



21世纪普通高等院校新材料专业特色教材

HUNNINGTU JIQI ZHIPIN GONGYIXUE 混凝土及其制品工艺学

陈立军 张春玉 赵洪凯 主编

中国建材工业出版社

21 世纪普通高等院校新材料专业特色教材

混凝土及其制品工艺学

陈立军 张春玉 赵洪凯 主编

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土及其制品工艺学/陈立军,张春玉,赵洪凯

主编. —北京:中国建材工业出版社,2012.8

21 世纪普通高等院校新材料专业特色教材

ISBN 978-7-5160-0186-8

I. ①混… II. ①陈…②张… ③赵… III. ①混凝土—工艺学—高等学校—教材 IV. ①TU528

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第134331号

内 容 简 介

《混凝土及其制品工艺学》是根据教育部高等学校无机非金属材料专业指导委员会要求的无机非金属材料工程专业(技术性)人才培养的教学内容和知识结构框架编写的。本教材共分八章,分别为绪论,普通混凝土的组成材料,混凝土的性能与应用,混凝土的配合比设计及质量控制,混凝土的搅拌、输送、成型和养护,混凝土制品生产工艺,特殊性能混凝土和其他混凝土,混凝土材料试验。同时,介绍混凝土的发展过程和发展趋势。

本教材可作为高校材料专业的教材,也可供相关专业工程技术人员参考使用。

混凝土及其制品工艺学

陈立军 张春玉 赵洪凯 主编

出版发行:中国建材工业出版社

地 址:北京市西城区车公庄大街6号

邮 编:100044

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:23.25

字 数:577千字

版 次:2012年8月第1版

印 次:2012年8月第1次

定 价:52.00元

本社网址:www.jcbs.com.cn

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010)88386906

前 言

混凝土及其制品是经济发展和社会进步的重要基础材料,其需求量为我国之最。随着我国经济建设的快速发展和全球低碳经济的逐步兴起,以及水泥、混凝土工业技术和理念的不断进步,大力加强混凝土技术教育,及时更新、补充和完善水泥混凝土教材的知识体系和基本概念,深入认识混凝土及其制品生产工艺、组成、结构、性能和使用性能之间的相互关系,其意义十分重大。为此,《混凝土及其制品工艺学》的编写,在注重教材内容基础性和完整性的同时,加大拓展性和探索性。结合最新的国家标准、规范和研究成果,突出混凝土的耐久性问题,强调基本概念的细化,以及水泥组成结构与混凝土建筑性能之间的联系。力求体现混凝土化学成分和孔结构变化范围大的特殊性,及其对混凝土性能影响规律的复杂性,并试图揭示其变化规律的周期性和重复性。尽力满足混凝土技术教育和我国基础建设发展的形势需要。

本教材的特点主要体现在以下几个方面:

1. 注意习惯性思维和不完善用语的改变。国际混凝土界的著名教授 P. K. Mehta 指出:“混凝土世界与人类世界一样是非线性的,且在非线性中还有着不连续性”。其观点深刻表达了混凝土世界的多变性和复杂性。为了描述混凝土水泥浆体内部孔隙的尺寸范围(包括 7 个数量级)有多么宽广,Mehta 教授列出了相似的范围:以人的身高(相当于 CSH 中的层间孔)为起点,经过类似埃菲尔铁塔、珠穆朗玛峰等 6 个级别的变化后,以火星直径(相当于浆体中带入的气孔)为终点。在如此巨大的孔径变化范围内,同时伴随着混凝土化学组成和环境条件的变化,混凝土性能和使用性能的变化不是简单的线性,已是不争的事实。在不同的内部结构和外部环境条件下,其变化规律应具有不同的周期性和重复性。因此,我们应注意改变一些习惯性的思维和不完善的用语,例如“混凝土密实度越大或水胶比越小,耐久性越好”以及“增加混凝土密实度,改善混凝土孔结构”等等,这对于未用引气剂的混凝土和不能确保混凝土达到超密实的情况是十分重要的。

2. 强调耐久性概念的细化和耐久性评价方法的适用条件。鉴于混凝土耐久性的影响因素非常广泛和复杂,为了相对简化所研究的问题,人们在研究混凝土的耐久性时,通常针对规定的试验条件和某一方面的研究内容,如抗渗性、抗冻性或耐化学腐蚀性等。即使这样仍是非常复杂的问题。以抗冻性为例,国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)采用三种混凝土抗冻性能试验方法——慢冻法、快冻法和单面冻融法(盐冻法),并明确规定了每种试验方法的适用条件。然而,目前每种试验方法得到的试验结果之间的对应关系仍不十分明确;对于不同孔结构的混凝土,仍然不能完全用一种试验条件下的抗冻性结果去代替和判断另一种试验条件下的抗冻性。因此,需要将混凝土笼统的抗冻性概念细化为不同环境条件下的抗冻性(即在抗冻性概念前面加环境条件作定语,在抗渗性概念前面则加渗透驱动力作定语),并明确强调各种抗冻性概念的试验方法及其适用条件,不可

