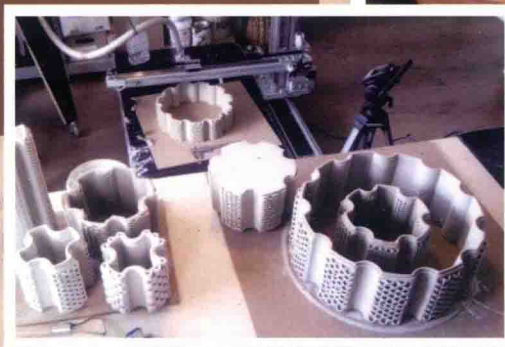


特种陶瓷工艺学

周张健◎编著



非外借



科学出版社

特种陶瓷工艺学

周张健 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是为无机非金属材料专业开设的必修课程“特种陶瓷工艺学”配套的本科教材,其任务是学习与特种陶瓷制备工艺相关的基础概念、理论和技能知识,体会相关的思维方法。

本书以成分-工艺-显微结构-性能控制之间的关系为主线,突出反映特种陶瓷共性的工艺原理和技术,注重介绍学科前沿及发展动向。主要内容包括:特种陶瓷的定义与分类;常用原料及其预处理;纳米粉体的合成与表征评价;配料计算及坯料处理;坯体的成型与干燥、脱脂;烧结及显微结构的形成;实际案例揭示性能与结构、工艺之间的关系等。

本书可作为材料科学与工程、无机非金属材料等专业的学生学习特种陶瓷相关课程的教材或教学参考书,也可供从事特种陶瓷研发、生产的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

特种陶瓷工艺学 / 周张健编著. —北京: 科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-057916-4

I. ①特… II. ①周… III. ①特种陶瓷 IV. ①TQ174.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 127328 号

责任编辑: 顾英利 霍志国 付林林 / 责任校对: 樊雅琼
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 东方人华

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年6月第一次印刷 印张: 19 1/2

字数: 393 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

以特种陶瓷为代表的无机非金属材料作为当今三大类支柱材料之一，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。本书是为无机非金属材料专业开设的必修课程“特种陶瓷工艺学”配套的本科教材，其任务是学习特种陶瓷的原料特性、制备工艺及原理、相关设备，以及成分和工艺条件对材料显微结构和性能的影响等方面的基础概念、基本理论和技能知识。主要内容包括：特种陶瓷的定义与分类；常用原料及其预处理；纳米粉体的合成与表征评价；特种陶瓷的配料计算及坯料处理；坯体的成型与干燥、脱脂；烧结及显微结构的形成；实际案例介绍特种陶瓷的性能与结构、工艺之间的关系；陶瓷材料的设计；特种陶瓷的热点研究方向等。本书可作为其他专业学习特种陶瓷相关课程的教材或教学参考书，以及供从事特种陶瓷研发、生产的工程技术人员参考。

“特种陶瓷工艺学”是了解和学习特种陶瓷制备技术的重要核心课程，也是一门实践性很强的面向工程应用的课程。本教材在编写过程中注重以本科工程教育认证对材料类专业课程体系教学改革的要求及研究型教学理念为指导，打破传统的课程体系，围绕建立符合工程教育认证标准的新型特种陶瓷工艺学的课程体系的教改思想而编写，力争做到深入浅出、理论联系实际。

特种陶瓷种类繁多，包括各种结构陶瓷、功能陶瓷等，同时又处于高速发展之中，纳米陶瓷、陶瓷基复合材料等新型特种陶瓷不断涌现，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。虽然根据特种陶瓷种类和性能要求的不同，各种特种陶瓷的生产工艺有一定差异，但从整个特种陶瓷的生产过程来讲，其制备工艺又有着很多共性的地方。因此，本书突出特种陶瓷共性的工艺技术和原理，注重反映学科发展前沿和动向。通过本教材的学习，期望能加强学生的基础知识，提供自主学习的能力，拓宽知识面，使学生全面系统地掌握特种陶瓷的制备原理和工艺，明晰生产过程中的共性与个性问题，理解工艺因素对特种陶瓷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特种陶瓷生产中出现的问题并提出改进方案。培养具有一定独立研究能力和创新精神的复合型人才。

