

# 大掺量粉煤灰混凝土力学性能试验及应用

黄 聪

(新疆电力设计院,新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:**为探究大掺量粉煤灰混凝土的物理性能,展开了 3 种水胶比和 5 种粉煤灰掺量的混凝土性能试验。结果表明:在不同水胶比和粉煤灰掺量下,混凝土的粘聚性和保水性均较好,坍落度都在 160 mm 以上,满足混凝土泵送的要求;混凝土抗压强度随养护龄期的延长而增长,养护 90 d 后,粉煤灰颗粒表面已附着一层水化产物,且在混凝土的孔隙中仍能发现片状的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,不会造成大掺量粉煤灰混凝土“缺钙”的问题。在实际工程应用中发现,水胶比为 0.40,粉煤灰掺量为 70% 时的混凝土仍满足 C25 的要求,其抗渗等级不低于 W8,抗冻等级不低于 F200。

**关 键 词:**粉煤灰;混凝土;力学性能;微观结构

**中图法分类号:**TV42.3

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.S1.061

粉煤灰作为掺和料掺入混凝土时,可使混凝土具有早期强度低、水化热低、高耐久性和低成本等诸多特点<sup>[1-3]</sup>。但由于粉煤灰的活性较低,粉煤灰在混凝土中的掺量往往较小<sup>[4-6]</sup>,通常不超过胶凝材料总量的 30%,这在一定程度上阻碍了粉煤灰的应用,尤其是在我国西部地区。

以新疆苇湖梁电厂、石化热电厂、红雁池一电厂和红雁池二电厂为例,4 厂每年粉煤灰的排放量为 70 万~80 万 t,但每年的利用量不到一半,如此多的粉煤灰若得不到利用且不加处理,将会产生扬尘、污染大气、占用大量土地、耗费人力管理等问题。

因此,粉煤灰的大量应用已成为了一个亟需解决的问题,特别是对掺量大于 50% 的粉煤灰混凝土有待进一步深入研究。

为此,本文采用粉煤灰作为试验材料,通过配制大掺量粉煤灰混凝土试件,探究大掺量下粉煤灰对混凝土拌和物的和易性、抗压强度和混凝土微观形貌的影响,并研究高水胶比和大掺量时混凝土的抗渗性和抗冻性能,为新疆粉煤灰的应用提供理论基础和试验支撑。

## 1 试验原材料

试验采用新疆乌鲁木齐青松水泥厂的普通水泥(C),等级为 42.5R,比表面积为  $380\text{ m}^2/\text{kg}$ ,标准稠度用水量为 28.2%,3 d 抗压强度为 28.1 MPa,28 d 抗压强度为 50.9 MPa。粉煤灰(F)为乌鲁木齐市苇湖梁电厂生产而产生的粉煤灰,比表面积为  $440\text{ m}^2/\text{kg}$ ,需水量比 105%。

水泥和粉煤灰化学成分检测结果见表 1。从表 1 可以看出,粉煤灰中的  $\text{CaO}$  (5.9%) 较水泥低,属于低钙粉煤灰,但  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  之和满足不小于 70% 的要求。

表 1 水泥和粉煤灰的化学成分构成 %

材料	水泥	粉煤灰	材料	水泥	粉煤灰
CaO	65.03	5.90	$\text{SO}_3$	0.90	0.91
$\text{SiO}_2$	22.46	55.65	$\text{Na}_2\text{O}$	0.39	1.44
$\text{Al}_2\text{O}_3$	4.88	21.03	$\text{K}_2\text{O}$	0.78	1.95
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	3.53	6.07	$\text{R}_2\text{O}$	0.90	2.72
MgO	1.78	2.59			

混凝土中的粗细骨料选用水洗砂(S)和卵石(G),其中水洗砂的细度模数  $\mu_f = 2.8$ ,含泥量 0.2%。

卵石为 5 ~ 20 mm 的连续级配(一级配),5 ~ 10 mm 的颗粒占 60%,10 ~ 20 mm 的颗粒占 40%,含泥量为 0。外加剂采用聚羧酸高性能减水剂,减水率为 25%,拌和用水(W)和养护用水均为实验室自来水。

2 试验设计

试验水胶比为 0.40,0.35,0.30,粉煤灰的掺量为 30%,40%,50%,60%,70%(质量分数)。为了能够形成对比,除粉煤灰的掺量递增外,其余的参数均不变,各水胶比下减水剂固定为胶凝材料的 1.25%,基准配合比见表 2。主要研究粉煤灰掺量对高强绿色高性能混凝土各龄期抗压强度的发展规律,同时满足泵送混凝土的要求,即高流动度、粘聚性以及保水性等。

