

高 等 学 校 教 材

水泥与混凝土工艺

苏达根 主编

Chemical Industry Press



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

水泥与混凝土工艺

苏达根 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

水泥与混凝土工艺/苏达根主编. —北京: 化学工业出版社, 2004. 12
高等学校教材
ISBN 7-5025-6407-1

I. 水… II. 苏… III. 水泥-混凝土-生产工艺-高等学校-教材 IV. TQ528.456

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 127398 号

高等学校教材
水泥与混凝土工艺

苏达根 主编
责任编辑: 杨 菁 陈 丽
文字编辑: 贾 婷
责任校对: 李 林
封面设计: 于剑凝

*

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>

*

新华书店北京发行所经销
北京云浩印刷有限责任公司印装
开本 787mm×1092mm 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 333 千字
2005 年 3 月第 1 版 2005 年 3 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5025-6407-1/G·1633
定 价: 24.00 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

本教材是编者结合二十多年在华南理工大学材料学院科研及教学经验编写而成。

编写本教材的指导思想是紧密结合人才培养模式的改革，培养科学精神、创新思维，培养分析解决问题的能力。本书具有如下特点。

① 内容尽可能反映本学科国内外的新成就以及有关的新标准，且注重水泥与混凝土的内在联系。

② 每章设工程实例分析及创新漫谈专栏，以培养创新意识，培养理论联系实际、分析解决问题的能力。

③ 理论教学与实验教学有机结合，把验证性试验改革为综合设计试验。

④ 突出环境保护及可持续发展，培养科学发展观。内容还涉及到编者主持的两项国家自然科学基金资助项目：“水泥窑有害气体逸放与防治基础研究”（编号 29777012）和“利用固体废物煅烧水泥过程中 Hg、Pb、Cd 的排放机理及防治基础研究”（编号 20377014）。

⑤ 每章设学习建议及练习题，以方便学生的学习。

本书既可供材料科学与工程、无机非金属材料工程等专业的本科生教学使用，也可供水泥企业、混凝土企业以及建筑工程的技术人员培训及参考使用。

本书的编写得到了众多同行的支持和帮助。华南理工大学王天頔教授、杨东生副教授对本书提出了宝贵的意见。中国建筑材料工业规划研究院院长刘长发，广州珠江水泥有限公司庄义汉总经理、郑利强主任、陈中华工程师，广州水泥厂赵思源总经理，广西大学曹德光、陈益兰，以及广东建材研究院杨莘高工等为本书提供了相关资料。广东工业大学苏倩及关启欣完成了自动化控制的初稿。所指导的研究生亦有多人参与了本书的有关工作，其中博士生林少敏、柯昌君和钟明峰完成了有关图片的制作和文字修改工作，硕士生张京锋、刘辉敏和陈懿懿等完成了文字的导入编排工作。此外，本书在编写过程中还得到了华南理工大学周曦亚、张志杰、殷素红等的帮助。在此一并表示感谢。

由于编者水平所限，书中的疏漏甚至错误之处恐难避免，欢迎广大读者批评指正。

编者

(E-mail riccesu@163.net)

2004 年 12 月

内 容 提 要

本书共十三章,详细介绍了硅酸盐水泥熟料的组成,硅酸盐水泥的原燃料及配料,水泥生产及环境保护,通用水泥、特性水泥和专用水泥,水泥的水化及性能,混凝土组成材料,混凝土的性能,普通混凝土配合比设计及质量控制等内容。

本书在内容上尽可能反映本学科国内外的新成就以及新标准,每章设工程实例分析、创新漫谈专栏和练习题,起到了培养学生创新意识、分析解决问题的能力的作用,并方便了学生的学习。

本书可供材料科学与工程、无机非金属材料工程等专业的本科生教学使用,也可供水泥、混凝土企业以及建筑工程的技术人员培训及参考使用。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 胶凝材料的定义和分类.....	1
第二节 水泥生产与发展概况.....	1
第三节 通用水泥生产的主要工艺过程.....	2
第四节 混凝土的发展概况.....	3
【创新漫谈 1-1】 谁发明了水泥	4
【创新漫谈 1-2】 金字塔使用的胶凝材料	5
【创新漫谈 1-3】 月球上的建筑材料	5
学习建议及练习题.....	5
第二章 硅酸盐水泥熟料的组成	6
第一节 熟料的矿物组成.....	6
第二节 熟料的率值	12
【工程实例分析 2-1】 B 矿成堆的硅酸盐水泥熟料.....	15
学习建议及练习题	15
第三章 硅酸盐水泥的原燃料及配料	17
第一节 原料	17
第二节 配料	23
【工程实例分析 3-1】 改用化学成分相近的石灰石后熟料质量下降原因分析	28
学习建议及练习题	28
第四章 硅酸盐水泥熟料的煅烧	29
第一节 物料在煅烧过程中的物理化学变化	29
第二节 其他少量组分及矿化剂对熟料煅烧和质量的影响	37
第三节 水泥窑与煅烧工艺	40
第四节 悬浮预热与窑外分解技术	47
第五节 水泥窑用耐火隔热材料	62
【工程实例分析 4-1】 利用稀土废弃物生产水泥熟料	68
【工程实例分析 4-2】 预分解窑窑内结大球原因分析	68
【工程实例分析 4-3】 某立窑水泥厂生产的水泥凝结时间长原因分析	68
【工程实例分析 4-4】 飞砂料的形成与防治	69
学习建议及练习题	69
第五章 水泥生产及环境保护	71
第一节 硅酸盐水泥及普通水泥标准	71
第二节 粉磨工艺	74
第三节 水泥生产控制	77
第四节 水泥生产的环境保护	81

