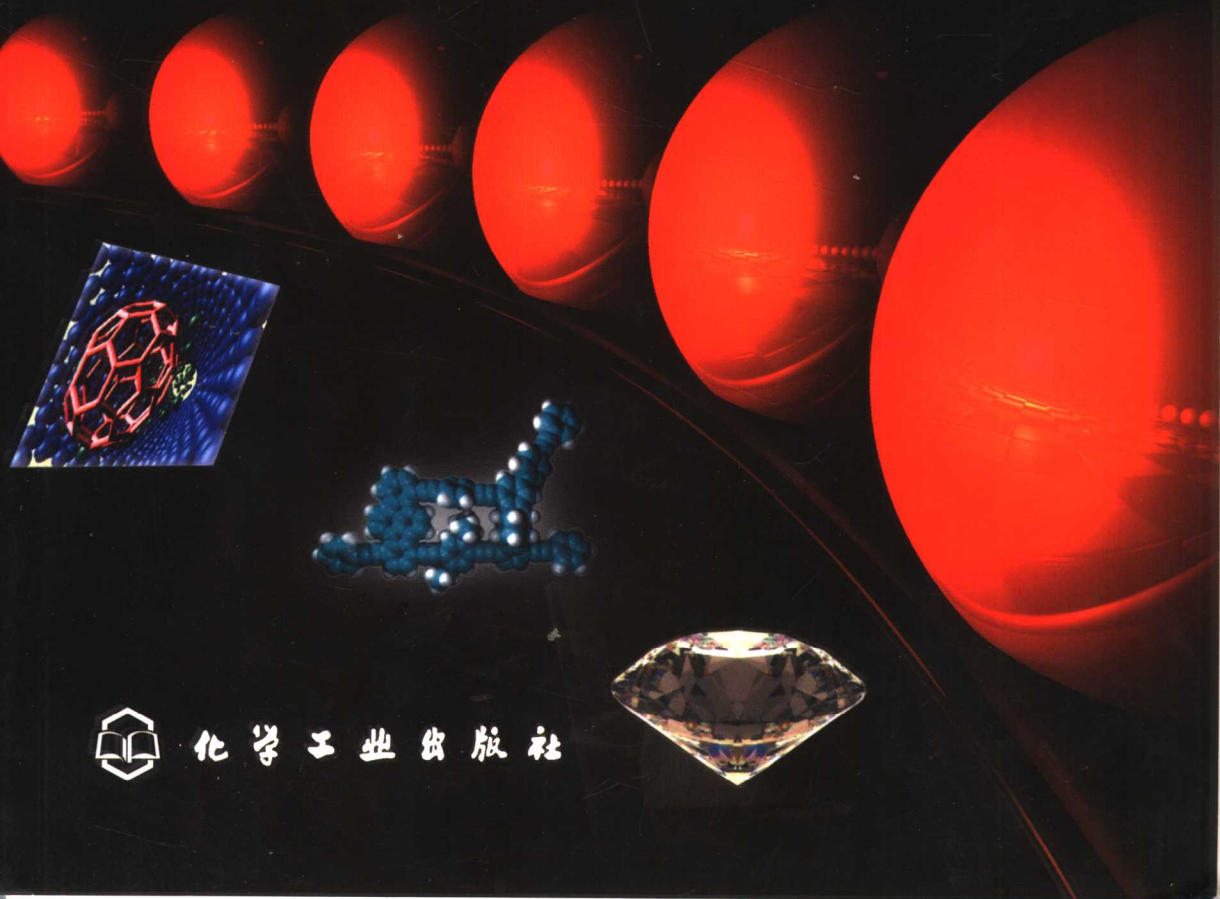


陶瓷材料

显微结构与性能

◆ 张金升 张银燕 王美婷 许凤秀 编著



化学工业出版社

陶瓷材料 显微结构与性能

◆ 张金升 张银燕 王美婷 许凤秀 编著



化学工业出版社

·北京·

本书吸收了近年来大量最新科研成果,理论联系实际,图文并茂地讨论了陶瓷材料的显微结构及其性能。陶瓷材料的显微结构千变万化,繁杂深奥,本书在系统介绍基本知识的同时,引用丰富的实例和图片,深入浅出地分析陶瓷材料显微结构的特点及其与材料性能的关系,为读者呈现出一幅游历材料王国微观世界的美丽图景。书中不仅对作为最终产品的陶瓷材料显微结构进行了全面论述,而且对工艺过程的中间产品如原料、坯体等的显微结构也进行了分析介绍;不但研究结构方面的知识,同时涉及表征技术;既涉及结构陶瓷,又包括功能陶瓷,还兼顾普通陶瓷;对于与材料结构性能研究密切相关而大多数文献中鲜有涉及的非平衡态研究、分形维数理论、体视学知识等也进行了论述。

