

武山尾矿坝无纺土工织物滤层化学淤堵问题初探

A preliminary study on chemical clogging of nonwoven geotextile filter in Wushan tailings fill dam

孔丽丽 陈守义

(中科院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071)

文 摘 土工织物作为滤层在尾矿坝排渗设施中已得到广泛应用, 但有些尾矿坝遇到了土工织物淤堵问题。本文针对武山铜矿尾矿坝排渗系统中发生的土工织物淤堵问题, 通过一系列试验研究对无纺土工织物化学淤堵问题进行了初步探讨。研究结果表明氢氧化铁凝胶在织物纤维上的附着是化学淤堵的主要机理, 尾矿中含有充分多的细粒黄铁矿且滤层处于非饱和渗流带或饱和-非饱和和交替变化渗流带是土工织物发生严重化学淤堵的必要条件。

关键词 尾矿坝, 排渗设施, 无纺土工织物, 机械淤堵, 化学淤堵

中图法分类号 TV 641

作者简介 孔丽丽, 女, 1972 年生, 1999 年在中科院武汉岩土力学研究所获岩土工程专业硕士学位。

Kong Lili Chen Shouyi

(Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan, 430071)

Abstract Nonwoven geotextile as filter is widely used in the drainage installations of tailings fill dams. But clogging problem of geotextile has been found in some cases. In this paper, regarding the clogging problem happened in Wushan copper mine a preliminary study on chemical clogging of geotextile through a series of laboratory experiment have been performed. The results show that the adherence of ionic hydroxide gel to the fiber of geotextile is the main mechanism of chemical clogging and the essential condition of serious chemical clogging is that the filter is located in unsaturated or cyclic saturated-unsaturated seepage zone as well as enough of fine grained pyrite exist in tailings sand.

Key words tailings fill dam, drainage installation, nonwoven geotextile, mechanical clogging, chemical clogging

1 前 言

用土工织物作为滤层在岩土工程中已得到广泛应用, 近年来此项技术运用于尾矿坝排渗设施也很多, 但有些尾矿坝遇到了土工织物淤堵问题。土工织物淤堵可分为机械淤堵、化学淤堵和生物淤堵 3 类^[1]。目前国内外对土工织物机械淤堵问题已研究得比较成熟, 并建立了一定的试验规程, 设计中只需按一定的准则选择适当的土工织物型号, 就可以避免机械淤堵的发生。但目前对另外两种形式的淤堵问题还研究的很少, 甚至还缺乏比较清楚的认识。排渗设施出现淤堵后, 致使坝体浸润线升高甚至溢出, 对尾矿坝安全运行非常不利。所以, 此问题已引起尾矿坝设计和使用部门的重视。武山铜矿尾矿坝在堆积坝体的排渗设施中, 垂直反滤竖井及水平反滤盲沟均采用无纺土工织物包卵石的结构形式。此排渗系统投入使用后, 坝体有些部位浸润线仍很高, 坝面局部出现沼泽化现象, 且以靠近排渗盲沟出口处最为严重^[2]。本文旨在揭示土工织物滤层在武山铜矿尾矿坝运用工况下发生化学淤堵的条件, 阐明其发展机理。

