

水泥基矽尘泡沫轻质土耐久性能及微观机理研究

刘 勇¹, 安 宁¹, 张宏博^{2*}

¹山东交通学院交通土建工程学院, 山东 济南

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月28日

摘 要

为了研究水泥基矽尘泡沫轻质土的耐久学性能和微观机理, 以水泥、矽尘作为胶凝材料制作泡沫轻质土, 分析湿密度(500 kg/m³、600 kg/m³、700 kg/m³、800 kg/m³)、矽尘掺量(0%、7.5%、12.5%、17.5%、22.5%)及冻融循环次数等因素对泡沫轻质土经历耐久性后的无侧限抗压强度、表观形态、质量损失率、孔泡结构的影响, 建立冻融循环性能预测模型。结果表明: 随着冻融循环次数的增加, 无侧限抗压强度呈现出波动降低趋势; 湿密度高于700 kg/m³的试件, 冻融30次后的表观形态较完整; 并且所有配合比的试件质量损失率均小于5%; 矽尘掺量低于12.5%时, 能有效提高无侧限抗压强度; 相同养护龄期内, 设计湿密度与抗压强度成正比; 依据实验结果, 建立了适用于不同配合比的水泥基矽尘泡沫轻质土的冻融循环性能预测公式; 揭示了冻融循环强度微观机理, 湿密度越大, 泡沫轻质土孔隙率越低; 矽尘掺量越多, 平均孔径越小。研究成果可以为该材料的工程应用提供依据。

关键词

矽尘, 泡沫轻质土, 冻融循环, 微观机理, 预测公式

Research on the Durability and Microscopic Mechanism of Cement-Based Silica Dust Foam Lightweight Soil

Yong Liu¹, Ning An¹, Hongbo Zhang^{2*}

¹School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

²School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Received: September 22, 2025; accepted: October 14, 2025; published: October 28, 2025

*通讯作者。

文章引用: 刘勇, 安宁, 张宏博. 水泥基矽尘泡沫轻质土耐久性能及微观机理研究[J]. 材料科学, 2025, 15(10): 1930-1942. DOI: 10.12677/ms.2025.1510206

Abstract

In order to study the durability properties and microscopic mechanism of cement-based silica dust foam lightweight soil, cement and silica dust were used as cementitious materials to make foam lightweight soil, and the wet density (500 kg/m³, 600 kg/m³, 700 kg/m³, 800 kg/m³), silica dust content (0%, 7.5%, 12.5%, 17.5%, 22.5%) and the number of freeze-thaw cycles were analyzed to determine the unconfined compressive strength, apparent morphology, mass loss rate and pore structure. The results show that with the increase of the number of freeze-thaw cycles, the unconfined compressive strength shows a fluctuating downward trend. The apparent morphology of specimens with wet density higher than 700 kg/m³ was relatively complete after 30 freeze-thaw times. And the mass loss rate of all specimens is less than 5%; when the dust content of the quarry is less than 12.5%, it can effectively improve the unconfined compressive strength. During the same curing age, the design wet density is directly proportional to the compressive strength. According to the experimental results, a prediction formula for the freeze-thaw cycle performance of cement-based silica dust foam lightweight soil with different mix ratios was established. The microscopic mechanism of freeze-thaw cycle strength was revealed, and the higher the wet density, the lower the porosity of foamed light soil. The more silica dust is added, the smaller the average pore size. The research results can provide a basis for the engineering application of this material.

Keywords

Silica Dust, Foamy Light Soil, Freeze-Thaw Cycle, Microscopic Mechanism, Prediction Formula

Copyright © 2025 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

在水泥浆体中掺入适量泡沫使其形成泡沫轻质土，其具有质地轻、密度可调节、整体性强以及耐久性好等特点[1][2]。近年来泡沫轻质土在道路工程中得到广泛应用，如用作拓宽路段路基材料以减小附加应力，用作桥涵台背回填材料以防止差异沉降引起的跳车现象[3]-[5]。在季节性冻融或者高海拔寒冷地区，外界温度在 0℃ 上下徘徊，当路基所处环境温度较低时，路基处于冰冻状态，泡沫轻质土路基内部的水分冻结产生冻胀应力，当冻胀应力大于孔泡结构强度时，孔泡结构受到挤压破坏，进而产生细微裂缝；当路基所处环境的温度回暖时，解冻状态的水会析出一部分物质，当泡沫轻质土经历数次冻融循环后，其强度会发生改变[6]。因此，泡沫轻质土的冻融循环特性具有十分重要的意义。

于婷婷[7]发现泡沫轻质土在经历冻融循环试验后，其内部大孔增多，小孔减少，孔径粗化，孔径分布分散，抗冻性能降低。董召强[8]认为泡沫轻质土在冻融循环次数小于等于 3 次时，泡沫轻质土冻融循环质量损失为负值，泡沫轻质土超过三次冻融循环时质量损失为正值。陈雄威[9][10]等学者认为，随着冻融循环试验的开始，泡沫轻质土的无侧限抗压强度小幅度上升，然后开始逐渐下降。

本文研究将水泥基矽尘泡沫轻质土作为研究对象，研究其湿密度、矽尘掺量和冻融次数对冻融循环性能的影响，并从微观层面揭示抗压强度机理，建立冻融循环性能预测模型，为水泥基矽尘泡沫轻质土用于道路工程提供技术支持。

2. 试验准备

2.1. 矽尘

试验选用泗水县矽尘，其化学成分主要为 CaCO_3 、 $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$ 、 SiO_2 ，其中 SiO_2 含量为 10.9%。矽尘 XRD 测试结果如图 1 所示，主要矿物相为方解石(Calcite)、方英石(Quartz)、白云石(Dolomite)。