本书在有限的篇幅内为读者提供了陶瓷材料结构与性能方面的大量信息,语言通俗易懂,既有理论深度,又注重简洁实用,适用于从事陶瓷材料研究、生产的各个层次的读者群。本书提出的方法对无机非金属材料的研究具有普遍指导意义,可供从事陶瓷材料研究和生产的科技人员阅读参考,亦可作为有关无机非金属材料专业大学生或研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

陶瓷材料显微结构与性能/张金升,张银燕,王美婷,许凤秀编著. —北京:化学工业出版社, 2007.5
ISBN 978-7-122-00198-6

I. 陶… II. ①张…②张…③王…④许… III. ①陶瓷-无机材料-显微结构 ②陶瓷-无机材料-性能
IV. TQ174.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 043170 号

责任编辑: 窦 臻

文字编辑: 林 丹

责任校对: 李 林

装帧设计: 潘 峰

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: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市前程装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张 21¼ 字数 432 千字 2007 年 5 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: 49.00 元

版权所有 违者必究

序 言

材料显微结构的千差万别导致了其性能的千变万化，显微结构决定着材料的性能。

相对于金属材料和有机高分子材料而言，陶瓷材料的显微结构更多变、更复杂，由此得到的材料性能更独特、更奇妙。当代科技对材料的性能要求越来越高，越来越苛刻，陶瓷材料是最有希望担当起这些重任的先进材料之一。研究陶瓷材料的显微结构是研究开发相关材料的前提，是材料科学和工艺发展基础和关键。

近几十年来，人们对材料显微结构的研究越来越重视，材料显微结构研究在材料研发中起到越来越大的作用。对于陶瓷材料显微结构的研究，尽管在许多文献和专著中都有所涉及，但大都比较零散，目前尚鲜见专门论述陶瓷显微结构的著作。陶瓷材料显微结构十分复杂，透彻地研究它，需要有厚实的理论基础和丰富的微观结构观测的实践经验，这也使得它成为许多材料工作者既渴望了解又望而却步的领域，因而也就迫切需要一部系统明晰而又较通俗易懂的专著问世。《陶瓷材料显微结构与性能》的出版，可以说在这方面进行了有益的尝试。

该书作者张金升教授等人，孜孜以求，耕耨不辍，旋有此不菲果实，可喜可贺。该书较全面地论述了现有陶瓷材料的显微结构特点和规律及其对材料性能的影响，是作者花费大量心血精心撰写而成的。该书信息量大，内容丰富，图文并茂，基本知识系统，理论联系实际，并吸收了近年来大量最新科研成果，对于从事陶瓷领域工作的教学科研人员、学生以及生产技术人员具有重要的参考价值。该书的出版，相信定能受到业内人士的热烈欢迎，并在陶瓷材料的研发和生产中起到良好的促进作用。同时希望作者再接再厉，不断取得丰硕的成果奉献给读者。

中国海洋大学教授 尹衍升

2007年4月于青岛

前 言

亘古以来,材料的制造、使用和发展一直伴随着人类文明史的发展。人类能够制造和使用的最早材料大概是无机非金属材料,使用最广泛的对人类生产生活影响最大的也是这类材料,即现在所谓的陶瓷材料。材料的研究和发展伴随人类从蒙昧走向文明,然而,在漫长的材料发展史中,人类一直在宏观层面上研究材料,只是到了近代,随着显微技术的发展,人们才得以进入一个美轮美奂的材料微观世界,在这里人们不但认识到物质微观结构的奇妙和谐,也更加深刻地认识到了组成和微观结构决定材料性能这一大自然的普适真理,从此人们采取各种办法力图改善材料显微结构以便改善材料性能,由此产生了一门年轻但富于生命力的学科——材料显微结构学。

