

我国西南尾矿库区岩溶特征及防渗研究进展

田 帅^{1,2} 胡振琪^{1,3} 李社锋⁴

(1. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所,北京 100083;2. 保定理工学院资源与工程技术学院,河北 保定 071000;
3. 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州 221116;4. 中冶南方都市环保工程技术股份有限公司,湖北 武汉 430205)

摘 要 西南地区是我国重要的矿产资源产地。在长期开采过程中,该区域形成规模不等、数量众多的尾矿库;同时,西南地区灰岩广布,在气候等要素的综合作用下,发育了溶洞、落水洞、裂隙等,极易造成区域尾矿库的渗漏,影响尾矿库的安全,对当地地表与地下水、土壤、生物等造成严重的危害。本研究以我国西南地区Ⅱ类尾矿库为研究对象,总结分析了尾矿库区岩溶洼地、漏斗(落水洞/竖井)、裂隙、溶洞等主要岩溶渗漏类型及形态特征;从岩性、地质构造、水文、地形地貌因素对尾矿库区岩溶发育机制进行了探讨;最后,从岩溶地基防渗技术、库底复合防渗工程技术对尾矿库防渗进行了研究。本研究对我国西南岩溶发育下的尾矿库区防渗分析具有一定的参考价值。

关键词 尾矿库 岩溶 机制 防渗 西南地区

中图分类号 TD926

文献标志码 A

文章编号 1001-1250(2022)-02-185-09

DOI 10.19614/j.cnki.jsks.202202025

Research Progress on Karst Characteristics and Seepage Prevention of Tailings Reservoir Area in Southwest China

TIAN Shuai^{1,2} HU Zhenqi^{1,3} LI Shefeng⁴

(1. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. College of Resources and Engineering Technology, Baoding University of Technology, Baoding 071000, China;
3. School of Environment Science and Spatial Information, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
4. China City Environment Protection Engineering Limited Company, Wuhan 430205, China)

Abstract Southwest region is an important mineral resource producing area in China. In the long-term mining process, a large number of tailings reservoirs with different sizes are formed in this area. Moreover, limestone is widely distributed in southwest China. Under the comprehensive action of climate and other factors, karst caves, swallow holes, fissures, and so forth are developed, which can easily cause leakage of regional tailings reservoirs, affect the safety of tailings reservoirs, and cause serious harm to local surface and ground water, soil and organisms. Taking the Ⅱ tailings reservoir in southwest China as an example, this paper summarized and analyzed the main karst seepage types and morphological characteristics of karst depression, funnel (swallow hole / shaft), fissure, karst cave, etc. The karst development mechanisms in tailing reservoir area were discussed from lithology, geological structure, hydrology, topography and geomorphology. Finally, the seepage preventions of tailings pond were studied from the seepage prevention technology of karst foundation and the composite seepage prevention engineering technology of reservoir bottom. This paper has a certain reference value for the study of seepage prevention of tailings reservoir area under karst in southwest China.

Keywords tailings reservoir, karst, mechanism, seepage prevention, southwest China

我国西南地区位于 97°21′~110°11′E, 21°08′~33°41′N 之间,包括四川、云南、贵州、重庆、西藏五省(直辖市、自治区),面积达 234.2×10⁴ km²,约占全国面积的四分之一,是我国七大自然地理分区之一^[1]。该区域矿产资源丰富,据相关统计,已发现矿种 155

种,有探明储量的矿产资源约 90 种,其中有色金属约占全国储量的 40%;部分矿种储量巨大,如四川钒、钛,云南铅、锌、锑,贵州省磷矿与金矿等^[2]。该区域共发现各种矿产地 11 000 余处,大、中型以上规模的矿床产地约 1 000 处^[3],是我国有色金属工业发展和

收稿日期 2021-10-08

基金项目 “十三五”国家重点研发计划项目(编号:2018YFC1801704)。

作者简介 田 帅(1981—),男,讲师,博士研究生。通讯作者 胡振琪(1963—),男,教授,博士,博士研究生导师。

战略储备的重要基地^[4]。以丰富的矿产资源为基础,矿业开发已经成为西南地区重要产业之一^[5]。

在矿产资源开采中,因广泛采用浮选等选矿工艺,生产过程产生了大量颗粒细、含水份高的尾矿砂,并通过泵送湿排的形式堆存于尾矿库中。尾矿砂在尾矿库中呈饱水状态,渗滤液 Ph 值为酸性/碱性,含有相应的铅、锌、镉、砷、银、汞、有机物等有毒有害物质,使得尾矿库对周边土壤、水、生物等存在巨大的环境污染隐患^[6-10]。同时,西南地区也是我国岩溶集中分布地区,发育形成了岩溶裂隙、落水洞、溶洞、地下河(暗河)等典型的岩溶地貌;不同类型岩溶地貌或出露于地表或埋藏于地下,其单独或相互作用,存在极大的渗漏风险隐患;选址于此的尾矿库一旦发生渗漏,在岩溶系统作用下,其影响的范围、程度等都远远超过非岩溶区尾矿库污染,对区域水资源、土壤、植被等自然生态环境及社会造成严重的影响及经济损失^[8,11]。因此,对西南岩溶发育尾矿库区进行防渗研究具有重要意义。

本研究以我国西南岩溶发育下的Ⅱ类尾矿库为分析对象,总结分析西南尾矿库区影响渗漏的岩溶地貌类型、形态特征及发育形成机制,并从岩溶地基防渗技术、库底复合防渗工程技术对尾矿库区渗漏防治进行分析,以期对西南岩溶发育下的尾矿库区防渗工作提供参考。

1 区域岩溶及尾矿库概况

1.1 区域岩溶概况

西南地区地形地貌复杂,其中低地盆地、平原、小起伏低山与中山面积较大,超过总面积的 42%;峡谷地形主要分布于横断山区,在河流长期切割作用下,地表起伏、破碎。该区域江河众多,如澜沧江、金沙江、怒江等;同时,受季风环流和复杂地理环境的影响,强降水区域较多,如重庆大部、四川盆地、贵州大部及云南南部等。地质构造方面,在地质历史时期,西南地区海相沉积形成了广布的石灰岩;同时,该区属于特提斯造山带的一部分,经历了强烈的构造运动,地质构造复杂^[4]。

在地形地貌、气候、地质构造运动等共同作用下,经过漫长的时间,西南地区发育形成了我国面积广大的典型的岩溶地貌,主要岩溶地貌类型如岩溶裂隙、石芽、石林、峰林、溶沟、漏斗、天坑、落水洞等,集中分布于贵州和云南东南部等区域。西南地区岩溶地貌的特征及发育程度差异较大,如岩溶类型方面,贵州高原多为裸露型、四川盆地为埋藏型岩溶等,其原因主要为各地区岩溶发育条件的差异^[12],以及构造、岩性、气候、水文、土壤等综合影响而产生的直接作用方

