

中等专业学校教材

水利工程施工

黄河水利学校主编

水利出版社

内 容 提 要

本书为水利类中等专业学校通用教材,适用于水利工程建筑和农田水利两专业,亦可供水利技术人员参考。

全书共分四篇。第一篇内容为水工建筑材料的性质、使用条件和材料试验方法;第二篇主要工种的施工机械、施工方法;第三篇主要建筑物的施工特点、施工方案;第四篇施工组织与概(预)算等。

中等专业学校教材

水 利 工 程 施 工

黄河水利学校主编

*

水利出版社出版发行

(北京潘各庄外六铺炕)

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 28 印张 639千字

1980年2月第一版 1980年2月北京第一次印刷

印数 00001—25140 册 每册 2.80 元

书号 15047·4003

前 言

本书是根据水利电力部制订的“1978~1981年中专水利电力类专业教材编审规划”组织编写的。

本书包括水工建筑材料、工种施工、水工建筑物施工、施工组织与概算等四篇，共二十四章。编审中，注意了联系当前水利施工的实际水平，适当反映国内外的先进施工技术，教材体系力求完整，着重阐明基本概念与基本方法，以机械化施工为主，兼顾大、中、小型工程以及山区和平原、南方和北方的施工特点，并适当照顾农田水利专业的要求。建筑材料部分采用了国内现行规范。本书内容较多，各校采用时可根据具体情况，酌情取舍。

本书由黄河水利学校主编，参加编写的有成都水力发电学校、吉林水利电力学校和四川省水利电力学校。参加编写工作的同志有：曾本麓（绪论、第十三、十六、十九章）、王应鼎（第一至第六章）、乔有谟（第七、十七章）、戴显德（第八、十五章）、王建国（第九章）、阎宗文（第十至第十二章）、涂林海（第十四章）、沈敦新（第十八、二十章）、李润生（第二十一至第二十四章）。由李润生、曾本麓同志主编。

本书由成都水力发电学校主审。参加审稿工作的有：水电部第七工程局乔瀛洲、成都水电勘测设计院李鹏程、四川省水电工程局李国兴、四川省水利水电设计院尹常泽、成都科技大学熊达成、王民寿、陕西省水利学校张四维等同志。

扬州水利学校徐永年、涂世荣、黄河水利学校陆德民、丘振域等同志也对本书的编写内容提出了宝贵意见，在此一并致谢。

希望广大师生及读者对本书存在的缺点和错误提出宝贵意见，以便改正。

编 者

1979年5月

目 录

前 言	
绪 论	1

第一篇 水 工 建 筑 材 料

第一章 无机胶凝材料	3
第一节 气硬性石灰	3
第二节 硅酸盐水泥及普通硅酸盐水泥	5
第三节 掺混合材料的水泥	13
第四节 其它品种水泥	17
第二章 水工混凝土与水工砂浆	20
第一节 水工混凝土的主要性能和要求	21
第二节 水工混凝土的组成材料	31
第三节 水工混凝土配合比的选择	41
第四节 混凝土保证强度的选择和质量评定	50
第五节 其它混凝土	56
第六节 水工砂浆	57
第三章 沥青材料及其防水制品	60
第一节 沥青材料	61
第二节 沥青防水制品	65
第四章 木材	70
第一节 木材的构造	70
第二节 木材的主要性能	71
第三节 木材的缺陷	74
第四节 木材的合理使用	74
第五章 钢铁材料	76
第一节 钢铁的分类和技术条件	76
第二节 铁碳合金的结晶构造、热处理	82
第六章 合成树脂与塑料	84
第一节 概述	84
第二节 合成树脂与塑料的一般性质	85
第三节 水工用合成树脂与塑料	86
附：混凝土试验部分	95
I 水泥试验	95
一、水泥比重的测定	
二、水泥细度的测定	
三、水泥标准稠度用水量的测定	
四、水泥凝结时间的测定	

测定	五、水泥安定性试验	六、水泥胶砂强度的测定	
Ⅱ	细骨料试验		108
一、	砂的颗粒细度和级配的测定	二、砂粒面干饱和比重和吸水率的测定	三、砂粒表面含水率的测定
四、	砂子容重的测定		
Ⅲ	粗骨料试验		115
一、	石子的粘土、淤泥、细屑含量的测定	二、石子比重和吸水率的测定	三、石子容重的测定
	石子颗粒表面含水率的测定	五、石子的颗粒级配(人工级配)试验	
Ⅳ	混凝土拌合物质量检验		118
一、	试验室检验用混凝土的拌合	二、坍落度检验	三、工作度检验
	重的测定	六、混凝土含气量的推算	
Ⅴ	混凝土物理力学性能测定		124
一、	强度测定	二、抗渗性测定	三、抗冻性测定