材料的显微结构对材料的性能是至关重要的,一切的宏观性能都是材料微观结构的反映。近代和现代的材料研究者深刻认识到这一点,勤勤恳恳地在这片新的领域耕耘,对材料的显微结构理论、显微结构表征技术和分析技术进行了大量研究,取得了丰硕的成果。人们利用各种显微技术,包括光学显微镜、体视学方法、分形理论、X射线衍射、差热分析、能谱分析、热重分析、光谱分析、激光分析等对材料显微结构进行研究,尤其是最近几十年发展起来的电子显微技术、探针技术、电子衍射技术,可以给出材料微观结构直观而清晰的映像,探索的领域不断细微化,例如,高分辨电子显微镜已可将材料结构放大几百万倍至上千万倍,可以直接看到晶格排列的形貌,为人们研究材料结构与性能提供了强有力的手段。利用各种先进的表征技术,人们得到信息丰富的显微结构图片,同时人们研究显微图片解析技术,同样取得了丰硕的成果,目前人们已能从显微结构的微妙变化精确地推定材料性能和加工工艺。随着纳米技术在20世纪末21世纪初的蓬勃兴起,特别是扫描隧道电子显微镜的发展和使用,人们已经可以实现对单个原子的直接操作,这种学科前沿进展的意义是,人们可以制造纳米机器人,实现逐个用原子构造物质,根据预定性能要求,设计材料组成和结构,并通过一定工艺实现它们,以满足人们对材料性能的要求。

陶瓷材料显微结构的解析是了解其性能的关键。陶瓷材料显微结构复杂多变,显微图片浩如烟海,对显微结构的分析散见于各类文献中,而专门研究陶瓷材料显微结构与性能的著作较少见,从事陶瓷材料科研和生产的科技人员及陶瓷专业的大学生、研究生和教师,亟切需要一本系统论述陶瓷材料显微结构与性能的工具书。基于此目的,本书作者总结多年从事陶瓷研究、生产的经验,参阅大量国内外文献,去粗取精,综合整理,撰写成《陶瓷材料显微结构与性能》一书。本书可作为

由化学工业出版社出版的《先进陶瓷丛书》(尹衍升主编)的姊妹篇,从另外一个角度为人们提供了研究陶瓷材料结构与性能的有力工具。本书的特点在于引用 400 余幅内容丰富的显微结构图片,系统地分析了陶瓷材料显微结构特征,在理论和实践两方面论述了陶瓷材料显微结构与性能的关系,信息量大,涉及面广,将专业性较强的显微结构知识用浅显的形式表现出来,适合从事陶瓷材料学习、研究和生产的不同的读者群。

本书由山东交通学院张金升博士,文登市科技局张银燕硕士,山东轻工学院王美婷副教授、许凤秀副教授撰写。在撰写过程中得到了山东大学教授、中国海洋大学教授尹衍升先生的热情指导和帮助,谨向尹先生致以崇高的敬意!同时向山东交通学院的李浩教授,郝秀红、王彦敏、徐静、张林、徐坤忠、孙向武等老师的热情帮助,致以深深的谢意!书中引述了前人和同行的诸多研究成果,撰写过程中得到许多专家学者的坦诚指教,谨向给作者提供无私帮助的前辈和同行表示感谢!

本书的出版得到了山东交通学院科研基金的资助,谨在此表示衷心的感谢!

作 者

2007 年 3 月

目 录

绪论	1
第 1 章 陶瓷材料显微结构的基本理论	5
1.1 基本概念	5
1.1.1 陶瓷材料的显微结构和相组成	5
1.1.2 晶粒	11
1.1.3 晶粒的取向及织构	12
1.1.4 表面及界面的结构特征	13
1.1.5 晶界	14
1.1.6 气孔及裂隙	17
1.2 平衡和非平衡条件下组成物相与显微结构之间的关系	19
1.2.1 相平衡结晶过程与显微结构	19
1.2.2 同质多晶转变与显微结构	22
1.2.3 非平衡条件下的结晶过程与显微结构	23
1.2.4 玻璃晶化及不混溶过程与显微结构	24
1.2.5 烧结和固相反应与显微结构	25
1.2.6 添加剂和杂质的存在与显微结构	27
1.2.7 复合相结合过程与显微结构	28
1.3 显微结构特征的研究	29
1.3.1 晶体生长形态研究中若干问题的说明	29
1.3.2 显微结构特征研究的若干要点说明	31
1.3.3 非晶态材料的显微结构特征	32
1.4 晶体生长过程中涉及的重要参数和显微结构的关系	33
1.5 显微结构图像解析中若干问题的讨论	34
第 2 章 陶瓷材料的显微结构表征	36
2.1 陶瓷材料的显微结构特征与结构参数	36
2.1.1 陶瓷显微结构类型	37
2.1.2 陶瓷显微结构特征分析	40
2.1.3 体视学方法在陶瓷研究中的应用	41
2.2 颗粒和粉体表征	44

