

文章编号:1671-8879(2013)04-0035-05

## 粉煤灰对加气混凝土性能的影响

温久然<sup>1</sup>,刘开平<sup>1</sup>,耿 飞<sup>1</sup>,陈延新<sup>2</sup>,俞晓花<sup>2</sup>

(1. 长安大学 材料科学与工程学院,陕西 西安,710061; 2. 江苏省交通技师学院,江苏 镇江,212006)

**摘 要:**通过常温养护的方法制备了粉煤灰加气混凝土,研究了粉煤灰加气混凝土的制备工艺和力学性能。通过对碱激发剂、矿物掺合料等原料的配比调整,研究了粉煤灰含碳量、细度及用量对粉煤灰加气混凝土硬化时间、比强度的影响。在矿物掺合料总用量不变的情况下,采用膨胀珍珠岩及漂珠为轻质填料代替 22% 的粉煤灰进行加气混凝土制备试验。研究表明:随着粉煤灰含碳量的增加,加气混凝土的硬化时间延长,比抗压强度下降;粉煤灰颗粒越粗,加气混凝土硬化时间越长,比抗压强度越低;随着粉煤灰用量的增加,加气混凝土的比抗折强度先增加后降低,当粉煤灰分别占矿物掺合料用量的 50% 和 100% 时加气混凝土的比抗折强度出现 2 个极值点;填料膨胀珍珠岩及漂珠的加入,并不能降低加气混凝土的密度,但却能使加气混凝土的比抗折强度明显降低。

**关键词:**材料工程;粉煤灰;加气混凝土;硬化时间;比强度

中图分类号:TU522.32

文献标志码:A

## Effects of fly ash on properties of aerated concrete

WEN Jiu-ran<sup>1</sup>, LIU Kai-ping<sup>1</sup>, GENG Fei<sup>1</sup>, CHEN Yan-xin<sup>2</sup>, YU Xiao-hua<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering of Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Jiangsu Provincial Traffic Technician Institute, Zhenjiang 212006, Jiangsu, China)

**Abstract:** The preparation process and mechanical properties of a kind of fly ash aerated concrete cured at normal temperature were studied. By adjusting the ratio of alkali activator, mineral admixture and other raw materials, this paper studied the effects of the carbon content, fineness and dosage of fly ash on setting time and specific strength of aerated concrete. With the amount of admixture unchanged, expanded perlite and floating beads were used instead of 22% fly ash to prepare aerated concrete. The results show that setting time increases with the increase of carbon content of fly ash and the grain size while compressive specific strength of aerated concrete decreases. With the increase of fly ash content, flexural specific strength of aerated concrete strength increases first and then decreases, and at the dosage of 50% and 100%, flexural specific strength reaches extreme point. Adding expanded perlite and floating beads, the density of aerated concrete will not be reduced but flexural specific strength will be reduced obviously. 4 tabs, 7 figs, 10 refs.

**Key words:** materials engineering; fly ash; aerated concrete; setting time; specific strength

0 引 言

随着人类对环境保护的日益重视,发展新型建材并用它来代替粘土实心砖是中国建材行业的发展趋势。加气混凝土是迄今为止能够同时满足墙材革新和节能 50% 要求的唯一单材料墙体。在节能、保温、环境保护、加工及使用等方面远优于当前广泛使用的空心砖及空心砌块,其发展前途十分广阔<sup>[1-2]</sup>。

加气混凝土又名发气混凝土。它是用含钙材料(水泥、石灰等)、含硅材料(粉煤灰、石英砂、尾矿粉、粒化高炉矿渣、页岩等)和发气剂作为原材料,加水和其他附加剂,经过磨细、配料、搅拌、浇注、发气、切割和蒸压养护等工序生产而成<sup>[3-6]</sup>。加气混凝土具有低导热系数(0.12~0.24 W/(m·K))、低表观密度(<800 kg/m<sup>3</sup>)、较高的抗冻性及易加工使用等优良性能,在中国北方地区应用广泛。特别是粉煤灰加气混凝土的生产,有效地利用了电厂废料粉煤灰,成为具有广阔发展前景的保温节能建筑材料。

