

高 等 学 校 教 材

无机非金属材料 工艺原理

姜建华 主编

Chemical Industry Press



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

无机非金属材料工艺原理

姜建华 主编



化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

无机非金属材料工艺原理/姜建华主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 1

高等学校教材

ISBN 7-5025-5560-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 044142 号

高等学校教材

无机非金属材料工艺原理

姜建华 主编

责任编辑: 杨 菁

文字编辑: 杨欣欣

责任校对: 王素芹

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

[http //www cip com.cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 36 $\frac{3}{4}$ 字数 918 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5560-9/G · 1444

定 价: 55.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

《无机非金属材料工艺原理》是按照中国教育部有关面向 21 世纪高等学校材料类专业课程体系改革的教材建设要求而编写的。编写内容选定的依据为无机非金属材料科学与工程专业的教学计划及其必修（核心）课程“无机非金属材料工艺原理”教学大纲等。

21 世纪的材料类专业高级人才培养，必须与当代材料工业科技发展形势相适应。目前，无机材料、高分子材料、金属材料在制造工艺上、组成上、性能上以及结构分析表征方法上，日趋相互交融、借鉴、渗透与复合。但是在无机非金属材料专业为人才培养的具体目标下，不能本末倒置。我们首先应该重视的是无机非金属材料类各种不同材料（玻璃、陶瓷等）之间的综合与渗透性，这才是真正有利于上述关于整个材料类工业科技与教育发展形势的现实基础。为此，本书摒弃了传统上对这些各种不同材料工艺原理的分别阐释以及工艺学式的长篇赘述，打破了按品种分类的模式，改为以具有共性的单元工艺进行内容上的编排与撰写。

本书的编写共识和特色，主要有以下几点。

1. 知类通达和博采约取。通过拓宽专业口径以求知类。强调用通达来培养出的通才，也就是能作更高层次深造的具有广泛扎实基础的专才。编写内容尽量博及整个无机非金属材料各方面，而约取其基本的单元工艺原理。

2. 最新科技前沿与信息是创新之源。除了有关基本内容外，强调通过最新科技前沿与信息（如光电子玻璃、纳米陶瓷、绿色水泥、流变学等）之间的交融，将带给学生更多富于想像力与智慧的创新启示。

3. 突出单元工艺，在内容编排上改纵为横，举一反三，避免重复，提高教学效率。

4. 提高篇幅效率，拓宽涉及领域；并引用其他学科的有关知识，提升单元工艺原理的学术层次。

5. 引入一些新型材料的制备新工艺内容，反映出高新科技发展动向。

6. 由于淡化了材料类别界限，加深了共性鲜明的单元工艺原理，因而有利于推进产学合作办学、提高学生业务竞争力以及扩大读者范围。

本书由姜建华主编，并编写第一章、第二章、第三章、第五章；杨伦编写绪论和第四章、第六章；黄佳农编写第七章、第八章；张金朝编写第九章。全书由杨伦审稿。

本书主要是参考有关文献资料、结合编者多年教学与科研工作的体验进行编写而成的。在此，谨向所有文献资料作者致以衷心感谢！书末列有主要参考文献，但限于篇幅，未能悉数列出。祈请未予列入的作者谅解，并深致歉意。

本书在编写和出版的过程中，得到了编者所在单位华东理工大学材料科学与工程学院的关心指导与大力支持，谨致衷心感谢！

由于编者水平有限，尤其是按不同单元工艺而分章编撰的方式尚属初试，不足之处在所难免，竭诚希望读者们不吝批评指正。

姜建华

2005 年 1 月

目 录

绪论	1
一、无机非金属材料学科	1
二、无机非金属材料种类与重要地位	2
三、无机非金属材料开发要素与制备工艺	3
四、无机非金属材料生产与单元工艺	4
第一章 概论	6
第一节 玻璃概论	6
一、玻璃的发展	6
二、普通玻璃的种类和使用性能	7
三、特种玻璃的种类和使用性能	22
第二节 陶瓷概论	30
一、传统陶瓷的种类和使用性能	31
二、先进陶瓷的种类和使用性能	32
三、中国传统陶瓷的发展	34
四、先进陶瓷的发展	39
第三节 耐火材料概论	43
一、中国耐火材料发展过程	43
二、耐火材料的使用性能、种类和发展前景	44
三、中国优质耐火材料的技术进步	51
第四节 水泥概论	54
一、水泥的种类、使用性能和发展	54
二、特种水泥的使用性能、种类和发展	57
三、绿色化的水泥工业	59
第二章 组成	63
第一节 玻璃组成	63
一、玻璃组成的发展	63
二、玻璃组成设计	65
三、钠钙硅酸盐玻璃的组成	72
四、硼硅酸盐玻璃的组成	78
五、其他硅酸盐玻璃的组成	84
六、其他氧化物玻璃的组成	90
七、非氧化物玻璃的组成	92
八、有色容器与器皿玻璃的组成	93
九、有色光学玻璃的组成	98
十、遮阳和护目镜片玻璃的组成	100

