



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

无机非金属材料学

杜景红 曹建春 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

无机非金属材料学

杜景红 曹建春 编著

北 京

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

本书以材料的组成-工艺-结构-性能-效能之间的相互关系为主线,系统介绍了陶瓷、玻璃、水泥、耐火材料、无机非金属基复合材料这几种无机非金属材料制备原理、组织结构、性能特点和用途等理论知识,并扼要介绍了几种材料的最新发展动态。

本书可作为高等学校材料科学与工程专业、无机非金属材料工程专业本科生教材,也可供无机非金属材料工程领域的工程技术人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

无机非金属材料学/杜景红,曹建春编著. —北京:
冶金工业出版社, 2016. 8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7312-9

I. ①无… II. ①杜… ②曹… III. ①无机非金属材料—高等学校—教材 IV. ①TB321

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 209819 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 吕欣童 版式设计 吕欣童

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7312-9

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2016 年 8 月第 1 版, 2016 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 13 印张; 312 千字; 197 页

29.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

材料是社会文明和科技进步的物质基础和先导,材料科学与能源科学、信息科学一并被列为现代科学技术的三大支柱,其发展水平已成为一个国家综合国力的主要标志之一。

在浩如烟海的材料大家族中,无机非金属材料是人类最早认识和使用的材料。以硅酸盐为主要成分的传统无机非金属材料在国民经济和人民生活起着极其重要的作用,至今仍是国民经济重要的支柱产业。随着新技术的发展,20世纪40年代陆续涌现出了一系列新型无机非金属材料,如结构陶瓷、复合材料、功能陶瓷、新型玻璃、半导体、非晶态材料和人工晶体等。这些新材料具有耐高温、耐腐蚀、高强度、高硬度、多功能等多种优越性能,在微电子技术、激光技术、红外技术、光电子技术、传感技术、超导技术和空间技术等现代高新技术领域中占有十分重要或核心的地位。传统无机非金属材料 and 新型无机非金属材料共同构成了庞大的无机非金属材料体系,推动着科学技术的发展和人类社会的进步。

“无机非金属材料学”是高等院校无机非金属材料工程专业本科教学的一门重要专业课,是学生修完“材料科学基础”“材料工程基础”“材料性能学”等课程后开设的,具有综合性和应用性强的特点。通过本课程的学习,可使学生系统掌握各类无机非金属材料的特点、功能,理解无机非金属材料的组成与结构、合成与制备、性能及使用效能之间的关系,拓展知识视野,培养学生理论联系实际,发现问题和解决问题的能力,为今后从事专业技术工作时能够正确评定材料品质、合理使用材料打下良好的基础。

无机非金属材料涉及内容丰富而且发展迅速,本书根据自编“材料学”讲义中的无机非金属材料部分,参考国内外较新的同类教材和文献补充完善而成。编写时以材料的组成-工艺-结构-性能-效能之间的相互关系为主线,系统介绍了陶瓷、玻璃、水泥、耐火材料、无机非金属基复合材料等典型无机非金属材料的制备原理、组织结构、性能特点和用途等理论知识,同时引入了这些材料的最新研究成果,突出了新理论、新思路、新技术,并对新型无机非金属

材料也进行了适当介绍,以适应当前材料科学与工程的发展。每章后均列有思考题和习题,可帮助学生归纳总结,加深印象,检验学习掌握的程度。

本书由昆明理工大学材料科学与工程学院的杜景红和曹建春编写,全书由杜景红统稿。本书的出版得到了本校材料学精品课程建设项目的资助,编写中得到了陈庆华、颜廷亭等老师的指导和帮助,在此表示衷心的感谢!编写过程中参考了有关文献资料,向这些文献的原作者致以诚挚的谢意!研究生曹勇、赵晨旭、栗智为书稿的文字录入提供了很多帮助,在此一并向他们表示感谢!

