

DOI: 10.11779/CJGE201904002

# 青藏高原东缘水库绕坝基渗流化学溶蚀研究

陈建生<sup>1,2</sup>, 李平<sup>1,2</sup>, 王涛<sup>1,2</sup>, 詹沪成<sup>1,2</sup>, 严嘉恒<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 研究了青藏高原东缘某大坝基础遭受渗流场与化学场破坏的过程。通过氯离子示踪、温度电导示踪以及人工示踪方法, 确定混凝土防渗墙中存在缺陷, 库水通过非全封闭式防渗墙绕坝基渗漏, 渗水通过坝后区的反滤层排泄; 酸溶解试验和 X 射线荧光分析证明, 坝后区地表的白色颗粒物主要是  $\text{CaCO}_3$ ; 结合化学反应过程, 确认析出物来自于防渗墙中的水泥, 渗漏水中的  $\text{CO}_2$  与水泥中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  发生反应生成可溶性  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , 然后被渗漏水带到地表, 并在常温下分解形成  $\text{CaCO}_3$ 。通过地表水中  $\text{CO}_2$  含量的测试分析发现, 参与水岩反应的  $\text{CO}_2$  具有除大气降水之外的其他来源。结合地质构造推断来自深部碳库中的  $\text{CO}_2$  通过断裂带进入到了地下水与库水中, 并参与了水岩反应, 对大坝的侵蚀速度大幅度增加。研究表明深部  $\text{CO}_2$  进入地下水并参与渗流过程, 对大坝及水工建筑物的化学侵蚀作用将大幅度增强。

**关键词:** 大坝破坏; 水岩反应; 化学侵蚀; 深部  $\text{CO}_2$ ; 青藏高原

中图分类号: TV62.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)04-0610-07

**作者简介:** 陈建生(1955-), 男, 江苏泗阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事同位素水文学、渗流理论与示踪探测技术的研究。E-mail: jschen@hhu.edu.cn。

## Chemical dissolution of seepage around dam foundation of a reservoir in eastern margin of the Tibetan Plateau

CHEN Jian-sheng<sup>1,2</sup>, LI Ping<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>1,2</sup>, ZHAN Lu-cheng<sup>1,2</sup>, YAN Jia-heng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The foundation failure of a dam on the eastern margin of the Tibetan Plateau during seepage and chemical processes is studied. By using  $\text{Cl}^-$  tracing, temperature-conductivity tracing and artificial tracing techniques, it is determined that there is leakage through the non-closed concrete cut-off wall, where the reservoir water leaks through the dam foundation, and excretes through the filter layer after the dam area. The acid dissolution experiment and X-ray fluorescence analysis show that the precipitated white particles on the surface after the dam are mainly composited of  $\text{CaCO}_3$ . Combined with the chemical reaction process. It is confirmed that the precipitation comes from the cement of cut-off wall. The  $\text{CO}_2$  dissolved in the leakage water reacting with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in the cement can generate soluble  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , which is taken to the surface by the leakage water and decomposed to  $\text{CaCO}_3$  at normal temperature. Through the measurement and analysis of  $\text{CO}_2$  content in surface water, it is found that  $\text{CO}_2$  in the water-rock reaction has other sources except atmospheric precipitation. Considering the local geologic structure, it is inferred that  $\text{CO}_2$  mainly from the deep carbon pool enters the groundwater and reservoir water through the fault zones, and participates in the water-rock reaction. This results in a faster erosion of the dam. The chemical erosion of the dam and hydraulic structures will be greatly enhanced if the deep  $\text{CO}_2$  enters the groundwater and participates in the seepage process.

**Key words:** dam failure; water-rock reaction; chemical erosion; deep  $\text{CO}_2$ ; Tibetan Plateau

## 0 引言

渗流破坏是造成大坝溃坝的主要原因, 1959 年法国著名的 Malpasset 拱坝因为渗流破坏导致溃决, 1974 年中国四川江北龙井水库由于集中渗流导致晴天溃坝<sup>[1]</sup>。渗流场与应力场、温度场和化学场之间存

在耦合关系, 且渗流场在其中起着至关重要的作用, 因而, 渗流破坏造成的坝体失事受到国内外科学家和

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51578212)

收稿日期: 2018-01-29

工程界的高度重视和广泛关注<sup>[2-3]</sup>。对于大坝而言, 渗流以及多场耦合作用产生的破坏主要表现在坝体以及坝基中物质的流失, 例如, 对于松散介质而言, 如果渗透流速大于土颗粒的启动流速, 当土颗粒的级配不合理时, 细颗粒将会流出坝体或坝基, 由于物质的流失, 坝体或坝基的渗透性增加, 流体的应力集中在了渗漏点上, 形成管涌与流土破坏, 从而造成土体在宏观上的变形, 最终造成渗透破坏, 严重的可导致垮坝等事故发生。