式和强度^[13]。

岩溶是一种不良地质现象。在长期的流水作用下,以碳酸岩为主的可溶性岩石经溶蚀、冲蚀、潜蚀、崩塌等形成了地表、地下复杂的水循环系统。地表水通过地面出露及隐伏的岩溶裂隙、漏斗、落水洞等进入地下溶洞、暗河,对工程防渗造成巨大的隐患,严重影响其安全性^[14-15]。

1.2 区域尾矿库概况

尾矿库是指筑坝拦截谷或围地构成的、用以贮存矿产开采选矿后排出的尾矿或其他工业废渣的场所^[8,16-17]。根据《GB 50863—2013 尾矿库设施设计规范》,因堆存尾矿性质的不同,尾矿库分为 3 种类型:Ⅰ类库、Ⅱ类库、危险废物库。Ⅰ类库堆积物对外界环境无污染,不需要进行防渗处理;Ⅱ类库为堆存一般工业固体废物的尾矿库,其堆存的尾矿对周边环境具有一定的危害,需要采取防渗措施;危险废物库具有放射性,需要进行特殊处理^[17]。其中,Ⅱ类库是我国西南地区主要的尾矿库类型,在尾矿库防渗中占有重要地位。

据不完全统计,目前西南地区有近千余座尾矿库。因矿产资源普遍富存于山区,尾矿库选址通常结合矿区地形地貌、地层特征,多选址在山间峡谷、盆地等区域,使得我国西南地区尾矿库主要为山谷型尾矿库、傍山型尾矿库两种类型^[18-19]。

西南地区广泛发育岩溶裂隙、落水洞等岩溶地貌,相较于其他地区,渗漏的风险更大;同时,尾矿中大量的重金属离子、有毒有机溶剂等污染物质可能随落水洞、地下暗河等迁移,扩大污染范围,造成更为严重的后果^[6]。如贵州省某钼盐渣场,建于岩溶洼地之上,因沉淀池防渗处理没有做好,导致其与地下岩溶裂隙连通,发生渣场渗漏事故,周围地下水变成白色, Ba^{2+} 、 S^{2-} 浓度增高,当地居民无法饮用^[20]。贵阳市某尾矿库区废液发生渗漏,导致其附近的陆家湾、白水泉、牟老泉等处排泄出的地下水 pH 均大于 10,最高值为 13,总碱度最高为 7 021.6,地下水遭受污染^[21]。云南省楚雄州武定县朱家坝新建尾矿库下伏昆阳群绿汁江组的白云岩基底发育有隐伏断层,形成的岩溶裂隙导致下游一泉水点出现尾矿粉渗漏污染,污染了当地地下水源^[22]。因此,我国西南地区进行相关类型尾矿库建设必须要解决渗漏问题。

2 尾矿库区岩溶形态特征及发育机制

2.1 岩溶地貌形态特征

2.1.1 岩溶洼地

岩溶洼地主要发育及分布于西南尾矿库区地势

低平、峰丛等之间的区域,是最常见的岩溶地貌类型^[19,23-24]。

岩溶洼地规模不一,多呈圆形、椭圆形等,发育于灰岩地层中。吴慧群等^[25]研究表明,岩溶洼地是云南大理大沙地尾矿库地上岩溶的主要形式;其呈月牙状、圆形、椭圆形,面积约900~15 220 m²,大小不一,纵深可达十数米,存在于北衙组、丽江组上段地层中。刘文连等^[24]研究发现,云南个旧老厂五级凹塘尾矿库岩溶洼地包括典型与非典型2类。典型岩溶洼地分布于岩溶峰丛之间,由差异溶蚀形成,边壁较平缓、均匀;非典型岩溶洼地无溶峰围绕,规模较小,分布于沟谷或小型山间盆地内,边壁坡度不均匀,存在断崖式的标高骤降,可能主要受到深部岩溶的驱动。

岩溶洼地多呈规律性定向分布。云南个旧五级凹塘尾矿库岩溶洼地沿沟呈串珠、带状分布;在更大尺度上的分布特征为呈带分布,如背阴山槽谷一线^[24]。付其林^[26]对贵州岩溶石山地区某尾矿库岩溶发育研究也有呈串珠状等类似的结果。

复合型岩溶洼地是岩溶洼地进一步发育、复杂化的结果;受当地地质、地形地貌影响,多出现于规模较大的洼地中。如云南个旧五级凹塘尾矿库地处红河水系与南盘江水系的分水岭地带,区内发育有洼地内嵌套2个或更多洼地的复合型岩溶洼地^[24]。

2.1.2 漏斗(落水洞/竖井)

尾矿库区地表水沿节理裂隙不断向下溶蚀同时伴随塌陷作用,逐渐形成漏斗、落水洞、竖井等垂向岩溶地貌。其多发育于厚层灰岩、白云岩中,有呈条带状分布的特征^[27-28]。3种形式的岩溶地貌均可引起尾矿库的集中渗漏。

漏斗通常是呈口大底小的一种岩溶地貌,直径及深度一般数米至数十米,其底部常有通道与暗河相连^[27]。刘文连等^[24]对云南红河个旧老厂五级凹塘尾矿库研究表明,该尾矿库岩溶地貌发育数个岩溶漏斗,直径7~20 m,深约数米至十米左右,边壁坡度25°~40°左右,边壁形态圆润,底部平坦、多未见基岩,个别有基岩出露。同时,五级凹塘尾矿库亦发育形成有不规则漏斗,其长、短轴相差10 m左右。

落水洞是地表水流入地下溶洞、地下河或深部裂隙的洞穴。其表面形态与漏斗相似,直径与深度为数米至数十米,大小不一,有垂直的、倾斜等形态,如云南金宝山铂钨矿细米家尾矿库区沟谷底部地表^[29]、红河五级凹塘尾矿库^[24]均发育形成有落水洞。部分落水洞分布呈一定的规律,如贵阳市岩溶区某尾矿库区主要发育于二叠系栖霞、茅口组灰岩上,地面竖井状落水洞呈带状、串珠状发育^[21]。

竖井是由落水洞进一步向下发育、地表水进入地下河的垂直通道。蔡良钧等^[28]对贵州扎塘赤泥堆场研究发现,该区域为裸露型岩溶,发育于二叠系下统石灰岩中,其内的岩溶竖井、落水洞达35个/km²,平均深15 m,最深40 m。

