

特 约 专 稿

绿色高性能混凝土与科技创新

吴中伟
(中国建筑材料研究院)

摘 要 水泥与水泥基材料科研近期宜在宏观、粗观、亚微观三个层次上进行. 波特兰水泥与常规混凝土存在着可持续发展的问题. 生产 1 t 熟料水泥同时排放 1 t 左右的 CO₂. 中国水泥与混凝土需求猛增, 形势更为严峻. 因此提出发展绿色高性能混凝土, 并扩大其应用范围. 从宏观、粗观、亚微观三个层次说明开发 GHPCC (green high performance concrete) 对中国和世界的重要意义.

关键词 高性能混凝土; 绿色高性能混凝土; 超高性能混凝土; 环保型水泥基材; 熟料中图法分类号 TU 5

1 科学思想与科技创新

在世纪交替、祖国经济面临重大转折的时代, “科学技术是第一生产力”、“科教兴国”、“创新是民族的灵魂”……等很多号召, 说明科技工作者担当着时代使命和人民的厚望, 如何在本专业作出最大的贡献应该时刻铭记在心, 身体力行. 科研工作创造性劳动, 科技工作者应不断创新. 科技创新必须有正确的科研思想或科研思维方式, 必须正确选题. 就技术科学而论, 选题必须重实效与时效, 应密切注视当前, 联系实际, 力求早收实效大效. 时间就是财富, 积累要有时间, 创新来源于继承, 在积累的基础上前进.

科学思想分为两大派系: 整体论(综合)与还原论(分解), 过去整体论用得最普遍——中医辩证论治可为一例. 近代科研手段精进, 还原论用得更为普遍. 即将科研对象还原或分解到可能达到的最小单位, 进行具体的量化研究, 还原论对当代自然科学与技术科学的发展, 已产生很大作用, 但缺点是分得愈细, 愈易脱离整体和实际, 因此无法从整体来全面有效地解决问题或认识事物的本质.

钱学森先生一向重视科研思维方式. 他提出应将还原论与整体论两种不同的思维方式结合起来, 从宏观上把握事物的整体, 用还原论对事物的系统、结构、功能等进行具体的量化研究. 他主张: “从定性到定量综合集成”. 他认为 50 年代以来, 各种新技术的迅速发展与普遍采用, 为进行创造性思维与创新工作提供了前所未有的条件; 人机结合的工作体系, 对各种复杂事物进行从定性到定量的分析与综合集成, 能够准确地把握复杂事物的现象与本质、微观与宏观、部分与整体、固定与发展的辩证关系, 有所前进, 有所创新.

近 30 多年来在材料科学与工程学的建立与高速成长中, 也提出了“从宏观到微观, 从定性到定量”, 愈来愈重视还原论的运用, 以水泥与水泥基材料为例: 水泥水化与水泥石结构的研究这一课题, 从 70 年代瑞典科学家开始用 SEM 进行研究以来, 形貌学研究风行一时, 提高了亚微观(细观)层次上的认识. 随后, 更多的新技术新工具的应用, 使水泥水化与水泥石结构的认识深化了一大步, 但进入 80 年代中叶, 热潮似有所减退, 对波特兰水泥与水泥基材料的技术进步, 如品种、性能、经

收稿日期: 1997-11-12
作者: 男, 1918 年生, 教授, 中国工程院院士, 中国建筑材料研究院高级顾问. 中国建筑材料研究院, 北京, 100024.

济、功能等的研究效果不很突出,与预期的材料设计相距尚远.1987年我在“反思”一文中提出建议,水泥与水泥基材料的科学研究工作近期仍宜以宏观(粗观)为主,以亚微观微观研究作为验证和解释以促进深化.当前应积极扩大已取得宏观效益的成果或苗头,例如掺加活性细掺料与高效外加剂以及细磨、节能工艺等(当时还未提出高性能混凝土技术).

关于宏观、微观等研究层次的划分,有不同意见,最常用的是:

粗观(macro, > mm,按一般称作宏观,似不妥);

亚微观或细观(submicro, μm);

微观(micro, nm).

钱学森先生的划分是:胀、宇、宏、微、渺,五个层次.大到宇宙,小到比基本粒子更小(10^{-33}mm).

