

# ★★世纪期刊网-专业期刊论文原文服务网站★★

## 【关于我们】

世纪期刊网专业提供中文期刊及学术论文、会议论文的原文传递及下载服务。

## 【版权申明】

世纪期刊网提供的电子版文件版权均归属原版权所有人，世纪期刊网不承担版权问题，仅供您个人参考。

## 【联系方式】

电子邮件 [support@verylib.com](mailto:support@verylib.com)

## 【网站地址】

世纪期刊网 <http://www.verylib.com>

## 【网上购书推荐商家】

[当当网](#) [卓越网](#) [读书人网](#)

[京东IT数码商城](#)

本次文章生成时间：2010-6-2 9:33:15

[文章内容从第二页开始!](#)

请将本站向您的朋友传递及介绍!

高强混凝土, 水泥, 粉煤灰, 用量。

# 低水泥用量大掺量粉煤灰的

⑥  
22-28

## 高强混凝土

宋培建

TU528.31

### 1 前言

进入九十年代以来,混凝土的设计与工艺都有了显著的变化,传统的水灰比决定强度的理论受到了挑战,而水泥用量低强度也随之降低的概念也为日新月异的混凝土工艺上的改进而突破,由于外加剂的普遍应用,低水灰比不再是干硬性混凝土的代名词,而同样可以配制出高流动性的混凝土来。

孔隙理论的出现,将强度主要归结于混凝土本体的孔隙度,使得粉末材料以填充混凝土体孔隙中增高强度为世人所注目。其中,以掺加工业废料粉煤灰与硅粉尤为得到青睐。

一般来说,当水泥用量低,大量地掺加工业废料,难以配制高强度混凝土。但是,通过掺加外加剂,合性调整混凝土的配合比,选用合宜的骨料以及掺合料,同样能配制出高强混凝土。

本论文在参阅大量国外资料的前提下,介绍目前国外九十年代大掺量粉煤灰的经验,以及用低水泥用量配制出高强混凝土的技术,以飨读者。

### 2 目前混凝土工艺学上发展的几大趋势

依作者披阅大量的专著,拟有儿大如下特点:

#### 2.1 高性能混凝土

高性能混凝土,不是以传统的强度为主导因素的一种全新的混凝土概念。按照美国混凝土学会的认识,高性能混凝土并不需要

很高的强度,但仍需达到 55Mpa 以上,但具有自流密实(免振捣)、低收缩量、高抗渗、高抗裂且能耐腐蚀。从某种意义上来说,高性能混凝土是一种耐久性优良的,能适应各种环境的又能采用机械化施工的材料。

#### 2.2 高强和超高强混凝土

从某种意义上来说,随着时代的发展,随着高层建筑不断涌现,九十年代的高强与超高强混凝土的等级范围从五十年代提高了二个等级,即九十年代的今天,高强混凝土系指能在现场浇筑出 C60 级的混凝土,超高强混凝土则为 C80 级。

这里着重指出的是,国外不再将实验室小范围内配制的强度为混凝土的等级,而是以在施工现场直接浇筑出混凝土强度为依据,因此,要实现此目标,是有一定难度的。

作者在沿海等地参观高层建筑发现,在 20~30 层以钢筋混凝土结构体系中,以 C30 混凝土作为框架柱,柱断面  $1.60 \times 1.60\text{m} \sim 2.00\text{m} \times 2.00\text{m}$ ,而采用 C50 混凝土的柱,结构断面为  $0.80 \times 0.80\text{m}$ ,后者的面积为前者的四分之一,可见高层建筑推广高强混凝土的意义。

这里要特别介绍这一趋势:国外配制高强混凝土,早已从为利用工业废料而掺加粉煤灰和硅粉,走到为配制高强混凝土而必需掺加的方面,这是从为利用而利用向为取得高强高性能混凝土必须掺用工业废料的一个飞跃。

#### 2.3 低水灰比高流动性混凝土

采用低的水灰比,无疑可提高强度,节约水泥;但是由于流动性差,在施工现场难以捣捣密实。目前国外采用高性能的减水剂,并具10~15cm的低水灰比流动性混凝土。其缺点是坍落度损失显著,目前最常用的是葡萄糖酸钠缓凝剂,可于炎热气候条件下使用。

