性泥料的成型性能
166	5.2.2 可塑成型方法
171	5.3 压制成型
171	5.3.1 压制用粉料成型性能
175	5.3.2 干压成型方法
178	5.4 快速成型
178	5.4.1 快速成型制造技术的定义及特点
181	5.4.2 快速成型制造技术的分类
181	5.5 玻璃的成型
181	5.5.1 玻璃性质对成型的作用
182	5.5.2 玻璃的成型制度
183	5.5.3 玻璃成型方法概述
192	5.6 成型模具
192	5.6.1 压制成型用金属模具



193	5.6.2 挤压成型用模具
193	5.6.3 冷等静压成型模具
194	5.6.4 模具的放尺
194	5.7 坯体的干燥
194	5.7.1 含水坯体的干燥
195	5.7.2 凝胶的干燥及超临界干燥方法
197	5.8 釉浆的制备及施釉
197	5.8.1 釉浆的制备
198	5.8.2 施釉工艺
<b>204</b>	<b>第6章 烧成及显微结构的形成</b>
204	6.1 显微结构的概念及其组成
204	6.1.1 显微结构的概念
205	6.1.2 无机非金属材料显微结构的组成
213	6.1.3 显微结构的研究进展
214	6.2 普通陶瓷的烧成及其结构
214	6.2.1 普通陶瓷坯体在烧成过程中的变化
216	6.2.2 釉层在烧制过程中的变化
228	6.2.3 普通陶瓷烧成制度的制定及烧成工艺
231	6.3 特种陶瓷的烧结及其方法
231	6.3.1 烧结的基本过程及其机理
240	6.3.2 特种陶瓷的烧结方法
253	6.3.3 影响特种陶瓷烧结的因素
256	6.4 玻璃的高温熔制及其结构
256	6.4.1 玻璃的结构
266	6.4.2 功能玻璃的结构
269	6.4.3 玻璃的熔制
276	6.4.4 功能玻璃的制备
279	6.5 硅酸盐水泥的高温煅烧
280	6.5.1 硅酸盐水泥熟料的煅烧
290	6.5.2 新型干法水泥生产
293	6.6 烧成的节能环保技术
<b>298</b>	<b>第7章 材料的性能与结构之间的关系</b>
298	7.1 材料的力学性能与结构的关系
298	7.1.1 断裂强度
301	7.1.2 显微结构与断裂强度的关系
304	7.1.3 材料的断裂韧性
305	7.1.4 组织结构与断裂韧性的关系
306	7.1.5 陶瓷材料的强韧化机理
308	7.1.6 陶瓷材料的耐磨性
311	7.2 材料的热学性能与显微结构的关系
311	7.2.1 无机材料的热容

313	7.2.2 热膨胀
315	7.2.3 热传导
318	7.2.4 热抗震性
323	7.3 无机材料的光学性能与显微结构的关系
324	7.3.1 光的折射、反射、吸收、散射和透射
326	7.3.2 透光性
329	7.3.3 无机材料的颜色
330	7.4 材料的电学性能与结构的关系
330	7.4.1 陶瓷的导电性及机理
331	7.4.2 电导率
339	7.4.3 介电性
342	7.4.4 介电性能的影响因素及改善途径
344	7.5 玻璃的性质与结构的关系
344	7.5.1 玻璃的结构因素
346	7.5.2 玻璃的性质
358	7.6 水泥的性能与结构
358	7.6.1 水泥的水化与凝结硬化
361	7.6.2 水泥石的结构
362	7.6.3 影响硅酸盐水泥凝结硬化和结构的主要因素
362	7.6.4 硅酸盐水泥的技术指标
366	7.6.5 水泥的耐久性
370	<b>第8章 无机非金属材料基复合材料</b>
370	8.1 复合材料的定义、分类及其发展
371	8.1.1 碳基复合材料
373	8.1.2 金属陶瓷
374	8.1.3 无机胶凝复合材料
375	8.2 复合材料的结构及其界面
375	8.2.1 复合材料的结构
376	8.2.2 复合材料的界面问题
377	8.2.3 复合材料的界面理论
378	8.2.4 界面残余应力
379	8.2.5 复合材料组分的相容性
380	8.3 无机非金属材料基复合材料的增强体
380	8.3.1 增强体的概念和分类
383	8.3.2 增强机理
385	8.4 无机非金属材料基复合材料的设计和制备新技术
385	8.4.1 原位复合技术
389	8.4.2 自蔓延复合技术
391	8.5 功能梯度材料
391	8.5.1 功能梯度材料的产生与发展
392	8.5.2 梯度材料的显微结构特征与设计
394	8.5.3 梯度复合技术与结构控制方法

