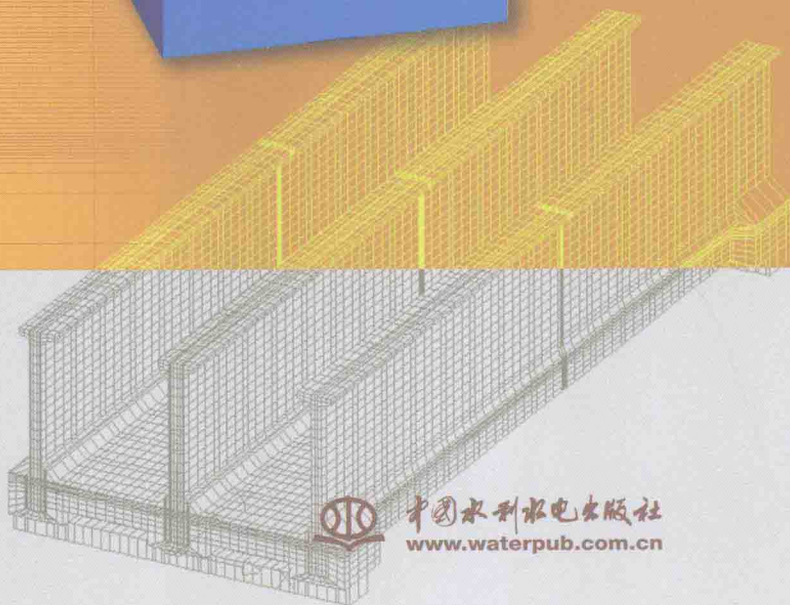
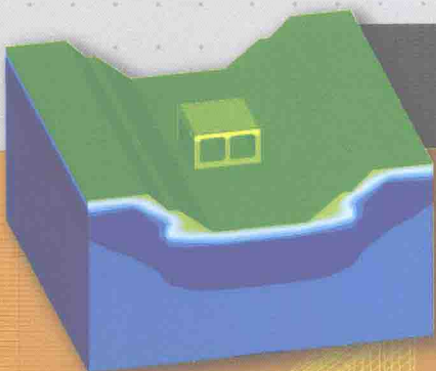


# 水工混凝土薄壁结构的 温控防裂

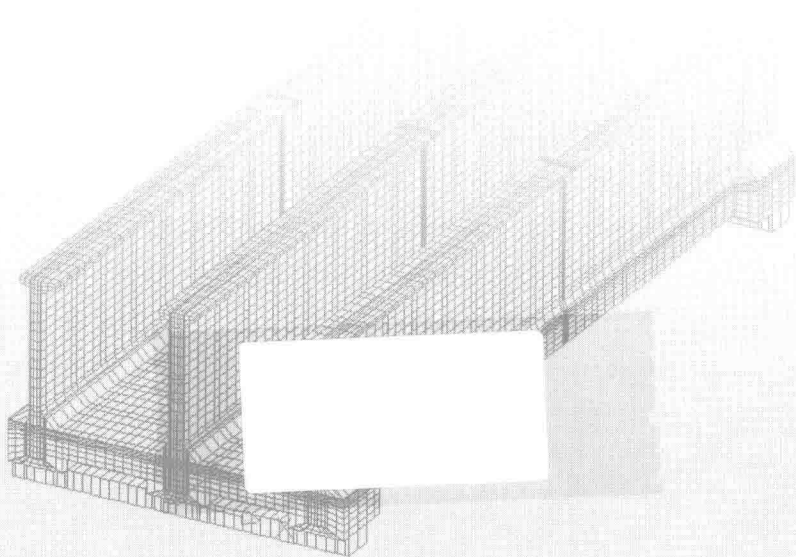
王振红 于书萍 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 水工混凝土薄壁结构的 温控防裂

王振红 于书萍 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书通过全面阐述水工混凝土薄壁结构的温控防裂特点和难点,提出了该类混凝土结构的温控防裂方法和措施。主要内容有薄壁结构混凝土的热力学特性、温度应力仿真计算理论和方法、水工薄壁混凝土热学参数试验、水工薄壁混凝土结构的裂缝成因和防裂方法以及工程实际应用和取得的实际效果等。

