

## 现代混凝土的研究进展

李宗津<sup>1</sup>, 孙伟<sup>2</sup>, 潘金龙<sup>3</sup>

(1. 香港科技大学土木及环境工程系, 中国香港 999077)

(2. 东南大学材料学院, 江苏南京 211189)

(3. 东南大学土木工程学院, 江苏南京 211189)

**摘要:** 首先回顾了混凝土的发展历史, 然后系统地介绍和总结了混凝土材料的研究与应用现状。重点介绍了近期混凝土材料水化机理探索方面的进展以及新型混凝土的开发成果。最后根据社会发展需求, 展望了混凝土材料发展趋势和应用前景。

**关键词:** 混凝土; 水化机理; 服役寿命; 微结构

**中图分类号:** TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2009)11-0001-07

## New Development of Contemporary Concrete

LI Zongjin<sup>1</sup>, SUN Wei<sup>2</sup>, PAN Jinlong<sup>3</sup>

(1. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China)(2. School of Material Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

(3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** The history of the development of contemporary concrete is reviewed first. Then the current development and applications of concrete have been systematically introduced and summarized, emphasizing on new discoveries in exploring the hydration mechanism and new development of contemporary concrete. Finally, the development trends and future applications of concrete materials have been presented based on the demands of the developing human society.

**Key words:** concrete; hydration; service-life; microstructure

### 1 前言

#### 1.1 混凝土的发展史

混凝土是一种由填充料与胶凝材料组成的复合材料。实际上, 混凝土是一种人造石材。从其字面上理解, 要形成这种材料, 首先要将各组成部分混在一起, 然后经过胶凝材料的凝结作用, 形成统一的材料, 即人造石材。在混凝土中, 填充料起骨架作用, 称为骨料; 胶凝材料与水形成浆体, 称为胶凝浆体。胶凝浆体包裹在骨料表面并填充骨料之间的空隙。在硬化前, 胶凝浆体起润滑作用, 使得拌合物具有一定的和易性, 便于施工。胶凝浆体硬化后, 将骨料胶结为一个坚实的整体<sup>[1]</sup>。根据所用胶凝材料的不同, 混凝土可分为不同种类, 如石灰混凝土、石膏混凝土、沥青混凝土、聚合物混凝土、波特兰水泥混凝土等。当前应用最广泛的是波

特兰水泥混凝土。从广义上来讲, 混凝土的历史可以追溯到远古时代。新石器时代即有泥结卵石、草筋泥砂浆。埃及早在3000BC即用石膏砂浆砌筑金字塔(图1)。中国早在秦朝(220BC)也已用石灰砂浆建造了万里长城。近代波特兰水泥混凝土的发展是以1756年英国的John Smeaton发明水硬性胶凝材料并重建Eddystone灯塔起, 经历了1796年英国的James Parker获得天然水硬性水泥的专利, 1813年法国的Louis Vicat通过烧结石灰石与粘土生产人造水硬性水泥, 至1824年英国的



图1 石膏砂浆砌筑的埃及金字塔

Fig. 1 Gypsum mortar masonry of the pyramids in Egypt

收稿日期: 2008-09-23

基金项目: 国家973重大基础研究计划资助项目(2009CB623200)

通信作者: 李宗津, 男, 首席科学家, 教授

Joseph Aspdin 发明波特兰水泥这一整个历史阶段为起点。为方便叙述,下面文中的混凝土一词即指波特兰水泥混凝土。

混凝土具有取材方便、常温下凝结固化、易于浇筑成型、经济实惠、耐高温性能好、水中生成强度、耐水性能好、维修要求低等优点。因此,自其于180年前面世后,发展极其迅速,至今已成为世界上用量最大、用途最广的材料。

但作为结构材料,混凝土也存在着致命的弱点,即其抗拉强度远比其抗压强度低,其拉压比一般只有十分之一。因此,混凝土在结构中往往只起抗压作用,而拉应力则由钢筋来承担。一般认为,素混凝土为第一代混凝土。在掺加钢筋以后所形成的钢筋混凝土为第二代混凝土。钢筋混凝土是19世纪50年代出现的。1853年 Coignet 建造了第一座钢筋混凝土结构的四层楼别墅,坐落在 72 rue Charles Michels, St. Denis。另外,混凝土还有一个大缺点,即容易开裂,即使在钢筋混凝土中,位于受拉区的混凝土也会开裂,往往导致内部钢筋的锈蚀加速。为了提高钢筋混凝土的抗裂性,预应力混凝土就应运而生了。预应力混凝土也被称为第三代混凝土它是1886年由美国旧金山一工程师发明的。