【工程实例分析 5-1】 优化质量控制指标,合理利用矿产资源	91
【工程实例分析 5-2】 增设预破碎后球磨机工艺参数的调整	91
学习建议及练习题	92
第六章 硅酸盐水泥的水化硬化与性能	93
第一节 熟料矿物的水化	93
第二节 硅酸盐水泥的水化	96
第三节 水泥浆体的凝结硬化及其组成结构	97
第四节 硅酸盐水泥的性能	104
【工程实例分析 6-1】 水泥凝结时间前后变化	110
【工程实例分析 6-2】 挡墙开裂与水泥的选用	110
学习建议及练习题	110
第七章 其他通用水泥	112
第一节 矿渣、粉煤灰和火山灰质混合材料	112
第二节 其他通用水泥的定义和技术指标	117
第三节 几种通用水泥的性能与应用	118
【工程实例分析 7-1】 镶贴瓷砖空鼓脱落与水泥质量	119
【工程实例分析 7-2】 水泥温度与混凝土开裂	120
学习建议及练习题	120
第八章 特性水泥和专用水泥	121
第一节 铝酸盐水泥	121
第二节 快硬水泥和特快硬水泥	122
第三节 抗硫酸盐硅酸盐水泥	124
第四节 膨胀水泥和自应力水泥	125
第五节 中热水泥、低热水泥和低热矿渣水泥	126
第六节 白水泥和彩色水泥	127
第七节 道路硅酸盐水泥	128
第八节 砌筑水泥	129
第九节 油井水泥	129
【创新漫谈 8-1】 新型无机胶凝材料——土聚水泥	130
学习建议及练习题	130
第九章 混凝土组成材料	132
第一节 水泥	132
第二节 集料	132
第三节 混凝土拌合及养护用水	139
第四节 混凝土外加剂	140
第五节 混凝土掺合料	143
【工程实例分析 9-1】 集料杂质多危害混凝土强度	147
【工程实例分析 9-2】 含糖分的水使混凝土 2d 仍未凝结	148
【工程实例分析 9-3】 氟盐防冻剂锈蚀钢筋	148
学习建议及练习题	148

第十章 混凝土拌合物的性能	150
第一节 混凝土拌合物的和易性.....	150
第二节 新拌混凝土的凝结时间.....	154
【工程实例分析 10-1】 碎石形状对混凝土和易性的影响	154
【工程实例分析 10-2】 集料含水量波动对混凝土和易性的影响	154
学习建议及练习题.....	155
第十一章 硬化后混凝土的性能	156
第一节 混凝土的强度.....	156
第二节 混凝土的变形.....	161
第三节 混凝土的耐久性.....	163
【工程实例分析 11-1】 北京西直门旧立交桥混凝土的开裂	166
【工程实例分析 11-2】 混凝土强度低的屋面倒塌	166
【工程实例分析 11-3】 掺合料搅拌不均致使混凝土强度低	166
【工程实例分析 11-4】 过道屋面混凝土剥落漏水分析	166
【创新漫谈 11-1】 钢筋混凝土的海水腐蚀防治	167
学习建议及练习题.....	167
第十二章 普通混凝土的配合比设计及质量控制	168
第一节 混凝土的基本要求与质量控制.....	168
第二节 普通混凝土的配合比设计.....	168
【工程实例分析 12-1】 水泥质量波动与混凝土强度波动	176
【工程实例分析 12-2】 砂变细后混凝土配合比设计的调整	176
学习建议及练习题.....	176
第十三章 其他种类混凝土及砂浆	178
第一节 高性能混凝土和高强混凝土.....	178
第二节 抗渗混凝土.....	179
第三节 纤维混凝土.....	180
第四节 聚合物混凝土.....	181
第五节 泵送混凝土.....	181
第六节 砂浆.....	181
【工程实例分析 13-1】 树脂混凝土应用分析	189
【工程实例分析 13-2】 砂浆质量问题	189
【工程实例分析 13-3】 以硫铁矿渣代建筑砂配制砂浆的质量问题	189
【创新漫谈 13-1】 钢筋混凝土诞生漫谈	190
【创新漫谈 13-2】 自愈合混凝土	190
学习建议及练习题.....	190
水泥与混凝土工艺试验	191
综合试验 1 混合材种类及掺量对水泥性能影响综合试验	191
综合试验 2 普通混凝土配合比设计试验	191
试验 1 水泥技术性能试验	191
实验 1.1 水泥细度检验	192

