第 49 卷第 2 期
2021 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 2
February，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200316

综 合 评 述

泡沫混凝土的研究进展与应用

宋 强[1]，张 鹏[1]，鲍玖文[1]，薛善彬[1]，牟世宁[2]，韩向阳[3]

(1. 青岛理工大学土木工程学院，山东 青岛 266033；2. 烟台三力轻质混凝土科技有限公司，山东 烟台 265500；
3. 山东铭城环保新材料科技有限公司，山东 淄博 255190)

摘 要：泡沫混凝土是近年来广泛研究和应用的高性能结构保温材料，不仅轻质，而且具有保温、耐火、隔音等优异性能。泡沫混凝土的性能参数众多，但其主要性能是抗压强度和导热系数。泡沫混凝土的抗压强度随密度增大而增大，导热性能随着密度的增大而降低，因此，抗压强度和导热系数的矛盾为泡沫混凝土的大规模推广应用造成不利影响。考虑密度、孔隙率、发泡剂、掺合料、水灰比等因素，从宏观规律和微观结构角度，综述泡沫混凝土抗压强度和导热系数变化；在此基础上，对轻质泡沫混凝土和保温结构一体化混凝土应用现状进行介绍，总结轻质泡沫混凝土塌模、保温结构不兼容、耐久性差等问题解决方案，指出现有研究的不足，为未来研究和应用提供方向与思路。

关键词：泡沫混凝土；抗压强度；密度；导热系数；保温结构；一体化
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)02–0398–13
网络出版时间：2021–01–04

Research Progress and Application of Foam Concrete

SONG Qiang[1], *ZHANG Peng*[1], *BAO Jiuwen*[1], *XUE Shanbin*[1], *MU Shining*[2], *HAN Xiangyang*[3]
(1. Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, Shandong, China;
2. Yantai Sanli Light Concrete Technology Co., Ltd, Yantai 265500, Shandong, China;
3. Shandong Mingcheng Ecological New Material Technology Co., Ltd, Zibo 255190, Shandong, China)

Abstract: Foam concrete as one of the most widely used and investigated construction materials with integrated structural insulation has various unique properties such as low self-weight, fire resistance and air borne sound insulation. The compressive strength and thermal conductivity of foam concrete are the key factors affecting the application. The compressive strength of foam concrete increases while the thermal conductivity decreases with the increase of the density, thus hindering the application. In this review, the effects of foaming agent, density, porosity, admixture and water cement ratio on the compressive strength and thermal conductivity were discussed. Recent research work on lightweight foam concrete and integration of thermal insulation structure foam concrete were summarized. The existing problems (*i.e.*, collapse of the slurry, incompatibility of mechanical and heat preservation properties and low durability) and the corresponding solutions to the problems were given. This review could provide a basis for future investigation and practical engineering application.

Keywords: foam concrete; compressive strength; density; thermal conductivity; insulation structure; integrated

经济增长与城市化进程的加快，使建筑需求与日俱增。然而在高层建筑和建筑工地频发的火灾成为影响行业发展和人民生命财产安全的隐患。2019 年应急管理部消防救援局公布全国火灾 23.3 万起，直接财产损失 36 亿元，其中高层建筑和建筑工地分别发生火灾 6 974 和 2 926 起，同比上升 10.6%和 5.8%[1]。在高层建筑和建筑工地火灾中，外墙保温材料着火占有相当比例。因此，提高外墙保温材料的防火性

收稿日期：2020–05–06。　修订日期：2020–06–04。
基金项目：国家自然科学基金(51922052，51778309，U1706222)；青岛市博士后应用研究项目(A2020-003)；山东省博士后创新项目(202003035)。
第一作者：宋 强(1990—)，男，博士。
通信作者：张 鹏(1981—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–05–06.　**Revised date:** 2020–06–04.
First author: SONG Qiang (1990−), male, Ph.D.
E-mail: songqiang3709@163.com
Correspondent author: ZHANG Peng (1981−), male, Ph.D., Professor.
E-mail: peng.zhang@qut.edu.cn

能，杜绝火灾隐患成为外墙保温材料研究的关键。

目前，常见的保温材料有聚苯乙烯、聚氨酯、酚醛塑料、矿物棉、陶瓷及泡沫混凝土。泡沫混凝土是将发泡剂水溶液制成泡沫，再将泡沫加入含硅质材料(粉煤灰和砂等)、钙质材料(水泥和石灰等)、水及外加剂组成的料浆中，混合搅拌和浇注成型、养护而成的轻质多孔建筑材料[2–4]。泡沫混凝土属于无机材料，耐火极限一般可达 3 h，是一种理想的耐火材料[5]。由于泡沫混凝土中制备过程中填充大量气孔，因而与传统混凝土相比具有轻质、保温、隔音和抗震等优点(表 1[6])，进而起到墙体保温、管道保温及框架填充墙的作用[7–9]。

2011 年住房与城乡建设部颁布泡沫混凝土行业标准(JG/T266—2011)，详细规定了泡沫混凝土干密度、强度、导热系数、吸水率、制品尺寸和耐火性等要求[9]。图 1[9]为泡沫混凝土行业标准中 A03、A04、A05 和 A06 等级的泡沫混凝土干密度、导热系数和强度范围。由图 1 可知，随着泡沫混凝土等级的升高，其强度和导热系数逐渐增大。由于过高的干密度为对于泡沫混凝土的浇制、安装和应用带来不便，而导热系数的增加又不利于墙体的保温效果。因此，研究并认识影响上述性能的宏观参数及微观机理，进而通过优化调控获得优异性能的泡沫混凝土成为研究的热点。

关于泡沫混凝土的发展历史、特性、制备工艺已有广泛而深入的介绍[10–13]。虽然泡沫混凝土的性能参数众多，包括干燥收缩性能、吸水和渗透率、抗压强度、抗拉强度、抗弯强度、弹性模量、导热性和耐火性等，但是泡沫混凝土的强度和保温系数始终影响其推广和应用的关键。为此，立足应用，围绕影响泡沫混凝土的抗压强度和保温系数简要介绍取得研究进展及应用情况。

表 1　泡沫混凝土与普通混凝土性能对比

Table 1　Properties comparison of foam concrete and ordinary concrete

Sample	Density/ ($kg·m^{-3}$)	Compressive strength/MPa	Bending strength/MPa	Modulus of elasticity/GPa	Drying shrinkage	Thermal conductivity/ ($W·m^{-1}·K^{-1}$)	Freeze/thawing properties/%	Flowability/ mm
Foam concrete	400–1 600	0.5–10	0.1–0.7	0.3–1.2	1 500–3 500	0.11–0.30	90–97	>200
Ordinary concrete	2 200–2 400	30–80	3–8	20–30	600–900	2.0	90–97	>200

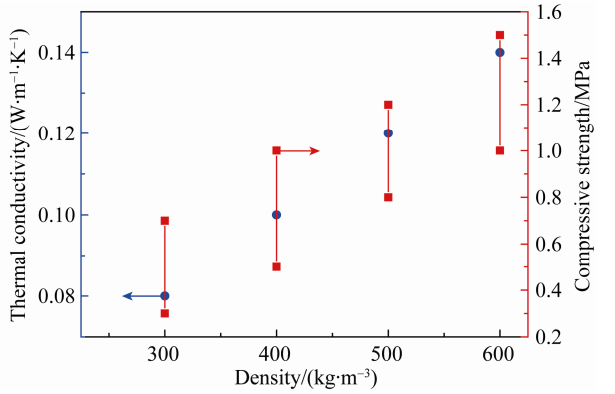


图 1　混凝土密度与抗压强度和导热系数关系[9]

Fig. 1　Relationship between density of foam concrete and its thermal conductivity and compressive strength[9]

1　抗压强度

1.1　密度及孔隙率

抗压强度是泡沫混凝土最主要的性能参数之一。影响泡沫混凝土抗压强度的因素众多包括密度(孔隙率)、骨料和掺合料、水灰比等，密度是影响其抗压强度主要因素之一。通过对国内外文献综述发现，泡沫混凝土的抗压强度随着其密度增大而增大[14–21](图 2)。为定量描述泡沫混凝土密度与抗压强度关系，张磊蕾[22]采用蛋白质发泡剂和 42.5 级快硬硫铝酸盐水泥制作不同密度的泡沫混凝土，并测试其抗压强度，实验结果如图 3 所示。由图 3 可知，泡沫混凝土密度与抗压强度具有较高的相关性，且随着密度的增大抗压强度迅速增大。随着泡沫混凝土密度等级的变化，泡沫混凝土内部形貌，尤其是泡沫尺寸发生明显变化，这说明泡沫混凝土孔结构是影响抗压强度的内在因素[23]。

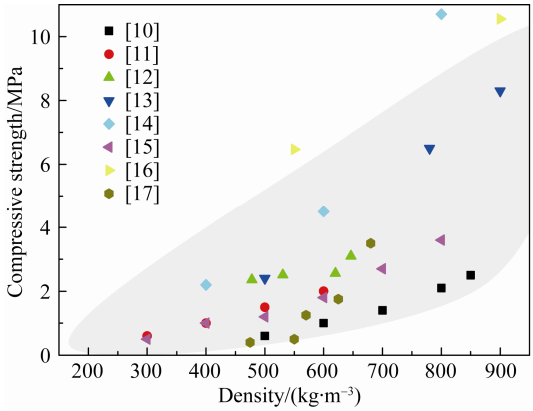


图 2　不同密度泡沫混凝土的抗压强度[14–21]

Fig. 2　Relationship between density of foam concrete and its compressive strength[14–21]

