

文章编号: 2097-096X(2025)-04-0329-16

我国贮灰场发展形势与安全问题分析

李维朝^{1,2}, 鲁 欣², 王建军³, 温彦锋^{1,2}, 台泽雯⁴, 谢定松^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100038;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038;

3. 中国能源建设集团山西省电力设计院有限公司, 山西 太原 030001;

4. 河南省巩义市应急管理局, 河南 郑州 451200)

摘要: 粉煤灰是我国工业固体废弃物的最大单一污染源, 未能综合利用的数量可观的粉煤灰多采取筑坝形成贮灰场加以贮存。贮灰场长期运行中与封场后的安全环保是其全生命周期内面临的关键问题, 贮灰场事故不仅会直接导致重大的人员伤亡或财产损失, 还会引发链式环境污染, 造成严重的次生灾害。本文在搜集整理我国大量贮灰场实际资料的基础上, 对我国贮灰场当前发展形势与安全问题进行了探讨。现阶段, 在我国粉煤灰贮存总量大幅增长的同时, 贮灰场贮灰方式已从湿式为主过渡为干式为主, 涌现出模袋坝、石膏坝等新型贮灰方式, 上百米高的灰坝不断出现, 部分贮灰场周边城镇化与工业化高速发展, 由荒郊步入城市, 甚至成为“头顶库”, 贮灰场日常运行中不仅易遭降雨等极端气候的冲击, 还会受到粉煤灰回采、基础设施建设、采矿、爆破等人为活动影响与灰场周边山体滑坡等自然因素影响, 在多年运行和封场后还面临排水排洪设施老化等问题。这些新形势不仅会对贮灰场安全产生直接影响, 还会对贮灰场溃决风险起到交织放大作用。建议今后贮灰场设计、建设、运行、封场、再利用的全过程中, 要全面考虑贮灰场的潜在致灾因素, 在科学论证分析的基础上有效化解风险, 提升新形势下贮灰场的韧性和安全水平。

关键词: 贮灰场; 封场; 再利用; 极端降雨; 灰坝**中图分类号:** X705; X820.4**文献标识码:** A**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240167

1 研究背景

现阶段燃煤发电依然是我国电力生产的主体。进入二十一世纪以来, 我国火电装机容量呈不断增长的趋势^[1](图 1), 其中 2006 年的增长率最高达到 23.6%。近些年来虽然增长率有所放缓, 但截止 2022 年, 总的火电装机容量仍高达 13.32 亿 kW, 其中燃煤发电占到火力发电的 90% 以上^[2]。

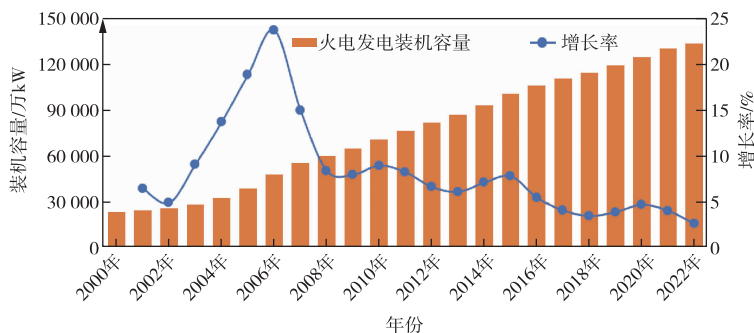
图 1 我国火力发电装机趋势分析图^[1]

Fig.1 Trends of installed capacity of thermal power generation in China

收稿日期: 2024-08-27; 网络首发时间: 2024-12-04

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20241203.1725.002>

作者简介: 李维朝(1979-), 博士, 正高级工程师, 主要从事土石坝、环境岩土和地质灾害方面的科研与咨询工作。E-mail: liwc@iwhr.com

我国燃煤发电厂每年都排放数量巨大的粉煤灰，火电装机容量的快速增长导致我国粉煤灰年排放量也迅猛增加(图2)。2000年，我国粉煤灰年排放量仅为1.50亿t，随后至2019年逐年呈近线性递增，年增长率约为8.8%，在2010年和2019年时分别达到了4.80亿t和7.48亿t，2021年增速虽然略有放缓，但年排放量仍高至7.90亿t^[3]，约为2000年的5.2倍。

虽然我国粉煤灰的综合利用水平在不断提高，但与我国粉煤灰年增长量的增速相比，综合利用量和增速均偏低(图3)，粉煤灰累计贮存量依然可观。2018年我国粉煤灰综合利用量增速最高，达到9.7%，其余年份增速均低于5.3%，甚至大多数年份增速位于4%以下。粉煤灰排放量与粉煤灰综合利用量在基数和增速之间的差值，导致我国粉煤灰累计贮存量越来越高。根据《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》，“十三五”期间我国粉煤灰综合利用率达到78%，截至2020年粉煤灰累计贮存量达30多亿t^[4]。

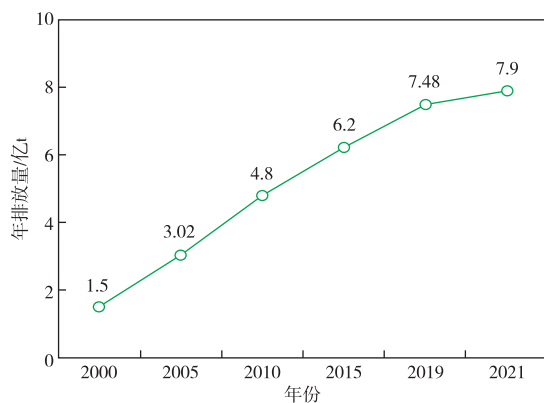


图2 我国粉煤灰年排放量^[3]

Fig.2 Annual emissions of coal ash in China^[3]

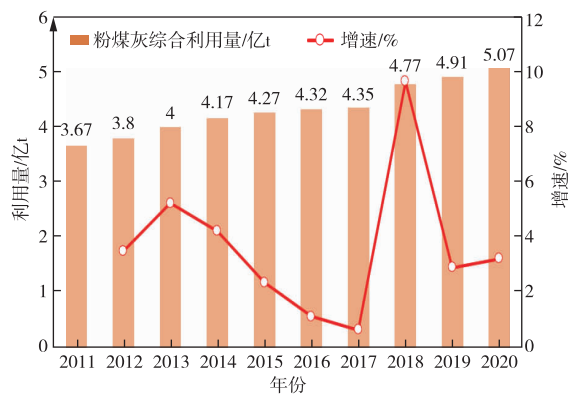


图3 我国粉煤灰综合利用量^[4]

Fig.3 Comprehensive utilization of coal ash in China^[4]

粉煤灰安全环保贮放是我国长期面临的问题。这些未能综合利用的数量可观的粉煤灰，往往需要建坝形成贮灰场加以贮放。与水库大坝相比，灰坝规模一般不大，但建设质量和运行管理水平并不乐观。灰坝分期建设往往使大坝的沉降变形大、抗震能力较差。贮灰场分期筑坝方式导致坝体排渗系统结构复杂，排渗系统失效的风险较高。贮灰场内排水系统一般采取坝下埋管的方式，不仅排水系统本身易损且不便检查，也易引发事故。贮灰场一旦发生事故，不仅会导致重大的人员伤亡或财产损失，还会引发链式环境污染，造成严重的次生灾害。2008年美国田纳西州金斯顿电厂灰场溃坝(图4)，420万m³灰浆污染近1 km²土地，检测出重金属包括砷、汞、镉、铬、铅、钡、锰等，为美国最大工业污染^[5]。贮灰场的高风险还受到国际顶级学术期刊《Science》的关注，Santamarina指出机理认识不够、管理水平不足是贮灰场和尾矿库溃决的主要原因，由于缺乏对岩土材料时变过程的深入认识，使得此类灾害难以预测^[6]。

随着我国对贮灰场安全要求的不断提高，贮灰场溃坝事故大大减少，安全形势得以逐渐改善。但在我国粉煤灰累积总量增长的同时，贮灰场的自身结构、赋存环境、管理要求等也发生了较大的变化，贮灰场安全也出现了一些新的问题，依然不容乐观。本文主要就现阶段我国贮灰场面临的一些形势与安全问题进行探讨，从而为灰场的设计与运行管理提供参考，为保障贮灰场的长期安全提供有益借鉴。