混凝土的发展主要遵循复合化、高强度、高性能化3条技术路线。复合化是各种材料发展的主要途径,混凝土也不例外。远古时代先人们用泥浆胶结大卵石作为柱基;用草木筋增强黄土与黄土结核(料浆石)泥浆抹墙打地坪等方法来建筑居屋;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<sup>[2]</sup>;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、羊桃藤汁掺入石灰砂浆中增加密实度、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,都是用多种材料复合来改善性能,以达到增强、耐久、经济等目的。80年代以后开始采用“水泥基复合材料”名词来概括各种混凝土材料。复合化是混凝土材料获得高性能的主要途径。

随着社会经济的不断发展,大型复杂工程不断建设,高强度一直是混凝土材料发展的一个重要方向。这里需要指出的是混凝土的高强度只是指其抗压强度的高强度。作为主要的结构材料,抗压强度一直是混凝土的主要性能指标;加之混凝土抗压强度取决于密实性,后者与耐久性密切相关,因此高抗压强度一直是优质混凝土的特征。近几十年来,混凝土的高强度取得了飞速发展。70年代以前,混凝土抗压强度多在30 MPa以下,

40 MPa以上即为高强混凝土;70年代以后50~100 MPa甚至更高强度的混凝土已用于高层建筑与桥梁工程。1972年,62 MPa的混凝土即用于芝加哥74层的 Water-Tower Place。可以预见,随着大跨、超高层等建筑的不断出现,150 MPa以上的超高强混凝土将逐渐扩大其应用。

高性能混凝土(HPC)是上世纪90年代提出的一个新的概念。它是采用现代混凝土技术,通过选用优质原材料,添加必要的外加剂,严格控制质量制成的。HPC侧重于提高混凝土的耐久性与工作性<sup>[2]</sup>。上世纪80年代起,混凝土耐久性问题得到全世界的广泛关注,因为不少混凝土建筑退出服役不是由于强度不足而是由于混凝土材质劣化、耐久性降低造成的。从20世纪70年代起,发达国家已有建设并投入使用的诸多基础建设和重大工程,已逐渐显示出过早破坏的问题。如美国有2 530 000座混凝土桥梁,桥面板使用不到20年就开始破坏。美国土木工程学会在其2005基建工程状态报告中估计(美国)需花费1.6万亿美元在5年间将基建工程恢复到正常使用状态。英国英格兰的中环城快车道上有八座高架桥,全长21 km,总造价只有2 800万英镑,而2004年修补费用达1.2亿英镑,接近造价的6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。要解决这些问题,就必须加速混凝土高性能化研究,大力提高混凝土的耐久性。

## 1.2 混凝土与基建工程在国民经济中的地位

当今我国的基本建设已进入高速发展阶段,重大基础工程规模空前,城镇化高速推进。2006年我国混凝土产量近70亿t,占全球的45%。高速公路在2010年要达到6.5万km,水电工程建设到2049年要达到24个三峡工程的装机总量。跨越大江、大河、深谷、海峡的大跨与超大跨桥梁工程建设正遍及全国各省。我国在建桥梁总量已达世界的50%。很多桥梁技术指标已达世界先进水平,如南通长江大桥(图2)。在国防防护工程建设方面,由于近代高科技武器发展迅猛,要求建造的防护工程必须具有超高防护能力,而且在备用期间还必须具有性能经久不衰的特点。这些超大型工程的发展无一不与混凝土材料息息相关,并对混凝土提出了高强度、高韧性、高流动性、高耐久性等新的、更高的要求。目前我国的基建工程在整个国民经济中不仅占有极大的比例而且起着火车头的牵动作用。根据统计,世界上的财富大部分由建筑物及构筑物组成。据报道,美国

全部财富的 70% 由市政设施、楼宇建筑、基建工程组成。在我国基建工程也是国家的主要财富。我国嫦娥一号的全部研制费用仅仅是 2~3 km 地铁的建设费。由于混凝土是基建工程的主体，因此国家总财富中混凝土占有相当大的部分。因此，怎样把现代混凝土从一应用技术提高到科学的境地，从而提高现代混凝土安全服役年限，是国家急需解决的重大理论课题，也是实现国家可持续发展的关键和重大工程建设的重中之重。