2.1.3 裂隙

裂隙是可溶性岩石在构造运动、岩溶等作用下发育形成的常见岩溶地貌类型,是尾矿库区渗漏的重要形式。西南尾矿库区主要分为2种类型:构造裂隙与岩溶裂隙;裂隙大小不等,一般不超过1 m。依据裂隙发育规律,在西南岩溶尾矿库区呈纵向分层的形态特征,如贵州岩溶石山地区某尾矿库,其垂直方向上不同高程处的裂隙发育程度及规模整体呈“上粗下细”的特征^[26]。

构造裂隙发育与断裂构造行迹一致,同时也基本与沟谷发育方向一致。如金宝山铂钨矿细米家尾矿库区主要发育2组优势节理裂隙,3~4条/m,延伸1.0~4.0 m,裂面粗糙平直;裂隙、断裂构造、沟谷三者发育方向基本相同^[29]。构造裂隙在岩溶的作用下进一步发育,使得构造裂隙进一步发育加大,增加渗漏的风险。如王亚明^[30]对西藏玉龙铜矿尾矿库研究表明:其灰岩区节理裂隙在该区良好的岩溶条件下,岩体裂隙规模进一步发育,且裂隙上窄下宽,使得岩体导水性增加。

岩溶裂隙主要在岩溶作用下形成,其规模及影响范围均较小,主要发育于灰岩分布区。雷再云等^[31]对云南文山盘龙河流域的尾矿库研究表明,该尾矿库区以岩溶峰丛洼地地貌为主,四周高中间低,溶蚀裂隙等发育较强烈。张德洲^[32]对玉龙沟尾矿库场区研究发现,其地面发育有较多岩溶裂隙,直径一般不超过1.0 m。

2.1.4 溶洞

溶洞是尾矿库区常见的岩溶地貌类型,常见于尾矿库地下。溶洞大小与发育条件有关,通常情况下大小不一,呈单体分布。吴慧群等^[25]发现云南大沙地尾矿库所在的北衙盆地南部鸡鸣寺—锅盖山一带发育有溶洞,位于三叠系中统北衙组三段地层内,高度约1.2 m,宽度约2 m,面积7.5 m²,其内无地表水汇集。袁胜超等^[33]对西藏某尾矿库库区研究发现,库区左岸坡下伏基岩为灰岩,局部基岩裸露,岩溶发育,存在较大溶洞和大量小溶洞。张德洲^[32]研究表明,玉龙沟尾矿库场区地面溶洞以小溶洞为主,直径一般不超过1.0 m;钻孔与物探分析发现场地溶洞等从几十厘米到几米不等,发育在地面下10~35 m之间。王应科等^[29]研究表明,金宝山铂钨矿细米家尾矿库

区内溶洞直径多数小于 5 m, 溶洞垂直高度 1~5 m, 埋深数米至数十米不等。

研究区溶洞内多有填充物。杨燕等^[34]对云南会泽铅锌渣库研究发现, 该区域溶洞大部分有充填物; 王应科等^[29]研究表明, 金宝山铂钯矿细米家尾矿库区为充填型溶洞, 充填物为含砾粉质黏土和角砾。

2.2 岩溶发育机制研究

2.2.1 岩溶发育的岩性因素

可溶性岩石是岩溶发育的物质基础。西南地区发育形成了大范围可溶性碳酸盐岩石, 为岩溶发育奠定了基础。如贵州省晴隆县花贡镇某尾矿库区为石炭系上统马平组上部为碳酸盐岩, 下部为碎屑岩中泥、粉砂岩, 形成以岩溶峰丛槽谷、洼地等为主的岩溶地貌^[23]。云南省大理市大沙地尾矿库扩容场地岩性主要为灰岩, 地表发育石芽、洼地、沟槽; 在地面以下岩体中溶蚀裂隙和小型溶洞较发育^[25]。

西南尾矿库区不同类型的层状碳酸岩组合形成岩溶层组, 因其各层岩性不同, 发育的含水介质不同, 形成了不同层性质的岩溶类型^[33]。贵州岩溶石山地区某尾矿库灰岩含水介质包括裂隙(溶洞)—管道—裂隙类型组合, 形成落水洞、地表溶洞等^[26]。拉萨墨竹工卡县甲玛沟尾矿库碳酸盐岩地层与其他地层的接触部位岩溶发育程度相对较大, 连通性较好, 局部地段发育溶洞, 主要以赋存碳酸盐岩裂隙溶洞水为主, 富水性较好^[35]。云南武定县朱家坝尾矿库区内主要出露地层为昆阳群绿汁江组不等厚白云岩、泥灰岩等, 在溶解、溶蚀作用下形成裂隙、溶沟、溶槽、溶洞等中等岩溶发育地貌^[22]。

2.2.2 岩溶发育的地质构造因素

2.2.2.1 断裂与岩溶发育

西南岩溶尾矿库区在强烈的构造运动背景下, 断裂构造发育普遍。如贵阳市某尾矿库^[21]、云南大理北衙地区尾矿库^[25]、西藏拉萨甲玛沟尾矿库^[35]等均有断裂发育。岩溶发育程度与断裂力学性质有密切联系, 断裂带为张性, 其岩溶发育程度高; 断裂带为压性, 岩溶发育差或不发育; 扭性断裂带岩溶作用的深度一般较大, 如云南北衙大沙地尾矿库形成有张性断裂, 使得该区内岩溶洼地、落水洞等与其分布一致^[25,36]。

节理是断裂构造带最常见的构造形式, 其发育程度和延伸方向对岩溶的发育程度和形式有决定性作用, 如金宝山铂钯矿细米家尾矿在构造节理的影响下, 岩溶沟谷基本保持与其相同的发育方向^[29]。构造运动造成岩体破碎, 大量节理具有很强的透水性^[25], 促进了岩溶的发展。如云南武定县朱家坝尾

矿库原基岩中的裂隙在溶蚀作用下逐渐变为溶隙通道, 且规模不断扩大^[22]。西藏某尾矿库库区断裂构造发育, 节理裂隙等发育, 形成地下水运移和赋存的通道^[33]。

断层是构造运动中两侧岩体发生相对位移的一种地质构造。断层发育区基岩面起伏较大, 岩体破碎, 多形成富水区及水流通道。工程实践证明, 通常断层通过的可溶岩石地区, 岩溶均较发育。云南大沙地尾矿库区域 11 条断层均为高角度至近于直立的平移断层, 约束了降水入渗路径及岩溶发育空间与方式, 为降水垂向入渗及垂向岩溶发育提供了通道与场所^[25]; 金宝山铂钯矿细米家尾矿库区在南东向至南侧沟谷张性断层的影响下, 发育形成了岩溶地貌类型^[29]。