本教材特点如下：

(1) 特种陶瓷种类繁多，本书打破各类特种陶瓷制品之间的界限，以成分-

工艺-显微结构-性能控制之间的关系为主干,建立以“特种陶瓷”基本概念—原料及其预处理—成型—烧结—显微结构—性能为主要内容,突出反映特种陶瓷共性的工艺技术和原理的教材体系,基于典型案例解析特种陶瓷工艺原理和技术,理论与实践相结合。

(2) 本课程的特点是知识点多而散,涉及面非常广。教材注重基本原理、共性技术等内容的介绍,化繁为简,在各部分内容给出推荐参考资料,引导学生课下进一步查阅相关文献,拓展知识面,同时在每一章开始处给出本章导读及内容提要,章节结尾处附有思考讨论题,帮助学生培养思考和自主学习能力。

(3) 本书充分反映学科的发展前沿和发展趋势,内容包括了近年来涌现出来的特种陶瓷的新材料、新工艺、新方法,注重启发学生把握学科发展方向,培养创新能力。

本书是在多年的科研成果、教学经验和自编讲义基础上编写而成的,各章节中的许多内容已在北京科技大学的本科教学中试用,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。编写过程中,参考了大量的国内外学术论文、教材专著及网上资料,在此谨向这些作者表示衷心的感谢。

本书的编写与出版得到了北京科技大学教材建设经费的大力资助,科学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。沈卫平教授和李云凯教授对本书提出了诸多宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢!

特种陶瓷工艺涉及的知识面相当广泛,可以说每一部分内容都可以拓展成一个以上的研究方向。作为结果的知识是不断发展、更新的,发现真理、探求结果的方法才是更重要的。教学的目的不能仅限于向学生传授具体的知识,而更应注重培养他们掌握科学的思维方法、工具和手段,以及举一反三的学习能力。因此,本书的教学应力图从分散的知识点的传授为主转向更加关心和注重以知识学习为媒介,体会和掌握科学的研究方法、开拓思维方面的训练。在教和学的过程中应注重考虑如何通过知识点的集成,传递一定的思想,使学生即使当具体的知识点已被遗忘时,仍能留存解决问题的思路和方法,这也是我们今后在教学中需要持续探索的方向之一。特种陶瓷,内涵宽广,发展迅速。

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

2018年5月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论——特种陶瓷的概念及分类	1
本章导读及内容提要	1
1.1 陶瓷发展简史	1
1.1.1 陶器起源和发展	1
1.1.2 瓷器的出现和发展	3
1.1.3 中国瓷器对世界瓷器发展的贡献	4
1.1.4 特种陶瓷的出现和发展	4
1.2 特种陶瓷的定义与分类	5
1.2.1 结构陶瓷	7
1.2.2 功能陶瓷	7
1.2.3 纳米陶瓷	8
1.2.4 陶瓷基复合材料	9
1.3 特种陶瓷工艺中的共性特点及学习要求	10
主要参考文献及延伸阅读材料	12
思考讨论题	12
第 2 章 特种陶瓷的化学键和晶体结构	13
本章导读及内容提要	13
2.1 原子结合与化学键	13
2.1.1 离子键	14
2.1.2 共价键	15
2.1.3 金属键	15
2.1.4 极化键	16
2.1.5 混合键合	17
2.1.6 各种键型的比较	18
2.2 陶瓷的典型晶体结构	19
2.2.1 金刚石结构	26
2.2.2 石墨结构	27
2.2.3 刚玉晶体结构	27

