

蒸压粉煤灰砖在使用阶段的干燥收缩试验研究

梁建国¹, 程少辉², 彭茂丰³

1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙, 410004;
2. 湖南省建筑工程集团, 湖南 长沙, 410004;
3. 湖南农业大学 工学院, 湖南 长沙, 410128)

摘要: 为了控制蒸压粉煤灰砖砌体房屋的干燥收缩裂缝, 按照快速法和慢速法对上墙相对含水率不同的蒸压粉煤灰砖在不同相对湿度下的干燥收缩进行试验研究。试验结果表明: 按标准(快速)法得到的蒸压粉煤灰砖的干燥收缩率为慢速试验法的48%, 且蒸压粉煤灰砖使用阶段的干燥收缩率随着上墙相对含水率的增大而增大, 随着环境相对湿度增大而减小。通过对试验结果的回归分析, 得到了上墙相对含水率影响系数、环境相对湿度影响系数以及龄期影响系数, 得出了蒸压粉煤灰砖使用阶段干燥收缩率的估算公式。

关键词: 蒸压粉煤灰砖; 干燥收缩; 含水率; 相对湿度; 龄期

中图分类号: TU362

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2010)04-1578-06

Experimental research on drying shrinkage of autoclaved fly ash brick in service stage

LIANG Jian-guo¹, CHENG Shao-hui², PENG Mao-feng³

1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China;
2. Hunan Construction Engineering Group Corporation, Changsha 410004, China;
3. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to avoid cracking in autoclaved fly-ash brick masonry walls due to drying shrinkage, the drying shrinkage of autoclaved fly-ash brick with different relative moisture contents in different relative humidities were tested using rapid method and comparatively slow method. The test results show that the drying shrinkage of autoclaved fly ash brick using rapid method is 48% of that using slow method, and the drying shrinkage of autoclaved fly ash bricks in service stage increases with the increase of relative moisture content and decreases with the increase of relative humidity. The moisture content factor, the relative humidity factor as well as the age factor can be obtained by regression analysis of the test results. The predicting formula of the drying shrinkage of autoclaved fly-ash brick in service stage is obtained.

Key words: autoclaved fly-ash brick; drying shrinkage; moisture content; relative humidity; age

蒸压粉煤灰砖因失去水分将产生较大的干燥收缩变形, 导致墙体开裂, 影响房屋正常使用^[1]。为了控制这类房屋开裂, 国内大量研究者注重从改进砖的生

产工艺、原材料及其配合比来减少砖的干燥收缩率, 从提高材料性能的角度来控制墙体干燥收缩裂缝^[2-3]。然而, 只有在使用环境中达到平衡含水率时,

收稿日期: 2009-08-23; 修回日期: 2009-11-15

基金项目: 建设部国家标准资助项目(建标[2007]125号)

通信作者: 梁建国(1963-), 男, 湖南常宁人, 教授, 从事砌体结构与钢筋混凝土基本理论研究; 电话: 0731-82309713; E-mail: jgliang1963@163.com

砖的干燥收缩即使用阶段的干燥收缩率才会导致房屋开裂^[4-5]。Raimondo 等^[6]认为: 砌体所处的环境相对湿度越大, 砌体的平衡含水率越大, 砌体使用阶段的干燥收缩越小, 这与 Hughes 等^[7-8]的混凝土砌块砌体的干燥收缩试验结果一致。Forth 等^[9-10]认为砖的上墙含水率越大, 墙体的干燥收缩越大。但是, 这些研究都不能针对某一种材料建立预估干燥收缩的计算公式。砌体的干燥收缩由砖和砂浆的干燥收缩组合而成^[11], 有的标准^[12]认为: 砖在砌体中所占体积的比例很大, 砌体的干燥收缩率直接由砖的干燥收缩率来确定。由此, 预估蒸压粉煤灰砖使用阶段的干燥收缩对结构裂缝控制是有益的。人们在这面对混凝土结构进行了大量研究^[13], 而对砖砌体研究较少。在此, 本文作者针对蒸压粉煤灰砖的上墙含水率、环境相对湿度、龄期、干燥收缩测试方法等影响因素, 通过对比试验, 分析研究蒸压粉煤灰砖干燥收缩规律以及估算蒸压粉煤灰砖干燥收缩率的表达式。