表 2 粉煤灰混凝土的基准配合比

试件 编号	水胶 比	粉煤灰 掺量/%	混凝土各项材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )					坍落度/ mm	扩散度/ mm	粘聚 性	保水 性	实测表观密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )
			C	F	W	S	G					
A1	0.40	30	259	111	148	826	1010	175	282	好	好	2354
B2	0.35	30	287	123	144	792	1008	184	320	好	好	2356
C3	0.30	30	350	150	151	754	960	233	521	好	好	2369

注:水胶比 0.40,粉煤灰掺量为 30%,40%,50%,60%,70% 时分别记为 A1、A2、A3、A4、A5,其余依次类推。

3 试验结果与分析

3.1 拌和物和易性

诸多研究表明:拌和物的和易性是影响硬化混凝土性能的重要因素,而和易性通常易受水胶比、单位用水量、掺和料掺量的影响。

本次研究发现,粉煤灰掺入混凝土后,其粘聚性和保水性都较好,如图 1 所示。

在水胶比为 0.35 和 0.40 时,混凝土拌和物的坍落度和扩展度都随粉煤灰掺量的增大呈先增大后减小的趋势,而水胶比为 0.30 时却一直呈下降的趋势。这可能与粉煤灰需水比过大有关,在用水量和减水剂用量不变时,粉煤灰的掺入减少了拌和物的自由水,降低其流动性,但坍落度都在 160 mm 以上,满足混凝土泵送的要求。若要保证拌和物流动性不变,需适当增加减水剂的用量。

此外,由于粉煤灰的密度约为 2.4 g/cm<sup>3</sup>,比水泥密度(3.1 g/cm<sup>3</sup>)要小,因此,粉煤灰替代水泥后其表观密度均呈下降的趋势。

3.2 抗压强度

抗压强度是水泥混凝土最重要的参数之一,但它和其它力学性能从任何意义上都不应该被认为是“内在的”或“本质的”材料性能,诸如水泥等级、水灰比(水胶比)、集料、龄期、养护温度和湿度、试件的几何

尺寸、试件的制备方法、含湿量、加载速率及试验机和加载装置的类型等都将会影响观测到的混凝土力学行为。因此,本次试验参考 SL352 - 2006《水工混凝土试验规程》进行,结果见图 2。

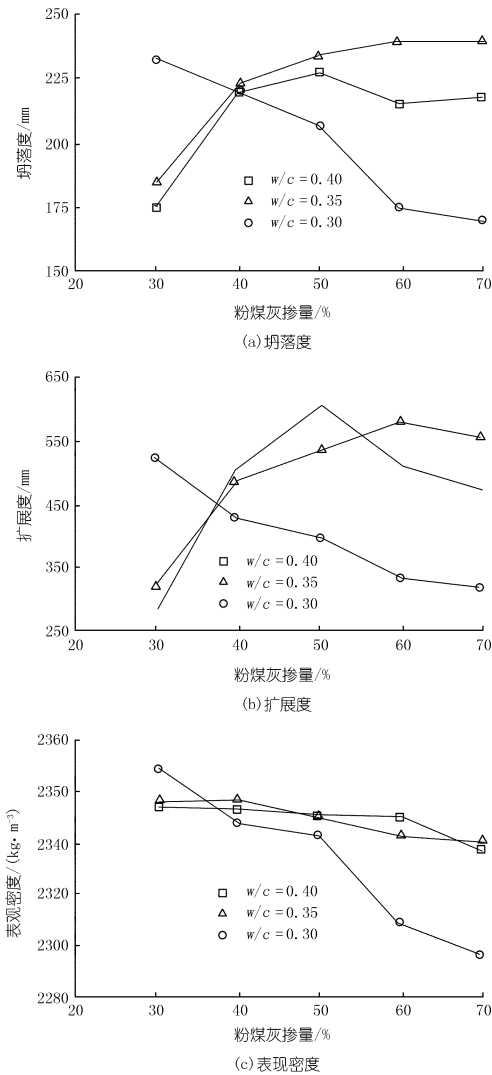


图 1 混凝土和易性与粉煤灰掺量的关系

从图 2 可以看出,水胶比、养护龄期和粉煤灰掺量对混凝土抗压强度的影响较大,鉴于水胶比对混凝土力学性能影响的研究已经屡见不鲜,在此不再赘述。

随着粉煤灰掺量的增加,混凝土抗压强度降低趋势较显著,在水胶比较低时尤为明显。这可能是粉煤灰替代水泥后,由于粉煤灰活性较低且不像钢渣那样自身参与水化,分散了水泥的作用,仅发挥着微集料效应所致。但随养护龄期的延长,混凝土的抗压强度逐渐提高,尤其在 60 d 前较为明显。

