

泡沫混凝土保温材料研究综述

洪志龙*, 曾嘉令, 周楚鸿, 陈家栋

西京学院土木工程学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2024年6月19日; 录用日期: 2024年7月9日; 发布日期: 2024年7月23日

摘要

分析研究了泡沫混凝土制备原理与基本的技术指标, 包括发泡剂、稳定性、抗压性能、吸水性能、保温节能效果, 这些可以用以评价泡沫混凝土的质量。泡沫混凝土质量轻、强度高、具有环保特性, 目前在框架墙、保温垫层方面有较为广泛的应用。泡沫混凝土目前主要以现浇生产为主, 在生产工艺、产品性能、环境适应性上仍然有很大的发展空间。泡沫混凝土作为一种节能型高性能材料, 未来应用的面十分广阔, 从更低成本、更高效率、更简便的施工的角度, 泡沫混凝土具有很大的可能性。

关键词

泡沫混凝土, 制备技术, 性能机理, 工程应用

Summary of Foam Concrete Insulation Materials

Zhilong Hong*, Jialing Zeng, Chuhong Zhou, Jiadong Chen

Shaanxi Key Laboratory of Concrete Structure Safety and Durability, School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 19th, 2024; accepted: Jul. 9th, 2024; published: Jul. 23rd, 2024

Abstract

The preparation principle and basic technical indicators of foamed concrete are analyzed and studied, including foaming agent, stability, compressive resistance, water absorption, heat preservation and energy saving effect, which can be used to evaluate the quality of foamed concrete. Foamed concrete has light quality, high strength and environmental protection characteristics, and has been widely used in frame wall and insulation cushion. At present, foamed concrete is

*通讯作者。

mainly produced by cast-in-place, and there is still a lot of room for development in production technology, product performance and environmental adaptability. As an energy saving and high performance material, foamed concrete has a wide range of applications in the future. From the perspective of lower cost, higher efficiency and simpler construction, foamed concrete has great possibilities.

Keywords

Foamed Concrete, Preparation Technology, Performance Mechanism, Engineering Application

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球建筑业的快速发展,对建筑材料的环保性、节能性和功能性要求日益提高。泡沫混凝土作为一种轻质、多孔、具有良好隔热和隔音性能的新型建筑材料,近年来受到了广泛关注。本文综述了泡沫混凝土的发展历程、制备技术、性能特点以及工程应用等方面的研究进展,旨在为该领域的研究者和工程技术人员提供参考和启发。

2. 研究背景

自 20 世纪初泡沫混凝土概念的提出,到 1923 年相关专利的注册[1],泡沫混凝土的研究已有近百年的历史。然而,直到近几十年,随着建筑节能和环保要求的提高,泡沫混凝土才真正迎来了快速发展的机遇。特别是在中国,随着墙体材料改革和建筑节能政策的推行,泡沫混凝土作为一种具有巨大潜力的节能型建筑材料,其研究和应用得到了迅速发展。

3. 泡沫混凝土制备基本原理

泡沫混凝土由基本成分和补充成分组成。基本成分是水泥、沙子和砂浆用水,加上生产混凝土的骨料,辅料是粉煤灰、增塑剂和纤维。泡沫混凝土是按照特定的配合比制备胶凝材料浆体,首先将发泡剂溶液通过特殊方式制备成泡沫,再加入制备好的胶凝材料浆体中,经搅拌、浇筑、养护而成的一种轻质多孔的建筑材料[2]。当由发泡剂制成的泡沫顺利混入胶凝材料浆体,经凝结作用固定在混凝土内,形成泡沫混凝土,才能最终体现泡沫的价值。泡沫在形成混凝土的过程中,将发生一系列变化,并对混凝土产生重要的影响。

