

纳米二氧化硅改性气泡轻质土泡沫稳定性及力学特性

刘思敏¹, 许 言², 叶观宝¹, 张 振^{1,3}, 王明玉⁴, 万 勋¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 中国 上海 200092; 2. 上海市自然资源调查利用研究院, 中国 上海 200072;
3. 西藏农牧大学水利土木工程学院, 中国 西藏 林芝 860000; 4. 德国亚琛工业大学建筑材料研究所, 德国 亚琛 52062)

摘 要: 气泡轻质土是一种将气泡、固化剂和水按一定比例搅拌后制成的新型轻质土工材料。气泡轻质土的力学特性受其孔隙结构影响, 因此优化孔隙结构是提高其力学特性的途径之一。本工作通过宏观试验研究纳米 SiO₂ 颗粒掺入对气泡轻质土泡沫稳定性及力学特性的影响。纳米 SiO₂ 质量掺入比为 1%、3% 和 5%, 颗粒形状采用球形和不规则形, 试样密度组为 1.5、1.1 g/cm³ 和 0.6 g/cm³。试验结果表明, 纳米 SiO₂ 的掺入使泡沫液膜增厚, 形状趋于规则, 掺入 3% 不规则纳米 SiO₂ 测试组对应的泡沫质量最佳。相较于未掺入纳米 SiO₂ 的气泡轻质土试样, 3 个密度组的试样 28、60 d 龄期的抗压强度提高了 7%~51%; 试样孔隙体积减小, 孔隙形状趋于规则, 孔隙间隙分布趋于均匀。纳米 SiO₂ 的加入对低密度组孔隙结构的优化效果更为显著。

关键词: 气泡轻质土; 纳米二氧化硅; 力学性能; 气泡稳定性; 增强机制

中图分类号: TU525.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0454-5648(2026)08-2743-10

网络出版时间: 2026-04-16



气泡轻质土是将气泡、固化材料(通常为水泥)和水, 有时也会掺入其他骨料(如黏土和砂), 按一定比例充分搅拌后制成的新型轻质土工材料^[1]。在浇筑过程中, 由发泡材料生成气泡, 包裹于固化材料浆液中, 通过控制泡沫的掺入量, 调节气泡轻质土的密度和强度。采用气泡轻质土可有效降低填土荷重, 减小地基沉降。因此, 气泡轻质土在路基填筑、桥台填土、边坡治理、挡土墙背填土和管线回填等工程中具有广阔的应用前景。

在工程应用中, 气泡轻质土的宏观密度和抗压强度是其重要的设计参数。气泡轻质土的强度与其密度普遍存在指数相关关系^[2-3]。进一步研究表明, 气泡轻质土具有多闭合孔、蜂窝状结构^[4], 其力学性质不仅受宏观密度影响, 也受其孔隙结构的影响^[1]。Rao 等^[5]研究发现气泡轻质土试样宏观密度差异小于 5%, 但其试样强度和模量差异达 11.5%~24.8%, 孔隙结构中联通型孔隙数量和形状会影响气泡轻质土的力学性能。在浇筑过程中, 由于气泡的破裂、连通和融合, 使得固化后气泡轻质

土中的孔隙分布不均匀、大小不一、形状不规则^[4,6]。因此, 如何优化孔隙结构以提升气泡轻质土的力学性能受到中国内外学者普遍关注。

提高泡沫本身的稳定性是改善气泡轻质土孔隙结构的有效措施之一。若制备的气泡不稳定, 当泡沫和水泥浆混合时极易造成泡沫的破裂、融合, 影响气泡轻质土的制备质量。添加稳泡剂如月桂醇等, 可提高与表面活性剂的协同作用以增强泡沫膜韧性^[7]; 掺入增黏性物质如聚丙烯酰胺等^[8-10], 起到增加液相黏度作用以减缓泡沫泌水性^[5], 但还需兼顾可能引起的对发泡能力的降低^[11]。除此之外, 通过纳米改性能够改善气泡气/水界面性质、延缓泡沫衰变^[2,12]。研究表明, 其稳泡机理涉及颗粒与界面的相互作用、疏水颗粒自身作用及其与表面活性剂的协同效应^[13], 并能形成致密结构抑制泡沫破坏^[14]。然而, 目前仅关注纳米材料对泡沫本身稳定性的影响, 缺乏对泡沫轻质土孔隙结构的影响及纳米改性气泡轻质土与普通气泡轻质土的力学特性对比研究。

收稿日期: 2025-10-04。 修订日期: 2025-11-06。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42377165, 42372317); 上海市自然科学基金面上项目(22ZR1466600)。

第一作者: 刘思敏(2000), 女, 硕士研究生。

通信作者: 张 振(1984), 男, 博士, 研究员。

Received date: 2025-10-04. Revised date: 2025-11-06.

First author: LIU Simin (2000-), female, Master candidate.

E-mail: 2330568@tongji.edu.cn

Correspondent author: ZHANG Zhen (1984-), male, Ph.D., Research Fellow.

E-mail: 14149@tongji.edu.cn

本工作开展一系列的宏观与细观试验, 研究纳米 SiO_2 改性气泡的稳定机制及其对轻质土力学特性与孔隙结构的影响。通过气泡密度、泡沫泌水率和光学显微镜试验分析纳米 SiO_2 形状和掺量对气泡宏观参数及形态特征的影响, 进而揭示纳米 SiO_2 的稳泡增强机制。结合单轴抗压强度试验与计算机断层成像(X-CT)扫描, 研究纳米 SiO_2 对气泡轻质土的力学特性及孔隙结构的影响^[15]。研究成果对指导纳米材料在气泡轻质土中的应用具有理论与实践意义。

1 实验

1.1 试样制备

试验中气泡轻质土主要原材料为水泥、发泡剂和自来水。水泥采用 P·C 42.5 复合硅酸盐水泥, 发泡剂采用植物蛋白型混凝土发泡剂。发泡剂参数如表 1 所示。纳米 SiO_2 采用亲水型纳米 SiO_2 , 外观为白色粉末, 平均粒径 20 nm, 密度 2.2~2.6 g/cm³, 颗粒晶型具有不规则的随机形态和经过特殊磨圆处理后规则的球形 2 种, 球形纳米 SiO_2 的成球率在 95% 以上。将颗粒形状近似球形的称为球形纳米 SiO_2 , 颗粒形状不规则的称为不规则形纳米 SiO_2 。

表 1 发泡剂主要性能指标

Project	Parameters
Appearance	Light white powder
pH value	About 7.0
Density	1.14 kg/L
Foaming radio	>50
Foam density	About 50 g/L
Fresh water volume	<20 mL
Settlement distance	<5 mm

