



“十二五”国家重点图书

材料科学研究与工程技术系列(应用型院校用书)

# 混凝土学

Concrete Science

主编 张巨松  
主审 李家和

本书 体现先进性 前瞻性 反映材料领域的研究成果  
内容贯通 注重交叉性 学术性 立足材料科学的人才培养  
内容翔实 追求研究性 实用性 促进材料工程的创新发展

哈尔滨工业大学出版社

“十二五”国家重点图书

材料科学研究与工程技术系列(应用型院校用书)

# 混凝土学

---

主 编 张巨松

副主编 李秋义 高小建 纪明香  
戴 民 佟 钰

主 审 李家和

哈尔滨工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书共 8 章,在简要介绍混凝土发展过程的基础上,系统介绍了混凝土组成材料、混合料(拌和物)、硬化结构、力学性能、尺寸稳定性、耐久性、配合比设计、常用混凝土等的概念和基本原理,以及混凝土组成、结构和性能之间的相互关系,介绍了混凝土材料的最新进展和技术标准(规范),在附录中列举了常用最新混凝土技术标准(规范)。

本书既可作为高等院校无机非金属材料工程专业教材,又可作为本行业工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土学/张巨松主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011. 1

ISBN 978-7-5603-3167-6

I. 混… II. ①张… III. ①混凝土-研究  
IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 012892 号

责任编辑 许雅莹  
封面设计 卞秉利  
出版发行 哈尔滨工业大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006  
传 真 0451-86414749  
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>  
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂  
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 18 字数 450 千字  
版 次 2011 年 2 月第 1 版 2011 年 2 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5603-3167-6  
定 价 30.00 元

---

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

# 前 言

本书是根据教育部面向 21 世纪材料类专业课程体系改革的要求编写的,重点介绍混凝土材料科学方面的基本概念、基本原理,强调了混凝土组成、结构和性能之间的相互关系。

随着我国城市化建设进程的大力推进,铁路、公路、桥梁、地铁等基础设施的大力发展,使混凝土的用量巨增。同时,随着资源的枯竭,环境的破坏,节约能源、绿色环保的呼声越来越高,并受到广泛重视。对与上述产业息息相关的混凝土行业提出了更高的要求。为满足混凝土行业的快速发展,为满足无机非金属材料专业在校本科生、研究生教学的需要,为满足混凝土行业工程技术人员专业水平的提高,我们编写了《混凝土学》这本书。

本书系统介绍了混凝土组成材料、混合料(拌和物)、硬化结构、力学性能、尺寸稳定性、耐久性、配合比、常用混凝土基本概念、基本原理及最新进展的同时,还重点反映了混凝土的“双掺”、“泵送”、“绿色、低碳”的时代特征,为此本书在讨论具体基本概念、基本原理之后,还注重讨论了解决当今混凝土问题的技术途径和措施,为进一步从事混凝土工程具体工作奠定了基础。

本书介绍了混凝土材料技术标准(规范)的基本知识,介绍各种材料及性能时,强调了标准规范的作用,注意培养学生的法规观念,为方便学习与工作,本书附录列举了常用混凝土材料技术标准(规范),且全书采用了法定计量单位及当前最新的技术规范,使学生获得最新知识。

本书由沈阳建筑大学张巨松教授主编,哈尔滨工业大学李家和教授主审。参加编写的人员及编写工作分工如下:张巨松(绪论、第 5 章、8.8、附录),黑龙江建筑职业技术学院纪明香(第 1 章),沈阳建筑大学佟钰(第 2 章),哈尔滨工业大学高小建(第 3 章、第 4 章、第 7 章),青岛理工大学李秋义、高嵩(第 6 章),沈阳建筑大学戴民(8.1、8.2、8.4、8.5、8.6),同济大学李好新(8.7),中国建筑材料研究总院张利俊(8.3),全书由张巨松统稿。

由于时间仓促,编写人员缺乏经验以及水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者及同行专家给予指正并提出宝贵意见。

作 者

2010 年 12 月

# 目 录

## CONTENTS

绪 论 .....	(1)
0.1 混凝土的特点 .....	(1)
0.2 混凝土的分类 .....	(2)
0.3 混凝土发展的历史 .....	(3)
0.4 绿色高性能混凝土 .....	(7)
0.5 混凝土技术标准简介 .....	(8)
第1章 组成材料 .....	(10)
1.1 水泥 .....	(10)
1.2 骨料 .....	(24)
1.3 混凝土用水 .....	(33)
1.4 混凝土外加剂 .....	(34)
1.5 矿物掺和料 .....	(42)
1.6 混凝土用纤维 .....	(48)
第2章 混凝土混合料 .....	(53)
2.1 混合料流变特性 .....	(53)
2.2 工作性 .....	(58)
2.3 工作性的评定 .....	(61)
2.4 影响工作性的因素 .....	(68)
2.5 凝结时间 .....	(73)
2.6 含气量 .....	(77)
第3章 硬化混凝土结构 .....	(80)
3.1 水泥石结构及形成过程 .....	(80)
3.2 过渡区结构 .....	(89)
3.3 内外分层结构 .....	(93)
3.4 宏观堆聚结构 .....	(95)
第4章 混凝土力学性能 .....	(96)
4.1 强度 .....	(96)
4.2 混凝土强度理论 .....	(99)