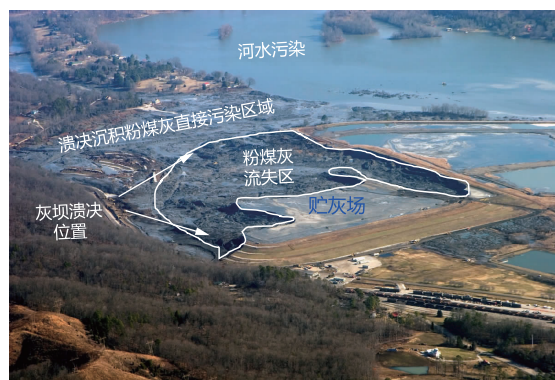


图4 美国2008年田纳西州金斯顿电厂灰场溃坝^[5]

Fig.4 The fly ash dam failure of Kingston Power Plant in Tennessee in 2008^[5]

2 现阶段贮灰场面临的新形势

2.1 贮灰场及周边环境变化显著

2.1.1 以湿式为主过渡为干式为主 贮灰场按贮灰方式可分为湿式和干式两种，我国早期以湿式贮灰场为主，上世纪末期干式贮灰场逐渐增多，目前以干式贮灰场数量居多。我国 2013 年发布的《粉煤灰综合利用管理办法》第十二条更是指出，新建电厂不得湿排粉煤灰。我国初期建设的干式贮灰场库底大多未铺设土工膜防渗，随着国家对环保越来越重视，后期建设的灰场均要求依据规范《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》和《火力发电厂干式贮灰场设计规程》铺设土工膜。

湿式贮灰场内库水位较高，灰坝易因漫顶、浸润线过高或渗透破坏诱发灾变。贮灰场从湿式为主过渡为干式为主后，其风险模式也相应发生了新的变化。干灰场的子坝多采取碾压施工的方式，在实际施工过程中受管理等因素的影响，质量控制往往不如湿式贮灰场严格，常出现粉煤灰子坝碾压质量不高、将疏松堆积的粉煤灰坡面直接修整作为永久边坡等，这导致粉煤灰坝体或边坡密实度不高(图 5)、强度偏低等现象。

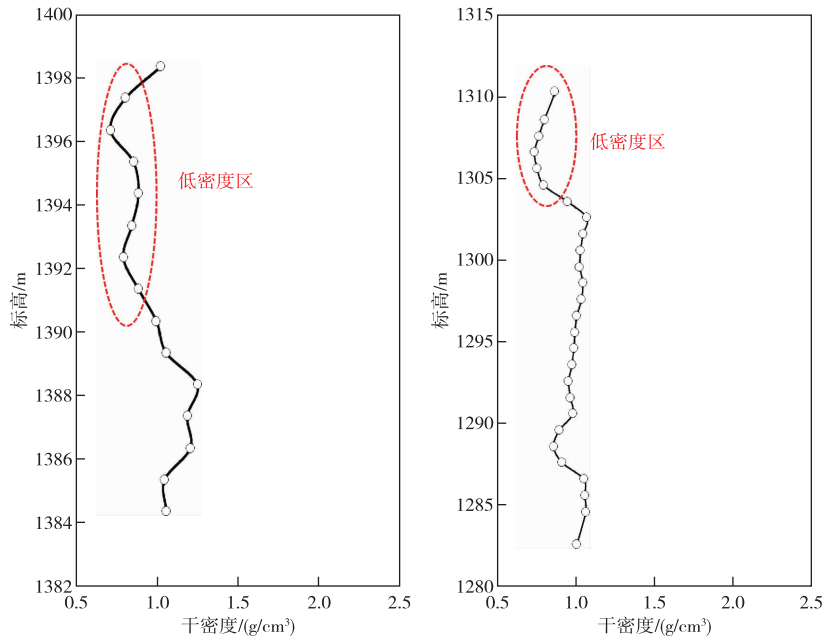


图 5 某干灰场填筑密度
Fig.5 Filling density of a dry ash dam

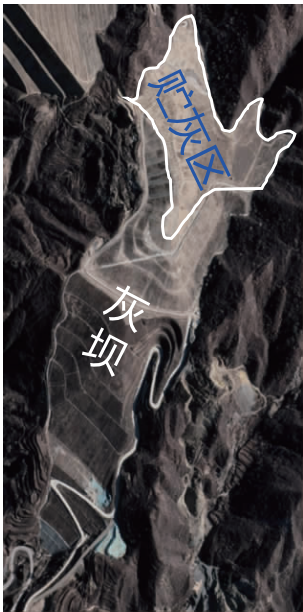


图 6 寨沟灰场规划坝高 174.5 m
Fig.6 The planned dam height of Zhaigou coal ash storage facility is 174.5 m

2.1.2 灰坝坝高不断攀升 当前，我国一些地区粉煤灰综合利用率低，贮灰总量不断增加，在达到原规划坝高，满足封场条件后，受新贮灰场建设征地困难等影响，大多贮灰场采取了加高扩容改造，这导致贮灰场灰坝坝高不断攀升，超过百米的灰坝不断涌现。如寨沟灰场初期设计坝高约为 130 m，在达到设计库容后又进行了扩建，扩建后的总坝高为 174.5 m(图 6)，据不完全统计为我国贮灰场最高坝。张镇沟灰场(图 7)和元家山灰场(图 8)原设计坝高分别为 100 m 和 90 m，后因贮灰需要，进行了加高扩容，设计总坝高分别达到 116 m 和 110 m。东沟灰场原设计最大堆灰高度为 89 m，后拟采用子坝加高的方式扩容，规划总坝高达到 119 m(图 9)。紫房庙贮灰场坝高 115.5 m(图 10)。

随着灰坝坝高的增加，贮灰场的安全风险也随之加大，并且同等条件下高坝溃决后的影响范围也会远大于低坝。堆灰高度的增加将使灰场底部灰体和坝基的应力不断增大，部分灰体和坝基可能会进入塑性区，并且随着塑性区的不断扩展而直接威胁到灰场安全。一般说来，随着坝高的增加，发生滑坡的可能性和溃决造成的危害都会明显提高。但与之相应的是我国百米级灰坝的设计和管理等经验均

偏少，都应有特殊的考虑。我国《火力发电厂干式贮灰场设计规程》(DL/T 5488—2014)也专门指出“山谷干灰场应根据规划分期建设，当最终高度超过 100 m，应做专题研究”。



图 7 张镇沟灰场规划坝高 116 m
Fig.7 The planned dam height of Zhangzhengou coal ash storage facility is 116 m



图 8 元家山灰场规划坝高 110 m
Fig.8 The planned dam height of Yuanjiashan coal ash storage facility is 110 m



图 9 东沟灰场规划坝高 119 m
Fig.9 The planned dam height of Donggou coal ash storage facility is 119 m



图 10 紫房庙贮灰场规划坝高 115.5 m
Fig.10 The planned dam height of Zifangmiao coal ash storage facility is 115.5 m

2.1.3 贮灰场周边城镇化及工业化高速发展 随着我国经济社会的发展，城镇化、工业化进程加快，原设置于城郊等偏远地区的贮灰场，其附近的建筑物和公共设施等不断增加，人口密度也大幅提升，有些甚至成为“头顶库”（图 11）。1957 年，青山热电厂戴家湖灰场建成，当前戴家湖灰场周边已逐步形成多个楼盘为代表的新型社区（图 12），聚集和辐射十多万居民^[7]。1990 年，华能南京电厂贮灰场建成，随着城镇化不断发展，30 年后灰场周围建设了大量小区（图 13）。

灰场周边除了房屋建筑，还出现了附近建设高



图 11 灰坝坝脚附近房屋建设
Fig.11 Construction of houses near the foot of an ash dam



图 12 青山热电厂戴家湖贮灰场周边环境变化^[7]

Fig.12 Environmental changes around Daijia Lake coal ash storage facility of Qingshan thermal Power Plant^[7]



图 13 南京电厂贮灰场周边环境变化 (Google earth)

Fig.13 Environmental Changes around Nanjing Power Plant coal ash storage facility (Google earth)

铁、公路穿过贮灰场、高架桥座落于贮灰场内、大断面连拱隧道穿越贮灰场等情况。这些后续建设施工及周围环境变化不仅可能会对灰坝的长期服役造成不利影响，还会因建筑和人口的大量增加而导致灰坝事故影响和失事损失扩大，增大了灰坝失事风险。

