

AAC在细观尺度上强度和热工性能的研究进展

周楠¹, 范学颖¹, 陈贡联^{1,2}

¹华北水利水电大学, 河南 郑州

²河南省生态建材工程国际联合实验室, 河南 郑州

收稿日期: 2022年11月30日; 录用日期: 2022年12月20日; 发布日期: 2022年12月31日

摘要

蒸压加气混凝土(Autoclaved Aerated Concrete, 简称AAC)作为一种新型绿色建筑材料, 是唯一能满足65%建筑节能设计标准要求的单一墙体材料, 集新型墙体材料、保温绿色材料、防火材料于一体, 是现阶段建材发展的主要产品之一。随着对墙体自保温要求越来越高, 自保温制品对导热系数的要求也更高。本文通过概括国内外相关学者对AAC的力学和热工性能的研究现状, 探讨了在细观尺度方面AAC改性性质的研究, 提出AAC的性能与孔的形式、孔隙率及孔壁的密实度等关系较大, AAC的优化生产技术也应围绕上述指标进行改进, 以达到指导AAC的生产及工程应用的目的。

关键词

蒸压加气混凝土(AAC), 力学性能, 热工性能, 细观尺度

Research Progress in Strength and Thermal Properties of AAC at Microscopic Mesoscale

Nan Zhou¹, Xueying Fan¹, Gonglian Chen^{1,2}

¹North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²International Joint Research Lab for Eco-Building Materials and Engineering of Henan, Zhengzhou Henan

Received: Nov. 30th, 2022; accepted: Dec. 20th, 2022; published: Dec. 31st, 2022

Abstract

As a new green building material, autoclaved aerated concrete (Abbreviation AAC) is the only single wall material that can meet the requirements of 65% building energy saving design standards, which integrates new wall materials, thermal insulation green materials and fire protection materials. It is one of the main products in the development of building materials at the present stage. With the increasing requirements for wall self-insulation, self-insulation products have higher

requirements for thermal conductivity. In this paper, the current research status of mechanical and thermal properties of AAC by relevant scholars at home and abroad were summarized, the study on the modification properties of AAC in mesoscale was discussed, and the performance of AAC was closely related to the form of the hole, porosity and the density of the hole wall was proposed. The optimized production technology of AAC should also be improved around the above indexes to achieve the purpose of guiding the production and engineering application of AAC.

Keywords

Autoclaved Aerated Concrete (AAC), Mechanical Property, Thermal Performance, Microscopic Scale

Copyright © 2022 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

城市化浪潮推动全球建筑业空前增长，对环境和气候问题构成挑战。中国能否实现 2030 “碳达峰”和 2060 年“碳中和”目标，建筑行业的角色至关重要。能源转型委员会(ETC) 2019 年发布的一份报告指出，中国的建筑业可以实现碳中和，但要在整个生命周期内实现建筑脱碳，就需要对该行业进行彻底改革。

外墙外保温系统作为建筑工程降低能耗的一项重要分项工程，是建筑行业实现“双碳”目标的重要路径。传统外墙外保温材料因其耐火性、耐久性差及施工复杂，易造成火灾、外墙剥落及施工工序增加，往往加剧经济损失。蒸压加气混凝土作为一种新型绿色建筑材料，是传统保温材料的良好替代品，是唯一一种能满足 65%建筑节能设计标准要求的单一墙体材料，为 A 级防火材料，具有集新型墙体材料、保温绿色材料、防火材料于一体的结构，且具有较好的耐久性和抗震性能，是现阶段建材发展的主要产品之一[1] [2]。

随着墙体自保温概念的提出，对 AAC 性能的要求却越来越高，本文主要阐述了 AAC 的组成材料对各种性能的影响，细观尺度上 AAC 的力学及热工性能——AAC 的重要工程应用指标，并总结了 AAC 的改性——AAC 的优化生产技术，提出通过关注 AAC 细观尺度的性质，在 AAC 材料强度→导热系数耦合、湿度→导热系数的耦合、及强度→韧性的耦合三个方面进行研究，以材料的细观机理为出发点，以试验结果和数值分析结果为评价手段，以模型化评价结果为依据，进行 AAC 改性质质的相关试配及中试试验，达到指导 AAC 的生产及工程应用的目的。

2. AAC 力学及热工性能的研究现状

2.1. AAC 的组成材料——影响 AAC 各种性能的本质因素

一般根据尺寸和研究方法的侧重点不同，将混凝土内部结构分为三个层次：1) 微观层次(Micro-level)；2) 细观层次(Meso-level)；3) 宏观层次(Macro-level)。

在混凝土孔的尺度分类方面，对于普通混凝土，国内外很多学者进行了分类，大致分为胶凝孔、毛细孔和宏观孔，各种孔在孔径和孔型上有很大差异，对材料性能的影响也不同。一般来讲，孔径越小，对混凝土的影响越小，而大孔径对混凝土的危害较大(图 1)。

