



干湿循环作用下全尾砂固结体的损伤机理

罗小峰, 侯运炳, 闫浩东, 孙 翔

(中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘 要: 为探究干湿循环过程对全尾砂固结体力学性质的损伤作用, 系统研究了干湿循环作用对全尾砂固结体单轴抗压强度的劣化规律, 并结合压汞仪、扫描电镜和热重分析装置等测试仪器分析了干湿循环作用对全尾砂固结体的损伤机理。结果表明: 养护 3 d 的全尾砂固结体在干湿循环作用下单轴抗压强度呈先上升后降低趋势, 在干湿循环初期, 固结体内部生成更多的水化产物, 孔隙减少, 整体结构更加致密; 随干湿循环的继续进行, 固结体逐渐破坏。养护 28 d 的固结体强度随干湿循环次数的增加逐渐降低, 水泥含量越高, 固结体强度的降幅越低; 未经干湿循环的试件内部孔隙少, 水化产物层状叠加; 在干湿循环作用下, 水化产物之间的连接逐渐破坏, 孔隙率由 35.75% 增加至 39.08%, 且大孔占比大幅度上升。干湿循环作用引起的颗粒胀缩和水侵蚀导致固结体内部出现更多孔隙, 部分孔隙联通形成大孔, 水化产物减少, 从而使固结体内部结构变得松散破碎, 这是导致固结体损伤的主要原因。

关键词: 全尾砂固结体; 干湿循环; 孔隙; 水化产物; 损伤

文章编号: 1004-0609(2021)-12-3730-10

中图分类号: TD853.3

文献标志码: A

引文格式: 罗小峰, 侯运炳, 闫浩东, 等. 干湿循环作用下全尾砂固结体的损伤机理[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(12): 3730–3739. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36711

LUO Xiao-feng, HOU Yun-bing, YAN Hao-dong, et al. Damage mechanism of total tailings consolidation under action of dry-wet cycle[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(12): 3730–3739. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36711

随着国内尾矿生成量逐年增多, 尾矿的堆存处置问题日益突出, 为解决传统尾矿排放带来的环境污染和尾矿库溃坝等问题, 已有学者在尾砂干堆技术基础上改良提出了尾砂固结排放技术, 实现了尾矿的地表安全堆存^[1]。由于夏季降雨和高温的频繁转换, 排放于地表的尾砂固结堆体经历多次干湿循环过程后强度和稳定性改变, 固结体受到不可逆转的损伤^[2-3]。因此, 有必要对干湿循环条件下全尾砂固结体的损伤情况进行研究。

目前, 国内外学者对干湿循环条件下岩土体的损伤特性已有一定研究, DUDA 等^[4]通过实验研究了水对砂岩力学性能的损伤劣化作用; 刘帅等^[5]对红砂岩进行了干湿循环处理, 发现干湿循环

次数增加使砂岩变得疏松多孔, 应变增大, 强度大幅度下降后趋于不变。宋勇军等^[6]通过室内实验得出干湿循环使固结体弹性模量和单轴抗压强度下降的结论, 并探究了干湿循环条件下岩体的损伤机制。董金玉等^[7]和程涛等^[8]研究了干湿循环作用下土体力学特性的变化规律, 发现水是导致土体胀缩变形及强度下降的主要原因, 且在干湿循环初期表现得更加明显。

研究发现^[9-11], 全尾砂固结体力学性质主要与固结体内部水化产物及孔隙结构有关, 孔隙分布和水化产物含量是固结体微观结构变化的内因, 也是固结体强度的决定性因素。周贤良等^[12]通过试验确定了干湿循环过程中水泥水化产物变化对水泥基

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51674263)

收稿日期: 2021-02-25; **修订日期:** 2021-05-23

通信作者: 侯运炳, 教授, 博士; 电话: 13051090099; E-mail: houyunbing2000@163.com

复合材料强度和损伤的影响。刘文化等^[13]通过抗剪强度试验研究了干湿循环过程中水泥对固化淤泥强度的影响规律。褚夫蛟等^[14]通过核磁共振技术确定了不同含水状态下砂岩孔隙和损伤的关系。刘新荣等^[15]和曾召田等^[16]以岩土体为研究对象,研究了干湿循环作用下孔隙演化情况和岩土体劣化度的变化规律。参考岩土体干湿循环损伤特性的研究方法,在其他学者对尾砂的研究基础上^[17-24],本文通过室内试验探究了干湿循环对全尾砂固结体单轴抗压强度的影响,并借助压汞仪、热重分析装置和扫描电镜探究其损伤机理,这对干湿循环条件下全尾砂固结体的长期稳定性具有重要意义。

1 实验

1.1 试验材料

对试验尾砂进行 X 射线衍射(XRD)分析和粒度分析,尾砂化学矿物组成见表 1。通过对实验数据分析可知,尾砂中主要成分是 SiO₂、Al₂O₃、MgO,全尾砂 $d_{10}=27.57\text{ }\mu\text{m}$, $d_{20}=72.53\text{ }\mu\text{m}$, $d_{60}=172.05\text{ }\mu\text{m}$,全尾砂不均匀系数 $C_u=6.24>5$,曲率系数 $C_e=1.11$,属于级配良好材料。选用的胶凝材料为普通硅酸盐水泥(PO42.5),其化学成分见表 2。