第二节 陶瓷组成	103
一、坯、釉料组成的表示方式	103
二、普通陶瓷坯体的组成	104
三、高温结构陶瓷的组成	110
四、功能陶瓷的组成	112
第三节 耐火材料组成	119
一、耐火材料的组成表征	119
二、硅质耐火材料的组成	120
三、硅酸铝及刚玉质耐火材料的组成	122
四、氧化镁-氧化钙系耐火材料的组成	125
五、尖晶石耐火材料的组成	128
六、含锆耐火材料的组成	130
第四节 水泥组成	133
一、硅酸盐水泥熟料的组成	133
二、硅酸盐水泥熟料的矿物组成设计	138
三、通用水泥的组成	140
四、特种水泥的组成	141
第三章 原料	148
第一节 概述	148
一、原料的分类	148
二、原料质量的重要性	150
三、原料的选择	151
第二节 无机非金属矿物原料	153
一、概述	153
二、硅质矿物原料	157
三、长石类铝硅质矿物原料	161
四、云母(含似云母)类铝硅质矿物原料	164
五、黏土类铝硅质矿物原料	165
六、高铝质矿物原料	172
七、钙质矿物原料	175
八、镁质矿物原料	178
九、其他矿物原料	180
第三节 工业废渣	184
一、采矿废渣	185
二、黑色冶金矿渣	185
三、有色冶金矿渣	186
四、化工废渣	186
五、回收加工料	188
六、其他工业废渣	188
第四节 预制原料	189

一、原料的热处理	189
二、原料的合成	191
三、铝硅镁质熟料	192
四、镁质熟料	199
五、镁钙质及其他熟料	201
第五节 选矿	204
一、选矿意义	204
二、选矿方法	204
三、镁质、铬质原料的选矿	205
四、黏土类原料的选矿	206
五、硅质原料的浮选	207
六、原料的除铁	208
第四章 配合料的制备	210
第一节 配合料制备的要求和流程	210
一、对配合料的要求	210
二、配合料制备流程	213
第二节 原料调控	216
一、水分调控	216
二、粒度调控	223
三、表面改性	243
第三节 配料计算与称量	245
一、玻璃配料计算	245
二、陶瓷配料计算	249
三、水泥配料计算	256
四、称量原理	259
第四节 粉料的均质化	263
一、粉料均质化过程原理	263
二、粉料均质化的程度	266
三、均化	269
四、混合	276
五、混练和陈化	280
第五章 熔制	283
第一节 玻璃的熔制过程	283
一、玻璃熔制中的变化类别和阶段性	283
二、硅酸盐形成	283
三、玻璃的形成	290
四、玻璃液的澄清	292
五、玻璃液的均化	308
六、玻璃液的冷却	312
七、玻璃熔制工艺制度	314

第二节 玻璃熔制用耐火材料的侵蚀·····	315
一、玻璃熔制用耐火材料·····	315
二、耐火材料侵蚀的动力学和影响因素·····	315
三、熔窑不同部位的耐火材料侵蚀机理·····	320
四、各种耐火材料的侵蚀过程·····	322
五、铂质材料的侵蚀和污染·····	325
第三节 玻璃缺陷·····	326
一、气泡·····	326
二、结石·····	328
三、条纹、线道和节瘤（玻璃态夹杂物）·····	330
第四节 电熔·····	332
一、玻璃电熔·····	332
二、耐火材料电熔·····	335
第六章 成型·····	338
第一节 基础原理·····	338
一、流变学基础·····	338
二、玻璃成型的传热原理·····	344
三、颗粒学成型原理·····	353
四、硅酸盐水泥的水化和硬化·····	370
第二节 玻璃成型·····	375
一、玻璃成型种类·····	375
二、容器玻璃制品的模成型·····	376
三、玻璃纤维的成型·····	393
四、平板玻璃的成型·····	403
第三节 颗粒料成型·····	411
一、压缩法成型·····	411
二、可塑法成型·····	417
三、注浆法成型·····	426
四、浆体密实法成型·····	432
第七章 烧成·····	436
第一节 烧成和烧结·····	436
一、无机非金属材料的高温烧成·····	436
二、烧结过程和烧结程度·····	436
三、烧结类型和烧结机理·····	438
四、影响烧结的因素·····	438
第二节 硅酸盐水泥熟料的煅烧·····	440
一、硅酸盐水泥熟料的形成过程·····	440
二、微量元素与矿化剂对熟料煅烧的影响·····	448
三、回转窑内的物料煅烧过程·····	450
四、悬浮预热和窑外分解·····	452