4.3	影响混凝土强度的因素 .....	(104)
4.4	混凝土高强化的技术途径 .....	(110)
4.5	混凝土的受力变形 .....	(111)
4.6	徐变 .....	(117)
<b>第5章</b>	<b>混凝土的尺寸稳定性 .....</b>	<b>(128)</b>
5.1	塑性收缩 .....	(128)
5.2	温度变形 .....	(130)
5.3	自收缩 .....	(134)
5.4	干缩和湿胀 .....	(137)
5.5	碳化收缩 .....	(143)
5.6	提高尺寸稳定性的技术途径 .....	(149)
5.7	尺寸稳定性评价 .....	(152)
<b>第6章</b>	<b>混凝土耐久性 .....</b>	<b>(160)</b>
6.1	渗透性 .....	(161)
6.2	抗冻性 .....	(165)
6.3	碳化 .....	(170)
6.4	化学侵蚀 .....	(171)
6.5	碱-骨料反应 .....	(171)
6.6	钢筋锈蚀 .....	(178)
6.7	提高混凝土耐久性的技术途径 .....	(183)
<b>第7章</b>	<b>混凝土的配合比设计 .....</b>	<b>(186)</b>
7.1	基本要求 .....	(186)
7.2	基本原理 .....	(187)
7.3	设计步骤 .....	(190)
7.4	其他设计方法 .....	(196)
7.5	配合比设计实例 .....	(199)
<b>第8章</b>	<b>常用混凝土 .....</b>	<b>(203)</b>
8.1	高性能混凝土 .....	(203)
8.2	自密实混凝土 .....	(212)
8.3	补偿收缩混凝土 .....	(216)
8.4	纤维混凝土 .....	(227)
8.5	硅酸盐混凝土 .....	(236)
8.6	轻质混凝土 .....	(247)
8.7	砂浆 .....	(263)
8.8	其他混凝土 .....	(273)
附录:水泥混凝土领域的常用技术标准(规范) .....		(277)
参考文献 .....		(281)

# 绪 论

混凝土是用胶凝材料(无机的、有机的或有机无机复合的)将骨(集)料胶结成整体的复合固体材料的总称。

由水泥、颗粒状骨料、水以及化学外加剂和矿物掺和材料(矿物外加剂)按适当比例配合,经均匀搅拌、密实成型和养护硬化而成的人工石材称为水泥混凝土。

自1824年波特兰水泥问世以来的近两百年时间里,水泥与混凝土的生产技术和研究水平迅速发展提高,混凝土的用量急速增加,使用范围日益扩大。至今,混凝土已成为世界上用量最多的人造材料之一。

## 0.1 混凝土的特点

混凝土在土木工程中能够得到广泛的应用是因为它与其他材料相比具有一系列特点:

(1)混凝土的原材料是地表非常丰富的砂、石、水及由粘土和石灰石烧制的水泥,除水泥外其他三种材料几乎是最廉价的材料;近些年来随着泵送混凝土的普及,混凝土都掺入大量的工业灰渣如粉煤灰、渣矿粉、硅灰等,减少了工业灰渣的环境污染。据测算混凝土的能耗为 $440 \sim 770 \text{ kWh/m}^3$  ( $182 \sim 320 \text{ kWh/t}$ ),水泥为 $1300 \text{ kWh/t}$ ,钢材为 $8000 \text{ kWh/t}$ ,钢筋混凝土为 $800 \sim 3200 \text{ kWh/m}^3$ ,预应力混凝土为 $700 \sim 1700 \text{ kWh/m}^3$ ;不同材料承受 $1000 \text{ t}$ 荷载的 $1 \text{ m}$ 高柱能耗分别为:素混凝土 $70 \text{ L}$ 油,粘土砖 $210 \text{ L}$ 油,钢材 $320 \text{ L}$ 油,可见在常见的工程材料中混凝土的能耗是较低的。

(2)尽管混凝土外观简单,但具有十分复杂的结构。混凝土含有许多分布不均的固体成分以及形状和大小不同的孔隙,这些孔隙又部分或全部被碱性溶液所充满。因而,一般材料结构与性质之间的关系对混凝土不大适用,例如对于相对均质且不太复杂的人造材料(如钢、塑料等)适用的固体力学和材料科学的一些方法,对混凝土并不能解决问题。

(3)与其他材料相比,混凝土的结构和性质不是静态的。混凝土中的水泥浆体及水泥浆体与骨料之间的过渡区随着时间不断变化。混凝土的强度和其他性质决定于连续多年不断形成的水泥水化产物,虽然这些产物是不溶的,但它们在潮湿的环境中能缓慢分解和再结晶,因而赋予混凝土愈合微裂缝的能力。这一点混凝土跟木材或其他有生命的物质相似。

(4)调整各组成材料的品种及数量,可获得不同性能(强度、耐久性)的混凝土来满足工程上的不同要求。混凝土拌和物具有良好的可塑性,可根据工程需要浇筑成各种形状尺寸的构

件及构筑物;混凝土具有较高的抗压强度,且可与钢筋有良好的配合组成钢筋混凝土,弥补了混凝土抗拉、抗折强度低的缺点,使混凝土能够适应各种工程结构;性能良好的混凝土具有很高的抗冻性、抗渗性、耐腐蚀性等使得混凝土长期使用仍能保持原有性能。混凝土的主要缺点是自重大、抗拉强度低、呈脆性、易开裂,并且在施工中影响质量的因素较多,质量波动较大。

