

不同干容重下海水泡沫混凝土物理性能研究

韩卫卫¹, 王溪², 陈友治³, 崔静恩³

1. 河南财经政法大学, 河南 郑州 450000

2. 河南建筑职业技术学院, 河南 郑州 450000

3. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430050

DOI: 10.61369/SSSD.2026040011

摘 要 : 本文结合 Matlab 二值化处理和 IPP 软件图像处理技术, 开展了不同干容重下海水泡沫混凝土导热系数、抗压强度、孔结构特性 (孔隙率、孔径尺寸) 等物理性能研究, 重点探讨海水泡沫混凝土干容重与其孔隙特征等物理性能间的映射关系。研究表明, 随着海水泡沫混凝土干容重的不断增大, 其孔隙率、大孔孔径比例会不断降低, 但其 28d 抗压强度、导热系数会不断增大, 同时, 海水泡沫混凝土干容重与其孔隙率、导热系数间呈现一定的线性关系, 与其 28d 抗压强度呈现一定的非线性关系。

关 键 词 : 干容重; 海水泡沫混凝土; 物理性能

Research on Physical Properties of Seawater Foam Concrete under Different Dry Bulk Densities

Han Weiwei¹, Wang Xi², Chen Youzhi³, Cui Jing'en³

1. Henan University of Economics and Law, Zhengzhou, Henan 450000

2. Henan Technical College of Construction, Zhengzhou, Henan 450000

3. Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430050

Abstract : In this study, the compressive strength, thermal conductivity and pore structure characteristics of seawater foamed concrete under different dry densities were investigated with Matlab binarization processing and IPP software image processing. The mapping relationships between dry density and physical performance indicators such as pore characteristics were placed. The results showed that with the increasing of dry density, the porosity and proportion of large pore diameters progressively were decreased, while the compressive strength for 28d and thermal conductivity were increased. And, a certain linear relationship between dry density and porosity (thermal conductivity) was studied, while a nonlinear relationship with the compressive strength was also studied.

Keywords : dry density; seawater foam concrete; physical performance

泡沫混凝土主要由钙质材料 (水泥、石灰) 和硅质材料 (石英砂、河砂、粒化高炉矿渣、粉煤灰、页岩等), 并掺加适宜的加气剂等, 经过配料、搅拌、浇筑、发气、切割而成的多孔超轻材料^[1]。泡沫混凝土作为一种轻质、保温隔热性能优异的建筑材料, 在陆地工程 (保温墙体、路基回填、边坡填充等) 中已广泛应用。

随着海洋经济与沿海地区开发的快速发展 (如海岛基础设施建设、海上风电基座、人工岛礁等), 泡沫混凝土在海洋工程中的潜在应用价值日益凸显。随着我国沿海地区级远海岛礁的基础设施建设飞速发展, 严重依赖淡水和河砂制备的传统泡沫混凝土已经越来越难以满足大规模、高效率的施工需求。广阔的海洋蕴含着极为丰富的资源, 如何就地取材, 已成为一个极具现实意义的研究方向。同时, 在海洋工程建设与沿海地区基础设施修建中, 传统混凝土面临原材料运输成本高、淡水资源消耗大及抗海水侵蚀性能不足等突出问题, 而泡沫混凝土凭借轻质、保温、隔音及良好的施工性等优势, 成为该领域极具潜力的替代材料。然而, 沿海地区淡水匮乏的现状限制了普通泡沫混凝土的规模化应用, 采用海水制备泡沫混凝土成为解决这一矛盾的有效途径。干容重作为泡沫混凝土最核心的技术参数之一, 直接决定其密度等级、强度特性及保温性能, 现有研究多聚焦于淡水体系下泡沫混凝土的性能调控, 针对海水介质中不同干容重对泡沫混凝土物理性能影响的系统研究仍较为匮乏, 部分研究虽涉及海水掺用但未明确干容重梯度与性能的量化关系^[2-3]。这种研究缺口导致海水泡沫混凝土在实际工程中难以根据设计需求精准调控干容重以匹配性能指标, 制约了其在海洋工程、沿海围填海及滩涂地区建筑等场景的推广应用。

