

文章编号: 1005-0523(2010)04-0001-06

现代混凝土的进展及应用

喻乐华

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:以现代混凝土演化为线索,从混凝土生产技术、性能、工程应用、检测与监控、理论研究等方面综合阐述国内外现代混凝土材料的发展历史、现状及趋势。

关 键 词:混凝土;水泥;性能;结构;工程

中图分类号:TU528

文献标识码:A

以水泥为胶凝材料生产的混凝土,当今已成为全世界各种各样结构工程建设首选的建筑材料,这主要是由它的经济性所决定:原材料来源广泛、便宜,施工与维修费用较低廉。混凝土在工程领域发挥着其它材料无法替代的作用,已成为现代社会文明的基石。

自 1824 年硅酸盐水泥发明后,混凝土就开始使用,其后经历了四个发展阶段:初始混凝土时期;干硬性混凝土和预应力混凝土时期;流动性混凝土时期;现代混凝土的时代。上世纪 70 年代高效减水剂的问世和应用揭开了现代混凝土的时代,加之矿物掺合料的开发应用,使混凝土向高性能、多功能、智能化发展,混凝土科学技术有了很大的提高。这也为混凝土科学技术的进一步发展奠定了良好的基础。因此,在未来的 100 年内混凝土仍将是最主要、最大宗的建筑材料,而且在工程上的应用领域也将不断扩大。

本文以现代混凝土演化为线索,从混凝土生产技术、性能、工程应用、检测与监控、理论研究等方面综述混凝土材料的发展及其趋势。

1 发展混凝土生产技术

混凝土及其原材料的生产技术与装备历经了不断的更新与进步,现已进入自动化、信息化高效率生产以高性能混凝土为代表的现代混凝土^[1]与各种特殊用途混凝土并驾齐驱的时代。

1.1 应用高效减水剂为代表的化学外加剂催生了现代混凝土

1935 年美国的 E. W. Scripture^[2]首先研制成以木质素磺酸盐为主要成分的减水剂 Pozzolitn,减水率约 8%。1962 年日本花王石碱公司服部健一等研制成以 β -萘磺酸甲醛缩合物钠盐为主要成分的萘系减水剂,减水率高达 20% 左右,适宜于制备高强(抗压强度达 100 MPa)或坍落度达 20 cm 以上的混凝土。1964 年联邦德国研究成功磺化三聚氰胺甲醛树脂减水剂,该类减水剂与萘系减水剂同样具有减水率高、早强效果好、低引气量等特点,同时对蒸养混凝土制品和铝酸盐(主要为 C₃A)含量高的水泥制品适应性较好,能制备高强或大流动性混凝土,德国由此发明了液态混凝土。以高效减水剂的研制和应用为标志,混凝土技术进入由塑性、干硬性到液化的第三代——现代混凝土时代。上世纪 90 年代日本率先研究出聚羧酸系高性能减水剂。美国首次提出高性能混凝土的概念,即要求混凝土具有高强度、高流动性、高耐久性等性能,高性能混凝土对减水剂提出了更高的要求,要求高性能减水剂具有减水率高、大流动度和坍落度损失小等特点^[3-4]。一些新型高效减水剂得到了迅速的开发和应用,如聚羧酸特效系、氨基磺酸系高效减水剂,减水率也增加到 30% 左右。

高效减水剂的分散效果不仅使水泥浆或新拌混凝土流动性大增导致填充成型密实,而且可使水泥均匀分散完全水化充分发挥水泥的胶结强度效果;高效减水剂可降低水灰比,减少混凝土的用水量,使混凝土内部结构孔隙减少;新一代高效减水剂聚羧酸类可减少混凝土的体积收缩从而减少混凝土开裂,有利于

收稿日期:2010-04-29

作者简介:喻乐华(1962—),男,教授,研究方向为建筑材料。

混凝土强度和耐久性的提高。

除高效减水剂以外,其它化学外加剂如减缩剂、膨胀剂、引气剂、缓凝剂、抗冻剂等以及集多种单组功能于一身的多功能、高性能复合外加剂对于改善现代混凝土性能和工程应用有积极的影响。

