

文章编号:1673-9469(2024)02-0001-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.02.001

水灰比对泡沫混凝土性能的影响研究

丰土根,杨航,张箭*

(河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要: 泡沫混凝土作为一种多孔材料被广泛应用于建筑中,其性能直接受内部气孔结构的影响,而水泥浆的性质是影响泡沫稳定存在的重要因素。为探究水灰比对泡沫混凝土性能的影响,该文配制了三种不同水灰比的水泥浆制备泡沫混凝土,并测量其干密度、抗压强度、导热率和吸水率,探究其性能与水灰比的关系。结果表明,随着水灰比减小,水泥含量增加,水泥粘度增加,泡沫混凝土密度逐渐增加,强度逐渐增加,导热率逐渐增大,吸水率逐渐减小。在合适的水灰比下,泡沫混凝土相比纯水泥浆密度降幅最大,达到41.76%;强度降幅最小,抗压强度达到9.8 MPa;导热率降幅达到最大,为0.212 W/m·K;吸水率达到21.5%。

关键词: 泡沫混凝土;抗压强度;导热率;吸水率;干密度

中图分类号:TU528

文献标识码:A

Study on the Effect of Water/Cement Ratio on the Performance of Foamed Concrete

FENG Tugen, YANG Hang, ZHANG Jian*

(Key Laboratory of Geotechnics and Dike Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Foamed concrete is a porous material widely used in buildings, but its performance is directly affected by the internal pore structure. The property of cement slurry is an important factor affecting the stability of foam. In order to explore the influence of water/cement ratio on the performance of foamed concrete, three kinds of cement slurry with different water/cement ratio (w/c) were prepared to fabricate the foamed concrete in this paper, and their dry density, compressive strength, thermal conductivity and water absorption were measured to explore the relationship between their properties and w/c . The results show that as the w/c decreases, the cement content and cement slurry viscosity increase while the density of foam concrete, concrete strength, and thermal conductivity increase gradually. However, the water absorption decreases gradually. Under an appropriate w/c , the foam concrete has the largest decrease in density compared with the pure cement slurry, reaching 41.76%. The decrease of the strength is the smallest and the compressive strength reaches 9.8 MPa. The thermal conductivity decreases the most, reaching 0.212 W/m·K, and the water absorption rate reaches 21.5%.

Key words: foamed concrete; compressive strength; thermal conductivity; water absorption; dry density

泡沫混凝土是通过在水泥浆体或砂浆中引入预制水性泡沫而形成的轻质多孔材料。泡沫混凝土在许多工程领域得到广泛应用,如预制或现浇墙体构件、保温平板、外立面、楼板、轻质夹芯板的

芯部等^[1-3]。多孔结构在绝缘和填充应用中的优势在于其密度低、自流平能力强、成本低、导热系数低、耐火性能强等方面^[4-5]。孔结构(孔隙率、孔径及其分布)对超轻泡沫混凝土的力学和热学性

收稿日期:2023-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178386,52378336)