1 蒸压粉煤灰砖干燥收缩的试验研究

1.1 试验方法

1.1.1 标准(快速)法

按照《砌墙砖试验方法》^[14], 将浸泡饱和的砖放置在温度为(50±1)、相对湿度为(17±2)%的烘箱中, 质量和收缩变形达到稳定时所测得的干燥收缩率是材料的基本性能指标, 按下式计算:

$$\varepsilon_0 = \frac{L_s - L_0}{L_0} \times 1000 \quad (1)$$

式中: ε_0 为砖的干燥收缩率(mm/m); L_s 为浸泡饱和时砖的长度(mm); L_0 为烘干后砖的长度(mm)。

1.1.2 慢速法

为了模拟砖在墙上的实际工作状况, 将某一含水率的砖置于受人工控制温度和湿度的空气环境中自然干燥, 测量砖的初始长度和质量, 然后, 在时刻 $t(t = 1 \sim 138 \text{ d})$ 时, 测量每块砖的长度和质量。干燥收缩率 $\varepsilon(t)$ 按下式计算:

$$\varepsilon(t) = \frac{L_1 - L(t)}{L_0} \times 1000 \quad (2)$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为砖的干燥收缩率(mm/m); L_1 为测试开始时或上墙时砖的初始长度(mm); $L(t)$ 为开始测试后或

者上墙后某时刻 t 时砖的长度(mm)。

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 砖在环境中达到平衡含水率, 砖的干燥收缩也趋于稳定, 这时, 砖的干燥收缩率为使用阶段干燥收缩率 ε_{eq} , 该值与砖的上墙含水率和所处的环境相对湿度有关。

1.2 不同试验方法时蒸压粉煤灰砖的干燥收缩

从湖南、湖北、福建、河南、山东等地抽取了 10 个厂家的蒸压粉煤灰砖(共 10 组, 每组 20 块), 它们的原材料和生产工艺有所不同。将每组试件中的 10 块按快速法试验, 另外 10 块按慢速法试验, 慢速法试验中砖的初始含水率为饱和, 且在中等环境(温度为(20±3)、湿度为(65±5)%)下试验。试验结果见表 1。

表 1 不同试验方法时蒸压粉煤灰砖干燥收缩试验结果
Table 1 Drying shrinkage of autoclaved fly ash brick using different test methods

组别	$\varepsilon_0 /$ (mm·m ⁻¹)	$\varepsilon_{eq,s}^m /$ (mm·m ⁻¹)	$\delta_{eq} / \%$	$\varepsilon'_0 /$ (mm·m ⁻¹)	$\varepsilon_0 / \varepsilon'_0$	$\varepsilon_{eq,s}^m / \varepsilon'_0$
1		0.143	17.08	0.551		0.260
2	0.251	0.157	21.81	0.450	0.558	0.349
3	0.228	0.525	25.69	0.795	0.287	0.660
4	0.210	0.153	9.43	0.190	1.105	0.805
5	0.192	0.356	13.00	0.622	0.309	0.572
6	0.373	0.358	27.60	1.033	0.361	0.347
7	0.169	0.287	19.34	0.640	0.264	0.448
8	0.343	0.514	13.02	1.315	0.261	0.391
9	0.453	0.363	14.76	0.728	0.622	0.500
10	0.427	0.387	11.63	0.769	0.555	0.503
平均值	0.294	0.324	17.34	0.709	0.480	0.483

注: δ_{eq} 为平衡相对含水率; $\varepsilon_{eq,s}^m$ 为浸泡饱和砖在中等试验环境(温度(20±3)、湿度(65±5)%)下, 采用慢速法测到的使用阶段收缩率; ε'_0 为慢速法试件达到平衡含水率, 用烘箱烘干后得到的从饱和到绝干的干燥收缩率。

