

# 恒温湿循环环境下水泥基材料的体积变形

马保国 温小栋 王明远 鄢佳佳 罗忠涛

( 武汉理工大学硅酸盐材料工程教育部重点实验室 湖北 武汉 430070 )

**摘要** :研究了在 20℃、循环湿度变化环境下水泥基材料的体积变形。结果表明 :随着湿度的下降 ,试件水分损失及收缩变形增大 ,当环境湿度上升时 ,毛细孔吸湿膨胀 ,但同一相对湿度下 ,吸湿过程试件的含水量小于干燥过程的含水量 ,且试件吸湿膨胀值小于干燥收缩值 ;从水分损失及收缩速率看 ,随着相对湿度下降而减小 ,而在 65% ~ 35% 区间内其值变化较小 ;而从湿胀曲线看 ,其发展趋势相反 ,开始经历一个平缓期 ,随后出现加速期 ,水分损失及收缩变形随着水灰比的降低逐渐减小 ,不可逆水分及不可逆收缩比重增加 ,但总的水分损失和残余收缩值仍减少。

**关键词** :水泥基材料 ;体积变形 ;水分损失 ;残余收缩变形

中图分类号 :TV502<sup>+</sup> .4

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2007)04-0027-03

**Volume deformation of cement-matrix material under constant temperature and humidity cycle**//MA Bao-guo , WEN Xiao-dong , WANG Ming-yuan , YAN Jia-jia , LUO Zhong-tao( *Key Laboratory of Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education , Wuhan University of Technology , Wuhan 430070 , China* )

**Abstract** : A study was performed to investigate the volume deformation of cement-matrix materials under the condition of relative humidity cyclic at constant temperature of 20℃. Some conclusions were drawn as follows : with the decrease of the relative humidity , the moisture loss and shrinkage deformation of specimens increased , while with the increase of environmental humidity , the specimens swelled ; under the same relative humidity , the moisture content of the specimens during the moisture adsorption process was less than that during the drying process , and the swelling volume of the specimens induced by moisture adsorption was less than the volume of drying shrinkage ; the moisture loss and shrinkage rate of specimens decreased with the decrease of relative humidity , and the variation was relatively small for the range of relative humidity 65%-35% ; according to the swell curve during moisture adsorption process , the swelling of the specimens experienced a relatively steady stage at first , and then it entered an acceleration stage ; with the decrease of the water cement ratio , the moisture loss and shrinkage deformation gradually decreased , but the ratios of irreversible moisture content and irreversible shrinkage increased , and the total volume of moisture loss and residual shrinkage strain still decreased.

**Key words** : cement matrix material ; volume deformation ; moisture loss ; residual shrinkage strain

混凝土破坏过程是其内部原有的微裂纹在外界因素作用下 ,不断扩展、并集、聚合 ,形成宏观裂纹的过程。而混凝土各种微裂纹形成和贯通 ,又为  $\text{Cl}^-$  ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ,  $\text{Mg}^{2+}$  ,  $\text{H}_2\text{O}$  等有害介质入侵提供了快速通道 ,这严重影响到混凝土结构的耐久性和使用寿命<sup>[1]</sup>。混凝土内部微裂缝的形成除少数由荷载作用产生外 ,绝大多数是因约束条件下的体积变形引起的<sup>[2]</sup>。

目前 ,国内外关于水泥混凝土体积变形的研究绝大多数局限于恒定的温度、湿度环境下单因素研究 ,很少考虑不同环境因素下混凝土体积变形<sup>[3-6]</sup> ,因此对恒温、变湿环境下水泥基材料的体积变形规律的研究 ,对于正确预测混凝土的体积变形及其引

起的危害具有重要的理论及实际意义。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 原材料及配合比

a. 水泥。亚东 42.5 普通硅酸盐水泥 ,比表面积为  $350 \text{ m}^2/\text{kg}$  ,密度  $3.1 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

b. 砂。武汉巴河中砂 ,细度模数为 2.8 ,含泥量小于 1.5%。

c. 高效减水剂。采用花王高效减水剂 ,萘系。制作了 3 组配合比的砂浆 ,水灰比(  $w/c$  )分别为 0.5 0.4 0.3 ,所有砂浆的胶砂比固定为 1:2.5 ,通过掺入减水剂控制砂浆流动度在 125 ~ 135 mm 范围内。

1.2 试验方案

1.2.1 试件制备

为了减小水泥基材料内部层间约束的影响,并使砂浆试件在较短时间内达到与环境湿度相平衡,采用尺寸为 25 mm × 8 mm × 280 mm 的薄片状砂浆试件,在砂浆浇注成型过程中,沿试件长轴方向在两端预埋两个测头。砂浆成型后 1 d 拆模,恒温水养 28 d 来减小其自收缩的影响。

1.2.2 试验方法

将水养 28 d 的试件放入温度为 20℃ 的水中浸泡 7 d,使其达到试验的温度,再取出后采用棉布擦去表面吸附的水分,快速测量其初始长度  $L_0$ 、初始质量  $M_0$ ,之后将试件放入多功能环境模拟室内,按图 1 方法调节环境模拟室内温、湿度。试件在每一相对湿度下持续保持 7 d 后测量其长度  $L_i$ 、质量  $M_i$  (由于试件较薄,固定环境条件下放置 7 d 后其质量基本不变,认为与环境湿度达到平衡状态)。

