

# 新拌砂浆动态失水模型的建立

张永娟<sup>1,2</sup>, 顾彩勇<sup>1,2</sup>, 张 雄<sup>1,2</sup>, 蒋昭瑜<sup>3</sup>

(1. 同济大学 建筑材料研究所, 上海 201804; 2. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

3. 上海市建设工程质量检测中心黄浦区分中心, 上海 200000)

**摘要:** 以毛细管力学理论及流体力学理论为基础建立砂浆动态失水数学模型, 并用砂浆动态失水试验进行验证。研究了该模型与砂浆保水性的关联性, 以模型为基础, 探讨砂浆保水性的影响因素。结果表明: 砂浆失水的前期阶段及后期阶段可分别用毛细管渐进式收缩模型及毛细管整体收缩模型模拟; 毛细管渐进式收缩模型中砂浆失水量平方和失水时间的比值与砂浆的保水率呈线性反比关系, 而毛细管整体收缩模型不能表征砂浆保水性; 根据毛细管渐进式收缩模型, 从理论上获得水的性质、胶凝材料的物料特性及灰砂比等对砂浆保水性的影响规律。

**关键词:** 新拌砂浆; 保水性; 失水数学模型

**中图分类号:** TQ177.6

**文献标志码:** A

## Establishment of Mathematical Model for Fresh Mortar Dynamic Dewatering Process

ZHANG Yongjuan<sup>1,2</sup>, GU Caiyong<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiong<sup>1,2</sup>, JIANG Zhaoyu<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Building Materials, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Shanghai Quality Test of Construction Engineering Center Huangpu Distinction Center, Shanghai 200000, China)

**Abstract:** Mathematical model of mortar dynamic dewatering process was established based on theory of capillary mechanics and fluid mechanics, and it was verified through dynamic dewatering experiments. The relationship between model and water retention was further studied. Influence factors on water retention were discussed based on the model. The results indicate that the early stage and the later stage of mortar dewatering can be simulated by Capillary Gradual Contraction Model (CGC) and Capillary Integral Contraction Model (CIC) respectively. An inverse linear relationship was found in CGC instead of CIC between the rate of square of dewatering quantity and dewatering time and water retention

rate. In addition, the influencing rule on water retention of fresh mortar of water, binder and cement-sand ratio was obtained in theory according to CGC.

**Key words:** fresh mortar; water retention; dewatering mathematical model

砂浆是我国最常用的建筑材料之一, 一般被用作砌筑、抹面及防水层等。在应用过程中, 新拌砂浆保水性对其和易性<sup>[1]</sup>以及硬化后与基底的黏结强度影响很大<sup>[2]</sup>。

目前市场上提高砂浆保水性的途径是增加保水增稠剂如纤维素醚<sup>[3]</sup>、稠化粉<sup>[4]</sup>等。稠化粉的发明, 原本是为了取代昂贵的化学外加剂降低砂浆成本, 然而稠化粉一方面提高砂浆的保水性, 但另一方面也大大降低了砂浆的强度<sup>[4-5]</sup>。此时通过多掺水泥来弥补强度损失, 但又增加了砂浆成本, 这一矛盾是目前砂浆保水增稠剂普遍存在的问题。本文的研究目的是找到砂浆保水性的影响因素, 从而为减少保水增稠剂的用量及其对强度的负面影响探索一条新的途径。

JG/T 230—2007《预拌砂浆》附录 A 保水性试验方法, 只能通过给出砂浆在 2 min 内的失水量来计算保水率, 且无理论依据将这一指标与砂浆各组分物料特性联系起来。若以保水率为指标, 由于一些因素的不可量化性、未知性及因素之间关系的模糊性, 使得用试验的方法探讨保水性影响因素非常困难。Carter 等<sup>[6]</sup>和 Hendrickx 等<sup>[7]</sup>用土壤学的相关知识研究了新拌砂浆被动式(在一定外界压头下)的失水过程且有理论依据支持, 能够将砂浆失水性能与物料特性联系起来, 但与砂浆实际应用状态不符。为保证砂浆失水过程与实际应用状态相符, 本文用砂浆主动式(自身毛细管压头)失水过程来探讨砂浆失水规律及保水性的影响因素。