气泡形成变化一般经历 3 个阶段:气-液界面向气-液-固界面的转变,此时泡沫混入胶凝材料浆体;气-液-固界面向气-固界面的过渡,该阶段是胶凝材料的静停阶段,是泡沫混凝土生产最关键的一个阶段,黏附在气泡膜上的胶凝颗粒慢慢生成胶凝物质;气-固界面形成,当胶凝材料初凝后,水化开始加快进行,大量水化热使泡沫液膜的水分蒸发,泡沫变成气孔,被胶凝物质固定在混凝土内,形成泡沫混凝土。

从化学成分上看,混凝土发泡剂主要是由表面活性剂和蛋白质两大类物质组成[3]。泡沫的发泡机理,是发泡剂中表面活性物质或表面活性剂溶于水以后,形成一种双电子结构,将空气包围形成的气泡。气泡的形成需克服液体表面张力,以溢出表面,泡沫由很薄的水膜包裹空气形成。发泡剂本质都是活性较

高的表面活性剂[4]-[7],能在液膜表面定向吸附、排列,在一定浓度范围内,可有效降低液体表面张力[8]-[10]。

4. 泡沫混凝土技术指标

泡沫体系不是一个静态的平衡系统,其结构和性能会随着时间的推移而发生变化[11]。泡沫混凝土主要性能指标包括发泡剂、稳定性、抗压性能、吸水性能、保温节能效果等等。发泡剂可以评价其发泡倍数、泌水性、使用效率、黏度、与浆料的结合性、保质期、外观和毒副作用[12]。

发泡剂通过水泥浆混合物中产生的气泡速率来控制混凝土密度。泡沫气泡被定义为由于添加泡沫剂而形成的封闭气隙。常见的发泡剂有合成的、蛋白质基础的、洗涤剂、胶水树脂、水解蛋白、树脂皂和皂苷。基于蛋白质的发泡剂产生更强、更封闭的气泡结构,允许包含更多的空气,并提供更稳定的空气空隙网络,而合成的发泡剂产生更大的膨胀,从而产生更低的密度。发泡剂的含量对新拌混凝土和硬化混凝土的性能都有相当大的影响。过多的泡沫体积会导致流量下降。而流动受混合时间的显着影响。混合时间越长,夹带的空气就越多,因此长时间混合可能会通过降低空气含量而导致夹带空气的损失。

凡泌水性大的发泡剂的泡沫无论是其单独存在或是接触水泥、粉煤灰浆料其稳定性均不好,因此泌水性的大小间接反应泡沫单独存在时的稳定性。使用效率反映制作泡沫混凝土的效率,按规定的设备制作泡沫混凝土,发泡效率越高,制作单位泡沫混凝土所需要的发泡剂就越少。黏度越大的发泡剂,制作泡沫混凝土就越需要加热和强力搅拌,有关的施工就越不方便。发泡剂与浆料的结合性能够反映在泡沫混凝土样块 7D 或 28D 的抗压强度上,结合性好的发泡剂能帮保证混凝土的初终凝时间和抗压强度。保质期太短,就意味着该发泡剂的质量指标下降曲线的斜率比较陡峭,而且保存条件一般比较苛刻。一般而言,均匀透明的外观表明该种发泡剂的水溶性一般也是比较好的。发泡剂不应含有对人体和环境有毒、副作用的物质。

泡沫的稳定性与泡沫混凝土的性能、质量、成品率、合格率等关系密切,起着决定性的作用。泡沫稳定性是泡沫混凝土生产的技术核心,泡沫混凝土能否成功生产,重要取决于泡沫稳定性。泡沫的稳定性就是指泡沫能够长时间存在而不破灭的性能,它具体可表现为泡沫的寿命。稳定性和泡沫混凝土的密切关系,重要表现以下四个方面:1) 泡沫稳定性决定泡沫混凝土气孔结构;2) 泡沫稳定性决定浇注稳定性和成品率;3) 泡沫的稳定性影响浆体泵送和泡沫混凝土密度;4) 泡沫的稳定性影响搅拌[13]。

