

# 水布垭面板堆石坝面板附着物成分及成因分析

卢晓春<sup>1</sup>, 田 斌<sup>1</sup>, 覃 源<sup>2</sup>, 彭艳周<sup>3</sup>, 熊勃勃<sup>4</sup>

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;  
2. 湖北省水电工程施工与管理重点实验室, 湖北 宜昌 443002;  
3. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 4. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为了确保水布垭面板堆石坝工程的长效安全运行, 对库水水质、面板附着物的成分和成因以及面板混凝土的强度状况进行研究, 在此基础上开展库水和附着物对面板混凝土的腐蚀性评价。研究表明: 库水对面板混凝土和钢筋均无腐蚀; 面板混凝土上的附着物主要成分为方解石和石英, 其对面板混凝土基本没有腐蚀性; 面板混凝土的强度损失较小, 面板运行状况良好。从工程美观和长效安全角度考虑, 建议对面板上的附着物进行定期铲除清理。

**关键词:** 水布垭面板堆石坝; 面板附着物; 成因分析; 安全性评价

**中图分类号:** TV331      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1006-7647(2018)06-0061-05

**Composition and cause analysis of attachments on concrete face of Shuibuya CFRD**//LU Xiaochun<sup>1</sup>, TIAN Bin<sup>1</sup>, QIN Yuan<sup>2</sup>, PENG Yanzhou<sup>3</sup>, XIONG Bobo<sup>4</sup> (1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, Yichang 443002, China; 2. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, Yichang 443002, China; 3. College of Civil Engineering & Architecture, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To ensure long-term and safe operation for Shuibuya CFRD Project, water quality of the reservoir, composition and causes of the attachments on the concrete face and the strength condition of the concrete face were analyzed. On this basis, causticity evaluation for face slab concrete caused by reservoir water and attachments was completed. The results show that reservoir water is non-corrosive to both the face slab concrete and the steel bars. The main ingredients of the attachments on the concrete face are calcite and quartz, which are basically non-corrosive to the face slab concrete. The strength loss of the face slab concrete has little change, indicating a good operation condition. Considering aesthetics and long-term safety, it is suggested that the attachments on the concrete face should be cleared regularly.

**Key words:** Shuibuya CFRD; attachments on concrete face; cause analysis; safety evaluation

我国面板堆石坝数量众多, 无论是坝高、工程规模以及技术难度都处于世界前列, 面板堆石坝在我国已成为主要比选或首选坝型<sup>[1]</sup>。起挡水作用的混凝土面板, 是整个面板堆石坝工程的生命线工程, 其防渗安全对工程的安全运行起着至关重要的作用<sup>[2-3]</sup>。长期以来, 混凝土面板安全研究主要集中在堆石体与面板的变形协调理念与变形控制措施、不利自然条件下建坝的面板防裂控制和实时监测技术等方面<sup>[4-11]</sup>, 对运行过程中混凝土面板在服役环境作用下(化学作用和生物作用)的长效安全性能的关注较少。

水布垭面板堆石坝为目前世界上最高的混凝土面板堆石坝, 最大坝高 233 m, 工程总工期 7.5 a, 2008 年 8 月 4 台机组全部投产发电。迄今为止, 水布垭水电站经过历时约 10 a 的发电运行<sup>[12-13]</sup>。在首次定期检查过程中, 发现大坝混凝土面板上附有皮状的附着物, 如图 1 所示。为了探究附着物对混凝土面板安全性能的影响, 拟对库水水质、面板附着物的成分和成因以及面板混凝土的强度状况进行调查, 并在此基础上开展库水和附着物对面板混凝土的腐蚀性评价。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51509142); 湖北省水电工程施工与管理重点实验室项目(2016KSD08); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2010CDA076)

