

硫酸盐侵蚀初期泡沫轻质土力学及孔隙演化

万 勋^{1,2}, 张 振^{1,2}, 叶观宝^{1,2}, 赵建军³, 张 欢^{3,4}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 成都 610059; 4. 川设(四川)工程咨询有限公司, 成都 610036)

摘 要: 泡沫轻质土由于其独特的孔隙结构, 在硫酸盐侵蚀条件下其强度演化特征很可能不同于混凝土, 侵蚀初期物化反应引起的孔隙结构演化及其与力学特性的关联机制尚不明确。基于单轴压缩试验和 X 射线计算机断层扫描技术联合核磁共振方法, 研究了 Na_2SO_4 质量分数、龄期对侵蚀初期泡沫轻质土力学性能和孔隙特征的影响。结果表明: 相比于标准试样, 试样在侵蚀后力学性能衰减。然而, 随着龄期增加(28~56 d), 峰值强度和残余强度回升分别可达 19.28%和 55.56%。随 Na_2SO_4 质量分数增加, 含水大孔($>100\ \mu\text{m}$)分布频率减小, 从 25.66%降至 9.49%, 相应峰值强度变化率回升。侵蚀初期, 试样的含水孔隙度高于同期自来水浸润后的试样, 且随着质量分数增加, 总含水孔隙度先减小而后趋于不变。随着泡沫轻质土试样含水孔隙度减小, 其峰值强度和残余强度呈指数上升。研究结果对于深入认识服役环境对泡沫轻质土早期工程性能的影响具有指导意义。

关键词: 泡沫轻质土; 硫酸盐侵蚀; 力学特性; 含水孔隙度; 核磁共振; X 射线计算机断层扫描

中图分类号: TU525.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0454-5648(2025)11-3079-12

网络出版时间: 2025-10-11



泡沫轻质土是将水泥浆液与预制泡沫搅拌均匀, 亦可掺杂土料(如黏土, 硅灰, 粉煤灰, 砂土等), 浇筑养护而成的一种含有大量气孔的轻质水泥基土工材料^[1]。因其具备强度和密度可调节、自立性良好、施工便捷、环境友好等优点, 被广泛应用于桥台填土、路基填筑、挡土墙背填土和边坡治理等工程中^[2-3]。然而在高含盐软土地区, 泡沫轻质土在服役过程中, 除了受到气温、雨水入渗影响外, 还将受到化学溶液侵蚀。化学环境效应对泡沫轻质土力学特性影响的研究越来越受到人们的关注^[4-5]。

对于水泥基材料而言, 硫酸盐作用下的性能演化过程极其复杂^[6-7], 受控于多种环境因素(温度、渗流压力、硫酸根浓度)^[8-11], 其演化机理仍未形成共识^[12]。以混凝土为例, 硫酸根离子侵入过程包括离子扩散、化学反应、结晶或膨胀等诸多动态变化的过程^[13-15], 造成既有孔隙内部溶液的平衡态被打破, 在特定条件下消耗水化产物水化硅酸钙(C-S-H)以及固相氢氧化钙(CH), 生成石膏、钙矾

石等矿物^[16]。在侵蚀初期, 一方面水化产物得以消耗, 造成孔隙度增大, 材料强度降低; 另一方面膨胀性的钙矾石和石膏的生成又填充了既有孔隙, 使得材料变得密实, 强度得以提高。不难发现, 这一对立统一过程与材料孔隙度、孔径分布有着密切关系^[17-18]。泡沫轻质土具有独特的孔隙结构, 其孔隙度、孔径分布与混凝土存在巨大的差异^[19-22], 其在硫酸盐中的侵蚀过程必然不同于混凝土。泡沫轻质土中膨胀性产物在初期可能优先填充孔隙空间而非直接挤压基体, 因此这种局部沉积可能延缓膨胀压力的积累, 从而推迟裂缝萌生时间以及降低力学性能劣化程度。因此, 关注硫酸盐侵蚀初期泡沫轻质土的力学特征与孔隙结构之间的关联机制, 对研究侵蚀全过程泡沫轻质土性能演化具有重要意义。

与此同时, 在硫酸盐侵蚀环境中, 相对于温度和渗流压力, 硫酸根离子的浓度对于侵蚀的影响显得尤为重要, 这不仅表现在侵蚀速率上, 还深刻影响着侵蚀产物的类型和生成顺序^[23-24], 也直接决定

收稿日期: 2025-03-05。 修订日期: 2025-03-19。

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

第一作者: 万 勋(1997—), 男, 博士研究生。

通信作者: 张 振(1984—), 男, 博士, 研究员。

Received date: 2025-03-05. Revised date: 2025-03-19.

First author: WAN Xun (1997—), male, Doctoral candidate.

E-mail: 2210402@tongji.edu.cn

Correspondent author: ZHANG Zhen (1984—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: 14149@tongji.edu.cn

了侵蚀产物在泡沫轻质土中的含量和分布,引起其内部孔隙结构的演变,进而改变其力学性能。对于混凝土,在不同硫酸盐浓度(1%~10%)条件侵蚀下,由于浅层孔隙充填,侵蚀初期的增强效应会持续 30~60 d 不等^[25–26]。然而,在不同浓度硫酸盐溶液作用下,侵蚀初期泡沫轻质土的力学性能和孔隙结构演化及两者之间联系机制鲜有报道。

本研究以泡沫轻质土为对象,开展了其在 3 种不同质量分数 Na_2SO_4 的溶液中的侵蚀试验。通过单轴压缩试验,获取试样在 Na_2SO_4 溶液中各侵蚀龄期下的峰值强度和残余强度。基于 X 射线计算机断层扫描技术(X-CT)和核磁共振测试(NMR)联合确定侵蚀前后试样含水孔径分布和含水孔隙度。探究了泡沫轻质土在不同质量分数 Na_2SO_4 的溶液作用下侵蚀初期的物理力学特性演化规律。研究结果对于深入认识服役环境对泡沫轻质土早期工程性能的影响具有指导意义。

1 实验

1.1 材料

试验对象为由水泥、发泡剂和水组成的无骨料泡沫轻质土。其中:水泥采用太仓海螺牌 P.C42.5 复合硅酸盐水泥;发泡剂采用山东优索化工公司生产的 LG-2258 型阴离子复合发泡剂,发泡倍数大于 50;试验用水采用实验室自来水,盐度 0.01%,pH 值为 7.37。试样制作过程中控制水灰比 m_w/m_c 为 0.45。根据预实验结果确定泡沫体积比 V_f/V_w 为 3.50,以控制泡沫轻质土试样最终含水密度在 0.9 g/cm^3 左右。将泡沫和水泥浆搅拌均匀,浇筑在 $70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$ 的三联模具中,24 h 后脱模,并置于标准养护环境中[温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度大于 95%]至少养护 28 d。为了排除试样初始含水量对侵蚀过程的影响,将所有制备的试样置于 60°C 恒温箱中直至恒重。

1.2 方法

采用苏州纽迈公司生产的 MarcoMR12-150H-I 型大口径核磁共振测试系统检测上述制备试样的含水情况,并选取含水率相近的试样进行后续侵蚀试验。在本研究中自制了多场耦合试验装置(图 1a),该装置能同时实现侵蚀过程温度、真空压力以及化学溶液浓度的自主可控。泡沫轻质土在实际服役过程中往往会受到多环境场共同作用的影响。在已有的研究中报道了泡沫轻质土在硫酸盐溶液中浸泡 56 d 所带来的强度劣化现象^[4,27]。基于此,设置侵蚀过程

温度恒定为 20°C ,真空压力恒定为 10 kPa (等效于泡沫轻质土在地下水位以下 1 m 左右受到的渗流压力), Na_2SO_4 质量分数(w)为 0、0.5%、2.5%、5.0%,作用时间为 0、28、56 d,以研究不同浓度的 Na_2SO_4 溶液对泡沫轻质土侵蚀初期力学性能与孔隙结构的影响。试验组别如表 1 所示。待试样达到侵蚀龄期后取出,擦干表面水分,其后进行 NMR 测试(图 1b),并结合 X-CT 确定泡沫轻质土试样含水孔径分布和含水孔隙度。本研究中所用 X-CT 系统为 Nikon 公司生产的 XTH320 型扫描试验机,如图 1c 所示。测试完成后采用上海华龙公司生产的 WDW-600 型微机控制电子万能试验机进行单轴压缩测试(图 1d),以获取泡沫轻质土试样在各条件下的抗压强度和残余强度,加载速率设置为 2 mm/min ,各编号试验均重复至少 3 次。