作者简介:丰土根(1975-),男,浙江金华人,工学博士,教授,从事隧道与地下空间方面的研究。

* 通信作者:张箭(1989-),男,安徽芜湖人,工学博士,教授,从事岩土与隧道工程方面的研究。

能有重要影响。孔隙率可以用干密度来表示,干密度的减小意味着孔隙率的增加^[6]。抗压强度和导热系数与密度有直接关系,密度的降低对抗压强度有负面影响,但有利于隔热性能的提高。孔径大小影响泡沫混凝土的抗压强度和导热系数^[7]。当材料的基体和孔隙率保持不变时,孔隙结构将是影响材料抗压强度和热导率的一个特别重要的微观性质。平均孔径越大,导热系数越高,抗压强度越低^[8]。此外,由于空气的导热系数较低,闭孔结构可以降低泡沫混凝土的导热系数^[9]。当多孔隔热材料的孔径减小到纳米级时,其热导率可以很低^[10]。然而,在泡沫混凝土中很难形成纳米级的孔隙。为了优化超轻泡沫混凝土的力学和热学性能,不仅需要提高其孔隙率,还需要改善其孔结构^[11]。不当的孔结构会对泡沫混凝土的强度、密度、渗透性和保温性能产生不利影响,严重限制了泡沫混凝土的应用。因此,决定孔结构的气泡稳定性的影响因素成为泡沫混凝土研究的重点之一。气泡稳定性取决于气泡的性质及其在混入水泥之后的稳定性。预制泡沫中气泡的性质主要由发泡剂控制,而影响气泡后续稳定性的主要因素是浆料的特性^[12]。影响气泡在水泥浆中稳定性的一个很重要的因素就是水泥浆的性质。在泡沫混凝土制备过程中,气泡受到各种力的作用,包括材料颗粒的挤压和浆体提供的浮力。当作用在气泡上的力超过气泡所能承受的能力时,气泡就会聚并并逃离水泥浆^[13]。这就会加剧泡沫混凝土的气孔结构化,从而产生一系列的不稳定现象。气泡受到水泥浆的挤压和浮力都和水泥浆的粘度分不开,因此,选取合适的水泥浆粘度对制备高性能泡沫混凝土至关重要,而水泥浆粘度主要由水灰比控制。但现有研究多从泡沫混凝土的性能上分析泡沫混凝土随原料掺量不同而产生性能变化的趋势,未深入探究其内在原因。

因此,本文以分析气泡在水泥浆中存在稳定性为出发点,通过干密度、抗压强度、导热率和吸水率试验,联系宏观性能指标,探究水灰比对泡沫混凝土性能的影响,旨在为配制不同用途泡沫混凝土提供依据。

1 原材料与实验方法

1.1 原材料

本研究采用马鞍山产“海螺”牌 42.5 普通硅酸盐水泥,3 d 抗折强度为 5.9 MPa,抗压强度为

27.4 MPa,28 d 抗折强度为 7.7 MPa,抗压强度为 45.0 MPa。主要化学组成及含量见表 1。

表 1 42.5 硅酸盐水泥化学组成含量
Tab. 1 42.5 Silicate cement chemical composition

化学组成	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
占比/%	63.22	22.55	5.91	2.68

本研究采用自主研发的复配表面活性剂作为发泡剂,其主要成分为十二烷基硫酸钠(SDS)和茶皂素(TS),二者配比为摩尔质量 1 : 1,发泡剂类型和特征如表 2 所示。利用铂金环法测定发泡剂的表面张力随摩尔浓度对数值变化,得到临界胶束曲线,如图 1 所示。最终选用 10 mmol/L 作为发泡剂的浓度。