在大坝渗流过程中, 水岩反应也可以造成坝基或坝体物质的流失, 地层或灌浆水泥中容易被溶蚀的方解石、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  等在化学侵蚀作用下被溶解成为离子而带出, 从而对大坝的微观结构产生破坏。李旭春对回龙山水电站的地下水进行了监测分析和评价, 认为地下水中较多的重碳酸盐和游离二氧化碳对大坝不同坝段和坝基岩石产生了侵蚀<sup>[4]</sup>。林和振认为库水中有有机质的富集使下层库水呈弱酸性, 库水在向坝基运移过程中, 与坝基岩石、帷幕、混凝土之间产生了化学侵蚀作用<sup>[5]</sup>。当微观破坏持续发展, 就可能形成宏观上的缺陷, 从而改变了土体或岩体的承载力, 最终造成垮坝等事故的发生<sup>[6-7]</sup>。化学侵蚀大坝造成垮坝的事例并不多见, 但是, 在某些特殊的情况下, 化学溶蚀作用在四场耦合中起着重要的作用, 尤其在大量  $\text{CO}_2$  溶入地下水中, 化学侵蚀的作用将会急剧增强。本文通过对青藏高原东缘某大坝的渗流场与溶蚀性进行研究, 分析了化学侵蚀作用对大坝运行所造成的安全隐患。

## 1 大坝渗漏探测

### 1.1 大坝基本情况

该水库坝址位于青藏高原东缘, 全年最高气温  $31^\circ\text{C}$ , 最低气温  $-12^\circ\text{C}$ , 年平均气温  $5.3^\circ\text{C}$ , 年降水量为  $800.3\text{ mm}$ 。库水主要来源于上游的冰雪融水汇集, 上游山体植被稀疏, 能够被带到库水中的有机质很少。大坝是碾压堆石坝, 坝顶高程约  $2934\text{ m}$ , 坝高约  $56\text{ m}$ , 水库总库容约  $1.12\text{ 亿 m}^3$ , 参见图 1(a)。水库自 2008 年蓄水以来, 渗漏问题突出, 严重影响了大坝的正常使用。前后 3 次对该大坝进行防渗处理, 包括灌浆处理、更换土工膜等, 但大坝下游的渗漏量依然达到  $754.33\text{ L/s}$ , 远远大于设计允许的最大渗漏  $73.72\text{ L/s}$  的限值。该区域地下水主要为第四系松散堆积孔隙潜水及基岩裂隙水, 库水与溪水的 pH 值分别为 7.3 与 8.0, 渗漏水的 pH 值在 7.1~7.5 之间, 渗漏水与坝前库水并不完全相同。

### 1.2 工程概况

坝区地层较单一, 山体由三叠系变质砂岩组成,

大坝地基由第四系松散堆积层和巨厚的三叠系变质砂岩及薄层板岩夹层组成, 包括①冰川冰水混合堆积、②冰水堆积、③冲积和冰水混合堆积、④洪积堆积、⑤湖积堆积, 参见图 1(b)。根据沉积层的年代可分为 7 层, 渗透系数  $K$  在  $10^{-2}\sim 10^{-5}\text{ cm/s}$  之间, 渗流场分布不均匀, 与地质构造有关。大坝为复合土工膜堆石坝, 坝体从上游至下游分为上游护坡(预制混凝土为  $12\text{ cm}$  厚的保护板、土工膜防渗体、无砂混凝土为厚度  $6\text{ cm}$  的垫层、砂砾石垫层宽度  $300\text{ cm}$ )、坝壳堆石区、坝基反滤层由砂石料构成, 具体结构参见图 1(a)、(b)。坝体防渗在高程  $2891.5\text{ m}$  以上采用坝面复合土工膜防渗, 在高程  $2891.5\text{ m}$  以下浇筑混凝土防渗墙防渗, 并与基础防渗墙相接, 在覆盖层坝基段复合土工膜固定在混凝土趾板上, 两岸及坝肩基岩采用两排帷幕灌浆防渗, 参见图 1(b)。两岸坝肩低高程部位多分布崩坡积块碎石, 块碎石成分以变质砂岩为主, 少量板岩夹层, 岩体结构松散, 透水性强, 综合考虑经济技术等方面, 通过浇筑非全封闭悬挂式防渗墙对河道下部的破碎带进行了加固处理。

大坝经过防渗处理后, 当库水位上升至  $2913\text{ m}$  时, 依然发现右岸坝体廊道、灌浆平洞出现明显渗水现象, 当库水位超过  $2913\text{ m}$  时, 坝后出现大量渗水, 右坝后<sup>#3</sup>观测井出现自流, 参见图(c); 靠近左坝肩渗水通过反滤层汇入排水沟, 参见图 1(d); 在左坝后渗漏区距离<sup>#2</sup>观测井  $10\text{ m}$  附近的堆渣压重平台地表有几处白色细颗粒堆积物, 参见图 1(e), 细颗粒堆积物面积  $10\sim 20\text{ m}^2$ , 厚度  $10\sim 15\text{ cm}$ 。

### 1.3 渗漏水来源分析

研究表明左岸坝与右岸坝存在明显的绕灌浆帷幕端部及底部的渗漏, 参见图 1(a), 当库水位高程达到  $2913\text{ m}$  时, 渗漏量突增, 表明此高程之上灌浆帷幕端部的断裂带及破碎带的透水性很强, 库水绕过坝肩向坝后区渗漏。为了调查渗漏水来源, 在坝后区钻了 3 个观测井, 具体位置参见图 1(a), 井的深度都超过了帷幕灌浆(高程  $2850\text{ m}$  左右)以及防渗墙的深度, 井管采用花管结构, 确保能采集到不同深度的水样, 并通过分析氯离子浓度对坝体的渗漏通道进行研究<sup>[8-11]</sup>。在库区、钻井以及坝后排泄区采集样品, 测定其  $\text{Cl}^-$  含量, 结果列于表 1 中, 样品编号具体位置参见图 1(a)。