水泥与水泥基材料科研,目前宜分为宏观、粗观、亚微观三个层次.陶瓷材料科学已进入微观层次(如纳米陶瓷等),水泥基材料很快也将进入微观层次的研究.高性能混凝土的微观研究已排上日程.

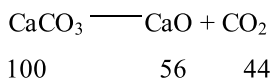
2 从宏观层次上提出绿色高性能混凝土

2.1 波特兰水泥与混凝土的可持续发展问题

地球环境问题已十分严峻,一切科技创新,必须遵循可持续发展战略.现在大量使用的波特兰水泥(Portland cement, 以下简为 PC)与常规混凝土(normal concrete 以下简为 NC)均大量浪费资源能源,更严重的是破坏环境,尤其因用量极大和不断增加,更成为引人瞩目的不可持续发展的大宗建筑材料.

水泥厂一直被看作污染源.传统上对水泥工业排放的有害物质限于 CO , NO_x , SO_3 , HCl , CH 与 Hg , Pb , Cd , As , Cr , Ni , Ti , Zn 等重金属.所采用的防治手段不外设备密封,负压操作与高烟囱排放,以保持工厂与车间范围的“清洁”与工人的“安全”.其实,排放的大量 CO_2 是环境代价最高的“温室气体”,直到1992年在巴西里约热内卢由联合国召开的世界环境与发展大会后,才引起各国政府与人民的重视.

生产1 t 熟料水泥的同时,排放出几乎同量的 CO_2 .



1 t 熟料中平均约含 CaO 620 kg,排出 CO_2 为 $620 \times (44/56) = 487\text{ kg}$,比之所消耗的矿物燃料(包括用电)产生的 CO_2 (300~450 kg)还多.现在常估为1 t 熟料水泥排放1 t CO_2 (日本水泥工业能耗较低,1994年该国水泥工业排放 CO_2 5 500 万 t,水泥生产量约7 000 万 t).据法国资料报道:水泥工业排放 CO_2 量约占本国工业排放总量的 $1/7 \sim 1/10$.可见水泥工业对环境破坏之大!常规混凝土采用的大量集料,对山林景观与江河航道破坏很大,加上废料废水,能耗料耗等,常规混凝土与波特兰水泥的生产,随着产量猛增必将对全人类造成更大的危害.

2.2 我国水泥生产对环境破坏的严重性

随着建设的迅猛发展,我国水泥产量增加特快,50年代初生产不足300万 t,1980年达到1亿 t,1985年超过2亿 t,1995年达4.5亿 t,1996年4.9亿 t,其中3/4为高耗低效污染严重的小水泥.当水泥年产量超过2亿 t时,我就曾怀疑中国是否需要和是否应当生产这样多的以中低标号为主的波特兰水泥(当时苏联年产约1.2亿 t,日本、美国约七八千万 t),但那时还不知 CO_2 作为温室气体所带来的严重环境问题.世界环境与发展大会后,尤其是1994,1995年我国相继提出可持续发展战略,我开始研究水泥与混凝土生产带来的环境问题,提出“环保型高效水泥基材料”^[1],后来改为“绿色高性能混凝土(1997年3月在“高强与高性能混凝土”会议上的报告),吁请大家重视.1996年

日本内川浩也发表了“高性能环境共存型混凝土用先进胶凝材料”的文章¹⁾。

现在我国水泥产量超过世界总产量的 1/3,初步计划 2010 年将增至 8~8.5 亿 t,接近当时世界总产量的 1/2。从低估计,1995 年我国熟料水泥产量 3.5 亿 t,则 CO₂ 排放量也为 3.5 亿 t,到 2010 年的 15 年内,累计排放 CO₂ 将达 75 亿 t。如世界水泥产量从 1996 年 13 亿 t 到 2010 年增到 18 亿 t,则水泥工业为地球大气层增加 CO₂ 的积存量达 150 亿 t 之巨,对环境影响之大,无法估量!现在各国政府纷纷提出对温室气体排放量的限制计划,波特兰水泥与常规混凝土必将受到愈来愈严格的限制。1997 年我国国家建材局提出水泥工业“上大改小”与对小水泥“淘汰、限制、改造、提高”的正确方针,同年 5 月在我国水泥工业发展座谈会上,我提出到 2010 年我国熟料水泥产量应保持在年产 3.5 亿 t 的当前水平,以发展绿色高性能混凝土作为主要措施。