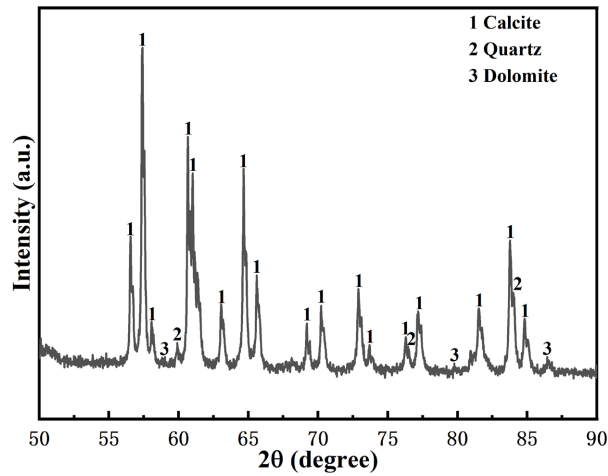


Figure 1. XRD image of silica dust
图 1. 矽尘的 XRD 图

2.2. 水泥

水泥选用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥，水泥的物理性能指标如表 1 所示。

Table 1. Physical properties of cement
表 1. 水泥物理性能指标

比表面积 (m^2/kg)	标准稠度 (%)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3800	28.5	260	380	18.5	45.5	4.1	7.3

2.3. 发泡剂

发泡剂采用山东烟台驰龙建筑节能科技有限公司生产的复合型发泡剂，其性能如表 2 所示。

Table 2. Main chemical composition of foaming liquid
表 2. 发泡液的主要性能指标

品种	稀释倍数	发泡倍数	标准泡沫密度(kg/m^3)	30 min 泌水率(%)
复合型	50	800~1000	40~50	15.93

2.4. 水泥基矽尘泡沫轻质土配合比

为了研究不同设计湿密度及矽尘掺量对泡沫轻质土力学性能的影响，结合前期预试验，确定水固比为 0.55，浆体湿密度为 $500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $700 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、 $800 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，矽尘掺量为 7.5%、12.5%、17.5%、22.5%。试验配比如表 3 所示。

Table 3. Mix design table
表 3. 配合比设计表

ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	P	C_1	C_2	C_3	C_4	K_1	K_2
500	600	700	800	0	299	365	432	498	0	0
				7.5	276	338	399	461	22	27
				12.5	261	320	378	436	37	46
				17.5	247	301	356	411	52	64
				22.5	232	283	334	386	67	82
K_3	K_4	W_1	W_2	W_3	W_4	B_1	B_2	B_3	B_4	
0	0									
32	37									
54	62	164	201	237	274	37	34	31	28	
76	87									
97	112									

注：下标 i 表示变量的取值。 ρ 表示设计浆体湿密度， kg/m^3 ； P 表示砂尘掺量，%； C 表示水泥质量， kg ； K 表示砂尘质量， kg ； W 表示拌和用水量， kg ； B 表示泡沫质量， kg 。

2.5. 试验流程

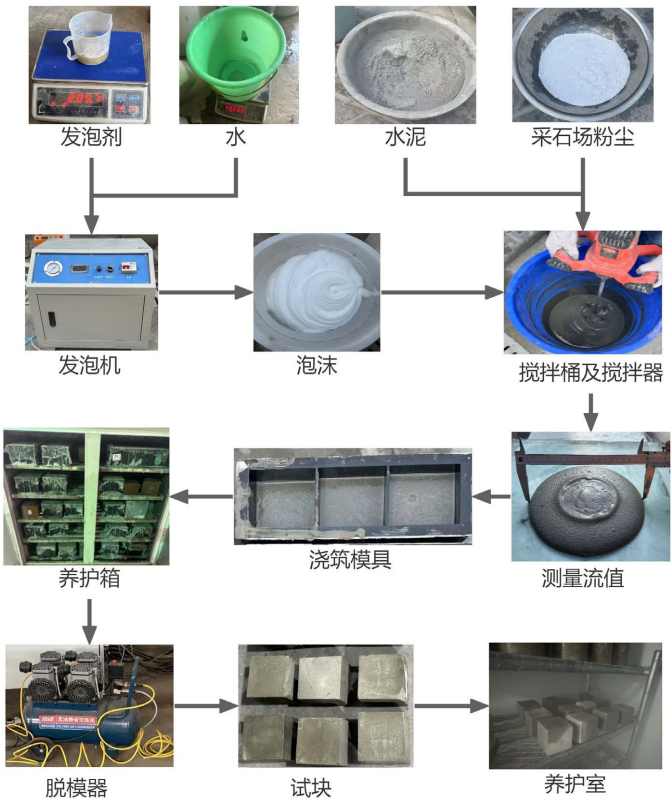


Figure 2. Flow chart of specimen preparation
图 2. 试件制备流程图

水泥基砂尘泡沫轻质土的制备流程如下：按表 2 中泡沫要求，配置密度为 50 kg/m^3 的泡沫。按照表 3 中的配合比，先将干料(水泥与砂尘)搅拌均匀，再将混合料倒在搅拌桶中边加水边搅拌，持续 4 min；然后称取适量泡沫加入搅拌桶，慢速搅拌 1 min 后快速搅拌 2 min，使泡沫与水泥浆充分融合，然后把泡沫轻质土拌合物浇筑在模具里，覆盖保鲜膜后放在养护箱，养护 24 h 后脱模。最后将试件放在标准养护室(温度 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\geq 90\%$)内，养护至规定龄期后进行试验。试件制备流程图如图 2 所示。