断裂集中发生地区往往形成断裂带, 因裂隙众多, 连通性更好, 通常是岩溶集中发育且程度相对较大的地段, 常分布有漏斗、竖井、落水洞等。如拉萨墨竹工卡县甲玛沟尾矿库南、北两侧断裂发育地带, 岩溶形态有溶洞和落水洞, 溶洞呈近圆状^[35]; 贵阳市岩溶地区某尾矿库位于区域构造带, 且该区域因背斜核部附近有破碎带, 构造活动较强烈, 岩溶地貌发育^[21]。

2.2.2.2 褶皱与岩溶发育

褶皱是岩体受力后发生弯曲但仍保持连续性的一种构造, 包括背斜与向斜 2 种类型。背斜轴部通常发育张节理, 地表水易沿节理下渗并向两翼运动, 形成垂直形态为主的岩溶类型; 向斜轴部裂隙闭合, 裂隙欠发育, 但其两翼层面的来水汇向轴部, 故向斜的岩溶也会发育; 因此, 褶皱轴部一般岩溶均较发育^[37]。

袁胜超等^[33]对西藏某尾矿库库区研究发现, 其左岸山坡多为背斜构造, 节理裂隙发育, 水沿裂隙发育方向流动而岩溶发育明显; 樊怀华等^[21]研究表明, 贵阳市遵义岩溶地区某尾矿库库区靠近革射背斜核部东翼, 构造活动较强烈, 发育了较为显著的落水洞、裂隙、溶洞等岩溶形式。吴慧群等^[25]研究发现, 北衙盆地为倾伏向斜形成的构造盆地, 导致该区域地下水流向低洼的轴部一带, 为岩溶地貌的发育提供条件。

2.2.2.3 岩层产状与岩溶发育

岩层产状中, 倾角的大小对岩溶发育及程度有直接的影响。倾斜或陡倾斜的岩层, 一般岩溶发育较强烈; 水平或缓倾斜的岩层, 当上覆或下伏非可溶性岩层时, 岩溶发育较弱。云南金宝山铂钯矿细米家尾矿库区近直立的断裂构造岩层产状引发洼地、槽谷及漏斗等岩溶负地形, 其边壁断崖式“自下而上”标高骤

降^[29]。红河五级凹塘尾矿库在区域岩性白云质灰岩及灰质白云岩基础之上,其低倾角产出状态不利于降水向深部入渗,阻碍岩溶特别是垂向岩溶的形成;高倾角及存在的剪性断裂为岩溶发育提供了发育条件,形成“垂向为主、水平向为辅”的岩溶格局^[24]。

2.2.3 岩溶发育的水文因素

区域水文地质条件直接影响岩溶发育的形式和发育强度。我国西南地区岩溶水系统在该区域气候下,大气降水丰沛,地表与地下水循环交替强烈,岩溶水动力条件较强^[25]。在尾矿库区地表与地下水不同动力形式作用下,岩溶地貌发育,且发育形成了水平与垂直不同的岩溶类型。

周建平^[38]对云南昆明海口头石山尾矿库研究表明,地下水的溶蚀作用和径流是形成溶洞或溶隙的主导因素。吴慧群等^[25]研究发现云南大沙地尾矿库地表下的灰岩处于垂直渗流带,发育形成的岩溶主要为垂直形式分布,水平呈间断形态。周南等^[22]对云南武定县朱家坝尾矿库研究表明,地表库区内岩溶发育以垂直发育为主、在水平方向沿侵蚀基准面随地层产状延伸;地下隐伏断层控制了水的汇集与主要径流通道,从而影响了地下水的流动,形成溶蚀裂隙通道。宋旭^[39]研究发现尾矿库区地下水与地表水分水岭基本一致,大气降水沿垂直裂隙下渗,岩溶发育形态主要为竖直溶沟、溶槽,主要分布在库岸西侧和南侧之间地带,浅表层岩溶极为发育。

2.2.4 岩溶发育的地形地貌因素

地形地貌控制岩溶发育的条件,进而影响岩溶发育的类型及程度,其中坡度与地貌形态及部位具有重要作用。

地面坡度反映地表倾斜程度,其大小直接影响渗流量大小。在较平缓的地方,地表径流速度慢,渗透量大,地下水运动和循环迅速;反之,地下水运动和循环缓慢,影响岩溶发育强度。西藏拉萨市甲玛沟尾矿库左岸谷坡呈上陡下缓之势,坡脚段小型洪积扇的坡度一般 $12^{\circ}\sim 18^{\circ}$;右岸谷坡坡脚以上段因基岩出露良好,基本为 $>35^{\circ}$ 的长陡坡,局部呈陡崖。坡度为该区域岩溶的发育创造了条件^[35]。云南武定县朱家坝尾矿库沟谷形态近似V字型,岸坡坡度介于 $30^{\circ}\sim 48^{\circ}$,局部可达 90° ,主沟纵坡降 $100\%\sim 200\%$,发育形成了中等岩溶地貌^[22]。

不同地貌形态或部位对岩溶的发育及强度有较大影响。云南澜沧县某尾矿库库区地形呈“锅底”状,库区地貌不利于地表水体的排泄,地表水排泄主要通过灰岩裂隙下渗,为库区喀斯特地貌的垂向发育创造了条件^[40]。贵州水银洞金矿小厂尾矿库库盆位

于相对开阔的槽谷内,地势西、北高,南、东低。左岸冲沟发育,外侧存在溶蚀低洼地带,伴随落水洞以及喀斯特管道发育;右岸地形单薄,有低邻谷分布,谷底发育Ls20l一三岔河岩溶通道^[41]。

3 尾矿库防渗研究

3.1 岩溶地基防渗技术

我国西南尾矿库区发育形成的裂隙、落水洞、溶洞等岩溶类型,对尾矿库的防渗有极大的隐患。依据岩溶地貌及防渗特点,将其分为:裂隙防渗、落水洞防渗、水平溶洞防渗、岩溶破碎带(强发育区)防渗^[14]。

3.1.1 裂隙防渗

岩溶裂隙是西南岩溶发育尾矿库区最常见的地貌类型,分布于尾矿库底部及边坡风化的基岩上,裂隙大小不一,从数毫米至数米不等,风化严重地区尤其密集,是重要的渗漏隐患。

防渗处理时,通常根据库区岩溶裂隙的发育情况,将其按宽度分类,再采取针对性的措施。宽度较小的裂隙,水泥砂浆直接填缝;中等裂隙,用碎石、粗砂充填,最后用水泥砂浆填缝;大的裂隙,先填充块石,上部依次填充碎石、砂浆,再用混凝土封堵。

