

文章编号 1000-5013(2001) 03-0278-06

# 粉煤灰掺量与砂浆强度和水化参量的关系

严 捍 东

(华侨大学土木工程系, 泉州 362011)

**摘要** 对水胶比为0.5, I级粉煤灰掺量分别占胶凝材料总量(质量分数)为0, 0.20, 0.30, 0.45和0.55的砂浆试样, 经标准养护(d)7, 28, 90, 180和365时的抗压强度、浆体非蒸发水量和CH含量, 进行了系统测试. 试验数据经回归分析, 发现粉煤灰掺量与砂浆抗压强度、非蒸发水量和CH含量之间, 分别存在很好的线性相关关系. 从中, 可以定量研究在不同的粉煤灰掺量和养护龄期时, 粉煤灰效应对大掺量粉煤灰水泥基材料的力学性能和水化进程的影响规律.

**关键词** 粉煤灰掺量, 抗压强度, 非蒸发水量, CH含量, 粉煤灰效应

中图分类号 TU 522.3<sup>+</sup>50.6

文献标识码 A

近年来, 粉煤灰等火山灰矿物掺合料的应用已被普遍接受. 它不仅因为节约水泥所带来的经济性和环保性, 而且若合理设计还能制得具有高耐久性的结构材料. 因此, 如何定量预测不同粉煤灰掺量、不同养护龄期下粉煤灰水泥基材料的强度和水化进程, 就变得非常重要. 为了定量预测粉煤灰混凝土的强度, 一些研究者试图在普通混凝土强度与水灰比关系的基础上, 引入由 Smith 首先提出的“胶凝效率因子  $k^{[0,2]}$ ”来修正. 其定义为在不改变水泥性能的情况下, 一份粉煤灰所能取代的水泥份数. 从而, 在“有效水灰比  $[w/(C+kf)]$ ”时, 普通混凝土的强度和水灰比的关系也适合于粉煤灰混凝土. Hansen<sup>[1]</sup>也在 Smith 和 Bolomey 的基础上, 提出了粉煤灰混凝土抗压强度与水泥、粉煤灰用量及粉煤灰活性因子间的关系为  $s = a \left( \frac{C+kF}{W} - 0.5 \right)$ . 大量研究表明,  $k$  值随粉煤灰质量、掺量和养护龄期而变. 文献<sup>[1]</sup>的研究结果表明, 如在粉煤灰掺量提高的同时降低砂率, 则不同养护龄期时混凝土的抗压强度与粉煤灰掺量的关系是二次抛物线. 普通水泥浆体的水化过程可以用诸如非蒸发水含量、CH 含量或化学减缩量等来定量表征<sup>[6,6]</sup>. Marsh, Day<sup>[7]</sup>和 Berry 等<sup>[8]</sup>, 也都对粉煤灰水泥浆体的 CH 和非蒸发水含量进行了测定. 但因粉煤灰水泥浆体的水化很复杂, 粉煤灰火山灰反应需消耗水泥水化产生的 CH, 所以以都认为 CH 含量和非蒸发水含量并不能很好表征粉煤灰水泥的水化过程. 本文系统测定了不同掺量粉煤灰砂浆, 在不同养护龄期时的抗压强度、非蒸发水及 CH 含量. 在此基础上, 对测定数据进行科学地分析, 以期揭示粉煤灰效应对大掺量粉煤灰水泥基材料力学和水化进程的影响规律.