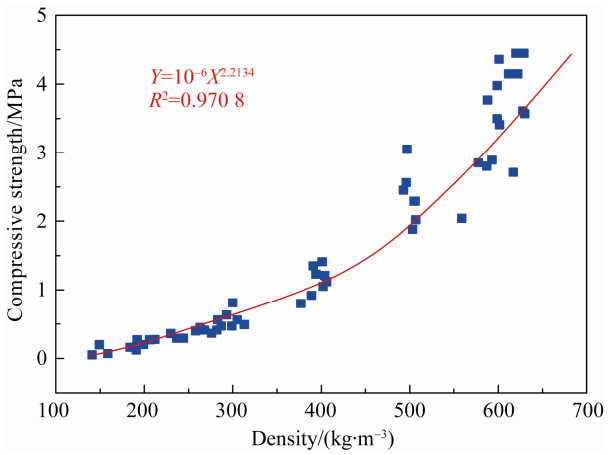


图 3 泡沫混凝土密度与抗压强度关系

Fig. 3 Relationship between density of foam concrete and its compressive strength

为了进一步揭示泡沫混凝土孔隙率与抗压强度关系，研究者进行了大量实验研究，并基于数据分析获得了相应的理论模型。例如，典型的泡沫混凝土强度与孔隙率模型有 Balshin 模型、Ryshkevitch 模型和 Hasselmann 模型[24–25]。其模型公式分别为：

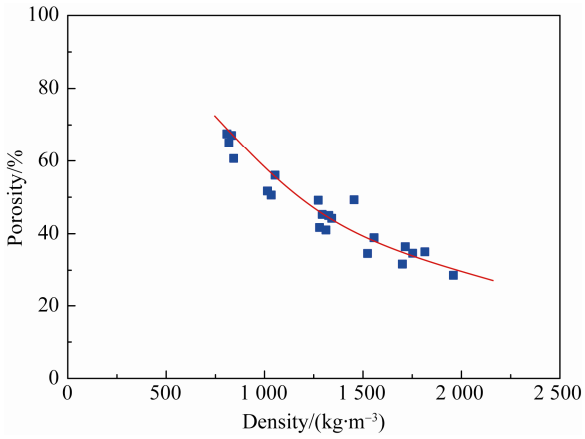
$$f_c = f_{c0}(1-\rho)^n \quad (1)$$

$$f_c = f_{c0}e^{-k\rho} \quad (2)$$

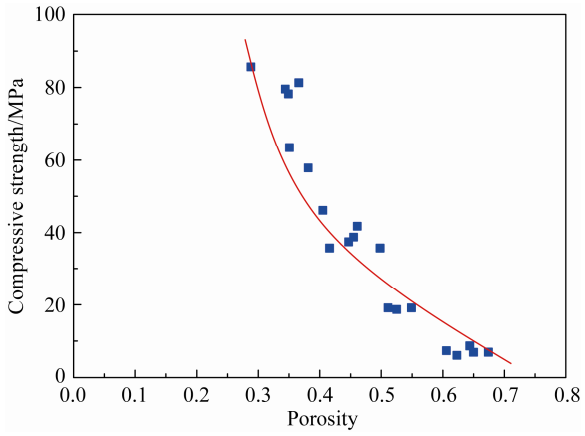
$$f_c = f_{c0} - \rho k \quad (3)$$

其中：f_c 为泡沫混凝土抗压强度；f_{c0} 为混凝土零孔隙率的理论抗压强度；p 为孔隙率；n、K 为常数。

Kearsley[26]研究了泡沫混凝土的孔隙率与干密度及抗压强度的关系(图 4)。并将实验结果代入模型验证获得了相应的 f_{c0}、n 和 K 值，即 Balshin 模型中 f_{co} 和 n 分别为 321 和 3.6，Ryshkevithc 模型中 f_{co} 和 k 分别为 981 和 7.43，Hasselmann 模型中 f_{co} 和 k 分别为 137 和 226。Kearsley 认为泡沫混凝土孔隙率主要取决于其干密度而不是水泥种类。随着泡沫混凝土干密度减小，其孔隙率逐渐增大，孔隙率增大又造成抗压强度的降低。此外，关凌岳[27]还研究了 3、7、28 d 养护条件下泡沫混凝土的孔隙率、干密度及抗压强度关系，也发现了与 Kearsley 相似规律。Visagie[28]研究不同密度的泡沫混凝土抗压强度的决定因素时发现，当泡沫混凝土密度<1 000 kg/m^3 时，孔隙率是决定其抗压强度的主要因素，即提高孔隙率会降低抗压强度，而当泡沫混凝土密度>1 000 kg/m^3 时，浆体的固相组成对泡沫混凝土抗压强度的影响更为显著。由此可见，孔隙率对泡沫混凝土抗压强度的影响在一定密度范围内显著。



(a)



(b)

图 4 泡沫混凝土的孔隙度与干密度及抗压强度的关系

Fig. 4 Relationship between porosity of foam concrete and its density and compressive strength

值得注意的是，尽管以上研究者基于大量实验数据推导了泡沫混凝土强度经验公式，但是还存在强度预测模型局限性高，影响强度的机制认识不清晰等问题。除了研究泡沫混凝土孔隙率对强度的作用规律，研究者还关注了泡沫混凝土中的孔尺寸和形状对其强度影响[29]。孙伟[30]将混凝土中的孔按孔径大小分为无害孔(<20 nm)、少害孔(20~50 nm)、有害孔(50~200 nm)和多害孔(>200 nm)。嵇鹰[31]借助图像分析技术考察了粉煤灰对泡沫混凝土微观孔的改善作用，研究发现粉煤灰可以减少泡沫混凝土气孔中多害孔。此外对>10 μm 宏观孔的研究发现，粉煤灰可以降低>500 μm 孔数量，从而提高泡沫混凝土的性能。Gong[32]借助 SEM 分析添加矿渣粉和硅灰对泡沫混凝土孔结构影响，研究发现矿渣粉和硅灰添加使泡沫混凝土孔径分布均匀，孔径减小，连接孔减少，有利于强度和抗冻性能提升。由以上研究可知，泡沫混凝土的密度是影响抗压强度的主要因素，而密度改

变影响其内部孔隙结构，均匀分布的球形孔隙有利于泡沫混凝土抗压强度的提高[33]。因此，研究泡沫混凝土孔隙率、孔径分布、孔尺寸、孔形状等微观因素是认识泡沫混凝土强度变化的关键。

1.2　发泡剂

由于泡沫混凝土的强度性能依靠内部孔结构维持，因此选择合适的发泡剂，获得合适尺寸、分布及寿命的泡沫成为泡沫混凝土优异力学性能的关键。泡沫混凝土用发泡剂主要有物理发泡剂和化学发泡剂两大类。物理发泡剂是指通过发泡剂高压空气或者机械搅拌形式预先制好泡沫，随后掺入料浆中，通过进一步搅拌、养护浇筑制备泡沫混凝土的方法；化学发泡法是指通过在料浆中加入化学药剂，使之发生化学反应，产生气体膨胀料浆，进而通过硬化后获得泡沫混凝土的方法。有研究表明，物理发泡剂比化学发泡剂形成的气泡特征更均匀，而化学发泡剂法适合应用于预制生产工艺中[34]。目前，物理发泡剂主要有松香树脂、表面活性剂、动植物蛋白和复合型 4 类。表 2 为部国外分典型物理发泡剂种类、机制、特点及性能介绍。

表 2　物理发泡剂种类、机制、特点和性能介绍

Table 2　Types, mechanism, characteristics and properties of physical foaming agent

Type	Mechanism	Characteristics	Properties
Rosin resin	Its tricyclic backbone of rosin has excellent hydrophobicity	Natural origin, low price, abundance and chemical modification[35]	The initial foam height is 110 mm while corresponding foam height is 33 mm after 5 min[36]
Surfactants	It have a strong tendency to aggregate and arrange at the water-air interface via hydrophobic interactions[37]	Higher surface activity, foamability and foam stability	Gemini surfactants produces homogeneous air voids with larger number and smaller size than that of their single-chained analogue[38]
Protein foaming agent	As the peptide linkage of large protein molecules breaks, more hydrophobic small molecules are formed. This process not only reduces the surface tension of the solution and creates an interface for air bubbles, but the hydrogen bonds between molecular groups help develop stable air bubbles[39]	Protein foaming agent results in smaller isolated spherical air voids and fewer connected pores[40]	The protein agent (Foamtech) is diluted with water to a ratio of 1:40 and then aerates to 70 kg/m^3 density[26]
Compound foaming agent	Compound foaming agent has both the effect of protein foaming agent and Surfactants	Compound foaming agent has small pore size, better porous structure uniformity and good process controllability[41]	Compound foaming agent has more stability than the protein foam at very low concentration[42]

由表 2 可知，松香发泡剂具有价格低廉和制作简单的优点，而松香发泡剂发泡质量差，通常适用于密度低于 600 kg/m^3 的泡沫混凝土。离子型发泡剂种类多种多样，包括阴离子、阳离子、非离子和两性离子发泡剂，不同类型离子型合成类发泡剂优缺点各异。通常阴离子和两性离子发泡剂发泡性能良好，但也存在稳定性差、价格昂贵等问题。动植物蛋白质发泡剂普遍泡沫稳定性好，发泡倍数高，但也存在成本高、适于超低密度(200~500 kg/m^3)泡沫混凝土的问题[43]。基于以上问题，研究者通过复配法实现发泡剂功能协同增效，然而目前复合型发泡剂种类复杂、泡沫混凝土性能差异明显[44–47]。

