



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

无机非金属材料工学

李玉平 高朋召 编



化学工业出版社

本书的突出特点是将无机非金属材料的制备过程当成一个整体,以其制造工艺过程为线索,介绍了这个家族材料的制备过程。全书分为8章,包括无机非金属材料的含义及演化、原料、配方、配合料的制备、成型、干燥、烧成及后加工等,相应的细节问题以实例的方式穿插于各章节中。

本书突出重点,彰显特色,将无机非金属材料工学问题置于材料科学与工程领域的宏观角度探讨,适合作为高等学校无机非金属材料的教材,也可供相关专业人士参考。

图书在版编目(CIP)数据

无机非金属材料工学/李玉平,高朋召编. —北京:
化学工业出版社,2011.8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-11875-2

I. 无… II. ①李…②高… III. 无机非金属材料-高等学校-教材 IV. TB321

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第142703号

责任编辑:杨菁
责任校对:边涛

文字编辑:咎景岩
装帧设计:刘丽华

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 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张14 $\frac{1}{4}$ 字数390千字 2011年8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:29.00元

版权所有 违者必究

前 言

无机非金属材料是指除金属材料与高分子材料外的其他所有材料。它是一个庞大的材料家族。在这个材料家族中，既有以传统陶瓷为代表的古老材料，也有以功能材料为标志的新型材料。将这个家族所有成员的制备工艺汇编于一本书中，这是一个独特而艰巨的任务。自2001年湖南大学材料科学与工程学院成立以来，从全校相关专业汇聚起来的材料科学与工程专业采取了按大类招生、宽口径培养的方式进行人才培养探索。相应地，也将原来的“陶瓷工艺学”、“玻璃工艺学”、“水泥工艺学”、“碳素工艺学”、“特种陶瓷”等课程整合成了“无机非金属材料制备工艺原理”，作为无机非金属材料专业的专业核心课。本书的编写，就是根据这一教学思路进行的，反映了数十年来这门课程的教学研究过程与教学改革成果。这种宽口径人才培养方式，也得到了无机非金属材料教学指导委员会的认可。该书被批准为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书的编写依据教育部高等学校材料科学与工程专业教学指导委员会无机非金属材料专业分委员会编制的《材料科学与工程专业规范》及《无机非金属材料专业规范》，结合了近十年来材料学科的相关教学改革成果。其突出特点是将无机非金属材料的制备过程当成一个整体，以其制造工艺过程为线索，介绍了这个家族材料的制备过程。全书分为8章，包括无机非金属材料的含义及演化、原料、配方、配合料的制备、成型、干燥、烧成及后加工等。相应的细节问题则以实例的方式穿插地介绍于各章节中。本书力求突出重点，彰显特色，尝试将无机非金属材料的工学问题置于材料科学与工程领域的宏观角度来探讨。

本书由李玉平、高朋召编，研究生庄鹏、王志云、公伟伟等人协助收集了相关材料并绘制了书中的插图。

本书编写过程中，得到编者所在单位和同仁们的大力支持和帮助，书中引用了许多文献资料，在此，作者向所有给本书的编写提供帮助的人士深表感谢！由于作者学识浅陋，书中的不妥和遗漏之处，敬请读者不吝指正。

编者
2011年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 无机非金属材料含义及演化	1
1.2 无机非金属材料的分类	2
1.2.1 按化学成分分类	2
1.2.2 按性能(功能)分类	2
1.2.3 按用途分类	3
1.2.4 其他常用分类方法	3
1.2.5 本书推荐的无机非金属材料分类方法	4
1.3 无机非金属材料的发展历程	7
1.3.1 传统陶瓷的发展历程	7
1.3.2 其他无机非金属材料的发展历程及产品类型	8
1.4 无机非金属材料工学的学习方法	18
思考题与习题	19
2 原料	20
2.1 天然原料	20
2.1.1 黏土类原料	21
2.1.2 高铝原料	28
2.1.3 石英类原料	29
2.1.4 长石类原料	31
2.1.5 钙、镁质原料	33
2.1.6 其他天然原料	36
2.2 人工原料	36
2.2.1 氧化物类原料	37
2.2.2 碳化物类原料	38
2.2.3 氮化物类原料	40
2.2.4 硼化物类原料	42
2.2.5 硅化物	44
2.2.6 辅助材料	45
2.3 工业固体废物	46
2.3.1 采矿废渣	46
2.3.2 黑色金属矿渣	46
2.3.3 有色冶金矿渣	47
2.3.4 化工废渣	47
2.3.5 人工火山灰质混合材(烧页岩、煤矸石、烧黏土和煤渣)	48
2.3.6 其他工业废渣	49
2.4 原料的预处理及评价	49

2.4.1	天然原料的选用原则	49
2.4.2	天然原料的预处理	50
2.4.3	天然原料的评价	51
	思考题与习题	57
3	配方设计与计算	58
3.1	概述	58
3.2	配方表示方法	59
3.2.1	化学成分表示法	59
3.2.2	实验式表示法	59
3.2.3	示性矿物组成表示法	60
3.2.4	率值表示法	60
3.2.5	配料量表示法	61
3.3	配方的设计	61
3.3.1	陶瓷坯料配方设计	61
3.3.2	釉配方设计	62
3.3.3	水泥配方的设计	66
3.3.4	耐火材料的配方设计	68
3.4	配方的计算和换算	69
3.4.1	无机非金属材料各配料表示方法间的相互换算	69
3.4.2	无机非金属材料配方计算示例	71
3.4.3	更换原料时的配方计算	75
3.4.4	泥浆(或釉浆)的调配计算	75
3.5	配方设计新方法	79
3.5.1	灰色理论与均匀设计	79
3.5.2	人工神经网络	80
3.5.3	主成分分析	82
3.5.4	遗传算法	82
3.5.5	计算机编程辅助配方计算	83
	思考题与习题	83
4	配合料的加工处理	85
4.1	概述	85
4.2	配合料的工艺要求	85
4.2.1	陶瓷坯料	85
4.2.2	玻璃配合料的性能要求	89
4.2.3	水泥生料的性能要求	90
4.3	配合料的制备	91
4.3.1	陶瓷坯料制备的工艺流程及相关设备	91
4.3.2	釉料的制备	102
4.3.3	耐火材料配合料的制备	103
4.3.4	玻璃配合料的制备	105
4.3.5	水泥生料的制备	106
	思考题与习题	107
5	成型	109