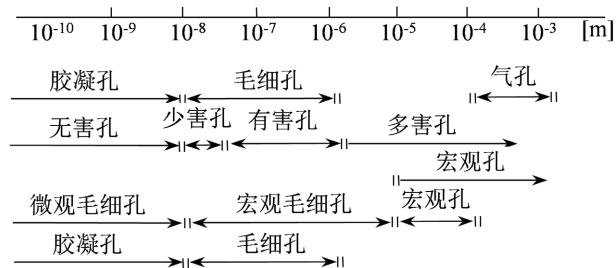


Figure 1. Classification of concrete mesoporous structures by different researchers [3]

图 1. 不同研究者对混凝土中孔结构的分类[3]

加气混凝土是一种由连续的固体相(水泥基体)和离散的气体相(空气孔洞)组成的两相多孔材料。加气混凝土中的孔由气孔和微观孔组成,气孔由发气剂发气后气体溢出所形成,形状呈圆球形或近似圆球形,孔径较大,一般在 0.5 mm~2 mm 范围内,微观孔则存在于气孔孔壁。AAC 孔隙率一般达 70%~80%,其中由铝粉在碱溶液中化学反应产生的氢气造成的气孔约占 45%~55%,此部分为气孔;由水分蒸发留下的毛细孔约占 20%~40% [3]。对于 AAC,气孔较大且较多,对混凝土的强度和导热性能影响也较大。

AAC 中气孔的形成与原材料的配比和生产时的工艺参数有直接的关系,研究发现铝组分对 AAC 的孔隙率有很大影响[3] [4] [5] [6] [7],利用铝粉、铝粉膏和高分散的铝颗粒可制备不同类型的 AAC。从孔形方面讲,AAC 内部的孔形状大部分为不规则球体,部分孔为连通孔,导致实际的导热系数高于理论值。研究表明,平均孔径的增大会削弱孔隙率对导热系数的影响,同时孔形会显著影响 AAC 的导热系数[8] [9] [10]。现有文献中一般描述孔形对强度或导热性能的影响,还未见固定一个参数——即不改变容重的前提下,相关的孔径、孔形控制研究。经过本文的前期尝试,确定改变孔径的两个因素:稳泡剂的掺量和铝粉倒入浆体后的搅拌时间(图 2 和图 3) [11];同时,干铝粉发气产生的气孔相比铝粉膏发气产生的气孔孔径小,且孔径较均匀。

普通混凝土孔结构的表征方法有光学法(SEM)、压汞法和气体渗透法,上述表征方法除光学法外都不太适合测试气孔[12]。光学法对 AAC 孔结构表征的一般程序是通过图像处理技术进行孔结构的表征[13] [14] [15] [16]。部分学者采用 CT 图像的三维重建技术对混凝土进行了三维微观尺度上的扫描并重建取得了较好的效果,但未考虑参数拓展[17] [18]。

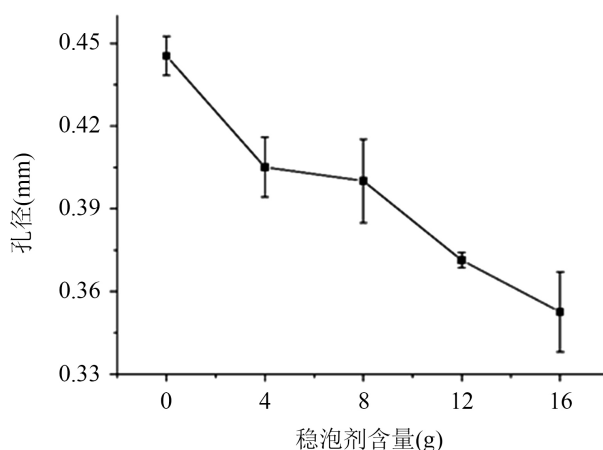


Figure 2. Effect of the content of foam stabilizer on pore size

图 2. 稳泡剂含量对孔径的影响

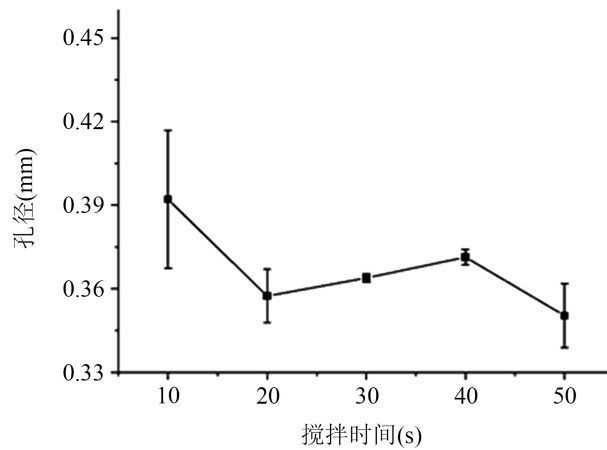


Figure 3. Influence of mixing time on pore diameter
图 3. 搅拌时间对孔径的影响

微观尺度上数值模拟, 从统计学角度讲, 随机气孔模型的生成对于后续的力学和热工分析具有重要意义。现阶段对于随机气孔模型的生成还未见有相关研究, 但对于普通混凝土随机骨料模型已有的研究较多[19] [20] [21] [22] [23]。从本文的前期研究结果来看, 由于加气混凝土中孔相对较多且较小, 建模时较为复杂, 建立在 MATLAB 基础上进行气孔的生成, 导入到有限元软件中再进行网格划分、计算的效果较好。