采用慢速法的试验过程中, 由于毛细孔水或分子结合水失去后, 原来作用于毛细孔上的表面张力撤除, 砖产生蠕变变形, 随着时间增加, 干燥收缩变形不断增大, 采用慢速法测得的干燥收缩率比采用快速法测得的要大。由表 1 中 10 组试件统计得到, 用快速法测得的干燥收缩率为慢速法测得的干燥收缩率的 48.0%, 即:

$$\varepsilon_0 = 0.48\varepsilon'_0 \quad (3)$$

在中等环境下按慢速法试验时,10 组蒸压粉煤灰砖试件的平衡相对含水率 δ_{eq} 为 17.34%,即从初始饱和到平衡含水率过程中失水率为 82.66%,但是,在这个阶段砖的干燥收缩率却为饱和到烘干状态的干燥收缩率的 48.3%。这是由于在烘干过程中,蒸压粉煤灰砖失去的水分是分子结合水^[15],这种分子结合水的失去对干燥收缩影响很大,尽管在烘干过程中失水很少,但干燥收缩很大。由表 1,有

$$\varepsilon_{eq,s}^m = 0.483\varepsilon'_0 \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得:

$$\varepsilon_{eq,s}^m \approx \varepsilon_0 \quad (5)$$

从式(5)可以看出:蒸压粉煤灰砖的干燥收缩率相当于中等环境下浸泡饱和砖的使用阶段干燥收缩率。

1.3 上墙含水率不同的蒸压粉煤灰砖在不同环境下的干燥收缩试验

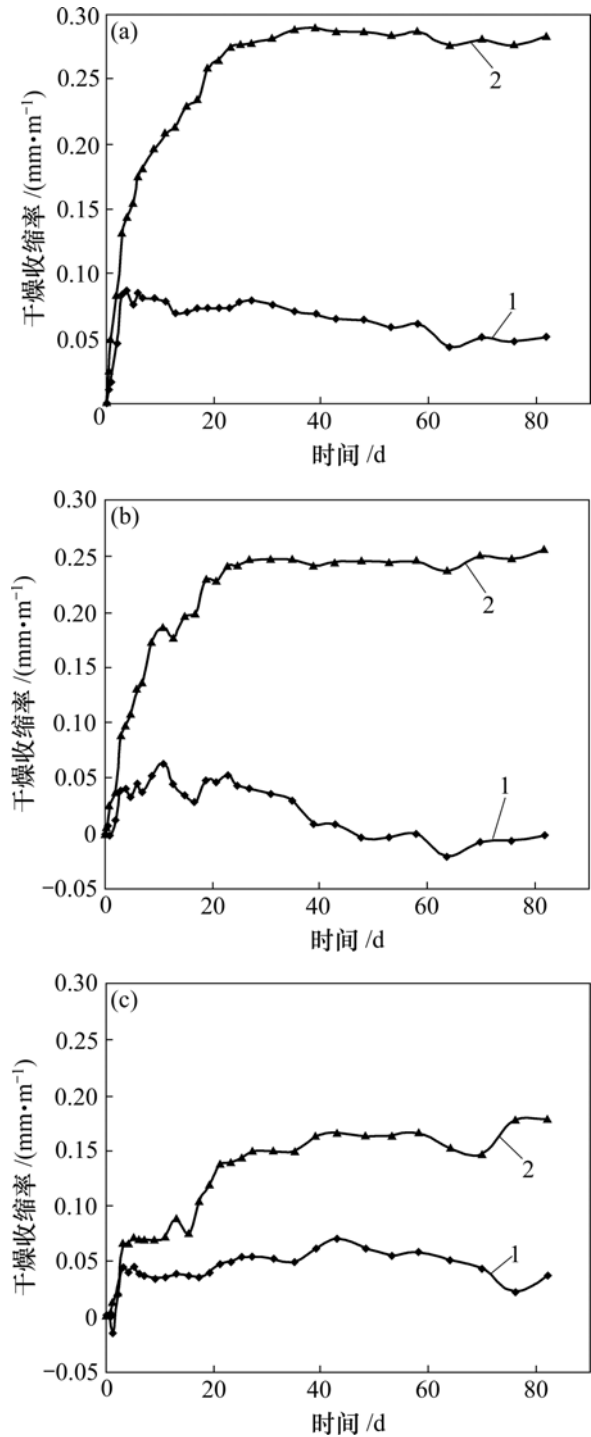
取 30 块同一釜生产的蒸压粉煤灰砖,分为 2 组,每组 15 块:第 1 组为自然状态(不浇水)的蒸压粉煤灰砖,相对含水率为 13.9%;第 2 组蒸压粉煤灰砖在试验前 1 d 按现行施工验收规范的要求进行浇水,相对含水率为 56.0%。在试验前先测量每块砖的质量及初始长度。

