

文章编号: 1004 - 0609(2004) S1 - 0164 - 09

# 水泥混凝土与可持续发展<sup>①</sup>

唐明述

(南京工业大学 材料科学与工程学院, 南京 210009)

**摘要:** 水泥和混凝土是工程中用量最大的材料。要实施可持续发展战略, 节约能源、资源和保护环境, 这是必须重视的重要领域。着重阐述了充分利用工业废渣、提高工程耐久性和延长使用寿命的经济效益和社会意义及应采取的措施。

**关键词:** 水泥; 混凝土; 可持续发展; 工业废渣; 耐久性

## Cement, concrete and sustainable development

TANG Ming-shu

(School of Materials Science and Engineering,  
Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Cement and concrete are the most widely used building materials. For the purpose of realization of sustainable development, much more attention should be paid to energy saving, resource conservation and environment protection. The recent progresses in the world was reviewed and the importance of full utilization of industrial wastes and improvement of the durability of concrete structures for sustainable development was emphasized. At the same time, many methods were suggested for the realization of the above goals.

**Key words:** cement; concrete; sustainable development; industrial waste; durability

在古文明的建设中, 混凝土材料已经发挥了它的独特作用。远在公元 70~ 80 年, 古罗马人就用石灰加火山灰精细加工捣实, 建成混凝土竞技场 (Colloseum), 一直保留到现在。在人类发展过程中, 混凝土已逐渐成为人类社会生活、文化生活的基础。城市、公路、桥梁、港口码头、机场、大坝、隧道、地下工程、海上海下工程等建设中应用最广、使用量最大的是水泥混凝土。要实现国民经济的可持续发展, 节约资源、能源和保护环境, 水泥混凝土是关键领域和必须重视的环节。主要内容是必须充分重视资源的再利用, 改变单纯追求加快施工速度和压低工程造价的片面行为, 从整体效益出发, 确保工程质量, 力争将重要工程的寿命提高到 100 年以上, 这将是当前需要解决的紧迫问题, 也是造福于子孙后代的宏伟工程。

## 1 水泥混凝土是社会发展的支柱产业

纵观人类的发展史, 最活跃的是 20 世纪, 特别是科学技术取得了突飞猛进的发展, 人类 80% 的科学技术成就是在这 100 年内完成的。而人口也出现前所未有的增长。在 20 世纪初, 世界总人口为 15 亿, 到 2000 年达到了 60 亿。人类从冰川时代之末, 经过 10 000 年人口才达到 15 亿, 而在过去的 100 年内却从 15 亿增加到 60 亿<sup>[1]</sup>。

随着人口的急剧增长, 加以高速城市化, 城市人口越来越多。20 世纪初, 城市人口仅占 10%, 而到 2001 年, 全球 60 亿人口有一半居住在城市, 其中超过 1 000 万人口的特大城市 19 个, 500~ 1 000 万人口的城市 22 个, 100~ 500 万人口的城市 370

① 作者简介: 唐明述(1929 -), 男, 教授, 中国工程院院士。

通讯作者: 唐明述, 院士; 电话: 025-83587218; E-mail: tangms@njut.edu.cn

个, 50~ 100 万人口城市 430 个。城市化和交通运输的需要, 使建筑业呈现蓬勃发展, 水泥产量从 1900 年的 1 000 万 t<sup>[2]</sup> 发展到 2000 年的 16.6 亿 t。2001 年达到 17 亿 t。若以混凝土的质量配比计, 水泥 12%, 水 8%, 集料 80%, 则每年需砂石 113.3 亿 t, 水 11.3 亿 t, 总和为 141.6 亿 t。而每年用于制造水泥的原材料需要 31.8 亿 t。由此可见水泥混凝土工业中, 每年固、液体物料处理量总和达 173.4 亿 t, 这是其他材料望尘莫及的。开采、运输、耗能及其对环境的影响均应予以充分的重视。仅水泥工业年 CO<sub>2</sub> 排放量就达 17 亿 t, 占全球总排放量的 7%。据称全世界每年的物流量为 5 000 亿 t, 而其中仅 300 亿 t 转变成可利用的产品, 其余均变成流入环境的废气、废液和废渣。以上数据表明建筑业对节约能源、资源具有重要作用。据统计, 美国土木基建工程系统 (Civil infrastructure system) 在国民经济中占有很大比例, 总价值为 34 000 万亿美元, 有 75% 的学校过分拥挤陈旧, 29% 的桥梁有问题, 1/3 道路质量不好, 需要 110 亿美元更换 54 000 个饮水系统, 要使整个土木基建工程系统升级需 1.3 万亿美元。

表 1 列出近几年来世界各国水泥产量的变化<sup>[3]</sup>。从表 1 中可以看出, 水泥产量的变化也反映出各国经济的盛衰, 亚洲的金融风暴也表现在泰国等国的水泥产量的增减趋势上; 前苏联曾一度高居全世界水泥产量的首位, 而今的俄罗斯已远不如昔 (当然这其中也有版图缩小的因素); 而美国等国的水泥产量几乎与 20 世纪 50~ 60 年代相当, 没有太大的变化; 反之, 发展中国家, 如我国与印度, 水泥产量呈持续升高趋势, 这种趋势看来今后还会持续下去。