AAC 基质材料可认为除去孔之后的固体材料, 一般指孔壁材料。AAC 孔壁的水化产物以托贝莫来石为主的水化硅酸钙(C-S-H), 但不同强度的 AAC 孔壁的组成有所差异。AAC 的水化产物的比表面积比湿养加气混凝土水化产物的比表面积小得多, 说明其结构更致密[24] [25]。

为深入研究加气混凝土孔壁力学及传热特性及为有限元的微观建模提供数据支持, 需对蒸压加气混凝土基材进行试验研究。根据本文的前期研究结果[11], 蒸压养护时成品和基材的成分有差别, 故需对基材先预养护一段时间, 初试样品通过 XRD 分析和 SEM 图像扫描发现基材和成品内部晶体形状类似, 如图 4 和图 5 所示, 研究结果为加气混凝土的微观研究及有限元建模提供了支持。

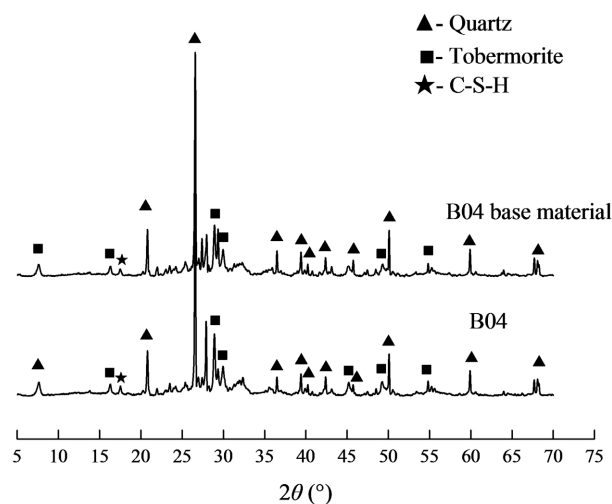


Figure 4. XRD diffraction spectrum of finished product and base material of B04 autoclaved aerated concrete
图 4. B04 级蒸压加气混凝土成品与基材 XRD 衍射谱图

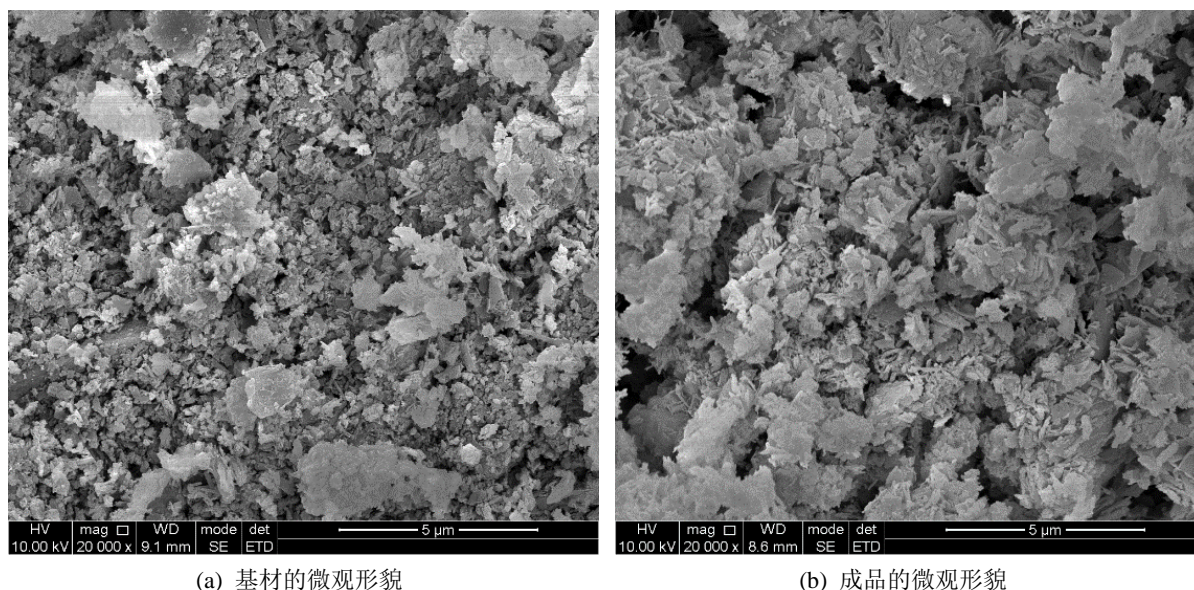


Figure 5. Micromorphology of autoclaved aerated concrete base material and finished product
图 5. 蒸压加气混凝土基材与成品的微观形貌