第三节 陶瓷的烧成	456
一、陶瓷坯体在烧成过程中的物理化学变化	456
二、瓷胎的显微结构	460
第四节 耐火材料的烧成	463
一、黏土制品的烧成	463
二、硅砖的烧成	464
三、镁砖的烧成	465
第五节 烧成工艺与设备	466
一、烧成工艺的类型	466
二、烧成设备	466
三、烧成制度	469
四、快速烧成	472
第六节 特种烧结技术	473
一、热致密化方法	473
二、反应烧结	476
三、高温自蔓延烧结	477
四、微波烧结	477
第八章 加工和处理	479
第一节 应力及其处理	479
一、内应力	479
二、玻璃的退火工艺	481
三、玻璃的物理钢化	483
四、玻璃的化学钢化	485
第二节 熔体和玻璃体的相变	486
一、熔体和玻璃体的成核与晶体生长过程	486
二、微晶玻璃	489
三、熔铸耐火材料的晶化	491
四、玻璃的分相	491
第三节 封接	496
一、玻璃的封接	496
二、陶瓷的金属化与封接	500
第四节 冷加工	502
一、冷加工种类	502
二、冷加工过程	503
三、表面冷加工	504
四、切割、开孔技术	506
第五节 表面处理	507
一、表面化学加工	507
二、表面改性	509
三、表面涂层	509

第六节 釉饰.....	511
一、釉的作用、特点与分类.....	511
二、釉的性质.....	512
三、制釉.....	516
四、施釉.....	517
第七节 高温涂层.....	517
一、高温熔烧法.....	517
二、火焰喷涂法.....	519
三、等离子喷涂法.....	519
四、高温化学气相沉积法.....	520
第九章 新型无机材料工艺.....	522
第一节 溶胶-凝胶技术	522
一、概述.....	522
二、溶胶-凝胶工艺方法	523
三、溶胶-凝胶法的工艺原理	525
四、影响溶胶-凝胶法的主要工艺因素	528
五、溶胶-凝胶法的特点	532
六、溶胶-凝胶法的应用	534
第二节 物理气相沉积技术.....	536
一、蒸发镀膜.....	537
二、溅射镀膜.....	538
三、离子镀.....	540
第三节 化学气相沉积技术.....	541
一、化学气相沉积的历史回顾.....	541
二、CVD 技术的一般反应原理	542
三、CVD 技术的热力学原理	547
四、化学气相沉积的装置和工艺.....	553
五、CVD 在无机材料制备中的应用	566
主要参考文献.....	571

绪 论

一、无机非金属材料学科

1. 教材的学科归属

高等教育中的四大建设为学科建设、专业建设、课程建设和学风建设。课程建设所涉及的条件与内容有：培养目标、教学计划、教学大纲、师资人才、教学方法、实验设备以及教材建设。本教材乃用于无机非金属材料学科类无机非金属材料科学与工程专业的核心课程。显然，专业并不完全等同于学科，而学科归属是专业划分和课程设置中的惟一科学依据。随着当代科学技术学科的拓展与界定，才得以不断形成既统一而又发展中的专业类别系列。

2. 当代科学技术学科的发展

高等教育必须具备随时能够跟踪世界科学技术发展中最前沿信息的机制。当人类跨入新世纪之际，所感受到最强烈的时代脉搏，正是迅猛发展、奔腾不息的科学技术浪潮，它用前所未有的磅礴气势撞击与推动着社会、经济和人类文明的进步。自 20 世纪以来，科技学科一方面分化得更精细；另一方面各门学科间却又相互渗透，出现高度综合，从而形成了当代自然科学整体化的特点。所以，过去曾将科学、技术、工程、人文科学等生硬分开，把传统学科按其出现次序分为所谓一级、二级等学科，这些已不能适应时代特征。当代科学和技术的发展，形成了一种“群簇网状”的结构，即各科学、技术之间的横向交叉成为主要结构形式；它是个有机“生命体”，具有生长、遗传与杂交等功能。按此结构大致可列出包括无机非金属材料学科在内的 70 个主学科，它们又各自拥有若干个新的次学科，这些由主学科衍生出的科技前沿，目前已达 1200 多项。在无机非金属材料主学科中，以陶瓷方面的为例，其科技前沿有：纳米陶瓷，陶瓷材料制备科学和工艺学，陶瓷烧结理论，陶瓷的脆性和增韧，纤维补强陶瓷基复合材料，陶瓷材料信息的转换、传输与存储，陶瓷敏感材料的物性及其耦合效应，陶瓷薄膜，化学结合陶瓷以及陶瓷材料无损评价技术。层出不穷的科技前沿充分展示了主学科无限生命潜力。