5.1	概述	109
5.2	陶瓷的成型	110
5.2.1	陶瓷成型方法的分类与选择	110
5.2.2	压制成型	111
5.2.3	可塑成型	114
5.2.4	注浆成型	119
5.2.5	坯体的放尺	126
5.3	玻璃的成型	128
5.3.1	玻璃成型原理	128
5.3.2	玻璃成型方法	129
5.4	混凝土的浇注与密实成型	136
5.4.1	混凝土成型工艺	137
5.4.2	浇注设备	139
5.4.3	混凝土工程施工缝	139
	思考题与习题	140
6	干燥和排胶	141
6.1	概述	141
6.2	干燥理论	142
6.2.1	物料中的水分类型	142
6.2.2	干燥方法	143
6.2.3	坯体的干燥过程	144
6.2.4	影响干燥速率的因素	145
6.2.5	坯体干燥制度的确定	148
6.3	陶瓷坯体的排胶	150
6.3.1	影响排胶的因素	150
6.3.2	示例：排胶工艺制度制定	152
6.3.3	示例：SiC 素坯的排胶 (PVA) 工艺制度及排胶工艺过程	153
6.4	干燥实例	154
6.4.1	陶瓷类坯体的干燥	154
6.4.2	可不用考虑材料形状的干燥案例	156
6.4.3	几种新型的干燥方法及干燥设备	161
	思考题与习题	165
7	高温加热过程	166
7.1	高温加热过程概述	168
7.2	配合料在加热过程中的物理化学反应	168
7.2.1	陶瓷在高温加热过程中的基本情况	169
7.2.2	釉在高温加热过程中的性状	173
7.2.3	硅酸盐水泥在高温加热过程中的性状	174
7.2.4	玻璃高温加热过程中的性状	177
7.3	高温加热过程中的工作制度	180
7.3.1	制定高温加热过程中工作制度的依据	180
7.3.2	确定温度制度的因素	181
7.3.3	确定气氛制度的因素	182

7.3.4	压力制度的确定	184
7.4	高温加热过程中的现代技术	185
7.4.1	先进陶瓷的烧成	185
7.4.2	新型干法水泥的制备工艺	188
7.4.3	玻璃的现代烧成技术——全氧燃烧技术及其他现代烧成技术	190
	思考题与习题	193
8	后加工与处理	194
8.1	概述	194
8.2	冷加工	196
8.2.1	机械去除加工	196
8.2.2	物理冷加工	202
8.2.3	超精密加工	203
8.3	表面处理及涂层	205
8.3.1	表面化学加工	205
8.3.2	表面改性	207
8.3.3	低温涂层（镀膜）	208
8.3.4	高温涂层	209
8.4	热加工	212
8.4.1	钢化玻璃	212
8.4.2	微晶玻璃	214
8.5	连接	216
8.5.1	金属化	216
8.5.2	封接	216
8.6	后加工实例——电瓷的胶装	221
8.6.1	概述	221
8.6.2	电瓷的切割	222
8.6.3	电瓷的研磨	222
8.6.4	电瓷的胶装	223
	思考题与习题	223
	参考文献	225

1 绪 论

学习导读

简要叙述无机非金属的概念，了解无机非金属工学的研究对象及主要任务，从种类繁多的无机非金属材料中找到共性、突出个性。依据无机非金属材料成型与高温处理的关系，划分这类材料的大类，然后在大类中再细分出小类。最后总结各类无机非金属材料的发展历程及现状，并由此确定学科属性及建立过程。

本部分的重点与难点：如何从繁杂的无机非金属材料中总结其共性与个性，并据此将整个无机非金属材料家族融为一个整体。

金属材料、无机非金属材料、高分子材料及其组合而成的复合材料，构成了完整的材料体系，与信息、能源并列为现代文明的三大支柱，是人类文明和科学技术革命的物质基础和技术先导，材料科学与工程被列为 21 世纪优先发展的关键领域之一，材料的研究、开发、生产和应用受到了空前的重视。材料制备技术是材料研究、开发、生产与应用中的关键，也是本课程的学习内容。

陶瓷、玻璃、水泥、耐火材料等都是无机非金属材料的重要成员。它们是人类最早应用的材料，也是用量最大、用途最广的材料。无机非金属材料脆性大，但坚硬、稳定，且一般都具有良好的绝缘、绝热性能，既可以用作结构材料，也可用作功能材料。近年来，随着科学技术的高速发展，新型的功能材料和结构材料不断涌现，无机非金属材料大家族不断地增添新的成员。这些新成员，在科学技术、航空航天、新型能源、信息电子、工业农业等国民经济主要领域中得到了更为广泛的应用，也逐渐为人们所熟悉。正因为无机非金属材料家族成员的突出作用，人们又将现在这个以芯片为主要标志的时代称为新的“石器时代”。

1.1 无机非金属材料的含义及演化

无机非金属材料就是除金属材料、高分子材料外的其他所有材料。陶瓷是无机非金属材料典型代表。已在国内外广泛应用的陶瓷 (ceramic, pottery, porcelain) 一词经长期演变，有狭义和广义多重含义。狭义的陶瓷一般仅为陶器和瓷器的合称，指以可塑性黏土为主要原料，加入瘠性的石英和助熔剂长石，成型后经烧制而成的制品，按制品性质及所用原料、烧成制度的不同可分为土器、陶器、炆器、瓷器等，按制品用途不同分为日用、建筑、卫生、电工、美术陶瓷等类别。