2.2.4	萤石型结构	27
2.2.5	钙钛矿结构	28
2.2.6	尖晶石型结构	29
2.3	陶瓷的晶体缺陷	30
2.3.1	缺陷的类型	30
2.3.2	固溶体	35
2.3.3	非化学计量化合物	38
	主要参考文献及延伸阅读材料	41
	思考讨论题	41
第3章	特种陶瓷粉体原料	42
	本章导读及内容提要	42
3.1	常见原料及其要求	42
3.2	超细粉体的特性及其表征与评价	46
3.2.1	粉体的粒度及填充特性	47
3.2.2	粉体的颗粒形态和表面特性	51
3.3	超细(纳米)粉体的合成	53
3.3.1	固相法	56
3.3.2	湿化学法	65
3.3.3	气相法	78
3.4	纳米粉体的团聚和表面改性	81
	主要参考文献及延伸阅读材料	87
	思考讨论题	87
第4章	特种陶瓷的配料及坯体成型	88
	本章导读及内容提要	88
4.1	配方计算及坯料制备	88
4.1.1	配方计算	88
4.1.2	坯料的制备和处理	90
4.2	注浆成型	94
4.2.1	注浆成型原理及方法	94
4.2.2	常规注浆成型方法	102
4.2.3	热压铸成型	104
4.2.4	流延成型	105
4.2.5	原位凝固胶态成型	107
4.3	可塑成型	115

4.3.1 可塑成型原理	116
4.3.2 传统可塑成型原理及方法	120
4.3.3 挤压成型	120
4.3.4 注射成型	121
4.3.5 轧膜成型	126
4.4 压制成型	127
4.4.1 压制成型的工艺原理及方法	127
4.4.2 单轴压制成型	133
4.4.3 等静压成型	134
4.4.4 超高压成型	135
4.5 3D 打印成型	136
4.5.1 3D 打印的基本过程	136
4.5.2 3D 打印技术	137
4.5.3 陶瓷 3D 打印的难点	139
4.6 成型模具	140
4.6.1 多孔模具	140
4.6.2 金属模具	142
4.6.3 弹性模具	143
4.6.4 模具的放尺	144
4.7 坯体的干燥	144
4.7.1 含水坯体的干燥过程	144
4.7.2 干燥收缩与变形	146
4.7.3 凝胶的干燥及超临界干燥方法	147
4.8 坯体的脱脂	149
4.8.1 脱脂的目的和作用	149
4.8.2 脱脂过程中的物理化学变化	150
4.8.3 影响脱脂过程的因素及脱脂制度的制订	150
主要参考文献及延伸阅读材料	153
思考讨论题	153
第 5 章 特种陶瓷的烧结及显微结构	155
本章导读及内容提要	155
5.1 特种陶瓷材料烧结理论	155
5.1.1 烧结的几个阶段	156
5.1.2 烧结过程中物质的传递	156
5.1.3 烧结过程中的再结晶和晶粒长大	160

5.2 特种陶瓷烧结方法	165
5.2.1 常压烧结及反应烧结	165
5.2.2 气体压力烧结	167
5.2.3 热压烧结及热等静压烧结	167
5.2.4 强化快速烧结新技术	169
5.3 特种陶瓷的显微结构	173
5.3.1 显微结构的定义	173
5.3.2 特种陶瓷显微结构的组成特点	176
5.3.3 显微结构的分析	186
5.4 烧结制度的制定及其对显微结构的影响	190
5.4.1 影响烧结的因素	190
5.4.2 烧成制度的制订	193
主要参考文献及延伸阅读材料	195
思考讨论题	195
第6章 特种陶瓷的加工	197
本章导读及内容提要	197
6.1 陶瓷的机械加工	197
6.1.1 陶瓷材料的磨削及其机理	198
6.1.2 研磨及抛光	201
6.2 陶瓷加工新方法	204
6.2.1 激光加工	204
6.2.2 电火花线切割加工	207
6.2.3 电子束加工	208
主要参考文献及延伸阅读材料	208
思考讨论题	208
第7章 主要结构陶瓷的工艺实践	209
本章导读及内容提要	209
7.1 氧化铝陶瓷及透明陶瓷	209
7.1.1 氧化铝的晶型及制品分类	210
7.1.2 氧化铝陶瓷的制造	212
7.1.3 透明陶瓷及其制备要点	217
7.2 氧化锆陶瓷及相变增韧	226
7.2.1 氧化锆粉末的制备	226
7.2.2 氧化锆的晶型转变及其稳定化处理	227
7.2.3 相变增韧机理	229

