

某磷石膏干渣库浆砌石拦渣坝开裂变形原因分析及处理方案探讨

陈贵生¹, 余再西^{2*}

1. 昆明恒基建设工程施工图审查中心, 云南 昆明 650000

2. 云南建安昆宁工程设计咨询有限公司, 云南 昆明 650000

摘 要 : 尾矿因其对环境污染严重且影响范围广, 若处理不当扩散后治理费用高难度大, 需要对其集中堆积后处理, 而尾矿坝是稳定这些尾矿堆积体的重要构筑物, 其破坏或溃坝后果极其严重, 故尾矿坝的安全性对尾矿库的安全性起到至关重要的作用。本文通过某实际工程案例, 分析了某磷石膏干渣库浆砌石拦渣坝开裂变形的原因并给出了加固方案, 其中对施工质量、尾矿渗滤液等对坝体安全性的影响做了详细分析, 为类似尾矿库的建设和管理提供参考和借鉴。

关 键 词 : 浆砌石拦渣坝; 鼓包开裂; 原因分析; 施工质量

Analysis of the Causes of Cracking and Deformation of the Masonry Stone Retaining Dam in a Phosphogypsum Dry Slag Storage Yard and Discussion on the Treatment Scheme

Chen Guisheng¹, Yu Zaixi^{2*}

1. Kunming Hengji Construction Engineering Construction Drawing Review Center, Kunming, Yunnan 650000

2. Yunnan Jianan Kunming Engineering Design & Consulting Co., LTD. Kunming, Yunnan 650000

Abstract : Due to the severe environmental pollution and wide influence range caused by tailings, if not properly handled, the cost and difficulty of post-diffusion treatment will be extremely high. Therefore, it is necessary to concentrate and treat the tailings. Tailings dams are important structures for stabilizing these tailings accumulation bodies. Their failure or collapse would have extremely serious consequences. Thus, the safety of tailings dams plays a crucial role in the safety of tailings ponds. Through a practical engineering case, this paper analyzes the causes of cracking and deformation of the masonry stone retaining dam of a phosphogypsum dry residue storage pond and provides a reinforcement plan. It also conducts a detailed analysis of the impact of construction quality and tailings seepage liquid on the safety of the dam, providing reference and guidance for the construction and management of similar tailings ponds.

Keywords : grout stone check dam; bulging and cracking; cause analysis; construction quality

引言

尾矿因其对环境污染严重且影响范围广, 若处理不当扩散后治理费用高难度大, 需要对其集中堆积后处理, 而尾矿坝是稳定这些尾矿堆积体的重要构筑物, 其破坏或溃坝后果极其严重, 故尾矿坝的安全性对尾矿库的安全性起到至关重要的作用^[1-6]。本文通过某实际工程案例, 分析了某磷石膏干渣库浆砌石拦渣坝开裂变形的原因并给出了加固方案, 其中对施工质量、尾矿渗滤液等对坝体安全性的影响做了详细分析, 为类似尾矿库的建设和管理提供参考和借鉴。

一、项目概况

顶高程约 1945.00m, 场地建设前现场照片详见图 1。

(一) 地质概况

某磷石膏干渣库位于山间冲沟处, 下游修建了蓄水池, 场区汇水面积为 0.4km²; 区域大范围上游地表分水岭为近似圆弧形连绵山脉, 南端最高山峰高程约为 2004m; 沟谷两侧岸基本对称, 坡度约 10~20°, 植被发育中等。渣库位于沟谷发育的上游段, 坝



> 图 1 干渣库拟建位置现场照片

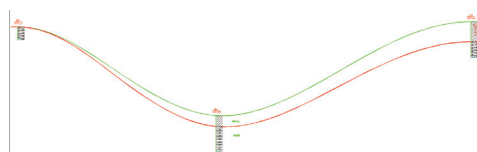
第一作者简介: 陈贵生 (1965-), 男, 汉族, 云南曲靖人, 工程地质学士, 高级工程师, 国家注册土木工程师 (岩土), 主要从事岩土工程勘察、设计、检测、咨询和施工图审查工作, Email: chs97412@163.com。

通讯作者简介: 余再西 (1988-), 男, 汉族, 云南大理人, 岩土工程硕士, 高级工程师, 国家注册土木工程师 (岩土)、一级建造师, 主要从事岩土工程勘察、设计、审查、咨询和研究工作, Email: 764388172@qq.com。

拟建场区内下伏基岩为二叠下统灰岩，场地周边可见露头。第四系地层包括：沟谷底部和两侧岸坡的坡残积层，典型地质剖面图如图2所示。根据野外调查和勘察结果，将场区内的主要地层由新到老分述如下：

