

低碳胶凝材料体系下的混凝土收缩性能研究综述

王晶, 胡邦胜

广西交通职业技术学院, 广西 南宁 530023

DOI: 10.61369/SSSD.2026050045

摘 要 : 随着全球对碳中和目标的追求, 建筑材料的低碳化已成为行业发展的必然趋势。传统水泥生产占全球人为温室气体排放的5–8%, 推动低碳胶凝材料的发展具有重要意义。然而, 低碳胶凝材料体系下混凝土的收缩性能控制面临着新的挑战。本文系统综述了低碳胶凝材料体系下混凝土的收缩机理、影响因素及控制策略。研究综述表明, 通过合理的材料组合和先进的控制技术, 可在实现40–70% 碳排放减少的同时, 有效控制混凝土收缩, 确保长期性能。本研究综述为低碳混凝土的工程应用提供了理论指导和技术支撑。

关 键 词 : 低碳混凝土; 收缩性能; 胶凝材料; 碳减排; 耐久性

A Review of Research on Shrinkage Performance of Concrete in Low-Carbon Binder Systems

Wang Jing, Hu Bangsheng

Guangxi Vocational And Technical College Of Communications, Nanning, Guangxi 530023

Abstract : With the global pursuit of carbon neutrality goals, the low-carbon transformation of building materials has become an inevitable trend in the development of the industry. Traditional cement production accounts for 5–8% of global anthropogenic greenhouse gas emissions, making it of great significance to promote the development of low-carbon binders. However, the control of concrete shrinkage performance in low-carbon binder systems is facing new challenges. This paper systematically reviews the shrinkage mechanisms, influencing factors and control strategies of concrete in low-carbon binder systems. The review indicates that through rational material combination and advanced control technologies, it is feasible to effectively control concrete shrinkage and ensure its long-term performance while achieving a 40–70% reduction in carbon emissions. This review provides theoretical guidance and technical support for the engineering application of low-carbon concrete.

Keywords : low-carbon concrete; shrinkage performance; cementitious materials; carbon emission reduction; durability

引言

混凝土作为世界上使用最广泛的建筑材料, 其生产过程中的碳排放问题日益突出。传统水泥生产导致大量 CO₂ 排放, 约占全球人为温室气体排放的5–8%^[1]。每生产1吨水泥需要消耗60–130kg 燃料和约110kWh 电力, 碳足迹显著^[2]。为应对气候变化挑战, 建筑行业迫切需要开发低碳混凝土技术。通过使用辅助胶凝材料、替代胶凝材料和新型熟料等技术路径, 可显著降低混凝土的碳排放。研究表明, 采用辅助胶凝材料可实现40–60% 的碳排放减少, 其中 LC³ 技术通过碳捕集与利用实现减排, 可减少40% CO₂ 排放, 而 MOMS 技术通过生物质资源化利用实现减排, 理论可实现50–70% 的减排^[3]。

混凝土收缩是导致早期开裂和耐久性降低的主要因素。收缩分为自生收缩、干燥收缩和塑性收缩三类, 其中自生收缩在低水胶比高强混凝土中尤为突出^[4]。收缩产生的拉应力会导致微裂缝形成和扩展, 为氯离子、硫酸根离子等有害物质提供渗透通道, 加速钢筋腐蚀和结构劣化。在低碳胶凝材料体系中, 由于胶凝材料组成和微观结构的变化, 收缩特性与传统混凝土存在显著差异。因此, 深入研究低碳混凝土的收缩机理并开发有效的控制技术, 对于确保其在工程应用中的长期性能具有重要意义。

一、混凝土收缩的机理

混凝土的收缩行为是由多种因素共同作用引起的, 通常可以

根据不同的收缩来源将其划分为自收缩、干燥收缩、温度收缩以及碳化收缩等类型^[5]。每种收缩类型的发生机制不同, 且其相互之间往往存在复杂的耦合作用, 这使得混凝土的收缩行为更为复杂

项目信息: 广西教育厅高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2024KY1172)。

作者简介:

王晶 (1983—), 女, 副教授, 从事水泥及混凝土相关的研究;