2.6. 测试方法

根据 TJG-F10-01-2011《现浇泡沫轻质土路基设计施工技术规范》[11]，进行配合比设计、浆体流值测试。

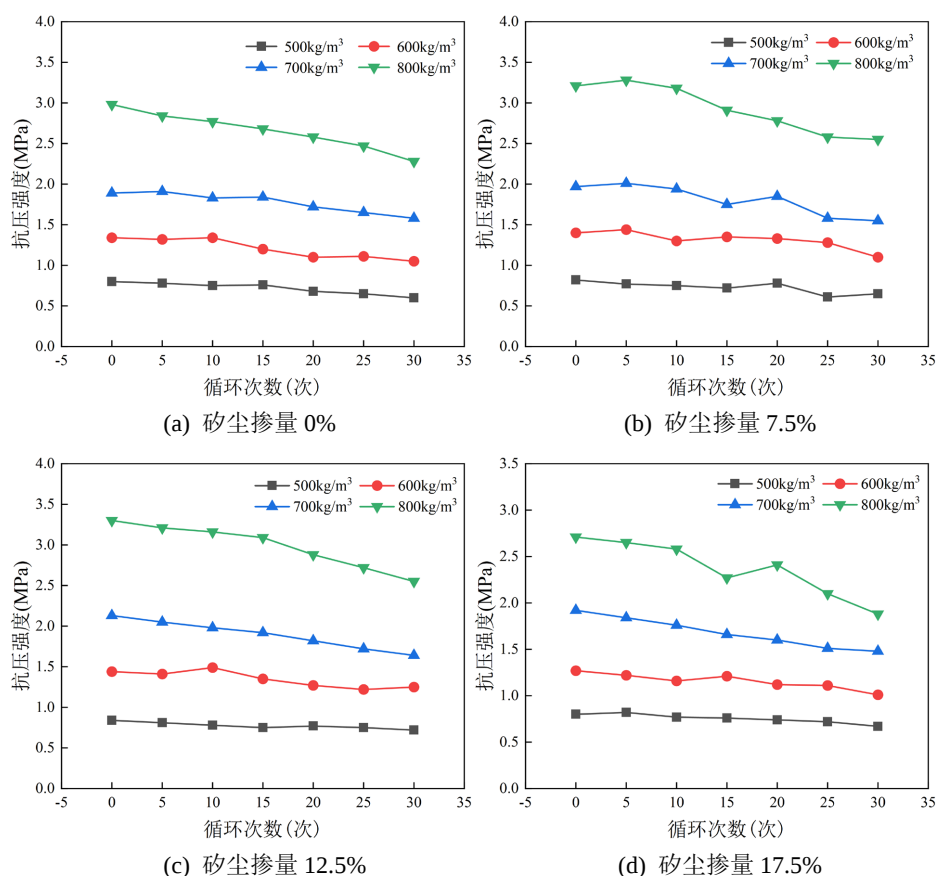
根据 GBT11969-2020《蒸压加气混凝土性能试验方法》[12]，进行试块尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的抗压强度试验。

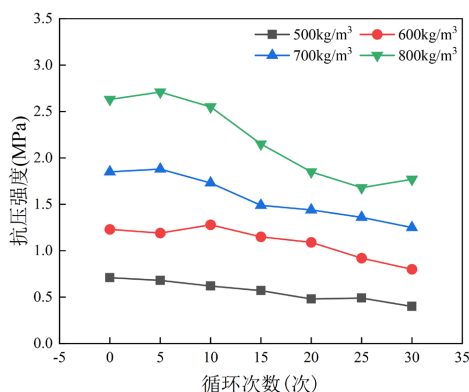
孔隙率使用 3D 数码显微镜(凯视迈 KS-X1000)采集，图像处理采用 Image Pro Plus (6.0)。

3. 实验结果分析

3.1. 无侧限抗压强度随冻融循环次数发展规律

图 3 表示不同砂尘掺量的泡沫轻质土无侧限抗压强度与冻融循环次数的关系。如图所示，泡沫轻质土在经历冻融循环试验后，无侧限抗压强度会有上下波动的现象，但整体呈现下降趋势。砂尘掺量越多，无侧限抗压强度下降幅度越大，以 700 kg/m^3 的泡沫轻质土为例，在不掺加砂尘时，泡沫轻质土经历 30 次冻融循环，无侧限抗压强度减少 16.4%，当砂尘掺量提高到 22.5% 时，无侧限抗压强度减少 32.4%。





(e) 矽尘掺量 22.5%

Figure 3. Relationship between the unconfined compressive strength of different silica dust content and the number of freeze-thaw cycles

图 3. 不同矽尘掺量无侧限抗压强度与冻融循环次数关系图

这是由于矽尘同等质量替换了水泥, 导致泡沫轻质土的水化产物含量降低, 导致水泥基矽尘抵抗冻融破坏的能力降低, 随着湿密度的提高, 单位体积的水化产物含量增多, 泡沫轻质土对冻融循环带来的应力变化抵抗能力提高。因此水泥基矽尘泡沫轻质土的湿密度越大, 冻融循环性能越好。

3.2. 冻融循环泡沫轻质土表面分析

泡沫轻质土经历 30 次冻融循环后, 表面没有明显破坏痕迹, 如图 4 所示, 但是其无侧限抗压强度降低, 所以其内部可能受到受冻胀破坏, 因此把试块从距离边缘三分之一位置用钢锯锯开, 观察其内部切片表面的破坏形态。



