

粉煤灰基蒸压加气混凝土的毛细吸水特性研究

王小兵¹, 张传达¹, 高 健¹, 甘元楠², 纪云锋²

(1. 河南洛宁抽水蓄能有限公司, 洛阳 471000; 2. 中国安能集团第二工程局有限公司, 南昌 330096)

摘要: 为探究粉煤灰基蒸压加气混凝土的毛细吸水特性, 通过毛细吸水试验, 分析干密度级别、硅质材料和干燥温度对蒸压加气混凝土毛细吸水系数的影响。结果表明: 在不同干密度级别中, B06 级粉煤灰基蒸压加气混凝土的毛细吸水系数最高, 其次是 B05 级, 而 B07 级最低; B06 级粉煤灰基蒸压加气混凝土具有较小且不均匀的孔径和较多的连通孔, 表现出更强的毛细吸水能力; 硅质材料类型的不同也导致了毛细吸水系数的差异, 其中砂基蒸压加气混凝土的毛细吸水系数低于粉煤灰基蒸压灰加气混凝土, 这与砂基蒸压加气混凝土中水化产物的结晶度较高, 减少了毛细孔的数量有关; 干燥温度的升高对毛细吸水系数有一定的促进作用, 但相较于普通混凝土, 这种影响在粉煤灰基蒸压加气混凝土中并不显著。

关键词: 蒸压加气混凝土; 毛细吸水特性; 干密度级别; 硅质材料; 干燥温度

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 01-0063-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.012

Capillary Water Absorption Properties of Fly Ash – based Autoclaved Aerated Concrete

WANG Xiaobing¹, ZHANG Chuanda¹, GAO Jian¹, GAN Yuannan², JI Yunfeng²

(1. Henan Luoning Pumped Storage Co., Ltd., Luoyang 471000, China;

2. China Anneng Group Second Engineering Bureau Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to investigate the capillary water absorption characteristics of fly ash – based autoclaved aerated concrete, the effects of dry density level, siliceous material and drying temperature on the capillary water absorption coefficient of autoclaved aerated concrete were analyzed by carrying out capillary water absorption tests. The test results show that among different dry density grades, the capillary water absorption coefficient of fly ash – based autoclaved aerated concrete of grade B06 is the highest, followed by grade B05, while grade B07 is the lowest. SEM electron microscopy analysis reveals that grade B06 exhibits a stronger capillary water absorption capacity due to its smaller and uneven pore size and more connecting pores. The difference in the type of siliceous material also affects the difference in the capillary water absorption coefficient, with sand – based autoclaved aerated concrete having a lower capillary water absorption coefficient than fly ash – based autoclaved aerated concrete. This is attributed to the higher crystallinity of hydration products in sand – based autoclaved aerated concrete, which reduces the number of capillary pores. Additionally, an increase in drying temperature promotes the capillary water absorption coefficient; however, this effect is not significant in fly ash – based autoclaved aerated concrete compared to ordinary concrete.

项目来源: 国网新源集团有限公司科技项目 (SGYYKJ-2023-105)。

作者简介: 王小兵 (1988—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 混凝土材料研究。

通信作者: 张传达 (1997—), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 混凝土材料研究。

收稿日期: 2024-11-23

材料科学

This is because temperature changes below 100 °C have a limited impact on the microstructure of fly ash - based autoclaved aerated concrete.

Key words: autoclaved aerated concrete; capillary water absorption; dry density grades; siliceous materials; drying temperature

0 引言

蒸压加气混凝土是一种轻质建筑材料, 主要原材料包括钙质材料(水泥、石灰)、硅质材料(硅砂、粉煤灰)和发气材料(铝粉)等, 主要生产流程包括混合搅拌、发气初凝和蒸压养护等步骤^[1-3]。在生产过程中, 作为发气材料的铝粉与二氧化硅反应产生了大量的微观氢气泡, 从而在材料内部形成了大量孔隙^[4]。蒸压加气混凝土的孔隙率通常超过70%, 使其具备轻质、隔音、隔热以及节能等优点, 广泛应用于墙体围护结构^[5-6]。然而, 蒸压加气混凝土的多孔结构增强了其吸水性, 进而可能降低耐久性。在非饱和状态下, 混凝土的吸水性主要受毛细作用的影响^[7], 因此, 深入研究蒸压加气混凝土的毛细吸水特性显得尤为重要。