第二篇 工 种 施 工

第七章	土工	131
第一节	土壤分类与特性	131
第二节	土方机械的分类与生产率	132
第三节	土方开挖	133
第四节	土方运输	144
第五节	土方压实	150
第六节	土方工程的冬季施工与雨季施工	156
第八章	砖石工	158
第一节	砖石材料与砌筑的基本原则	158
第二节	块(片)石的干砌与浆砌	159
第三节	条石的浆砌与干砌	162
第四节	拱架放样、安装与拆除	162
第五节	拱圈砌筑与变位观测	167
第九章	爆破工	171
第一节	爆破材料	172
第二节	爆破的基本理论	176
第三节	爆破的基本方法	180
第四节	钻眼爆破	186
第五节	控制爆破	194
第六节	爆破工程的安全技术	198
第十章	模板工	202
第一节	模板的型式与构造	202
第二节	模板的侧压力	205
第三节	模板的固定	207
第四节	木模板的制作及木工厂	208
第五节	模板的安装	209

第六节	模板的拆除	210
第十一章	钢筋工	211
第一节	钢筋的加工	211
第二节	钢筋加工厂	216
第三节	钢筋安设	217
第十二章	混凝土工	218
第一节	骨料制备	218
第二节	混凝土制备	221
第三节	混凝土运输	226
第四节	混凝土的浇筑和养护	235
第五节	装配式及预应力混凝土构件	242
第六节	混凝土的冬季与夏季施工	244
第十三章	灌浆工	247
第一节	灌浆材料	247
第二节	灌浆机械设备与布置	248
第三节	灌浆前的准备工作	251
第四节	灌浆施工	253

第三篇 水工建筑物施工

第十四章	施工导流与截流	258
第一节	施工导流的意义与任务	258
第二节	施工导流方法	258
第三节	围堰	265
第四节	导流标准选择和导流时段划分	269
第五节	施工导流的水力计算	271
第六节	截流	275
第十五章	基坑施工	280
第一节	基坑排水	280
第二节	基坑开挖	289
第三节	打桩工程	292
第四节	混凝土防渗墙施工	297
第十六章	土坝施工	306
第一节	碾压土坝	306
第二节	水坠坝	318
第三节	堆石坝	322
第十七章	水工隧洞施工	324
第一节	隧洞施工过程与施工特点	324
第二节	隧洞开挖	324
第三节	隧洞衬砌与灌浆	340
第四节	隧洞快速施工措施与方法	345

第十八章 混凝土坝施工	353
第一节 混凝土坝的施工特点	353
第二节 砂石骨料及混凝土生产系统	354
第三节 混凝土坝的温度控制与分层分块	361
第四节 混凝土运输方案的选择	368
第五节 坝体接缝灌浆	371
第十九章 水闸施工	373
第一节 筑块划分与浇筑程序	373
第二节 底板与闸墩施工	376
第三节 闸室上层结构的施工	380
第四节 闸门与启闭机的安装	381
第二十章 水电站厂房施工	390
第一节 水电站厂房的施工特点及混凝土分期	390
第二节 厂房混凝土施工	391
第三节 机电安装常识及厂房土建与安装的交叉作业	402

第四篇 施工组织与概算

第二十一章 施工组织设计	404
第一节 水利工程基本建设程序	404
第二节 施工组织设计的作用和内容	405
第三节 施工条件资料	406
第四节 施工组织设计的编制原则	407
第二十二章 施工进度计划	407
第一节 施工进度计划的作用和类型	407
第二节 施工进度计划的编制原则	408
第三节 施工进度计划的编制	409
第二十三章 施工总体布置	413
第一节 施工总体布置的任务、种类和设计原则	413
第二节 大型临时设施及辅助企业	414
第三节 施工总体布置的设计步骤和方法	424
第二十四章 工程概(预)算	426
第一节 工程概(预)算的作用和编制原则	426
第二节 定额	426
第三节 工程概(预)算的项目划分	428
第四节 各项基础资料的确定	428
第五节 工程概(预)算文件的组成	430
第六节 工程概(预)算的编制	430
附录 水利水电基本建设工程的项目划分	435

绪 论

一、我国水利水电工程施工技术的发展与成就

我们伟大的祖国，历史悠久，幅员辽阔，河川众多，水利资源丰富。广大劳动人民在长期与自然作斗争中，特别在对河流的除害兴利方面，积累了丰富的实践经验。几千年来，修筑了蜿蜒数千里的黄河大堤，兴建了灌溉川西平原的都江堰工程，开凿了贯穿南北的长达1700余公里的大运河，以及其它许许多多施工技术复杂的水利工程。在抗御洪水的斗争中，使用了捆厢埽进占、柳枕护底、平堵与立堵相结合等堵口方法，创造了草土围堰和杩槎围堰等的施工经验。这些伟大的水利工程和施工技术，在防洪、灌溉、航运诸方面，发挥了巨大的作用，有力地促进了工农业生产的发展。这也充分说明了我国劳动人民的勤劳智慧及其在水利建设方面的卓越成就。但由于过去历代反动统治阶级残酷剥削劳动人民，漠不关心人民生活，轻视科学技术，因而水利事业的发展受到严重阻碍。