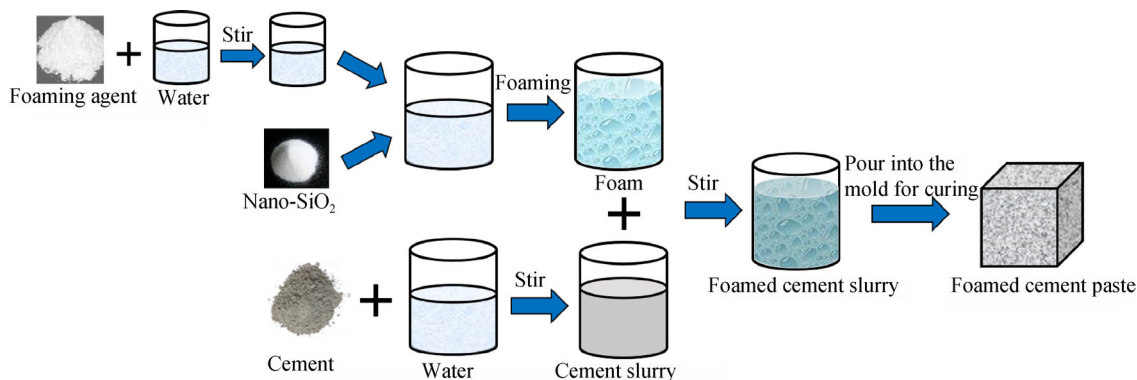


图 1 试样制备流程图

Fig. 1 Flow chart of specimen preparation

泡沫采用预发泡方法来制备。相较于混合发泡, 预发泡方法需要的发泡剂少, 发泡设备简单, 并且气泡掺入量与试样密度间关系更加明确^[16]。试验设置 3 个密度组: 密度组 1(1.5 g/cm³)、密度组 2(1.1 g/cm³)、密度组 3(0.6 g/cm³)^[17–18]。通过预试验确定泡沫与浆液的体积比(V_f/V_w)分别为 1、2、5。纳米 SiO_2 质量分数为 1‰、3‰和 5‰。试样制备流程示意图如图 1 所示。试样制备时, 制备泡沫时发泡剂和水的混合比例为 1:18, 用搅拌器搅拌 5 min, 为避免纳米 SiO_2 团聚, 将称量好的纳米 SiO_2 粉末缓慢地、分批地加入搅拌中的溶液中, 搅拌 10 min 后形成均匀稳定的浅白色发泡液。将发泡液通入发泡机, 将发泡溶液和压缩空气在一定压力下喷出从而制成泡沫。制备水泥砂浆时, 水泥浆的水胶比采用 0.45, 用搅拌器搅拌 5 min 以上得到均匀的水泥浆。随后, 将确定体积的泡沫加入水泥浆液中, 充分搅拌使水泥浆液和泡沫均匀混合。将拌合的气泡水泥浆液分 3 次灌入模具, 并充分振实^[19–21]。模具为边长 70.7 mm 的三联立方体模具。灌模完成后覆盖保鲜膜, 待静置硬化 24 h 后脱模。脱模后将试件置于温度为(20±2)℃、湿度大于 95%的养护室中养护 7、28、60 d。

1.2 方法

气泡的宏观试验包括气泡密度、泡沫泌水率。密度测试时, 将制备好的泡沫放入已知容量的容器内, 称取泡沫质量, 结合容器体积测得泡沫密度。泡沫泌水率试验时, 将制备好的气泡轻质土在空气中静置, 每隔一段时间记录泡沫的体积, 测定所排出的水分占泡沫总量的比率, 即泡沫泌水率。气泡的细观形态试验采用光学显微镜进行观测。将制备后的气泡立刻细致地涂覆在载玻片上, 拍摄泡沫图像, 记录各组别气泡的消泡过程。同时, 通过图像处理分析各组别气泡的形态特征(图 2), 包括气泡的柏拉图通道、费雷特直径和圆度指标。