项目信息: 本文系横向课题《赤泥-粉煤灰-脱硫石膏胶凝材料体系设计及其用作道路基层的性能研究》(项目编号 534033)、河南省 2026 年度一般人文社科项目《“师-生-机”三元交互教学模式赋能学为中心教学范式改革研究》(项目编号 2026-ZDJH-462)、2026 年度河南财经政法大学高层次科研成果培育项目 (国家一般项目) 多学科交叉视角下数智时代地方高校教师数字素养提升多维困境与协同路径研究》(项目编号 25HNCDXJ28), 2026 河南财经政法大学校级教改项目: “项目-探究”双驱教学模式在管理科学与工程专业课程群中的构建与实践 (JXGG2021-X261945) 研究成果。

作者介绍: 韩卫卫 (1986—), 男, 博士, 讲师, 主要研究新型水泥基建筑材料、工程项目管理等。

因此,本文基于前期海水泡沫混凝土配合比,开展不同干容重下海水泡沫混凝土的抗压强度、导热系数、孔结构特性等物理性能研究,并结合 Matlab 二值化处理技术、IPP 软件图像处理技术结果,重点探讨海水泡沫混凝土干容重变化与其空隙特征间的映射关系,为实际工程中海水泡沫混凝土的设计、制备及性能调控提供理论指导和实践借鉴。

一、原材料

(1) 胶凝组分: 水泥采用普通硅酸盐水泥(P·O42.5, 密度为3.01g/cm³, 比表面积385.7m²/kg, 武汉华新水泥有限公司)和快硬硫铝酸盐水泥(SAC42.5, 密度2.85g/cm³, 比表面积480.3m²/kg, 湖北孝感安达水泥厂), II级粉煤灰(FA, 玻璃体含量70%~80%, 需水比104%, 筛余量为0.38%(80μm), 比表面积为470m²/kg, 武汉市阳逻电厂)和94级硅灰(SF, 平均粒径0.22μm, 比表面积20001m²/kg, 武汉新必达硅材料有限公司)。

(2) 发泡剂: BP-01复合型发泡剂, 临沂邦普化工有限公司;

(3) 其他: 聚羧酸减水剂, 固含30%, 减水率25%, 市购; 三乙醇胺早强剂, 国药集团化学试剂有限公司; 甲基纤维素M450增稠材料, 国药集团化学试剂有限公司; 自来水和人工海水(100%浓度), 人工海水组分见表1。

表1 人工海水(100%浓度)组成
Table 1 Component of Artificial Seawater (100%)

组分 Component	氯化钠	氯化镁	硫酸镁晶体	二水石膏	碳酸钙
占比 /% Percentage/%	21.0	2.54	1.54	2.43	0.1

二、试验方法

表2 海水泡沫混凝土基准配合比
Table 2 Mix Design of Seawater Foam Concrete

组分 Component	水胶比	普通硅酸盐水泥	硫铝酸盐水泥	粉煤灰	硅灰	聚羧酸减水剂	早强剂	甲基纤维素
占比 /% Percentage/%	0.6	69.4	5.6	20	5	1	0.02	0.2

注: 用自来水和符合型发泡剂制备出泡沫, 添加量每克胶凝材料为1.2ml, 聚羧酸减水剂、早强剂、甲基纤维素等采用外加方式, 比例为其与胶凝材料总质量之比。

首先将稀释好的发泡剂溶液加入到发泡机料槽中进行制泡, 然后依据制定的泡沫混凝土配合比, 将制备好的泡沫添加到已搅拌均匀的含有海水拌合楼的搅拌锅中进行混合搅拌, 最终制备出海水泡沫混凝土浆料。将浆料振捣然后浇注成模, 并放置到砂浆标准养护室进行养护, 待到龄期进行相关性能测定。

1) 干容重的测定

试验步骤: 将制备好的海水泡沫混凝土试块放在砂浆标准养

护室养护至7d, 28d时, 每组分别取试块3个, 然后对所有泡沫混凝土进行干容重测定。在测试过程中, 首先将试样表面水分擦干, 通过电子台秤称量测试试样的质量G, 然后将测试试样放入到电热鼓风恒温干燥箱中, 在60±5℃下保温24小时, 再以80±5℃保温24小时, 最后在105±5℃条件下烘干至恒重G₀, 然后将试块取出, 测定并计算它的体积V, 体积精确到1cm³, 并基于式1-1进行试样干容重的测定和计算。

$$\rho = \frac{G_0}{V \times 10^{-6}} \quad (1-1)$$

式中, ρ——测试试样的干容重, 单位为kg/m³;

