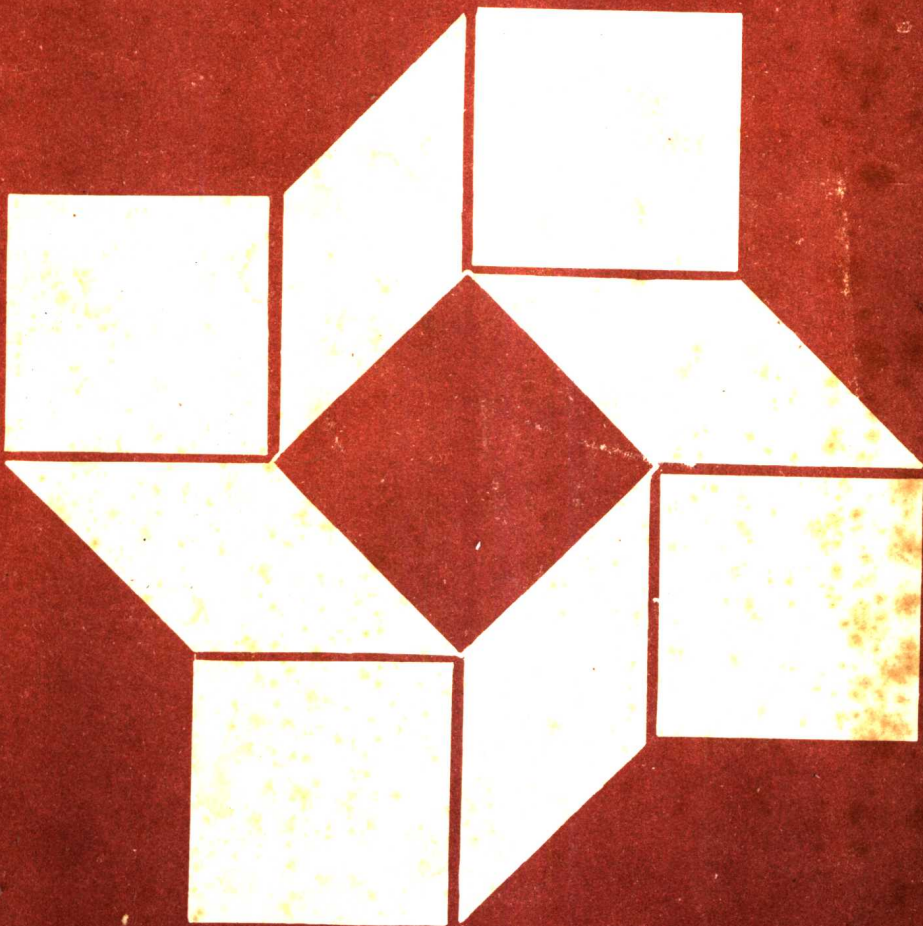


特种陶瓷工艺学



李世普 主编

高等学校试用教材



武汉工业大学出版社

高等学校试用教材

特种陶瓷工艺学

李世普 主编

武汉工业大学出版社

[内容简介]

本书为高等学校无机非金属材料专业教材。全书分为特种陶瓷生产工艺原理(三章)、高温结构陶瓷(三章)、功能陶瓷(七章)三篇。该书分篇介绍了特种陶瓷主要生产过程及其原理,按照特种陶瓷的制备工艺过程,组成、结构和性能之间的关系,详细论述了特种陶瓷的主要品种及应用。各章对所涉及的基本原理均作了简要介绍,并对某些宏观性质作了微观解释。还着重介绍了特种陶瓷生产用粉料的制备方法及其性质;对具体材料作了典型例子介绍。

该书除用作教材外,还是从事材料科学领域中与特种陶瓷材料相关的科研人员、生产技术人员、研究生们不可多得的参考文献。

高等学校试用教材

特种陶瓷工艺学

李世普 主编

责任编辑 田道全

武汉工业大学出版社出版(武昌珞狮路14号)

湖北省新华书店发行 各地新华书店经销

中南三〇九印刷厂印刷(湖北安陆九号信箱)