表 2 发泡剂类型和特征
Tab. 2 Types and characteristics of foaming agent

表面活性剂	类型	特征
SDS	阴离子表面活性剂	白色粉末,易溶于水,溶于水后呈半透明溶液
TS	非离子表面活性剂	黄色粉末,刺激性气味

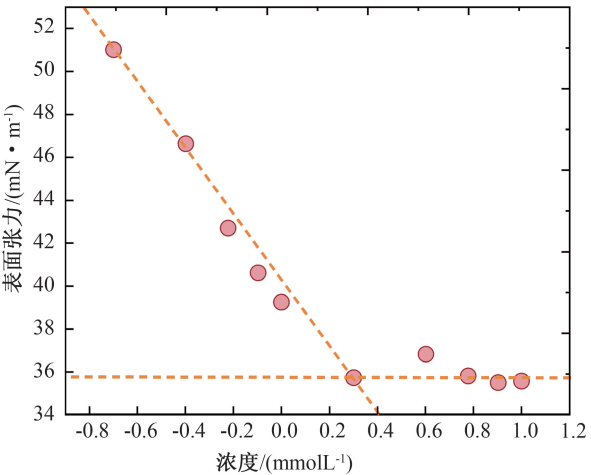


图 1 发泡剂临界胶束曲线
Fig. 1 Critical micelle curve of foaming agent

1.2 实验方法

1.2.1 配合比

本文试验分为三个组,分别为高水灰比组、合适水灰比组和低水灰比组,其中水和泡沫的掺入量保持恒定,具体配合比如表 3 所示。

表 3 试验配合比
Tab. 3 Experimental arrangements

分组	水泥/g	水/g	泡沫/mL
高水灰比组	1 000	500	2 500
合适水灰比组	1 250	500	2 500
低水灰比组	1 500	500	2 500

1.2.2 测试方法

试样的干密度和吸水率采用称重法测量。将试样在 105 ℃ 的烘箱中烘干 24 h,通过式(1)可以得到试样的干密度:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

式中, m 是试样烘干完的质量, g; V 为试样体积; mm^3 。

样品吸水率通过式(2)计算得到:

$$w(\%) = \frac{(m - m_1)}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, m_1 为样品烘干之后重量, g; m 为样品在 25 ℃ 水中浸泡 30 min 的重量, g。

采用液压抗压试验机测定水泥试样的抗压强度。以 0.5 ~ 1.5 kN/s 的速度对具有压缩面积 $A(\text{mm}^2)$ 的试样进行持续、一致的加载,直至达到最大荷载 $F(\text{kN})$ 。根据式(3)计算抗压强度:

$$f = \frac{F}{A} \quad (3)$$

采用智能双平板导热系数试验机对试件的导热系数进行测试,两平板温差为 20 ℃。预热时间为 30 min,测量时间为 180 min。

2 结果与分析

2.1 干密度

三组泡沫混凝土样品和纯水泥样品的干密度结果如图2所示。和纯水泥试块相比,泡沫混凝土由于泡沫的加入,三组样品的密度分别降低了 37.57%, 41.76% 和 32.6%。高水灰比组意味着水泥含量少,水泥浆粘度低,干密度要低于其余两组。对于低水灰比组,意味着水泥含量高,干密度明显大于其余两组。从密度变化百分数可以看出,不同水灰比下,泡沫的加入对密度的降低程度是不一样的,对于合适水灰比的情况来说,加入泡沫可以最大限度地降低泡沫混凝土的密度。对于高水灰比组,虽然整体密度比较低,但由于水泥含量较低,水泥浆粘度低无法束缚气泡稳定存在,导致气泡上浮导致泡沫留存量不够,密度降低程度低于合适水灰比组。对于低水灰比组,虽然水泥粘度足以束缚更多泡沫留存,但由于水泥含量多,密度的变化只有 32.6%, 低于合适粘度组的 41.76%。因此在合适的水灰比范围内,泡沫混凝土可以达到降低密度的最大效率。