397	8.5.4 梯度材料的特性评价
397	8.6 复合材料的发展方向
397	8.6.1 发展功能、多功能、机敏、智能复合材料
399	8.6.2 纳米复合材料
400	8.6.3 仿生复合材料

# 第 1 章 绪论

材料是人类生产和生活的物质基础，与信息、能源构成现代文明的三大支柱。新材料被视为新技术革命的基础和先导，材料科学技术被列为 21 世纪优先发展的关键领域之一。在材料家族中，有一类非常重要的材料叫无机非金属材料，是人类应用最早的材料，也是用量最大、用途最广的一类材料。无机非金属材料工艺学是继材料结构、材料物理化学、材料性能等技术基础课之后开出一门重要的专业课，其任务是学习包括陶瓷、玻璃、水泥等主要种类无机非金属材料的原料特性、制备工艺流程、工艺原理、工艺设备以及工艺条件对材料结构性能的影响等方面的基础概念、基本理论和基本技能知识，本课程是无机非金属材料工程专业不可缺少的必修专业主干课。本章主要介绍无机非金属材料的定义、分类；典型无机非金属材料及其发展简史；无机非金属材料工艺的任务和发展方向。通过对普通陶瓷发展历史的回顾，可以领会成分、工艺和材料结构与性能之间的关系。

## 1.1 无机非金属材料的定义、分类与特点

无机非金属材料 and 金属材料、有机高分子材料并列为当代三大固体材料，其区别主要在于材料的结合化学键，即原子间的相互作用力不同，因而表现出性质上的极大差异。无机非金属材料可以定义为以离子键及共价键为主要结合力的含金属和非金属元素的复杂化合物和固溶体，是除有机高分子材料和金属材料以外的所有固体材料的统称。

不同的无机非金属材料之间存在着成分、制造工艺、结构、性能和用途等方面的差异，但彼此之间又具有共性和内在联系，对其进行合理的分类有助于了解其内在的本质和规律，系统、全面地认识和研究材料。但是无机非金属材料品种繁多、用途各异，站在不同的角度，往往有不同的分类，因此，还没有一个统一而完善的分类方法。通常综合考虑其化学成分、原料、性能和用途、制造工艺等进行分类。表 1-1 为常见无机非金属材料的分类，包括陶瓷、玻璃、水泥、耐火材料、人工晶体、天然矿物岩石材料等。从大类上可以把它们分为普通的（传统的）和特种的（新型的）无机非金属材料两大类。传统无机非金属材料，如普通陶瓷、普通玻璃、水泥等，一般都含有硅酸盐，所以又被称为硅酸盐材料，通常以天然的硅酸盐矿物（黏土矿物、石英、长石等）及其组成的岩石为主要原料，经高温窑炉烧制而成，故有时也被称为窑业材料。在硅酸盐物质中，硅氧四面体  $[\text{SiO}_4]$  是其基本结构单元。由于硅-氧化学键强度大，结合牢固，因

表 1-1 常见无机非金属材料分类

	材 料	品 种 示 例	
传统无机 非金属材料	普通陶瓷	黏土质、长石质、滑石质和骨灰质陶瓷等	
	玻璃	硅酸盐	
	水泥和其他胶凝材料	硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、石灰、石膏等	
	耐火材料	硅质、硅酸铝质、高铝质、镁质、铬镁质、镁碳质等	
	铸石	辉绿岩、玄武岩、铸石等	
	多孔材料	硅藻土、蛭石、沸石、多孔硅酸盐和硅酸铝等	
	非金属矿材料	黏土、石棉、石膏、云母、大理石等	
特种无机 非金属材料	结构陶瓷	氧化物、碳化物、氮化物等	
	功能陶瓷	铁电和压电材料	PbTiO <sub>3</sub> 系压电材料、多元单晶压电体
		半导体材料	钛酸钡系、锆钛酸铅系材料等
		导电材料	固体电解质、离子-电子混合导体、超导体等
		磁性材料	锰-锌、镍-锌、锰-镁、锂-锰等铁氧体等
		光学材料	石英晶体、蓝宝石、单晶硅、单晶锗、CaF <sub>2</sub> 等
	生物陶瓷	长石质齿材、氧化铝、磷酸盐骨材和酶的载体材料等	
	碳素材料和超硬材料	碳纳米管、碳化钛、人造金刚石和立方氮化硼等	
	无机涂层和薄膜	热障涂层、耐磨涂层等	
	人工晶体	钇铝榴石、铝酸锂、钽酸锂、砷化镓、氟金云母等	
无机复合材料	陶瓷基、金属基、碳素基的复合材料		