Figure 4. Untreated specimen surface

图 4. 未处理试件表面

图 5 为矽尘掺量为 12.5% 时, 不同湿密度的泡沫轻质土在经历 30 次冻融循环后的切割面表面照片。可以看出, 随着湿密度的提高, 泡沫轻质土表面的裂缝数量逐渐减少, 并且裂缝的发育趋势由大面积龟裂以及贯通裂缝向着单根裂缝和半贯通裂缝发展。其中, 湿密度为 500 kg/m³ 和 600 kg/m³ 的泡沫轻质土在人工切割的过程中造成了部分破碎现象。根据表 3 水泥基矽尘泡沫轻质土配合比设计表, 高密度泡沫

轻质土所需泡沫质量较少,所以在浆体凝结硬化过程中形成的连通孔隙较少,孔隙率小且孔壁强度高,内部结构密实,试件抵抗水侵蚀能力强,试件冷冻过程中可冻结的水含量较低,在冻融过程中,试件内部的封闭孔泡结构能缓冲结冰时的冻胀应力[7]。由于低密度的泡沫轻质土水化产物少,抵抗渗透压力或者冰胀压力的能力较弱,导致泡沫轻质土试件强度降低,产生的裂缝数量增多。

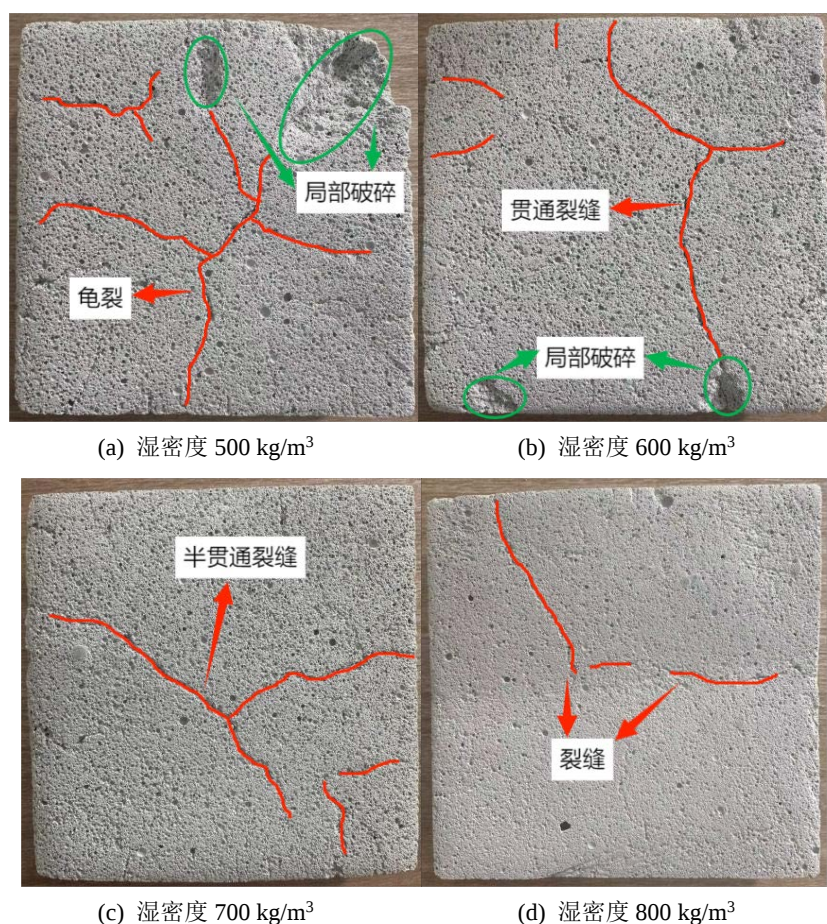


Figure 5. Apparent view of the cutting surface of the freeze-thaw cycle specimen
图 5. 冻融循环试件切割面表现图

3.3. 矽尘对泡沫轻质土冻融循环性能的影响

图 6 为不同湿密度泡沫轻质土在经历 30 次冻融循环后,无侧限抗压强度与矽尘掺量的关系。如图所示,随着矽尘掺量的增多,无侧限抗压强度先升高后降低。当泡沫轻质土湿密度相同时,由于矽尘替代了部分水泥,水泥用量减少,导致水泥水化产物越少,最终致使泡沫轻质土内部结构强度降低,泡沫轻质土的无侧限抗压强度随着矽尘掺量的增大而整体呈现减小;但是矽尘在掺量低于 12.5%时,无侧限抗压强度随着矽尘掺量增加呈现小幅度的增长。

通过图 6 还可以看出,无侧限抗压强度随着冻融循环次数先升高后降低。泡沫轻质土在经历 30 次冻融循环试验后,无侧限抗压强度均有不同程度的降低,降低幅度最大的是掺加 22.5%矽尘掺量的湿密度为 500 kg/m³ 的轻质土,强度损失达到 33.3%;对于无侧限抗压强度增长阶段,矽尘掺量为 12.5%的湿密度为 800 kg/m³ 的泡沫轻质土,强度增长幅度最大,达到了 15.3%。由图 6(a)可知,湿密度为 500 kg/m³ 时,矽尘掺量直至 17.5%时,抗压强度开始快速降低;图 6(b)~(c)均是在矽尘掺量为 12.5%时,泡沫轻质