1.2 应用矿物掺合料促进了混凝土向高性能方向发展

工艺上用优质活性矿物掺合料适量替代高强度等级水泥乃现今配制混凝土的必要技术手段,同时是提高混凝土技术性能和经济社会效益的重要措施。这也是当今国际上混凝土技术发展的主要趋势之一^[5-8]。国内外普遍使用工业排放物(粉煤灰、硅粉、矿渣粉、稻壳灰等)和天然岩石磨细粉用作活性矿物掺合料^[8-10]。高强、高性能混凝土用大量掺合料代替水泥熟料将是一条解决混凝土发展与环境保护矛盾的出路。吴中伟提出“绿色”高性能混凝土中掺合料而不是熟料水泥将成为最大的胶凝组分^[5]。在上海教育电视台综合楼大体积基础 C40 高性能混凝土,水泥用量只占胶凝材料总量的 46%,配制的混凝土浆量饱满,其工作性、粘聚性和抗离析性能都十分优异。由此可见,掺入活性矿物掺合料对现代混凝土工艺意义巨大,毫不夸张地说,活性矿物掺料是现代高强、超高强高性能混凝土必不可少的组分,是现代混凝土工艺的基石之一。

矿物掺合料在混凝土中主要有四方面作用:首先是滚球润滑作用,由于其颗粒比水泥细,增加了水分子与水泥颗粒之间的过渡粒级,在混凝土拌合物中有滚球润滑作用,改善了混凝土拌合物的工作性;其次是微集料作用,高强混凝土中胶凝材料用量大,其中相当部分不能完全水化而起微集料作用;再次是填充作用,混凝土掺合料普遍很细(比水泥颗粒细小),能填充混凝土中更细小孔隙的空间使混凝土更密实,因而提高了其强度、抗渗性、抗冻性和抗腐蚀性,降低了干缩和徐变;最后是最重要的火山灰反应,混凝土掺合料是潜在的水硬性胶凝材料,在水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 或 (和) CaSO_4 作诱发剂环境中发生火山灰反应,将 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体大量置换为低钙型 C—S—H 凝胶,改善了水化物的组成,强化了骨料与水泥基体界面过渡区的微结构^[11],增加混凝土后期强度与密实性,大掺量矿料可抑制碱骨料反应,提高了混凝土强度和耐久性。另外,混凝土掺合料使混凝土凝硬过程中水化放热低也有利于制备高性能混凝土。

1.3 与环境友好的混凝土技术

作为构筑人类基础设施最重要的工程材料也是地球天然资源的主要消费者—混凝土工业需要重新定位,接受有利于生态环境的工艺技术,即与环境友好的混凝土技术,其内容包括三个要素:

(1) 节约利用混凝土原材料:最重要的方向是利用各种具有潜在活性和火山灰活性的工业废渣和天然矿物替代部分水泥制造混凝土(包括用于水泥的混合材料),从而减少水泥熟料的用量。节约混凝土生产的能耗主要集中在水泥生产上,现行的技术措施是生产低能耗的高性能水泥和新型胶凝材料^[12]以及采用新型干法水泥生产工艺和低能耗的粉磨工艺,如 EMC (Energetically Modified Cement)^[13-14]。

(2) 延长混凝土材料与结构的耐久寿命和服役期,其实质上是对资源和能源的最大节约^[15]。

(3) 混凝土生产和使用中生态环境保护问题:包括混凝土生产过程中消耗天然资源和能源对生态环境造成的影响,混凝土使用过程中对生态环境的影响以及混凝土废弃物的再使用问题^[16]。

低碳、绿色混凝土及其制品是混凝土制备工艺中最主要的课题之一。因此,在制备混凝土时应合理地减少水泥用量,大量使用工业废渣,废混凝土再生利用作为生产混凝土的原材料,变废为宝,化害为利,改善环境、节约资源、造福人类。

2 提高混凝土性能

2.1 高强化

混凝土高强化的重要意义在于减轻工程建筑的自重。目前,在我国工程中应用的混凝土强度等级明显提高,预拌混凝土工厂已比较成熟地掌握了 C50—C60 混凝土的配制与泵送技术,而 C50—C60 在全国大面积普及推广。在配制高强混凝土的研究中,应致力于提高混凝土的延性、抗裂性与抗拉强度。

广州珠江新城西塔高 432 m,从主塔楼现浇异性柱到直形墙等设计采用 C70—C90 高性能混凝土约 4 万方,其中 C80 混凝土需最高泵送 410 m, C90 混凝土需最高泵送 167 m。实际施工采用 52.5R 硅酸盐