2.2 我国对贮灰场安全环保生态的要求不断提高 大量贮放的粉煤灰不仅占用大量土地资源，还是重大危险源和污染源。灰坝事故不仅会导致重大的人员伤亡或财产损失，还易引发链式环境污染，泄漏的粉煤灰和灰水将对灰场下游水体、土壤及大气环境等造成严重的次生灾害。贮灰场渗漏导致的地下水环境污染问题和扬尘导致的周围大气环境影响问题，已经引起社会的普遍关注。国际环保组织绿色和平在北京发布的《煤炭的真实成本—2010 中国粉煤灰调查报告》中指出，粉煤灰已经成为中国工业固体废弃物的最大单一污染源。2012 年以来，我国倡导绿色发展，对灰坝安全和环保的要求不断提高，主管单位国家能源局（原国家电监会）与生态环境部等相关部局多次发文强调加强灰坝安全环保监督管理，预防灰坝安全与环保事故，提高对突发事件的应急处置能力，有效提升贮灰场建设、运行、封场及封场后整个生命周期内的安全与环保，推进封场后的生态修复。

2021 年 4 月 22 日，在地球日领导人气候峰会上，我国提出将严控煤电项目，“十四五”时期严控煤炭消费增长、“十五五”时期逐步减少。2021 年 9 月，中国首次明确宣布，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。2020 年，中国电力行业碳排放占全国碳排放总量的 37%，在实现碳中和目标过程中，控煤政策以及新能源发电装机的增加，将使我国大部分燃煤电厂面临关停，依附电厂建造的贮灰场也会进行封场。此外我国还有很多贮灰场在经过数十年的运行后，已达到规划封场条件。预计“十四五”至“十五五”期间会有越来越多的贮灰场面临封场整治。

2.3 极端气候条件频发 20 世纪中期以来，受全球变暖趋势日益加剧的影响，极端气候条件频现，与贮灰场安全相关的主要是极端降雨。根据《中国气象数据网》的报告，气候变暖背景下，近 50 年来

我国总降水量没有明显的极端化倾向，但平均降雨强度呈增加趋势。其中，中国西部地区、长江中下游地区以及华南沿海等地区的极端降水事件趋于增多。而且，近年来长江流域的降水在时间和空间上的集中程度显著增加。据《第三次气候变化国家评估报告》，“中国极端强降雨日数、极端降雨平均强度和极端降雨量都有增强趋势，极端降雨事件趋多，尤其是 20 世纪 90 年代后，极端降雨量比例区域增大”。在极端气候的背景下，贮灰场所在地的降雨强度和降雨量有可能会超出贮灰场原有的设计标准，致使贮灰场防洪和灰坝稳定性均面临巨大的考验。

3 需要关注的几个安全问题

3.1 运行安全

3.1.1 新贮坝方案的长期安全

(1) 石膏筑坝

脱硫石膏是燃煤发电厂对煤等含硫燃料燃烧后产生的烟气进行脱硫净化时产生的一种工业副产品，主要成分为二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。《火力发电厂干式贮灰场设计规程》(DL/T 5488—2014)要求脱硫石膏堆放于灰场内的专门区域，且不应堆放在后期堆积坝区域内。脱硫石膏的力学和变形特性复杂，并且研究成果匮乏，使得脱硫石膏的筑坝技术远不如粉煤灰筑坝技术成熟^[8]，且脱硫石膏的综合利用率也低，导致贮灰场内脱硫石膏的堆储量越来越高，已逐渐成为继粉煤灰之后的第二大固体副产物^[9]。

为了增加脱硫石膏的利用率，有的贮灰场尝试利用脱硫石膏与粉煤灰混合料来筑坝，也有的灰场在施工中将石膏混入了子坝或坝基中。如大唐贵州发耳发电有限公司一期灰场为山谷干灰场，分七级子坝加高，坝体填筑材料为灰渣和脱硫石膏混合物(图 14)，每级子坝高度 10.0 m，库容 1800 万 m^3 ^[10]。有的贮灰场直接采用纯脱硫石膏筑坝，但鉴于石膏遇水软化的物理力学特性，对石膏采取了隔水措施。如后龙山贮灰场现建有六级子坝(图 15)，其中一级子坝为堆石坝，二至六级子坝为碾压石膏坝，各级子坝高 5 m。鉴于石膏易浸水后软化，一级堆石子坝设计了集水井，并采取了自动抽排方式，利用超声波液位计实时监测集水井水位，并根据设定水位参数自动控制水泵启停，实现自动抽水目的，从而控制一级堆石子坝集水井内水位不进入上方的石膏子坝。在后续扩容中，计划用土工膜全部封盖石膏子坝下游坡面，且库内灰场也铺设土工膜，从而避免灰场加高后的雨洪渗入石膏子坝。



图 14 贮灰场脱硫石膏与粉煤灰混合料筑坝^[11]
Fig.14 Damming with desulfurized gypsum and coal ash mixture
in coal ash storage facility^[11]



图 15 后龙山贮灰场纯石膏筑坝
Fig.15 Damming with pure gypsum in
Houlongshan coal ash storage facility

抗剪强度一般用黏聚力和内摩擦角来表示。已有室内试验结果表明，石膏与粉煤灰混合筑坝材料抗剪强度与粉煤灰具有一定的差异。随着脱硫石膏掺量的增加，石膏与粉煤灰混合筑坝材料的黏聚力

呈现出先增后减的变化趋势,当石膏掺量为30%时石膏与粉煤灰混合筑坝材料的黏聚力最大^[11]。石膏与粉煤灰混合筑坝材料的内摩擦角随着石膏掺量的增加而呈降低的趋势,降低幅度约4°左右^[10-12]。

这些试验均是只考虑了石膏与粉煤灰混合筑坝材料的初期状态,没有分析实际长期运行条件下混合筑坝材料抗剪强度的变化。石膏渗透系数较低,吸水性强,具有增水膨胀、失水收缩的物理特性,并且脱硫石膏还具有溶蚀性,在水的渗流作用下溶蚀钙离子,使得脱硫石膏的抗剪强度指标降低,从而降低灰坝稳定性。淋滤试验表明^[10],石膏与粉煤灰混合筑坝材料经雨水淋滤后,其黏聚力与淋滤前相比有较大幅度的减小,内摩擦角较淋滤前略有增大;淋滤后的抗剪强度值随石膏掺入比的增大而减小。此外,在长期水流作用下,石膏与粉煤灰混合材料的渗透系数会随着石膏的溶解溶蚀而增大,如不采取相应措施加以控制,坝基或坝体内还可能会出现渗流通道,引发管涌风险^[10]。

因此在采取石膏与粉煤灰混合材料筑坝时,如果直接采取混合料的抗剪强度来计算灰坝安全系数,会偏危险,应当从材料抗剪强度长期演化的角度出发,考虑降雨的淋滤作用,对石膏含量、降雨等不同条件下的抗剪强度变化及对灰坝长期稳定性的影响等开展专门论证,利用长期淋滤后的强度,来计算分析灰坝安全系数,保障灰坝长期抗滑稳定性。此外还需做好灰坝上游防渗措施和下游反滤措施,保障灰坝的长期渗流安全。

(2) 粉煤灰模袋筑坝

模袋是指由上、下两层高强度土工织物制作的大面积连续袋状材料^[13]。贮灰场模袋筑坝是采用泵灌等方法将粉煤灰水力冲填进模袋,且排水固结形成充填体,然后通过错缝堆砌充填后的模袋形成坝体(图16)。模袋坝主要用于建设贮灰场子坝,其筑坝工艺主要有三方面优点^[13]:①使粉煤灰与模袋形成一个整体,有效利用土工模袋的力学特性,增大模袋坝的抗剪强度与稳定性;②充分利用模袋透水不透灰的特点,加快水力冲填粉煤灰的排水固结,有利于快速筑坝;③工艺成熟,操作简单,可以边贮灰边筑坝,施工过程中不影响贮灰场贮灰。模袋坝的显著优点,使其成为很多子坝加高首选。