除了四种常见物理发泡剂外，双氧水、碳化钙(电石)和铵盐等化学类发泡剂也被广泛应用。化学发泡剂的气泡机制见式(4)~式(8)[48]。

$$2Al + 6H_2O_2 \rightarrow 2Al(OH)_3 \downarrow + 3H_2 \uparrow \quad (4)$$

$$Na_2CO_3 + H_2O_2 \rightarrow Na_2CO_3 \cdot 3H_2O_2 \quad (5)$$

$$H_2O_2 \rightarrow H_2O + O_2 \uparrow \quad (6)$$

$$CaC_2 + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2 \uparrow \quad (7)$$

$$NH^4 + OH^- \rightarrow H_2O + NH_3 \uparrow \quad (8)$$

化学发泡剂具有使用方便、可制备超低密度泡沫混凝土泡沫的优点，同时化学发泡剂普遍存在气泡尺寸不均匀，需要配合使用稳泡剂的问题。

1.3　骨料和掺合料

由于目前泡沫混凝土的胶凝材料以普通硅酸盐水泥为主，因此，骨料和掺合料的性质及用量成为影响其抗压强度的因素之一。目前骨料的选择以传统河砂为主，因此，砂的粒度对泡沫混凝土的性能有影响。Lim[49]对比 0.60、0.90、1.18 mm 和 2.36 mm 的砂制备泡沫混凝土[密度为(1 300±50) kg/m^3]时发现，使用 0.60 mm 砂制备泡沫混凝土与粗砂相比具有较高的抗压强度和抗弯强度，即降低骨料粒度有利于泡沫混凝土性能提升。除了以传统砂为骨料外，混凝土再生骨料以及多种多孔轻质材料(如采石场粉尘、粘土和污泥等)也被用于泡沫混凝土中，而再生骨料和多孔轻质材料的添加对泡沫混凝土的强度影响研究结论并不统一，例如 Sharipudin[50]和 Norlia[51]认为再生骨料可以显著提高泡沫混凝土的

抗压强度，而国内外学者也有研究证实再生骨料对泡沫混凝土强度影响不明显或有降低作用[52–53]。

在泡沫混凝土制备过程中粉煤灰是最常见的掺合料，粉煤灰的用量对泡沫混凝土的宏观强度和微观孔结构具有显著影响。例如，She[54]将粉煤灰制成泡沫混凝土用于高铁路基填充，研究发现 50%和 100%粉煤灰替代砂时，56 d 强度分别提高 2.6 和 2 倍。对泡沫混凝土微观结构分析表明添加粉煤灰的泡沫混凝土结构更加致密(图 5)，分析认为这可能与粉煤灰的火山灰效应有关。过高的粉煤灰添加量使泡沫混凝土强度降低，这说明粉煤灰添加量存在最优值。庞超明[55]采用计算机断层成像(X-CT)技术和 Image-Pro Plus 软件分析粉煤灰对泡沫混凝土孔隙影响。实验结果表明，粉煤灰掺入可以优化混凝土的孔径，特别是对<400 μm 的孔，这与嵇鹰[31]的研究结论相似。粉煤灰掺入除了可以降低泡沫混凝土的平均孔径，还可以改善孔的形状因子，增大圆形孔的比例。Chen[56]使用循环流化床燃烧粉煤灰、生石灰和铝酸盐水泥制备泡沫混凝土，实验发现粉煤灰的细度对泡沫混凝土力学性能影响明显，即使用细粒粉煤灰有利于气泡在颗粒表面的均匀分布，避免气泡合并成大孔，从而提高抗压强度。粉煤灰的微集料填充效应有利于其与水泥之间级配，而火山灰效应对砂浆有增强作用，因此添加粉煤灰有利于提高泡沫混凝土的力学性能。值得注意的是，过高的掺量可能影响泡沫混凝土的早期水化，造成水化物的胶凝性变差[57]。此外，Jones[58]还发现了使用粉煤灰作为泡沫混凝土掺合料，除了可以提高抗压强度外，还可以提高其流变性和抗腐蚀性。

除粉煤灰外，硅灰是常见的泡沫混凝土掺合料，硅灰的添加可以提高泡沫混凝土的强度[59]，而 Khan[60]研究发现，添加硅灰可以明显提高泡沫混凝土早期强度，但也会明显增加收缩率。李灵[61]采用 236.07 kg/m^3 水泥，29.96 kg/m^3 矿渣和 29.97 kg/m^3 硅灰制备 400 kg/m^3 的泡沫混凝土，获得 14 d 抗压强度 1.12 MPa，导热系数 0.16 W/(m·K)。研究发现，适量硅灰加入对泡沫混凝土前期和后期抗压强度增长均有利。Gökce[62]分别对比了添加 0、10 和 20%质量的粉煤灰和硅灰泡沫混凝土性能，发现硅灰对泡沫混凝土强度的提高及导热系数的降低效果要优于粉煤灰，当泡沫含量较高时，硅灰对泡沫混凝土性能提升效果更加显著。此外，钢渣、膨润土也被用于泡沫混凝土的制备中，但普遍认为二者对泡沫混凝土强度有降低作用[63]。

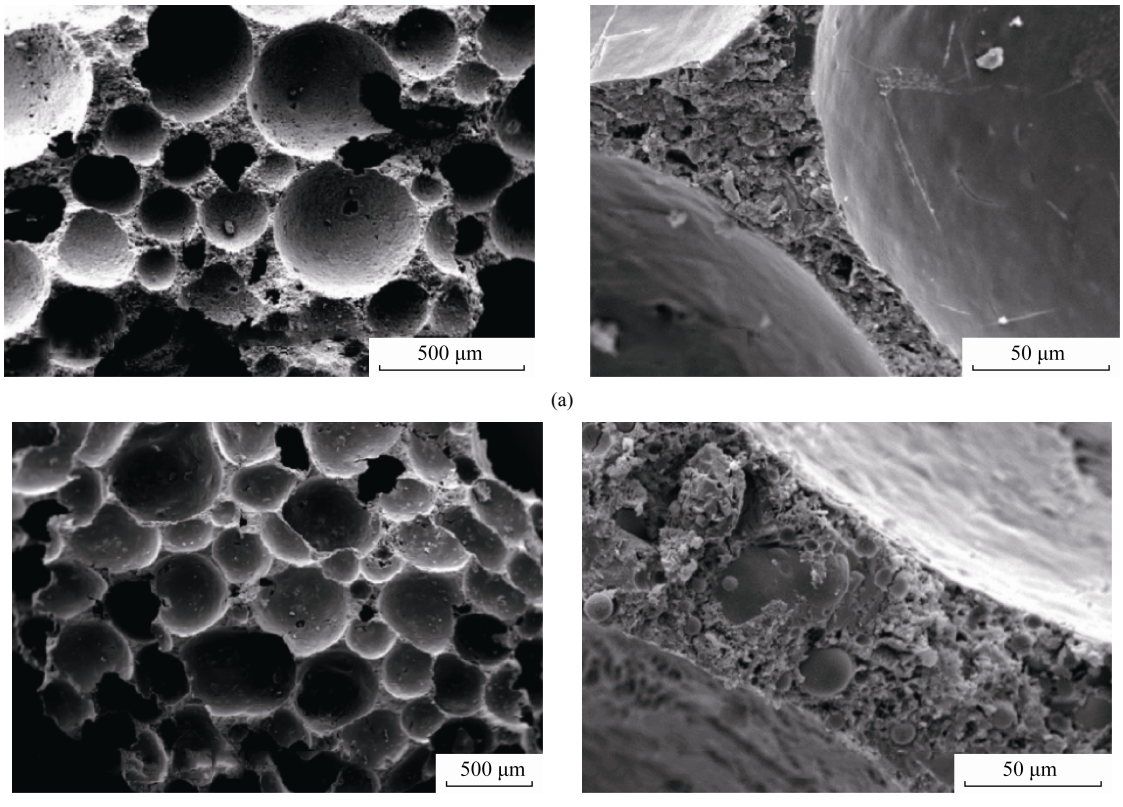


图 5 全砂(a)和 50%粉煤灰(b)泡沫混凝土养护 56 d 的微观结构

Fig. 5 Microstructure of cementitious cell wall with full sand (a) and with 50% FAc (b) curing for 56 d

1.4　其他因素

水灰比是影响泡沫混凝土强度的因素之一。当水灰比较低时，水泥等材料不能进行完整的水化反应，容易吸收泡沫中水分，进而造成泡沫混凝土初凝过程中泡沫破裂，最终导致封闭气孔的减少，泡沫混凝土强度减低[64]；当水灰比提高时，浆体的流动性增加，气泡在混凝土中分布均匀，有利于强度的升高；当水灰比过高，泡沫混凝土出现泌水现象，进而导致其强度降低[65]。按照典型水泥水化理论，水泥完全水化的水灰比为 0.38，泡沫混凝土水灰比可达 0.7[66]。而在实验设计过程发现，泡沫混凝土的水灰比通常为 0.45~0.6[67–69]，最小水灰比小于 0.3[70]。

纤维是制备泡沫混凝土常用的原料之一，主要分为天然纤维和化学纤维。天然纤维包括动物毛发、亚麻和黄麻等植物纤维，化学纤维包括聚丙烯纤维、玻璃纤维和碳纤维等。目前使用较多的纤维有聚丙烯纤维、玻璃纤维和聚乙烯醇纤维等。Cai[71]对比了线性聚丙烯纤维和网状聚丙烯纤维对 400 kg/m^3 混凝土抗压、抗拉和吸水性影响。实验结果表明，添加纤维对泡沫混凝土吸水率影响不大，适量添加可以提高泡沫混凝土抗压强度(60.7%)和抗折强度(71.2%)，且线性纤维性能优于网状纤维。Novais[72]使用废弃玻璃纤维制备泡沫混凝土时发现，掺加短且随机分布的玻璃纤维对抗压强度影响明显，当掺加 3%玻璃纤维时，抗压强度可提高 162%。Flores-Johnson[73]发现使用聚乙烯醇纤维可以增强泡沫混凝土试件的密实度，提高抗压强度。添加纤维除了可以降低泡沫混凝土收缩开裂、提高力学强度外，对提高泡沫混凝土抗冲击、抗折和抗疲劳有一定效果[74]。