*

开本787×1092mm1/16 [照排胶印] 印张21.875 字数532千字

1990年12月第1版 1991年9月第2次印刷

印数1001—2000册 定价5.65元

ISBN 7-5629-0384-0/TKU·24

前 言

该教材根据1988年7月高等学校无机非金属材料专业类教材编审委员会陶瓷编审组教材计划编写。

随着科学的进步,无机非金属材料学科得到了很大的发展,新技术、新应用正日益改变着人们的生活,这一学科的发展如同高温超导陶瓷的出现一样,给人们展示了新的未来。为了使教学跟上时代的步伐,使学生较全面地了解无机非金属材料学科的知识,我们按照科学性、先进性和系统性的原则,综合归纳了国内外特种陶瓷生产和科研的成果,吸取了目前材料科学前沿中有益的内容,编写成此书。

该书分篇介绍了特种陶瓷主要生产过程的原理,按照特种陶瓷的制备工艺过程,组成结构和性能之间的关系,详细论述了特种陶瓷的主要品种及应用。全书分为特种陶瓷生产工艺原理、高温结构陶瓷、功能陶瓷三篇。各章对所涉及的基本原理均作了简要介绍并对某些宏观性质作了微观解释。该书还着重介绍了特种陶瓷生产用粉料的制备方法及其性质;对具体材料作了典型例子介绍。

全书由武汉工业大学李世普主编。编写人员为:李世普(绪论、第一篇第三章,第二篇第二、三章,第三篇第七章)、景德镇陶瓷学院肖尊文(第一篇第二章,第二篇第一章,第三篇第四、五章)、武汉工业大学陈晓明(第三篇第一、三章)、武汉工业大学邢宁(第三篇第二章)、武汉工业大学张联盟(第一篇第一章)、陈晓明、肖尊文(第三篇第六章)。全书由华南理工大学刘康时教授主审。由于这一学科所涉及的内容广泛,各学科交叉渗透,加之编者水平有限,书中难免还有一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

1990年4月

目 录

绪论.....	1
---------	---

第一篇 特种陶瓷生产工艺原理

第一章 特种陶瓷粉体的物理性能及其制备.....	4
第一节 特种陶瓷粉体的基本物理性能.....	4
一、粉体的粒度与粒度分布.....	4
二、粉体颗粒的形态及其表征.....	10
三、粉体的表面特性.....	11
四、粉体的填充特性.....	15
第二节 特种陶瓷粉体制备方法.....	19
一、固相法制备粉末.....	19
二、液相法制备粉末.....	21
三、气相法制备粉末.....	25
四、合成微粉的实例.....	29
五、等离子体合成陶瓷微粉体.....	35
六、激光法制超微粉.....	38
七、其他陶瓷粉体制备方法.....	38
参考文献.....	40
第二章 特种陶瓷成型方法.....	41
第一节 配料计算与制备.....	41
一、配料计算.....	41
二、配料制备.....	44
三、混合.....	44
四、塑化.....	45
五、造粒.....	47
六、瘠性物料的悬浮.....	48
第二节 注浆成型法.....	49
一、注浆成型.....	50
二、热压铸成型.....	50
第三节 可塑法成型.....	53
一、挤压成型.....	53
二、轧膜成型.....	54

第四节 模压成型	54
一、干压成型	54
二、干压成型的工艺原理	55
三、加压方式和压力分布	55
四、加压速度与保压时间	55
五、干压成型的优缺点	57
第五节 等静压成型	57
一、等静压成型	57
二、等静压成型方法	58
第六节 带式成型法	58
一、流延法成型	59
二、料浆要求	59
参考文献	60
第三章 特种陶瓷的烧结	61
第一节 特种陶瓷烧结概论	61
一、特种陶瓷烧结理论	61
二、添加剂对显微结构的影响	68
第二节 特种陶瓷的烧结方法	77
一、低温烧结	77
二、热压烧结	78
三、气氛烧结	80
四、其他烧结方法	80
参考文献	80

第二篇 高温结构陶瓷

第一章 氧化物陶瓷	82
第一节 氧化铝陶瓷	82
一、氧化铝陶瓷的类型及性能	82
二、 Al_2O_3 的预烧	83
三、添加剂对 Al_2O_3 陶瓷烧结性能的影响	85
四、 Al_2O_3 陶瓷的生产工艺及用途	86
五、透明氧化铝陶瓷	88
第二节 MgO 陶瓷	92
一、MgO 原料的制备	92
二、MgO 陶瓷的性质与应用	93
三、MgO 陶瓷的制造工艺	93
第三节 BeO 陶瓷	95