水胶比从 0.40 降低至 0.30 的过程中,60 ~ 90 d 的抗压强度增长趋势逐渐明显,特别是水胶比为 0.30 时较为突出。这主要是由于粉煤灰中的活性物质 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 参与了二次水化,养护龄期越长,水化程

度越高<sup>[6]</sup>,因此住建部文件建议将高性能混凝土的养护龄期从 28 d 改为 60 d 或 90 d,这是非常有必要的。

仍可以发现六方体片状的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,见图 3(c),因此,不会造成大掺量粉煤灰混凝土“缺钙”的问题,文献[6]也证实了这一点。

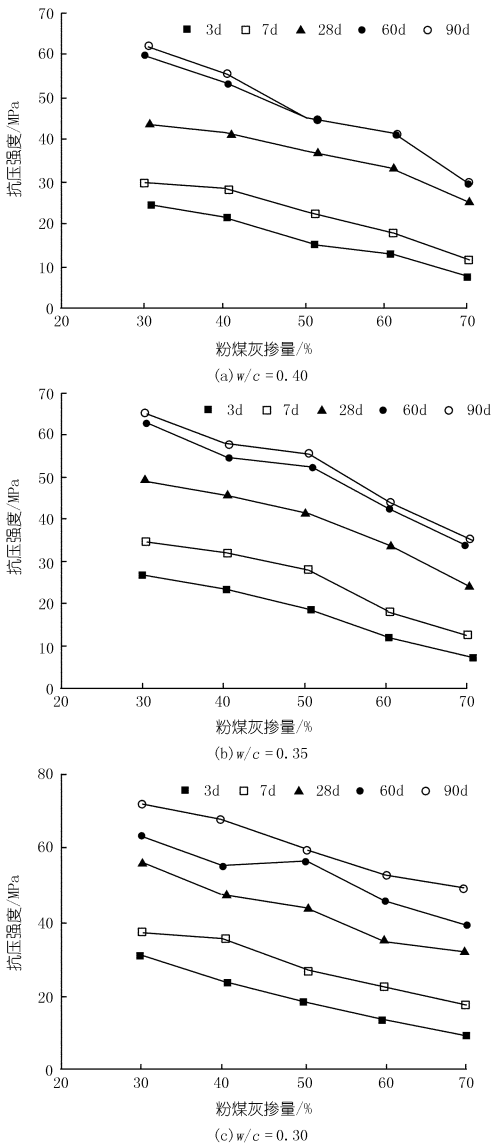
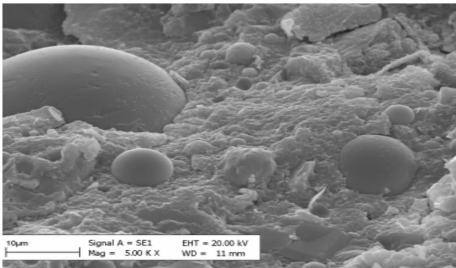


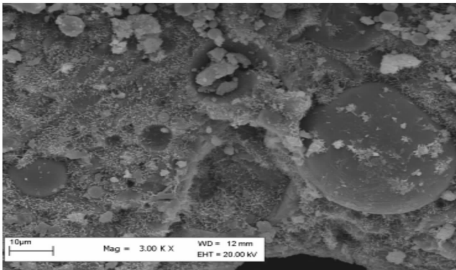
图 2 混凝土抗压强度与粉煤灰掺量的关系

3.3 粉煤灰混凝土的微观形貌

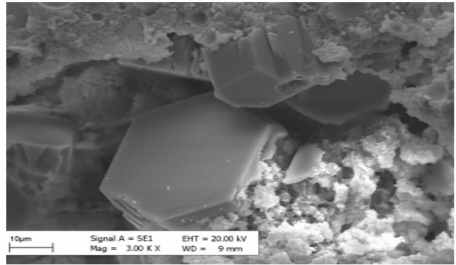
粉煤灰虽具有潜在的活性,但其活性较低,通常需要  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的激发才能发挥,即使养护 28 d,粉煤灰颗粒表面仍未见水化产物,见图 3(a),由于粒径不同,粉煤灰起着逐级填充的作用,因此,从界面上看混凝土较密实,强度较高。但如 3.2 节所述,养护龄期对混凝土性能的影响较大,养护 90 d 后,混凝土中粉煤灰颗粒表面已经发生“蚀刻”现象,即表面已附着一层水化产物,见图 3(b),提高了混凝土的密实度。此外,粉煤灰掺入混凝土后会消耗一部分水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,从而降低了混凝土溶液中碱度,对钢筋产生不利影响,因此,已有学者对大掺量粉煤灰混凝土的稳定性产生担忧,而本次研究通过电镜扫描发现,在混凝土的孔隙中