关于多孔建筑材料的毛细吸水特性, 国内外已有诸多学者进行了研究。Hanumanthu 等^[8]通过分析不同多孔材料的毛细吸水数据, 揭示了温度对毛细吸水特性的显著影响, 表明约 10°C 的温度变化会显著改变毛细吸水系数; Wang 等^[9]则研究了温度、浸水深度、厚度和底面积等因素对泡沫混凝土、加气混凝土和珊瑚砂混凝土毛细吸水特性的影响, 结果表明各因素对毛细吸水的影响程度为: 温度 > 浸入深度 > 厚度 > 底部面积; Zhou 等^[10]的研究表明, 空气压力对硅酸钙、蒸压加气混凝土和陶瓷砖等多孔建筑材料的毛细吸水特性的影响可以忽略不计; 而 El 等^[11]则利用了中子照相技术研究了密封方式对砌块砖吸水过程的影响, 指出不同的密封涂料密封试件会影响毛细吸水系数; 此外, 苏丽等^[12]分析了硅灰和矿渣对珊瑚砂骨料混凝土的毛细吸水性影响, 发现不同的材料成分会影响毛细吸水性能。

尽管已有关于蒸压加气混凝土毛细吸水特性的初步探讨, 如温度、浸水深度和试件尺寸的影响, 但尚未就不同类型的蒸压加气混凝土进行系统的毛细吸水试验。根据 GB/T 11968—2020《蒸压加气混凝土砌块》^[13]的规定, 蒸压加气混凝土可根据干密度

进行分类, 不同干密度等级的蒸压加气混凝土可能具有不同的孔隙结构, 这可能成为影响其毛细吸水特性的关键因素。此外, 蒸压加气混凝土还可根据硅质材料的不同分为粉煤灰基和砂基, 其材料成分的变化也可能对毛细吸水特性产生影响。在 GB/T 11969—2020《蒸压加气混凝土性能试验方法》^[14]中, 蒸压加气混凝土的吸水试验通常需要在 60°C、80°C、105°C 的烘干处理。为确保试验的一致性并排除干扰因素, 不同干燥温度对毛细吸水是否存在影响值得探讨。因此, 参考文献 [15] 的规定, 通过毛细吸水试验研究不同干密度级别、硅质材料和干燥温度的蒸压加气混凝土毛细吸水特性。

1 试验

1.1 试验材料

试件材料选用常见的蒸压加气混凝土砌块制品, 砌块规格为 600 mm × 240 mm × 100 mm; 编号 B05、B06、B07。砌块原材料包括粉煤灰(硅砂)、生石灰、水泥、石膏、铝膏, 配和比见表 1。由于蒸压加气混凝土在生产过程中存在各向异性, 试件切割时应选择垂直于发气方向的位置, 从砌块制品中切取, 试件尺寸统一选定为 100 mm × 100 mm × 100 mm, 用于毛细吸水性能测试。

表 1 蒸压加气混凝土砌块配和比
Table 1 Autoclaved aerated concrete block mixing ratio / %

编号	石灰	水泥	粉煤灰	砂	粉煤灰	石膏	铝膏
灰 B05	15	11	60.3		60.3	3	0.7
灰 B06	16	10	60.4		60.4	3	0.6
灰 B07	18	8	60.5		60.5	3	0.5
砂 B05	10	15		68.1		6	0.9
砂 B06	12	13		68.2		6	0.8
砂 B07	14	11		68.3		6	0.7