此硅酸盐材料一般都具有良好的化学稳定性，较高的机械强度和耐高温性能，是工业和建筑所必需的基础材料。如水泥是一种重要的建筑材料；各种规格的平板玻璃以及日用陶瓷、建筑陶瓷等与人们的生产、生活息息相关。特种无机非金属材料则是随着科学技术的发展和工业的进步，自 20 世纪中期以来涌现的一大类具有特殊性能和用途的无机非金属材料，包括特种陶瓷、非晶态材料、人工晶体、无机涂层、无机纤维等，多数为非硅酸盐类新材料，如不含硅的氧化物、碳化物、氮化物等。

## 1.2 典型无机非金属材料简介

### 1.2.1 陶瓷

陶瓷包括普通（传统）陶瓷和特种（新型）陶瓷两大类。就其传统工艺含义来说，传统陶瓷是指将黏土、石英、长石等天然矿物岩石物料经过成型及高温处理变成有用的多晶材料。从显微结构来看，传统陶瓷材料是由包括晶体相、玻璃相及气孔所构成的复杂系统，这些相在数量上的变化，对陶瓷的性质起着一定程度的影响。从成分上看陶瓷属于“硅酸盐”，所以传统陶瓷习惯也称“硅酸盐陶瓷”。

随着对陶瓷材料性能要求的提高，人们进行了大量的试验来改进硅酸盐陶瓷，不断

提高配方中氧化铝的含量,加入许多纯度较高的人工合成化合物代替天然原料来提高陶瓷的强度、耐高温性和其他性能。后来发现,不使用传统的天然原料,完全不含硅酸盐,也可以做成陶瓷,而且性能更为优越,适用于高技术领域。于是历来由硅酸盐统治的陶瓷家族发生了变化,出现了完全崭新的现代特种陶瓷,如氧化物、非氧化物、金属陶瓷以及纤维增强陶瓷等,并在20世纪中期以后得到了迅速发展。标志着以高技术陶瓷为代表的“新石器时代”的到来。

可以看到,随着科学技术的发展,与陶瓷工艺相近的无机材料的不断出现,陶瓷的概念已难以局限于其传统的含义,其外延也不断扩大。最广义的陶瓷概念几乎与无机非金属材料的含义相同。本书把“陶瓷”定义为:陶瓷是天然或人工合成的粉状化合物,经过成型和高温烧结制成的,由金属和非金属元素的无机化合物构成的多晶固体材料。传统硅酸盐陶瓷及现代特种陶瓷,都包括在这个范围内。

陶瓷制品种类繁多,国际上尚无统一的分类方案。按陶瓷制品坯体的本质,即坯体结构及其相应的基本物理性能的不同来分类,是较为科学的一种分类方法。为了便于学习,本书按照陶瓷的概念和用途及坯体的物理性能来分类,将陶瓷制品分为两大类:即普通陶瓷和特种陶瓷。需要指出的是,陶瓷的分类方法仅是考虑到陶瓷品种的发展和应用的的不同,以约定俗成的方法来区别的,各类陶瓷之间并没有严格的界限。有的陶瓷品种完全可以一种多用,无需拘泥于属于哪一类。

### 1.2.1.1 普通陶瓷的概念和分类

普通陶瓷即传统陶瓷,一般为陶器、炆器、瓷器等以黏土、石英、长石等天然矿物岩石为主要原料,经过成型、烧制得到的制品的通称,是一种多晶多相(晶相、玻璃相、气孔)的硅酸盐材料。按照普通陶瓷坯体的结构不同和坯体致密度的不同,将其分为三大类:陶器、炆器和瓷器,如图1-1所示,三者的区别如表1-2所示。这一类陶瓷