解放后，党中央、毛主席领导全党和全国人民进行了伟大的社会主义革命和建设事业，在对水利水电建设方面，先后发出了“一定要把淮河修好”、“要把黄河的事情办好”、“一定要根治海河”等一系列战斗号召，激励着广大人民群众，奋战江河湖海，水利水电建设事业得到迅速发展。在声势浩大的水利建设高潮中，随着社会主义革命和建设事业的发展，全国人民越来越深刻地认识到“水利是农业的命脉”，电力是工业的先行的重要意义。全国各地修建大批各种类型的闸、坝、电站、大中小型水库和灌溉系统，广泛地开展了群众性的技术革新和技术革命运动，水利施工技术水平有了很大的提高。在施工机械方面，逐步采用了大型施工机械和综合机械化施工，在筑坝技术方面，创造了水坠坝，发展了定向爆破筑坝，掌握了高速优质的修建当地材料坝的施工技术，在地基处理方面，采用深层爆破加密砂基与混凝土防渗墙等许多新技术；在水工建筑材料方面，无论是材料的品种、质量、产量及生产工艺等都有了较大的发展。近年来，我国对混凝土的浇筑能力也有显著提高。但总的说来，我国施工机械化程度仍比较低，还不能适应新时期大规模经济建设的需要。

在以华国锋同志为首的党中央领导下，我国社会主义革命和社会主义建设已进入新的发展时期，全国工农业生产出现了新的跃进局面。党的第十一次代表大会和全国五届人大，确定了我国社会主义建设的宏伟目标，即在本世纪内把我国建设成为农业、工业、国防和科学技术现代化的社会主义强国。我们一定要为完成历史赋予我们的这个光荣任务而努力奋斗。

实现四个现代化与我国水利水电建设事业的发展密切相关，我们相信，我国的水利水电工程施工技术，必将在机械化、自动化、新材料、新工艺等方面获得迅速发展，不断攀登新的高峰。

二、水利水电工程施工的特点

水利水电工程的施工，由于必须考虑河流的各种影响，因而增加了施工的复杂性，主要有以下几个特点：

1. 工程量大，施工期限受洪水和气候的影响，需采取措施，保证常年施工。
2. 需要导流与排水，或者进行水下施工。
3. 施工技术复杂。如建筑物本身或地基应采取防渗措施，建筑物表面有些应具有耐磨性与抗冻性，金属和木材应采取防腐蚀措施等。
4. 受工程位置及地形条件限制，运输任务大，组织施工比较困难。水利水电枢纽工程因在河谷中修建，距离城市较远，场外运输任务很大；同时还要在工地建立较多的辅助企业，以满足施工需要；此外，由于施工场地狭窄，干扰性大，工地布置也比较复杂。

三、课程的任务

本课程是水利工程建筑专业的一门专业课，它的任务是介绍主要建筑材料的性质、使用条件和材料试验方法，系统地阐述水利水电工程建筑中各主要工种的施工与主要建筑物的施工，以及施工组织等内容。施工机械部分分别在各章中结合各种机械的使用适当介绍其基本构造、工作原理和主要性能。通过以上内容的学习，树立政策观点和群众观点，懂得施工机械与施工方法的选择，以及经济合理地组织施工的原则和步骤，掌握施工标准的控制要领，通过实践能够按照保证质量、降低造价、安全生产、提高工效、缩短工期的要求进行水利水电工程的施工。

本课程实践性较强，并且施工技术及施工机械设备和科学研究等都在不断革新和发展，因此在教学过程中，必须密切联系生产实际，把理论教学与现场参观、生产劳动以及科学实验紧密结合起来，才能获得先进的和实际的施工知识与技能。