狭义的陶瓷也称为硅酸盐材料。“硅酸盐”一词按严格的化学概念是指由二氧化硅和金属氧化物所形成的盐类。以硅酸盐类矿物为主要原料，经高温处理制成的制品或材料称为硅酸盐制品 (silicate products) 或硅酸盐材料 (silicate materials)。制造这类制品或材料的工艺过程称为硅酸盐工艺 (ceramic process)。生产这种制品或材料的工业称为硅酸盐工业 (silicate industry)。传统的硅酸盐制品有陶瓷、砖瓦、玻璃、耐火材料、水泥、搪瓷等，是

无机非金属材料的主要构成部分。

最近几十年来，“硅酸盐材料”一词的概念有过一些变化。自第二次世界大战之后，涌现了大量的不含硅酸盐化合物的陶瓷，如不含硅的氧化物（如 Al_2O_3 等单一氧化物和 BaTiO_3 等复合氧化物）、碳化物、氮化物、硼化物、硅化物、卤化物、硫化物、碳素、其他非金属单质为主要成分的非硅酸盐类材料以及其他类陶瓷（如金属陶瓷和纤维增强陶瓷等），给陶瓷这一传统概念赋予了新的含义。人们将这些化学组成、显微结构以及性能均不同于普通陶瓷的新型陶瓷称为特种陶瓷。我国自 20 世纪 50 年代后期起，曾一度把它们都纳入硅酸盐材料范畴之内（20 世纪 40 年代中期至 50 年代初期曾一度使用“陶业”一词），与国际上广义的“陶瓷”（ceramics）及日本的“窑业”具有同一含义，使广义的硅酸盐材料几乎包括了所有的无机非金属材料。

上述传统的硅酸盐制品及现在不断涌现的不含硅酸盐化合物的新型材料，都是非本书所指的无机非金属材料。

1.2 无机非金属材料的分类

无机非金属材料品种繁多，用途复杂，至今尚无公认的、系统的分类方法和分类体系。现在流行的分类方法大多是从材料本身的特性入手，例如，通常依据材料的化学成分、化学特性、矿物组成、物理状态、物理性能、用途、制造工艺等。分类的基本原则都应有科学性、系统性、实用性、通用性（国际化），既要科学地反映材料体系的特点，又要便于交流使用。当然，不论采用何种分类方法，其目的就是为了应用方便。

1.2.1 按化学成分分类

根据构成材料的主要化学成分，可将无机非金属材料分成以下主要类型（或称物系）：单质、氧化物、碳化物、氮化物、硼化物、硫化物、卤化物、硅化物、磷化物、氧氮化物。

氧化物系材料是无机非金属材料的主要部分，也是目前使用最广泛的材料，因此，习惯上也把材料分为氧化物系和非氧化物系。一般所称硅酸盐材料也归于氧化物系材料。除了氧化物系之外的其他无机非金属材料归为非氧化物系，如氮化物、碳化物、硼化物、碳素材料等材料。它们具有很多氧化物系材料所没有的特殊性能，自 20 世纪 70 年代以来发展迅速，已成为了当今高技术材料的重要研究领域。

由两种或两种以上氧化物构成的无机非金属材料，根据材料体中基本氧化物的组合形式及复杂程度，进一步分为一元系、二元系、三元系和多元系（表 1-1）4 类。其中最常见的是二元系和三元系。这种分类方法，有很强的学术性，可以很方便地应用物理化学原理，特别是相图学研究和设计材料，但分类体系过于分散，此外尚有许多多元系不易划分。

另外，在氧化物系材料中，许多材料是以含氧盐类形式存在的，因此又可将氧化物系材料含氧盐形式进行分类，如常用的有氧化物、硫酸盐、氢氧化物、铬酸盐、硅酸盐（含铝硅酸盐）、硝酸盐、硼酸盐、砷酸盐、铝酸盐、锆酸盐、磷酸盐、铋酸盐、钛酸盐、碲酸盐、钨酸盐、铌酸盐、钼酸盐、钽酸盐、铁酸盐、铊酸盐、钒酸盐、钇酸盐、锆酸盐、镍酸盐、碳酸盐等。

1.2.2 按性能（功能）分类

一般可分为结构材料和功能材料两大类，较详细的还可按材料的具体性能（功能）划分

表 1-1 氧化物系无机非金属材料的一步分类

类型	主要成分	实例
一元系	SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 Cr_2O_3 、 Mn_3O_4 、 HfO_2 、 BeO 、 Y_2O_3 、 La_2O_3 、 CeO_2	石英、刚玉、磁粉等
二元系	$\text{R}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (R=Al, Fe, B 等)、 $\text{R}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ (R=K, Na, Li 等)、 $\text{RO} \cdot \text{SiO}_2$ (R=Mg, Ca)、 $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{RO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (R=Mg, Ca)、 $\text{TiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{Mg}) \cdot \text{CO}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{SO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{MgO}$ 、 $\text{RO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (R=Mg, Ba)、 $\text{RO} \cdot \text{TiO}_2$ (R=Ca, Fe)、 $\text{MgO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$	各类耐火材料、陶瓷、水泥、玻璃、特种陶瓷、保温材料、建材
三元系	$\text{R}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (R=K, Na, Li)、 $\text{RO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ (R=Ca, N, B, Be, Ba)、 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{CdO} \cdot \text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$	各类耐火材料、陶瓷、水泥、玻璃、保温材料
四元系	$\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	碱性耐火材料、硅酸盐水泥