1 试验原材料和试验方法

1.1 试验原材料

水泥采用 525# 普通水泥, 粉煤灰为 I 级粉煤灰. 它的化学组成和基本物理力学性能, 如表 1 所示. 表中  $w$  为材料化学组成的质量分数,  $\rho$  为材料密度,  $S$  为材料比表面积,  $S_1$  为方孔筛筛余(水泥为 0.080 mm 筛余, 粉煤灰为 0.045 mm 筛余),  $w_1$  为粉煤灰的需水量(质量分数),  $\sigma_{28}$  为水泥 28 d 抗折强度,  $\sigma_{28}$  为水泥 28 d 抗压强度,  $\sigma_{28f}$   $\sigma_{28}$  为粉煤灰 28 d 抗压强度比. 砂为人工砂, 表观密度  $\rho_0$  为  $2.63\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  堆积密度  $\rho_0$  为  $1\,459\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 细度模数为 2.67, 级配良好. 减水剂为改良型木钙减水剂, 减水率在 20% 以上, 掺量为胶凝材料用量(质量分数)的 0.007.

表 1 水泥和粉煤灰的基本参数

项 目	水 泥	粉煤灰	项 目	水 泥	粉煤灰
$w_{\text{SiO}_2}$	0.210 6	0.564 8	$w_{\text{loss}}$	0.011 8	0.030 4
$w_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	0.050 2	0.320 7	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.19	2.22
$w_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	0.057 5	0.034 3	$S/\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$	3 837	5 450
$w_{\text{CaO}}$	0.621 2	0.027 4	$S_1/(%)$	2.2	5.4
$w_{\text{MgO}}$	0.021 9	0.005 1	$w_1$	—	0.876
$w_{\text{SO}_3}$	0.017 2	0.010 0	$\sigma'_{28}/\text{M Pa}$	8.08	—
$w_{\text{Na}_2\text{O}}$	0.006 2	0.008 5	$\sigma_{28}/\text{M Pa}$	55.8	—
$w_{\text{K}_2\text{O}}$	0.006 9	0.008 3	$\sigma_{28f}\cdot\sigma_{28}^{-1}/(%)$	—	98.9

1.2 试验方法

按表 2 所示砂浆配比搅拌成型  $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 160\text{ mm}$  试件, 每个龄期各 3 块. 在  $(20\pm 3)$  , 相对湿度 90% 以上的室内放置 24 h 后拆模. 然后, 分别养护至 7 d, 28 d, 90 d, 180 d 和 360 d 时, 测定抗折强度和抗压强度. 相应成型  $30\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 30\text{ mm}$  的试件, 每个龄期

表 2 各砂浆的配合比参数<sup>①</sup>

项 目	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
$f/(f+c)$	0	20	30	45	55
$(f+c)/S_2$	0.29	0.27	0.27	0.26	0.24
$w_2/(f+c)$	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

①  $f$  为粉煤灰用量,  $c$  为水泥用量,  $S_2$  为砂的用量,  $w_2$  为水的用量

2 块, 到相应龄期后用无水酒精中止水化. 65 ℃ 下烘干 4 h, 取试块中间部分的水泥浆体在研钵中磨细至全部通过 80  $\mu\text{m}$  筛. 取适量磨细样品用 TG-DTA 方法测试其在 105~90 ℃ 间的失重量, 按下式(1) 计算非蒸发水量. 其中 440~523 ℃ 的失重为 CH 脱水引起, 758~910 ℃ 失重为  $\text{CaCO}_3$ (CH 碳化产生) 分解引起. 根据 CH,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CO}_2$  的分子量可换算出浆体中 CH 的含量(计算方法见文[9]), 计算基准为每克胶凝材料的用量. 有

$$w_{\text{ne}} = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} - \frac{l_{\text{fc}}}{1 - l_{\text{fc}}}, \tag{1}$$

式中  $w_{\text{ne}}$  为非蒸发水量( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  胶凝材料),  $l_{\text{fc}} = p_{\text{d}}/(p_{\text{d}} + p_{\text{f}} + p_{\text{c}})$  分别为粉煤灰、水泥占总胶凝材料的质量分数,  $l_{\text{f}}$ ,  $l_{\text{c}}$  分别为粉煤灰、水泥的烧失量(质量分数),  $m_0$ ,  $m_1$  和  $m_2$  分别为样品的初始、105 ℃ 和 950 ℃ 时的质量(g).