3. 材料群科学

在当代科技学科的持续发展中，不论有多少种不同走向的科技前沿阵地，材料科学、信息科学和生命科学这三个群科学成为 21 世纪中最重要、最活跃，也是最具有重大突破期望的领域。所谓群科学是一类横跨若干个主学科的群体，但它又高于任何一个主学科。材料（群）科学涵盖着无机非金属材料、金属材料和有机高分子材料等主学科。这些各种各样的不同材料，在制备和使用过程中的许多概念、现象和转变都有惊人的相似，诸如：相变机理、缺陷行为、平衡热力学、扩散、流动和断裂机理、界面的精细结构与行为、晶体和玻璃的结构以及它们之间的关系、不同类型材料中的电子的迁移与禁锢、原子聚集体的统计力学或磁自旋等。但是，材料（群）科学也绝不是这些主学科的简单综合或直接加和，而是由于各材料之间相互有机联系而诞生的。群科学源自诸多相关主学科，并已成为另一类的更深层次的科学体系。但是目前大多尚未形成比较确切的定义和范围，带有某种不稳定性或更具有突变的特征。群科学的

出现是科学技术相互交融的结果，也是人类将在更大程度上把握和运用科技力量的体现。

二、无机非金属材料种类与重要地位

1. 材料的分类

材料是由原材料通过物理的或化学的方法加工制得的各种固体物质；它们既可作为进一步制成有用的构件、器件或物品的原料或半成品（如玻璃纤维、管、棒，天然石料，混凝土骨料等），也可以直接制成最终产品（如陶瓷或玻璃等制品。）除了基本的无机非金属材料、金属材料和有机高分子材料之外，还有由这三类基本材料组合制成的复合材料，它在性能上取长补短而提高综合效能。例如，航天飞机的超音速燃烧冲压式发动机（内部热流值高达 $5\text{MW}/\text{m}^2$ 以上）成功地采用了一种倾斜功能性的复合材料。它由耐热性陶瓷与高导热性的高机械强度金属复合而成，前者面向燃烧室，以抗御数千摄氏度的高温气体；后者则面向冷却室的液态 H_2 或液态金属，遂使该发动机得以安全运行。

2. 无机非金属材料种类

无机非金属材料中的玻璃、陶瓷、耐火材料、胶凝材料（水泥等）、磨料以及无机单晶体等，因其原材料主要为硅酸盐等矿物，故狭义称为硅酸盐材料，即 $(\text{SiO}_2 + \text{M}_2\text{O}_y)$ ，其中 M 为 Na、K、Ca、Mg、Al、Fe 等元素。此外，广义的无机非金属材料还包括有：不含 Si 的其他氧化物（如 Al_2O_3 、 BaTiO_3 等），氮化物（如 Si_3N_4 、BN、AlN 等），硼化物（如 ZrB_2 、 LaB_6 、 TiB_2 等），卤素化合物（如 BeF_2 、 ZrCl_2 等），硫系化合物（如 CeS、ThS 等），碳素材料（如人造碳素制品、人造金刚石等），非金属单质（如 Se 等）以及陶瓷基复合材料等。这些新型的无机非金属材料（包括特种玻璃、先进陶瓷、特种水泥等）满足了当前各种结构、信息和功能方面层出不穷的材料性能要求。

3. 无机非金属材料的重要地位

材料、能源和信息是国民经济现代化建设的三大支柱。由于材料是制造生活资料和生产资料的器具的物质，所以在悠久的人类发展史中，材料就一直是人类赖以生存和发展，征服、改造自然的重要物质基础；材料更是人类社会文明发展的重要标志与阶段性界定依据，如石器时代、青铜器时代等。直至今日，无机非金属材料的应用范围已从品种与数量极为浩繁的建筑及日用两个方面进一步拓展到了冶金、化工、交通、能源、机械、电工电子、食品、光学、医药、照明、新闻媒体、情报技术、国防军工、航空航天以及其他尖端科技领域。具体讲，21 世纪无机非金属材料的发展将集中在适应下列几方面的形势要求：首先，信息技术已从电子技术进入光电子技术，并接着达到光子技术。其次，动力机械受到热力学限制，预料在 21 世纪初叶，承受高温的材料有可能实现重大突破；另外，燃料电池和太阳能利用也将成为重点材料的研究方向。再次，纳米技术与纳米材料是有着广泛应用前景的重要发展领域。最后，生物医用材料也将进入春华秋实的新时代。无机非金属材料制造所用的原材料，除了价廉而丰富的众多自然矿物原料外，近年来又多改用人工合成原料，以进一步提高材料产品的最终质量品位，从而开拓了更高层次的科技应用范畴。此外，无机非金属材料的应用地位与重要性很可能还与其生产中的单位能耗（ kJ/kg ）有关。若设水泥的相对单位能耗为 1，则陶瓷为 3.25~6，玻璃为 1.5~2.5，塑料为 15，铝为 25~37.5，钢为 7.5~12.5。何况往往在不少场合中，无机非金属材料替代金属材料或有机高分子材料，显得更为胜任，甚至是非它莫属。