表 1 尾砂化学组成

Table 1 Chemical composition of tailings (mass fraction, %)

MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO ₂
2.412	3.850	82.054	2.459
Na ₂ O	MnO	Fe ₂ O ₃	Total
0.179	0.022	8.003	98.979

表 2 普通硅酸盐水泥化学成分

Table 2 Chemical composition of ordinary portland cement (mass fraction, %)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
22.86	65.89	4.61	2.65	1.76
SO ₃	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₂ S
1.77	60.22	7.63	8.52	17.33

1.2 试验方案及过程

按照设定的配比制备固结体,每一配比制备 3 个固结体试件,试件质量浓度为 78%,水泥含量(质

量浓度)分别为 4%、6%、8%。按配比称取尾砂、水泥、水(未经处理的自来水)后搅拌均匀制成直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱状试件。试件固结成型 24 h 后脱模,然后放入恒温恒湿养护箱进行标准养护,养护龄期设置为 3 d、28 d。将养护至设定龄期的试件取出,随后放入温度为 50 ℃的烘箱中烘干 12 h,再将干燥后的试样放入浸泡盆中自然吸水 12 h,此过程为一次干湿循环。对经过 0、3、6、9、12、15 次循环的试件进行单轴压缩试验,采用位移控制方式进行试验加载,加载速率为 1 mm/min。取单轴压缩试验后试块中心部分的小碎块,放入无水乙醇中终止水化,对经过不同干湿循环次数的样品进行热重测试、孔隙结构测试及扫描电镜试验。

2 结果与分析

2.1 干湿循环对全尾砂固结体强度的影响

图 1 所示为不同养护龄期固结体在干湿循环作用后固结体的强度变化规律。为更好地探讨干湿循环对全尾砂固结体损伤劣化的影响,定义固结体单轴抗压强度损失百分比为干湿循环作用下的总劣化度 D_a ,即

$$D_a = \frac{\sigma_0 - \sigma_a}{\sigma_0} \tag{1}$$

式中: D_a 为固结体劣化度; σ_0 为固结体初始强度; σ_a 为 a 次干湿循环后固结体单轴抗压强度。表 3 所示为不同干湿循环次数后固结体的单轴抗压强度和劣化度,考虑到篇幅原因,只列出了水泥含量为 6%固结体试件的测试结果。由图 1 和 2 可知,不同养护龄期的固结体随干湿循环次数的增加呈现不同的强度变化规律,相同养护龄期不同水泥含量的固结体强度变化趋势相同。随循环次数的增加,养护 3 d 的固结体强度先上升,后下降,最后趋于平缓;以水泥含量 6%的固结体为例,6 次循环后固结体强度由 0.4 MPa 增加到最大值 0.6 MPa,然后至 15 次循环时降至 0.29 MPa;随干湿循环次数的增加,固结体劣化度从负数逐渐增加为正数,试件受到破坏。随循环次数的增加,养护 28 d 的固结体强度逐渐下降,然后趋于不变,劣化度由 0 逐步上升后趋于平缓。不同水泥掺量

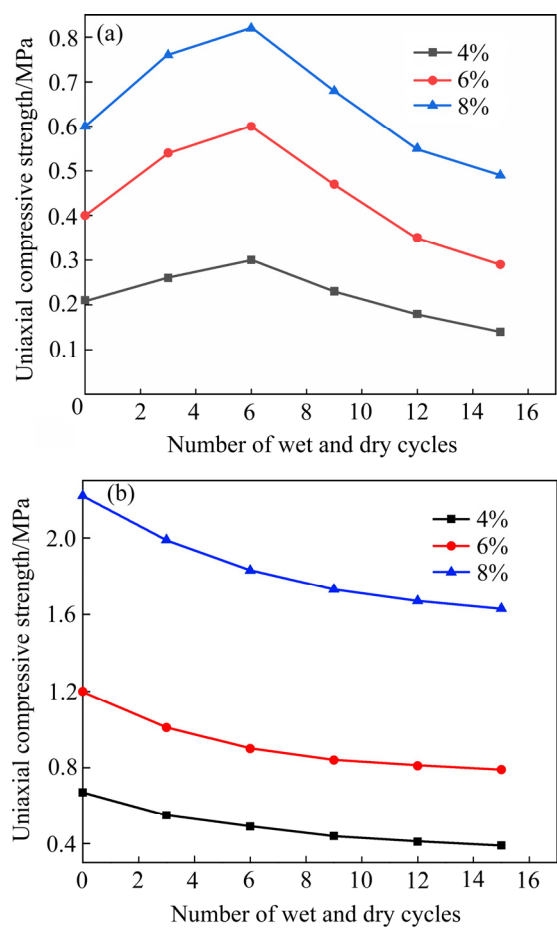


图 1 养护不同时间固结体强度与干湿循环次数的关系
Fig. 1 Relationship between strength of consolidated body cured for different days and number of dry and wet cycles: (a) 3 d; (b) 28 d

的固结体强度总降幅不同，水泥含量越高，固结体强度总降幅越低。水泥含量 4% 的固结体试件由 0.67 MPa 降至 0.39 MPa，降幅为 41.79%；水泥含量 8% 的固结体由 2.22 MPa 降为 1.63 MPa，降幅为 26.58%。

表 3 不同干湿循环次数后固结体的强度和劣化度
Table 3 Strength and deterioration of consolidated body after different numbers of wet and dry cycles