表 1 粉煤灰的化学成分  
Tab. 1 Composition of fly ash

成分	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>	烧失量/%
质量分数/%	48.23~51.11	3.65~5.48	23.16~27.51	5.26~6.28	1.19~1.26	0.42~0.51	0.68~0.85	7.70~14.4

粉煤灰的化学成分是评价粉煤灰质量高低的重要技术参数。实际应用中常根据粉煤灰中 CaO 的含量高低,将其分为高钙灰和低钙灰。CaO 含量(质量分数)在 20% 以上的称为高钙灰。粉煤灰的烧失量可以反映锅炉燃烧状况,烧失量越高,粉煤灰质量越差。粉煤灰中 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量(质量分数)也直接关系到它用作建材原料的优劣。

试验中所用的粉煤灰是从某发电厂购得, SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较高,烧失量也较大,CaO 的含量偏低,属低钙灰。图 1 是试验所用粉煤灰的电镜照片。

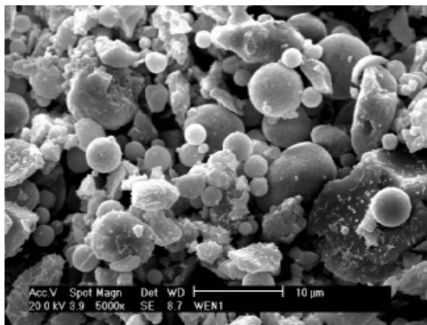


图 1 粉煤灰的扫描电镜照片

Fig. 1 Scanning electron micrograph of fly ash

1. 1. 2 水泥

试验中采用的水泥为某水泥厂生产的 32.5# 复

但是,目前生产的粉煤灰加气混凝土制品抗压、抗折强度低,吸水率较大,在生产中要经过蒸压养护,设备投资大,能耗高,极大地限制了它的应用<sup>[7-10]</sup>。

本文在已有的粉煤灰加气混凝土的理论经验基础上,采用常温养护的方法,通过原料的配比调整,在实验室研究不同原料品质及用量对粉煤灰加气混凝土性能的影响,以期改进粉煤灰加气混凝土的性能,为粉煤灰加气混凝土的发展和应用提供参考。

1 试验原料、仪器设备及工艺

1. 1 试验原料

1. 1. 1 粉煤灰

粉煤灰是火力发电厂燃煤后产生的工业废渣。粉煤灰的化学组成类似于粘土的化学组成,主要包括 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO 和未燃尽碳,还有少量 Mg, Ti, K, P, S 等的氧化物。由于各地煤的品种和燃烧条件不同,粉煤灰的化学成分波动范围较大。表 1 是本试验所用粉煤灰的化学成分。

合硅酸盐水泥。

1. 1. 3 石灰

石灰为本地的普通石灰窑生产的块灰,经人工破碎后的粉状灰,细度在 80 目以下,有效氧化钙 65% 以上。

1. 1. 4 石膏

石膏主要化学成分是 CaSO<sub>4</sub>,在粉煤灰加气混凝土中作发气过程的调节材料。本试验采用市售磨细石膏,二水硫酸钙含量大于 80.0%,含水率小于 1.5%。

1. 1. 5 碱

选用 NaOH,市售工业品,作激发剂使用。

1. 1. 6 铝粉

市售工业铝粉,保存期在 3 个月内,有效铝含量(质量分数)约为 58%。

1. 1. 7 减水剂

试验中用到的减水剂是 FDN 萘系高效减水剂,属市售工业产品。减水率在 15% 以上,属高效早强型减水剂。

1. 1. 8 高岭土

采用天然矿物高岭土粉,成分以高岭石为主,质量分数约占 90%,属于层状的含水铝硅酸盐矿物。将高岭土粉在 750 ℃ 热处理 2 h,以形成偏高岭石,

增加其活性。作为活性矿物掺合料之一使用。

1.1.9 漂珠

漂珠是一种能浮于水面的粉煤灰空心球,呈灰白色,壁薄中空,质量轻,表面封闭而光滑,热导率小,化学成分以 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主,是优良的保温耐火材料。试验所用漂珠的重度为 600 kg/m<sup>3</sup>,粒径约为 0.1 mm,用作轻质填料和活性矿物掺合料使用。