如下。

按机械性能：高强材料、超硬材料、耐磨材料、韧性材料、摩擦材料等。

按热学性能：耐火材料、绝热材料（保温材料）、传热材料、防火材料等。

按化学性能：耐腐蚀材料、防水材料、吸附材料、离子交换材料、催化剂载体、胶凝材料等。

按光学性能：电光材料、导光材料、透光材料、荧光材料、发光材料、感光材料、分光材料等。

按电学性能：绝缘材料、介电材料、压电材料、铁电材料、超导材料、半导体材料等。

按磁学性能：磁性材料。

按声学性能：隔声材料、吸声材料等。

按核物理性能：放射性材料、反应材料等。

按生物性能：骨科材料、齿科材料、生物陶瓷等。

按复合性能：智能材料、梯度功能材料等。

需要注意的是，有许多材料往往都集多种功能于一身，这样，又给材料的分类造成了新的困难。

1.2.3 按用途分类

同一种材料常常兼具多种功能和用途，从用途的角度也难以对无机非金属材料体系做出科学的系统的分类。用此法进行类别划分，各类之间并非完全独立，而常常是重复性连接和相互包含的，如用于砌筑建筑物的耐火材料、保温材料同时也属于建筑材料。尽管如此，按用途分类的方法在工业、商业和国民经济计划统计等领域还是得到了广泛应用。

无机非金属材料的主要类别有：耐火材料、防火材料、保温材料、建筑材料、胶凝材料、涂覆材料、模具材料、装饰材料、包装材料、研磨材料、隔声材料、吸声材料、耐蚀材料、感光材料、电子材料、电工材料、光学材料、航空材料、食品材料、医用材料、农用材料等。

这一分类方法，也体现了无机非金属材料在国民经济及社会经济中的广泛应用情况。

1.2.4 其他常用分类方法

(1) 按材料的化学性质分类

构成材料的主要成分的性质和数量直接决定了材料的化学性质。根据材料主要成分的化学性质也可将无机非金属材料分为酸性材料、中性材料及碱性材料三大类（表 1-2）。

需要说明的是，不同材料有其特定的用途，上述分类只是按材料的抗腐蚀性能划分的，

表 1-2 无机非金属材料的化学性质分类

类别	耐侵蚀性能	主要成分	举例
酸性材料	对酸性物质侵蚀抵抗性强	SiO ₂ 、ZrO ₂ 等四价氧化物(RO ₂)	硅质耐火材料、耐酸陶瓷、器皿玻璃
中性材料	对酸、碱性物质抗侵蚀性相近	Al ₂ O ₃ 、Cr ₂ O ₃ 等三价氧化物(Rb ₂ O ₃)，SiC、C 等原子键结晶矿物	氧化铝陶瓷、高铝耐火材料
碱性材料	对碱性物质抵抗性强	碱金属及碱土金属氧化物(R ₂ O、RO)	镁质耐火材料、碱性玻璃、耐碱陶瓷、水泥

不能包含所有材料。但这种分类方法对了解材料的化学性质，判断材料在使用过程中与接触物间的化学作用情况有重要意义。

(2) 按材料的矿物(晶体)组成分类

矿物成分分类方法对研究固体材料特别是晶态材料以及非金属矿产资源的开发利用有重要意义。按矿物组成分类的方法不能概括无机非金属材料的全貌，只能作为一种辅助分类方法，难以形成一种系统性的分类方法。这种分类方法往往能直接地反映出材料的结构和性能特点。工业界就常采用材料体中主要矿物的名称来分类和命名材料，如石膏装饰板、膨胀蛭石制品、堇青石匣钵、刚玉坩埚、碳化硅耐火材料、石英玻璃、长石瓷、莫来石耐火纤维、石墨制品等。

(3) 根据材料的内部结构特征分类

可将无机非金属材料分为晶态材料(包括单晶材料、多晶材料、微晶材料、液晶材料、孪晶材料等)、非晶态材料、准晶态材料(准晶态是利用快速制冷技术制备的，材料正在研制中)和复合材料；也可分为单晶材料、无机玻璃、玻璃陶瓷(微晶玻璃)、陶瓷等。

(4) 根据工业生产特点分类

一般将无机非金属材料按行业分为水泥、胶凝材料及其制品、玻璃、玻璃纤维、搪瓷、铸石、陶瓷、砖瓦、耐火材料、保温材料、高温及特种无机涂层、碳素材料、磨料及磨具、人工晶体、石材等。这种分类方法不利于材料的共性研究。

其他尚有按来源(天然的、合成的)、成型方法、烧结方法、加热方法、原料种类、添加剂种类、结构尺度(如纳米材料、微米材料)、材料形状、某种物理性能(如颜色、强度、密度、温度、耐久性、可塑性等)、具体用途以及施工方法等来进行分类。

以上各种分类方法，应用较系统、广泛的是按化学成分、材料性能和用途的分类，且更多的是几种方法相结合的复合式分类法。但按用途分类在工业生产和商业领域也有广泛的代表性。

和分类方法一样，无机非金属材料的命名方法也很复杂，命名依据可以是化学成分、矿物成分、化学性质、物理性质、生产工艺方法、结构特征、原料种类、材料形态、施工方法、商业名称、用途等，参与命名的术语更是显得复杂多变，但直到现在，尚缺乏通用的材料命名方法。

1.2.5 本书推荐的无机非金属材料分类方法

如前所述，无机非金属材料是非常复杂的材料体系，组成范围杂、性能多样、应用范围广，很难找到根据单一材料的特征就对其进行准确、系统的分类方法。对无机非金属材料进行较为完整的分类，还应该从这类材料的制备工艺过程出发。从制备过程来看，无机非金属材料具有如下的共性。

(1) 原料来源广泛

水泥、玻璃、陶瓷、耐火材料等无机非金属材料大宗产品的原料大多数来自储量丰富的

非金属矿产，如石英砂、黏土、长石、铝矾土等。构成这些矿产的氧、硅、铝三种元素的总量，占地壳中元素总量的90%以上。这些无机非金属材料大宗产品的生产还可以“吃”掉许多工业固体废弃物，为净化地球环境做出了巨大的贡献。