土的无侧限抗压强度开始降低。这是由于低密度的泡沫轻质土泡沫掺量大,水泥基砂尘泡沫轻质土结构致密性较差,冻融循环试验过程中水体结冰导致水体体积变大,而致密性差的泡沫轻质土有足够的空间容纳冰体,而高密度的泡沫轻质土质地密实,只能依靠自身强度抵抗冻胀应力。

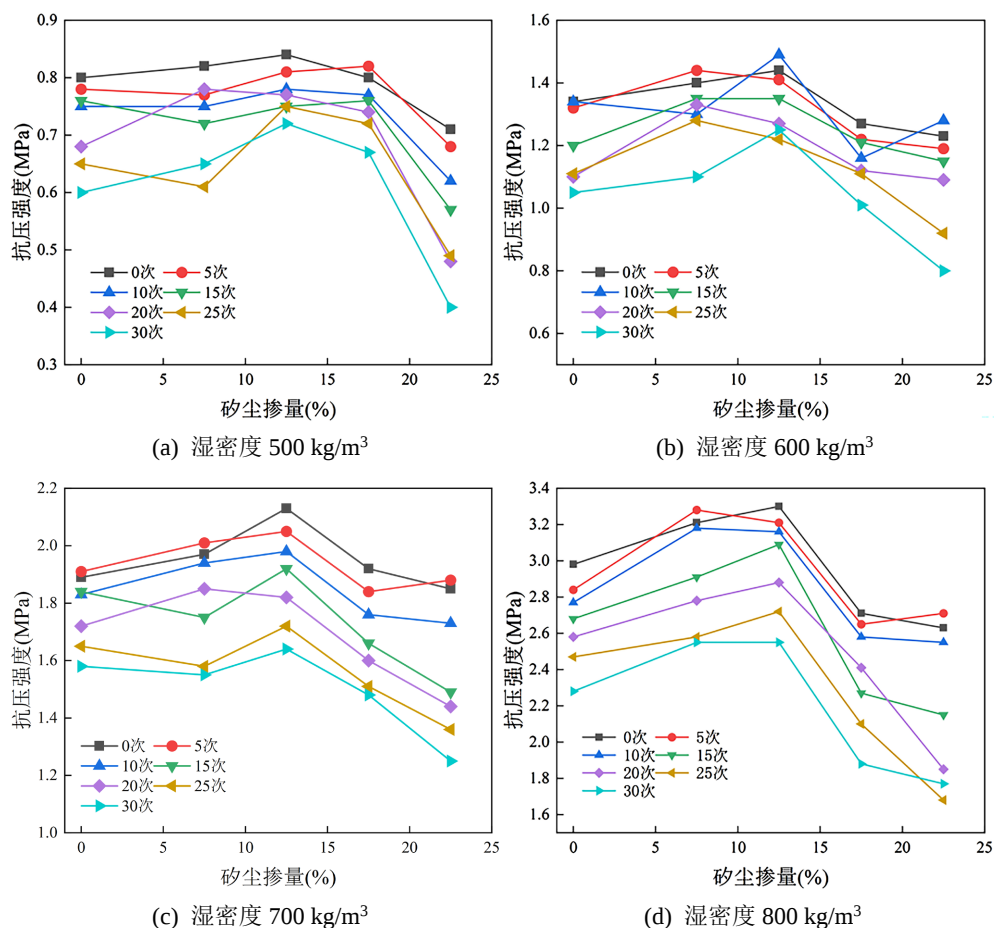


Figure 6. Relationship between unconfined compressive strength and freeze-thaw cycles at different wet densities

图 6. 不同湿密度无侧限抗压强度与冻融循环次数关系图

3.4. 质量损失率分析

在冻融循环试验后,泡沫轻质土进行质量损失率计算,质量损失率不小于 5%为合格。质量损失率计算公式如下:

$$M_m = \frac{M_0 - M_s}{M_0} \times 100 \quad (1)$$

上式中, M_m 为质量损失率(%), M_0 为冻融试验前试件恒质质量(g), M_s 为冻融试验后试件恒质质量(g)。

由上式可计算出不同湿密度试件的质量损失极限值,湿密度 500 kg/m³、600 kg/m³、700 kg/m³ 以及 800 kg/m³ 的试件质量损失极限值分别为 475、570、665 和 760。

图 7 为冻融循环后试件的质量损失图。可以看出,不同配合比的试件均存在质量损失现象,但是损失后的质量都在质量损失极限值以内。图 7(a)为湿密度 500 kg/m³ 不同砂尘掺量的试件质量损失图,随着砂尘掺量的增加,质量损失呈现出阶梯状下降,主要分为三个阶段,0%砂尘掺量与 7.5%砂尘掺量的试件

为一个阶段, 12.5% 矽尘掺量与 17.5% 矽尘掺量的试件为第二阶段, 第三阶段为矽尘掺量 22.5%, 同一阶段的损失后试件质量接近, 不同阶段的损失后质量差距较大。图 7(b) 为湿密度 600 kg/m^3 不同矽尘掺量的试件质量损失图, 随着矽尘掺量的增加, 质量损失呈现出余弦波的趋势, 7.5% 矽尘掺量的试件质量损失比 12.5% 和 17.5% 矽尘掺量的试件质量损失大。图 7(c) 和图 7(d) 为湿密度 700 kg/m^3 和 800 kg/m^3 的试件质量损失图, 随着矽尘掺量的增加, 质量损失呈现出线性下降的趋势。