2.2.1	粉体表征	44
2.2.2	表征颗粒的目的和目标	44
2.2.3	颗粒尺寸分布	46
2.2.4	颗粒尺寸分布测量	50
2.2.5	在线颗粒测量	54
2.2.6	统计直径	58
2.2.7	粉末性能	62
2.3	坯体显微结构及其表征	63
2.3.1	坯体的结构	64
2.3.2	生坯的结构	68
2.3.3	表征方法	84
2.4	陶瓷烧结体的显微结构及其表征	93
2.4.1	表征技术	93
2.4.2	含缺陷陶瓷材料的显微结构	97
2.4.3	增韧陶瓷的显微结构	103
2.4.4	新型结构及制备方法	106

第3章 陶瓷材料显微结构分析

3.1	传统陶瓷的显微结构特征	114
3.1.1	瓷胎	114
3.1.2	釉层	116
3.1.3	骨质瓷	118
3.1.4	电瓷	120
3.2	结构陶瓷的显微结构特征	123
3.2.1	滑石瓷与镁橄榄石瓷	123
3.2.2	氧化铝瓷	126
3.2.3	氧化铍瓷	131
3.2.4	氧化锆瓷	132
3.2.5	氧化锡 (SnO_2) 陶瓷	137
3.2.6	硅灰石 (CS) 瓷	138
3.2.7	金红石瓷的显微结构分析	138
3.3	非氧化物陶瓷的显微结构特征	139
3.3.1	氮化硅陶瓷与其它氮陶瓷	139
3.3.2	碳化物陶瓷	145
3.3.3	多相复合陶瓷	147
3.4	功能陶瓷的显微结构特征	149
3.4.1	概述	149

3.4.2	电容器瓷和电子陶瓷	154
3.4.3	磁性瓷	158
3.4.4	压电瓷	160
3.4.5	远红外辐射陶瓷	163
3.4.6	光学陶瓷	164
3.4.7	热敏电阻瓷	165
3.4.8	氧化锌变阻器瓷	166
3.4.9	湿敏瓷	167
3.4.10	生物功能瓷	168
3.4.11	薄膜功能瓷	169
3.5	氧化物超导体和快离子导体的显微结构特征	169
3.5.1	氧化物超导体	170
3.5.2	快离子导体	173
3.6	复合材料的显微结构	176
3.6.1	陶瓷基复合材料概况	177
3.6.2	复合材料中增强材料的显微结构	181
3.6.3	陶瓷基复合材料的显微结构	184
3.6.4	金属陶瓷的显微结构分析	193
3.7	非均质材料的显微结构及其性质	194
3.7.1	概述	195
3.7.2	非均质材料显微结构特征	195
3.7.3	非均质材料宏观性质的颗粒散射理论	198
3.8	分形学在无机非金属材料显微结构研究中的应用	198
3.8.1	概述	198
3.8.2	分形图形	200
3.8.3	分形维数	200
3.8.4	分数维的测量方法	201
3.8.5	分形生长的动力学模型	202
3.8.6	分数维的测量设备	204
3.8.7	分数维测量的实例	205
3.8.8	展望	208

第4章	先进陶瓷的性能特点	209
4.1	材料性质与使用性能	209
4.1.1	材料的物理和化学性质及其使用性能	209
4.1.2	材料性质数据库	210
4.2	陶瓷材料的性能特点	211

4.2.1	陶瓷材料的性能特点	211
4.2.2	先进陶瓷在性能上的特点	221
4.2.3	功能陶瓷的性能与特征	222
4.2.4	绝缘陶瓷的性能与特征	222
4.3	陶瓷的基本性能与显微结构特征的关系	223
4.3.1	可控气孔率	224
4.3.2	室温力学强度	226
4.3.3	断裂能	229
4.3.4	抗高温变形性	231
4.3.5	热震阻力	232
4.3.6	硬度及抗磨损性	233
4.3.7	热导率	234
4.3.8	热膨胀	235
4.3.9	光学功能	236
4.3.10	特殊的电功能	237
4.3.11	磁学功能	238
4.3.12	抗腐蚀性	239
4.3.13	连接能力	239
4.3.14	总结	239