由于  $\text{Cl}^-$  在水中非常稳定, 在渗漏过程中,  $\text{Cl}^-$  只会增加, 不会减少, 通过在高水位下不同采样点的氯离子浓度分布, 基本上可以确定地下水的渗漏通道位置。从表 1 中可以看出: <sup>#2</sup> 中  $\text{Cl}^-$  浓度从深部到浅层是逐渐增大的, 故<sup>#2</sup> 内存在向上的垂向流, 参见图 1



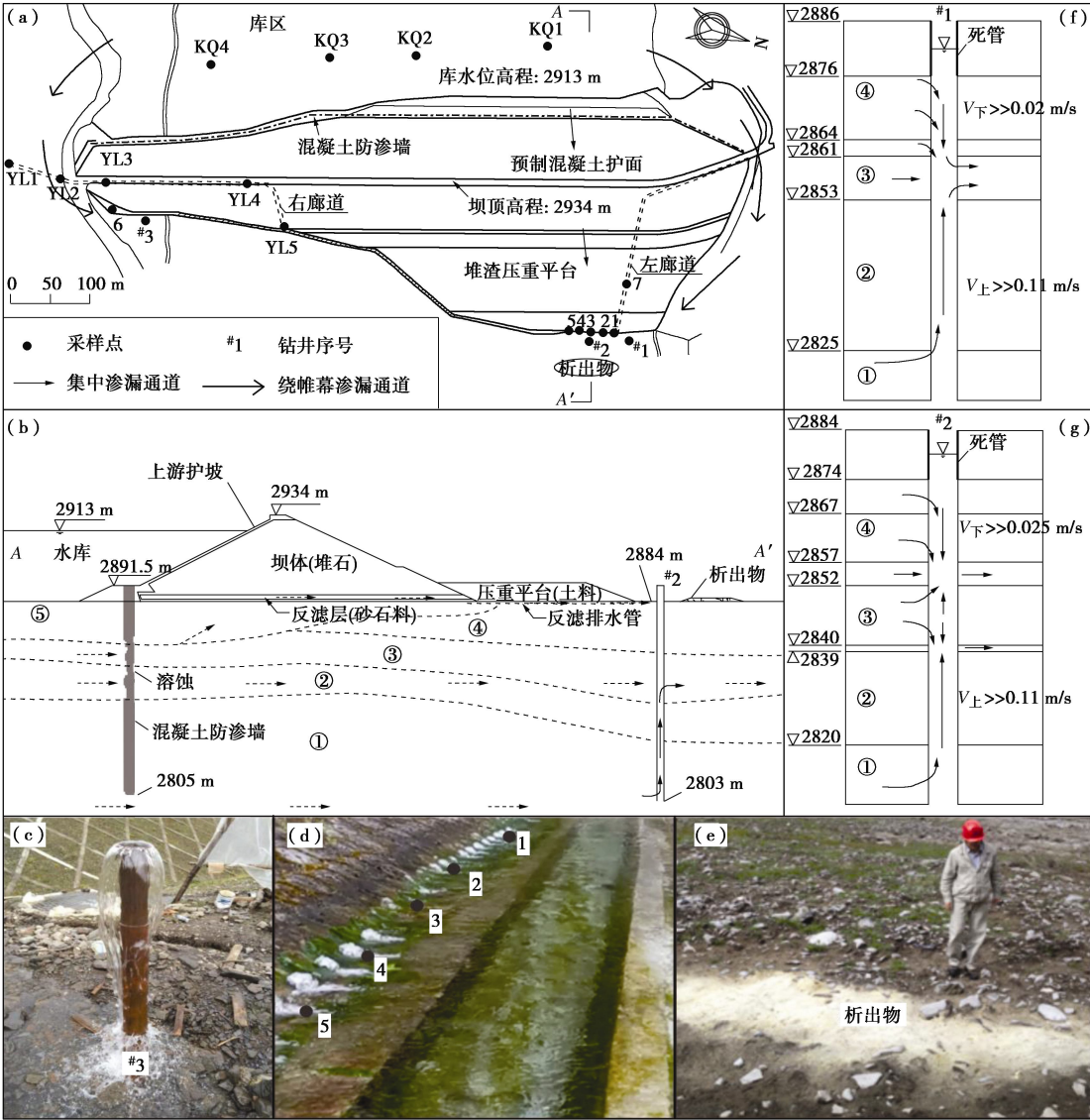


图 1 大坝渗漏示踪

Fig. 1 Tracing of dam leakage

(b); 高程 2844 m 以上的取样点的浓度略高于坝前库区的浓度, 至于高程 2844 m 处的 2.01 mg/L, 略低于坝前库区浓度, 其原因应该是受到底层低浓度渗漏水的影响。#2 井中高程 2844 m 以上的渗漏水与坝后库区的水力联系较高, 高程 2820 m 处以及更深层的渗漏水则与高程 2844 m 以上渗漏水的来源不同。对比分析发现, #2 井中的氯离子浓度低于#1 井, 表明#2 井渗漏水并不是主要来自#1 井方向, 即#1 井水不是坝后区主要渗漏水的来源, 尤其是白色析出物的来源。结合钻孔#1 和#2 不同深度的温度、电导以及孔内人工投源示踪, 可得到孔内的渗流场分布, 见图 1(f)、(g)。井中垂向流测量结果显示, #2 井中底部向上的垂向流速太大以至于示踪剂投放装置放下不去, 上涌的垂向流速远远大于#1 井同层的垂向流速 0.11 m/s, 表明#1 井的涌水量远小于#2 井。由于#1 井深部的涌水量较小,