(5)与其他材料相比,混凝土一般需要使用前在工程现场或现场附近加以拌制。作为一种工程材料,对于硬化前后混凝土的结构和性质来说,混凝土的原材料配比与施工工艺具有同样重要的影响。

## 0.2 混凝土的分类

混凝土种类繁多,常见混凝土的分类方法及种类见表0.1、0.2。

表0.1 混凝土的不同分类方法及种类

分类方法		名称	特性
按 胶 结 材 分 类	无机	水泥类	水泥混凝土 以硅酸盐水泥及各系列水泥为胶结材,可用于各种混凝土结构
		石灰类	硅酸盐混凝土 (石灰混凝土) 以石灰、火山灰等活性硅酸盐或铝酸盐与消石灰的混合物为胶结材
		石膏类	石膏混凝土 以天然石膏或工业废料石膏为胶结材,可作天花板及内隔墙等
		硫磺	硫磺混凝土 硫磺加热融化,然后冷却硬化,可作粘结剂及低温防腐层
		水玻璃	水玻璃混凝土 以钠水玻璃或钾水玻璃为胶结材,可作耐酸结构
		碱矿渣类	碱矿渣混凝土 以磨细矿渣及碱溶液为胶结材,是一种新型混凝土,可作各种结构
	—	—	—
	有机	沥青类	沥青混凝土 用天然沥青或人造沥青为胶结材,可作路面及耐酸、耐碱地面
		树脂	树脂混凝土 以粘结力强、热固性的天然或合成树脂为胶结材,适于在侵蚀性介质中使用
		—	—
	有机 无机 复合	合成树脂+水泥	聚合物水泥混凝土 以水泥为主要胶结材,掺入少量乳胶或水溶性树脂,能提高抗拉、抗弯强度
		聚合物(浸渍)	聚合物浸渍混凝土 将水泥混凝土基材在低粘度单体中浸渍,用热或射线使表面固化
—		—	—



表 0.2 水泥混凝土的分类方法及种类

分类方法	混 凝 土 品 种
按集料种类	重混凝土(干表观密度大于 2 600 kg/m <sup>3</sup> ),重集料钢球、铁矿石、重晶石等,用于防射线混凝土工程
	普通混凝土(干表观密度为 1 950 ~ 2 600 kg/m <sup>3</sup> ),普通砂石为骨料,可做各种结构
	轻混凝土(干表观密度小于 1 950 kg/m <sup>3</sup> ),分为轻骨料混凝土(表观密度为 800 ~ 1 950 kg/m <sup>3</sup> ,轻骨料浮石、火山渣、陶粒、膨胀珍珠岩等)和多孔混凝土(干表观密度为 300 ~ 1 200 kg/m <sup>3</sup> ,如泡沫混凝土、加气混凝土)
	大孔混凝土(无细骨料)(表观密度为 800 ~ 1 850 kg/m <sup>3</sup> ),适于作墙板或非承重墙体
	细颗粒混凝土(无粗骨料),以水泥与砂配制而成,可用于钢丝网水泥结构
按使用功能	结构混凝土、保温混凝土、耐酸混凝土、耐碱混凝土、耐硫酸盐混凝土、耐热混凝土、水工混凝土、海洋混凝土、防辐射混凝土等
按施工工艺	浇筑混凝土、离心成型混凝土、喷射混凝土、泵送混凝土等
按配筋情况	素混凝土、钢筋混凝土、纤维混凝土、预应力混凝土等
按强度	普通混凝土、高强混凝土(强度>C45)、超高强混凝土(强度>C100)
稠 坍落度	超干硬性混凝土、特干硬性混凝土、半干硬性混凝土
度维勃稠度	低塑性混凝土、塑性混凝土、流动性混凝土、大流动性混凝土

### 0.3 混凝土发展的历史

从新石器时代的泥结卵石、草筋泥砂浆,经历石灰(石膏)三合土、火山灰石灰混凝土、牛马血、糯米汁等外加剂混凝土,到近代波特兰水泥混凝土、钢筋混凝土、预应力混凝土、纤维混凝土及聚合物混凝土,以及最近的高强度/高性能混凝土。混凝土的发展主要遵循复合化、高强度、高性能化三条技术路线。在提高性能、增加品种与扩大应用的相互促进下,混凝土逐渐成为当代最主要的结构工程材料,也是最大宗的人造材料,不断推动着人类文明的进步。

复合化是包括混凝土在内各种材料发展的主要途径。新石器时代用泥浆胶结大卵石作为柱基(西安半坡遗址);用草木筋增强黄土与黄土结核(料浆石)泥浆抹墙打地坪,有的还用柴火焙烧,至今仍坚硬光亮(甘肃先民遗址);古埃及用石膏砂浆砌筑金字塔;古罗马用火山灰石灰混凝土建筑斗兽场与水渠、桥梁;东汉至今的石灰三合土房基、路基;唐宋以来用桐油、牛马血、糯米汁、杨桃藤汁掺入石灰砂浆中增加密实度、防水能力及耐久性(南京、和州等城墙及古罗马和秦长城采用牛马血作外加剂,实际上是现代引气型外加剂的始祖);近代的各种增强混凝土,掺加混合材与外加剂,都是用多种材料复合来改善混凝土性能,以达到增强、耐久、经济等目的。20世纪80年代用“水泥基复合材料”这一名词来概括各种混凝土,是科学合理的。复合化带来的超叠效应,更是高性能混凝土获得高性能的主因。