(2) 均存在粉料的制备与运输

大多来自天然的矿物无机非金属材料的原料，均需经过选矿、研磨等预处理，再进行配料、均化，才可进行各种热处理或成型。粉体颗粒的大小、级配、形状及其均匀性往往直接影响产品的质量和产量。天然矿物原料往往均匀性差，需要对其进行均化，如水泥工业就要采用多种措施对原料进行均化，陶瓷工业也要对原料进行加工、成分检验、均化掺和，提供标准化、系列化的粉料。因此，粉体的制备和运输在无机非金属材料的生产过程中非常重要。新发展起来的特种陶瓷和玻璃，要求很高的原料纯度，则需要用人工合成的原料来制备。由此也成长出了一个新的学科分支——粉体的合成。总之，无机非金属材料的原料量大、面广，既有天然原料，也有工业固体废弃物，还有人工合成的粉体，拥有一个复杂的原料供给体系。

(3) 均存在高温加热过程

所有的无机非金属材料工业都需要经过高温过程。无机非金属材料所用原料的稳定性和耐高温性，要使它们相互反应生成新的高度稳定的物质或使其形成熔体，必须要在较高的温度条件下（一般都在1000℃以上）才可，高温加热过程是无机非金属材料生产的核心过程，一般都在用耐火材料砌筑的窑炉中进行。尽管不同产品的加热方式和目的有所不同：如石灰石的煅烧是为了得到活性CaO；水泥的煅烧是使石灰石和黏土等反应，合成硅酸钙类水泥矿物；玻璃工业中的加热是为了获得无气泡、无结石的均一熔体，而晶化又是为了使熔体变成晶体；陶瓷的烧结是让黏土分解、长石熔化，然后和其他组分生成新矿物和液相，最后形成坚硬的烧结体等。加热过程中所遵循的基本原理是相同的：如热的传递、气体的流动、物质的传递；熔体、气体对炉体的侵蚀；气氛的影响等。

此过程所需的热量通常来自燃料的燃烧，少数则可能来源于电、光（激光）、电磁场（微波）等新型热源。高温加热的能量来源、燃料的品种、质量、燃烧的条件等，都会直接、间接地影响到窑炉内的温度及其均匀性，以及能量的消耗量。能否合理有效地利用能量，认真组织燃料燃烧过程是决定产品质量、产量和成本的主要因素。

(4) 均存在成型过程

由粉体或中间体变成产品都有一个成型过程。尽管成型的方法很多，所依据的原理各不相同，但都要使粉体或中间体又快又好地形成某种形状，并得到符合设计要求形状与尺寸的制品。尽管水泥生产只有两磨一烧，没有成型工序，但若将水泥产品延伸到混凝土材料，则成型也必不可少。水泥只是个中间胶凝材料，使用时要加上水、砂、砾等原材料，经过成型，浇注成堤埂、管道、幕柱、预制板才可作为材料使用。

(5) 均存在干燥过程

干燥是无机非金属材料生产的重要工艺过程。有些天然原料如黏土、砂等常含有水分而不好加工，需要烘干。有时为了粉碎、均化、混合又常常要往原料中加水制成浆体，各种浆体都要脱水烘干。有些成型过程要在粉料中加水方能完成（如陶瓷中的可塑成型和注浆成型），还有的高性能陶瓷及其他无机材料的成型还要加入除水之外的其他黏结剂，如在热压铸过程中添加蜡，其他特种陶瓷成型过程中添加有机黏结剂等，成型后都必须要进行干燥（脱黏结剂），才能进入烧成工序中。虽然干燥的对象和水分高低不一定相同，但都是从物料和制品中除去水或其他黏结剂，都有共同的作用原理，都存在热量的传递，水分的蒸发，加热方式、空气温度和流速对水分蒸发的影响，干燥过程中坯体的收缩等。

从制备工艺过程来看，无机非金属材料生产也具有如下个性。

无机非金属材料品种多，门类杂，生产工艺过程也十分复杂，同一生产过程中的作用机理也往往不同，所采用的设备差别很大，要求也不同，再加上近年又发展了很多新品种和新工艺，使本来就复杂的生产工艺更加复杂。当然，这些复杂的工艺过程又往往可以分解为几个简单工艺过程的组合。如将粉体的制备过程以 P (powder) 来表示，热处理过程用 H (heating) 来表示，成型以 F (formation) 来表示，则无机非金属材料的生产工艺过程可以有 P-H-P、H-P-F、P-H-F、P-F-H 等组合。本书根据无机非金属材料制备过程的上述特点，尤其根据制备过程中成型与高温加热的关系，将这一家族的材料分成如下三大类。

① 高温加热之前成型的无机非金属材料，以陶瓷、砖瓦、烧结型耐火材料等为代表。此类产品的工艺过程的组合为 P-F-H 系列。这里的热处理过程称烧成或烧结，它是通过粉体间的固相反应，或形成液相产生固液反应、气固反应，使粉体间产生牢固的连接而具有强度。它不要求完全合成某种矿物，主要是通过各种反应把原来的粉末烧结在一起。制品中常有各种原料的残余相，有反应物、析出物，有固相、液相、气相，是一个结构复杂的烧结体。根据烧结体致密度的不同，可分为陶器、半瓷器（炆器）、瓷器等。为了防渗漏、易于清洗、美化制品，还往往在陶瓷表面施加一层釉。釉坯的匹配、施釉技术的好坏对产品质量影响很大，釉可以施在坯上一次烧成，也可以施在已烧好的素坯上二次烧成。这层釉实际上是玻璃体，这类材料可以说是烧结体和玻璃体所组成的复合材料。

② 成型与高温加热同步的无机非金属材料，以玻璃、玻璃纤维、铸石、人工晶体类材料为代表，属 P-H-F 系列。

玻璃 (glass)，由于它的透明性、整体性和化学稳定性，大都被用作建筑材料、各种交通工具的采光材料和各种密封容器材料，它是通过硅酸盐高黏度的熔融体急冷而成的。它要先将各种原料粉碎成粉体，经配料、熔化，最后冷却固化而成型。