## 1 试验

### 1.1 原材料

水泥:小野田水泥有限公司生产的 PII52.5 水泥,密度  $3\,120\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,比表面积  $364\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ,标准稠度需水量 0.27,用字母 C 表示。

矿粉:宝田新型建材有限公司生产的 S95 矿粉,密度  $2\,830\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,比表面积  $398\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ,标准稠度需水量 0.27,用字母 S 表示。

粉煤灰:一种是石洞口电厂产的高钙粉煤灰,密

度  $2\,390\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,比表面积  $490\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ,标准稠度需水量 0.25,用字母 HF 表示;另一种是富春建业有限公司提供的二级粉煤灰,密度  $2\,220\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,比表面积  $460\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ,标准稠度需水量 0.29,用字母 F 表示。

水泥、粉煤灰、矿粉化学组成见表 1。

甲基纤维素醚:黏度为  $15\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ,用字母 MC 表示。

砂:级配良好的中砂,并符合 JGJ 525《普通混凝土用砂质量标准及检验方法》的规定,砂的最大粒径不超过 5 mm。

表 1 不同粉体材料化学组成

Tab.1 Chemical composition of different powder materials									%
粉体	$w_{\text{CaO}}$	$w_{\text{SiO}_2}$	$w_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$w_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$	$w_{\text{MgO}}$	$w_{\text{SO}_3}$	$w_{\text{TiO}_2}$	$w_{\text{K}_2\text{O}}$	LOI
C	61.30	20.8	6.34	3.07	1.03	2.29	0.29	0.85	—
S	15.00	56.2	17.80	4.10	1.30	0.40	—	2.00	—
HF	47.00	27.4	12.80	5.50	2.50	6.20	—	—	2.40
F	5.49	50.9	29.80	7.08	1.67	0.91	—	—	4.76

注:LOI 表示烧失量; $w_{\text{CaO}}$ , $w_{\text{SiO}_2}$ , $w_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ , $w_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$ , $w_{\text{MgO}}$ , $w_{\text{SO}_3}$ , $w_{\text{TiO}_2}$ , $w_{\text{K}_2\text{O}}$ 分别为各组分质量分数。

### 1.2 试验方法

#### (1) 动态失水试验

动态失水试验在 JG/T 230—2007《预拌砂浆》附录 A 保水性试验方法的基础上做了部分修改,将该方法中滤纸张数改为 15 张(高于标准中的 8 张,因为吸水时间高于标准中的 2 min)。具体试验过程为:将 2 kg 重物放在盖板上计时开始,然后每隔一段时间取出滤纸(此过程停止计时),迅速称其质量并放回继续计时。所得不同时刻的滤纸吸水质量即为砂浆动态失水质量。

#### (2) 砂浆保水性试验

砂浆保水性试验参照 JG/T 230—2007《预拌砂浆》附录 A 保水性试验方法。

#### (3) 砂浆稠度试验

砂浆稠度试验参照 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行。

### 1.3 配合比设计

动态保水性试验各组分掺量如表 2 所示。其中试样编号 X-a 中 X 指胶凝材料的编号,a 表示砂浆试样编号。

表 2 砂浆动态保水性试验各组分掺量

Tab.2 Component dosages of sample mortar dynamic water retention test										
组分	HF-1	HF-2	HF-3	HF-4	C-1	C-2	S-1	S-2	F-1	F-2
灰量/g	150	150	150	150	350	450	350	450	350	450
砂/g	600	600	600	600	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200	1 200
水/g	80	85	85	85	225 *	228 *	228 *	231 *	213 *	230 *
MC/%	0	0	0.1	0.2	0	0	0	0	0	0

注:\*表示砂浆稠度为  $(80\pm 5)\text{ mm}$  的加水量。

## 2 砂浆动态失水模型的建立

砂浆中砂作为支承骨架,净浆填充于其空隙中,使得空隙连通,因此净浆体处于连通状态,粉体颗粒间形成的毛细管道也都相互连通。基于砂浆在工程应用时所处的实际环境,砂浆失水过程如下:首先表层浆体中的水被基底(试验中基底为滤纸)吸收,然后靠近表层的内层浆体中水分沿着毛细管道在毛细