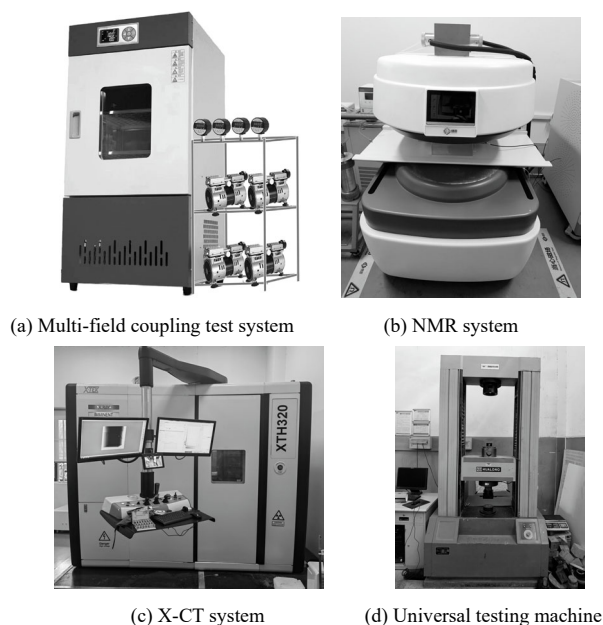


图 1 试验装置图

Fig. 1 Experimental setup

表 1 泡沫轻质土试验方案

Table 1 Experimental scheme of foamed cement pastes

Sample No.	$w/\%$	Time/d
F-Standard	0	0
F-0-28	0	28
F-0-56	0	56
F-0.5-28	0.5	28
F-0.5-56	0.5	56
F-2.5-28	2.5	28
F-2.5-56	2.5	56
F-5.0-28	5.0	28
F-5.0-56	5.0	56

w is mass fraction.

2 结果与讨论

2.1 力学特性

2.1.1 应力应变关系 强度是反映泡沫轻质土宏观性能的重要指标,也是工程应用的重要参考。对在不同外部作用龄期下的泡沫轻质土试样进行单轴压缩测试,设定压缩位移最大为 10 mm,以测定试样的残余变形性能。图 2 反映了其在外部 Na_2SO_4 侵蚀作用(w 为 0.5%, 2.5%, 5.0%),自来水浸润作用(w 为 0)后,以及初始状态(即标准试样)的轴向应力应变关系(σ - ε),可以发现在外部 Na_2SO_4 侵蚀或者自来水浸润下均会导致试样峰值强度及残余强度的衰减,且随着 w 的增大(0~5.0%),试样强度呈现出非单调变化的特点。

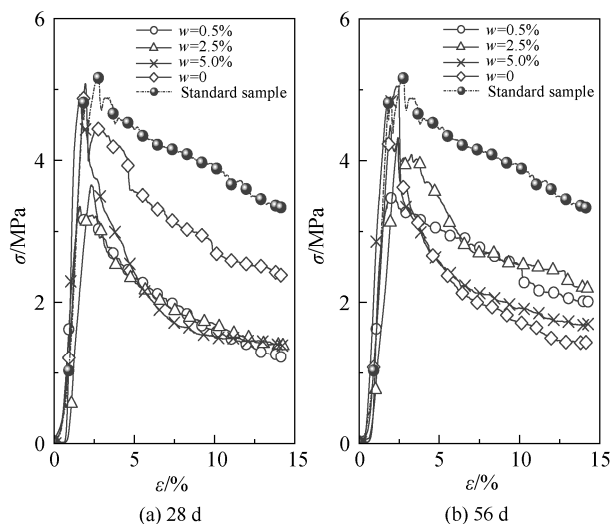


图 2 轴向应力-轴向应变关系图
Fig. 2 Axial stress-strain relationship

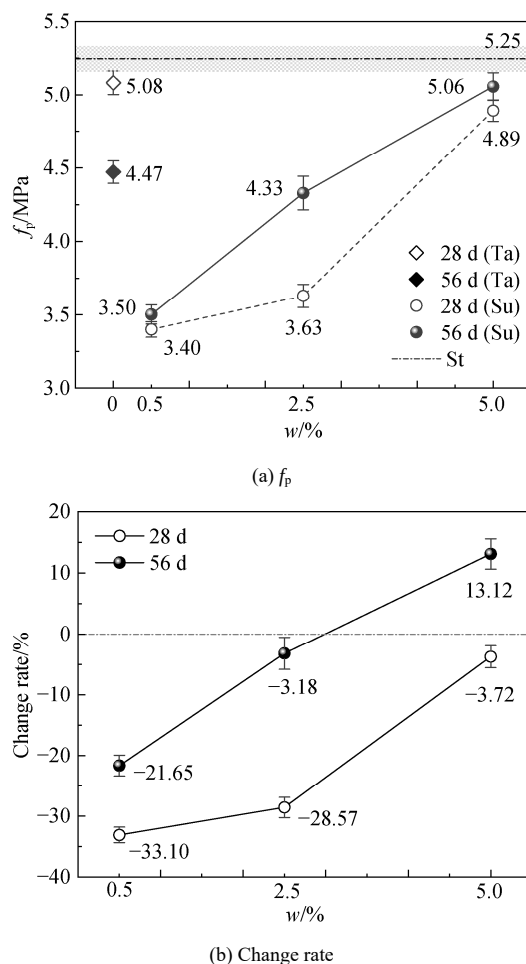
2.1.2 峰值强度 进一步地,从图 3a 可以明确地发现其强度参数变化规律,试样初始状态的峰值强度(f_p)均值为 5.25 MPa。随着在自来水中浸润时间增长,其 f_p 逐步衰减,至 56 d 时,其 f_p 平均值为 4.47 MPa,采用水稳定系数 K_w 评价试样在自来水浸润过程中强度的损失情况:

$$K_w = \frac{f_{p1}}{f_{p0}} \quad (1)$$

式中: f_{p1} 为自来水浸润后的峰值强度,MPa; f_{p0} 为初始状态下的峰值强度,MPa。自来水浸润 28 d 后 K_w 为 0.97,至 56 d 时为 0.85。水分进入泡沫轻质土孔隙后,原本干燥状态下的骨架吸水软化,毛细力减弱,孔隙结构稳定性下降, f_p 下降, K_w 小于 1,且随着浸润龄期增加而进一步降低。在 Na_2SO_4 侵蚀

作用下,与标准试样相比,其 f_p 均出现了不同程度的衰减。再者,与自来水浸润情况不同,随着 Na_2SO_4 作用时间增长,试样 f_p 反而升高,且在 w 为 2.5% 时增幅最为明显,达到了 19.28%。此外,随着 w 的增加,试样的 f_p 逐步增加。

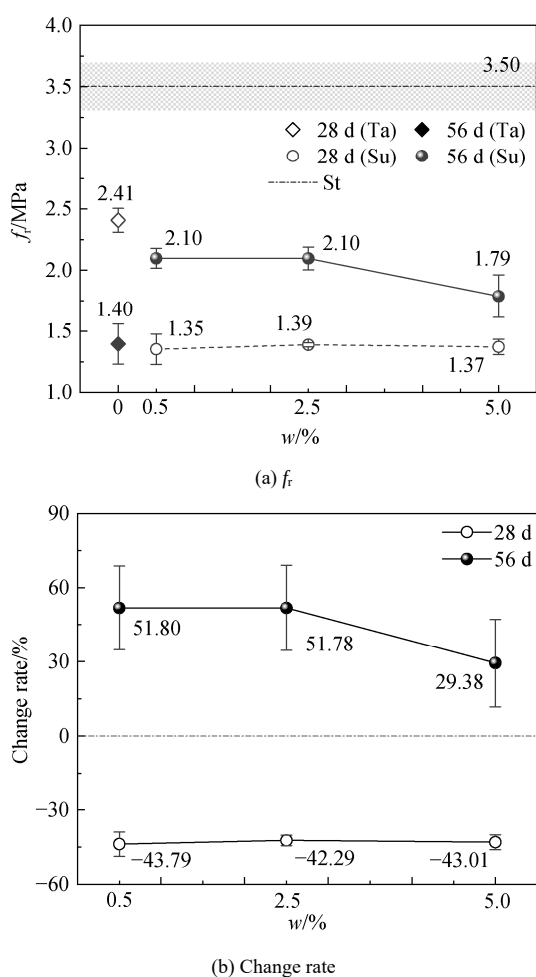
为进一步反映侵蚀初期泡沫轻质土强度演化规律,图 3b 中显示了与同期自来水浸润作用相比,各 w 下 f_p 的变化率。随 w 增加, f_p 变化率亦逐渐增加,且随作用时间增长,变化率也相应增长,这反映出随 w 增加,侵蚀产物充填作用愈明显,使得 f_p 回升,当 w 为 5.0% 时,作用 56 d 后,变化率回升明显,达 13.12%。值得注意的是,当 w 为 0.5% 时,作用 28 d 后变化率为 -33.10%,这反映出在低浓度 Na_2SO_4 作用下,侵蚀初期的物化反应劣化了泡沫轻质土的结构,这将在 2.2.2 部分展开讨论。



Note: f_p is the peak strength.