本书涉及面广、内容翔实,从参数研究到结构计算、从基本理论到工程应用等全方位进行阐述,可作为水工混凝土薄壁结构科研、设计、施工等人员的参考书,也可作为大体积混凝土温控防裂研究人员的参考书,还可以作为高等院校水工结构类专业的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

水工混凝土薄壁结构的温控防裂 / 王振红, 于书萍  
著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 10  
ISBN 978-7-5170-4819-0

I. ①水… II. ①王… ②于… III. ①水工结构—混凝土结构—薄壁结构—汽温控制②水工结构—混凝土结构—薄壁结构—防裂 IV. ①TV332.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第247040号

书 名	水工混凝土薄壁结构的温控防裂 SHUIGONG HUNNINGTU BOBI JIEGOU DE WENKONG FANGLIE
作 者	王振红 于书萍 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 12.5印张 180千字
版 次	2016年10月第1版 2016年10月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	45.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

混凝土温度裂缝问题一直是工程界所面临的一大难题，它不但影响工程的耐久性和使用寿命，而且也影响工程的安全性。长期以来，国内外学者对混凝土温度裂缝问题进行了大量的科学研究，但终因问题异常复杂，影响因素众多，至今尚未得到很好解决。在水利界，这方面的叙述主要集中在以大坝为代表的大体积混凝土温度裂缝防止方面，而对水闸、渡槽、泵站、厂房、地涵、船闸、隧道等水工混凝土薄壁结构的温度裂缝问题叙述相对较少。水工混凝土薄壁结构和大体积混凝土温控存在较大区别，主要表现在材料特性和结构型式方面，其温控防裂是一个复杂的系统工程，既要从混凝土材料本身特性进行研究，也要从施工技术上予以改进。

笔者长期从事水工结构工程工作，主要研究方向是混凝土的温控防裂。在经历了多个薄壁混凝土工程的建设历程、见证了一个个水工混凝土薄壁结构温控防裂难题被攻克之后，心中充满了欣慰与感动。在欣喜之余，笔者认为有必要对水工混凝土薄壁结构施工时遇到的温控防裂技术问题及研究方法进行梳理与总结，对提高个人知识水平和我国水工混凝土的温控防裂措施技术大有裨益，同时对类似工程的施工也能起到一个参考作用。鉴于此，在总结以

往工程温控防裂技术的基础上，编撰了本书。

本书针对水工薄壁结构混凝土的热力学特性，借助仿真计算理论，结合相关试验和实际工程，对施工期的温控防裂进行了较深入、系统的阐述，主要内容包括：①水工薄壁结构混凝土的热力学特性，探讨其变化规律；②水工混凝土薄壁结构的相关试验，确定混凝土的表面放热特性；③混凝土薄壁结构温度裂缝形成机理和防裂方法，特别是大体积混凝土结构中的水管冷却技术在水工混凝土薄壁结构中的应用等；④水工混凝土薄壁结构的实际应用等。

本书在编撰过程中得到了有关专家和同仁的大力支持和帮助，中国水利水电科学研究院张国新教高、刘毅教高、朱新民教高、刘有志教高和朱振泱高工等提出了许多宝贵的建议，在此表示深深的感谢。此外，还要感谢国家自然科学基金项目（51579252，51439005）、国家重点研发计划项目（2016YFB0201000）、国家重点基础研究发展规划项目（2013CB036406，2013CB035904）和流域水循环模拟与调控国家重点实验室基金项目对本书所提供的支持和资助。

由于混凝土工程技术发展迅速，新材料和新工艺层出不穷，加之个人的水平所限、编写时间仓促，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者