Ⅱ型水泥、S⁹⁵矿粉、挪威硅灰、高效减水剂配制混凝土满足工程设计与施工要求,C⁹⁰混凝土检测强度达112.7 MPa^[17]。

2.2 高性能化

高性能混凝土不仅具有良好的耐久性、流动性与体积稳定性,由于在配制的组份材料中利用了大量的工业废渣,显著地减少了生产时严重污染环境的水泥用量。因此,应将之作为可持久发展的绿色建筑材料而给于大力的发展应用。自上世纪90年代以来,我国各行业高度重视混凝土耐久性,相继出台了针对本行业特点的混凝土耐久性规范和技术规定,如中国土木工程学会 CCES01—2004《混凝土结构耐久性与施工指南》、铁道部的铁建设[2005]157号《铁路混凝土结构耐久性设计暂行规定》^[18]等。我国在若干重大工程的建设中已经充分贯彻了“混凝土耐久性设计”理念,并提升到了“强度设计与耐久性设计并重,强度服从耐久性”的认识高度。

杭州湾跨海大桥全长36 km,其中跨越海域长近32 km,大桥主体结构除南、北航道桥用钢箱梁外,其余均为混凝土结构,混凝土用量约 $250 \times 10^4 \text{ m}^3$,设计使用寿命100年。该桥混凝土施工中以氯离子扩散系数为混凝土耐久性的主要控制指标,采用大掺量掺合料(42.5PⅡ硅酸盐水泥55%~70%矿粉粉煤灰复掺料)和低水胶比(≤ 0.4),低氯离子扩散系数($\leq 1.5 \times 10^{12} \sim 3.5 \times 10^{12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),以混凝土材料的耐久性作为确保混凝土结构耐久性的必要前提^[19]。

2.3 轻质化

在工程材料的上,除强度外,还有一个比强度(强度/比重)技术指标同样具有重要意义。作为结构用的轻混凝土,近期的奋斗目标为:容重为 $500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,抗压强度达到15 MPa;容重为 $800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,抗压强度达到25 MPa。因此,对轻集料陶粒等的制作与研究还有待深入。

2.4 功能化

现代建筑等土木工程对混凝土材料提出了新的挑战,不仅要求混凝土有高强度,而且还应具有声、光、电、磁、热等功能,以适应多功能和智能建筑的需要。

导电混凝土是将导电物质(如导电聚合物、碳黑、石墨、金属粉末、金属丝和碳纤维等)掺混并均匀分散在水泥混凝土中而制成。目前常用于导电混凝土分可分为3类:聚合物类、碳类和金属类^[20],其中最常用的是碳类和金属类,碳类常包括石墨和碳纤维。导电混凝土材料按其体积电阻率可分为半导体材料、防静电材料、导电材料和高导电材料等,它们广泛地应用于工业防静电、非金属电热元件和建筑物屏蔽电磁波^[21-23]等工程。自20世纪90年代以来,水泥基导电复合材料得到了很快的发展,现已在工程中得到了相当广泛的应用。导电混凝土用作防静电材料时,其电阻率小于 $10^5 \Omega \cdot \text{m}$ 即可。导电混凝土用作电热材料的电阻率在 $10^{-1} \sim 10^2 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,与常用的金属电热器相比,具有热容大、抗过电压和电流的能力强、散热面积大、热量分布均匀、表面温度低、耐久等优点,因而不但可用作采暖的电热材料,而且也可广泛地应用于高速公路、机场跑道除雪^[24],在动物养殖厂和植物种植场建造温室等。通过功能掺合料碳黑、金属粉末、金属纤维配制的高导电混凝土材料电阻率为 $10^{-5} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$ 可用作传导材料及电磁隐身材料。

美国内布拉斯加州的 Roca Spur 桥是世界上第一座采用导电混凝土桥面板除冰化雪的桥梁^[25],其桥长46米,宽11米,桥面板内镶嵌 $36 \text{ m} \times 8.5 \text{ m} \times 100 \text{ mm}$ 的导电混凝土层(由52块独立的导电混凝土板组成),其中装配了热电偶为除冰化雪提供监测数据。导电混凝土采用钢纤维和碳质材料作为导电介质,导电混凝土发热板用三相交流电供电生热,自动控制温度在 $4.5 \sim 12.8^\circ \text{C}$,通电时记录到峰值功率在 $360 \sim 560 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。该桥2001年开工,次年竣工,2003年开放交通,首次除冰实验的数据显示导电混凝土板的温度高于环境 9°C 。对比分析可知在路面板和桥面板上铺设导电混凝土层从技术和经济考量都是最为有效的除冰雪方法。