限于编著水平,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2016年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 无机非金属材料的定义及分类	1
1.2 无机非金属材料的特点	2
1.3 无机非金属材料的作用和地位	2
1.4 无机非金属材料的发展趋势	3
1.5 无机非金属材料的选用原则	5
1.6 无机非金属材料学的研究内容	6
思考题和习题	7
2 陶瓷	8
2.1 陶瓷的概念及分类	8
2.1.1 陶瓷的概念	8
2.1.2 陶瓷的分类	8
2.2 陶瓷的制备	9
2.2.1 原料与坯料制备	9
2.2.2 成型	12
2.2.3 坯体干燥	13
2.2.4 陶瓷的烧成	14
2.2.5 施釉	17
2.3 陶瓷的结构与性能	19
2.3.1 显微结构	19
2.3.2 力学性能	27
2.3.3 热学性能	35
2.3.4 电学性能	36
2.3.5 其他性能	38
2.4 普通陶瓷及其应用	40
2.4.1 日用陶瓷	41
2.4.2 建筑陶瓷	42
2.4.3 电瓷	44
2.4.4 化工陶瓷	46
2.5 特种陶瓷及其应用	48

2.5.1 结构陶瓷	48
2.5.2 功能陶瓷	52
思考题和习题	63
3 玻璃	64
3.1 概述	64
3.1.1 玻璃的定义	64
3.1.2 玻璃的分类	65
3.1.3 玻璃的共性	67
3.2 玻璃的形成规律及其相变	68
3.2.1 玻璃的形成条件	68
3.2.2 玻璃的形成方法	73
3.2.3 传统熔体法制备玻璃工艺	75
3.2.4 熔体和玻璃体的相变	82
3.3 玻璃的结构理论	85
3.3.1 晶子学说	85
3.3.2 无规则网络学说	87
3.3.3 玻璃结构的近程有序论	88
3.3.4 几种典型的玻璃结构	89
3.4 玻璃的性质	91
3.4.1 黏度	91
3.4.2 密度	93
3.4.3 力学性质	94
3.4.4 热学性质	97
3.4.5 电学性质	98
3.4.6 光学性质	102
3.4.7 玻璃的化学稳定性	108
3.5 新型玻璃材料	110
3.5.1 微晶玻璃	110
3.5.2 光导纤维	113
3.5.3 激光玻璃	115
3.5.4 光致变色玻璃	116
3.5.5 生物玻璃	116
思考题和习题	117
4 水泥	119
4.1 水泥的定义和分类	119
4.1.1 水泥的定义	119
4.1.2 水泥的分类	119

4.2 硅酸盐水泥的生产	120
4.2.1 硅酸盐水泥的原料	120
4.2.2 生料制备	121
4.2.3 熟料的煅烧	121
4.2.4 水泥的粉磨	124
4.3 硅酸盐水泥熟料的组成	124
4.3.1 硅酸盐水泥熟料的化学组成	125
4.3.2 硅酸盐水泥熟料的矿物组成	125
4.3.3 熟料的率值	127
4.4 硅酸盐水泥的水化硬化	130
4.4.1 熟料矿物的水化	130
4.4.2 硅酸盐水泥的水化	134
4.4.3 水化速率的调节	136
4.4.4 水泥的凝结与硬化过程	137
4.4.5 硬化水泥浆体的组成和结构	137
4.5 硅酸盐水泥的性质	139
4.5.1 密度和容积密度	139
4.5.2 水泥细度	139
4.5.3 凝结时间	139
4.5.4 体积安定性	140
4.5.5 强度及标号	140
4.5.6 保水性和泌水性	141
4.5.7 耐久性	141
4.6 各类水泥及应用	143
4.6.1 火山灰质硅酸盐水泥	143
4.6.2 粉煤灰硅酸盐水泥	144
4.6.3 矿渣硅酸盐水泥	145
4.6.4 高铝水泥	146
4.6.5 快硬水泥	147
4.6.6 抗硫酸盐水泥	148
4.6.7 膨胀水泥	149
4.6.8 装饰水泥	149
思考题和习题	150
5 耐火材料	152
5.1 耐火材料的定义和分类	152
5.1.1 耐火材料的定义	152
5.1.2 耐火材料的分类	152
5.2 耐火材料的生产	153