胡邦胜 (1990—), 男, 研究生, 工程师, 从事水泥混凝土及新材料的研究。

和难以预测。

(一) 自收缩

自收缩是指在无外界约束条件下,混凝土在水泥水化反应过程中,由于水化产物体积较小,导致混凝土体积逐渐缩小的现象^[6]。自收缩通常发生在混凝土硬化初期,且该过程在低水胶比的高强度混凝土中表现得尤为显著。自收缩的出现往往会引起混凝土内部分布不均的拉应力,如果这些应力超过混凝土的抗拉强度,便会导致微裂缝的产生。因此,自收缩是混凝土裂缝产生的重要原因之一。

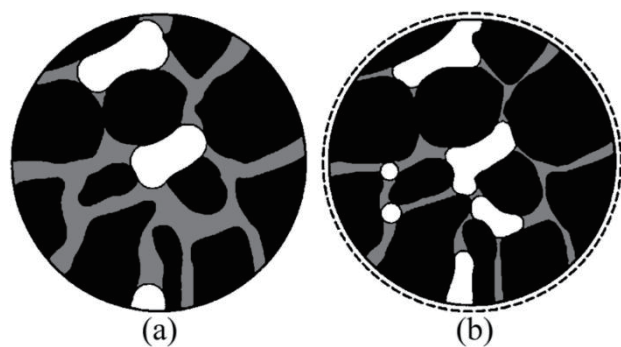


图1 水泥浆体在密封条件下的水化和自生收缩过程 (a) 水化前; (b) 水化过程中^[7]

(二) 干燥收缩

干燥收缩是指混凝土暴露在空气中,由于内部水分蒸发而引起的体积收缩^[8]。混凝土内部的水分主要通过毛细孔蒸发,而毛细孔的水分蒸发过程是一个非常重要的驱动因素。混凝土的干燥收缩行为不仅受到外界湿度的影响,还与混凝土的水胶比、骨料的特性、结构尺寸等因素密切相关。通常来说,水胶比较大的混凝土在干燥条件下会经历更显著的收缩,因为更多的自由水需要蒸发,从而产生更大的收缩应力。干燥收缩通常伴随表面裂缝的产生,由于表面水分蒸发速度较快,混凝土表面容易出现裂缝,这些裂缝不仅影响结构的美观,还可能影响结构的耐久性。

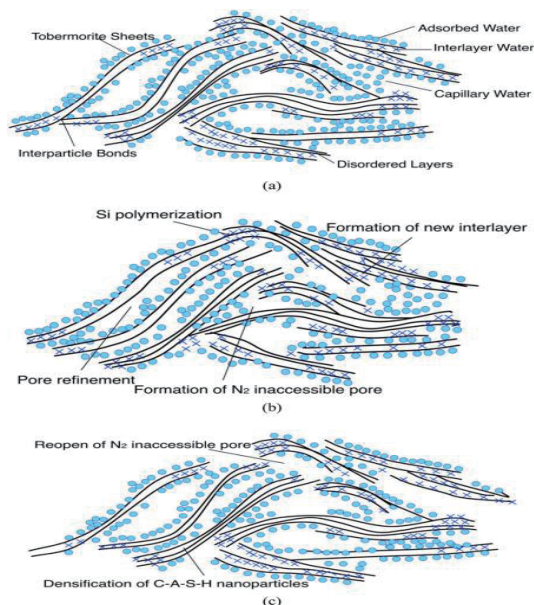


图2 干燥过程中C-A-S-H结构变化的示意图 (a) 干燥前 (b) 干燥后^[9]

(三) 温度收缩

温度收缩是由混凝土在固化过程中产生的温度变化引起的体

积变化^[10, 11]。混凝土在初期水化过程中会释放大热量,这使得混凝土内部温度急剧升高。在浇筑过程中,混凝土内部通常会形成温度梯度,外部冷而内部热的温差会导致混凝土的膨胀与收缩现象。当混凝土的温度下降时,混凝土发生冷收缩,进而引起内部应力的变化。如果混凝土内部温度过高,表面收缩与内部膨胀之间的差异将导致温度裂缝的产生。为此,在混凝土工程中,合理的温控措施(如分层浇筑、缓慢降温等)非常重要,能够有效减少温度收缩对结构的影响。