管压头的作用下输送至表层被基底吸收,表层水被吸收后再由内部输送,如此循环反复。显然,基底的吸水速率比后者砂浆内部输送水的速率大得多,所以砂浆在使用过程中的失水速率主要取决于后者。

### 2.1 砂浆失水模型的初步建立

砂浆中毛细管道是由粉体颗粒之间的空隙形成的,在水的拨开作用下毛细半径要大于粉体紧密堆积状态时的毛细半径,所以随着砂浆开始失水,毛细半径便产生收缩,如图 1 所示,这一收缩模型以下称

为毛细管整体收缩模型。

为方便用数学语言描述该模型作如下假设:①颗粒间隙为一条圆柱形的毛细管道,如图 1 所示;②毛细管的收缩视为横向整体收缩,纵向收缩忽略不计(试验对象为饼状物,净浆体横向收缩远大于纵向收缩尺寸);③表层浆体失水后,水在毛细压头下自内向外输送,忽略水的重力影响(毛细管半径足够细,毛细上升力远大于重力);④假定毛细管收缩体积为浆体失水体积。

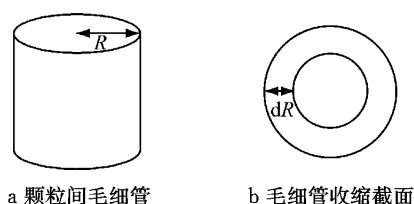


图 1 毛细管整体收缩模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of CIC Model

### 2.1.1 毛细管整体收缩模型砂浆失水动态方程的建立

设  $t$  时刻毛细管半径为  $R$ ,  $dt$  时间内毛细半径收缩了  $dR$ (见图 1b), 毛细管长度为  $l$ , 砂浆的失水速率为  $v$ 。

由假设①和③可知, 砂浆中水的移动可以看作毛细压头下水在圆柱形毛细管道中流动, Poiseuille 公式<sup>[8]</sup>给出的流体在管道中流动的速率与管道长度、半径、两端压力差及液体黏度间关系如下所示:

$$\frac{dl}{dt} = -\frac{\rho g R^2}{8\eta} - \frac{2\gamma R \cos \theta}{8\eta l} \quad (1)$$

式中:  $\rho, \eta, \gamma$  分别为水的密度、黏度和表面张力;  $\theta$  为粉体与水的接触角。由假设③忽略重力影响得

$$\frac{dl}{dt} = -\frac{2\gamma R \cos \theta}{8\eta l} \quad (2)$$

故砂浆的失水速率

$$v = \frac{dl}{dt} \pi R^2 \rho = -\frac{\pi \gamma \rho \cos \theta}{4\eta l} R^3 = k_0 R^3 \quad (3)$$

式中:  $k_0 = -\pi \gamma \rho \cos \theta / (4\eta l)$ 。由假设④可知, 毛细管收缩的体积等于砂浆失去水的体积, 可得

$$2\pi R dR l \rho = v dt = -\frac{\pi \gamma \rho \cos \theta}{4\eta l} R^3 dt$$

$$-\frac{1}{R^2} dR = \frac{\gamma \cos \theta}{8\eta l^2} dt$$

当  $t=0$  和  $R=R_0$  ( $R_0$  为初始毛细管半径) 时, 两边积分得

$$\int_{R_0}^R -\frac{1}{R^2} dR = \frac{\gamma \cos \theta}{8\eta l^2} \int_0^t dt$$

$$\frac{1}{R} = kt + \frac{1}{R_0}$$

式中:  $k = \gamma \cos \theta / (8\eta l^2)$ 。将此关系式代入式(3), 整理得

$$\left(\frac{1}{v}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{1}{k_0}\right)^{\frac{1}{3}} \left(kt + \frac{1}{R_0}\right) \quad (4)$$

