

程峰,苏夏征,周洁军,等.岩溶区尾矿库渗漏机理与综合防治技术:以环江北山铅锌矿尾矿库为例[J].中国岩溶,2017,36(2):242-247.

DOI:10.11932/karst20170212

岩溶区尾矿库渗漏机理与综合防治技术 ——以环江北山铅锌矿尾矿库为例

程峰,苏夏征,周洁军,郭尚其

(中国有色桂林矿产地质研究院有限公司,广西 桂林 541004)

摘要:岩溶区尾矿库渗漏是矿山引发环境污染的主要途径之一,其形成机理复杂、治理难度大,已成为矿业开发中的重大隐患。岩溶区尾矿库渗漏是复杂的、多因素共同作用的结果。渗漏虽然受多种因素的影响,但其发生主要是由上部附加应力作用、下部岩溶发育程度和地下水侵蚀(掏蚀)作用3个影响因素决定。文章在总结和分析前人研究的基础上,结合北山铅锌矿尾矿库最新调查成果,通过调查分析尾矿库的地质构造、岩溶发育特征、工程地质条件、水文地质条件等因素,对影响尾矿库渗漏的3个主要因素逐一分解,研究了深层与浅层渗漏的形成机理与破坏机制,结果表明尾砂堆积、高水头压力等产生的附加应力导致了库底岩土体支撑应力的破坏,频繁、大幅度的水位波动以及地下水侵蚀(掏蚀)作用产生的负压效应引发岩溶管道的连通,是导致尾矿库渗漏的主要原因。通过螺栓堵塞技术、配制有机充填材料封堵渗漏通道、地下水引流、坡面防护等措施对渗漏区进行了治理,取得了较好的防渗效果。

关键词:岩溶区;尾矿库;渗漏;防治技术

中图分类号:TV649;X758

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2017)02-0242-06

0 引言

尾矿库渗漏问题一直以来都是矿业开发中较为棘手的难题之一,尤其是岩溶区有色金属矿山尾矿库的渗漏,很容易造成地表水、地下水的污染,引发地质环境的恶化,对周边居民的生活造成严重影响,是矿业开发中急需解决的环境问题。国内外对岩溶区尾矿库渗漏机理研究取得了一些有益的成果,蒋海飞等^[1-2]研究认为,高压孔隙水压力作用时会导致岩石发生蠕变,造成岩石裂隙面扩展,引发渗漏通道的形成,但对地下水的诱发机制未进行深入的研究。郭印同等^[3-5]研究表明尾矿库渗漏的影响因素除了地质条件、构造条件以及水文条件之外,还与尾矿堆积产生高附加应力有关,但未阐明高附加压力的作用机理。另外在渗漏治理技术研究方面,目前还主要是采

用传统帷幕灌浆的工艺方法进行堵漏施工,但由于采用的水泥注浆材料凝固距离与时间不能得到有效的控制,致使浆液流失问题得不到解决,造成了很大的浪费^[6-8]。本文以北山尾矿库为研究对象,通过库区地质资料分析与调查,对尾矿库渗漏的诱发机制进行了研究,揭示了尾矿库渗漏的诱发机理,阐述了高压击穿应力层引发渗漏的理论依据,并根据该理论分析岩溶区尾矿库渗漏的途径与方式,研发螺栓堵塞技术与有机材料充填技术等防渗措施对尾矿库进行治理。

1 尾矿库基本概况

1.1 工程基本概况

北山尾矿库位于环江县驯乐镇上朝村下平洞屯东北约1.8 km处,库区为四面环山的岩溶洼地。库

基金项目:国家自然科学基金项目(51309055,11372078)