## 2 我国水泥混凝土产业在世界的地位

2002 年美国混凝土协会的专家们考察了三峡工程<sup>[4]</sup>, 写下了不少赞美之词, 惊叹中国在 2300 年前建造了举世闻名的“万里长城”。表示中国在混凝土领域将取得突出的成就, 必须予以充分重视, 并称“中国将混凝土大量应用于各种等级和各种类型的建筑之中。我们必须密切注视中国的建筑业, 特别是他们在混凝土方面的进步。按照现在国家发展的步伐, 在不久的将来中国的建筑技术和方法将超过西方。尽管有人相信这是应该关注的原因, 但我们更相信这将对西方提供空前的机遇去与中国人更密切合作。”

表 2 所列为 2001 年世界水泥产量前 10 名的国家。从表 2 可以看出, 中国的水泥产量在世界上遥遥领先。在前 10 名中除中国外其他 9 个国家的产量总计为  $505.3 \times 10^6$  t, 也就是说中国的产量比其

表 1 世界水泥产量 ( $10^6$ t/a)

国家	年份				
	1997	1998	1999	2000	2001
巴西	38.1	39.9	40.3	39.2	39.5
加拿大	12.0	12.1	12.6	12.6	13.0
中国	511.7	536.0	573.0	597.0	626.5
埃及	19.7	21.0	23.3	24.1	24.5
法国	19.8	19.5	20.2	20.1	19.8
德国	36.0	36.6	35.9	34.7	28.3
希腊	15.0	15.0	13.9	14.5	15.5
印度	80.0	85.0	90.0	95.0	100.0
印度尼西亚	27.5	22.3	23.9	27.8	31.3
伊朗	19.3	21.3	22.1	23.9	26.7
意大利	33.7	35.5	37.3	38.9	39.8
日本	92.0	81.3	81.1	81.1	76.6
韩国	60.3	46.1	48.2	51.3	52.0
马来西亚	12.7	10.4	10.1	11.5	13.8
墨西哥	27.6	27.7	29.4	31.7	30.0
菲律宾	14.7	12.9	12.6	12.0	8.7
波兰	15.0	15.0	15.6	15.1	11.9
俄罗斯	26.7	26.0	28.4	32.4	35.1
沙特阿拉伯	15.4	14.0	16.3	18.1	20.6
西班牙	27.6	27.9	35.8	38.1	40.5
中国台湾	21.5	19.7	18.3	17.6	18.1
泰国	37.1	22.7	25.4	25.5	27.9
土耳其	36.0	38.2	34.3	35.8	30.1
英国	12.6	12.4	12.7	12.5	11.9
美国	84.3	85.5	87.8	89.5	90.5
其他国家	243.7	246.0	251.5	260.0	267.4
总和	1 540.0	1 530.0	1 600.0	1 660.0	1 700.0

表 2 2001 年水泥产量前十名的国家

排名	国家	产量/ $10^6$ t
1	中国	626.5
2	印度	100.0
3	美国	90.5
4	日本	76.6
5	韩国	52.0
6	西班牙	40.5
7	意大利	39.8
8	巴西	39.5
9	俄罗斯	35.1
10	印度尼西亚	31.3

他9个国家的总和还要多。由于我国人口众多, 往往人均产量或人均占有量远低于世界人均水平, 但水泥不然, 以2001年为例, 人均产量已达482 kg, 而世界平均仅283 kg。实际上, 据报道2002年中国水泥产量已达7.25亿t, 即人均占有量为558 kg, 远远超过世界平均值, 也比西方发达国家高很多。

对于我国的水泥产量, 1998年我国曾提出“控制总量, 调整结构”。这之后连续3年也曾提出过控制数量, 但实际上水泥产量必然会随国民经济的快速增长而强劲增加, 从未达到过控制目标。这里还有一个问题, 目前的水泥总量是根据水泥厂产量而定, 现在有众多商品混凝土搅拌站和大型工程广泛推广使用磨细掺和料, 所以实际的混凝土方量远大于从水泥产量而推算的总量。个人的想法是: 尽可能控制熟料产量不增加或少增加, 充分利用我国的工业废渣, 如矿渣、粉煤灰、煤矸石等以满足蓬勃发展的混凝土工程的巨大需求。这是满足可持续发展的最有效的途径。

中共“十六大”已给出我国今后发展的宏伟蓝图, 到2020年将全面实现小康, 国民生产总值翻2翻, 这就必然要大力开发基础工程、基础设施的建设, 胶凝材料的需求量必将仍然保持高速发展。其原因有如下几点。

### 2.1 城市化的大发展

世界先进国家已基本完成城市化, 城市人口占80%; 而我国城市化才开始起步, 目前仅达36%。今年“两会”期间着重讨论了“三农”问题, 众多著名社会学家和经济学家一致认为要解决农民的贫困问题, 仅靠土地增收是不可能的, 必须将大量农村人口转移到城市, 计划2050年城市化程度达到80%。以当时人口16亿计, 则城市人口将从目前的4.68亿达到12.4亿。这样大量的人口搬迁, 必然要增加工业、民用建筑、文化娱乐设施以及交通运输网络。这是必将大幅度增加水泥产量的原因之一。