图 2 苏通长江大桥

Fig. 2 Su-Tong Yangtze River Bridge

## 2 现代混凝土的研究与应用现状

### 2.1 水化与微结构形成机理的研究进展

从混凝土发展历史来看，混凝土是一种应用先行、实用导向的材料，历来缺乏系统的科学的研究。事实上，混凝土是一种极其复杂的多尺度结构材料，其微结构跨越了从纳米、微米、毫米多个尺度。对混凝土粘结强度贡献最大的水化产物，C-S-H 凝胶，其微结构即在纳米尺度。然而，由于测试手段及研究方法的局限，一百多年的混凝土的研究与发展始终未能揭示其水化与微结构形成的本质，尤其是纳米尺度 C-S-H 凝胶的本质，从而为科学有效地发展与使用这种材料提供可靠的科学依据。近年来，现代测试技术的飞速发展及计算模拟功能的极大增强为混凝土研究的科学化带来了极大的活力，也为研究混凝土水化机理及纳米尺度微结构，C-S-H 凝胶提供了有效的手段。有学者采用  $^{29}\text{Si}$  核磁共振技术(NMR)研究发现 C-S-H 凝胶结构均包含单链的硅氧四面体长链。在 Grutzeck 等<sup>[3]</sup>研究中发现富硅的 C-S-H 具有通式  $\text{Ca}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，它是组群状硅酸盐结构，而不是羟基硅钙石结构。Cong 等<sup>[4]</sup>对上述理论做了验证，但并未找到支持这 2 种水化硅酸钙结构的热力学依据，而是通过对  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  或  $\text{CaO}$ ，硅灰水化得到的 C-S-H 进行分析后，认为 C-S-H 凝胶结构是以 1.4 nm 的托贝莫来石为主，在此基础上产生单层内和相邻层间的变形和缺陷。

混凝土水化是一个很复杂的物理化学过程，通过水化过程胶凝净浆从流态逐渐转变为多孔固态。对于水泥水化过程的研究，主要采用传统水化热分析法，通过不同阶段水泥水化热的测量来分析水泥水化机理。但是，水泥水化所释放的热量既不与水泥水化程度成正比，也不与水泥块体的物理特性成一定比例关系，很难定量去描述水泥水化过程和机理<sup>[5]</sup>。当水泥和水按照一定比例混合后，水泥中的部分离子就会在水中溶解，并游离在净浆孔隙水中。在特定的电场作用下，孔隙水中的离子具有导电性，并产生一定的电流。水泥浆体的导电性主要取决于浆体中离子浓度和其微结构，特别是水泥净浆的孔结构及其连通性。基于这样的原理，可以通过水泥浆体的导电率或者电阻率的测定来分析水泥的水化过程。许多学者<sup>[6-11]</sup>通过对水泥浆体的交流阻抗谱来分析水泥浆体的水化过程。但是，在试验过程中电极与水泥净浆之间的接触很难保证，对试验结果的精度和一致性造成很大的影响。

近年来，香港科技大学成功研发了非接触式电阻测量仪<sup>[12-14]</sup>来监测水泥的水化过程，并获得了多项专利。该项技术是基于变压器原理来测定水泥水化过程中的电阻率，并以电阻率的变化来描述水泥水化的不同阶段。这种方法的优点是，它是一种非接触式电阻测量仪器，避免了试验过程中接触不良的缺陷，并且成功地建立起水泥水化与电阻率变化之间的关系，可以有效进行水泥水化过程中微观结构的分析。利用这一技术，混凝土的水化动力学过程得到了近一步的科学解释。根据电阻率-时间与电阻率变化率-时间曲线上的特征点，水化动力学阶段可更科学地划分为：离子溶解、动态平衡、凝结、固化及成熟 5 个阶段<sup>[14]</sup>，如图 3 所示。

### 2.2 新型混凝土的发展与应用

自密实(流平)混凝土与超高强混凝土是现代混凝土的两个典型代表。

#### 2.2.1 自密实混凝土

自密实混凝土是一种高流动性混凝土。一般来讲，自密实混凝土可以靠自重及惯性力充满模板空间，无需振捣(图 4)。施工中既减少了噪音污染，又节约了劳动力。自密实混凝土组分的特点有：胶凝材料量大，细骨料量大，粗骨料量少，高效减水剂量大。这些特点是为了使混凝土在能保持其高抗压强度的同时，增加其流动性。