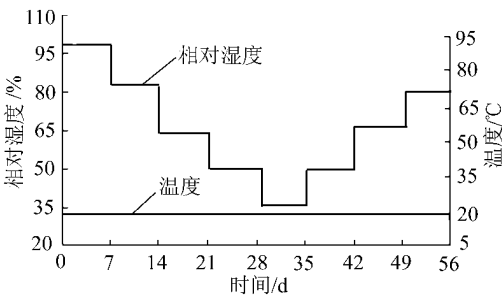


图 1 环境模拟系统温、湿度控制

试件在每一相对湿度下的干燥收缩值  $\epsilon_i$  按公式(1)计算：

$$\epsilon_i = \frac{L_0 - L_i}{L_0 - 2c} \tag{1}$$

式中： $\epsilon_i$  为试件各阶段干燥收缩值； $L_0$  为试件初始长度，mm； $L_i$  为试件各阶段长度，mm； $c$  为埋入砂浆内的测头长度，mm。

试件在每一相对湿度下的水分损失  $\zeta_i$  为

$$\zeta_i = M_0 - M_i \tag{2}$$

式中： $M_0$  为试件初始质量，g； $M_i$  为试件各阶段质量，g。

1.3 试验设备

砂浆长度测量采用 JC476 型砂浆比长测试仪，精度为 0.001 mm。温、湿度调控采用多功能环境模拟系统，由武汉理工大学设计，型号 DGNHJ-20，其中温、湿度精度分别为 ±0.1℃ 和 ±1%。

2 试验结果与分析

2.1 水分损失

从图 2 可看出，在恒温变湿环境下，试件水分损

失存在相同的趋势，即随着湿度的下降，水分损失增大，且在相对湿度 35% 处其值最大。当外界环境湿度上升时，试件开始吸湿，水分损失减小。这是由于，当环境相对湿度低于其平衡相对湿度时，孔隙水就蒸发；反之，当环境相对湿度高于其平衡相对湿度时则引起凝结。

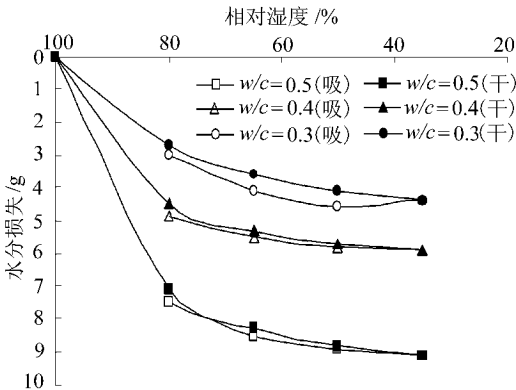


图 2 水分损失与湿度的关系

在相对湿度 100% ~ 80% 的区间内，水泥基材料的水分损失速率最大，在 80% ~ 65% 区间内，水分损失速率成下降趋势，而在 65% ~ 35% 区间内其值变化较小，趋于平缓，而对于吸湿过程则是，随着湿度的增大，其不可逆水分逐渐增大，但水灰比 0.3 试样出现反常，这是由于水灰比较小时，水泥石致密，干燥和吸湿过程未达到平衡（特别在低湿阶段）所引起的。

随着水灰比的增大，试件在不同相对湿度下的水分损失及水分损失速率逐渐增大，稳定点后移，但不可逆水分略有减小，分析其原因，是由于水灰比增大，水化程度提高，以至胶凝体的这种在干燥期间失去吸附水后发生新的化学结合的作用就减小<sup>[7]</sup>，导致不可逆水分减小。

2.2 收缩变形

图 3 为收缩变形与湿度的关系曲线，试件在恒温变湿环境下，收缩变形趋势大致一致。随着湿度的下降，收缩变形增大，且在相对湿度 35% 时其变形值最大；当外界环境湿度上升时，毛细孔吸湿膨

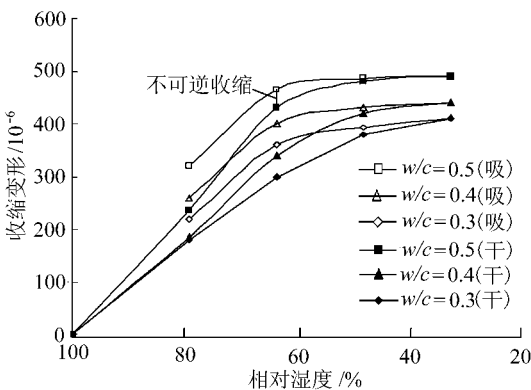


图 3 收缩变形与湿度的关系

胀。但同一相对湿度下,由于存在不可逆收缩,使得试件吸湿膨胀值小于干燥收缩值。毛细管张力学说认为:在温度恒定条件下,当环境相对湿度低于其平衡相对湿度时,毛细管内部液面下降,弯液面的曲率增大,从而导致表面张力增大,这种表面张力作用于孔壁,使水泥石产生体积收缩;反之,当环境相对湿度高于其平衡相对湿度时则引起凝结,毛细管液面的弯曲面上升,曲率减小,相应的表面张力减小,从而减小水泥石体积收缩,甚至引起肿胀<sup>[8]</sup>。