第一篇 水工建筑材料

第一章 无机胶凝材料

胶凝材料是指由液态或泥膏状态经过物理化学变化后，能将散粒的或块状的材料胶结成为一个整体的物质。

胶凝材料可分为无机胶凝材料（亦称矿物质胶凝材料，如石灰、石膏、水玻璃和水泥等）和有机胶凝材料（如沥青与合成树脂等）两大类。

无机胶凝材料，按照硬化条件可分为两类：

气硬性胶凝材料——只能在空气中硬化，并保持或继续增长其强度。如：气硬性石灰、石膏和水玻璃等。

水硬性胶凝材料——不仅能在空气中硬化，而且能在水中更好的硬化，并保持或继续增长其强度。各种水泥均属此类材料。

气硬性胶凝材料，一般只适用于地上干燥环境的建筑物中，不适用于过分潮湿之处，更不能用于水中。水硬性胶凝材料，可用于干燥、潮湿、地上、地下和水中。因此水硬性胶凝材料在建筑工程中应用最为广泛。有机胶凝材料因有某些特殊性质，如：防水性、高强度、耐磨性和抗侵蚀性等，故能适应工程中一些特殊要求。本篇将重点阐述水泥及其配制的混凝土和砂浆，对有机胶凝材料、木材、建筑用钢、合成树脂及塑料亦作适当介绍。

第一节 气硬性石灰

石灰分气硬性石灰和水硬性石灰两种。气硬性石灰应用广泛，即通常所说的石灰。水硬性石灰，目前国内应用很少，故不作介绍。

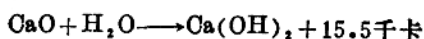
气硬性石灰（以下简称石灰），是以石灰岩、白垩及白云质石灰岩等含有大量碳酸钙而粘土杂质含量不大于8%的天然岩石，经煅烧而得的以氧化钙为主要成分的块状产品，通称为生石灰。煅烧良好的生石灰比重约为3.2克/立方厘米，容重为800~1000公斤/立方米。

一、石灰的熟化和硬化

在工地上，常将生石灰加水熟化成为熟石灰，应用在建筑物上，经过硬化达到胶结的目的。

（一）石灰的熟化

石灰熟化是一个放热反应：



石灰熟化成为熟石灰粉的理论用水量，仅为CaO重量的32.13%。但为防止温度过高，

水分蒸发,引起 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 部分脱水,使 CaO 颗粒表面形成薄膜阻碍熟化起见,实际用水量为70%或更多一些。

石灰熟化时,由于放热很多,部分水化为蒸汽,使 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 成为粉末。熟石灰粉的体积约增大1.5~3.5倍。比重约为2.1克/立方厘米,松散容重为400~450公斤/立方米。

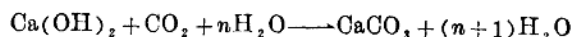
当加水为 CaO 重量的2.5~3倍时,熟化所得的是石灰膏。石灰膏的颗粒较石灰粉小,产浆量(每公斤生石灰按规定方法熟化成为石灰浆的体积)和塑性也较大。所以建筑工地上多将生石灰熟化成为石灰膏,并应存放二星期以上,使未曾熟化的充分熟化。

(二) 石灰的硬化

石灰膏的硬化是以下两个变化交错进行的过程:

1. 石灰膏中水分蒸发或被砌体吸收时, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 从饱和溶液中析出胶体,以后部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成晶体与逐渐失水的胶体结合成为较坚硬的固体。

2. 表面的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气接触,吸受空气中的 CO_2 , 生成 CaCO_3 结晶,并析出水分。反应式如下:



由于空气中的 CO_2 较稀薄,又由于面层生成的 CaCO_3 薄层阻碍 CO_2 深入内部和水分的向外蒸发,因此石灰的硬化非常缓慢。

石灰硬化必须在空气中进行, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 又溶于水。因此石灰不能用于与水接触或潮湿环境下的建筑物中。

二、石灰的质量要求

(一) 外观

1. 块灰含量越多越好,因为粉灰是在空气中吸收水分和 CO_2 的结果,胶结能力将会降低;

2. 煤碴与石块等杂质含量越少越好;

3. 过火和欠火石灰含量越少越好:过火石灰呈暗黑色,是煅烧温度过高时,部分 CaO 与粘土中的 SiO_2 及 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 等化合生成较密实的硅酸钙、铝酸钙和铁酸钙等矿物的结果,这些矿物既能阻碍石灰熟化,用于建筑物上以后,熟化缓慢,且体积膨胀后,常引起已经硬化的石灰发生裂缝或局部脱落现象。欠火石灰不能熟化且容重过大。

(二) 物理化学性质检验

1. CaO 和 MgO 含量越多越好;

2. 熟化速度和产浆量越大越好;

3. 未熟化颗粒含量越少越好。

三、石灰的应用和贮运注意事项

(一) 石灰的应用

石灰与砂子或和麻刀、纸筋等混合调制成砂浆,作砌筑砖石或抹面之用。石灰与砂子及粘土混合制成三合土;若再加碎砖或碎石制成四合土,用作小型水利工程或一般建筑物的基础。石灰与矿渣、煤碴或煤干石等混合,经过蒸压处理或蒸养处理做成硅酸盐制品,常在房屋建筑中应用。石灰也可作为无熟料水泥的原料。