2　导热系数

2.1　密度

泡沫混凝土的密度、孔隙率、发泡剂和掺合料是影响其导热系数的主要因素，其中密度对泡沫混凝土导热系数的影响尤为明显。

图 6 为 Gökçe[62]考察泡沫混凝土密度与导热系数关系。由图 6 可知，泡沫混凝土的导热系数与密度间呈抛物线关系，即随密度的增大，导热系数迅速增大。在高密度泡沫混凝土中，密度的小幅度增大会导致导热系数的大幅度增加；而对高强度/密度比的泡沫混凝土，强度/密度比对导热系数影响较小。Weigler[75]研究发现，泡沫混凝土密度每下降 100 kg/m^3，其导热系数下降 0.04 W/(m·K)。

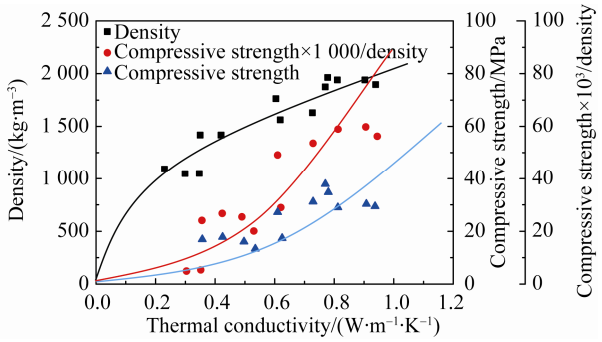


图 6　导热系数、密度、抗压强度及抗压强度/密度比间关系

Fig. 6　Relationships between thermal conductivity-density, compressive strength or strength/density ratio

2.2　孔隙率

泡沫混凝土孔隙率是影响其导热系数的关键因素之一。Fongang[76]在研究地聚合物泡沫混凝土孔隙率、导热系数和抗压强度时发现，泡沫混凝土孔隙率和连通孔是影响其导热系数的关键因素。国内关凌岳[27]通过考察了纯水泥泡沫混凝土干密度、孔隙率和导热系数的关系(图 7)发现，随着泡沫混凝土干密度的降低，其孔隙率逐渐升高，导热系数呈线性下降趋势。分析认为，由于泡沫混凝土主要靠固体内热传导作用，因此高孔隙率不利于热量传导。为了计算泡沫混凝土的导热系数，研究者提出了计算导热系数的并联模型[式(8)]、串联模型[式(9)]、Maxwell-Eucken 模型[式(10)和式(11)]和通用模型[式(12)][77]。

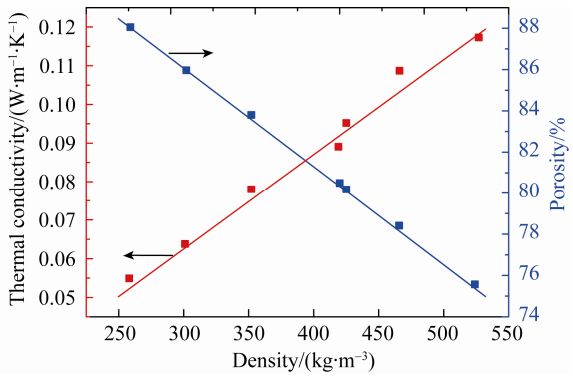


图 7　泡沫混凝土导热系数、密度、孔隙率的关系

Fig. 7　Relationships between density of foam concrete and its thermal conductivity and porosity

$$\lambda_e = (1-V)\lambda_1 + V\lambda_2 \tag{8}$$

$$\lambda_e = 1/[(1-V)\lambda_1 + V\lambda_2] \tag{9}$$

$$\lambda_e = \lambda_1 \frac{2\lambda_1+\lambda_2-2(\lambda_1-\lambda_2)V}{2\lambda_1+\lambda_2+(\lambda_1-\lambda_2)V} \tag{10}$$

$$\lambda_e = \lambda_2 \frac{2\lambda_2+\lambda_1-2(\lambda_2-\lambda_1)(1-V)}{2\lambda_2+\lambda_1+(\lambda_2-\lambda_1)(1-V)} \quad (11)$$

$$\lambda_e = \frac{\sum_{i=1}^{2}\lambda_i V_i \frac{d_i\lambda'}{(d_i-1)\lambda'+\lambda_i}}{\sum_{i=1}^{2} V_i \frac{d_i\lambda'}{(d_i-1)\lambda'+\lambda_i}} \quad (12)$$

其中：λ_e为导热系数；λ_1为固相导热系数；λ_2为气相导热系数；v为气孔率。λ_i和V_i为各成分导热系数和体积分数。通过文献[78]中数据代入上述公式计算发现，串联模型计算的导热系数随气孔率增大而增大；MaxwellEucken1 模型计算与实际值接近，但偏差较大；对通用模型 d 和 λ'赋值 3 和 0.3 W/(m·K)发现通用模型能够较好的预测泡沫混凝土导热系数。

2.3 发泡剂

发泡剂是影响泡沫混凝土导热系数的关键因素之一。化学发泡剂制备的泡沫混凝土导热系数通常与发泡剂反应产物有关。例如，使用碳酸氢钠为发泡剂制备泡沫混凝土气泡含有二氧化碳，使用铝粉和锌粉为发泡剂气泡含有氢气，使用双氧水为发泡剂的泡沫混凝土中气泡含有氧气。以上 3 种气体导热系数从大到小依次为氢气、氧气、二氧化碳，因此在其他参数相同条件下使用碳酸氢钠制备的泡沫混凝土导热系数更低[79]。使用发泡剂进行泡沫混凝土制备时，提高发泡剂用量可以增加泡沫混凝土内部孔隙，降低导热系数和表观密度[80]，但过高的发泡剂容易造成塌模、无法成型或收缩开裂等问题。此外，发泡时间的延长，会增加空气夹带，过长的发泡时间容易降低气泡稳定性，从而造成气泡破裂[10]。

蛋白质发泡剂和复合型发泡剂是常见的化学发泡剂。通常认为，蛋白质发泡剂能够产生体积小、均匀的气泡，有利于提高泡沫混凝土的性能参数[80]。Panesar[39]对比了 3 种发泡剂制备的 13 批泡沫混凝土，并对比了蛋白质发泡剂和复合发泡剂对泡沫混凝土性能参数影响。实验结果显示，使用蛋白质发泡剂的泡沫混凝土导热系数受干密度变化更加明显，而复合型发泡剂的导热系数更低，热阻更高。为了进一步提高蛋白质发泡剂发泡性能，研究者采用稳泡剂进行蛋白质发泡剂改性研究。礼航[81]使用三乙醇胺对蛋白质发泡剂改性，当三乙醇胺掺量为 0.1 mL 时，泡沫高度达 130 mm，发泡倍数为 16 倍，2 h 后泡沫高度为 70 mm。当使用甲醇进行改性时，泡沫高度可达 120 mm，发泡倍数 9 倍。

2.4 掺合料

如前所述，常见的泡沫混凝土掺合料有粉煤灰、矿渣和硅粉。其中，粉煤灰的粒度会影响其活性物质的分布，进而影响泡沫混凝土水化产物和孔隙分布。Wang 等[82]研究发现，当粉煤灰粒度为 0.25~0.5 mm 时，泡沫混凝土气孔均匀分布较好，泡沫混凝土 C-S-H (硅酸钙)含量较多，各项性能指标优异。在单一掺合料泡沫混凝土研究基础上，研究者进一步考察了复合掺合料对泡沫混凝土导热系数影响。杭美艳[83]研究了粉煤灰和矿渣粉掺量对泡沫混凝土导热系数影响，随着粉煤灰掺量的增加导热系数逐渐降低，当粉煤灰掺量>30%时，导热系数的下降效果不明显；粉煤灰和矿渣粉复合掺加，当二者比例大于 2:3 时，导热系数明显增大。此外，作为常见泡沫混凝土掺合料，硅粉对泡沫混凝土导热系数也有影响，研究表明，掺加硅粉可以降低泡沫混凝土导热系数，但过高的掺量又会造成其导热系数的升高[84]。

除了粉煤灰、硅灰等材料外，橡胶、废大理石和纤维也被用于泡沫混凝土制备。陈建银等[85]考察橡胶掺料对泡沫混凝土导热系数影响时发现，橡胶掺量越大，砂浆导热系数越低，当掺量>20%时，橡胶对砂浆导热系数的影响不明显；Zhang 等[86]研究硅灰和废大理石对多孔泡沫混凝土力学性能影响时发现，添加 10%硅灰和 5%~20%废大理石可以显著提高泡沫混凝土力学性能；纤维添加能显著改善泡沫混凝土的性能，通常认为纤维具有提高水泥基材料抗拉强度，阻止裂缝扩展和提高其形变能力。由于纤维可以割裂气泡，从而具有发泡作用，加之纤维乱向分布起到支撑料浆的作用，通常认为添加纤维可以降低泡沫混凝土导热系数[87]。Falliano 等[88]系统考察了 3 种纤维(聚丙烯、红麻和油棕纤维)对泡沫混凝土性能参数影响。实验结果表明，聚丙烯对干缩率和导热系数降低效果最明显。

3 泡沫混凝土的应用

得益于多孔的内部结构，泡沫混凝土展现出轻质、保温、隔音等优异性能。制备过程中多种固体废弃物掺料的使用提高了泡沫混凝土的经济效益和环保效益。目前，研究者从力学结构和保温性能两个角度出发不断拓宽泡沫混凝土的应用范围，泡沫混凝土的应用研究朝着轻质、一体化、高耐久性和多用途方向发展。