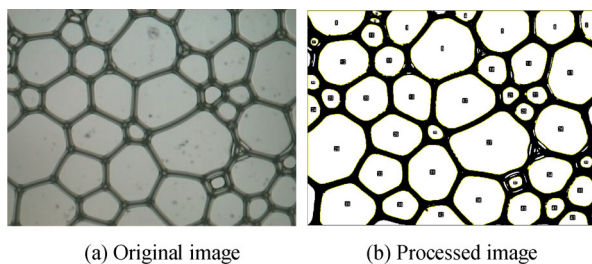


图 2 气泡的图像二值化处理

Fig. 2 Image binarization of foam

气泡轻质土的宏观力学特征采用单轴抗压强度试验。所采用的液压式万能试验机测量精度为 $\pm 1\%$,

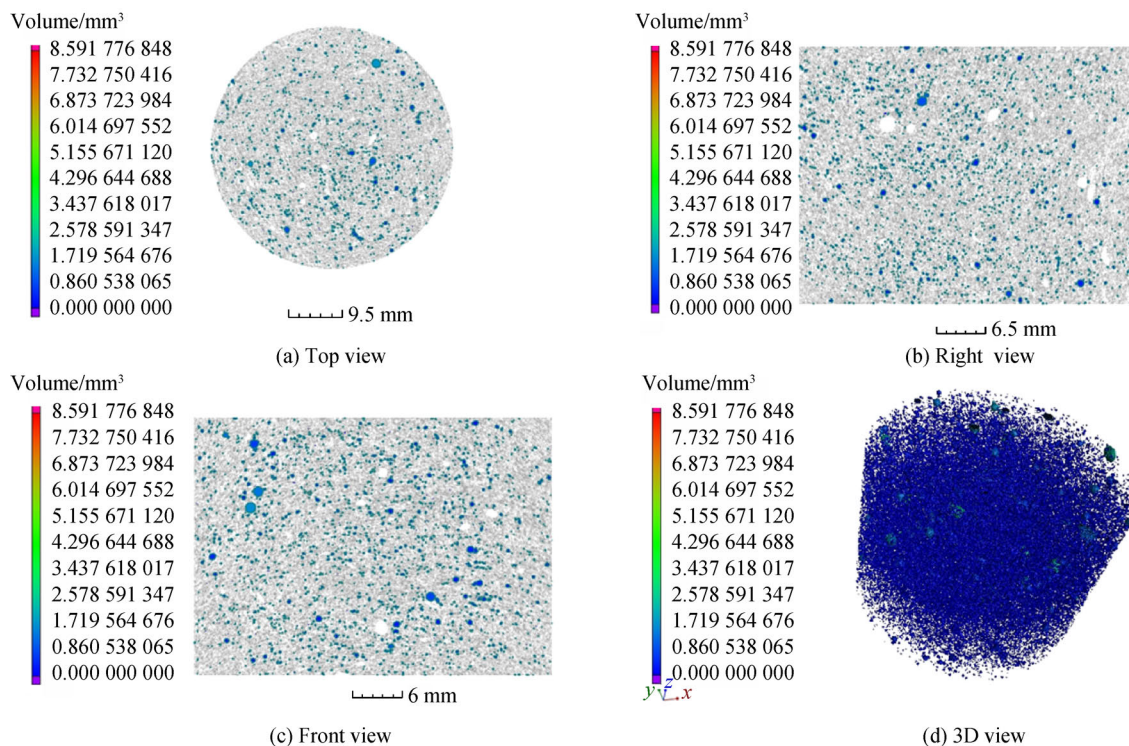


图 3 气泡轻质土 VGStudio Max 处理及分析结果

Fig. 3 Treatment and analysis results of VGStudio Max in foamed lightweight soil

1.3 步骤

按照制定的试验方案, 试验步骤如下: 1) 按设计的纳米 SiO_2 掺量制备气泡; 2) 进行气泡密度试验, 测得泡沫密度; 2) 进行气泡稳定性试验, 获得发泡倍数、泌水率; 3) 通过光学显微镜观测气泡形态与消泡过程; 4) 按设计的气泡轻质土密度组别和纳米 SiO_2 掺量制备气泡轻质土试样; 5) 待试样养护至龄期后, 进行 X-CT 扫描获得试样孔隙结构, 而后进行单轴抗压强度试验。

2 结果与讨论

2.1 泡沫稳定性试验

2.1.1 气泡外观特征

图 4 为纳米 SiO_2 改性气泡

试验时采用应力控制, 加载速度为 0.15 kN/s , 试样加压方向为成型时的插捣振动密实方向。气泡轻质土的孔隙结构采用 X-CT 检测。通过 X-CT 试验对气泡轻质土的三维孔隙结构进行重构, 将重构后的三维图像导入 VGStudio Max 软件进行图像处理和定量分析, 如图 3 所示。为了避免由于原本立方体试件边缘破损以及密度不均匀性对分析结果的影响, 在试样中心提取底面直径 30 mm 、高 30 mm 的圆柱形作为感兴趣区。将图像中的像素点按照灰度值区分孔隙和基质, 定量分析纳米 SiO_2 改性气泡轻质土的孔隙结构变化, 包括孔隙体积、形状、连通情况等。

的泡沫密度、发泡体积和泡沫 1 h 的泌水率, 其中, T 代表不掺入纳米 SiO_2 试验组, TR 代表掺入球形纳米 SiO_2 试验组, TS 代表掺入不规则形纳米 SiO_2 试验组, 纳米 SiO_2 掺量用数字表示。总体而言, 掺入纳米 SiO_2 后, 气泡的密度提高, 发泡体积减小, 泌水率减小, 纳米 SiO_2 有效增强了气泡的稳定性。对于不规则形纳米 SiO_2 , 随着纳米 SiO_2 掺量的增加, 泡沫的泌水率先降低后升高, 这说明纳米 SiO_2 存在最优掺量^[22]。随着颗粒浓度的增加, 吸附到气液表面的颗粒浓度随之上升, 体系的发泡性能和稳泡性能均有明显提高, 但随着纳米 SiO_2 稀释浓度增加到一定程度, 泌水率开始变大。这是因为在掺入适量的纳米 SiO_2 时, 表面活性剂分子吸附到其表

面, 通常形成单层吸附层, 使纳米颗粒表面被疏水碳链覆盖, 从而由原本的亲水表面转变为疏水表面, 有助于增强气—液界面的稳定性。但当大量表面活性剂分子吸附到纳米颗粒表面, 由于碳链之间的疏水相互作用, 表面活性剂分子形成双层吸附层, 纳米颗粒表面又变为亲水表面, 稳定性随之下降。对于不规则形纳米 SiO_2 , 由于其形态不规则, 表面积大, 在气—液界面的吸附更稳定, 能形成更致密的颗粒膜, 增强界面机械强度, 有效阻碍气泡合并与液膜排液, 因此泡沫稳定性提升更显著, 泌水率降低。对于球形纳米 SiO_2 , 球形颗粒在界面的吸附相对松散, 空间位阻效应较弱, 对液膜的支撑作用不如不规则形颗粒, 泡沫稳定性提升有限。对于掺入不规则纳米 SiO_2 的测试组, 最优掺入量在 3‰ 左右, 此时的泡沫体系 1 h 泌水率为 23%, 较未加入纳米 SiO_2 的组别降低了 70%。对于球形纳米 SiO_2 的测试组, 在 1‰~5‰ 这个掺量区间内, 泌水率持续增加, 故推测最优掺入量可能小于 1‰。

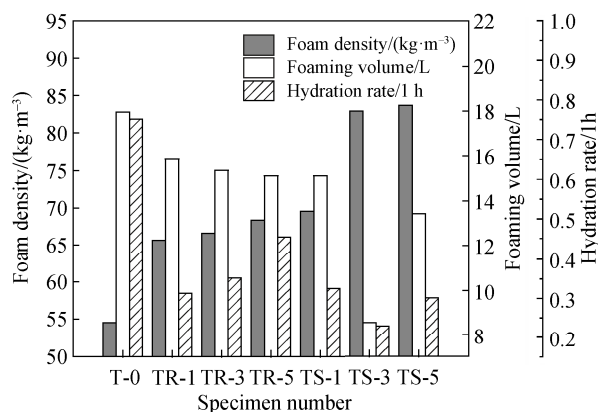


图4 发泡表现特征

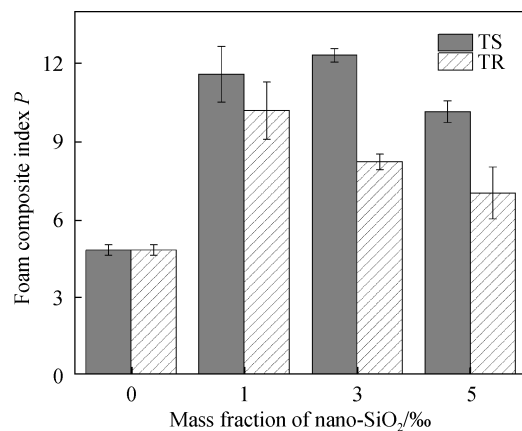
Fig. 4 Apparent characteristics of foaming

衡量气泡质量好坏, 需综合评价其发泡能力和气泡稳定性^[23]。本工作提出泡沫综合指数 P 综合表征泡沫的发泡效果与泡沫稳定性:

$$P = M \times (1 - D) \quad (1)$$

式中: M 为发泡倍数, D 为 1 h 泌水率。 P 值越大, 意味着发泡能力越强和气泡稳定性越好。由图 5 可见, 随着纳米 SiO_2 浓度的增加, 泡沫综合指数 P 呈现先增后减的变化规律。掺入 3‰ 不规则纳米 SiO_2 测试组对应的泡沫综合指数 P 最大, 气泡综合性能最优。同时, 掺入不规则形状的纳米 SiO_2 颗粒的试验组整体上综合性能较好。当纳米 SiO_2 掺量为 1‰ 时, 2 种纳米 SiO_2 的作用效果相似, 但随着掺量的