#### 2.4 特种混凝土

水下浇筑的混凝土,耐高温、耐火混凝土,抗高压水渗透以及用于海工建筑的混凝土,随着经济的发展,特种混凝土的重要性越来越显著。

#### 2.5 大掺量工业废料的混凝土

近年来,国外在这方面有大量的报道,采用低的水泥用量,掺以代水泥用量30~50%的粉煤灰,或者与硅粉合用(掺量约5~10%),就能配制出高强混凝土来,其耐久性均属良好。

按照混凝土孔隙理论,只要混凝土填充密实,强度就能提高,因此,混凝土组成成为石、砂、较粗粉末(水泥)至较细粉末(硅粉、磨

细粉煤灰)的连续颗粒级配。这样的混凝土才能达到最大强度。

一般来说,当混凝土的水泥用量低,就难以配制出高强混凝土,但掺以磨细粉煤灰,填充骨料颗粒孔隙,照样可以用低水泥用量配制出高强混凝土。

### 3 粉煤灰的质量要求

在西方国家,自七十年代石油危机之后,至今以燃煤发电仍是最重要的电力来源,据估计,西欧与北美年各产粉煤灰约1亿吨,有一半得以利用。主要是西方国家的粉煤灰烧失量低,用电收尘灰烧失量普遍低于5%,而且比表面积与水泥相近似,而渣灰由于内摩擦角高(25~30°),普遍用于筑路与作人工地基。

在美国,将CaO含量超过10%的粉煤灰定为C级灰,又称高钙粉煤灰,低于10%,称之为低钙粉煤灰,定为F级,国内电厂生产

加拿大七种比较典型的粉煤灰的化学成分

表 1

化学成分	ASTM 型 波特兰水泥	粉煤灰化学成分 %						
		A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
SiO <sub>2</sub>	21.5	47.1	38.3	45.1	55.7	55.6	62.1	48.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.00	23.0	12.8	22.2	20.4	23.1	21.4	24.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.56	20.4	39.7	15.7	4.61	3.48	2.99	18.9
CaO	62.7	1.21	4.49	3.77	10.7	12.3	11.0	2.80
MgO	3.70	1.17	0.43	0.91	1.53	1.21	1.76	1.10
Na <sub>2</sub> O	0.48	0.54	0.14	0.58	4.65	1.67	0.30	0.59
K <sub>2</sub> O	0.67	3.16	1.54	1.52	1.00	0.50	0.72	1.87
TiO <sub>2</sub>	0.21	0.85	0.59	0.98	0.43	0.64	0.65	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.16	1.54	0.32	0.41	0.13	0.10	-
MnO	-	0.78	0.20	0.32	0.50	0.56	0.69	-
BaO	-	0.07	0.04	0.12	0.75	0.47	0.33	-
SrO	0.06	-	-	-	-	-	-	-
SO <sub>3</sub>	3.09	0.67	1.34	1.40	0.38	0.30	0.16	0.78
烧失量	1.42	2.88	0.86	9.72	0.44	0.29	0.70	3.7

注:水泥烧失量的温度为1050℃,粉煤灰烧失量温度为105与750℃之间

的粉煤灰大多是 CaO 含量低的,如贵州贵阳电厂与清镇电厂的 CaO 含量各为微量和 2.76%。

表 1 列出加拿大较典型的 7 种低钙粉煤灰的化学成分。如表 1 示,除少数粉煤灰的 CaO 含量接近 10% 外,大多低于 10%。而烧失量,除 A-3 编号为 9.72%,其余都低于 4%,有的甚至低于水泥的烧失量。自然可掺于混凝土中。

目前国内有的文献认为粉煤灰烧失量高,就是碳含量高。有的认为,碳含量高,不会对混凝土产生大的影响,例如生产导电混凝土,还在混凝土掺以碳(焦炭)。但作者认为,烧失量低于 8% 的粉煤灰,其未燃部分确定是碳,可以按规范作二级灰。但是粉煤灰烧失量超过 10%,其未燃部分已不是碳,而是煤屑、煤块,自然对混凝土耐久性产生大的影响,如贵阳与清镇电厂粉煤灰烧失量各为 15.25 和 13.38%,应该认为其未燃部分仍然是煤屑,而不是碳,故在混凝土中大量应用要经过严格的试验