2 研究方法与技术路线

本研究采用室内试验为主, 室内试验与现场调查研究相结合的方法, 在试验手段上采用宏观与微观相结合的方法。具体技术路线如图 1 所示。

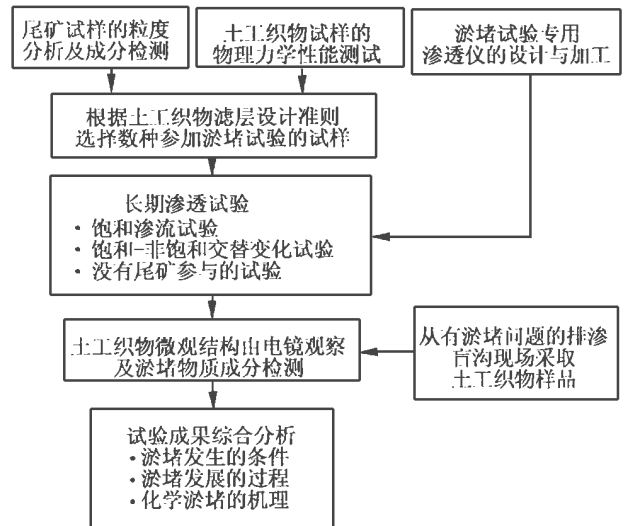


图 1 本研究采用的技术路线图

Fig. 1 Flow chart of technical route adopted in this study

表 1 试验用尾砂物性参数表

Table 1 Physical parameters for tailings sand sample

颗粒组成 / %					砂粒组		粉粒组		粘粒组		不均匀系数 η	
0.25 ~	0.1 ~	0.05 ~	0.01 ~	0.005 ~	d_{60}	d_{10}	$\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$		d_{15}	d_{85}	渗透系数	
0.1	0.05	0.01	0.005	0.002	/mm	/mm			/mm	/mm	相对密度	$k_s / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
51.7	31.1	13.6	1.0	2.6	0.115	0.029	3.97		0.044	0.17	3.34	$< 7 \times 10^{-4}$

表 2 试验用土工织物水力学特性指标

Table 2 Parameters of hydraulic characteristics for geotextile samples

水力学特性指标	产品型号		
	A ₁	A ₃	Y
等效孔径 O_{90} / mm	0.12	0.11	0.105
垂直渗透系数 / $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.103	0.086	0.21

注: A₁, A₃ 广东新会无纺布厂产品, Y 湖北应城防水材料厂产品。

表 3 试验用尾砂与织物机械淤堵判别结果

Table 3 Identification result of mechanical clogging

反滤 准则	仿砂砾料准则		渗透系数比准则
	保土准则	透水准则	
表达式	$O_{90} < d_{85}$	$O_{90} > d_{15}$	$k_g > 100k_s$
A ₁	$0.12 < 0.17$	$0.12 > 0.044$	$1.08 \times 10^{-1} > 100 \times 7 \times 10^{-4}$
A ₃	$0.11 < 0.17$	$0.11 > 0.044$	$8.2 \times 10^{-2} > 100 \times 7 \times 10^{-4}$
Y	$0.105 < 0.17$	$0.105 > 0.044$	$2.1 \times 10^{-1} > 100 \times 7 \times 10^{-4}$

图见图 2。仪器为长方形的箱体, 用有机玻璃材料制成。箱体被细尼龙网和土工织物隔成 3 段, 各段分别装水、尾砂和砾石。4 根测压管分布如图。试验用尾砂为从武山铜矿尾矿坝现场所取代表性样品, 物性参数见表 1。用 X-衍射谱分析尾砂的矿物成分主要

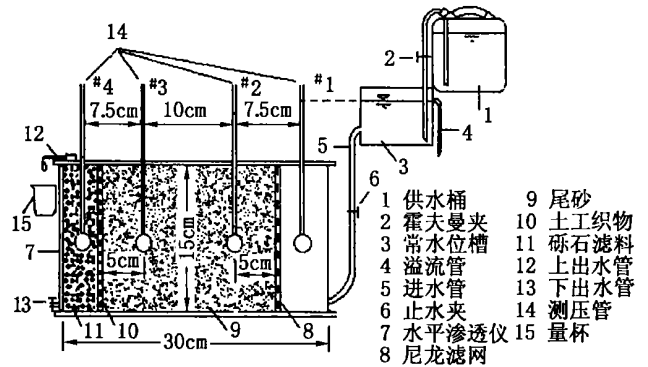


图 2 试验用水平渗透仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the horizontal permeameter used in the experiments