(四) 碳化收缩

碳化收缩是指混凝土中的水泥水化产物与空气中的二氧化碳反应,生成碳酸钙的过程^[12, 13]。碳化反应不仅会导致混凝土表面产生微小的体积收缩,还可能改变混凝土的化学性质,影响其长期的耐久性。在混凝土的碳化过程中,水泥水化产物中的氢氧化钙会与二氧化碳反应,生成碳酸钙,并伴随少量的体积收缩。碳化过程对混凝土的结构安全性影响较大,尤其是对钢筋的保护作用。随着碳化深度的增加,混凝土的碱性环境逐渐消失,钢筋容易发生锈蚀,进而影响结构的稳定性。

(五) 收缩行为的综合效应

在混凝土中,这几种收缩现象通常并不是单一作用的,而是多种因素共同作用的结果。例如,水泥水化热引起的温度变化不仅会导致温度收缩,还可能加剧水分的蒸发,进而增加干燥收缩效应^[14]。此外,自收缩和干燥收缩之间也可能相互叠加,进一步增加混凝土裂缝的风险。由于混凝土常常处于较长时间的硬化期,并且在这一过程中温度变化较大,因此其收缩行为的预测和控制变得尤为复杂。

二、低碳胶凝材料分类与特性

低碳胶凝材料包含辅助胶凝材料与替代胶凝材料。辅助胶凝材料主要为工业废渣和农业废料,具有显著的环保和经济效益。替代胶凝材料展现出与传统水泥完全不同的水化机理和收缩特性。主要有碳酸钙硅酸盐水泥^[15]、镁基胶凝材料^[16]与碱激发材料^[17]。

(一) 辅助胶凝材料的收缩调控机制

不同辅助胶凝材料对收缩的影响机制各异。粉煤灰和矿渣主要通过火山灰反应消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,生成额外的C-S-H凝胶,细化孔隙结构,降低渗透性,从而显著减少干燥收缩。研究表明,20-40%的替代率可实现20-40%的干燥收缩减少^[18]。硅灰通过超细颗粒的填充效应和高火山灰活性进一步改善微观结构,但可能增加自生收缩。在5-15%掺量下效果最佳^[19]。稻壳灰、棕榈油燃料灰等含有高活性 SiO_2 ,在替代10-30%水泥时可获得良好的收缩控制效果。这些材料不仅环保,而且具有成本优势^[20]。三元复合系统如粉煤灰-矿渣-硅灰复合可发挥协同效应,实现更优的收缩控制。研究表明,三元系统可实现高达60%的碳减排,同时保持良好的工作性和耐久性^[21]。

(二) 替代胶凝材料的收缩特性

替代胶凝材料通过碳化反应形成 CaCO_3 和C-S-H,不仅不引

起收缩,反而可能产生膨胀,有效补偿收缩。这种自补偿机制使其在控制收缩方面具有独特优势^[22]。镁基胶凝材料通过水化形成 $Mg(OH)_2$ (水镁石),其体积稳定性优于传统水泥,且可吸收 CO_2 发生碳化反应。研究表明,镁基胶凝材料基混凝土表现出较低的收缩和优异的耐久性^[23]。碱激发材料的收缩行为取决于激发剂类型和胶凝材料组成。通常表现出较低的干燥收缩但可能具有较高的自生收缩,需要针对具体体系进行优化。

三、收缩控制技术与策略

(一) 内养护技术

内养护通过在混凝土内部提供水分储备来维持高湿度环境,有效缓解自生收缩。常用内养护剂包括:(1)预湿轻骨料,在混凝土内部形成“水库”,在水化过程中缓慢释放水分,维持内部相对湿度>95%。研究表明,采用15%预湿轻骨料可将自生收缩降低19.7%,同时改善强度发展^[24]。(2)超吸水聚合物(SAP):可在混凝土中形成均匀分布的微储水系统,但需控制掺量以避免工作性降低。(3)其他材料:碎砖、陶粒等也可用作内养护材料,但需要评估其对混凝土性能的影响。