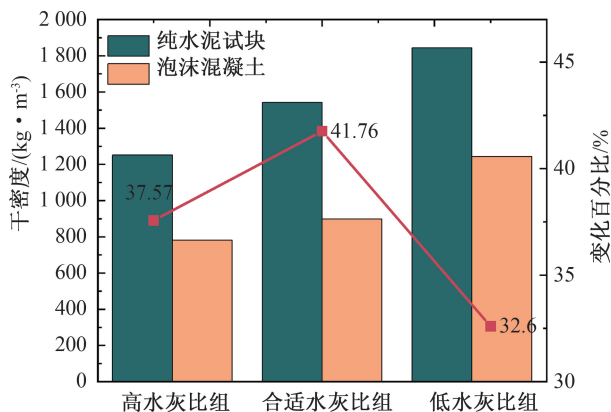


图2 三组试样干密度测量结果

Fig. 2 Measured dry density of the three groups of sample

2.2 抗压强度

抗压强度试验结果如图3所示。一般情况下,水泥的密度和抗压强度之间存在正相关关系。较高的密度意味着更多的水泥物质被紧密地填充在一起,有更多的粒子间相互作用,从而产生较高的抗压强度。相反,较低的密度可能意味着较多的孔隙和较少的物质连接点,导致较低的抗压强度。因此,低水灰比组的强度要大于高水灰比组和合适水灰比组,28 d 抗压强度可以达到 12.5 MPa。对于高水灰比组的泡沫混凝土,由于泡沫的加入,孔隙占据了水泥的一部分空间,而且又因为水泥含量少而导致的凝结能力弱,从而强度降低 62.5%, 28 d 抗压强度只有 3.98 MPa。在合适水灰比下,水泥浆粘度相较于高水灰比组增大,一方面实现了更多的气泡在水泥中的存在,有效降低密度。另一方面,水泥含量的增加有效地减弱了由于气孔增多而引起的强度下降。因此,在合适水灰比下,抗压强度降低达到最小 41.67%, 28 d 强度达到 9.8 MPa。

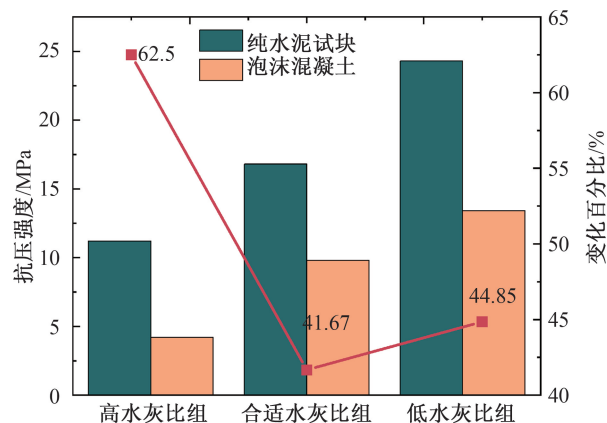


图3 试样的抗压强度测量结果

Fig. 3 Measured compressive strength of the three groups of samples

2.3 导热率

三组试样的导热率实验结果如图 4 所示。由于气孔中的空气是较差的导热介质,它们会成为热量在水泥试块中传递的障碍。当热量在试块中传播时,它会遇到气孔,导致传导路径的中断或转向。这种中断或转向会增加导热阻抗,降低导热性能。因此,由于泡沫的加入,水泥样品的导热率都有不同幅度的降低。相比较低水灰比组来说,高水灰比组和合适水灰比组的下降幅度要更大,导热系数分别为 $0.201 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 和 $0.212 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,低水灰比组试样的导热率为 $0.612 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。这是由于低水灰比意味着水泥浆的高粘度,泡沫受到水泥浆的挤压力较大,造成联通孔隙较多,因此试样的导热系数较大。除此之外,水泥的密度也对导热率有一定的影响。