(二) 貯运石灰注意事项

1. 防潮防水，以防石灰自然的熟化和硬化甚至酿成火灾。
2. 如需长期保存，应熟化成为石灰膏，用砂、土覆盖，以防变质。

第二节 硅酸盐水泥及普通硅酸盐水泥

水泥是水硬性胶凝材料，在现代工程中应用极广，常用来拌制混凝土及砂浆，也常用作灌浆材料。

目前我国生产的水泥有70种以上，其中常用的有硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥与粉煤灰硅酸盐水泥。在每一品种的水泥中，又根据其胶结强度的大小，分为若干标号。当水泥品种及标号不同时，其性能也有不同，因此在选用时应根据工程需要及水泥性能特点合理确定。

本节主要讲述硅酸盐水泥及普通硅酸盐水泥的成分及其主要性能。根据国家标准，GB175-77，硅酸盐水泥的定义是：凡以适当成分的生料，烧至部分熔融，所得以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料，加入适量的石膏，磨细制成的水硬性胶凝材料，称为硅酸盐水泥。

根据国家标准GB175-77，普通硅酸盐水泥的定义是：凡由硅酸盐水泥熟料、少量混合材料、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料，称为普通硅酸盐水泥（简称普通水泥）。水泥中混合材料掺加量（按重量百分比计）规定如下：掺活性材料时，不得超过15%；掺非活性混合材料时，不得超过10%。

普通硅酸盐水泥的成分中，绝大部分仍是硅酸盐水泥熟料，故其性质与硅酸盐水泥相近。但由于普通硅酸盐水泥中掺加了少量混合材料，故其某些性能与硅酸盐水泥比较起来，又稍有差异。同标号水泥相比，普通水泥的早期硬化速度稍慢，其3天、7天的抗压强度较硅酸盐水泥稍低。

硅酸盐水泥是硅酸盐类水泥的一个基本品种，其它许多品种的硅酸盐类水泥，都是在此基础上或者加入一定量的混合材料，或者适当改变水泥熟料的矿物成分而成的。

一、水泥熟料的矿物其特性及其对水泥性能影响

水泥熟料的矿物成分对水泥的特性影响很大。表1-1为四种主要矿物的主要特性及其在熟料中的大致含量。

由表1-1可知，各种矿物的性质各不相同。它们在水泥熟料中的不同含量，决定了水泥的不同性质，也就形成了不同品种的水泥。例如，快硬硅酸盐水泥的 C_3S 及 C_4A 含量就较普通水泥为高；而低热的大坝水泥和抗硫酸盐侵蚀能力很强的抗硫酸盐水泥的 C_3S 及 C_4A 就较低。

二、水泥熟料的煅烧温度、粉磨对水泥质量的影响

(一) 水泥熟料的煅烧温度与水泥质量的关系

由含碳酸钙和粘土为原料按适当比例均匀配合而成的生料，经过煅烧，在1000~1300℃时，生成 C_2S 、 C_3A 及 C_4AF 和剩余的一部分 CaO ，在1300~1450℃时，部分 C_2S

表 1-1

普通水泥熟料的矿物特性

性 质			与水作用的	放热速度	强度增长	体积收缩	抗蚀能力
名 称	代 号	含 量 %	速 度	及放热量	速 度		
铝 酸 三 钙	C ₃ A	7~15	最 大	最 大	最大, 但强度不高	最 大	较 小
铁铝酸四钙	C ₄ AF	10~18	小于C ₃ A	小于C ₃ S	早期慢, 后期快	小于C ₃ A	较 大
硅 酸 三 钙	C ₃ S	37~60	小于C ₄ AF	小于C ₃ A	小于C ₃ A, 但强度最大	小于C ₄ AF	较 小
硅 酸 二 钙	C ₂ S	15~37	最 小	最 小	早期慢, 后期快	最 小	较 大

吸收CaO生成C₃S。这个温度必须保持足够的时间, 才能使C₃S反应完全(残余的CaO很少), 使水泥有足够的强度, 不致在水泥凝结硬化时出现裂缝。

有些厂生产的水泥强度不稳定或凝结硬化时体积变化不均匀甚至产生裂缝, 主要是由于煅烧温度不均匀, 不够高, 生成C₃S较少, 剩余CaO较多所引起的。

(二) 水泥粉磨与其质量的关系

水泥熟料为坚硬的块状, 为了减少或消除残余CaO对水泥体积变化不均匀的影响和易于粉磨, 烧成的熟料, 须贮存1~3星期, 使CaO吸收空气中的水分进行熟化。

在磨细熟料时, 为了消除水泥的急凝现象, 应加入天然石膏CaSO₄·2H₂O和混合材料一起磨细。磨细后的水泥仍须存放较短时间, 使残余CaO进一步熟化。

水泥粉磨越细, 水泥凝结硬化越迅速, 早期强度也越高, 同时也可使残余CaO较易熟化, 减少其不利因素。但粉末特细的水泥, 消耗粉磨能量大、成本高, 而且在空气中硬化时, 有较大的收缩。