2.2. 细观尺度上 AAC 的力学及热工性能——AAC 的重要工程应用指标

AAC 的力学特性和热工性能是生产企业和研究者最为关注的问题，尤其是 AAC 在应用过程中的脆性问题。孔结构对普通混凝土强度的影响，现阶段的研究较多，都反映了随着孔隙率的增加，混凝土强度降低这一趋势，对于 AAC，同样如此[26] [27]，但都没有考虑孔径大小、孔的形貌等对强度的影响。对于普通混凝土也有学者研究了孔径分布，孔的形貌等对强度的影响[28] [29]，但均为针对胶凝孔或毛细孔的研究。

除基本力学性能外，近年来 AAC 在工程应用中的脆性行为也引起了工程人员的较大关注。脆性是表征混凝土性能的重要指标之一，如何评价脆性是混凝土类材料研究的重要课题，有学者用应变能、抗压强度、抗折强度等进行表征，但现阶段指标表征尚不统一[30]。

根据本文前期的 SEM 试验研究表明[11]，不同强度的 AAC，其细观组分不同(图 6)。当柳叶状的水化产物较多时，水化产物相互之间交错连接，使其形成一个整体，强度相对较高；当水化产物较少时，强度较低。从力学方面考虑，应是强度和变形能力的有效统一，其重要的表征方式是受压应力 - 应变全曲线。

对 AAC 力学性能的数值模拟，现阶段的研究较少，仅限于均质化材料的数值模拟[31]，而在细观尺度上对普通混凝土的数值模拟研究较多[32] [33] [34] [35] [36]。文献[37]通过对 EPS 轻集料混凝土的理论分析和细观尺度的有限元分析，建立了相应的强度模型，此模型不但能考虑孔隙率的影响，也可考虑孔形的影响。

从细观尺度导热系数模型方面讲，多孔混凝土的组成主要是其气孔结构和孔壁。孔径的大小、分布，孔的连通性以及气孔的形状都可对其性能产生影响，尤其是热工性能。常用的导热系数模型有串联模型，Maxwell-Eucken 模型，有效介质理论模型，Levy 模型等。这些模型仅利用多孔混凝土中两相即水泥集和空气相的导热系数和相应的体积分数来计算多孔混凝土的有效导热系数，并不能提供有关多孔混凝土孔结构的信息，而且这些通常不能准确预测多孔混凝土的导热系数[38] [39]。文献[40]采用离散元方法从接触导热模型和多尺度计算两方面入手，讨论了颗粒材料热传导问题的数值模拟方法，为从细观尺度进行热传导分析的一种新手段。