表 2 列出了加拿大六种粉煤灰的技术指标与 ASTM(美国材料试验协会)和 CSA(加拿大标准协会)的规定之比较结果。

如表 2 示,这六种粉煤灰的骨架成分(即  $SiO_2 + Fe_2O_3 + Al_2O_3$ ),都超过了 ASTM 的规定,证明硬质成分占大多数。而  $SO_3$  的含量也低得多,更值得注意的是,其在 0.045mm (45 $\mu$ m)筛余以及需水量也比 ASTM, CSA 的规定低。

这里要说明一点,如表 2 示,A-3 编号粉煤灰尽管烧失量达 9.72%,但其在 0.045mm 筛余仅为 21.2%,比规定的 34% 要低得多,故仍能用于混凝土中。

如表 2 示,加拿大标准,低钙粉煤灰烧失量可达 12%,但实际生产的粉煤灰的烧失量要低得多。贵阳电厂和清镇电厂的粉煤灰在 0.080mm 筛余各为 16.6 和 30.4%,前者超过了 JGJ28-86 二级灰的规定,而后者又超过关于二级灰 0.08mm 筛余不超过 25% 的规定。参考上海和北京生产的粉煤灰,其烧失量在 5% 以下,还要进行一道磨细过程,证明,贵州燃煤电厂尚需改进燃煤工艺,将烧失量降低至规范值以下,并像上海再作磨细,则效果更佳。

表 2 的另一技术指标是需水量,除了 A-3 外,都低于 100%,需水量低,为配制低用水量高强度粉煤灰创造了一定的条件。

加拿大粉煤灰的技术指标与 ASTM 和 CSA 比较

表 2

技术指标	ASTMC618-84 规定	CSAA23.5-M82 规定	粉煤灰的各项指标					
			A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
骨架成分, %	70	-	90.5	90.8	83.0	80.7	82.2	86.5
$SO_3$ %	5.0	5.0	0.67	1.34	1.40	0.38	0.30	0.16
烧失量 %	6.0	高钙:6.0 低钙:12.0	2.88	0.88	9.72	0.44	0.29	0.70
45 $\mu$ m 筛余	34	34	17.3	19.2	21.2	33.2	19.4	46.0
需水量 %	105	-	92	92	100	94	92	97

骨架成分: ( $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ) 占百分数。

#### 4 大掺量粉煤灰的混凝土

正如前述,粉煤灰必须达到规定的质量要求,方能在混凝土中作大掺量的应用。

关于大掺量的范围,通常认为,以纯水泥混凝土的水泥用量的百分数计,在30%以上,即为大掺量粉煤灰混凝土,当然,在掺用粉煤灰的同时,水泥用量也减少几乎相同的数量。

表3列出了采用各种掺量粉煤灰混凝土的特性,掺量从0至70%,其中采用的超塑化剂为三聚氰胺(密胺),引气剂为树脂类型的外加剂。

如表3示,当粉煤灰掺量从0增加至316kg/m<sup>3</sup>,水泥用量也从375降至110kg/m<sup>3</sup>,尽管水泥用量每m<sup>3</sup>仅110kg/m<sup>3</sup>,但91天龄期的强度仍可达到32.8MPa,这证明在采用合宜的外加剂情况下,掺入粉煤灰的作用相当之大。

##### 4.1 低水灰比高流动性拌合物

如表3示,拌合物中掺以2.6~2.9L/m<sup>3</sup>的密胺基超塑化剂,坍落度一般都能达到约120mm,尽管水与水泥+粉煤灰之比在0.33~0.36,但和易性较佳。不掺粉煤灰的混凝土,在0.36的水灰比下,28天抗压强度为