在大大提高流动性的同时，自密实混凝土还必须保证各组分空间分布的均匀性，尤其是粗骨料。为此，自密实混凝土必须具备良好的、适中的流变性。提高自密实混凝土流变性主要有两种方法，粉末法与增稠剂法。粉末法是通过加添具有一定细度的矿物粉末或工业废渣以

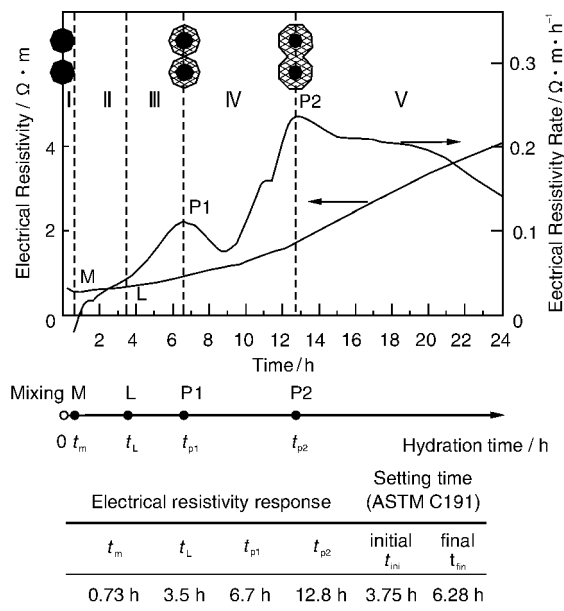


图 3 根据电阻率与电阻率变化率划分水化阶段：I 离子溶解阶段，II 动态平衡阶段，III 凝结阶段，IV 固化阶段，V 成熟阶段

Fig. 3 Division of hydration stages according to resistivity and resistivity changes: I ions dissolved, II homeostasis, III condensation, IV curing, V mature



图 4 自密实混凝土的浇筑

Fig. 4 Self-Compacting concrete pouring

提高胶凝材料总量，在保持小水灰比的前提下，增加混凝土的粘稠度。增稠剂法是通过在混凝土中增添大分子质量的水溶性聚合物，由其与水反应所产生的粘聚力来增加胶凝浆体的粘稠度。图 5 对普通混凝土、粉末型自密实混凝土及增稠剂型自密实混凝土在原材料组分上作了详细的对比。

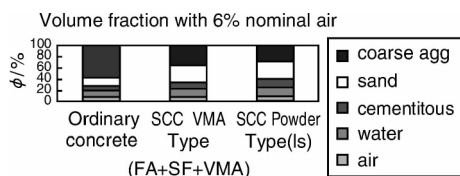


图 5 不同混凝土的组分比较

Fig. 5 Comparison of the different components of concrete

在欧洲和日本，自密实混凝土已经被广泛用来进行水下结构和高配筋结构的混凝土浇注，并取得许多成功的范例。据报道<sup>[15]</sup>，在北美自密实混凝土主要在质量控制要求较高的混凝土预制构件工厂中得到大量应用。在我国北京、深圳、济南等城市也开始使用自密实混凝土，从 1995 年开始，浇筑量已超过 4 万立方米。主要用于密筋、形状复杂等无法浇筑或浇筑困难的部位、解决扰民问题、缩短工期等。

但是，由于其较高的成本和质量控制所需的条件较高，许多现场浇注的场合不愿意使用自密实混凝土。自密实混凝土的进一步推广还需要进行深入的研究，一方面开发成本相对低廉的外加剂，另外进一步完善其质量控制程序，便于混凝土现场施工。

### 2.2.2 超高强混凝土

首先介绍高强混凝土的发展历史。高强混凝土的发展是与高效减水剂的研发紧密相关的。在上世纪 70 年代，当时减水剂尚没有出现，28 d 强度超过 40 MPa 的混凝土就被称为高强混凝土。自从日本和德国分别成功研制了 Naphthalene Sulfonate 和 Melaniline Sulfonate 高效减水剂后<sup>[2]</sup>，使混凝土可在小水灰比的情况下保持相当好的工作性能，混凝土的抗压强度不断提高。为此，美国混凝土协会在 2002 年对高强混凝土的概念重新作了定义，规定圆柱体设计强度超过 50 MPa 的混凝土才被称为高强混凝土。

