

西北寒旱区超长池体砂浆干燥收缩性能研究 及干燥收缩模型的建立

Research on the Shrinkage Performance of Ultra-long Pool Body Mortar in the Northwest
Cold and Arid Region and Establishment of the Shrinkage Model

伍山雄¹, 薛翠真², 银克俭¹, 刘玉果¹

(1. 中国建筑股份有限公司, 北京 100020; 2. 兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050)

摘要: 针对西北寒旱区超长池体水泥基材料的干燥收缩开裂问题, 系统开展镁质高性能抗裂剂、粉煤灰、矿粉粉体材料单掺、双掺以及不同养护环境 (标准养护、自然养护及覆膜养护) 对砂浆干燥收缩性能的影响规律研究, 并基于 CEB 90 Code Model 模型建立不同养护条件下砂浆干燥收缩模型, 以对其干燥收缩率进行预测。结果表明: 随着养护龄期的增长, 超长池体砂浆的干缩率逐渐增大; 当镁质高性能抗裂剂掺量控制在 $\leq 6\%$ 时, 不同养护条件下砂浆干燥收缩均得到一定程度改善; 单掺粉煤灰试件在不同养护条件下干缩率明显较小; 基于 CEB 90 Code Model 修正的砂浆干燥收缩模型对砂浆早期收缩率预测效果良好。研究结果及收缩模型可为进一步研究大体积混凝土干缩变形问题提供理论依据。

关键词: 超长池体; 干燥收缩; 镁质高性能抗裂剂; 养护方式; 收缩模型

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2025) 04-0007-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.002

WU Shanxiong¹, XUE Cuizhen², YIN Kejian¹, LIU Yuguo¹

(1. China State Construction Engineering Corporation, Beijing 100020, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To address the problem of dry shrinkage cracking in ultra-long concrete pools in the arid and cold northwest region, a systematic study was conducted on the effects of magnesium-based high-performance anti-cracking agents, fly ash and slag powder on the dry shrinkage performance of concrete specimens, as well as the influence of different curing environments (standard curing, natural curing, and film-covered curing) on the dry shrinkage properties of the specimens. A dry shrinkage model was established for the specimens based on the CEB 90 Code Model to predict the dry shrinkage rate. The results show that as the curing age increases, the dry shrinkage rate of ultra-long concrete pools increases gradually; When the magnesium-based high-performance anti-cracking agent content is controlled at $\leq 6\%$, the dry shrinkage of concrete

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52108219); 甘肃省青年科技基金项目 (20JR5RA440); 中国建筑第四工程局有限公司科技项目 (1602202000219004)。

作者简介: 伍山雄 (1975—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 施工技术、建筑材料。

通信作者: 薛翠真 (1990—), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 建筑垃圾再生利用及混凝土耐久性。

收稿日期: 2022-10-17

材料科学

specimens is improved to some extent under different curing conditions; The dry shrinkage rate of single-added fly ash specimens is significantly smaller under different curing conditions; The dry shrinkage model established for concrete specimens based on the CEB 90 Code Model can accurately predict the early dry shrinkage rate of the specimens. The research results and the shrinkage model can provide a theoretical basis for further studies on the drying shrinkage deformation of mass concrete.

Key words: super long pool body; drying shrinkage; magnesium high performance anti-cracking agent; maintenance mode; shrinkage model