表明#2 井底部的涌水不可能来自于绕坝肩的渗漏, 因为绕左坝肩的渗漏水必须经过#1 井。由于绕坝肩的水的水岩作用时间长, 故#1 井涌水中的氯离子浓度比#2 井的高。

比较#1、#2 中水样  $\text{Cl}^-$  浓度可知: 相对于同高程处#1 中  $\text{Cl}^-$  浓度, #2 中  $\text{Cl}^-$  浓度更低, 若#2 中的渗漏水是从左坝绕渗过来的, 那么必然先经过#1, 而由于  $\text{Cl}^-$  在水中的稳定性, 在水流动的途径中, 其浓度只会增加不会减少。所以, #2 中的  $\text{Cl}^-$  离子浓度就应该会比#1 中的高, 而事实却是相反, 因此可以断定#2 中的渗漏水不是来源于左坝的绕渗。排除掉左坝绕渗这个可能性, #2 中高程 2844 m 以上的渗漏水只可能来自防渗墙接缝, 接缝处可能存在不封闭区, 渗漏水穿过防渗墙接缝, 然后向上垂向流动, 经过坝体反滤层, 最后通过坝后反滤排水管向坝体后方排泄, 具体渗漏过程

参见图 1(a), 其中剖面 A—A' 具体位置绘于图 1(b), 孔中用实线表示的垂向流为真实测量得到, 其他用虚线表示的水平渗流路线均为推测得到。

表 1 大坝各点氯离子浓度分布

Table 1 Distribution of chloride ion concentration at each point of dam

编号	高程 /m	Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )	编号	高程 /m	Cl <sup>-</sup> /(mg·L <sup>-1</sup> )
#1	2879	14.74	KQ3	2873	2.08
#1	2859	2.96	KQ4	2908	2.20
#1	2834	2.36	KQ4	2873	2.08
#1	2819	2.41	1	2884	2.18
#2	2874	8.37	2	2884	2.20
#2	2864	2.23	3	2884	2.21
#2	2844	2.01	4	2884	2.25
#2	2834	1.48	5	2884	1.37
#2	2820	0.95	6	2898	2.10
#3	2901	2.20	7	2884	2.26
KQ1	2908	2.14	YL1	2895	1.07
KQ1	2873	2.10	YL2	2895	2.20
KQ2	2908	2.09	YL3	2895	2.17
KQ2	2873	2.15	YL4	2895	2.17
KQ3	2908	2.07	YL5	2895	2.15

2 坝后析出物来源试验分析

2.1 坝后白色颗粒物化学分析

为研究白色细颗粒是什么成分, 笔者在试验室内对该白色析出物进行酸解反应, 反应过程中产生了大量气泡且反应后残留的黑色细小砂粒约占反应物体积的 1%, 可以判断该白色细颗粒是碳酸盐, 黑色细砂粒应该是碳酸盐在沉积过程中经过地表混入的。99% 白色细颗粒能被盐酸溶解, 据此推断其主要成分是碳酸盐, 应该属于化学侵蚀的作用。为进一步分析析出物的主要成分, 对#1 和#2 后的析出物样品做了烧失量和 X 射线荧光分析, 分析结果见表 2。

从表 2 中可以看出, 白色析出物中 CaO 为主型, 主要是 CaCO<sub>3</sub> 胶体, #1 后析出物中 CaO 占 40.81%, #2 后的析出物中 CaO 占 40.37%, 均值 40.59%, 由于析出物灼烧过程中 CO<sub>2</sub> 气体的逸出, 故相应的烧失量含量亦高, 均值 32.35%。因此, 析出物中 CaCO<sub>3</sub> 是主要成分, 而且含量超过 70%。

表 2 析出物化学成分分析

Table 2 Chemical composition analysis of precipitates

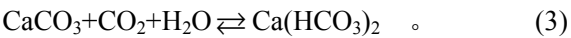
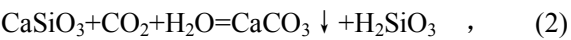
样品	检测结果/%					
编号	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	烧失量
#1	40.81	1.16	2.78	3.28	18.60	31.50
#2	40.37	2.75	2.28	2.24	16.48	33.20

2.2 碳酸钙沉积物来源

白色颗粒物的粒径在 0.1~1 mm 之间, 在沉积区揭露地层没有发现沉积颗粒, 颗粒物都堆积在地表低

洼处, 根据氯离子示踪方法确定白色颗粒物(碳酸钙)来自于#2 井附近的渗漏通道, 参见图 1(b), 渗漏通道沿着河床下部的破碎带, 穿过了防渗墙中不封闭带, 通过岩性分析可知, 河床下部的岩石没有石灰岩, 钙离子的来源只可能是混凝土防渗墙中的水泥, 由于混凝土防渗墙中存在不封闭带, 库水通过防渗墙中不封闭带绕坝基渗漏到坝后区。

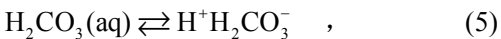
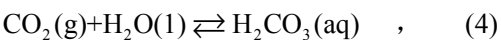
在完全水化的水泥石中, 水化硅酸钙(凝胶)约占 70%, Ca(OH)<sub>2</sub> 约占 20%, 两者为水泥石的主要成分。在地下水存在游离二氧化碳, 它对水泥石的腐蚀作用是通过下面方程式进行的:



当水中 CO<sub>2</sub> 含量较低时, CaCO<sub>3</sub> 沉淀到水泥石表面而使腐蚀停止; 当 CO<sub>2</sub> 浓度较高时, 上述反应还会继续进行, 生成的 Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 易溶于水, 最终导致水泥石中的 Ca(OH)<sub>2</sub> 浓度降低, 造成水泥石腐蚀<sup>[12]</sup>。由此推测, 这些碳酸钙沉积物溢出地表前应该是离子状态, 溢出地表后由于压力降低以及蒸发作用达到了饱和溶度后分解产生了碳酸钙沉积。进而可以得出碳酸钙沉积物来自于防渗墙中不封闭带, 而地下水中 CO<sub>2</sub> 浓度是造成混凝土防渗墙溶蚀破坏的关键因素, 因此 CO<sub>2</sub> 的来源成为了新的研究目标。

2.3 渗漏水中 CO<sub>2</sub> 来源

如果水中 CO<sub>2</sub> 来源于库水, 那么水中溶解的 CO<sub>2</sub> 应该来自于大气。溶解在水中的 CO<sub>2</sub> 可以电离出大量的 H<sup>+</sup>:

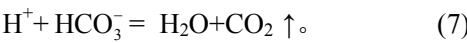


由上述反应式可以看出, H<sup>+</sup> 浓度与水中溶解的 CO<sub>2</sub> 的含量有关。随着水中 H<sup>+</sup> 浓度的增加, Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 的溶解度会逐渐变大, 水泥石的腐蚀也会继续进行。碳酸是二元弱酸, 其电离最终会处于平衡状态, 即 CO<sub>2</sub> 或 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 最终会按照一定比例存在于水中, 而决定此比例的因素就是 H<sup>+</sup> 浓度即 pH, 不同 pH 下 CO<sub>2</sub>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的比例参见表 3。

为了解渗漏水中的 CO<sub>2</sub> 含量, 笔者采集了水库周边溪水, 并通过测定 pH 确定水中 CO<sub>2</sub> 的浓度。氩气是一种化学性质极不活泼的惰性气体, 当水中通入氩气时, 水中溶解的 CO<sub>2</sub> 和氩气都存在于水分子的间隙中, 但氩气分子体积远小于 CO<sub>2</sub> 分子体积, 故试验采用向水中通氩气的方法将水中溶解的 CO<sub>2</sub> 气体完全置换掉。

通过表 3 可以看出, 当 pH 小于 8.5 时, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 所

占比例极小，因此，水中通入氩气的过程中主要发生的反应为



由于 $[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}}$ ，另外，在 $\text{H}_2\text{CO}_3$  离解时， $[\text{H}^+]$  和 $[\text{HCO}_3^-]$  大致相等，即 $[\text{H}^+] \approx [\text{HCO}_3^-]$ ，那么 $\text{HCO}_3^-$  的反应量 $(\Delta \text{HCO}_3^-)$ 就等于 $\text{H}^+$ 的反应量 $(\Delta \text{H}^+)^{[14]}$ 。随着氩气的不断通入，水中的 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  电离平衡会被打破，与 $\text{H}^+$ 结合生成新的 $\text{CO}_2$  分子，转化为 $\text{CO}_2$  气体排出，最终水中以分子形式存在的 $\text{CO}_2$  会几乎完全消失，并且可以通过逆反应生成 $\text{CO}_2$  的 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  离子最终的含量也可忽略不计，记为 0，因此，在最初状态下 $[\text{HCO}_3^-] = \Delta \text{HCO}_3^- + 0$ ，整个过程中排出的 $\text{CO}_2$  总量（即大坝侵蚀过程中水岩反应消耗的 $\text{CO}_2$  含量）就等于水样中总 C 元素浓度。由总 C 元素的含量 $= [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}]$ ，可知水样总 C 元素的含量 $= [\text{HCO}_3^-] / \omega(\text{HCO}_3^-)$ ，其中 $\omega(\text{HCO}_3^-)$  为水样在初始状态下 pH 所对应的 $\text{HCO}_3^-$  的百分比，参见表 3。

表 3 3 种形式二氧化碳比例 (%) <sup>[13]</sup>

Table 2 Proportions of carbon dioxide in three forms (%)			
pH	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
6.0	70.00	30.00	0
6.5	41.62	58.37	0.01
7.0	18.64	81.32	0.04
7.5	6.74	93.12	0.14
8.0	2.46	97.08	0.46
8.5	0.72	97.83	1.45
9.0	0.17	95.36	4.47

溪水样本共 10 个，具体试验详细步骤如下：①取水样置于烧杯中；②静置一段时间，将仪器 pH 探头放入烧杯中，记录 pH 值，记为 pH1；③持续通入氩气直至其 pH 值稳定，确保已将水中的 $\text{CO}_2$  完全排出，记录稳定后的 pH 数据，记为 pH2，结果列于表 4。表 4 中 $\omega(\text{HCO}_3^-)$  由表 3 的数据插值得到，而 $[\text{HCO}_3^-] \approx \Delta \text{H}^+ \approx 10^{-\text{pH1}} - 10^{-\text{pH2}}$ ， $\text{CO}_2$  浓度就等于总 C 元素浓度 $= [\text{HCO}_3^-] / \omega(\text{HCO}_3^-)$ 。由表 4 绘制不同 pH 下 $\text{CO}_2$  浓度曲线，参见图 2。