式(4)可以得到  $(1/v)^{\frac{1}{3}}$  与  $t$  成线性关系。

### 2.1.2 模型检验

为验证毛细管整体收缩模型, 用高钙粉煤灰作为胶凝材料配制的砂浆试样进行砂浆动态失水试验, 滤纸每隔 30 s 称取一次质量, 历时 10 min。

图 2 和 3 所示为用毛细管整体收缩模型(见式(4))对试样前 5 分钟动态失水试验结果进行拟合的曲线。由图 2 可知, HF-1 和 HF-2(不掺 MC)试样曲线线性度都非常好, 说明毛细管整体收缩模型较好地模拟了未掺 MC 的砂浆失水过程。由图 3 可知, HF-3 和 HF-4(掺有 MC)试样曲线相关系数较低, 散点在 1~3 min 有一凸出带, 且随着 MC 掺量加大, 这一凸出带越明显, 线性度也越差, 说明毛细管整体收缩模型不能模拟掺 MC 的砂浆失水过程。

图 2 和 3 所表现出的差异是因为两种试样代表的失水阶段不同。砂浆中掺 MC 使得水的黏度增加, 由式(1)可知, 水黏度增加会降低水在毛细管道中的传输速率, 因此掺 MC 的砂浆失水速率较未掺 MC 大大降低。因为动态失水试验中称取质量间隔为 30 s, 所以未掺 MC 的砂浆前期失水过程由于失水速率过快, 在曲线(试样 HF-1 及 HF-2)中并未表现出来, 而掺有 MC 的砂浆由于失水较慢, 从而放大了前期失水这一过程。

综上所述, 毛细管整体收缩模型对试样 HF-3 及 HF-4 试验结果不适用, 说明该模型不能模拟砂浆失水过程的前期阶段, 但能够模拟砂浆失水过程的后期阶段。

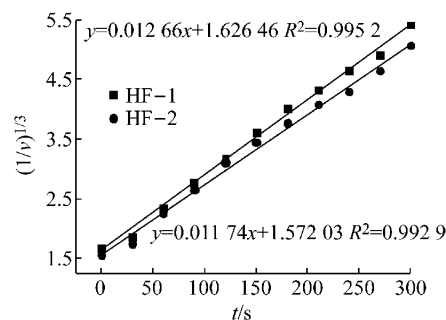


图 2 HF-1 和 HF-2 试样毛细管整体收缩模型拟合曲线  
Fig.2 Fitting curves of CIC Model (Sample HF-1 and HF-2)

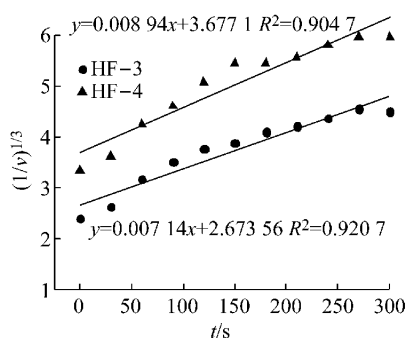


图3 HF-3和HF-4试样毛细管整体收缩模型拟合曲线  
Fig.3 Fitting curves of CIC Model (Sample HF-3 and HF-4)

## 2.2 砂浆失水模型的修正

对毛细管整体收缩模型的验证可知,毛细管整体收缩模型不能模拟砂浆的前期失水过程,因此该模型并不具备普适性。

图4所示为经过长达10 min的动态保水性试验后的砂浆试饼。从图4可以发现,试饼上下层含水率明显不同。由此可见,砂浆中毛细管并非随水量流失呈整体收缩,而是自表层向内层渐进式收缩,以下简称该模型为毛细管渐进式收缩模型。为简化该模型,在上述模型假设基础上增加假设⑤,即砂浆不同层面之间毛细管收缩无相互影响。

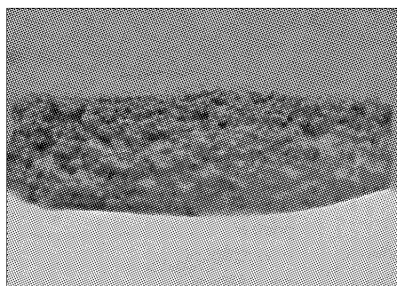


图4 经10 min失水后砂浆试饼图  
Fig.4 Schematic diagram of slurry pie dewatering for 10 min

### 2.2.1 毛细管渐进式收缩砂浆失水动态方程的建立

由于毛细管是自表层向内层逐渐收缩的,即考虑了收缩段长度的变化(设为 $dl$ ),如图5所示。设 $R$ 为 $t$ 时刻毛细管半径, $R_0$ 为初始毛细管半径, $R_{\min}$ 为砂浆失水后收缩至最小毛细管半径, $Q$ 为砂浆在 $t$ 时刻失水量,水在毛细管中的流动速率仍符合式(3),此时的砂浆失水速率

$$v = \frac{dl}{dt} \pi R_{\min}^2 \rho = -\frac{\pi \gamma \rho \cos \theta}{4\eta l} R_{\min}^3 \quad (5)$$