高强度是百余年来努力的方向。自从1824年波特兰水泥问世,1850年出现钢筋混凝土以来,作为重要的结构材料,强度一直是混凝土的主要性能指标;加之混凝土强度决定于密实度,密实度又与耐久性密切相关,因此高强度一直被认为是优质混凝土的重要特征。随着强度与孔隙率关系和水灰比定则等的建立,长期以来,强度已成为混凝土配合比设计以及生产和应用的首要性能指标甚至唯一指标。高强度的发展道路决定着水泥生产,决定着混凝土工艺的

发展方向。20世纪50年代以前,各国混凝土强度都在30 MPa以下,30 MPa以上即为高强混凝土;20世纪50年代34 MPa以上为高强混凝土;20世纪60年代强度提高到41~52 MPa;现在50~60 MPa高强混凝土已开始用于高层建筑与桥梁工程。而有学者预测,本世纪混凝土平均强度将超过50~60 MPa;100 MPa以上的超高强混凝土将大量用于结构工程,可见混凝土的高强趋势是很明显的。

高性能化是近些年才提出的,作为主要的结构材料,混凝土耐久性的重要程度不亚于强度和其他性能。不少混凝土建筑域材质劣化引起开裂破坏甚至崩塌,水工、海工建筑与桥梁尤为如此,因而早在20世纪30年代水工混凝土就要求同时按强度与耐久性来设计配合比;有些重要建筑物,如高层建筑、大跨度桥梁、采油平台、压力容器等对耐久性有更高的要求。同时随着施工技术的进步和结构中混凝土均匀性要求的提高,工作性也成为另一重要性能指标。此外,体积稳定性、变形、抗冲耐磨、疲劳、耐化学腐蚀等性能也受到应有的重视。

1990年5月美国国家标准与技术研究院(NIST)与美国混凝土协会(ACI)联合召开会议,首次提出高性能混凝土(High Properties Concrete, HPC)这一概念,并认为HPC是同时具有某些性能的匀质混凝土,必须采用严格的施工工艺与优质原材料,配制成便于浇捣、不离析、力学性能稳定、早期强度高,并具有韧性和体积稳定性等性能的混凝土,特别适于高层建筑、桥梁以及暴露在严酷环境中的建筑物。大多数学者认为HPC的强度指标应不低于50~60 MPa;日本学者则更重视工作性与耐久性。我国吴中伟院士认为HPC应根据用途与经济合理等条件对性能有所侧重,现阶段HPC强度低限可向中等强度等级(30 MPa)适当延伸,但以不损及混凝土内部结构(如孔结构、过渡区结构、水化物结构等)的发展与耐久性为度。他所提出的高性能混凝土的定义是:HPC是一种新型高技术混凝土,是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上,采用现代混凝土技术,选用优质原材料,在严格的质量管理条件下制成的;除水泥、水、骨料外,必须掺加足够数量的细掺料与高效外加剂。HPC重点保证下列诸性能:耐久性、工作性、各种力学性能、适用性、体积稳定性以及经济合理性。HPC不仅在性能上对传统混凝土有很大突破,在节约资源、能源、改善劳动条件、经济合理等方面,尤其保护环境方面,有着十分重大的意义,是一种可持续发展的绿色材料。

近代混凝土材料发展过程中重要的历史事件很多,据有关资料记载主要如下:

1850年法国人Lambot制作了第一条钢筋混凝土小船,是混凝土制品发展史上的首次大突破。

1866年C. S. Hutchinson首获美国空心砌块专利。T. B. Rhodes于1874年获得在混凝土塑性状态下制作空心砌块的专利。

1867年法国花匠J. Monier获得钢筋混凝土结构设计专利,实际当时尚无设计理论指导,仅凭经验,1875年建成了世界上第一座钢筋混凝土桥,钢筋混凝土逐渐成为重要的结构材料。

1886年德国工程师M. Koenen基于材料力学原理,提出了以允许应力计算钢筋混凝土结构的方法。

1889年霍夫曼(Hofman)取得了用盐酸和碳酸钠制造加气混凝土的专利。1919年,柏林人格罗沙海(Grosche)用金属粉末作发气剂制出了加气混凝土。1923年,瑞典人埃克森(J. A. Eriksson)掌握了以铝粉为发气剂的生产技术并取得了专利权。

1890年,凯特劳脱(C. Candlot)首先发现铝酸三钙和硫酸钙能形成钙矾石。1892年,米却利斯(W. Michaelis)提出钙矾石是造成波特兰水泥混凝土在含硫酸盐介质中产生膨胀、破坏的