G₀——海水泡沫混凝土测试试样恒重状态的质量, 单位为kg;

V——海水泡沫混凝土测试试样恒重状态下的体积, 单位为m³。

2) 抗压强度的测定

采用NYL-300水泥抗折抗压试验机, 依据《泡沫混凝土制品性能试验方法》(JC/T 2357-2016)开展海水泡沫混凝土试样抗压强度(7d, 28d)测定。

3) 导热系数的测定

参照JC/T 2357-2016, 每组试验制备300mm×300mm×50mm的试块三个, 在28d养护龄期前1天取出放入恒温干燥箱, 在105±5℃条件下烘24h, 然后将试块取出放置干燥器中冷却, 采用DRCD-3030型智能化导热系数测定仪进行测定, 取三组数据的平均值。

4) 孔结构特性

海水泡沫混凝土孔结构特性测定首先是对测试试样进行扫描, 已完成图像采集, 然后采用Matlab软件对图像进行二值化处理, 同时采用IPP图像分析软件计算测试试样(不同干容重泡沫混凝土)整体孔隙率、孔径分布(平均孔径)等气孔特征参数。

(1) 孔隙率P

参照JC/T 2357-2016, 通过干容重G₀来计算试块的真实容重G, 然后根据式1-2计算孔隙率P。

$$P = \frac{G - G_0}{G} \quad (1-2)$$

式中, P——测试试样的孔隙率, 单位为%;

G₀——测试试样的干容重, 单位为kg/m³;

G——测试试样的真实容重, 单位为kg/m³。

(2) 孔径(分布)

依据前文泡沫混凝土制备方法获得需要测定的泡沫混凝土试样, 然后基于专业相机和扫描设备获得不同干容重下海水泡沫混

凝土测试试样的截面（照片），其次通过 Matlab 图像处理软件对测试试样照片分别进行二值化处理（图1，黑白色），同时采用 IPP 图像分析软件对二值化处理后的测试试样图片进行深度化分析，测定每张测试试样图片上孔的特性（主要是孔径大小、孔径分布等），获得每个测试试样上孔的 Feret (mean) 值，最后计算出测试试样的平均孔径值。选择每个测试试样上9个点的平均孔径值作为该测试试样试块的平均孔径。选取每个测试试样上的9个监测点，测定每个监测点的孔径分布，然后对每个监测点孔径分布进行综合分析，即可得到对应测试试样的孔径分布特性。

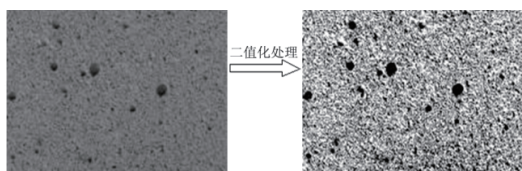


图1 泡沫混凝土试样二值化图像处理

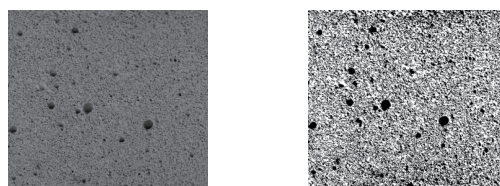
Fig. 1 Binary image process of foam concrete

三、结果及讨论

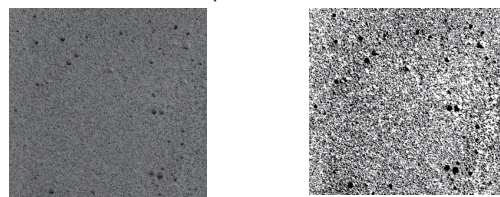
干容重，作为海水泡沫混凝土重要物理性能之一，与其抗压强度、孔隙率、导热系数等均存在密切关联。研究海水泡沫混凝土干容重与孔隙率、孔径分布、抗压强度、导热系数等物理性能之间的相关性，有助于更好的掌握海水泡沫混凝土的性能，助力海水泡沫混凝土的设计、制备及应用实践。