2.3 高性能混凝土是对常规混凝土的重大改进

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)召开会议,首次提出高性能混凝土(high performance concrete,以下简称 HPC)这个名词。HPC 是用优质水泥、集料、饮用水和活性细掺料与高效外加剂制成,它是同时具有优良耐久性、工作性、强度的匀质混凝土。对于 HPC,各国根据不同的工程提出不尽相同的要求和涵义,大多数认为 HPC 的强度不应低于 50~60 MPa,但日本更重视工作性与耐久性。例如,新建的明石跨海悬索桥,缆索锚基混凝土 52 万 m³ 要求高耐久性、高流动性、高体积稳定性与低水化热,而强度指标则为 91 d 50 MPa(28 d 约 42 MPa);其桥墩混凝土约 50 万 m³,要求高耐久性、高抗冲刷与低温升,强度只要求 20 MPa。两者都是掺加复合细掺料与复合外加剂的 HPC,其细掺料用量均超过熟料水泥。

综合各种观点对 HPC 提出如下定义,供大家讨论:“HPC 是一种新型高技术混凝土,是在大幅度提高常规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,在妥善的质量管理的条件下制成的。除水泥、水、集料以外,HPC 必须采用低水胶比和掺加足够细掺料与高效外加剂。HPC 应同时保证下列诸性能:耐久性、工作性、各种力学性能、适用性、体积稳定性和经济合理性”。

所以,HPC 不仅在性能上比 NC 大大改进,在节约能源、资源、改善劳动条件、经济合理等方面,尤其在利用工业废渣、保护环境方面有着十分重大的意义,因此,将发展成为一种可持续发展的绿色材料。

2.4 绿色高性能混凝土(Green HPC,简称为 GHPC)

人类的生存与发展,只能在地球这个巨大生态系统的承载力(环境、资源、能源、物种等)范围之内。人类的繁衍与活动不能超越生态系统有限的调节能力,随着近几十年的人口爆炸,生产发达,地球承受的负担剧增,尤以资源枯竭、环境破坏、物种灭绝最为严重、人类生存与发展受到了极大的威胁。因此绿色事业受到普遍关注,绿色的涵义,随着认识的深化而不断扩大,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,既满足当代人的需求,又不危及后代人满足其需要的能力。

前两条是第三条的保证。

作为一种材料或产业,节约资源能源也是为了本身能够持续存在和发展。水泥与混凝土作为当代最大宗的人造材料,预计到 2000 年水泥产量将超过 15 亿 t,混凝土将超过 40~50 亿 m³(100~120 亿 t),对资源能源的消耗和对环境的影响均十分巨大,混凝土能否长期作为最主要的建筑结构材料,其关键在于能否成为绿色材料。所以,GHPC 是混凝土的发展方向,更是混凝土的未来,提出 GHPC 的目的在于加深人们对绿色的重视,即加强绿色意识。要求混凝土工作者更自觉地去提高 HPC 的绿色含量或加大其绿色度,节约更多的资源能源,将对环境的破坏减到最小。这不仅为了混凝土与建筑工程的持续健康发展,也是人类的生存与发展所必需,是大有可为的。

1) 见内川浩. 高性能环境共存型混凝土用先进胶结材料. 1996 年秩父小野田研究报告 47 卷 124 号。

3 GHPC 的特征和发展前景

3.1 GHPC 具有的特征

1. 更多地节约熟料水泥,减少环境污染:PC 生产对环境的破坏已如上述,但水泥基材料作为最主要的建筑结构材料,需求与日俱增.因此除改变 PC 品种,改进生产工艺,降低能耗之外,应该在应用技术方面来一次大突破.发展 GHPC 是当前最有效的途径.用大量工业废渣作为活性细掺料代替大量熟料,最多可达 60%~80%,在 GHPC 中不是熟料水泥而是磨细水淬矿渣和分级优质粉煤灰、硅灰等,或它们的复合,成为胶凝材料的主要组分.生产这种与环境相容的胶凝材料,比起 PC 生产,既大大减少 CO₂ 的排放,也节约资源能源.