注: 灰 B05 为干密度级别为 B05 的粉煤灰基蒸压加气混凝土, 砂 B05 为干密度级别为 B05 的砂基蒸压加气混凝土, 以此类推。

1.2 试验参数

试验参数设置见表 2。F 代表粉煤灰, S 代表硅砂。恒质状态定义为在连续干燥 4 h 后试件的质量减少不超过 2 g。

表 2 试验参数
Table 2 Test parameters

试件编号	干密度级别	硅质材料	干燥方法
F5	B05	粉煤灰	先 60℃ 干燥 24h, 再 80℃ 干燥 24h, 最后 105℃ 干燥至恒质
F6	B06	粉煤灰	同 F5
F7	B07	粉煤灰	同 F5
S5	B05	硅砂	同 F5
S6	B06	硅砂	同 F5
S7	B07	硅砂	同 F5
F6-A	B06	粉煤灰	60℃ 干燥至恒质
F6-B	B06	粉煤灰	80℃ 干燥至恒质
F6-C	B06	粉煤灰	105℃ 干燥至恒质

1.3 毛细吸水试验

毛细吸水试验按照 ASTM C1794-15《部分浸水法测定吸水系数的标准试验方法》的规定进行, 试验装置如图 1 所示。试验开始前, 采用 WGZ 精密形鼓风干燥箱干燥至恒质, 并精确测量尺寸至 0.1 mm。试件侧面使用环氧树脂密封, 上表面和下表面保持不密封状态。环氧树脂干燥期间, 准备试验水箱, 设置高度超过 5 mm 的支撑物, 并注入蒸馏水, 确保水深达到支撑物上方 5 ± 2 mm 的范围内。环氧树脂彻底干燥后, 称量试件的初始质量 m_i , 然后将试件放在支撑物上, 启动计时器开始试验。

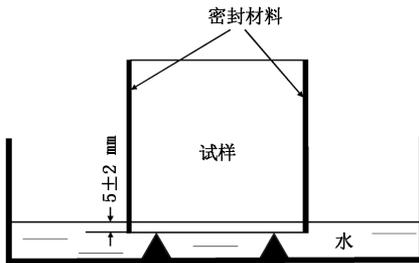


图 1 毛细吸水试验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the capillary water absorption test device

试验过程中, 当吸水时间 t 达到 5、30 min 和 1、2、4、8、16 h 及 1、2、3、4、5、6、7 d 时, 取出试件并用湿抹布快速擦去表面水滴, 称量试件吸水后的质量 m_t , 然后立即将试件放回水中, 整个过程控制在 30 s 内完成。为保持试验条件的一致性, 适时补充蒸馏水, 确保试件底面与水面的距离始终保持在 5 ± 2 mm。

根据式 (1) 计算每次称量时的单位面积累计吸水质量 Δm_t , 再以 Δm_t 为纵坐标, $t^{0.5}$ 为横坐标绘制曲线图, 然后根据式 (2) 进行线性拟合得到斜率 (忽略斜率突然减小后的各点), 即为毛细吸水系数 w_w :

$$\Delta m_t = \frac{m_t - m_i}{A} \quad (1)$$

$$\Delta m_t = w_w \cdot t^{0.5} + \Delta m_0 \quad (2)$$

式中: A 为试件底面积, m^2 ; m_i 为试件初始质量, kg ; m_t 为 t 时的试件吸水后的质量, kg ; Δm_t 为单位面积累计吸水质量, kg/m^2 ; Δm_0 为拟合截距; t 为吸水时间, h ; w_w 为毛细饱和和吸水系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$ 。

2 结果与讨论

2.1 不同干密度级别下蒸压加气混凝土的毛细吸水特性

由图 2 可知, 随着吸水时间 t 的增加, F5、F6 和 F7 的 Δm_t 均呈明显的增长趋势, 且与 $t^{0.5}$ 之间存在显著的线性相关性。在吸水速率方面, F5、F6 和 F7 表现出明显的差异性, 其中 F6 的吸水速率最快, F5 其次, F7 的吸水速率则相对较慢。