2 试验结果与分析

2.1 砂浆抗压强度试验结果与分析

砂浆抗压强度试验值与多项式线性回归结果,如图 1 所示.从图中可以看出,水胶比相同为 0.50 时,粉煤灰掺量在 0~0.55 范围内,抗压强度均随养护龄期的延长而提高.纯水泥砂浆养护 90 d 后,强度几乎没有增长,而粉煤灰砂浆的强度则继续增长.养护 90 d 时,粉煤灰砂

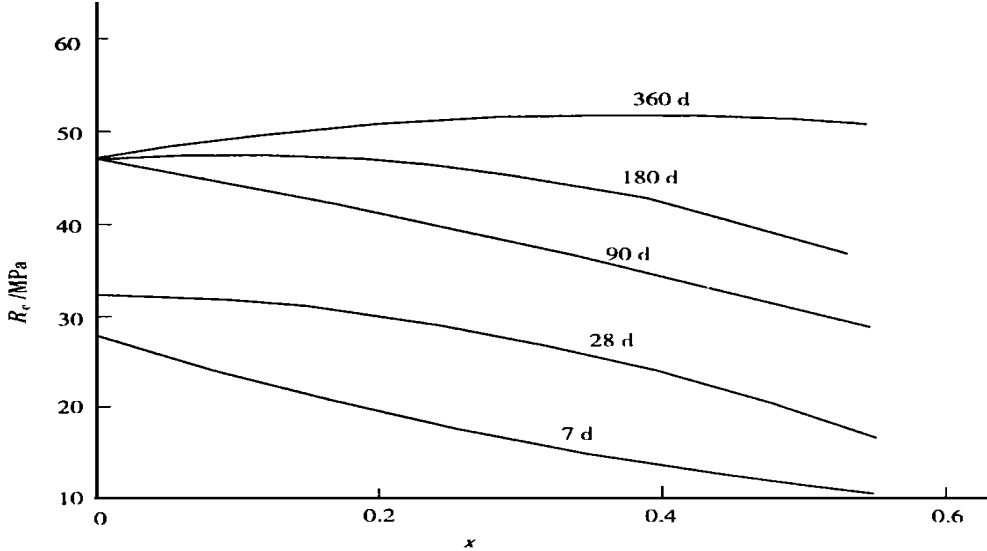


图 1 不同养护龄期时的砂浆抗压强度与粉煤灰掺量的关系图

浆的强度尚未超过不掺粉煤灰的纯水泥砂浆强度值,180 d 时粉煤灰掺量为 0.20 的砂浆抗压强度才超过纯水泥砂浆的抗压.而到 365 d 时,粉煤灰掺量达 0.55 的砂浆抗压强度,都超过了纯水泥砂浆的抗压强度.这明粉煤灰的火山灰效应在 90 d 前发挥很小,于 90~180 d 间逐步发挥,且粉煤灰掺量较高的发挥程度更大.养护龄期相同时,从多元回归曲线看,至 180 d 时,砂浆抗压强度均随粉煤灰掺量的增加而降低,到 365 d 时砂浆抗压强度则随粉煤灰掺量增加而略有提高.相应各龄期砂浆抗压强度与粉煤灰掺量的回归方程,如表 3 所示.

表 3 不同养护龄期时的砂浆抗压强度与粉煤灰掺量的回归方程<sup>①</sup>

<i>T</i> /d	回归方程	$\Phi$	$\alpha$
7	$R_c=27.814-0.48x+0.003x^2$	0.986	1.13
28	$R_c=32.29-0.018x+0.005x^2$	0.993	0.78
90	$R_c=47.045-0.274x+0.001x^2$	0.964	1.96
180	$R_c=46.977-0.107x+0.006x^2$	0.951	1.56
365	$R_c=47.048-0.243x+0.003x^2$	0.913	0.80

① *T* 为养护龄期, *R<sub>c</sub>* 为砂浆的抗压强度值(MPa), *x* 为粉煤灰掺量,  $\Phi$  为相关系数,  $\alpha$  为均方差