实验 1.2 水泥比表面积测定	192
实验 1.3 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验	196
实验 1.4 水泥胶砂强度试验	199
试验 2 普通混凝土试验	202
实验 2.1 拌合物和易性试验	203
实验 2.2 拌合物表观密度试验	204
实验 2.3 立方体抗压强度试验	205
参考文献	208

第一章 绪 论

第一节 胶凝材料的定义和分类

一、胶凝材料的定义

凡能在物理、化学作用下，由浆体变为坚固的石状体，并能胶结其他物料而具有一定机械强度的物质，统称为胶凝材料。胶凝材料可分为有机和无机两大类。沥青和各种树脂属有机胶凝材料。无机胶凝材料按硬化条件，可分为水硬性和非水硬性两类。非水硬性胶凝材料又称气硬性胶凝材料。如石灰拌水后只能在空气中硬化。水硬性胶凝材料拌水后既能在空气中硬化，又能在水中硬化，通常称为水泥。

二、水泥的分类

GB/T 4131—1997《水泥的命名、定义和术语》规定了水泥的分类和命名原则。

为了便于水泥的命名，水泥按其用途及性能分为三类。通用水泥：一般土木建筑工程通常采用的水泥；专用水泥：专门用途的水泥；特性水泥：某种性能比较突出的水泥。

水泥按其主要水硬性物质名称分为，硅酸盐水泥即国外统称的波特兰水泥；铝酸盐水泥；硫铝酸盐水泥；铁铝酸盐水泥；氟铝酸盐水泥；以火山灰性或潜在水硬性材料以及其他活性材料为主要组分的水泥。

水泥按需要在水泥命名中标明的主要技术特性分为，快硬性：分为快硬和特快硬两类；水化热：分为中热和低热两类；抗硫酸盐腐蚀性：分为中抗硫酸盐腐蚀和高抗硫酸盐腐蚀两类；膨胀性：分为膨胀和自应力两类；耐高温性：铝酸盐水泥的耐高温性以水泥中氧化铝的含量分级。

三、水泥命名的一般原则

水泥的命名按不同类别以水泥的主要水硬性矿物、混合材料、用途和主要特性进行，力求简明准确，名称过长时，允许有简称。

通用水泥以水泥的主要水硬性矿物名称冠以混合材料名称或其他适当名称命名。通用水泥包括硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥和石灰石硅酸盐水泥。

专用水泥以其专门用途命名，并冠以不同型号。如 G 级油井水泥。

特性水泥以水泥的主要水硬性矿物名称冠以水泥的主要特性命名，并冠以不同型号或混合材料名称。例如，快硬硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥、膨胀硫铝酸盐水泥。

以火山灰性或潜在水硬性材料以及其他活性材料为主要组分的水泥是以主要组分的名称冠以活化材料的名称进行命名，也可再冠以特性名称。例如，石膏矿渣水泥、石灰火山灰水泥。

第二节 水泥生产与发展概况

原始水泥可追溯到 5 千年前。埃及的金字塔、古希腊和古罗马时代用石灰掺砂制成混合砂浆，曾被用于砌筑石块和砖块，这种用于砌筑的胶凝材料称为原始水泥。虽然按今天科学家的眼光来看，它们只不过是粘土、石膏、气硬性石灰和火山灰，但就是这些原始的发现为现代水泥的发明奠定了基础。

1824 年，英国人丁·阿斯普丁（J. Aspdin）发明了一种将石灰石和粘土混合后加以煅烧来制造水泥的方法，并获得了专利权。这种水泥同英国伦敦附近波特兰（Portland）小城盛产的石材颜色相近，故称为波特兰水泥。此后，欧洲各地不断地对水泥进行改进，1856 年德国建起了水泥厂，并普及到了美国。1870 年以后，水泥作为一种新型工业在世界许多国家和地区得以发展和应用。

至今，水泥生产工艺已不断发展完善。但其基本的生产过程仍分为三个阶段：生料制备、熟料煅烧及水泥磨制。如硅酸盐水泥的生产，它以石灰质原料、粘土质原料等原料按适当比例配合并磨细混匀成生料，称为生料制备。生料在水泥窑内煅烧至部分熔融变成以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料，称为熟料煅烧。熟料加入适量石膏，有些品种还加入适量的混合材料共同磨细为水泥，称为水泥磨制。

具体的水泥生产工艺流程有多种，如生料的制备有湿法和干法。水泥窑有立窑和回转窑。而回转窑又有湿法回转窑、立波尔窑、悬浮预热器窑及预分解窑等多种。

我国的水泥工业在解放前十分落后，1876 年只是在河北唐山成立了启新洋灰公司，以后又相继建立了大连、上海、广州等水泥厂。历史上最高年产量（1942 年）只有 229 万吨。我国水泥工业真正的发展是在解放以后。20 世纪 50 年代，我国按照前苏联的模式，在部分高校和中等专业学校中培养水泥方面的专业技术人才，与此同时，国家成立了建材研究机构，一部分专业人员潜心研究水泥技术，并建成了一批水泥厂。经过 50 多年的发展，我国水泥工业在世界上举足轻重，1998 年我国水泥产量已达 5.36 亿吨，连续多年居世界第一。在提高水泥产量的同时，水泥质量也不断提高。产品的标准不断更新，并逐步与国际接轨。