由假设④知,毛细管收缩体积即为砂浆失水体

积,由此得到

$$2\pi R dR dl \rho = v dt = -\frac{\pi \gamma \rho \cos \theta}{4\eta l} R_{\min}^3 dt$$

$$R dR dl = -\frac{R_{\min}^3 \gamma \cos \theta}{8\eta} dt$$

两边积分得

$$\int_{R_{\min}}^{R_0} R dR \int_0^l dl = \frac{R_{\min}^3 \gamma \cos \theta}{8\eta} \int_0^t dt$$

$$l^2 = \frac{R_{\min}^3 \gamma \cos \theta}{2\eta (R_0^2 - R_{\min}^2)} t \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得

$$\left(\frac{1}{v}\right)^2 = k' t$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{k' t}}$$

式中: $k' = 8\eta / [\pi^2 \gamma \rho^2 \cos \theta R_{\min}^3 (R_0^2 - R_{\min}^2)]$ 。两边同乘以 $dt$ 得

$$v dt = \frac{1}{\sqrt{k' t}} dt$$

两边积分得

$$Q = \int_0^t v dt = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{k' t}} dt = \left(\frac{t}{k'}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$Q^2/t = \frac{1}{k'} = \frac{\pi^2 \gamma \rho^2 \cos \theta R_{\min}^3 (R_0^2 - R_{\min}^2)}{8\eta} \quad (7)$$

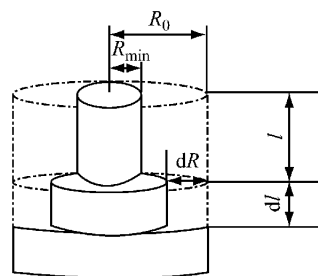


图5 毛细管渐进式收缩模型示意图  
Fig.5 Schematic diagram of capillary gradual contraction model

### 2.2.2 模型检验

图6和7所示为用毛细管渐进式收缩模型(见式(7))对试样的动态失水前5分钟试验结果进行拟合的曲线。从图6可以看出,试样HF-1和HF-2曲线相关系数较差,曲线有明显的凸出带,说明毛细管渐进式收缩模型不能模拟未掺MC的砂浆失水过程。从图7可知,试样HF-3和HF-4曲线线性度非常好,这说明用毛细管渐进式收缩模型能较好地模拟掺有MC的砂浆失水过程。

图6和7的差异原因与图2和3的差异原因是一致的,这说明毛细管渐进式模型不能模拟砂浆失

水过程的后期阶段但能够模拟砂浆失水的前期阶段。

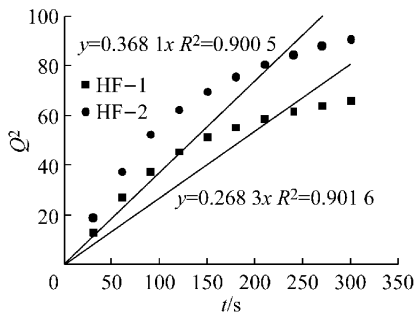


图6 HF-1和HF-2毛细管渐进式收缩模型拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of capillary gradual contraction model (Sample HF-1 and HF-2)

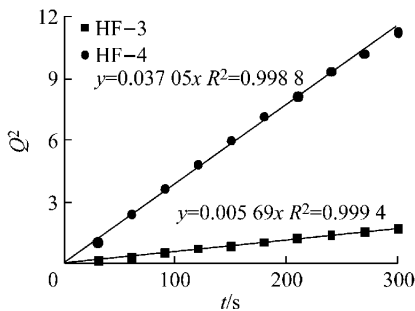


图7 HF-3和HF-4毛细管渐进式收缩模型拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of capillary integral contraction model (Sample HF-3 and HF-4)

### 3 两种模型对比分析

#### 3.1 两种模型适用阶段分析与验证

上文利用掺和不掺MC来模拟砂浆不同失水阶段,并以此为试验对象验证了两种不同失水模型且确定了它们不同的适用阶段.为进一步验证模型的适用阶段,需用两种不同模型分别对同一砂浆试样不同时间段的失水过程进行拟合验证.