对于高强混凝土，骨料的选择对混凝土的体积稳定性和混凝土强度和刚度都具有较大的影响。采用高效减水剂后，水泥基体以及水泥基体与骨料之间的过渡区域变得更加密实。如果选用花岗岩或者硅岩作为粗骨料，在水泥水化过程中在过渡区域通常会产生温度裂缝，阻碍了混凝土宏观强度的进一步增长。通过试验研究发现，粗骨料最大粒径越小，混凝土的强度越高，强度超过 100 MPa 的混凝土其粗骨料的最大粒径应该选择在 14~20 mm。基于试验研究，Aitcin 和 Metha<sup>[16]</sup> 建议采用弹性模量和强度较高，且热膨胀系数较低的粗骨料来配制高强混凝土，建议采用细度模数较高的砂作为细骨料。C-S-H 晶体具有一定方向性，同时凝胶体中毛细孔的存在使得水泥基体在微观尺度具有很多的缺陷，添加火山灰质材料（比如粉煤灰）是目前常用的改进办法。粉煤灰不仅可以与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应形成与 C-S-H 凝胶具有相似组成和力学性能的产物，而且可以降低毛细孔的体积和大小，使得混凝土强度得到大幅度的提高。在浇注大体积混凝土时，为了避免高强混凝土由于水化热产生的温度裂缝，可以用火山灰部分代替水泥，不仅可以降低成本，还可以降低温度裂缝的产生。当然，粉煤

灰、炉渣、火山灰、高岭土等集料的添加会对混凝土的早期强度产生一定的影响，但对 28 d 强度几乎没有什么影响。如果采用蒸汽养护，高强混凝土的早期强度也可以得到保证。

随着我国基本建设的高速发展，高强高耐久性混凝土逐步在高层建筑、水力电力、铁道、冶金、军工等工程中得到应用。如沈阳富林大厦（混凝土强度超过 100 MPa）及北京财税大楼工程（混凝土强度达到 127 MPa）等。

超高强混凝土是法国 Scientific Division BOUYGUES 公司于上世纪 90 年代发明的。原名为活性粉体混凝土。其抗压强度超过 200 MPa。超高强混凝土典型配合比见表 1。从表中可以看出，超高强混凝土有以下几个特点：无粗骨料、掺有大量硅灰、大剂量高效减水剂、大掺量钢纤维、水胶比小。

表 1 超高强混凝土的典型配比

Table 1 Comparison of the typical ultra-high-strength concrete

Component	Mass ratio
Type V portland cement	1
Fine sand(150-400, >99% quartz)	1.1
Silica fume(18 m <sup>2</sup> /g)	0.25
Water	0.15
Superplasticizer	0.044
Micro-fibers (essential)	0.05

由此制成的混凝土极度致密，抗压强度超高，耐久性好。图 6 是一例超高强混凝土的微观结构。从图中可以看出其微结构在微米层次非常均匀，无大于 0.1  $\mu\text{m}$  的有害孔，无明显界面区，未水化水泥颗粒较多。

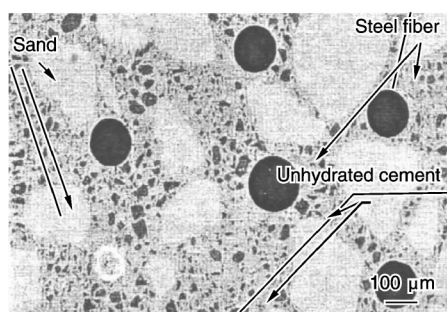


图 6 超高强混凝土的微观结构

Fig. 6 Micro-structure of ultra-high-strength concrete

图 7 给出了 4 种梁的截面。可以看出，用超高强混凝土制作的梁与用钢制作的梁在截面尺寸及重量上已非常接近，远远小于传统的钢筋混凝土梁及预应力钢筋混凝土梁。加拿大于 90 年代成立了以 Sherbrook 大学为总部的 Concrete Canada 研究中心，与法国共同在 Sherbrook