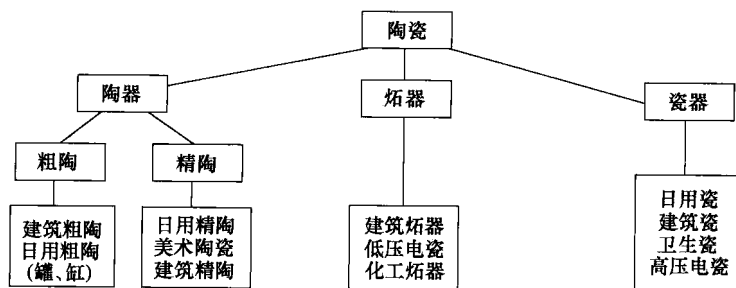


图 1-1 普通陶瓷的分类

表 1-2

我国日用陶瓷分类标准

	吸水率/%	透光性	胎体特征	敲击声
陶器	一般大于3	不透光	未玻化或玻化程度差,结构不致密,断面粗糙,烧成温度低	沉浊,粗哑
瓷器	不大于3	透光	玻化程度高,结构致密细腻,断面呈面状或贝壳状	清脆
炆器	吸水率介于陶器和瓷器之间。与陶器的区别在于陶器坯体是多孔性的,而炆器坯体气孔率较低,是致密的烧结体。与瓷器的区别在于炆器坯体都带色且呈半透明性			



制品是人们生活和生产中最常见的陶瓷制品，其所用原料基本相同，生产工艺技术亦相近，都是典型的传统陶瓷生产工艺，只是根据需要制成适于不同使用要求的制品。

### 1.2.1.2 特种陶瓷的概念和分类

#### (1) 特种陶瓷的概念

随着航空航天、传感、能源等新技术的发展，对材料的性能提出更高要求，材料的使用环境更为苛刻。传统材料难以满足要求，开发和有效利用高性能材料成为材料科学发展的必然趋势。具有高强耐温、耐腐蚀特性或各种敏感特性的新型陶瓷材料应运而生。由于其制造工艺过程与传统陶瓷不同，尤其是其化学组成、显微结构及特性不同于传统的普通陶瓷，因而被称为特种陶瓷，又称高技术陶瓷、先进陶瓷、精细陶瓷、新型陶瓷等。关于特种陶瓷的定义，还有一些值得讨论的问题，本书作如下定义：特种陶瓷是采用人工精制的粉末原料，通过结构设计，精细的化学计量，采用先进的成型和烧成方法及相应的制度，从而获得具有特定性能、经过加工处理使之符合使用要求尺寸精度的无机非金属材料。其与普通陶瓷的主要区别在于：

① 在原料上，突破了以黏土等矿物岩石为主要原料的界限，主要采用人工精制的化工原料。

② 在成分上，传统陶瓷的组成由黏土等矿物原料的成分决定，所以不同产地和窑炉的陶瓷有不同的质地，而特种陶瓷的成分由人工配比决定，其性质的优劣由原料的纯度和工艺决定。

③ 制备工艺上，突破了传统陶瓷以注浆、可塑成型为主要成型手段，窑炉为主要烧成手段的界限，广泛采用新型的成型及烧结工艺。

④ 在陶瓷材料设计上，随着知识和经验的积累以及微细结构分析技术的进步，相关陶瓷理论得到了发展，并在一定程度上实现了根据实际使用要求进行材料设计的目标，实现工艺—显微结构—性能的统一。

⑤ 性能不同。由于以上各点不同，导致传统陶瓷和高性能陶瓷材料性能的极大差异，后者不仅在性能上远优于前者，而且高性能陶瓷材料还发掘出传统陶瓷所没有的性能和用途。传统陶瓷材料一般限于日用和建筑使用，而高性能陶瓷基于其优异的力学性能，特别是高温力学性质和各种光、热、电、声、磁的功能，可以在工业各领域，如石油、化工、钢铁、电子、纺织和汽车等行业，以及很多的尖端技术领域如航天、核工业和军事工业中有着广泛的应用价值和潜力。