从收缩速率看,在相对湿度 100%~80% 的区间内,其速率最大,在 80%~65% 区间内,速率成下降趋势,而在 65%~35% 区间内其值变化较小(几乎保持不变),而从湿胀曲线看,其发展趋势相反,开始经历一个平缓期,随后加剧。

试件在不同相对湿度下的收缩及收缩速率随着水灰比的降低而减小。这是因为水灰比越小,水泥石中孔径分布更为细化,并降低总孔隙率,因此水灰比越小,收缩变形速率也越小,整个干燥过程中收缩值也越小。水灰比越小,其不可逆水分占总失水的比例增大,导致不可逆收缩比例增加,但残余收缩值仍减少。

### 2.3 水分损失与收缩变形的关系

在恒温变湿环境下,各试件水分损失与收缩变形的发展趋势大致相同。由图 4 可知:在干燥过程中,随着水分损失增大,水泥基材料收缩变形增大,且收缩变形速率逐渐增大;而在吸湿过程,环境湿度大于试件湿度,使得试件水分损失减轻,且收缩变形随着水分损失降低而减缓,但其发展趋势与干燥过程一致,即膨胀变形速率逐渐增大。

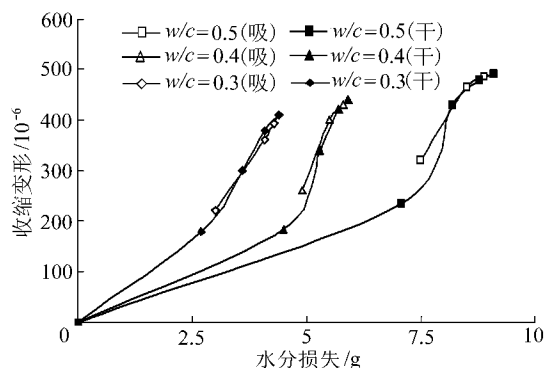


图 4 变形与水分损失的关系

随着水灰比的减小,收缩变形速率增大(即相同水分损失所带来的收缩变形增大),而对于吸湿过程,其发展趋势也相同。

由拉普拉斯公式推导出:毛细管张力与弯曲面曲率半径(由于水对水泥石能够完全浸润,所以以下讨论以毛细孔径代替<sup>[9]</sup>)呈反比关系

$$P_c = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (3)$$

式中: $P_c$  为毛细管张力,MPa; $\sigma$  为水的表面张力,N/cm; $r_1, r_2$  为弯曲面曲率半径,cm。

毛细孔越大,毛细管张力越小,引起的收缩变形值越小,因此水分损失与变形不成正比,相同水分损失,大孔产生的收缩值小于小孔产生的收缩值,这与前面的试验结果一致。

### 3 结 论

a. 随着湿度的下降,试件水分损失及收缩变形增大,当外界环境湿度上升时,毛细孔吸湿膨胀。但同一相对湿度下,吸湿过程试件的含水量小于干燥过程含水量,且试件吸湿膨胀值小于干燥收缩值。

b. 从水分损失及收缩速率看,在相对湿度 100%~85% 的区间内,其速率最大,在 85%~65% 区间内,速率成下降趋势,而在 65%~35% 区间内其值变化较小(几乎保持不变),而从湿胀曲线看,其发展趋势相反,开始经历一个平缓期,随后加剧。

c. 随着水灰比的降低,试件在不同相对湿度下的水分损失及收缩变形逐渐减小,不可逆水分及不可逆收缩增加,但总的水分损失和残余收缩值仍减少。

d. 随着水灰比减小,相同水分损失所带来的收缩变形越大,而对于吸湿过程,其发展趋势也相同。

### 参考文献:

- [1] MEHTA P K, BURROWS R W. Building durable structures in the 21st century[J]. Concrete International, 2001(3): 57-63.
- [2] JENSEN A D, CHATTERJI S. State of the art report on micro-cracking and lifetime of concrete: part I[J]. Materials and Structure, 1996, 29(1): 3-8.
- [3] PERSSON B. Experimental studies on shrinkage of high performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(7): 1023-1036.
- [4] ZHANG M H, TAM C T, LEOW M P. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(10): 1687-1694.
- [5] KIM J K, LEE C S. Prediction of differential drying shrinkage in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(7): 985-994.
- [6] 高小建, 巴恒静. 约束状态下板式混凝土早期开裂模式及收缩应变的分布[J]. 硅酸盐学报, 2004(3): 335-340.
- [7] 黄国兴, 惠荣炎. 混凝土收缩[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1990.
- [8] 岩崎训明. 混凝土特性[M]. 尹家辛, 李景星, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980.
- [9] 严吴南. 试论混凝土的干燥干缩与开裂[J]. 混凝土, 1995(2): 7-9.

(收稿日期 2006-09-02 编辑 熊水斌)