3.1 轻质泡沫混凝土

制备轻质泡沫混凝土的目的是进一步降低泡沫混凝土密度，获得优异保温性能，并为制备、运输

和安装带来便利。目前，用于外墙保温的泡沫混凝土保温板干密度可达 120~180 kg/cm^3，导热系数为 0.045~0.055 W/(m·K)，抗压强度为 0.15~0.50 MPa。然而在制备轻质泡沫混凝土过程中容易出现浆体塌模，造成泡沫破裂形成连通孔，进而造成沉降等问题[89]，尤其是当泡沫混凝土密度低于 400 kg/m^3 时沉降问题更为严重。为了解决上述问题，研究者通过完善药剂使用制度，掺加轻质材料等方法提高轻质泡沫混凝土的强度。

使用了促凝剂、消泡剂、增稠剂和稳泡剂等药剂提高气泡性能，其中促凝剂被认为可以减少水泥初凝和终凝时间，降低试件塌模率。李洋[90]对比了硫酸铝、硅酸钠和氯化钙促凝剂对泡沫混凝土沉降效果影响，实验发现硫酸铝和氯化钙具有较好的防沉降效果，进一步考察复配促凝剂对泡沫混凝土影响时得出，氯化钙和硫酸按照质量比为 7:8 时能明显改善凝结时间，降低浇筑沉降过程中的塌陷。除了促凝剂外，消泡剂、增稠剂和稳泡剂等也影响泡沫混凝土制备过程气泡特征，进而影响其性能。张旭[59]系统考察了干密度为 120 g/m^3 超轻泡沫混凝土制备过程中消泡剂、增稠剂和稳泡剂对超轻混凝土孔结构特征影响。研究发现消泡剂掺量为 0.2%时，消泡剂对降低了液相与气相间润湿角效果明显，促进了大气泡分散成微小气泡。当消泡剂掺量超过 0.25%时，大孔径气泡强度无法支撑料浆，出现料浆塌模；掺加增稠剂可以增强气泡稳定性，提高料浆粘聚。研究发现当增稠剂掺量小于 0.06%时，随着增稠剂掺量增加，轻质泡沫混凝土的孔径分布变窄，孔径分布集中。当增稠剂掺量超过 0.06%时，气泡孔径继续下降，形状因子变化减小，气孔壁密实度降低；稳泡剂掺加实验表明，掺加稳泡剂提高大气孔稳定性，降低分裂为小气孔概率。职红涛[47]优化了 5 种发泡剂和 8 种增稠剂使用参数，制备干密度为 300 kg/m^3 的泡沫混凝土，获得抗压强度为 0.45 MPa，导热系数为 0.073 W/(m·K)。为了解决单独使用药剂容易出现塌模的现象，任冰冰[91]复配促凝剂和早强剂实现了缩短水泥凝结时间同时提高试件内部骨架的早期强度的目的。

在制备轻质泡沫混凝土过程中，除了不断优化和完善药剂使用外，研究者通过添加轻质集料降低密度。常见的泡沫混凝土轻集料有粉煤灰、陶粒、聚苯乙烯等。掺加粉煤灰有利于泡沫减小以及气泡壁厚度的增加，且对泡沫混凝土的干燥收缩具有较好的抑制作用[92]，且粉煤灰掺量最高可达 75%[93]。但由于泡沫混凝土强度的需要，粉煤灰通常需要Ⅰ和Ⅱ级粉煤灰，且逐渐面临着市场供应短缺的问题[94]；利用陶粒等集料的增强性、抗缩性和泡沫混凝土的固结性，将陶粒、陶砂和沸石加入泡沫混凝土中，制成轻集料泡沫混凝土，可以有效克服收缩开裂等问题，并提高强度[9]。例如，李家和[95]以陶粒、礁砂和 42.5 号水泥为原料，制备表观密度为 910 kg/m^3 陶粒泡沫混凝土抗压强度和导热系数分别达 11.4 MPa 和 0.312 W/(m·K)。Wang[96]证实了陶粒泡沫混凝土导热系数、抗压强度与密度的线性关系，并提出设计密度为 600 kg/m^3 陶粒泡沫混凝土，陶粒掺量不超过 45%；聚苯乙烯颗粒是良好的隔热有机材料，使用有机超轻聚苯乙烯可以实现泡沫混凝土密度大幅度降低。鲁永明[97]采用堆密度大于 4 kg/m^3 的有机聚苯颗粒掺入泡沫混凝土，制备泡粒混凝土，获得保温性能、抗压抗裂性能优于普通泡沫混凝土的无机保温材料；纳米多孔二氧化硅气凝胶、废旧玻璃等[98–99]轻质材料的使用，也被证实可以降低泡沫混凝土密度，提高保温性能等参数。

值得注意的是，尽管以上研究为制备轻质泡沫混凝土及解决其存在的问题提供了研究思路，但轻质泡沫混凝土密度和保温系数与无机保温板仍存在明显差距。为此，通过制备参数优化实现泡沫混凝土密度<100 kg/m^3，获得具有良好保温系数和结构的低密度泡沫混凝土将是研究者继续关注的重点。

3.2　保温结构一体化泡沫混凝土

泡沫混凝结构性能随着干密度的增大而提高，但保温性能随着干密度的增大而降低，即单一材质的泡沫混凝土难以实现力学性能与热工性能兼顾。为了解决上述问题，研究者开发了复合墙板、保温砌块等具有保温结构一体化功能的混凝土材料。

复合墙板采用“三明治”构造方式，由主墙、辅墙和保温层组合而成。保温层由最初的挤塑聚苯乙烯泡沫塑料、聚苯乙烯逐渐转变成泡沫混凝土[100]。目前，通过对泡沫混凝土复合墙板的保温层和结构层优化基本满足了抗压强度和保温性能的要求。如，李从波[101]根据夏热冬暖地区居住建筑节能要求，选择陶粒混凝土和泡沫混凝土为结构层和保温层，设计了厚度为 150 mm 的保温夹芯复合墙体，通过有限元分析法获得，结构层理论压力为 15 MPa，保温层为 0.21 MPa 可满足竖向 10 MPa 载荷。考虑到保温砌块具有制备工艺简单、安装方便等优点。研究者在复合保温墙板研究基础上，开发了不同保温砌块。

将具有保温性能材料置于混凝土砌块内部制成保温砌块，可以实现内部保温，外部抗压的效果。为了提高保温砌块的综合性能，研究者对保温砌块的内部插入材料、孔洞数目等参数进行了优化。内部插入材料，通常有机聚乙烯和泡沫混凝土两种。由于有机聚乙烯保温性能优异，选择有机聚乙烯为内部填充料制备的砌块其保温性能优于填充泡沫混凝土。张旭[102]使用泡沫混凝土、火山灰渣混凝土和泡沫塑料保温堵头制成组合结构保温砌块，理论计算墙体传热系数为 0.339 W/(m·K)。Sariisik[103]以浮石骨料、轻质混凝土和发泡聚苯乙烯泡沫塑料制成了干密度为 562 kg/m^3，抗压强度为 2.99 MPa，导热系数为 0.33 W/(m·K)的保温砌块。丁晓燕[104]设计厚度为 280 mm 的 15 种 5 排孔混凝土砌块，外层使用陶粒混凝土为基体，内层插入聚苯板，制备保温砌块导热系数达 0.35 W/(m·K)，满足东北严寒地区节能要求。

随着近年来防火意识和要求的提高，以无机泡沫混凝土为内部填充料的保温砌块逐渐成为研究热点。选择无机内部填充料的保温砌块，通常有 3、4、5 排孔。梁晓旭[105]认为 3 排孔洞具有最佳的保温性能，理论计算得到保温砌块导热系数为 0.429 W/(m·K)可以满足严寒地区 9 层以上建筑的保温需求。杨召通[106]采用加权求和法优化保温结构一体化混凝土材料的热工性能、力学性能和经济性能。结合有限元软件 ABAQUS 对混凝土自保温空心砌块结构进行优化设计，将泡沫混凝土[导热系数和抗压强度分别为 0.060 2 W/(m·K)和 5.2 MPa]填充在空心砌块内制成了多排陶粒混凝土复合砌块。在加权求和法进行多目标优化后得出，交错程度和孔排数增大到一定程度，砌块热工和力学性能影响变小。研究结果表明，5 排孔复合砌块导热系数为 0.61 W/(m·K)，强度满足 MU10，能够用作承重墙使用。值得注意的是，以上保温砌块研究中发现砌块壁肋的传热系数较高，容易形成热桥，进而出现结露和发霉的现象[107]。

通过复合墙板和保温砌块的研究，制备了兼顾保温和结构一体化的泡沫混凝土材料，满足了不同地区的保温需求。目前对泡沫混凝土耐久性认识普遍不足，泡沫混凝土结构多孔性使其吸水率高、抗冻性差。为此，需要进一步研究如何提高泡沫混凝土耐久性，以提高泡沫混凝土对环境的抵抗力。

3.3 泡沫混凝土耐久性

如前所述，泡沫混凝土具有较高孔隙率，从而实现保温和轻质的功能，但泡沫混凝土的多孔性使其渗透率高、抗冻性差和易碳化。为此，认识泡沫混凝土耐久性及其影响因素是提高其推广应用的关键。

泡沫混凝土的密度、骨料及掺合料是影响其孔隙率，进而改变其渗透性宏观因素。如前所述，泡沫混凝土密度越低其孔隙率越高，抗渗性越差；骨料体积的增大会提高泡沫混凝土渗透性[108]；粉煤灰的微集料填充效应可以提高泡沫混凝土的密实度，降低渗透率。Kearsley[109]研究粉煤灰替代水泥对泡沫混凝土影响时发现，泡沫混凝土的孔隙率和吸水率主要受混凝土干密度影响，而粉煤灰的用量和种类对其影响不大。通过对泡沫混凝土孔隙结构分析发现，毛细孔和连通孔的水分渗入是影响泡沫混凝土渗透性的主要因素。泡沫的使用，泡沫混凝土的渗透率达到普通混凝土的 2 倍。针对泡沫泡沫混凝土高渗透性问题，通过涂刷硅烷类防水剂，使浆体表面形成憎水性聚硅氧烷，可以有效降低其渗透性。