### 2.2 基建工程(Infrastructure)的需要

根据以下资料, 可以了解到我国的基建工程正从蓬勃发展走向顶峰。

公路建设: 高速公路“九五”末达到1.6万km, “十五”预期达到2.5万km, 2010年达到3.54万km, 2020年达到6.44万km。

公路通车里程: “九五”达到140万km, “十五”达到160万km, 需要数为274万km。

港口: “十五”将新增135个深水泊位, 改造45个泊位, 新增1600万标准箱的吞吐能力。

水电: 2049年装机总量15亿kW, 其中水电装机总量4.3亿kW(相当于24个三峡工程)。

其他铁路、隧道、海上海下工程加以治山、治水、治海、治沙漠等的需要, 必需大力增加胶凝材料的数量以满足国民经济高速发展的需要。

## 3 实施“可持续发展”战略, 水泥混凝土产业大有作为

在“能源、环境可持续发展研讨会”上, 中国工程院院长徐匡迪呼吁: “人类生存发展离不开大自然赋予的宝贵资源, 大力推进资源的节约回收和再利用是一项刻不容缓的任务, 也是实现可持续发展的重要内容 and 必然选择”。而固体废渣的利用在建筑业占主导作用, 如其中的粉煤灰和煤矸石在我国年产量近3~4亿t。虽然可以开展其他领域的综合利用, 但数量极其有限, 只有用于水泥混凝土中才有可能从根本上解决问题。从上文的叙述可知, 我国2002年水泥产量已达7.25亿t, 以250 kg/m<sup>3</sup>用量计, 则混凝土方量达29亿m<sup>3</sup>。若以每立方米混凝土中水泥: 水: 砂石=12: 8: 80(质量比)计, 则用水量达4.83亿t, 砂石材料48.3亿t, 总计约60亿t。在水资源并不丰富、砂石材料在很多地方都出现紧缺的情况下, 节约资源问题就显得特别突出。除利用工业废渣外, 关键问题就是提高耐久性, 延长使用寿命。若能将道路、桥梁、港口、机场的寿命由10年提高到50年, 则材料将节省1/5。若能将寿命提高到100~250年, 则材料的消耗也将按比例减少。由于水泥混凝土是用量最大的建筑材料, 我们要节约资源、能源、资金和保护环境, 必须在这一领域予以特别的重视。下面将就这两方面的问题展开论述。

### 3.1 充分利用工业废渣

这是一个古老的话题。其实就建筑业利用工业废渣而言, 应该说我国在世界上也是领先的。在美国尚未推广利用矿渣的20世纪80年代初, 我国已经将所有水淬高炉矿渣应用于水泥混凝土工业中。粉煤灰的利用, 就研究水平、资料积累以及在工程上的实际应用, 都有相当高的水平。其他工业废

渣, 如钢渣、磷渣、铜渣、镍矿等我国均有系统研究和工业利用。这里着重介绍的是 Malhotra<sup>[5]</sup> 和 Mehta<sup>[1]</sup> 近年来开发和倡导的“高掺量粉煤灰水泥和混凝土”。这两位专家分别是加籍印度人和美籍印度人, 是他们特别提到应在中国和印度推广应用高掺量粉煤灰水泥和混凝土。但作者认为最值得开发利用的首推中国, 因为从目前的水泥产量而言, 中国为印度的 7 倍, 就煤产量而言, 2002 年我国煤产量为 13.8 亿 t, 居世界首位。估计粉煤灰量约为 1.8 亿 t 左右, 矸石量也大体相当, 也就是说二者总和为 3.6 亿 t; 预计今后我国煤产量将达 20 亿 t, 届时粉煤灰量将达 2.6 亿 t, 二者总和将达 5~6 亿 t。提出高掺量粉煤灰混凝土并进行过系统研究的是 Malhotra 所在的加拿大 CANMET (Canada Center for Mineral and Energy Technology—加拿大矿物与能源技术中心), 他们建立了“水泥混凝土可持续发展的世界中心—International Center of Sustainable Development on Cement and Concrete Industries”。其实加拿大到 2001 年水泥年产量为  $13 \times 10^6$  t, 仅为我国的 1/50。所谓高掺量粉煤灰混凝土是指掺量达 50%~60%。若能实现, 即使我们将水泥熟料控制在 5 亿 t, 则水泥产量可达 10~12.5 亿 t。这可能是我国建材行业既要保持熟料总量不变而又能满足经济快速增长需求的最有效的途径。这里强调“充分”利用有两重含义, 一是全部利用, 实现零排放; 其次是充分利用粉煤灰的潜在胶凝特性, 这只有在与水泥或与石灰共用时才表现出来, 单独用于路基或填坑不能说是最有效的利用。

表 3 所列是 Mehta<sup>[1]</sup> 推荐的 C25 混凝土, 特别表明传统混凝土与高掺量粉煤灰混凝土的配合比差异。

表 3 C25 混凝土配合比对比

项目	传统混凝土		高掺量粉煤灰混凝土	
	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积/ $\text{m}^3$	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	体积/ $\text{m}^3$
水泥	307	0.075	154	0.037
粉煤灰			154	0.049
水	178	0.136	120	0.091
含气量(2%)		0.015		0.015
粗集料	1 040	0.294	1 210	0.343
细集料	825	0.244	775	0.228
全部	2 350	0.764	2 413	0.764
水灰比	0.58		0.38	
净浆体积		0.226		0.192

这两种配合比均能达到 C25。后者的特点是水灰比仅 0.38, 坍落度为 12.5~15.0 cm, 但由于水

灰比小, 净浆量少 16%, 因而干缩也比较小。

Malhotra<sup>[5]</sup> 特别推荐了用于混凝土路面的高掺量粉煤灰混凝土配合比及其强度试验结果(表 4 和表 5)。

表 4 高性能高掺量粉煤灰混凝土配合比 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

成分	强度等级 (MPa, 28 天)		
	低强 (20 MPa)	中强 (30 MPa)	高强 (40 MPa)
水	120~130	115~125	115~120
ASTM I 型/II 型水泥	125~130	155~160	180~200
ASTM F 级粉煤灰	125~130	215~200	220~225
粗集料	1 170±10	1 200±10	1 110±10
细集料	800±10	750±10	750±10