3 长期渗透试验

3.1 仪器设备及试验材料

在本项研究中, 设计了一批大型水平渗透仪, 示意

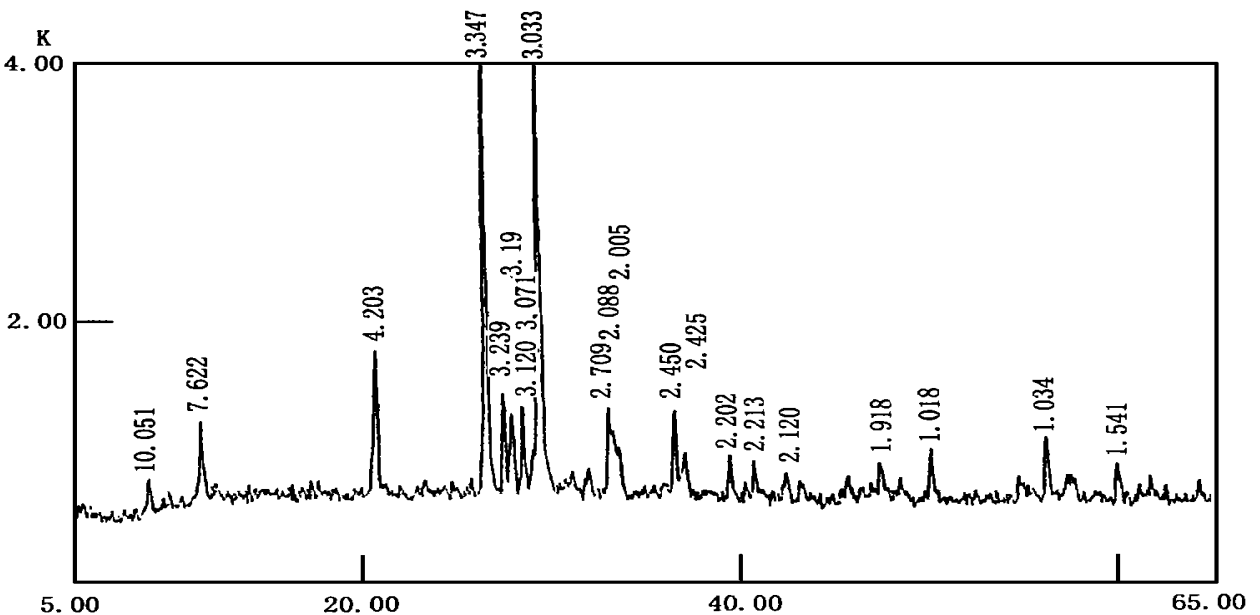


图 3 试验用尾砂的 X-衍射谱

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of tailings sand sample

有:石英、方解石、云母、石膏、钾长石、钠长石、黄铁矿等,其X-衍射谱见图3。试验用3种织物的水力学特性指标见表2。因本项目旨在研究化学淤堵问题,所以在试验设计中首先排除发生严重机械淤堵的可能性。判别结果见表3,可以看出,3种织物均不会发生严重的机械淤堵。试验用水为人工制备的饱和CaSO₄溶液,与尾矿库水的主要成份接近。

3.2 试验方法

用3种不同型号的土工织物作对比试验,以观察织物的类型对淤堵程度的影响。并对每种织物作两种不同渗透条件下的对比试验,即饱和渗流条件及饱和与非饱和交替变化的渗流条件(以下简称交替变化渗流条件)。饱和渗流条件的控制:关闭下出水口,渗透水从上出水口流出使尾砂处于饱和渗流状态。交替变化渗流条件的控制:交替改变渗透水的流出部位,以使尾砂交替处于饱和与非饱和状态,交替循环周期多为一个星期,在每次饱和渗流相对稳定时测定测压管的读数和流量。在所有的试验中,装填尾砂的控制干密度为 $1.86 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$ 。