三、无机非金属材料开发要素与制备工艺

1. 无机非金属材料开发的基本要素

如同其他材料一样，无机非金属材料也是在它的研究开发中涉及材料的组成、结构、性能（基本性质与使用效能）和制备（合成）工艺，以及四者相互间的关系，如图 0-1 所示的四面体。最近一个世纪以来，材料科学工作者的重点是通过组成设计和相应工艺的发展来获得优良的材料性能。可以认为，性能是追求目标，而组成与工艺是相互制约的双重有效手段。至于结构的重要性乃在于制备工艺与材料性能之间的联系可用材料的显微结构来表征；通过对性能与结构间关系的不断分析，对其认识深化与积累的效应将有助于得到当结构进一步优化时会使性能提高所具有巨大潜力的启示。由此可见，随着新材料的研制和对传统材料要求的与日俱增，无机非金属材料制备工艺的原理研究与设计开发，显得格外迫切与重要。

2. 无机非金属材料工艺研究的重要性与困难

材料工程（或材料技术）更侧重于生产实际。材料工程应与材料科学相互补充，但前者的主要议题将是材料（制备）工艺。目前，材料工艺几乎变成了极为复杂的技艺。材料工艺这一主题似乎常常构成材料科学与工程间的一个颇为突出的矛盾体。一方面，工艺被认为是材料科学赖以进一步发展的基础，材料性能对工艺过程有着明显的依赖性，充分表明了工艺是确定该材料能否推向预期市场的决定性因素。另一方面，与工艺的重要性这一普遍认识适得其反，若要找到涉及有关工艺方法全貌、但又比一般工艺学的泛泛内容更具共性、系统性与科学指导性的工艺原理方面参考文献，确实还真不多见。目前，在组成、结构、性能方面的系统性文献、专著或优秀教科书却为数不少。造成上述困难可能来自下列一些原因：首先，对工艺常常仅仅根据实用准则来作出评价，即工艺的成败悉由最后产品的质量优劣来衡量裁定，一旦性能不够优异，则原有的一整套工艺构思就会被轻易地全盘否定，这很不利于对工艺原理的逐步加深理解与不断创新拓展。其次，工艺过程是个多变数的复杂过程，其结果具有一定的离散性，常会取决于局部因素，甚至是非可控因素。再次，限于当前统计性工艺控制技术不高，还难于及时或甚至无法检查出过程中的差错、测量不当、工艺参数偏差以及出现突发性变化等。最后，一些复杂的技艺通常由技术诀窍来调控，而不是用建立成熟的系统性学科理论来表达；再加上专利制度的因素，这两方面的具体关键就都属于难为人知的内容了。如果能够不断致力于上述一些原因的逐步解决与克服，将使无机非金属材料工艺原理的研究变为可知的、可行的、可控的以及可持续发展的。