在水泥发展过程中，硅酸盐水泥（即波特兰水泥）从产量和应用来看，在基本建设工程中占有重要地位。但是，由于硅酸盐水泥固有的性能和特点，决定了它不能满足一些特殊工程的需要，也不能更好地满足现代化建设工程和施工新技术的需求。当今世界各国都在研究和发展专用水泥及特种水泥。水泥已从单一的含硅酸盐矿物的品种发展到各种化学成分矿物组成、性能与应用范围不同的品种。

到目前为止，我国已研制成功了特种水泥和专用水泥 100 余种，经常生产的有 30 余种，约占水泥总产量的 25%，如道路水泥、大坝水泥、快硬水泥、油井水泥、膨胀水泥、自应力水泥、耐高温水泥及白水泥等。

我国的水泥工业将沿着“由大变强，靠新出强”的可持续发展道路前进。

第三节 通用水泥生产的主要工艺过程

通用水泥生产的主要工艺过程为：生料制备、熟料煅烧及水泥磨制，即“两磨一烧”。

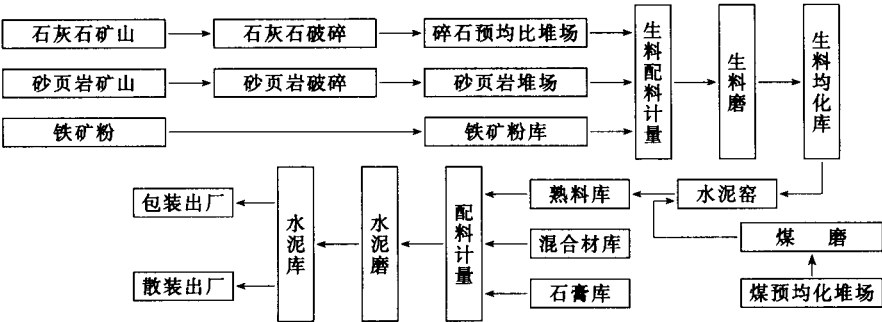


图 1-1 水泥生产工艺流程

水泥生产工艺流程如图 1-1 所示。

第四节 混凝土的发展概况

水泥的主要应用是配制成水泥砂浆、水泥混凝土及其各种制品。应该说，混凝土的发展历史与水泥的发展历史几乎是同步的。

自从 1824 年 J. Aspdin 发明波特兰水泥后，制作混凝土的胶凝材料产生了质的变化。此后，水泥与混凝土的生产技术迅速发展，混凝土的用量急剧增加，使用范围日益扩大。迄今为止，它已成为世界上用量最多的人造材料。这是因为混凝土具有原料丰富、造价低廉、制作简单、造型方便、坚固耐久、耐火抗震等多种优异性能。但混凝土也存在抗拉、抗折强度低，脆性系数大，容易开裂，自重大等缺点，限制了混凝土的使用范围。为了改善混凝土的性能，克服这些缺陷，世界各国的材料科学工作者和土木建筑师们进行了不懈的努力。

1850 年法国人朗波特（Lambent）用加钢筋的方法制造了一条小水泥船，此后，人们就用钢筋来增强混凝土，以弥补混凝土抗拉强度及抗折强度低的缺陷。1887 年科伦（M. Konan）首先发表了钢筋混凝土的计算方法。1918 年艾布拉姆斯（D. A. Abrams）发表了著名的计算混凝土本身强度的水灰比理论。1928 年弗列什涅（E. Freyssinet）提出了混凝土收缩和徐变理论。之后，发现用张拉钢筋对混凝土预先施加压应力可以保证混凝土构件在荷重作用下既能抗拉又不致产生裂纹，在此过程中采用了高强度钢丝，并且发明了预应力锚具。预应力混凝土的出现，是混凝土技术的一次飞跃。由于预应力技术在大跨度建筑、高层建筑以及在抗震、防裂、抗内压等方面的卓越效果，从而大大地扩展了混凝土的应用范围。研究表明，强度等级为 C100 的预应力混凝土在质量上可与钢结构相近，因此，大部分钢结构工程即可用预应力混凝土代替。此外，预应力混凝土还广泛用于环形截面混凝土制品，如压力水管、电杆、管桩、管柱等；用预应力的方法来制作混凝土墙板、楼板及其他预制建筑构件已成为经常化的工作。

利用膨胀水泥生产收缩补偿混凝土和自应力混凝土是混凝土技术的另一成就，其本质是通过改变混凝土的收缩本性为膨胀本性，以克服混凝土收缩裂纹的产生，并应用膨胀性能来张拉钢筋，自应力混凝土管正是利用这一原理制作的。膨胀水泥还广泛用于工业与民用建筑、路面、防水防渗结构、管道接头、构件接缝和二次灌浆等方面。

利用聚合物高分子材料的强渗透性和粘接性，制成了聚合物水泥混凝土、聚合物浸渍混凝土以及聚合物胶结混凝土，使混凝土由单一的无机材料进入了无机和有机材料复合的新阶段。这种复合的结果，使得混凝土的强度大幅度提高，强度等级可达 C280，其抗渗性、抗冻性、耐腐蚀性均可大大提高。