0 引言

超长池体混凝土长度、宽度及厚度较大,属于大体积混凝土,因此,明确西北寒旱区超长池体混凝土干缩变化规律,提出抑制超长池体混凝土开裂的措施是亟待解决的问题。

国内外学者关于大体积混凝土开裂开展了一定的研究,如 Puertas 等^[1]研究表明在 21 ℃ 和相对湿度为 50% 条件下养护,掺 1% 聚丙烯纤维可显著降低砂浆的干燥收缩; Bakharev 等^[2]研究不同化学外加剂对砂浆干燥收缩性能影响,结果表明引气剂和减水剂可降低试件的干缩率;李飞等^[3]研究了再生微粉对碱激发胶凝材料干缩性能的影响规律,结果表明再生微粉的“微集料”效应对碱激发胶凝材料的干燥收缩有较强的抑制作用;李馨等^[4]研究不同水灰比对砂浆收缩性能的影响,结果表明水灰比对砂浆自收缩、干缩以及抗压强度的发展具有显著影响;陈迎^[5]研究了机制砂石粉掺量对混凝土早期收缩和抗裂性能的影响,结果表明掺加适量石粉,可提高机制砂混凝土抗裂性能。为缓解超长池体等大体积混凝土的收缩开裂问题,较为经济有效的方法为掺入一定膨胀剂。顾春平等^[6]研究了 HCSA 膨胀剂和 SAP 单掺、复掺对低水胶比(0.25)下水泥净浆体积变形(自收缩、干燥收缩、浸水变形)的影响,结果表明单掺 HCSA 膨胀剂和 SAP 均能降低水泥净浆的自收缩和干燥收缩、增大浸水条件下膨胀变形。相关研究表明, MgO 膨胀剂与其他膨胀剂相比水化需水量较少、膨胀源较为稳定,可调控其膨胀过程,如 Fang 等^[7]研究表明煅烧氧化镁可提高试件抵抗干燥收缩的能力;杜兆金等^[8]研究结果表明,水泥净浆膨胀率与 MgO 掺量呈线性关系;周月霞等^[9]研究了钙源膨胀剂和镁源膨胀剂以及两者复合双源膨胀体系在不同养护温度、养护制度的混凝土限制膨胀

率,研究表明湿度越高掺有膨胀剂混凝土的限制膨胀率越高;曹丰泽^[10]研究表明升高养护温度可以提高 MgO 的膨胀速率,并增加最终膨胀量。此外,还有一些学者研究了石膏、硬石膏及生石灰等膨胀剂对水泥基材料收缩性能的影响,结果表明在一定条件下,掺适量的膨胀剂可提高水泥基材料抵抗干燥收缩的能力^[11-14]。

综上所述,水泥基材料收缩变形规律与机理并不是由单一因素导致的,不同养护条件、粉煤灰、矿粉等矿物掺合料的掺入,均会对 MgO 膨胀剂的膨胀规律及机理产生一定的影响。鉴于此,针对超长池体大体积混凝土的干燥收缩问题,研究粉煤灰、矿粉、镁质高性能抗裂剂及养护条件单一因素、多因素对水泥基材料干燥收缩的影响规律,建立其干燥收缩模型,并采用微观测试手段揭示其干燥收缩变形机理。研究结果及收缩模型可为进一步研究大体积混凝土干缩变形问题提供理论依据。

1 试验材料及方案

1.1 原材料

水泥采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其基本指标见表 1;选用兰州地区细度模数为 2.46 天然河砂作为细集料;矿物掺合料选用 II 级粉煤灰和矿粉,其基本性能见表 2;抗裂剂选用镁质高性能抗裂剂,其基本性能指标见表 3。

表 1 P·O 42.5 水泥基本指标

Table 1 P·O 42.5 basic index of cement

凝结时间 / min		抗压强度 / MPa		抗拉强度 / MPa	
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
159	253	17.4	46.9	3.75	6.58

表 2 矿粉基本性能

Table 2 Basic properties of mineral powder

活性指数 / %		含水量	比表面积	密度	三氧化硫	氯离子
7 d	28 d	/%	/(m ² /kg)	/(g/cm ³)	/%	/%
77	98	0.3	421	2.82	3.4	5

表 3 镁质高性能抗裂剂基本性能
Table 3 Basic properties of magnesium high performance anti-cracking agent

MgO 含量 /%	烧失量 /%	含水率 /%	细度 1.18 mm 筛筛余/%	比表面积 /(m ² /kg)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		膨胀率/%	
					初凝	终凝	7 d	28 d	7 d	28 d
88.6	2.9	0.26	0.5	206	180	315	24.5	44.5	0.06	0.55