2.2 浆体非蒸发水含量试验结果与分析

浆体的非蒸发水含量实测值随龄期变化图和非蒸发水含量与粉煤灰掺量(质量分数)的线性回归曲线,分别如图 2,3 所示.从图 2 可看出,浆体中的非蒸发水含量随龄期的发展有波动,7~90 d 龄期基本随龄期延长而增加,但在 180 d 有所降低.粉煤灰掺量较高时,一直到

365 d 仍是有降低的趋势. 文 [10] 认为这一现象可能是由于 C-S-H 凝胶中的多聚硅酸盐的平均链长, 将随硅灰等火山灰材料掺量和时间的增加而增加, 在聚合过程中释放出水分, 这部分

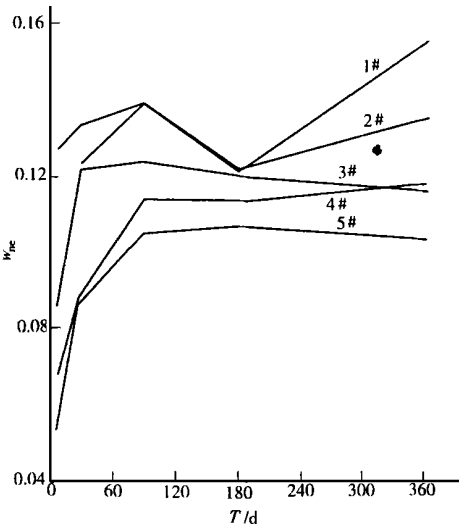


图 2 浆体非蒸发水和养护龄期的关系

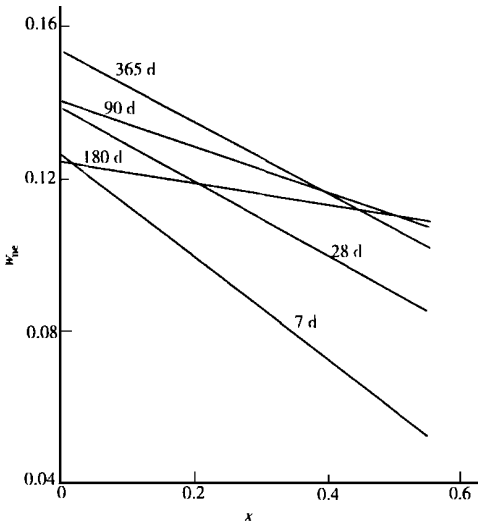


图 3 浆体非蒸发水与粉煤灰掺量的回归曲线图

水分可能成为可蒸发水失去. 从强度随龄期的发展关系来看, 这也可能是由于 90~180 d 时粉煤灰火山灰反应较大发挥, 消耗 CH, 生成的产物结合的水分可能比水泥水化产物少. 通过回归分析发现, 在同一龄期, 非蒸发水含量和粉煤灰掺量间存在很好的线性关系, 其回归方程如表 4 所示. 从各回归方程的斜率可看出, 养护 7 d 时, 非蒸发水量随粉煤灰掺量增加降低最大, 这是由于水泥相对含量减少, 水化产物生成量少. 随后, 方程斜率随龄期延长而降低, 180 d 时最小. 这表明在 180 d 时, 粉煤灰掺量较低的浆体, 火山灰反应程度较大, 非蒸发水量降低较多, 而粉煤灰掺量较大浆体火山灰反应还较小. 到 365 d 时, 粉煤灰掺量较大浆体的火山灰反应更大地发挥, 使得其非蒸发水量降低较大. 因此, 365 d 时, 方程的斜率又增大. 从中也可得出, 对于粉煤灰水泥浆体, 非蒸发水的降低并不意味着胶凝材料水化程度的降低. 它可能表明粉煤灰火山灰反应程度加大, 宏观上则表现出强度的提高.