作者简介: 卢晓春(1983—), 男, 副教授, 博士, 主要从事大坝长期服役性态分析与安全评估。E-mail: luxiaochun1014@163.com



图1 水布垭面板堆石坝面板附着物

1 库水水质分析及混凝土面板腐蚀性评价

1.1 水样采集

水样采集分左岸、河谷中间、右岸 3 个采集点，每个采集点分 2 个水样点，一个采集库表水面以下 0.5 m 处水样，另一个采集水下 10 m 处水样。取样设备为中国科学院水生生物研究所研发的卡盖式采水器，可定深采集水样。水样采用处理过的干燥矿泉水瓶收集，并在瓶身附有标签，每种水样的采集量均为 3 000 mL。

1.2 检测项目

水质分析的检测项目主要有： $\rho$ (悬浮物)、电导率、 $\rho$ (硫化物)、pH 值、 $\rho$ (游离  $\text{CO}_2$ )、 $\rho$ (侵蚀  $\text{CO}_2$ )、碱度、 $\rho(\text{HCO}_3^-)$ 、 $\rho(\text{CO}_3^{2-})$ 、 $\rho(\text{OH}^-)$ 、 $\rho(\text{Cl}^-)$ 、

$\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{Na}^+)$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 、硬度(包括总硬度、碳酸盐硬度、非碳酸盐硬度)、矿化度等。

1.3 检测结果

采用 SL219—2013《水环境监测规范》规定方法对上述项目进行检测分析，水样检测结果如表 1 所示。

1.4 环境水对面板混凝土腐蚀性评价

由于大坝面板为配有钢筋的混凝土结构，一旦面板产生裂缝，库水也可能对钢筋产生腐蚀，因而环境水对混凝土面板的评价一方面包含环境水对面板混凝土腐蚀性判别，另一方面包含环境水对钢筋的腐蚀性判别。依据 GB50487—2008《水利水电工程地质勘察规范》，其判别标准和腐蚀性评价结论如表 2 所示。由此可见，库水对混凝土的一般酸性型腐蚀、碳酸型腐蚀、重碳酸型腐蚀、镁离子型腐蚀和硫酸盐型腐蚀程度均为无腐蚀；库水对钢筋混凝土面板中钢筋的腐蚀程度也为无腐蚀。

2 面板附着物成分分析

为了研究面板附着物的化学组成，运用 X 射线荧光分析法(XRF)进行其化学成分测试，运用 X 射线衍射(XRD)、红外光谱(IR)进行颗粒成分和有机物的检测分析。为了探究附着物的存在是否会为水中藻类营造生存环境，通过  $\text{BaCl}_2$  饱和法测定附着物的阳离子交换量，评价附着物的保肥能力。

表 1 库水水质检测结果

| 部位          | $\rho$ (悬浮物)/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 电导率/<br>( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) | $\rho$ (硫化物)/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | pH 值 | $\rho$ (游离 $\text{CO}_2$ )/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\rho$ (侵蚀 $\text{CO}_2$ )/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{HCO}_3^-)$ /<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{CO}_3^{2-})$ /<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |
|-------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 左岸库表        | 13                                                   | 283                                            | ND                                                   | 7.48 | 9.5                                                                | 3                                                                  | 143                                                             | 6.4                                                               |
| 左岸水下 10 m   | 10                                                   | 268                                            | ND                                                   | 7.54 | 7.3                                                                | 5                                                                  | 143                                                             | 6.4                                                               |
| 河谷中间库表      | 11                                                   | 284                                            | ND                                                   | 7.58 | 9.8                                                                | 3                                                                  | 139                                                             | 6.4                                                               |
| 河谷中间水下 10 m | 11                                                   | 284                                            | ND                                                   | 7.61 | 6.2                                                                | 6                                                                  | 142                                                             | 6.4                                                               |
| 右岸库表        | 11                                                   | 284                                            | ND                                                   | 7.65 | 9.7                                                                | 3                                                                  | 141                                                             | 6.4                                                               |
| 右岸水下 10 m   | 12                                                   | 285                                            | ND                                                   | 7.63 | 7.5                                                                | 5                                                                  | 143                                                             | 6.4                                                               |