表 4 样本试验数据

Table 4 Data of experimental samples				
水样编号	初始 pH1	最终 pH2	$\omega(\text{HCO}_3^-)$ /%	CO <sub>2</sub> 浓度 / (mol·L <sup>-1</sup> )
1	6.053	7.606	32.84	$2.61 \times 10^{-6}$
2	6.121	7.280	36.87	$1.91 \times 10^{-6}$
3	6.409	8.576	53.21	$7.28 \times 10^{-7}$
4	6.594	8.448	62.68	$4.01 \times 10^{-7}$
5	6.796	8.243	71.96	$2.14 \times 10^{-7}$
6	6.976	7.888	80.22	$1.16 \times 10^{-7}$
7	7.317	8.109	88.80	$4.55 \times 10^{-8}$
8	7.392	8.287	90.57	$3.91 \times 10^{-8}$
9	7.520	8.210	93.28	$2.58 \times 10^{-8}$
10	7.570	8.420	93.67	$2.47 \times 10^{-8}$

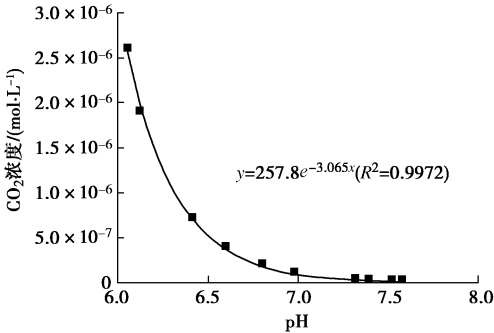


图 2 不同 pH 下水中 $\text{CO}_2$  的浓度

Fig. 2 Concentration of  $\text{CO}_2$  in water with different pH values

由图中散点数据拟合得到关于 $\text{CO}_2$  浓度的关系曲线： $y = 257.7e^{-3.065x}$ ，相关系数 $R^2 = 0.99$ 。根据化学反应式（3）的逆反应可知，白色细颗粒碳酸钙是水中过饱和的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  分解产生的。从大坝 2008 年开始蓄水起到 2013 年，6 a 时间要生成至少 $1 \text{ m}^3$  且纯度达到 70% 的碳酸钙（密度为 $2.7 \text{ g/cm}^3$ ），至少需要消耗 18900 mol 的 $\text{CO}_2$ 。渗漏水 pH 是 7.1~7.5，由试验结论可知，渗漏水中溶解的 $\text{CO}_2$  含量为 $2.68 \times 10^{-8} \text{ mol/L} \sim 9.12 \times 10^{-8} \text{ mol/L}$ 。观测得到在库水位 2930 m 时右岸渗漏量为 251.75 L/s，而此时大坝量水堰渗流量为 754.33 L/s，#2 附近的渗漏量小于 502.58 L/s，将该值作为计算上限值，那么造成如此大的渗漏量需要消耗的 $\text{CO}_2$  为 2548.57~8672.77 mol，那么还有至少 10902.23~16351.43 mol 的 $\text{CO}_2$  是另有来源。可见，只有 13.4%~45.9% 的 $\text{CO}_2$  是由大气降水所带来的，其余 54.1%~86.6% 的 $\text{CO}_2$  存在其他来源。

### 3 讨 论

大坝下游#2 井附近的白色析出物是渗漏水在高水位下将混凝土防渗墙中不封闭带的材料带出地表形成的。经历的过程都是渗漏水溶解水泥材料形成 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ，然后被带出地表，在压力降低以及蒸发作用下， $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  浓度达到饱和后分解产生碳酸钙。实际上渗漏水从地层中向大坝下游方向渗流将大部分的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  离子带走了，而这些渗漏水并没有上升到地表。另外，在计算过程中没有考虑左坝渗漏，将渗漏量 502.58 L/s 估计为#2 附近的渗漏量计算的上限值，实际上渗漏量要小于计算值，这样计算得到其他来源的 $\text{CO}_2$  偏小。因此，使用地表析出物计算消耗的 $\text{CO}_2$  含量只是一个保守值，实际消耗的 $\text{CO}_2$  含量远大于 18900 mol。降雨将大气中的 $\text{CO}_2$  以及土壤表面的 $\text{CO}_2$  带到库水当中，但库水<sup>[15]</sup> 作为碳源是全球碳循环中重要的一环，不断的向大气排放 $\text{CO}_2$ ，因此库水全年的 pH 值变化不大，表层库水在与深层库水交换过程中被带到大坝深部的 $\text{CO}_2$  是有限的。由于库水主要来源于上游的冰雪融水汇集，上游山体植被稀疏，能



由降雨带到库水中的有机质很少, 可以排除通过有机质分解产生大量的  $\text{CO}_2$ 。<sup>#2</sup>附近的渗漏水6年消耗的  $\text{CO}_2$  含量中, 只有 13.4%~45.9%的  $\text{CO}_2$  由大气降水所带来, 其余 54.1%~86.6%的  $\text{CO}_2$  另有来源。石慧馨<sup>[16]</sup>举例阐述了中国碳酸水出露点的分布并探讨了二氧化碳的来源, 发现昆仑—川滇带由于强烈的新构造活动与深大断裂、岩浆活动在四川地区分布着碳酸水出露点, 据此推测这些  $\text{CO}_2$  来源于地层深部。