2016年7月于北京

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 工程背景 .....	1
1.2 高性能混凝土研究进展 .....	4
1.3 混凝土施工期仿真计算方法研究进展 .....	13
1.4 混凝土温度参数反分析研究进展 .....	17
1.5 施工期温控防裂方法研究进展 .....	20
1.6 主要研究内容 .....	23
<b>第 2 章 高性能混凝土的热学和力学特性</b> .....	26
2.1 概述 .....	26
2.2 高性能混凝土的热学特性 .....	26
2.3 高性能混凝土的力学特性 .....	42
2.4 高性能混凝土的湿度场 .....	56
2.5 本章小结 .....	57
<b>第 3 章 混凝土温度和应力仿真计算理论与方法</b> .....	58
3.1 概述 .....	58
3.2 混凝土非稳定温度场基本理论和有限单元法 .....	58
3.3 混凝土应力场基本理论和有限单元法 .....	65
3.4 混凝土水管冷却计算方法 .....	68
3.5 本章小结 .....	72

<b>第 4 章 混凝土热学参数试验与反分析</b> .....	73
4.1 概述 .....	73
4.2 反分析原理与算法 .....	74
4.3 混凝土室内立方体非绝热温升试验 .....	84
4.4 带冷却水管的混凝土室内长方体非绝热试验 .....	89
4.5 风速影响下长方体混凝土的非绝热温升试验 .....	94
4.6 塑料管和铁管冷却效果试验 .....	101
4.7 本章小结 .....	106
<b>第 5 章 混凝土薄壁结构的裂缝成因与防裂方法</b> .....	107
5.1 概述 .....	107
5.2 裂缝形成机理 .....	108
5.3 防裂方法 .....	110
5.4 应注意的几个问题 .....	121
5.5 本章小结 .....	134
<b>第 6 章 工程应用</b> .....	135
6.1 概述 .....	135
6.2 水闸 .....	137
6.3 渡槽 .....	150
6.4 本章小结 .....	172
<b>第 7 章 结论与展望</b> .....	174
7.1 主要结论 .....	174
7.2 主要创新点 .....	175
7.3 展望 .....	176
<b>参考文献</b> .....	178

## 绪 论

### 1.1 工程背景

#### 1.1.1 研究背景

目前全国正处在水利工程建设的高峰时期,大量水工混凝土薄壁结构工程投入建设。南水北调东线和中线工程约有 2000 座新建渡槽、泵站、水闸、船闸、倒虹吸、地涵和各种交叉建筑物等混凝土工程。与混凝土大坝相比,水闸、地涵、泵站等水工建筑物混凝土体积相对较小,但由于其独特的功能和相对复杂的结构型式与受力特点,这些结构在施工期产生裂缝的现象一直较为普遍,严重困扰工程界。同时,在这类工程的建设当中,高性能泵送混凝土越来越被广范使用,其施工优点和较大经济效益受到工程建设者喜欢,但高性能泵送混凝土具有水泥用量多、坍落度大、水化反应剧烈、热量多且早期集中释放、弹性模量大和体积变形大等特点,致使裂缝产生现象更加普遍、更是防不胜防。因此,薄壁混凝土的特点困扰工程的建设 and 施工质量,成为全国水利行业学术界和工程界特别关注的问题。

资料显示<sup>[1]</sup>,湖北省陈家冲溢洪道,1965 年建成,1989 年 2 月检查发现,在闸墩、底板等部位发生各类裂缝 81 条。马头寨溢洪道 1988 年浇筑,1991 年 2 月陆续在侧墙底板、闸墩等部位发现 69 条裂缝,总长达 931m。同时施工的巩河水库溢洪道也产生了类似裂缝。位于长江江堤的大型涵闸(新滩口、余码头、武穴等),在底板和胸



墙部位都发生了较为严重的裂缝<sup>[2]</sup>。在观音寺闸的底板上曾发现了多达 127 条裂缝,其中 24 条为贯穿性裂缝<sup>[3]</sup>;在沙颍河郑埠口枢纽工程节制闸闸墩上曾发现 45 条裂缝<sup>[4]</sup>;新河大坝在混凝土铺盖上发现了 3 条横向贯穿性裂缝<sup>[5]</sup>;在法泗闸也发现了裂缝<sup>[6]</sup>。