宋志^[14]对岩溶发育区尾矿库裂隙进行防渗处理研究,应首先清除裂隙内的松散物,并将其适当挖大挖深,小于5 cm宽的裂隙,用水泥砂浆填缝,表面铺平;5~20 cm宽的裂隙,用碎石充填后再铺粗砂,并以水泥砂浆堵缝;裂隙宽于20 cm,依次填充块石、碎石、粗砂,并用混凝土封堵。云南澜沧县某尾矿库库底及周围边坡裂隙采用的防渗措施如下:尾矿库边坡及其附近,依据裂隙实际情况,选择毛石混凝土、细石混凝土填隙;库底附近裂隙较少区域,以细石混凝土充填^[40]。

3.1.2 落水洞防渗

落水洞的处理较裂隙复杂。清理之后,通常先用块石等填充,上面依次铺设一定厚度的碎石层、粗砂层、砂浆砌筑层、混凝土层、粉黏土层等,形成良好的防渗效果。

梁彤彤等^[40]对云南澜沧县某尾矿库落水洞处理方法为:将落水洞口清理后插入钢管;洞内填充大块石料,并用混凝土填隙;洞口用混凝土以盖板形式覆盖顶部;用黏土分层碾压回填到原始地面。宋志^[14]研究表明:清理落水洞之后采用块石填充后,上覆防渗层依次为碎石层、粗砂层、碎石层、砂浆砌筑块石层、混凝土层和黏土层。雷再云等^[31]处理云南文山尾矿库库底落水洞发育区防渗方案为:清除落水洞内的杂物,然后用混凝土及块石夯填浇灌堵塞,待地面整平后用素混凝土浇筑。

3.1.3 水平溶洞防渗

溶洞在我国西南部分尾矿库区发育,包括普通溶洞及隐伏溶洞两类。其体积较大,通常在清除杂物后,先填充块石、碎石、粗砂等,最后根据具体工程要求以混凝土进行封闭,达到对溶洞进行处理的目的。

西藏某尾矿库发育形成有较大溶洞与小溶洞,使用浆砌片(块)石充填、水泥砂浆填缝、混凝土等封堵^[33]。宋志^[14]对尾矿库溶洞进行处理,利用块石堵塞溶洞后,上部覆盖防渗层依次为碎石层、粗砂层、混凝土层、黏土层。王应科等^[29]对金宝山铂钼矿细米家尾矿库存在潜在危险的隐伏溶洞通过钻孔,向溶洞内部灌注入水泥砂浆、混凝土进行防渗治理。

3.1.4 岩溶破碎带(强发育区)防渗

因断层等局部构造运动、强烈岩溶作用,区域地表物质破碎,渗漏作用明显,对防渗造成极大的工程隐患。工程施工中,应先对区域地表进行清理;再根据实际情况采用合适的方法进行处理。

王应科等^[29]对金宝山铂钼矿细米家尾矿库存在岩溶强发育区,设计防渗方案为:钻孔后,通过灌浆管,灌入水泥浆防渗加固,遇下部较大孔隙,可先用砂浆、粗砂等进行填入,再行注浆。傅灿等^[42]对云南大沙地矿区存在的断裂破碎带区域进行工程设计研究,在对其表层破碎物进行开挖置换并夯实后,沿断层两侧各设置聚丙烯双拉塑料格栅处理。梁彤彤等^[40]对云南澜沧县某尾矿库岩体破碎区设计防渗思路为:破碎区先清理表面,对落水洞、裂隙封堵;其上依次铺设用黏土层、SS20 土工格网、防渗复合土工布、黏土保护层,以达到防渗的目的。

3.2 库底复合防渗工程技术

3.2.1 水平防渗

水平防渗是我国西南岩溶发育区尾矿普遍采用的一种防渗形式。该技术是在尾矿库底水平铺盖多层不同功能的防渗层材料,形成人工复合防渗结构(包括单层及双层人工复合防渗结构等)^[17,43-44],达到尾矿库有效防渗的目的。

3.2.1.1 防渗层结构概述

为增强防渗结构的稳定性及防渗的效果,达到我国尾矿库环保防渗标准要求,水平防渗层多采用复合结构。其基本结构层包括:防渗材料层、防渗材料垫层(防护层)、地下水导排层等。

(1)防渗材料层,是防渗功能的主体。目前西南尾矿库区普遍采用的防渗材料为 HDPE 膜,通过 HDPE 膜或结合土工布形成 HDPE 复合土工膜(如二布一膜等)形成防渗材料层。

(2)垫层。该层为对防渗材料起衬垫作用物理

层,为防渗材料的铺设、良好性能的发挥提供支撑基础。垫层包括上垫层与下垫层。上垫层材料可采用砂砾料、土工织物等;下垫层材料可采用压实细粒土、土工织物等。目前,西南尾矿库区常见形式的垫层包括黏土垫层、GCL 合成垫层等,具体可以结合当地情况,选择适当的材料,如选择当地资源丰富的黏土等,以便降低尾矿库成本;同时,垫层铺设时应注意相关问题,如黏土垫层含水量、尾矿废水 pH 值影响、GCL 合成垫层接缝等,以免影响防渗的效果^[17]。

(3)地下水导排层。地下水导排层用于尾矿库区地下水排出,降低地下水压力水头,以免破坏防渗结构。我国西南地区雨量较多,同时因尾矿库多布置于沟谷中,受降水影响地下水位显著,需进行地下水导排。一般位于排放库内及两侧边坡防渗层以下,主要选用复合土工排水网、碎石、集水盲沟、通过排渗管将多余水排出。

3.2.1.2 缺点与不足

(1)施工工艺相对复杂:水平防渗考虑不同的功能层,防渗层、垫层、排水层等,共同发挥作用,达到尾矿库稳定防渗的目的,这导致其设置层数较多,且各层具体功能及要求不同,施工工艺相对复杂。

(2)防渗膜造价及渗漏问题:采用 HDPE 土工膜防渗衬层,工程造价高,投资大,对企业形成一定的经济负担,影响其工程应用及推广。HDPE 土工膜对接缝焊接工艺要求较高,不规范操作易造成缝隙焊接不实;同时,后期铺设膜上碎石排水层易使土工膜产生孔洞破坏,形成渗漏^[17,45]。