5.2.1 耐火材料原料	153
5.2.2 原料的加工	155
5.2.3 泥料的制备	156
5.2.4 烧结耐火材料的生产	157
5.2.5 熔铸耐火材料的生产	158
5.2.6 不定形耐火材料的生产	158
5.3 耐火材料的组成、结构和性质	159
5.3.1 耐火材料的组成	159
5.3.2 耐火材料的结构	160
5.3.3 热学性质	161
5.3.4 力学性质	162
5.3.5 高温使用性质	163
5.4 耐火材料的种类及应用	166
5.4.1 硅酸铝质耐火材料	166
5.4.2 硅质耐火材料	168
5.4.3 镁质耐火材料	170
5.4.4 轻质耐火材料	171
5.4.5 不定形耐火材料	173
5.4.6 特种耐火材料	175
思考题和习题	178
6 无机非金属基复合材料	180
6.1 概述	180
6.2 复合材料的复合原理及界面	180
6.2.1 复合材料的复合效应	180
6.2.2 增强原理	182
6.2.3 复合材料界面	183
6.3 纤维增强无机非金属基复合材料	185
6.3.1 金属纤维增强材料	185
6.3.2 无机非金属纤维增强材料	186
6.4 颗粒增强无机非金属基复合材料	190
6.4.1 金属-陶瓷复合材料	190
6.4.2 碳-陶瓷复合材料	192
6.5 复合材料的发展趋势	192
6.5.1 发展功能、多功能、机敏、智能复合材料	192
6.5.2 纳米复合材料	194
6.5.3 仿生复合材料	195
思考题和习题	195
参考文献	196

1.1 无机非金属材料定义及分类

无机非金属材料是指以某些元素的氧化物、碳化物、氮化物、硼化物、硫系化合物（包括硫化物、硒化物及碲化物）和硅酸盐、钛酸盐、铝酸盐、磷酸盐等物质组成的材料，是除有机高分子材料和金属材料以外的所有材料的统称。无机非金属材料的命名是20世纪40年代以后，随着现代科学技术的发展从传统的硅酸盐材料演变而来的。无机非金属材料是当代材料体系中一个重要的组成部分。

无机非金属材料的名目繁多，用途各异，目前尚没有一个统一而完善的分类方法。通常根据无机非金属材料功能与作用的不同，分为传统无机非金属材料 and 新型无机非金属材料两大类，见表1-1。传统无机非金属材料主要是指以 SiO_2 及其硅酸盐为主要成分的材料，并包括一些生产工艺相近的非硅酸盐材料，如碳化硅、氧化铝陶瓷、硼酸盐、硫化物玻璃、镁质或铬质耐火材料和炭素材料等，这一类材料通常生产历史较长、产量较高、用途也较广，是工业和基本建设所必需的基础材料。新型无机非金属材料主要指20世纪40年代以后发展起来的，如氧化物、氮化物、碳化物、硼化物、硫化物、硅化物以及各种无机非金属化合物经特殊先进工艺制成的材料。这里的新型无机非金属材料包含两个层面的含义：一是对传统材料的再开发，使其在性能上获得重大突破的材料；二是采用新工艺和新技术合成，开发出具有各种新的和特殊功能的材料。新型无机非金属材料具有轻质、高强、耐磨、抗腐、耐高温、抗氧化以及特殊的电、光、声、磁等一系列优异性能，在高新技术领域有着重要的用途，是其他材料难以替代的和比拟的。

表 1-1 无机非金属材料的分类

材 料		品 种 示 例
传 统 无 机 非 金 属 材 料	水泥和其他胶凝材料	硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、石灰、石膏等
	陶 瓷	黏土质、长石质、滑石质和骨灰质陶瓷等
	耐火材料	硅质、硅酸铝质、高铝质、镁质、铬镁质等
	玻 璃	硅酸盐、硼酸盐、氧化物、硫化物和卤素化合物玻璃等
	搪 瓷	钢片、铸铁、铝和铜胎等
	铸 石	辉绿岩、玄武岩、铸石等
	研磨材料	氧化硅、氧化铝、碳化硅等
	多孔材料	硅藻土、蛭石、沸石、多孔硅酸盐和硅酸铝等
	碳素材料	石墨、焦炭和各种炭素制品等
	非金属矿	黏土、石棉、石膏、云母、大理石、水晶和金刚石等