(a)  $w/c = 0.40, F=30\%$ , 28d



(b)  $w/c = 0.40, F=30\%$ , 90d



(c)  $w/c = 0.40, F=70\%$ , 90d

图 3 粉煤灰混凝土的微观形貌

4 应用实例

某水电站工程装机容量为 4 500 kW,主要建筑物由压力前池、引水渠、压力钢管、厂房和退水渠等组成,工程所在地的平均温度为 6.8℃,最低温度为 -30.0℃左右。根据工程与水接触的情况,以及设计院提出的指标,在不同部位决定选用不同要求的混凝土。对于引水渠、压力前池和退水渠,由于与水接触,经过理论计算和查阅相关资料,最终选用 C25W6F200 的混凝土;对于电站厂房结构,经过计算选用 C30 的混凝土。

为了降低混凝土的成本,结合当地废渣情况,选用大掺量粉煤灰混凝土。综合上述研究发现,当粉煤灰掺量在 60% 以内时,混凝土强度满足 C30 的要求,而水胶比为 0.40,粉煤灰掺量为 70% 时仍满足 C25 的要求。混凝土抗渗和抗冻试件养护 28 d 后,混凝土抗渗和抗冻的试验结果见表 3,从表 3 可以看出,粉煤灰掺量为 70% 时,混凝土的抗渗等级不低于 W8,而其抗冻

等级不低于 F200。因此,为了节约成本和应用工业废渣,在该工程中可使用大掺量粉煤灰混凝土。

表 3 粉煤灰混凝土的抗渗及抗冻试验结果

试件 编号	平均渗水 高度/mm	抗渗 等级	冻融循环 次数/次	冻融前	冻融后	质量损失率/%		相对动弹性模量/%		抗冻 等级
				质量/kg	质量/kg	实测值	平均值	实测值	平均值	
A5-1				9.49	9.38	1.16		95.6		
A5-2	5	>W8	205	9.45	9.26	2.01	1.52	96.3	95.6	>F220
A5-3				9.43	9.3	1.38		94.8		

5 结 论

(1) 混凝土和易性受掺和料掺量的影响较大,在水胶比为 0.35 和 0.40 时,混凝土拌和物的坍落度和扩展度,都随粉煤灰掺量的增大呈先增大后减小的趋势,水胶比为 0.30 时却一直呈下降的趋势。混凝土粘聚性和保水性都较好、坍落度都在 160 mm 以上,均满足混凝土泵送的要求。

此外,粉煤灰替代水泥后混凝土的表观密度均随粉煤灰掺量的增加呈下降的趋势。

(2) 粉煤灰掺量和养护龄期对混凝土抗压强度的影响较为突出,混凝土抗压强度随掺量的增加而呈降低的趋势,特别是水胶比低时尤为明显。随着养护龄期的延长,粉煤灰中的活性物质  $Al_2O_3$  和  $SiO_2$  参与了二次水化,养护龄期越长,水化程度越高,混凝土的抗压强度也就越高,特别是水胶比为 0.30 时较为突出。

(3) 粉煤灰虽具有潜在的活性,但其活性较低,养

护 28 d 后,粉煤灰颗粒表面仍未见水化产物。当养护 90 d 后,混凝土中粉煤灰颗粒表面已附着一层水化产物,且在混凝土的孔中仍可以发现了六方体片状的  $Ca(OH)_2$ ,不会造成大掺量粉煤灰混凝土“缺钙”的问题。

(4) 水胶比为 0.40,粉煤灰掺量为 70% 时的混凝土仍满足 C25 的要求,其抗渗等级不低于 W8,抗冻等级不低于 F200。因此,粉煤灰掺量较大的混凝土可满足工程耐久性的要求。

参考文献:

[1] Sakai E, Miyahara S. Hydration of fly ash cement[J]. Cem Concr Res,2005,(35):1135-1140.

[2] MENG Yun-fang, SUN Qing-he, WANG De-zhi, et al. With gangue and fly ash to enhance strength of concrete[J]. China Power Science and Technology,2008,(14):58-65.

[3] WU Fu-fei, SHI Ke-bin, DONG Shuang-kuai. Influence of Concrete with Lithium-slag and Steel slag by Early Curing Conditions[J]. Key Engineering Materials,2014,(599):52-55.

[4] WU Fu-fei, SHI Ke-bin, DONG Shuang-kuai. Properties and Microstructure of HPC with Lithium-slag and Fly ash[J]. Key Engineering Materials,2014,(599):70-73.

[5] Olson R A, Jennings H M. Estimation of C-S-H content in a blended cement paste using water adsorption. Cem Concr Res, 2001,(31):351-356.

[6] Medhat H S, Michael D A, Roland F B. The effects of fly ash composition on the chemistry of pore solution in hydrated cement pastes. Cem Concr Res, 1999,(29):1915-1920.

(编辑:胡旭东)