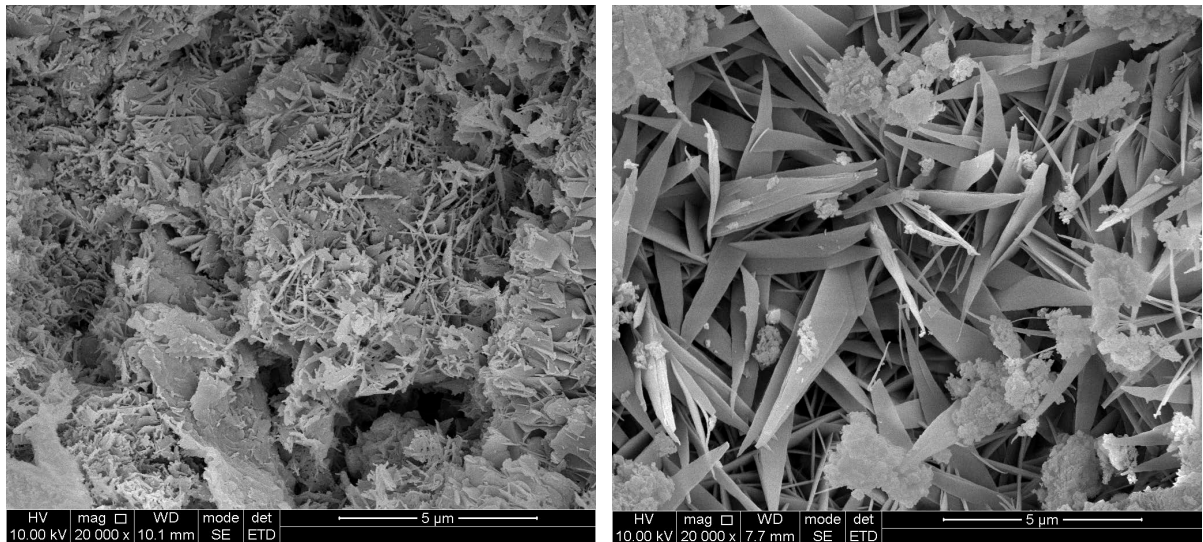


Figure 6. SEM scanning results of different strength AAC hydration products

图 6. 不同强度 AAC 水化产物的 SEM 扫描结果

加气混凝土含湿量对砌块导热系数有着较大影响，加气混凝土砌块墙体的含湿量变化规律是正确进行热工设计的基础，对其进行研究具有重要意义。现阶段国内外对加气混凝土的热湿耦合传递规律已有相关的研究，并建立了相关的湿热耦合模型[25] [41]，文献[42]研究了墙体的湿热耦合传递规律，建立了湿热耦合传递模型，并模拟分析了上海地区自然干燥状态下加气混凝土砌块墙体的热湿性能变化规律，但自然状态下蒸压加气混凝土墙体内部水分传递规律的实测现阶段研究较少。

3. AAC 改性的优化生产技术

材料宏观力学性能的本质在于细微观的材料组成，研究重点和难点在于优化后材料的生产工艺。从以上的分析可知，AAC 的性能与孔的形式、孔隙率及孔壁的密实度等关系较大，AAC 的优化生产技术也应围绕上述指标进行改进。

在 AAC 的基本配合比及制作工艺方面，我国加气混凝土协会多次出版加气混凝土生产工艺的指导手册[43]，在原材料及生产工艺方面进行了相应的指导，对于加气混凝土行业培训技术人员、指导生产都起到了较大的作用。但指导手册是普适性的手册，较难量化配合比和生产工艺；加之不同厂家生产工艺有差异，难以深入研究 AAC 的性能并对其产品进行提升。

具体到 AAC 的改性，在基本配合比和制作工艺的基础上，需多次试验来确定。相关研究[3] [4] [5] [6]认为水料比是影响 AAC 质量的一个关键参数，水料比将影响容重、孔隙率、孔径、孔型的分布；铝粉将影响 AAC 的发气特征，影响因素主要包括铝粉的细度、颗粒形貌、脱脂情况、发气初始温度等；石灰的品质不仅关系到 AAC 制品的内在性能，而且影响浇筑的稳定性，因此一直是技术人员关注的重点；石膏会影响石灰消化及料浆扩散度，从而影响到 AAC 孔的形成。

纳米材料具有小尺寸效应、量子效应、表面和界面效应、宏观量子隧道效应等特点，还拥有一系列的如电、磁、光、力学等方面的特性。目前在水泥混凝土行业应用最为成熟和广泛的纳米材料是纳米 SiO_2 和纳米 CaCO_3 。纳米超细颗粒可填充混凝土内部提高密实度，从而提高混凝土的性能，现已成为混凝土研究的热点问题[44] [45]，但对 AAC 的超细颗粒改性的研究相对较少[46] [47]。

现阶段对仅有的纳米 CaCO_3 用于 AAC 制品的研究表明[46]：不仅有助于硬化混凝土均匀性的改善，也有助于混凝土中孔隙和毛细孔的充填和“细化”，能明显地改善和增强混凝土及制品的结构强度，提

高匀质性和致密性，同时具有性能稳定、价格低廉的优势，具有很好的工程应用和研究价值。

在文献[48]的研究表明，纳米 CaCO_3 和纳米 SiO_2 可以有效地降低了水灰比(W/C)分别为 0.3 和 0.4 碳纤维混凝土(CFRC)的渗透性，纳米材料加入 W/C 到 0.3 的 CFRC 中会使得微结构孔隙率较低，而 W/C 达到 0.4 时，CFRC 微结构的连通性显著降低；纳米材料会降低混凝土的渗透性，并且纳米 CaCO_3 和纳米 SiO_2 对峰后性能的改善作用同样更为明显。文献[49]的研究表明，纳米 CaCO_3 影响水泥水化过程，加快了水化过程，提高了水泥砂浆的早龄期强度。纳米 CaCO_3 替代量为 2% 的试件表现出最佳的性能，突出了纳米 CaCO_3 颗粒对水泥砂浆性能的好处。由此可知，由于纳米碳酸钙的比表面积大使得需水量大，随着纳米碳酸钙的加入会降低混凝土的流动性，加入会加快水泥水化过程，提高抗压强度，增强混凝土的韧性，改善水泥浆体的微观结构，使得混凝土的微观结构更加均匀、密实。

将纳米材料引入，目的是对纳米材料改善孔壁之后对 AAC 强度和热工性能的影响量化。基于文献中的研究，加入纳米材料后 AAC 强度会增加已被证实；且加入纳米 SiO_2 会提高普通混凝土早期强度，这对 AAC 强度的提高更加有利[50]；而纳米材料对热工性能的影响还未知，基于文献[44]的 SEM 研究结果，加入纳米 CaCO_3 之后，孔结构较为致密，大孔减少而小孔和独立孔多，可见孔结构得到了较大改善，这些都会对热工性能起到有利作用。