第一作者简介:程峰(1981-),男,博士,高级工程师,主要从事岩土工程、工程地质的研究工作。E-mail:chf46629@126.com。

收稿日期:2016-04-26

底原始标高约为+383.7 m,设计回填最大标高+460 m,回填高度最大为7.6 m,尾矿库长约400 m,宽约250 m,总库容约515万 m^3 ,设计使用年限40年。1993年9月建成并使用至今,现库内尾砂已堆填至标高+415~+416 m,最大堆填厚度约32 m。根据库区工程地质物理探测、水文地质勘察资料^[6-7],该尾矿库库底北东及南东部山脚发育有构造裂隙,洼地底发育有消(落)水洞。建库时库底的消水洞及库岸四周作了防渗处理,周边防渗土工膜铺至标高406 m。2008年当尾砂堆填至标高400 m时,即回填高度为16 m时,库区东南面标高约395 m处库岸发生

岩溶地面塌陷,并有尾矿砂及渗滤液通过岩溶裂隙(管道)向大环江下游渗漏,污染了环江水质,根据水文地质调查报告^[7],其影响范围已波及到下游8 km的地段。

1.2 工程地质概况

根据库区的钻探资料^[9-10]揭露与现场调查,尾矿库出露的岩石为上泥盆统融县组(D_3r)灰岩夹白云质灰岩分布,上覆第四系土层分布不连续。地层自上而下主要有素填土、粉质粘土、砂岩、灰岩。尾矿库地质剖面图见图1。

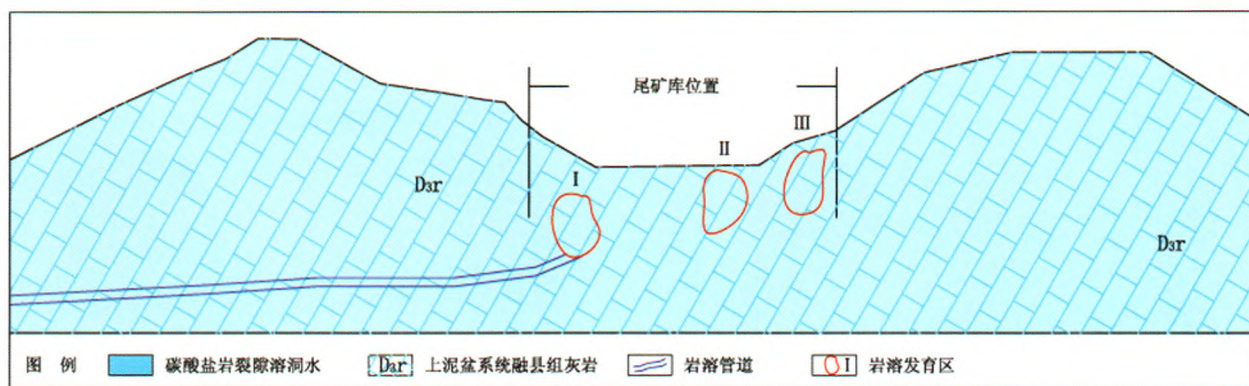


图1 尾矿库地质剖面图

Fig.1 Geological section of tailing pond

1.3 地质环境及岩溶发育情况

库区主要属于岩溶峰丛洼地地貌,库区东面、东南面属低山地貌。库区四面环山,山顶标高+693.0~+752.0 m,原库底标高约为+383.7 m,高差300~400 m,山体自然坡度 $30^\circ\sim 60^\circ$,北、西、南面灰岩裸露,东面山体有砂岩、页岩层露头。灰岩山体植被茂盛、杂草丛生,砂岩、页岩组成的低山丘陵植被多为人工种植的速封林。

1.3.1 水平方向岩溶发育特征

据库区24个钻孔资料,遇溶洞的钻孔为13个,钻孔遇洞率为44.8%,线岩溶率为3.5%。溶洞发育高度0.40~22.50 m,平均高度4.05 m。根据工程物探资料,在面积为0.134 km^2 的尾矿库库底曾发育有2个消水洞、6个落水洞和8个溶洞,区间地段面积约1.0 km^2 内地表岩溶发育密度已达到6个/ km^2 ,为岩溶强烈发育区。岩溶发育受构造带方向影响明显,消水洞、溶洞和断层走向大致相同,深部岩溶发育以管道型为主,形成有水溶洞通道式的强岩溶发育带。