1) 若混凝土需要早强, 即 1 天强度大于 10 MPa 时, 采用早强型水泥 ASTM III 型;

2) 引气剂掺量由所需含气量、引气剂类型、砂级配而定, 当含气量为 5%~7% 时, 对于低强混凝土掺 200  $\text{mL}/\text{m}^3$ , 对高强混凝土掺 300  $\text{mL}/\text{m}^3$ 。

3) 超塑化剂掺量决定于其品种和对流动度的要求, 当高坍落度为 20 cm 时, 萘系减水剂需 3~5  $\text{L}/\text{m}^3$ 。对滑模混凝土路面, 坍落度仅需 5 cm。在这种情况下, 当用丙烯酸型超塑化剂, 则掺量要小得多。

表 5 不同型号水泥的强度 (MPa)

性能	龄期/d	ASTM I 型 水泥	ASTM II 型 水泥
抗压强度/MPa (15 cm × 30 cm 圆柱体)	1	8	14
	7	20	25
	28	35	35
	91	45	45
	365	55	-
抗弯强度/MPa (三点荷载棱 柱体)	28	5	5.5
	91	6	-
劈裂抗拉强 度/MPa (15 cm × 30 cm 圆柱体)	28	3.5	3.5
	91	38	-
弹性模量	28	35	-
	91	38	-
干缩	450	$500 \times 10^{-6}$	

混凝土路面设计时一般要求 28 天抗弯强度大于 4 MPa, 可见粉煤灰混凝土能满足要求。实际上必须指出水泥是活性材料, 它与钢材、木材、塑料、陶瓷等均不同。在有利条件下, 它的强度会不断增加, 特别是粉煤灰混凝土, 按照 Malhotra<sup>[5]</sup> 的经验, 91 天强度为 28 天强度的 120%, 一年为其 140%。由于水灰比低, 因而混凝土结构致密, 如表 6 所示, 高掺量粉煤灰混凝土具有很好的耐久性。

特别应该强调粉煤灰混凝土早期强度不高, 但

表6 高掺量粉煤灰混凝土的耐久性试验结果

试验	湿养护期	暴露条件	结果
轴压 2.7 MPa	120 d	> 100 d 在 2.7 MPa 压力下	$\leq 10^{-13}$ m/s
抗冻性(根据 ASTM C666 方法 A 冻融循环)	14 d	1 000 次	耐久性系数 $\geq 90$
	28 d	60 V, 6 h	5 000~ 2 000 C
	91 d		200~ 700 C
氯离子快速渗透试验 (ASTM C1202)	28 d 后空气干燥 7 d	混凝土板用 3.4% 的 NaCl 溶液浸泡 6 个月	覆盖层 13 mm 未发现钢筋锈蚀
抗氯离子渗透腐蚀(b)		混凝土板用 4% 的 NaCl 溶液浸泡 10 a	覆盖层 13 mm 未发现钢筋锈蚀
抗硫酸盐腐蚀	28 d	浸入 5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液 10 a	试件膨胀很小
碱硅酸反应	24 h 脱模	各种快速试验条件	试件膨胀很小
碳化试验 (用酚酞测试 1.6 <sup>3</sup> m 试块保存在 25 °C, 50% RH)	28 d	31 月	碳化深度 4mm
		4 a	碳化深度 7 mm
		7.5 a	碳化深度 8 mm
		13 a	碳化深度 11 mm
		15 a	碳化深度 12 mm
放在 Me. Treet 岛的海水中	> 91 d	10 a 干湿循环, 100 次冻融循环, 1 a 海水侵蚀	无破坏现象
ASTM C 799 混凝土耐磨试验	91 d	磨蚀 2 mm 的时间	与参比混凝土相同
耐疲劳极限	28 d	千百万次疲劳循环	与参比混凝土相同

后期强度不比硅酸盐水泥差,甚至还高一些,表7为10年的对比试验结果。

表7 粉煤灰混凝土与硅酸盐水泥抗压强度对比(MPa)

龄期/d	粉煤灰水泥混凝土 <sup>1)</sup>	硅酸盐水泥混凝土 <sup>2)</sup>
1	7.8	41.5
3	27.1	47.5
7	34.0	51.4
28	49.9	59.9
91	82.6	75.6
182	87.0	74.3
365	95.6	88.2
546	100.5	94.7
730	99.9	95.9
912	96.8	95.5
1 460	109.9	99.4
3 650	112.3	102.3

1) -350 kg/m<sup>3</sup>, 水泥:粉煤灰= 43:57, 水/灰= 0.29;  
2) -485 kg/m<sup>3</sup>, 水泥:粉煤灰= 100, 水/灰= 0.27

从上述试验来看,最宝贵的长龄期试验结果表明高掺量粉煤灰耐久性良好,特别是人们担心粉煤灰掺入量多,消耗掉 Ca(OH)<sub>2</sub> 后,混凝土孔隙液相 pH 降低会加剧钢筋腐蚀,但上述结果表明,这种混凝土并不加剧钢筋腐蚀,原因是材料致密,因而抗碳化性能良好。