Curing age/d	Cement content/%	Number of dry and wet cycles	Uniaxial compressive strength/MPa	Deterioration/%
3	6	0	0.4	0
		3	0.54	−35
		6	0.6	−50
		9	0.49	−22.5
		12	0.34	15
		15	0.29	27.5
28	6	0	1.2	0
		3	1.01	0.158
		6	0.9	0.25
		9	0.84	0.3
		12	0.81	0.325
		15	0.79	0.342

2.2 干湿循环对全尾砂固结体破坏形式的影响

固结体的破坏形式是指固结体在荷载作用下显现出宏观上的破坏形态，受其自身物理化学性质、受力形式及不同外界环境条件的影响。破坏形式可分为三大类：脆性张拉劈裂破坏、剪切破坏和复合式破坏。全尾砂固结体的破坏形式主要受固结体内部孔隙结构和裂纹发育情况、水化产物互连接形成结构的紧密性所影响。为更好地研究干湿循环对全尾砂固结体损伤的情况，对养护 3 d 和 28 d 固结体的破坏形式进行测试，图中从左至右依次为干湿循环 0 次、3 次、9 次、15 次的全尾砂固结体，如图 2 和 3 所示。

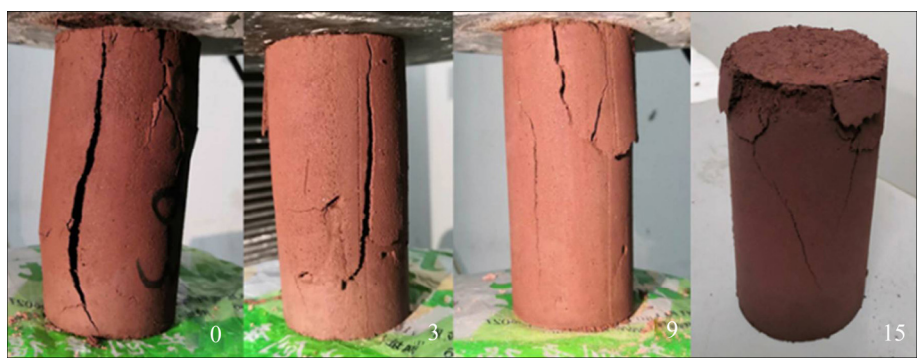


图 2 养护 3 d 固结体单轴压缩破坏图
Fig. 2 Uniaxial compression failure diagram of consolidated body cured for 3 d



图 3 养护 28 d 固结体单轴压缩破坏图

Fig. 3 Uniaxial compression failure diagram of consolidated body cured for 28 d

由实验结果可知, 未经循环的固结体以张拉劈裂和剪切破坏为主, 宏观的破坏面大体上呈纵向分布, 有着明显的脆性破坏特征。在干湿循环初期, 养护 3 d 的固结体已出现脆性破坏特征, 以劈裂、剪切破坏为主; 随着干湿循环的继续进行, 循环 9 次后, 固结体出现延性破坏特征, 以复合式挤压破坏为主; 养护 28 d 的固结体在干湿循环初期就受到干湿循环的损伤, 出现介于脆性破坏与延性破坏之间的转换状态, 之后逐渐转变为延性破坏, 试样侧面出现片状折断现象。

3 干湿循环损伤机理分析

3.1 孔隙结构分析

孔隙数量和结构是固结体内部微观结构致密程度的重要影响因素, 而微观结构直接决定了固结体的宏观性能, 对干湿循环后固结体内部的孔隙数量及结构进行检测分析能更好地了解固结体的损伤情况。对养护 28 d, 干湿循环 0 次、3 次、15 次的固结体进行压汞测试, 试验结果如图 4、图 5 和表 4 所示。由表 4 可知, 随干湿循环次数的增加, 固结体孔隙率、孔总面积和平均孔径等参数均呈增加趋势, 孔隙率由 35.75% 增加至 15 次循环后的 39.08%; 图 4 所示为固结体的孔径分布曲线(图中 α 代表各孔径的入孔量)。由图 4 可知, 曲线第二个峰值点随干湿次数的增加逐渐向右偏移, 且峰值增加, 固结体孔径分布微分曲线对应的孔径范围主要集中在 $0.5 \sim 4 \mu\text{m}$, 这表明在干湿循环作用下, 孔径分布微分曲线形态未发生明显变化, 但各类孔隙数

量发生了一定改变, 出现大孔的概率增大。出现此现象的原因是干湿循环过程中, 固结体内部尾砂颗粒经历频繁的干燥受热和浸水冷却过程, 而尾砂颗粒受热膨胀、冷却收缩; 尾砂颗粒因多次的膨胀、收缩作用使颗粒接触点处拉应力、压应力频繁转换, 导致尾砂颗粒接触处出现细微的裂隙, 同时使闭口孔隙转变为开口孔隙; 微裂隙的产生以及开口孔隙的增加导致固结体内部孔隙增多, 部分孔隙互相联通形成大孔隙。为验证以上结论, 依据孔隙的分类方法, 对干湿循环后固结体的孔隙分布进行分析, 其结果如图 5 所示: 固结体试样各类孔隙含量在干湿循环前后有明显的差异, 未循环的固结体试样 $<10 \text{ nm}$ 、 $10 \sim 100 \text{ nm}$ 、 $100 \sim 1000 \text{ nm}$ 、 $>1000 \text{ nm}$ 的孔隙占总孔隙的比例分别为 2.56%、23.67%、33.57%、40.2%; 15 次循环后, 孔隙率变为 0.32%、