改善 AAC 的脆性性质，现阶段思路是在配合比的基础上加入纤维，纤维形式有多种，有碳纤维、玄武岩纤维、玻璃纤维等，纤维的长度不一[51]-[56]。一般情况下，AAC 中加入纤维可明显改善 AAC 的脆性性质，但往往带来导热系数的增加，原因在于纤维的存在破坏了 AAC 孔结构的完整性[57]，同时纤维丝会起到热桥作用，增加 AAC 的导热系数[58]。本文前期进行了纤维丝增强 AAC 的试配研究，结果发现纤维丝在搅拌过程中会引起团聚现象，同时会影响 AAC 的发气。

在制作 AAC 时，对现有固体废物进行资源化应用是近期研究的焦点问题。一般情况下，在 AAC 的生产中，河砂或粉煤灰经常被用作二氧化硅源。然而，近年来由于为节约自然资源和保护环境而禁止开采河砂，建筑业中河砂的稀缺性日益突出；同时，用于生产 AAC 的 SiO_2 来源粉煤灰在建筑材料行业也变得不足。因此，有必要寻找替代硅质材料来生产 AAC。现阶段利用煤矸石、空冷渣、钢渣、铁尾矿、沸石和铜尾矿等各种固体废物制备 AAC 的研究已广泛开展，并取得了良好的效果[1] [59] [60] [61]。对固体废物变废为宝，本身可减少环境的污染，同时可节约所代替的原材料，无论经济价值还是社会、环境效益，均有较为积极的意义，符合现阶段的社会需求。

4. 结语

通过总结 AAC 细观尺度上强度和热工性能的研究进展发现，AAC 所表现出的力学性能、导热性能、湿热耦合关系等本质上在于材料性质。从材料细观尺度方面讲，孔、孔壁、水分的组成形式等性质是影响 AAC 上述性能的影响指标。故应重点关注 AAC 细观尺度的性质，在 AAC 材料强度→导热系数耦合、湿度→导热系数的耦合、及强度→韧性的耦合三个方面进行研究，以材料的细观机理为出发点，以试验结果和数值分析结果为评价手段，以模型化评价结果为依据，进行 AAC 改性性质的相关试配及中试试验，达到指导 AAC 的生产及工程应用的目的。

基金项目

河南省高等学校重点科研项目计划(23A560006)。

参考文献

- [1] Jiang, J., Ma, B., Cai, Q., *et al.* (2021) Utilization of ZSM-5 Waste for the Preparation of Autoclaved Aerated Concrete