图 3 各条件下试样峰值强度 f_p 及强度变化率
Fig. 3 Peak strength f_p and its change rate of samples subjected to different conditions

2.1.3 残余强度 在残余强度(f_r)方面, 从图 4a 可以看出试样初始状态的 f_r 均值为 3.50 MPa。与 f_p 变化规律一致, 随着在自来水中浸润时长增加, 其 f_r 逐步衰减, 及至 56 d 时, 其 f_r 均值为 1.40 MPa。在 Na_2SO_4 侵蚀作用下, 与标准试样相比, 其 f_r 均出现了不同程度的衰减。随着 Na_2SO_4 作用时间增长, 试样的 f_r 反而升高, 在 w 为 0.5%、2.5%、5.0% 时增幅分别为 55.56%、51.08%、30.66%。进一步地, 图 4b 显示了与同期自来水浸润作用相比, 各 w 下 f_r 的变化率。可以发现, 当 Na_2SO_4 作用 28 d 后, 变化率均小于 0, 而随着作用时间增加, 变化率均大于 0, 且随着 w 增加其逐渐减小。



Note: f_r is the residual strength.

图 4 各条件下试样残余强度(f_r)以及强度变化率
Fig. 4 Residual strength (f_r) and its change rate of samples subjected to different conditions

综上, 基于在 Na_2SO_4 溶液中侵蚀初期的结果, 可以发现, 泡沫轻质土在侵蚀初期的表现不同于混凝土。对于混凝土, 其在侵蚀初期受到侵蚀产物的充填而变得密实, 其强度高于标准试样且随着质量

分数和侵蚀时间增加而逐渐增加^[25–26]。而对于泡沫轻质土, 其独特的孔隙结构为 Na_2SO_4 溶液的侵入提供了更为复杂的通道和充足的持水空间, 以至于在侵蚀初期其强度低于标准试样甚至同期自来水浸润试样。且随着的质量分数和侵蚀时间增加, 侵蚀产物的充填使其强度逐步回升。

2.2 孔隙特征

2.2.1 含水孔隙转换关系 在 Na_2SO_4 溶液作用过程中, 泡沫轻质土在宏观层面上表现出来的力学性能的变化主要由以下几个方面因素决定, 即细微尺度上的孔隙结构、基质矿物成分的力学性能, 以及试样整体的含水状态。其中试样孔隙结构会影响含水状态, 进而控制化学反应的进程, 以此决定基质矿物成分的演变。为了能够精确探明泡沫轻质土在 Na_2SO_4 溶液侵蚀初期含水孔隙的演变规律, 采用 NMR 对各条件下试样进行测试。根据相应 NMR 测试原理, 核磁 FID 信号均来自于待测样品中液态水的 ^1H , 其与孔隙水的横向弛豫时间(T_2)有直接关系。对于无梯度场情况, T_2 近似满足以下关系,

$$\frac{1}{T_2} = \rho_2 \frac{S}{V} \quad (2)$$

式中: T_2 为液态水的横向弛豫时间, ms; ρ_2 为横向表面弛豫强度, $\mu\text{m/ms}$; S 为孔隙的表面积, μm^2 ; V 为孔隙的体积, μm^3 , S/V 与孔隙半径 r_c (μm) 具有以下关系,

$$\frac{S}{V} = \frac{F_s}{r_c} \quad (3)$$

式中: F_s 为孔隙形状因子, 无量纲, 在本研究中假定泡沫轻质土中均匀分布球形孔, 此时 F_s 取值为 3。因此, 式(2)可以转化为式(4)。

$$r_c = 3\rho_2 T_2 = C \times T_2 \quad (4)$$

式中: C 为转换系数, $\mu\text{m/ms}$ 。在同一材料中为固定值。在已有研究中通常采用压汞测试(MIP)与 NMR 联合确定转换系数 C ^[28]。但由于本研究中泡沫轻质土孔隙度较高, 孔壁相对较薄, 在压汞测试中过高的进汞压力势必会导致试样内部的孔隙结构遭遇破坏, 影响测试精度。因此本研究中采用 X-CT 与 NMR 联合确定转换系数 C 。对于本研究中 0.9 g/cm^3 密度的试样, 将其切割取芯制备形成 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 尺寸的试样进行 X-CT 扫描。选取图像分割灰度阈值为 9300, 对扫描切片进行三维重构, 按照如图 5 所示的步骤构建三维孔隙结构模型, 经计算, 试样总孔隙度为 48.90%。图 6 显示了试样内部各尺寸孔隙的体积分数, 不难发现, 试样内

部主要以孔隙半径小于 0.17 mm 的孤立孔和由多孔连接的连通孔组成, 连通孔最大半径可达 3.96 mm。

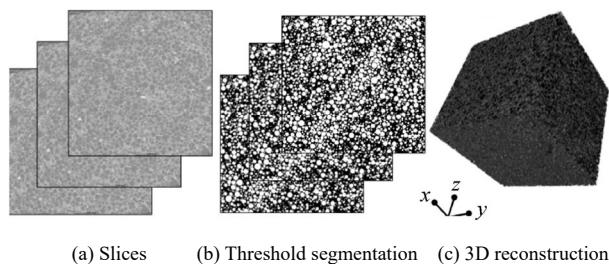
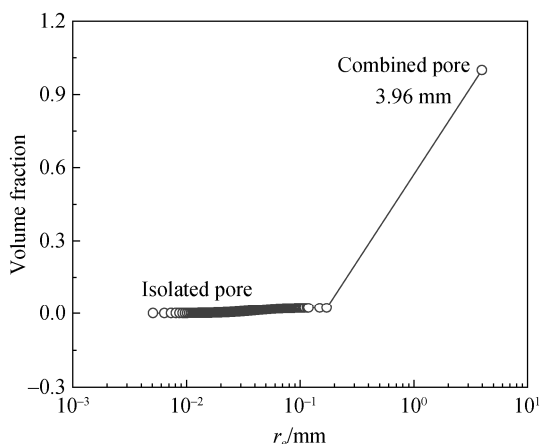


图 5 X-CT 图像处理与三维重构

Fig. 5 X-CT image processing and 3D reconstruction



Note: r_c is the pore radius.

图 6 0.9 g/cm³ 密度试样的孔径分布

Fig. 6 Pore size distribution of sample with a density of 0.9 g/cm³

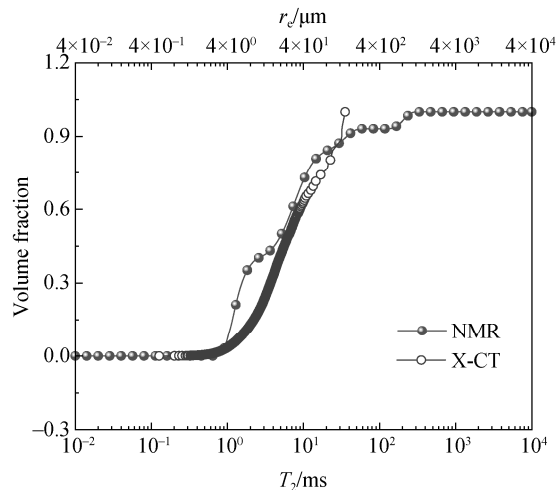
在 X-CT 测试中, 图像分割灰度阈值的主观选取直接决定了测定孔隙的大小和连通程度。对于密度较低的泡沫轻质土, 这一主观结果增加了 X-CT 和 NMR 结果对比的不确定性。因此, 在本研究中采用密度为 1.2 g/cm³ 的泡沫轻质土试样进行转换系数 C 的测定, X-CT 的测试步骤同上, 其后将该试样饱和并进行 NMR 测试。分别对 NMR 横向弛豫时间 T_2 和 X-CT 孔隙半径进行累积, 并最终调整转换系数 C 为 4.0 $\mu\text{m}/\text{ms}$ 使得两条曲线叠合, 如图 7 所示。由此可以通过 NMR 测试获取泡沫轻质土试样在各条件下的含水孔隙的孔径分布。