原因,即所谓的“水泥杆菌”。

1910年,美国的 H. F. Porter 发表了关于短钢纤维增强混凝土的第一篇论文。但是纤维混凝土真正进入工程的研究是在 20 世纪 60 年代初期。

1913 年美国 Comell Kee 设计并制造出第一台曲轴机械式混凝土输送泵,但没能得到应用;1927 年德国的 Fritz Hell 设计制造了第一台得到成功应用的混凝土输送泵;荷兰人 J. C. Kooyman 在前人的基础上进行改进,1932 年他成功地设计并制造出采用卧式缸的 Kooyman 混凝土输送泵,该泵采用一个卧式缸和由两个联杆操纵联动的旋转阀的结构,成功解决了混凝土输送泵的构造原理问题,大大提高了工作的可靠性。1959 年德国的 Schwing 公司生产出第一台全液压的混凝土输送泵,它采用液压驱动,功率大、振动小、排量大,可实现无级调速,并可以实现反泵操作,减少了堵管现象。混凝土泵的不断发展和泵送混凝土的发展。

20 世纪 30 年代在美国开发北美洲时,混凝土路面由于严寒气候的除冰而很快受到破坏,为提高路面混凝土质量而使用了“文沙树脂”来提高混凝土的耐久性。

1928 年法国 E. Freyssinet 提出了混凝土收缩徐变理论,采用了高强钢丝,发明了预应力锚具,成为预应力混凝土的鼻祖、奠基人。

1935 年美国的 E. W. Scripture 首先研制成功了木质素磺酸盐为主要成分的减水剂(商品名 Pozzolith),1937 年获得专利,标志着普通减水剂的诞生。1954 年制定了第一批混凝土外加剂检验标准。

1936 年,法国洛西叶(H. Lossier)是最早认识到钙矾石具有消除水泥收缩和产生预应力的学者,并发明了膨胀水泥。

1955 年前后,米哈依洛夫(B. B. Михалов)创造了硅酸盐膨胀-自应力水泥(国外称为 M 型水泥),它由波特兰水泥、铝酸盐水泥和石膏按一定比例共同粉磨而成,开始用于地下工程。

1958 年,美国的克莱恩(A. Klien)在此基础上开发了 K 型膨胀水泥。1964 年正式投入生产,通过在波特兰水泥熟料中加入适量的膨胀剂而制成。膨胀剂的配制和煅烧是使其中具有适量的无水硫铝酸钙( $3\text{CA} \cdot \text{CaSO}_4$ , 简写  $\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$ )、 $\text{CaSO}_4$  和  $\text{CaO}$ , 可以根据所需要的膨胀值调节膨胀剂的掺入量,以制得能够补偿收缩的膨胀水泥或自应力水泥。

1962 年日本花王石碱公司服部健一等人研制成功  $\beta$ -萘磺酸甲醛缩合物钠盐(商品名麦蒂)即萘系高效减水剂。1964 年西德的 Aignesberger 等人研制成功三聚氰胺减水剂(商品名 Melment)即树脂系高效减水剂,标志着高效减水剂的诞生。

1962 年,日本大成建筑技术研究所购买了美国 A. Klein 的 K 型膨胀水泥专利,在此基础上研制成硫铝酸钙膨胀剂,1969 年日本水泥公司出售 CSA 膨胀剂。

1963 年,美国的 J. P. Romualdi 等人提出了纤维混凝土的阻裂机理“纤维间距理论”,才使这种复合材料的发展有了实质性的突破。

1970 年,日本小野田水泥公司开发成功石灰系膨胀剂。20 世纪 90 年代后期,美国 P. K. Mehta 为解决大体积混凝土温差裂缝问题提出了  $\text{MgO}$  膨胀剂。

1862 年,德国 Emillangen 发现水淬高炉矿渣具有潜在水硬性,从此高炉矿渣就长期作为水泥的活性混合材料使用,近些年来,由于商品混凝土的发展和粉磨技术的提高,矿渣粉已直接应用于混凝土中。

20 世纪 40 年代,美国垦务局等工程部门总结一些大坝工程混凝土中掺入粉煤灰的成功

经验,决定在蒙大拿州的俄马坝这一工程中大规模应用粉煤灰,该工程共用 13 万吨粉煤灰,欧美国家有关文献将俄马坝工程作为粉煤灰混凝土技术发展史上的第一个里程碑。

20 世纪 50 年代和 60 年代,因发展能源工业的需要,世界范围内火力发电工程增多,粉煤灰产量也随之剧增,对粉煤灰性质的认识逐渐深化,粉煤灰混凝土经历了广泛的实用阶段。事实证明,实用结果令人惊喜,粉煤灰混凝土在经济性、工作性以及耐久性等方面大大超过了普通混凝土。此后,粉煤灰混凝土的应用越来越受重视,到 20 世纪 80 年代已发展成为现代混凝土的基本材料。同时,其他国家也发展了许多先进技术,如英国最先开发了优质粉煤灰,最早发展了胶凝效率系数的原理和应用;日本则长期研究粉煤灰混凝土的耐久性等。我国的粉煤灰混凝土技术发展起步于 20 世纪 50 年代中期,1954 年,国家财经委在编制并颁布的“关于在基本建设工程中使用水泥暂行规定”中,就确定了粉煤灰作为“水硬性混合材料”掺入水泥熟料中生产水泥。我国粉煤灰混凝土研究应用的特点是研究较早,开发较迟,发展势头迅猛,发展前景广阔。