模袋坝初始主要应用于码头,后来引进至尾矿库和贮灰场。虽然模袋坝优点显著,但当前关于模袋坝变形特征、模袋与袋内粉煤灰的整体作用机理、模袋坝的稳定性计算方法等尚不明确。当前计算模袋坝稳定性的计算方法,主要有水平条分法和基于界面单元的有限元强度折减法等,这些方法虽然很好的考虑了土工模袋界面滑动的特点,但都假设土工模袋间界面为水平状,实际上模袋为柔性土工布,水力充填粉煤灰后的模袋会因不均匀固结、施工错缝、施工顺序等影响,而产生镶嵌现象,与水平状界面假设具有一定的差距^[14]。当前贮灰场模袋坝施工领先于理论,在模袋坝精细化设计或安全评估时,如何合理准确的计算模袋坝稳定性,并与当前规范规定的安全系数进行对比分析,就成了需要解决的问题。模袋坝虽然在使用过程中也出现了一些问题,如漫顶、坝基渗透破坏、坝体滑动变形等(图17),但在漫顶、滑坡等条件下均展现出较强的韧性,避免了更大的损失。这也需要针对模袋坝的具体使用条件,合理计算各种工况下的安全性。



图16 模袋坝

Fig.16 Ash dam by multi-layered stacked geotextile tubes



图17 某模袋坝因坝基渗透破坏而滑动变形

Fig.17 Ash dam by stacked geotextile tubes slips due to seepage failure

3.1.2 环保要求引发的灰坝安全新问题 我国灰场大规模建设初期,库区防渗还没有强制要求,没有设置专门的库底防渗系统,而仅是将库区渗漏问题作为选址决策因素之一。随着我国国民经济的发展和环保意识的不断增强,后续新建的贮灰场底部都要求采取防渗处理。早期灰场底部未做过防渗处理

的贮灰场子坝加高时，有些会采取在现有灰面上铺设防渗膜的方式，进行防渗处理。

现有灰面上铺设防渗膜可以阻挡降雨或灰水向下的渗漏，减少对地下水的污染，但从安全的角度出发，灰面上铺设防渗土工膜可能会成为影响灰坝稳定性的风险源。防渗土工膜铺设后对灰坝稳定性的影响有两方面：一是受阻雨水或灰水在防渗土工膜顶部壅积，形成滞水，导致局部浸润线抬升，从而使得灰坝有效抗剪强度降低；二是土工膜与粉煤灰界面剪切强度低于粉煤灰自身强度，易成为影响灰坝稳定的薄弱部位。对于降雨强度小、蒸发量大的地区，受蒸发的影响，降雨形成土工膜上层滞水的可能性较小，或滞水位抬升较慢。但在我国南方等降雨强度和降雨量较大的地区，贮灰场入渗降雨量会偏多，当雨洪排泄不畅、长期积存时，会导致土工膜上滞水位的快速提升。此时的贮灰场虽然设计为干灰场，但实际上内部存在较高的滞水位，稳定性低于干灰场的设计值(图 18)。

当前防渗土工膜对灰坝稳定性影响评价尚无规范参考。在实际分析过程中，如果依据干式贮灰场计算，不考虑滞水位的影响，会导致计算的安全系数偏高，结果偏危险。如果依据湿式贮灰场计算，会出现稳定渗流条件下滞水位过高，导致计算的安全系数偏低，结果偏保守。因此，防渗土工膜对灰坝稳定性的评价，需结合当地的降雨特征、蒸发量等气象条件，考虑管理不周导致积水长期入渗等不利因素，从诱因分析、不利因素发展、稳定性演化等角度出发，结合贮灰场设计使用年限等，进行综合论证分析。当运行条件不利、滞水位较高时，还应考虑对土工膜上的滞水设置排水通道。

3.1.3 极端降雨条件下的贮灰场防洪安全与灰坝稳定性 在极端气候的背景下，贮灰场防洪安全面临巨大考验。极端强降雨不仅会导致贮灰场内水位快速抬升，直接面临漫顶风险^[15]，还会降雨滑坡、冲蚀等破坏排洪设施，导致排洪困难，间接诱发漫顶风险。在河南郑州“7·20”特大暴雨中，就曾产生运灰道路冲毁、截洪沟局部滑塌(图 19)、排水斜槽底部冲蚀、排水竖井淤堵等现象^[16]。由于粉煤灰的污染性，强降雨条件下，洪水还有可能会将粉煤灰冲蚀进排洪沟，并最终冲向下游沟外，造成下游污染事故^[17]。强降雨期间贮灰场内的高水位还容易引发管涌。

极端降雨不仅会给贮灰场的防洪安全、渗流安全增加压力，还对灰坝的稳定性产生不利影响^[18]。如娃娃沟灰场一二级子坝左坝肩曾因降雨滑动塌陷^[19]。极端降雨对灰坝稳定性的影响主要有两类：一类是坡面汇流冲蚀；另一类是坝体滑坡。降雨汇流冲蚀会导致灰坝坡面冲沟不断发育，不仅影响了坝体的完整性，还会使坝面护坡结构因底部脱空而开裂破坏，是最常见的一种破坏模式。降雨对灰坝的稳定性影响主要为三个方面：一是降雨会导致灰坝内孔隙水压力增加，抗剪强度降低，导致抗滑稳定性降低；二是降雨会使灰坝内产生饱和区，易在地震作用下发生动态液化，从而导致灰坝地震破坏；三是降雨会使松散填筑的灰坝发生静态液化，产生流滑破坏。静态液化是因土体剪缩而导致强度骤然降低，出现流态运动的一种现象，具有启动时间短、运动速度快、冲击能量高等特点。当前静态液化导致流滑主要发生在尾矿库、填土边坡、固体废弃物堆填体等松散无黏性填方体中^[20]，如 2015 年巴西 Fundão 尾矿库静态液化导致溃坝事件，造成 19 人死亡^[21]。虽然当前尚未见灰场静态液化流滑的案例报道，但碾压密实度不足的灰坝材料具备剪缩的条件，在降雨入渗、浸润线抬升等条件下存在静态液化、高速流滑的可能性。灰坝在建设过程中，坝高随子坝级数的增加

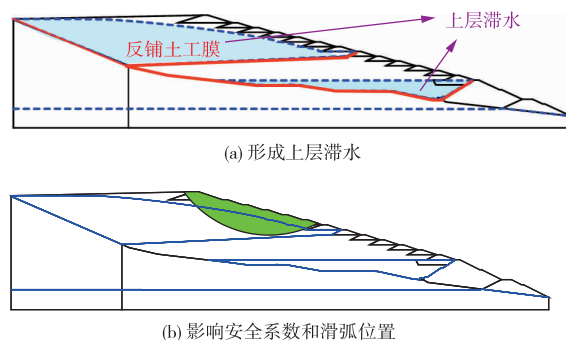


图 18 灰场铺设土工膜的不利影响
Fig.18 Adverse effects of laying geomembrane in coal ash storage facility



图 19 极端降雨导致截洪沟局部滑塌^[16]
Fig.19 Extreme rainfall triggered partial collapse of the flood trench^[16]

而增加,当坝体质量控制不好而产生流滑时,灰坝越高溃决风险越大,溃坝影响范围也越大。

3.1.4 排渗、排洪设施的长期安全 贮灰场多采用土石初期坝、粉煤灰子坝的方式筑坝(图7)。这类筑坝方式,在设计合理的条件下,随着时间的增长,灰坝的固结度会增加,从而导致坝体抗剪强度有所增强。对贮灰场长期安全影响较大的主要是排渗和排洪设施。贮灰场常用的排渗设施有坝脚排渗棱体和坝底排渗褥垫等。贮灰场经过长期运行后,排渗设施的渗透性有可能会因淤堵而降低,排渗效果不佳,从而会导致坝体内的浸润线位置抬升,下游坝面出现渗水等问题,严重的还有可能导致坝体滑坡。如青石壁贮灰场因初期坝坝底排渗褥垫淤堵、排渗能力降低,导致初期坝下游坡面出现大面积渗水^[22];桦林西沟贮灰场二、三级子坝因水平排渗管排渗能力降低,导致二、三级子坝下游坡面发生长达150 m的局部大面积渗水现象^[23]。

