

周期性浸泡下三峡库区松散土体微观特性分析

何晓英, 唐红梅, 陈洪凯, 刘虎队

(重庆交通大学 河海学院 岩土与地质工程系, 重庆 400074)

摘要: 三峡库区水位上升至 175 m 之后引发了新的地质灾害, 尤其是引起了已发地质灾害的复发。已有研究未考虑周期性浸泡对三峡库区土体性质的影响。采取三峡库区典型松散土体, 运用多晶 X 射线衍射仪对所采取的岩土样在天然状态、长期性浸泡状态、周期性浸泡状态试验工况下的物相进行定性、定量分析的物相变化, 得出库区水位升降引起的周期性浸泡作用是导致土体结构和强度劣化的重要因素。

关键词: 矿物成分测试; 周期性浸泡; X-衍射光谱; 松散土体; 三峡库区

中图分类号: TU 45

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)03-0445-05

Macroscopic Characteristics of Loose Earth in Cyclic Soak at Three Gorges Reservoir Area

HE Xiao-ying TANG Hong-mei CHEN Hong-kai LU Hu-dui

(Department of Geological & Geotechnical Engineering School of River & Ocean Engineering

Chongqing Jiaotong University Chongqing 400074 China)

Abstract As the water level of Three Gorges Reservoir has risen up to 175m, it has already caused plenty of geologic disasters, especially caused some occurred disasters to recur. The current researches in this field don't take the influence of cyclical soak on Three Gorges Reservoir's earth into consideration. So the typical loose earth of Three Gorges Reservoir area is adopted, and the earth samples are investigated through a series of tests which are carried out under the condition of natural state, long-term soak state and cyclical soak state. Phase's qualitative analysis and quantitative analysis on these earth samples are carried out by polycrystal X-ray diffractometer. Through comparing phase's analysis, the conclusion that the cyclic soak caused by the fluctuation of the water level at reservoir area is an important factor to cause the deterioration of earth structure and intensity is confirmed.

Key words mineral composition test; cyclic soak; X-diffractive spectrum; loose earth; Three Gorges Reservoir area

三峡库区是三峡工程重要部分之一, 水位一年一度变化于 145~175 m 之间, 变幅达 30 m, 库水位变动带岩土体处于周期性浸泡状态; 库区移民工程建设, 产生了大量松散土体, 受到库区降雨浸润; 土体在水体的周期性浸泡作用下, 黏土矿物物理力学特性必然发生劣化, 导致土体力学参数变化, 给土体边坡(岸坡)的稳定性带来严重的地质安全隐患^[1-2]。

目前对影响三峡库区的安全因素做了大量的研究, 包括地形地貌、地质条件、降雨、地下水、水库蓄水、人类工程活动、水位涨落对库区滑坡孔隙水压力的影响、以及长期浸泡对土质的软化作用等^[3-9]。取得的卓越成就概括起来, 主要有以下几方面:

1) 三峡库区碎石土在长期浸泡作用下的稳定

性影响^[10];

2) 库水位升降条件对边坡失稳研究^[11];

3) 水位涨落对库岸滑坡孔隙水压力影响^[12]。

但是目前鲜有采用 X 射线衍射技术分析三峡库区土体在周期性浸泡作用下的微观特性。笔者以三峡库区典型松散土体为研究对象, 采用多晶 X 射线衍射技术, 模拟土体的各种浸泡状态, 进行物相分析, 揭示库区水位升降引起的周期性浸泡作用是导致土体结构和强度劣化的重要因素。

1 试验设计和方法

1.1 试验原理

X 射线衍射技术, 是利用 X 射线在晶体、非晶体中衍射与散射效应, 进行物相的定性和定量分析、结构类型和不完整分析的技术。自 1895 年威廉·

收稿日期: 2009-07-11 修订日期: 2010-02-05

项目基金: 国家自然科学基金项目(50678182); 重庆市重点自然科学基金项目(2008BA0015)