已有学者对泡沫混凝土单轴抗压力学性能进行了研究。周顺鄂等[14]在泡沫混凝土压缩性及抗压强度模型研究中,得出泡沫混凝土压缩过程分为 4 个阶段,即平台阶段、密实阶段、屈服阶段和衰退阶段,其压缩力学性能受到基体材料、容重和气孔形态及分布等因素的影响。在单轴压缩下泡沫混凝土的峰值应力随龄期的增加而增大,密度大的峰值应力增长速率要高,尤其在低龄期时最为明显,但泡沫混凝土随着龄期的增加,峰值应力增长速率是降低的[15]。通过实验观察到抗压强度与密度有直接关系,其中密度的降低会对抗压强度产生指数和不利影响。混合料的抗压强度的主要控制因素之一是发泡剂的体积与密度比,泡沫混凝土中的空隙量随其变化。例如,当泡沫混凝土的塑性密度为 1800 kg/m^3 和 280 kg/m^3 , 28 d 时的相关抗压强度分别为 43 MPa 和 0.6 MPa。泡沫剂的过量添加会降低抗压强度,因为泡沫剂的体积越大,通常会产生空隙,导致密度降低。

泡沫混凝土因其自身的多孔结构特征吸水率较大它的吸水是通过连通孔渗透和毛细孔渗透共同作用实现的。泡沫混凝土作为一种轻质保温材料,在建筑市场上得到了广泛的应用。但其应用中也出现了一些问题,如应用于保温构件时,由于其吸水率过大,使得容重上升,保温性能下降,在寒冷环境下,则因冻融循环造成强度和结构的损失。这对于泡沫混凝土的耐久性十分不利[16]。在设计对吸水性能有不同要求的配合比时,泡沫混凝土的孔隙率可通过 T.C. Powers 模型进行估算,在估算的基础上结合试验检测,

获得满意的配合比。

泡沫混凝土属于气固两相混合物，其传热过程是由固体中微观粒子振动和气体中气体分子碰撞共同作用的结果，以固体材料传热为主[17]。泡沫混凝土干密度越大，固相占比越高，热量传递效率越大，导热系数越大，节能效果越差。因此，想要节能效率高，采用多孔的低干密度泡沫混凝土是一种选择[18]。

5. 工程应用研究

5.1. 国内泡沫混凝土的应用

随着我国墙体材料改革与建筑节能政策的推行，节能型建筑材料的开发和应用受到广泛的重视，国内大力发展节能、利废、保温、轻体、隔热等新型材料，对泡沫混凝土也进行了深入的研究和开发。

目前，我国的泡沫混凝土砌块，南方地区利用其隔热性能和轻质高强作为框架结构的填充墙，北方地区用作墙体保温层和管道保温套等[19]。目前，屋面发泡水泥混凝土已在贵州省境内推广使用，用户反馈表明使用效果较好[20]。随着建筑节能对建筑热工性能要求的提高，除外墙保温得到全面推广使用外，楼地面保温也逐渐受到重视，暖气管、配电管等各类管线需要埋在垫层中，迫切需要一种质量轻、强度高、可用做楼地面垫层又具有优良保温性能的材料，以前多采用陶粒混凝土等材料，但自重大、保温性能差，而且较难泵送施工。由于泡沫混凝土是在现场整体浇注，保温找坡一次做成，省去了采用其他保温材料时需先做找坡层工序，加快了施工进度；由于强度高、刚度强、充填好，与水泥类基层或找平层粘结好，保温层下的水泥砂浆找平层可省去不做，节约了材料，降低了成本；泡沫混凝土保温层所需原材料均是价廉易得的当地材料，而且工艺、设备简单，施工方便，工人经简单培训、掌握了要领即能施工；粉煤灰是废物再利用，泡沫混凝土是环保生产链的终端产品，符合建设节能环保型建筑的时代要求[21]。具有轻质性、强度可调节性、低渗透性、高流动性、固化后的自立性等物理特性，且施工便捷、所需作业面小，因此，将泡沫混凝土技术用于公路拓宽工程，可有效解决公路拓宽工程中存在的难点，为临河软基地段的地基处理提供了一种新的技术手段[22]。