叶国华<sup>[7]</sup>调查了我国华东六省一市几个地区近 50 座大中型船坞、水闸、船台、重力式码头、卸煤坑道、翻车机房和泵站等较大的建筑物共 800 多段墙体、墩体、底板和基础结构,其中有 200 多段都出现裂缝,而且大多为贯穿性裂缝,并指出产生裂缝的原因除了与浇筑块温差和外在约束有关外,混凝土的收缩如干缩、自生体积收缩与裂缝的产生也有直接关系。北京永定河与小清河闸墩以及河南陆浑水库溢洪道闸墩由于在设计中未考虑温度应力,施工单位也未采取必要的温控措施,致使结构在施工期就出现了许多裂缝<sup>[8]</sup>。另外,泵送混凝土闸墩如石梁河泄洪闸,在混凝土龄期 3~20d 时就不同程度地产生了裂缝。闸墩裂缝一般沿竖直方向出现,常发生在沿长度方向的中部,在  $1/3 \sim 1/2$  高度范围内。

可见,裂缝现象是层出不穷、无处不在的,有时新材料和新工艺的应用,也会带来一些新的问题,为混凝土的裂缝防治带来新的困难。

### 1.1.2 研究意义

混凝土结构裂缝的危害是显而易见的,它的存在和发展,不仅影响建筑物的外观,同时也使建筑物容易产生渗漏,加速混凝土的碳化,降低混凝土抵抗各种侵蚀性介质的耐腐蚀性能力,影响混凝土结构物的结构强度和稳定性,危及建筑物的正常使用和缩短建筑物的使用寿命。如何有效地防止裂缝的形成和发展是建设、设计和施工方都极为关注的问题,也是学术界研究的热点之一。

因此,根据目前国内众多工程建设的需要,有必要对水工混凝土薄壁结构,特别是以大型输水渡槽、泵站和地涵工程为代表的高性能泵送混凝土的裂缝成因和施工防裂方法进行深入研究,借助高精度仿真计算理论和方法及计算参数准确确定理论与方法的研究和

敏感性仿真计算分析,预测裂缝产生的具体机理、启裂时间、启裂部位和发展过程等,进而能够提出更加科学、效果更好、经济且易行的防裂措施,指导工程施工,提高混凝土工程的安全度和耐久性,更好地为国民经济建设服务。

### 1.1.3 问题的提出

在水工混凝土薄壁结构建设过程中,大多使用高性能混凝土(High Performance Concrete, HPC),其特性与普通混凝土(Conventional Concrete, CC)明显不同。高性能混凝土水泥用量多,水化反应剧烈,混凝土温升高;同时,为满足混凝土某种特性的需要,往往在混凝土中掺入各种矿物掺合料和外加剂。研究表明,温度、矿物掺合料和外加剂都不同程度地影响着混凝土的热学和力学参数,影响着混凝土温度和应力特性的发展,进而影响混凝土裂缝的产生。因此,研究温度、掺合料和外加剂对高性能混凝土热力学特性的影响就成为重要的课题。

统计表明<sup>[9]</sup>,在水工混凝土薄壁结构裂缝问题中,裂缝主要是在混凝土施工阶段产生的,80%的裂缝又是因体积变形引起的,混凝土的体积变形主要表现为收缩。体积收缩包括温降冷缩、基本收缩(自生体积收缩)、干缩、化学收缩和塑性收缩等,这些收缩相互影响,且随混凝土龄期的发展不断变化。为了防止裂缝的产生,施工阶段每种收缩变形的形成机理和影响因素是值得关注的问题。

把大体积混凝土中的水管冷却技术应用到水工混凝土薄壁结构中无疑是一种技术上的突破和创新。实践证明,埋设冷却水管是一项经济、有效且方便的混凝土温控手段,但水管沿程水温的计算与温度梯度 $\partial T/\partial n$ 有关,因此水管冷却混凝土温度场是一个边界非线性问题,温度场的解无法直接求出,必须采用迭代解法逐步逼近真解。在他人<sup>[10,11]</sup>工作的基础上,针对实际工程中的水管布置大都为蛇形布置这一问题,河海大学朱岳明教授提出按水流方向计算沿程水温,不必采用截弯取直的方法,可以很好地计算蛇形水管中流动水的水温增量,提高了温度及温度应力计算的精确程度。该方法无