此外, NMR 信号强度与含水量存在线性关系, 通过对 6 个含水量标准试样进行测定, 获得含水量区间为 0~126 g 试样的横向弛豫时间谱 $A-T_2$ (见图 8), 并求取各信号曲线 T_2 信号总强度 A_m 。由此可以建立信号总强度 A_m 和含水量 m_w 之间的线性关系, 如图 9 所示, 经过拟合得到如下函数关系:

$$m_w = 2.981A_m - 11.423 \quad (5)$$

$$R^2 = 0.99$$

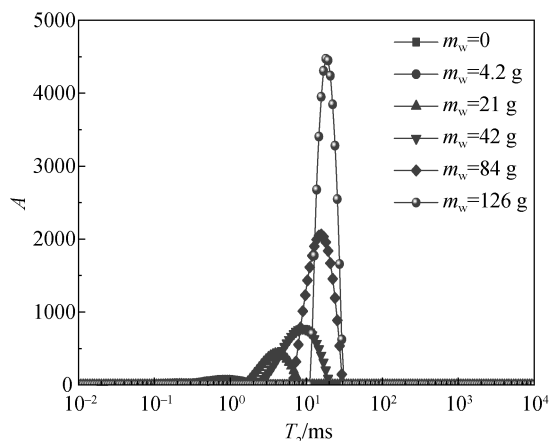
式中: m_w 为试样中含水量, mg; A_m 为核磁横向弛豫时间谱图中信号总强度。



Note: T_2 is the transverse relaxation time.

图 7 NMR 与 X-CT 联合确定转换系数

Fig. 7 Determination of conversion coefficient by combining NMR with X-CT

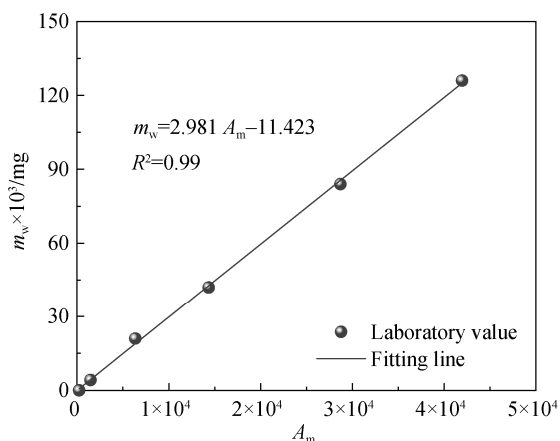


Note: A is the T_2 signal intensity.

图 8 标准含水试样的 T_2 谱

Fig. 8 T_2 spectra of standard aquiferous samples

2.2.2 含水孔径分布 图 10 反映了泡沫轻质土在各条件下的信号强度与 NMR 横向弛豫时间关系。从中可以发现试样在 Na_2SO_4 溶液作用前后均在谱图中表现为 2 个优势峰。与标准试样相比, 自来水或者 Na_2SO_4 溶液作用后第 1 个优势峰的信号强度均明显上升, 反映了外部液体浸润试样并充填试样原有孔隙的过程。第 2 个优势峰在横向弛豫时间 T_2 以及信号强度 A 方面均有较大变化。



Note: m_w is the moisture content; A_m is the cumulative T_2 signal intensity.

图9 累计信号强度与含水量的关系

Fig. 9 Relationship between cumulative signal amplitude and water content

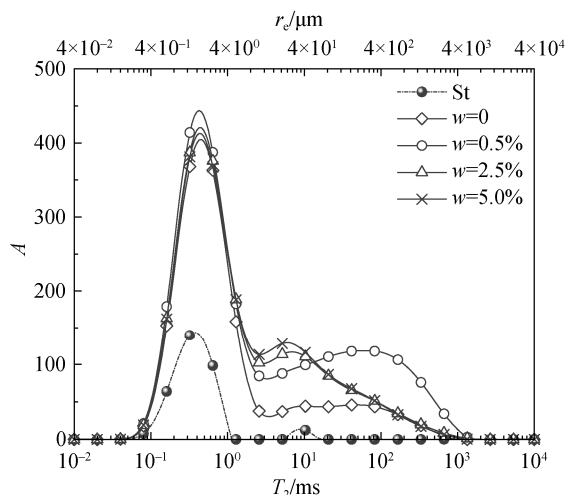
表2统计了图10中各横向弛豫时间谱曲线的优势峰所对应的孔径。不难发现,相比于标准试样,无论是经历自来水浸润或者 Na_2SO_4 溶液作用,泡沫轻质土的第一优势孔径均未产生明显变化,其区间分布在 $1.5\ \mu\text{m}\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 。对于第二优势孔径,标准试样的孔径均值为 $36.0\ \mu\text{m}$ 。在经历自来水浸润或者 w 为 0.5% 的 Na_2SO_4 溶液作用后,试样的优势孔径大幅度增加,结合前述 X-CT 的结果,可以推断在以上2种溶液作用过程中,试样原有的连通程度高的孔隙逐步被溶液充填,在

NMR 测试中对应于 T_2 的增大。此外,还可以发现随着 0.5% 的 Na_2SO_4 溶液作用时间增加,第二优势孔径减小,与自来水作用过程相反,这是因为随着 Na_2SO_4 与试样中水化产物反应过程的进行,钙矾石等产物填充既有孔隙,造成缩孔。在经历 w 为 2.5% 和 5.0% 的 Na_2SO_4 溶液作用后,试样的第二优势孔径减小,说明在以上2种情况中随着外部溶液的侵入,原有连通程度较高的孔隙不断被反应产物充填。进一步地,随着 w 的提高,充填程度也相应增加,在 5.0% 的 Na_2SO_4 溶液作用 $56\ \text{d}$ 后,试样的第二优势孔径为 $22.2\ \mu\text{m}$,仅为标准试样孔径的 61.7% 。

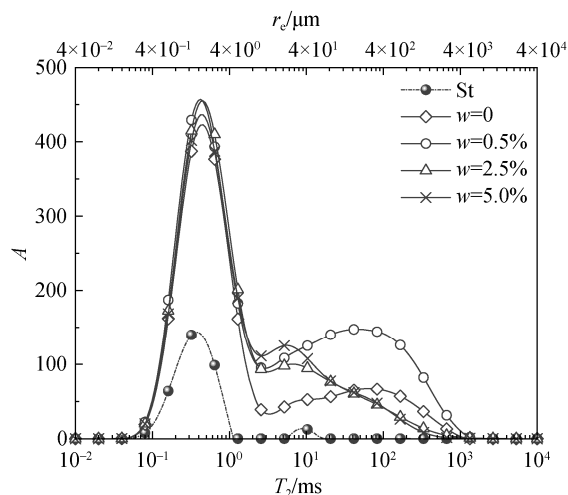
表2 各条件下试样的优势孔径统计

Table 2 Advantage aquiferous pore radius statistics of samples subjected to different conditions

Sample No.	The first advantage pore radius/ μm	The second advantage pore radius/ μm
F-Standard	1.5	36.0
F-0-28	1.8	190.7
F-0-56	1.8	251.8
F-0.5-28	1.7	251.8
F-0.5-56	1.7	178.0
F-2.5-28	1.8	27.3
F-2.5-56	1.8	27.3
F-5.0-28	1.7	23.8
F-5.0-56	1.7	22.2



(a) 28 d



(b) 56 d

图10 各条件下试样的 T_2 谱

Fig. 10 T_2 spectra of samples subjected to different conditions

根据泡沫轻质土试样含水孔的孔径分布范围,将其分为4个区间,分别对应于:微孔($<1\ \mu\text{m}$),小孔($1\sim 10\ \mu\text{m}$),中孔($10\sim 100\ \mu\text{m}$),大孔($>100\ \mu\text{m}$)。

将各条件下试样的孔径分区并做分布频率统计,见图11。对于标准试样,其含水孔的孔径分布以小孔为主,微孔次之。在自来水浸润后,小孔和

微孔的分布频率均出现明显的下降, 相应的中孔和大孔的分布频率明显升高, 并且随着浸润时间的增加, 这一转换持续进行。在 w 为 0.5% 的溶液侵蚀后, 微孔和小孔的分布频率相比于其他各浓度最低, 相应的大孔的分布频率最高, 在侵蚀 56 d 后, 其分布频率高达 25.66%, 这一结果远高于自来水浸润后的试样。一个可能的原因是在侵蚀初期随着 Na_2SO_4 与试样反应的进行, 试样中原有水化产物得以消耗, 这增加了既有孔隙的连通性, 然而由于 w 较低, 侵蚀产物的生成量不足以淤堵既有大孔, 造成大孔分布频率增大, 这也是图 3 中强度劣化的重要原因。以上推测与已有