另外,还做了没有尾砂参与的试验,即不装尾砂,其余试验条件不变,用以研究单是尾矿水对织物的淤堵有何影响。

试验前测定试验用织物厚度、质量,试验过程中测量测压管水位、渗透流量、水温,试验后使织物风干后再称重。

3.3 成果整理

(1)通过试验过程中测量的测压管的读数、渗透流量及水温等,计算尾砂的渗透系数 k_s 及尾砂与织物系统(以下简称系统)的渗透系数 k_{sg} 。因土工织物与相邻的土层是一个整体,应联系在一起加以研究,往往透水能力失之于土工织物,却得之于土层中,单看织物本身透水性的变化显然是不够全面的^[3],因此本文未对单纯织物的渗透系数作计算。 k_s 及 k_{sg} 计算公式为

$$k_s = \frac{Q}{t \cdot A \cdot \gamma} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot l_{23}}{t \cdot A \cdot (h_2 - h_3)}$$

$$k_{sg} = \frac{Q}{t \cdot A \cdot \gamma} = \frac{Q \cdot \gamma \cdot (L + \delta)}{t \cdot A \cdot (h_1 - h_4)}$$

式中 Q 为 t 时间段内的渗透水量(cm^3); A 为过水断面的面积(cm^2); γ 为温度校正系数; h_1, h_2, h_3, h_4 分别为测压管1, 2, 3, 4对应的水位(cm); l_{23} 为测压管2, 3之间的渗透距离(cm); L 为沿渗流方向的尾砂总长度(cm); δ 为土工织物的厚度(cm)。

(2)绘制渗透系数随时间变化曲线。

(3)根据试验前后织物质量的变化,计算各种试验条件下单位体积淤堵物质量。

3.4 试验成果分析

(1) $k-t$ 曲线分析

饱和渗流条件下,3种织物的 $k-t$ 曲线变化总趋势都很相似,首先 k 有一明显的减小阶段,之后转为缓慢减小,最后 k 基本稳定。交替变化渗流条件下,3种织物的 $k-t$ 变化趋势与饱和渗流条件下很相似,但 k 值比饱和渗流条件下有所降低,说明织物除发生机械淤堵外还发生了化学淤堵。其中, A_1 型织物 $k-t$ 曲线饱和与交替变化渗流条件下 k_s 与 k_{sg} 对比曲线分别见图4, 5。

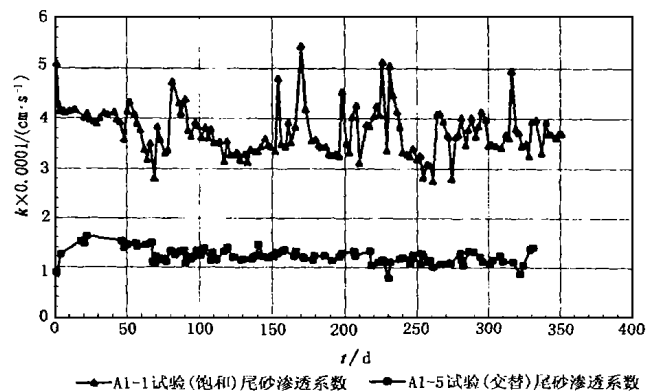


图4 A_1 型织物两种渗流条件下尾砂的渗透系数 k_s 随时间 t 变化曲线对比

Fig. 4 Comparison of k_s-t curves for type A_1 geotextile in two different kinds of long-term seepage tests

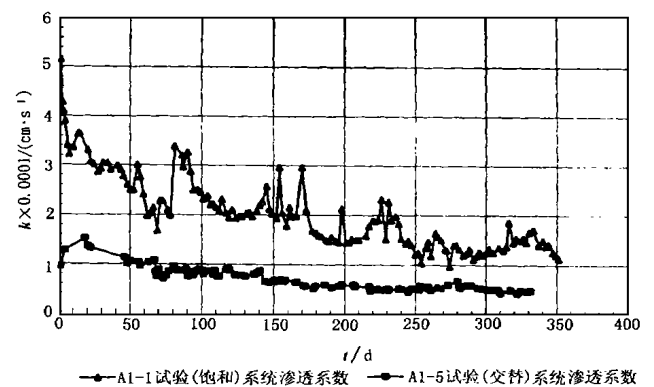


图5 A_1 型织物两种渗流条件下系统的渗透系数 k_{sg} 随时间 t 变化曲线对比

Fig. 5 Comparison of $k_{sg}-t$ curves for type A_1 geotextile in two different kinds of long-term seepage tests