1.3.2 垂向上岩溶发育特征

根据钻探揭露的24个溶洞按其发育高程划分,地面以下溶洞大致可划分为4段。(1)标高400 m以上,遇溶洞9个,占溶洞总数的37.5%,无充填溶洞2个,占该段溶洞总数的22.2%。(2)标高350~400 m,遇溶洞9个,占溶洞总数的37.5%,空溶洞7个,占该段溶洞总数的77.8%。(3)标高300~350 m,遇溶洞6个,占溶洞总数的23.1%,空溶洞1个,占该段溶洞总数的16.7%。(4)标高300 m以下未遇溶洞。钻孔揭露溶洞底板标高最深为300.70 m。

1.4 尾矿库渗漏途径情况

根据尾矿库水文地质勘察报告等^[9-10]资料,尾矿库钻孔水位观测的水位标高为300.87~414.66 m,水位变化很大。根据钻孔揭示岩溶发育情况将库区内划分为3个岩溶强发育区,每个区均存在一个地下水水位低点,其中Ⅰ区为300.87 m,Ⅱ区为341.87 m,Ⅲ区为365.89 m,为地下水的集中汇流点。根据地下水水位高低判断地下水流向为Ⅱ区、Ⅲ区地下水集中汇流后,沿西—东向的岩溶管道径流运动至Ⅰ

区,转往北流向的地下岩溶管道,并通过有水溶洞出口流向环江,见图 2。

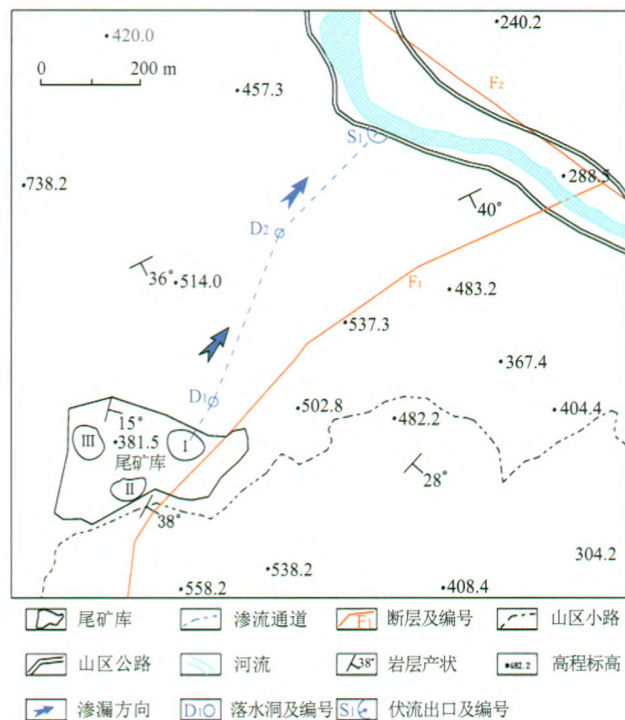


图 2 尾矿库渗漏主要通道示意图

Fig. 2 Sketch map showing principal channels of tailing leakage

2 渗漏条件与机理分析

2.1 尾矿库渗漏诱发的基本条件

2.1.1 岩性条件

库区及周边岩溶发育较强地段的地层为上泥盆系统融县组 (D_3r), 岩性为灰白色、中厚层状灰岩。该岩体受断裂影响, 节理裂隙发育, 岩溶发育受裂隙或断裂带方向控制, 岩体中的溶蚀裂隙、溶洞等发育明显, 溶洞内一般有第四系粘土充填物, 溶洞大小为 $0.5 \sim 22.5$ m, 为渗漏提供了通道。