第5章 结构陶瓷的性能 241

5.1	概述	241
5.1.1	力学性能	243
5.1.2	高温性能	244
5.1.3	耐磨性能	245
5.1.4	耐蚀性能	246
5.2	滑石瓷的性能和应用	246
5.3	氧化铝 (Al_2O_3) 陶瓷	249
5.3.1	Al_2O_3 瓷的类型和性能	249
5.3.2	高铝瓷的组成和性能	250
5.3.3	氧化铝陶瓷的特性及应用	259
5.3.4	着色氧化铝瓷	261
5.4	其它高熔点氧化物陶瓷	265
5.4.1	氧化锆陶瓷的性质和应用	265
5.4.2	熔融石英 (SiO_2) 陶瓷	266
5.4.3	透明氧化物陶瓷	267
5.4.4	氧化铍和氧化镁陶瓷	268

5.5 高温碳化物陶瓷	269
5.5.1 碳化硅陶瓷的性能和应用	269
5.5.2 碳化硼陶瓷	270
5.5.3 碳化钛陶瓷	270
5.6 氮化物耐热陶瓷	271
5.6.1 氮化硅陶瓷	271
5.6.2 六方氮化硼 (HBN) 陶瓷的性质和用途	277
5.6.3 立方氮化硼 (CBN) 和超硬工具材料	278
5.6.4 氮化铝 (AlN) 陶瓷	286
5.7 高热导率瓷	286
5.7.1 高热导率材料的结构特点	286
5.7.2 BeO 瓷	288
5.7.3 BN 瓷	291
5.7.4 AlN 瓷	294
5.8 其它结构陶瓷	298
5.8.1 二硼化锆陶瓷	298
5.8.2 二硅化钼陶瓷	299
5.9 结构陶瓷的合理使用	300
5.9.1 陶瓷的脆性断裂和材料强度的韦伯 (Weibull) 分布	300
5.9.2 联合强度理论和脆性材料的优化使用	301
5.9.3 断裂韧性和陶瓷的韧化处理	303

第6章 功能陶瓷的性能 308

6.1 陶瓷材料的电性能	309
6.1.1 陶瓷材料的导电性及其机理	309
6.1.2 电导率	310
6.1.3 陶瓷材料的极化与介电常数	312
6.1.4 介电常数	314
6.1.5 陶瓷材料的介质损耗	315
6.1.6 绝缘强度	317
6.2 力学性质	318
6.2.1 弹性模量	319
6.2.2 机械强度	319
6.2.3 断裂韧性	320
6.3 热学性质	320
6.3.1 热容	321
6.3.2 热膨胀系数	322

6.3.3 热导率	322
6.3.4 抗热冲击性	323
6.4 光学性质	323
6.5 磁学性质	325
6.6 耦合性质	326
6.7 功能陶瓷的腐蚀与氧化	327
6.8 其它物理性质	327
参考文献	328

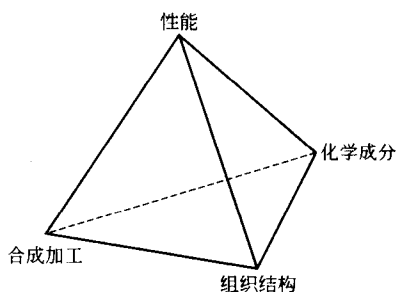
绪 论

一切客观实在都是由材料组成的，材料是用一种或多种物质结合而成的，构成物质的基础是分子、原子，原子可进一步分解为电子、质子、中子，比电子、质子、中子更小的也是目前人类所能认识到的最细微的物质组成是光子、介子、夸克、超子、胶子、强子、轻子、传播子等基本粒子，在基本粒子尺度下物质趋于大同。基本粒子在超微观世界里是简单的、和谐的，这也是人们探索物质世界的美学追求。现代科技对基本粒子的研究还处于探索阶段，对原子、分子的研究相对来讲比较丰富，也正是在原子、分子这一层面上，决定了人们生活的客观世界的千变万化。