2. 更多地掺加以工业废渣为主的活性细掺料:更多地掺加以工业废渣为主的活性细掺料对改善环境,节约土地与石灰石资源,节约能源,效果十分明显.我国水淬矿渣年产约 8 000 万 t,多用作水泥混合材,但因细度不够,潜在活性远未能发挥,只起到微集料作用,实在是一大浪费.我国粉煤灰产量随火电事业发展迅速增加,已超过 1.25 亿 t,其中适用于 HPC 的优质粉煤灰也大量增加,这是我国发展 GHPC 的有利条件.1995 年加拿大能源矿产部开发高掺量粉煤灰混凝土(HFCC),粉煤灰占胶凝材总量的 55%~65%,再掺加适量超塑化剂,能制得工作性、耐久性与力学性能均优的 HPC.如将几种活性细掺料复合使用,则效果更好,达到多掺、多代、节料节能、改善环境等 GHPC 的目的,且具有降低温升,改善体积稳定性和耐蚀耐磨等优点.

3. 更大地发挥高性能优势,减少水泥和混凝土的用量:利用 HPC 的高强早强来减小截面,降低自重,节省模板与工时,在高层建筑与大跨桥梁中已收到很大效益;减少材料生产与运输能耗,保证和延长安全使用期,经济效益更大;减少水泥与混凝土的用量是从根本上减少环境负担.

3.2 扩大 GHPC 的应用范围

建议将 HPC 的强度下限从 C50~C60 降低到 C30 左右,以不损及混凝土内部结构(如孔结构、水化物结构、界面区结构等)为度,以保证其耐久性与体积稳定性.例如,水胶比应不低于 0.40~0.42,胶凝材总量不少于 250~300 kg/m³,根据工程条件确定强度指标.至今 HPC 的使用范围还不宽,主要受强度下限定得太高的限制,随着材性、工艺和结构设计的进步,混凝土强度正在不断提高,GHPC 的强度下限也将不断提高.许多工程如大体积水工建筑、基础等对强度要求不高,但对耐久性、工作性、均匀性、体积稳定性、低水化热等有很高要求,都必须采用 HPC.日本明石大桥采用 20 MPa 的 HPC 是很正确的.扩大 GHPC 应用范围,增加 GHPC 的用量,在开始阶段尤应受到重视.如果将 HPC 局限于满足极少数高强度需要,每年只有几十万甚至几百万立方米的用量就窒息了混凝土向绿色发展的前景.

随着科研向亚微观、微观深入和大量工程实践 GHPC 的性能正不断提高.以强度而言,加拿大、法国已研究成超高性能混凝土(UHPC),现已报道的有活性细粒混凝土(RPC)、注浆纤维混凝土(SEFCON)与压密配筋复合材(CRC)等.兹举 RPC 为例,分 200 MPa 与 800 MPa 两级,其物理力学性能见表 1.

表 1 RPC 的物理力学性能

试 样	凝结期中加压	加热养护 / °C	抗压强度 / MPa	抗折强度 / MPa	断裂能 / J·m ⁻²	弹性模量 / GPa	透气性 / 10 ⁻¹⁸ m ²	Cl ⁻ 扩散系数
RPC-200	不加	20~90	170~230	30~60	20 000~40 000	50~60	2.5	~0.0
RPC-800	10~50 MPa	250~400	500~800	45~140	1 200~20 000	65~75	—	—
HPC	—	—	60~100	6~10	140	—	120	5

利用 UHPC 的突出的强度与耐久性优势,能够减轻结构物自重 1/2~2/3,且节省大量混凝土与钢筋,将水泥与集料的环境代价减到很小.以加拿大休布洛克人行桥采用 RPC-200 为例,该桥单

跨长 70 m,桥面宽 4.2 m.因当地气候条件严峻,常年高湿,冬季可达 - 40 ℃,必须经常洒盐化冻.根据耐久性要求,采用 RPC-200 与钢管混凝土,桥面板厚 30 mm,每隔 1.7 m 设高 70 mm 的加强肋,腹杆用 $\Phi 150$ mm 厚 3 mm 的不锈钢管;内填 RPC,下弦为 RPC 双梁,均按常规混凝土工艺预制,运到现场再用后张预应力拼装.表 2 对比了 UHPC,HPC,HC 的材料量.