2.1.2 地下水条件

库区地下水补给来源渠道多, 主要为大气降水、尾砂水。地下水水量丰富, 水位变幅大, 变幅一般为 20 m 左右, 对库岸与库底岩溶发育起到了较大促进作用。建库时虽已对尾矿库底消水洞、落水洞进行了防漏回填, 但由于地下水频繁波动作用使得回填裂隙溶洞遭到了不同程度的侵蚀破坏。

2.1.3 尾砂堆积条件

尾矿库自使用以来, 每年堆积的高度基本都以

$2 \sim 3$ m 增长, 目前堆积高度已有 42 m。尾矿库初期运行时, 尾砂堆积厚度较低, 在厚度小于 20 m 时, 尾矿库处于正常运行阶段, 未出现渗漏情况。当尾矿堆积超过 20 m 后, 库底东南库岸 395 m 处下面发生岩溶塌陷, 尾砂液向下泄露, 并通过岩溶裂隙、管道渗漏到下游的大环江。

2.2 渗漏机理分析

根据尾矿库的渗漏基本条件与尾砂排放等影响因素分析^[11-12], 尾矿渗漏的机理主要有以下几个方面:

(1) 断裂带构造作用, 使尾矿库下部溶蚀裂隙、溶洞等较发育, 提供了渗漏基本途径;

(2) 库区地下水位标高为 $300.87 \sim 414.66$ m, 地下水水量丰富, 变幅大, 变幅一般为 20 m 左右。频繁、大幅度的水位波动, 导致上覆岩土体层被侵蚀(掏蚀), 形成的负压效应^[13-14]引发库底岩土体层的塌落破坏;

(3) 库底原始标高 $+383.7$ m, 当尾矿堆积高度到 395 m 处时, 堆积高度达到 11.3 m, 根据勘察资料库底溶洞距地面高度为 7.5 m, 此时形成的水头压力与尾砂堆积的附加应力, 远大于土工布与岩土体共同作用形成的应力, 因此尾砂及地下水易形成水头压力叠加堆填附加应力大于库底岩土体的抗击穿强度, 击穿了防护层, 引发库底土工布与岩土体支撑面的应力损伤破坏; 导致底部溶洞应力层支撑作用丧失, 从而引发渗漏渠道的贯通;

(4) 地下水与尾矿液渗漏到底部岩溶通道后, 其侵蚀作用使得渗漏渠道不断地得到扩展, 与下游天然岩溶管道实现了贯通, 使渗漏途径延伸至下游环江口, 导致渗漏污染范围不断扩大。

3 治理技术方案与工艺

3.1 治理技术方案

根据尾矿库渗透机理可知, 尾矿库底部由于高压击穿作用, 导致底部岩土体支撑应力层发生了破坏, 造成裂隙与岩溶管道连通后发生了管道渗漏。因此如何切断库区地下水和大环江的水力联系, 封堵渗漏渠道, 提高库底岩土体支撑应力是解决库区渗漏问题的关键。经综合分析后, 提出尾矿库的综合治理方案如下: 深部渗漏采用钻孔注浆, 形成防渗幕墙, 封堵岩溶渗漏通道; 浅部修建排洪隆道对尾矿地表水进行引流, 防止尾砂水与雨水累积形成高压附加压力, 浅部

坡面防渗主要采用平整坡面、混凝土裂隙封堵、粘土充填、土工布隔断、修建地表截排水沟分流等措施,治理标高范围+383.7 m—+460 m。

(1)尾矿库深层渗漏治理

首先对岩溶渗漏管道地下水流速进行控制,防止水流过大影响浆液流失,方法是采用大口径钻孔在岩溶通道前部开孔,孔径为 200 mm,钻孔形式采用梅花状,钻孔间距 1.5 m,然后通过钻孔灌入砂砾石,砂砾石直径不大于 10 cm。该工序完成后会形成了管道阻塞段,通道的水流流速会明显降低;在尾矿库库岸处进行小口径的钻孔施工,孔径 75 mm,孔距 2~3 m,钻孔完成后进行高压注浆施工,上述施工后可形成前封后堵的幕墙与螺栓式封堵体,有效的阻断了岩溶管道的渗流路径。