轻易地互相代替和表示。

3. 强调耐久性病害综合症和整体论思想。影响混凝土耐久性的各种内部作用和外部作用是紧密联系在一起的,它们互相制约、互相影响,将这些作用分割开来进行研究不符合实际情况。由于规定的试验条件与实际的环境条件差异较大,所得结论很多是不可采纳的,甚至是错误的。越来越多的工程事例证明,多种破坏因素的综合作用,是加速混凝土建筑破坏和混凝土质量劣化的重要原因。因此,P. K. Mehta 教授在世纪之交主张舍弃还原(分解)论方法,代之以整体(综合)论研究方法。中国科学院院士吴中伟先生也曾明确指出还原论的缺点,并在1987年就建议水泥与水泥基材料的科学研究工作近期宜以宏观(粗观)为主,以亚微观(细观)、微观研究作为验证和解释。要真正解决混凝土耐久性问题,有效延长混凝土的使用寿命,必须运用整体论的科学思想,着重研究综合破坏作用下的混凝土耐久性问题——混凝土耐久性病害综合症;弄清各种因素的主次、先后及其交互作用。

4. 注重水泥组成结构与混凝土建筑性能之间的联系。目前,我国的水泥生产企业与混凝土生产企业多数仍分别归属建材和建筑两个行业,这一差别导致水泥生产技术与混凝土生产技术的连贯、不协调。技术人员对两个行业间的互相了解不充分,配合不默契,不容易最佳地使水泥的组成结构满足混凝土建筑性能的要求。因此,本教材相对加强了水泥组成结构与混凝土建筑性能之间关系的探讨,以求对现状能够有所改进。

5. 完善混凝土孔结构的分类方法,同时提出高性能混凝土的孔结构种类。并通过对混凝土组成结构演变过程与发展趋势的叙述、分析和探讨,指出绿色混凝土的主要发展途径。

6. 强调水泥混合材与混凝土掺合料的概括分类及优化组合,从而有利于改善混凝土的综合性能,同时改善不同组成的胶凝材料与外加剂的适应性。

参加本教材编写的人员及分工如下:陈立军负责编写第1章、第2章(不包括外加剂一节)和前言;张春玉负责编写第5章、第6章、第7章和第2章外加剂一节;赵洪凯负责编写第3章、第4章和第8章;本教材的编写大纲由冯乃谦教授补充和审定。全教材由陈立军负责统稿,赵洪凯、张春玉协助整理。

由于编写人员的水平有限,错误和不当之处在所难免,恳请业内专家、学者和读者加以批评并指正。

编 者
2012年5月

发展出版传媒 服务经济建设

传播科技进步 满足社会需求

我们提供

图书出版、图书广告宣传、企业定制出版、团体用书、
会议培训、其他深度合作等优质、高效服务。

编辑部

010-68342167

图书广告

010-68361706

出版咨询

010-68343948

图书销售

010-68001605

jccbs@hotmail.com

www.jccbs.com.cn



中国建材工业出版社
China Building Materials Press

(版权专有，盗版必究。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。举报电话：010-68343948)

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 混凝土的定义、分类及特点	1
1.1.1 混凝土的定义及分类	1
1.1.2 混凝土的特点	2
1.2 混凝土材料的研究内容	2
1.3 混凝土的发展概况及趋势	3
1.3.1 混凝土的发展概况	3
1.3.2 混凝土的发展趋势	5
1.4 混凝土及其制品的主要工艺过程	6
1.5 混凝土基本概念的细化及其相互关系	7
1.5.1 混凝土强度概念的细化及其与耐久性的关系	7
1.5.2 混凝土渗透性概念的细化及其相互关系	7
1.5.3 混凝土抗冻性概念的细化及其相互关系	8
思考题	9
第2章 普通混凝土的组成材料	10
2.1 水泥	10
2.1.1 水泥的品种与组分材料	10
2.1.2 水泥的质量标准	12
2.1.3 水泥的组成结构与建筑性能	13
2.2 集料	20
2.2.1 集料的质量与性能	20
2.2.2 细集料的技术要求	22
2.2.3 粗集料的技术要求	24
2.2.4 再生混凝土集料	25
2.3 混凝土用水	26
2.4 外加剂	26
2.4.1 混凝土外加剂的定义和分类	27
2.4.2 外加剂的作用	29