续表 1-1

材 料		品 种 示 例
新 型 无 机 非 金 属 材 料	高频绝缘材料	氧化铝、氧化铍、滑石、镁橄榄石质陶瓷、石英玻璃和微晶玻璃等
	铁电和压电材料	钛酸钡系、锆钛酸铅系材料等
	磁性材料	锰-锌、镍-锌、锰-镁、锂-锰等铁氧体、磁记录和磁泡材料等
	导体陶瓷	钠、锂、氧离子的快离子导体和碳化硅等
	半导体陶瓷	钛酸钡、氧化锌、氧化锡、氧化钒、氧化锆等过渡金属元素氧化物系材料等
	光学材料	钇铝石榴石激光材料, 氧化铝、氧化钇透明材料和石英系或多组分玻璃的光导纤维等
	高温结构陶瓷	高温氧化物、碳化物、氮化物及硼化物等难熔化合物
	超硬材料	碳化钛、人造金刚石和立方氮化硼等
	人工晶体	铌酸锂、钽酸锂、砷化镓、氟金云母等
	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
	无机复合材料	陶瓷基、金属基、碳素基的复合材料

1.2 无机非金属材料的特点

无机非金属材料、高分子材料、金属材料是材料的三大支柱。无机非金属材料在化学组成上与金属材料和有机高分子材料明显不同, 其化学组分主要是氧化物和硅酸盐, 其次是碳酸盐、硫酸盐和非氧化物。随着新型无机非金属材料不断发展, 其化学组成也在不断扩展。与金属材料和有机高分子材料相比, 无机非金属材料具有下列特点:

- (1) 比金属的晶体结构复杂;
- (2) 没有自由电子 (金属的自由电子密度高);
- (3) 具有比金属键和纯共价键稳定的离子键和混合键;
- (4) 结晶化合物的熔点比许多金属和有机高分子高;
- (5) 硬度高, 抗化学腐蚀能力强;
- (6) 绝大多数是绝缘体, 高温导电能力比金属低;
- (7) 光学性能优良, 制成薄膜时大多是透明的;
- (8) 一般比金属的导热性低;
- (9) 在大多数情况下观察不到变形。

总起来说, 无机非金属材料有许多优良的性能, 如耐高温、硬度高、抗腐蚀, 以及有介电、压电、光学、电磁性能及其功能转换特性等。但无机非金属材料尚存在某些缺点, 如大多抗拉强度低、韧性差等, 有待于进一步改善。而将其与金属材料、有机高分子材料合成无机非金属基复合材料是一个重要的改性途径。

1.3 无机非金属材料的作用和地位

自从人类诞生至今, 传统无机非金属材料就与人类的生活密切相关, 成为人类生活、

生产中不可或缺的材料。普通陶瓷的发展历史可以说就是一部中华民族的发展历史。从经济建设和近代高技术的发展来看,无机非金属材料也起着重要的基础和先导作用,特种无机非金属材料的发展对于许多高技术行业的发展起着至为关键的作用。例如,化合物半导体材料促使光电子技术的快速发展,形成了半导体发光二极管和半导体激光器的新兴产业;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;碳富勒烯球和碳纳米管的诞生使纳米技术走向世纪的前沿;弛豫铁电、压电单晶和陶瓷的突破使高性能超声和水声换能器、压电驱动器等得到发展,在医学等高新技术领域中广泛应用;氧化物和超薄膜材料中巨磁电阻效应(GMR)和近 10 年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;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。

现代的玻璃不仅是人类生活上不可缺少的用品,而且还将与其他材料相竞争,成为工业生产和科学技术发展中极为重要的材料。如玻璃可制成高效、廉价而耐用的太阳能收集器。石英玻璃用于制作坩埚,微晶玻璃兼有金属、高分子材料的可切削性。多孔玻璃可作为生物活性材料的载体,如将固相酶保存在多孔玻璃中可长期保持活性。由于 20 世纪 70 年代石英玻璃光导纤维的损耗小于 20dB/km,才使光纤通信技术能够实用化,光导纤维的发现和通信中的应用,将从多方面改变人类的有关活动。

水泥是当今世界上最重要的建筑材料之一,对社会发展和经济建设起着重要的作用。作为水硬性胶凝材料,其加水后具有可塑性,与砂、石拌和后可浇筑成各种形状尺寸的构件,使建筑工程多样化,满足工程设计的不同需要。水泥与钢筋、砂、石等材料混合制成的钢筋混凝土、预应力钢筋混凝土,其性能大大优于钢筋或混凝土本身,具有坚固性、耐久性、抗蚀性和适用性强等特点,可用于海洋、地下或者干热、严寒地区等苛刻的环境中,被广泛应用于各类工业建筑、民用高层建筑、大型桥梁等交通工程、巨型水坝等水利工程,以及海港工程、核电工程、国防建设等新型工业和工程建设等领域。