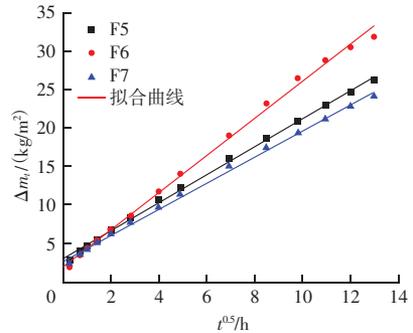


图 2 F5、F6 和 F7 的单位面积累计吸水质量 Δm_t 与吸水时间 t 的关系

Fig. 2 Cumulative mass of water absorbed per unit area Δm_t versus absorption time t for F5, F6 and F7

F5、F6、F7 的线性拟合程度都非常好, R^2 值均超过 0.99, 这表明毛细吸水系数 w_w 能够有效衡量蒸压加气混凝土的毛细吸水能力。 w_w 值越大, 则蒸压加气混凝土的毛细吸水能力越强。F6 的毛细吸水系数 w_w 相对 F5 的增大了 32.25%, 表明其毛细吸水能力较强; F7 的毛细吸水系数 w_w 相对 F5 的减小了 6.89%, 表明其毛细吸水能力相对 F5 较弱。

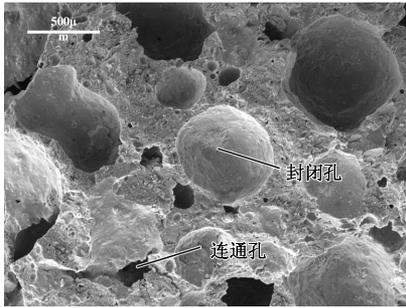
表 3 单位面积累计吸水质量 Δm_t 与吸水时间 t 的拟合结果
Table 3 Fitting results of cumulative water absorption mass per unit area Δm_t and absorption time t

编号	毛细吸水系数 w_w	拟合截距 Δm_0	R^2
F5	1.827 12	2.910 84	0.998 39
F6	2.416 43	1.893 67	0.997 17
F7	1.701 16	2.566 63	0.997 52

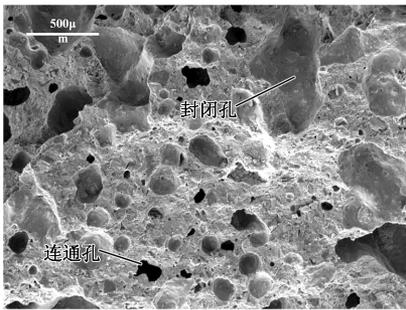
材料科学

蒸压加气混凝土的干密度与孔隙率密切相关, 一般情况下, 干密度较低时孔隙率较高, 两者呈负相关。同时, 混凝土的毛细吸水系数通常与孔隙率正相关, 即孔隙率越大, 毛细吸水系数越高。因此, F7 的毛细吸水系数低于 F5、F6。

由图 3 可知, 蒸压加气混凝土的内部结构都是由大小不一的孔隙和胶结体组成的蜂窝状结构, 但 F5 与 F6 的内部结构在孔径大小和均匀性方面存在显著差异。其中, F5 的孔径普遍较大, 主要在 500 ~ 800 μm 之间, 且孔径规则、均匀; 而 F6 孔径的孔径普遍较小, 主要在 100 ~ 300 μm 之间, 孔径分布不均匀, 这说明当孔隙直径较大且孔径分布越均匀时, 毛细吸水将越小。F6 相比于 F5 具有更多的连通孔。封闭孔相对独立, 不与其他孔重叠、联合, 孔壁也相对完整, 几乎呈球形, 而连通孔多与其他孔连接, 形状不一且具有深度, 这为毛细吸水提供了便利条件。综上所述, 蒸压加气混凝土的毛细吸水系数不仅与孔隙率有关, 还与其孔径均匀性、孔径大小和连通孔数量相关。