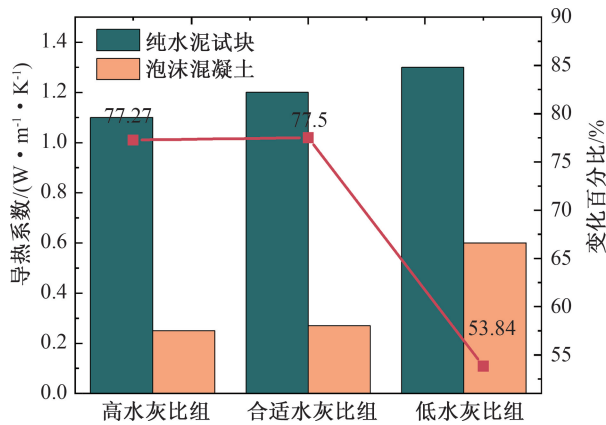


图 4 试样导热系数测量结果

Fig. 4 Measured thermal conductivity of the three groups of samples

2.4 吸水率

吸水率实验结果如图 5 所示。一般情况下,较多的气孔会增加水泥试块的吸水率。这是因为气孔提供了额外的孔隙空间,可以容纳更多的水分。当试块暴露在水中时,水可以进入气孔中,被试块吸收,导致较高的吸水率。相反,较少的气孔会降低水泥试块的吸水率。密实的试块内部气孔较少,水分进入试块的能力相对较低,这就导致了较低的吸水率。因此,由于泡沫的加入,泡沫混凝土的吸水率均高于纯水泥试块,如图 5 所示。高水灰比组的泡沫混凝土吸水率增长幅度高达 313.79%,这是因为密度较低的泡沫混凝土除了泡沫所形成的气孔外,还具有较多内部孔隙。这些孔隙提供了更多的路径和容积,使得水分能够更容易地渗透和吸收到试块内部,导致较高的吸水率。

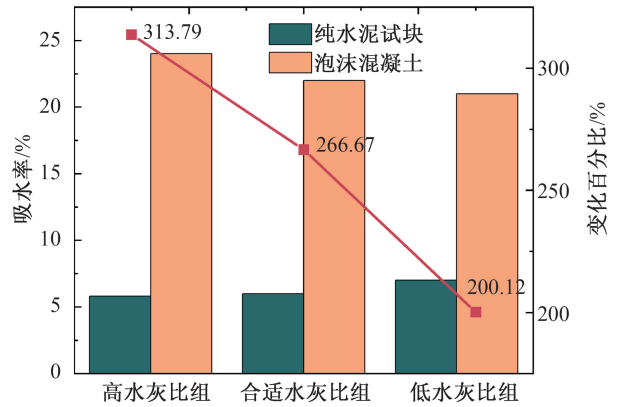


图 5 试样吸水率测量结果

Fig. 5 Measured water absorption of the three groups of samples

2.5 理论分析

一个 2D 的气泡在新鲜水泥浆液中的受力如图 6 所示^[14-15]。此力学模型的假设前提为:外部力均匀作用在气泡表面,且气泡为标准球形;内部气体压力处处相等;水泥浆为均匀粘度流体。如图所示,该气泡受重力 G_i (主要为包裹气体外部的液膜重力),气泡的浮力 F_b (由气泡的体积所主导),粘性力和周围环境的压力 F_{η} 作用。在以上几个力达到平衡时,气泡在水泥浆中就达到相对的稳定。影响泡沫在水泥中存在的主要有两个因素,在水泥浆不影响泡沫薄膜破裂的前提下,气泡内部气压与外部压力的平衡保证气泡不在水泥浆中自发的破裂,从而在水泥的包裹下形成稳定的气孔。气泡上浮是影响气泡存在的另一个因素,由于气泡的浮力作用,泡沫趋向于向水泥浆顶部移动,从而造成水泥浆在硬化后表面不平整问题。环境粘度可有效抵消浮力所引起气泡的上浮作用,但并不是粘度越大越好。如果粘度超过一定的限制,由于气泡在水泥浆中也会发生聚并反应,一些相对比较大的气泡也留存在水泥浆中,从而影响水泥硬化后的结构性能。

根据气泡平衡,单个气泡在水泥当中保持不破裂的前提可用式(4)表示:

$$P_i = P_{\text{atm}} + \frac{2\sigma}{r} + \rho_{\text{slurry}}gh \quad (4)$$

其中, P_i 代表气泡内部压力, Pa; P_{atm} 为大气压强, Pa; σ 代表气泡与水泥接触界面的表面张力, mN/m; ρ_{slurry} 代表水泥浆的密度, g/cm^3 ; r 代表气泡的半径, cm; h 代表气泡所处的深度, cm; g 为重力系数, 取 9.8 N/kg 。当气泡所处深度或者所处环境密度足够大时,气泡就会因为内外压力差而趋于不稳定从而破裂。气泡也可在水泥中移动,通过