采用各种掺量粉煤灰的混凝土性质

表3

混凝土特性		粉 煤 灰						
		B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6	B-7
水泥用量, kg/m <sup>3</sup>		375	328	259	220	179	107	110
粉煤灰用量, kg/m <sup>3</sup>		0	72	139	182	226	310	316
水用量, kg/m <sup>3</sup>		135	139	133	150	136	153	155
水与(水泥+粉煤灰)之比		0.36	0.35	0.34	0.37	0.33	0.37	0.36
砂, kg/m <sup>3</sup>		682	695	677	659	655	637	607
25mm骨料, kg/m <sup>3</sup>		1182	1207	1172	1153	1139	1128	1145
坍落度, mm		120	65	160	120	115	75	120
空气含量, %		6.3	4.1	5.2	6.4	7.0	3.7	6.4
超塑化剂, L/m <sup>3</sup>		2.9	2.9	2.8	2.7	2.7	2.6	2.6
引气剂, ml/m <sup>3</sup>		270	300	350	515	885	905	1380
空气温度, °C		21	21	21	21	-	26	-
混凝土温度, °C		23	23	23	26	26	26	25
新拌混凝土密度, kg/m <sup>3</sup>		2380	2445	2395	2360	2335	2335	2365
硬化混凝土密度, kg/m <sup>3</sup>		2470	2510	2430	2415	2340	2300	2325
粉 煤 灰 掺 量		0	15	30	40	50	70	70
各种龄期下 混凝土的 抗压强度 MPa	1天	27.3	27.7	12.3	7.8	-	-	-
	3天	31.6	35.2	27.9	18.2	11.4	0.4	-
	7天	35.6	42.8	36.5	24.3	17.0	0.4	0.7
	28天	43.3	49.8	47.4	35.9	31.8	16.3	17.5
	91天	47.6	56.7	55.7	41.7	39.8	29.3	32.8
	365天	58.5	70.3	70.7	49.9	39.0	36.5	40.8

43.3MPa(坍落度为 120mm)。编号 B-3 粉煤灰混凝土,水灰比为 0.34,掺以 30% 的粉煤灰,坍落度可达到 160mm,这证明,掺以粉煤灰,可改善拌合物的流动性。

#### 4.2 各种掺量粉煤灰的强度分析

从目前国外资料来看,在低水灰比下,采用超塑化剂,可以达到  $1\text{kg}/\text{m}^3$  水泥用量提高  $1\text{kg}/\text{cm}^2$  抗压强度的效果,如表 3 示,采用  $375\text{kg}/\text{m}^3$  水泥用量,28 天抗压强度可达到 43.3MPa。但是,靠降低水灰比和采用高效塑化剂,已没有多少潜力可挖,如果将液体外加剂作为混凝土第五种组分,则必须掺以第六种组分——固体掺合料,其中粉煤灰的作用相当显著。

如表 3 示,当粉煤灰掺量为 15% ( $75\text{kg}/\text{m}^3$ ),水泥用量减少  $47\text{kg}/\text{m}^3$ ,其 28 天强度可达到 49.8MPa,说明,虽然水泥用量减少,但掺以粉煤灰,强度反而提高。这种作用在 B-3 编号则更为显著,当粉煤灰掺量为 30%,水泥用量减少  $116\text{kg}/\text{m}^3$ ,其 28 天强度可达到 47.4MPa,超过纯水泥混凝土的强度。

粉煤灰掺入混凝土中,后期强度则更显著。掺以 15 和 30% 粉煤灰,后期强度增速较大,三个月龄期为 56.7 和 55.7MPa,而一年后的强度更达 70MPa 之高。

当粉煤灰掺入量 40~70%,一年后的强度也可达到 40MPa 左右。

所以说,掺入粉煤灰,不但水泥用量可以大大降低,而抗压强度却反而能提高,即使在 30~50% 的大掺量下,强度可以达到或超出纯水泥的混凝土。

图 1 示出了各种掺量粉煤灰混凝土,其抗压强度与龄期关系曲线,从图 1 可以看出,当粉煤灰掺入量达 30% (水泥用量相应减少  $116\text{kg}/\text{m}^3$ ),无论强度以及强度发展是最高的,其次是掺以 40% 粉煤灰的混凝土(水泥用量相应减少  $155\text{kg}/\text{m}^3$ )。而不掺粉煤灰的混凝土,在强度以及强度发展方面,排在第三位。这证明,尽管粉煤灰掺入量相当之大,水泥用量相当地减少相当之多,但是可配制出高强混凝土来。