(2)尾矿库浅层防渗治理

浅层治理的范围为库区标高 460 m 以下地段,方法主要采用库岸清表,坡面平整,裂隙封堵等措施。具体如下:砍伐库岸边的高大植被,刨除树根,清理杂草,用块石、浆砌石等封堵较大裂隙及溶洞,小的裂隙

及破碎带采用素混凝土灌注,对于坡面起伏较大地段采用混凝土喷射平整,达到满足铺设土工布要求为止,粘土覆盖夯实,最后采用两布一膜的要求铺设土工布,土工布采用有纺过滤土工布、长丝土工布,防渗膜采用 HDPE 防渗膜,两布一膜铺设高度按尾矿库使用库存要求进行,预留 2~3 年的储存量。最终铺设达到堆积标高 460 m 处,具体见图 3。

(3)截排水工程设计

目前库区内地表排水以自然排泄为主,没有截排水设施,为防止雨水、尾砂水进入尾矿库后,形成高压水头压力,对尾矿库防渗产生不利影响,须进行尾矿库外围截排水沟和排水隧道的建设,以降低库区的水位,防止地下水排泄口形成高压水头破坏库底岩土体应力层的稳定。根据库区防渗要求,设计一条排洪隧道并与雨水截流通道相连接,将尾矿库中的尾砂水、截留雨水通过排洪隧道回收到矿山污水处理厂处理,一部分用于矿山循环利用,一部分沉淀达标后外排。这样不仅可以防止雨水进入库区,减少尾矿库废水下渗的风险,还可以节约用水。

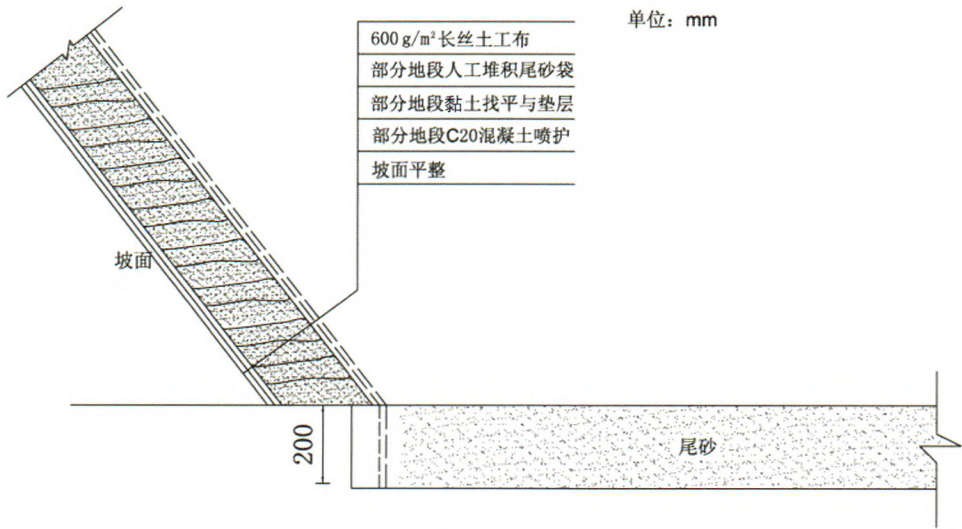


图 3 库区岸坡防渗结构图

Fig. 3 Diagram showing impervious structure of bank slope in reservoir area

根据尾矿库地形条件,先在库区东南侧修建一条排洪隧道,与污水处理厂相连,采用爆破掘进方式施工。库区西北侧为灰岩山体,岩石出露,无第四系覆盖层,此地段不宜修建排水沟。库区东南侧为碎屑岩地段,山体被第四系覆盖厚度较大,可在此地段修建集排水沟。设计在地形较好的进入库区的道路内侧设置集排水沟,排水沟的出水口与修建的排洪隧道相连接。