纤维增强混凝土的出现，又把混凝土的抗裂性能提高了一大步。纤维增强材料已从单一的钢纤维发展到石棉纤维、耐碱玻璃纤维、有机合成纤维、植物纤维、金属纤维等。目前，纤维增强混凝土制品种类繁多，如玻璃纤维增强水泥制品（GRC）、石棉水泥制品、钢纤维增强水泥制品等，广泛用于道路、桥梁、涵洞、建筑物的内外墙板、屋面板及各种复合墙体材料。

为了降低混凝土的自重，加快墙体材料改革，出现了轻质混凝土制品及其构件。轻质混凝土主要指轻集料混凝土和多孔混凝土。近 30 年来，由于新的建筑结构体系的建立和高层建筑的发展，使得轻质混凝土应用越来越广泛。混凝土空心砌块、加气混凝土制品、泡沫混凝土制品、轻集料混凝土制品等，由于具有良好的保温隔热及隔声性能，表观密度小，自重

轻，取代传统墙体材料的比例逐年提高。

高性能混凝土近年来发展很快，特别是高强混凝土已在许多大型工程中得到应用。强度等级在 C50 以上的应用较广泛，C80~C120 的高强混凝土也有不少工程实例。

加强环境保护，变废为宝，利用工业废渣来生产混凝土一直是各国材料科学工作者矢志不渝的追求目标。

发展预拌混凝土和混凝土的商品化也是当今混凝土工业的发展方向。以原材料基地、原材料运送、配料、搅拌、输送、定量控制等形成的商品混凝土工厂，早在 20 世纪 40 年代就已问世。在城市与建设工程集中地区合理地分布设置商品混凝土工厂，其优点是节约材料、能耗及其他资源，保证混凝土质量，改善施工环境，有效利用外加剂和混凝土掺合料，便于现代化管理。目前，发达国家有近 90% 的水泥是制成商品混凝土出售，而不是以袋装水泥的形式提供给用户。发展商品混凝土也带动了散装水泥事业的发展。

混凝土外加剂的应用已有 70 余年的历史。1980 年 9 月在挪威首都奥斯陆举行的“混凝土制备和质量控制”国际会议上，讨论并通过了混凝土、水泥砂浆外加剂的定义。在混凝土、砂浆或净浆的制备过程中，掺入不超过水泥用量的 5%（特殊情况除外），能对混凝土、砂浆或净浆的正常性能按要求而改性的产品称为混凝土外加剂。据不完全统计，世界上目前至少有 400 种不同类型的外加剂，欧洲一些国家的市场上，经常保持着几十种甚至上百种外加剂在出售。

由于外加剂的出现和应用，使人们在力求改善混凝土性能的过程中获得了用其他方法难以达到的理想效果，这就使得外加剂身价倍增，成为混凝土工业的宠儿。外加剂也从早期对混凝土的单一改性发展到复合外加剂对混凝土的多重改性。从混凝土发展的高性能、快硬、高强、轻质、节能、改性等方面看，均离不开外加剂及有关的掺合料。

【创新漫谈 1-1】 谁发明了水泥

英国人说，最早发明水泥的是英国人。

的确，英国人阿斯普丁在 1824 年，曾经用粘土和石灰混合起来，放在高温炉内煅烧，从而制成了水泥。因为用这种水泥拌制的混凝土在硬化之后，在硬度、颜色和外观上都和当时英国波特兰岛生产的石材颇为相似，所以阿斯普丁以“波特兰水泥”为名，为他的发明申请了专利。阿斯普丁还利用波特兰水泥成功地建造了穿越伦敦泰晤士河河底的隧道。

俄国人则说，发明水泥的荣誉应该归于杰出的工程师契利耶夫。

18 世纪初，俄国工程师就在思考这样一个问题：为什么有些石灰在遇到水后，会剧烈发热，然后爆裂开来，最后成为浆状石灰乳；而有些石灰却能够在水中转变成石头似的硬块，他们百思不得其解。

19 世纪初，建筑工程师叶戈·契利耶夫在莫斯科工作时，发现用混有粘土的石灰石烧制的石灰在水中能够硬结。他受此启发，将粘土和石灰石按一定比例掺合后煅烧，然后再研磨成细粉末，从而发明了水泥制造法。

1825 年，契利耶夫出版了世界上第一本关于水泥的专著，书名很长，《适用于水下建筑工程，如运河、桥梁、贮水池、堤坝、隧道和砖木结构粉刷等的品质优良、价格低廉的泥灰土或水泥的制造方法指南》。在书中，他指出，把一份石灰和一份粘土加水拌合，制成砖块，晾干后用木柴在炉子里煅烧到白热，待其冷却后碾细过筛，即制成了价廉物美的水泥。契利耶夫还指出，在应用水泥时加入少量石膏粉，可以增加水泥的强度。