将每组砖再分成 3 小组,每小组 5 块,分别置于干燥环境(温度 (20 ± 3) ,湿度 $(45 \pm 5)\%$)、中等环境(温度 (20 ± 3) ,湿度 $(65 \pm 5)\%$)、潮湿环境(温度 (20 ± 3) ,湿度 $(85 \pm 5)\%$)中,砖与砖之间的间距保持约 50 mm,让其自然干燥。参照我国标准《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2003),分别在 1~165 d 测量其质量和长度,最后烘至绝干,测得干重和干燥状态时的长度,测试的结果见图 1 及表 2(注:82 d 以后数据由于冰灾停电,环境无法控制,数据未采用)。

试验结果表明:砖的初始含水率(上墙含水率)越大,其使用阶段的干燥收缩率 ε_{eq} 越大;浇水粉煤灰砖使用阶段的干燥收缩率比不浇水蒸压粉煤灰砖的大;不浇水蒸压粉煤灰砖由于初始(上墙)相对含水率仅为 13.9%,其干燥收缩很小,环境控制及测量误差将使得测试精度降低。

试验结果还表明,环境相对湿度越大,蒸压粉煤灰砖的平衡含水率越大,失水越少,使用阶段的收缩

率 ε_{eq} 越小。浇水粉煤灰砖在中等、干燥环境下的收缩率 ε_{eq} 分别是潮湿环境下的 1.45 和 1.60 倍。而对不浇水蒸压粉煤灰砖,因为上墙含水率很小,干燥收缩很小,这个规律不是十分明显。



(a) 干燥环境; (b) 中等环境; (c) 潮湿环境
1—不浇水蒸压粉煤灰砖; 2—浇水蒸压粉煤灰砖

图 1 蒸压粉煤灰砖在各种环境下干燥收缩

Fig.1 Drying shrinkage of autoclaved fly ash brick in different environments

表 2 蒸压粉煤灰砖使用阶段失水和干燥收缩率 ϵ_{eq}

Table 2 Drying shrinkage and exhalation of autoclaved fly ash brick in service stage

试验环境	不浇水粉煤灰砖		浇水粉煤灰砖	
	失水率/%	$\epsilon_{eq}/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$	失水率/%	$\epsilon_{eq}/(\text{mm}\cdot\text{m}^{-1})$
潮湿环境	0	-0.001	5.7	0.177
中等环境	0.2	0.037	9.5	0.257
干燥环境	1.7	0.051	8.9	0.284

2 蒸压粉煤灰砖在使用阶段影响干燥收缩的因素

2.1 上墙相对含水率

采用上墙含水率影响系数 β_1 来衡量上墙相对含水率 δ 对蒸压粉煤灰砖使用阶段干燥收缩率的影响:

$$\beta_1 = \frac{\epsilon_{eq}^m}{\epsilon_{eq,s}^m} \quad (6)$$

式中, ϵ_{eq}^m 为上墙含水率不同的蒸压粉煤灰砖在中等环境下使用阶段的干燥收缩率; $\epsilon_{eq,s}^m$ 为浸泡饱和的蒸压粉煤灰砖在中等环境下使用阶段的干燥收缩率。