Mehta<sup>[1]</sup>还介绍了几个在工程中采用高掺量粉煤灰水泥的实例。一例是在美国本土西部 4 000 km 的太平洋中的 Kauai 岛上修建了两块整体的混凝土板,声称寿命预期为 1 000 a,其配合比为: I 型波特兰水泥 106 kg/m<sup>3</sup>, F 级粉煤灰 142 kg/m<sup>3</sup>, 水 100 kg/m<sup>3</sup>, 破碎的钙质砂 994 kg/m<sup>3</sup>, 破碎的玄武岩粗集料(最大 25 mm) 1 120 kg/m<sup>3</sup>, 超塑化剂 3.5 L/m<sup>3</sup> (即水/胶凝材料= 0.4, 水泥中粉煤灰量 57%, 水泥:砂:石= 1:3.8:4.5); 板的设计标号为 C20, 两年之后检查无任何裂缝,强度增加了一倍。另一个实例是重型钢筋抗剪应力墙和大型后张钢筋混凝土基础深 3.4 m、宽 1.8 m, 设计者目的在于建一个无裂缝“绿色混凝土”建筑物。对于抗剪应力墙和基础,要求坍落度为 15 cm, 56 天强度为 35 MPa; 同时对于混凝土墙为了便于脱模,要求 7 天强度为 20 MPa; 对于基础混凝土,特别担心的是温度应力产生的裂缝,为此设计要求内外温差小于 25 °C。为了满足抗剪应力墙的要求,使水和胶凝材料之比为 0.32, 掺有超塑化剂,配合比中 I 型波特兰水泥 195 kg/m<sup>3</sup>, F 级粉煤灰 195 kg/m<sup>3</sup>; 对于基础混凝土,为了减少水化热,水泥用量为 160 kg/m<sup>3</sup>。由于混凝土流动性好,未出现蜂窝狗洞,9 个月后观察无裂缝。

这些实例可推荐用于公路路面,对于我国是有

现实意义的。我国幅员辽阔, 希望公路里程达到 270 万公里以上。根据加拿大的工程经验<sup>[7,8]</sup>, 认为水泥混凝土路面有许多优点: 1) 钢性水泥混凝土路面可将载荷均匀分布到基层, 一般基层载荷仅为柔性沥青混凝土基层载荷的 1/10。一个 3 000 kg 的滚轮, 前者的基层载荷仅 0.2 MPa, 后者的基层载荷可达 2 MPa。2) 一般混凝土路面的寿命为 34 a, 而沥青混凝土路面为 17 a。春季化冻时沥青混凝土路面损伤为 61%, 而混凝土路面的损伤仅 5.5%。3) 混凝土路面与沥青混凝土路面不同, 不会形成车辙、搓衣板型路面和在边角形成挤浆现象。4) 混凝土路面凹坑少, 不打滑, 因而可缩短刹车距离。5) 混凝土路面摩擦阻力小, 汽车油耗可节省 10%~20%。6) 混凝土路面反光性能良好, 对照明要求低。7) 混凝土路面行车舒适度 (Rid comfort and quality) 高, 在新建的头两年, 沥青混凝土路面舒适度高, 但两年半以后就会不如混凝土路面。8) 混凝土路面经过改进, 噪音也可减小。

随着运输量的增加以及老化运输工程维修的新要求, 过去 10 年加拿大水泥混凝土路面需求持续增长; 美国的混凝土路面已达 30%。由于我国自产沥青易软化, 路面寿命更短, 推广应用水泥混凝土路面是有利的。德国的经验<sup>[9]</sup>是过去所建公路, 其设计承载能力已不能适应大型重车的运行, 需要全面重建加厚, 在这种条件下, 选择水泥混凝土路面是有显著效益的。在路面混凝土中若能大力推广高掺量粉煤灰混凝土, 对节约资源、能源和保护环境将有重大的社会效益。Tarun<sup>[10]</sup>等还证明粉煤灰掺量达 70% 的水泥混凝土路面可使用 7 年, 性能良好。

实际上在我国的工程中采用高掺量粉煤灰水泥已积累了相当丰富的经验。四川二滩电站大坝混凝土采用水泥 260 kg/m<sup>3</sup>, 其中掺有 52% 优质粉煤灰, 水和胶凝材料比为 0.43。180 天后强度达到 C40。水工工程中采用碾压混凝土, 粉煤灰掺量可达 60%~70%。但要在公路、机场路面混凝土中全面推广使用高掺量粉煤灰混凝土还需要开展系统开发研究, 制定出相应的规范、规程, 以确保工程质量。必须强调还应注意以下一些问题。

#### 1) 优选原材料

总的说来我国粉煤灰质量不如国外。Mehta<sup>[1]</sup>曾提到国外所用的优质粉煤灰是现代化热电站的产物, 具有含碳量低和粒度细的优点, 特别是可以提高混凝土的流动度, 使用水量可以降低 15%~20%, 还能保持相同的流动性。但按照我国标准,

I 级粉煤灰用水量可以降低 5%, II、III 级粉煤灰还会增加用水量, 因此要在公路、机场路面上使用高掺量粉煤灰, 必须制定相应的标准和规程。同时要有稳定的供货来源, 对质量差的粉煤灰和煤矸石进行加工分选是必要的。