如果将熔融体直接拉成丝，可制备成各种玻璃纤维 (glass fibre)。玻璃纤维的高强度、高绝缘性和优良的保温性能，使它成为一个独立的工业分支，而特种光导玻璃纤维则是近代光通信的基础。

玻璃作为采光材料、日用器件、艺术品、化学仪器和各种特殊容器，还有一个很重要的工序是后加工，也称深加工。后加工分热加工和冷加工两大类。热加工主要有热应力钢化、夹层、热喷涂、烤花等。冷加工包括碾磨抛光、雕刻、喷花、蚀刻、制镜等。

如果将熔融体冷却到一定的温度，或将玻璃块重新加热到一定温度，使其晶化，则能形成微晶玻璃和各种多晶体、单晶体。这些材料具有比玻璃更优异的品质，如微晶玻璃的高强度、高韧性，熔铸耐火材料的高致密度和优良的抗高温侵蚀性能。人造宝石具有高硬度和优良的光学性能，由辉绿岩、玄武岩、高炉渣等熔融、浇铸成型，再晶化而成的铸石 (cast stone) 具有高耐磨性等。有些人工晶体 (synthetic crystal)，如人造氟云母、锂云母、多晶 CaF_2 等都是先制成熔体，然后再形成晶体。上述材料的特点是在玻璃工艺的基础上，再加一晶化过程，因此总结成 P-H-F-H 工艺。

③ 成型在高温加热之后的无机非金属材料，以胶凝材料类 (binding material) 为代表，属 P-H-P-F 系列。这类产品首先要经过热处理，合成能水化的矿物，如水泥矿物 ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 等)，然后磨成细粉，最后成型。

碳化硅 (SiC) 磨料的生产 and 水泥粉的生产过程很相似，是将石英砂与石油焦炭粉混合在电阻炉中加热至 2500°C 以上，由固相、气固相反应生成 SiC，放出 CO_2 ，然后将大块的 SiC 晶体粉碎，并经分级处理，制成各种细度的磨料。

先按制造过程中成型与高温加热的关系进行分类，在大类中再从各自研究与应用的角度进行细类划分，不论对无机非金属材料的学习，还是对这类材料的研发，都有很大的意义。如表 1-3 列出了无机非金属材料大类的分类。

表 1-3 无机非金属材料分类表

类 型	成型时间	无机非金属材料
第 1 类	高温加热前成型	陶瓷、砖瓦、耐火材料类材料
第 2 类	高温加热中成型	玻璃、玻璃纤维、铸石、人工晶体类材料
第 3 类	高温加热后成型	胶凝材料类

1.3 无机非金属材料的发展历程

1.3.1 传统陶瓷的发展历程

在人类发展史中，最先使用的工具是石头。在由古猿到原始人的漫长进化过程中，石器一直是人类使用的主要工具。约 50 万年前，人类学会了用火。在原始社会末期，开始用火烧制陶器。新石器时代的仰韶文化和龙山文化时期，制陶技术已经发展到能在含有温度达 950℃ 的氧化性炉气的窑中烧制红陶，在温度达 1050℃ 的还原性炉气中烧制薄胎黑陶与白陶。7000 多年前的浙江河姆渡，3000 多年前的殷、周时期发明了釉陶，窑炉温度提高到了 1200℃。我国陶瓷发展经历了三个重大的飞跃：从原始陶器发展到商、周时代的釉陶是一个飞跃；从釉陶发展到具有半透明的釉，而胎还是瓦胎的瓷器，又是一个飞跃；以后在此基础上发展成为更具有半透明胎的瓷器，是第三个飞跃。

自商、周出现釉陶以后，后来的秦砖汉瓦、秦代的巨型兵马俑、汉代的铅釉陶器、唐代的“唐三彩”陶器以及自宋代以后在江苏宜兴地方兴盛起来的紫砂陶器等，都是曾经在历史上煊赫一时、至今声名不衰的著名陶器。陶器经历了几千年的考验，尽管它的致密度、强度和光泽度不及后起的瓷器，但由于它具有密度较小，变形小，易于制造大件器物，基质中多孔结构形成的某些“点结合”，可以释放出由于温度或机械作用造成的局部应力，从而相对地降低脆性等特点，虽经过几千年的起伏曲折，仍一直与瓷器并存到现在，继续为人类服务。

东汉时期出现了瓷器，从浙江上虞龙泉塘西晋墓出土的越窑青釉瓷片（同时出土的有西晋元康七年的墓砖）和上虞小仙坛出土的东汉越窑青釉瓷片来看，无论在组成上还是工艺上，都已达到近代瓷器的标准。它的组成中因 Fe_2O_3 和 TiO_2 的含量较高（龙泉塘瓷片分别为 2.72% 和 11.1%，小仙坛瓷片分别为 1.64% 和 0.97%）而使瓷胎呈较深的灰白色，并且其烧成温度已达 1300~1310℃，吸水率为 0.42% 和 0.28%，显气孔率为 0.92% 和 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，石英颗粒较细，还可看到它的熔蚀边。有较多的玻璃态，烧结程度较好，微透光，这说明我国在公元 1~2 世纪的东汉时代即已出现瓷器。

自东汉、三国、魏、晋以后，瓷器进入了一个更加辉煌的发展时期。在南北朝（公元 420~589 年）青釉瓷器大量生产。北方青瓷也有了极大发展。隋唐两朝（公元 581~907 年）已普遍使用高火度烧成，胎质更为坚韧。白釉瓷器也在隋代烧造成功。唐代瓷器产区已分布很广，其中越窑（浙江余姚）的青瓷和邢州窑的白瓷齐名全国。到五代景德镇胜梅亭窑的白度已达 70%，孔隙度为 0.81%，已接近现代瓷器的水平。从此我国不仅有了半透明釉的瓷，也有了符合现代瓷器标准的具有半透明胎的瓷。