2.4.3 减水剂·····	31
2.4.4 引气剂与引气减水剂·····	40
2.4.5 早强剂·····	45
2.4.6 缓凝剂与缓凝减水剂·····	48
2.4.7 其他外加剂·····	50
2.4.8 使用外加剂注意事项·····	51
2.5 掺合料·····	53
2.5.1 掺合料的概括分类与优化组合·····	53
2.5.2 粉煤灰·····	54
2.5.3 矿渣微粉·····	56
2.5.4 硅灰·····	58
2.5.5 其他矿物掺合料·····	59
思考题与习题·····	60
第3章 混凝土的性能与应用 ·····	61
3.1 新拌混凝土的性能·····	61
3.1.1 拌合物的工作性及其主要内容·····	61
3.1.2 拌合物工作性的检测方法·····	61
3.1.3 拌合物工作性的影响因素及选择·····	64
3.2 混凝土的早期性能·····	70
3.2.1 早期收缩·····	70
3.2.2 早期开裂·····	73
3.2.3 对策·····	75
3.3 混凝土的力学性能·····	77
3.3.1 混凝土的强度及影响因素·····	77
3.3.2 混凝土的形变·····	86
3.4 混凝土的耐久性·····	89
3.4.1 混凝土的抗冻性·····	89
3.4.2 混凝土的抗渗性·····	95
3.4.3 混凝土的碳化·····	96
3.4.4 混凝土的耐磨性·····	97
3.4.5 混凝土的化学侵蚀·····	98
3.4.6 混凝土的碱-集料反应·····	100
3.4.7 混凝土中钢筋的锈蚀·····	101
3.4.8 混凝土耐久性病害综合征·····	105

3.5 混凝土的其他性能	111
3.5.1 混凝土的热学性能	111
3.5.2 混凝土的电学性质	113
3.5.3 混凝土的声学性能	115
思考题与习题	116
第4章 混凝土的配合比设计及质量控制	117
4.1 普通混凝土的配合比设计	117
4.1.1 混凝土配合比设计的规范要求	117
4.1.2 混凝土配合比设计步骤	122
4.1.3 混凝土配合比设计实例	130
4.2 普通混凝土质量控制	133
4.2.1 强度的评定方法	133
4.2.2 过程控制措施	135
思考题与习题	147
第5章 混凝土的搅拌、输送、成型和养护	149
5.1 混凝土的搅拌工艺	149
5.1.1 混凝土的原材料加工、储存和输送	149
5.1.2 混凝土拌合物制备工艺	157
5.2 混凝土拌合物的输送	166
5.2.1 运输方法及选择原则	166
5.2.2 运输设备及性能	167
5.3 混凝土的浇注工艺	168
5.3.1 混凝土的浇注目的	168
5.3.2 混凝土上的浇注工艺	168
5.3.3 混凝土的浇注设备	171
5.4 密实成型工艺	171
5.4.1 振动密实成型工艺	172
5.4.2 离心脱水密实成型工艺	178
5.4.3 真空脱水密实成型工艺	182
5.4.4 悬辊密实成型工艺	183
5.4.5 其他密实成型工艺	185
5.5 混凝土养护工艺	185
5.5.1 养护重要性	185
5.5.2 养护方法	186

5.5.3 热养护中的体积变形	189
5.5.4 常温常压热养护	192
5.5.5 高压湿热养护	195
思考题与习题	199
第6章 混凝土制品生产工艺	200
6.1 概述	200
6.1.1 混凝土制品的分类	200
6.1.2 混凝土制品的生产工艺	202
6.1.3 混凝土制品的生产组织方法	203
6.2 常见混凝土制品生产工艺举例	206
6.2.1 混凝土板材生产工艺	206
6.2.2 预应力混凝土管、桩材生产工艺	210
6.2.3 混凝土墙材生产工艺	228
思考题与习题	240
第7章 特殊性能混凝土和其他混凝土	241
7.1 高性能混凝土	241
7.1.1 高性能混凝土发展背景及历程	242
7.1.2 高性能混凝土用原材料及其选用	243
7.1.3 高性能混凝土的性能	244
7.1.4 超密实高性能混凝土配合比设计	245
7.1.5 超密实高性能混凝土在施工中需注意的问题	247
7.2 纤维增强混凝土	247
7.2.1 概述	247
7.2.2 纤维增强混凝土的基本原理	249
7.2.3 钢纤维增强混凝土	252
7.2.4 玻璃纤维增强混凝土	255
7.2.5 聚丙烯纤维增强混凝土	256
7.2.6 碳纤维增强混凝土	258
7.3 聚合物混凝土	259
7.3.1 概述	259
7.3.2 聚合物的混凝土分类	259
7.3.3 聚合物的混凝土的特性	260
7.4 轻集料混凝土	265
7.4.1 概述	265