增加, 两者的差异逐渐增大。试验认为不规则的纳米 SiO_2 具有更好的发泡剂优化效果, 可能是因为不规则形颗粒比球形颗粒与气泡表面有更大的接触面积。

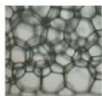
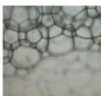
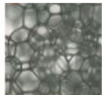
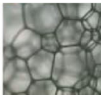
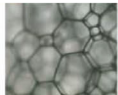
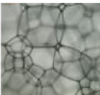
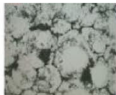
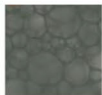
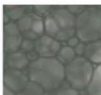
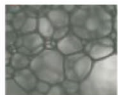
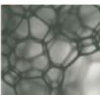
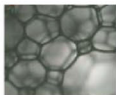
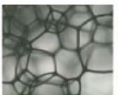
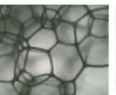
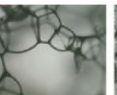
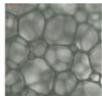
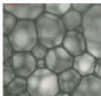
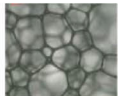
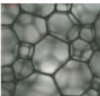
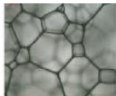
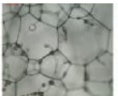
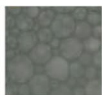
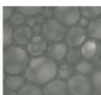
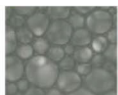
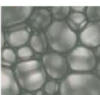
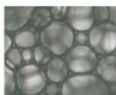
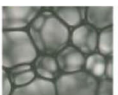
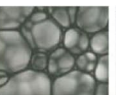
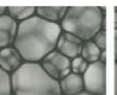
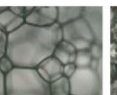
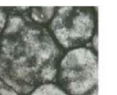
图5 泡沫综合指数 P 随纳米 SiO_2 掺量变化Fig. 5 Foam composite index P changes with the amount of nano-SiO₂ content

2.1.2 气泡消散 将制备的气泡放在载玻片上, 让气泡在自然状态下消散, 观测气泡消泡过程, 如表 2 所示。由于不同尺寸的气泡之间存在压力差, 随着时间的推移, 气泡增大并逐渐聚合, 并伴随水相在液膜之间流动, 液膜逐渐变薄, 泡沫体积也逐渐变大, 直至破裂、消失。普通泡沫在自然状态下, 5 min 时就已经基本完全消散。当掺入 3‰ 纳米 SiO_2 后, 消散时间在 35 min 以上, 表明气泡稳定性显著增强。

放大倍数 100 倍后可直观观测到气泡形态与接触关系, 如图 6 所示。泡沫形态为类多边形, 且紧密接触。气泡之间的柏拉图通道(Plateau border)相互连通, 为整个泡沫体系提供了泌水通道。相比于普通泡沫的液膜, 掺入 3‰ 纳米 SiO_2 后的泡沫液膜明显增厚。普通泡沫之间的柏拉图通道连通性好, 这有利于泡沫内水分的排出; 加入纳米 SiO_2 后, 大泡沫交接处有小泡沫的产生, 导致柏拉图通道的连通性降低, 这将阻碍泡沫体系内水分的排出, 从而提高泡沫的稳定性^[24]。

2.1.3 气泡形状 研究表明尺寸较小、形状规则的泡沫稳定性较好^[5]。通过图像二值化处理后, 计算泡沫的费雷特直径和圆度, 以评价纳米 SiO_2 对气泡形状的影响。图 7 为气泡费雷特直径随纳米 SiO_2 掺量的变化。普通气泡的费雷特直径较大和直径极差较大, 因此气泡尺寸大且大小差异大, 容易发生液膜破裂。加入纳米 SiO_2 后, 吸附在气—液界面

表 2 光学显微镜(50×)下气泡消散过程
Table 2 Foam dissipation process under light microscopy (50×)

Time/min	0	3	5	10	13	20	21	30	35	42
T-0										
TR-1										
TR-3										
TR-5										
TS-3										

1 mm

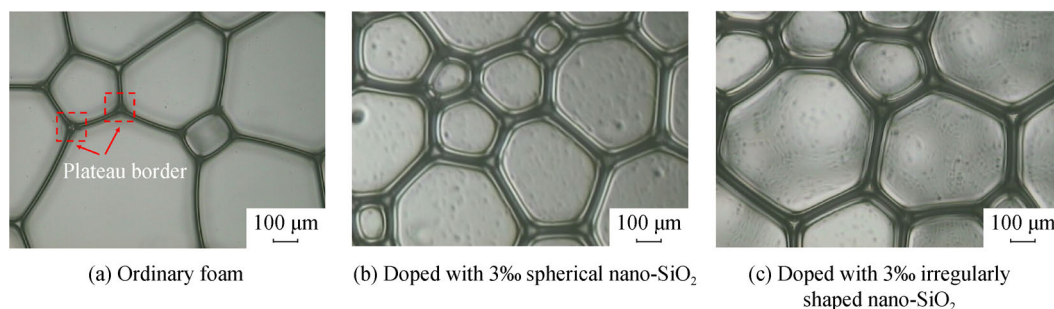


图 6 光学显微镜下气泡微观结构
Fig. 6 Mesoscopic structure of foam under light microscope

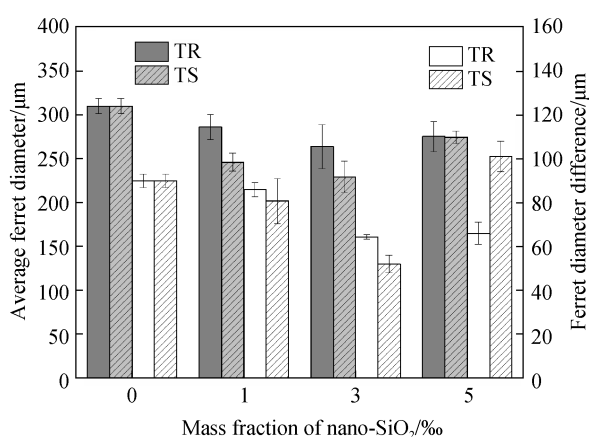


图 7 纳米 SiO₂ 掺量对气泡费雷特直径的影响
Fig. 7 Effect of nano-SiO₂ content on the diameter of foam Ferret