1.1.10 膨胀珍珠岩

膨胀珍珠岩是以天然酸性火山玻璃珍珠岩经高温膨胀处理形成的轻质多孔固体颗粒,常温导热系数为 0.024 5~0.048 0 W/(m·K),最高使用温度可达 800 ℃。本文采用 150# 膨胀珍珠岩,堆集密度 150 kg/m<sup>3</sup>,质量含水率不大于 2%,5 mm 筛孔筛余量不大于 2%。用作轻质填料和高效保温材料。

1.2 试验配比

本试验粉煤灰加气混凝土的制备中,所用的基本配合比见表 2。

表 2 粉煤灰加气混凝土基本配比

Tab. 2 Basic ratios of fly ash aerated concrete

材料	水泥	矿物掺合料	水	碱	石灰	石膏	铝粉	减水剂
比例/%	6.7	46	40	2.7	8.7	2.7	0.045	0.18

其中矿物掺合料包括粉煤灰、高岭土、漂珠和膨胀珍珠岩,试验中按不同比例搭配。

1.3 试验工艺

1.3.1 加气混凝土制备工艺

粉煤灰原料首先在球磨机内干磨至不同细度,将 NaOH、石灰计量后混合均匀,再加计量水的 50%(即总用水量的一半)混合搅拌 1 min,制成碱液。粉煤灰、漂珠、膨胀珍珠岩、水泥、石膏、萘系减水剂等原料计量后混合均匀,然后加剩余 50%的计量水混合搅拌 1 min,得到水泥浆;将制得的碱液倒入水泥浆中混合搅拌,搅拌时间为 1~2 min,直至得到均匀混凝土浆,然后加入铝粉,搅拌 60 s。浇注料浆入试模,浇注的体积约为三联模总体积的 2/3,发气静停 2.0~2.5 h,然后用铲刀将试模表面切平,24 h 后脱模,并放在空气中进行常温保湿养护,然后再分别进行不同龄期抗折强度和抗压强度测试。

1.3.2 材料性能测试

- (1)硬化时间:用维卡仪测试试件的硬化时间。
- (2)抗压和抗折强度的测量:按照国家标准《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)的方法进行硬化混凝土的抗压强度和抗弯拉(折)强度测试。
- (3)密度测量及比强度计算:参照《加气混凝土

体积密度、含水率和吸水率试验方法》(GB/T 11969—2008)中的规定测试试样的干密度。按照材料强度除以密度计算得到加气混凝土的比强度值。

2 试验结果及分析讨论

2.1 粉煤灰含碳量对加气混凝土性能的影响

当矿物掺合料全部采用粉煤灰(无高岭土、漂珠和膨胀珍珠岩)时,其含碳量与加气混凝土硬化时间和 28 d 比抗压强度的关系如图 2 和图 3 所示。

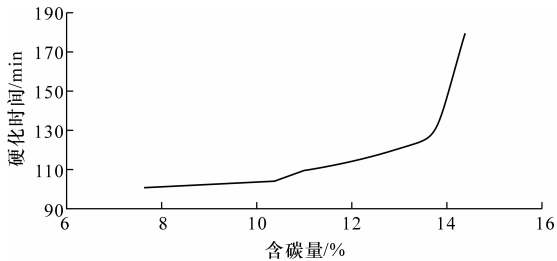


图 2 粉煤灰含碳量对加气混凝土硬化时间的影响  
Fig. 2 Effect of carbon content of fly ash on setting time of aerated concrete