疑对其工程应用提供了可靠的科学依据。

混凝土特别是早期混凝土温度和应力计算精度不高的一个主要原因是不能准确确定混凝土的热学参数,包括绝热温升、导热系数和不同物盖条件下混凝土表面热交换系数。这些参数的确定一般通过仪器进行测定或者经验公式进行计算,但至今还缺少这方面的仪器,此外,经验公式计算的热学参数又往往和实际情况有较大出入。为了克服这些缺陷,借助先进的反分析理论和方法,对这些参数进行反演就显得十分必要。

水工混凝土薄壁结构一般型式单薄、约束明显,在分析裂缝成因的基础上,有必要提出相应的防裂措施。混凝土的温控防裂要从内因和外因两方面进行,内因是从材料方面进行优化,外因是从施工技术方面予以改进。另外,针对薄壁结构的特点,一些因素的影响是不得不考虑的,比如寒潮、昼夜温差等。

在研究高性能混凝土基本热学参数和力学参数特性的基础上来分析混凝土温度和应力特性,进而再分析结构的温控防裂问题,无疑是一个循序渐进、逐步深入的过程。另外,先进的计算分析思路也是一个重要的环节,比如本书提倡的“混凝土热学参数反演分析+温控参数敏感性分析→施工反馈分析→温控防裂方法”这一新的防裂思路,为后续仿真计算的准确把握提供了保障,值得在工程中应用推广。

总之,水工混凝土薄壁结构施工期的温控防裂是一个非常复杂的系统工程。

## 1.2 高性能混凝土研究进展

### 1.2.1 高性能混凝土的定义

世界上对高性能混凝土的研究及其应用与日俱增,高性能混凝土越来越广泛地应用于各国工程实际。高性能混凝土是从高强混凝土发展而来的,不同国家、不同学者依照各自的认识、实践、应用

范围和目的要求的差异，对高性能混凝土有不同的定义和解释<sup>[12]</sup>：

(1) 美国国家标准与技术研究所 (NIST) 与美国混凝土协会 (ACI) 认为 HPC 是用优质水泥、集料、水和活性细掺料与高效外加剂制成的，同时具有优良的耐久性、工作性和强度的匀质混凝土。1990 年 5 月，美国国家标准局组织召开了关于 HPC 的专题讨论会，参加者认为，HPC 具备的性能应包括易于浇注捣实（免振自流平）而不离析，优良且长期保持的力学性能；高早强、高韧性；体积稳定；严酷环境下的长久使用寿命。对于普通混凝土可通过控制水灰比来调节抗压强度，但提高强度时，工作性、耐久性、体积稳定性等综合性能指标并不能得到保证，而 HPC 则从全方位角度改变了混凝土的工作概念。

(2) 欧洲重视强度与耐久性，常把高性能混凝土与高强混凝土并提，法国与加拿大正在研究超高性能混凝土，北欧正开发高强 HPC。1992 年法国 Malier 认为，HPC 的特点在于有良好的工作性、高的强度和早期强度、工程经济性高和高耐久性，特别适用于桥梁、港工、核反应堆以及高速公路等重要的混凝土建筑结构。

(3) 日本重视 HPC 的工作性与耐久性，而不过分强调强度。1992 年日本的小泽一雅和冈村甫认为，HPC 应具有高工作性（高的流动性、黏聚性与可浇注性）、低温升、低干缩率、高抗渗性和足够的强度。同年，日本的 Sarker 提出，HPC 具有较高的力学性能（如抗压、抗折、抗拉强度）、高耐久性（如抗冻融循环、抗碳化和抗化学侵蚀）、高抗渗性，属于水胶比很低的混凝土。

(4) 我国著名的混凝土科学家、中国工程院院士吴中伟教授认为，高性能混凝土是一种新型的高技术混凝土，是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上采用现代技术制作的混凝土，是以耐久性作为设计的主要指标，针对不同用途的要求，有重点对耐久性、施工性、适用性、强度、体积稳定性和经济性予以重点保证。赵国藩认为，高性能混凝土是指具有高强度、高耐久性、高流动性等多方面优越性的混凝土<sup>[13]</sup>。