残积层：红粘土①₁：红色，局部夹灰白色，稍湿、稍密状态，主要分布于库区底部及挡水坝沟底。液性指数 I_L 的范围值为0~0.12，平均值0.05，呈可塑状态；压缩系数的范围值为0.26~0.52 MPa⁻¹，平均值为0.38，属中压缩性土；标贯实测锤击数 N 平均值为6.8击，强度一般，库区底部平均厚度约8m，基础承载力140kPa。红粘土①₂：红色，局部夹灰白色，稍湿，稍密状态，夹有少量中等风化的碎石块，主要成分为石灰岩，粒径1~3cm，主要分布于库区底部及库区两侧，基础承载力180kPa。

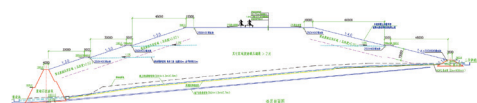
二叠系下统：中等风化石灰岩②：灰色、灰白色。隐晶质结构，厚层状构造，矿物成分以方解石为主，方解石脉发育。局部有溶蚀现象，风化裂隙中等发育，裂隙间充填有少量红粘土，岩芯呈柱状。岩体为较硬岩，质量基本等级为Ⅲ级。岩芯采取率为90%，RQD为70~80%。本层埋深0~20.3m，整个场区均有分布。岩层承载力1000kPa。



> 图2 典型地质剖面图

（二）设计概况

本干渣库拟堆存磷石膏废渣为酸性渣，pH值介于1.95~3.04，为Ⅱ类固体废物。根据《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》（GB18599-2001）中的相关要求，此磷石膏干渣库将按一般工业固体废物的贮存、处置场Ⅱ类场进行设计。本干渣库占地315亩，拟分两期实施。一期废渣考虑堆至标高1960.0m，最终废渣顶标高定为1980.0m，库区剖面设计如图3所示。

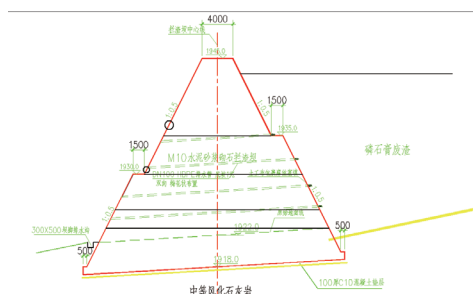


> 图3 库区剖面设计图

根据库区地形情况，本干渣库设置两道坝体，下游设有透水的浆砌石拦渣坝，库尾也设置有拦渣堆石坝。在拦渣坝以上设有三级废渣平台，后期废渣堆高为35m，渣坝外坡比不大于1:3.3（库尾渣坝外坡比不大于1:4）。库区两岸各有一道浆砌石截洪沟，库内采用排水斜槽+排水管排洪。拦渣坝内坡设有多层排水管道，库区渣坝体内也设有排渗系统以降低废渣坝内的浸润线高程。为避免污染地下水，库区范围均铺设1.5mm厚的HDPE防渗膜，且膜下设有地下水导排盲沟。库区共设有二个浆砌石集液池，收集磷石膏渗滤液，防止废水外排。

本文研究对象为下游的拦渣坝，如图4所示：拦渣坝顶标高1945.0m，坝轴处自然地面标高1922.0m，沟谷段清基深度为4m，最大坝高 $H_{初}=23m$ （不含清基深度），坝顶宽 $B=4.0m$ ，坝体外坡比1:0.5，内坡比1:0.5，坝轴长104.5m。外坡在标高1930.0m处设置一1.5m宽的马道，内坡在标高1935.0m处也设

置一1.5m宽的马道。为降低废渣坝体的浸润线高程，在坝体上设置排水管。排水管交错布置，起始埋设标高1925.0m，竖向间距3m，横向间距5m，共4层。排水管道为HDPE结构，管口用土工布包裹，内径 $d=100mm$ ，埋设坡度 ≥ 0.02 。石坝体与岸坡的连接，为使连接面处不产生集中渗流和存在软弱夹层，坝体与岸坡结合部采用斜面连接。



> 图4 拦渣坝剖面图（垂直坝轴线）

（三）施工概况

（1）设计对筑坝工艺的要求

拦渣石坝砌筑前须清除表层粘土层，进入持力层（中等风化石灰岩②）内，沟谷处坝体最小清基深度4米。石坝体施工时采用“坐浆法”砌筑，砂浆饱满，相邻块石交错搭接，石料无裂缝。砌筑坝体所用石料的块度、强度须满足以下要求：岩石的饱和抗压强度大于40MPa，风化系数大于0.8，软化系数大于0.85，块石料径大于30cm，砂浆等级为M10水泥砂浆。在填筑施工时，必须清除坝体两侧山坡上部覆土和强风化极破碎岩石，对坡面上残留的泥土清扫干净，另外在坝底设置200mm厚C10混凝土垫层。