(a) F5



(b) F6

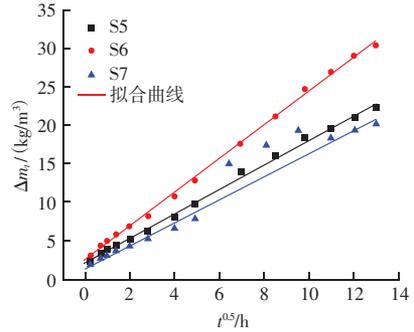
图 3 SEM 电镜扫描图

Fig. 3 SEM electron microscope scans

2.2 不同硅质材料下蒸压加气混凝土的毛细吸水特性

由图 4 可知, S5、S6、S7 与 F5、F6、F7 具有相同的毛细吸水规律, 吸水质量都随吸水时间的呈现出相似的增长趋势; 在吸水速率方面, S6 最快, S5

其次, S7 相对较慢。根据表 4 的拟合结果, 与 S5 的毛细吸水系数相比, S6 的毛细吸水系数增大了 37.58%, S7 的毛细吸水系数减小了 5.92%。这表明尽管硅质材料的类型有所不同, 但蒸压加气混凝土的毛细吸水过程并未出现显著差异。

图 4 S5、S6 和 S7 的单位面积累计吸水质量 Δm_t 与吸水时间 t 的关系Fig. 4 Cumulative mass of water absorbed per unit area Δm_t versus absorption time t for S5, S6 and S7表 4 单位面积累计吸水质量 Δm_t 与吸水时间 t 的拟合结果Table 4 Fitting results of cumulative water absorption mass Δm_t per unit area and absorption time t

编号	毛细吸水系数 w_w	拟合截距 Δm_0	R^2
S5	1.596 73	2.056 69	0.996 79
S6	2.196 75	2.424 79	0.998 49
S7	1.502 25	1.272 91	0.994 13

与 F5、F6、F7 的吸水速率相比, S5、S6、S7 表现出了更低的吸水速率。S5 的毛细吸水系数相较于 F5 的毛细吸水系数减小了 14.71%; S6 的毛细吸水系数相较于 F6 的 9.09%; S7 的毛细吸水系数相较于 F7 的毛细吸水系数 11.71%。由此可知, 硅质材料的不同会影响蒸压加气混凝土的毛细吸水系数, 砂基蒸压加气混凝土的毛细吸水能力小于粉煤灰基蒸压加气混凝土的毛细吸水能力。

2.3 不同干燥温度下蒸压加气混凝土的毛细吸水特性

由图 5 可知, 干燥温度越高, 蒸压加气混凝土的初始吸水质量越多, 毛细吸水质量增加速率也越快。

由表 5 可知, 毛细吸水系数随着干燥温度的升高而增加, 与 60 $^{\circ}\text{C}$ 干燥温度下的毛细吸水系数相比, 80 $^{\circ}\text{C}$ 干燥温度下的毛细吸水系数增加了 3.691%, 105 $^{\circ}\text{C}$ 干燥温度下的毛细吸水系数增加了 7.816%。

这些结果表明, 干燥温度会对蒸压加气混凝土的毛细吸水特性产生影响, 干燥程度越高, 蒸压加气混凝土的孔隙结构中的毛细作用力越强, 水分更容易渗透进内部孔隙。

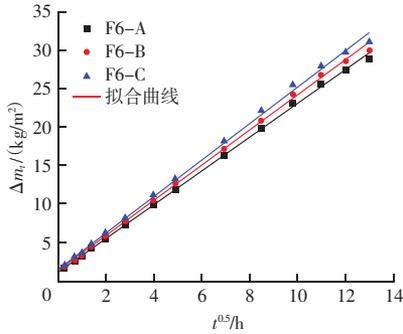


图5 干燥温度对蒸压加气混凝土的毛细吸水特性影响

Fig. 5 Effect of drying temperature on capillary water absorption characteristics of autoclaved aerated concrete