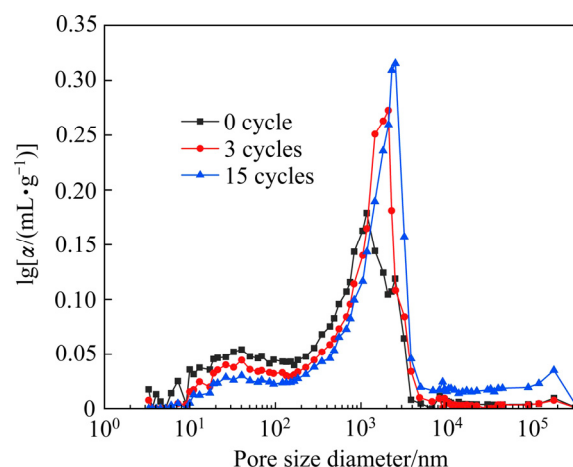


图 4 干湿对固结体试样孔径分布的影响

Fig. 4 Influence of dry and wet on pore size distribution of consolidated sample

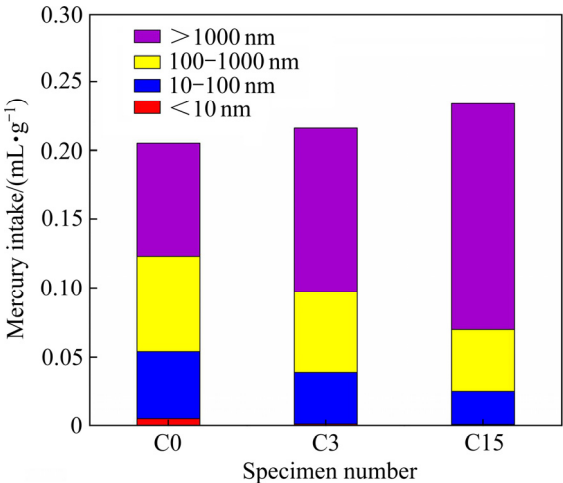


图 5 不同干湿循环次数后固结体试样中各类孔隙的孔隙量

Fig. 5 Pore volume of various pores in consolidated body sample after different numbers of dry and wet cycles

表 4 不同干湿次数后固结体孔结构参数

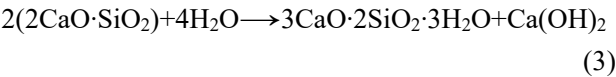
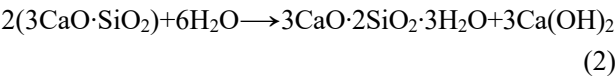
Table 4 Pore structure parameters of consolidated body after different numbers of wet and dry cycles

Number of dry and wet cycles	Porosity/%	Total porosity/(mL·g ⁻¹)	Total hole area/(m ² ·g ⁻¹)	Average pore size/nm
0	35.75	0.205	3.972	72.8
3	36.76	0.216	5.986	134.4
15	39.08	0.234	9.678	235.5

10.18%、19.46%、69.97%。由此可知，频繁的干湿循环过程使固结体内部孔隙增多且大孔占比增加，小孔逐渐联通形成大孔，与上述分析相符。

3.2 水化产物分析

水泥水化生成的水化产物在全尾砂固结体中具有将松散的尾砂颗粒包裹并填充孔隙的作用，对全尾砂固结体微观孔隙结构和整体强度起着决定性的影响。由于选用的是普硅水泥，固结体内部主要发生硅酸三钙和硅酸二钙的水化反应：



由式(2)和(3)可知，固结体内部的水化产物中含

有化学结合水，通过测试化学结合水在固结体中的含量，即可得知水化产物在固结体中占比的多少，由 ALIREZA 等^[25]的研究可知，水泥水化后化学结合水的含量 w 为

$$w=\frac{m_{105}-m_{900}}{m_{900}}\times 100\%$$
(4)

式中： m_{105} 和 m_{900} 为全尾砂固结体试样在 105 ℃ 和 900 ℃ 灼烧后的质量。

对经历不同干湿循环次数后的固结体进行热重试验，结果如图 6 和 7 所示。由图 6 可知，固结体试样的质量随温度的升高而呈现降低的趋势，减少的质量即为化学结合水的质量；干湿循环次数越多，固结体试样减少的质量越少，这代表随干湿循环次数的增加，固结体内部水化产物减少。由图 7 可知，养护 3 d 的固结体化学结合水含量随干湿循环次数的增加呈先增加后降低的趋势；固结体化学结合水含量未经循环时为 3.31%，循环次数达 6 次时最大，为 3.75%，之后，逐渐下降至 3.01%。养护 28 d 的固结体试样化学结合水含量随干湿循环次数的增加逐渐下降之后趋于平缓，在干湿循环初期，化学结合水含量下降幅度更大，此现象也与干湿循环作用下固结体的强度变化规律相吻合。

出现此种变化的原因是，养护 3 d 的固结体内部水化反应远未完成，同时，干湿循环作用初期，水分的渗入使水泥与水充分接触，干燥过程温度升高使水化溶液中离子运动加快，两者都提升了水化反应的速度。此阶段干湿循环对水化反应的促进作