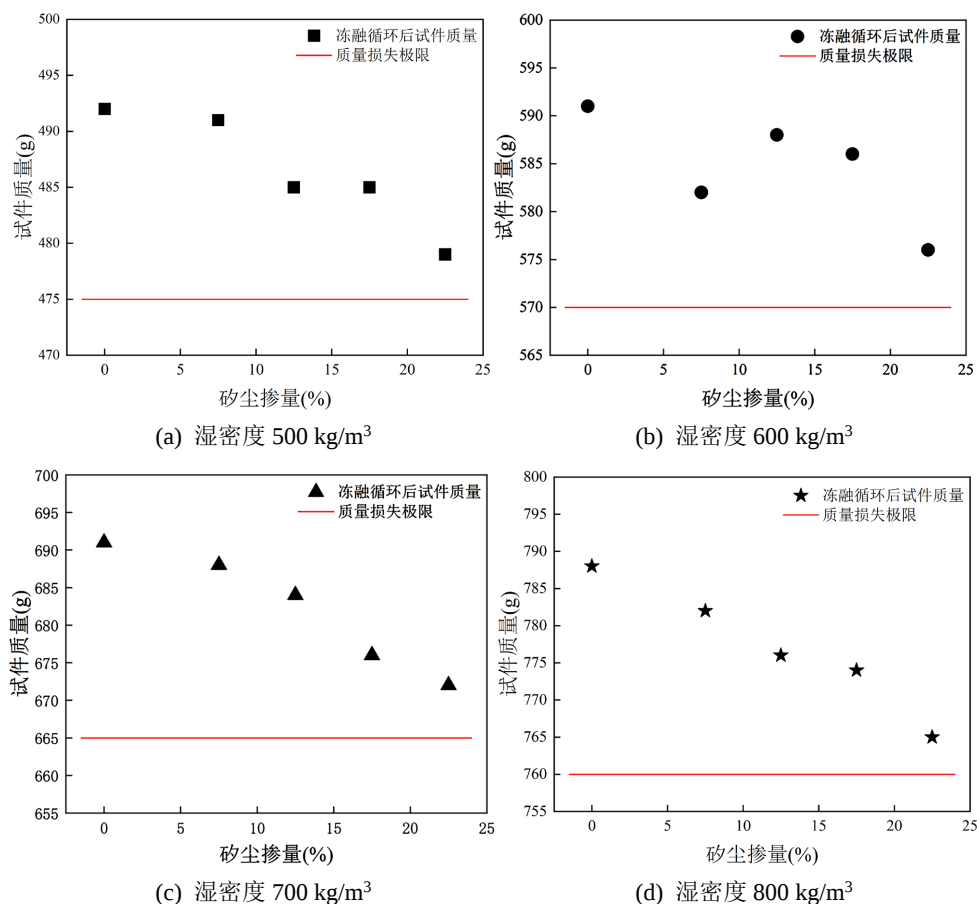


Figure 7. Specimen mass loss after freeze-thaw cycle test
图 7. 冻融循环试验后试件质量损失

这是因为, 在冻融循环试验中, 泡沫轻质土需要抵抗水体结冰带来的冻胀应力, 低密度的泡沫轻质土泡沫掺量大, 试件内部有足够的空间容纳冰胀的水体, 同时, 矽尘是惰性材料, 不能与水泥发生水化反应, 随着矽尘掺量增加, 胶凝材料的损失相对增加。

3.5. 冻融循环性能预测模型的构建

根据冻融循环试验数据, 本节通过 SPSS 的拟合功能, 使用回归法, 得到水泥基矽尘泡沫轻质土冻融循环强度系数在浆体相对密度、矽尘掺量和冻融循环次数影响下的方程式, 其中将经过规定冻融循环后测定的无侧限抗压强度与标准大气压强 0.1013 MPa 的比值作为冻融循环强度系数, 按(2)式计算, 浆体密度系数 H 和矽尘掺量系数 K_{cs} 按公式(2)和公式(4)计算。

$$Q_{ft} = \frac{q_{ft}}{q_s} \quad (2)$$

式中, q_{ft} 为冻融循环试验后试件的无侧限抗压强度值, q_s 为标准大气压 0.1013 MPa, Q_{ft} 为冻融循环强度系数, Q_{ft} 越大代表水泥基砂尘泡沫轻质土抗冻融循环能力越强。

浆体湿密度无量纲系数 H :

$$H = \frac{\rho_{fc}}{\rho_w} \quad (3)$$

式中, ρ_{fc} 水泥基砂尘泡沫轻质土设计湿密度, ρ_w 为水的密度。

砂尘掺量系数 K_{cs} :

$$K_{cs} = \frac{K_p}{K_s} \quad (4)$$

式中, K_p 为砂尘实际掺量, K_s 为 12.5% 标准掺量, K_{cs} 为砂尘掺量系数。

冻融循环系数 N_{ft} :

$$N_{ft} = \frac{n_{fti}}{n_{ft10}} \quad (5)$$

式中, n_{fti} 为实际冻融循环次数, n_{ft10} 为第 10 次冻融循环, N_{ft} 为冻融循环系数。

首先, 建立出设计湿密度系数和冻融循环系数关于冻融循环特性的部分预测模型:

$$Q_{ft1} = 9.114H^2 - 3.752H - 2.133H \frac{N_{ft}}{30} \quad (6)$$

然后, 建立出设计湿密度系数和砂尘掺量系数关于冻融循环特性的部分预测模型:

$$Q_{ft2} = 0.076K_{cs} - 0.002K_{cs}^2 - 0.063HK_{cs} \quad (7)$$

其次, 建立出砂尘掺量系数和干湿循环系数关于干湿循环特性的部分预测模型:

$$Q_{ft3} = \frac{N_{ft}}{30} \left(1.219 - 0.177H \frac{N_{ft}}{30} \right) - 0.009K_{cs} \frac{N_{ft}}{30} \quad (8)$$