作者简介: 何晓英(1987-), 女, 新疆阿勒泰人, 硕士研究生, 从事岩土工程研究。E-mail: diyuexianxue@126.com

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

伦琴发现 X 射线之后不断发展,目前是应用最广泛的一项技术^[13]。

试验获得的晶体的 X 射线衍射图谱是对晶体微观结构精细的形象变换,每种晶体结构与其 X 射线衍射图之间有着——对应的关系,任何一种晶态物质都有自己独特的 X 射线衍射图,而且不会因为与其它物质混合在一起而发生变化,即 X 射线衍射法进行物相分析的依据。

1.2 试验设备

试验采用的是粉晶 X 射线衍射仪,是利用辐射探测器自动测量和记录衍射线的仪器。该衍射仪的主要性能参数如下:

靶: Cu 靶, 36 kV, 20 mA, 石墨弯晶单色器;

狭缝: 发散, 决定于扫描始角, 防散射, 接收: 常用 0.3 mm ;

扫描范围: $5\sim 65^\circ$;

采数步宽: 0.01° ;

扫描方式: 连续;

扫描速度: $8^\circ/\text{min}$;

满足规定要求。

1.3 样品采集

试验所研究的区域是三峡库区重庆段,属于巴东组泥岩。采取的土样包括:巫山宁江岛填土、巫山城区土体、杭州—兰州线高速路奉节—巫山段紫红色泥岩、杭州—兰州线高速路奉节—巫山段青灰色泥岩、重庆交通大学泥岩、重庆江津四面山水竹坝土体,共 6 组岩土样,这 6 组岩土样均位于巴东地组云阳—巫山段。

三叠系中统巴东组的紫红色泥岩,在库区常被称为“易滑地层”。这种岩土体还具有一定膨胀性,致使一些边坡防护工程发生变形破坏。根据殷跃平等的研究表明:该地层黏土矿物含量一般为 17.9% 左右,其中,有效蒙脱石含量一般在 $1.27\%\sim 6.01\%$ 之间,混层矿物占黏土矿物的一半以上,具中强胶结,有弱膨胀性^[14]。

1.4 试验模型

为了得到较明显的结果,分 3 种工况做试验,并将 3 种实验结果进行对比得到最后结果。

1.4.1 天然状态

将采集的样品在玛瑙研钵中研磨成 $1\sim 5\text{ }\mu\text{m}$,定量相分析约在 $0.1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ 达到用手搓无颗粒感即可。制样,放入粉晶 X 射线衍射仪进行扫描,之后运用 Jade5 分析软件进行物相分析。

1.4.2 长期浸泡状态

将适量土样倒入 300 mL 的烧杯,用蒸馏水浸泡,以 3 d 为一周期,吸取浸泡土样表层悬浊液,烘

干,制样,扫描,物相分析。

1.4.3 周期浸泡状态

以 3 d 为一周期,浸泡 2 d 将表面蒸馏水用吸管吸干,自然风干 1 d 再制样,扫描,进行物相分析。

其中长期浸泡与周期浸泡工况以 3 d 为一周期,一共进行 45 d 15 个周期,一共 180 组试验。

1.5 试验过程

样品制备:将样品放入衍射仪中→开仪器和水箱→开启衍射仪控制操作系统→扫描样品得衍射谱图→存储数据→物相分析。

2 试验结果分析

通过对衍射仪扫描结果的图谱平滑、背底扣除、衍射强度 I 的测量等初步处理,开始对衍射结果进行物相分析。

2.1 物相定性分析

由于采取的样品是泥岩和黏土,均为泥质岩,它的主要成分是黏土矿物、陆源碎屑矿物和自生矿物。

陆源碎屑物主要指长石类矿物、石英类矿物及云母类矿物。

一般的黏土矿物常见的有高岭石、水云母、蒙脱石、伊利石、绿泥石等。

自生矿物则多种多样,常见的有铁、锰、铝的氧化物和氢氧化物(赤铁矿、褐铁矿、软锰矿等)、碳酸盐(方解石、白云石、菱铁矿)、硫酸盐(石膏、硬石膏、重晶石等)、硅质矿物(蛋白石、玉髓、自生石英)、硫化物(黄铁矿、白铁矿)以及磷灰石、石盐、海绿石等。