1.2 试验方案

以砂浆为研究对象。在基准砂浆配合比下相应地掺入粉煤灰、矿粉、镁质高性能抗裂剂，试验方案见表 4。基准砂浆（JZ 组）配合比为水灰比为 0.5，水泥 450 g，砂 1 350 g，水 225 g。试件尺寸为 25 mm×25 mm×80 mm，使用立式电子比长仪测量不同方案试件干缩数值。三种养护制度分别为：标准养护、西北寒旱区自然气候环境及覆膜养护（自然养护条件基础上前 7 d 覆膜，后续自然养护），养护龄期为 1、3、7、14、28、60 d。

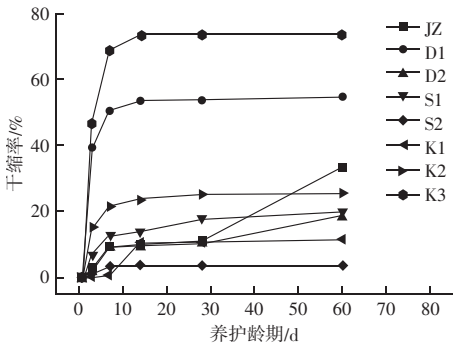
表 4 试验方案
Table 4 Experimental plan

试验编号	粉煤灰/%	矿粉/%	抗裂剂/%
D1	15		
D2	15		6
K1			4
K2			6
K3			8
S1	15	15	
S2	15	15	6

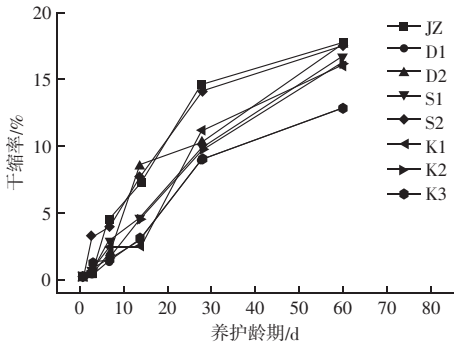
2 试验结果及分析

2.1 不同方案试件干缩率演化规律

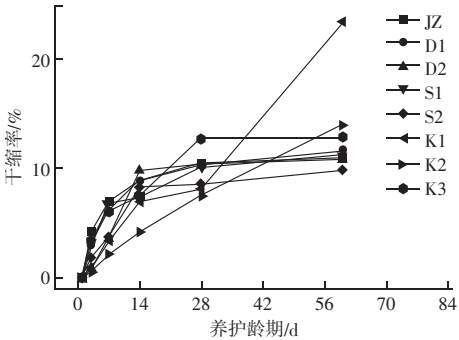
图 1 为不同养护方式下砂浆试件干缩率变化规律。不同养护方式下，水泥砂浆收缩率均随着龄期的增大逐渐增大。对于标准养护试件，在 14 d 之前收缩率呈加速增长趋势，14 d 收缩率增长较慢，几乎处于平稳状态；自然养护与覆膜养护条件下，整个龄期内收缩率均处于增长状态，且自然养护增长速率较大。水泥基材料干缩本质上是水化相的失水



(a) 标准养护



(b) 自然养护



(c) 覆膜养护

图 1 不同养护方式下试件干燥收缩试验结果
Fig. 1 Dry shrinkage test results of specimens under different curing methods

收缩，由图 1（a）可知，在抗裂剂掺量为 8%（K3），其收缩率在整个龄期内都表现为最大；抗裂剂掺量为 4%（K1），收缩率在整个龄期内均小于 JZ 组收缩率；而掺量为 6%（K2），在龄期 60 d 前略大于 JZ 组收缩率，在 60 d 却小于 JZ 组收缩率。由此可知，抗裂剂掺量控制在≤6% 时，抗裂剂可以改善砂浆后期收缩率。同时合适的矿物掺合料也可以限制砂浆干缩率，粉煤灰掺量为 15%（D1）时，在前期收缩率增长较快，14 d 后处于平稳状态，收缩率大致保持在 50%；掺入粉煤灰与抗裂剂后，砂浆收缩率明显降低，在龄期 14 d 后保持稳定，收缩率大致为 18%；粉煤灰与矿粉双掺（S1），收缩率在 28 d 前略大于 JZ 组收缩率，28 d 收缩率保持在 18% 稳定状态；在粉煤灰-矿粉双掺基础上再掺入抗裂剂（S2），该组砂浆收缩率只在 7 d 前变化较明显，7 d 之后收缩率保持在 3% 平稳状态。