对试样C-1, C-2, S-1, S-2, F-1及F-2分别进行砂浆动态保水性试验.在不掺MC的条件下,前1分钟试样HF-1及HF-2曲线均呈较好的线性关系(见图6),因此本批试样统一在前1分钟内每隔10s记一次滤纸质量,2~5min内每隔30s记1次,5~10min内每隔1min记1次.

图8~11所示分别为两种模型对试样动态失水试验结果进行拟合的曲线,其中前1分钟用毛细管渐进式收缩模型拟合,3~8min用毛细管整体收缩模型进行拟合(此处不包含1~3min时间段是为了凸显两种不同的失水阶段).从图8~11可知,所有

拟合直线(不同粉体不同灰砂比)的线性度均很高,说明毛细管渐进式收缩模型能够模拟砂浆失水过程前期阶段,毛细管整体收缩模型能够模拟砂浆失水过程后期阶段.

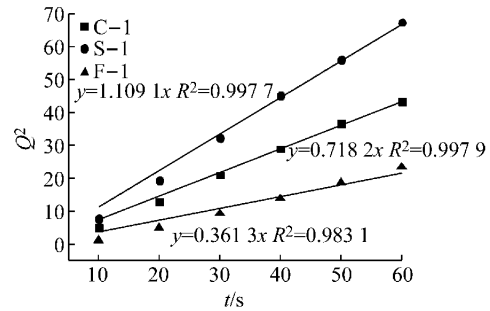


图8 不同粉体毛细管渐进式收缩模型拟合曲线(灰砂比0.33)

Fig. 8 Fitting curve of CGC Model for the mortar with different binders (B and S ratio 0.33)

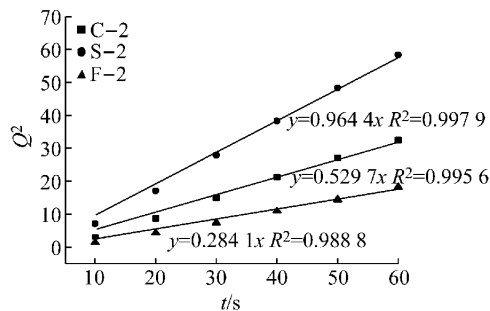


图9 不同粉体毛细管渐进式收缩模型拟合曲线(灰砂比0.38)

Fig. 9 Fitting curve of CGC Model for the mortar with different binders (B and S ratio 0.38)

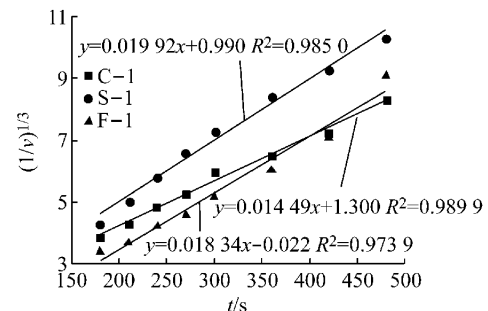


图10 不同粉体毛细管整体收缩模型拟合曲线(灰砂比0.33)

Fig. 10 Fitting curve of CIC Model for the mortar with different binders (B and S ratio 0.33)

#### 3.2 两种模型与保水性的关联性

图12和13所示为六种砂浆试样(C-1, C-2, S-1, S-2, F-1及F-2)在不同时间段失水量柱状图及保水率折线图,图14所示为六种砂浆试样用毛细管渐

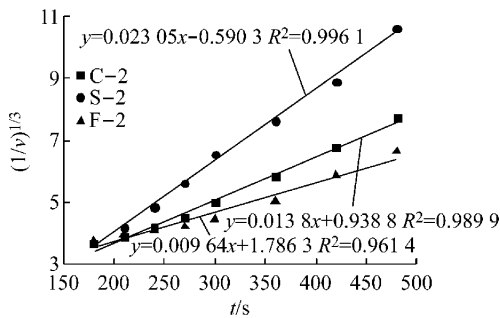


图 11 不同粉体毛细管整体收缩模型拟合曲线  
(灰砂比 0.38)