表 2 UHPC,HPC,NC 材料量比较表

试 样	计算等效截面厚/ mm	混凝土体积/ m ³	单方水泥用量/ kg · m ⁻³	熟料水泥用量/ t	集料用量/ t
30 MPa NC	500	126	350	44	230
60 MPa HPC	400	100	400	40	170
200 MPa UHPC	150	33	705	27	60

可见用 UHPC 节省熟料水泥与集料之多!还可预见,用 UHPC 制成型材与金属、塑料复合或叠合可代替钢结构与钢筋混凝土;也有可能利用 UHPC 的高强、高耐久性、高抗渗、抗冲、耐磨、耐蚀等特性作为混凝土的镶面材料,大大提高混凝土本来较低的抗冲、耐磨、抗气渗等功能.这一改进,将使土建工程的功能与面貌发生改观,混凝土工业将取得很大的进步,向自动化、智能化前进.

4 亚微观、微观研究将为 GHPC 的发展与提高提供依据

在 GHPC 的研究开发工作中,必须有正确的科学思想指导,不断进行科技创新,实践、积累、再创新,并不断取得实效.宏观的环境性能与粗观的物理力学性能以及应用中取得的各种功能,都已证明 GHPC 必须加速发展,它是水泥基材料的未来,正如西方学者所称 HPC 为“21 世纪混凝土”.

近几年来 HPC 在国内外均开发得较好,国内大城市,京、沪、沈、津、深圳等地,高层建筑与某 2 些大桥均多采用,HPC 已被工程界接受,这是好现象.但在科研方面,尤其涉及其机理等基础性研究,国内外还均稀少.国内还有不少人认为,HPC 同样用水泥、水、集料、混合材和高效减水剂,这与高标号 NC 无大区别,只是换一下名称.国外也有说“用高成本来换取高性能”,因此没有多少科技含量,说不上是技术进步,更不是什么高科技!这说明发展新科技,必须做好宣传教育来纠正错误,正确认识.更重要的是要保证和加快 HPC 向 GHPC 健康发展,不断创新,使成为高性能高科技材料,还必须向亚微观、微观层次深入研究,结合宏观粗观,密切联系实际,不断实践,取得大的实效,认真采用整体论与还原论综合集成的正确科学思维方式,迅速提高水泥基材料科学与工程的技术水平.

由于 HPC 的低水胶比与掺加大量活性细掺料和高效外加剂,尤其是后二者的复合产生超叠加效应,HPC 与掺混合材水泥混凝土有着本质上的差别,因此带来性能与功能的悬殊.在这方面,法国路桥研究中心开始做了一些研究,从微观结构和含湿性对比 HPC 与 NC 的差异¹⁾.他们比较了 HPC 的水泥石(代号 CH)与混凝土(代号 BH),NC 的水泥石(代号 CO)与混凝土(代号 BO),按表 3 配比.

初步试验结果如下:

1. 自收缩率(由于水化):HPC 引起的自收缩率大大超过 NC.用试件内部相对湿度(RH)来比,BH 3 个月降为 75 %,6 个月 72 %,1 年 69 %;而 BO 6 个月为 95 %,1 年为 94 %.
2. 干缩率(由于外界湿度降低):外界相对湿度从 90.4 %逐步降到 3 %(现取 90.4 %到 53.5 %一段,较可信),对比干缩率如表 4.
3. 总收缩率:试件经 6 个月自收缩后进入 RH = 53.5 %的环境中,待收缩到稳定,测得总收缩率,计算干缩率如表 5.

从表 4 可知 HPC 自收缩大于 NC,但干缩率与总收缩率均远小于 NC,这对 HPC 的抗裂性、脆性等重要应用功能以及早期湿养护的重要,提供了有价值的依据.

1) 见 Baroghel-Bmny 等. Microstructure and moisture properties of HPC. 4th International Symposium on Utlization of HSC/ HPC. Paris. 1996.

表 3 NC 与 HPC 的水泥石与混凝土配比

试样	水胶比	掺加料 ¹⁾	集料 胶凝材	28 d 强度/ MPa
CO	0.34	—	—	—
CH	0.19	硅灰 10 %, 萘系 超塑化剂 1.8 %	—	—
BO	0.48	—	5.48	49
BH	0.26	硅灰 10 %, 萘系 超塑化剂 1.8 %	4.55	115

1) 掺加料含量为质量百分数.