但水泥很有可能是中国人所首创。1985 年，在我国甘肃省秦安县大地湾村，发现了一

个新石器时代的文化遗址。在遗址一座保存完好的建筑物厅堂内，平整而又光洁，颜色呈青黑色的地坪引起了考古学家的关注，因为它好像是水泥地坪。考古学家凿开一角仔细观察，只见地坪中混有人造的轻质骨料，其余部分肉眼看来正是水泥。接着化学家对它做了分析，证明其中的主要成分是硅和铝的化合物，与现代水泥的主要成分相同。地坪的抗压强度约为10MPa。而附近农家并没有类似的地坪。因此，我们有理由设想 5000 年前我们的祖先已发明了水泥。

【创新漫谈 1-2】 金字塔使用的胶凝材料

古埃及人发现尼罗河流域盛产的石膏可以做成很好的黏结材料。他们发现，把开采出来的石膏碾碎磨细，再加上少量粘土一起煅烧，就会失去一部分结晶水成为熟料。熟料加水，调成糊状，过不了多久又会重新变硬，而且石膏糊黏性甚好。由此，埃及人发明了与水泥相似的石膏黏结剂，还用它创造了世界建筑史上的奇迹——金字塔。金字塔是古代埃及法老（国王）的陵墓，底面成正方形，侧面是倾斜向上的三角形，整体为棱锥体。由于其外形与汉文中的“金”字相仿，上尖下大，所以中国人将其称为金字塔。

到目前为止，埃及尚存的金字塔有近 80 座左右，其中规模最大的一座是位于开罗郊区、尼罗河西岸吉萨的胡夫大金字塔。它是由约 230 万块巨大的石块以石膏复合胶凝材料黏结而成的。

胡夫大金字塔大约建造于公元前 26 世纪，至今已有 4500 多年的历史。可见该石膏复合胶凝材料具有良好的耐久性。

【创新漫谈 1-3】 月球上的建筑材料

1969 年人类首次登上月球。人口增长、资源枯竭，月球很有可能成为若干年后人类地球以外的居住空间。人类如何在月球上建立自己的第二家园呢？

月球上可用来生产建筑材料的天然资源首推水泥及混凝土。对从月球带回的岩石进行成分分析，其中含丰富的氧化钙、氧化硅、氧化铝、氧化铁等，可直接煅烧生产与地球高铝水泥成分相近的胶凝材料。月球的岩石可加工成碎石、碎砂，若解决水的问题，则可大量生产月球混凝土。事情尽管令人鼓舞，但仍存在不少问题，月球表面处于真空状态，混凝土浇注、振实很可能需人为施压等。相信人类终将会在宇宙建起自己的第二家园。

学习建议及练习题

掌握胶凝材料、气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料的概念，初步了解水泥的分类原则及主要生产工艺过程。

1-1 以下水泥是否均为通用水泥？并请简要说明石膏属于何种胶凝材料。

普通硅酸盐水泥；矿渣硅酸盐水泥；复合硅酸盐水泥；G 级油井水泥。

1-2 从水泥、混凝土的发展可获得哪些有益的启示。

1-3 请解释胶凝材料、气硬性胶凝材料和水硬性胶凝材料。

第二章 硅酸盐水泥熟料的组成

硅酸盐水泥熟料，即国际上的波特兰水泥熟料，简称水泥熟料（Cement Clinker），是一种由主要含 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 的原料按适当配比，磨成细粉，烧至部分熔融，所以以硅酸钙为主要矿物成分的水硬性胶凝物质。

水泥的质量主要决定于熟料的质量。优质熟料应该具有适合的矿物组成和岩相结构。熟料的化学成分不仅决定了熟料的矿物组成，同时还与熟料的烧成工艺和资源的合理利用密切相关，直接影响优质、高产、低消耗等经济指标。因此，控制熟料的化学成分，是水泥生产的关键环节之一。

硅酸盐水泥熟料主要由氧化钙（ CaO ）、氧化硅（ SiO_2 ）、氧化铝（ Al_2O_3 ）、氧化铁（ Fe_2O_3 ）四种氧化物组成，通常在熟料中占 94% 左右。同时，含有约 5% 的少量其他氧化物，如氧化镁（ MgO ）、硫酐（ SO_3 ）、氧化钛（ TiO_2 ）、氧化磷（ P_2O_5 ）以及氧化钾和氧化钠（ K_2O 和 Na_2O ）等。

现代生产的硅酸盐水泥熟料，各主要氧化物含量的波动范围为： CaO 60%~67%； SiO_2 20%~24%； Al_2O_3 4%~9%； Fe_2O_3 2.5%~6.0%。

当然，在某些情况下，由于水泥品种、原料成分以及工艺过程的差异，各主要氧化物的含量，也可以不在上述范围内，例如白色硅酸盐水泥熟料中 Fe_2O_3 含量必须小于 0.5%，而氧化硅可高于 24%，甚至可达 27%。

第一节 熟料的矿物组成

在水泥熟料中，氧化钙、氧化硅、氧化铝和氧化铁不是以单独的氧化物存在，它们经高温煅烧后，以两种或两种以上的氧化物反应生成多种矿物，其结晶体细小，通常为 30~60 μm 。因此，水泥熟料是结晶体细小的多种矿物的集合体。