1947 年挪威埃肯公司(Elkem ASA)开始进行微硅粉的生产技术、粉尘处理、分级和应用方面的研究,成为世界上最早开展微硅粉研发的企业,并始终在微硅粉收尘与处理技术上保持领先地位。随后,美国、俄罗斯、日本也开始进行研发应用,并成为微硅粉主要生产国。中国最早收集硅灰的企业是上海铁合金厂(1984 年),此后河北唐山、山西、青海、甘肃、新疆等地的铁合金企业陆续安装硅灰收尘系统,生产和供应硅灰产品。

1913 年美国研制成功页岩陶粒(国外又称膨胀页岩),用它可以配制成抗压强度为 30 ~ 35 MPa 的轻骨料混凝土,应用在房屋建筑、船舶制造和桥梁工程中,至 1920 年,已用它建造了 10 多座桥梁。20 世纪 60 年代末轻骨料混凝土在结构工程上的应用得到了巨大的发展,闻名于世的高 218 m 的贝壳广场塔楼就是用轻骨料混凝土建造的。80 年代初,美国的轻骨料混凝土已在 400 多座桥梁工程中应用。到了 80 年代轻骨料混凝土发展达到了鼎盛时期,目前采用堆积密度 1 000 kg/m<sup>3</sup> 左右的粉煤灰陶粒配制全轻混凝土,其抗压强度可达 70 MPa,采用高效外加剂配制的砂轻混凝土其强度可达 100 MPa。日本是在第二次世界大战后才大力发展人造轻骨料的,1970 年达最高峰。

吴中伟教授在其所著的《膨胀混凝土》一书中总结到,水泥混凝土科学历史上曾有过三次大突破:

- ①19 世纪中叶至 20 世纪初,钢筋和预应力钢筋混凝土的诞生;
- ②膨胀和自应力水泥混凝土的诞生;
- ③外加剂的广泛应用——有机和无机的复合。

黄大能教授在其著作中提出,水泥混凝土科学历史上曾有过三次大突破:

- ①19 世纪中叶法国首先出现的钢筋混凝土;
- ②1928 年法国 E. Freyssinet 提出了混凝土收缩徐变理论,采用了高强钢丝,发明了预应力锚具,成为预应力混凝土的鼻祖、奠基人;
- ③20 世纪 60 年代以来层出不穷的外加剂新技术——有机和无机的复合。

尽管各位专家的看法略有不同,总体来看材料科学在水泥混凝土科学中的表现可以看成如下三个阶段:

- ①金属、无机非金属、高分子材料的分别出现;
- ②19 世纪中叶至 20 世纪初无机非金属和金属的复合;
- ③20 世纪中叶金属、无机非金属、高分子的复合。

## 0.4 绿色高性能混凝土

### 1. 绿色的含义

随着人口爆炸、生产发达,地球承受的负担剧增,以资源枯竭、环境破坏最为严重,人类生存受到威胁。1992年里约热内卢世界环境与发展会议后,绿色事业受到全世界重视。绿色的含义随着认识的提高不断扩大,主要可概括为:

- ①节约资源、能源;
- ②不破坏环境,更应有利于环境;
- ③可持续发展,保证人类后代能健康、幸福地生存下去。

作为一种材料或一种产业,节约资源、能源也是为了本身能够持续存在和发展。水泥混凝土作为最大宗的人造材料,2008年世界水泥产量已达到28.3亿吨;混凝土达100亿立方米(250亿吨)左右,对资源、能源的需求和对环境的影响十分巨大。混凝土能否长期维持作为最主要的建筑结构材料,关键在于能否成为绿色材料,因此提出“绿色高性能混凝土(Green High Property Concrete, GHPC)”,它是混凝土的发展方向,是混凝土的未来。

### 2. 绿色高性能混凝土

HPC的含义和组成材料已能说明,它含有很多“绿色”要素,也可说是传统混凝土向绿色材料迈进了一步。现在提出GHPC作为今后发展方向,目的在于加强人们对绿色的重视,加强绿色意识,要求混凝土工作者更自觉地提高HPC的绿色含量,或加大其绿色度,节约更多的资源和能源,将对环境的破坏减到最少。这不仅是为了混凝土和建筑工程的继续健康发展,更是人类的生存和发展所必须,是大有可为的。

GHPC应具有下列特征:

#### (1)更多地节约熟料水泥,减少环境污染

作为混凝土主要原料的水泥是一种不可持续发展的产品,是众所周知的污染源,不仅排出大量粉尘和有害气体,而且在水泥生产过程中产生大量 $\text{CO}_2$ ,作为温室气体将严重影响地球变暖,造成气候反常,物种灭绝,疾病流行,给人类带来重大灾害。各国已规定 $\text{CO}_2$ 排放限量,水泥工业的发展必将受到限制,水泥产量也不能再增加了。因此必须积极改变水泥品种和工艺,降低能耗和应用新技术。GHPC用大量细掺料代替熟料,将是一条主要出路。GHPC中,最大的胶凝组分将是磨细工业废渣而不是熟料水泥。

#### (2)更多地掺加工业废渣为主的细掺料

工业废渣的应用不仅可以节代熟料水泥,而且能改善环境、减少二次污染。GHPC将矿渣、粉煤灰或硅灰等复合掺加,达到多掺多代、节能节料、改善环境的目的。这种GHPC还具有降低温升、改善体积稳定性和耐磨耐蚀等优点。