笔者认为，高强混凝土不一定是高性能混凝土，高性能混凝土

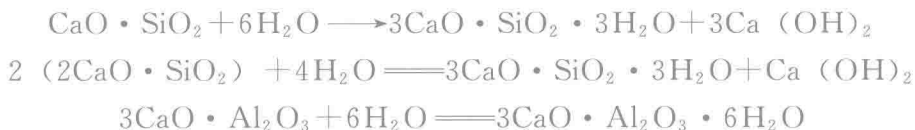
也不只是高强混凝土，而是包括各种强度等级的具有良好的各种性能的混凝土。水工混凝土薄壁结构要求有很长的安全使用期，且所处环境都比较复杂（寒冷、干热以及高速水流冲刷等），因此对耐久性、体积稳定性和工作性有很高的要求，而对强度要求不是很高。

## 1.2.2 高性能混凝土组分

### 1.2.2.1 水泥

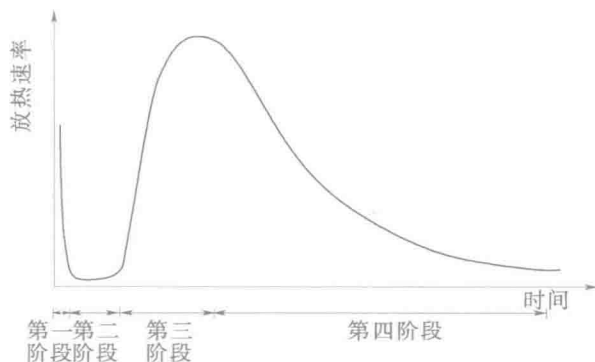
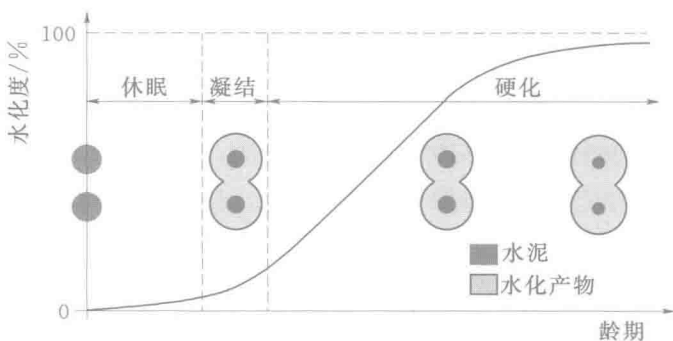
水泥的水化热是单位质量水泥中的各种化合物与水反应的过程中放出的热量，以 J/g 表示。影响水泥水化热的因素很多，包括水泥熟料矿物组成、水泥细度、混合材掺量及质量、水灰比、养护温度等，但主要是决定于熟料矿物的组成与含量。硅酸盐水泥熟料主要由氧化钙、氧化硅、氧化铝、氧化铁 4 种氧化物组成，这些氧化物并不是单独存在的，而是反应生成多种矿物集合体。水泥熟料是多种矿物的聚积体，主要包括硅酸三钙（ $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，简写  $\text{C}_3\text{S}$ ）、硅酸二钙（ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ，简写  $\text{C}_2\text{S}$ ）、铝酸三钙（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ，简写  $\text{C}_3\text{A}$ ）。

普通硅酸盐水泥的水化是熟料组分、硫酸钙和水发生交错的化学反应，反应的结果导致水泥浆体不断地稠化和硬化。从化学上讲，水化是一种复杂的溶解—沉淀的过程，各种水泥矿物以不同的速率同时进行，而且彼此影响。硅酸盐水泥水化反应主要为：



水化放热速率（rate of heat evolution）随水化时间的变化见图 1.1，水化反应龄期与水化度的关系见图 1.2。

从图 1.1 可以看到，水泥和其他矿物的水化过程可以分为 4 个阶段，即初始阶段、稳定阶段、加速阶段、衰减阶段。第一阶段在水泥与水混合接触之后， $\text{C}_3\text{A}$  和石膏激剧反应并生成钙矾石，钙矾石生成的同时也降低了  $\text{C}_3\text{A}$  的反应，因此放热速率迅速降低，该阶段持续时间为 15~30min，水化反应仅影响混凝土的初始浇筑温度，释