后, 会形成颗粒膜, 阻碍气泡的合并与长大, 若掺量过高, 过量的纳米颗粒会在体系中聚集, 破坏界

面的均匀性, 导致气泡尺寸再次增大、均匀性下降。气泡的平均费雷特直径和直径差值呈现先减小、后增大的趋势, 纳米 SiO₂ 掺量为 3‰ 时, 平均费雷特直径和直径差值达到最小值, 表明此时气泡尺寸较小且大小相对均匀。图 8 表明掺入纳米 SiO₂ 后, 气泡的平均圆度先增大后减小, 在纳米 SiO₂ 掺量 3‰ 时达到最大值, 且不规则形纳米 SiO₂ 改性后的气泡圆度更大。当纳米 SiO₂ 掺量为 5‰ 时, 气泡平均圆度小于普通气泡。纳米 SiO₂ 通过增强界面机械强度, 调控气泡的形状规则性。适量的纳米颗粒在气-液界面形成致密的支撑结构, 使气泡更易保持球形。其中, 不规则形纳米 SiO₂ 因形态不规则, 对气泡形状的规整作用更显著, 圆度更大。当掺量过高时, 纳米颗粒的聚集会破坏界面的稳定性, 气泡易发生变形, 圆度降低。以往研究也表明, 纳米颗粒掺量较高时反而会降低气泡稳定性^[25]。总体而言, SiO₂

掺量为 3‰ 时, 不规则形纳米 SiO_2 比球形纳米 SiO_2 对泡沫的稳泡能力更强, 会使得气泡大小更均匀, 形状更规则。

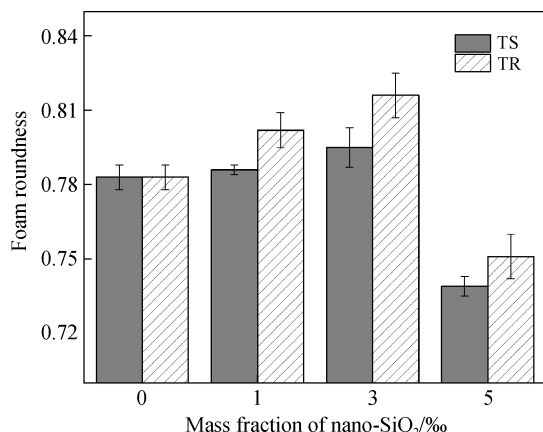


图 8 纳米 SiO_2 掺量对气泡圆度的影响

Fig. 8 Effect of nano- SiO_2 content on foam roundness

2.2 气泡轻质土宏观试验

2.2.1 单轴抗压强度 图 9 为各密度组单轴抗压强度的统计结果。可以看出同一组的气泡轻质土试样抗压强度存在一定离散性, 且高密度组强度的离散性低于低密度组。这可能与低密度的气泡轻质土孔隙结构差异较大有关^[26]。在相同养护龄期下, 随

着纳米 SiO_2 掺量的增加, 不同密度组气泡轻质土的峰值强度总体呈现先增大后减少的趋势, 当掺量为 3‰ 时, 峰值强度均值达到最高值。此时, 相较于未掺入纳米 SiO_2 试样, 1.5 g/cm^3 密度组试样 28、60 d 龄期的抗压强度分别提高了 17% 和 14%, 1.1 g/cm^3 密度组试样提高了 20% 和 28%, 0.6 g/cm^3 密度组试样提高了 7% 和 51%。

2.2.2 气泡轻质土孔隙结构 气泡轻质土孔隙结构从孔隙体积、孔隙形状和孔隙间隙 3 个层面分析。气泡轻质土孔隙体积特征统计结果如图 10 所示。其中 V 表示孔隙的平均体积; V_{50} 表示小于相应体积的孔隙占比为 50%, 即孔隙体积的中位数; V_{90} 表示小于相应体积的孔隙占比为 90%, 即孔隙体积的高占比分布。由图 10 可以看出, 在同一密度组别内, 加入纳米 SiO_2 后, 气泡轻质土内部的孔隙体积整体上是变小的。随着掺入量的增大, 气泡轻质土内部孔隙体积先减小后增大。以密度组 1 为例, 普通气泡轻质土(未加入纳米 SiO_2)的平均孔隙为 0.014 0 mm^3 , 分别掺入 1‰、3‰、5‰ 的纳米 SiO_2 后, 试样内部平均孔隙依次为 0.010 1、0.007 5、0.008 1 mm^3 , 体积相应减小了 28%、46%、42%。孔隙特征值 V_{50} 、 V_{90} 变化规律与之一致。

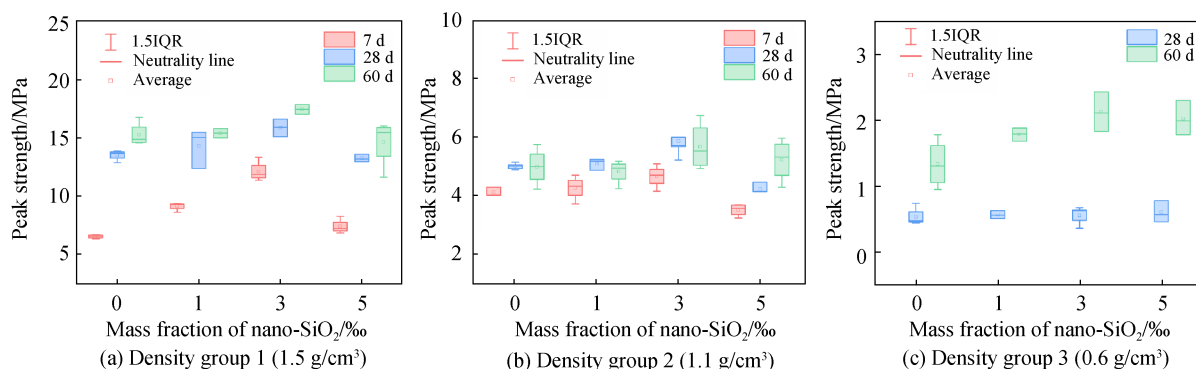


图 9 气泡轻质土养护不同龄期峰值强度统计结果

Fig. 9 Statistical results of peak intensity of foamed lightweight soil at different ages