7.2.4 氧化锆相变增韧陶瓷及制备	238
7.3 氮化硅陶瓷及赛隆陶瓷	240
7.3.1 氮化硅的晶体结构	242
7.3.2 氮化硅的制备	243
7.3.3 赛隆陶瓷	248
7.4 碳化硅陶瓷及纤维增韧陶瓷	251
7.4.1 碳化硅的晶体结构和相图	251
7.4.2 碳化硅粉体的制备	253
7.4.3 碳化硅陶瓷的烧结	254
7.4.4 碳化硅陶瓷基复合材料	257
7.5 层状陶瓷	264
7.5.1 Ti_3SiC_2 的晶体结构	266
7.5.2 Ti_3SiC_2 合成与制备	267
主要参考文献及延伸阅读材料	270
思考讨论题	270
第 8 章 陶瓷材料的设计和材料基因工程	271
本章导读及内容提要	271
8.1 设计依据和限制	271
8.1.1 工程材料全生命周期设计理念	271
8.1.2 应用上的要求和性能上的限制	272
8.1.3 制造上的限制和成本问题	274
8.2 材料基因工程	275
8.2.1 材料基因工程的提出及发展方向	276
8.2.2 材料数据库建设	276
8.2.3 材料计算设计与模拟的发展	279
8.2.4 材料的高通量制备与表征	284
主要参考文献及延伸阅读材料	291
思考讨论题	291
第 9 章 特种陶瓷工艺的发展方向	292
本章导读及内容提要	292
9.1 国家关于材料发展的规划	292
9.2 特种陶瓷及其工艺发展方向	297
主要参考文献及延伸阅读材料	300
思考讨论题	300

第 1 章 绪论——特种陶瓷的概念及分类

本章导读及内容提要

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。材料科学技术是 21 世纪优先发展的关键战略领域之一，被视为新技术革命的基础和先导。按照组成，材料一般分为金属材料、有机材料、无机非金属材料及复合材料。属于无机非金属材料的特种陶瓷在高技术行业中起着重要的作用，从某种意义上可以说，特种陶瓷的发展水平决定了某些行业的发展高度。那么什么是特种陶瓷，它与人们平时所熟知的普通陶瓷有哪些区别？本章将主要解答这些问题，介绍陶瓷发展简史、特种陶瓷的定义与分类及其共性特点等内容。

1.1 陶瓷发展简史

广义的陶瓷就是所有无机非金属材料或制品的总称（1968 年美国科学院定义）。从狭义上讲，陶瓷材料主要指多晶多相的无机非金属材料，人们习惯于将其分为普通（传统）陶瓷和特种（新型）陶瓷两大类。特种陶瓷只有百年历史，而普通陶瓷历史悠久，在人类文明进步中起着重要的推动作用。普通陶瓷根据吸水率大小又可分为陶器和瓷器，以及介于二者的炆器。就传统工艺来说，普通陶瓷是指将黏土、石英、长石等硅酸盐类天然矿物岩石原料经配料、成型及高温处理变成有用的多晶多相材料。从成分上看，普通陶瓷属于硅酸盐材料，从显微结构上看，是由包括晶相、玻璃相及气孔所构成的多相系统。这些相在数量上的变化，对陶瓷的性质有一定影响，而显微结构的特点又受原料和工艺过程的极大影响。下面对我国陶瓷的发展简史进行介绍，从中也可看到陶瓷工艺的进步对陶瓷发展的影响。

1.1.1 陶器起源和发展

陶器在距今一万年前就已出现，是人类第一次通过化学变化将一些物质转变成另一种物质的创造性活动，其起源具有世界普遍性，标志着人类文化开始从旧石器时代跨入新石器时代，是人类发展史上的一个里程碑。最早出现的陶器大多