一、BeO 陶瓷的性质与应用	95
二、添加剂对BeO 陶瓷性能的作用	96
三、BeO 陶瓷的制造工艺	96
四、BeO 陶瓷生产中的安全保护	98
第四节 ZrO ₂ 陶瓷	98
一、ZrO ₂ 的性质	98
二、ZrO ₂ 的结晶形态和晶形转化	98
三、ZrO ₂ 陶瓷的制造工艺、性质和用途	98
第五节 ZrO ₂ 增韧陶瓷	99
一、ZrO ₂ 相变增韧机理	100
二、几种典型的ZrO ₂ 增韧陶瓷及用途	105
参考文献	109
第二章 非氧化物陶瓷	111
第一节 碳化物陶瓷	111
一、碳化硅陶瓷	112
二、其他碳化物陶瓷	120
第二节 氮化物陶瓷	121
一、氮化硅陶瓷	121
二、氮化铝陶瓷	134
三、氮化硼陶瓷	135
四、氮化钛陶瓷	140
五、Sialon陶瓷	142
参考文献	145
第三章 复合材料	146
第一节 陶瓷纤维、晶须的制备	147
一、碳纤维	147
二、硼纤维	151
三、碳化硅纤维	152
第二节 纤维补强陶瓷复合材料	154
一、纤维补强陶瓷的机理	154
二、几种有希望的复合材料系统	155
第三节 金属陶瓷	156
一、概述	156
二、金属陶瓷制造原则	157
三、金属陶瓷的制造工艺	158
参考文献	159

第三篇 功能陶瓷

第一章 电介质陶瓷.....	160
第一节 电介质陶瓷的一般特性.....	160
一、电绝缘与极化.....	160
二、极化与介电损耗.....	161
第二节 电介质陶瓷的性能及分类.....	161
一、电绝缘陶瓷.....	162
二、电容器陶瓷.....	164
三、压电陶瓷.....	165
第三节 电绝缘陶瓷生产工艺、性能及应用.....	165
一、电绝缘陶瓷的生产特点.....	165
二、刚玉—莫来石瓷及莫来石瓷.....	167
三、镁质瓷.....	171
四、装置陶瓷的应用及未来.....	179
第四节 非铁电电容器陶瓷.....	180
一、温度补偿电容器陶瓷.....	180
二、热稳定型电容器陶瓷.....	185
三、新型电容器陶瓷材料.....	190
参考文献.....	192
第二章 铁电陶瓷.....	193
第一节 压电陶瓷.....	194
一、结构与性能.....	194
二、典型的压电陶瓷.....	202
三、压电陶瓷的生产工艺.....	205
四、压电陶瓷的应用.....	208
第二节 热释电陶瓷.....	209
一、热释电陶瓷的结构和性能.....	209
二、热释电陶瓷的主要应用.....	210
三、几种典型的热释电陶瓷.....	212
第三节 透明铁电陶瓷.....	213
一、透明铁电陶瓷的组成和相图.....	213
二、透明铁电陶瓷的电光特性和应用.....	215
三、透明铁电陶瓷生产工艺.....	217
第四节 铁电电容器陶瓷.....	219
一、生产工艺.....	219
二、典型的铁电陶瓷电介质材料.....	220

参考文献.....	225
第三章 敏感陶瓷.....	226
第一节 敏感陶瓷的分类及应用.....	226
第二节 敏感陶瓷的结构与性能.....	228
第三节 敏感陶瓷的半导化过程.....	229
一、化学计量比偏离.....	229
二、掺杂.....	230
第四节 热敏陶瓷.....	231
一、热敏陶瓷的分类及阻温特性.....	231
二、PTC热敏电阻陶瓷.....	233
三、NTC热敏电阻陶瓷.....	239
第五节 气敏陶瓷.....	251
一、气敏陶瓷的分类.....	251
二、气敏陶瓷元件的结构及性能.....	252
三、吸附气体与材料电导率的关系.....	253
四、典型的气敏陶瓷.....	254
第六节 湿敏陶瓷.....	261
一、湿敏陶瓷的分类.....	261
二、湿敏陶瓷的技术参数及湿敏特性.....	262
三、几种典型的湿敏陶瓷及元件.....	263
第七节 其他敏感陶瓷.....	269
一、压敏陶瓷.....	269
二、光敏陶瓷.....	272
参考文献.....	274
第四章 导电陶瓷.....	276
第一节 β - Al_2O_3 陶瓷.....	276
一、 β - Al_2O_3 陶瓷的导电机理与性质.....	276
二、 $\text{Na}-\beta$ - Al_2O_3 陶瓷的生产工艺.....	277
三、 $\text{Na}-\beta$ - Al_2O_3 陶瓷存在的问题.....	278
第二节 铬酸镧陶瓷.....	279
一、铬酸镧的性质与导电机理.....	279
二、铬酸镧的生产工艺.....	281
第三节 ZrO_2 导电陶瓷.....	282
一、 ZrO_2 的结晶形态与稳定.....	282
二、 ZrO_2 陶瓷的导电机理.....	283
三、 ZrO_2 导电陶瓷的性质与应用.....	283
四、 ZrO_2 导电陶瓷的制造工艺.....	284
参考文献.....	285