⑥ 传统陶瓷一般不需加工，特种陶瓷则经常需要精加工以获得符合其使用要求的尺寸精度。

特种陶瓷发展的历史虽然较短，但是其潜力很大，发现新材料的几率很高。其一，从资源上讲，其主要原料如氧化铝、氧化硅等，储量丰富易得；其二，许多特种陶瓷材料具有优异的综合性能，特别是电磁功能、化学功能、半导体功能等；其三，适当改变组成和掺杂后，其功能可按人们的要求改变。由于以上原因，自20世纪问世以来，各主要工业国都十分注重特种陶瓷的开发研究，形成世界性的陶瓷热，特种陶瓷甚至被誉为万能材料。尤其近年来，在现代生产和科技的推动和培育下，特种陶瓷发展非常快，新品种层出不穷。按照化学组成的不同可将特种陶瓷划分为：氧化物陶瓷、氮化物陶

瓷、碳化物陶瓷、硼化物陶瓷、硅化物陶瓷、硒化物陶瓷、硫化物陶瓷、碲化物陶瓷等。除了主要由一种化合物构成的单相陶瓷外，还包括由两种或两种以上的化合物构成的复相陶瓷。例如，由氮化硅和氧化铝结合而成的氧氮化硅铝陶瓷，由氧化锆、氧化钛、氧化铅、氧化镧结合而成的锆钛酸铅镧（PLZT）陶瓷等。近年来，为了改善陶瓷的脆性，在陶瓷基体中添加了金属或无机纤维，构成陶瓷基复合材料，成为陶瓷家族中年轻却最有发展前途的一个分支。

## (2) 特种陶瓷的分类

特种陶瓷由于不同的化学组分和显微结构而决定其具有不同的特殊性质和功能，如高强度、高硬度、耐腐蚀、磁性、透光，以及压电、铁电、光电、声光、磁光、超导、生物相容性等。人们为了生产、研究和学习上的方便，有时不按化学组成，而根据性能及用途的不同将特种陶瓷分为结构陶瓷和功能陶瓷两大类。另外，随着纳米技术的发展，纳米陶瓷也日益得到重视，成为特种陶瓷中的重要一员。

① 结构陶瓷：结构陶瓷是着重于发挥其力学、热学、化学等效能的一类先进陶瓷材料。包括高强度陶瓷、高温陶瓷、高韧性陶瓷、耐酸陶瓷等，由于它具有耐高温、耐磨损、耐腐蚀、耐冲刷、抗氧化、耐烧蚀等优异性能，可以承受金属材料和高分子材料难以胜任的严酷工作环境，广泛用于能源、航空航天、机械、汽车、化工等领域，主要用作切削工具、模具、耐磨零件、泵和阀部件、发动机部件、热交换器、生物部件和装甲等，如氮化硅、碳化硅、二氧化锆、碳化硼、二硼化钛、氧化铝等。

虽然高性能结构陶瓷具有一系列优异性能，逐渐成为尖端技术不可缺少的关键材料。但其致命的弱点是脆性大，不像金属那样具有塑性变形的能力，因此改善结构陶瓷的脆性，增强韧性是多年来研究者所关注的重要课题。另外，对于特种陶瓷材料，在强调其机械性能时，不能仅用平均强度作为其强度指标，还需从统计角度来考虑其强度值的可靠性与分散程度。这种分散性，主要与制造及加工过程中引入的各种缺陷有关。在提高材料平均强度的同时，如何提高材料强度的可靠度，已成为结构陶瓷材料开发研究的一个重要课题。

② 功能陶瓷：功能陶瓷主要是指利用其电、磁、光、声、热和力学性能，以及其间的交叉耦合效应来制作各类与能量转换相关器件的陶瓷材料。功能陶瓷由于材料晶体结构的不对称性而存在自发极化，在各种外界因素，包括应力、温度或电场等的作用下，引起自发极化的变化而发生相应的电效应，因而产生了压电、热电和光电等效应。而且，通过对电畴作用、晶界效应、表面电导、离子电导、电子电导、铁磁效应以及相变等方面的研究，构成了力敏、热敏、气敏、声敏、湿敏、光敏、磁敏等传感器的理论基础。功能陶瓷包括铁电陶瓷、压电陶瓷、电解质陶瓷、半导体陶瓷、光学陶瓷、磁性陶瓷、陶瓷薄膜等，在电、磁、光、热、力、化学、生物等信息的检测、转换、处理和存储显示中具有广泛的应用。

功能陶瓷的发展趋势是多功能化和智能化，即从其单一的力学、热学、电学、磁学、光学等向复合特性功能发展是其研究的一个重要趋向。多相复合是使功能陶瓷的传感功能与驱动功能集于一身，即制备所谓机敏陶瓷的有效途径，它将成为功能陶瓷向更高层次发展的一个方向。