是泥质或夹砂红陶、灰陶及夹炭黑陶，到新石器时代中晚期，出现了以彩陶和黑陶为特色的灿烂辉煌的史前文化。

六七千年前发源于黄河中游地区的仰韶文化彩陶，体现了中华民族在制陶艺术上的惊人创造才能，采用天然颜料在成型好的陶胎上绘制图案后烧成，其所涂彩色料大致有赭、红及黑色（主要着色剂为铁和锰）。彩陶最初的纹饰受编制物影响很大，如席纹、篮纹和绳纹，尤以鱼纹和漩涡纹为代表，同时还有写实的舞蹈纹，如图 1-1 所示，这些神秘纹饰代表了远古人民的原始宗教思想。彩陶上还发现了汉字起源时的简单文字。

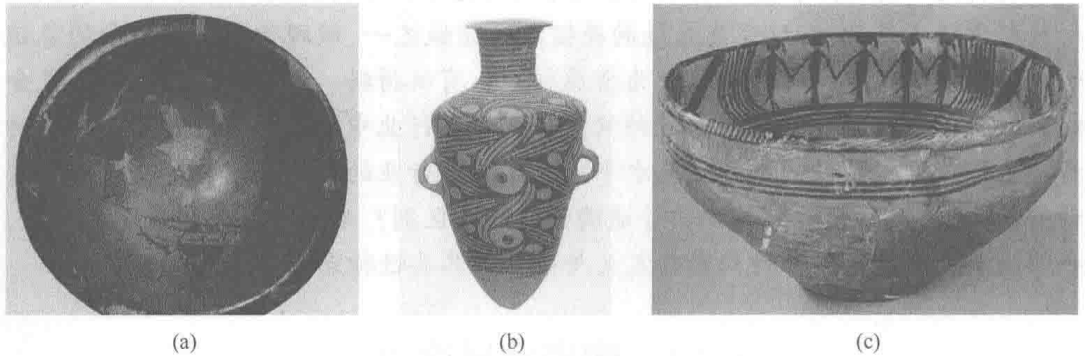


图 1-1 人面鱼纹彩陶钵 (a)、尖底瓶 (b) 和舞蹈纹盆 (c)

新石器时代晚期，在黄河下游和东部沿海兴起以龙山文化为代表的黑陶，其特点为“黑、薄、光、纽、挺”。黑陶在工艺上采用先进的陶轮制作，并采用封窑渗碳技术，不以纹饰取胜，而以造型和胎色见长，优质者质细而薄、色黑而光、素面无纹，俗称蛋壳陶。这一时期还出现了白陶，用白色高岭土为主要原料，以 1000°C 左右高温烧成，质细色白。商代是白陶制作的高峰时期，至西周几乎销声匿迹。商周开始把陶器应用于建筑方面，出现陶制砖瓦等建筑材料，至秦汉，以“秦砖汉瓦”闻名于世。1975 年在陕西临潼秦始皇陵东侧出土的巨型陶兵马俑，其尺寸类同真人真马、造型生动、工艺精巧，并有彩绘，是罕见的古代巨型雕塑杰作，说明当时在陶俑成型和烧造方面具有很高能力，是我国陶瓷工艺发展史上的辉煌成就。

两汉是我国陶器制造非常发达的时代，尤其是釉陶，水平很高。汉代釉陶的釉色有翠绿、赭黄、铜绿、灰青等，基本上都属于以少量氧化铜或氧化铁为着色剂，铅做助熔剂的低温釉，被称为铅釉陶或绿釉陶。随着使用原料的选择和精制、烧成温度的提高，又出现了高温石灰釉，使汉代末期的釉陶向胎质更致密、釉层更光亮透明、胎釉之间结合良好的瓷器过渡。汉代以后，瓷器得到不断发展，但致密度和光泽都不及瓷器的陶器，并未因此消失。陶器由于其密度较小、不易变形、易于制造大件器物等特点，加之原料易得、烧成温度低、工艺技术要求不高、民间需求量大等原因，一直经久不衰，与瓷器并存到现在。历代在陶器品种上也