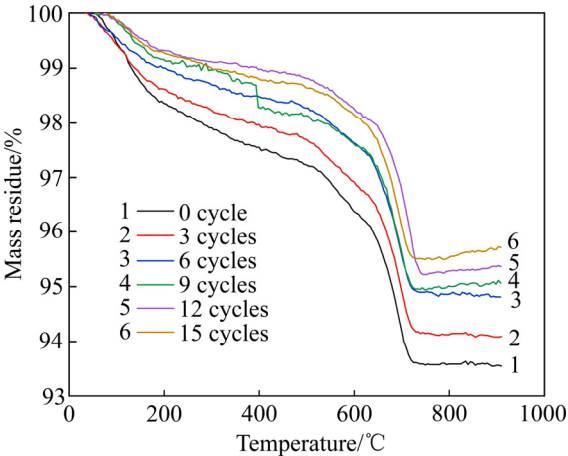


图 6 养护 28 d 水泥含量 8% 固结体的质量损失曲线

Fig. 6 Mass loss curves of consolidation with cement content of 8% cured for 28 d

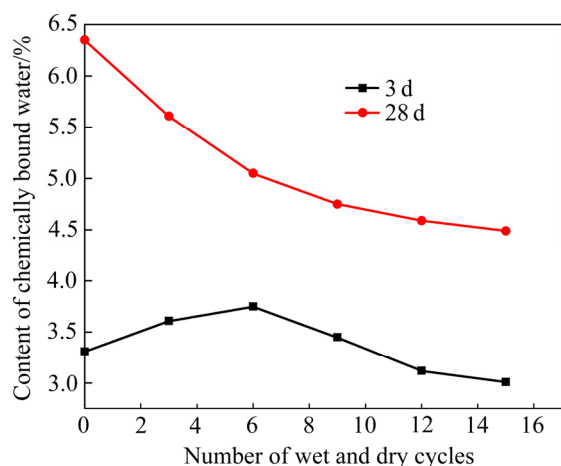


图7 化学结合水含量与干湿循环次数的关系

Fig. 7 Relationship between content of chemically bound water and number of wet and dry cycles

用比对固结体的损伤作用来得更强烈, 所以水化产物含量有所增加。养护 28 d 固结体水化反应基本完成, 干湿循环作用导致固结体内部孔隙增多, 尾砂颗粒接触处出现裂隙, 包裹尾砂颗粒并充填孔隙的水化产物破碎流失; 同时, 水分的入渗使具有连通性的孔隙之中的气体排出, 而气体排出破坏水化产物之间的连接, 使其变得零散破碎, 而且水会对水化产物产生侵蚀作用。在二者的共同作用下, 水化产物逐渐松散并减少, 固结体微观结构受到破坏, 强度降低。

3.3 微观形貌分析

为更直观地观察干湿循环作用下固结体内部微观结构的变化情况并验证以上分析, 对经历不同干湿循环次数后的全尾砂固结体进行扫描电镜观察。图 8 和 9 所示分别为养护 3 d 和 28 d 固结体经历不同干湿循环次数后的微观形貌图。由图 8 可知, 养护 3 d 未经干湿循环的固结体中水化产物中含有少量的水化硅酸钙(C-S-H), 固结体内部存在较大孔隙且水化产物不能完全填充孔隙, 水化产物未能紧密连接, 整体结构较为松散(见图 8(a))。3 次干湿循环后, 固结体内部生成更多的板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与水化硅酸钙(C-S-H)且紧密连接, 水化产物覆盖在颗粒表面并填充孔隙, 固结体内部孔隙减少, 整体结构比未循环时完整(见图 8(b))。15 次干湿循环后, 仍能从固结体中观测到一定量的水化硅酸钙(C-S-H)

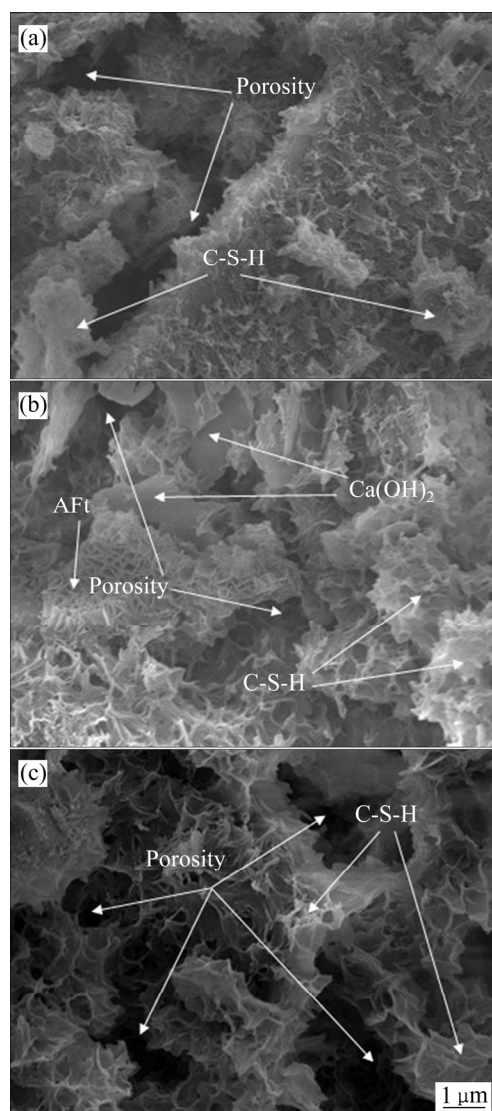


图8 养护 3 d 固结体干湿循环后的 SEM 像

Fig. 8 SEM images of consolidated body cured for 3 d after different numbers of dry and wet cycles: (a) 0 cycle; (b) 3 cycles; (c) 15 cycles