最后, 得出无侧限抗压强度的预测模型:

$$Q_{ft} = 0.21 + Q_{ft1} + Q_{ft2} + Q_{ft3} \quad (9)$$

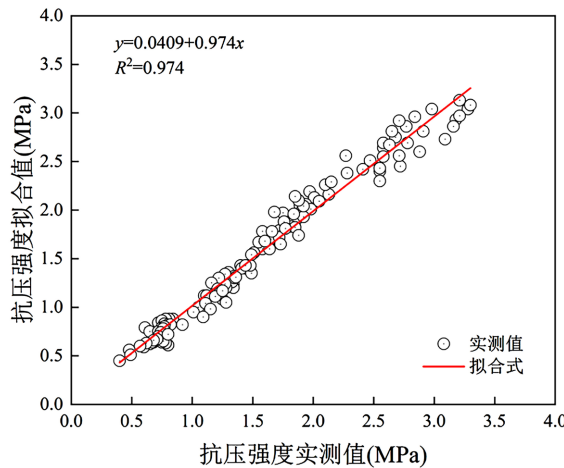


Figure 8. Relationship between the predicted and actual values of unconfined compressive strength after freeze-thaw cycle test
图 8. 冻融循环试验后无侧限抗压强度预测值与实际值关系图

采用回归分析法对经历 30 次冻融循环试验后的水泥基矽尘泡沫轻质土的无侧限抗压强度实测值与预测值进行拟合, 结果如图 8 所示: 散点图为无侧限抗压强度实测值, 直线为预测模型, $R^2 > 0.9$, 可以看出经历冻融循环试验后的水泥基矽尘泡沫轻质土抗压强度预测值与实测值较吻合, 表明此抗压强度预测模型可靠性较高, 因此可通过此模型推算相同参数泡沫轻质土的冻融循环性能。

3.6. 微观分析

在冻融循环试验过程中, 水泥基矽尘泡沫轻质土受到水体结冰体积变大带来的冰胀挤压力, 会对泡沫轻质土内部造成损伤, 因此本文对冻融循环试验后的试件进行微观图像采集, 揭示泡沫轻质土冻融循环特性机理。本文用电子显微镜对水泥基矽尘泡沫轻质土的内部孔结构进行了测试, 然后用 Image Pro Plus 软件进行数据处理分析。

由图 9 可知, 随着湿密度的增大, 试件受到冰胀破坏的程度越小, 随着矽尘掺量的增大, 试件受到冰胀破坏的程度越大。图 9(a)是矽尘掺量为 12.5%的湿密度 500 kg/m^3 的泡沫轻质土微观图, 经过 30 次冻融循环后, 试件内部存在两条较长的裂缝和一个面积较大的空腔, 并且孔泡结构分布不均匀, 多个大孔泡结构紧密相邻, 连通孔泡结构的数量较多; 当矽尘掺量增加到 12.5%后, 破坏形态以单一裂缝为主。