#### 2) 注意中外水泥名称的差异

土建类研究生和混凝土科技工作者往往把我国的普通硅酸盐水泥翻译成国外的普通波特兰水泥 (Ordinary Portland Cement, OPC)。其实这二者是不同的, 我国的普通硅酸盐水泥允许掺入 15% 的混合材, 而国外的 OPC 是不允许的。要把我国的普通硅酸盐水泥准确地翻译成英文, 进行国际交流是困难的。所以著者一再呼吁与国际接轨, 应将这一品种取消。在这里不是深入讨论译名问题, 但值得注意的是我们要采用高掺量粉煤灰必须了解使用的是什么水泥, 若为普通硅酸盐水泥, 就一定要了解掺有的混合材及掺量, 再在此基础上加粉煤灰。还特别要注意的是有的水泥厂即使粉煤灰(或矿渣)掺量达 20%~25% 甚至更高, 也以普通硅酸盐水泥出售, 以这种水泥为基础再掺大量粉煤灰又不注意其特性, 就很可能造成质量事故。

#### 3) 超塑化剂

从 20 世纪 50 年代起我国就大量使用掺粉煤灰和矿渣的水泥。但在工程中也发现问题, 原因是早强低、易碳化、抗冻性不佳。要特别指出的是国外现在倡导使用高掺量粉煤灰水泥, 其前提条件是使水灰比降得很低(0.35 以下, 甚至 0.30)。而我国早期的混凝土水灰比往往在 0.5~0.6 以上。现在大家都知道水灰比为 0.4 是使水泥浆体无毛细管孔而只有凝胶孔的边界条件。由于粉煤灰化学反应程度不高, 对粉煤灰水泥这一临界值就必然要小一些。因此选用与水泥有良好匹配性能的高效减水剂使水灰比达到 0.30~0.35 是十分重要的。无有害孔是混凝土提高抗渗、抗冻、抗腐蚀和具有优异力学性能的关键因素。

#### 4) 养护

水泥与钢材、木材、塑料等的最大区别在于使用过程中强度会继续增加, 故称之为活性材料 (Living materials)。高掺量粉煤灰水泥混凝土由于化学反应缓慢, 更加需要养护, 一定要注意国外报导的其长期性能良好是在试验室湿养条件下取得的。Malhotra<sup>[5]</sup>提出一般养护期为 7 天, 在干热条

件下要养护 14 天, 若有条件, 特别是对于公路路面, 可以再延长一些养护龄期。

#### 5) 由点到面

先精心设计建一段典型路面, 取得经验, 再逐步推广。根据李大为等<sup>[11]</sup>的资料, 粉煤灰掺量达 40%, 水泥混凝土路面的试验路段获得良好效果, 希望这样的试点工程能继续进行。同时对高掺量粉煤灰混凝土可能出现的问题, 如早强低、泌水、收缩、抗冻、抗磨等性能, 进行系统深入研究<sup>[12]</sup>, 特别是要针对各种类型粉煤灰进行研究, 为其推广应用奠定坚实的科学基础。

### 3.2 提高工程的寿命是节约资源、能源和保护环境的关键措施

这一命题已被众多科技工作者反复论述过。根据 1998 年美国土木工程学会的资料<sup>[1]</sup>, 美国要解决其基建工程的问题, 需要的经费是 1.3 万亿美元, 这就相当于我国 2002 年国民生产总值。反复提供这些数值是想让全社会都能理解, 要节约资金、人力、物力和实施可持续发展, 建筑业可以发挥极大的作用, 在这篇文章里只想补充几点应开发研究的课题。

#### 1) 在合同条款中应有耐久性的条款

目前在招标过程中, 尽量压低造价, 工程一般一年后验收完毕, 之后就无责任了。这样的合同不可能让中标者花大力气注意长期寿命。当前国外已提出桥梁寿命应按 120 年设计, 路面寿命设计应为 40 年。若在合同条款中列出 10~20 年不得大修的条款, 将迫使中标者一定想方设法重视耐久性。

#### 2) 钢筋锈蚀是建筑物和构筑物破坏的重要因素

为了保护钢筋, 近年来的规范反复强调保护层厚度的作用, 要求在 3.5 cm 以上, 直至 7 cm。但层厚增加必然增加构件尺寸和质量, 同时在施工中也往往并不均衡。因此材料工作者应设法减轻这一厚度, 同时又能保护钢筋。在材料科学迅猛发展的今天, 这应该是有可能的, 但必须强调是“价廉物美”, 因为建筑业是十分重视造价成本的。

#### 3) 碱集料反应也是破坏混凝土的重要因素

值得一提的是, 美国最早发现碱集料反应, 并采取了较多防患措施, 但最近仍发现大量新的事例<sup>[13]</sup>, 仅军用机场就有 31 个遭受碱硅酸反应的损

伤, 其中空军机场 23 个, 陆军机场 3 个, 海军机场 6 个, 时间均在 5~15 年之内, 因而引起高度重视。我国机场在 10 年左右严重破坏的也不乏事例。美国提出除采用低碱水泥以外还必须采用有一定规范要求粉煤灰、矿渣和硅灰, 在我国特别应重视鉴定集料碱活性的代表性。一个大型工程使用的集料在万吨、十万吨以上, 只鉴定几公斤或几十公斤集料是不具有代表性的, 特别是采石场地质复杂时, 往往各地质层面情况很不一样。加拿大 Kingston 地区的集料就明显表现出有的鉴定是活性的, 而另外一些岩层是非活性的。在大型重要工程开工之前, 与地质工作者联合取样鉴定是十分必要的。