和钙矾石, 但两者含量比 3 次循环时大幅度减少且破碎分散, 水化产物已不能完全包裹住颗粒, 固结体内部出现较多大孔和小孔隙, 部分孔隙连接形成裂隙, 试样显著破坏(见图 8(c))。

由图 9 可看出, 未经循环的固结体试样中含有大量的絮状水化硅酸钙(C-S-H)与针状钙矾石, 且水化硅酸钙(C-S-H)将大部分钙矾石包裹住填充在孔隙之中, 固结体内部孔隙少且多为微小孔隙(见图 9(a))。3 次干湿循环后, 水化产物未见增加, 表明此阶段固结体水化反应已基本完成; 可观测到的水化硅酸钙(C-S-H)与钙矾石较少, 且二者未能紧密连

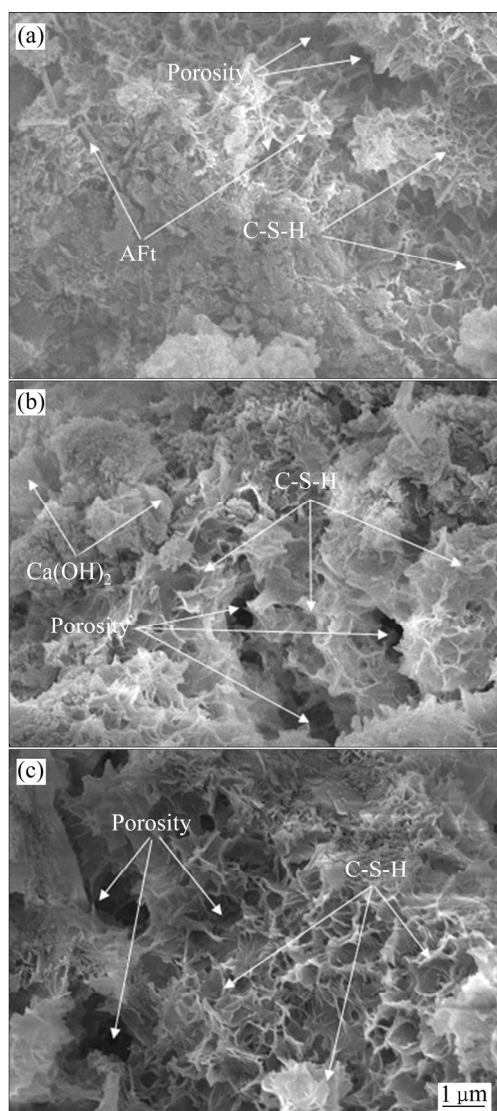


图9 养护28 d固结体干湿循环后的SEM像

Fig. 9 SEM images of cured 28 d consolidated body after different numbers of dry and wet cycles: (a) 0 cycle; (b) 3 cycles; (c) 15 cycles

接; 固结体内部出现较为明显的损伤孔隙, 存在于C-S-H之间且向周围扩展, C-S-H的连接变得松散(见图9(b)). 15次干湿循环后, 固结体中干湿损伤孔隙显著增加, C-S-H凝胶变得破碎分散, 钙矾石被破坏断裂, 固结体结构变得松散, 受到干湿循环作用的损伤加剧(见图9(c)).

由以上分析可知, 养护3 d的固结体在干湿循环初期生成更多的水化产物并连接更为紧密, 固结体内部孔隙减少, 整体结构更为致密; 随干湿循环的继续进行, 水化产物之间的连接受到破坏, 出现大量干湿损伤孔隙, 固结体变得松散, 受到破坏。

养护28 d的固结体未循环时内部孔隙较少, 水化产物层状叠加; 随着干湿循环次数的增加, 水化产物之间的连接逐渐破坏, 生成干湿损伤孔隙并扩展, 这与干湿循环后固结体的强度变化规律吻合, 同时也验证了干湿循环作用下固结体孔隙结构和水化产物变化情况的分析。

3.4 干湿循环对固结体的损伤机理综合分析

作为一种较强的风化过程, 干湿循环对固结体的影响主要分为水对固结体的物理作用和化学作用。养护龄期较短的固结体内部水化反应远未完成, 干湿循环初期浸水时水分的渗入与干燥过程温度的升高加速了水化反应的进行, 干湿循环造成的损伤不明显; 随干湿循环的继续进行, 固结体受到的损伤累积, 强度逐渐下降, 固结体受到破坏。