- (AAC): Mechanical Properties and Reaction Products. *Construction and Building Materials*, **297**, Article ID: 123821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123821>
- [2] 河南省住房和城乡建设厅. DBJ41/T100-2015 砌块墙体保温体系技术规程[S]. 郑州: 郑州大学出版社, 2015.
- [3] 彭军芝. 蒸压加气混凝土中孔的形成、特征及对性能的影响研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [4] Fomina, E.V., Chulenyov, A.S. and Kozhukhova, N.I. (2018) Properties Control in Autoclave Aerated Concrete by Choosing of Pore Forming AL-Agent. *Materials Science and Engineering*, **365**, Article ID: 032044. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032044>
- [5] Lekūnaitė-Lukošiūnė, L., Balčiūnas, G. and Kligys, M. (2017) Influence of Micro Additives on Macrostructure of Autoclaved Aerated Concrete. *International Journal of Engineering Science Invention*, **6**, 72-79.
- [6] Hamad, A.J. (2014) Materials, Production, Properties and Application of Aerated Lightweight Concrete: Review. *International Journal of Materials Science and Engineering*, **2**, 152-157. <https://doi.org/10.12720/ijmse.2.2.152-157>
- [7] 胡新萍, 李翔宇, 韩保清, 邓庆阳. GEM 方程的多孔混凝土导热行为表征. *硅酸盐通报*, 2014, 33(10): 2597-2603.
- [8] 朱明, 王方刚, 张旭龙, 王发洲. 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.
- [9] Li, H., Zeng, Q. and Xu, S. (2017) Effect of Pore Shape on Thermal Conductivity of Partially Saturated Cement-Based Porous Composites. *Cement and Concrete Composites*, **81**, 87-96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.002>
- [10] Li, F., Chen, G., Zhang, Y., Hao, Y. and Si, Z. (2020) Fundamental Properties and Thermal Transferability of Masonry Built by Autoclaved Aerated Concrete Self-Insulation Blocks. *Materials*, **13**, Article No. 1680. <https://doi.org/10.3390/ma13071680>
- [11] Chen, G., Li, F., Jing, P., Geng, J. and Si, Z. (2021) Effect of Pore Structure on Thermal Conductivity and Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete. *Materials*, **14**, Article No. 339. <https://doi.org/10.3390/ma14020339>
- [12] 彭军芝. 蒸压加气混凝土孔结构及其对性能的影响研究进展[J]. *材料导报 A: 综述篇*, 2013, 27(8): 103-107.
- [13] 袁誉飞, 梁启成, 黄照明, 等. MATLAB 图像处理技术在加气混凝土孔结构研究中的应用[J]. *混凝土*, 2012, 268(2): 51-54.
- [14] 彭军芝, 彭小芹, 桂苗苗, 蔡振哲. 蒸压加气混凝土孔结构表征的图像分析方法[J]. *材料导报 B: 研究篇*, 2011, 25(1): 125-129.
- [15] 廖明顺. 多孔材料力学性能数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
- [16] 郭玉顺, 陆爱萍, 郭自力. 多孔混凝土成分、孔结构与力学性能关系的研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1996, 36(8): 44-49.
- [17] 田威, 党发宁, 陈厚群. 混凝土 CT 图像的 3 维重建技术[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(6): 12-15.
- [18] 毛灵涛, 刘永亮, 薛茹. 混凝土三维细观数值模拟与 CT 试验研究[J]. *混凝土*, 2015, 313(12): 7-11.
- [19] 柏巍, 彭刚. 蒙特卡罗法生成混凝土随机骨料模型的 ANSYS 实现[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2007, 25(4): 504-507.
- [20] 程书怀, 任志刚, 李培鹏, 上官瑾瑜. 基于 LS-DYNA 的混凝土三维随机凹凸型骨料数值建模[J]. *武汉理工大学学报*, 2014, 36(12): 89-94.
- [21] 叶志强, 焦生杰, 叶敏. 混凝土骨料预冷热力学仿真分析[J]. *水利水电技术*, 2014, 45(1): 84-89.
- [22] 张燕坤, 吴海英, 张兵. 基于细观层次的次轻混凝土受力性能数值模拟分析[J]. *混凝土*, 2015, 312(10): 1-3+13.
- [23] Chen, G., Li, F., Geng, J., Jing, P. and Si, Z. (2021) Identification, Generation of Autoclaved Aerated Concrete Pore Structure and Simulation of Its Influence on Thermal Conductivity. *Construction and Building Materials*, **294**, Article ID: 123572. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123572>
- [24] Ioannis, I., Andrea, H. and Christopher, H. (2008) Capillary Absorption of Water and *n*-Decane by Autoclaved Aerated Concrete. *Cement and Concrete Research*, **38**, 766-771. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.01.013>
- [25] Jin, H.-Q., Yao, X.-L., Fan, L.-W., Xu, X. and Yu, Z.-T. (2016) Experimental Determination and Fractal Modeling of the Effective Thermal Conductivity of Autoclaved Aerated Concrete: Effects of Moisture Content. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **92**, 589-602. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.103>
- [26] 郑万康, 郭树云. 加气混凝土孔结构及其与强度的关系[J]. *工业建筑*, 1982, 19(9): 38-40.
- [27] 孙抱真, 贾传久. 加气混凝土孔结构与强度的数学关系式[J]. *建筑节能*, 1983, 11(5): 25-27.
- [28] Arandigoyen, M. and Alvarez, J.I. (2007) Pore Structure and Mechanical Properties of Cement-Lime Mortars. *Cement and Concrete Research*, **37**, 767-775. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.023>
- [29] 金南国, 金贤玉, 郭剑飞. 混凝土孔结构与强度关系模型研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39(11):