图 1.1 水泥的水化反应过程<sup>[14]</sup>图 1.2 水化反应龄期与水化度的关系<sup>[14]</sup>

放的能量也仅使混凝土初始温度升高  $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ ；稳定阶段发生在混凝土拌和、运输、浇筑的过程中，持续时间  $1\sim 3\text{h}$ ，由于这一阶段水化反应率很低，所以几乎没有能量的释放；加速阶段发生在混凝土浇筑后，持续时间  $3\sim 12\text{h}$ ，这一阶段是水化反应最激烈的阶段，伴随有大量的热量释放；混凝土放热高峰到达以后，水化放热速率开始逐渐减小并最终趋于稳定。在实际混凝土水化放热理论与计算研究中，前两个阶段由于发生在混凝土浇筑以前，持续时间很短，且水化放热量很小，常常忽略不计，一般的计算模型仅从第三阶段（即混凝土浇筑后加速水化阶段）开始，这使问题得到大大简化。

事实上，水泥的水化反应是其组分分别与水的化学反应，每种组分的水化反应持续时间和速率是不一样的，它们的活性顺序大致

为： $C_3A > C_3S > C_2S$ 。除此之外，每一个化合物与水反应的反应速率还取决于它的生产过程；颗粒尺寸、粒径分布和水化温度对水化反应速率也影响很大。如果考虑每种组分的水化反应，那需要了解水泥的每种化学组分的物理和化学特征，模型将会很复杂。鉴于此，这里考虑的水化反应是指每种化学组分的平均水化反应。

### 1.2.2.2 集料<sup>[15]</sup>

(1) 粗集料。天然岩石一般强度都很高，在 80~150MPa。因此，对于高性能混凝土，最重要的不是强度，而是粗集料的粒形特征，包括粒形、粒径、表面状况、级配以及分化石含量等。在高强高性能混凝土中，集料的粒形特征对混凝土的强度和性能影响更大。

(2) 细集料。细集料宜选用石英含量高、颗粒形状浑圆、洁净、具有平滑筛分曲线的中粗砂，细度模数为 2.6~3.2。细度模数在 3 附近时，混凝土工作性最好，强度最高。应按砂石标准严格控制砂子的质量，尤其是含泥量和泥块的含量，以确保混凝土质量。

### 1.2.2.3 矿物掺合料

为了提高混凝土的耐久性、抗渗性、体积稳定性和工作性等，高性能混凝土往往掺有大量矿物掺合料。这些掺合料对混凝土热学和力学特性有重要影响，可降低温升，改善工作性，增进后期强度，并可改善混凝土内部结构，提高抗腐蚀能力。尤其是磨细矿物掺合料对碱-骨料反应的抑制作用已引起国内外专家的极大兴趣。因此，国外将这种混合材料称为辅助胶凝材料，是高性能混凝土不可缺少的成分。

矿物掺合料主要包括粉煤灰、矿渣、火山灰等，其对水泥水化的影响各不相同。水泥中掺入粉煤灰能够减小水化放热量和水化反应速率<sup>[16-18]</sup>，矿渣水泥比普通水泥的水化热要低，而且和普通水泥的水化放热过程相比，在水化过程中要经历两个水化放热高峰<sup>[19,20]</sup>，火山灰水泥由于其矿物成分能够加速水泥的水化，水化放热速度要高于一般水泥，但总的水化放热量降低<sup>[21-23]</sup>。



#### 1.2.2.4 高效减水剂

除矿物掺合料外, 高效减水剂也是高性能混凝土一个关键组成部分。减水剂使混凝土中的水泥用量减少, 超细粉用量增大, 在施工过程中混凝土不会离析, 它的坍落度保持在 200mm 以上, 稍加振捣或免振捣就能使混凝土在钢筋密集部位得到很好的填充, 使制作流态混凝土包括自流平及自密实混凝土的技术得到实现。