除此之外,泥质岩中还含有数量不等的有机质,主要是炭质、沥青质及动植物遗体等^[15-16]。

取天然状态下巫山宁江岛填土的物相分析过程为例,各样品在各试验工况下均是如此进行物相定性分析。

粉晶 X 射线衍射仪对样品进行扫描之后,得到未经分析的粗略图谱。经过 Jade5 分析软件在 PDF 卡片库对衍射谱图进行衍射图的平滑去底之后,根据衍射角的大小和衍射波峰的位置,结合当地矿产资源及研究人员的经验,分析得到的谱图如图 1。

物相检索之后,分析得到该区黄色填土含有的主要矿物为:

陆源碎屑矿物:石英、方解石(与白云石共生)和少量云母类矿物;

黏土矿物:少量蒙脱石和伊利石;此外含有少量硫铝矿(Corundum);

含有的金属元素及微量元素为:铜、铁、砷、锌、锂、铅、银等。

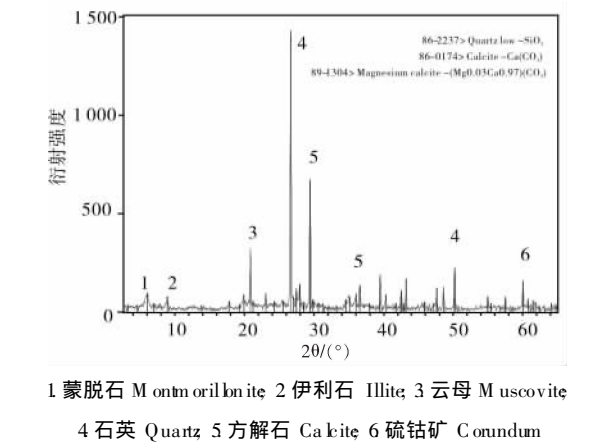


图 1 巫山宁江岛填土天然状态下衍射谱图

Fig 1 Diffraction spectral illustration of filling in Wushan Ningjiang Island under the native state

经过分析,得到 6 组岩土样在天然状态、长期浸泡状态、周期浸泡状态 3 种试验工况下的物相定性分析结果。

其中衍射谱图中的特征峰主要是陆源碎屑物如石英、云母、方解石等,黏土矿物衍射强度较低。此外,不同的样品还含有不同的自生矿物。

各样品在不同试验工况下的矿物组成如表 1。

表 1 各样品组成矿物
Tab 1 Minerals composition of each sample

| 组成矿物 | 主要矿物 | 次要矿物 | 其他矿物 |
|----------------------|------|------|-----------------------------------|
| 巫山宁江岛填土 | 天然状态 | 石英 | 云母、方解石 伊利石、蒙脱石 |
| | 长期浸泡 | 石英 | 云母、方解石 伊利石、蒙脱石、陨氮钛石、尖晶石、赤铜矿、锰钙辉石 |
| | 周期浸泡 | 石英 | 云母、方解石 蒙脱石、伊利石、尖晶石、陨氮钛石、斜方锰矿、绿泥石、 |
| 巫山龙湖湾后山土体 | 天然状态 | 方解石 | 石英、云母 高岭石、伊利石、绿泥石 |
| | 长期浸泡 | 方解石 | 石英、云母 高岭石、伊利石、绿泥石、陨氮钛石、 |
| | 周期浸泡 | 方解石 | 云母 — |
| 巫奉高速 K52+700~870 段泥岩 | 天然状态 | 石英 | 白云石 斜绿泥石、钛尖晶石 |
| | 长期浸泡 | 石英 | 云母 陨氮钛石、斜绿泥石、伊利石、高岭石、赤铁矿、赤铜矿 |
| | 周期浸泡 | 石英 | 云母 斜绿泥石、伊利石、尖晶石、赤铜矿、符山石、蛭石 |
| 巫奉高速 K52+470~680 段泥岩 | 天然状态 | 白云石 | 石英、云母 绿泥石、蒙脱石、铁白云石 |
| | 长期浸泡 | 白云石 | 石英、云母 斜钠锆石、伊利石、绿锥石、铁白云石 |
| | 周期浸泡 | 白云石 | 石英、云母 绿泥石、蒙脱石、铁白云石、斜钠锆石、 |