表5 单位面积累计吸水质量与吸水时间的拟合结果

Table 5 Results of fitting the cumulative mass of water absorbed per unit area to the time of water absorption

编号	毛细吸水系数 w_w	拟合截距 Δm_0	R^2
F6-A	2.201 33	1.051 22	0.999 1
F6-B	2.282 58	1.298 68	0.998 7
F6-C	2.373 38	1.446 18	0.997 9

3 结论

通过对蒸压加气混凝土进行毛细吸水试验，得出以下结论：

(1) 不同干密度级别的蒸压加气混凝土有不同的毛细吸水系数。B06 级的毛细吸水系数最高，其次是 B05 级，B07 级则最低。与 B05 级相比，B06 级具有较小且不均匀的孔径以及较多的连通孔，毛细吸水系数也较高。因此，蒸压加气混凝土的毛细吸水系数不仅与孔隙率有关，还与其孔径均匀性、孔径大小和连通孔数量相关。

(2) 不同硅质材料的蒸压加气混凝土在毛细吸水过程中表现出相似的规律，但砂基蒸压加气混凝土的毛细吸水系数低于蒸压灰加气混凝土。

(3) 干燥温度对蒸压加气混凝土的毛细吸水特性有一定的影响。随着干燥温度的升高，毛细吸水系数相应增加。然而，与普通混凝土相比，这种影响并不显著。

参 考 文 献

- [1] FENG W, LI Z, LONG Q, et al. Study on the properties of autoclaved aerated concrete with high content concrete slurry waste [J]. *Developments in the Built Environment*, 2024, 17: 100338.
- [2] 陈潇, 张浩宇, 薛鑫, 等. 固体废弃物在蒸压加气混凝土中的应用现状综述 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42 (2): 541-553.
- [3] LIU K, SHEN C, WANG Y, et al. The performance of autoclaved aerated concrete prepared by arenaceous rock coal gangue powder instead of fly ash: The effect of Ca/Si ratio [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 441: 137495.
- [4] YE H, ZHU B, PAN J, et al. Solid waste - based low - carbon autoclaved aerated concrete: Relationship between engineering properties and microstructure [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 91: 109691.
- [5] RAHMAN R, FAZLIZAN A, ASIM N, et al. A review on the utilization of waste material for autoclaved aerated concrete production [J]. *Journal of Renewable Materials*, 2021, 9 (1): 61-72.
- [6] CHEN G, LI F, GENG J, et al. Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 294: 123572.
- [7] 蒋科, 庞超明, 张晖, 等. 混凝土水分传输及边界条件试验研究 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38 (10): 161-166, 173.
- [8] HANUMANTHU K, SARKAR K. Statistical quantification of the effect of temperature on capillary water absorption in some porous building materials [J]. *Building and Environment*, 2021, 198: 107889.
- [9] WANG Y, WANG W, WANG D, et al. Study on the influence of sample size and test conditions on the capillary water absorption coefficient of porous building materials [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 43: 103120.
- [10] ZHOU M, LI X, FENG C, et al. Hygric properties of porous building materials (VIII): Influence of reduced air pressure [J]. *Building and Environment*, 2022, 225: 109680.
- [11] EL ABD A, TAMAN M, KICHANOV S E, et al. Implementation of capillary penetration coefficient on water sorptivity for porous building materials: An experimental study [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 298: 123758.
- [12] 苏丽, 牛获涛, 黄大观, 等. 增强珊瑚骨料混凝土毛细吸水性能与预测模型 [J]. *材料导报*, 2023, 37 (15): 100-107.
- [13] GB/T 11968—2020 蒸压加气混凝土砌块 [S].
- [14] GB/T 11969—2020 蒸压加气混凝土性能试验方法 [S].
- [15] ASTM International. Standard Test Methods for Determination of the Water Absorption Coefficient by Partial Immersion; ASTM C1794 - 15. PA: ASTM International, United States, 2015.