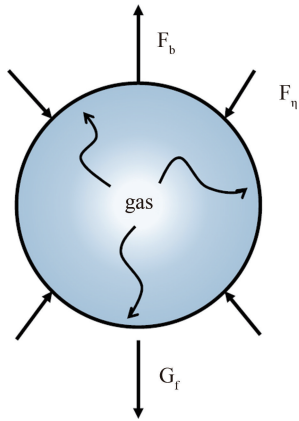


图6 单一气泡在水泥净浆中的理想受力图

Fig. 6 Idealized schematic illustration of forces acting on a single bubble within a fresh cement slurry

气泡移动实现气泡的聚并,从而增大了气泡体积来减小内部压强保持气泡稳定。然而,大气泡就意味着有更大的浮力,从而使它们更容易上浮脱离水泥浆。重力和粘性力成为阻碍气泡上浮的重要力,如图6所示。按照受力模型,力的平衡可用式(5)表示:

$$F_b = F_{\eta} + G_f \quad (5)$$

其中, F_b 代表气泡的上浮力, N ; F_{η} 代表水泥浆液的粘性力, N ; G_f 代表气泡的重力, N 。因此,粘性力可根据式(6)算得:

$$F_b - G_f = (\rho_{\text{slurry}} - \rho_{\text{foam}}) \cdot \frac{4\pi r^3}{3} \cdot g = F_{\eta} \quad (6)$$

其中, ρ_{foam} 代表泡沫的密度。

根据上式,当气泡重力越大或者粘性力越大时,气泡上浮动力就越小。粘性力与水泥的粘度有关系,气泡平衡时,若水泥密度越大,也就意味着粘性力越大。

三组水泥浆气孔如图7所示。从图7看到,高水灰比组泡沫水泥浆流动度大,自立性差,气孔大小不一,形状不规则;合适水灰比组,泡沫水泥浆流动度适中,自立性好,气孔圆度大,分布均匀;低水灰比组,泡沫水泥浆流动度差,水泥浆中大型气泡含量增多。由上述分析可知,水泥的粘度提供了气泡抵御上浮的阻力,从而使更多气泡在未逃离之前在水泥浆中固化。但是,过大的粘度一方面使一些大气泡无法逃离水泥浆从而形成巨型气孔,这对硬化后的水泥产生不利影响,例如导热率较大,密度较大等。此外,水泥粘度过大将有助于连通孔隙的发展。若粘度过小时,气泡将得不到有效的固化,大部分泡沫易于上浮到表面,从而造成表面的不平整。虽然低水泥粘度有利于独立孔隙的发展,但是低粘度水泥意味着水泥浆的密度小,这样对结构的力学性能产生不利影响。因此,水泥的粘度过大或过小都不利于气泡在水泥中的存在,即水灰比过大或过小都会造成泡沫混凝土性能的削弱。