5.2. 国外泡沫混凝土的应用

在英国，泡沫混凝土的年市场规模估计约为 250,000~300,000 m³ 包括一个非常大的矿山稳定项目。加拿大西部估计每年的市场规模约为 50,000 m³。此外，在韩国，泡沫混凝土约 250,000 m³ 按建筑量计算，每年被用作地板采暖系统的重要组成部分。在中东，泡沫混凝土具有隔热和轻质等优越性能，使其成为减少地震不利影响和解决温度变化负面影响的合适材料。在荷兰，泡沫混凝土被用作道路底基层，因为要承载的荷载很低，用于建造桥墩，因为它的密度低，并且通过减小基础尺寸和墙壁厚度而大大节省了成本。此外，泡沫混凝土应用在修复和修复时具有成本效益。

泡沫混凝土的其他典型用途用于混凝土摊铺，以防止道路冻胀，隔离浅层基础系统和位置，防止桩盖下的冻胀和浅桩的冻顶，用作灌浆填充废弃管道和埋地油田模块下的回填，降低热油罐和储罐支架下的温度，填充板下的空隙并减少热混凝土坑中的热应力和热梯度，从而使浅层隔热。

6. 未来发展方向

泡沫混凝土作为一种新型建筑材料因其与其他混凝土材料在某些性能上占据相当大的优势，当前已经受到社会各界的认可，并在实际建筑工程当中得到了广泛的应用。在保温隔热材料中更是取代了有机保温材料，具有广阔的应用前景。虽然在理论研究及其在实际应用中还存在着一定问题，但只要不断加强泡沫混凝土理论的深入研究，对其生产设备、生产工艺等方面的优化升级，另外结合泡沫混凝土的功能优势与建筑节能的国内发展形势，泡沫混凝土必定会成为我国最为重要的建筑“绿色”功能材料。

我国目前正大力推进符合生态节能、资源利用的建筑材料的研究和开发,发泡混凝土由于其良好性能使得应用前景广阔。从我国局部地区的泡沫混凝土砌块推广过程中来看,高性能和经济优化是生产应用所要达到的主要目标,其中包括研制高效发泡剂、原料与复合外加剂的选用配比以及对混凝土性能影响、工艺流程及设备优化等,进一步在理论和实践上解决好这些技术问题,对于泡沫混凝土的发展应用具有推动意义。

进一步扩展泡沫混凝土在公路工程中的应用,需要对以下几方面进入深入研究:1) 进一步完善泡沫混凝土的材料生产工艺和施工工艺,降低工程造价。2) 不断深入研究,提供发泡倍数更高、泡沫稳定性更好的高效发泡剂。3) 进一步研究泡沫混凝土各项工作性能的影响因素,提高其对各类施工条件和环境的适应能力。

7. 结论

根据现有的研究,观察到大多数研究仅限于评估泡沫混凝土性能,而不是关注泡沫本身的特性,或它如何影响泡沫混凝土基体的强度。混凝土中的泡沫稳定机制应被视为确保光滑几何形状以及均匀的硬化阶段和过程的最重要特征之一。尽管所需的密度和所需的强度取决于某些条件,即材料比例方法、指南和试错法,但没有标准方法可以精确确定泡沫混凝土的材料混合比例设计。稳定的发泡混凝土生产取决于许多因素,如发泡剂的种类、发泡剂的制备方法以引发气隙(气泡)的均匀分布、发泡材料部分的工艺、混合物的设计计算精度和发泡混凝土生产。为了生产具有高一一致性和稳定性的泡沫混凝土,建议减少泡沫剂的体积,使用粉煤灰或硅粉部分替代水泥,以及轻质骨料,从而减少水化热的过程。