冻融损伤是影响泡沫混凝土应用的主要因素之一。泡沫混凝土由于孔隙率高、孔壁薄、吸水率高，泡沫内水膨胀应力大，因而抗冻性差。Tsilivis[110]研究发现，掺加粉煤灰对泡沫混凝土抗冻效果影响不大。为了提高泡沫混凝土的抗冻性，郭雷[111]对泡沫混凝土分别涂刷硅烷防水剂和复合防水剂(硅烷类与 OS 类防水剂)，实验发现，对未掺纤维的泡沫混凝土涂抹硅烷防水剂使其冻融循环次数由 100 次，提高到 200 次。分析认为，硅烷防水剂中的甲基硅醇在碱性物质作用下，缩聚形成多缩硅醇，并与混凝土中的羟基作用形成聚硅氧烷，从而起到防水作用。

空气中的二氧化碳沿混凝土表层气孔扩散到毛细孔中与水化产物氢氧化钙反应，形成碳酸钙的过程称为碳化，碳化会使泡沫混凝土质地疏松、强度降低。由于低密度泡沫混凝土结构疏松，因此更容易发生碳化反应[58]。从制备泡沫混凝土水泥、骨料等因素出发，考虑其对碳化影响，是提高泡沫混凝土抗碳化能力的关键。由于泡沫混凝土制备过程中，掺入的矿渣、火山灰和粉煤灰等，易于水泥水化产物氢氧化钙反应，从而降低泡沫混凝土碱性，因此活性掺合料会影响泡沫混凝土抗碳化能力；降低水泥碱性可以提高泡沫混凝土的抗碳化性能，这是由于水泥碱性较高，容易造成水泥硬化产物 C-S-H 不稳定，增大孔隙。同时高碱水泥会加速二氧化碳吸附，从而提高碳化速率。

4　结论与展望

综上所述，作为新型节能材料，泡沫混凝土兼具轻质、保温、耐火等特点。泡沫混凝土性能参数众多，其中抗压强度和导热系数是最主要的参数。泡沫混凝土密度是影响其强度的主要因素，此外，选择细骨料、粉煤灰和硅灰掺合料、合适发泡剂和水灰比对提高泡沫混凝土抗压强度有促进作用；泡沫混凝土导热系数随密度增大而增大，随孔隙率的增大而降低。掺杂粉煤灰、硅灰、纤维和聚丙烯对导热系数具有降低作用。为了获得优异的保温性能，研究者通过调配外加剂(促凝剂、消泡剂、增稠剂和稳泡剂)、掺加轻质材料(粉煤灰、陶粒、聚苯乙烯)等方式制备轻质泡沫混凝土，掌握了外加药剂与轻质掺料对轻质泡沫混凝土结构和性能影响；在此基础上，为了兼顾泡沫混凝土保温性能和结构性能，研究者通过将外层结构层与内层保温层复合，制备保温结构一体化的复合墙板、保温砌块，通过制备材料、砌块孔洞优化，解决了传统泡沫混凝土保温和结构性能矛盾的问题。以上研究对于缓解泡沫混凝土塌模、提高泡沫混凝土性能和稳定性提供帮助，综合分析国内外研究现状，为了更好实现泡沫混凝土材料的研究和应用，如下问题值得重视：

1) 尽管泡沫混凝土的原料配比、药剂种类等宏观参数对其性能影响已被广泛研究，并在此基础上，构建了孔隙率、孔形状、连同孔数等与宏观性能关联，但仍需从微观角度揭示泡沫混凝土的改性机理、水化规律，研究泡沫混凝土水化产物对气泡成孔过程影响，为制备高性能泡沫混凝土提供理论依据。

2) 针对轻质泡沫混凝土和保温结构一体化复合墙板、砌块制备过程出现的难成型、易塌模、壁肋导热系数高等问题，研究者通过优化制备条件、使用高比强度材料等初步解决了上述问题。但由于制备过程使用的原料、药剂等种类多样，没有比较统一的预测模型，这为泡沫混凝土的规模化生产及施工带来不便。此外，探索和使用高质量发泡剂、胶凝材料、超轻骨料等有望成为解决轻质泡沫混凝土和保温结构一体化材料上述问题的关键。

3) 尽管泡沫混凝土的强度、保温性是主要性能参数，但泡沫混凝土的耐久性也是影响其工程应用的关键。研究者针对泡沫混凝土碳化、抗渗、抗冻等耐久性能已经进行了研究，但普遍认为泡沫混凝土结构多孔性使其吸水率高、抗冻性差。尽管在提高上述耐久性研究方面，研究者进行诸多尝试，但是提高一项性能对其他耐久性性能影响并未系统阐释，这将是未来研究的重点之一。

4) 基于丰富的孔隙结构和良好的保温性能，泡沫混凝土已经被用作保温材料、油田固井、飞机跑道阻拦系统、园林绿化、工程回填等，但其应用领域仍比较局限，研发适应多种复杂环境(温度、湿度、腐蚀和电磁等)的泡沫混凝土，拓展泡沫混凝土的新功能和新应用将是未来的研究方向。

参考文献:

[1] 中国消防年鉴 2019 [R]. 北京: 公安消防部, 2019.
China fire protection Yearbook 2019[R]. Beijing, Fire and Rescue Department Ministry of Emergency Management, 2019.

[2] 中国建筑能耗研究报告[R]. 上海: 中国建筑节能协会, 2018.
Research report on building energy consumption in China[R]. Shanghai: China Building Energy Conservation Association, 2018.

[3] ANANDA F H, BYERS L. An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling)[J]. Energy, 2016, 97: 517–527.

[4] 郑朋强, 陈卫忠, 谭贤君, 等. 软岩大变形巷道底臌破坏机制与支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34: 3143–3150.
ZHENG Pengqiang, CHEN Weizhong, TAN Xianjun, et al. Chin J Rock Mech Eng (in Chinese), 2015, 34: 3143–3150.

[5] VILCHES J, RAMEZANI M, NEITZERT T. Experimental investigation of the fire resistance of ultra-lightweight foam concrete[J]. Int J Adv Eng Appl, 2012, 1(4): 15–22.

[6] 周明杰, 王娜娜, 赵晓艳, 等. 泡沫混凝土的研究与应用最新进展[J]. 混凝土, 2009(4): 109–112.
ZHOU Mingjie, WANG Nana, ZHAO Xiaoyan, et al. Concrete (in Chinese), 2009(4): 109–112.

[7] 方永浩, 王锐, 庞二波, 等. 水泥–粉煤灰泡沫混凝土抗压强度与气孔结构的关系[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(1): 79–84.
FANG Yonghao, WANG Rui, PANG Erbo, et al. J Chin Ceram Soc, 2010, 38(1): 79–84.

[8] LIU M Y J, ALENGARAM J, JUNAAT M Z, et al. Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete[J]. Energ Build, 2014, 72: 238–245.

[9] MOHURD. JG/T266–2011 foam concrete[S]. Beijing: MOHURD, 2011.

[10] AMRITHA R, DHANYA S. Physical and functional characteristics of foam concrete: A review[J]. Constr Build Mater, 2019, 221: 787–799.

[11] 宋安祥, 郭远臣, 王雪, 等. 泡沫混凝土研究新进展与应用现状[J]. 混凝土, 2018, 347(9): 158–162.
SONG Anxiang, GUO Yuanchen, WANG Xue, et al. Concrete (in Chinese), 2018, 347(9): 158–162.

[12] MECHTCHERINE V, MARKIN V, WILL F, et al. Production of monolithic, load-bearing, heat-insulating wall structures by additive manufacturing with foam concrete[J]. Bauingenieur, 2019, 94: 405–415.

[13] NUR A J, LIEW Y M, HEAH C Y, et al. Correlation between pore structure, compressive strength and thermal conductivity of porous metakaolin geopolymer[J]. Constr Build Mater, 2020, 247: 118641.

[14] 柳厚祥, 郑智雄. 高地应力软岩公路隧道泡沫混凝土卸压机理及支护结构研究[J]. 中国公路学报, 2016, 29(11): 122–129.
LIU Houxiang, ZHENG Zhixiong. China J Highway Transp (in Chinese), 2016, 29(11): 122–129.

[15] 魏向明, 董超, 冯竟竟, 等. 双掺粉煤灰矿渣泡沫混凝土性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(7): 63–66.
WEI Xiangming, DONG Chao, FENG Jingjing, et al. China Concr Cem Prod (in Chinese), 2019(7): 63–66.

[16] CHUNG S Y, ELERAHMAN M A, KIM J S, et al. Comparison of lightweight aggregate and foamed concrete with the same density level using image-based characterizations[J]. Constr Build Mater, 2019, 211: 988–999.

[17] 余其俊, 林秋旺, 李方贤, 等. 硅酸钙板-纤维增强泡沫混凝土复合墙板的受压性能[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2017, 45(8): 88–95.
YU Qijun, LIN Qiuwang, LI Fangxian, et al. J S Chi Univ Technol (in Chinese), 2017, 45(8): 88–95.

[18] BATOOL F, RAFI M M, BINDIGANAVILE V. Microstructure and thermal conductivity of cement-based foam: A review[J]. J Build Eng, 2018, 20: 696–704.

[19] 贾艳涛, 杨永敢. 泡沫混凝土性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35: 2804–2809.
JIA Yantao, YANG Yonggan. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2016, 35: 2804–2809.

[20] SAMSON G, CYR M. Porous structure optimisation of flash-calcined metakaolin/fly ash geopolymer foam concrete[J]. Eur J Environ Civ En, 2018, 22(12): 1482–1498.