材料科学

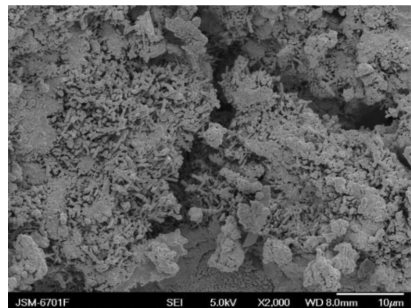
由图 1 (b) 可知, 自然养护条件下, 砂浆收缩率均随着龄期增加而逐步增大, 且在 3 d 前, 各组试件收缩率变化几乎同步, 3 d 之后收缩率变化差异较大。抗裂剂掺量为 4% (K1)、6% (K2) 及粉煤灰与抗裂剂混合 (D2) 组试件收缩率在整个龄期内均呈线性增长状态, K2 组收缩率在整个龄期内表现为较小, 且在 28 d 龄期前收缩率略小于 JZ 组收缩率, 28 d 之后均大于 JZ 组收缩率。其余组试件收缩率与 JZ 组收缩率几乎保持同步, 在整个龄期内, 粉煤灰-矿粉双掺 (S1) 及粉煤灰-矿粉双掺基础上再掺入抗裂剂 (S2) 组试件, 收缩率均小于 JZ 组收缩率, 且 S2 组收缩率较小; 而对于粉煤灰单掺 (D2) 与抗裂剂掺量为 8% (K3), 在 7 d 前与 JZ 组收缩率均同步, 7 d 后收缩率均略大于 JZ 组收缩率, K3 组收缩率相对较大。

由图 1 (c) 可知, 覆膜养护条件下, 各组试件在 3 d 前收缩率变化几乎同步, 后期增长速率差异较大。在整个龄期中, S2 组试件收缩率与 JZ 组收缩率几乎同步, 其他组试件收缩率均小于 JZ 组收缩率, 其中 D1 组试件收缩率表现为最小; D1 与 D2 组试件收缩率在 28 d 前同步, 在 28 d 之后 D2 组收缩率略大于 D1 组收缩率; K1、K2 与 K3 组试件收缩率变化几乎同步, S2 组试件收缩率大于 S1 组试件收缩率。

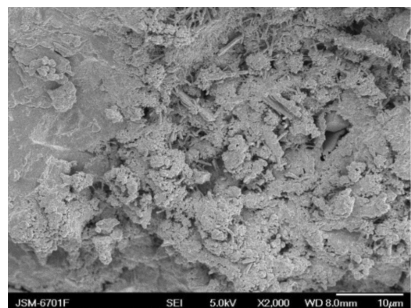
综上所述, 不同养护条件对于砂浆收缩率影响较大, 在标准养护条件下, 水泥水化较充分, 在 14 d 后收缩率处于平稳状态, 掺入适量粉煤灰、矿粉及抗裂剂减少了水泥用量, 前期水泥水化产生一定量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶, 粉煤灰在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激发作用下进行二次水化作用, 部分粉煤灰参与水化, 大量未参与水化的矿粉与粉煤灰起到微集料填充作用, 同时抗裂剂膨胀作用限制了砂浆内部微裂纹形成, 使砂浆不容易失去内部自由水而限制了其收缩过程; 在自然养护条件下, 西北地区自然环境中湿度较小, 水分蒸发较快, 导致参与胶凝材料水化的水分不足, 而收缩率在整个龄期内表现为加速增长, 但未达到平稳状态, 此时掺入适量的抗裂剂及矿物掺合料可以在一定程度上减小砂浆的干缩率; 对于覆膜养护条件, 砂浆中的自由水在前 7 d 不易蒸发, 收缩变化不明显, 后期不同组试件的收缩均小于 JZ 组, 粉煤灰、矿粉及抗裂剂掺入明显降低了砂浆的收缩。

