 DOI: https://doi.org/10.12349/msat.v3i4.3642

Preparation and Performance Evaluation of High-performance Carbon Dioxide Curing Foam Concrete

Xiu Li[1,2] Xinmei Yang[1] Cairui Fan[1] Teng Wang[1,2]

1. School of Geography, Science and Planning, Jining Normal University, Ulanqab, Inner Mongolia, 012000, China
2. Inner Mongolia Research Center for Equalization of Urban and Rural Public Services, Jining Normal University, Ulanqab, Inner Mongolia, 012000, China

Abstract

This study focuses on the preparation and performance evaluation of high-performance CO_2 curing foam concrete. The paper first introduces the basic principle of foam concrete and carbon dioxide curing mechanism, lay the theoretical basis for subsequent experimental design and data analysis, then describes the preparation process of high performance carbon dioxide curing foam concrete, including the selection of raw materials, preparation process and curing conditions, finally discusses the physical, mechanical and environmental durability test in the performance evaluation of carbon dioxide curing foam concrete application.

Keywords

high performance; carbon dioxide curing; foam concrete; performance evaluation

高性能二氧化碳养护泡沫混凝土的制备与性能评估

李秀[1,2] 杨昕美[1] 樊才睿[1] 王腾[1,2]

1. 集宁师范学院地理科学与规划学院，中国 · 内蒙古 乌兰察布 012000
2. 集宁师范学院内蒙古城乡公共服务均等化研究中心，中国 · 内蒙古 乌兰察布 012000

摘　要

本研究聚焦于高性能二氧化碳养护泡沫混凝土的制备与性能评估。论文首先介绍了泡沫混凝土的基本原理和二氧化碳养护机制，为后续的实验设计和数据分析奠定理论基础，随后详细描述了高性能二氧化碳养护泡沫混凝土的制备工艺，包括原材料选择、制备流程和养护条件的选择，最后探讨了物理、力学和环境耐久性测试在二氧化碳养护泡沫混凝土性能评估上的应用。

关键词

高性能；二氧化碳养护；泡沫混凝土；性能评估

1 引言

作为一种轻质、隔热、隔音且环保的建筑材料，泡沫混凝土在现代建筑和工程领域得到了广泛的应用，其独特的多孔结构不仅显著降低了材料的密度，还赋予了其优良的热工性能和良好的施工便利性。然而传统的泡沫混凝土制备和养护方法存在一些局限性，如养护周期长、强度低、性能不稳定等问题，一定程度限制了泡沫混凝土在高性能建筑领域的进一步应用，在“双碳”目标背景下，利用二氧化碳养护技术对轻质泡沫混凝土进行养护，可实现二氧化碳的有效封存，同时探索轻质泡沫混凝土性能的提升。

【基金项目】集宁师范学院科学研究项目“固碳节能轻质混凝土的二氧化碳养护研究”（项目编号：jsky202238）；大学生创新创业训练计划项目“基于智慧赋能的零碳校园建设路径研究”（项目编号：202411427005）。

【作者简介】李秀（1989–），男，中国内蒙古呼和浩特人，硕士，讲师，从事建筑节能研究。

2 泡沫混凝土与二氧化碳养护

2.1 泡沫混凝土

泡沫混凝土是一种轻质多孔材料，其基本原理是通过引入大量微小气泡形成具有特定孔隙结构的混凝土基体，这些气泡的存在能够显著降低材料的密度，同时赋予了泡沫混凝土优异的隔热、隔音和减震性能。从组分上看，泡沫混凝土由水泥浆体、骨料、水和泡沫组成，其中泡沫占据了大部分体积[1]。孔隙的大小和分布对泡沫混凝土的性能有重要影响，例如，均匀分布的小孔隙有助于提高材料的隔热性能而大孔隙则可能导致强度下降，所以优化孔隙结构是提高泡沫混凝土综合性能的关键。