建造了世界上第一座超高强混凝土步行桥梁<sup>[17]</sup>。

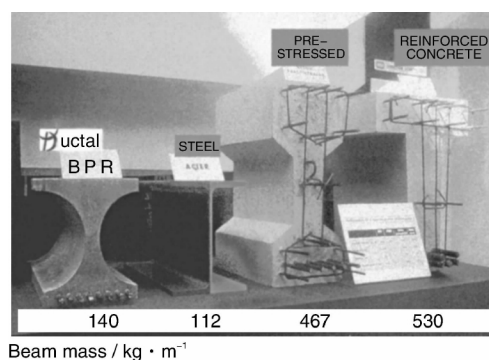


图 7 四种梁截面比较

Fig. 7 Comparison of 4 kinds of beam cross-sections

## 2.3 混凝土耐久性研究

为解决现代混凝土耐久性问题，世界各国投入了大量的人力、物力进行了范围广泛的研究工作<sup>[18]</sup>。这些研究涵盖了碳化、碱骨料反应、钢筋锈蚀、硫酸盐侵蚀、氢氧化钙析出，海洋环境影响等各种引起混凝土结构劣化的因素。从而，很多研究工作已从单一环境因素的影响扩展到多因素的共同作用。如美国的 Ulm，法国的 Coussy<sup>[19]</sup>，德国的 Kuhl, Bangert 及 Meschke<sup>[20]</sup>，法国的 Nguyen 及 Torrenti 等<sup>[21]</sup>，法国的 Gérard 等<sup>[22]</sup>。他们以溶蚀、碱集料反应与荷载耦合为例，研究了环境因素与荷载耦合对混凝土的传输性能和力学性能的影响。近年来，我国也陆续资助了几项混凝土研究的大型项目，重点对混凝土耐久性进行了较深入的研究。其中包括 1996 年“九五”国家重点科技攻关项目“重点工程混凝土安全性的研究”。从该攻关项目的“高强混凝土耐久性研究”专题研究开始，东南大学十多年持续研究了荷载-冻融循环、荷载-氯盐侵蚀、荷载-硫酸盐侵蚀、荷载-盐侵蚀-冻融多系列耦合因素作用下混凝土的损伤劣化规律，失效机制和耐久性与寿命的评价问题。这些研究工作促进了重大工程耐久性评价由单一环境因素向力学与环境因素耦合作用过渡，提高了结构混凝土与混凝土结构耐久性评价与寿命预测的安全性和可靠性<sup>[23]</sup>。

作为耐久性研究的主要成果，世界很多国家均提出了混凝土结构耐久性设计思路，如 Duracret<sup>[24]</sup> 及我国陈肇元院士领导制定的混凝土耐久性设计规范<sup>[25]</sup>。

## 3 混凝土材料的研发趋势

### 3.1 混凝土微结构的深入研究

在现代混凝土的组分中，水泥基胶凝材料起着将其它组分固结在一起的重要作用。胶凝材料在水化过程中

形成的微结构是现代混凝土的细胞,其分布与组合影响着现代混凝土的各项宏观性能。因此,探讨现代混凝土复杂的硬化浆体微观结构形成机理并提炼其微结构模型是当前本研究领域中至关重要的课题。同时,针对现代混凝土组分复杂的特点,有必要研究各组分对微结构形成的影响,组分之间的交互作用,水化速率与水化度对微结构的影响,以提炼现代混凝土的微结构模型。图8是本项目组测得的C-S-H的原子力显微图像。从图像中可以看出纳米层次上C-S-H有一定的取向性,其蛋形尺度在几百纳米左右,这对混凝土微结构的深入研究及模型提炼有指导意义。