在硅酸盐水泥熟料中主要形成以下四种矿物：

① 硅酸三钙 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，可简写为 C_3S ；

② 硅酸二钙 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，可简写为 C_2S ；

③ 铝酸三钙 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ，可简写为 C_3A ；

④ 铁相固溶体 通常以铁铝酸四钙 $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ 作为其代表式，可简写为 C_4AF 。

另外，熟料中还含有少量的游离氧化钙（f- CaO ）、方镁石（结晶氧化镁）、含碱矿物以及玻璃体等。

通常，熟料中硅酸三钙和硅酸二钙的总含量占 75% 左右，合称为硅酸盐矿物；铝酸三钙和铁铝酸四钙的总含量占 22% 左右。在煅烧过程中，后两种矿物与氧化镁、碱等，在 1250~1280℃ 开始逐渐熔融成液相，以促进硅酸三钙的顺利形成，故称为熔剂矿物。

硅酸盐水泥熟料的岩相照片如图 2-1 所示。黑色多角

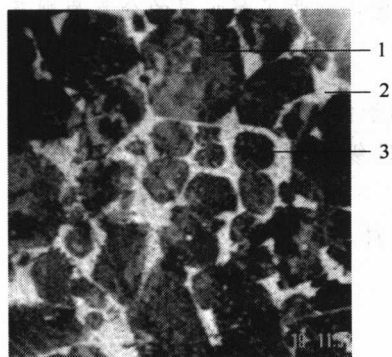


图 2-1 硅酸盐水泥熟料的岩相照片

1—A 矿；2—中间相；3—B 矿

形颗粒为 C_3S ；具有黑白双晶条纹的圆形颗粒为 C_2S 结晶体；在上述两种晶体间反射能力强的为白色中间相（浅色）铁相固溶体；反射能力弱的为黑色中间相（深色）铝酸三钙。此外，还存在游离氧化钙和方镁石。

一、硅酸三钙

主要由硅酸二钙和氧化钙反应生成，是硅酸盐水泥熟料的主要矿物，其含量通常为 50% 左右，有时甚至高达 60% 以上。纯 C_3S 只在 1250~2065℃ 温度范围内稳定存在，在 2065℃ 以上熔融为 CaO 与液相，在 1250℃ 以下分解为 C_2S 和 CaO 。实际上 C_3S 的分解反应进行得比较缓慢，致使纯 C_3S 在室温下以介稳状态存在。

随着温度的降低， C_3S 在不同温度下的转变如下。



由此可知， C_3S 有分属于 3 个晶系的 7 种变型：即斜方晶系的 R 型；单斜晶系的 M_{I} 、 M_{II} 、 M_{III} 型和三斜晶系的 T_{I} 、 T_{II} 、 T_{III} 型。

在硅酸盐水泥熟料中，硅酸三钙并不以纯的形式存在，总含有少量的其他氧化物，如氧化镁、氧化铝等形成固溶体，称为阿利特（Alite）或 A 矿。而 A 矿晶系为三方晶系、单斜晶系和三斜晶系。阿利特的组成，由于其他氧化物的含量及其在硅酸三钙中固溶程度的不同而变化较大，不同研究者所得结果有所差异。有些研究者认为是 $54CaO \cdot 16SiO_2 \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ （简写为 $C_{54}S_{16}MA$ ）；有些研究者认为是 $C_{105}S_{35}M_2A$ 或 $C_{154}S_{52}M_2$ 等。电子探针分析表明，在阿利特中除含有氧化镁和氧化铝外，还含有少量的氧化铁、碱、氧化钛和氧化磷等，但其成分仍然接近于纯硅酸三钙。几种阿利特的组成范围为： CaO 70.90%~73.10%； SiO_2 24.90%~25.30%； Al_2O_3 0.70%~2.47%； MgO 0.3%~0.98%； TiO_2 0.2%~0.4%； Fe_2O_3 0.4%~1.6%； K_2O 0.20% 左右； Na_2O 0.1% 左右； P_2O_5 0.1% 左右。

纯 C_3S 在常温下通常只能保留三斜晶系（T 型），若含有少量 MgO 、 Al_2O_3 、 SO_3 、 ZnO 、 Fe_2O_3 、 R_2O 等稳定剂形成固溶体，便可保留 M 型或 R 型。由于熟料中的硅酸三钙总含有 MgO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 ZnO 、 R_2O 等氧化物，故阿利特通常为 M 型或 R 型。

C_3S 的晶型如图 2-2 所示，其晶体断面为六角形和棱柱形。单斜晶体的阿利特单晶为假六方片状或板状。阿利特在偏光显微镜下观察为透明无色的二轴晶，具有负光性，折射率为： $N_g = 1.722 \pm 0.002$ ， $N_p = 1.717 \pm 0.002$ ；双折射率 $N_g - N_p = 0.005$ ；光轴角较小， $2V = 0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。在正交偏光镜下，呈现灰色或深灰干涉色；在反光镜下，阿利特更为清晰，呈现六角形、棱柱形。