2.2 二氧化碳养护机制

二氧化碳养护技术是一种新兴的混凝土养护方法，它利用二氧化碳与水泥浆体中的氢氧化钙发生碳化反应进而生成碳酸钙沉淀，整个过程不仅加速了混凝土的硬化速度，还提高了材料的密实度和强度。具体而言，当二氧化碳气体通入泡沫混凝土中时会迅速与水泥浆体中的氢氧化钙反应，生成碳酸钙和水。研究表明，二氧化碳养护不仅能够显著缩短养护时间，降低能耗，还能改善泡沫混凝土的微观结构。与传统标准养护相比，二氧化碳养护的泡沫混凝土将表现出更高的早期强度和更稳定的孔隙结构，这为泡沫混凝土在快速施工和高性能建筑领域的应用提供了新的可能性。

2.3 泡沫稳定性和孔隙结构调控

泡沫稳定性和孔隙结构是影响泡沫混凝土性能的两个关键因素。泡沫稳定性是指泡沫在搅拌和浇筑过程中保持其形态的能力而孔隙结构则决定了材料的密度、强度和热工性能。为了改善泡沫稳定性，通常需要选择合适的泡沫剂种类和浓度，常见的泡沫剂包括表面活性剂、蛋白质类和合成聚合物类等，这些泡沫剂通过降低液体表面张力促进气泡的形成和稳定。不仅如此，泡沫剂的浓度也会影响泡沫的稳定性，过低的浓度会导致泡沫容易破裂，而过高的浓度则会使泡沫过于稠密，不利于混凝土的流动性和施工性。因此，为有效调控泡沫混凝土的孔隙结构，提高其综合性能，在实际应用过程中需要通过实验优化泡沫剂的种类和浓度，本研究使用阴离子表面活性剂进行发泡。

3 高性能二氧化碳养护泡沫混凝土的制备

3.1 原材料选择

高性能二氧化碳养护泡沫混凝土的制备首先需要选择合适的原材料，主要原材料包括水泥、骨料、水、泡沫剂和外加剂。水泥选用普通硅酸盐水泥（P.O 42.5），具有良好的早期强度和后期稳定性，适用于泡沫混凝土的制备，水泥的细度和活性对混凝土的性能有显著影响，因此需选择标准细度的水泥以确保良好的分散性和流动性 [2]。骨料选用河砂，粒径范围为 0.1~2mm，河砂具有较低的吸水率和良好的级配，能够提高泡沫混凝土的密实度和强度。需要注意的是，细骨料的含量和粒径分布都会影响泡沫混凝土的孔隙结构，所以在使用时要通过试验确定最佳比例。使用水确保无有害杂质，避免影响混凝土的性能，水灰比是影响泡沫混凝土密度和强度的关键参数，控制在 0.4~0.6。泡沫剂选用自制复配阴离子表面活性剂，具有良好的发泡能力和泡沫稳定性。为了进一步改善泡沫混凝土的性能，制备时添加适量的减水剂和矿物掺合料。

3.2 制备工艺

高性能二氧化碳养护泡沫混凝土的制备工艺包括混合、发泡和养护三个主要步骤。首先将水泥、细骨料和水按预定比例加入搅拌机中，充分搅拌均匀，搅拌时间为 2~3min，确保所有材料充分混合。在此过程中可以适当调整水灰比以达到所需的流动性和稠度。随后将预先配置好的泡沫剂溶液加入发泡机中，通过高速搅拌产生大量微小气泡，泡沫剂溶液的浓度和发泡时间对泡沫的质量有重要影响，通常发泡时间设置为 1~2min，产生的泡沫直径应控制在 1~3mm。将发泡后的泡沫均匀加入已搅拌好的水泥浆体中并继续搅拌 1~2min，使泡沫均匀分布在整个混凝土基体中。最后，将制备好的泡沫混凝土浆体倒入预先准备的模具中，注意避免气泡逸出，浇筑过程中应保持均匀的速度以防止浆体分层。浇筑完成后用刮刀平整表面，确保混凝土表面光滑平整。完成上述所有工艺后就开始进行二氧化碳养护并得到最终的泡沫混凝土。图 1 展示了泡沫混凝土的基本制备工艺。