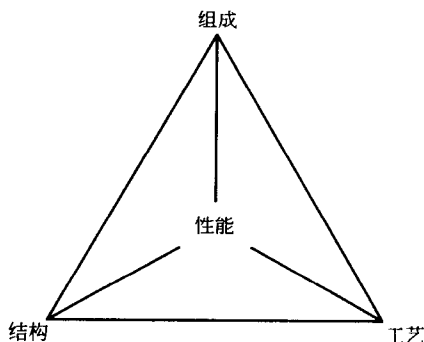


图 0-1 材料科学的核心四面体

识适得其反，若要找到涉及有关工艺方法全貌、但又比一般工艺学的泛泛内容更具共性、系统性与科学指导性的工艺原理方面参考文献，确实还真不多见。目前，在组成、结构、性能方面的系统性文献、专著或优秀教科书却为数不少。造成上述困难可能来自下列一些原因：首先，对工艺常常仅仅根据实用准则来作出评价，即工艺的成败悉由最后产品的质量优劣来衡量裁定，一旦性能不够优异，则原有的一整套工艺构思就会被轻易地全盘否定，这很不利于对工艺原理的逐步加深理解与不断创新拓展。其次，工艺过程是个多变数的复杂过程，其结果具有一定的离散性，常会取决于局部因素，甚至是非可控因素。再次，限于当前统计性工艺控制技术不高，还难于及时或甚至无法检查出过程中的差错、测量不当、工艺参数偏差以及出现突发性变化等。最后，一些复杂的技艺通常由技术诀窍来调控，而不是用建立成熟的系统性学科理论来表达；再加上专利制度的因素，这两方面的具体关键就都属于难为人知的内容了。如果能够不断致力于上述一些原因的逐步解决与克服，将使无机非金属材料工艺原理的研究变为可知的、可行的、可控的以及可持续发展的。

3. 无机非金属材料工艺优化的近代手段

随着科学技术的发展，不少无机非金属材料领域的开发工作已由单纯的试制转变为在试制的同时结合应用了越来越多的数学方法、计算机和信息技术。在大多数的无机非金属材料的研究中，往往最为令人关注的主题是工艺参数的优化。但是目前常是仅有组成、工艺和性能的相关数据，而对三者间的内在规律却不甚清楚，尚无法建立完整精确的理论模型。以往都是借助于回归实验数据来获得一些经验公式，以满足

工艺优化之需，但回归法不具备解决复杂问题的能力。例如，近年已有人将人工神经网络（artificial neural network, ANN）成功引用于材料工艺优化中。它以模拟人脑神经系统的结构与功能特征的数学处理方法，利用其自学习能力，不需任何先验函数的假设，即可从已有的工艺数据中自动地总结出规律，以便预测未知，而成为一种有效的近代研究手段。用 ANN 建立材料制备工艺过程模型后，在寻找合适工艺参数（网络输入）以使材料性能（网络输出）达到最大（或最小）的工艺参数优化过程中，由于没有确定的函数关系，只有采用遗传算法（genetic algorithm, GA），它是借鉴生物界自然选择和群体进化机制所形成的一种全局性参数优化手段，能够有效地解决此类复杂的工艺参数优化问题。近年来，在中国已有一些将上述近代手段成功地分别应用于 V-PTC、ZrO₂-SiC、非氧化物基、新型氮氧化物等先进陶瓷与耐火等无机非金属材料工艺参数优化以及其他复合材料、功能梯度材料的材料设计中。今后，这些近代手段如果能与传统的材料开发研究方法相互结合、相互验证、相互说明，必将进一步有利于加速探究无机非金属材料制备工艺过程机理。

四、无机非金属材料生产与单元工艺

1. 中国传统无机非金属材料生产现状

随着高新科技的发展，中国不断研究开发了能满足更新、更高要求的各种无机非金属的新材料与新工艺。诸如先进陶瓷从原来的多相结构趋变为单相结构，继又转为更复杂的多相复合结构；其相应的先进制备工艺更引人注目。非晶态材料制备能摆脱高温工艺而改用溶胶-凝胶法在常温下制备玻璃。仿生技术和复合新技术等也先后应用成功。但是中国在传统无机非金属材料的连续化规模生产中，其生产技术水平仍然很不理想，令人十分担忧。以中国的建筑材料为例（表 0-1），其产量虽已跃居全球首位，堪称世界“大国”；但由于技术落后、设备能力低、管理欠佳以及消耗高而产品质量低等，劳动生产率远低国外先进水平，难成世界“强国”。

表 0-1 中国主要建筑材料产量和劳动生产率与国外的比较

材 料	比较产量(2001 年)			比较劳动生产率			
	产 量	年增长/%	世界 排位	单 位	中 国	国外先进水平	比中国高/倍
水泥	6.21 亿吨	11.5	No. 1	吨/(人·年)	200	3000	15
平板玻璃	2.04 亿重量箱	12.5	No. 1	重量箱/(人·年)	651	8000~10000	12~15
建筑陶瓷	21 亿平方米	36.1	No. 1	平方米/(人·年)	4000~6000	10000~50000	1.7~12.5
卫生陶瓷	6000 万件	18.1	No. 1	吨/(人·年)	3~7	120~180	17~60

由此不难理解，在持续发展新材料、新工艺的同时，中国传统的无机非金属材料工业仍然亟需对技术人员的力量补充与水平提高。

2. 无机非金属材料生产的单元工艺

生产流程均由若干个单元工艺组成，它们有：配料 B（包括粉体机械法制备 G、粉体的化学法制备 D、原料称量 W 和粉料均化 H），熔化 M，烧成 S，成型 F，制品后加工处理 P；另外，还有原料 R（预制与选择）和组成（设计）C 等。下列各种材料采用了不同的生产流程：