| 部位          | $\rho(\text{OH}^-)$ /<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{Cl}^-)$ /<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ /<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{Na}^+)$ /<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{K}^+)$ /<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{Ca}^{2+})$ /<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\rho(\text{Mg}^{2+})$ /<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 总硬度/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 矿化度/<br>( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |
|-------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 左岸库表        | 0                                                            | 3.44                                                         | 29.2                                                              | 2.39                                                         | 0.29                                                        | 52.7                                                            | 4.68                                                            | 152                                         | 168                                         |
| 左岸水下 10 m   | 0                                                            | 3.58                                                         | 29.6                                                              | 2.93                                                         | 0.32                                                        | 56.6                                                            | 2.28                                                            | 151                                         | 192                                         |
| 河谷中间库表      | 0                                                            | 3.48                                                         | 28.6                                                              | 2.17                                                         | 0.22                                                        | 52.8                                                            | 4.8                                                             | 152                                         | 180                                         |
| 河谷中间水下 10 m | 0                                                            | 3.55                                                         | 29.2                                                              | 2.75                                                         | 0.25                                                        | 52.6                                                            | 4.92                                                            | 152                                         | 182                                         |
| 右岸库表        | 0                                                            | 3.54                                                         | 31.3                                                              | 2.12                                                         | 0.23                                                        | 51.9                                                            | 5.34                                                            | 152                                         | 180                                         |
| 右岸水下 10 m   | 0                                                            | 3.59                                                         | 29.0                                                              | 2.69                                                         | 0.25                                                        | 54.6                                                            | 3.72                                                            | 152                                         | 190                                         |

注:ND 表示检测结果低于分析方法检出最低限值。

表 2 环境水对混凝土面板的腐蚀性评价

| 对象  | 腐蚀性类型 | 腐蚀性判断依据                 | 检测结果               | 腐蚀程度 | 判别依据                                 |
|-----|-------|-------------------------|--------------------|------|--------------------------------------|
| 混凝土 | 一般酸性型 | pH 值                    | 7.48 ~ 7.65        | 无腐蚀  | pH > 6.5                             |
|     | 碳酸型   | 侵蚀 $\text{CO}_2$ 质量浓度   | 3 ~ 6 mg/L         | 无腐蚀  | $\rho$ (侵蚀 $\text{CO}_2$ ) < 15 mg/L |
|     | 重碳酸型  | $\text{HCO}_3^-$ 质量浓度   | 2.28 ~ 2.34 mmol/L | 无腐蚀  | $\rho(\text{HCO}_3^-)$ > 1.07 mmol/L |
|     | 镁离子型  | $\text{Mg}^{2+}$ 质量浓度   | 2.28 ~ 5.34 mg/L   | 无腐蚀  | $\rho(\text{Mg}^{2+})$ < 1 000 mg/L  |
|     | 硫酸盐型  | $\text{SO}_4^{2-}$ 质量浓度 | 28.6 ~ 31.3 mg/L   | 无腐蚀  | $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ < 250 mg/L  |
| 钢筋  |       | $\text{Cl}^-$ 质量浓度      | 3.44 ~ 3.59 mg/L   | 无腐蚀  | $\rho(\text{Cl}^-)$ < 100 mg/L       |

为了使分析结果有代表性,选择左岸、河谷中间、右岸 3 个采集点,每个采集点取水上干样和水下湿样 2 个样本,一共有 6 个样本。各样品经 X 射线荧光光谱分析得到的各化学成分如表 3 所示。由表 3 可知,面板附着物的主要化学成分(以氧化物表示)为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CaO}$  及  $\text{SiO}_2$ ,三者总量占 95% 左右。此外,还含有少量  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1% 左右)、 $\text{MgO}$  (0.9% 左右) 和  $\text{SO}_3$  (大部分样品在 0.8% 左右)。