3.2 施工顺序

根据工程设计内容及项目特点,工程施工按照先下后上、先局部后整体的顺序进行,具体如下:

(1)首先配制有机充填注浆材料,根据凝固距离选择合适的配比方案,有机材料主要成分为环氧固化剂(二氨基二苯基甲烷)、稀释剂(二乙二醇—乙醚),比例为 1:1。有机充填材料与水泥浆的配比需经试验确定,并对其进行强度与腐蚀性试验,以获得最优

的配合比,经凝固距离试验以及强度与腐蚀性试验后,最终确定有机充填注浆材料的配合比为 1:2.5。满足工程防渗要求;

(2)大口径钻孔施工进行前端螺栓封堵,采用小孔探测,辅以雷达与井下电视观测确定通道位置。大口径钻头扩孔后,灌注砂砾石材料,形成前部管道封堵段,保证浆液能够在通道内有效固结;

(3)在库内渗漏通道左右进行引孔施工,孔距适当放大,通过物探 CT 扫描,确定孔与孔之间的渗漏渠道情况,如存在异常,则需要补孔,为防止钻孔塌落,需要在孔内放置 PVC 管进行护壁;

(4)所有注浆孔完成后进行注浆施工,采用先深部后浅部的顺序进行,每次注浆深度控制在 15m,并进行观测试验,在尾矿库渗漏处添加颜料,在下游进行观测,确保注浆后尾矿库的管道渗漏得到有效的控制;

(5)在库区边界征地标高范围内修建一条截水沟,三条排水沟,并将排水沟与排洪隧道相连,使外围积水汇集到尾矿库后迅速排走,降低雨水补给,并防止尾矿库积水形成高压水头击穿下部通道;

(6)对尾矿库库岸进行清表,平整,采用块石填充较大的裂隙、溶洞,并用粘土进行覆盖夯实,对于坡面岩石较破碎或裂隙发育地段采用混凝土喷射整平,达到平整要求后,进行土工布防渗膜铺设的施工;

(7)整个施工过程需要监测,监测内容主要包括渗漏点的水质变化、渗漏通道治理效果,其他可能存在的渗漏途径等。

经上述工程治理后,尾矿库渗漏的情况得到了有效的控制。根据治理前后的渗漏量比较可知,治理前在尾矿库内可以看见明显的塌陷,下游环江岸边出口处每天有数十方的尾砂流出来,并伴有强烈的臭味,出水口水质经检测严重超标;治理后尾矿库内未见有塌陷点,下游环江岸边出口处未见有尾砂渗漏,水质检测也达到标准,表明该治理技术具有较好的防渗漏效果,其技术成果可在类似工程中推广使用。

3.3 讨论

岩溶区尾矿库的渗漏一直是环保工程领域较为棘手的问题,一直以来也未形成有效地防治体系。目前在渗漏机理与防治技术方面还存在很多欠缺,主要表现为渗漏机理的理论研究成果较少、防渗漏材料的研发缺乏,治理工艺复杂,防渗效果不好等问题。目前工程领域所采用的防渗漏技术虽然在一定程度上起到了防渗效果,但由于施工过程不能够得到有效的

控制,浆液流失问题未能有效地解决,造成较大的材料浪费。传统的无机材料由于凝固时间不能得到控制,其裂隙充填率较低,注浆效果不能得到保证。本文所采用的大口径钻孔螺栓堵塞技术有效地解决了地下水流速过快的问题,防止了浆液流失;所研发的有机充填注浆材料可以有效的控制凝固距离,施工过程更容易控制,与传统的材料相比,充填与凝固效果好,防渗性能更强,且施工工艺简单,大大节约了治理费用。

4 结论

(1)尾矿库受岩性条件、断裂带构造作用,其下部溶蚀裂隙、溶洞等较发育,提供了渗漏基本途径;长期的水头压力作用与地下水侵蚀,导致底部溶洞应力层支撑的破坏,从而引发渗漏渠道的贯通;