3.2.1.3 工程应用案例

(1)西藏玉龙沟尾矿库防渗工程。西藏玉龙沟尾矿库位于玉龙沟下游,在构造作用下,主要发育形成了侵蚀—溶蚀地貌,沟床宽度不一,同时发育有次级沟谷,谷底狭窄,宽度 5~30 m。张德洲^[32]对玉龙沟尾矿库基底的防渗层研究采用如下防渗结构:尾矿库底设计 30 cm 细粒土垫层,经过覆压处理渗透系数 $\leq 1.0 \times 10^{-5}$ cm/s;土工膜下部铺设钠基膨润土垫 GCL;HDPE 膜设置无纺布衬层保护层。该防渗工程自下而上的防渗层次为:地基平整层、地下水导排层、GCL(细粒土)层、HDPE 膜、土工布、尾矿砂层。

(2)云南大沙地尾矿库防渗工程。研究区域位于云南北衙地区盆地南部斜坡上,尾矿库北半部石芽发育,出露少量溶蚀洼地,微观地貌为峰丛,南部微观地貌为溶蚀残丘。傅灿等^[42]对大沙地尾矿库防渗工程进行研究如下:各结构层由上部到下部为 400 g/m² 土工布、HDPE 光面土工膜、400 g/m² 土工布、70 cm 厚压实黏土垫层。上部导排采用 30 cm 厚

砾石沥水导流层和 200 g/m² 长丝纺粘针刺非织造土工布,导流层内设 HDPE 钻孔透水管,膜下导排采用碎石盲沟,盲沟内衬 HDPE 钻孔透水管,钻孔管外侧及砾石盲沟四周均用 200 g/m² 土工布包裹。

3.2.2 垂直帷幕防渗

3.2.2.1 简 述

尾矿库垂直防渗,是通过采用注浆帷幕或混凝土连续墙等垂直防渗体,阻隔尾矿库区地下水及污染物水平向扩散污染周围环境实现尾矿库的防渗。其主要特点是基于隔断库区水平横向流动的地下水流及污染物,达到避免污染物向尾矿库四周扩散进而污染库区环境;根据《GB 50863—2013 尾矿设施设计规范》的规定,垂直防渗设置的前提是尾矿库下部需存在不透水层或厚的弱透水层且深度不小于 2 m,从而达到尾矿库整体防渗的效果^[46-47]。

目前,尾矿库垂直防渗工艺中的注浆帷幕或混凝土连续墙是应用较广的方式。注浆帷幕主要是经钻孔将水泥浆液、黏土浆液、膨润土浆液或混合材料浆液等,利用灌注压入、高压喷射等方式,形成帷幕防渗体,增强防渗的效果;混凝土连续墙法主要利用水泥等防渗材料,在地下形成连续防渗墙体,达到防渗的目的。与水平防渗相比,垂直防渗有其自身的优势,如成本低、效果好等;但对尾矿库底部地层的要求较高,应用受到一定的限制^[47]。

3.2.2.2 工程应用案例

蔡良钧等^[28]对贵州扎塘赤泥堆场应用悬挂式帷幕灌浆防渗,取得了较好效果。

贵州扎塘赤泥堆场位于大山洞—曹关溶丘谷地与长冲岩溶槽谷之间的峰丛山地,峰丛间发育有岩溶洼地、落水洞等。研究区以 1 250 m 为界,上部岩溶发育带,以落水洞、竖井、垂直溶隙为主;下部以大溶隙为主,沿断层及旁侧破碎带发育,含水性极不均匀。

根据当地地层渗透剖面 and 地形地质条件,由于该地区隔水层埋藏较深,应采取悬挂式帷幕灌浆,原则上以微渗地段下 5 m 为下限。灌浆施工中孔的设计采用单排、双排布置,要求排距 1 m,孔距 2.5 m,施工时采取“先上游排后下游排”施工过程;按 I、II、III 序孔的顺序进行灌浆施工。灌浆浆液的水灰比控制在 2:1、1:1、0.8:1、0.5:1 共 4 个级别。正常灌浆段从 2:1 浆液浓度开始灌,遇严重漏水段使用 0.5:1 浓浆液起灌,浆液变换遵循“由稀到浓”的原则;灌浆压力从 0.5 MPa 到 3.0 MPa 逐渐加压。

4 结 语

我国西南地区因其丰富的矿产资源,在开采过程中形成了大量尾矿库,对周围环境造成极大隐患;同

时,西南地区岩溶发育,落水洞、裂隙等岩溶类型进一步增加了尾矿库污染的风险及程度。本文综述了西南尾矿库区主要岩溶类型及特征;从岩性、地质构造、水文、地形地貌因素对尾矿库区岩溶发育机制进行了研究;最后,从岩溶地基处理、防渗工程分析总结西南尾矿库区防渗技术。随着国家对矿山环境的重视,绿色矿山建设是矿山发展的方向,未来可考虑以尾矿库区固废、当地丰富的潜在防渗物料等为基础,研发经济可行、高性能的防渗材料及创新功能结构层,为尾矿库绿色、环保、安全运行奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 沈冰,陈家彪,朱志敏. 中国西南地区矿业活动与环境保护[J]. 地球与环境,2007(4):362-366.
SHEN Bing, CHEN Jiabiao, ZHU Zhimin. Mining activities and environmental protection in southwest China[J]. Earth and Environment, 2007(4):362-366.
- [2] 黄家琰,杨绍章. 贵州矿山环境问题及防治对策的思考[J]. 能源与环境,2011(6):75-77.
HUANG Jiayan, YANG Shaozhang. Thinking on mine environment problems and countermeasures in Guizhou[J]. Energy and Environment, 2011(6):75-77.
- [3] 林方成,杨家瑞,廖朝贵. 中国西南地区固体矿产资源调查评价战略分析[J]. 矿床地质,2002,21(S1):160-164.
LIN Fangcheng, YANG Jianui, LIAO Chaogui. Strategic analysis on solid mineral resources investigation and evaluation in southwestern China[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S1):160-164.
- [4] 刘增铁,丁俊,秦建华,等. 中国西南地区铜矿资源现状及对地质勘查工作的几点建议[J]. 地质通报,2010,29(9):1371-1382.
LIU Zengtie, DING Jun, QIN Jianhua, et al. Status of copper resources in southwestern China and suggestion on prospecting[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(9):1371-1382.
- [5] 毛英. 西南地区矿产资源开发的环境地质问题研究[J]. 四川地质学报,2003(2):106-108.
MAO Ying. On environmental geology in the exploitation of mineral resources in southwest China[J]. Acta Geologica Sichuan, 2003(2):106-108.
- [6] 丁坚平,鄢贵权,王伍军,等. 工业废渣库岩溶渗漏污染预测和评价[J]. 贵州工业大学学报,1997(2):73-78.
DING Jianping, YAN Guiquan, WANG Wujun, et al. A prediction and evaluation of pollutant of karst leakage in industrial wastes reservoir[J]. Journal of Guizhou University of Technology, 1997(2):73-78.
- [7] 魏伦武. 西南地区矿山环境地质问题与防治对策[J]. 地质灾害与环境保护,2002(1):6-8.
WEI Lunwu. The problems of environmental geology in mining regions and corresponding control policy in southwest of China[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002(1):6-8.
- [8] 林玉山,张卫. 尾矿库地质灾害与危险性评估[J]. 桂林工学院学报,2006(4):486-490.