各样品的红外光谱图和 X 射线衍射图基本一致,表明其各处附着物种类和物相成分基本相同。受文章篇幅限制,主要选取河谷中间试样检测成果进行分析。图 2 为河谷中间面板附着物干样的 X 射线衍射图。由图 2 并结合面板附着物的化学成分分析<sup>[14]</sup>可知,面板上附着物的主要晶体物相有两种,即方解石 ( $\text{CaCO}_3$ ) 和石英 ( $\text{SiO}_2$ )。图 3 为河谷中间面板附着物的红外光谱图。由文献[14]可知,水化硅酸钙的特征波数是  $3\,420\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,420\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,020\text{ cm}^{-1}$ 、 $990\text{ cm}^{-1}$  及  $460\text{ cm}^{-1}$  等,  $2\,930\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,870\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,458\text{ cm}^{-1}$ 、 $875\text{ cm}^{-1}$ 、 $845\text{ cm}^{-1}$ 、 $713\text{ cm}^{-1}$  对应方解石的特征波数,  $1\,160\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,080\text{ cm}^{-1}$ 、 $790\text{ cm}^{-1}$ 、 $770\text{ cm}^{-1}$ 、 $690\text{ cm}^{-1}$  等对应石英的特征波数。结合所检样品的化学成分(表 3)分析认为,面板附着物样品的主要物相成分除方解石、石英外,还含有少量的水化硅酸钙。

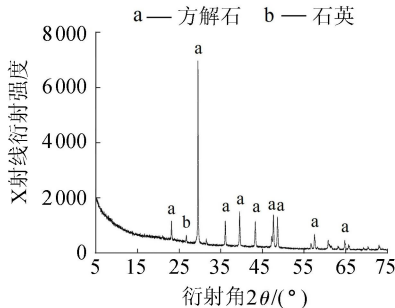


图2 河谷中间面板附着物干样的 X 射线衍射图

通过对 6 个样品的阳离子交换量分析,左岸干样和湿样的阳离子交换量分别为  $455.59\text{ cmol/kg}$  和  $446.5\text{ cmol/kg}$ ,河谷中间干样和湿样的阳离子交换量分别为  $453.12\text{ cmol/kg}$  和  $441.14\text{ cmol/kg}$ ,右岸干样和湿样的阳离子交换量分别为  $470.69\text{ cmol/kg}$  和  $477.02\text{ cmol/kg}$ 。

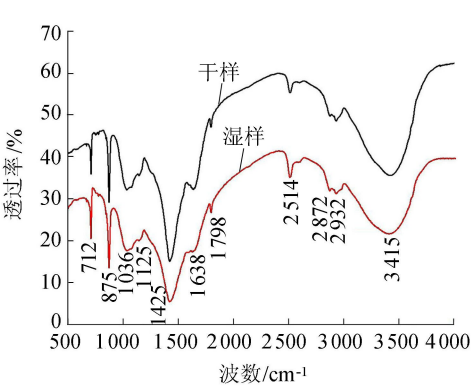


图3 河谷中间面板附着物的红外光谱图

从阳离子交换量的测试结果来看,面板各部位附着物的阳离子交换量普遍较高,同时从干样和湿样阳离子交换量来看,检测结果比较接近,说明两者的肥力接近,可以推断两者的成分也几乎相同。阳离子交换量较高的原因可能为测定的样品中存在着很多的苔藓组织,土壤含量非常少;但苔藓类对原生裸地土壤的形成和矿质营养的积累有十分明显的作用,它不仅有利于土壤的形成和积累,也有利于土壤中 N、P、S 等有机质养分的保持。

但是,在 XRF、XRD 和 IR 分析中均未检测到烃类、胺类、羧酸类等有机物成分,其原因可能与样品处理方式有关。面板附着物样品在开展 XRF、XRD 和 IR 检测前需要制样,即经电磁制样机粉磨至  $0.08\text{ mm}$  以下粒径。在粉磨过程中,可能导致温度较高,因升温和机械冲击等作用很可能使苔藓组织的结构损坏或分解,再加之其含量并不高,从而造成 XRD、IR 等分析均未能检出有机物成分。