③ 纳米陶瓷：纳米陶瓷属于纳米材料的一种，是 20 世纪 80 年代中期随着纳米技术的广泛应用而发展起来的新型材料，指陶瓷材料的显微结构处在纳米尺寸水平（小于 100nm），包括晶粒尺寸、晶界宽度、第二相分布、气孔尺寸、缺陷尺寸都是纳米级。由于纳米陶瓷晶粒细小，具有小尺寸效应、界面占有可与颗粒相比拟的体积百分比、表面效应以及界面的无序性而呈现特殊的物理、化学和力学性能，为克服陶瓷材料研究领域中长期未能解决的一些问题（如陶瓷的脆性等）开辟了新的途径，因而有着极大的应用前景。英国材料学家 Cahn 指出纳米陶瓷是解决陶瓷脆性的战略途径。

与非纳米陶瓷相比，纳米陶瓷在性能上具有以下显著特点：

a. 较高的强度和韧性以及低温超塑性 由于纳米陶瓷中晶粒尺寸和气孔尺寸都是纳米级，因而具有较高的强度和韧性，一般比普通陶瓷高出 3~5 倍。如在 100℃ 下纳米  $\text{TiO}_2$  陶瓷的显微硬度为 130MPa，而普通  $\text{TiO}_2$  陶瓷的显微硬度低于 20MPa。陶瓷的超塑性是由于扩散蠕变引起的晶格滑移所致，扩散蠕变速率与扩散系数成正比，与晶粒尺寸的三次方成反比，非纳米陶瓷只有在很高温度下才表现出明显的扩散蠕变，而纳米陶瓷的扩散系数提高了三个数量级，因而其扩散蠕变速率较高，在较低温度下表现出超塑性，使其韧性大大提高。如纳米  $\text{TiO}_2$  陶瓷在 900℃ 可发生无裂纹形变，断裂韧性提高了 50%。德国纳米材料专家 Gleiter 指出，如果多晶陶瓷是由大小为几个纳米的晶粒组成，则能够在低温下变为延性的，能够发生 100% 的范性形变。并且发现，纳米  $\text{TiO}_2$  陶瓷材料在室温下具有优良的韧性，在 180℃ 经受弯曲而不产生裂纹。许多专家认为，如能解决烧结过程中抑制晶粒长大的技术问题，从而控制陶瓷的晶粒尺寸在 50nm 以下，则它将具有高硬度、高韧性、低温超塑性、易加工等传统陶瓷无与伦比的优点。

b. 更好的扩散与烧结性能 纳米陶瓷材料存在的大量界面为原子提供了短程扩散途径，与单晶材料相比，纳米陶瓷材料具有更高的扩散率。增强扩散能力的同时又使纳米陶瓷材料的烧结温度大为降低。以氮化硅为例，不需要添加任何助剂，50nm 的氮化硅粉的烧结温度低于常规烧结温度 200~400℃。

c. 奇异的电学、磁学性能 由于纳米颗粒尺寸极其细小，其电学、磁学性能与粗晶粒材料有着显著的区别，表现出明显的小尺寸效应。另外在纳米材料中存在大量的界面成分。当晶粒尺寸减小到纳米级时，晶粒之间的铁磁相互作用影响材料的宏观磁性。与铁磁原子类似，根据相互作用的大小，纳米晶粒体可表现出超顺磁性、超铁磁性、超自旋玻璃态等特性。对作为变阻器或压敏电阻主要组元的纳米相  $\text{ZnO}$  烧结体（平均粒径为 60nm）进行的阻抗谱研究表明，晶粒边界控制着  $\text{ZnO}$  压缩体的电性能。

纳米陶瓷出现的同时也引出一系列新的问题有待解决：

- 纳米粉体的制备和表征。
- 解决纳米粉体的分散和团聚问题，非氧化物粉体的抗氧化性等问题。
- 纳米陶瓷成型工艺的研究，以获得高质量的生坯。
- 纳米陶瓷的烧结，包括烧结动力学，烧结理论及快烧强化烧结的研究等。

虽然纳米陶瓷还有许多关键技术需要解决，但其作为一种新型的陶瓷材料，所显示出来的潜在优异性能是其他陶瓷所无法代替的。特别是在富有挑战性的 21 世纪前 20