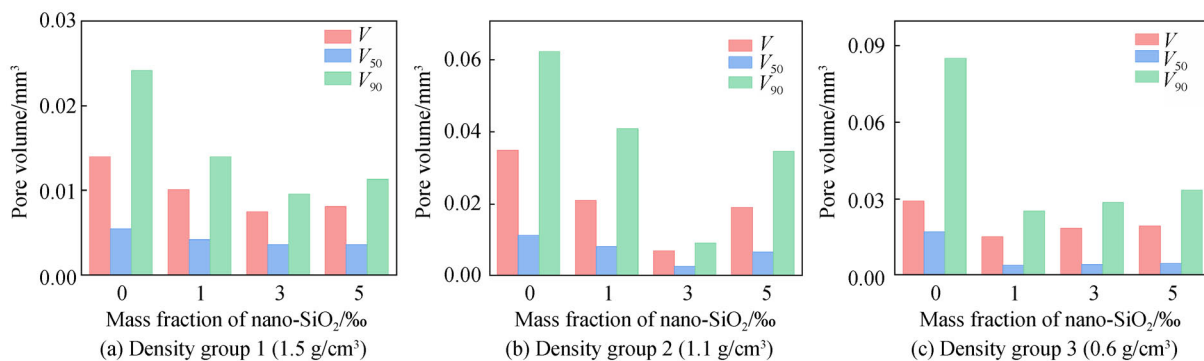


图 10 气泡轻质土 28 d 龄期时孔隙体积特征

Fig. 10 Pore volume characteristics of foamed lightweight soil at 28 d age

孔隙形状可用孔隙的球度来表征。当球度值接近于 1 时, 说明孔隙的形状接近于规则的圆球; 当球度值接近于 0 时, 说明孔隙的形状不规则。为了清晰地表示出掺入纳米 SiO_2 的组别与普通气泡轻质土组别的球度分布差异, 按照气泡轻质土不同的密度分组绘制球度数量的累计分布曲线如图 11 所示。由图 11 可见, 对于密度组 1 (1.5 g/cm^3) 而言, 纳米 SiO_2 的加入对于球度的影

响不大。随着试样的密度减小, 纳米 SiO_2 的加入对球度的影响逐渐增大。对于密度组 3 (0.6 g/cm^3) 的气泡轻质土, 纳米 SiO_2 的加入使得曲线整体向右侧移动, 说明试样内部孔隙的球度整体增大, 纳米 SiO_2 的加入使气泡轻质土内部孔隙形状变得更加规则。此外, 当掺入浓度为 3‰ 和 5‰ 纳米 SiO_2 时, 气泡轻质土内部孔隙结构比掺入 1‰ 纳米 SiO_2 的更规则。

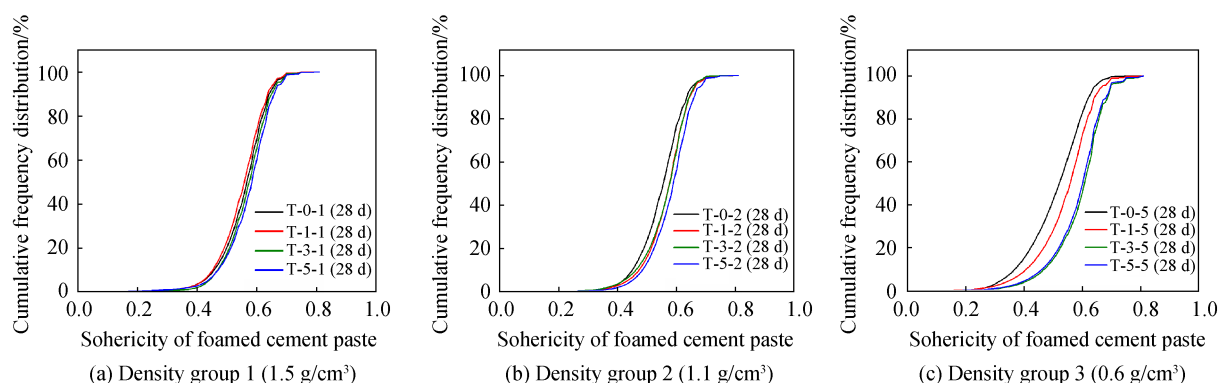


图 11 气泡轻质土孔隙球度累计分布曲线

Fig. 11 Cumulative frequency distribution curve of pore sphericity of foamed lightweight soil

孔隙间隙的分布可通过孔隙间隙统计的小提琴图来分析, 如图 12 所示。小提琴图纵向的长度代表孔隙间隙分布的范围, 横向的宽度代表某一间隙的孔隙所占比例的大小。从图 12 可见, 气泡轻质土内部孔隙间隙的分布是不均匀的。普通气泡轻质土孔

隙间隙小提琴图为瘦长形, 分布区间较大, 且内部孔隙间隙的最大值超过 1 mm。加入纳米 SiO_2 后, 孔隙间隙小提琴图变得更为扁平形, 孔隙间隙的分布范围减小, 表明孔隙间距的分布趋于均匀, 且对低密度组内部孔隙间隙影响更大。

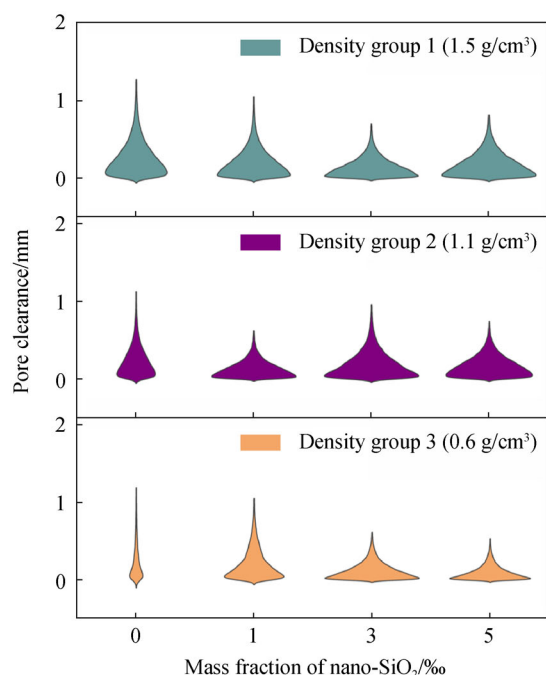


图 12 气泡轻质土孔隙间隙统计

Fig. 12 Statistics of pore clearance of foamed lightweight soil

3 结论

本工作通过一系列的宏观和细观试验, 开展了纳米改性气泡的稳定增强机制和气泡轻质土的力学特性研究。纳米 SiO_2 质量掺入比为 1‰、3‰、5‰, 颗粒形状采用球形和不规则形。基于试验结果与分析, 得到以下结论:

1) 纳米 SiO_2 的掺入可提高泡沫密度, 减小发泡体积和泌水率。微观观测表明, 加入纳米 SiO_2 可使液膜增厚, 泡沫圆度增加, 柏拉图通道连通性降低, 起到阻止气体排出的作用。掺入 3‰ 不规则纳米 SiO_2 测试组对应的泡沫质量最佳。