#### 4) 冻融破坏是严寒地区的关键问题

我国的东北、西北、华北地区冬季气温偏低, 可达 -40 °C, 提高抗冻性是这些地区延长混凝土使用寿命的关键措施。国内外资料一致证明加入引气剂使含气量达到 4%~6% 是提高抗冻性的最有效措施。加拿大的资料推荐使用引气剂<sup>[6]</sup>, 并称“引气剂是极其重要的, 可改善流动性, 减少分层, 使新鲜混凝土早完工; 对硬化混凝土增加抗冻性, 抗化冰盐的剥离, 提高抗硫酸盐性和不透水性”。引气混凝土是一个“设计”的孔体系, 空间系数和单位面积的孔隙及其比面积是其重要特性, 表明孔间距、分布和孔数。在路面混凝土中这些孔有减震作用。但目前我国有的寒冷地区仍未能全面推广, 其原因是引气剂品牌多, 好坏差别很大; 其次是如何掺匀也是施工中的难题, 多掺强度显著下降, 掺少了不起作用; 第三个原因是在现场需要能快速测定含气量和气孔大小和分布的仪器。科技工作者应针对实际工作中存在的问题找出解决办法, 否则提高耐久性的目标是无法实现的。

#### 5) 抗硫酸盐腐蚀

我国西北、西南地区地下水含有硫酸盐的地方及盐湖地区, 必须重视化学腐蚀。陕西吴起镇曾因集料中含有石膏使桥梁破坏, 西南地区的隧道也曾遭受硫酸盐腐蚀。

#### 6) 延迟性钙矾石 (Delayed ettringite formation—DEF) 的破坏

近年来实验室研究和工程实践一致证明若蒸养温度超过 70 °C, 使钙矾石遭受破坏, 在后期再生成, 则将产生膨胀应力, 发生开裂。为此, Hobbs<sup>[14]</sup>提出施工过程中要限制混凝土的最高温度

(表 8) 和水泥的最高用量(表 9), 这是基于下列数据而提出的规范: 假定 52.5R 水泥, 100 kg/m<sup>3</sup> 温升 14 °C, 42.5R 水泥温升 12.5 °C, 42.5 水泥温升 11 °C, 32.5 水泥和低碱抗硫酸盐波特兰水泥温升 10 °C。在我国常用钙矾石型膨胀剂应该引起特别重视, 尤其是南方地区或夏季施工。

表 8 预应力混凝土防止 DEF 开裂对温度的限制(潮湿环境)

水泥	限制温度/ °C
波特兰水泥	70
低碱抗硫酸盐波特兰水泥	85
粉煤灰波特兰水泥(粉煤灰> 20%)	85
矿渣波特兰水泥(矿渣> 35%)	85

表 9 现场混凝土防止 DEF 开裂对水泥用量的限制(尺寸> 600 mm, 潮湿环境)(kg/m<sup>3</sup>)

水泥	现场温度/ °C			
	10	20	25	30
52.5R 波特兰水泥	430	360	320	280
52.5, 42.5R 波特兰水泥	480	400	360	320
42.5, 32.5R 波特兰水泥	550	450	400	360
32.5 波特兰水泥	550	500	460	400
低碱抗硫酸盐波特兰水泥 (< 0.60% Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )	550	500	500	450
粉煤灰波特兰水泥 (粉煤灰> 20%)	550	500	500	450
矿渣波特兰水泥 (矿渣> 35%)	550	500 <td 500	450	

#### 4 我国水泥混凝土发展展望

Mehta<sup>[1]</sup> 将混凝土的年消耗量与人口的发展联系起来, 如图 1 所示, 到 2050 年世界人口将从 2000 年的 60 亿增长到 105 亿, 之后将缓慢增长至 2100 年, 达到 111 亿。因此在 2050 年之前混凝土用量将持续增加, 至 2050 年将达到 180 亿 t, 之后将逐渐下降, 至 2100 年回复到 2000 年的 120 亿 t。预测我国到 2010 年水泥产量将达到高峰, 达 12 亿 t。从目前我国基建规模蓬勃发展的趋势来看, 这是完全有可能的。要减少因水泥生产而排放的 CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub>, 唯一有效的措施是充分利用工业废渣。当前发展磨细矿渣和磨细粉煤灰作为商品, 已广泛应用于商品混凝土和大型工程之中。另一方面水泥厂也应生产高掺量混合材的水泥以适应各种工程的需

要。加拿大最近研究的结果表明: 水泥厂生产的高掺量粉煤灰水泥性能同样良好<sup>[16]</sup>。这里需要克服的是标准问题。按目前的国家标准, 在水泥掺入大量混合材, 生产出的必然是众所周知的劣质低标号水泥。为什么在商品混凝土站掺混合材得到的是高性能混凝土, 而在水泥厂生产的高掺量混合材水泥却是低标号劣质水泥呢? 关键是混凝土中应掺入塑化剂, 即使掺入大量混合材, 强度仍可保证。而在水泥厂中, 标准试验规定水灰比为 0.5 是不变的, 掺入大量混合材, 特别是粉煤灰, 早期强度往往很低, 达不到标准要求, 无法出厂。这种人为的障碍易造成在市场可以出现高性能高掺量粉煤灰混凝土, 而在水泥厂无法生产高掺量粉煤灰水泥。实际上在水泥厂掺混也有利于掺匀和易控制质量。至于水泥应磨到多细, 可能因工程需要、原材料不同、掺量不同而不同, 这些可以用系统研究解决。在水泥厂还可实现分别粉磨再混合的工艺流程, 琉璃河水泥厂在 20 世纪 50 年代就这样生产过。为此作者建议, 不仅应发展磨细掺和料的粉磨站, 在水泥厂也要设法克服人为障碍, 大力发展高掺量混合材水泥。