三、硅酸盐水泥及普通水泥的凝结硬化

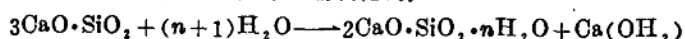
水泥加水拌合后, 最初是塑性的浆体, 然后逐渐变稠, 失去塑性, 这一过程称为凝结。失去塑性后, 强度逐渐增长, 变成坚固的石状物体——水泥石, 这一过程称为硬化。

水泥的凝结硬化是一系列同时交错进行的物理化学变化过程。

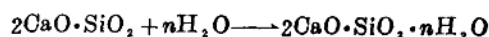
(一) 化学变化

水泥的各种矿物遇水后的化学反应:

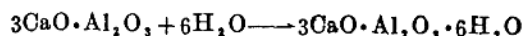
1. C₃S与水作用, 生成水化硅酸钙及氢氧化钙:



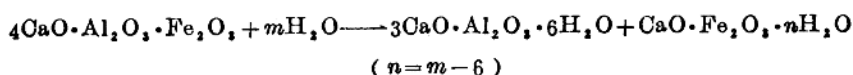
2. C₂S与水作用, 生成水化硅酸钙:



3. C₃A与水作用, 生成水化铝酸钙:



4. C₄AF与水作用, 生成水化铝酸钙和水化铁酸钙:



普通水泥的主要矿物与水作用后，生成新的化合物为：水化硅酸钙、氢氧化钙、水化铝酸钙和水化铁酸钙。

水泥石表层中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吸收空气中的 CO_2 （碳化），生成碳酸钙结晶和水。

(二) 物理变化

水泥加水拌合后，水泥颗粒表面与水接触，反应生成物立即溶于水中，暴露新的水泥颗粒表面，继续反应、溶解。此种作用继续下去，使水泥颗粒周围很快成为水化生成物的饱和溶液。由于水化生成物的溶解度很小，且拌合用水量也很少，这时，水泥颗粒表面只有很少一部分与水作用。

溶液达到饱和后，水泥继续与水反应的生成物就不能再溶解，水泥颗粒将生成分散的微小胶体颗粒。这是因为熟料矿物与水有强烈的吸附力，水能够从水泥颗粒表面的微细裂缝渗入裂缝的深处，产生尖劈作用，使裂缝扩大，水泥颗粒被分裂；水又能渗入矿物晶体内部与矿物反应，水化生成物体积膨胀，使晶体沿最薄弱处破裂。由于这两种作用的发展，水泥浆内胶体颗粒不断增加，游离水分不断减少，胶体颗粒得以相互连接形成逐渐变浓的凝胶体。水泥浆随之逐渐失去塑性，产生凝结现象。

水泥浆凝结后，由于水化作用的继续，水分仍在不断的减少，凝胶体中的氢氧化钙和水化铝酸钙即逐渐转变为结晶体而贯穿于凝胶体中，形成具有一定强度的水泥石。水化硅酸钙和水化铁酸钙虽然较长期地保持胶体状态，但是随着水分的不断减少，胶体逐渐紧密，对水泥石的强度增长也有重要作用。随着水化作用的继续进行，结晶体的逐渐增多，胶体的逐渐密实，水泥石的强度和胶结能力越来越高。这个凝结硬化过程如图 1-1 所示：

水泥的水化反应是由水泥颗粒表面逐渐深入到内部的。由于生成的胶粒在水泥颗粒周围形成胶体薄膜包围了水泥颗粒，水分透过胶膜与新暴露的颗粒表面继续作用，将越来越困难。水化作用也越来越慢。实际上，较粗的水泥颗粒，其内部将长期不能水化。因此硬

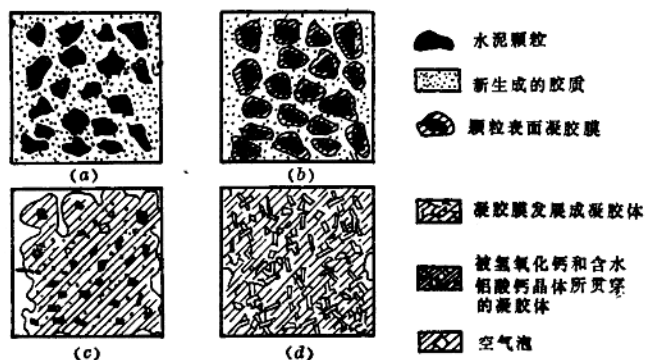


图 1-1 水泥凝结硬化图解

(a) 水泥颗粒遇水后析出新生胶质溶于水中；(b) 水泥颗粒表面产生凝胶膜；(c) 凝胶膜发展成凝胶体，并产生结晶；(d) 凝胶体被氢氧化钙及含水铝酸钙等晶体所贯穿