(2)土工织物单位体积淤堵量分析

各种试验条件下织物单位体积淤堵量见表4。没有尾砂参与的试验是为了分析淤堵机理而设计的“空白”对比试验。由表4可见,无尾砂参与时,交替变化

渗流条件下淤堵量为饱和渗流条件下的 2~10 倍,可知织物发生了轻微的化学淤堵,因渗透用水为 CaSO₄ 饱和溶液,故淤堵物应为石膏。

尾砂参与的试验中织物淤堵量都远大于无尾砂参与的试验,说明尾砂的成分对织物淤堵起了决定性作用,且交替变化渗流条件下淤堵量为饱和渗流条件下的 3~7 倍,说明化学淤堵在淤堵过程中起了主要作用。

表 4 各种试验条件下试验结束时织物单位体积淤堵量对比表
Table 4 Comparison of clogging capacity of unit volume of geotextile at the end of different experiments

试 验 条 件	试 验 编 号	单 位 体 积 淤 堵 量 /(g·cm ⁻³)	平 均 /(g·cm ⁻³)
有尾砂参与	A ₁₋₁	0.0918	0.10
	A ₁₋₂	0.0891	
	A ₃₋₁	0.1601	
	A ₃₋₂	0.0942	
	Y ₋₁	0.1044	
	Y ₋₂	0.0608	
饱和与非饱和交替变化渗流	A ₁₋₅	0.684	0.67
	A ₁₋₆	0.753	
	A ₃₋₅	0.885	
	A ₃₋₆	0.581	
	Y ₋₅	0.473	
	Y ₋₆	0.642	
无尾砂参与	A ₁₋₃	0.0020	0.0021
	A ₁₋₄	0.0018	
	A ₃₋₃	0.0008	
	A ₃₋₄	0.0024	
	Y ₋₃	0.0031	
	Y ₋₄	0.0025	
饱和与非饱和交替变化渗流	A ₁₋₇	0.0096	0.0073
	A ₁₋₈	0.0069	
	A ₃₋₇	0.0082	
	A ₃₋₈	0.0066	
	Y ₋₇	0.0071	
	Y ₋₈	0.0055	

4 微观结构的电镜观察及淤堵物质成分检测

为进一步研究土工织物的化学淤堵机理,用电子探针显微照像观察织物中淤堵物的形态,并根据电子探针能谱图定性地分析淤堵物的化学成分。

4.1 微观结构的电镜观察

未进行过试验的织物纤维光滑,纤维间无杂物(见图 6(a))。织物经饱和渗流试验后,纤维上有少量的附着物,纤维间有粒状、块状物质充填(见图 6(b))。交替变化渗流试验后,纤维上有大量附着物,纤维间的

充填物也明显多于经过饱和渗流试验的织物(见图 6(c))。由此可知,交替变化渗流条件下的织物淤堵程度明显比饱和渗流条件下织物的淤堵严重,这与两种渗流条件下系统渗透系数对比结果以及单位体积淤堵物质量对比结果相符合。

4.2 淤堵物成分的检测

用电子探针能谱图对土工织物淤堵物质成分进行定性分析,见表 5。

表 5 土工织物淤堵物质主要成分

Table 5 Main components of clogging material in geotextile

饱和渗流条件	交替变化渗流条件
石英、长石、黄铁矿等 (其能谱图见图 7)	Fe(OH) ₃ 胶体、石英、石膏、黄铁矿等 (其能谱图见图 8)