第五章 超导陶瓷	286
第一节 超导体	286
一、超导体	286
二、超导体的分类	286
三、超导陶瓷的晶体结构	287
四、超导理论	289
第二节 超导体的性质和测试	294
一、超导体的完全导电性	295
二、超导体的完全抗磁性	295
三、超导体性能的测试	296
第三节 超导陶瓷的制造工艺	297
第四节 超导陶瓷的应用	298
一、在电力系统方面	299
二、在交通运输方面	299
三、在选矿和探矿方面	299
四、环境和医药方面	300
五、在高能核实验和热核聚变方面	300
六、在电子工程方面	301
参考文献	301
第六章 磁性陶瓷	302
第一节 磁学基本概念	302
一、抗磁性和顺磁性	302
二、铁磁体和反铁磁体	302
三、磁化过程和磁滞	303
第二节 磁性陶瓷的分类	304
第三节 铁氧体的晶体结构与亚铁磁性	305
一、尖晶石型铁氧体	305
二、磁铅石型铁氧体	306
三、石榴石型铁氧体	306
第四节 铁氧体的生产工艺	307
一、多晶铁氧体的生产工艺	307
二、铁氧体薄膜的制备	310
第五节 铁氧体微观结构与性能	311
一、晶粒大小的影响	311
二、气孔的影响	312
第六节 软磁铁氧体	312
一、软磁铁氧体的特性、用途及种类	312
二、软磁铁氧体的配方	313

三、配方中主要化学组分含量与磁特性	315
四、掺杂对铁氧体物理特性的影响	316
五、软磁铁氧体的烧结	317
第七节 其他铁氧体材料	318
一、永磁铁氧体	318
二、旋磁铁氧体	320
三、矩磁铁氧体	321
四、磁泡材料	321
五、磁光材料	322
六、压磁铁氧体	322
参考文献	323
第七章 陶瓷的金属化与封接	324
第一节 被银法	324
一、瓷件的预处理	324
二、银浆的配制	324
三、涂敷	325
四、烧银	325
第二节 烧结金属粉末法	326
一、高铝瓷钨锰金属化及金属封接	327
二、透明刚玉瓷高温烧结金属化及与金属封接	329
第三节 玻璃焊料封接法	330
一、工艺过程	330
二、焊料的组成对性能的影响	331
第四节 非氧化物系陶瓷的固相封接	333
一、非氧化物系陶瓷的封接方法	333
二、陶瓷的固相封接机理	336
参考文献	337

绪 论

陶瓷在人类生活和现代化建设中是不可缺少的一种材料。它和金属材料、有机高分子材料并列为当代三大固体材料。这三者的主要区别在于化学键，即原子间的相互作用力不同，因而表现出性质上极大的差异。陶瓷材料是以离子键及共价键为主要结合力的无机非金属材料中的主要分支。从显微结构(microstructure)及状态上来看，多数陶瓷材料包括晶体相(crystal phase)、玻璃相(glass phase)及气孔(pore)。但接近无气孔的致密陶瓷正在日益受到重视，这方面的研究及应用正在不断深入。随着科学技术不断发展，出现了不含硅酸盐的化合物陶瓷，如氧化物、非氧化物、金属陶瓷和以金属纤维或无机非金属纤维增强的纤维增强陶瓷。在有关工艺过程上也突破了传统方法，更主要的是由于其化学组成、显微结构以及性能不同于普通陶瓷，故称为特种陶瓷(special ceramics)。