玻璃 C-R-B(G、W、H)-M-F-P

传统陶瓷、耐火材料 C-R-B(G、W、H)-F-S-P

先进陶瓷

C-R-B(D,W,H)-F-S-P

水泥

C-R-B(G,W,H)-S-G-H

过去,在不同无机非金属材料各自工艺学中,分别阐述其采用的各个单元工艺,致使不同材料所用的同类单元工艺之间似乎毫无联系。实质上,远非如此,完全可以举一反三、触类旁通。其基本原理相同,相异的仅是具体数据或设备而已。例如,配料中的粉体工程内容基本上大同小异。再如,成型工艺中,不论是颗粒料还是玻璃,流变学都是它们成型的基础理论。

综上所述,为了进一步提高无机非金属材料生产技术水平,大可按单元工艺分别集中来进行深入研究与开发,以获事半功倍之效,且在教学中亦能免除不少重复。

单元工艺十分类似于 20 世纪中期在化工方面从“化工原理”向“化学工程学”演变中所出现的所谓“单元操作 (unit operation)”。当然,各种无机非金属材料在不同单元工艺中的表现有着比较强烈的个性,目前对其强求统一可能尚欠融洽。相信随着人们对各单元工艺的深入探究,定将显露其具有更多共性的真面目来,升华烘托出单元工艺的原理真谛。从而在有利于无机非金属材料的加速发展中,逐步实现从宏观深入到微观,从定性描述上升为定量评估,从经验积累型演变成科学预告型;真正能够自由地按照预期的材料性能,一次性成功地设计制定出材料的组成、结构形态和生产工艺,而毋需反复修正。

第一章 概 论

无机非金属材料有着众多的类别，但是它们都各有其漫长悠久而又丰富多彩的发展历程。在历史回顾或前景展望中，又无不均以使用性能作为其永无止境的追求目标、先进化的动力以及制品质量的最终判据。正是由于使用性能的确认，才得以对材料或制品给予肯定。

第一节 玻璃概论

玻璃是经熔融而冷却固化的非结晶（在特定条件下也可能成为晶态）无机物，具有一系列非常可贵的特性，能够用多种成型和加工方法制成各种形状和大小的制品，可以通过调整化学组成改变其性质，以适应不同的使用要求。特别是制造玻璃的原料丰富、价格低廉，因此获得了极其广泛的应用。玻璃制品的生产流程，一般如图 1-1 所示。

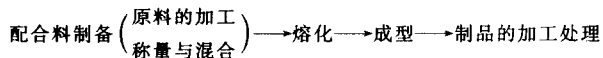


图 1-1 玻璃制品的生产流程

一、玻璃的发展

1. 东西方不同的发展源头

人类早期玻璃制造技术的发生和发展，与制陶和青铜冶炼技术的进步有关。距今约 4000 年前，美索布达米亚地区和地中海沿岸的埃及和腓尼基人已能制成玻璃。其组成基本上属 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ 系统。由于铁、锰及铜杂质氧化物较多，大都呈深绿色。以大约公元前 2000 年时的美索布达米亚玻璃的组成分析为例（质量分数）： SiO_2 65.0%、 Al_2O_3 2.5%、 CaO 3.5%、 MgO 3.4%、 K_2O 4.5%、 Na_2O 17.0%、 Fe_2O_3 2.4%、 CuO 0.49%、 MnO 0.04%、 CoO 0.15%、 TiO_2 0.09%。中国已知最早的玻璃是在距今约 3000 年前的西周早期墓葬（陕西宝鸡）中发现的。到战国（公元前 475~221 年）时，玻璃制品制作精巧，已成为商品。其组成大都属 $\text{BaO}-\text{PbO}-\text{SiO}_2$ 系统。以洛阳出土的战国玻璃珠为例（质量分数）： SiO_2 44.5%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 1.33%、 CaO 4.94%、 PbO 26.51%、 BaO 13.29%、 Na_2O 8.38%。公元前 300 年到公元 300 年这一时期，中国玻璃的制品和技术还向邻国日本流传（相当于日本的弥生时代）。由于东方和西方的文明发展在一定程度上是相似的，玻璃制品在制造及化学组成方面的巨大差异，有可能存在着东方的中国和西方的美索布达米亚及地中海沿岸地区两种不同的玻璃制造的起源。