干湿循环过程中尾砂颗粒出现反复的胀缩现象, 使颗粒接触点处拉应力、压应力频繁转换, 导致固结体内部出现更多的裂隙, 闭口孔隙转变为开口孔隙。固结体内部孔隙增多并互相联通形成大孔隙, 使得包裹在尾砂颗粒表面和填充孔隙的水化产物变得破碎零散, 同时, 孔隙的增多导致更多水分渗入到固结体内部。水分的渗入使具有连通性的孔隙之中的气体排出, 而气体排出会在颗粒接触处形成拉力, 破坏此处的平衡状态, 造成连结能力较弱的骨架的破坏, 水化产物从尾砂表面和孔隙间脱落。随干湿循环的持续进行, 固结体内部孔隙逐渐增加并联通形成大孔隙, 水化产物变得零散破碎并随水分流失, 固结体内部结构破坏, 强度降低。

4 结论

1) 在干湿循环作用下, 养护3 d的尾砂固结体强度呈先上升后下降趋势, 养护28 d的尾砂固结体强度逐渐下降后趋于平缓, 水泥含量越高, 下降幅度越小。

2) 干湿循环作用使固结体内部孔隙率逐渐增大, 孔径分布微分曲线形态未发生明显变化, 但各类孔隙数量发生了一定改变; 尾砂频繁的胀缩使固结体内部出现更多的孔隙, 小孔互相联通形成大孔。

3) 养护龄期短的固结体内部水化反应未完成,

在干湿循环初期有水化产物生成;养护 28 d 的固结体随干湿循环的增加,水化产物逐渐减少,内部结构变得松散。

4) 在干湿循环作用下,尾砂颗粒接触处出现裂隙和开口孔隙增加使固结体内部孔隙增多,小孔联通形成大孔,水化产物破碎流失;孔隙增多和水化产物的减少使固结体内部微观结构接变得破碎,这是其受到损伤的主要原因。

REFERENCES

- [1] 侯运炳,唐杰,魏书祥.尾矿固结排放技术研究[J].金属矿山,2011(6):59-62.
HOU Yun-bing, TANG Jie, WEI Shu-xiang. Research on tailings' cementation and discharging technology[J]. Metal Mine, 2011(6): 59-62.
- [2] 刘福萍.多雨地区尾矿干堆体表面固化试验与应用研究[D].长沙:中南大学,2014.
LIU Fu-ping. Study on surface solidification test and application of dry tailings pile in rainy area[D]. Changsha: Central South University, 2014
- [3] 傅晏,王子娟,刘新荣,等.干湿循环作用下砂岩细观损伤演化及宏观劣化研究[J].岩土工程学报,2017,39(9):1653-1661.
FU Yan, WANG Zi-juan, LIU Xin-rong, et al. Meso damage evolution characteristics and macro degradation of sandstone under wetting-drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1653-1661.
- [4] DUDA M, RENNER J. The weakening effect of water on the brittle failure strength of sandstone[J]. Geophysical Journal International, 2012, 192(3): 1091-1108.
- [5] 刘帅,杨更社,董西好.干湿循环对红砂岩力学特性及损伤影响试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(4):101-106.
LIU Shuai, YANG Geng-she, DONG Xi-hao. Experimental study on influence of wetting-drying cycles on mechanical characteristics and damage of red sandstone[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 101-106.
- [6] 宋勇军,陈佳星,张磊涛,等.干湿循环作用下受荷砂岩损伤劣化特性研究[J].长江科学院院报,2021,38(9):133-140.
SONG Yong-jun, CHEN Jia-xing, ZHANG Lei-tao, et al. Damage and degradation characteristics of loaded sandstone under drying-wetting cycle[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(9): 133-140
- [7] 董金玉,赵志强,杨继红,等.干湿循环作用下滑带土的变形演化和强度参数弱化试验研究[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(S2):1-7.
DONG Jing-yu, ZHAO Zhi-qiang, YANG Ji-hong, et al. Research on the deformation evolution and the strength weakening of slip soil under wetting-drying cycle[J]. Advanced Engineering Sciences, 2016, 48(S2): 1-7.
- [8] 程涛,洪宝宁,程江涛.干湿循环下高液限土力学特性研究[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(6):82-86,95.
CHEN Tao, HONG Bao-ning, CHEN Jiang-tao. Mechanical properties of high liquid limit soil under different drying and wetting cycles[J]. Advanced Engineering Sciences, 2013, 45(6): 82-86, 95.
- [9] 侯运炳,张兴,李攀,等.冻融循环对全尾砂固结体力学性能影响及无损检测研究[J].工程科学学报,2019,41(11):1433-1443.
HOU Yun-bing, ZHANG Xing, LI Pan, et al. Mechanical properties and nondestructive testing of cemented mass of unclassified tailings under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(11): 1433-1443.
- [10] SUN X, HOU Y. Experimental investigation of the macroscopic behavior and microstructure property evolution of hardened cement consolidated tailings[J]. Minerals, 2019, 10(1): 6-22.
- [11] HOU Y, DING P, HAN D, et al. Study on the preparation and hydration properties of a new cementitious material for tailings discharge[J]. Processes, 2019, 7(1): 47-63.
- [12] 周贤良,刘长武,冯波,等.干湿循环作用对水泥基复合充填材料的影响[J].工程科学学报,2019,41(12):1609-1617.
ZHOU Xian-liang, LIU Chang-wu, FENG Bo, et al. Effects of dry-wet circulation on cement-based composite filling materials[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(12): 1609-1617.
- [13] 刘文化,舒俊炜,孙秀丽,等.干湿循环作用下固化淤泥的抗剪强度变化规律[J].土木与环境工程学报,2019,41(4):10-18.
LIU Wen-hua, SHU Jun-wei, SUN Xiu-li, et al. Shear strength variations of solidified sludge during drying-wetting cycles[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering,