贮灰场常用的排洪设施主要是竖井、排水斜槽和坝下排洪涵管。这些排洪设施主要为钢筋混凝土材料,在长期运行后,会产生混凝土老化开裂、钢筋裸露锈蚀、接头变形等现象^[24]。贮灰场在加高扩容改造中,不仅会影响坝体的稳定性,还会影响坝下排洪涵管的受力,从而导致管道非均匀变形、接口错位、原胀圈损坏等现象。受材料老化和涵管变形的影响,排洪涵管还会产生倒虹吸、灰渣淤积、漏水严重、管周粉煤灰脱空等问题,从而影响排洪设施的承载能力与功能。这些排洪设施多被掩埋于粉煤灰下,给巡视检查带来困难,产生的问题难以及时发现,往往在对灰场产生较大影响时才被发现。如紫山灰场2001年排水斜槽上部段上方的粉煤灰突然塌陷,形成了直径约30 m的近似漏斗状塌陷坑^[25]。哈建屯灰场在投入运行32年后,因排水涵管接头处损坏,出现涵管出水浑浊、坝体大面积塌陷等现象(图20)^[26]。黑龙江某水灰场排水涵管在运行中出现了错位,受该位置灰水泄露冲刷影响,导致管周粉煤灰严重脱空,灰面顶部突然出现圆形漏斗状塌陷坑(图21)。某电厂排洪涵管因不均匀沉降出现倒虹吸(图22),导致灰渣局部淤积严重,影响排洪能力。为避免类似场景发生,应定期检查排洪涵管的完整性与老化情况,优先采用管道机器人等进行检查,如发现问题及早处理。其次应做好应急预案,防止隐患进一步发展,酿成溃坝等事故。

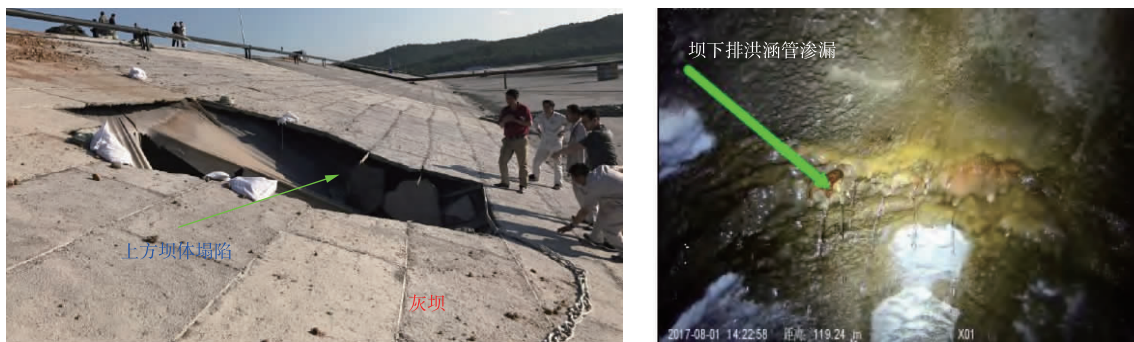


图20 灰场排水管道渗漏导致坝体塌陷^[26]

Fig.20 Collapse of fly ash dam caused by the leakage of the drainage pipe^[26]



图21 某水灰场排洪管道错位渗漏导致灰面出现天坑

Fig.21 Sinkholes on the ash surface due to leakage of drainage pipes

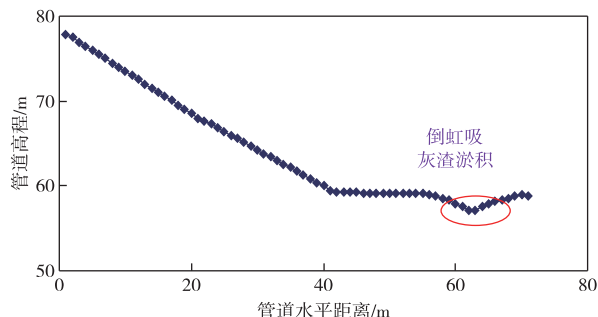


图22 某电厂排洪管道实测沉降变形

Fig.22 Deformation of drainage pipe in a power plant

当前贮灰场运行中,为了增加库容,往往采取加高扩容的方式,导致灰坝坝高超出现规划的设计高度。根据我国《火力发电厂干式贮灰场设计规程》(DL/T 5488—2014)的要求,“堆灰高度不得超过规划的设计高度。当灰场确需扩容且堆灰总高度超过规划的设计高度时,应进行专题论证。”除了论证加高后的结构安全外,还需要论证对排洪涵管的影响。贮灰场加高扩容后的土压力是影响排洪涵管服役状态的重要因素之一。排洪涵管所承载的土压力受到排洪涵管和其周围粉煤灰的相对刚度、基床形式、粉煤灰的沉积形态与沉积时间等因素影响。现有的排洪涵管压力多是采用 Marston-Spangler 公式等直接计算,考虑影响因素不周全,计算结果与实际误差较大。因此有待提升贮灰场加高条件下土压力及排洪涵管应力变形响应分析方法,从过程分析的角度出发,考虑排洪涵管的实际赋存环境与粉煤灰的实际沉积或碾压过程,从而可以更准确地分析贮灰场加高条件下排洪涵管所受的土压力,复核排洪涵管的承载力。

3.2 封场安全

3.2.1 灰场封场与再利用有待规范 2012 年以来,我国的发展更加注重生态环保。响应国家政策,很多贮灰场封场采取了生态修复方案,甚至将灰场打造成生态公园,从而调节当地生态环境,实现土地资源再利用,如北京的龙口灰场^[27]、大唐陡河电厂李家峪灰场、武汉青山热电厂贮灰场、呼和浩特金桥电厂贮灰场等。当前我国贮灰场的具体封场方案设计与整治主要集中在坝体、防洪与排水设施、周边环境整治、闭库后管理与环境保护等,从而满足国家相关导则标准所提出的安全环保要求。需指出的是,当前经过严格封场设计与生态修复的贮灰场数量仍然偏少,很多已经停产且需要封场的贮灰场没有完整封场方案,有的仅是在贮灰场表面简单种植一些植物,有的甚至直接弃用不采取任何措施,使得已停用或封场贮灰场的安全性、环保状态参差不齐。如果发生封场贮灰场事故,必定对周围地区的安全与环境造成不良影响。

针对封场贮灰场场地平整、面积大等特点,再利用贮灰场为建设用地,成为建设用地紧缺地区的备选。近几年封场贮灰场再利用中以光伏电站占比最大,其中有江西井冈山电厂灰场、贵州粤电盘南电厂灰场、河南省平顶山热电有限公司竹园灰场、宁夏青铜峡市华能雷避窑灰场等。有些封场贮灰场正被考虑再利用为其他用途,如用作煤场等其他工程建设场地等,我国封场贮灰场的再利用还较少,但有发展的趋势。当封场贮灰场再利用为其他工程建设用地时,应当开展深入论证,分析其他工程建设对贮灰场防洪、渗流、坝体稳定、排渗排洪设施等的影响。

与我国贮灰场封场与再利用的发展相比,我国当前尚无专门关于贮灰场封场与再利用的标准,现有的标准中涉及的相关内容也不能满足当前的需求。当前国内导则主要有《电厂粉煤灰渣排放与综合利用技术通则》(GB/T 15321—1994)、《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599—2020)、《火力发电厂灰渣筑坝设计规范》(DL/T 5045—2006)、《火力发电厂干式贮灰场设计规范》(DL/T 5488—2014),其中只有《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制指标》(GB 18599—2020)和《火力发电厂干式贮灰场设计规范》(DL/T 5488—2014)涉及到贮灰场封场,并且相关内容也比较简要。如《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599—2020)中虽然涉及封场时间、结构、维护、再利用等,但均是关于固体废弃物封场与复垦的原则性要求。《火力发电厂干式贮灰场设计规范》(DL/T 5488—2014)中有专门一节关于干灰场封场设计,提出了设计要求与维护,但该内容比较简要。