(2)尾砂及尾砂液堆积所形成高压附加应力与高水头压力,击穿了土工布的防护,引发库底岩土体支撑面的应力损伤破坏;地下水与尾矿液的侵蚀作用,使得渗漏渠道不断地得到延伸、扩展,导致渗漏污染范围不断扩大;

(3)尾矿库治理采用钻孔注浆封堵下部岩溶通道+喷射混凝土+尾砂袋墙+土工布+地下水引流+地表截排水分流等综合措施,并采用先下后上、先整体后局部的顺序施工,取得了较好的工程效果。

参考文献

- [1] 蒋海飞,刘东燕,黄伟,等.高围压下不同孔隙水压作用时岩石蠕变特性及改进西原模型[J].岩土工程学报,2014,36(3):443-451.
- [2] 郭富利,张顶立,苏洁,等.地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(11):2325-2332.
- [3] 孙春东,姜福兴,刘懿,等.超高水开放式充填开采围岩破裂的微地震监测[J].岩石力学与工程学报,2014,33(3):475-483.
- [4] 郭印同,杨春和,贾长贵,等.页岩水力压裂物理模拟与裂缝表征方法研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(1):52-59.
- [5] 李世平,李玉寿,吴振业.岩石全应力应变过程对应的渗透率-应变方程[J].岩土工程学报,1995,17(2):13-19.
- [6] LI Quan-ruing, YUAN Hui-na, ZHONG Mao-hua. Safety assessment of waste rock dump built on existing tailings ponds [J]. J. Cent. South Univ., 2015, 22: 2707-2718.
- [7] 任旭.某铅锌尾矿库对地下水环境影响及防治措施[J].地下水, 2015, 37(2): 91-95.
- [8] 朱正环.预设排渗系统降低某尾矿库浸润线[J].现代矿业, 2015, 550(2): 142-145.
- [9] 欧智声,王尤凯,廖培涛,等.广西北山矿业发展有限责任公司尾

- 矿库水文地质勘察报告[R]. 广西水文地质工程地质勘察院, 2014.
- [10] 戴前伟,严家斌,贺文根,等. 广西北山铅锌矿尾矿库渗漏地球物理探测报告[R]. 中南大学地质调查院,2013.
- [11] Allege C J, M ouel J L L, Provost A. Scaling rules in rock fracture and possible implications for earthquake prediction[J]. *Nature*, 1982, 297: 47-49.
- [12] Smalley R F, Turcotte D L, Solla S A. A renormalization group approach to the stick slip behavior of faults[J]. *J Geophys Res*, 1985, 90: 1894-1900.
- [13] 王秀英,谭忠盛,王梦恕,等. 山岭隧道堵水限排围岩力学特性分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(1): 75-80.
- [14] 彭苏萍,孟召平,王虎,等. 不同围压下砂岩孔渗规律试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(5): 742-746.

Leakage mechanism and comprehensive prevention control technology of tailing pond in karst areas

CHENG Feng, SU Xiazheng, ZHOU Jiejun, GUO Shangqi

(*China Nonferrous Metals (Guilin) Geology And Mining Co. Ltd, Guilin, Guangxi 541004, China*)

Abstract The tailing pond leakage in karst area is one of the main reasons which cause environment pollution by mining. Because the impact mechanisms are complex and the governance is difficult, it has become a major hidden danger in mining development. This work took the tailing pond of the Beishan lead-zinc mine as the research area. The formation and failure mechanisms of deep and shallow leakage were studied through investigating and analyzing the geological structure of tailings, karst development characteristic, engineering geologic conditions, hydrogeological conditions and other factors in the karst area. The results show that the main reason of tailing pond leakage is the bottom rock-soil mass penetrated by high voltage. The leakage areas are harnessed by bolt plugged technique, leak paths sealed by organic filling materials, groundwater diverted, slope surfaces protected, among other measures. After engineering treatment, it proves that the anti-seepage result of the leakage area is good.

Key words karst area, tailing pond, leakage, control technology

(编辑 张玲)