表 4 浆体非蒸发水含量和粉煤灰掺量的回归方程<sup>①</sup>

$T/\text{d}$	回归方程	$\Phi$	$\alpha$
7	$w_{\text{ne}} = -0.1334x + 12.669$	0.999	0.016
28	$w_{\text{ne}} = -0.0954x + 13.885$	0.872	0.82
90	$w_{\text{ne}} = -0.0579x + 14.095$	0.796	0.53
180	$w_{\text{ne}} = -0.0265x + 12.472$	0.754	0.141
365	$w_{\text{ne}} = -0.0908x + 15.339$	0.921	0.433

①  $w_{\text{ne}}$  为浆体非蒸发水含量,  $x$  为粉煤灰掺量

2.3 浆体 CH 含量试验结果和分析

图 4 示出了不同养护龄期时, 各配比浆体中 CH 含量的实测值. CH 量随龄期也呈现一定的波动性. 对于粉煤灰水泥浆体而言, 90 d 时 CH 含量基本在各配比浆体中都是最多的, 表明 90 d 前基本是浆体中水泥发生水化, 180 d 时则 CH 含量最少, 表明 90~180 d, 粉煤灰的火山

灰反应较大. 这一结果, 与前面非蒸发水得到的结论是一致的. 表 5 示出了浆体中 CH 含量和粉煤灰掺量对数的回归方程(不含 1# 纯水泥浆体), 其回归曲线如图 5 所示. 从图 5 可看出, 7 d 和 180 d 时回归方程的斜率最小, 7 d 主要是水泥水化产生 CH 而 180 d 则是粉煤灰掺

表 5 浆体 CH 含量和粉煤灰掺量对数的回归方程<sup>①</sup>

$T/d$	回归方程	$\Phi$	$\alpha$
7	$w_{CH} = -3.392\lg x + 10.210$	0.943	0.040
28	$w_{CH} = -7.689\lg x + 17.075$	0.996	0.013
90	$w_{CH} = -6.719\lg x + 15.724$	0.844	0.472
180	$w_{CH} = -3.947\lg x + 10.224$	0.996	0.004
365	$w_{CH} = -6.348\lg x + 14.589$	0.955	0.106