大坝位于青藏高原东缘的川西高原, 60~50 Ma 以来, 由于印度板块和亚洲板块发生碰撞, 至今印度板块仍以 44~50 mm/a 的速率往北推进, 俯冲到亚洲大陆之下, 导致喜马拉雅山崛起, 青藏高原隆升, 最终形成青藏高原<sup>[17]</sup>。插入到欧亚大陆板块之下的印度板块上有碳酸盐, 碳酸盐等在高温下分解成  $\text{CaO}$  与  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2$  通过断裂带上升到岩石圈中形成碳库, 碳库中的  $\text{CO}_2$  通过河道下部的活动断裂层不断地向地表释放, 大量的  $\text{CO}_2$  溶解到地下水中。研究发现该区域温泉出口处有泉华沉淀, 不断有气体从泉水中释放出来, 逸出气体中  $\text{CO}_2$  含量在 90%~102%之间<sup>[18]</sup>。类似情况在川西高原很常见, 笔者观察到有些井水定时喷气喷水。

坝基防渗墙的化学溶蚀破坏影响了大坝本身的渗流场分布, 渗流过程中随着坝体和坝基中物质的流失, 在渗漏点上流体应力集中, 孔隙水应力增加, 土体的有效应力降低, 形成管涌或流砂破坏。同时地下水在坝基岩体介质和裂隙内流动会与周围岩土体发生水岩反应、离子交换, 反应物顺水流流动, 从而将径流路线上的岩土体逐渐溶蚀, 进而影响化学场。

上述研究表明, 青藏高原东缘的川西高原地区, 深部  $\text{CO}_2$  通过断裂带向地表释放, 由于大坝修建在河道之上, 这些河道基本上都是在断裂带上, 地质学有: “十沟九断”或“逢沟必断”的说法, 暗示着大型山沟河道下部广泛分布着断裂构造。该坝在建坝前通过浇筑非全封闭悬挂式防渗墙对河道下部的破碎带进行了加固处理, 一般来说, 这种处理方法即不增加防渗墙的施工难度, 又能达到防渗目的, 对大坝的安全性不会产生很大的影响, 这是因为库水主要来自大气降水, 而大气降水中所溶解的  $\text{CO}_2$  含量有限, 化学溶蚀作用要经历较长的时间。大气中的  $\text{CO}_2$  的浓度为 0.04%, 在温度 20℃、1 个标准大气压条件下, 1 升水中溶解的气体为 18.68 mL, 其中  $\text{CO}_2$  的含量为 0.007472 mL, 于是溶解在水中的  $\text{CO}_2$  质量=0.007472 mL÷22.4 L/mol×44 g/mol=0.015 mg。但是对该大坝而言, 大坝底部存在深部碳源, 大量深部  $\text{CO}_2$  进入库水并参与渗流过程, 化学溶蚀的速度达到了正常大坝化学侵蚀速度的 1~2 个数量级。

渗流对大坝的化学侵蚀作用已经影响到大坝及水工建筑物的安全, 例如, 丰满水库水经过坝体和坝基渗透后, 对坝体混凝土及坝基水泥帷幕产生了侵蚀。丰满水库 1943 年开始蓄水, 多年平均坝体混凝土溶蚀约 9.6 t, 坝基溶蚀约 8.0 t<sup>[19]</sup>。大坝 2008 年开始蓄水, 2013 年已经在地表发现了大量的析出物, 能够留在地表的碳酸钙沉积物仅是一部分, 因为大部分离子被水流带走了。对比分析可知, 在深部  $\text{CO}_2$  参与下, 化学溶蚀速度将大幅度提高, 若不及时处理, 大坝会形成集中渗漏通道, 坝基的稳定性下降, 渗漏通道向上部发展影响到坝体结构, 这对大坝的安全运营是有较大影响, 并且有较多库水流出, 大坝的经济效益也会有所降低。因此必须要对其做适当处理, 防止或减弱该类侵蚀的进一步发展。

## 4 结 论

(1)位于青藏高原东缘川西高原的某水库自蓄水以来坝体渗漏量一直超过设计值, 高水位下库水绕过坝基及两坝肩渗漏到坝后区。氯离子示踪、温度电导示踪以及人工示踪试验证实, 大坝下防渗墙中存在不封闭带, 库水通过防渗墙中不封闭带渗漏到反滤层中溢出地表。

(2)左坝后地表的白色颗粒物大部分为碳酸钙沉积, 根据渗漏通道位置推断  $\text{CaCO}_3$  来自于防渗墙中不封闭带, 水泥中的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  被水中的  $\text{CO}_2$  溶蚀成为  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$ , 防渗墙中不封闭带遭化学侵蚀。根据地质构造推断, 其中 54.1%~86.6%的  $\text{CO}_2$  来自于深部碳库, 这些  $\text{CO}_2$  是造成化学侵蚀的主要原因。

(3)深部的  $\text{CO}_2$  对大坝的侵蚀很严重, 比正常大坝化学侵蚀的速度大幅度增加, 地下水中  $\text{CO}_2$  储存丰富的地区, 坝体以及水工结构物建造必须考虑  $\text{CO}_2$  的快速溶蚀作用。