2.2 微观机理分析

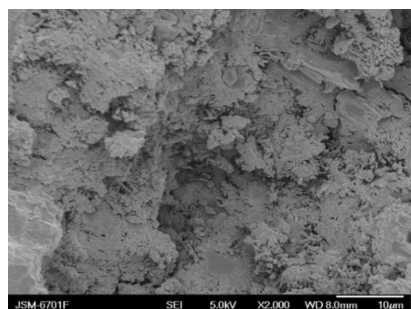
为进一步揭示镁质高性能抗裂剂、粉煤灰、矿粉单因素及多因素对砂浆收缩性能影响的微细观机理, 对其微观形貌进行分析。图 2 为 28 d 龄期时, 不同方案试件微观形貌图。



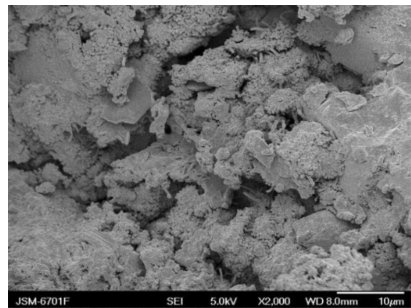
(a) JZ



(b) D1



(c) S1



(d) K2

图 2 不同方案试件微观形貌图

Fig. 2 Micromorphology of different schemes

各方案试件内部微观形貌基本相似,试件内部均含有一定数量的水化产物与微裂缝,但各方案内部结构密实度、水化产物种类与数量、裂缝数量及宽度等均有所不同,宏观上表现为干缩变形规律的不同。JZ 组砂浆试件内部结构较为疏松,含有较多裂缝;水化产物主要以针棒状的 Aft、片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和少量絮状 C-S-H 凝胶为主。单掺粉煤灰(D1)与粉煤灰-矿粉双掺(S1)内部结构较为相似,与 JZ 组试件相比,试件内部裂纹数量及宽度均有所降低,内部结构较为致密;水化产物种类及数量有所变化,其中簇状 C-S-H 凝胶数量增多,片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 数量有所降低。掺镁质高性能抗裂剂(K2)试件内部微观结构较不够致密,内部含有一定数量的孔洞和裂缝,但密实度优于 JZ 组试件,水化产物除 C-S-H 凝胶外,还可看到一定数量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。试件内部结构越致密、C-S-H 凝胶数量越多,宏观上表现为试件抵抗干缩变形的能力越强,干缩率越小。

3 干燥收缩模型的建立

国内外学者关于水泥材料干缩模型开展了一定的研究,研究表明 CEB 90 Code Model 预测模型较适合于波特兰水泥^[15],具体表达式如下:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cs0} \beta_s(t - t_s) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cs0} = \varepsilon_{cs}(f_{cm}) \beta_{RH} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cs}(f_{cm}) = \left[160 + \beta_{sc}(90 - f_{cs}) \right] \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$\beta_{RH} = 1.55(1 - H^3) \quad (4)$$

$$\beta_s(t - t_s) = \left[\frac{200(t - t_s)}{7h^2 + 200(t - t_s)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: ε_{cs0} 为试件的最大收缩率; ε_{cs} 为不同龄期试件收缩应变; β_{sc} 为与水泥种类有关的系数,普通水泥取 5.0; β_{RH} 为相对湿度系数; β_s 为干燥值随时间变化系数; t 、 t_s 、 h 分别为砂浆试件龄期、干缩开始的龄期、等效截面高度; f_{cm} 为试件强度标准值; H 为相对湿度。将试件相关参数带入 CEB 90 Code Model 预测模型,同时考虑试件几何尺寸对砂浆干缩影响,修正后得到不同养护方式下砂浆的干缩模型:

标准养护:

$$\varepsilon_{cs} = 121.17k \times 10^{-6}, S = 121.17k \times 10^{-4} \quad (6)$$

自然养护:

$$\varepsilon_{cs} = 480.29k \times 10^{-6}, S = 480.29k \times 10^{-4} \quad (7)$$

覆膜养护:

$$\varepsilon_{cs} = 407.7k \times 10^{-6}, S = 407.7k \times 10^{-4} \quad (8)$$

$$\text{其中, } k = \left[5t / (5t + 21) \right]^{\frac{1}{2}}$$

单掺粉煤灰 + 6% 镁质高性能抗裂剂砂浆试件(D2)抵抗干缩变形的能力最优,因此,以 D2 组试件干缩率建立 3 种养护条件下砂浆干缩模型。图 3 为不同养护条件下试件干缩率随龄期的变化规律。

采用离差平方 R^2 和不同龄期下干缩率误差值 D_i 评价不同养护方式试件干燥收缩模型的准确性,计算公式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2} \quad (9)$$

式中: X_i 、 Y_i 分别为砂浆干燥收缩实测值与预测值; $\bar{X}$ 为砂浆干燥收缩实测平均值; n 为砂浆实测次数。

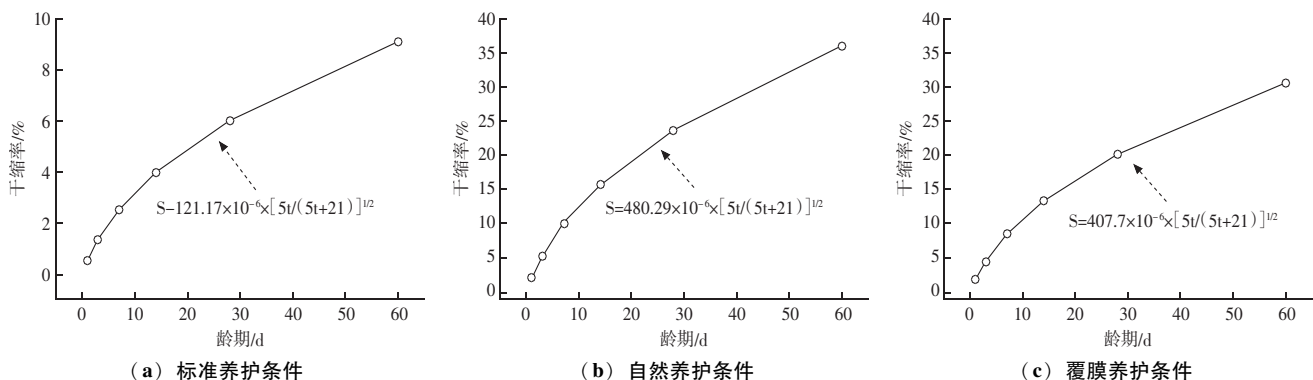


图 3 不同养护条件下干缩模型

Fig. 3 Drying shrinkage model under different curing conditions

材料科学

由表 5 可知, 采用 CEB 90 Code Model 建立的砂浆干缩率预测模型, 在标准养护条件下相关系数 R^2 最高, 高达 0.920, 各龄期干缩率误差值均小于 10%。自然养护与覆膜养护条件下, 相关系数 R^2 有所降低, 但均大于 0.75, 误差值除自然养护条件下 D_{60} 为 25.07% 外, 其他均小于 15%。28 d 龄期前, 各组试件误差基本在 10% 以内, 后期误差值有所增加。说明采用 CEB 90 Code Model 建立的修正干缩模型预测效果较好。

表 5 R^2 及干燥收缩误差值 D_i

Table 5 R^2 and drying shrinkage error value D_i

养护方式	R^2	$D_1/\%$	$D_3/\%$	$D_7/\%$	$D_{14}/\%$	$D_{28}/\%$	$D_{60}/\%$
标准	0.920	0.53	0.05	6.80	5.54	4.22	9.61
自然	0.754	2.11	4.33	6.49	5.89	13.28	25.07
覆膜	0.789	1.79	4.28	6.41	4.85	9.89	13.01