- 1680-1684.
- [30] 吴剑锋, 李慧剑, 王彩华, 等. 基于强度表征的混凝土脆性指标影响因素研究[J]. 力学季刊, 2020, 41(3): 528-536.
- [31] Ferretti, D., Michelini, E. and Rosati, G. (2015) Cracking in Autoclaved Aerated Concrete: Experimental Investigation and XFEM Modeling. *Cement and Concrete Research*, **67**, 156-167. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.09.005>
- [32] 程书怀, 任志刚, 余细东, 付应兵. 钢纤维混凝土细观二维建模与数值研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(3): 69-74.
- [33] 秦武, 杜成斌. 基于 CT 切片的三维混凝土细观层次力学建模[J]. 工程力学, 2012, 29(7): 186-193.
- [34] 李鹏, 荆鹏飞, 耿静亚, 陈贡联. 蒸压加气混凝土等效导热系数的数值模拟研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 91-96.
- [35] 王从锋, 刘富德. 高透水混凝土细观抗压破坏数值仿真模拟研究[J]. 混凝土, 2010, 254(12): 14-16.
- [36] 李朝红, 王海龙, 徐光兴. 混凝土损伤断裂的三维细观数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(2): 463-469.
- [37] 程从密. EPS 轻集料混凝土组成结构与性能研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [38] 李翔宇, 赵青龙, 郭向勇, 曹力强. 泡沫混凝土导热系数模型研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 69-73.
- [39] 胡新萍, 李翔宇, 韩保清, 邓庆阳. GEM 方程的多孔混凝土导热行为表征[J]. 硅酸盐学报, 2014, 33(10): 2597-2603.
- [40] 周强. 基于离散元方法的颗粒材料热传导研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [41] Jerman, M., Keppert, M., Výborný, J. and Černý, R. (2013) Hygric, Thermal and Durability Properties of Autoclaved Aerated Concrete. *Construction and Building Materials*, **41**, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.036>
- [42] 黄建恩, 吕恒林, 冯伟, 等. 蒸压加气混凝土墙体热湿耦合传递特征[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 88-94.
- [43] 姜勇, 齐子刚. 蒸压加气混凝土生产技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2021.
- [44] Seddighi, F., Pachideh, G. and Salimbahrami, S.B. (2021) A Study of Mechanical and Mechanical and Microstructures Properties of Autoclaved Aerated Concrete Containing Nano-Graphene. *Journal of Building Engineering*, **43**, Article ID: 1034106. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103106>
- [45] Zhang, P., Wan, J., Wang, K. and Li, Q. (2017) Influence of Nano-SiO₂ on Properties of Fresh and Hardened High Performance Concrete: A State-of-the-Art Review. *Construction and Building Materials*, **148**, 648-658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059>
- [46] 应姗姗. 加气混凝土的纳米碳酸钙改性及高铝质加气混凝土的制备[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [47] 应姗姗, 钱晓倩, 詹树林. 纳米碳酸钙对蒸压加气混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(6): 1254-1259.
- [48] Liu, R., Xiao, H., Geng, J., Du, J. and Liu, M. (2020) Effect of Nano-CaCO₃ and Nano-SiO₂ on Improving the Properties of Carbon Fibre-Reinforced Concrete and Their Pore-Structure Models. *Construction and Building Materials*, **244**, 118-297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118297>
- [49] Cosentino, I., Liendo, F., Arduino, M., et al. (2020) Nano CaCO₃ Particles in Cement Mortars towards Developing a Circular Economy in the Cement Industry. *Procedia Structural Integrity*, **26**, 155-165. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.019>
- [50] Muid Norhasri, M.S., Hamidah, M.S. and Fadzil, A.M. (2017) Applications of Using Nano Material in Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*, **133**, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005>
- [51] 杨东升, 杨小春, 赵玉印. 不同长度玻璃纤维对陈积粉煤灰假凝混凝土力学性能影响[J]. 混凝土, 2019, 41(12): 92-94.
- [52] 吕信敏, 陈国新, 王佳慧, 陈亮亮. 纤维增强型蒸压加气混凝土砌块力学性能研究[J]. 混凝土, 2015, 37(2): 114-117.
- [53] 李敏, 吴智深. 短切玄武岩纤维增强低导热型加气混凝土的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(S2): 61-65.
- [54] Ayudhya, B.I.N. (2016) Comparison of Compressive and Splitting Tensile Strength of Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Containing Water Hyacinth and Polypropylene Fibre Subjected to Elevated Temperatures. *Materials and Structures*, **49**, 1455-1468. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0588-4>
- [55] Pehlivanlı, Z.O. and Uzun, İ. (2022) Effect of Polypropylene Fiber Length on Mechanical and Thermal Properties of Autoclaved Aerated Concrete. *Construction and Building Materials*, **322**, Article ID: 126506.

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126506>
- [56] He, T., Xu, R., Da, Y., *et al.* (2019) Experiential Study of High-Performance Autoclaved Concrete Produced with Recycled Wood Fibre and Rubber Powder. *Journal of Cleaner Production*, **234**, 559-567.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.276>
- [57] Pehlivanlı, Z.O., Uzun, İ., Yücel, Z.P. and Demir, İ. (2016) The Effect of Different Fiber Reinforcement on the Thermal and Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete. *Construction and Building Materials*, **112**, 325-330.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.223>
- [58] Xargay, H., Folino, P., Nuñez, N., *et al.* (2018) Acoustic Emission Behavior of Thermally Damaged Self-Compacting High Strength Fiber Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials*, **187**, 519-530.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.156>
- [59] Peng, Y., Liu, Y., Zhan, B. and Xu, G. (2021) Preparation of Autoclaved Aerated Concrete by Using Graphite Tailings as an Alternative Silica Source. *Construction and Building Materials*, **267**, Article ID: 121792.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121792>
- [60] Wan, H., Hu, Y., Liu, G. and Qu, Y. (2018) Study on the Structure and Properties of Autoclaved Aerated Concrete Produced with the Stone-Sawing Mud. *Construction and Building Materials*, **184**, 20-26.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.214>
- [61] Jiang, J., Cai, Q., Ma, B., *et al.* (2021) Effect of ZSM-5 Waste Dosage on the Properties of Autoclaved Aerated Concrete. *Construction and Building Materials*, **278**, Article ID: 122114.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122114>