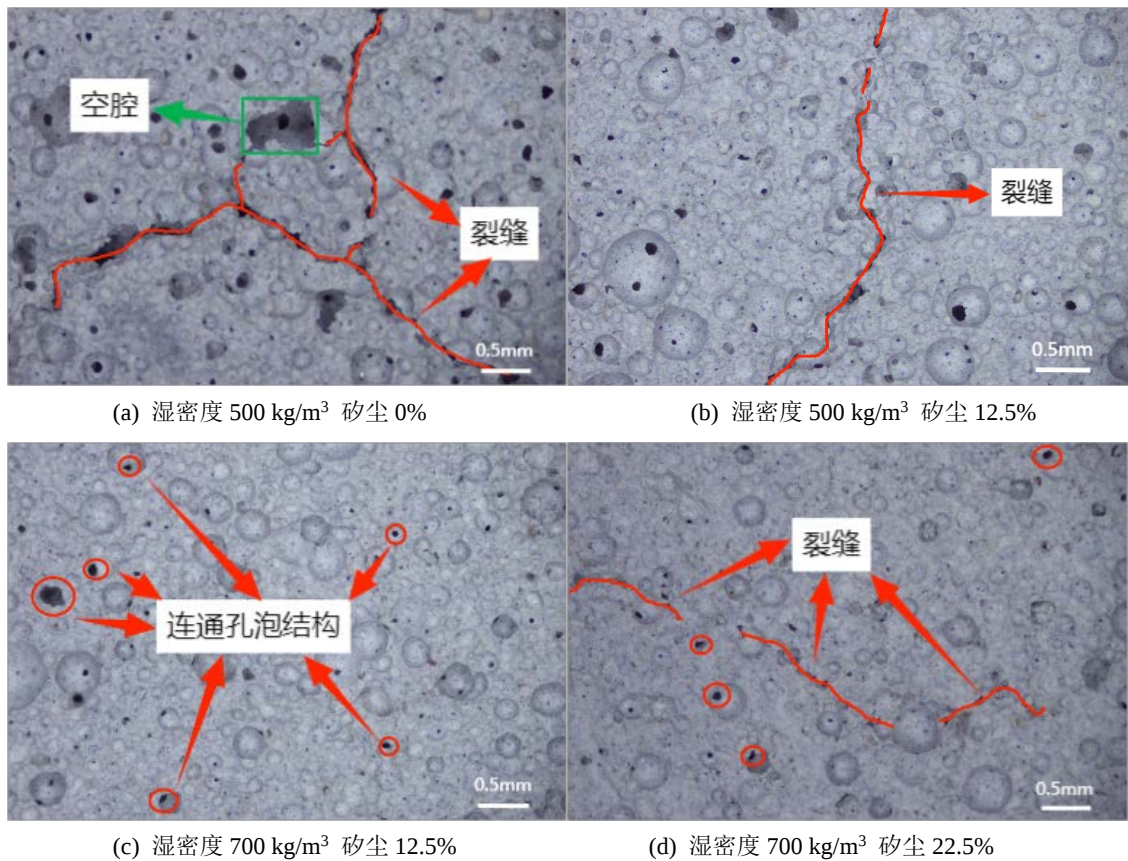


Figure 9. Microscopic image of the specimen after the freeze-thaw cycle test
图 9. 冻融循环试验后的试件微观图片

当矽尘掺量不变, 湿密度增加到 700 kg/m^3 时, 试件在冻融循环试验结束后, 其内部存在个别面积较大的连通孔隙, 大部分的连通孔隙面积较小; 当矽尘掺量增加到 22.5%时, 泡沫轻质土内部又出现了裂

缝,但是此裂缝的长度远不及低密度泡沫轻质土的裂缝长度,并且试件中的连通孔隙面积较为均匀,没有出现大面积的连通孔隙。

Table 4. Changes in the pore structure of the specimen after freeze-thaw cycle test
表 4. 冻融循环试验后试件孔泡结构变化

密度(kg/m ³)	掺量(%)	平均孔径(mm)	孔隙率(%)	连通孔隙率(%)
500	0	1.25	75.8	11.5
500	12.5	1.17	73.8	10.7
700	12.5	0.69	66.5	7.1
700	22.5	0.58	62.4	5.2

由表 4 可知, 矽尘掺量为 0% 时, 500 kg/m³ 的泡沫轻质土的平均孔径和孔隙率值最大。当矽尘掺量为 12.5% 时, 湿密度由 500 kg/m³ 上升到 700 kg/m³ 后, 平均孔径下降 0.48 mm, 孔隙率下降 7.3%, 连通孔隙率下降 3.6%; 矽尘掺入量从 12.5% 提高到 22.5% 后, 平均孔径减小 0.11 mm, 孔隙率下降 4.1%, 连通孔隙率下降 1.9%。

4. 结论

(1) 水泥基矽尘泡沫轻质土在经历冻融循环试验后, 无侧限抗压强度会有上下波动的现象, 但整体呈现下降趋势, 对于 700 kg/m³ 的泡沫轻质土, 矽尘掺量提高到 22.5% 时, 无侧限抗压强度减少 32.4%。

(2) 水泥基矽尘泡沫轻质土的湿密度越高, 试件表面的裂缝数量越少。随着矽尘掺量的增多, 无侧限抗压强度先升高后降低。

(3) 在冻融循环试验后, 泡沫轻质土进行质量损失率计算, 质量损失率均小于 5%, 均合格。

(4) 通过对抗压强度数据进行拟合, 得到水泥基矽尘泡沫轻质土无侧限抗压强度与龄期、矽尘掺量及设计湿密度的关系式。

(5) 从微观数据来看, 适量矽尘加入可以有效抵抗冻胀应力带来的裂缝, 并且泡沫轻质土的平均孔径、孔隙率和连通孔隙率也有所降低。

参考文献

- [1] 张宏博, 刘明朋, 孙玉海. 粉土基泡沫轻质土三轴力学特性[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(1): 39-46, 57.
- [2] Rakam, A., Sahu, S.S. and Pillalamarri, B. (2024) State-of-the-Art Review on Advancement in Foam Concrete Production Technology Using Mineral Admixtures. *Innovative Infrastructure Solutions*, **9**, Article No. 439. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01760-7>
- [3] 庾会军, 封翔宇. 建筑垃圾再生骨料泡沫混凝土台背填料技术研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(9): 140-144.
- [4] Lu, Z., Zhao, Y., Liu, J., Yuan, X., Yao, H., Tang, C., et al. (2024) Engineering Properties and Micropore Structure of Clay-Based Foamed Lightweight Soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **36**, 1-14. <https://doi.org/10.1061/jmce7.mteng-16475>
- [5] Hu, H. (2023) Foamed Lightweight Soil Material for Solving Bridge Bumping on Soft Soil Foundations. *Academic Journal of Engineering and Technology Science*, **6**, 23-28. <https://doi.org/10.25236/AJETS.2023.060204>
- [6] 张昕毅. 聚丙烯纤维改性橡胶泡沫轻质土静动力学特性及耐久性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [7] 于婷婷. 拜耳赤泥基泡沫轻质土研发与性能试验[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [8] 董召强. 地质聚合物泡沫轻质土路用性能及应用[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2022.
- [9] 陈雄威. 赤泥基轻质土的抗冻融、干湿循环及耐腐蚀研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广州大学, 2022.

- [10] 卢正, 张荣, 赵阳, 等. 盐渍土基泡沫轻质土工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2025, 44(S1): 206-218.
- [11] 天津市市政公路管理局. TJG-F10-01-2011 现浇泡沫轻质土路基设计施工技术规范[S]. 天津: 天津市市政公路管理局办公室, 2011. https://jtys.tj.gov.cn/ZWGK6002/ZCJD/202012/t20201208_4699958.html
- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T11969-2020 蒸压加气混凝土性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. <https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=B13990C15C1B5DDAE05397BE0A0A0D35>