我国“十四五”规划中明确指出,要大力发展水电、风电、核电、太阳能、生物质能、地热能等新能源和清洁能源,推进绿色中国建设。在国家能源调整和注重生态环保发展的大背景下,将会有更多的贮灰场面临封场。贮灰场封场施工时,有可能会因施工振动等因素而导致粉煤灰液化,对安全产生不利影响^[28]。贮灰场封场以后,管理人员与经费投入会相应减少,存在管理措施难以继续等问题,也会导致一些安全问题:一是排水系统会发生设施老化、淤积淤堵、排洪不畅等问题,导致贮灰场的防洪能力不满足要求;二是外部人畜等进入贮灰场,损坏贮灰场坝体结构、监测设施、排洪设施等,引发事故的可能性增大。贮灰场封场应当从长期安全生态环保的角度来考虑封场措施,并且在安全环保的条件下开展再利用,通过再利用来延续灰场的运行管理与除险加固等工作,从而及早发现险情,及早处理。

3.2.2 不当回采引发的安全问题 粉煤灰是一种重要的建筑材料,可用于生产水泥、公路填方等,具

有良好的综合利用价值。当粉煤灰综合利用率较低时，大量的粉煤灰会被贮放。但当粉煤灰需求较高时，这些原本贮放的粉煤灰就会被开挖回采后再利用。《粉煤灰综合利用管理办法》第二十四条中明确指出，任何单位及个人不得在灰场非指定区域擅自取灰。当前涉及封场贮灰场回采的规范较少，实际回采过程中常常无论论证设计，或者不依据设计施工，随意性较大，给贮灰场带来不利影响，甚至造成较大事故。

某贮灰场一直处于停运状态。其灰坝坝高 31 m，坝型为堆石、干砌石和浆砌石混合坝，下游坝坡为 1:1.5，上游坝坡 50 m 标高以上为直立，50 m 标高以下为 1:0.15。20 世纪 90 年代初期覆土复耕，后来由于周边村民挖灰现象严重，致使覆土部分遭受破坏。多年来周边村民无序挖取贮灰场存灰，且取灰位置直接临近主坝，导致坝体上部近 20 m 没有堆灰。主坝上游的粉煤灰被挖走后，造成灰坝上游面临空，浆砌石墙两侧受力悬殊，墙体向上游倾斜，当倾斜发展到一定程度，在降雨等条件的诱发下，墙体连带其后部分堆石体失稳，发生向灰场内的倒塌，所幸无人员伤亡(图 23)。



图 23 不当取灰导致灰坝倒塌

Fig.23 Ash dam collapse induced by improper ash removal

2023 年 7 月 16 日，四川省宜宾一企业在该市豆坝电厂贮灰场取灰作业时，发生了一起较大坍塌事故，造成 3 人死亡，直接经济损失约 458.8 万元。事故调查表明^[29]，不合理的取灰方式是本次事故的主因，企业违规采取自下而上的取灰方式，导致坡角陡于设计值、稳定性较差，再叠加前期降雨和挖掘机外力扰动的双重影响，加速粉煤灰边坡结构体系失稳而突发大面积坍塌，导致事故发生。

封场贮灰场大量回采时，应当开展专门论证设计，制定合理的回采方案，分层分区回采^[30]。回采涉及坝体、排洪构筑物附近位置时，更应结合实际情况，考虑结构的特点，合理制定方案。如果不规范取灰方式，既有可能造成贮灰场内粉煤灰开挖边坡的不稳定性，对作业人员的生命与财产安全造成不利影响，也有可能伤及灰坝，对贮灰场的安全造成不利影响。

3.3 其他工程扰动安全

3.3.1 基础设施建设 近年来，随着我国经济建设的发展，基础设施建设不断加强，高铁、公路等交通设施不断增加，有些建设在了灰坝附近，甚至灰场之上，如京张铁路张家口段距离张家口发电厂东灰场坝脚最近地方约 100 m(图 24)^[31]，黑龙江省一公路直接穿越某贮灰场(图 25)，某贮灰场内施工有高架桥桥墩等。对于建设用地紧缺地区，为有效利用封场贮灰场平整的场地，直接在贮灰场上建设煤场等其他基础设施。根据基础设施建设的需求和建设用地紧缺间的矛盾，推测今后再利用封场贮灰场作为基础设施建设用地的需求或规划会越来越多。

基础设施建设对贮灰场的影响有直接和间接两类。直接影响主要是直接座落于贮灰场上的基础设施的影响：一是在基础设施勘察或施工阶段，有可能钻孔会打穿贮灰场排洪涵管或库底防渗层，从而影响贮灰场的防渗、防洪安全和环保；二是在运行阶段，建成后的基础设施会增加灰场的运行荷载，从而加大灰坝沉降量或降低灰坝抗滑安全系数，也会增大坝下排洪涵管的载荷与变形，改变贮灰场的防洪容积、洪水汇流等，从而影响贮灰场的防洪安全。间接影响主要是座落在贮灰场附近的基础设施的影响：一是这些基础设施运行中存在振动等现象，这些振动会间接的传递给灰坝，从而可能会对灰坝的安全产生影响；二是这些基础设施直接位于灰坝下游，既有可能影响贮灰场的行洪路径，也增

大了贮灰场溃决后的失事后果。

当前国内外关于基础设施与贮灰场之间的相互作用研究相对较少，缺乏详细的评估规定，这就需要对于这些特殊条件下的基础设施建设开展专门的论证，既要论证基础设施建设运行对贮灰场安全的影响，也要论证评估贮灰场溃决对基础设施的冲击和影响，从而提前防治潜在的安全隐患，确保贮灰场和基础设施的共同安全。



图 24 贮灰场坝脚高铁通过

Fig.24 High-speed rail near the foot of a fly ash dam



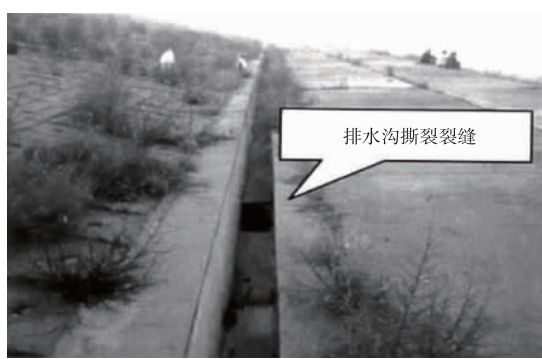
图 25 公路从灰坝顶部附近穿过

Fig.25 The road passes near the top of the ash Dam

3.3.2 压煤开采 许多燃煤发电厂为坑口电厂，设置在煤矿、矿井周边，其贮灰场也常不可避免的坐落在采空区之上，如果贮灰场下方压煤或附近煤层进行开采时，灰坝安全与压煤开采之间就会不可避免的产生矛盾^[32-33]。中电投姚孟发电公司程寨沟灰场为山谷型水灰场，坝高 70 m，坝顶宽度为 6.67 m，主坝长约 1 km，总贮灰库容 $3.36 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，已存贮灰渣约 $2.8 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。贮灰场地处采空区上方，其下压煤约 655 万 t，严重影响了矿井达产能力和出煤量^[33]。为缓解面临的紧张局面，灰场下进行了采煤。开采过程中坝体监测最大下沉约 260 mm，主坝顶面出现了横向裂缝(图 26)^[33]。山西某山谷干灰场坝高 62 m，库容 $5.92 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，灰场下方煤矿开采导致管理站房开裂，二级子坝顶部出现 9 条裂缝，延伸长度 6.4~38.5 m。



(a) 坝顶混凝土板塌陷



(b) 灰坝表面裂缝及灰体泄出

图 26 程寨沟灰场下方开采引发地表变形^[31]

Fig.26 Surface deformation caused by mining under Chengzhaigou coal ash storage facility

灰坝下压煤开采会引起坝体的变形，当变形达到一定极限值时，坝体会产生拉裂缝从而影响坝体抗滑稳定性与渗透稳定性，当坝体沉降量过大时，还会降低贮灰场的防洪能力，易产生漫顶破坏。排洪(水)系统的水工构筑物，如排水沟、坝下排洪涵管等，在采空区变形和坝体变形的双重影响下，也会产生相应的弯曲变形，甚至开裂或错断，导致漏水、漏灰。因此贮灰场下采煤时，应当以贮灰场安

全为根本,深入论证采煤方案及其对上部贮灰场的影响,重点论证未来煤炭开采布局、保安煤柱宽度、开采方式和强度等对贮灰场的影响。当待加高的贮灰场下已有采空区时,应结合采空区的实际状况及规划加高的高度、位置等,论证子坝加高对采空区顶板受力与变形的影响,以及采空区顶板变形对贮灰场的影响。