4 结论

为缓解西北寒旱区超长池体水泥基材料干缩开裂问题, 系统探究了矿物掺合料 (粉煤灰、矿粉)、镁质高性能抗裂剂及养护环境 (标准/自然/覆膜) 在单一因素和多因素组合条件下对水泥基材料干缩性能的影响规律与作用机制, 并基于修正的 CEB 90 Code Model 模型对水泥基材料的干燥收缩率进行预测, 得到以下主要结论:

(1) 随龄期的增长, 砂浆干缩率逐渐增大; 养护方式对砂浆试件干缩率存在显著影响, 标准养护试件 14 d 后干缩率增长缓慢; 自然养护与覆膜养护条件下, 整个龄期内干缩率均处于增长状态。

(2) 膨胀剂、粉煤灰等主要通过影响结构内部密实度、水化产物种类与数量、裂缝数量等进而影响其干燥收缩性能。

(3) 基于 CEB 90 Code Model 修正的干燥收缩模型对不同养护条件下砂浆干燥收缩率进行预测, 预测误差基本在 10% 以内, 预测效果较为良好。

参 考 文 献

[1] PUERTAS F, AMAT T, FERNANDEZ - JIMENEZ A. Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33 (12): 2031 - 2036.

[2] BAKHAREV T, SANJAYAN J G. Effect of admixtures on properties of alkali - activated slag concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30 (9): 1367 - 1374.

[3] 李飞, 李威翰, 卢亚, 等. 再生微粉对碱激发胶凝材料性能的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41 (4): 583 - 588, 596.

[4] 李馨, 黄乐, 姚传勤. 水灰比对硫铝酸盐水泥砂浆力学及收缩性能的影响 [J]. 黑龙江工业学院学报 (综合版), 2020, 20 (2): 35 - 39.

[5] 陈迎. 石粉对机制砂混凝土早期收缩和开裂性能的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 44 - 48, 90.

[6] 顾春平, 徐艳文, 韦海霞. HCSA 膨胀剂与 SAP 对低水胶比水泥净浆体积变形的影响 [J]. 复合材料学报, 2024, 41 (5): 2623 - 2632.

[7] FANG Y H, LIU J F, CHEN Y Q, et al. Effect of magnesia on properties and microstructure of alkali - activated slag cement [J]. Water Science and Engineering, 2011, 4 (4): 463 - 469.

[8] 杜兆金, 刘加平, 田倩, 等. 外掺不同活性 MgO 的水泥浆体膨胀性能研究 [J]. 混凝土, 2010 (1): 72 - 74.

[9] 周月霞, 方博, 隋玉朋, 等. 双源膨胀体系对混凝土收缩性能的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 25 - 32.

[10] 曹丰泽. MgO 膨胀剂的作用机理及在补偿收缩水泥基材料中的应用 [D]. 北京: 清华大学, 2021.

[11] 梁咏宁, 钱乾, 肖泽荣, 等. 煅烧硅藻土对 UHPC 收缩性能的影响及机理 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (6): 717 - 723.

[12] KIM T, JUN Y B. The Strength and Drying Shrinkage Properties of Alkali - activated Slag using Hard - burned MgO [J]. Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2015, 19 (3): 39 - 47.

[13] 孙浩杰, 李北星, 纪宪坤, 等. 水化温升抑制剂对掺钙镁复合膨胀剂混凝土温控与变形性能的影响 [J/OL]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (6): 2079 - 2088

[14] 韩宇栋, 侯东旭, 李威, 等. 高强珊瑚砂灌浆材料制备与早期膨胀性能研究 [J/OL]. 建筑材料学报, 1 - 12 [2025 - 07 - 10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20250430.1629.008.html>.

[15] 乔宏霞, 李元可, 梁金科, 等. 干混砂浆早期收缩变形性质研究及预测 [J]. 硅酸盐通报, 2019, 38 (4): 1196 - 1200, 1252.