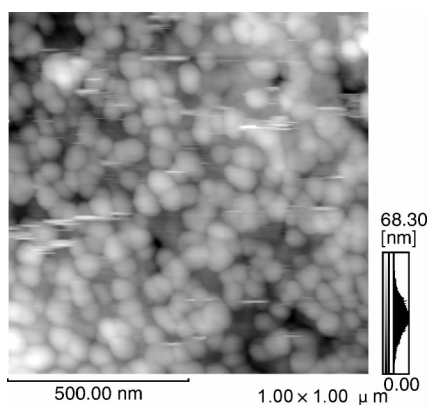


图8 C-S-H的原子力显微图像

Fig. 8 Atomic force microscope images

### 3.2 高韧性、高抗拉强度混凝土的研发

波特兰水泥通常主要有  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_4AF$  和  $C_3A$  4大矿物组成,水化后产生C-S-H凝胶及其结晶相。其中,C-S-H和结晶CH,钙矾石等的多少与形态决定了其胶结能力。由于这些矿物均为水化矿物,它们之间的作用力来源既有离子键、共价键的成分,又有相当一部分分子键力。离子键、共价键几乎没有塑性变形,分子键塑性变形能力也很小,这就从根本上决定了其低韧性和低抗拉强度。为解决现代混凝土的脆性大的问题,迫切需要研发新型高韧性、高抗拉强度的现代混凝土。可考虑在此类混凝土的薄弱环节进行增韧。如在C-S-H的层间的硅氧键上接上阳性半聚合物,然后由其自行聚合,形成纤维状或胶膜状有机聚合物,填充空隙,提高韧性及抗拉强度如图9所示。

### 3.3 荷载承载力与耐久性科学统一的服役寿命设计理论

现代混凝土服役过程中既承受荷载(静载,动载)又经受环境的双重和多重作用。大量的混凝土结构的过早失效是环境作用诱发混凝土内部化学演变和结构承载力下降双向作用的结果。其劣化过程包括微结构的演变、裂缝的发展乃至结构的失效,经由材料层面逐渐发

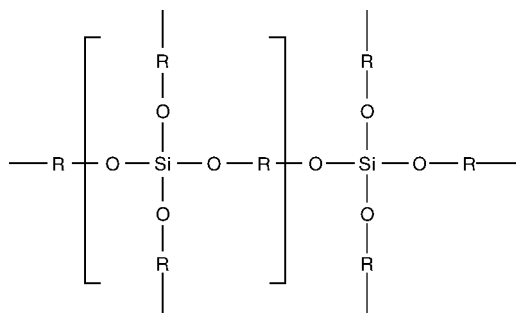


图9 增韧机理示意图

Fig. 9 Toughening mechanism diagram

展到结构层面。而当前所有的设计规范,往往只考虑结构的承载能力,并以静止的观点看待结构的抗力。近期推出的耐久性设计规范,往往只提出一些构造措施,缺乏科学的理论工具与计算公式,不能满足现实的需求。为此,研究并建立崭新的服役寿命设计理论是混凝土科研人员必须面对的责任。实现环境影响因素向力学效能的转换与探明结构性能的时变规律是建立新的服役寿命设计理论的两个关键问题。前者可提供在设计中考虑环境因素的科学依据,从而把耐久性因素以力或应力的形式引入设计规范。这一工作以多孔介质力学与热动力学为平台,以虚功计算为工具,将混凝土耐久性问题统一到力学的框架下。后者将提供材料与结构性能随时间的变化规律,以动态的观点及多尺度理论为根据,在设计过程中将其劣化过程,维修加固等统一考虑在内。真正实现混凝土结构服役寿命设计<sup>[26]</sup>。

## 4 结 语

简单回顾了混凝土的发展历史,指出了复合化、高强化和高性能化是混凝土发展三大趋势,通过一系列的统计数据阐明了混凝土及基建工程在国民经济中所起的巨大作用。然后,系统地介绍和总结了混凝土材料的研究与应用现状,并重点介绍了近期混凝土材料水化机理探索方面和纳米技术在C-S-H微观结构表征上引用等研究方面的主要进展和成果。还以自密实混凝土和超高强混凝土为例系统阐述了高性能混凝土的发展和应用,并指出了各自存在的不足之处。最后,围绕水泥水化机理、高韧性、高抗拉强度混凝土的研发以及荷载承载力与耐久性科学统一的服役寿命设计理论为主论述了现代混凝土发展的趋势和应用前景。

## 参考文献 References

- [1] Mindess Sidney, Young J Francis, Darwin David. *Concrete* [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [2] Mehta P Kumar, Monteiro Paulo J M. *Concrete, Microstructure*,