- 2019, 41(4): 10–18.
- [14] 褚夫蛟, 刘敦文, 陶明, 等. 基于核磁共振的不同含水状态砂岩动态损伤规律[J]. 工程科学学报, 2018, 40(2): 144–151.
- ZHU Fu-jiao, LIU Dun-wen, TAO Ming, et al. Dynamic damage laws of sandstone under different water bearing conditions based on nuclear magnetic resonance[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(2): 144–151.
- [15] 刘新荣, 袁文, 傅晏, 等. 干湿循环作用下砂岩溶蚀的孔隙度演化规律[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(3): 527–532.
- LIU Xin-rong, YUAN Wen, FU Yan, et al. Porosity evolution of sandstone dissolution under wetting and drying cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(3): 527–532.
- [16] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 膨胀土干湿循环过程孔径分布试验研究及其应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 322–328.
- CHEN Zhao-tian, LÜ Hai-bo, ZHAO Yan-lin, et al. Study of pore size distribution of expansive soil during wetting-drying cycle and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 322–328.
- [17] HOU Y F, JIA X. Usage of iron mine tailing sand on concrete[C]//International Conference on Structures and Building Materials. Switzerland: Trans Tech Publications, 2013: 1856–1859.
- [18] MA L J, ZHANG L, ZHANG J Y. The research on concrete mix design of tailings sand and gravel[J]. Advanced Materials Research, 2012, 468/471: 1308–1312.
- [19] SIMONSEN A M T, SOLISMAA S, HANSEN H K, et al. Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics[J]. Waste Management, 2020, 102: 710–721.
- [20] ZHANG T, WANG L, ZHANG Y. The environmental study on utilization of casting waste sand and iron tailing sand as road base materials[J]. Ekoloji, 2018, 27(106): 1615–1624.
- [21] 徐文彬, 田喜春, 侯运炳, 等. 全尾砂固结体固结过程孔隙与强度特性实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 272–279.
- XU Wen-bin, TIAN Xi-chun, HOU Yun-bing, et al. Experimental study on the pore and strength properties of cemented unclassified during the consolidation process[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(2): 272–279.
- [22] 刘迪, 卢才武, 连民杰, 等. 基于粒径效应影响的尾矿毛细特性试验[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(11): 2746–2757.
- LIU Di, LU Cai-wu, LIAN Min-jie, et al. Experiment on tailings capillary characteristics based on particle size effect[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(11): 2746–2757.
- [23] 诸利一, 杨鹏, 吕文生, 等. 不同化学条件下孔隙比对尾矿砂渗透性影响试验[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(9): 2190–2200.
- ZHU Li-yi, YANG Peng, LÜ Wen-sheng, et al. Experimental on influence of pore ratio on tailings sand permeability under different chemical conditions[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(9): 2190–2200.
- [24] 吴爱祥, 周靓, 尹升华, 等. 全尾砂絮凝沉降的影响因素[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(2): 439–446.
- WU Ai-xiang, ZHOU Jing, YIN Sheng-hua, et al. Influence factors on flocculation sedimentation of unclassified tailings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(2): 439–446.
- [25] ALIREZA G, MAMADOU F. Strength evolution and deformation behaviour of cemented paste backfill at early ages: Effect of curing stress, filling strategy and drainage[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2016, 26(5): 809–817.

Damage mechanism of total tailings consolidation under action of dry-wet cycle

LUO Xiao-feng, HOU Yun-bing, YAN Hao-dong, SUN Xiang

(School of Energy and Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to explore the damage effect of the dry-wet cycle process on the mechanical properties of the whole tailings consolidation, the degradation of the uniaxial compressive strength of the total tailings consolidated by the dry-wet cycle was systematically studied, combined with mercury intrusion testing and scanning electron microscopy. Test methods, such as thermogravimetric test and other test methods, were used to analyze the damage mechanism of the whole tailings consolidation by the dry-wet cycle. The results show that the uniaxial compressive strength of the whole tailings consolidated body cured for 3 d under the action of the dry-wet cycle increases first and then decreases. At the beginning of the dry-wet cycle, more hydration products are generated in the consolidated body and the pores decrease. The overall structure is more compact, and the consolidated body is gradually destroyed as the dry-wet cycle continues. The strength of the consolidated body cured for 28 d gradually decreases with the increase of the number of dry-wet cycles. The higher the cement content, the lower the decrease. The internal pores of the specimens without the dry-wet cycle are less, and the hydration products are layered. Under the action of the dry-wet cycle, the connection between the hydration products is gradually broken, the porosity increases from 35.75% to 39.08%, and the proportion of macropores increases greatly. The dry-wet cycle causes the particles to expand and shrink, which leads to more pores in the consolidation body. The erosion of water and the generation of cracks lead to the increase of pores in the consolidation body and the formation of macropores, and the reduction of hydration products makes the interior structure of the consolidation body loose and broken, which is the main reason that causes the consolidated body damaged.

Key words: total tailings consolidation; dry-wet cycle; pores; hydration products; damage

Foundation item: Project(51674263) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2021-02-25; **Accepted date:** 2021-05-23

Corresponding author: HOU Yun-bing; Tel: +86-13051090099; E-mail: houyunbing2000@163.com

(编辑 李艳红)