参考文献

- [1] 郑靓,王新祥,王元光. 泡沫混凝土研究进展综述[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(11): 21-26.
- [2] Dhasindrakrishna, K., Pasupathy, K., Ramakrishnan, S. and Sanjayan, J. (2021) Progress, Current Thinking and Challenges in Geopolymer Foam Concrete Technology. *Cement and Concrete Composites*, **116**, Article ID: 103886. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103886>
- [3] 刘佳奇,霍冀川,雷永林,等. 发泡剂及泡沫混凝土的研究进展[J]. 化学工业与工程, 2010, 27(1): 73-78.
- [4] 余伟. 水泥基多孔材料微结构形成机理与传热行为的研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2014.
- [5] Averina, G.F., Zhivtcova, R.A. and Kovaleva, O.I. (2019) Modifying Non-Autoclaved Foamed Concrete Technology on the Magnesia Cement with Crystal Starter Seed Infusion. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **687**, Article ID: 022045. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/687/2/022045>
- [6] 赵国玺,朱玮瑶. 表面活性剂作用原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
- [7] Arzumanyan, A. (2019) Technological Peculiarities of Non Autoclaved Foam Concrete Production on the Base of Volcanic Pumice Aggregates. *Materials Science Forum*, **974**, 206-210. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.974.206>
- [8] Kumar, S. and Mandal, A. (2017) Investigation on Stabilization of CO₂ Foam by Ionic and Nonionic Surfactants in Presence of Different Additives for Application in Enhanced Oil Recovery. *Applied Surface Science*, **420**, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.05.126>
- [9] 孙乾. 改性 SiO₂ 纳米颗粒稳泡机理及渗流特征研究[D]: [博士学位论文]. 东营: 中国石油大学(华东), 2015.
- [10] Singh, L.P., Bhattacharyya, S.K., Kumar, R., Mishra, G., Sharma, U., Singh, G., et al. (2014) Sol-Gel Processing of Silica Nanoparticles and Their Applications. *Advances in Colloid and Interface Science*, **214**, 17-37. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.10.007>
- [11] 张文华,杨冯皓,吕毓静. 泡沫混凝土的稳泡措施和机理研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(10): 2266-2275.
- [12] 李森兰,王建平,路长发. 泡沫混凝土发泡剂评价指标及其测定方法探讨[J]. 混凝土, 2009(10): 71-73.
- [13] 范丽,张建旭. 泡沫稳定性对泡沫混凝土的影响以及稳定措施[J]. 科技信息, 2011(11): 258, 280.
- [14] Mordzich, M.M. (2019) Technology and Physico-Mechanical Properties of Claydite Foam Concrete for Monolithic and Prefabricated Construction. *Science & Technique*, **18**, 292-302.

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-292-302>

- [15] 尚帅旗, 李丹, 陈星明, 等. 泡沫混凝土的单轴抗压力学特性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(12): 24-29.
- [16] 贺彬, 黄海鲲, 杨江金. 轻质泡沫混凝土的吸水率研究[J]. 墙材革新与建筑节能, 2007(12): 24-28, 3.
- [17] 朱明, 王方刚, 张旭龙, 等. 泡沫混凝土孔结构与导热性能的关系研究[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(3): 20-25.
- [18] 宋京. 泡沫混凝土的节能保温等效果探析[J]. 安徽建筑, 2021, 28(6): 71-72, 74.
- [19] 张磊, 杨鼎宜. 轻质泡沫混凝土的研究及应用现状[J]. 混凝土, 2005(8): 44-48.
- [20] 鲁海梅, 徐斌, 孟国强. 屋面现浇水泥发泡混凝土[J]. 新型建筑材料, 2003(12): 56-57.
- [21] 阳廷亚. 泡沫混凝土屋面及楼地面保温施工探讨[J]. 科技信息, 2011(3): 315-316.
- [22] 项小伟. 泡沫混凝土在道路拓宽工程中的应用[J]. 科技创新与应用, 2013(31): 190-191.