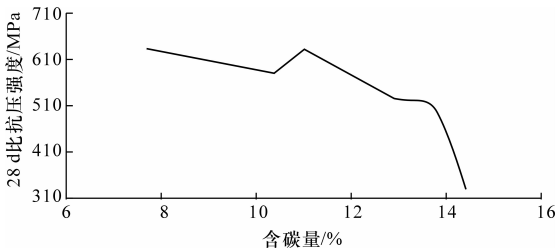


图 3 粉煤灰含碳量对加气混凝土 28 d 比抗压强度的影响  
Fig. 3 Effect of carbon content of fly ash on flexural specific strength of aerated concrete of 28 days

从图 2 和图 3 可知,随着粉煤灰含碳量的增加,加气混凝土的硬化时间延长,同时 28 d 比抗压强度下降。分析其原因,应该是含碳量增加导致粉煤灰中有效活性成分降低,粉煤灰的火山灰效应降低,水化时间延长,吸水率提高,导致混凝土强度降低,从而使硬化时间延长和比抗压强度降低。

2.2 粉煤灰细度对加气混凝土性能的影响

矿物掺合料全部采用粉煤灰时,粉煤灰的细度与加气混凝土硬化时间和 28 d 比抗压强度的关系如下页图 4、图 5 所示。

从图 4 可知,随粉煤灰筛余量增大,颗粒变粗,加气混凝土硬化时间变化情况复杂,但从总体趋势来说,粉煤灰颗粒越粗,加气混凝土硬化时间越长。

从图 5 可知,粉煤灰颗粒越粗,加气混凝土的比抗压强度越低。因为粗颗粒的粉煤灰水化较慢,硬化时间延长,在所测定的时间内,强度较低,导致比

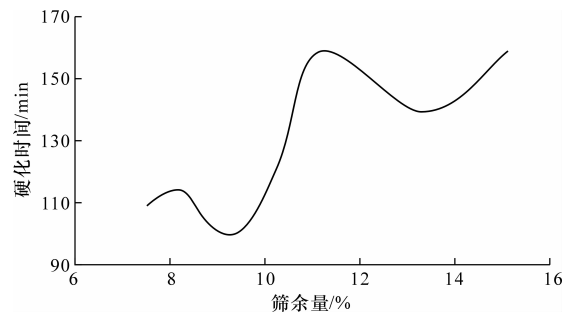


图 4 粉煤灰细度对加气混凝土硬化时间的影响

Fig. 4 Effect of fineness of fly ash on setting time of aerated concrete

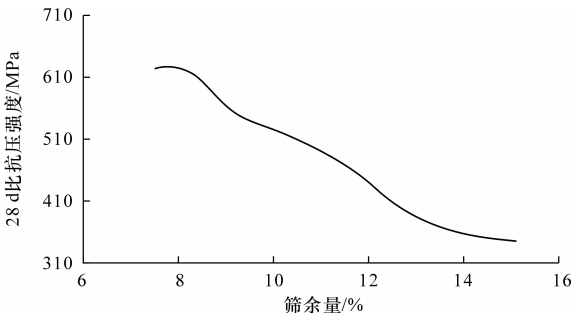


图 5 粉煤灰细度对加气混凝土 28 d 比抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of fineness of fly ash on flexural specific strength of 28 Days