表 4 不同湿度下的干缩率

RH(%)	干 缩 率 / 10 ⁻⁶			
	CO	CH	BO	BH
90.4	0	0	0	0
80.1	733	500	157	186
71.5	1 170	818	297	231
63.2	—	1 249	419	—
53.5	2 118	1 635	663	351

表 5 干缩率与总收缩率

试 样	6 个月达到的 RH(%)	自收缩率	总收缩率	干缩率 = 总收缩 - 自收缩
CO	93	995	3 400	2 405
CH	80	1 630	2 765	1 135
BO	95	130	1 030	900
BH	72	205	325	120

在此必须指出,各种收缩率还受到试件尺寸、胶凝材、配比、量测方法等因素的影响.上述对比数据是在一定条件下得来,精确性尚不足,应待更多的研究来证明和深化.

该中心在亚微观、微观研究中,对水泥石(hcp)用 BET 水蒸汽吸附法测定每克干 hpc (RH = 3 %) 的比表面积(m²/ kg) 为 CO:83,CH:85,BO:109,BH:92.可见 HPC 与 NC 的比表面积测值相近,但用直接法和间接法所定出的水化程度却相差很大.CO 接近 76 %,CH 只 44 %,如此大差距的水化程度,由比表面积值表明所生成的 CSH 凝胶量却几乎相等.这是由于活性细掺料(在这里是硅灰)与高效减水剂在低水胶比条件下起的作用,使 HPC 在结构和性能上与 NC 产生巨大差异.由于活性细掺料的火山灰作用在 HPC 的水泥石中,氢氧化钙石(Ca(OH)₂)只剩 3.5 %,而 NC 中常达 25 %.

该中心又用水银压入法(MIT)作孔分析.NC 水泥石(CO)孔分布集中在 100~200 Å,而 HPC 水泥石(CH)在 MIT 测量范围内未出现孔峰.孔的量极少.因此又用 BJH 法测更小的孔级,测得 NC 水泥石 CO 中孔半径 20~50 Å 的孔较多,而 HPC 水泥石(CH)的孔半径多在 20 Å 左右,孔的总体积也较小.通过计算,CO 的凝胶孔隙率(半径 < 50 Å)为 26.7 %,与经典(Powers 提出)原始孔隙率 28 %相近.CH 的凝胶孔隙率则为 18.8 %,其孔半径多小于 25 Å,这充分说明 HPC 的高密实性与优异的抗渗性与抗气性.

虽然上述亚微观与微观研究只是较初步的探索,但已为 HPC 的高性能提供了科学解释.我国硅灰供应少,因此对磨细矿渣,优质粉煤灰、沸石岩粉以至稻壳灰、石英石粉、石灰石灰等应开展亚微观、微观研究,对超细粉磨工艺与设备也应抓紧研究.GHPC 的研究已进入高科技领域,在我国特殊条件下,更为迫切.

5 结论

1. HPC 与现有的掺混合材水泥混凝土有本质差别,不仅表现在性能的悬殊上,亚微观、微观研究结果,已提出充分说明. HPC 必须向 GHPC 发展.
2. GHPC 是水泥与水泥基材料走可持续发展道路的正确方向,在我国尤为紧迫,必须加紧科研,不断创新,并应加强宣传教育工作.
3. GHPC 的科技工作必须遵循整体论与还原论结合的综合集成的科研思想,不断创新,不断前进.

参 考 文 献

- 1 吴中伟. 环保型高效水泥基材料. 混凝土, 1996, (4): 3~6

Green High Performance Concrete and Innovation

Wu Zhongwei

(China Building Materials Academy, Beijing, 100024)

Abstract It is pointed out in this paper that nowadays the cement and cement based materials should be studied on the grand, macro, and submicro three levels. Portland cement and normal concrete are facing the serious sustainable development problem. About 1 ton CO₂ pollution is caused by 1 ton cement clinker production. The seriousness of the development of green high performance concrete in China is described by the author from the point of view of grand, macro, and submicro three levels as the requirement of cement concrete in China is increasing rapidly.

Key words high performance concrete; green high performance concrete; ultra high performance concrete; environment compatible cement-based materials; clinker