（2）现场实际施工情况

本项目于2019年3月20日开工，2019年8月28日完工，2019年8月30日完成验收。施工过程中部分照片如图5、图6所示，由图可以看出来：（1）施工过程中石块泥土灰尘未清洗干净；（2）砂浆含泥量过高；（3）砂浆强度较低时受到机械碾压和振动，表面块石人工砌筑整齐，但缺少与内部石块之间的拉结镶嵌。



> 图5 施工过程照片1（石块上有泥土灰尘）



> 图6 施工过程照片2（砂浆含泥量过高）

（四）竣工后运营情况

本项目拦渣坝后期运营情况如下：2019年8月30日完成竣工验收→2021年4月~5月发现坝体有砂浆脱落（在马道位置上方）现象，但坝体鼓包不明显→2021年7月~10月完成拦渣坝后方形坝体区域的尾矿回填，此后尾矿开始与坝体接触（图7）。在此前楔形区域有积水，但坝体在楔形区域回填前后均未发现泄水孔和排渗沟外的渗漏情况→2021年10月17日现场对砂浆脱落部位进行重新抹灰处理→2022年6月坝体出现明显的鼓包现象→2022年6月~2022年12月，鼓包开裂略有增大。



> 图7 磷石膏废渣回填过程照片

二、浆砌石拦渣坝现状调查和检测结果

(一) 鼓胀开裂情况

经对受检拦渣坝进行外观质量检查,外观质量一般;墙体表面风化、空鼓、脱落,墙体出现竖屏、垂直或斜向宽度大于5mm的斜向裂缝;现场检查发现局部出现较大裂缝,详见图8~12。



> 图8 拦渣坝正前方照片



> 图9 拦渣坝侧面开裂照片图



> 图10 坝体上部鼓包位置



> 图11 坝体中部台阶处鼓包位置



> 图12 泄水孔下方结晶情况

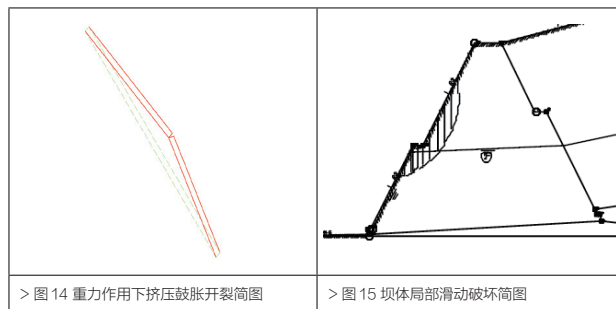
(二) 坝体开裂变形规律分析

从现场调查情况可以看出,如图13所示,坝体鼓包、开裂位置主要发生在坝体中上部到中下部之间,坝体靠近顶部和底部目前未发现明显的鼓包开裂现象。



> 图13 坝体开裂规范分析图

从图13可以看出:(1)图上“1”“3”区域开裂明显,且开裂伴随着鼓包发生,类似于挤压屈曲失稳的情况(如图14所示);(2)图上“2”部位所示区域,裂缝主要为张拉、剪切裂缝,为破坏边缘地段,区域“2”两侧坝体无明显的开裂鼓包情况出现;(3)开裂范围主要发生在“1”“2”“4”包围的区域内;(4)区域“4”位置的开裂情况有别于区域“1”和“3”,其鼓胀不明显,但是裂缝位置有明显的水平剪切错断位移,类似于滑动体的剪出口。坝体现状表现出来的破坏情况如图15所示的局部滑动破坏。



> 图14 重力作用下挤压鼓胀开裂简图

> 图15 坝体局部滑动破坏简图

(三) 检测鉴定结果

(1)外观质量普查结果:经对受检拦渣坝进行外观质量检查,外观质量一般;墙体表面风化、空鼓、脱落,墙体出现竖向、垂直或斜向宽度大于5mm的斜向裂缝;现场检查发现局部出现较大裂缝。

(2)尺寸、标高检测结果:渣坝高度、倾角、墙段长度与设计值符合。

(3)砂浆强度检测结果:拦渣坝未鼓包表面位置砌筑砂浆强度单个构件的推定值在11.7~12.2MPa之间,满足设计要求。拦渣坝未鼓包内部位置砌筑砂浆强度单个构件的推定值在6.7~7.2MPa之间,不满足设计要求。鼓包内部位置砌筑砂浆强度单个构件的推定值在2.5~3.3MPa之间,不满足设计要求。

(4)坝体砌筑质量检测结果:坝体砌筑块石和砌筑砂浆有明显分离现象。掀开石块有砂浆饱满度不够和含泥量偏高现象,石块见有瞎缝。部分位置上下石缝连通,搭接不满足规范要求。