基于前文海水泡沫混凝土基准配合比，通过调整发泡剂等掺量，设计、制备12种（450kg/m³、500kg/m³、525kg/m³、550kg/m³、555kg/m³、600kg/m³、630kg/m³、650kg/m³、660kg/m³、700kg/m³、710kg/m³、775kg/m³）不同干容重的海水泡沫混凝土测试试样，并结合本文试验方法对其孔结构、抗压强度、导热系数进行测定。

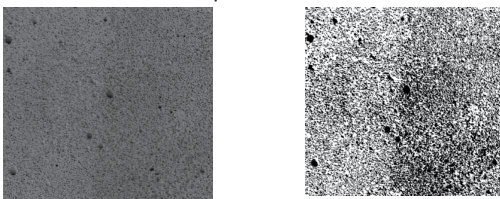
1) 干容重与孔结构



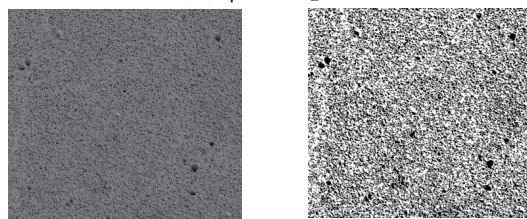
(a) $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$



(b) $\rho = 550 \text{ kg/m}^3$



(a) $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$



(a) $\rho = 650 \text{ kg/m}^3$



(a) $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$

图2 不同干容重下海水泡沫混凝土断面特性及二值化处理结果

Fig.2 Cross-section Characteristics and Binarization Analysis of Seawater Foam Concrete with Different Dry Densities

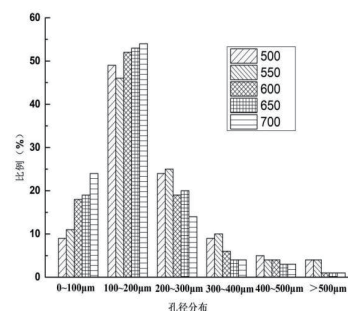


图3 不同干容重下海水泡沫混凝土孔径分布

Fig.3 Pore Size Distribution of Seawater Foam Concrete with Different Dry Densities

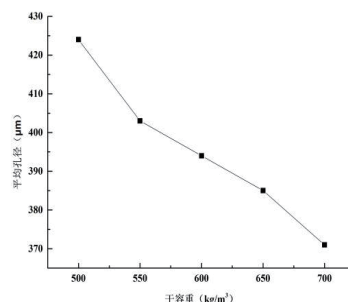


图4 不同干容重下海水泡沫混凝土平均孔径

Fig.4 Average Pore Diameter of Seawater Foam Concrete with Different Dry Densities

根据图2和图3可知，试验中海水泡沫混凝土的气孔大都分布于0 ~ 400 μm，且随着测试试样干容重的不断增加，海水泡沫混凝土的气孔孔径尺寸逐渐变小，大孔比例也随之降低，这一结论也可通过图4结果得以验证。干容重为500kg/m³的海水泡沫混凝土的平均孔径约是700kg/m³海水泡沫混凝土的1.12倍。海水泡沫混凝土干容重越低，制备浆体时加进的泡沫或拌合水就越多，导致浆体中气泡增多，而过多的气泡易发生合并的现象，进而小孔变大孔，最终导致平均孔径增大^[4]。

为进一步探究海水泡沫混凝土干容重与其孔隙率间的相互关系，对不同干容重下测试试样的孔隙率进行了测定，并对结果进

行拟合,发现海水泡沫干容重与其孔隙率间存在一定的线性关系 ($R^2=0.99242$,图5),即随着干容重的不断增大,海水泡沫混凝土的孔隙率会表现线性减小或降低的趋势(式1-3)。

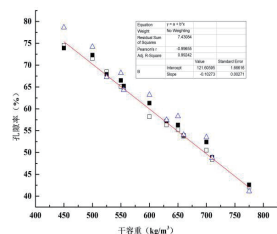


图5 不同干容重下海水泡沫混凝土孔隙率

Fig.5 Porosity of Seawater Foam Concrete with Different Dry Densities

$$y=121.60595-0.10273x \quad (1-3)$$

其中, y ——为测试试样的孔隙率,单位 %;

x ——为测试试样的干容重,单位 kg/m^3 ;