研究相互印证, 即随着 w 增加, 侵蚀产物钙矾石和石膏充填作用愈发明显, 这使得大孔的分布频率降低, 水蒸气透过性降低^[29]。这与图 11 中反映出的随 w 的增加, 大孔的分布频率明显减小不谋而合。此外, 在侵蚀的时效变化上, 随着 w 为 0.5% 的溶液侵蚀时间增加, 微孔和小孔分布频率降低, 而中孔和大孔分布频率升高。当 w 为 2.5% 和 5.0% 的溶液作用相同时间时, 后者中孔的分布频率均高于前者。且随着作用时间的增加, 中孔和大孔的分布频率逐渐减小, 转化为微孔和小孔, 这表明了在侵蚀初期钙矾石等产物淤堵孔隙通道的过程。

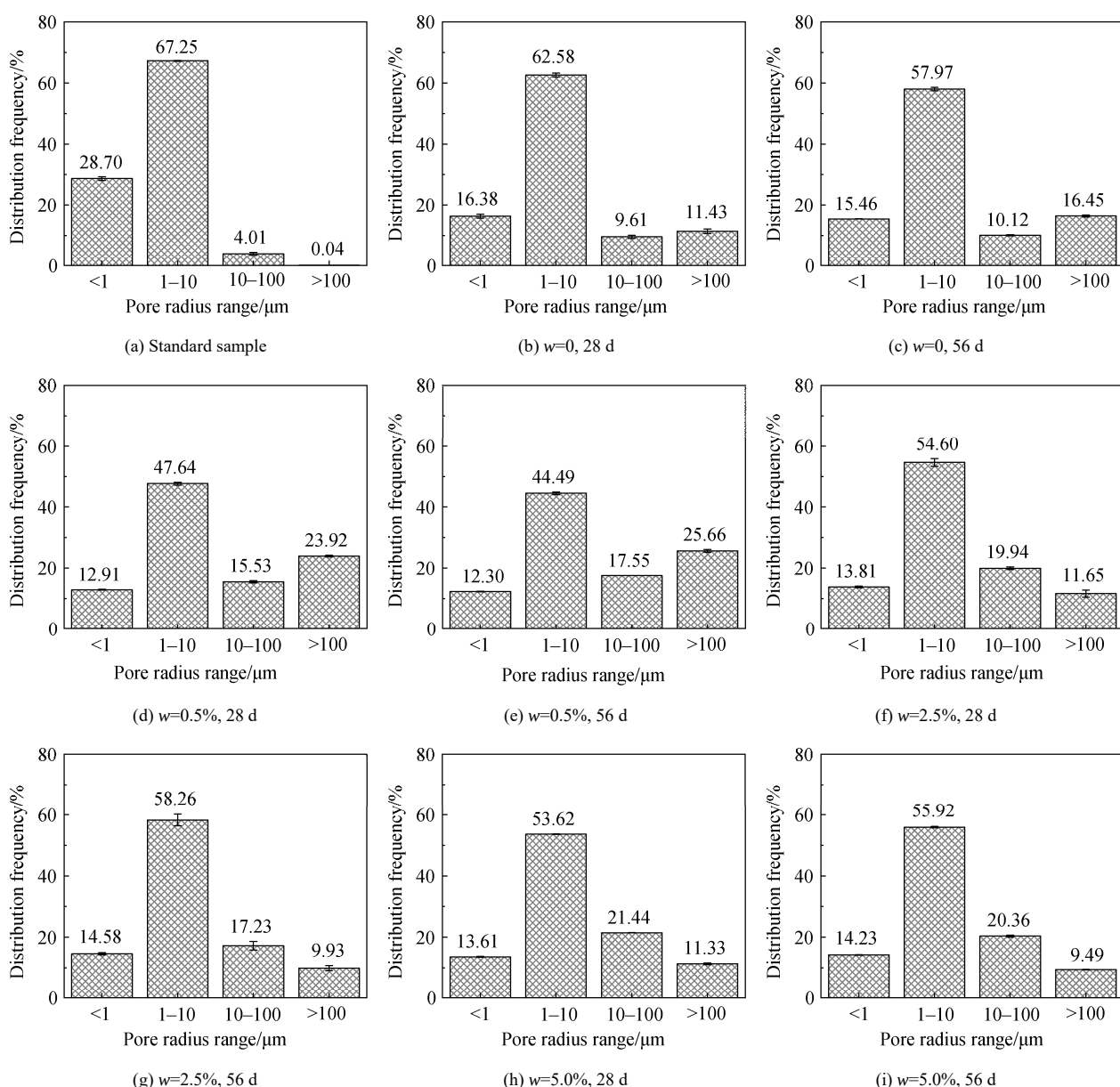


图 11 各条件下试样孔径的分布频率

Fig. 11 Distribution frequency of aquiferous pore size of samples subjected to different conditions

2.2.3 含水孔隙度 前述提及泡沫轻质土试样在各条件下的横向弛豫时间谱均表现为 2 个优势峰, 本研究计算了各谱线总信号强度以及谱线中各优势峰所对应的总强度, 如表 3 所示。根据式(5)获取各强度所反映的含水量, 并按照式(6)计算含水孔隙度:

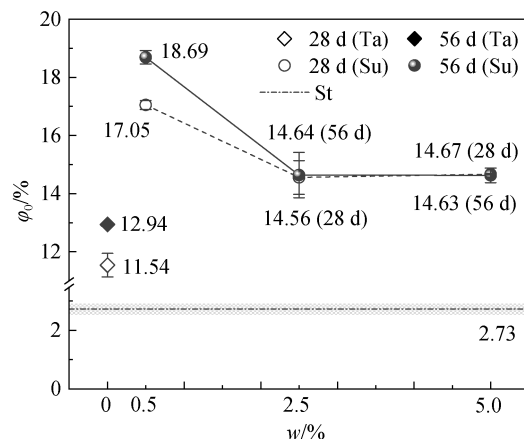
$$\varphi = \frac{m_w}{\rho_w \cdot V_F} \quad (6)$$

式中: φ 为含水孔隙度, %; ρ_w 为试样中液体的密度, g/cm^3 ; V_F 为试样体积, cm^3 。含水孔隙度综合考虑了侵蚀过程中侵入溶液的体积和既有孔隙结构的改造, 是一个综合性的指标。图 12 和图 13 中显示了各条件下试样的总含水孔隙度 φ_0 , 第 1 峰含水孔隙度 φ_1 和第 2 峰含水孔隙度 φ_2 。标准试样 φ_0 仅为 2.73%, 其中 2.61% 分布在第 1 峰, 0.11% 分布在第 2 峰。在自来水浸润条件下, φ_0 随时间增加而逐步升高, 浸润 56 d 后, φ_0 为 12.94%。可以发现从 28 d 到 56 d 这一过程 φ_0 的增幅小于从 0 d 到 28 d 这一过程, 这表明随着浸润的发生, 试样内部复杂的孔隙通道大大增加了水分迁移的时间。所以, 从 56 d 时 φ_0 为 12.94% 直至完全浸润(根据 X-CT 计算结果总孔隙度为 48.90%)还需要很长的时间。各浓度 Na_2SO_4 溶液侵蚀后试样的 φ_0 均大于自来水浸润后的试样。随着侵蚀中 w 的增加, φ_0 先减小后不变。当 w 为 0.5% 时, φ_0 随侵蚀龄期增加而增加, 具体表现为 φ_2 的明显增大, 当 w 为 2.5% 和 5.0% 时无明显变化, φ_0 均保持在 14.60% 左右。然而, 从 2 个优势峰情况来看, 在 w 为 2.5% 和 5.0% 作用下, φ_2 随作用时间增加而逐渐减小, 相应地转为 φ_1 。

表 3 各条件下试样 NMR 信号强度统计

Table 3 NMR signal amplitude statistics of samples subjected to different conditions