抗压强度降低。

2.3 粉煤灰比例对加气混凝土性能的影响

在矿物掺合料总用量不变的情况下,采用粉煤灰和高岭土进行搭配制备加气混凝土。图 6 是粉煤灰占矿物掺合料不同比例时的加气混凝土样比抗折强度试验结果。

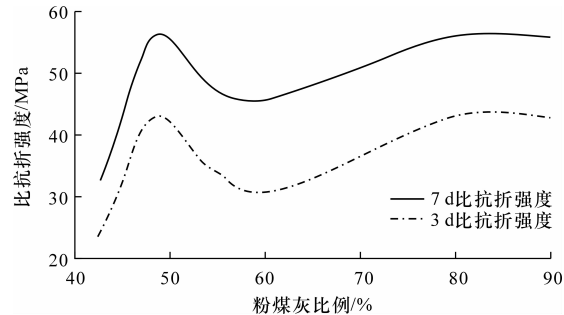


图 6 粉煤灰比例与加气混凝土比抗折强度的关系

Fig. 6 Relationship between proportion of fly ash and flexural specific strength

从图 6 知,随粉煤灰比例的增加,加气混凝土的比抗折强度也呈现出复杂的变化情况。

总体来说,加气混凝土的 7 d 比抗折强度要高于 3 d 比抗折强度。这一方面与混凝土的强度随时间的增长有关,也与混凝土随时间延长脱水导致密度下降有关。

另外,加气混凝土的比抗折强度随粉煤灰的比

例增加出现 2 个极值点,即粉煤灰占矿物掺合料用量的一半(图中 50%)时和矿物掺合料全部采用粉煤灰(图中 100%)时。分析其原因,当粉煤灰比例占矿物掺合料一半时,高岭土活化强度高,产物强度高,因此其比抗折强度较高。在随后的粉煤灰比例增大后,高岭土用量降低,强度则有所下降,但由于粉煤灰密度较低,使混凝土密度也降低。因此,到全部采用粉煤灰后,密度最低,使混凝土的比抗折强度达到较大。表 3 的粉煤灰用量与加气混凝土抗折强度及密度的关系数据即说明了这一点。

表 3 粉煤灰用量与加气混凝土 7 d

比抗折强度及密度的关系

Tab. 3 Relationship between dosage of fly ash and flexural specific strength and density of 7 days

粉煤灰占矿物掺合料比例/%	0.43	0.50	0.57	0.65	0.87	1.00
7 d 比抗折强度/MPa	0.35	0.50	0.45	0.40	0.45	0.45
7 d 密度/(t·m <sup>-3</sup> )	1.09	0.90	0.93	0.87	0.81	0.80

2.4 轻质填料对加气混凝土性能的影响

在矿物掺合料总用量不变的情况下,采用膨胀珍珠岩及漂珠为轻质填料代替 22% 的粉煤灰进行加气混凝土制备试验,试验结果如图 7 所示。

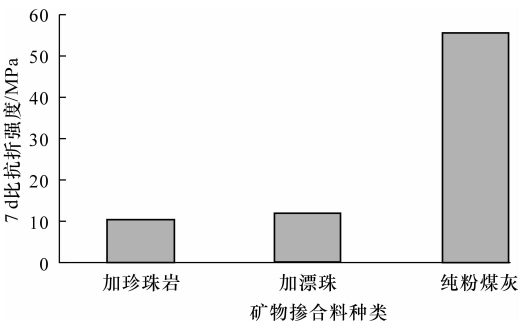


图 7 轻质填料对加气混凝土比抗折强度的影响

Fig. 7 Effect of expanded perlite and floating beads on flexural specific strength

从图 7 可以看出,加入膨胀珍珠岩及漂珠这些轻质填料后,加气混凝土的比抗折强度明显降低。

从表 4 可知,加入膨胀珍珠岩及漂珠后并没有降低加气混凝土的密度,但却大大降低了加气混凝土的强度,从而使得加气混凝土的比抗折强度大幅度下降。

表 4 加轻质填料后加气混凝土的 7 d 比抗折强度和密度值

Tab. 4 Flexural specific strength and density of aerated concrete of 7days after adding packing

性能	加 22% 珍珠岩	加 22% 漂珠	纯粉煤灰
7 d 比抗折强度/MPa	0.10	0.10	0.45
7 d 密度/(t·m <sup>-3</sup> )	0.91	0.83	0.80

分析原因,膨胀珍珠岩和漂珠本身虽具有较低的密度,但它们都是非晶态物质。前者是一种天然的火山玻璃,经人工加热膨胀,火山玻璃的属性并未改变。相反,膨胀后具有更大的比表面积,更易发生火山灰活性反应,在加气混凝土固化反应中参与反应,破坏了其部分多孔结构,不能充分发挥其轻质填料的作用,制得的加气混凝土密度较高。后者是粉煤灰中提取的空心的纯玻璃态物质,也具有较高火山灰活性,可参与水泥的水化反应,使混凝土的密度提高。但这2种轻质填料均使加气混凝土的孔隙结构均匀性变差,不及纯粉煤灰的孔隙结构均匀性好,从而使得加气混凝土的比抗折强度降低。这可能就是加入这些轻质填料后加气混凝土比抗折强度降低的原因。