3 面板混凝土强度检测

水布垭水电站混凝土面板共分 3 期施工:一期面板高程  $177\sim278\text{ m}$ ,最大高差  $101\text{ m}$ ;二期面板高程  $278\sim340\text{ m}$ ,最大高差  $62\text{ m}$ ;三期面板高程  $340\sim405\text{ m}$ ,最大高差  $65\text{ m}$ 。面板混凝土的配合比如表 4 所示。为了提高面板混凝土的抗裂能力,并强化初期强度和韧性,在一期和二期面板混凝土中添加聚丙烯腈纤维;同时,为了更好地适应面板堆石坝施工期和蓄水期面板受力变形的特点,在三期面板范围内坝体不均匀沉降比较明显的左 7 至左 11 块面板混凝土

表 3 面板附着物中各化学成分所占比例 %

| 样品     | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CO <sub>2</sub> |
|--------|------|--------------------------------|------------------|-----------------|------------------|-------|--------------------------------|-----------------|
| 左岸干样   | 0.86 | 1.47                           | 2.74             | 1.55            | 0.18             | 15.78 | 0.78                           | 76.29           |
| 左岸湿样   | 0.74 | 0.86                           | 1.93             | 0.88            | 0.09             | 32.53 | 0.80                           | 61.60           |
| 河谷中间干样 | 0.87 | 1.03                           | 2.15             | 0.72            | 0.13             | 23.11 | 0.46                           | 71.30           |
| 河谷中间湿样 | 0.98 | 1.41                           | 3.04             | 0.78            | 0.14             | 33.98 | 0.72                           | 58.65           |
| 右岸干样   | 0.91 | 1.08                           | 2.24             | 0.75            | 0.12             | 23.51 | 0.58                           | 70.58           |
| 右岸湿样   | 0.75 | 0.78                           | 2.80             | 0.69            | 0.09             | 33.52 | 0.41                           | 60.65           |

土中采用了钢纤维和聚丙烯腈纤维复掺的方式<sup>[15]</sup>。式,养护的库水中可能含有苔藓生长的营养要素,从而导致运行水位以上部分也存在苔藓状附着物。

表 4 面板混凝土配合比

| 施工分期 | 强度等级 | 羧酸类缓凝<br>高效减水剂<br>SR3/% | 引气剂<br>AIR202/% | 水灰比  | 粉煤灰/<br>% | 砂/% |
|------|------|-------------------------|-----------------|------|-----------|-----|
| 一期   | C30  | 0.5                     | 0.020           | 0.38 | 20        | 39  |
| 二期   | C30  | 0.5                     | 0.020           | 0.38 | 20        | 39  |
| 三期   | C30  | 0.5                     | 0.020           | 0.38 | 20        | 42  |

由于库水水质分析和面板附着物取样均在三期面板的高程范围内,因而强度状况调查只针对水位变动区的三期面板。在面板混凝土材料室内试验研究中,考虑不同料场对混凝土强度的影响,单独添加聚丙烯腈纤维三期混凝土的抗压强度范围为 44.8 ~ 54.7 MPa,复掺聚丙烯腈纤维和钢纤维的三期混凝土的抗压强度范围为 53.5 ~ 62.0 MPa<sup>[16]</sup>。

为了探究面板混凝土强度现状,采用无损回弹法检测混凝土抗压强度。在水库运行水位 385.38 m 以上的三期面板中,对河谷中间及右岸选择 4 个测区开展面板强度测试工作,4 个测区的抗压强度分别为 51.1 MPa、47.2 MPa、42.7 MPa、51.1 MPa。从检测结果来看,除 1 个测区强度低于试验强度范围 44.8 ~ 54.7 MPa 外,其余几个测区强度值均在试验强度范围之内。从已有的 4 个测区的强度检测结果可见,水布垭面板堆石坝经过约 10a 的发电运行,面板混凝土强度损失较小,面板的运行状况良好。