关于特种陶瓷的定义，虽还有一些值得讨论的问题，但不妨可作如下定义：采用高度精选的原料，具有能精确控制的化学组成，按照便于进行结构设计及控制制造的方法进行制造加工的，具有优异特性的陶瓷。特种陶瓷这一术语首先出现于50年代的英国。当时，人们以其性质和用途不同，分别称作耐火材料、电瓷、电子陶瓷、原子能陶瓷等。可见“特种陶瓷”这一术语可看作无机非金属材料发展过程中的一个过渡阶段的特有称谓。近几年来，对这些材料的称谓则因不同国家而异：英国人认为“技术陶瓷”(technology ceramics)较为适当；美国人常将其称作“高级陶瓷”或“近代陶瓷”(advanced ceramics)、“高效陶瓷”(high performance ceramics)；日本人则常以“精细陶瓷”(fine ceramics)或“新型陶瓷”(new ceramics)命之。我国虽然有人将其称作“工业陶瓷”(industrial ceramics)，但仍以称“特种陶瓷”者居多。这主要是习惯称法之故。工业陶瓷主要包括高温、高强、耐磨、耐腐蚀为特征的结构陶瓷、用以进行能量转换的功能陶瓷(functional ceramics)及生物陶瓷(bio-ceramics)、原子能陶瓷(nuclear ceramics)。习惯上已将耐火材料和电瓷从工业陶瓷中分出去。结构陶瓷由于主要用于工业或工程上，故近年来更多地被称作“工程陶瓷”(engineering ceramics)。如切削刀具、新型发动机的最佳材料等，受到极为广泛的重视。

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、导电、绝缘、磁性、透光、半导体以及压电、铁电、光电、电光、声光、磁光、超导、生物相容性等。由于性能特殊，这类陶瓷可应用在高温、机械、电子、宇航、医学工程等方面，成为近代尖端科学技术的重要组成部分。

特种陶瓷材料的研究，主要是探求和了解材料的组成、结构与性能之间的关系。当化学组成确定后，工艺过程是控制材料结构的主要手段。为了提高现有特种陶瓷的质量和探索新材料，以适应现代化建设的需要，重要的是材料结构，包括原子结构、原子间的结合状态、键型或电子结构，还有晶体结构类型、相的体系以及它们的结合关系，最后是它们的尺寸因素、各类缺陷的存在状态及分布等。但是，对于特种陶瓷的显微结构，尤其是在烧结过程中

形成的显微结构，在很大程度上是由粉体的特性所决定。随着粉末颗粒的微细化，粉体的显微结构和性能将会发生很大的变化，尤其是亚微米-纳米级超细粉体，除能加速粉料在烧过程中动力学过程、降低烧结温度和缩短烧结时间、改善和提高烧结体的各种性能外，它还将对高性能陶瓷材料的烧结机制及其材料的新应用产生难以预期的影响。

大多数特种陶瓷材料是一种多晶体材料。因此，晶界对材料性能的影响是不可忽略的。近年来，有人提出特种陶瓷研究的“晶界工程”概念。它首先研究晶界的作用，晶界的组成及它对材料性能的影响，然后设计所需的晶界来达到人们所要求的材料性能。

特种陶瓷的研究任务主要是：一、研究现有材料的性能及改变它的途径；二、发掘材料新的性能；三、探索和发展新的材料；四、研究制备材料的最佳工艺；五、对烧后的制品进行的冷加工技术。因此，对这一领域的深入探索是陶瓷科学(ceramic science)的重要内容。这门学科的发展有待于冶金学、物理学、化学和数学等多学科的交叉渗透，共同探索。

为了弄清楚特种陶瓷显微结构的形成过程及控制机理等，直接的显微观察与成份分析是必不可少的，因为它为表征材料的显微结构提供重要的，以至定性、定量的参数。因此在表面态、非晶态、原子像、固态中的杂质与缺陷、一维与二维结构、非平衡态、相变的微观机制、变形、断裂和磨损等的宏观规律及微观机制和过程，以及点阵结构的稳定性等领域，探索性研究正日益活跃。人们期望，对特种陶瓷材料基本规律的掌握，将有助于按预定性能设计材料的原子或分子组成以及结构形态等，为特种陶瓷的广泛应用提供发展新品种、新工艺和新技术的途径。