储存太阳能的蓄热混凝土、夜间导向的发光混凝土,监测建筑物安全性的智能混凝土、光致变色混凝土、温度变色混凝土、抗灭菌混凝土、吸音混凝土等一批功能性混凝土^[26-28]将在现代工程、现代建筑及其它领域中得到广泛的应用。

2.5 艺术化

用玻纤增强混凝土等制作的人造石、雕塑、园林小品、仿生建筑和仿古建筑,在装点自然、美化城市、改

善人居环境等方面,混凝土将占有更大的艺术空间。质朴的、粗犷的、更贴近人类回归自然心理要求的人造石文化时代必将出现。

2.6 膨密化

不论从密实性、体积稳定性以及减免干缩、温度裂缝等功能来看,掺入适量膨胀剂,对量大面广的普通混凝土、高性能混凝土,尤其是大体积混凝土和侵蚀环境中的钢筋混凝土,提高其耐久性都是十分有利的。普遍掺入膨胀剂是混凝土发展的一种趋势。^[29]

3 扩大混凝土工程应用领域

3.1 陆上工程

由于混凝土强度的不断提高,在超高层建筑中,百层的大楼可由钢筋混凝土来建造,屋盖结构的跨度可达 30 m。上世纪 70 年代以前建造的所有超高层建筑主体结构均为钢材构筑,如纽约帝国大厦(1931 年建成 381 m 高)、芝加哥汉考克大厦(1969 年建成 344 m 高)、纽约世界贸易中心(1972 年建成 417 m 高,2001 年被破坏);高性能混凝土的发展改变了超高层建筑主体钢结构一统天下的局面,现今大多数超高层建筑主体结构部分或全部采用了钢筋混凝土,如迪拜哈利法塔(2010 年建成 828 m 高)、台北 101 大楼(2001 年建成 508 m 高)、上海环球金融中心(2008 年建成 492 m 高)、佩重纳斯大厦(1996 年建成 452 m 高)。

跨度为 400~600 m 的桥梁可由钢筋混凝土来建造。在混凝土公路的建造中,也将发生巨大的变革,由于膨胀混凝土的收缩补偿功能^[29]和外加剂的进一步开发、应用,路面的收缩缝将得到有效的控制,甚至全部免除。

3.2 海洋构筑物

海洋大约占地球表面积的 70%,要充分利用“蓝色国土”,海洋构筑物起着举足轻重的作用,这将有助于解决陆上空间紧缺。当今海洋构筑物包括开采海底石油的钻井平台、海上炼油厂、海上天然气液化贮装站、海上潮汐发电站与波力发电站、海上机场、海上城市、海上旅游设施、海上渔业养殖场与海底隧道等,都将由混凝土建造而逐步兴起,而且建造费用也较在陆地上建造同样工厂少 25%~30%^[30]。这些工程一般采用钢筋混凝土结构且投资巨大,对其耐久性要求非常高,一般要求服役寿命 100 年以上,日本和欧美国家已提出 500 年服役寿命的要求和概念^[31]。由于混凝土的高强化与高性能化,对于人类开发海洋资源、增加陆地面积与国防建设也将做出贡献。

1989 年挪威在北海建造的石油开采平台是由 24 个直径 28 m 高 5 m 的储油罐和用于支承 5 万吨钢结构的 4 根混凝土管柱组成^[30]。混凝土结构总高度达 262 m,总用量混凝土 24 万 m³,普通钢筋 7 万吨,预应力钢筋 3 600 吨。平台在近海施工浇筑完工后拖运至现场沉入海底 20 m 深的淤泥中。该平台需承受 30 m 高的巨浪、地震和高水压的作用,所用混凝土 28 天抗压强度 79 MPa,为高配筋预应力钢筋混凝土结构,以适应各种严峻的工作条件。

在应用于国防军事方面,俄罗斯正在研究将混凝土建造潜水艇,该潜艇可以下潜到所有其他潜艇都无法达到的深度,其推进系统不发出声响,因而敌方采用声纳装置也无法发现其踪迹。有资料表明^[30]:建造预应力钢筋混凝土船壳为钢材制作费用的 75%,而且前者的耐久性明显优于后者。