7.4.2 轻集料分类	265
7.4.3 轻集料混凝土特性	267
7.5 大体积混凝土	270
7.5.1 概述	270
7.5.2 温度裂缝的技术控制措施	271
7.6 道路混凝土	274
7.6.1 概述	274
7.6.2 混凝土路面技术要求和材料要求	275
7.6.3 水泥混凝土路面施工	279
7.7 喷射混凝土	280
7.7.1 喷射混凝土的用途	280
7.7.2 喷射混凝土的原材料选择	281
7.7.3 喷射混凝土施工	281
7.7.4 喷射混凝土特性	284
7.8 水下浇筑混凝土	285
7.8.1 概述	285
7.8.2 水下浇筑混凝土原材料选择	285
7.8.3 水下浇筑混凝土的性能	286
思考题与习题	287
第8章 混凝土材料试验	288
8.1 混凝土原材料试验	288
8.1.1 水泥性能试验	288
8.1.2 集料性能试验	293
8.1.3 外加剂性能试验	306
8.2 混凝土拌合物性能试验	341
8.2.1 混凝土拌合物和易性试验	341
8.2.2 混凝土拌合物毛体积密度试验	345
8.2.3 混凝土拌合物含气量试验	346
8.3 硬化混凝土性能试验	349
8.3.1 抗压强度试验	349
8.3.2 抗折强度试验	352
8.3.3 弹性模量试验	353
参考文献	360

第1章 绪 论

1.1 混凝土的定义、分类及特点

1.1.1 混凝土的定义及分类

凡由胶凝材料、集料和水(或不加水)按适当的比例配合、拌制成混合物,经一定时间后硬化而成的人造石材,称为混凝土。

混凝土的种类很多,其分类方法也很多。根据材料科学的四要素(生产方法、组成结构、性能和使用性能),混凝土可进行如下分类:

1. 按生产方法分类

可分为:预拌混凝土(商品混凝土)、泵送混凝土、喷射混凝土、压力灌浆混凝土(预填集料混凝土)、造壳混凝土(裹砂混凝土)、碾压混凝土、挤压、离心、真空脱水混凝土、热拌混凝土等。

2. 按组成结构分类

① 按所用胶凝材料的化学组成可分为:

水泥混凝土、沥青混凝土、聚合物水泥混凝土、聚合物胶结混凝土、聚合物浸渍混凝土、水玻璃混凝土、硅酸盐混凝土、石膏混凝土等。

② 按所用掺合料组成可分为:

粉煤灰混凝土、硅灰混凝土、磨细高炉矿渣混凝土、纤维混凝土等。

③ 按混凝土的主要孔径尺寸可分为:

超密实混凝土:以超微孔(半径 $r < 10\text{nm}$)为主要孔隙的混凝土。其孔隙内部冰点极低且不会产生碳化收缩等现象。

高密实混凝土:以微毛细孔($10\text{nm} < r < 100\text{nm}$)为主要孔隙的混凝土。其孔隙内部冰点较低,但会出现毛细孔凝结现象(系指对平液面不饱和的蒸汽在毛细孔中液化的现象)和毛细孔压力增大的现象(注:毛细孔凝结和毛细孔压力是毛细孔所具有的两个重要性质。毛细孔凝结现象可使混凝土孔隙内部的含湿量增大,但在大气中只有微毛细孔才能产生毛细孔凝结现象,大毛细孔不仅不吸收潮湿空气中的水分,其中原有的水分反而会被排入空气中;毛细孔压力可使混凝土的自收缩和毛细孔压力渗透性增大,造成混凝土早期裂缝增多,接触液体时的渗透深度加大,而毛细孔压力的大小亦与毛细孔半径呈反比关系,且始终具有使液体由外部渗入内部的作用方向,当液体由毛细孔一端渗入达到另一端时,毛细孔压力会改变作用方向)。