2. 玻璃的别称

中国玻璃历史上尚有颇黎、琉璃及硝子等名称。

（1）颇黎 初见于《玄中记》（原书已佚，据《太平御览》卷 808 引）：“大秦国有五色颇黎，红色最贵。”为印度梵文 *spantika* 汉语音译的节略，原意指水晶或其他宝石类的天然矿物。在汉译佛经中，又译为颇梨、颇胝、颇胝迦、塞颇胝迦、宰坡致迦及婆破致迦等。唐段成式《西阳杂俎》（公元 863 年）及明李时珍《本草纲目》（公元 1593 年）作玻璃或玻璃。李时珍曰：“玻璃，本作颇黎。颇黎，国名也。其莹如水，其坚如玉，故名水玉。与水精同

名。”又谓：“药烧者有气眼而轻”。因而又用以指水精的人工仿制品——玻璃，与琉璃同名。

(2) 琉璃 最早见于西汉桓宽《盐铁论》：“……而璧玉珊瑚琉璃，成为国之宝”。东汉班固《汉书》作璧琉璃，许慎《说文解字》作璧珊。清段玉为：“璧珊即璧流离……三字为名，胡语也。梵书言吠琉璃，吠与璧相近。”均为印度梵文 *vaidurya* 的汉语音译。其原意为一种天然玉石——青金石 (*lapis lazuli*, $4\text{NaAlSiO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{S}_3$)，琉璃即为其音译的节略。汉译佛经中译为鞞头梨、鞞头利夜、吠努离耶、吠留璃及毗留璃者，亦均即指此。其后词义转化，一名多指，除某些天然玉石及其人工仿制品——玻璃外，覆铅釉陶及兽角制品半透明物亦称琉璃。因而在引用古代文献时，需仔细识别。

(3) 硝子 明朝曹昭《格古要论》(公元 1387 年)：“硝子，假水晶用药烧成者，色暗青有气眼，或有黄青色者，亦有白者，但不洁白明莹。”据李时珍《本草纲目》(公元 1593 年)记载：“水精，药烧成者，有气眼，谓子硝子，一名海水精。”可见以硝子称玻璃，在中国明代即有。至今，在日语中仍沿用硝子一词。

3. 玻璃制造技术的始发

纪元前 1 世纪时，罗马人发明用铁管吹制玻璃。11~15 世纪，玻璃的制造中心在威尼斯，生产窗玻璃、玻璃瓶、玻璃镜和装饰玻璃等。17 世纪时，欧洲许多国家都建立了玻璃工厂，并开始用煤代替木柴燃料。1790 年瑞士 Guinand 发明用搅拌法制造光学玻璃。

19 世纪中叶，发生炉煤气和蓄热室池炉应用于玻璃的连续生产。随后，出现了机械成型和加工。制碱以及耐火材料质量的提高对于玻璃工业的发展都起了重大的促进作用。

19 世纪末，德国 Abbe 和 Schott 对光学玻璃进行了系统的研究，为建立玻璃的科学基础作出了杰出的贡献。

4. 玻璃制品的应用和分类

无机玻璃的化学组成包括有众多元素的氧化物或非氧化物。玻璃制品的成型方法又有多种手段：热成型(吹、压、拉、铸、延)、冷加工(磨砂、抛光、钻、削)、烧结和焊接。对玻璃制品还有众多的再加工工艺(热处理、表面处理)。因而可使玻璃的物化性质作大幅度的调整，制品形状包括有单件的(中空、或实心)和延续的(板片、管棒、丝棉)。所以，玻璃制品的应用范围十分广泛，涉及下列方面：建筑材料、化学工业、医药工业、轻工业、电子工业、交通运输、航空航天、核工业。据 20 世纪末的统计，全世界的玻璃产量约为 8000 万吨/年，其中美国 25%、前苏联 9%、日本 8%、德国 7%；各类玻璃制品分别为：瓶罐玻璃 60%、平板玻璃 25%、特种玻璃 10%、玻璃纤维 5%。

随着时代的发展，各类玻璃制品的品种系统、应用范围和生产规模也逐步形成和扩大。迄今为止，玻璃有普通与特种之分。

二、普通玻璃的种类和使用性能

(一) 平板玻璃

平板玻璃及其制品广泛应用于建筑、交通运输等部门，在各种玻璃制品中占有突出的地位。

1. 平板玻璃的种类

有窗玻璃、压花玻璃、夹丝玻璃、夹层玻璃、中空玻璃、有色玻璃、吸热和反射玻璃、光致变色玻璃、釉面玻璃、玻璃空心砖、波形玻璃、槽形玻璃。

平板玻璃还可以按加工分为磨光和不磨光两大类。经机械研磨和抛光的玻璃，称为磨光玻璃，表面平整，无光学畸变。自浮法玻璃出现后，磨光玻璃大部分被取代。