3.3.3 工程爆破、山体滑坡等影响 有的山区灰场附近基岩裸露,易被作为工程露天采石场。这些采石场主要依靠爆破手段来进行开采,爆破在便利采石的同时,其强烈的爆破振动也给采石场附近的贮灰场安全产生较大的威胁。爆破振动一是会直接给坝体和排洪设施的变形产生不利的震动作用,二是有可能诱发液化,间接影响灰场安全^[34]。因此在灰场附近开展爆破时,应针对实际的工程条件与地质条件,论证爆破荷载下的安全区域与贮灰场灰坝、排洪设施等在爆破荷载下的安全性。

山谷贮灰场的库内及坝址下游往往存在较高的斜坡。这些斜坡既有可能因为降雨、地震等条件触发滑坡,也有可能因山体开挖取土等诱发滑坡。这些滑坡会威胁到贮灰场的防洪、坝体稳定、排渗排洪设施、上坝道路等。陕西某电厂贮灰场灰坝坝肩黄土滑坡,近 $2\times 10^5\text{ m}^3$ 滑坡体堆积于坝脚,掩埋了部分灰坝,摧毁了灰坝左侧截排水沟,堵塞了贮灰场的排洪通道^[35]。

4 结论

我国燃煤火力发电厂排放了数量巨大的粉煤灰,在综合利用之后,剩余的粉煤灰数量仍然可观,需要建设贮灰场加以贮存。随着我国经济和技术水平的不断发展,环保生态理念的不断深入等,当前我国贮灰场面临的形势产生了较大的变化。从贮灰场及其周边环境而言,贮灰场类型已由湿式为主过渡到干式为主;灰坝坝高不断攀升,百米高坝不断涌现;经济发展使得原位于荒郊的贮灰场逐步进入城市内部,灰场周边高速发展,交通、建筑、人口等均呈增多趋势。从我国管理理念和极端气候条件而言,我国对贮灰场生态环保的要求不断提高;国家碳达峰与“碳中和”战略背景下,将有越来越多的贮灰场封场;频发的极端气候严重威胁贮灰场的安全。

在这些新形势的交叉作用下,贮灰场的安全也涌现出一些新问题,主要涉及运行安全、封场安全和其他工程扰动安全等。运行安全主要涉及石膏坝、模袋坝等新型贮灰方式的长期安全性,环保铺膜上层滞水影响灰坝安全,极端降雨条件下的贮灰场防洪安全与灰坝稳定性,排渗、排洪设施在淤堵、老化、加高等条件下的长期安全。封场安全主要是不当取灰易引发灰面或坝体坍塌,以及排洪设施老化等。其他工程扰动主要是铁路、公路、桥梁、再利用项目等对贮灰场的加载、扰动、破坏等影响,以及贮灰场下方或附近采空、爆破、滑坡等对贮灰场防洪、结构、排渗等影响。

为提升贮灰场的韧性与安全水平,建议后续贮灰场设计、建设、运行、封场、再利用的全过程中,不仅要全面考虑贮灰场当前面临的形势,还要考虑贮灰场未来形势的发展与转变,深入分析潜在致灾因素,在科学论证分析的基础上,加强管理,有效化解风险,防患于未然。

参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020. (National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020. (in Chinese))
- [2] 姜龙. 燃煤电厂粉煤灰综合利用现状及发展建议[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 31-39. (JIANG Long. Comprehensive utilization situation of fly ash in coal-fired power plants and its development suggestions[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(4): 31-39. (in Chinese))
- [3] 刘梦茹, 杨亚东, 杨素洁, 等. 粉煤灰资源综合利用现状研究[J]. 化工矿物与加工, 2021(4): 45-48. (LIU Mengru, YANG Yadong, YANG Sujie, et al. Research on comprehensive utilization of fly ash resources [J]. Industrial Minerals & Processing, 2021(4): 45-48. (in Chinese))
- [4] CAO D Z, EVA S, et al. Utilization of fly ash from coal-fired power plants in China[J]. Journal of Zhejiang Uni-

versity: SCIENCE A, 2008(9): 681-687.

- [5] Office of the Inspector General. Review of the Kingston Fossil Plant Ash Spill Root Cause Study and Observations about Ash Management[R]. Tennessee Valley Authority (TVA), 2008.
- [6] SANTAMARINA J C, TORRES-CRUZ L A, BACHUS R C. Why coal ash and tailings dam disasters occur[J]. Science, 2019, 364(6440): 526-528.
- [7] 新华社新媒体. 一个中国湖泊的“变形记”[EB/OL]. (2018-06-05)[2024-08-25]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1602429543740274894>. (New media, the official Xinhua News Agency. A Chinese lake “metamorphosis”[EB/OL]. (2018-06-05)[2024-08-25]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1602429543740274894>. (in Chinese))
- [8] 刘伟, 周成, 何宁, 等. 脱硫石膏-灰渣固废料参数确定及其筑坝分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(6): 1420-1425, 1475. (LIU Wei, ZHOU Cheng, HE Ning, et al. Parameter determination of desulfurized gypsum-ash solid waste and analysis of dam construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(6): 1420-1425, 1475. (in Chinese))
- [9] 刘志勇, 陈群, 董渝. 脱硫石膏的掺入对灰渣子坝稳定性的影响[J]. 水电站设计, 2015, 31(1): 16-19, 47. (LIU Zhiyong, CHEN Qun, DONG Yu. Influence of desulfurization gypsum on stability of ash and slag dam [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2015, 31(1): 16-19, 47. (in Chinese))
- [10] 谢兴富. 粉煤灰—脱硫石膏混合体的耐淋特性及作为坝基材料的渗流稳定分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. (XIE Xingfu. Leaching Characteristic of Fly ash with Desulfurization Gypsum and Seepage Stability Analysis of Ash Dam[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese))
- [11] 彭君, 罗启迅, 陈群. 掺石膏灰渣混合料的力学性质试验分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(11): 121-123, 88. (PENG Jun, LUO Qixun, CHEN Qun. Experimental Analysis of Mechanical Properties of Mixture of Fly Ash, Cinder and Gypsum[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(11): 121-123, 88. (in Chinese))
- [12] 曾平, 康学毅, 马领康. 电厂脱硫石膏及其混合物作为填筑材料的物理力学性质试验研究[J]. 工程勘察, 2008(S2): 100-103. (ZENG Ping, KANG Xueyi, MA Lingkan. Experimental study on physical and mechanical properties of desulfurized gypsum and its mixture as filling materials in power plant[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(S2): 100-103. (in Chinese))
- [13] 周汉民, 刘晓非, 崔旋, 等. 偏细粒尾矿新型快速堆坝方法[J]. 现代矿业, 2011(11): 120-121, 124. (ZHOU Hanmin, LIU Xiaofei, CUI Xuan, et al. A new rapid dam stacking method for ultrafine tailings[J]. Modern Mining, 2011(11): 120-121, 124. (in Chinese))
- [14] 刘磊, 尚静石, 李维朝, 等. 强度折减条件下膜袋坝应力和变形响应特征离散元分析[J]. 华北水利水电学院学报, 2021, 42(4): 83-91. (LIU Lei, SHANG Jingshi, LI Weichao, et al. Investigation of Stress and Deformation Characteristics of a Geotextile Tubes Dam under Strength Reduction Via Discrete Element Method[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2021, 42(4): 83-91. (in Chinese))
- [15] 王忠祥, 张大伟. 堤防漫顶溃决物理模型试验研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(1): 36-48. (WANG Zhongxiang, ZHANG Dawei. Research progress of physical model test of levee overtopping failure[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(1): 36-48. (in Chinese))
- [16] 李兴. 极端暴雨下贮灰场损毁案例分析及设计对策[C]//贮灰场工程安全与生态环保学术交流会. 2023. (LI Xing. Case analysis and design countermeasures of ash storage yard damage under extreme rainstorm[C]//Ash Storage Engineering Safety and Ecological Environmental Protection Academic Exchange Meeting. 2023. (in Chinese))
- [17] 王玉军. 干式贮灰场堆灰运行方式与雨季防洪实例分析[J]. 电力科技与环保, 2010, 26(4): 60-62. (WANG Yujun. Case analysis of incline ash field operating mode and its flood control in rainy season[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2010, 26(4): 60-62. (in Chinese))
- [18] 周成利, 王志强, 李维朝, 等. 极端降雨条件下填土高边坡的水文响应研究[J]. 水利学报, 2014, 45(S2): 137-141. (ZHOU Chengli, WANG Zhiqiang, LI Weichao, et al. Hydraulic response of dry ash dam subjected to extreme rainfall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(S2): 137-141. (in Chinese))