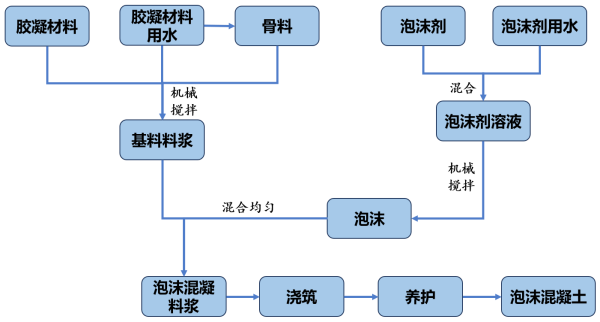

图 1 泡沫混凝土的基本制备工艺

3.3 二氧化碳养护技术

二氧化碳养护技术是本研究的核心内容之一，它利用二氧化碳与水泥浆体中的氢氧化钙发生碳化反应，生成碳酸钙沉淀，从而加速混凝土的硬化过程并提高其性能，具体操作如下。首先将浇筑好的泡沫混凝土试件放入特制的二氧化碳养护箱中，养护箱内设有温控和压控装置，用于精确调节温度和压力。开启二氧化碳气源，通过流量计控制气体流量以确保气体均匀分布在整个养护箱内，养护过程中需定期记录温度和压力变化。养护结束后取出试件，进行后续的性能测试。养护条件的选择需考虑温度、压力和养护时间等因素，温度和压力对二氧化碳的溶解度有显著影响，能够影响碳化反应的速度和程度。通常，养护温度控制在 20℃ ~30℃，压力控制在 0.1~1.0MPa，养护时间通常为 2~4h，目的是确保充分的碳化反应。

4 性能评估方法

4.1 物理性能测试

在评价高性能二氧化碳养护泡沫混凝土的物理性能时，主要关注的是密度和吸水率等关键指标。作为材料轻重的重要标志，密度直接影响到材料的应用范围和结构设计，对于泡沫混凝土而言，密度不仅关系到其隔热隔音效果，还影响着材料的强度和耐久性。密度测试通过称量干燥状态下的试件质量和完全浸入水中的质量，计算试件的真实体积，最终获得密度值 [3]。吸水率是衡量材料防水性能的重要参数，特别针对长期暴露于潮湿环境中的建筑材料。吸水率的测定方

法是：将试样在饱和面干状态下称重，然后将其完全浸入水中一段时间，取出后再次称重，通过计算两次质量之差来确定吸水率。高吸水率可能导致材料内部结构损伤并降低使用寿命，因此，合理控制吸水率，对于提升泡沫混凝土的耐久性和适用性具有重要意义。

4.2 力学性能测试

力学性能主要包括抗压强度和弹性模量两个方面，抗压强度直接反映了材料抵抗外力破坏的能力，弹性模量则用于描述材料在外力作用下产生形变的程度。抗压强度测试就是将标准尺寸的试块置于压力机中施加均匀载荷直至破坏，然后记录最大破坏载荷。弹性模量的测量则需借助于应力 - 应变曲线，在一定范围内加载卸载，通过计算斜率来确定。有研究表明通过改变发泡剂种类和添加量成功制备了一系列不同密度等级的泡沫混凝土样品，并对其进行了系统的力学性能测试。结果显示，样品的抗压强度随着密度的增加呈现出先增后减的趋势，最佳密度区间内的材料表现出最优的综合力学性能。这表明通过优化泡沫混凝土的孔隙结构，可以在保证轻质的同时提高其力学性能。