| (续表 1) | | | |
|-----------|------|------|-------------------------------|
| 组成矿物 | 主要矿物 | 次要矿物 | 其他矿物 |
| 重庆交通大学泥岩 | 天然状态 | 钙长石 | 石英 蒙脱石、伊利石、交沸石 |
| | 长期浸泡 | 石英 | 钠长石 陨氮钛石、绿泥石、蒙脱石、硅锆铁矿、锰铁尖晶石、 |
| | 周期浸泡 | 石英 | 长石、云母 陨氮钛石、绿泥石、蒙脱石、硅锆铁矿、锰铁尖晶石 |
| 江津四面山水坝土体 | 天然状态 | 石英 | 钠长石 绿泥石、伊利石、方解石 |
| | 长期浸泡 | 石英 | 云母 钠长石、绿泥石、绿锥石、陨氮钛石、堇青石、刚玉、 |
| | 周期浸泡 | 石英 | 云母 钠长石、绿泥石、绿锥石、陨氮钛石、堇青石、方解石 |

2 2 定量分析

本次试验采用内标法进行计算。

分析一个已知含有 n 个物相的多相样品时, 如果各组成物相均有一衍射线与其比强度能够被测定, 且在该样品中这些衍射线的强度分别为 $I_1, I_3, I_3, \dots, I_6, \dots, I_n$, 共 n 个强度数据, 可以得到其中任一相 i 的重量分数 X_i 的表达式即内标方程:

$$X_i = \frac{I_i K_i}{\sum_{j=1}^n I_j K_j}$$

(1)

式中: I_i 为各衍射峰强度, 其值可从经物相分析后的卡片库里读出; K_i 为各物相的最强线对于刚玉的最强线的比强度, 即所谓的“参考比强度 (R/R)”, 其值可从物相分析后的卡片库里读出。

运用该计算方法, 可以得到不同试验工况下各样品组成物质的百分含量。

各样品中百分含量占主导地位的仍旧是陆源碎屑物如石英、方解石等, 黏土矿物含量较少, 为 1% ~ 10% 不等。

得天然状态下各土样物相定量分析结果如表 2。

表 2 天然状态下各土样物相定量分析结果 (按衍射角大小排列)
Tab 2 Phase's quantitative analysis results of each sample under native state (arranging according to the diffraction angle)

| 土样 | 物质 | 衍射强度 | 含量 % |
|-----------|-----|-------|--------|
| 巫山宁江岛填土 | 蒙脱石 | 76 | 4. 75 |
| | 伊利石 | 66 | 9. 07 |
| | 云母 | 227 | 34. 66 |
| | 石英 | 1 638 | 35. 84 |
| | 方解石 | 653 | 15. 69 |
| 巫山龙湖湾后山土体 | 绿泥石 | 53 | 2. 81 |
| | 伊利石 | 84 | 15. 49 |
| | 高岭石 | 33 | 2. 9 |
| | 石英 | 665 | 15. 92 |
| | 方解石 | 1 839 | 59. 28 |

(续表 2)

| 土样 | 物质 | 衍射强度 | 含量 % |
|---------------------------------|-------|------|-------|
| 巫奉高速 K 52 + 700 ~ 870 段泥岩 | 斜绿泥石 | 65 | 4.29 |
| | 云母 | 56 | 14.28 |
| | 石英 | 1420 | 51.91 |
| | 钛尖晶石 | 73 | 1.79 |
| | 多硅白云石 | 87 | 27.74 |
| 巫奉高速 K 52 + 470 ~ 680 段泥岩 | 绿泥石 | 26 | 1.86 |
| | 云母 | 43 | 11.87 |
| | 铁白云石 | 54 | 2.16 |
| | 石英 | 387 | 15.31 |
| | 白云石 | 1368 | 67.44 |
| 重庆交通 大学泥岩 | 蒙脱石 | 12 | 1.36 |
| | 蒙脱石 | 92 | 4.41 |
| | 伊利石 | 49 | 5.17 |
| | 石英 | 1977 | 33.20 |
| | 钠长石 | 429 | 55.18 |
| 江津四面山 水竹坝土体 | 交沸石 | 41 | 2.04 |
| | 绿泥石 | 47 | 3.11 |
| | 伊利石 | 53 | 12.21 |
| | 石英 | 1375 | 50.42 |
| | 钠长石 | 160 | 1.36 |
| | 方解石 | 136 | 5.48 |