将式(5)代入式(6), 有

$$\beta_1 = \frac{\epsilon_{eq}^m}{\epsilon_0} \quad (7)$$

根据中等环境下饱和的、浇水的和不浇水的蒸压粉煤灰砖的试验数据, 按式(7)进行数据处理后, 回归得到上墙相对含水率影响系数:

$$\beta_1 = 0.3914 \ln \delta - 0.869 \quad (8)$$

其回归相关系数 $R=0.881$ 。为了简化, 取

$$\beta_1 = 0.40 \ln \delta - 0.85 \quad (9)$$

试验结果及由式(9)所得计算结果如图 2 所示。从图 2 可以看出: 随着上墙相对含水率的增加, 蒸压粉煤灰砖在使用阶段的干燥收缩率增加; 砖的上墙相对含水率与使用阶段干燥收缩率不成正比。这是因为当上墙含水率较大时, 收缩主要是表面水或较大毛细孔失水引起的, 曲线较平缓; 而上墙含水率较小时, 收缩主要是较小毛细孔水或分子结合水的失去引起的, 上墙相对含水率对收缩的影响较大, 曲线比较陡。若上墙相对含水率小于 5%, 则蒸压粉煤灰砖会从空气中吸收水分, 产生膨胀, 故其影响系数为负值。

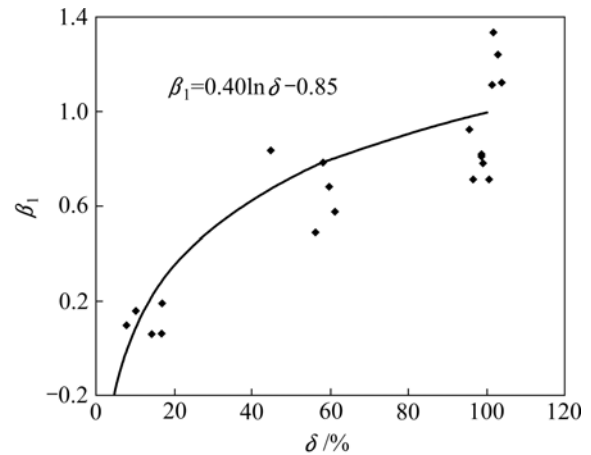


图 2 蒸压粉煤灰砖上墙相对含水率影响系数 β_1 与上墙相对含水率 δ 的关系

Fig.2 Relationship between moisture content factor of autoclaved fly ash brick and moisture content

2.2 环境相对湿度

采用相对湿度影响系数 β_2 来表示环境相对湿度 H_R 对蒸压粉煤灰砖使用阶段干燥收缩率影响:

$$\beta_2 = \frac{\epsilon_{eq}}{\epsilon_{eq}^m} \quad (10)$$

式中: ϵ_{eq} 为上墙相对含水率相同的蒸压粉煤灰砖在不同环境下使用阶段的干燥收缩率。将式(7)代入式(10), 有

$$\beta_2 = \frac{\epsilon_{eq}}{\beta_1 \epsilon_0} \quad (11)$$

采用浇水砖(第 2 组)在干燥、中等和潮湿环境的试验结果, 按式(11)进行计算, 并回归得到相对湿度影响系数表达式:

$$\beta_2 = \sqrt{2.86 - 0.0286 H_R} \quad (12)$$

其回归相关系数 $R=0.999$ 。相对湿度影响系数如图 3 所示。图 3 表明: 墙体所处的环境湿度越小, 平衡含水率越小, 则蒸压粉煤灰砖使用阶段的干燥收缩率越大。

2.3 龄期

蒸压粉煤灰砖的龄期指墙体砌筑以后所持续的时间。在砖的收缩试验中, 从开始测量的那一刻起计算龄期。设某一上墙相对含水率的蒸压粉煤灰砖在某一环境下, 龄期为 t 时的干燥收缩率为 $\epsilon(t)$, 它与该砖使用阶段干燥收缩率 ϵ_{eq} 的比值定义为龄期影响系数 β_3 , 则有:

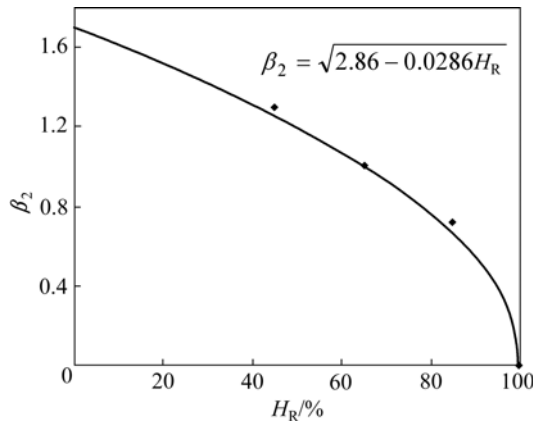


图 3 蒸压粉煤灰砖相对湿度影响系数 β_2 与相对湿度 H_R 的关系

Fig.3 Relationship between relative humidity factor of autoclaved fly ash brick and relative humidity

$$\beta_3 = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_{eq}} \tag{13}$$

将式(11)代入式(13), 得:

$$\beta_3 = \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_0 \beta_1 \beta_2} \tag{14}$$

将上述 16 组慢速法测得的试验结果代入式(14)可以得到每组试件在每一个测点 t 的龄期影响系数 β_3 。参照混凝土的干燥收缩预测公式的双曲线方程形式^[11, 16], 统计试验数据^[17]得到:

$$\beta_3 = \frac{t}{1.021t + 6.182} \tag{15}$$

其回归相关系数为 0.817。近似地, 取

$$\beta_3 = \frac{t}{t + 6} \tag{16}$$

由式(16)计算曲线以及试验结果如图 4 所示。

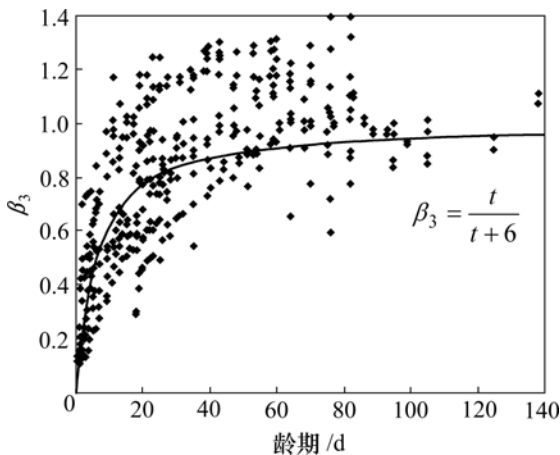


图 4 蒸压粉煤灰砖龄期影响系数 β_3 与龄期的关系

Fig.4 Relationship between age factor of autoclaved fly ash brick and age

3 预估蒸压粉煤灰砖在使用阶段的干燥收缩率数学表达式

砖在使用阶段的干燥收缩变形是导致墙体产生干燥收缩应力进而导致干燥收缩开裂的原因。砖的干燥收缩率 ε_0 是材料的物理指标, 用标准法测得, 它不能代表砖上墙后使用阶段的干燥收缩率。

试验研究结果表明, 蒸压粉煤灰砖在使用阶段的干燥收缩率受到环境相对湿度、上墙相对含水率及龄期等因素的影响, 同时, 又与材料固有的干燥收缩特性即干燥收缩率 ε_0 有关。一般地, 可根据回归分析的方式得出预估蒸压粉煤灰砖的数学表达式。

针对本研究的影响因素, 由回归分析式(14)得到预估蒸压粉煤灰砖使用阶段干燥收缩率计算公式:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \beta_1 \beta_2 \beta_3 \tag{17}$$

式中: $\varepsilon(t)$ 为蒸压粉煤灰砖上墙后 t 时刻干燥收缩率(mm/m); ε_0 为蒸压粉煤灰砖干燥收缩率(mm/m)。上墙含水率影响系数 β_1 按式(9)计算; 相对湿度影响系数 β_2 按式(12)计算; 龄期影响系数 β_3 按式(16)计算。

4 结论

(1) 标准(快速)法得到的蒸压粉煤灰砖的干燥收缩率 ε_0 为慢速试验法的 48%, 与饱和砖在中等环境下至平衡含水率时的干燥收缩率相当。

(2) 蒸压粉煤灰砖在使用阶段的干燥收缩率随着上墙相对含水率的增加而增加。上墙含水率较大时, 由于表面水或较大毛细孔水失去, 当上墙含水率-干燥收缩曲线较平缓; 而当上墙含水率较小时, 由于较小毛细孔水或分子结合水失去, 上墙含水率-干燥收缩曲线比较陡。