3.3 开发宇宙

在未来的宇宙开发中,混凝土也要占一席之地。在宇宙空间,混凝土系在失重状态下硬化,而且还需经受+150~-150℃交替温度变化。现在人类已创造了登上月球的记录,要开发宇宙,就需要有建筑物。在没有大气的月球上,水泥混凝土的硬化、安定性、耐久性等问题都耐人寻味。美国波特兰水泥协会(PCA)早在 1986 年开始研究直接利用月球表面的材料来制作混凝土,并认为水泥混凝土在月球上是耐久的。美国宇航局戈达德航天中心的科学家将碳、胶以及月壤按一定的比例混合后制造成一种月球混凝土^[32],它是一种胶粘而发出臭味的物资,并且象混凝土一样坚硬牢固。科学家认为:与地球混凝土一样,月球混凝土也能有效地应用于建筑房屋、月球基地等。

4 强化混凝土检测和监控水平

随着混凝土向高强度、高性能化发展,混凝土的质量控制就更为重要。以往采用的以28天强度作为控制指标已远远不能满足需要。核子示踪技术、声发射技术、同位素技术、红外线摄影技术、磁学和自位测量技术将在混凝土及其工程与制品的质量控制中得到广泛应用。一种便于检测混凝土质量的“显色剂”将作为“监察性”外加剂而进入混凝土的“快速湿态验收试验”也将得到发展和应用。工程结构混凝土的检测、鉴定和修复技术也有了巨大的进步。

5 促进混凝土理论研究

混凝土学科的理论研究是推动混凝土技术发展的动力与基础。混凝土学科涉及工艺技术科学与材料科学。在水泥化学、材料力学、细观力学、断裂力学等多学科发展的带动与促进下,目前已形成以研究混凝土材料组成、结构与性能之间关系和相互影响规律为主要内容的混凝土材料科学,它还将进一步充实和提高而形成一门独立学科。特别是在水泥混凝土与有机高分子材料的复合、与金属的复合以及纤维增强等领域,对复合机理的深入研究必将使混凝土等水泥基复合材料得到更大的发展与应用。

6 现存的问题

(1) 混凝土学科的理论有待提高 混凝土至今仍是一门经验性很强的实验科学,还没有达到以理论为制定的目标成品设计和以原材料设计为基础的剪裁与组装设计的水平。

(2) 混凝土的体积收缩有待于继续改善 由于混凝土成型过程的体积收缩目前尚未完全解决,从而导致混凝土工程易产生原生裂隙,降低混凝土抗渗性,影响混凝土耐久性和其他性能。

(3) 加速理论模型材料向实际工程应用材料技术的发展 以材料理论模型建立的CBC(化学粘结陶瓷)、MDF(无宏观缺陷)水泥制品和DSP(高致密水泥基均匀体系或微粒压实产品)是新的一族高强水泥基材料,它们具有很高的抗压强度和弹性模量,但限于非结构应用。为达到高强结构应用的高韧性要求,法国Richard等人开发出掺有钢纤维的活性粉末混凝土^[33-34],实际是超塑化的活性粉末砂浆,其水泥用量为 $1\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、细砂与粉石英 $900\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、硅粉 $230\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、水 $150\sim 180\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和钢纤维 $630\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,用机械压实的试件经 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热处理后,抗压强度可达 680 MPa 、抗折强度 100 MPa 、弹性模量 75 GPa 。现在预测活性粉末混凝土未来的发展还为时过早,因为尽管它的初始费用高昂、加工技术复杂且工程应用实例颇少,但在建筑业及其他土木工程还是会有适当的用途,特别是在高侵蚀环境中,大掺量的微纤维使其抗裂性能提高,保证了它的水密性。

参考文献:

- [1] 阎培渝. 现代混凝土的特点[J]. 混凝土, 2009(1): 3-5.
- [2] 熊大玉, 王小虹. 混凝土减水剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 王玲, 田培, 白杰, 等. 我国混凝土减水剂的现状及未来[J]. 混凝土与水泥制品, 2008(5): 1-7.
- [4] 欧阳新平, 李嘉, 邱学青. 混凝土减水剂的发展与绿色化[J]. 世界科技研究与发展, 2006, 28(2): 30-36.
- [5] 吴中伟. 绿色高性能混凝土—混凝土的发展方向[J]. 混凝土与水泥制品, 1998(3): 3-6.
- [6] 陈益民, 贺行洋, 李永鑫, 等. 矿物掺合料研究进展及存在的问题[J]. 材料导报, 2006, 20(8): 28-31.
- [7] 11TH International Congress on Chemistry of Cement[C]. Durban, South Africa, 2003, 736-1 026.
- [8] P KUMAR MEHTA, PAULO J M MONTEIRO. Concrete Structure, Properties and Materials (2nd Edition)[M]. Prentice Hall · New Jersey 1993, 271-285.
- [9] L TURANLI, B UZAL, F BEKTAS. Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(10): 2 277-2 282.
- [10] YU L H, OU H, LEE L L. Investigation on pozzolanic effect of perlite powder in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(1): 76-79.
- [11] 喻乐华. 混凝土集料界面与强度关系的界面理论分析[J]. 华东交通大学学报, 1999, 16(4): 14-19.