2.3 对比结果分析

在长期浸泡作用下,各样品的 X 衍射谱图中各物质的衍射峰强度较天然状态普遍有所降低,有的矿物消失,也有新的矿物生成。

在周期浸泡作用下,各样品 X 衍射谱图中各物质的衍射强度较长期浸泡作用下再次降低,表明在周期浸泡作用下,样品的内部结构没有在长期浸泡作用下完整,结晶度与晶形也有所劣化。长期浸泡 45 d 与周期浸泡 45 d 后物相定量分析结果如表 3 各土样矿物成分百分比对比见图 2。

表 3 长期浸泡及周期浸泡状态下各土样物相定量分析结果
Tab 3 Phase's quantitative analysis results of each sample under long-term soak state and cyclical soak state

| 土样 | 长期浸泡 45 d | | 周期浸泡 45 d | |
|-------------------|-----------|-------|-----------|-------|
| | 物质 | 含量 % | 物质 | 含量 % |
| 巫山 宁江岛 填土 | 石英 | 51.40 | 石英 | 41.92 |
| | 云母 | 30.82 | 云母 | 29.74 |
| | 碲碲铅矿 | 8.17 | 方解石 | 18.98 |
| | 绿泥石 | 5.39 | 绿泥石 | 5.24 |
| | 陨氮钛石 | 2.71 | 陨氮钛石 | 2.70 |
| | 赤铜矿 | 1.51 | 锰铁尖晶石 | 1.42 |
| 巫山 龙湖湾 后山土体 | 方解石 | 56.04 | 方解石 | 71.99 |
| | 石英 | 21.86 | | |
| | 云母 | 17.33 | 云母 | 28.01 |
| | 绿泥石 | 2.69 | | |
| | 尖晶石 | 1.26 | | |
| | 赤铜矿 | 0.82 | | |

(续表 3)

| 土样 | 长期浸泡 45 d | | 周期浸泡 45 d | |
|---------------------------------|-----------|-------|-----------|-------|
| | 物质 | 含量 % | 物质 | 含量 % |
| 巫奉高速 K 52 + 700 ~ 870 段泥岩 | 石英 | 49.46 | 石英 | 53.35 |
| | 云母 | 28.57 | 云母 | 24.89 |
| | 蓝晶石 | 20.47 | 斜绿泥石 | 16.93 |
| | 赤铜矿 | 1.88 | 陨氮钛石 | 3.35 |
| | 金红石 | 1.40 | 赤铜矿 | 1.48 |
| 巫奉高速 K 52 + 470 ~ 680 段泥岩 | 斜绿泥石 | 0.10 | | |
| | 白云石 | 80.16 | 白云石 | 63.97 |
| | 石英 | 7.48 | 云母 | 17.13 |
| | 云母 | 6.50 | 石英 | 11.93 |
| | 斜绿泥石 | 4.76 | 绿泥石 | 3.99 |
| 重庆交通 大学泥岩 | 铁白云石 | 1.10 | 铁白云石 | 2.99 |
| | 石英 | 39.17 | 钠长石 | 41.36 |
| | 钠长石 | 35.63 | 石英 | 36.48 |
| | 云母 | 18.87 | 云母 | 13.44 |
| | 绿泥石 | 2.89 | 蒙脱石 | 5.50 |
| 江津四面山 水竹坝土体 | 陨氮钛石 | 2.21 | 陨氮钛石 | 2.07 |
| | 赤铜矿 | 1.23 | 赤铜矿 | 1.15 |
| | 石英 | 46.66 | 石英 | 35.25 |
| | 云母 | 21.74 | 钠长石 | 20.43 |
| | 钠长石 | 16.45 | 云母 | 19.53 |
| | 方解石 | 6.54 | 堇青石 | 10.77 |
| | 绿泥石 | 3.99 | 斜绿泥石 | 9.48 |
| | 尖晶石 | 3.57 | 陨氮钛石 | 1.72 |
| | 赤铜矿 | 1.06 | 尖晶石 | 1.64 |
| | 赤铜矿 | 1.17 | | |