4 面板附着物成因分析及评价

4.1 面板附着物的成因分析

由以上 XRF、XRD、IR 及阳离子交换量测试结果表明,面板附着物的主要成分有方解石、石英和少量的水化硅酸钙等,此外还有一定量的苔藓组织。

这些物质中,方解石很可能是在潮湿条件下(降雨或夏季高温时洒水养护)面板中部分氢氧化钙溶出或析出,并随后于空气中碳化形成。同时,也有可能是附着物样品取样时所刮取的部分骨料成分。面板附着物中方解石的含量将随时间延长而增大(因氢氧化钙会不断在潮湿条件下渗出并碳化,从而会逐渐积累)。石英则可能是由原混凝土中砂粒等骨料的影响或库区落尘等原因形成。面板附着物中还含有少量的水化硅酸钙,由于水化硅酸钙的溶解度极低,故其溶出或析出量可忽略,它主要来源于取样时刮下的砂浆成分。

面板附着物中存在苔藓组织,主要是由于库水中有适合于苔藓类附着物生长的营养盐成分;运行水位以上部分也存在类似的情况,根据现场运行人员的介绍,在夏季气温较高情况下,一般对库水位以上的混凝土面板区域采取抽取库水浇洒的养护方

4.2 附着物对混凝土面板的影响评估

通过对面板附着物的化学成分、物相组成(颗粒成分)及有机物分析结果可知,面板混凝土的附着物主要是方解石和石英。方解石和石英两种物质的酸碱性均为中性,而且它们在水中的溶解度亦很小,同时也不与水泥及其水化产物(氢氧化钙、水化硅酸钙、水化硫铝酸钙等)发生化学反应。由此判断,附着物对面板混凝土基本没有腐蚀性。

但从附着物阳离子交换量来看,较大的阳离子交换量说明苔藓状附着物具有较强的保肥能力,长期情况下容易导致面板上生长更多的苔藓植物。而苔藓植物会积累周围环境中的水分和浮尘,并分泌酸性代谢物腐蚀面板,如果不及时清除会影响坝体的防渗安全。

5 结 语

a. 库水对混凝土的一般酸性型腐蚀、碳酸型腐蚀、重碳酸型腐蚀、镁离子型腐蚀和硫酸盐型腐蚀程度均为无腐蚀;库水对钢筋混凝土面板中钢筋的腐蚀程度也为无腐蚀。

b. 面板附着物基本为苔藓状附着物和混凝土溶出性侵蚀反应物的混合物。溶出性侵蚀的反应物主要是方解石和石英,并含有少量的水化硅酸钙。方解石很可能是面板混凝土中氢氧化钙溶出或析出,并在随后于空气中碳化形成;石英则可能是由原混凝土中砂粒等骨料的影响或库区落尘等原因形成;少量的水化硅酸钙应该来源于在取样时刮下的砂浆成分。苔藓状附着物产生的原因主要是库水中存在适合于苔藓类附着物生长的营养盐成分;而运行水位以上部位存在附着物是由于夏季运行过程中抽取库水浇洒的养护方式,而养护的库水中可能含有苔藓生长的营养要素。

c. 采用无损回弹法对水位变动区三期面板的抗压强度进行了检测,从检测结果可见面板混凝土强度损失较小。

d. 面板附着物中的方解石和石英两种物质的酸碱性均为中性,而且它们在水中的溶解度亦很小,同时也不与水泥及其水化产物(氢氧化钙、水化硅酸钙、水化硫铝酸钙等)发生化学反应。因此,溶出性侵蚀的反应物对面板混凝土基本没有腐蚀性。

e. 苔藓状附着物具有较大的阳离子交换量,说明附着物具有较强的保肥能力,长期情况下容易在面板上生长更多的苔藓植物。而苔藓植物会积累周围环境中的水分和浮尘,分泌酸性代谢物来腐蚀面