一切的宏观性能都是由微观结构决定的。材料的微观结构主要指的是组成材料的原子、分子层面上的存在环境和排列结合状态，它们的存在环境决定了同一种原子、分子可能表现出不同的性质，它们的相互排列结合状态是体现宏观物质性能的根本基础。目前，人们有足够的探索原子分子层面微观结构的奥秘，但这需要艰深的知识和复杂的设备以及昂贵的技术手段，因而这部分研究内容成为前沿基础科学的任务。另一方面，在亚微观层面上，即原子团簇、纳米、微米尺度上进行研究要简单得多，也较易于被广大研究者所掌握，同时这一尺度上物质的结构足以反映宏观物体的性能，因此从事应用基础研究和应用研究的专家和学者转而探索这一领域。在这个尺度范围内物质的结构状态就是人们熟知的显微结构。显微结构基本上决定了材料的宏观性能，进行显微结构研究可操作性强，因而对显微结构的研究变得十分重要。

按照现代材料分类的观点，陶瓷材料是一切无机非金属材料的统称。陶瓷材料以其原料来源的广泛性（占地壳总量的70%~80%）、材料性能的优越性（苛刻环境条件下无可替代的优异性能），在材料家族中独树一帜，是人类生活中最普遍最重要的一类材料，并且随着人类文明的进步，陶瓷材料的地位越来越重要，发展前景越来越光明。研究陶瓷材料的显微结构，可以更好地了解陶瓷材料的性能，从而指导材料组成设计和工艺革新，进而改善陶瓷材料的性能，从这个意义上讲，陶瓷材料显微结构的研究是至关重要的。

众所周知，材料的化学成分、组织结构是影响其各种性质的直接因素，加工过程则通过改变材料的组织结构而影响其性质。另一方面，改变化学成分又会改变材料的组织结构，从而影响其性质。这4个因素构成了下图所示的关系。其中组织结



材料科学与工程的四要素

构是核心，性能是研究工作的落脚点。

关于组成与性能之间的关系，不同的化学组成、颗粒组成、矿物组成在很大程度上决定了陶瓷材料的性能，尤其是化学组成（成分），其影响作用更大。例如，传统陶瓷的种类和性能与三元相图（ $K_2O-Al_2O_3-SiO_2$ 、 $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ 、 $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ 等）有关（某些与四元系统或四元以上系统有关，如骨质瓷等），某一类型的传统陶瓷

的组成必定落在相图中某一特定的区域，人们往往根据相图来指导配方设计和产品设计，并推测产品性能。对于高技术精细陶瓷来讲，其组成突破了传统陶瓷的三组分（黏土-长石-石英）的界限，可以是一元、二元、三元或更多元，高技术精细陶瓷的化学组成（单质、化合物的种类及其纯度）对其性能起着至关重要的作用。例如， Al_2O_3 陶瓷是一种重要的单组分陶瓷，但根据原料纯度又可分为高铝瓷、莫来石瓷、刚玉瓷等多种， Al_2O_3 含量可在 45%~99.99% 之间变化，相应地其性能变化很大，其应用领域的跨度变化也很大，从普通耐火材料到高技术的基板材料、超高介电材料、高频介质材料、透明及远红外材料等； ZrO_2 陶瓷，不但与其本身的纯度有关，而且与微量外加剂的种类和数量有关，如 Y_2O_3 稳定 ZrO_2 陶瓷， CaO 、 MgO 稳定 ZrO_2 陶瓷等，其性能、应用以及成本等有较大差异；多种多样的功能陶瓷，其功能特性更是与组成密切相关。

关于加工过程与材料性能之间的关系，也是显而易见的。传统陶瓷的生产一般认为受多种因素影响，从原料处理、成型到烧成各环节，都会影响到材料的最终性能。仅烧成环节来说，就要根据不同的产品和性能要求，综合考虑温度制度、压力制度、气氛制度等多种因素。高技术精细陶瓷的制造过程更为复杂，更为严格，由此发展了许多具有不同特点的粉体制备方法（粉体工程），得到具有不同性能的各种原料，发展了各种独具特色的成型方法，以适应不同产品性能的要求，发展了各种各样的烧成技术，可以影响到制品的烧成性能和微观结构，进而最终决定材料的性能。另外，高技术精细陶瓷的性能还与其后处理工艺有关，如退火、封接、被覆、切割、抛光、研磨、表面工程等，因而加工过程对材料性能的影响是多变而复杂的。