脆性(brittleness)是陶瓷材料的一个致命弱点。陶瓷的脆性，其直观表现是：在外加负荷下断裂是无先兆的，暴发性的；间接表现是：抗机械冲击性和温度急变性差。脆性的本质主要由化学键性质和晶体结构所决定。在陶瓷中缺少独立的滑移系统，材料一旦处于受力状态就难于通过滑移所引起的塑性形变来松弛应力。从显微结构上看，脆性的根源在于微裂纹的存在，易于引起应力的高度集中，因此改善陶瓷材料的脆性是陶瓷学家的长期关注的问题。近年来，纤维补强及氧化锆相变增韧在实践中被证实对改善陶瓷的脆性以及强化陶瓷是两条有效的途径。

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。均质脆性材料的强度取决于材料中存在的临界裂纹扩展所需的应力。裂纹的大小、形状和取向，引起材料强度在同样负荷条件下呈现很大的分散性。另外，试样尺寸形状及试验方法的不同，可以得到不同的测试值，用这些值来考虑脆性材料的实际强度时，也会产生很大的差别，对上述问题的处理，一般采用Weibull统计法，在考虑材料平均强度的同时，用Weibull模量作为材料强度均匀性的量度。若两种材料的平均强度相同，则在一定的破坏应力下，Weibull模量大的材料比Weibull模量小的材料发生破坏的可能性要小。因此，在提高材料平均强度的同时，如何提高材料的Weibull模量，也即提高材料强度的可信度，已成为材料开发研究的一个重要课题。

对于功能陶瓷从其单一的力学、热学、电学、磁学、光学等向复合功能的发展是其研究的一个重要趋向。从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、温度或电场的作用，引起自发极化的变化而产生相应的电效应，因而构成了有压电、热电和

电光效应的功能陶瓷。而且，通过电畴作用、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。而传感器的一个新的发展趋势是薄膜传感器，现在多数采用物理气相沉积、离子溅射工艺制备性能优异的陶瓷薄膜。

总之，对特种陶瓷材料的研究在整个材料科学领域中还是比较年轻的，很多科学问题还未研究透彻，甚至有些问题还未涉及。随着研究的深入和发展，必然为特种陶瓷材料的性能和应用的开拓以及新材料、新功能的发现提供更坚实的科学根据，开辟更美好的前景。本书只就这一学科的主要方面作一概述，以便对这一学科的全貌有所认识，并对继续深入学习和研究提供基础。

第一篇 特种陶瓷生产工艺原理

第一章 特种陶瓷粉体的物理性能及其制备

所谓粉体(powder),就是大量固体粒子的集合系。它表示物质的一种存在状态。它既不同于气体、液体,也不完全同于固体,正如不少国内外学者所认为的,粉体是气、液、固三相之外的所谓第四相。

粉体由一个一个固体颗粒组成,所以它仍然具有很多固体的属性,例如物质结构,密度等等。它与固体之间最直观,也最简单的区别在于:当我们用手轻轻触及它时,会表现出固体所不具备的流动性和变形。

组成粉体的固体颗粒其粒径大小对粉体系统的各种性质有很大影响。其中最敏感的有粉体的比表面积,可压缩性和流动性。同时,固体颗粒粒径的大小也决定了粉体的应用范畴。如土木、水利等行业所用的粉体,其颗粒粒径一般在1cm以上;而冶金、火药、食品等部门则用粒径为 $40\mu\text{m} \sim 1\text{cm}$ 的粉体;而最近开发出来的纳米相(nanometer phase)材料,其组成颗粒的粒径却小到几纳米~几十纳米。我们所要研究的特种陶瓷粉体,一般是指其组成颗粒的粒径在 $0.05 \sim 40\mu\text{m}$ 的物系。

众所周知,决定陶瓷材料性能的主要因素有材料组分和显微结构。长期以来,人们往往把注意力主要集中在材料组分上,而忽视了材料的显微结构及其影响因素。显微结构,尤其是陶瓷材料在烧结过程中形成的显微结构,在很大程度上由原料粉体的特性,诸如颗粒度,颗粒形状,粒度分布,比表面积,团聚状态以及相组分等决定。