其中石英、长石、黄铁矿为试验用尾砂的成分,可知饱和渗流条件下织物发生的是机械淤堵。而在交替变化渗流条件下,织物淤堵物质还有 Fe(OH)₃ 胶体及石膏,说明织物除了发生机械淤堵外,还发生了化学淤堵。

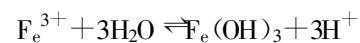
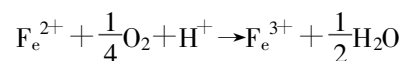
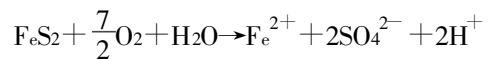
另外在武山铜矿尾矿坝排渗盲沟出口处,对发生淤堵的织物取样进行了同样的检测,结果相似,说明本试验设计基本能够模拟现场织物淤堵过程。

5 土工织物淤堵机理的初步探讨

5.1 两种独立的变化过程共同参与化学淤堵的形成和发展

由以上研究可知,在交替变化试验条件下,无论哪种无纺土工织物,均会发生较明显的化学淤堵现象,经初步分析认为土工织物化学淤堵机理主要有两种独立的反应和变化过程。

第 1 种过程 氧化亚铁硫杆菌能使尾砂中的黄铁矿与水及氧发生一系列的化学反应^[4],反应式如下:



在饱和渗流条件下,生成的 Fe(OH)₃ 以溶胶的形式,随渗流水穿过尾砂粒间孔隙,运移到土工织物处,继续往前运动完全可以穿过土工织物,所以不产生化学淤堵。但在非饱和渗流条件下,一方面氧化反应加快了 Fe(OH)₃ 的生成速度;另一方面 Fe(OH)₃ 脱水时由溶胶转化为凝胶,并粘附在土工织物的纤维上,所以在饱和与非饱和交替变化条件下,粘附在织物上的 Fe(OH)₃ 凝胶不断积累,造成化学淤堵。



(a) 未使用
before testing

(b) 经饱和和渗流试验后
after long-term saturated seepage test

(c) 经交替变化渗流试验后
after long-term saturated-unsaturated cyclic seepage test

图6 土工织物显微形态

Fig. 6 Microscopic pattern of clogging material in geotextile

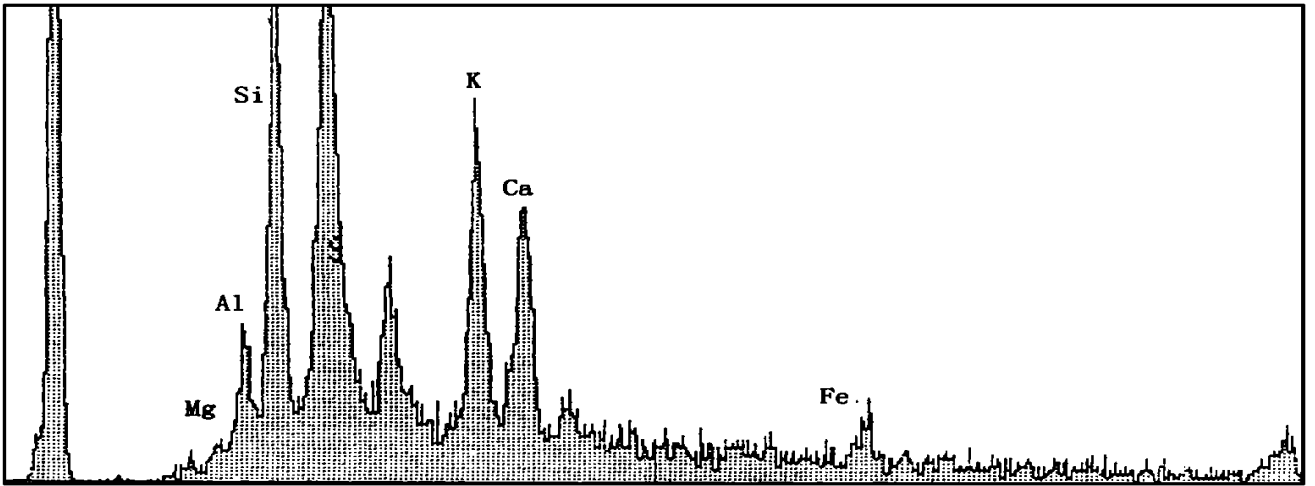


图7 经饱和和渗流试验后的织物淤堵物电子探针能谱图

Fig. 7 Energy spectrum of electron probe of clogging material in geotextile after long-term saturated seepage test