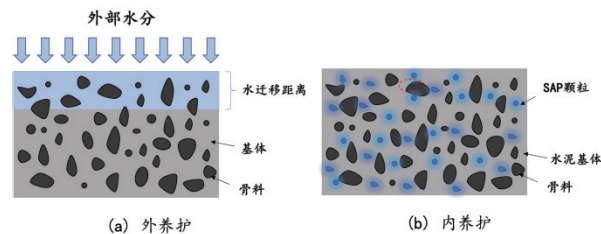


图3 混凝土外养护和内养护的区别

(二) 化学外加剂调控

化学外加剂为收缩控制提供了有效手段主要包含以下几种:(1)减缩剂,通过降低水的表面张力来减小毛细张力,可有效减少自生收缩和干燥收缩。典型SRA掺量为胶凝材料的1~2%,可实现20~40%的收缩减少^[25]。(2)膨胀剂,通过水化反应产生体积膨胀来补偿收缩,常用 CaO 、 MgO 和钙矾石类膨胀剂。需要精确控制掺量和养护条件以获得最佳效果。(3)纤维增强:钢纤维、合成纤维通过桥接裂缝和增加韧性来控制收缩开裂。(4)纳米材料,纳米 SiO_2 、 TiO_2 等通过晶核效应和填充效应改善微观结构,从而调控收缩。纳米材料的使用需要考虑分散性和成本问题。复合使用多种外加剂可发挥协同效应,获得更好的收缩控制效果。

(三) 配合比优化设计

基于浆体-骨料二元结构模型的配合比优化可实现低收缩混凝土设计。关键策略包括:(1)骨料堆积优化,采用Tarantula曲线或压缩堆积模型最大化骨料堆积密度,减少浆体含量。这不仅可以降低收缩,还能减少胶凝材料用量,降低碳排放。(2)水胶比控制,在保证强度的前提下尽可能降低水胶比,但需考虑工作性要求。低水胶比虽然有利于强度发展,但可能增加自生收缩。(3)胶凝材料复合:合理搭配不同辅助胶凝材料实

现性能互补。例如,粉煤灰改善工作性和长期强度,硅灰提高早期强度和密实度,矿渣改善耐久性。(4)骨料级配优化,改善骨料-浆体界面过渡区,提高界面粘结强度。研究表明,通过系统优化可实现水泥节省8~15%,28天收缩降低25%,同时保持泵送性和强度^[26]。

四、评价体系与标准

(一) 评价指标体系

低碳混凝土收缩性能评价需建立综合指标体系。收缩性能需包括自生收缩、干燥收缩和总收缩应变,以及开裂敏感性。微观结构参数需要考虑孔隙率、孔径分布、界面过渡区特性等。力学性能则关注抗压强度、弹性模量、泊松比等。耐久性指标需考虑氯离子渗透性、碳化深度、抗冻性等。环境性能指标需要关注碳足迹、能耗、生命周期评价等。这些指标相互关联,需综合考虑以全面评价低碳混凝土的性能表现。

(二) 收缩预测模型

准确评估与预测混凝土的收缩行为,是进行裂缝控制与耐久性设计的基础。为在设计和施工阶段前瞻性地预判收缩发展,研究者建立了多种预测模型,主要可归纳为经验模型、机理模型与数据驱动模型三类。主要如表1所示。

表1 混凝土的收缩行为预测模型

模型类型	模型名称	考虑因素
半经验模型	ACI 209系列 ¹	材料、构件尺寸与环境因素
	CEB-FIP MC 系列	收缩应变随时间发展的函数
	B3/B4 模型	大量矿物掺合料
	中国规范 GB 50010 模型	干燥收缩终极值的简化
机理模型	Bazant-Panula 模型	考虑内部相对湿度分布和扩散过程预测收缩的基础
	Hygro-Thermo-Chemo-Mechanical (HTCM) 模型	水分传输、热量传输、水泥水化化学反应与力学行为耦合
数据驱动模型	人工神经网络 / 支持向量机 / 集成学习	足够多高质量的数据

五、结语

(1) 低碳胶凝材料展现出显著的碳减排潜力,通过使用辅助胶凝材料、替代胶凝材料等技术,可实现40~70%的碳排放减少,为实现建筑行业碳中和目标提供了有效路径。

(2) 低碳混凝土的收缩特性与传统混凝土存在显著差异,需要综合考虑自生收缩、干燥收缩和塑性收缩的协同控制。

(3) 通过填充效应、火山灰效应、晶核效应等机制,低碳胶凝材料可显著改善混凝土微观结构,从而调控收缩性能。

(4) 内养护、化学外加剂、配合比优化等技术的综合应用, (5) 现有的评价标准主要针对传统混凝土, 需要建立适用于
可实现25-40% 的收缩降低, 同时保持混凝土的力学性能和耐 低碳混凝土的综合评价体系。
久性。

参考文献

[1]Mikulčić H, Klemes J J, Vujanović M, et al. Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process[J]. Journal of Cleaner Production, 2016,136:119-132.