无机非金属材料的原料资源丰富,成本低廉,生产过程能耗低,能在很多场合替代金属材料或有机高分子材料,且这种替代是非常必要的,能使材料的利用更加合理和经济。时至今日,不论在工业部门、日用品行业还是人文生活等许多方面,没有无机非金属材料是难以想象的。这些材料无论在品质上,还是在数量上都在不断提高,国际范围内在这一领域的空前繁荣以及人们在材料开发和工艺革新方面越来越多的投入也证明了这一点。

1.4 无机非金属材料的发展趋势

近年来,生物工程、新能源、信息工程、宇宙开发、海洋开发等新一代技术革命领域急需大量的新材料,因此对各种无机非金属材料,尤其是对特种新型材料提出了更多、更高的要求。无机非金属材料学科具有广阔的发展前景。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》国家重大战略需求的基础研究领域中对材料领域规划如下:重点研究材料的改性优化,新材料的理化性质,围绕低维化、人工结构化、集成化、智能化等新物理构架探索、设计和制备新材料;材料成型、加工的新原理与新方法,材料表征与测量,材料服役行为及与环境的相互作用等。毫无疑问,21 世纪无机非金属材料的发

展同样符合上述描述,应该具有复合化、结构功能一体化、低维化、智能化、环境友好和在极端环境中使用等特征。

第一,从均质材料向复合材料发展。随着科学技术的发展,原来各自相对独立的无机非金属材料、金属材料和高分子材料,已经相互渗透、结合,多学科交叉成为材料科学技术发展的重要特征。无机非金属材料与金属材料 and 有机高分子材料的复合化具有广阔的发展前景。事实上,以应用为目标,优化三大类材料的各自优点,进行宏观尺寸上的复合,20 世纪在传统无机非金属材料上已经广泛采用,如钢筋混凝土(金属与水泥)、玻璃钢(无机玻璃纤维与有机高分子)等。这类以结构材料为主的复合材料,今后仍将优化并继续发展。随着材料复合尺寸的越来越小,以至于达到纳米和分子尺度上的复合称之为杂化(hybrid),今后在无机非金属功能材料上将颇为明显。

第二,由结构材料向功能材料、多功能材料并重的方向发展。功能的复合将使结构材料与功能材料的界限逐步消失。例如平板玻璃是作为门、窗、墙的结构材料,但当平板玻璃镀膜后就具有不同的光反射和光吸收,有了阳光控制和低辐射性能后,就成为能满足节能、环保、安全和装饰的多功能建筑玻璃。结构陶瓷也逐步功能化,利用陶瓷优良的介电性能和光反射性能,发展了结构、防热、透波(或吸波)等陶瓷材料。利用 AlN 陶瓷高的导热性、低的电导率和热膨胀以及优良的机械性可作为大功率半导体集成器件的基板。

第三,材料结构的尺度向越来越小的方向发展,以及所谓的“低维化”发展。宏观上的低维化是从体材料向薄膜材料和纤维材料的发展。现代信息功能器件(微电子、光电子和光子学器件)都是集成化的,因此主要应用薄膜材料。结构材料可用涂层和薄膜来进行增强、增韧、耐磨的改性。无机涂层包括各类热控涂层、耐高温防腐涂层、抗氧化涂层、耐损涂层等,应用于航天器、核反应堆和运载工具上。特别在结构材料的功能化上,薄膜具有特殊的作用。因此,针对无机非金属材料的薄膜制备、结构和性能以及发展新的薄膜材料的研究十分重要。微观上的低维化,即无机非金属材料的织构与结构上的尺寸从毫米、微米趋向纳米。20 世纪末出现的光子晶体是在一维、二维和三维空间,介电常数以光波长为尺度(微米和亚微米)呈周期变化的人工带隙新材料,21 世纪将有很快的发展,特别是应用于光电子学和光子学的材料和器件。纳米尺度上的超晶格薄膜、纳米线、纳米点材料的结构和性能关系的认识延伸到介观尺度。21 世纪将以纳米器件为中心,研究纳米材料的合成、组装与性能调控。进一步的低维化,涉及基于原子和分子的纳米材料和技术,低维纳米材料及其复合的量子特性,量子限域体系的设计和制造,研究量子点和量子线材料的电子和能带结构、杂质态和缺陷态等与结构、材料物理性质的关系,实现量子调控等。