化后的水泥石是由结晶体、胶体、未完全水化的颗粒、游离水分和气孔等组成的不均质结构体。

由上述原理可知：

1. 水泥石的强度和其它性质的增长，是随着硬化时间（称为龄期）的增加而增长的。一般在28天以内较快，以后渐慢，三个月以后则更为缓慢。因此要获得较大的水泥石强度，就要保证潮湿的环境。所以混凝土工程在浇筑2~3周内，必须洒水养护。

2. 水泥石的凝结硬化，受温度的影响很大。温度较高，凝结硬化就较快；温度较低，凝结硬化就较慢。所以冬季混凝土施工时，要采取保温措施。

3. 水泥水化是由水泥颗粒表面逐渐深入进行的，水泥颗粒越粗，颗粒总表面积就越小，水化就越缓慢，强度增长速度也缓慢。因此快硬高强度的硅酸盐水泥，颗粒均较细。但是颗粒越细的水泥，在贮运过程中，越容易吸收空气中的水分和二氧化碳，以致在使用水泥时，凝结硬化减慢，强度降低。所以水泥贮运过程中，要注意防潮防水，不能贮存过久。

4. 水泥中的 C_3A 和 C_3S 含量大的，凝结硬化较快，强度增长也较快。因此高强度硅酸盐水泥含 C_3S 较多。

5. 水泥中加水较多，将增大水泥颗粒间距，使胶体变稀，凝结硬化减慢，同时由于游离水分增多，增加了水泥石的孔隙，使水泥石的强度和其它性能也将减低。因此混凝土施工时，必须严格控制用水量。

6. 水泥浆中掺入一些外加剂，能够改变水泥的胶体结构，使水泥的凝结硬化和强度增长受到显著影响。

四、硅酸盐水泥及普通水泥的主要性质和要求

（一）比重和容重

1. 比重：硅酸盐水泥及普通水泥的比重一般为3.10~3.20克/立方厘米，掺混合材料或贮存过久时，比重将稍有降低。

2. 容重：硅酸盐水泥及普通水泥的容重，松散状态时为900~1300公斤/立方米，紧密状态时为1400~1700公斤/立方米。

（二）细度

测定水泥细度的方法，通常采用筛分析法，有水筛法及干筛法两种。国家标准规定硅酸盐水泥和普通硅酸盐水泥的细度，在0.080毫米方孔筛上的筛余量不得超过15%。

水泥的细度也可用“比表面积”来表示，即一克水泥所具有的颗粒总表面积（平方米/克）。因为重量相同时，颗粒总体积相同，颗粒越小，颗粒数目越多，颗粒总表面积即越大。所以比表面积越大的水泥，其细度越大。目前比表面积多用透气法测定。硅酸盐水泥及普通水泥的比表面积为2500~3500平方米/克。

（三）标准稠度用水量

由于加水量的多少，对水泥的一些技术性质（如凝结时间等）影响很大，故测定这些性质时，必须在一个规定的稠度下进行。这个规定的稠度，称为标准稠度。水泥净浆达到标准稠度时所需拌合的水量（以占水泥重量的百分率表示），称为标准稠度用水量（亦称

需水量)。

硅酸盐水泥及普通水泥的标准稠度用水量，一般在24~30%之间。水泥熟料矿物成分不同时，其标准稠度用水量亦有差别。水泥越细，标准稠度用水量越大。在标准稠度相同时，用水量较大的水泥，硬化时收缩较大，强度和密实性较差。

(四) 凝结时间

凝结时间分初凝和终凝时间。

1. 初凝时间：从水泥加水到开始失去塑性的时间，称为初凝时间。在混凝土施工中，要经过拌合、运输和浇筑等工序，需要一定时间，所以初凝不宜过快。国家标准规定，硅酸盐水泥及普通水泥的初凝时间不得早于45分钟。

2. 终凝时间：从水泥加水，到完全失去塑性的时间，称为终凝时间。在混凝土浇筑完成后，要求尽早完成凝结并开始硬化，以利于下一步的施工工作。所以，终凝时间不宜过迟。国家标准规定，硅酸盐水泥及普通水泥的终凝时间不得迟于12小时。