图 2 示出了水泥取代量与抗压强度的关

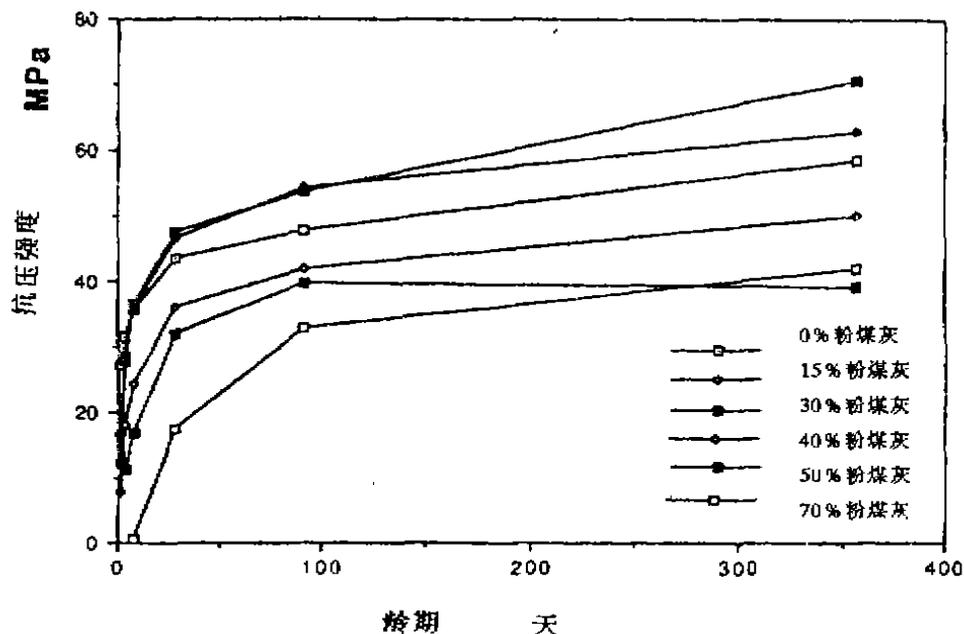


图 1 粉煤灰混凝土抗压强度与龄期关系

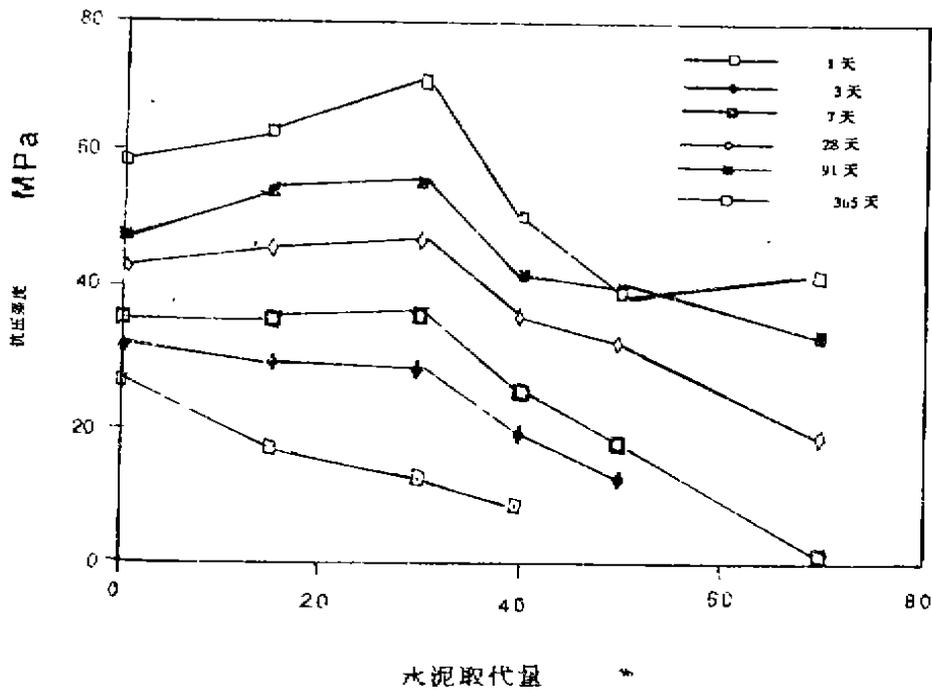


图2 水泥取代量与抗压强度关系

系。

如图2示,当用粉煤灰取代水泥在15~30%,则在各龄期下,强度都是较高的。

#### 4.3 粉煤灰的最佳掺入量

综上所述,当粉煤灰掺入量达30~40%时,能取得高的抗压强度。

参考其他类型混凝土,如喷混凝土,当水灰为0.30左右时,水泥用量约 $150\text{kg}/\text{m}^3$ ,粉煤灰约 $300\text{kg}/\text{m}^3$ ,1天强度即可达到4.5MPa,这证明,粉煤灰掺入支护作用的喷混凝土中,可以有高的早期强度。