#### 1.2.3 高性能混凝土的应用

随着大跨度、超高建筑的发展, 高性能混凝土越来越被广泛地应用。在国外, 高性能混凝土应用相对较多, 比如美国的芝加哥、西雅图、纽约、休斯敦; 加拿大的多伦多、德国的法兰克福等均有 多幢超高强高性能混凝土建筑, 芝加哥 SOUTH WACKER 大厦低层柱为 C95 混凝土; 西雅图 65 层的双联广场钢管混凝土柱, 28d 抗压强度 115MPa。应用超高强高性能混凝土最好的国家是挪威, 挪威已在建造北海油田的钻井平台中使用超高强高性能混凝土, 并将超高强高性能混凝土广泛用于道路工程, 明显提高了混凝土路面的耐磨性, 适应了挪威严寒地区汽车带钉轮胎对路面的强磨蚀状况。

我国在混凝土技术方面也取得了明显的进步。在普遍应用 C30、C40 等级混凝土的基础上, C50、C60 高性能混凝土的工程应用范围不断扩大, 大量的 C50、C60 用于高层建筑和大跨桥梁, 如上海金茂大厦、东方明珠电视塔、上海杨浦大桥、万县长江大桥等。也有少量 C80 高强泵送混凝土在实际工程中得到应用, 如上海明天广场、北京静安中心大厦等<sup>[24]</sup>。

在水利界, 由于高性能混凝土的耐久性强, 它越来越多地被应用于南水北调东线中线结构工程当中。南水北调工程约有 2000 座新建渡槽、泵站、水闸、船闸、倒虹吸、地涵和各种交叉建筑物, 这些水工混凝土薄壁结构所处环境条件恶劣, 要求具有较高的耐久性, 因此大都采用高性能混凝土, 南水北调中线某渡槽工程就采用 C50 高性能泵送混凝土。随着时间的推移和技术的发展, 高性能混凝土在中国的应用也将更加广泛。



## 1.2.4 高性能混凝土收缩变形

### 1.2.4.1 自收缩

自收缩（基本收缩），是指混凝土在硬化阶段，在恒温、与外界无水分交换的条件下混凝土宏观体积的减少<sup>[25-27]</sup>。研究表明，自收缩在混凝土内部是相对均匀地发生，而不仅仅在混凝土表面或内部发生<sup>[28]</sup>。从收缩机理方面来看，一般认为，混凝土自收缩主要是由水泥水化引起的混凝土内部自干燥产生的毛细管张力造成的。水泥的水化动力学使得水泥浆的自干燥水平受到限制，因而也使得自收缩的发展受到限制<sup>[29,30]</sup>

自收缩的发展受到很多因素的影响，最主要的是混凝土的材料组成方面，为此，国内外很多专家进行了研究。Miyazawa<sup>[31]</sup>试验研究了混凝土类型、水灰比、骨料类型与级配对高性能混凝土内部水分变化和自生体积收缩的影响。李家和<sup>[32]</sup>研究了硅灰、磨细矿渣、磨细粉煤灰三种掺合料对高性能混凝土自收缩的影响，结果表明：硅灰和磨细矿渣增大了高性能混凝土 3d 前的自收缩值，而磨细粉煤灰降低了高性能混凝土 3d 前的自收缩值。Zhang<sup>[33]</sup>介绍水灰比和硅粉对自生体积收缩的影响。祝昌墩<sup>[34]</sup>以掺硅粉的大流动性高强混凝土为研究对象，对混凝土在常温常湿的室内条件下的自收缩进行了研究。

为减小混凝土自生体积收缩，Bentur<sup>[35]</sup>试验研究采用湿的轻骨料来替代传统的高性能混凝土骨料，以通过内部的湿养护来达到减小混凝土自生体积收缩的目的。值得注意的是，过高的轻骨料含量会降低混凝土的强度，Zhutovsky<sup>[36]</sup>通过试验确定了合理的轻骨料含量，蒋亚清<sup>[37]</sup>提出了 HPC 中轻骨料含量的计算方法。Colleparidi<sup>[38]</sup>研究了减缩剂对 HPC 自生体积收缩的影响。韩建国<sup>[39]</sup>给出了减缩剂对抗混凝土自收缩及受限收缩的作用效果。另外，最近的研究显示，减水剂的使用使得混凝土的自生体积收缩量大大增加<sup>[40,41]</sup>，应当引起足够的重视，对掺减水剂的混凝土应特别加强早期养护、做自收缩试验和防裂研究。