宋代（公元 960~1279 年）陶瓷工业普遍发展，造瓷地区逐渐扩大，当时有官、越、定、钧、汝五大名窑。官窑北宋时在河南开封，南宋时在浙江临安（杭州）；越窑在浙江余姚；定窑有北定（河北曲阳）、南定（江西景德镇）两处；钧窑在河南禹县神垕镇；汝窑在河南临汝。其中官、越、钧、汝等窑制品都以青色为主，但各有特色。定窑以白色、黑色和

紫色制品著名。钧窑是应用铜红釉最早、制品颜色较多的窑。此外陕西的耀州窑，福建的建窑，江西的吉州窑，浙江的哥窑、弟窑、象州窑，河北的磁州窑，北宋和辽对峙时期的辽瓷，南宋和金对峙时期的金钧窑，也都是当时比较著名的窑场。同时广东、福建、山东、山西、甘肃、安徽、四川、云南也普遍开始生产陶瓷。宋代瓷业的全面发展，为后来明、清瓷业的精进奠定了基础。

元朝（公元1271~1368年）初期，南北瓷窑很多遭到破坏，独有景德镇在宋的基础上继续获得发展。当时蒙古帝国横跨欧亚，中西交通频繁，在一定程度上刺激了中国瓷业的发展，这时除在景德镇创造了青花、五色花、戛金、釉里红等装饰技艺外，龙泉的青瓷也大量出口。

明朝（公元1368~1644年）在传统的基础上制瓷技术有了很大的提高，并有不少新的发明创造。如永乐时创制的白釉脱胎瓷器及宝石红釉，宣德时的青花和祭红，成化时的五彩和斗彩，都超越了前代。尤其是宣德青花，幽茜明艳，被人称为“开一代未有之奇”。元明以来，景德镇逐渐成为了全国瓷业的中心。宜兴陶器到了明代也很有名。此外其他名窑还有德化窑、石湾窑等。

清代（公元1644~1911年）初期，我国的制瓷工艺进入十分成熟的阶段。此时仍以景德镇为中心，制瓷规模更大，在造型装饰方面有更进一步的提高。除继承前人之外，又接受了一些外来的影响，釉彩由五彩、斗彩发展到粉彩与珐琅彩，并创造了各种低温和高温颜色釉。康熙、雍正、乾隆三朝制品尤其精巧华丽，达到历史上的空前水平。

清代名窑除景德镇外，还有石湾、宜兴、德化、博山等地，至清末湖南醴陵瓷业一鸣惊人，成为后起之秀。

许多著名陶瓷产区，如景德镇、醴陵、唐山、邯郸、石湾、枫溪、高陂、宜兴、淄博、温州、海城、荣昌等地生产方式已大有改进，原料加工已基本上机械化，并部分自动化；成型已普遍推广机械滚压，有的已与干燥线联动；干燥采用了定向集中气流强化干燥，并部分采用远红外干燥、微波干燥等干燥新技术；烧成已普遍使用隧道窑、梭式窑、推板窑、辊道窑等新型窑炉。新工艺、新技术、新设备不断涌现，新品种、新造型、新装饰日新月异。

从以上情况来看，我国陶瓷工艺发展有三个重大突破：原料的选择和精制，炉窑的改进和烧成温度的提高以及釉的发现和使用。前一个突破是陶向瓷发展的内因根据，后两个突破是陶向瓷发展的外因条件。陶瓷也经历了由陶器向原始瓷器（过渡阶段）再向瓷器发展的三个阶段。

1.3.2 其他无机非金属材料的发展历程及产品类型

无机非金属材料种类繁多，且都有漫长而又丰富多彩的发展历程。在其发展历程中，又无不以使用性能作为其永无止境的追求目标。正是由于使用性能的不断提高，才得以对材料或制品给予肯定。本节从发展历程的角度，简要描述玻璃、先进陶瓷、耐火材料和水泥等材料的发展进程及产品类型。

1.3.2.1 玻璃

(1) 概述

玻璃是经熔融冷却固化的非结晶态（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不同形状和大小制品，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。制造玻璃的原料丰富、价格低廉，玻璃的应用极其广泛。

人类早期玻璃制造技术的产生和发展，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造玻璃。其组成基本上属 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 系统。由于铁、锰及铜杂质氧化物较多,大都呈深绿色。美索布达米亚大约公元前2000年时的玻璃组成(质量分数)如下: 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发现于距今约3000年前的西周早期墓葬(陕西宝鸡)。到战国(公元前475~前221年)时,制作精巧的玻璃制品已成为了商品。公元前300年到公元300年,中国玻璃制造技术还向邻国日本流传(相当于日本的弥生时代)。

无机玻璃化学组成较复杂,玻璃制品的成型方法丰富,如热成型(吹、压、拉、铸、延)、冷加工(磨砂、抛光、钻、削)、烧结和焊接都是常见的成型方法。玻璃制品还有许多再加工工艺(热处理、表面处理),玻璃的物化性质还可做较大幅度的调整。玻璃制品的形状包括单件的(中空或实心)和延续的(板片、管棒、丝棉)。玻璃制品的应用十分广泛;涉及建筑材料、化学工业、医药工业、轻工业、电子工业、交通运输、航空航天、核工业等工业部门。据20世纪末的统计,全世界玻璃产量约为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%。各类玻璃制品的品种、应用和生产也在逐步形成和扩大。

(2) 玻璃的主要品种与用途

① 平板玻璃 平板玻璃有窗玻璃、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、槽形玻璃等不同的品种。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。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。

以前,平板玻璃成型方法(机械法)大致有两类:一类是窗玻璃法,大体上又分为有槽法、无槽法、平拉法以及对辊法,常见有波筋和条纹等缺陷;另一类是压延、磨光玻璃法,将压延玻璃(无花纹)经研磨、抛光制得,表面平整,但生产成本高,限制了它的普遍使用。