(3) 蒸压粉煤灰砖所处的环境湿度越小, 其平衡含水率越小, 使用阶段的干燥收缩率越大; 蒸压粉煤灰砖的龄期越长, 水分挥发越多, 使用阶段干燥收缩越大。

(4) 本研究是将砖六面暴露在环境中自由干燥, 实际情况下, 砖大多只有 1 面或 2 面暴露在环境中, 暴露面积与体积的比值对其水分挥发及砖的干燥收缩的影响还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] TN18. Volume changes—Analysis and effects of movement[R]. Virginia: Brick Industry Association, 2006: 1–3.
- [2] 刘清正. 硅酸盐砖压制成型机理研究[J]. 砖瓦, 1994, 38(3): 20–22.
LIU Qing-zheng. Mechanism-study of silicate-brick pressing forming[J]. Brick-tile, 1994, 38(3): 20–22.
- [3] 马保国, 郝先成, 蹇守卫, 等. 蒸压电石渣粉煤灰砖的制备和性能[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(2): 20–22.
MA Bao-guo, HAO Xian-cheng, JIAN Shou-wei, et al. Properties of raw materials and performances of steam-pressure fly ash brick[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(2): 20–22.
- [4] 张钟陵. 用实验方法确定新型墙体材料砌筑的安全含水率[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2004(3): 21–23.
ZHANG Zhong-ling. Test method of safe constructing moisture content of new building materials[J]. Building Block and Block Building, 2004(3): 21–23.
- [5] ГОСТ 25485 — 1989. Бетоны ячеистые технические условия[S].
GOST 25485—1989. Specifications of cellular concretes[S].
- [6] Raimondo M, Dondi M, Mazzanti F, et al. Equilibrium moisture content of clay bricks: The influence of the porous structure[J]. Building and Environment, 2007, 42(2): 926–932.
- [7] Hughes T G, Harvey R J. Environmental influences on the shrinkage of concrete block masonry[J]. Materials and Structures, 1997, 30(5): 225–232.
- [8] 周瑾, 陈鸣, 金伟良, 等. 混凝土小型空心砌块墙体干缩性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2004, 34(8): 41–43.
ZHOU Jin, CHEN Ming, JIN Wei-liang, et al. Experimental study on drying shrinkage property of small concrete hollow block wall[J]. Industrial Construction, 2004, 34(8): 41–43.
- [9] Forth J P, Brooks J J, Tapsir S H. The effect of unit water absorption on long-term movements of masonry[J]. Cement & Concrete Composites, 2000, 22(4): 273–280.
- [10] 梁建国, 程少辉. 混凝土砖收缩特性试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(11): 17–20.
LIANG Jian-guo, CHENG Shao-hui. Research on shrinkage properties of concrete brick[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, 35(11): 17–20.
- [11] Brooks J J. Composite modeling of masonry deformation[J]. Materials and Structures, 1990, 23(4): 241–251.
- [12] ACI 530-05/ASCE 5-05/TMS 402-05, Building code requirements for masonry structures[S].
- [13] Rajeev G., Ram K, Paul D K. Comparative study of various creep and shrinkage prediction models for concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(3): 249–260.
- [14] GB/T 2542—2003, 砌墙砖试验方法[S].
GB/T 2542—2003, Code for test method of masonry bricks[S].
- [15] 黄国兴, 惠荣炎. 混凝土的收缩[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990: 62–72.
HUANG Guo-xing, HUI Rong-yan. The shrinkage of concrete[M]. Beijing: China Railway Press, 1990: 62–72.
- [16] ACI 209R-92. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures(Reapproved 1997)[R]. Michigan: ACI Committee 209, 1997: 5–8.
- [17] 程少辉. 蒸压粉煤灰砖干燥收缩及砌体收缩复合模型试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学土木建筑学院, 2008: 60–66.
CHENG Shao-hui. Experimental research on shrinkage properties of autoclaved fly ash brick and its masonry composite modeling[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology. School of Civil Engineering and Architecture, 2008: 60–66.

(编辑 赵俊)