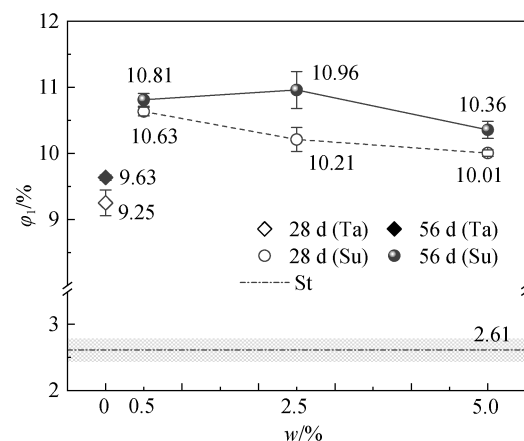
Sample No.	Total signal amplitude	Signal amplitude of the first peak	Signal amplitude of the second peak
F-Standard	3234.56	3102.81	131.75
F-0-28	13 687.62	10 969.75	2717.87
F-0-56	15 345.52	11 425.70	3919.83
F-0.5-28	20 217.96	12 609.26	7608.70
F-0.5-56	22 159.89	12 820.22	9339.67
F-2.5-28	17 264.36	12 108.66	5155.70
F-2.5-56	17 359.29	12 996.92	4362.36
F-5.0-28	17 395.66	11 865.27	5530.39
F-5.0-56	17 348.01	12 281.20	5066.82



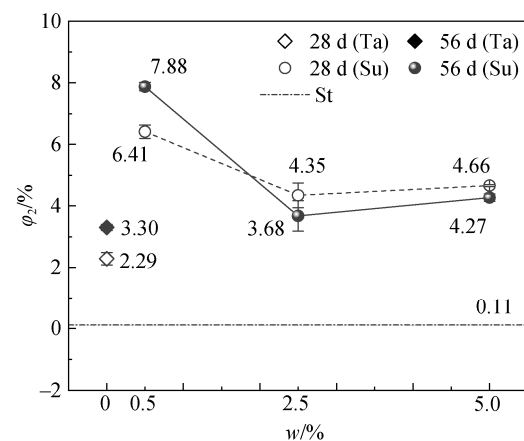
Note: φ_0 is the total aquiferous porosity.

图 12 各条件下试样的总含水孔隙度

Fig. 12 Total aquiferous porosity of samples subjected to different conditions



(a) φ_1



(b) φ_2

Note: φ_1 is the aquiferous porosity of the first peak; φ_2 is the aquiferous porosity of the second peak.

图 13 各条件下试样的优势峰含水孔隙度

Fig. 13 Aquiferous porosity of advantage peak of samples subjected to different conditions

2.3 侵蚀初期泡沫轻质土性能演化机制

2.3.1 力学特性与孔隙特征的联系 含水孔隙度

的变化可以解释侵蚀初期前述力学性能的演变。对于标准试样, 因其 φ_0 最低, 而拥有最大的 f_p 。在自来水浸润后, f_p 随 φ_0 增加而减小。在 0.5% 的 Na_2SO_4 溶液作用后, 试样 φ_0 最大, 因而 f_p 最低。随着 w 增加, 虽然 φ_0 无明显变化, 然而 φ_2 随时间增加而逐渐转化为 φ_1 , 试样在该过程中既有的孔隙被填充密实, 因而出现了更高的 f_p 。

图 14 构建了各条件下泡沫轻质土含水孔隙度 φ 与强度参数之间的量化关系。随着泡沫轻质土试样

φ 的减小, 试样 f_p 和 f_r 均呈指数上升。不同类型含水孔隙度与强度参数之间的拟合关系相关系数按降序依次为: φ_0 , φ_2 , φ_1 。其中采用 φ_0 拟合 f_p 或 f_r 的相关系数均可达 0.99。前人基于大量实验数据提出了泡沫轻质土抗压强度与天然孔隙度的经验模型, 具有代表性的有 Balshin 模型、Hasselman 模型, 以及 Ryshkevitch 模型^[30-31]。其中 Ryshkevitch 模型指出强度与天然孔隙度符合指数型函数关系, 这与本文构建的含水孔隙度与强度的关系一致。

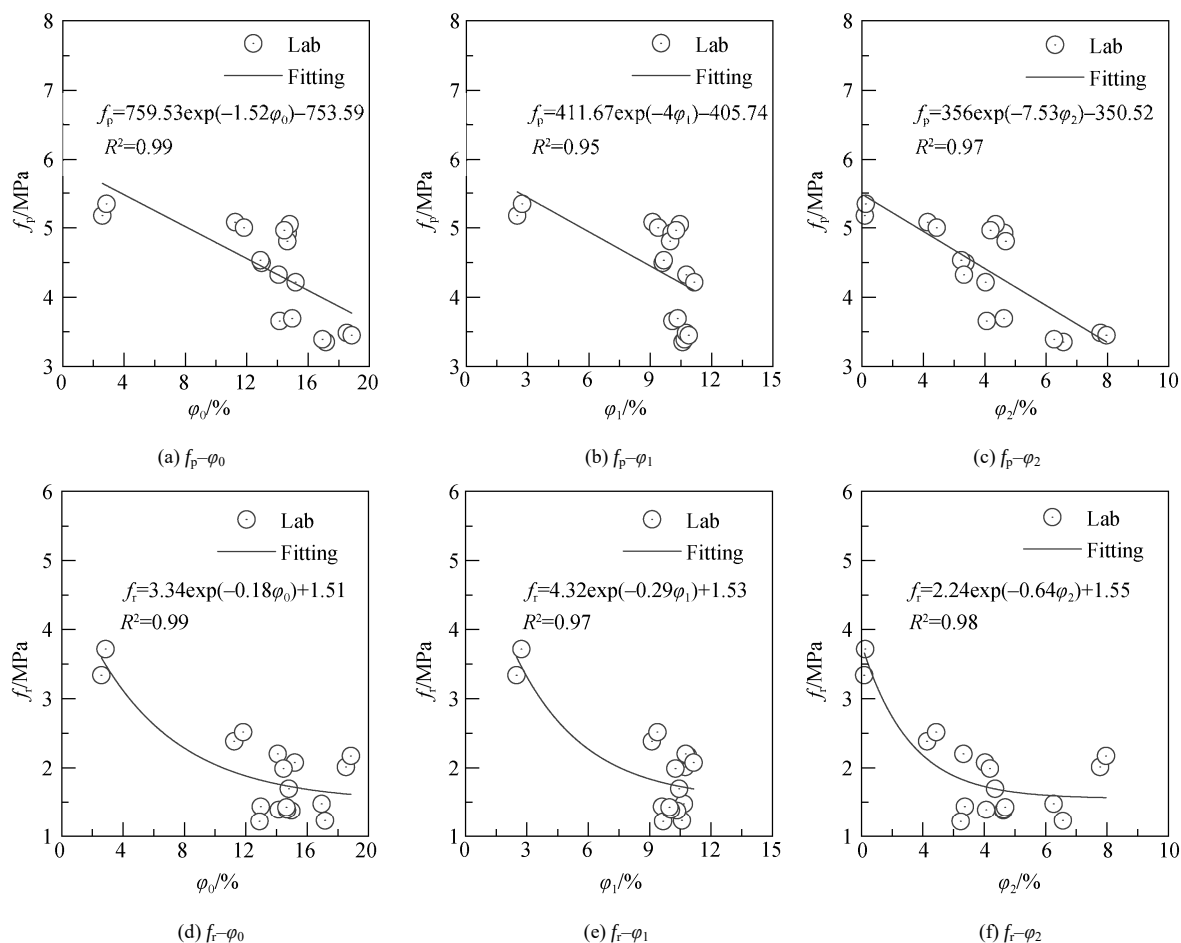


图 14 强度参数与含水孔隙度的关系

Fig. 14 Relationship between strength and aquiferous porosity

2.3.2 性能演化机制 泡沫轻质土的高孔隙度为侵蚀提供了充足的持水空间和产物生成空间, 由骨架吸水引起的软化效应与侵蚀产物充填引起的致密化效应相互抗衡, 影响了侵蚀初期泡沫轻质土强度的演化规律。相比于自来水浸润试样(图 15a), 当 w 为 0.5% 时, 试样中水化产物参与反应而被消耗, 原有孔隙增大或贯通(图 15b), 大孔的分布频率增大(图 11d 和图 11e), φ_0 增加(图 12), 软化效应增强; 在该浓度下侵蚀产物钙矾石与石膏生成量较少, 不

足以充填孔隙以提供强度支持, 致密化效应不明显, 这使得 f_p 低于自来水浸润试样(图 3)。当 w 为 2.5% 和 5% 时, 试样中大量水化产物参与反应, 原有孔隙进一步增大或贯通(图 15c), 这一过程使得软化效应增强; 而大量侵蚀产物充填既有孔隙, φ_0 小于 w 为 0.5% 时的试样(图 12), 随着 w 和侵蚀龄期的增加, 中孔和大孔分布频率减小, 微孔和小孔分布频率增加(图 11), 在减少软化效应的同时逐渐增强致密化效应, 这使得 f_p 逐步回升并在 w 为 5% 时侵蚀 56 d