特种陶瓷的制备,实际上是将特种陶瓷的粉体原料经过成型、热处理,最终成为制品的过程。因此,学习和掌握好特种陶瓷粉体的特性,并在此基础上有目的地进行粉体制备和粉体性能调控、处理,是获得优良特种陶瓷制品的重要前提。

第一节 特种陶瓷粉体的基本物理性能

一、粉体的粒度与粒度分布

1. 粉体颗粒(powder particle)

所谓粉体颗粒,是指在物质的本质结构不发生改变的情况下,分散或细化而得到的固态基本颗粒。这种基本颗粒,一般是指没有堆积、絮联等结构的最小单元即一次颗粒。尽管如此,但一次颗粒由完整的单晶物质构成的情况还比较少见,很多外形比较规则的颗粒,都常常是以完整单晶体的微晶镶嵌结构出现;即使是完全由一颗单晶构成,也在不同程度上存在一些诸如表面层错等缺陷。如图1-1-1所示的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 超微颗粒,虽是一颗单晶,但通过高分辨率透射电镜,可清楚见到沿颗粒周边存在的各层错缺陷。在实际应用的粉体原料中,

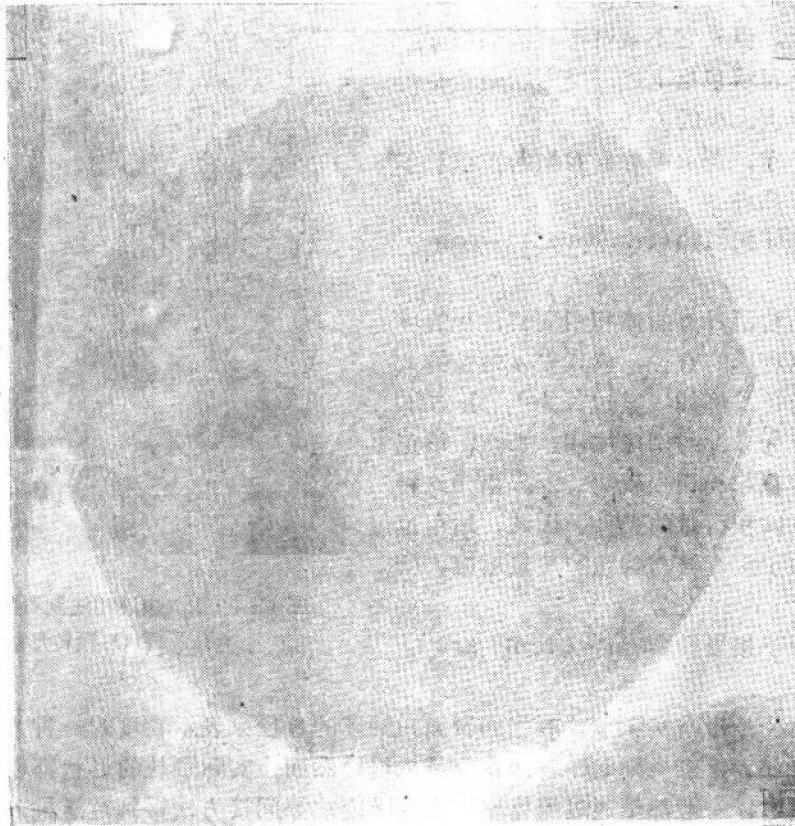


图 1-1-1 γ - Al_2O_3 超微颗粒的高分辨电子显微象

往往都是在一定程度上团聚了的颗粒，即所谓二次颗粒。尤其是特种陶瓷的粉体原料，由于它一般都比较细微，表面活性也比较大，而更易发生一次颗粒间的团聚。不管何种粉体，颗粒之间的自发团聚是客观存在。究其团聚的原因，不外乎以下五种：（1）分子间的范德华引力；（2）颗粒间的静电引力；（3）吸附水分的毛细管力；（4）颗粒间的磁引力；（5）颗粒表面不平滑引起的机械纠缠力。图 1-1-2 是用液相法制得的 TiO_2 微粉在透射电镜下的形貌象。从图中可以见到球状一次颗粒以及由其团聚而成的二次颗粒。所以，对一次颗粒和二次颗粒必须加以区别和认识。通常认为：一次颗粒直接与物质的本质结构相联系；而二次颗粒则往往是作为研究和应用工作中的一种对颗粒的物态描述指标。