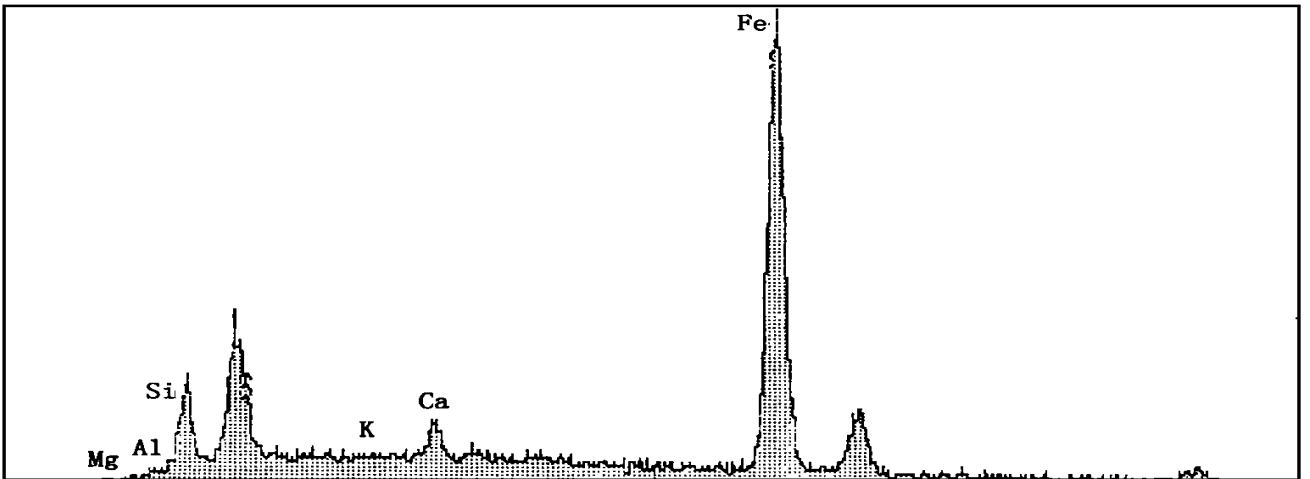


图8 经交替变化渗流试验后的织物淤堵物电子探针能谱图

Fig. 8 Energy spectrum of electron probe of clogging material in geotextile after long-term alternate seepage test

第2种过程 渗透用水原为饱和 CaSO_4 溶液, 非饱和和渗流情况下水分的蒸发导致 CaSO_4 结晶的析出, 停积并生长在土工织物纤维之间, 在反复的饱和和非饱和循环过程中, 结晶堵塞物的生长点不断增加, 结晶也不断增大, 这种淤堵过程在没有尾砂参与的渗透试验中有明显的体现。试验结果表明石膏结晶的阻塞作用还不足以造成明显的化学淤堵。这就说明化学淤堵的第1种过程, 即 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 凝胶在织物纤维上的附着在化学淤堵中起主导作用。