中密实混凝土:以大毛细孔($100\text{nm} < r < 1000\text{nm}$)为主要孔隙的混凝土。其孔隙内部不易

出现毛细孔凝结现象和毛细孔压力增大的现象。

非密实混凝土:以非毛细孔($r > 1000\text{nm}$)为主要孔隙的混凝土。

引气型混凝土:以孔径 $20 \sim 200\mu\text{m}$ 的气孔切断联通的微毛细孔和大毛细孔,从而减轻毛细孔压力和水压力(在每一段毛细孔中毛细孔压力都有正、反两个作用方向,其反向压力可抵抗水压力)引起的渗透现象;并可增加储备孔(被气体充填的孔隙)的相对数量,降低毛细孔凝结现象,提高混凝土在大气中的抗冻性。

3. 按性能分类

按混凝土表观密度可分为:

普通混凝土:干表观密度 $2000 \sim 2800\text{kg}/\text{m}^3$,由天然砂石作集料制成。是土建工程中最常用的混凝土。

轻混凝土:干表观密度小于 $2000\text{kg}/\text{m}^3$,由陶粒等轻质多孔集料配制的混凝土,或不采用集料而掺入加气剂或泡沫剂制成多孔结构的混凝土。

重混凝土:干表观密度大于 $2800\text{kg}/\text{m}^3$,由特别密实和特别重的集料配制的混凝土。具有不透过 X 射线和 γ 射线的性能。

按混凝土 28d 抗压强度(f_{cu})可粗略分为:低强混凝土、中强混凝土、高强混凝土和超高强混凝土等。

4. 按使用性能或用途分类

可分为结构混凝土(即普通混凝土)、防水混凝土、耐热混凝土、耐酸混凝土、装饰混凝土、大体积混凝土、膨胀混凝土、防辐射混凝土、道路混凝土以及高性能混凝土等。

1.1.2 混凝土的特点

混凝土是当代用量最大的建筑材料,它有如下优点:

(1)材料来源丰富,配制灵活,造价低廉。

(2)混凝土拌合物具有良好的可塑性和流动性,易于浇注成型。

(3)混凝土组成材料之间的匹配性好。如混凝土与钢筋有牢固的粘结力,且与钢筋的线膨胀系数基本相同。

(4)抗压强度高,配制合理即有良好的耐久性。

(5)耐火性好,且可代替钢、木结构,能节省大量钢材和木材。

(6)环保性好,混凝土可利用各种工业废渣,是一种较好的环境协调材料。

混凝土材料也存在如下不足之处:

(1)自重大,比强度小。

(2)抗拉强度低,脆性大,容易开裂。

(3)导热系数大,保温性差。

(4)硬化较慢,生产周期长。

1.2 混凝土材料的研究内容

任何材料都包括四个要素,即生产方法、组成结构、性能和使用性能,混凝土材料的研究内

容就是对这四个要素及其相互关系进行研究。

首先要研究的是混凝土材料的生产技术,包括混凝土原材料的生产技术和品种选择,混凝土的配方设计,混凝土生产的工艺及工业装备的选择等。目前,混凝土生产技术本身仍然是一门经验性很强的实验科学,还没有达到以理论为指导的目标成品设计的水平。因此,需要继续加强研究混凝土的生产原料、方法、手段与混凝土组成结构的相互关系。如:混凝土原材料的化学组成、颗粒组成及成型方法等与混凝土的微观结构、细观结构和宏观结构的关系。尤其是水泥及其掺合料的颗粒组成与混凝土孔结构的关系,以及在有减水剂或压力成型的情况下两者之间的关系,一直缺乏足够充分的研究。

同时要重点研究混凝土材料的组成结构与性能及使用性能的关系。特别是当混凝土的组成结构差别较大时,混凝土的性能及使用性能随之发生变化的规律要重点研究。掌握这种变化规律,是根据混凝土的使用要求设计混凝土组成结构的关键所在。如:混凝土的化学组成、孔结构与混凝土耐久性的关系。从根本上讲,混凝土的耐久性多半是孔结构控制的。要结合胶凝材料和混凝土组成结构的发展、演变过程及其相应的使用寿命进一步加强应用基础研究,认真分析、总结其中的相互关系,逐步建立和完善相应的理论。

第三要研究混凝土材料性能检验、测试与质量评估的方法和手段。尤其是对混凝土耐久性的检测和评价方法,还存在很多需要研究的问题。如:混凝土在不同环境条件下的抗冻性或抗渗性(首先应该在概念上进行细化和区分)应该采用不同的检测和评价方法,同时要逐步建立起不同组成结构的混凝土与不同的环境条件下抗冻性或抗渗性之间的对应关系。从而达到根据环境条件和使用要求设计混凝土组成结构的目的。