4.3 环境耐久性测试

为了确保泡沫混凝土在各种恶劣环境下仍能保持良好的使用性能，环境耐久性测试不可或缺，这类测试主要包括耐酸碱性测试、冻融循环测试等内容。耐酸碱性测试旨在考察材料在酸碱溶液中浸泡后的质量损失、外观变化等情况，具体操作是将样品分别浸入特定浓度的硫酸和氢氧化钠溶液中，一定时间后取出并清洗干燥，然后记录样品的质量变化率及外观缺陷。冻融循环测试则是模拟自然界的冻融过程，检测材料在反复冻融作用下的物理性质变化，特别是强度下降和表面剥落等问题，测试方法是将样品在低温环境中冷冻一段时间，然后在常温或高温环境中融化，重复多个循环周期后评估材料的耐久性。

5 实验与讨论

5.1 实验设计

为评估二氧化碳养护技术对泡沫混凝土性能的影响，验证该养护技术在提高泡沫混凝土相关性能方面的有效性和可行性，笔者以实验的方式对比了传统标准养护和二氧化碳养护条件下泡沫混凝土的相关性能，实验设计控制泡沫混凝土干密度 500kg/m^3 左右，硅灰替代掺量 3%，二氧化碳养护压力分别 0.2MPa、0.5MPa，养护时间 4h，养护到龄期进行性能测试，本实验是阶段性验证研究，只针对样品进行干密度、吸水率、7d 抗压强度进行测试。

5.2 结果和分析

实验结果包括干密度、吸水率、抗压强度性能指标。具体数据如表 1 所示。

表 1 泡沫混凝土性能测试结果

养护方法	干密度（kg/m^3）	吸水率（%）	7d 抗压强度（MPa）
传统标准养护	522	13.5	1.3
CO_2 养护（0.2MPa）	514	10.6	2.1
CO_2 养护（0.5MPa）	503	9.8	2.4

密度：从表 1 可以看出，二氧化碳养护与传统的标准养护对泡沫混凝干土密度未产生明显影响，随着养护压力的提升，呈略微下降趋势，但这样的变化趋势不足以产生显著影响，泡沫混凝土因泡沫的相对脆弱，制备与养护中泡沫孔隙结构的损失或完整均会使干密度有一定的变化。因此，本实验中设计干密度 500kg/m^3，三种养护条件下，干密度均未发生较大改变。

吸水率：二氧化碳养护条件下的泡沫混凝土吸水率显著低于传统水养护条件下的吸水率。0.2MPa 和 0.5MPa 条件下的吸水率分别为 10.6% 和 9.8%，而传统水养护条件下的吸水率为 13.5%，这表明二氧化碳养护可以有效形成矿化产物，使结构密实，改善材料的防水性能，减少水分渗透并延长使用寿命。

抗压强度：二氧化碳养护条件下的泡沫混凝土抗压强度显著高于传统水养护条件下的抗压强度，说明二氧化碳养护能够显著提高材料的力学性能，尤其在 7d 龄期抗压强度，0.2MPa 和 0.5 MPa 条件下的 7d 抗压强度分别为 2.1MPa 和 2.4MPa，几乎已达到全龄期的抗压强度，传统水养护条件下的抗压强度仅为 1.3MPa。

6 结语

论文系统地探讨了高性能二氧化碳养护泡沫混凝土的制备与性能评估，揭示了二氧化碳养护技术在缩短养护时间、固碳封存及改善泡沫混凝土物理、力学和环境耐久性方面的显著优势。未来的研究可进一步探索不同二氧化碳压力和温度条件对泡沫混凝土性能的影响，或者开发更多功能性的添加剂来全面提升泡沫混凝土的性能，满足更多复杂工程需求。

参考文献

[1] 田峰,范睿.浅析泡沫混凝土的特性及在工程中的应用[J].企业技术开发:中旬刊,2012(6):2.

[2] 孙一夫.二氧化碳养护固废轻质混凝土配方优化及工业化应用[D].杭州:浙江大学,2021.

[3] 梁淑哲.表面处理与二氧化碳养护对泡沫混凝土性能的影响[D].重庆:重庆大学,2021.