①  $w_{CH}$  为浆体中 CH 含量,  $x$  为粉煤灰掺量

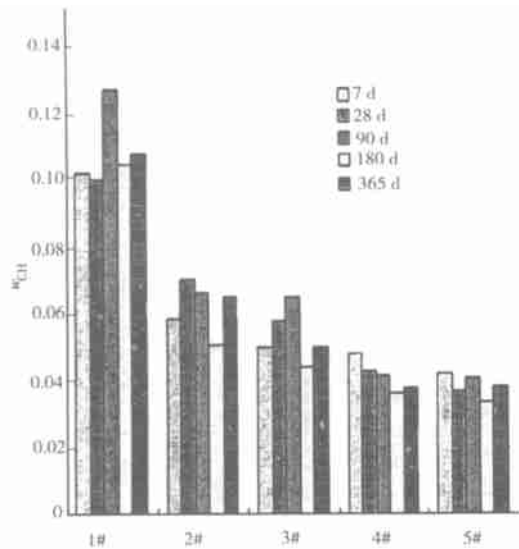


图 4 各养护龄期浆体的 CH 含量

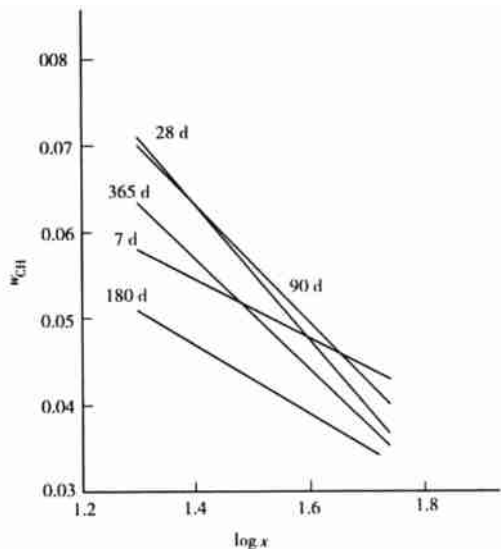


图 5 CH 含量与粉煤灰掺量对数的回归曲线

量较少的浆体中, 粉煤灰火山灰反应较大发挥的龄期. 通过对粉煤灰水泥基材料的抗压强度、非蒸发水含量和 CH 含量随粉煤灰掺量的变化规律的分析, 发现它们的结论能够很好地吻合. 这都反映出粉煤灰火山灰反应在 90 d 前很少, 90 d ~ 180 d 逐渐发挥, 发挥的程度随粉煤灰掺量增加而降低. 并且, 它们和粉煤灰掺量都有很好的线性关系, 这为我们预测粉煤灰掺水泥基材料性能提供了很有用的指导.

3 结束语

(1) 粉煤灰砂浆的抗压强度和粉煤灰掺量的关系可用二次函数表达, 非蒸发水量和粉煤灰掺量的关系为线性函数关系, CH 含量和粉煤灰掺量的对数也可用线性函数关系表示. 这为我们定量预测不同养护龄期、不同粉煤灰掺量水泥基材料的性能, 提供有用的指导. (2) 粉煤灰水泥基材料抗压强度、非蒸发水量和 CH 含量的随粉煤灰掺量的变化规律, 揭示出粉煤灰掺火山灰反应在 90 d 前很少, 90 d 以后逐渐发挥. 其发挥的程度, 随粉煤灰掺量增加而降低.

## 参 考 文 献

- 1 Babu K G, Rao G S N. Early strength behaviour of fly ash concretes[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(2): 227 ~ 284
- 2 Babu K G, Rao G S N. Efficiency of fly ash in concrete with age[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(3): 465 ~ 474
- 3 Hansen T C. Long-term strength of high fly ash concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20(2): 193 ~ 196
- 4 Bijen J, Selst R V. Cement equivalence factors for fly ash[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 22(5): 1 029 ~ 1 039
- 5 Parrott L J, Geiker M, Gutteridge W A, et al. Monitoring portland cement hydration comparison of methods[J]. Cement and Concrete Research, 1990, 20(6): 919 ~ 926
- 6 Geiker M, Kundsén T. Chemical shrinkage of port land cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 1982, 12(5): 603 ~ 610
- 7 Marsh B K, Day R L. Pozzloanic and cementitious reactions of fly ash in blended cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 1988, 18(2): 301 ~ 310
- 8 Berry E E, Hemmings R T, Cornelius B J. Mechanisms of hydration reactions in high volume fly ash paste and mortars[J]. Cement and Concrete Composites, 1990, 12(2-3): 213 ~ 261
- 9 廉慧珍, 童 良, 陈恩义, 建筑材料物相研究基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997, 98 ~ 101
- 10 Zhang M H, GjØrv O E. Effect of silica fume on cement hydration in low porosity cement pastes[J]. Cement and Concrete Research, 1991, 21(5): 800 ~ 808

## Relation of Fly Ash Entrainment in the Mortar with Strength and Hydration Parameters of the Mortar

Yan Handong

(Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** systematic measurements were made on compression strength, non-evaporable water and CH content of mortar samples. These mortar samples entrained first grade flyash with a water-ash ratio of 0.5 in respective mass fraction of 0, 0.20, 0.30, 0.45 and 0.55; and had passed through standard curing for 7, 28, 90, 180 and 365 days respectively. After regression analysis of these test data, it was found that the fly ash entrainment kept well linear correlation with compression strength, non-evaporable water and CH content of the mortar. With respect to the effect of fly ash with different entrainment and curing age on the mechanical performance and the hydration course of large amount fly ash cement based material, a quantitative study can be made therefrom with the hope of probing into its regularity.

**Keywords** flyash entrainment, compression strength, non-evaporable water, CH content, fly ash effect