后高于自来水浸润试样(图 3)。

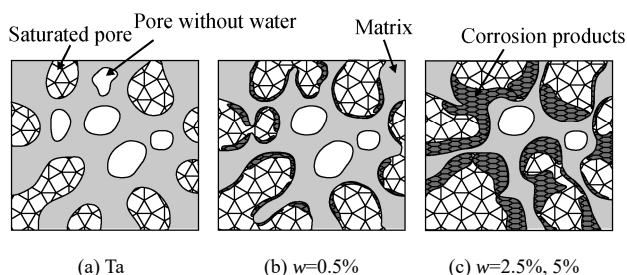


图 15 侵蚀初期泡沫轻质土含水孔隙结构演化机制
Fig. 15 Evolution mechanism of aquiferous pore structure in the early stage of sulphate attack of foamed cement paste

3 结论

基于以上对于泡沫轻质土在不同质量分数的 Na_2SO_4 溶液作用下侵蚀初期的力学性能和孔隙特性分析, 主要结论如下:

1) 随着侵蚀时间增加, 试样的峰值及残余强度均升高, 侵蚀 56 d 相比于 28 d 增幅最高分别可达 19.28% 和 55.56%。随着质量分数 w 增加, 其峰值强度变化率逐步回升, 侵蚀初期的软化效应逐渐减弱, 在 $w=5.0\%$ 下作用 56 d 变化率可达 13.12%, 高于同期自来水浸润试样, 致密化效应明显。

2) 采用 X-CT 与 NMR 联合确定了试样的含水孔径分布。在侵蚀中, 随着 w 增大, 试样大孔($>100\ \mu\text{m}$)的分布频率降低明显, 从 25.66% 可降至 9.49%。当 w 为 2.5% 和 5.0% 时, 随侵蚀龄期增加, 中孔($10\sim100\ \mu\text{m}$)和大孔($>100\ \mu\text{m}$)分布频率减小, 相应微孔($<1\ \mu\text{m}$)和小孔($1\sim10\ \mu\text{m}$)分布频率增加, 这一变化与 w 为 0.5% 时截然相反。

3) 侵蚀初期, 试样的含水孔隙度高于同期自来水浸润后的试样。随着 w 增大, 总含水孔隙度先减小后趋于不变。在 w 为 0.5% 时, 第 1 峰和第 2 峰含水孔隙度均随时间增加而增大, 在 w 为 2.5% 和 5.0% 时, 第 2 峰含水孔隙度随时间逐渐转化为第 1 峰含水孔隙度。随着泡沫轻质土试样含水孔隙度减小, 其峰值强度和残余强度均呈指数上升。

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] 朱俊杰, 刘鑫, 洪宝宁, 等. 气泡混合轻质土路堤最佳浇筑厚度的确定方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3642–3649.
ZHU Junjie, LIU Xin, HONG Baoning, et al. Rock Soil Mech, 2016, 37(12): 3642–3649.

[3] 陈永辉, 石刚传, 曹德洪, 等. 气泡混合轻质土置换路基控制工后沉降研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1854–1862.
CHEN Yonghui, SHI Gangchuan, CAO Dehong, et al. Chin J Geotech Eng, 2011, 33(12): 1854–1862.

[4] 张振, 洪旸, 叶观宝, 等. 硫酸钠溶液侵蚀下气泡轻质土的动静强度劣化特性[J]. 地基处理, 2025, 7(03): 222–228.
ZHANG Zhen, HONG Yang, YE Guanbao, et al. China Ind Econ, 2025, 7(03): 222–228.

[5] 刘楷, 李仁民, 杜延军, 等. 气泡混合轻质土干湿循环和硫酸钠耐久性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 362–366.
LIU Kai, LI Renmin, DU Yanjun, et al. Rock Soil Mech, 2015, 36(Suppl 1): 362–366.

[6] 蒋金洋, 郑皓睿, 孙国文, 等. 硫酸盐侵蚀混凝土的数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(10): 1047–1053.
JIANG Jinyang, ZHENG Haorui, SUN Guowen, et al. J Build Mater, 2023, 26(10): 1047–1053.

[7] 姚韦靖, 刘宜思, 庞建勇, 等. 硫酸盐侵蚀下掺稻壳灰混凝土的劣化性能及损伤模型[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4813–4823.
YAO Weijing, LIU Yisi, PANG Jianyong, et al. Acta Mater Compos Sin, 2022, 39(10): 4813–4823.

[8] LAWRENCE C D. Mortar expansions due to delayed ettringite formation. Effects of curing period and temperature[J]. Cem Concr Res, 1995, 25(4): 903–914.

[9] 张少辉, 王艳, 郭冰冰, 等. 温度场与硫酸盐侵蚀耦合作用混凝土孔结构分形特征演化规律[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(2): 474–484.
ZHANG Shaohui, WANG Yan, GUO Bingbing, et al. J Chin Ceram Soc, 2024, 52(2): 474–484.

[10] 李睿鑫, 邹贻权, 胡大伟, 等. 高渗透压-硫酸盐侵蚀下混凝土时空劣化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(3): 539–547.
LI Ruixin, ZOU Yiquan, HU Dawei, et al. J Zhejiang Univ Eng Sci, 2021, 55(3): 539–547.

[11] 任青阳, 任小坤, 靳红华. 基于混凝土表面 SO_4^{2-} 浓度时变的扩散模型预测研究[J]. 混凝土, 2024(1): 78–83.
REN Qingyang, REN Xiaokun, JIN Honghua. Concrete, 2024(1): 78–83.

[12] IKUMI T, SEGURA I. Numerical assessment of external sulfate attack in concrete structures. A review[J]. Cem Concr Res, 2019, 121: 91–105.

[13] YU Y G, ZHANG Y X. Numerical modelling of mechanical deterioration of cement mortar under external sulfate attack[J]. Constr Build Mater, 2018, 158: 490–502.

[14] 朱效宏, 李青, 陈平, 等. 硫酸盐侵蚀条件下 C-(A)-S-H 组成-结构演化的量化分析[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(5): 901–909.
ZHU Xiaohong, LI Qing, CHEN Ping, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(5): 901–909.

[15] 吴萌, 张云升, 刘志勇, 等. 水泥基材料碳硫硅钙石型硫酸盐侵蚀的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022(8): 2270–2283.
WU Meng, ZHANG Yunsheng, LIU Zhiyong, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(8): 2270–2283.

[16] 覃珊珊. 硫酸盐侵蚀混凝土劣化模型及耐久性失效研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
QIN Shanshan. Study on deterioration model and durability failure of sulfate-eroded concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[17] 朱洪波, 闫美珠, 李晨, 等. 图像分析宏观孔隙率对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 275–280.
ZHU Hongbo, YAN Meizhu, LI Chen, et al. J Build Mater, 2015, 18(2): 275–280.

[18] 薛翠真, 申爱琴, 郭寅川. 基于孔结构参数的掺 CWCPM 混凝土抗

- 压强度预测模型的建立[J]. 材料导报, 2019, 33(8): 1348–1353.
- XUE Cuizhen, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan. Mater Rep, 2019, 33(8): 1348–1353.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 耿飞, 尹万云, 习雨同, 等. 泡沫混凝土孔隙结构的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 526–532.
- GENG Fei, YIN Wanyun, XI Yutong, et al. Bull Chin Ceram Soc, 2017, 36(2): 526–532.
- [22] 彭远胜, 欧孝奇, 姬凤玲. 铝土尾矿泡沫轻质土的物理力学性能及微观特征[J]. 材料导报, 2022, 36(17): 128–133.
- PENG Yuansheng, OU Xiaoduo, JI Fengling. Mater Rep, 2022, 36(17): 128–133.
- [23] AL-DULAIJAN S U, MASLEHUDDIN M, AL-ZAHRANI M M, et al. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate[J]. Cem Concr Compos, 2003, 25(4–5): 429–437.
- [24] SANTHANAM M, COHEN M D, OLEK J. Sulfate attack research: Whither now?[J]. Cem Concr Res, 2001, 31(6): 845–851.
- [25] 董宜森. 硫酸盐侵蚀环境下混凝土耐久性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- DONG Yisen. Experimental study on durability of concrete under sulfate attack environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [26] 王海龙, 董宜森, 孙晓燕, 等. 干湿交替环境下混凝土受硫酸盐侵蚀劣化机理[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(7): 1255–1261.
- WANG Hailong, DONG Yisen, SUN Xiaoyan, et al. J Zhejiang Univ Eng Sci, 2012, 46(7): 1255–1261.
- [27] YE G, CHEN Y, ZHANG Z, et al. Strength degradation of foamed cement paste under sulfate attack[J]. IOP Conf Ser: Earth Environ Sci, 2024, 1334(1): 012002.
- [28] 孙小龙, 张宪国, 林承焰, 等. 基于核磁共振标定的高压压汞孔喉分布定量评价方法[J]. 岩矿测试, 2017, 36(6): 601–607.
- SUN Xiaolong, ZHANG Xianguo, LIN Chengyan, et al. Rock Miner Anal, 2017, 36(6): 601–607.
- [29] 刘赞群, 裴敏, 刘厚, 等. 半浸泡混凝土中 Na_2SO_4 溶液传输过程[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 787–793.
- LIU Zanqun, PEI Min, LIU Hou, et al. J Build Mater, 2020, 23(4): 787–793.
- [30] RÖBLER M, ODLER I. Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated Portland cement pastes I. Effect of porosity[J]. Cem Concr Res, 1985, 15(2): 320–330.
- [31] 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(2): 398–410.
- SONG Qiang, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. J Chin Ceram Soc, 2021, 49(2): 398–410.