### 3 结 语

(1)随粉煤灰含碳量的增加,加气混凝土的硬化时间延长,比抗压强度下降。

(2)随粉煤灰细度的增加,加气混凝土硬化时间呈现复杂的变化情况,但从总体趋势来说,粉煤灰颗粒越粗,加气混凝土硬化时间越长,比抗压强度越低。

(3)随粉煤灰比例的增加,加气混凝土的比抗折强度出现2个极值点,即粉煤灰占矿物掺合料用量的一半时和矿物掺合料全部采用粉煤灰时。

(4)加入轻质填料膨胀珍珠岩及漂珠后,并不能降低加气混凝土的密度,但却使加气混凝土的比抗折强度明显降低。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 闫振甲,何艳君.泡沫混凝土实用生产技术[M].北京:化学工业出版社,2006.  
YAN Zhen-jia, HE Yan-jun. Practical production technology of foam concrete[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.  
WU Zhong-wei, LIAN Hui-zhen. High properties concrete[M]. Beijing: China Railway Press, 1999. (in Chinese)
- [3] 张继能,顾同曾.加气混凝土生产工艺[M].武汉:武汉工业大学出版社,2003.

- ZHANG Ji-neng, GU Tong-ceng. Aerated concrete production process[M]. Wuhan: Wuhan University of Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [4] 陶有生,府坤荣.我国加气混凝土的发展与进步[J].新型建筑材料,2003(7):16-20.  
TAO You-sheng, FU Kun-rong. Development and progress of aerated concrete in China[J]. New Building Materials, 2003(7):16-20. (in Chinese)
- [5] 杨 静,覃维祖.粉煤灰对高性能混凝土强度的影响[J].建筑材料学报,1999(3):219-222.  
YANG Jing, QIN Wei-zu. Influence of fly ash on compressive strength of HPC[J]. Journal of Building Materials, 1999(3):219-222. (in Chinese)
- [6] 沈建华,周 平.粉煤灰在混凝土工程中的应用研究[J].科技信息,2011(14):330-331.  
SHEN Jian-hua, ZHOU Ping. Application research on fly-ash in the concrete[J]. Science & Technology Information, 2011(14):330-331. (in Chinese)
- [7] 刘淑芳.粉煤灰在新型建筑材料中的应用[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,30(S1):57-59.  
LIU Shu-fang. Application of fly-ash in new style construction materials[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2011, 30(S1):57-59. (in Chinese)
- [8] 李 刚,刘开平,姜曙光,等.粉煤灰轻质墙体材料的试验研究及机理分析[J].粉煤灰综合利用,2007(4):15-18.  
LI Gang, LIU Kai-ping, JIANG Shu-guang, et al. Experimental study on the light quality mural material with fly ash and its mechanism analysis[J]. Ash Comprehensive Utilization, 2007(4):15-18. (in Chinese)
- [9] 关博文,刘开平,赵秀峰.泡沫混凝土研究及应用新进展[J].广东建材,2008(7):30-32.  
GUAN Bo-wen, LIU Kai-ping, ZHAO Xiu-feng. New progress and application research of foam concrete[J]. Guangdong Building Materials, 2008(7):30-32. (in Chinese)
- [10] 刘开平,和立新,曹丽红,等.常温养护膨胀珍珠岩玻璃纤维加气混凝土性能研究[J].商品混凝土,2010(7):42-44.  
LIU Kai-ping, HE Li-xin, CAO Li-hong, et al. Properties research on GF aerated concrete of expanded perlite in room temperature curing conditions[J]. Ready Mixed Concrete, 2010(7):42-44. (in Chinese)