板,如果不及时清除会影响坝体的防渗安全,因而建议对面板上的附着物进行定期铲除清理,避免苔藓的长期生长造成面板的腐蚀。

## 参考文献:

- [1] 郇能惠,杨泽艳. 中国混凝土面板堆石坝的技术进步[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1361-1368. (LI Nenghui, YANG Zeyan. Technical advances in concrete face rockfill dams in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1361-1368. (in Chinese))
- [2] 杨启贵,张家发,熊泽斌,等. 水布垭混凝土面板堆石坝的渗流控制体系[J]. 水力发电学报, 2010, 29(3): 164-169. (YANG Qigui, ZHANG Jiafa, XIONG Zebin, et al. Seepage field control system for Shuibuya Concrete Faced Rock-fill Dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(3): 164-169. (in Chinese))
- [3] 甘磊,沈振中,肖钧升,等. 河谷坡度对高面板堆石坝应力变形特征的影响[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 78-83. (GAN Lei, SHEN Zhenzhong, XIAO Junsheng, et al. Effect of valley slopes on stress and deformation characteristics of a high concrete face rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5): 78-83. (in Chinese))
- [4] 刘萌成,高玉峰,刘汉龙. 混凝土面板堆石坝应力变形长期性状有限元模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊1): 412-418. (LIU Mengcheng, GAO Yufeng, LIU Hanlong. Finite element analysis of long-term stress-deformation behavior for concrete-faced rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1): 412-418. (in Chinese))
- [5] 汪明元,潘家军,黄斌,等. 水布垭超高混凝土面板堆石坝的运行性状[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 160-166. (WANG Mingyuan, PAN Jiajun, HUANG Bin, et al. Settling behaviors of the highest Shuibuya Concrete Faced Rock-fill Dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 160-166. (in Chinese))
- [6] 陈生水,王庭博,傅中志,等. 高混凝土面板堆石坝地震损伤机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 1937-1944. (CHEN Shengshui, WANG Tingbo, FU Zhongzhi, et al. Seismic damage mechanism of high concrete face rockfill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 1937-1944. (in Chinese))
- [7] 沈婷,李国英. 超高面板堆石坝混凝土面板应力状态影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1345-1349. (SHEN Ting, LI Guoying. Factors for stress behavior of concrete face slab of super-high CFRD [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1345-1349. (in Chinese))
- [8] 曾铨,沈贵华,王秋杰,等. 利用各向异性软岩筑高混凝土面板堆石坝关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 2655-2661. (ZENG Zeng, SHEN Guihua, WANG Qiuji, et al. Study of key technologies of using anisotropic soft rock to build high concrete face rockfill dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup1): 2655-2661. (in Chinese))
- [9] 周伟,常晓林. 高混凝土面板堆石坝流变的三维有限元数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1389-1392. (ZHOU Wei, CHANG Xiaolin. Three dimension FEM numerical simulating of the rockfill creep of high concrete face rockfill dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1389-1392. (in Chinese))
- [10] 徐泽平,邓刚. 高面板堆石坝的技术进展及超高面板堆石坝关键技术问题探讨[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1226-1234. (XU Zeping, DENG Gang. Development of high CFRD and key technologies for building super-high CFRD [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1226-1234. (in Chinese))
- [11] 朱福余. 水布垭高面板堆石坝中挤压边墙及其变形监测[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(2): 45-49. (ZHU Fuyu. Extrusion type side-wall and deformation monitoring of Shuibuya CFRD [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(2): 45-49. (in Chinese))
- [12] 李吉林. 清江水布垭水电站右岸防淘墙预应力锚索施工技术[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(6): 49-52. (LI Jilin. The construction technique of pre-stressed anchor cable in anti-wash wall of right bank of the Qingjiang Shuibuya Hydroelectric Power Station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(6): 49-52. (in Chinese))
- [13] 李吉林. 水布垭面板堆石坝基础灌浆试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(5): 67-70. (LI Jilin. Foundation grouting tests on Shuibuya Face Rockfill Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(5): 67-70. (in Chinese))
- [14] 杨南如,岳文海. 无机非金属材料图谱手册[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 2000.
- [15] 王云清,孙役,李亮,等. 水布垭面板堆石坝工程施工综述[J]. 水力发电, 2007, 33(8): 28-32. (WANG Yunqing, SUN Yi, LI Liang, et al. Construction summary on the Shuibuya Concrete Facing Rockfill Dam [J]. Water Power, 2007, 33(8): 28-32. (in Chinese))
- [16] 杨启贵,刘宁,孙役,等. 水布垭面板堆石坝筑坝技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

(收稿日期: 2017-12-02 编辑: 骆超)