Mechanical Behavior and Pore Structure Evolution of Foamed Cement Pastes in the Early Stage of Sulphate Attack

WAN Xun^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2}, YE Guanbao^{1,2}, ZHAO Jianjun³, ZHANG Huan^{3,4}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Chuanshe (Sichuan) Engineering Consulting Co., Ltd., Chengdu 610036, China)

Extended Abstract

Introduction Foamed cement paste (FCP) is a type of cementitious geotechnical material with a high porosity structure, prepared by mixing cement paste with preformed foam and sometimes incorporating soil materials such as clay, silica fume, fly ash, and sand. Due to its lightweight nature, excellent self-supporting ability, easy construction, and environmental friendliness, FCP has been widely used in embankment fills, bridge abutment backfills, slope reinforcement, and retaining wall applications. However, in saline soil regions, FCP is subjected to chemical attacks, particularly sulphate attack, in addition to environmental factors such as temperature fluctuations and water infiltration. The early stage of sulphate attack plays a critical role in determining the long-term durability of FCP. Unlike conventional concrete, which may experience initial strength gain due to ettringite and gypsum formation, FCP's unique pore structure may result in different degradation patterns. At this stage, the interaction between pore water, sulphate ions, and cement hydration products can lead to either early-stage degradation or partial densification. However, the mechanisms linking early-stage mechanical behavior and pore evolution remain unclear. This study focuses on the mechanical behavior and pore structure evolution of FCP during the early stage of sulphate attack. Specimens were exposed to Na_2SO_4 solutions (0%, 0.5%, 2.5%, 5.0%) for 28 d and 56 d, representing the early-stage exposure period. A combination of uniaxial compression testing, X-ray computed tomography (X-CT), and nuclear magnetic resonance (NMR) analysis was used to evaluate the changes in strength, aquiferous pore size distribution, and aquiferous porosity. The findings provide key insights into the initial degradation mechanisms of FCP, highlighting the competing roles of skeleton softening due to water absorption and pore densification due to sulphate reaction products, which are of great significance for further understanding of the influence of service environment on the engineering performance of FCP.

Methods FCP specimens were prepared using P.C42.5 composite Portland cement, anionic foaming agent LG-2258, and tap water. The water-to-cement ratio (m_w/m_c) was set at 0.45, and the foam volume ratio (V_f/V_w) was controlled at 3.5 to achieve a final wet

density of approximately 0.9 g/cm^3 . The specimens were cast in cubic molds ($70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm} \times 70.7 \text{ mm}$), demolded after 24 h, and cured under standard conditions [$(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, $\text{RH} > 95\%$] for 28 d. To eliminate the influence of initial moisture content on sulphate attack, all specimens were oven-dried at 60°C to a constant weight before sulphate attacking. A multi-field coupling test device was used to control sulphate attack conditions, maintaining a constant temperature of 20°C and an osmotic pressure of 10 kPa. The specimens were exposed in Na_2SO_4 solutions (0%, 0.5%, 2.5%, 5.0%) for 28 d and 56 d, simulating the early stage of sulphate attack. After attacking, NMR and X-CT analyses were conducted to assess aquiferous pore structure and aquiferous porosity, followed by uniaxial compression testing at a loading rate of 2 mm/min. Each experiment was repeated at least three times to ensure accuracy and repeatability.

Results and discussion Uniaxial compression test results showed that, during the early stage of sulphate attack, FCP specimens initially experienced strength reduction compared to the standard condition. However, partial strength recovery was observed after 56 d, particularly at 2.5% Na_2SO_4 concentration, where the peak strength increased by 19.28% and the residual strength increased by 55.56%. This indicates a transition from initial degradation to partial densification, likely due to the formation of sulphate reaction products. Unlike traditional concrete, which often exhibits a continuous strength increase in the early sulphate attack phase, FCP's unique pore structure resulted in a more complex response. At low sulphate concentrations (0.5%), sulphate attack increased porosity, accelerating early-stage degradation. However, at higher sulphate concentrations (2.5% and 5.0%), reaction products partially filled existing pores, leading to strength recovery. X-CT and NMR analyses revealed that sulphate attack significantly altered the aquiferous pore structure of FCP in the early stage: 1) Macropore frequency ($>100 \mu\text{m}$) decreased as sulphate concentration increased, indicating pore filling by reaction products. 2) Small pore frequency ($1\text{--}10 \mu\text{m}$) increased, particularly at 2.5% and 5.0% Na_2SO_4 , due to the formation of ettringite and gypsum. 3) Total aquiferous porosity of sulphate-attacked specimens was higher than that of water-immersed specimens, suggesting that sulphate ions modified water retention behavior. A strong exponential correlation was observed between aquiferous porosity and mechanical strength. As aquiferous porosity decreased, both peak and residual strength increased, confirming that sulphate-induced microstructural changes significantly influence mechanical performance.

Conclusions The main conclusion of this work are summarized as following: 1) Sulphate attack in the early stage first weakens FCP, then triggers partial strength recovery. Peak and residual strength initially declined, but after 56 d, peak strength increased by 19.28% and residual strength by 55.56%, particularly at 2.5% Na_2SO_4 concentration. 2) FCP's early-stage sulphate attack behavior differs from traditional concrete. At low sulphate concentrations (0.5%), sulphate attack increased aquiferous porosity, accelerating early-stage degradation. However, at higher concentrations (2.5% and 5.0%), sulphate reaction products partially filled pores, leading to strength recovery. 3) Sulphate attack altered FCP's aquiferous pore structure in the early stage. Macropores ($>100 \mu\text{m}$) decreased, while small pores ($1\text{--}10 \mu\text{m}$) increased, indicating that sulphate products influenced pore connectivity and densification. 4) A strong exponential relationship was identified between aquiferous porosity and strength. As aquiferous porosity decreased, both peak and residual strength increased, demonstrating that sulphate-induced pore transformations impact mechanical stability. These findings highlight the critical role of the early attack stage in determining the long-term durability of FCP, offering new insights for optimizing its application in sulphate-rich environments.

Keywords foamed cement paste; sulphate attack; mechanical property; aquiferous porosity; nuclear magnetic resonance; X-ray computed tomography



张振，工学博士，同济大学土木工程学院研究员，博士生导师，长期从事土体工程地质与绿色防治研究，主持国家自然科学基金项目 3 项、省部级项目 6 项；发表 SCI 论文 46 篇；参编行业标准 7 部；授权国家发明专利 16 项，软件著作权 1 项。荣获上海市科技进步奖二等奖 1 项，教育部自然科学奖二等奖 2 项。兼任国际土工合成材料学会会员、中国土工合成材料工程协会教育工作委员会秘书长、中国地震学会工程勘察专业委员会委员、中国土木工程学会透明岩土技术创新专家团队委员等学术职务。



万勋，同济大学土木工程学院地质工程博士研究生，研究方向为多场耦合环境下泡沫轻质土的性能演化机理及力学模型。参与国家自然科学基金项目 3 项，发表 SCI 论文 4 篇，EI 论文 1 篇，授权国家发明专利 1 项，软件著作权 1 项；获第三届全国地学研究生论坛优秀报告奖。所在课题组研究项目包括：考虑多环境场耦合效应的泡沫轻质土动力学性能劣化及其理论模型；考虑双界面耦合效应的劲性复合桩承载力发挥机制和力学模型；基于 PLA/PBAT 复合改性的可降解排水板研发与改性机理。