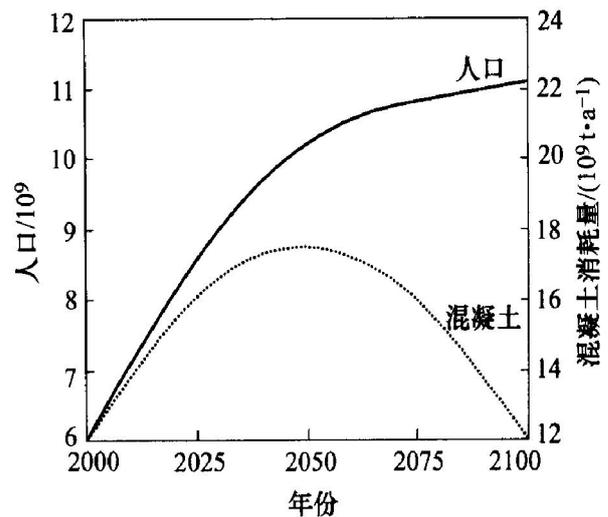


图 1 世界人口增长和混凝土消耗量预测

最近 Oner<sup>[17]</sup> 比较详细地研究了矿渣细度和水泥细度对矿渣水泥强度的影响, 其结果如下:

$$2 \text{ 天强度} = (1.88F_c + 0.64F_s) / 1000$$

$$7 \text{ 天强度} = (2.91F_c + 2.23F_s) / 1000$$

$$28 \text{ 天强度} = (5.05F_c + 5.36F_s) / 1000$$

式中  $F_s$  为水泥熟料细度,  $F_c$  为矿渣细度。由此可以看出, 在早期增加水泥细度要有利得多, 这种良好的匹配关系仅靠磨细掺合料是解决不了的, 在

水泥厂解决要有利得多。

## 5 结束语

纵观世界发展态势,我国应重视高新技术的发展,重视生物技术、纳米技术、信息技术的开发和利用。但在我国发展的现阶段,还必须重视发展制造业、基础农业、基础工业以及能源、资源和水的合理利用。对于节约资源、能源和固体废弃物的再利用,建筑业是大有作为的。当然传统工业水泥和混凝土也必须充分利用高新技术的新成果,不断创新。中国搞好水泥混凝土产业,取得显著进步也是对世界文明和科技进步的一大贡献。

### 参考文献

- [1] Mehta P K. Greening of the concrete industry for sustainable development[J]. *Concrete International*, 2002, 24(7): 23 - 28.
- [2] Marsh E. Civil infrastructure systems materials research support at the National Science Foundation[J]. *Cement & Concrete Composite*, 2003, 25(6): 575 - 586.
- [3] Aitcin Pierre Claude. Cements of yesterday and today, concrete of tomorrow[J]. *Cement & Concrete Research*, 2000, 30(9): 1349 - 1359.
- [4] Hendrik G. van Oss. Cement, U. S. Geological Survey Minerals Yearbook[M]. 2001, 165. 1 - 16. 8.
- [5] Semioli W J, Jensenet R. Taming the great dragon — Three Gorges Dam[J]. *Concrete International*, 2002, 24(8): 51 - 58.
- [6] Malhotra V M. High-performance high-volume fly ash concrete[J]. *Concrete International*, 2002, 24(7): 30 - 34.
- [7] Smith T, Tighe S, Fung R. Concrete pavement in Canada: A review of their usage and performance[A]. 2001 Annual Conference of the Transportation Association of Canada[C]. Halifax, Nova Scotia.
- [8] Cement Association of Canada. The benefits of concrete highways [EB/OL]. <http://www.cement.ca/cement.nsf/internet>
- [9] Society of Cement Factories of Germany[R]. Research Institute of Industry, Forschungsinstitut der Zementindustrie. 1996 - 1999, 114.
- [10] Tarun R N, Ramme W R, Rudolph N K, et al. Long-term performance of high-volume fly ash concrete pavements[J]. *ACI Journal Materials*, 2003, 100(2): 150 - 155.
- [11] 李大为, 宋卫国, 徐积广, 等. 大掺量粉煤灰水泥混凝土路面的研究与应用[J]. *东北公路*, 2002, 25(3): 13 - 14.
- [12] Obla K H, Hill R L, Martin R S. HVFA concrete—An industry perspective [J]. *Concrete International*, 2003, 25(8): 29 - 34.
- [13] Malval L J, Cline G D, Burke D F, et al. Alkali-silicereaction mitigation: State of the art and recommendations[J]. *ACI Materials Journal*, 2002, 99(5): 480 - 489.
- [14] Hobbs D W. Concrete deterioration: causes, diagnosis, and minimizing [J]. *International Materials Reviews*, 2001, 46(3): 117 - 144.
- [15] 崔源声, 于学敏, 孙星寿. 2002年的中国水泥工业和未来展望[J]. *新世纪水泥导报*, 2003(1): 9 - 12.
- [16] Bouzoubaa N, Fournier B, Malhotra V M, et al. Mechanical properties and durability of concrete made with High-volume fly ash blended cement produced in cement plant[J]. *ACI Materials Journal*, 2002, 99(6): 560 - 567.
- [17] Oner M, Erdogdu K, Gunlu A. Effect of components fineness on strength of blast furnace slag cement[J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(4): 463 - 469.

(编辑 杨 兵)