2) 相同龄期时, 随着纳米 SiO_2 掺量的增加, 不同密度组气泡轻质土的单轴抗压强度总体呈现先增大后减小的趋势, 当掺量为 3‰ 时, 峰值强度均值达到最高值。相较于未掺入纳米 SiO_2 试样, 3 个密度组的试样 28、60 d 龄期的抗压强度提高了 7%~51%。

3) 相较于未掺入纳米 SiO_2 试样, 28 d 龄期时,

3 个密度组试样内部的单个孔隙体积呈减小趋势, 平均孔隙体积相应减小了 28%~46%, 且孔隙的球度增大, 球度分布范围减小, 孔隙间距的分布趋于均匀。纳米 SiO₂ 的加入对低密度组内部孔隙结构的优化效果更为显著。

参考文献:

- [1] 张振, 饶烽瑞, 叶观宝, 等. 基于 X-CT 技术的气泡轻质土孔隙结构研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1104–1112.
ZHANG Zhen, RAO Fengrui, YE Guanbao, et al. J Build Mater, 2020, 23(5): 1104–1112.
- [2] 龙沛祺. 轻质气泡混凝土在轨道路基填筑工程中的分析与应用[J]. 工程技术研究, 2021, 6(22): 267–270.
LONG Peiqi. Eng Technol Res, 2021, 6(22): 267–270.
- [3] 李升涛, 陈徐东, 张锦华, 等. 不同密度等级泡沫混凝土的单轴压缩破坏特征[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1146–1153.
LI Shengtao, CHEN Xudong, ZHANG Jinhua, et al. J Build Mater, 2021, 24(6): 1146–1153.
- [4] 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, 2017, 20(1): 93–98.
- [5] RAO F R, ZHANG Z, YE G B, et al. Mesostructure of foamed cement paste and its influence on macromechanical behavior[J]. J Mater Civ Eng, 2021, 33(6): 04021114.
- [6] RAMAMURTHY K, KUNHANANDAN NAMBIAR E K, INDU SIVA RANJANI G. A classification of studies on properties of foam concrete[J]. Cem Concr Compos, 2009, 31(6): 388–396.
- [7] 黎冰, 高玉峰. 黏土与 EPS 颗粒混合轻质土的动力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 1042–1047.
LI Bing, GAO Yufeng. Chin J Geotech Eng, 2007, 29(7): 1042–1047.
- [8] WANG Z J, LI S Y, PENG D L, et al. The effect of interfacial tension on CO₂ oil-based foam stability under different temperatures and pressures[J]. Fuel, 2023, 341: 127755.
- [9] 徐蕊, 杨辰飞, 张磊, 等. 改性微生物泡沫剂及其在泡沫混凝土中的应用[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(1): 42–49.
XU Rui, YANG Chenfei, ZHANG Lei, et al. J Build Mater, 2025, 28(1): 42–49.
- [10] 李晶坤, 罗斌, 卢烁, 等. 泡沫混凝土三维疏水微结构的构筑及性能[J]. 建筑材料学报, 2025, 28(5): 442–448.
LI Jingkun, LUO Bin, LU Shuo, et al. J Build Mater, 2025, 28(5): 442–448.
- [11] 叶慈彪, 杨海平, 陈倩倩, 等. HPMC 改性泡沫对泡沫混凝土性能影响[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(3): 26–30.
YE Cibiao, YANG Haiping, CHEN Qianqian, et al. New Build Mater, 2022, 49(3): 26–30.
- [12] 孙乾, 李兆敏, 李松岩, 等. SiO₂ 纳米颗粒稳定的泡沫体系驱油性能研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 124–131.
SUN Qian, LI Zhaomin, LI Songyan, et al. J China Univ Petrol Ed Nat Sci, 2014, 38(4): 124–131.
- [13] 李兆敏, 王鹏, 李松岩, 等. 纳米颗粒提高二氧化碳泡沫稳定性的研究进展[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2014, 36(4): 155–161.
LI Zhaomin, WANG Peng, LI Songyan, et al. J Southwest Petrol Univ Sci Technol Ed, 2014, 36(4): 155–161.
- [14] 杨兆中, 朱静怡, 李小刚, 等. 纳米颗粒稳定泡沫在油气开采中的研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(5): 1675–1681.
YANG Zhaozhong, ZHU Jingyi, LI Xiaogang, et al. Chem Ind Eng Prog, 2017, 36(5): 1675–1681.
- [15] 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(7): 723–730.
GAO Zhihan, CHEN Bo, CHEN Jialin, et al. J Build Mater, 2023, 26(7): 723–730.
- [16] ALDRIDGE D. Introduction to foamed concrete: What, why, how [M]// Use of Foamed Concrete in Construction: Emerald Publishing Limited, 2005: 1–14.
- [17] 唐海斌. 高含水量水泥土工程特性试验研究[J]. 地基处理, 2024, 6(3): 256–261.
TANG Haibin. J Ground Improv, 2024, 6(3): 256–261.
- [18] 唐紫琼, 陈加富, 侯爵, 等. 粉土改良膨胀土工程特性试验研究[J]. 地基处理, 2023, 5(2): 113–120.
TANG Ziqiong, CHEN Jiafu, HOU Jue, et al. J Ground Improv, 2023, 5(2): 113–120.
- [19] FALLIANO D, DE DOMENICO 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: 735–749.
- [20] 查甫生, 廖斌, 崔可锐. 掺粉煤灰-石灰对膨胀土胀缩性的影响试验研究[J]. 上海地质, 2010(B11): 73–76.
ZHA Fusheng, LIAO Bin, CUI Kerui. Shanghai Land Res, 2010(B11): 73–76.
- [21] 李帆, 严国仙, 丛林. 水泥土工程特性的室内试验与分析[J]. 上海地质, 2001, 22(3): 24–27.
LI Fan, YAN Guoxian, CONG Lin. Shanghai Geol, 2001, 22(3): 24–27.
- [22] 邓少刚, 郭丽潇, 高志婷, 等. 纳米二氧化硅对去污泡沫稳定性的影响研究[J]. 当代化工, 2022, 51(6): 1388–1391.
DENG Shaogang, GUO Lixiao, GAO Zhiting, et al. Contemp Chem Ind, 2022, 51(6): 1388–1391.
- [23] 黎冰, 杜杰, 高玉峰, 等. 发泡剂性能评价指标[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 651–657.
LI Bing, DU Jie, GAO Yufeng, et al. J Southeast Univ Nat Sci Ed, 2020, 50(4): 651–657.
- [24] Xue, P. Study of hydrophobic hollow silica to improve foam stability[J]. Chemical Engineer, 2021, (4): 91–94.
- [25] 彭宝亮, 罗健辉, 王平美, 等. 用于低渗透油田调剖的纳米颗粒稳定泡沫体系研究进展[J]. 油田化学, 2017, 34(4): 745–748.
PENG Baoliang, LUO Jianhui, WANG Pingmei, et al. Oilfield Chem, 2017, 34(4): 745–748.
- [26] 汤峻, 朱伟, 李明东, 等. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土的物理力学特性[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1045–1049.
TANG Jun, ZHU Wei, LI Mingdong, et al. Rock Soil Mech, 2007, 28(5): 1045–1049.