不断推陈出新。例如，唐代的三彩陶是一种低温铅釉陶器，以黄、绿、白三色为主，用含铁、铜、钴、锰等元素的矿物作颜料，配以大量铅化合物，釉料在受热时向四周扩散流动，各种颜色互相浸润交融，形成自然而又斑驳灿烂的彩色釉。宋代以后在江苏宜兴地区兴起的紫砂陶器，由质地细腻、可塑性强、结合力好、含铁量高的特殊天然陶土制成，最适于做茶壶，颇具文化意蕴。如此等等，都是曾经在历史上闻名遐迩，至今声名不衰的著名陶器。

1.1.2 瓷器的出现和发展

瓷器是举世公认的我国古代伟大发明之一，远在 3000 多年前的商、周时代，即创烧了原始瓷器，又经过 1000 多年，大致在东汉时期，出现了成熟瓷器，使我国成为世界上最早发明瓷器的国家，图 1-2 是我国出土的东汉时期青瓷五连罐。对在浙江上虞小仙坛出土的东汉越窑青瓷片的研究表明：其吸水率为 0.42%~0.28%，显气孔率为 0.92%~0.62%，在光学显微镜下，可看到瓷胎里有发育较好的莫来石晶体，说明其烧成温度已达 1300℃ 左右。无论在组成还是工艺上，这些瓷片都已达到近代瓷器的标准。

从陶器到瓷器是我国陶瓷生产史上的一个重大飞跃，陶瓷的发明源于陶瓷工艺技术的重大突破，即原料的选择和精制、炉窑的改进和烧成温度的提高、釉的发现和使用时。前一个突破是陶器向瓷器发展的内在因素，后两个突破则是陶器向瓷器发展的外因条件。

我国瓷器在完成由陶向瓷过渡以后，进入了普遍发展时期，基本沿着青、白、彩瓷的方向发展。最早出现的瓷器以青瓷为主。至隋唐时代，经济、文化发达，由于生活的需要和禁用铜器，陶瓷制造业有了更大发展，并且出现了白釉瓷器。唐代瓷器产区分布很广，出现“窑”的专称。其中以浙江越窑的青瓷和河北邢窑的白瓷齐名全国，“邢瓷类银、类雪”“越瓷类玉、类冰”，形成了“南青北白”的瓷业发展格局。

宋代是我国古代陶瓷发展的辉煌时期，南北各地的窑业得到极大发展，各地名窑风起，尤以汝、官、哥、钧、定五大名窑为代表。汝窑在河南宝丰县，其釉以卵青色为主，器物通体有极细的纹片，是我国烧瓷技术采用铁还原着色的一个划时代的发展。官窑北宋时在河南开封，南宋时在浙江临安（今杭州），釉色主要是粉青。哥窑在浙江，窑址不详，黑胎青瓷，以紫口铁足和金丝铁线为特征。钧窑在河南禹县，是应用铜红釉最早的窑，其釉色丰富多彩，如茄紫、朱砂红、胭



图 1-2 出土的东汉时期青瓷五连罐

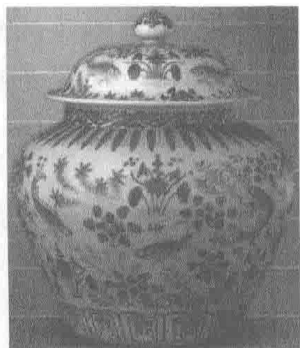


图 1-3 明嘉靖景德镇出产的青花红彩鱼藻纹盖罐

脂斑、鸡血红、葱翠青等，并创造出窑变花釉。定窑在河北曲阳，继承了邢窑制瓷传统，以白釉为主，兼烧红、紫、黑、绿定。此外，陕西耀州窑、福建建窑、江西吉州窑、浙江龙泉窑、河北磁州窑，都是当时著名的窑场，誉满海内外。元代虽然短暂，但在陶瓷发展上多有创新，出现了青花和釉里红等彩瓷。明清时期陶瓷业出现五彩缤纷的局面，景德镇成为全国制瓷中心，也是官窑所在地，大量生产影青瓷、青花瓷、斗彩、五彩、粉彩等，至今不衰。图 1-3 为我国明朝时期景德镇出产的青花红彩鱼藻纹盖罐。