关于材料的结构，尤其是微观结构和显微结构，与材料性能之间的关系最为密切，可以说是决定材料性能的一个充分必要条件。当然，材料的组成和加工工艺往往共同决定了材料的微观结构，从这一方面来说，材料的显微结构又受到组成和加工过程的制约。要精确控制材料的显微结构是非常困难的，而按照预定的性能设计和制造材料（材料设计或分子设计，最终落实到材料显微结构设计）正是材料学家的梦想。

对于材料组成、加工过程与性能的关系，前人作了很多探索，读者可参阅相关著述和文献。材料显微结构对性能的影响是十分复杂的，本书重点对该方面的问题进行探讨。

在材料科学发展过程中，无机非金属材料愈来愈受到人们的重视，它与金属材料、高分子材料和复合材料一起，构成了材料科学的四大支柱。

为了研究和提高无机非金属材料的性能和质量，人们采用了各种物理化学方法和手段，分析其中的关键原因，取得了很大的成效。从实践中认识到，显微结构研究是其中重要的一环。人们要获得性能优良的材料，可以通过不同途径去实现，但是，这些材料的性质都是同显微结构有密切关系的。例如，微晶玻璃和透明陶瓷的产生就是通过改变显微结构而得到的。而云母微晶玻璃特殊性能的发现，终于打破了玻璃、陶瓷和金属、高分子材料在机械加工性能上的界限，这是因为它有特殊的显微结构。又如作为陶瓷机器部件用的增韧复合材料，则是通过添加剂的引入，使部分氧化锆的相变被控制起来，形成了颗粒间应力作特殊分布的新材料。在断裂强度、韧性、抗热震性和耐高温性等方面有显著的优越性。

由此可见，显微结构的研究对无机非金属材料工艺产生的影响是深刻的，许多材料在性能上出现突破，不能忽视显微结构研究从中所起的作用。

谈到显微结构，有时人们还可能把它同微观结构混淆起来。其实，前者所研究的尺度范围，至少在几个或几十个原子以上，亦即从 1nm 左右到几十纳米以上，甚至达到 0.1mm 的大小。一般应有独立的物相与之相联系。而微观结构所研究的层次，则应在晶胞尺寸以下。如果依此划分两者的界限，是比较合适的。

早期的研究者在观察矿物岩石和硅酸盐材料或制品的显微结构时，常用的仪器是偏光或反光显微镜，但是，在研究其中细节的时候，由于光学显微镜分辨率较低，一般得不到满意的结果。新的研究方法和仪器的发展，给显微结构研究带来了新的活力。其中采用特殊的显微学研究方法（如暗场照明法），同时，还开拓使用了相衬、干涉以及微差干涉相衬等显微技术，大大地提高了光学显微镜的工作本领，甚至可以获得电子显微镜所不能提供的信息。目前广泛使用的透射和扫描电子显微镜已成为研究精细显微结构的主要手段。另外，电子探针和各种能谱仪、X 射线衍射仪、电子衍射、差热分析或差动扫描量热仪等相继得到配合使用，成效更为可观，使人们在进一步掌握显微结构与材料组成、物相以及性能质量之间的关系方面达到了新的水平。

关于显微结构研究，在岩石学中早就引起了人们的注意，但由于硅酸盐系统的结构特别复杂，没有像金相学那样达到切近于物理化学的尺度。许多的研究大都只限于作物相鉴定，对结构中物相的结合状态加以描述，而在联系到岩石的形成原因时，往往失之过简。之后，人们又把显微结构研究作为工艺岩石学研究中的一个重要部分来看待。但实际上，对材料中物相和显微结构形成原因的分析，仍然没有在理论联系实际达到系统化的程度。因此，现代的研究者主要的精力就集中于图像

的解析,使之达到具有逻辑推理的水平。为达到这一目的,研究者开始从图像解析时所需要的物理化学理论加以归纳,然后根据图像,在形象思维的基础上提出一系列步骤和方法,以求切实地解决图像解析中所需掌握的若干基本原则。可以指出,人们正是以物理化学、结晶学、矿物岩石学、材料制备工艺学以及各种有关分析测试技术综合起来的知识,作为解析显微结构图像的依据。当用来解释有关结构时,既能从实质上说明图像中所表示的结构是如何形成的,又可以推测到材料所表现的性质。特别是在物相基本弄清之后,从体视学方面来认识晶体的生长形态和相变过程,去理解各相之间的结合关系,显示了定性推理上的严密性。