## 参考文献:

- [1] 黄胜方. 土石坝老化病害防治与溃坝分析研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007: 4 - 24. (HUANG Sheng-fang. Aging disease control of earth-rock dam and break analysis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007: 4 - 24. (in Chinese))
- [2] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉, 等. 论岩体多场广义耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1329 - 1340. (ZHOU Chuang-bing, CHEN Yi-feng, JIANG Qing-hui, et al. On generalized multi-field coupling for fractured rock masses and its applications to rock engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1329 - 1340. (in Chinese))
- [3] 王 媛. 单裂隙面渗流与应力的耦合特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 3 - 87. (WANG Yuan. Coupling

- Characteristic of stress and fluid flow within a single fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(1): 83 - 87. (in Chinese))
- [4] 李旭春, 张国立. 环境水对回龙山水电站水工建筑物侵蚀的研究[J]. 海河水利, 2002(3): 37 - 38. (LI Xu-chun, ZHANG Guo-li. Environmental Water Erosion of hydraulic structures in Huilongshan hydropower station[J]. Haihe Water Resources, 2002(3): 37 - 38. (in Chinese))
- [5] 林和振. 大坝环境水潜蚀作用与防治对策[J]. 吉林水利, 2006(4): 17 - 18. (LIN He-zheng. Erosion Action by environment water to the dam and its countermeasures of prevention and control[J]. Jilin Water Resources, 2006(4): 17 - 18. (in Chinese))
- [6] 宋汉周, 施希京. 大坝坝址析出物及其对岩体渗透稳定性的影响[J]. 岩土工程学报, 1997, **19**(5): 16 - 21. (SONG Han-zhou, SHI Xi-jing. Precipitation at dam site and its influence on rock mass permeability stability[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, **19**(5): 16 - 21. (in Chinese))
- [7] 宋汉周, 朱旭芬, 彭 鹏, 等. 坝址渗水析出物及其潜在影响研究[J]. 水利学报, 2011, **39**(4): 454 - 460. (SONG Han-zhou, ZHU Xu-feng, PENG Peng, et al. Study on seepage colloidal educts of dam and its potential effects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, **39**(4): 454 - 460. (in Chinese))
- [8] 王 涛, 陈建生, 王 婷, 等. 熵权-集对分析模型探测堤坝渗漏[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 2136 - 2143. (WANG Tao, CHEN Jian-sheng, WANG Ting, et al. Entropy weight-set pair analysis (SPA) for the dam leakage detection[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(11): 2136 - 2143. (in Chinese))
- [9] WANG T, CHEN J S, WANG T, et al. Entropy weight-set pair analysis based on tracer techniques for dam leakage investigation[J]. Natural Hazards, 2015, **76**(2): 747 - 767.
- [10] DONG H, CHEN J, LI X. Delineation of leakage pathways in an earth and rockfill dam using multi-tracer tests[J]. Engineering Geology, 2016, **212**: 136 - 145.
- [11] 陈建生, 董海洲. 堤坝渗漏探测示踪新理论与技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 51 - 205. (CHEN Jian-sheng, DONG Hai-zhou. Dam leakage detecting tracer new theory and technology research[M]. Beijing: Science Press, 2007: 51 - 205. (in Chinese))
- [12] 杨 虎, 蒋林华, 张 研, 等. 基于溶蚀过程的混凝土化学损伤研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2011, **31**(1): 83 - 89. (YANG Hu, JIANG Lin-hua, ZHANG Yan, et al. Summary of researches on chemical damage of concrete based on leaching process[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, **31**(1): 83 - 89. (in Chinese))
- [13] 张祖莲, 朱汉明. 浅谈啤酒酿造用水中的二氧化碳[J]. 啤酒科技, 2008(3): 18 - 20. (ZHANG Zu-lian, ZHU Han-ming. Discussion on carbon dioxide in beer brewing water[J]. Beer Science and Technology, 2008(3): 18 - 20. (in Chinese))
- [14] 陈 俊, 王鹤年. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 185 - 186. (CHEN Jun, WANG He-nian. Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2004: 185 - 186. (in Chinese))
- [15] 赵小杰, 赵同谦, 郑 华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2377 - 2384. (ZHAO Xiao-jie, ZHAO Tong-qian, ZHENG Hua, et al. Greenhouse gas emission from reservoir and its influence factors[J]. Environmental Science, 2008, **29**(8): 2377 - 2384. (in Chinese))
- [16] 石慧馨. 中国碳酸水出露带分布特征简介[J]. 地震地质, 1979, **1**(2): 88 - 95. (SHI Hui-xin. A note on carbon-dioxide discharging zones and their seismicities in China[J]. Seismology and Geology, 1979, **1**(2): 88 - 95. (in Chinese))
- [17] 许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 等. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 2016(1): 1 - 42. (XU Zhi-qing, YANG Jing-sui, HOU Zeng-qian, et al. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 2016(1): 1 - 42. (in Chinese))
- [18] 杨贤和, 田玉苹. 康定温泉逸出气百分含量突跳与地震对应关系[J]. 四川地震, 2001, **1**(1): 42 - 44. (YANG Xian-he, TIAN Yu-ping. Relative relationship between earthquakes and sudden changes of air content of the hot spring in Kanding[J]. Earthquake Research in Sichuan, 2001, **1**(1): 42 - 44. (in Chinese))
- [19] 朴龙泽, 赵淑明. 丰满大坝渗水对混凝土的溶蚀分析[J]. 水利水电技术, 2000, **31**(10): 34 - 36. (PIAO Long-ze, ZHAO Shu-ming. Corrosion analysis of concrete by water seepage in Plump dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2000, **31**(10): 34 - 36. (in Chinese))