[21] KILINCARSLAN S, DAVRAZ M, AKCA M. The effect of pumice as aggregate on the mechanical and thermal properties of foam concrete[J]. Arab J Geosci, 2018, 11(11): 289–296.

[22] 张磊蕾. 泡沫混凝土的组成与性能、微结构的研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2011.
ZHANG Leilei. Research on the structure, properties and microstructure of foamed concrete (in Chinese, dissertation). Beijing: China Building Materials Academy, 2011.

[23] 胡艳丽, 郝晋高, 赵向敏, 等. 泡沫轻质混凝土性能与孔结构关系研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 363–366.
HU Yanli, HAO Jingao, ZHAO Xiangmin, et al. J Nanjing Univ Sci Technol (in Chinese), 2019, 43(3): 363–366.

[24] RÖBLER M, ODLER I. Investigation on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes: Effect of porosity[J]. Cem Concr Res, 1985, 15(2): 320–330.

[25] HOFF G C. Porosity-strength considerations for cellular concrete[J]. Cem Concr Res, 1972, 2(1): 91–100.

[26] KEARSLEY E P, WAINWRIGHT P J. The effect of porosity on the strength of foamed concrete[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(2): 233–239.

[27] 关凌岳. 泡沫混凝土孔结构表征与调控方法及其性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
GUAN Lingyue. Research on the air-void system characterization and regulation and properties of foamed concrete (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.

[28] VISAGIE M, KEARSLEY E. Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters[J]. Concr Beton, 2002, 101: 8–14.

[29] HE J, GAO Q, SONG X F, et al. Effect of foaming agent on physical and mechanical properties of alkali-activated slag foamed concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 226: 280–287.

[30] 廉慧珍. 建筑材料物相研究基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
LIANG Huizhen. Research basis of the phase of building materials[M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 1996.

[31] 嵇鹰, 张军, 武艳文, 等. 粉煤灰对泡沫混凝土气孔结构及抗压强度的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(11): 290–295.
JI Ying, ZHANG Jun, WU Yanwen, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2018, 37(11): 290–295.

[32] GONG J Q, ZHANG W J. The effects of pozzolanic powder on foam concrete pore structure and frost resistance[J]. Constr Build Mater, 2019, 208: 135–143.

[33] NARAYANAN N, RAMAMURTHY K. Microstructural investigations on aerated concrete[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(3): 457–464.

[34] HANG Z, PROVIS J L, REID A, et al. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction[J]. Constr Build Mater, 2014, 56(APR.): 113–127.

[35] SZYMON K, PAULA O, KORNELIA M M. Advances in rosin-based chemicals: The latest recipes, applications and future trends[J]. Molecules, 2019, 24(9): 1651–1701.

[36] YAN X, ZHAI Z, SONG Z, et al. Synthesis and properties of polyester-based polymeric surfactants from diterpenic rosin[J]. Ind Crop Prod, 2017, 108: 371–378.

[37] FOLEY P, POUR A K, BEACH E S, et al. Derivation and synthesis of renewable surfactants[J]. Chem Soc Rev, 2012, 41: 1499–1518.

[38] CHEN J, QIAO M, GAO N X, et al. Sulfonic gemini surfactants: Synthesis, properties and applications as novel air entraining agents for concrete[J]. Colloid Surfaces A, 2017, 522: 593–600.

[39] PANESAR D K. Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents[J]. Constr Build Mater, 2013, 44: 575–584.

[40] GRASSIA P, NEETHLING S J, CERVANTES C. The growth, drainage and bursting of foams[J]. Colloid Surfaces A, 2006, 274: 110–124.

[41] JULIA M V, ALBERTO M M, ANTONIO M R, et al. Surface properties and foam stability of protein/surfactant mixtures: theory and experiment[J]. J Phys Chem C, 2007, 111: 2715–2723.

[42] CONSTANTINER D. Discussion of the paper “Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology” by E.K. Kunhanandan Nambiar and K. Ramamurthy[J]. Cem Concr Compos, 2008, 30(2): 153–154.

[43] FALLIANO D, DOMENICO D D, RICCIARDI G, et al. Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density[J]. Constr Build Mater, 2018, 165, 20: 735–749.

[44] CHEN J, QIAO M, GAO N X, et al. Sulfonic gemini surfactants: Synthesis, properties and applications as novel air entraining agents for concrete[J]. Colloid Surfaces A, 2017, 522: 593–600.

[45] 石行波, 霍冀川, 李娴, 等. 动物蛋白发泡剂制备泡沫混凝土的研究[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(3): 609–612.
SHI Xingbo, HUO Jichuan, LI Xian. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2009, 28(3): 609–612.

[46] 戴民, 李秀, 魏征, 等. 泡沫混凝土复合发泡剂的实验研究[J]. 新型建筑材料, 2015(4): 40–43+62.
DAI Min, LI Xiu, WEI Zheng, et al. New Build Mater (in Chinese), 2015(4): 40–43+62.

[47] 职红涛. 轻质泡沫混凝土发泡剂的改性研究及应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
ZHI Hongtao. Research and application of modification of lightweight foam concrete foaming agent (in Chinese, dissertation). Zhenzhou: Zhengzhou University, 2019.

[48] 戴民, 贺中泽, 方鑫. 固体发泡剂制备泡沫混凝土的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 10: 101–103+119.
DAI Min, HE Zhongze, FANG Xin. New Build Mater (in Chinese), 2017, 10: 101–103+119.

[49] LIM S K, TAN C S, ZHAO X, et al. Strength and toughness of lightweight foamed concrete with different sand grading[J]. KSCE J Civ Eng, 2015, 19(7): 2191–2197.

[50] SHARIPUDIN S H, MOHD R, AHMAD R. Influence of waste paper sludge ash (WPSA) and fine recycled concrete aggregate (FRCA) on the compressive strength characteristic of foamed concrete[J]. Adv Mater Res, 2013, 626: 376–380.

[51] NORLIA M I, AMAT R C, RAHIM N L, et al. Performance of lightweight foamed concrete with replacement of concrete sludge aggregate as coarse aggregate[J]. Adv Mater Res, 2013, 689: 265–268.

[52] 黄芳美, 薛力梨, 刘红飞, 等. 用废弃发泡水泥制备轻骨料泡沫混凝土的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019, 273(1): 76–79.
HUANG Fangmei, XUE Lili, LIU Hongfei, et al. China Concr Cem Prod (in Chinese), 2019, 273(1): 76–79.

[53] FALADE F, IKPONMWOSA E, FAPOHUNDA C. A study on the compressive and tensile strength of foamed concrete containing pulverized bone as a partial replacement of cement[J]. J Therm Eng Appl, 2013, 13: 82–93.

[54] SHE W, ZHAO G T, FENG P, et al. Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds[J]. Constr Build Mater, 2018, 170: 153–166.

[55] 庞超明, 王少华. 泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1): 93–98.
PANG Chaoming, WANG Shaohua. J Build Mater (in Chinese), 2017, 20(1): 93–98.

[56] CHEN X M, YAN Y, LIU Y Z, et al. Utilization of circulating fluidized bed fly ash for the preparation of foam concrete[J]. Constr Build Mater, 2014, 54: 137–146.

[57] 佘伟. 水泥基多孔材料微结构形成机理与传热行为的研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
SHE Wei. Investigation of microstructure formation mechanism and thermal transfer behavior of cement based porous material (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2014.

[58] JONES M R, MCCARTHY A. Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete[J]. Fuel, 2005, 84: 1398–1409.

[59] 张旭, 王武祥, 杨鼎宜, 等. 超轻泡沫混凝土孔结构调控措施研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2255–2259+2267.
ZHANG Xu, WANG Wuxiang, YANG Dingyi, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2019, 38(7): 2255–2259+2267.

[60] KHAN M, ALI M. Improvement in concrete behavior with fly ash, silica-fume and coconut fibres[J]. Constr Build Mater, 2019, 203(10): 174–187.

[61] 李灵. 绿色节能建筑外墙保温材料力学及热工特性的研究——以泡沫混凝土为例[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.
LI Ling. Study on mechanics and thermal properties of exterior wall insulation materials for green energy-saving buildings-taking foam concrete as an example (in Chinese, dissertation). Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019.

[62] GÖKÇE HS, HATUNGIMANA D, RAMYAR K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete[J]. Constr Build Mater, 2019, 194: 1–11.

[63] 扈士凯, 李应权, 段策, 等. 矿物掺合料对泡沫混凝土基本性能的影响[J]. 新型墙材, 2009, 11: 27–29.
HU Shikai, LI Yingquan, DUAN Ce, et al. New Wall Mater (in Chinese), 2009, 11: 27–29.

[64] JUST A, MIDDENDORF B. Microstructure of high-strength foam concrete[J]. Mater Charact, 2008, 60(7): 741–748.

[65] 蒋俊, 卢忠远, 牛云辉, 等. 复合促凝剂对物理法超轻泡沫混凝土性能的影响研究[J]. 功能材料, 2015, 46(12): 12116–12121.
JIANG Jun, LU Zhonyuan, NIU Yunhui, et al. J Funct Mater (in Chinese), 2015, 46(12): 12116–12121.

[66] 蒋晓曙, 李莽. 泡沫混凝土的制备工艺及研究进展[J]. 混凝土, 2012, 1: 147–149.
JIANG Xiushu, Li Mang. Concrete (in Chinese), 2012, 1: 147–149.

[67] MOHAMMAD R, SAYYED A D, ALI S. Microstructure and mixture proportioning of non-structural foamed concrete with silica fume[J]. Mag Concr Res, 2017, 69(23): 1218–1230.

[68] 杜素云, 刘启顺, 操龙玉, 等. 泡沫混凝土在绍兴软基地段路基工程中的应用[J]. 混凝土, 2013, 4: 153–155.
DU Suyun, LIU Qishun, CAO Longyu, et al. Concrete (in Chinese), 2013, 4: 153–155.