通过试验分析出各样品组成矿物在不同试验工况下百分含量的改变,可以得到:

1)周期浸泡作用下石英的百分含量较长期浸泡作用下更大,可表明在周期浸泡作用下土体受淋滤作用导致其他矿物被冲刷淋滤随水体冲走。由于石英是土体的主要组成部分,且其强度较高,可得,在周期浸泡作用下土体的强度反而在短时间有所提高。

举巫奉高速 K52+ 700~ 800段泥岩、巫奉高速 K52+ 470~ 680段泥岩石英百分含量对比为例,结果如图 2 图 3。

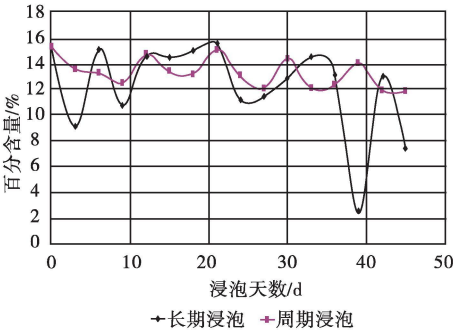


图 2 巫奉高速 K52+ 470~ 680 段泥岩石英含量对比图
Fig 2 Quartz content comparison of the Wufeng Highway K52+ 470~ 680 section

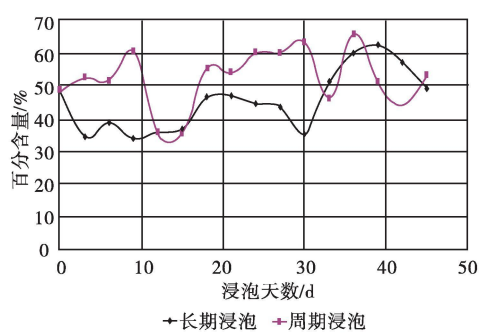


图 3 巫奉高速 K 52+ 700~ 800 段泥岩石英含量对比
Fig 3 Quartz content comparison of them udstone in W u r Feng Highway K 52+ 700~ 800 section

2) 周期浸泡作用下云母的百分含量较长期浸泡作用下普遍降低, 即云母在周期浸泡作用下受淋滤冲蚀作用其百分含量也降低了。以重庆交通大学泥岩云母百分含量对比为例, 结果如图 4

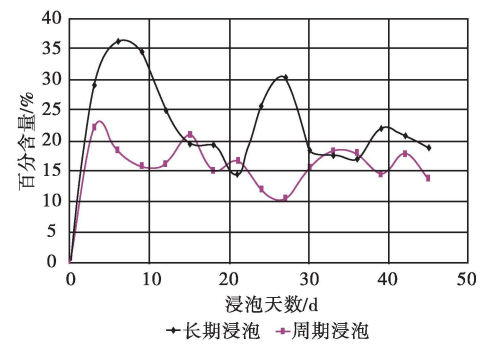


图 4 重庆交通大学泥岩云母含量对比图
Fig 4 Muscovite content comparison of the mudstone in Chongqing Jiaotong University

3) 周期浸泡作用下方解石族矿物的含量比长期浸泡作用下有显著增加, 尤其是在巫山龙湖湾后山土体中, 样品在周期浸泡作用下所含矿物仅剩方解石与云母。由此我们可以得出, 周期性浸泡更有利于方解石的结晶。方解石(白云石)硬度较低, 对土样的整体强度有所影响。

以最特征的巫山龙湖湾后山土体为例, 结果如图 5。

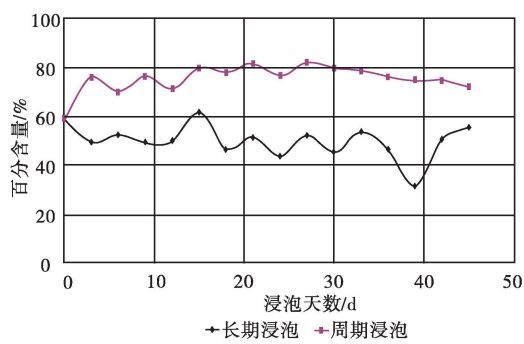


图 5 巫山龙湖湾后山土体方解石含量对比图
Fig 5 Calcite content comparison of the earth in W ushan Longhu Bay back hill