阿利特有时呈现环带结构，这也是它形成固溶体的特征。不同带的部位，其组成亦不同。在阿利特中还常有硅酸二钙和氧化钙的包裹体存在。

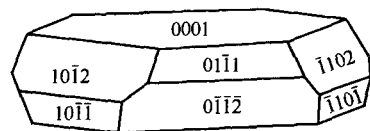


图 2-2 C_3S 的晶型

纯硅酸三钙呈洁白色，当熟料中含有少量氧化铬（ Cr_2O_3 ）时，阿利特呈绿色；含有氧化钴时，随钴的价数不同，可呈浅蓝色或玫瑰红色；含有氧化锰时，阿利特还会带有其他色泽。阿利特的密度为 $3.14 \sim 3.25 \text{ g/cm}^3$ 。

硅酸三钙加水调和后，凝结时间正常。其水化较快，粒径为 $40 \sim 45 \mu\text{m}$ 的硅酸三钙颗粒加水后 28d，强度可达到其 1 年强度的 70%~80%。就 28d 或 1 年的强度来说，在 4 种熟料矿物中硅酸三钙最高。

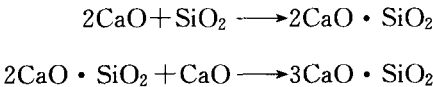
C_3S 含有少量其他氧化物形成固溶体阿利特，将影响它的水化反应能力和晶型。如加

0.3%~0.5%的 BaO 或 P₂O₅，将增加水泥的强度，而同样数量的 SrO 却没有什么作用；还发现含 4% C₃A 的阿利特与水的反应比纯 C₃S 快得多，阿利特含 1% Al₂O₃ 以及等量的氧化镁比纯 C₃S 早期强度高得多。其他元素成固溶体存在时，也会改变 C₃S 的晶型。由于固溶体在晶格中产生的变位、应变和扭曲，一般会增加其水化反应能力。

此外，阿利特晶体尺寸和发育程度会影响其反应能力。当烧成温度较高时，阿利特晶型完整，晶体尺寸适中，几何轴比大（晶体长度与宽度之比 $L/B \geq 2 \sim 3$ ），矿物分布均匀，界面清晰，熟料的强度较高。当添加矿化剂或用急剧升温等新的煅烧方法低温烧成时，虽然很多阿利特晶体比较细小，但发育完整、分布均匀，熟料强度也很高。

综上所述，适当提高熟料中硅酸三钙的含量，且其岩相结构良好时，可以获得高质量的熟料。但硅酸三钙水化热较高、抗水性较差，如要求水泥的水化热低、抗水性较好时，则熟料中硅酸三钙的含量要适当低一些。

熟料形成时，硅酸三钙是 4 种矿物中最后生成的。通常在高温下，氧化钙和氧化硅首先反应生成硅酸二钙，然后，氧化钙和硅酸二钙反应生成硅酸三钙，其反应式如下。



如无液相存在，在 CaO-SiO₂ 二元系统中，以固相反应合成硅酸三钙单矿物，1450℃ 下保温 1h，仅有少量 C₃S 晶体生成，但若有足够的液相存在，可使 C₂S 在液相中吸收 CaO，从而较迅速地形成，C₃S。此外，当要求熟料中硅酸三钙含量过高时，会给煅烧带来困难，往往使熟料中游离氧化钙增多，反而降低水泥强度，甚至影响水泥的安定性。

二、硅酸二钙

硅酸二钙由氧化钙与氧化硅反应生成，在熟料中的含量一般为 20% 左右，是硅酸盐水泥熟料的主要矿物之一。纯硅酸二钙在 1450℃ 以下，会进行多晶转变。各种硅酸二钙变型的晶系和密度见表 2-1。

表 2-1 各种硅酸二钙变型的晶系和密度

变 型	α	α'	β	γ
晶系	三方或六方	斜方	单斜	斜方
密度/g·cm ⁻³	3.04	3.40	3.28	2.97

在室温下，有水硬性的 α 、 α'_H 、 α'_L 、 β 型纯硅酸二钙的几种变型都是不稳定的，有转变为水硬性微弱的 γ 型的趋势。由于在硅酸盐水泥熟料中含有少量的氧化铝、氧化铁、氧化镁、氧化钾、氧化钛和氧化磷等，使硅酸二钙形成固溶体。根据硅酸二钙固溶体中固溶氧化物的种类与数量以及冷却开始时的温度与速率，可以保留不同的高温变型。 α' 型强度较 β 型为高； α 型的强度试验结果不一致，有些高于 β 型，有些低于 β 型，有些甚至在常温下只有微弱的胶凝性。 α 型由于生成温度较高，且主要稳定剂氧化钠大多与铝酸三钙形成固溶体，稳定 α' 型的氧化钾等含量也不多，且 α' 、 β 型结构比较相似，它们之间的转变较易，因而在熟料中 α 与 α' 型硅酸二钙较少存在。而 β 和 γ 型的转变，结构变化较大，虽然 β 型硅酸二钙也是不稳定的，但在烧成温度较高、冷却较快，且固溶有少量氧化物的硅酸盐水泥熟料中，通常保留 β 型。此硅酸二钙称为贝利特（Belit），简称 B 矿。

少量氧化物对硅酸二钙多晶形态的稳定作用见表 2-2。