5.2 溶失作用对机械淤堵过程的影响

饱和渗流条件下土工织物淤堵属于机械淤堵, 但其发展过程与一般工况下发生的情况有所不同。由前述 $k-t$ 曲线知本项目研究中, 系统的渗透系数并不象一些文献报导的那样, 能在几十天内逐渐达到稳定, 而是经历了一个约在前 50~70 d 明显降低, 在其后直到 200 d 内继续缓慢降低, 然后才趋于稳定的过程。初步分析后认为是黄铁矿溶失对机械淤堵的后期持续发展起了促进作用。这里所说的“溶失”作用, 即是指在含氧的渗流水长期作用下, 某些细菌使尾矿中一部分黄铁矿发生氧化和溶解, 最后以 Fe^{2+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} , H^+ 离子及氢氧化铁溶胶形式从尾砂中流失的复杂过程。不难预料, 如果有数量相当可观的黄铁矿被溶失, 必然会影响到尾砂颗粒间接触和排列的稳定性。因此黄铁矿溶失的过程将伴随着部分尾砂颗粒接触和排列位置的调整, 且有一部分细粒尾砂会迁移并充填到较大的孔隙中去。这种机理可以合理地解释在试验过程中为什么会出现尾砂渗透系数持续降低以及土工织物机械淤堵长期持续发展的现象。

本研究使用的尾砂在试验前的相对密度为 3.34, 已知黄铁矿 (FeS_2) 的相对密度约为 5.06, 尾砂中其它主要矿物成分的相对密度约为 2.65。由此可估算出黄铁矿的含量约占 28.6%。即使只有百分之几的黄铁矿被溶失, 也会对整个试验过程产生重大的影响, 包括对尾砂自身机械淤堵和土工织物机械淤堵都产生重要的促进作用。对 3 个试验后的尾砂试样进行比重检测, 其相对密度平均值为 3.28, 由此推算黄铁矿总含量中已有 8.76% 被溶失, 约占尾砂总量的 2.5%。

通过以上分析, 我们得到了一个重要的认识, 在饱和和渗流条件下, 虽然不存在直接的化学淤堵问题, 但黄铁矿的溶失可能影响机械淤堵的发展过程并加剧机械

淤堵的严重程度。

6 结 论

(1) 在持续的饱和和渗流试验条件下, 无论哪种无纺土工织物均不会发生化学淤堵现象。但尾砂中细粒黄铁矿的溶失会影响机械淤堵发展过程, 并加剧机械淤堵的严重程度。

(2) 在饱和与非饱和交替变化条件下无论哪一种无纺土工织物均会发生比较明显的化学淤堵现象, 在本文试验条件下, 土工织物的单位体积淤堵物质量达 $0.473 \sim 0.885 \text{ g/cm}^3$ 。其中化学淤堵物质占绝大多数。

(3) 扫描电镜观察结果表明, 化学淤堵物质有两种形态, 一种是非结晶的粒状、短絮状物质, 比较均匀而分散地粘附在织物纤维上, 也有的呈包膜状附着在纤维上; 另一种是晶体物质比较集中地阻塞在土工织物纤维之间的空隙之中。此检测结果与在现场已发生淤堵地段所取土工织物样品的检测结果基本一致。

(4) 用电子探针能谱图对淤堵物的成分进行了检测, 表明晶质淤堵物的成分主要为石膏, 其次为黄铁矿、石英等, 非晶质的粒状、短絮状物质成分主要是 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 凝胶。

(5) 滤层发生化学淤堵必须具备两个必要条件: 一是尾砂中须含有足够数量的细粒黄铁矿, 二是滤层所处部位为非饱和渗流带或是饱和与非饱和交替变化渗流带。

本文是江西铜业公司委托科研项目的一部分研究成果。武汉岩土力学所陈碧君、赵凌参加了部分试验工作。武山铜矿张可凤、胡建国协助进行现场取样。微观测试工作得到中国地质大学武汉测试中心的大力协助, 在此谨向上述单位和个人表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 1 南京水利科学研究所. 土工合成材料测试手册. 北京: 水利电力出版社, 1991
- 2 中科院武汉岩土力学研究所. 武山铜矿尾矿坝稳定性评价与综合治理对策研究报告, 1994
- 3 陆士强, 王钊, 刘祖德. 土工合成材料应用原理. 北京: 水利电力出版, 1994
- 4 徐振盛, 李孟谚编著. 环境微生物学. 台北: 淑馨出版社, 1995