4)其他矿物含量变化。联合表 2 表 3 观察土样中其他矿物尤其是黏土矿物的含量变化, 可得在 45 d 的周期内, 其他矿物尤其是黏土矿物并没有发现规律性的变化, 黏土矿物及其他金属矿物在浸泡作用下不规律的消失或生成新的矿物, 一直存在的矿物其含量也没有显著的变化。即短时间内黏土矿物在周期性浸泡作用下并没有明显的变化。

3 结论与建议

采用 X 射线衍射技术对三峡库区所采典型松散土体在天然状态、长期浸泡、周期浸泡试验工况下进行试验, 在该试验条件下所做工作及得出的结论如下:

1)对不同工况下的各样品进行了物相定性分析和定量分析。

2)根据试验结果, 能够明确的观察到在周期浸泡作用下岩土样的微观晶体结构较长期浸泡作用下结晶逐渐不完整。由此得出结论: 三峡库区的土体在库区水体周期性浸泡作用下矿物微观结构劣化, 严重影响了土体的性质。

3)试验进行 45 d 时间以 3 d 为一周期进行, 试验结果揭示了长期浸泡及周期浸泡作用下土样所含的主要矿物的微观变化, 但是含量较少的矿物(如黏土矿物)并没有明显变化, 需要日后进行时间更长的试验揭示其变化规律。

4)试验得到的结果可以运用在实际的三峡库区的实际工程中, 尤其是能够很明确的解释为何库区中已治理的滑坡等灾害再度复发, 为今后库区内滑坡的治理提出了新的需要注意的因素。

参考文献:

[1] 王思敬, 黄鼎成. 中国工程地质世纪成就 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1- 21

[2] 陈洪凯, 张永兴, 朱凡. 三峡地区新构造应力场的地貌学研究 [J]. 重庆交通学院学报, 1995, 4(4): 56- 61.

[3] 陈野鹰, 唐红梅, 陈洪凯. 三峡水库岸坡渗流自由面求解方法及应用 [J]. 水运工程, 2006(11): 16- 19.

[4] 刘铁庚, 王兴理, 叶霖, 等. 蒸发作用与淋滤作用对岩石风化影响的模拟实验 [J]. 矿物学报, 2007, 27(sup): 229- 230

[5] Wang B D. Potential in pacts of Three Gorges Dam in China on the eco system of east China [J]. Sea Acta Oceanologica Sinic 2008, 27(1): 67- 76.

[6] Li X Sh Yang D Y, Ke X K. Genophologic characteristics and origin of the valley bottom troughs at the site of Three Gorges Dam [J]. Journal of Geographical Sciences 2003 13(4): 507- 512

[7] 王勇, 李红春, 罗尚德, 等. 从沉积物组成变化看三峡水库蓄水对大宁河沉积环境的影响 [J]. 中国岩溶, 2008 27(1): 32- 37.

(下转第 483 页)