2) 干容重与抗压强度

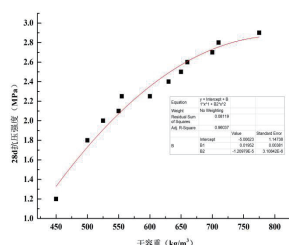


图6 不同干容重下海水泡沫混凝土28d 抗压强度

Fig.6 Compressive Strength of Seawater Foam Concrete with Different Dry Densities for 28d

由图6可知,随着海水泡沫混凝土测试试样干容重的不断增大,其28d 抗压强度值也随之逐渐变大,即海水泡沫混凝土28d 抗压强度随着孔隙率的增加而降低,这与材料强度的本质相关结论一致。材料本身可看成由固、液、气三大部分组成,而强度的主要来源是固体和液体成分,随着材料孔隙率的增大,能够展现出强度决定性支撑的固体和液体占比变小,组分间的结合力也会变小,最终变现出材料强度的降低。且通过测试结果也可看出,海水泡沫混凝土的干容重与其28d 抗压强度值存在如下相关性(式1-4):

$$y=-5.00623+0.01952x-1.20979 \times 10^{-5}x^2 \quad (1-4)$$

其中, y ——为测试试样的28d 抗压强度,单位 MPa;

x ——为测试试样的干容重,单位 kg/m^3 ;

3) 干容重与导热系数

导热系数是材料热工性能的表征参数,其与材料的内部结构、表观密度、传热时热流方向、含水率等因素关系密切。

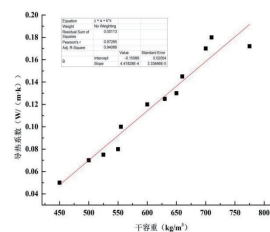


图6 不同干容重下海水泡沫混凝土导热系数

Fig.6 Thermal Conductivity of Seawater Foam Concrete with Different Dry Densities

由图6可知,随着干容重的不断增大,测试试样导热系数也呈现出不断增大的趋势。材料的导热性一般同导热系数去表征,导热系数越大,则其导热性越好,同时在相同情况下材料的导热系数一般固体大于液体,液体大于气体。随着海水泡沫混凝土干容重的不断增大,其固体占比不断增大,故而同样情况下,其导热系数会呈现出相应的变大趋势。此外,随着测试试样干容重的不断增大,其孔隙率不断降低,且大孔尺寸也不短降低,从而也促进了材料导热系数的提升——在材料成分、干容重及含水量等因素都相同的前提下,多孔材料的单位体积气孔数越多,导热系数越小;在孔隙率相同的条件下,孔隙尺寸越大,导热系数越大;封闭气孔越多,导热系数越小^[5]。

此外,通过对测试结果进行拟合,发现海水泡沫混凝土的干容重与其导热系数存在如下关系(式1-5):

$$y=-0.15088+4.41828 \times 10^{-4}x \quad (1-4)$$

其中, y ——为测试试样的导热系数,单位 MPa;

x ——为测试试样的干容重,单位 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$;

四、结论

(1) 随着泡沫混凝土干容重的不断增加,其孔隙率、大孔孔径比例会不断降低,但其28d 抗压强度、导热系数会不断增大。

(2) 经过试验可知,泡沫混凝土干容重与其孔隙率、导热系数间呈现一定的线性关系,与其28d 抗压强度间呈现一定的非线性关系。

参考文献

- [1] 李坚. 不同海水浓度下泡沫混凝土性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2): 744-748.
- [2] 张明, 李秋义, 王晓飞, 等. 海水海砂泡沫混凝土制备及基本性能试验研究 [J]. 混凝土, 2023, (1): 106-110.
- [3] 李华, 王立久, 李志国, 等. 海水拌合泡沫混凝土抗压强度及微观结构研究 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(3): 949-955.
- [4] 李相国, 刘敏, 马保国, 等. 孔结构对泡沫混凝土性能的影响与控制技术 [J]. 材料导报, 2012, 26(7): 141-144.
- [5] 邓雯琴. 纤维混凝土的孔结构特征与耐久性分析 [D]. 大连交通大学, 2010.