英国 Pilkington 公司于1953年开始试验,于1959年建设了世界上第一条浮法玻璃生产线,用大工业化的方法,生产了表面质量可与机械磨光玻璃相媲美的玻璃。浮法工艺的优点如下: a. 建设快,不需磨砂分级和磨光机械的系统设备,其建设要比连续磨光快得多,仅需一年即可投产; b. 投资省,基建费用仅为同规模双面连续磨光线的50%; c. 质量好,不仅平整度、平行度和透光度可与磨光玻璃相媲美,而且机械强度、热稳定性等优于磨光玻璃; d. 产量高,由于拉引速度与板宽的加大,生产能力最高可达900t/d以上; e. 成本低,由于使用寿命长、产量大、自动化程度高、劳动生产率高、设备维修少等,生产成本远低于磨光玻璃,基本接近于过去的普通窗玻璃; f. 品种多,可生产出0.55~25mm的优质平板玻璃,还可制得各种本体着色或在线镀膜玻璃。

美国、法国、意大利、比利时等国于20世纪60年代初,日本、前苏联、东欧各国于20世纪60年代末和70年代初,先后向英国购买专利建设浮法生产线。世界平板玻璃总产量从1960年的434万吨突增到1990年的2300万吨。浮法玻璃在全球平板玻璃总产量中所占的比例,目前已达90%以上。在这快速发展期间,主要的技术上的改进与提高有: a. 新颖的玻璃液输送系统,美国 Pittsburgh 玻璃公司于1975年宣布,将流槽加宽并与流液道结合在一起,从而缩短玻璃带在锡液上的横向伸展时间,并使其横向平直性更好; b. 拉薄方法,原始的浮法工艺只能生产6mm厚的玻璃,采用徐冷拉薄法和拉边机,有利于阻止玻璃

带展薄时的横向收缩，既能拉出薄玻璃，还能明显减少电耗，又提高了成型质量和成品率，扩大了厚度品种；c. 在线镀膜，利用了离子交换原理和气相沉积方法；d. 锡槽结构改进，将直通式等宽锡槽改成喇叭形，以降低锡的暴露，同时还对池深、密封以及进出口结构做了改进，降低了容锡量与锡耗量，改善了成型质量；e. 自动控制，浮法的水平拉引工艺特点，利于实现全线的机械化与自动化。20世纪60年代采用了数字程序控制，20世纪70年代普遍采用了电子计算机自动控制。这对提高劳动生产率、稳定生产和产品质量都极为有利。

中国的浮法工艺是在1965~1971年独立试验投产成功的。20世纪80年代初开始，明确了平板玻璃的发展，应以浮法工艺为主。从20世纪80年代后期开始，中国浮法工艺技术已输往发展中国家。到20世纪末浮法生产线总数已达到65条。

从产品结构来看，浮法提供的产品已占有极大的比例；产品质量与国外相比还有差距；大多数玻璃熔窑能耗偏高，寿命偏短；集中表现为集约化程度低、科技含量低、经济效益低。最近，提出的“由大转强的转变”已成为中国平板玻璃工业发展的战略方针。现在，我国玻璃产量已位居世界之首，浮法玻璃也是主要的玻璃品种。国家还采取了许多有利于玻璃工业发展的措施：如淘汰部分小型玻璃工厂的生产，改造部分落后工艺为浮法，努力提高原料的质量，大力建设原料矿山基地。开发新品种和提高二次加工率，如防火玻璃形成规模生产，以满足高层建筑的发展需要。加强宣传、组织与规范加工玻璃（如安全玻璃、中空玻璃等）的特性和应用技术。进一步提高国产专业装备的制造水平，包括大型浮法的全套装备、水平式钢化设备和磁控真空溅射镀膜设备等。

② 光学玻璃 中国古代以凹面铜镜聚焦阳光而取火。战国墨翟研究了反射成像。到11世纪沈括研究了凹面反射镜成像原理。16世纪后伽利略、开普勒、牛顿先后研究光学成像。牛顿还用三棱镜把日光分为七色，为现代光谱仪器的源头。此后，人们应用光学于工业生产、文化生活、科学研究诸方面，其中所利用的主要材料就是光学玻璃。光学玻璃稍具规模的试制始于德国的 Fraunhofer 及其技术合作者瑞士人 Guinand。最后归结为现在巴黎的 Parra-Mantois 光学玻璃厂。之后，英国的 Chance Brothers 工厂（1848年），美国的 Bausch&Lamb 工厂（1900年），先后进行光学玻璃的试制，这都与 Guinand 的后代有关。1886年德国的 Abbe 及 Schott 进行了系统的科学工作，扩大了光学玻璃的光性范围。第一次世界大战时，美国试验成功了用滚压法来大量制造望远镜照相机玻璃。为了满足光学设计上高折射率、低色散玻璃的要求，1938年后创造了镧冕玻璃及镧燧玻璃系统。第二次世界大战期间，德国创造了光学玻璃的浇铸法。另外，人们还发展了红外及紫外光学仪器所用的光学玻璃。天文事业的发展要求有大块的低膨胀的反射镜及透镜，美国用池炉熔化低膨胀的直径5m、质量达40t的玻璃盘，前苏联用坩埚法制成直径3.3m以上的玻璃盘。

光学玻璃的质量要求：为制造各种曲率的球面或非球面透镜和反射镜，以及各种复杂的棱镜，使光线得以做透射、折射和反射，必须满足下列基本要求。

- 特定的光学常数及其同批的一致性，每种光学玻璃对不同的波长有不同的折射率（允许差值应严格控制），供设计使用。

- 高度透明性，以保证清晰成像，对可见光区、紫外区和红外区均有高的透明度，这取决于着色杂质。

- 高度物化均匀性，气泡、结石和条纹的化学不均匀性，以及内应力与热历史的物理不均匀性，都会影响成像质量或光学测量精度。

- 一定的化学稳定性，应抗潮湿大气和弱酸侵蚀，以适应加工与使用的条件。

- 一定的热性质及机械性质，应能用于特殊环境（航空、航天的高精密光学装置），不