表 2 PCCFDI 与 HCC 燃烧过程的比较
Tab 2 Comparison of PCCFDI and HCCI combustion process

| | | HCCI | 引导量 30.4 mg/cyc | 引导量 30.4 mg/cyc | 引导量 30.4 mg/cyc |
|-------------|---|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 压力 | 最高爆发压力 /MPa | 5.49 | 5.03 | 4.81 | 4.71 |
| | 最高爆发压力发生角度 /($^{\circ}$ CA ATDC) | -2 | 7 | 12 | 14 |
| | 压力升高第 1 峰值 /($\text{MPa}\cdot^{\circ}\text{CA}^{-1}$) | 0.240 | 0.202 | 0.175 | 0.173 |
| 压力 升高率 | 压力升高第 1 峰值发生角度 /($^{\circ}$ CA ATDC) | -18 | -15 | -14 | -12 |
| | 最大压力升高率 /($\text{MPa}\cdot^{\circ}\text{CA}^{-1}$) | 0.583 | 0.463 | 0.374 | 0.353 |
| | 最大压力升高率发生角度 /($^{\circ}$ CA ATDC) | -7 | -3 | 1 | 3 |
| | 两个峰值间隔角度 / $^{\circ}$ CA | 11 | 12 | 15 | 15 |
| 放 热 率 | 第 1 阶段放热峰值 /% | 0.055 | 0.042 | 0.037 | 0.026 |
| | 第 1 阶段放热峰值发生角度 /($^{\circ}$ CA ATDC) | -20 | -18 | -14 | -12 |
| | 第 2 阶段放热峰值 /% | 0.156 | 0.130 | 0.122 | 0.110 |
| | 第 2 阶段放热峰值发生角度 /($^{\circ}$ CA ATDC) | -9 | -5 | -1 | 3 |
| 累积 放热率 | 累积放热 10% 对应的角度 /($^{\circ}$ CA ATDC) | -22 | -20 | -18 | -14 |
| | 累积放热 90% 对应的角度 /($^{\circ}$ CA ATDC) | -4 | 8 | 12 | 20 |
| | 累积放热 10% 到 90% 时的持续角度 / $^{\circ}$ CA | 18 | 28 | 30 | 34 |

3 结 论

- 1) DME PCCI-DI 发动机具有较低的最高爆发压力和压力升高率, 发动机工作柔和;
- 2) DME PCCI-DI 发动机的燃烧也表现出明显的两阶段放热特点, 主放热阶段靠近上止点, 放热量大, 燃烧迅速, 燃烧持续时间较短, 热效率高;
- 3) 相对于 DME 直喷发动机, DME PCCI-DI 发动机的燃烧持续期短, 燃烧速度较快, 因此, 可以采用推迟喷油的方法来降低 NO_x 排放。

参考文献:

[1] 朱驰, 刘圣华. 二甲醚均质充量压燃发动机排放特性的试验研究[J]. 内燃机学报, 2004, 22(1): 51-54.

[2] Gary D N, Shizuo S, Jeffrey A L. Experimental investigation of PCCFDI combustion on emissions in a light-duty diesel engine [J]. SAE transaction, 2004, 113(4): 197-207.

[3] 蒋德明, 陈常佑, 杨嘉林, 等. 高等车用内燃机原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 1-50.

[4] 李维. 二甲醚发动机部分均质压燃与缸内喷射混合燃烧的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2006.

[5] 周龙保. 内燃机学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 105-110.

[6] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 300-310.

[7] 尧命发, 郑尊清, 汪洋, 等. DME/CNG 双燃料均质压燃发动机性能试验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10(2): 61-66.

[8] 王贺武. 直喷柴油机燃用二甲醚时性能和排放的试验与理论研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2000.

(上接第 449 页)

[8] 尚敏, 易庆林, 王征亮, 等. 三峡库区库岸塌岸机理与防治措施研究 [J]. 人民长江, 2008, 39(12): 1-2.

[9] 贺可强, 王荣鲁, 李新志, 等. 堆积层滑坡的地下水加卸载动力作用规律及其位移动力学预测: 以三峡库区八字门滑坡分析为例 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1644-1651.

[10] 唐晓松, 邓楚键, 郑颖人, 等. 三峡库区碎石土地基浸水试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 226-229.

[11] 李邵军, Knappett JA, 冯夏庭. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1586-1593.

[12] 陈韶光, 柳群义. 水位涨落对库岸滑坡孔隙水压力影响的非饱和和渗流分析 [J]. 公路工程, 2008, 33(6): 55-59.

[13] 刘粤惠, 刘平安. X 射线衍射分析原理与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[14] 殷跃平, 胡瑞林. 三峡库区巴东组 (T2b) 紫红色泥岩工程地质特征研究 [J]. 工程地质学报, 2004, 12(2): 124-135.

[15] 卫管一, 张长俊. 岩石学简明教程 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.

[16] 刘国钧, 王徽枢, 陈扬杰, 等. 矿物学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1993.