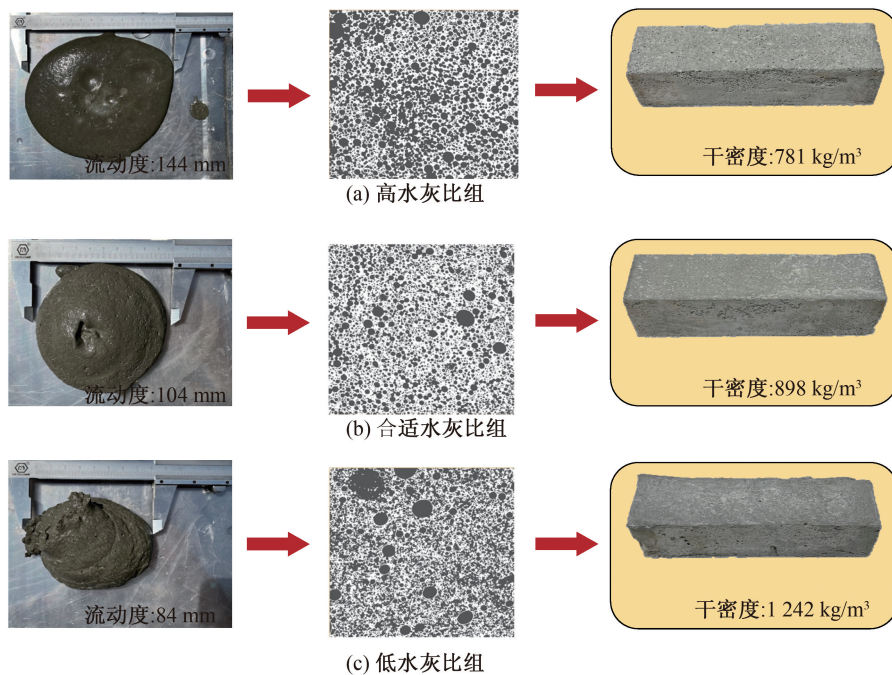


图7 水灰比对泡沫混凝土气孔结构的影响

Fig. 7 Effect of w/c on the pore state of foamed concrete

3 结论

本文通过理论分析和宏观性能试验,开展了水灰比对气泡存在从而影响泡沫混凝土性能的研究,结论如下:

1)水灰比对泡沫混凝土的性能有直接的影响,当水灰比为0.4时,水泥浆粘度适中,可实现泡沫混凝土的性能相对最优。

2)相比较纯水泥浆,由于泡沫的引入,泡沫混凝土的密度减小,强度减小,导热率增大,吸水率增大。当水灰比过大或过小时,泡沫混凝土密度减少的程度低且强度减小的程度大。在合适水灰比下,泡沫混凝土相比纯水泥浆密度降幅最大,达到41.76%;强度降幅最小,抗压强度达到9.8 MPa;导热率降幅达到最大,达到0.212 W/m·K;吸水率达到21.5%。

参考文献:

- [1] 宋强,张鹏,鲍玖文,等. 泡沫混凝土的研究进展与应用[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(02): 398-410.
- [2] 高志涵,陈波,陈家林,等. 基于X-CT的泡沫混凝土孔隙结构与导热性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(07): 723-730.
- [3] 刘迪,王玲,王振地,等. 超轻质混凝土耐久性试验方法探索[J]. 混凝土, 2022(07): 151-154.
- [4] 李猛,黄寅生,张少波,等. 泡沫混凝土的研究进展及展望[J]. 材料导报, 2016, 30(S1): 402-405.
- [5] 宋强,邹颖杰,张鹏,等. 泡沫混凝土气泡性能与基体材料研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(02):

706-724.

- [6] 董必钦,张泉,刘源涛,等. 硫酸铝对高掺量流化床粉煤灰基泡沫混凝土性能的影响[J/OL]. 材料导报: 1-18 [2024-04-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078>.
- [7] 冯璐,宁英杰,陈徐东,等. 不同龄期及密度泡沫混凝土微观结构及水化特性[J]. 混凝土, 2022(07): 1-5.
- [8] 咸国栋. 高性能泡沫混凝土材料制备关键技术研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2022.
- [9] 刘晓贺,岳祖润,周江涛,等. 纤维泡沫混凝土导热特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(11): 139-142.
- [10] 徐庭. SiO₂ 纳米微孔绝热材料的制备和性能研究[D]. 上海:华东理工大学, 2012.
- [11] 杨元意. 超轻水泥基泡沫材料制备关键技术及不同尺度纤维增强研究[D]. 成都:成都理工大学, 2022.
- [12] 区钰妍,潘卫东,郭文瑛. 新拌泡沫混凝土稳定性影响因素研究进展[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(10): 135-140+164.
- [13] ZHANG J, YANG H, ZHANG S, et al. Potential utilization of CO₂ foams in developing lightweight building materials[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107342.
- [14] JONES M R, OZLUTAS K, ZHENG L. Stability and instability of foamed concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 68(11): 542-549.
- [15] XIAO M, LI F, YANG P, et al. Influence of slurry characteristics on the bubble stability in foamed concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 71: 106500.

(责任编辑 周雪梅)