- [12] 陈益明,许仲梓.高性能水泥基础研究[M].北京:中国纺织出版社,2004.
- [13] JUSTNES H,ELFGREN L,RONIN V. Mechanism for performance of energetically modified cement versus corresponding blended cement[J].Cement and Concrete Research,2005,35(2):315-323.
- [14] JUSTNES H,DAHL P A,RONIN V,et al. Microstructure and performance of energetically modified cement (EMC) with high filler content[J].Cement and Concrete Research,2007,29(7):533-541.
- [15] BRYANT MATHER. Concrete durability[J].Cement & Concrete Composites,2004,26(1):3-4.
- [16] 王立久,艾红梅.绿色生态混凝土技术与循环经济发展[J].混凝土,2009(1):6-11.
- [17] 柯科杰,等. KJ-JS 配制 C80-C100UHPC 的试验与在广州西塔等应用[C]//全国特种混凝土技术及工程应用学术会议论文集.2008:538-542.
- [18] 中华人民共和国行业标准铁建设[2005]157号.铁路混凝土结构耐久性设计暂行规定[S].中华人民共和国铁道部.
- [19] 陈改新.混凝土耐久性的研究、应用和发展趋势[C]//第七届全国混凝土耐久性学术交流会议论文集.2008:22-29.
- [20] 黄世峰,徐荣华,刘福田,等.水泥基功能复合材料研究进展及应用[J].硅酸盐通报,2003(4):59-63.
- [21] 左跃,叶越华,李坚利,等.水泥基电磁屏蔽与吸波材料的研究进展[J].硅酸盐通报,2007(2):311-315.
- [22] 罗刘军,熊国宣,邓敏,等.有电磁屏蔽功能的水泥基复合材料[J].混凝土,2009(8):50-52.
- [23] 张雄,习志臻.建筑吸波材料及其开发利用前景[J].建筑材料学报,2003,6(1):72-76.
- [24] 李滨,孙明清,陈龙.用于融冰化雪的炭黑轻集料导电混凝土的配制和性能[J].混凝土,2010(2):121-123,129.
- [25] 周永祥,等.导电混凝土技术的发展与现状综述[C]//全国特种混凝土技术及工程应用学术会议论文集.2008:103-112.
- [26] 李贵佳,全静,龚红宇,等.水泥基压电复合材料的研究进展[J].材料导报,2009,23(12):52-55.
- [27] 唐祖全,李卓球,张华.混凝土路面温度自诊断特性的实验研究[C]//第十届全国结构工程学术会议论文集第Ⅱ卷.2001.
- [28] 匡亚川,欧进萍.智能混凝土损伤自修复全过程分析[C]//第六届中国功能材料及其应用学术会议论文集(9).2007.
- [29] 游宝坤,李乃珍.膨胀剂及其补偿收缩混凝土[M].北京:中国建材工业出版社,2005.
- [30] 陈宁.结构混凝土加强措施及在海洋结构工程中的应用前景[J].武汉造船,2000(4):11-15.
- [31] 刘竞,邓德华,赵腾龙,等.提高海洋环境钢筋混凝土构筑物耐久性措施综述[J].腐蚀与防护,2008,29(6):329-334.
- [32] 月球混凝土[J].科学之友:A版,2008(8):12.
- [33] 喻乐华,钟金如,罗威年.活性粉末混凝土[J].华东交通大学学报,2002,19(4):28-31.
- [34] 陈兵,李悦.活化粉末混凝土的发展与应用[J].混凝土,2000(8):34-36.

Development and Application of Modern Concrete

Yu Lehua

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: With the clue of modern concrete evolution, from the perspective of producing technology, concrete properties, engineering application, testing and monitoring, and theoretical research, this paper explores the developing history, status quo and tendency of concrete material at home and abroad.

Key words: concrete; cement; property; structure; engineering

(责任编辑 王全金)