1.3 混凝土的发展概况及趋势

1.3.1 混凝土的发展概况

早在公元前,古罗马人就利用石灰与火山灰混合料浆加入石渣、砖块、天然卵石等制成混凝土。利用这种混凝土建成的各种建筑,如著名的万神庙、古罗马竞技场等已有 2000 年左右的历史,至今其整体结构或主要部分依然完好。与之类似,我国也有利用石灰与火山灰筑造的部分长城和城墙,而且进一步利用人造火山灰——烧黏土或红砖粉拌合石灰,在明代和清代建成各种储水和输水建筑,其功效也经过数千年和数百年的考验。所不同的是古罗马火山灰本身含有约 10% 的 Na_2O 和 K_2O (与石灰混合后实质就是最原始的碱激发水泥),而我国和世界上大多数国家的火山灰都不含有那么多的 Na_2O 和 K_2O 。因此,世界上大多数石灰火山灰混凝土,都不具有快速的凝结硬化能力和较高的早期强度。随着历史的发展,石灰火山灰胶凝材料逐步被天然水泥和波特兰水泥所取代。对比混凝土所用胶凝材料种类的变化过程,可知其实质是矿物组成由基本独立的活性 CaO 和活性 SiO_2 、 Al_2O_3 矿物体系向合成的活性硅铝酸钙矿物体系的转变,也是其化学成分当中 CaO 含量与 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 含量之比大体上由低向高的转变。结果使混凝土得到了更优良的工作性、凝结时间和早期强度,失去的却是数百年和数千年的使用寿命,同时还伴随着烧成能耗和碳排放量的增加。

现代混凝土不仅与古代混凝土组成结构的差别很大,而且现代混凝土本身的组成结构也

在不断变化。现代混凝土的发展历史已有 200 年左右。其起始年代以 1824 年英国的一个施工人员约瑟夫·阿斯普丁提出的波特兰水泥专利,和 1825 年俄国建筑工程师出版的第一本关于水泥的专著为主要标志。至今,现代混凝土和水泥的生产技术一直在不断地发展,特别是在近几十年内出现了很大的变化。如今混凝土材料的化学组成、矿物组成和颗粒组成乃至水的掺量,都已经不同于当初混凝土工业发明的、世界性通用的 20MPa 混凝土。

20 世纪 30 年代末,美国发明了松脂类引气剂和纸浆废液减水剂,使混凝土的耐久性和易性得到前所未有的提高,昭示着外加剂使用和流动性混凝土时代的开始。20 世纪 60 年代,日本和德国相继开发、研制成功奈系高效减水剂和三聚氰胺树脂系高效减水剂。使用高效减水剂时,在相同水胶比的条件下,可以使混凝土的坍落度成倍提高,即使是水胶比很低的高性能混凝土,仍能使混凝土坍落度达到 200mm 或 250mm。在混凝土中掺入外加剂的做法并非现代才有。罗马建筑告诉我们,当时的混凝土中经常加入鸡蛋白或动物血,来改善混凝土的工作性和耐久性。唐宋以来用桐油、牛马血、糯米汁、羊桃藤汁掺入石灰砂浆中提高防水与耐久性。近代的各种增强混凝土,掺加混合材与各种外加剂,都是用来改善性能,以达到增强、耐久、经济等目的。

目前,一些工业发达国家,已基本在全部混凝土中掺用外加剂,其中必掺的外加剂是引气剂,只有在少数的特种混凝土中不掺引气剂,如日本、美、英等许多国家就是这样。我国在 20 世纪 50 年代就已经使用外加剂了。在 70 年代中叶,又掀起了一个使用和研制外加剂的高潮,但与国外发达国家相比仍有很大差距。尤其是引气剂的使用情况,目前与发达国家的使用情况几乎是相反的,只在少数的混凝土中掺用了引气剂,还没有达到在大多数混凝土中掺用引气剂。

伴随着混凝土外加剂的发展,20 世纪 30 年代,美国开始采用集中拌合混凝土的大型化生产方式,奠定了近代预拌混凝土工业的基础。40 年代,德国发明了聚合物混凝土,改善了混凝土的脆性,提高了抗渗和抗蚀能力。60 年代,美国发明了聚合物浸渍混凝土;苏联开发了钢丝网水泥;中国采用玻璃纤维增强水泥。此后,世界各国相继开发钢纤维、碳纤维、聚合物纤维作为增强材料,使混凝土的抗裂性提高了一大步。