2. 粉体颗粒的粒度

粉体颗粒是构成粉体的基本单位。由于粉体是具有粒度分布的大量固体颗粒的分散相，因而，不可能用单一的大小来描述。凡构成某种粉体的颗粒群，其颗粒的平均大小被定义为该粉体的粒度 (particle size)。

事实上，实际的粉体颗粒，其颗粒形状，不均匀程度都是千差万别的。绝大多数颗粒，并不是在图 1-1-2 中所见到的球形，而是条状、多边形、片状或各种形状兼而有之的不

规则体。这导致产生粒度表示的复杂性。换句话说，这使表示颗粒群平均大小的方法有多种多样。

球状颗粒的大小可用直径描述；正方体颗粒可用边长来表示。但其它不规则形状的颗粒呢？所以必须寻求能表示包括上述二类形状颗粒在内的，任何形状粒度大小的方法。

根据不同要求，表示颗粒群粒度的方法较多。但主要的有以下几种：

(1) 等体积球相当径 (equivalent volume diameter)

这是说某颗粒所具有的体积用同样体积的球来与之相当，这种球的直径，就代表该颗粒的大小即等体积相当径。例如：某边长为1的正方体，其体积等于直径为1.24的圆球体积，那么，该正方体颗粒的等体积球相当径就为1.24。由于这种方法局限于颗粒体积可求的条件，因此，适用范围不太广。但由于它直接与颗粒的质量对应，所以又很有用处。

(2) 等面积球相当径 (equivalent area diameter)

等面积相当径是用与实际颗粒有相同表面积的球的直径来表示粒度的一种方法。显然，当颗粒形状简单或者比较规则时，表面积容易求得。然而，实际颗粒的形状都较复杂，不易直接求得。应用中，一般都是通过流体透过法或吸附法等间接方法得到。这种方法比较实用。

(3) 等沉降速度相当径 (equivalent fauing-speed diameter)

等沉降速度相当径也称为斯托克斯径。斯托克斯假设：当速度达到极限值时，在无限大范围的粘性流体中沉降的球体颗粒的阻力，完全由流体的粘滞力所致。这时，可用下式表示沉降速度与球径的关系：

$$v_{s,k} = \frac{(\rho_s - \rho_f) g}{18 \eta} \cdot D^2 \quad (1-1-1)$$

式中： $v_{s,k}$ —— 斯托克斯沉降速度；

D —— 斯托克斯径；

η —— 流体介质的粘度；

ρ_s, ρ_f —— 分别是颗粒及流体的密度。

这里必须指出的是，斯托克斯公式的应用受颗粒——介质系统的阻力系数 C_D 及雷诺数 Re 的限制。图 1-1-3 表示了式(1-1-1)的适用范围。由图 1-1-3 知：式 1-1-1 适用于 $Re \leq 0.2$ 的系统。

我们利用(1-1-1)式，只要测得颗粒在介质中的最终沉积速度 $v_{s,k}$ (而实际应用中，往往取平均速度来计算)，就可以求得 D 。该 D 实际上是斯托克斯的所谓相当球径。这种方法应用

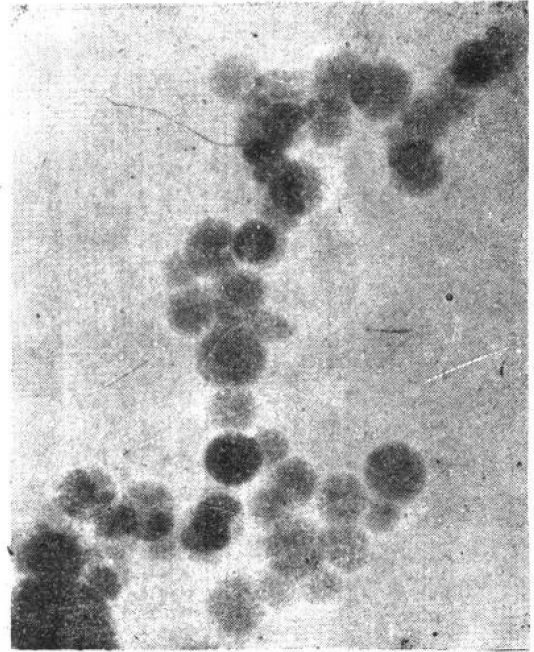


图 1-1-2 由液相法制得的球状 TiO_2 颗粒形貌