1.1.3 中国瓷器对世界瓷器发展的贡献

国外著名科学技术史料，李约瑟编著的《中国科学技术史》认为，在瓷器方面，西方落后于中国 11~13 个世纪。世界各国的瓷器发展都比中国晚得多，在早期瓷器的纹饰、造型及工艺制作过程，很容易找出源自中国的痕迹。中国瓷器为人类文化进步做出了重大贡献！

中国瓷器自 7 世纪初开始传播海外，各国竞相仿造。公元 918 年朝鲜学会了中国制瓷技术，在康津地区设窑烧造瓷器，能仿制越窑、汝窑、磁州窑、龙泉窑等各窑的制品。南宋嘉定十六年（公元 1223 年）日本人加藤四郎到福建学习制陶技术，五年后，回国在濑户地烧制黑釉炻瓷器，后人称为“濑户物”。明正德年间，日本又派人来中国景德镇学习制作青花瓷，归国后在有田设窑烧造瓷器。埃及人从法特米王朝（公元 969~1171 年）开始仿制中国瓷器。13 世纪波斯人仿造的瓷器中有中国式凤凰图案。伊拉克、叙利亚、土耳其等国所制瓷器的风格，均能不同程度看出中国瓷器的影响。1470 年前后，意大利威尼斯人开始从阿拉伯人手中学习中国制瓷技术。17 世纪中叶法国首先仿制中国瓷器，制成青花软质瓷，但还不能称为成熟的瓷器。直到 1708 年，德国迈森国家瓷厂的鲍特盖尔制成第一批硬质瓷，成为欧洲仿造中国瓷器的最先成功者。1712 年和 1722 年法国人传教士殷弘绪，以神父身份搜集了景德镇制瓷工艺的实况材料，详细地向法国报告，对欧洲瓷器的制造有很大的作用，之后几十年内，英国、法国、瑞典、丹麦等相继生产出硬质瓷，美国瓷器则于 1890 年出现。

1.1.4 特种陶瓷的出现和发展

随着 20 世纪电子、航空、核能、化工和冶金等行业的不断发展，材料使用

环境更为苛刻，对材料性能要求不断提高，开发和有效利用高性能材料成为陶瓷发展的必然趋势。人们进行了大量的实验来改进以硅酸盐原料为主的传统陶瓷，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、耐腐蚀特性或其他各种功能特性。后来发现，不使用传统的天然硅酸盐原料，也可以制成陶瓷，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，出现了崭新的陶瓷材料，由于制造工艺与传统陶瓷不同，更重要的是其化学组成、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 (special ceramics)，也称为先进陶瓷 (advanced ceramics)、高技术陶瓷 (high technology ceramics)、精细陶瓷 (fine ceramics) 等。

从经济建设和近代高技术的发展来看，特种陶瓷起着重要的基础和先导作用，是许多高技术行业发展的关键因素。例如，高温结构陶瓷与复合材料一直极大地推动了航空航天、兵器与运载工具的技术向高速度、高搭载和长寿命方向发展；半导体材料促使了光电子技术的极大发展，形成了半导体发光二极管和激光器的新兴产业；由于在 La-Ba-Cu-O 化合物中观察到 30K 以上的超导转变，开创了高温超导的新兴技术领域；以石墨烯为代表的纳米碳材料的诞生使纳米技术走向新材料研究的前沿；弛豫铁电、压电陶瓷的突破使高性能超声换能器、压电驱动器得到发展，在医学等高技术领域广泛应用；氧化物和超薄膜材料中巨磁阻效应和隧道磁电阻效应的发现，使磁存储密度获得很大提高，磁记录产业得到迅速发展。