- LIN Yushan, ZHANG Wei. Geohazard and risk assessment for tailing reservoir[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2006(4): 486-490.
- [9] 沈楼燕, 林武. 尾矿库环保防渗措施设计问题探讨[J]. 中国矿山工程, 2009, 38(5): 47-49, 54.
- SHEN Louyan, LIN Wu. Discussion on tailing-pond antiseepage design for environmental protection[J]. China Mine Engineering, 2009, 38(5): 47-49, 54.
- [10] 张家荣, 刘建林. 中国尾矿库溃坝与泄露事故统计及成因分析[J]. 中国钼业, 2019, 43(4): 10-14.
- ZHANG Jiarong, LIU Jianlin. The statistics and causes of dam break and leakage in Chinese tailings pond[J]. China Molybdenum Industry, 2019, 43(4): 10-14.
- [11] 张凡, 滕建珍, 赵卫权, 等. 贵州喀斯特地区矿产资源开采对生态环境的影响与对策研究[J]. 贵州科学, 2011, 29(6): 65-71.
- ZHANG Fan, TENG Jianzhen, ZHAO Wei-quan, et al. The major environmental problems caused by exploitation of mineral resources in karst areas of Guizhou Province[J]. Guizhou Science, 2011, 29(6): 65-71.
- [12] 刘宇涛, 谢世友. 中国西南地区岩溶地貌发育影响因素分析[J]. 许昌学院学报, 2010, 29(2): 143-146.
- LIU Yutao, XIE Shiyu. Analysis on influence factors of the development of karst landform in southwest China[J]. Journal of Xuchang University, 2010, 29(2): 143-146.
- [13] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- YUAN Daoxian. China Karstology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [14] 宋志. 岩溶地区尾矿库岩溶处理及安全管理[J]. 工程建设, 2017, 49(1): 38-42.
- SONG Zhi. Karst treatment and safety management of tailing dam in karst area[J]. Engineering Construction, 2017, 49(1): 38-42.
- [15] 代俊峰, 莫磊鑫, 曾鸿鹄. 西南岩溶地区氮磷迁移转化研究分析[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(4): 73-75.
- DAI Junfeng, MO Leixin, ZENG Honghu. Research progress of transport and transformation of nitrogen and phosphorus in karst areas of southwest China[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2017, 43(4): 73-75.
- [16] 于广明, 宋传旺, 潘永战, 等. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 3238-3248.
- YU Guangming, SONG Chuanwang, PAN Yongzhan, et al. Review of new progress in tailing dam safety in foreign research and current state with development trend in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3238-3248.
- [17] 袁永强. 第Ⅱ类尾矿库环保防渗系统设计探讨[J]. 金属矿山, 2016(5): 178-182.
- YUAN Yongqiang. Discussion on environmental anti-seepage design of category II tailing pond[J]. Metal Mine, 2016(5): 178-182.
- [18] 谭业壮. 岩溶尾矿库综合技术研究[J]. 湖南有色金属, 1998(3): 14-19.
- TAN Yezhuang. A synthetical technical study of tailings reservoir in karst region[J]. Hunan Nonferrous Metals, 1998(3): 14-19.
- [19] 王俊, 张进. 喀斯特地貌带尾矿库落水洞、塌陷的安全管理技术分析[J]. 现代矿业, 2014(9): 219-220.
- WANG Jun, ZHANG JIN. Analysis on safety management technology of waterfall cave and collapse of tailings pond in karst landform belt[J]. Modern Mining, 2014(9): 219-220.
- [20] 毛健全. 钡渣的浸出淋溶试验及渣场防渗处理[J]. 贵州化工, 2000(S1): 26-29, 48.
- MAO Jianquan. Leaching and eluviating of barium salt residue and seepage control[J]. Guizhou Chemical Industry, 2000(S1): 26-29, 48.
- [21] 樊怀华, 张舟, 孙熙宁, 等. 岩溶地区某尾矿库的防渗漏综合治理[J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 2006, 22(3): 6-10.
- FAN Huaihua, ZHANG Zhou, SUN Xining, et al. Comprehensive control of seepage-proof to a tailings reservoir in karst areas[J]. Journal of Kunming Metallurgy College, 2006, 22(3): 6-10.
- [22] 周南, 李卿, 喻涌麒. 云南武定县朱家坝尾矿库渗漏原因浅析[J]. 云南地质, 2020, 39(1): 118-124.
- ZHOU Nan, LI Qing, YU Yonglin. A preliminary analysis of the origin of Zhujiaba tails leakage in Wuding, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2020, 39(1): 118-124.
- [23] 邓瑞传. 喀斯特地区某尾矿库水文地质调查方法[J]. 有色金属文摘, 2015, 30(2): 8-9.
- DENG Ruichuan. Method for hydrogeological investigation of a tailings in karst area[J]. Nonferrous Metals Abstract, 2015, 30(2): 8-9.
- [24] 刘文连, 许汉华, 徐则民, 等. 个旧老厂五级凹塘尾矿库岩溶发育特征及成因机制分析[J]. 中国锰业, 2018, 36(3): 55-58.
- LIU Wenlian, XU Hanhua, XU Zemin, et al. An analysis on karst development characteristics and genetic mechanism of 5th grade aotang tailings pond in Gejiu Old Factory[J]. China's Manganese Industry, 2018, 36(3): 55-58.
- [25] 吴慧群, 张兵, 淮筱斌. 大沙地尾矿库岩溶发育特征研究[J]. 黄金, 2016, 37(3): 77-81.
- WU Huiqun, ZHANG Bing, HUAI Xiaobin. Research on features of karst development for Dashadi tailings pond[J]. Gold, 2016, 37(3): 77-81.
- [26] 付其林. 贵州岩溶石山地区某尾矿库渗漏治理新方法评价[J]. 资源信息与工程, 2017, 32(3): 186-187.
- FU Qilin. Evaluation of a new treatment method for tailings pond leakage in Karst Shishan Area, Guizhou Province[J]. Resource Information and Engineering, 2017, 32(3): 186-187.
- [27] 邹国富, 范柱国, 朱春蓉, 等. 云南普朗铜矿尾矿库喀斯特渗漏示踪试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(3): 292-297.
- ZOU Guofu, FAN Zhuguo, ZHU Chunrong, et al. A tracing test of karst seepage of the tailing reservoir in the Pulang Copper Deposit, Yunnan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(3): 292-297.
- [28] 蔡良钧, 毛健全, 丁坚平, 等. 扎塘赤泥堆场岩溶渗漏及防渗处理[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2002(5): 101-106.
- CAI Liangjun, MAO Jianquan, DING Jianping, et al. Karst leakage and leak-proof treatment for Zatang redclay disposal site[J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition), 2002(5): 101-106.