#### (3)更大地发挥高性能的优势,减少水泥与混凝土用量

例如,利用高强度减少结构截面积、减轻自重;或提高耐久性,保证和延长安全使用期,以获得最大的经济与环境效益。

#### (4)扩大GHPC的应用范围

将现行HPC的强度低限从C50~C60降到C30左右;将GHPC用于大体积水工建筑以及要求抗冻融、低温升等工程中,可获得更大的环境与技术经济效益。

## 0.5 混凝土技术标准简介

### 1. 技术标准的内容及作用

混凝土技术标准(规范)包括内容很多,如原材料及混凝土的质量、规格、等级、性质要求以及检验方法;混凝土及产品的应用技术规范(或规程);混凝土生产及设计的技术规定;产品质量的评定标准等。可见,技术标准是针对原材料、产品以及工程的质量、规格、检验方法、评定方法、应用技术等所作出的技术规定。因此,技术标准是在从事产品生产、工程建设、科学研究以及商品流通领域中所需共同遵循的技术依据。

### 2. 技术标准的等级

根据发布单位与适用范围,技术标准可分为国家标准、行业标准和地方及企业标准。

#### (1) 国家标准

国家标准是指对全国范围的经济、技术及生产发展有重大意义的标准。它是由国家标准主管部门委托有关部门起草,或有关部委提出批报,经国家技术监督局会同各有关部委审批,并由国家技术监督局发布。

#### (2) 行业标准

行业标准是指全国性的某行业范围的技术标准。它是由中央部委标准机构指定有关研究院所、大专院校、工厂等单位提出或联合提出,报请中央部委主管部门审批后发布,并报国家技术监督局备案。

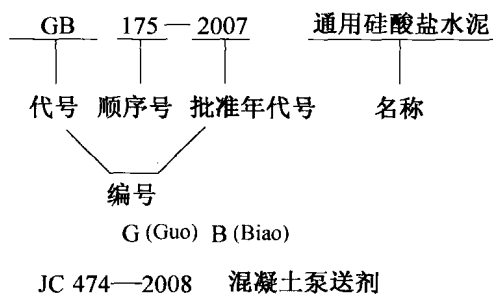
#### (3) 地方标准与企业标准

凡国家、行业未能颁布的产品与工程的技术标准,可由相应的工厂、公司、院所等单位,根据生产厂能保证的产品质量水平所制定的技术标准,报请本地区或本行业有关主管部门审批后,在该地区或行业中执行。

各级技术标准,在必要时可分为试行与正式标准两大类。按其权威程度又可分为强制性标准和推荐性标准。建材技术标准按其特性可分为基础标准、方法标准、原材料标准、能源标准、包装标准、产品标准等。

### 3. 标准的代号、编号与名称

每个技术标准都有自己的代号、编号与名称。标准代号反映了该标准的等级是国家标准、行业标准还是企业标准。代号用汉语拼音字母表示,如国标 GB、建工 JG、建材 JC、交通 JT、石油 SY、冶金 YB、水电 SD 等。编号表示标准的顺序号和颁布年代号,用阿拉伯数字表示,例如:



### (1) 标准的更新

标准是根据一个时期的技术水平制订的,因此它只能反映一个时期的技术水平,具有暂时相对稳定性。随着科学技术的发展,不变的标准不但不能满足技术飞速发展的需要,而且会对技术的发展起到限制和束缚的作用,所以应根据技术发展的速度与要求不断地进行修订。目前世界各国都确定为每五年左右修订一次。

### (2) 关于国际标准化组织(ISO)

ISO 是国际上范围与作用最大的标准化组织之一。它的宗旨是在世界范围内促进标准化工作的发展,以便于国际物质交流与互助,并扩大在知识、科学、技术与经济方面的合作。其主要任务是制定国际标准;协调世界范围内的标准化工作;报导国际标准化的交流情况以及与其他国际性组织合作研究有关标准化问题等。我国是国际标准化协会会员之一,当前我国各种技术标准正在向国际标准靠拢,以便于科学技术的交流与提高。

# 第 1 章 组成材料

混凝土的组成材料是实现混凝土性能的基础,只有控制好混凝土的组成材料,合理地利用原材料,才能获得性能优良、成本低廉的混凝土。然而,更值得注意的是,混凝土的各种原材料具有各种不同的性能,也蕴藏着各种不同的潜能,只有更有效地发挥这些潜能的作用,才能使混凝土这种商品表现出更高的性价比。要想以最低的成本获得最好性能的混凝土,就必须充分挖掘原材料的各种潜能,创造条件利用这些潜能来为混凝土的各种性能服务。

当然,利用原材料的潜能首先必须认识原材料的各种潜能,认识原材料各种潜能发挥的条件,以及它对混凝土各种性能的作用。本章将注重分析原材料的各种潜能,特别是对矿物外加剂进行较详细的分析,以建立起一种新的思维方式。同时也为后续章节论述如何利用这些潜能来配制混凝土,如何采取有效的措施来发挥这些潜能的作用奠定基础。

## 1.1 水 泥

水泥(Cement)是一种水硬性无机胶凝材料,即加入一定量水后成为塑性浆体,既能在水中硬化,又能在空气中硬化,能将砂、石等颗粒或纤维材料牢固地胶结在一起,具有一定强度的材料,又称为胶结料。水泥是混凝土的最重要组成材料之一,也是决定混凝土性能的最重要部分。