[2]Scrivener K L, John V M, Gartner E M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry[J]. Cement and Concrete Research, 2018,114:2-26.

[3]肖建庄, 邓琪, 夏冰. 混凝土制备低碳化演进与展望 [J]. 建筑科学与工程学报, 2022,39(05):1-12.

[4]陈宝春, 李聪, 黄伟, 等. 超高性能混凝土收缩综述 [J]. 交通运输工程学报, 2018,18(01):13-28.

[5]何世钦, 曾煜葳, 高鹏飞, 等. 石粉取代胶凝材料对自密实混凝土收缩变形影响研究 [J]. 北方工业大学学报, 2024,36(04):9-15.

[6]李景浩, 何小波, 胡少伟, 等. 现代混凝土自收缩及其调控研究进展 [J]. 水利水运工程学报, 2023(02):150-161.

[7]Lura P, Jensen O M, van Breugel K. Autogenous shrinkage in high-performance cement paste: An evaluation of basic mechanisms[J]. Cement and Concrete Research, 2003,33(2):223-232.

[8]伍山雄, 薛翠真, 银克俭, 等. 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 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025,39(04):7-12.

[9]Ye H, Radlińska A. Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag[J]. Cement and Concrete Research, 2016,88:126-135.

[10]白文博, 周浩一, 朱兰飞, 等. 大体积混凝土温度收缩补偿材料及抗裂性能研究 [J]. 中国农村水利水电, 2025(01):182-187.

[11]侯佑胜, 张兴斌, 张家臻, 等. 核电站大体积混凝土基础裂缝控制理论与方法 [J]. 工业建筑, 2025,55(01):182-187.

[12]华小满. 玄武岩纤维含氯盐补偿收缩混凝土抗碳化性能试验研究 [D]. 安徽理工大学, 2017.

[13]李茂森, 王露, 王军, 等. 大掺量矿物掺合料混凝土碳化行为研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2023,42(11):3787-3798.

[14]Thomas J J, Jennings H M. Effect of Heat Treatment on the Pore Structure and Drying Shrinkage Behavior of Hydrated Cement Paste[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2002,85(9):2293-2298.

[15]王明新, 毛宇光, 胡翔, 等. 碳化废弃混凝土微粉的特性及作辅助性胶凝材料的研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2025,53(05):1313-1327.

[16]冯超, 关博文, 张奔, 等. 湿度对氯氧镁水泥二氧化碳吸附能力影响研究 [J]. 硅酸盐通报, 2018,37(08):2355-2360.

[17]张勇, 邹尤, 尹键丽, 等. 碱激发钢渣的反应活性与体积安定性调控 [J]. 新型建筑材料, 2025,52(09):53-59.

[18]陈成文, 邵立荣, 王金光, 等. 醋酸乙烯- 乙烯改性抹灰砂浆早期干燥收缩分析 [J]. 硅酸盐通报, 2024,43(08):2778-2787.

[19]张涛, 朱成. 水泥- 硅灰/ 粉煤灰体系强度、收缩性能与微观结构研究 [J]. 硅酸盐通报, 2022,41(03):903-912.

[20]汪知文, 李碧雄, 张治博, 等. 稻壳灰对本地化高延性水泥基材料性能的影响 [J]. 工程科学与技术, 2023,55(03):77-86.

[21]张向东, 杨吉, 邢宇成, 等. 石灰石粉- 矿渣- 粉煤灰三元固废地聚物注浆材料的性能优化与微观结构表征 [J]. 复合材料学报, 2025:1-23.

[22]王爱国, 郑毅, 张祖华, 等. 碱激发材料与普通硅酸盐水泥和混凝土的耐久性能比较 [J]. Engineering, 2020,6(06):237-261.

[23]Shi C, Jiménez A F, Palomo A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2011,41(7):750-763.

[24]孙燕群, 徐海栋, 于子浩, 等. 玄武岩纤维增强轻骨料混凝土内部相对湿度及自收缩特性 [J]. 复合材料学报, 2025:1-14.

[25]赵明, 张悦然, 王海燕. 减缩剂和膨胀剂控制高性能混凝土自收缩的试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2025,45(02):76-82.

[26]黄燕, 胡翔, 史才军, 等. 混凝土中水泥浆体与骨料界面过渡区的形成和改进综述 [J]. 材料导报, 2023,37(01):106-117.