在近代混凝土技术发展的同时,现代硅酸盐水泥的生产也在发生变化,为了追求水泥的高早期强度,水泥企业不断提高水泥中硅酸三钙的含量和粉磨细度,以便加速混凝土模板的周转,提高生产效率和竞争力,但也给混凝土带来了负面影响。不仅混凝土的后期强度增幅很低,而且影响耐久性。尤其是在国内外混凝土减水剂普遍使用的情况下,使混凝土组成结构的改变更加明显,从而导致混凝土的性能发生了显著变化。例如,高强混凝土的技术发展经过 3 个阶段:第一阶段采用振动加压等方法降低水胶比;第二阶段采用高效减水剂降低水胶比,期间伴随着水泥矿物组成和粉磨细度的变化;第三阶段采用高效减水剂和细磨掺合料甚至包括超细硅灰复掺提高强度,不仅使混凝土的密实度进一步提高,而且改善了胶凝材料的化学组成(降低了胶凝材料的 CaO 与 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 含量之比)。三个阶段生产的高强混凝土,其组成结构都有较大变化(使混凝土由中等密实结构逐步达到高密实和超密实结构),混凝土的 28d 强度也不断提高。因此,高强混凝土的概念也在不断变化。

国际上 20 世纪 50 年代的高强混凝土为 35MPa,70 年代为 50MPa,80 年代为 60MPa,90 年代为 80MPa。我国《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)和《建筑材料术语标准》

(JGJ/T 191—2009)将高强混凝土定义为:强度等级不低于 C60 的混凝土。我国已建成逾 150m 的超高层建筑已有 100 幢,其中一批使用了 C60 泵送混凝土,最高达 110MPa。现在人们已经能够配制 150MPa 的混凝土;配制 200MPa 的活性粉末混凝土(掺入纤维,去除粗骨料,增大堆积密度和均质性)。活性粉末混凝土在薄壁钢管的约束下,抗压强度可提高至 375MPa;使用金属粉末取代砂子时,混凝土的抗压强度甚至可达 800MPa。

然而,在混凝土强度不断提高的进程当中,混凝土的耐久性并非全部得到了提高,其中甚至还有降低的现象,特别是强度提高的初级和中级阶段。从 20 世纪 70 年代起,发达国家已有投入使用的诸多基础建设和重大工程,出现了过早破坏的问题。如美国有 25.3 万座混凝土桥梁,桥面板使用不到 20 年就开始破裂。英国英格兰的中环城快车道上有 8 座高架桥,全长 21km,总造价只有 2800 万英镑,而 2004 年修补费用达 1.2 亿英镑,接近造价的 5 倍。我国房屋与基础设施的使用年限低于世界平均水平,且远远达不到设计的要求。有的公路桥梁甚至仅使用 3~5 年就出现破损,个别的桥梁建成后尚未投入使用已需要维修,甚至边建边修,大大缩短了混凝土结构的服役寿命。其内在原因与水泥中 C_3S 含量和粉磨细度的盲目提高以及混凝土水胶比的不适当变化都有必然的联系。

为了提高混凝土的耐久性,1968 年以来,日本、美国、加拿大、法国、德国等国家大力投入开发和研究高性能混凝土。1990 年,美国国家标准与技术研究院(NIST)和 ACI201 委员会将其定名为“HPC”,它否定了过去过于偏重强度的发展道路,美国学者认为:HPC 是一种易于浇注、捣实、不离析,能长期保持高强度、高韧性和体积稳定性,在严酷条件下寿命很长的混凝土。我国学者及专家认为:高性能应体现在工程力学特性、新拌混凝土施工特性、使用寿命和节能利废(经济学特性)的综合能力之上。然而,在何种应用环境下哪种结构的混凝土才具有最佳的技术经济性能,以及如何采用切实可行的手段使各种混凝土具有相对的高性能,目前尚需不断深入的研究。

现今混凝土的耐久性指标有些被定在 30 年到 50 年,有些情况被定为一百年到数百年,波动幅度有增大的趋势。其最低使用寿命的确定已明显低于当初全世界混凝土工业通用的 20MPa 混凝土,实际上还有更低的情况;但最高使用寿命的确定却超过当初的 20MPa 混凝土。混凝土使用寿命与混凝土组成结构的对应关系,以及混凝土生产技术(包括外加剂的使用、水泥矿物组成、掺合料组成和粉磨细度等)与混凝土组成结构的相互关系,还需结合混凝土组成结构和生产技术的演变过程及其实际寿命,进行更深入的研讨和详细的总结。