作者贡献声明:

刘思敏: 提出研究方向、绘制图表、撰写论文
许言: 绘制图表、参与数据分析

叶观宝：完善论文框架

王明玉：实验测试、参与数据分析

张 振：提出研究方向、设计论文框架，修订论文

万 勋：实验测试、参与数据分析

Foam Stability and Mechanical Characteristics of Silicon Dioxide Nanoparticles-Modified Foamed Lightweight Soil

LIU Simin¹, XU Yan², YE Guanbao¹, ZHANG Zhen^{1,3}, WANG Mingyu⁴, WAN Xun¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai institute of natural resources survey and utilization, Shanghai 200072, China; 3. College of Hydraulic and civil engineering, Tibet Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, Xizang, China; 4. Institute of building materials research Aachen (ibac), RWTH Aachen University, Aachen 52062, Germany)

Extended Abstract

Introduction Foamed lightweight soil (FLS) is a cementitious geotechnical material prepared *via* mixing cement paste with preformed foam and sometimes incorporating additional aggregates. Its density and mechanical strength can be tailored *via* adjusting the foam content. FLS is widely employed in embankment construction and backfill applications due to its capacity to substantially reduce fill load and settlement. The strength of FLS generally exhibits an exponential relationship with density, which is affected by its internal pore structure. During casting, unstable bubbles can lead to non-uniform pore distribution. Enhancing foam stability is therefore crucial for pore structure optimization. Additives such as stabilizers and viscosifiers are commonly used to improve foam stability, but they can concurrently reduce foaming capacity. SiO₂ nanoparticles have a potential in modifying interface properties and inhibiting foam decay. However, its influence on the pore structure of FLS and a systematic comparison with conventional FLS remain to be insufficiently investigated. This study was to examine how SiO₂ nanoparticles could affect foam stability and enhance the mechanical properties and pore structure of FLS. The effects of morphology and content of SiO₂ nanoparticles were analyzed through bubble density measurements, foam bleeding tests, and optical microscopy. The mechanical performance and pore structure characteristics were evaluated by uniaxial compression tests and X-ray computed tomography, providing theoretical and practical insights for the application of nanomaterials in FLS.

Methods FLS specimens were prepared with P·C 42.5 composite Portland cement, plant-protein-based foaming agent, nanoparticles of SiO₂, and tap water. SiO₂ nanoparticles were incorporated at different mass ratios (*i.e.*, 1‰, 3‰, and 5‰) by cement mass. Three target wet density groups were designed at 1.5, 1.1 g/cm³, and 0.6 g/cm³. The mixtures were cast in cubic molds with the size of 70.7 mm, demolded after 24 h, and cured under standard conditions (*i.e.*, (20 ± 2) °C, RH > 95%) for 7, 28 d, and 60 d, respectively. The foam bleeding rate was determined *via* measuring the volume of liquid expelled from freshly prepared foam standing in air at specified intervals, calculated as a ratio of expelled liquid to initial foam volume. The bubble morphology and foam decay were analyzed by optical microscopy. The mechanical properties of hardened specimens were evaluated by uniaxial compression tests, while the pore structure was characterized using X-ray computed tomography (X-CT). All the experiments were repeated at least three times to ensure accuracy and reproducibility.

Results and discussion The results of foam stability test demonstrate that the incorporation of SiO₂ nanoparticles significantly reduces the foam bleeding rate and prolongs the bubble dissipation duration in FLS, while simultaneously promoting more uniform bubble size distribution and regular morphological characteristics. These results confirm the effective enhancement of bubble stability through the modification of SiO₂ nanoparticles. Note that FLS specimens incorporating irregularly-shaped SiO₂ nanoparticles exhibit superior comprehensive performance due to the larger contact area between irregular particles and bubble interfaces, compared to their spherical counterparts. For FLS specimens with irregular SiO₂ nanoparticles, the optimal incorporation ratio is 3‰ (in mass), achieving a 1 h bleeding rate of 23% in the foam system, representing a 70% reduction, compared to the control group without SiO₂ nanoparticles. This enhancement mechanism involves the adsorption of surfactant molecules onto the surfaces of the nanoparticles, where appropriate concentrations typically form monolayer adsorption films that convert the surface of originally hydrophilic to hydrophobic. However, the excessive surfactant adsorption leads to a bilayer formation, reverting the nanoparticle surface to hydrophilic and consequently diminishing a stabilization effectiveness. The results of uniaxial compression tests reveal that the peak strength of FLS in different density groups generally follows an initial increase and a subsequent decrease trend with increasing the content of SiO₂ nanoparticles, reaching the maximum values at an incorporation ratio of 3‰. The results of X-CT scanning further indicate that the incorporation of SiO₂ nanoparticles generally reduces the internal pore volume of FLS, while demonstrating that the pore volume has a decreasing-then-increasing pattern as the content of SiO₂ nanoparticles increases. Moreover, the addition of SiO₂ nanoparticles contributes to more regular pore morphology and more uniform pore spacing distribution in FLS. The specimens incorporating the SiO₂ nanoparticles of 3‰ and 5‰ exhibit more regular internal pore structures, compared to that with SiO₂ nanoparticles of 1‰.

Conclusions The incorporation of SiO₂ nanoparticles enhanced foam density, while reducing foaming volume and bleeding rate. The microscopic analysis revealed that SiO₂ nanoparticles could thicken the liquid film, increase foam sphericity, and reduce the connectivity of Plateau borders, thereby inhibiting gas escape. The 3‰ content of irregular SiO₂ nanoparticles demonstrated an optimal foam quality. At identical curing ages, the uniaxial compressive strength of FLS in different density groups exhibited a characteristic trend of initial increase and subsequent decrease as the content of SiO₂ nanoparticles increased, obtaining the maximum value at the content of 3‰. Compared to the specimens without SiO₂ nanoparticles, the 28 d and 60 d compressive strengths in three density groups with SiO₂ nanoparticles could increase from 7% to 51%. For the specimens without SiO₂ nanoparticles, the 28 d FLS specimens with SiO₂ nanoparticles displayed reduced individual pore volumes in all density groups, and the average pore volume was decreased by 28%–46%. Concurrently, the pore sphericity increased and accompanied with a narrow size distribution, and the pore spacing became more uniform. The modification of SiO₂ nanoparticles could prove particularly effective in optimizing the pore structure of low-density FLS.

Keywords foamed lightweight soil; nano-silicon dioxide; mechanical properties; foam stability; enhanced mechanism