- Properties, and Materials*[M]. USA: McGraw-Hill, 2006.
- [3] Gutzeckm, Benesi A, Fanning B. Silicon 229 Magic Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance Study of Calcium Silicate Hydrates[J]. *J Am Ceram Soc*, 1989, 72(4): 665–668.
- [4] Cong Xiandong, Kirkpatrick R J. 29Si MAS NMR Study of the Structure of Calcium Silicate Hydrate[J]. *Adv Cem Based Mater*, 1996, 3(3): 144–156.
- [5] Gartner E M, Young E M, Damidot D A, et al. *Hydration of Portland Cement, Structure and Performance of Cements* [M]. London: Spon Press, 2002: 83–84.
- [6] Taylor H F W. *Cement Chemistry*[M]. London: Telford, 1997.
- [7] Christensen B J, Coverdale R, Olson T, et al. Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-Based Materials: Measurement, Interpretation, and Application[J]. *J Am Ceram Soc*, 1994, 77(11): 2 789–2 804.
- [8] Tashiro C, Ikeda K and Inome Y. Evaluation of Pozzolanic Activity by the Electric Resistance Measurement Method[J]. *Cement and Concrete Research*, 1994, 24(6), 1 133–1 139.
- [9] McCarter W J, Whittington H W, Forde M C. The Conduction of Electricity Through Concrete[J]. *Magazine of Concrete and Research*, 1981, 33(114): 48–60.
- [10] Gu P, Xie P, Fu Y. *Microstructural Characterization of Cementitious Materials; Conductivity and Impedance Methods, Materials Science of Concrete IV*[M]. Cincinnati, OH: American Ceramics Society, 1985: 94–124.
- [11] McCarter W J, Chrisp T M, Stars G, et al. Characterization and Monitoring of Cement-Based Systems Using Intrinsic Electrical Property Measurements[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(2): 197–206.
- [12] Li Z and Li W. *Contactless, Transformer-Based Measurement of the Resistivity of Materials*: United States, Patent 6639401[P]. 2003.
- [13] Li Z, Wei X, Li W. Preliminary Interpretation of Portland Cement Hydration Process Using Resistivity Measurements[J]. *ACI Material Journal*, 2003, 100(3): 253–257.
- [14] Xiao L Z, Li Z J. New Understanding of Cement Hydration Mechanism through Electrical Resistivity Measurement and Microstructure Investigations[J]. *J of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2009, 21(8): 368–373.
- [15] Spiratos N, Page M, Mailvaganam N P, et al. *Superplasticizers for Concrete, Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development*[M]. Ottawa Canada: ACI, 2003: 322.
- [16] Aitcin P C, Mehta P K. Effect of Coars-Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of High-Strength Concrete[J]. *ACI Mat J*, 1990, 87(2): 103–107.
- [17] Bennett D. *Innovations in Concrete*[M]. London: Thomas Telford, 2002.
- [18] Mindess S, Yong J F, Darwin D. *Concrete*[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- [19] Ulm F J, Coussy O, Li K F, et al. Thermo-Chemo-Mechanics of ASR Expansion in Concrete Structure[J]. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(3): 233–242.
- [20] Kuhl D, Bangert F, Meschke G. Coupled Chemo-Mechanical Deterioration of Cementitious Materials. Part I: Modeling and Part II: Numerical Methods and Simulations[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41(1): 15–67.
- [21] Nguyen V H, Colina H, Torrenti J M, et al. Chemo-Mechanical Coupling Behavior of Leached Concrete Part I: Experimental Result and Part II: Modeling[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, 237(20/21): 2 083–2 097.
- [22] Le Belleégo C, Pijaudier-Cabot G, Geéard B, et al. Coupled Mechanical and Chemical Damage in Calcium Leached Cementitious Structures[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2003, 129(3): 333–341.
- [23] Sun W, Mu R. Effect of Chloride Salt, Freeze-Thaw Cycling and Externally Applied Load on the Performance of Concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(12): 1 859–1 864.
- [24] DuraCrete. *Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures*[R]. Netherlands: CUR, 2000.
- [25] CCES01–2004, *Concrete Durability Design Specifications*(混凝土耐久性设计规范)[S].
- [26] ACI. Vision 2030: a vision for the US concrete industry[J]. *ACI Magazine Concrete International*, 2001, 23: 25–34.

## 中国工程院化工、冶金与材料工程学部 2009 年增选院士名单

姓名	年龄	工作单位	姓名	年龄	工作单位
付贤智	52	福州大学	张生勇	69	第四军医大学手性技术研究中心
刘炯天	46	中国矿业大学	周 玉	54	哈尔滨工业大学
翁宇庆	69	中国金属学会	周克崧	68	广州有色金属研究院

(来源：中国新闻网)