近年来,随着体视学研究方法的发展,使人们对样品显微结构的定量研究更加精确。凡属不同形态的同一物相,体视学从晶体生长及其环境影响过程来判断,大体上指出三维生长形态表现在二维图像上的关系,进而归纳确定样品中各种物相所占的分量,这对显微结构化学的建立和完善起着重要的作用。

由此可知,无机非金属材料显微结构研究所涉及的理论系统正在不断充实,只要我们去认真开拓,积累经验和资料,就一定能够为材料科学增添更为丰富的内容。

结合材料科学与工艺,可将显微结构研究的任务归纳如下。

① 根据无机非金属材料研究和生产过程中原料、半成品、成品的显微结构,对它们的质量进行评价。

② 通过材料或制品中缺陷的检验,从显微结构上找出缺陷产生的原因,提出改善和防止的措施,对生产进行控制。

③ 对玻璃或其它熔体(如炉渣等)与耐火材料发生的反应,通过显微结构的研究,了解其中的侵蚀机制,设法延长窑炉的使用寿命,为选择和使用适当的耐火材料提供依据。

④ 从显微结构和物理化学的基本观点出发,研究设计新材料或中间产品(如人造富矿等),以求获得较为理想的显微结构并具有预期优良性能的材料和制品。

⑤ 对其它工艺和材料使用中出现的无机非金属固体物质,通过显微结构的研究,了解它们的形成机理,以促使工艺过程的合理化,改善材料的使用效果,或者使副产品得到综合利用。

因此,无机非金属材料显微结构的研究,在现代科学领域内,将继续得到深入和发展,不断地发挥重要的作用。

第 1 章

陶瓷材料显微结构的基本理论

1.1 基本概念

1.1.1 陶瓷材料的显微结构和相组成

陶瓷材料的化学组成、晶相类型及显微结构特征是标志陶瓷材料性能最本质的因素。一般情况下，陶瓷制品是由天然原料或化工原料经过预处理、破碎、粉磨、混合、成型、干燥及高温烧成等工艺过程制成的。在上述过程中，各种影响因素都会施加在瓷件上，并最终在材料显微结构和物理化学性能上反映出来。

陶瓷属于多晶体。依其构成物相的类型不同可分为单相多晶体和多相多晶体。单相多晶体指的是构成陶瓷的相组成中主要由单一的多个晶相所组成；多相多晶体则是指除了晶相外，还有气相（气孔）和玻璃相。随着近代先进技术的发展已可制得无气孔、无玻璃相的陶瓷。在生产上总是希望产品性能优良而且稳定，可靠，重复性好，并希望显微结构均匀、致密。但由于工艺制度不同，陶瓷材料晶粒的大小、形态、结晶特性、分布、取向、晶界、表面的结构特征也不同，致使陶瓷材料性能上就有差异。因此，研究陶瓷材料的显微结构，不仅可以帮助判断陶瓷材料质量的优劣，而且可帮助我们z从工艺过程诸多的因素中，通过总结、对比，找出影响显微结构形成及变化的规律，分析工艺过程，如配料、粉磨、成型、烧成等工序条件是否合理，找出问题的原因，从而提出改进办法，以达到指导生产的目的。

把陶瓷材料的试样经过切割、磨制成薄片、光片或光薄片，分别用偏光显微镜、反光显微镜或偏光反光两用显微镜（也称矿相显微镜）进行观察和研究，这时，我们通常可以观察到结晶相、玻璃相和气相。它们的数量、几何形态、粒度大小、在空间的分布及它们相互的关系等就构成陶瓷材料的显微结构。而进一步的研究需要用到电子显微镜等技术手段。

陶瓷中的晶相、玻璃相和气相，依其存在的数量与分布上的差异，将赋予陶瓷不同的性能。因此，人们常试图对优良性能的陶瓷进行结构参数的定量测定，借此进行模拟和设计，以期找到最佳的显微结构，制备出具有优良理化性能的陶瓷来满足使用上的需要。

1.1.1.1 晶相和晶形

晶相是决定陶瓷基本性能的主导物相。在其形成和生长过程中，由于受到晶体