第四,由被动材料向具有主动性的智能材料方向发展,即所谓的材料智能化。表现为材料能接收外部环境变化的信息,并能实时反馈。最早智能化材料为被动式的,如光色(光致变色)材料受阳光辐射,会自动改变其透光度,但透光度的深浅不可控。而电致变色材料不仅光照后会变色,并且变色程度可由外加电压控制,是能动式的智能化。智能化功能材料大都为多层压电和铁电陶瓷的复式结构,外场信号的感知和反馈操作是分开的,目前趋向薄膜化和集成化。纳米复合材料的出现,可以把不同功能的材料从微观上复合在一起,形成紧凑的单体智能材料,这也是多功能无机非金属材料的主要发展方向。

第五,材料的可循环利用和环境友好型材料的发展。随着人类经济活动的发展,环境

保护成了越来越重要的问题。节能降耗、资源综合和循环利用、废弃物资源循环利用和治理、有害气体液体的低排放和无害处理、有毒有害元素的替代等环境友好型的无机非金属材料必然是将来的发展趋势。需要全方位、多学科地研究绿色生产工艺,大力发展环境协调材料的制备技术及其理论基础。传统的无机非金属材料产业是有名的资源、能源高消耗和环境高污染的行业。21世纪要按照“全面、协调、可持续发展”的科学发展观,开发传统无机非金属材料与生态环境协调的生产技术,使之成为生态环境材料。

第六,通过仿生途径发展新型无机非金属材料。“师法自然”,大自然是我们永远的老师,自然界的各类生物通过千百年的进化,在严峻的自然界环境中经过优胜劣汰、适者生存而发展到今天,自有其独特之处。通过学习并揭开其奥秘,会给我们无穷的启发,为开发新材料提供广阔的途径。

1.5 无机非金属材料的选用原则

材料选择是材料科学与材料工程的重要使命之一,是材料器件化、产品化的必经之路,也是工程设计中的重要环节之一,会影响整个设计过程。材料选择的核心是在技术、经济合理以及环境协调的前提下,使材料的使用性能与产品的设计功能相适应。一方面材料接近失效极限的范围内,安全系数趋于低值,并尽可能使用高性能的材料和强化技术;另一方面,在产业化工艺技术不够成熟和完善的情况下,避免盲目使用性能尚未稳定的新材料。材料的选用需遵循使用性能、工艺性能、经济性及环境协调性的原则。同样,无机非金属材料的选用也遵循这几项通用原则。

(1) 使用性能原则。使用性能是材料在使用过程中,能够安全可靠地工作所必须具备的性能,包含材料的力学性能、物理性能和化学性能。对于结构性器件,使用性能中最主要的是材料的力学性能。因为只有在满足力学性能之后才有可能保证器件的正常运转,不致早期失效。对于功能性器件,在满足力学性能的前提下,重点考虑的是外场作用下特定性能响应外场变化的敏感性以及性能的环境稳定性。对所选材料使用性能的要求是在对器件工作条件及失效分析的基础上提出的,这样才可达到提高产品质量的目的。

(2) 工艺性能原则。从原料到材料、从材料到器件、从器件到产品都要经过一系列的工艺过程。工艺性能是指材料在不同的制造工艺条件下所表现出的承受加工的能力。它是物理、化学和力学性能的综合。材料工艺性能的好坏,在单件或小批量生产时,并不显得重要,但在大批量生产条件下希望达到经济规模的要求,往往成为选材中起决定作用的因素之一。另外加工工艺性能好坏也会直接影响产品的寿命。