实际上,早在10年前,国外已开始进行大掺量粉煤灰的研究,如表4,就得出的一系列大掺量粉煤灰的高强粉煤灰的实例。

如表4示,当配制中等强度的混凝土(设计强度为27.6MPa),粉煤灰掺入是从20~60%,强度都超过设计强度,尽管水灰比在

0.50左右,后期强度都是高的,当掺以50%的粉煤灰,粉煤灰掺量超过水泥用量的C-5编号,91天强度可高达50.9MPa。

这证明,大掺量粉煤灰混凝土,最佳掺入量以30~40%为宜。

## 5 大掺量粉煤灰混凝土的特性

### 5.1 劈裂抗拉强度

一般当掺以40%粉煤灰,28天抗拉强度可达到2.76MPa,56天可达到3.41MPa。但粉煤灰掺量超过50%,则抗拉强度有所降低。

### 5.2 抗弯强度

当掺以40~50%粉煤灰,28天平均抗弯强度为4.0~4.7MPa,56天为4.4~4.9MPa

### 5.3 抗冻融性

大掺量粉煤灰混凝土的抗冻融性,经

采用美国威期康星州发电厂粉煤灰混凝土的结果

表 4

拌合物		粉 煤 灰					
		C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6
设计强度 MPa		27.6	27.6	27.6	27.6	27.6	27.6
水泥用量 kg/m <sup>3</sup>		311	250	219	187	156	126
粉煤灰用量 kg/m <sup>3</sup>		0	75	115	151	187	226
水用量 kg/m <sup>3</sup>		179	171	165	165	164	146
水胶比		0.57	0.53	0.49	0.49	0.48	0.41
粉煤灰掺量 %		0	20	30	40	50	60
各种龄 期下的 抗压强度 MPa	1	14.2	14.8	13.1	11.4	8.55	3.38
	3	17.6	19.4	16.8	15.0	12.4	--
	7	24.3	26.4	25.0	23.5	23.4	--
	28	31.8	35.3	37.7	40.3	39.6	33.5
	56	35.7	41.6	47.0	48.0	47.1	46.2
	91	36.1	41.9	46.5	48.8	50.9	48.7

注:水胶比系指水与水泥加粉煤灰之比

300次冻融循环,都能经受得住,其中掺以50%粉煤灰混凝土仍有较佳的耐冻融性能。

#### 5.4 干缩

当混凝土掺以40%的粉煤灰,可取得最低的收缩,28天的收缩为 $200 \times 10^{-6}$ 。

#### 5.5 耐磨性

在砂和粗骨料质量达到耐磨要求的前提下,掺以20%粉煤灰的混凝土,耐磨性最佳,在50%掺入量下,也有较好的耐磨性。

#### 5.6 耐硫酸盐侵蚀

在混凝土中掺以一定量的磨细石膏,则粉煤灰混凝土具有一定的耐硫酸盐侵蚀性能。

#### 5.7 氯化物渗透性

当混凝土中掺以40%的粉煤灰,具非常低的氯化物渗透性,这有利于配制耐钢筋腐蚀的混凝土。

#### 5.8 抗去冰盐的破坏

西方国家在寒冷冬季在路面上喷洒氯化

钙,以降低水的冰点,达到去冰的作用。但氯化钙对混凝土具侵蚀风化作用。如掺以20%粉煤灰,经50次冻融处理,具有良好的抗去冰盐的作用。不过,当粉煤灰掺量超过50%,则抗去冰盐性能下降。

#### 6 结语

低水泥用量、大掺量粉煤灰的高强混凝土是目前国外最新的混凝土工艺之一。采用低的水泥用量,必须掺以粉煤灰,并辅以超塑化剂和引气剂(以配制低水灰比高流动性混凝土),并发现,当粉煤灰的掺入量在30~40%的情况下,混凝土具有比纯水泥混凝土高的强度,而后期强度更高。所以,采用此项工艺,对于节省水泥,开发粉煤灰资源以及配制耐久性较好混凝土具相当重要的意义。

作者单位:贵州中建建筑科研设计院