- [29] 王应科,张春梅. 金宝山铂钯矿细米家尾矿库岩溶工程地质特性分析研究[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(5): 672-675.
WANG Yingke, ZHANG Chunmei. Analysis and research of karst engineering geological characteristics of Ximijia tailings reservoir [J]. Resources Environment & Engineering, 2013, 27(5): 672-675.
- [30] 王亚明. 西藏玉龙铜矿尾矿库渗漏特征及排洪隧道稳定性分析[J]. 地下水, 2016, 38(6): 181-183, 210.
WANG Yaming. Seepage characteristics of tailings pond and stability analysis of flood discharge tunnel in Yulong Copper Mine, Xizang Province [J]. Ground Water, 2016, 38(6): 181-183, 210.
- [31] 雷再云,李明. 文山市薄竹镇多金属选矿厂尾矿库工程地质特征及防渗处理方案[J]. 低碳世界, 2015(4): 136-138.
LEI Zaiyun, LI Ming. Engineering geological characteristics and anti-seepage treatment scheme of tailing pond of Bozhu Town Polymetallic Concentrator in Wenshan City [J]. Low Carbon World, 2015(4): 136-138.
- [32] 张德洲. 玉龙沟尾矿库基底处理对防渗施工的影响[J]. 中国矿山工程, 2014, 43(6): 25-27, 42.
ZHANG Dezhou. Influence of basement treatment on anti-seepage construction of Yulonggou tailings pond [J]. China Mine Engineering, 2014, 43(6): 25-27, 42.
- [33] 袁胜超,张小强. 西藏某尾矿库库区渗漏性分析[J]. 地下水, 2014, 36(1): 109-111.
YUAN Shengchao, ZHANG Xiaoqiang. Leakage analysis of a tailings reservoir in Xizang [J]. Ground Water, 2014, 36(1): 109-111.
- [34] 杨燕,刘浩. 云南会泽铅锌渣库防渗设计[J]. 有色金属工程, 2013, 3(5): 55-58.
YANG Yan, LIU Hao. Anti-seepage design of Yunnan Huize lead-zinc slag storehouse [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2013, 3(5): 55-58.
- [35] 何学勇. 甲玛沟尾矿库坝基渗漏影响分析[J]. 四川地质学报, 2017, 37(1): 121-123.
HE Xueyong. Influence factors for the Jiamagou tailing reservoir dam foundation leakage [J]. Acta Geologica Sichuan, 2017, 37(1): 121-123.
- [36] 眭素刚,徐世光,范柱国,等. 大砂地尾矿库岩溶问题分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(4): 494-499.
SUI Sugang, XU Shiguang, FAN Zhuguo, et al. Analysis on karst for Dashadi tailings pond [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2012, 31(4): 494-499.
- [37] 周笑,林贤杰. 岩溶与地质构造的关系[J]. 四川建筑, 2012, 32(4): 132-133.
ZHOU Xiao, LIN Xianjie. The relationship between karst and geological structure [J]. Sichuan Architecture, 2012, 32(4): 132-133.
- [38] 周建平. 昆明海口石山尾矿库工程地质问题及处理[J]. 云南地质, 2010, 29(4): 467-470.
ZHOU Jianping. The problem and processing of engineering geology of Toushishan tailing of Haikou, Kunming [J]. Yunnan Geology, 2010, 29(4): 467-470.
- [39] 宋旭. 某尾矿库扩容后库底塌陷、渗漏可能性论证[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(8): 101-102.
SONG Xu. The possibility of collapse and leakage of a tailing pond after capacity expansion [J]. West-China Exploration Engineering, 2018, 30(8): 101-102.
- [40] 梁彤彤,陈玉明. 澜沧县某尾矿库底防渗漏治理[J]. 工业安全与环保, 2010, 36(3): 13-14.
LIANG Xingxing, CHEN Yuming. The leakage control of a tailing in Lancang County [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(3): 13-14.
- [41] 黄顺涛,杨强,冉文波. 水银洞金矿小厂尾矿库渗漏的勘察分析与评价[J]. 贵州水力发电, 2011, 25(5): 10-14.
HUANG Shuntao, YANG Qiang, RAN Wenbo. Investigation, analysis and evaluation of tailings pond leakage in Xiaochang of Shuiyindong Gold Mine [J]. Guizhou Water Power, 2011, 25(5): 10-14.
- [42] 傅灿,江杰,文枚. 基于 Civil 3D 的尾矿库防渗措施设计[J]. 现代矿业, 2017(6): 189-192.
FU Can, JIANG Jie, WEN Mei. Design of anti-seepage measures for tailings pond based on Civil 3D [J]. Modern Mining, 2017(6): 189-192.
- [43] 朱景萌. 尾矿库的环保防渗设计探析[J]. 中国新技术新产品, 2019(22): 84-85.
ZHU Jingmeng. Environmental protection and seepage prevention design of tailings pond [J]. New Technology & New Products of China, 2019(22): 84-85.
- [44] 李旷野. 尾矿库的环保防渗设计研究[J]. 世界有色金属, 2020(6): 144-146.
LI Kuangye. Study on environmental protection and seepage control design of tailings pond [J]. World Nonferrous Metals, 2020(6): 144-146.
- [45] 沈楼燕,李海港. 尾矿库防渗土工膜渗漏问题的探讨[J]. 有色金属(矿山部分), 2009, 61(3): 71-72, 74.
SHEN Louyan, LI Haigang. Discussion on leakage of geomembrane for tailing pond antiseepage [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2009, 61(3): 71-72, 74.
- [46] 卢建京. 浅析垂直防渗技术在矿山尾矿库中的应用[J]. 有色冶金设计与研究, 2009, 30(5): 61-62, 67.
LU Jianjing. Application of vertical anti-seepage technology in mine tailing pond [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2009, 30(5): 61-62, 67.
- [47] 沈楼燕,张书滨. 论矿山尾矿库垂直防渗系统的适用性及经济性[J]. 有色金属(矿山部分), 2009, 61(5): 73-75, 78.
SHEN Louyan, ZHANG Shubin. Applicability & economical efficiency of vertical anti-seepage system for mine tailings pond [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2009, 61(5): 73-75, 78.