[69] 杨杨, 申绘芳, 吴炎平. 内注泡沫混凝土对混凝土空心砌块力学性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2010, 7: 45–47+77.
YANG Yang, SHEN Huifang, WU Yanping. New Build Mater (in Chinese), 2010, 7: 45–47+77.

[70] AZADEH T, EBRAHIM N K, ALI A. Performance evaluation of foaming agents in cellular concrete based on foamed alkali-activated slag[J]. Can J Civ Eng, 2017, 44(11): 893–898.

[71] CAI Y D, WANG J S, LUO Y F, et al. Different performance of foam concrete caused by two types of fiber[J]. Adv Mater Res, 2014, 842: 156–159.

[72] NOVAIS R M, CARVALHEIRAS J, SEABRA M P, et al. Effective mechanical reinforcement of inorganic polymers using glass fibre waste[J]. J Cleaner Prod, 2017, 166: 343–349.

[73] FLORES-JOHNSON E A, LI Q M. Structural behaviour of composite sandwich panels with plain and fibre-reinforced foamed concrete cores and corrugated steel faces[J]. J Cleaner Prod, 2012, 94(5): 1555–1563.

[74] 刘超, 罗健林, 李秋义, 等. 泡沫混凝土的生产现状及未来发展趋势[J]. 现代化工, 2018, 38(9): 16–20+22.
LIU Chao, LUO Jianlin, LI Qiuyi, et al. Mod Chem Ind (in Chinese), 2018, 38(9): 16–20+22.

[75] WEIGLER H, KARL S. Structural lightweight aggregate concrete with reduced density—lightweight aggregate foamed concrete[J]. Int J Cem Compos Lightweight Concr, 1980, 2(2): 101–104.

[76] FONGANG R T, PEMNDJE J, LEMOUGNA P N, et al. Cleaner production of the lightweight insulating composites: Microstructure, pore network and thermal conductivity[J]. Energy Build, 2015, 107: 113–122.

[77] 李彬, 于水军, 陈晓利. 钢渣粉煤灰泡沫混凝土性质研究[J]. 墙材革新与建筑节能, 2015(9): 35–38.
LI Shan, YU Shuijun, CHEN Xiaoli. Wall Mater Innov Energ Sav Build (in Chinese), 2015(9): 35–38.

[78] SHE W, CHEN Y Q, ZHANG Y S, et al. Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete[J]. Constr Build Mater, 2013, 47: 1278–1291.

[79] 李天, 王智, 周涛涛. 泡沫混凝土的研究应用现状[J]. 混凝土, 2019, 1: 26–29.
LI Tian, WANG Zhi, ZHOU Taotao. Concrete (in Chinese), 2019, 1: 26–29.

[80] MUGAHED AMRAN Y H, FARZADNIA N, ABANG A A. Properties

and applications of foamed concrete, a review[J]. Constr Build Mater, 2015, 101: 990–1005

[81] 礼航. 蛋白质类发泡剂的改性研究及其在泡沫混凝土中的应用[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2012.
LI Hang. Modification research of protein foaming agent and its application in foam concrete (in Chinese, dissertation). Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.

[82] WANG S F, MA X, DU L, et al. Effect of particle size on fly ash on pore structure and properties of geopolymer[J]. Non-Metal Mines, 2017, 40(5): 5–8.

[83] 杭美艳, 杨冉. 矿物掺合料对泡沫混凝土的性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(4): 361–367.
HANG Meiyan, YANG Ran. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2018, 37(4): 361–367.

[84] 黄星浩, 张欣, 陈颖, 等. 硅粉对化学法泡沫混凝土性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2017, 338(12): 110–112.
HUANG Xinghao, ZHANG Xin, CHEN Ying, et al. Concrete (in Chinese), 2017, 338(12): 110–112.

[85] 陈建银, 张云莲, 孔德玉. 刻日轮胎橡胶粉对砂浆力学性能和导热系数的影响[J]. 混凝土, 2013, 9: 115–117.
CHEN Jianyin, ZHANG Yunlian, KONG Deyu. Concrete (in Chinese), 2013, 9: 115–117.

[86] ZHANG S R, CAO K L, WANG C, et al. Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 241: 117980.

[87] CHEN G X, WANG L. Mechanical and thermal properties of glass fibre-reinforced ceramsite-foamed concrete[J]. Indoor Built Environ, 2018, 27(7): 890–897.

[88] FALLIANO D, DOMENICO D D, RICCIARDI G, et al. Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density[J]. Constr Build Mater, 2019, 198: 479–493.

[89] 黄政宇, 孙庆丰, 周志敏. 硅酸盐-硫铝酸盐水泥超轻泡沫混凝土孔结构及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(9): 1894–1899.
HUANG Zhengyu, SUN Qingfeng, ZHOU Zhimin. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2013, 32(9): 1894–1899.

[90] 李洋, 潘志华. 超轻泡沫混凝土性能的优化研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(11): 74–78+95.
LI Yang, PAN Zhihua. New Build Mater (in Chinese), 2016, 43(11): 74–78+95.

[91] 任冰冰. 水泥基轻质保温材料的组成与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
REN Bingbing. Composition and performance of cement-based lightweight insulation materials (in Chinese, dissertation). Haerbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[92] JONES M, RODERICK OZLUTAS K, ZHENG L. High-volume, ultra-low-density fly ash foamed concrete[J]. Mag Concr Res, 2017, 69(22): 1146–1156.

[93] 赵铁军, 高倩, 王兆利. 大掺量粉煤灰对泡沫混凝土抗压强度的影响[J]. 粉煤灰, 2002, 14(6): 7–10.
ZHAO Tiejun, GAO Qian, WANG Zhaoli. Coal Ash (in Chinese), 2002, 14(6): 7–10.

[94] MA S H, XU M D, QI Q G, et al. Challenges and developments in the utilization of fly ash in China[J]. Int Jo Environ Sci Develop, 2017, 8(11): 781–785.

[95] 李家和, 张志春. 陶粒泡沫混凝土强度及其影响因素研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 3: 79–83.
LI Jiahe, ZHANG Zhichun. J Harbin Univer Civil Eng Archit (in Chinese), 2002, 3: 79–83.

[96] WANG Q X, SHI X Y, SHI J B, et al. An experimental study on thermal conductivity of ceramsite cellular concrete[J]. Int J Concr Struct Mater, 2015, 4: 55–62.

[97] 鲁永明. 现浇泡粒混凝土的生产与应用[J]. 建筑节能, 2014, 42(12): 22–24+33.
LU Yongming. Build Energ Effic (in Chinese), 2014, 42(12): 22–24+33.

[98] NG S, JELLE B P, SANDBERG L I C, et al. Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete[J]. Constr Build Mater, 2015, 77: 307–316.

[99] BUBENÍK J, ZACH J. The use of foam glass based aggregates for the production of ultra-lightweight porous concrete for the production of noise barrier wall panels[J]. Transp Res Proc, 2019, 40: 639–646.

[100] BABU K G, BABU D S. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume[J]. Cem Concr Res, 2003, 33(5): 755–762.

[101] 李从波, 文梓芸, 殷素红. 大型承重保温夹芯复合墙体的材料选型及模拟[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(6):1012− 1016.
LI Congbo, WEN Ziyun, YIN Suhong. J Build Mater(in Chinese), 2013, 16(6): 1012− 1016.

[102] 张旭, 王武祥, 杨鼎宜, 等. 火山渣混凝土复合自保温砌块的试验研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(6): 53–57.
ZHANG Xu, WANG Wuxiang, YANG Dingyi, et al. New Build Mater (in Chinese), 2019, 46(6): 53–57.

[103] SARIISIK A, SARIISIK G. New production process for insulation blocks composed of EPS and lightweight concrete containing pumice aggregate[J]. Mater Struct, 2012, 45(9): 1345–1357.

[104] 丁晓燕, 罗永磊, 陈忠范, 等. 严寒地区基于热工和力学性能的混凝土自保温砌块设计及优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2015, 45(1): 145–150.
DING Xiaoyan, LUO Yonglei, CHEN Zhongfan, et al. J SE Univ (in Chinese), 2015,45(1): 145–150.

[105] 梁晓旭, 方光秀. 严寒地区新型自保温砌块配合比设计与构造研究[J]. 山西建筑, 2018, 44(27): 189–192.
LIANG Xiaoxu, FANG Guangxiu. Shanxi Architect (in Chinese), 2018, 44(27): 189–192.

[106] 杨召通, 刘勇, 尹冠生, 等. 多排陶粒混凝土复合砌块结构优化设计分析[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(1): 113–123.
YANG Zhaotong, LIU Yong, YIN Guansheng, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2020, 39(1): 113–123.

[107] WU Y, ZHANG Z, YUAN J, et al. Weight-dependent equilibrium solution for weighted-sum multiobjective optimization[M]. Proceeding of the Second International Conference on Intelligent Transportation. Springer Singapore, 2017.

[108] COX L, VAN DIJK S. Foam concrete: A different kind of mix[J]. Concrete, 2002, 36: 54–55.

[109] KEARSLEY E P, WAINWRIGHT P J. Porosity and permeability of foamed concrete[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(5): 805–812.

[110] 郭雷, 关辉, 杨学春. 甲基烷类防水剂对泡沫混凝土抗冻性的影响[J]. 哈尔滨工程大学, 2018, 39(12): 2075–2079.
GUO Lei, GUAN Hui, YANG Xuechun. J Harbin Eng Univer (in Chinese), 2018, 39(12): 2075–2079.

[111] TIKALSKY P, POSPISIL J, MACDONALD W, et al. A method for assessment of the freeze-thaw resistance of performed foam cellular concrete[J]. Cem Concr Res, 2004, 34(5): 889–893.