凝结时间是以标准稠度的水泥净浆，在标准温湿条件下，用凝结时间测定仪测定的（详见水泥试验部分）。

(五) 水化热

水泥在水化过程中所放出的热量，称为水泥的水化热。大部分的水化热是在水化初期（七天内）放出的，以后则逐渐减少。

水泥水化热的大小，主要由 C_3A 及 C_3S 的含量多少和细度大小决定。通常标号越高的水泥，水化热越大。掺入外加剂时，凡能起促凝作用的均能提高早期水化热；凡能起缓凝作用的，均能降低早期水化热。

水化热是用热量计直接测定水泥胶砂的温度变化后，计算而得的。

水化热较大的水泥，对小体积混凝土工程可以促进硬化；但对大●体积混凝土工程是不利的，因为混凝土的导热性较小，内部混凝土的热量不易散发，容易造成内外较大的温差，引起不均匀的内应力，使混凝土发生裂缝。所以在大体积混凝土工程中，要采用低热水泥和降温措施。

(六) 体积安定性

各种水泥在硬化过程中，体积都有一些变化。如变化过大，特别是在已硬化的砂浆或混凝土中发生不均匀地体积变化，将使水泥石发生崩溃、龟裂、弯曲或松脆等现象，造成工程的严重事故。

水泥在硬化时，体积均匀地变化，不产生危险裂缝的性质，叫做水泥的体积安定性。

水泥的安定性不良，是由于水泥熟料中含有较多的游离 CaO 、 MgO 或 SO_3 。过火的 CaO 熟化较慢；过火的 MgO 更慢； SO_3 与水化铝酸三钙生成水化硫铝酸钙则最慢。这些生成物的体积膨胀，都发生在水泥石具有一定强度之后，因而产生了不均匀的内应力，造成水泥石龟裂、弯曲以至崩溃。

水泥的安定性检验是用标准稠度的水泥净浆作成一定尺寸的圆饼，通过沸煮法加速

● 结构断面最小边尺寸大于或等于3米的混凝土块体，叫做大体积混凝土。

CaO的熟化，以检验CaO的危害作用；通过压蒸法加速MgO的熟化，以检验MgO的危害作用；通过在常温水中浸泡，以检验SO₃的危害作用。体积安定性不合格的水泥，不能使用。

国家标准规定：熟料中MgO含量不得超过5%，水泥中SO₃的含量不得超过3.5%。由于已有这种限制，所以一般可不作后两项试验。

(七) 干缩

水泥所含安定性不良成分虽在规定限额之内，如果拌合用水较多，在水泥硬化过程中，特别是在硬化初期，表面干燥过快，也会产生很多微细裂缝，这样的裂缝叫做干缩裂缝。干缩裂缝会降低水泥石的强度和其它性能。因此拌合用水量要尽量少一些，水泥在凝结硬化过程中，特别是在初期，必须加强养护，保证温湿条件，不使其干燥过快，既可防止干裂，也可使其强度不断增长。

(八) 强度及标号

水泥的强度是指水泥胶砂硬化一定龄期后，其胶结能力的大小。水泥的标号就是根据水泥强度的高低来划分的。

测定水泥强度的方法有硬练法及软练法两种。

硬练法是将水泥、标准砂（粒径0.5~0.85毫米）及水按规定比例拌制成水泥硬练胶砂，并按规定方法制定抗拉及抗压试件（抗拉试件为8字形，抗压试件为边长7.07厘米的立方体），再在标准条件下进行养护后，测其3天、7天及28天的抗压与抗拉强度。根据28天的抗压强度值，确定水泥的标号。但3天及7天的抗压强度及各龄期的抗拉强度值，均不得低于规定的强度指标。表1-2为普通硅酸盐水泥的硬练强度指标。

表 1-2 普通硅酸盐水泥的硬练强度指标

水泥标号	抗压强度 (公斤/厘米 ²)			抗拉强度 (公斤/厘米 ²)		
	3 天	7 天	28 天	3 天	7 天	28 天
200		100	200		12	18
250		140	250		12	18
300		180	300		15	22
400	160	260	400	15	19	24
500	220	350	500	19	23	27
600	260	420	600	21	27	32

软练法是将水泥、标准砂（粒径0.25~0.65毫米）及水按规定比例拌制成塑性水泥胶砂，并按规定方法制成4×4×16厘米的试件，在标准条件下养护后，测其3天、7天及28天的抗折及抗压强度。根据28天的抗压强度值，确定水泥的标号。但3天及7天的抗压强度及各龄期的抗折强度值，均不得低于规定的强度指标。表1-3列出了硅酸盐水泥及普通水泥的软练强度指标。

我国1979年7月1日起水泥标号已开始用软练胶砂强度确定。

根据试验统计资料，软练胶砂强度与硬练胶砂强度关系如图1-2所示，经验公式为：

普通硅酸盐水泥： $R_{\text{软}} = 0.865 R_{\text{硬}} - 5$