- [19] 王明斌, 吴勇, 梁洪. 强降雨条件下贮灰坝稳定性模拟研究[J]. 价值工程, 2018, 37(15): 99-100. (WANG Mingbin, WU Yong, LIANG Hong. Simulation study on stability of ash storage dam under heavy rainfall conditions[J]. Value Engineering, 2018, 37(15): 99-100. (in Chinese))
- [20] 李维朝. 松散填土边坡降雨流滑灾变过程研究[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (LI Weichao. Study on Rainfall Slip Disaster Process of Loose Fill Slope[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [21] DAVID R. Additional analyses of the Fundao tailings storage facility: in situ state and triggering conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(11): 04019088.
- [22] 谢定松, 蔡红, 温彦锋, 等. 青石壁贮灰场主坝坝面渗水原因分析及加固方案研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(6): 41-45. (XIE Dingsong, CAI Hong, WEN Yanfeng, et al. Study on causation of surface seepage of main dam for Qingshibi Ash Storage Yard and its strengthening scheme[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(6): 41-45. (in Chinese))
- [23] 张慧峰, 谢定松, 蔡红, 等. 桦林西沟贮灰场灰坝渗水综合治理方案探讨[J]. 工程建设与设计, 2014(11): 90-93. (ZHANG Huifeng, XIE Dingsong, CAI Hong, et al. Study on reinforcement measure of leakage in the ash dam of Hualinxigou[J]. Construction & Design for Project, 2014(11): 90-93. (in Chinese))
- [24] 孙东亚, 姚秋玲, 赵雪莹. 堤坝涵管接触冲刷破坏模式分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(2): 276-280(SUN Dongya, YAO Qiuling, ZHAO Xueying. Analysis of contact erosion failure mode of dike culvert[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 21, 19(2): 276-280. (in Chinese))
- [25] 罗长军, 李伟, 卢冰, 等. 灌浆技术在紫山灰场粉煤灰地层中的应用[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 332-335. (LUO Changjun, LI Wei, LU Bing, et al. Application of grouting technology to the layer of pulverized coal ash on ground of Zishan[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 332-335. (in Chinese))
- [26] 陈丽, 谢定松, 梁树军, 等. 哈建屯贮灰场灰坝塌陷原因与治理措施研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(2): 163-171. (CHEN Li, XIE Dingsong, LIANG Shujun, et al. Collapse causation analysis of ash dam at Hajiantun ash yard and its treatment measures[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(2): 163-171. (in Chinese))
- [27] 梁树军, 李健, 肖建章. 龙口贮灰场增设景观设施对灰坝的影响分析[J]. 水利建设与管理, 2022, 42(5): 16-20. (LIANG Shujun, LI Jian, XIAO Jianzhang. Analysis on the influence of adding landscape facilities on ash dam in Longkou ash storage yard[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2022, 42(5): 16-20. (in Chinese))
- [28] WANG J. Field Observation of Construction-Induced Liquefaction during Closure of a Coal Ash Impoundment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(6): 02822002.
- [29] 宜宾市应急管理局网站. 宜宾明涛商贸有限公司“7·17”较大坍塌事故调查结果公布[EB/OL]. (2023-11-16)[2024-07-01]. http://www.yibin.gov.cn/xxgk/jdhy/hyqg/202311/t20231116_1925595.html. (Yibin city emergency management agency web site. The investigation results of the “7·17” major collapse accident of Yibin Mingtao Trading Co., Ltd. have been announced[EB/OL]. (2023-11-16)[2024-07-01]. http://www.yibin.gov.cn/xxgk/jdhy/hyqg/202311/t20231116_1925595.html. (in Chinese))
- [30] 谭宁, 张庆, 王昌义. 火电厂灰场回采方案浅析[J]. 科学技术创新, 2018, 27: 10-12. (TAN Ning, ZHANG Qing, WANG Changyi. Analysis on mining scheme of ash field in thermal power plant[J]. Scientific and Technological Innovation, 2018, 27: 10-12. (in Chinese))
- [31] 严俊, 魏迎奇, 蔡红, 等. 高铁运行振动对大坝安全性影响特性研究[J]. 水力发电, 2019, 45(5): 67-72, 107. (YAN Jun, WEI Yingqi, CAI Hong, et al. Research on the Influencing Characteristics of the Running Vibration from High-speed Rail on Dam Safety[J]. Water Power, 2019, 45(5): 67-72, 107. (in Chinese))
- [32] 吴侃, 徐亚楠, 李亮. 电厂储灰场主要设施开采破坏分析研究[J]. 煤矿开采, 2010, 15(6): 25-28. (WU Kan, XU Yanan, LI Liang. Analysis on failure of main structures in ash field of power plant induced by mining[J]. Coal Mining Technology, 2010, 15(6): 25-28. (in Chinese))
- [33] 陶海亮, 牛本宣, 张云鹏, 等. 开采影响下电厂储灰场灰坝损害机理及治理对策[J]. 矿山测量, 2014(3): 44-47, 46. (TAO Hailiang, NIU Benxuan, ZHANG Yunpeng, et al. The damage mechanism and control

- countermeasures on the mining-induced ash dam of ash field in power plant[J]. *Mine Surveying*, 2014(3): 44–47, 46. (in Chinese))
- [34] 吴琦. 爆破冲击作用下某贮灰库动力稳定分析及应用[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022. (WU Qi. Dynamic Stability Analysis and Application of an Ashsilo under Blasting Impact[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2022. (in Chinese))
- [35] 刘红卫, 周毅, 董国良, 等. 陕西某已滑滑坡特征及治理成果[C]//2019 年全国工程地质学术年会. 2019: 125–130. (LIU Hongwei, ZHOU Yi, DONG Guoliang, et al. Characteristics of a landslide in Shaanxi Province and its management results[C]//2019 National Engineering Geology Annual Conference. 2019: 125–130. (in Chinese))

Development situation and safety issues in China's coal ash storage facilities

LI Weichao^{1,2}, LU Xin², WANG Jianjun³, WEN Yanfeng^{1,2}, TAI Zewen⁴, XIE Dingsong^{1,2}

(1. *Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;*

2. State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Shanxi Electric Power Exploration and Design Institute, Taiyuan 030001, China;

4. Gongyi Emergency Management Bureau, Zhengzhou 451200, China)

Abstract: Fly ash is the largest single source of industrial solid waste pollution in China. A considerable amount of unused fly ash is often stored in coal ash storage facilities by constructing dams. The long-term safety and environmental protection of these storage facilities are critical issues throughout their lifetime. Ash storage accidents can not only directly cause significant casualties or property damage, but also lead to environmental pollution, that would cause serious secondary disasters. Based on the collection and compilation of a large amount of actual data and references on coal ash storage facilities, this article delves into the development situation and safety concerns faced by coal ash storage facilities in China. Currently, in China, with the increasing of total amount of stored fly ash, the predominant kind of storage facilities has transitioned from wet to dry. New types of ash dams, such as ash dams formed by multi-layered stacked geotextile tubes or by desulfurization gypsum, have emerged. Ash dams over a hundred meters high have been constructed, and location of some storage facilities have been transitioned from rural to urban environments, even becoming overhead storage facilities. During operation, the storage facilities are not only susceptible to extreme weather events such as rainfall, but also influenced by human activities such as fly ash reclamation, infrastructure construction, mining, blasting, as well as natural factors such as landslides. In addition, after years of operation or closure, the storage facilities also face aging issues. These new developments not only directly impact the safety of the ash storage facilities, but also act to amplify and intertwine the risks of dam failure. It is recommended that in the future, the entire process of designing, constructing, operating, closing, and reusing ash storage facilities should fully consider the potential disaster-triggering factors and effectively mitigate risks based on scientific analysis, thereby enhancing the resilience and safety level of coal ash storage facilities in the future.

Keywords: Coal ash storage facility; closure; reuse; extreme rainfall; fly ash dam

(责任编辑: 祁 伟)