与金属材料相比，特种陶瓷具有密度低、强度高、耐高温和抗腐蚀等优秀性能，其发展历史虽短，但发展迅猛，发现新材料的概率很高。从资源上讲，其主要原料所含元素的矿物储量丰富；许多特种陶瓷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，而且其功能可通过成分和工艺进行调控。因此，特种陶瓷在 20 世纪中期出现以后，得到迅速发展，各主要工业国都十分重视特种陶瓷的开发研究，形成世界性的陶瓷热。

1.2 特种陶瓷的定义与分类

如前所述，特种陶瓷是随着一些高技术行业的发展应运而生的，相对于普通陶瓷，其发展历史非常短暂。目前，关于特种陶瓷的定义尚无公认标准，美国陶瓷专家 Kingery 的定义为：制造和应用固体制品的技艺和科学，这种固体制品主要由无机非金属材料作为基本组分组成 (The art and science of making and using solid articles, which have, as their essential component, and are composed in large part of inorganic nonmetallic material)。本书作如下定义：特

种陶瓷是使用人工精制的粉末为原料，通过精细的配方计算，采取先进的成型和烧结方法，获得具有特定显微结构和性能的制品，再根据需要经过加工处理达到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以下六点。

1) 在原料上，突破了以黏土等矿物岩石为主要原料的界限，主要采用化工原料。

2) 在成分上，普通陶瓷的组成由天然原料决定，其成分特点有一定的地域性，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，突破了普通陶瓷以可塑成型为主，以炉窑为主要烧成手段的界限，广泛采用各种新型的成型及烧结工艺。

4) 材料设计方面，随着知识和经验的积累及技术的进步，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，实现原料—工艺—显微结构—性能的统一。

5) 在显微结构和性能上，普通陶瓷为典型的液相烧结结构，晶粒较大、玻璃相含量高；特种陶瓷则通常晶粒组织细小、玻璃相含量少或没有。由于显微结构的差别，后者不仅在性能上远优于前者，而且发掘出前者所没有的性能和用途。

6) 普通陶瓷一般不需加工，特种陶瓷则经常需精加工以获得符合要求的尺寸精度。

可以说，上述普通陶瓷和特种陶瓷的异同高度概括了本书主要内容，在后续学习过程中，通过对比，深入思考造成二者异同的本质原因将非常有助于对陶瓷工艺原理和技术理解。

近年来，在现代生产和科技的推动下，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和非氧化物陶瓷两大类，后者又包括氮化物、碳化物、硼化物、硅化物陶瓷等。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，如由氧化锆、二氧化钛、氧化铅、氧化镧结合而成的锆钛酸铅镧（PLZT）陶瓷等。人们为了生产、研究和学习上的方便，有时不按化学组成，而是根据性能及用途将特种陶瓷分为结构陶瓷和功能陶瓷两大类。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。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。图 1-4 所示为陶瓷发展历史上的几大飞跃。



图 1-4 陶瓷发展历史上的几大飞跃

1.2.1 结构陶瓷

结构陶瓷 (structural ceramics) 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。由于它具有耐高温、耐磨损、抗腐蚀和氧化、耐冲刷及烧蚀等优异性能, 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。典型的结构陶瓷包括氧化铝、氧化锆、氮化硅、碳化硅、碳化硼、硼化钛等。

虽然高性能结构陶瓷具有一系列优异性能, 但其致命的弱点是脆性大, 制约了其使用范围。改善结构陶瓷的脆性, 增强韧性是长期以来研究的热点和难点。另外, 对于特种陶瓷, 在强调其机械性能时, 还需注意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。在提高特种陶瓷材料平均强度的同时, 如何提高强度的可靠度, 成为结构陶瓷材料开发研究的另一个重要课题。

1.2.2 功能陶瓷

功能陶瓷 (functional ceramics) 主要指利用其电、磁、光、声、热、核和生物性能, 包括这些性能之间及与力学性能之间的交叉耦合效应来制作的各类与能