1.3.2 混凝土的发展趋势

对照混凝土使用寿命的波动与混凝土组成结构的变化,以及混凝土外加剂的使用、水泥矿物组成和粉磨细度等因素的变化情况,可以逐步了解混凝土生产技术、组成结构和使用寿命三者之间的相互关系。古罗马混凝土和我国古代的石灰火山灰混凝土,以其合理的化学成分、矿物组成、颗粒组成及施工方法使其使用寿命达数千年之久,其组成结构的合理之处非常值得现代混凝土借鉴。现代混凝土较短的使用寿命及其出现的某些过早破坏现象,与其组成结构的不合理有着必然的联系。然而,现代混凝土优异的早期强度和工作性也是时代的需要;从生态环保的角度出发,现代混凝土的使用寿命不应仅满足几十年的使用要求,但也不是所有混凝土都要有上千年的使用寿命。因此,未来混凝土的组成结构取现代混凝土和古代混凝土两者之

长、补两者之短是必然的发展趋势,也是维持生态平衡、实现绿色混凝土的必由之路。

根据不同的需要预测混凝土的发展方向,包括:快硬、高强、轻质、高耐久性、多功能、节能、环保等。但并非任何混凝土都要集这些特点于一身,各种性能混凝土的组成结构和生产方法不可能完全相同;要使同一种混凝土在任何情况下都具有最佳的性价比也不现实。但无论任何用途和性能的混凝土都应以绿色为核心,这是混凝土最重要的发展方向。要针对不同的需要确保不同混凝土的最佳性价比和生态效益。

综合古今混凝土组成结构的特点和优势,强化互补,绿色混凝土组成结构的发展途径主要包括以下3个方面:

1. 中密实混凝土(即以大毛细孔为主要孔隙的混凝土)。应重点研究古代混凝土和现代混凝土所用胶凝材料的化学成分、矿物组成、颗粒组成和外加剂的区别及其作用效果,以及混凝土孔结构的差别及相应的使用寿命,并根据用途和性能的需要进行优势互补。例如:合理控制水泥矿物组成和粉磨细度;优化混凝土掺合料组成、细度及其与外加剂的配合,控制适当的水胶比等。确保混凝土胶凝组分当中具有合理的 $\text{CaO}/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值与孔结构,从而提高混凝土的使用寿命,同时避免烧成、粉磨能耗和外加剂(合理的颗粒组成可以少掺甚至不掺减水剂和引气剂)的浪费。另外,还应研究开发硅酸盐水泥与碱激发水泥优势互补的复合技术(类似苏联的低需水性水泥)。

2. 引气混凝土(以孔径 $20 \sim 200\mu\text{m}$ 的气孔切断联通的微毛细孔和大毛细孔)。应在混凝土胶凝材料的化学成分、矿物组成优化基础之上,推广应用高效引气剂或引气减水剂,实现其与不同胶凝材料的合理匹配,达到最佳的引气量和气孔分布。对于胶凝材料的颗粒组成不理想、混凝土水胶比受强度等因素控制而不宜调整,不能确保混凝土达到中密实或超密实结构的情况下,引气混凝土是提高混凝土耐久性的必由之路。

3. 超密实混凝土(以超微孔为主要孔隙的混凝土,为保证绝大多数孔隙半径 $< 10\text{nm}$,宜控制最可几孔半径或平均半径 $< 5\text{nm}$)。应在混凝土胶凝材料的化学成分、矿物组成优化基础之上,研究采用加入高效外加剂、超细粉和现代纤维材料复合制备混凝土的技术。实现无机和有机化学的结合,无定形和胶体的结合,粉体与纤维的结合,使混凝土获得更高的强度、耐久性和性价比。

1.4 混凝土及其制品的主要工艺过程

经过混凝土原材料的选择及其配合比设计、试验以后,混凝土及其制品生产工艺的主要过程为:混凝土拌合物制备和质量检验与控制——混凝土的运输与输送——混凝土结构与制品的成型——混凝土的养护——混凝土工程质量检验与验收。

混凝土拌合物的制备过程分为现场制备和预拌制备两种方法。现场制备是传统的方法,已经逐渐被预拌的工艺所取代。预拌混凝土工艺是一种工厂化的集中的生产方式,具有工艺合理、设备先进、计量精确、控制较严的优势,有条件生产高技术混凝土,生产效率较高,对环境的影响较低,已经成为混凝土拌合物制备工艺的主要方法。