(3) 经济性原则。在满足器件性能要求的前提下,选材时应考虑材料的价格、加工费用和国家资源等情况,以降低产品成本。

(4) 环境协调性原则。地球是所有材料的来源和最终归宿。通过采矿、钻井、种植或收获等方式,人们从地球上获得矿物、石油、木材等原材料,经过选矿、精炼、提纯、制浆及其他工艺过程,这些原材料就转化为工业用材料,如金属、化学产品、纸张、水泥、纤维等。在随后的工艺过程中,这些材料又被进一步加工成工程材料,如晶体、合金、陶瓷、塑料、混凝土、纺织品等。通过设计、制造、装配等过程,再把工程材料做成有用的产品。当产品经使用达到其寿命后,又以废料的形式回到地球或经过解体和材料回

收后以基本材料再次进入材料循环。人类社会要实现可持续发展,在原材料获取、材料准备与加工、材料服役以及材料废弃等材料的循环周期内,必须考虑环境负荷及环境的协调性。原材料开采对资源造成的破坏应降低到最低程度,废弃材料应最大程度地回收利用并进入材料的再循环圈中。

1.6 无机非金属材料学的研究内容

材料的组成与结构决定材料的性质,而组成和结构又是合成和制备过程的产物,材料作为产品又必须具有一定的效能以满足使用条件和环境要求,从而取得应有的经济、社会效益。因此,上述四个组元之间存在着强烈的相互依赖关系。无机非金属材料科学与工程就是一门研究无机非金属材料合成与制备、组成与结构、性能和使用效能四者之间相互关系与制约规律的科学,其相互关系可用图 1-1 的四面体表示。

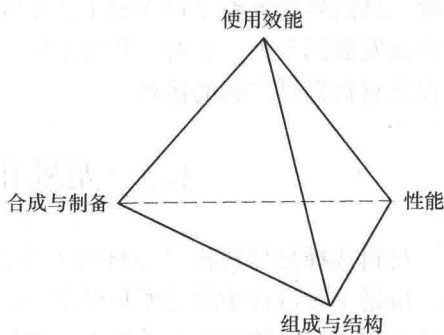


图 1-1 无机材料科学四要素关系图

无机非金属材料科学方面偏重于研究无机非金属材料的合成与制备、组成与结构、性能与使用效能各组元本身及其相互关系的规律;工程方面则着重研究如何利用这些规律性的研究成果以新的或更有效的方式开发并生产出材料,提高材料的使用效能,以满足社会的需要;同时还应包括材料制备与表征所需的仪器、设备的设计与制造。在无机材料学科发展中,科学与工程彼此密切结合,构成一个学科整体。

合成主要指促使原子、分子结合而构成材料的化学与物理过程,其研究内容既包括有关寻找新合成方法的科学问题,也包括以适用的数量和形态合成材料的技术问题;既包括新材料的合成,也应包括已有材料的新合成方法及其新形态的合成;制备也研究如何控制原子与分子使之构成有用的材料,但还包括在更为宏观的尺度上或以更大的规模控制材料的结构,使之具备所需的性能后使用效能,即包括材料的加工、处理、装配和制造。则合成与制备即是将原子、分子聚合起来并最终转变为有用产品的一系列连续过程,是提高材料质量、降低生产成本和提高经济效益的关键,也是开发新材料、新器件的中心环节。在合成与制备中,基础研究与工程性研究同样重要,如对材料合成与制备的动力学过程的研究可以揭示过程的本质,为改进制备方法、建立新的制备技术提供科学依据。因此,不能把合成与制备简单地归结为工艺而忽略其基础研究的科学内涵。

组成指构成材料物质的原子、分子及其分布;除主要组成以外,杂质对无机材料结构与性能有重要影响,微量添加物也不能忽略。结构则指组成原子、分子在不同层次上彼此结合的形式、状态和空间分布,包括原子与电子结构、分子结构、晶体结构、相结构、晶粒结构、缺陷结构等;在尺度上则包括纳米以下,纳米、微米、毫米及更宏观的结构层次。材料的组成与结构是材料的基本表征。它们一方面是特定的合成与制备条件的产物,另一方面又是决定材料性能与使用效能的内在因素,因而在材料科学与工程四面体中占有独特的承前启后的地位,并起着指导性的作用。了解材料的组成与结构及它们同合成与