水泥的种类很多,按其用途和性能可分为通用水泥、专用水泥以及特性水泥三大类型。一是通用硅酸盐水泥,简称为通用水泥,指一般用途的水泥,主要用于一般建筑工程,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、粉煤灰硅酸盐水泥、复合硅酸盐水泥六大系列。二是专用水泥,指有专门用途的水泥,主要用于专门建筑工程,例如油井水泥、砌筑水泥等。三是特性水泥,指有某种特殊性能的水泥,主要用于特殊建筑工程,例如快硬硅酸盐水泥、低热矿渣硅酸盐水泥、抗硫酸盐硅酸盐水泥、膨胀硫铝酸盐水泥、自应力铝酸盐水泥等。水泥也可按其组成为硅酸盐水泥、铝酸盐水泥、硫铝酸盐水泥、氟铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥等类型。不同品种的水泥具有不同的特性,在选用时应予以注意。目前,工程中使用最多的是通用硅酸盐水泥。

### 1.1.1 通用水泥

根据 GB 175《通用硅酸盐水泥》规定,以硅酸盐水泥熟料和适量的石膏及规定的混合材料制成的水硬性胶凝材料,称为通用硅酸盐水泥(Common Portland Cement),简称通用水泥。该标准规定的通用硅酸盐水泥按混合材料的品种和掺量分为硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥和复合硅酸盐水泥。其中,普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、火山灰质硅酸盐水泥、粉煤灰硅酸盐水泥及复合硅酸盐水泥又称为掺混合材硅酸盐水泥。



## 1. 硅酸盐水泥

凡由硅酸盐水泥熟料、质量分数为0%~5%石灰石或粒化高炉矿渣、适量石膏磨细制成的水硬性胶凝材料,称为硅酸盐水泥(国外通称为波特兰水泥,Portland Cement)。硅酸盐水泥分两类:不参加混合材料的称Ⅰ型硅酸盐水泥,代号P·Ⅰ;掺入不超过水泥质量5%的石灰石或粒化高炉矿渣的称Ⅱ型硅酸盐水泥,代号P·Ⅱ。

### (1) 硅酸盐水泥熟料的矿物组成

硅酸盐水泥熟料的矿物组成为硅酸三钙( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,简写成 $\text{C}_3\text{S}$ )、硅酸二钙( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,简写成 $\text{C}_2\text{S}$ )、铝酸三钙( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,简写成 $\text{C}_3\text{A}$ )、铁铝酸四钙( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,简写成 $\text{C}_4\text{AF}$ )。其中,硅酸三钙和硅酸二钙合称为硅酸盐矿物,约占整个矿物组成的75%;铝酸三钙和铁铝酸四钙合称为溶剂矿物,约占整个矿物组成的22%。此外,还含有少量的方镁石、玻璃体和游离氧化钙等。其熟料主要矿物组成的性质见表1.1。

表 1.1 硅酸盐水泥熟料主要矿物组成的性质

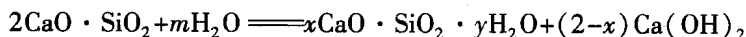
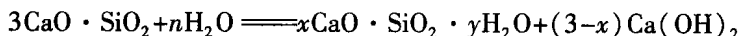
矿物名称	硅酸三钙	硅酸二钙	铝酸三钙	铁铝酸四钙
水化反应速度	快	慢	最快	快
强度	高	早期强度低,后期强度发展速度超过硅酸三钙,强度绝对值等同于硅酸三钙	低	低(含量多时对抗折强度有利)
水化热	较高	低	最高	中

### (2) 硅酸盐水泥的水化、凝结硬化

水泥加适量水拌和后,水泥中的熟料矿物与水发生化学反应(称为水化反应),生成多种水化产物。随着水化反应的不进行,水泥浆体逐渐失去流动性和可塑性而凝结硬化。凝结和硬化是同一过程中的不同阶段,凝结标志着水泥浆体失去流动性而具有一定的塑性强度。硬化则表示水泥浆体固化后形成的结构具有一定的机械强度。

硅酸盐水泥的水化是复杂的物理化学过程,水化产物的组成和结构受很多因素的影响。

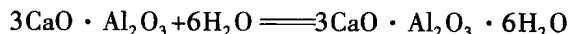
$\text{C}_3\text{S}$ 、 $\text{C}_2\text{S}$  与水反应生成水化硅酸钙和氢氧化钙,反应式为



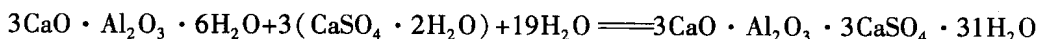
式中  $x$ ——钙硅比(C/S);

$n$ 、 $m$ ——结合水量。

$\text{C}_3\text{A}$  与水反应形成水化铝酸钙,其反应式为



由于 $\text{C}_3\text{A}$ 的快速反应,加上 $\text{C}_3\text{S}$ 的反应放出大量热,使温度急剧上升,上述反应迅速进行而出现不可逆的固化现象,此现象称为急凝或瞬凝。因此,水泥在粉磨时都需掺加一定量的石膏,以保证正常凝结时间,防止急凝的发生,其反应式为



(三硫型水化硫铝酸钙)

铁铝酸四钙的水化反应及产物与 $\text{C}_3\text{A}$ 极为相似。