Fig. 11 Fitting curve of CIC Model for the mortar with different binders (B and S ratio 0.38)

进式收缩模型拟合的曲线斜率  $Q^2/t$  与其保水率 (JG/T 230—2007《预拌砂浆》附录 A 保水性试验方法测得结果) 的关系图。

从图 12 和 13 可以发现,砂浆在前 1 分钟的失水量占总失水量的比例远高于在 3~8 min 的失水比例,且几乎占据总失水量的一半。同时在六种砂浆试样中,砂浆在前 1 分钟内的失水量与砂浆保水率呈现较好的反比关系,即前 1 分钟砂浆失水量越大,

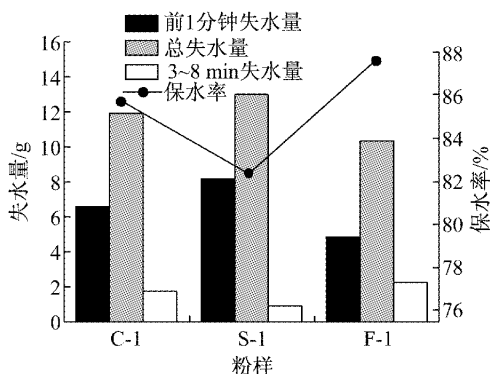


图 12 不同时间段砂浆失水量及保水率(灰砂比 0.33)

Fig. 12 Water loss at different time periods and water-retention rates (B and S ratio 0.33)

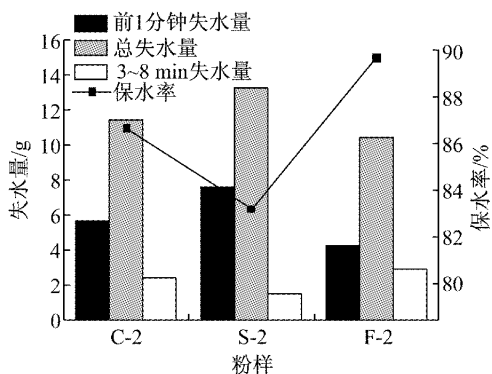


图 13 不同时间段砂浆失水量及保水率(灰砂比 0.38)

Fig. 13 Water loss at different time periods and water-retention rates (B and S ratio 0.38)

则试样保水率越小,反之则越大。而砂浆在 3 min 后的失水量与砂浆保水率成正比关系,且无依据证明此关系的合理性。从图 14 可以看出,  $Q^2/t$  与砂浆保水率成较好的线性反比关系,相关系数达 0.956 8。基于以上分析,砂浆的保水性主要取决于砂浆前期失水阶段的各项性能,且毛细管渐进式收缩模型能够表征砂浆的保水性。

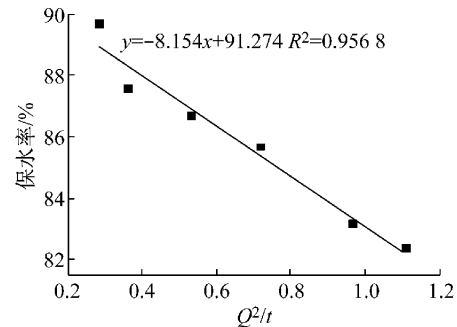


图 14  $Q^2/t$  与保水率的关系曲线

Fig. 14 Curve of relationship between  $Q^2/t$  and water-retention ratio

#### 4 基于毛细管渐进式收缩模型砂浆保水性因素分析

由上文可知,毛细管渐进式收缩模型能够表征砂浆的保水性,因此通过对  $Q^2/t$  的表达式(见式(7))分析,可以得到砂浆各组分物料特性对砂浆保水性的影响规律。