制备之间、性能与使用效能之间的内在联系，长久以来一直是无机材料科学与工程的基本研究内容。

性能指材料固有的物理与化学特性，也是确定材料用途的依据。广义地说，性能是材料在一定条件下对外部作用的反应的定量表述。例如，对外力作用的反应为力学性能，对外电场作用的反应为电学性能，对光波作用的反应为光学性能等。

使用效能是材料以特定产品形式在使用条件下所表现的性能。它是材料的固有性能、产品设计、工程特性、使用环境和效益的综合表现，通常以寿命、效率、耐用性、可靠性、效益及成本等指标衡量。因此，使用效能的研究与工程设计及生产制造过程密切相关，不仅有宏观的工程问题，还包括复杂的材料科学问题。例如，无机结构材料部件的损毁过程和可靠性往往涉及在特定的温度、气氛、应力和疲劳环境下材料中的缺陷形成和裂纹扩展的微观机理；功能器件的一致性和可靠性是功能材料原有缺陷（原生缺陷），器件制备过程引入的二次缺陷以及在使用条件下这些缺陷的发展和新缺陷生成的综合结果。这些使用效能的研究需要具备基础理论素养和现代化学、物理学、数学和工程科学的知识，并依赖于先进的组成、结构和性能测试设备。材料的使用效能是材料科学与工程追求的最终目标，而且在很大程度上代表这一学科的发展水平。

思考题和习题

1. 无机非金属材料的定义及特点是什么？
2. 结合实例说明无机非金属材料在国民生产中的地位和作用。
3. 简要说明无机非金属材料的发展趋势。
4. 无机非金属材料在使用时需要遵循哪些原则？
5. 无机非金属材料科学与工程的四要素是什么？简述其相互关系。

2.1 陶瓷的概念及分类

2.1.1 陶瓷的概念

陶瓷是人类生活和生产中不可缺少的一种材料,也是无机非金属材料的典型代表,已在国民经济的各个领域获得广泛应用。从陶器发展到瓷器是第一次飞跃,从传统陶瓷到先进陶瓷是第二次飞跃,从先进陶瓷到纳米陶瓷是第三次飞跃。目前,陶瓷的名称在国际上没有统一的界限,各个国家对陶瓷的理解略有不同,如:

- (1) 德国:经高温处理加工具有作为陶瓷制品特有性质的广义非金属制品。
- (2) 英国:经成型、加热硬化而得到的无机材料所构成的制品。
- (3) 法国:由离子扩散或玻璃相结合起来的晶粒聚集体构成的物质。
- (4) 美国:以无机非金属物质为原料,在制造和使用过程中经高温煅烧而成的制品和材料。
- (5) 日本:将制造和利用一无机非金属为主要组成的材料或制品的科学及艺术。
- (6) 中国:凡是采用传统的陶瓷生产方法烧制而成的无机非金属材料或制品均属陶瓷。

2.1.2 陶瓷的分类

陶瓷材料及产品种类繁多,但缺乏统一的分类方法。为了便于掌握各种陶瓷产品的特征,通常从不同的角度加以分类。

2.1.2.1 按化学成分分类

按化学成分可将陶瓷分为氧化物、碳化物、氮化物和硼化物四类。

(1) 氧化物陶瓷。氧化物陶瓷种类繁多,在陶瓷家族中占有非常重要的地位。最常用的氧化物陶瓷是 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 、 ZrO_2 、 CeO_2 、 CaO 、 Cr_2O_3 及莫来石 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) 和尖晶石 (MgAl_2O_4) 等。硅酸盐也属于氧化物系列,如 ZrSiO_4 、 CaSiO_3 等;复合氧化物,如 BaTiO_3 、 CaTiO_3 等亦属此类陶瓷。

(2) 碳化物陶瓷。碳化物陶瓷一般具有比氧化物更高的熔点。最常用的是 SiC 、 WC 、 B_4C 、 TiC 等。碳化物陶瓷在制备过程中应有气氛保护。

(3) 氮化物陶瓷。氮化物中应用最广泛的是 Si_3N_4 ,它具有优良的综合力学性能和耐高温性能。另外, TiN 、 BN 、 AlN 等氮化物陶瓷的应用也日趋广泛,新近研究的 C_3N_4 ,其性能可望超过 Si_3N_4 。

(4) 硼化物陶瓷。硼化物陶瓷的应用不很广泛,主要可作为添加剂或第二相加入其