液体黏度  $\eta$ 、表面张力  $\gamma$  及密度  $\rho$  是砂浆中水的性质,其中砂浆用水为自来水,所以密度  $\rho$  的变化忽略不计,表面张力  $\gamma$  越小,黏度  $\eta$  越大,砂浆失水性能越差,保水性就越好。它们可通过化学添加剂来调节,其中影响最大且最易调节的还是砂浆黏度  $\eta$ 。目前常用保水增稠外加剂(如 MC、稠化粉)来提高黏度  $\eta$ ,能够大大改善砂浆的保水性。

初始毛细管半径  $R_0$ ,  $R_0$  表征初始粉体颗粒之间的距离,由砂浆水灰比决定,而砂浆在某一定稠度时的水灰比则受粉体颗粒形貌、密度(体积效应)、减水剂及灰砂比影响。胶凝材料颗粒形貌越好(如质量较好的粉煤灰),会明显降低砂浆的需水量。减水剂的掺入会促进胶凝材料颗粒的分散从而释放自由水,降低砂浆某一稠度时的水灰比,但减水剂同时也会改变水的性质,因此对砂浆保水性影响比较复杂。灰砂比越大,同一稠度时的水灰比就越小,这从表 2 中试样(C-1, C-2, S-1, S-2, F-1 及 F-2)在不同灰砂比下的水灰比可以看出。密度越小,粉体的体积效应越

明显,这与同一粉体灰砂比的增加有相同的效应,也会降低水灰比。

接触角  $\theta$ ,  $\cos \theta$  表征的是粉体的润湿性。粉体润湿性越好,  $\cos \theta$  越大,砂浆失水就越快,从而保水性就越差。

最小毛细管半径  $R_{\min}$ , 它表征了粉体的堆积效应。以某一质量为  $m$  的粉体为例,其堆积状态下的空隙体积  $V_0$  取决于颗粒级配、粉体质量比表面积  $S_m$ 。由  $R_{\min} \propto V_0 / (S_m m)$  可知,  $R_{\min}$  由粉体的比表面积及颗粒级配决定。比表面积越大,颗粒级配越好,保水性越好。

## 5 结论

(1) 提出并验证了两个不同砂浆失水模型准确性及其使用阶段。毛细管整体收缩模型能够模拟砂浆失水过程的后期阶段,毛细管渐进式收缩模型能够模拟砂浆失水过程的前期阶段。

(2) 毛细管整体收缩模型与砂浆保水性无关;毛细管渐进式收缩模型中斜率  $Q^2/t$  能够表征砂浆的保水性,斜率  $Q^2/t$  将砂浆各组分物料特性与保水性联系起来。

(3) 通过对毛细管渐进式收缩模型中  $Q^2/t$  表达式的分析,可以得到水的性质(黏度、密度及表面张力)、胶凝材料的物料特性(表面形貌、颗粒级配、接触角、密度及比表面积)及灰砂比等对砂浆保

水性的影响规律。

## 参考文献:

- [1] Hendrickx R. The adequate measurement of the workability of masonry mortar [D]. Heverlee: Katholieke Universiteit Leuven, 2009.
- [2] Groot C. Effects of water on mortar-brick bond [D]. Aachen: Technische Universiteit Delft, 1993.
- [3] 张义顺,李艳玲,徐军,等. 纤维素醚对砂浆性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(3): 359.  
ZHANG Yixun, LI Yanling, XU Jun, *et al.* Influence of cellulose ether on mortar performance[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(3): 359.
- [4] 赫赫. 稠化粉对于干粉砂浆性能影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
HAO Hao. Power on properties of dry-mixed mortar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [5] 鞠丽艳,张雄. 建筑砂浆保水增稠剂的性能及作用机理[J]. 建筑材料学报, 2003, 6(1): 25.  
JU Liyan, ZHANG Xiong. Investigation of the performance and mechanism of the water-retentive and thickening admixture of mortar[J]. Journal of Building Materials, 2003, 6(1): 25.
- [6] Carter A M, Green M K, Wilson A M, *et al.* Measurement of the water retentivity of cement mortars[J]. Advances in cement research, 2003, 15(4): 155.
- [7] Hendrickx R, Roels S, Van Balen K. Measuring the water capacity and transfer properties of fresh mortar[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(12): 1650.
- [8] Washburn E W. Dynamics of capillary flow [J]. Physical Review, 1921, 17(5): 273.