(5)附属工程检查结果:对拦渣坝全部4排正面泄水孔检查:下部第一排和第二排泄水孔正常泄水;第三排泄水孔只有一个孔泄水;第四排泄水孔都未泄水。

三、拦渣坝开裂变形原因分析

（一）施工影响分析

从检测结果可以看出：（1）坝体内部砂浆强度达不到设计要求：坝体表面勾缝砂浆强度部分满足设计 M10 要求，但是内部砂浆强度不满足设计 M10 的要求，内部设计强度在 M2.5~M7.5 之间；（2）毛石砌筑工艺和质量不满足规范要求：坝体毛石和砌筑砂浆有明显分离现象，掀开石块有砂浆饱满度不够和含泥量偏高现象，石块见有瞎缝，部分位置上下石缝连通，搭接不满足规范要求。

从现场施工照片可以看出：（1）施工过程中石块上灰尘、泥土未清理干净，影响砂浆与石块之间的粘结强度；（2）砂浆含泥量超标，影响砂浆的强度、砂浆与石块之间的粘结强度、砂浆的水稳性；（3）挖机等大型机械设备在砂浆强度未达到设计要求的条件下在坝体上行走，导致砌筑体内部产生裂缝（特别是坝体边缘缺少约束的部位易产生微裂缝）为后期破坏埋下隐患；（4）表面块石人工砌筑整齐，但缺少与内部石块之间的拉结镶嵌，出现表面石块和内部石块不搭接的情况。

从上述分析可以看出：砂浆含泥量高、强度低、砂浆不饱满、砂浆与石块之间粘结强度不足、表面石块与内部石块未搭接易分离等问题为后期坝体出现挤压鼓包开裂、局部滑动剪切开裂等问题埋下了隐患。

（二）受力影响分析

因现状坝体中砂浆强度及砂浆与石块之间的粘结强度不足，坝体强度偏低，导致坝体的破坏模式由因磷石膏矿渣的推移而发生整体稳定性不足的破坏转换为因坝体自身强度不足而发生的强度破坏。现状坝体将在自重和磷石膏矿渣推力的共同作用下发生坝体内部局部或整体结构性破坏，即现状坝体的破坏由稳定性问题转变为强度问题。

在拦渣坝与磷石膏矿渣之间的楔形体区域未完全回填前，坝体虽然出现了砂浆脱落、局部开裂的现象，但并不严重且发展缓慢。坝体与矿渣之间的楔形体区域回填完成后，磷石膏矿渣对坝体的推力增大，坝体内应力增加，本身强度不足的坝体，变形和开裂较之前有较大发展。

从现场开裂变形情况可看出，坝体目前发生了浅表局部剪切变形，再往后发展将出现局部剪切破坏，进而引起坝体整体垮塌。

（三）物理化学影响分析

在坝体与矿渣之间的楔形体区域未完全回填前，坝体虽然出现了砂浆脱落、局部开裂的现象，但并不严重且发展缓慢。坝体与矿渣之间的楔形体区域回填完成后，除坝体内应力增大外，酸性矿渣渗滤液通过坝体表面裂缝进入坝体内部，在化学侵蚀和结晶的共同作用下，导致坝体砂浆强度进一步降低，坝体变形和开裂现象进一步发生和发展。

（四）综合分析

砂浆含泥量高、强度低、砂浆不饱满、砂浆与石块之间粘结强度不足、表面石块与内部石块未搭接易分离等问题是坝体开裂破坏的内因；磷石膏矿渣推力和矿渣渗滤液的侵蚀结晶作用均是加速坝体变形和开裂破坏的外因。

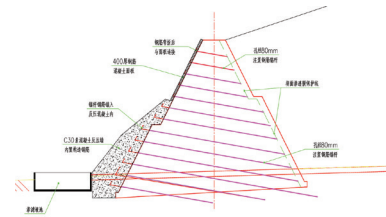
四、坝体加固措施及施工建议

（一）坝体需要加固的内容

砂浆强度不足、砂浆与石块之间的粘结强度不足、表层石块与内部石块之间拉结强度不足为此坝体需要解决的主要问题，即现状工况下坝体加固补强需要解决的主要问题。

（二）加固措施及建议

根据拦渣坝出现的问题和现场可能的用地和施工条件，针对此浆砌石拦渣坝加固措施和建议如下：如图 16 所示，可采取注浆和加筋补强与增大截面反压补强相结合的方法进行坝体加固补强。



> 图 16 加固方向示意图

（三）加固施工注意事项

（1）坝体表层目前处于欠稳定状态，因高度重视施工扰动对其不利影响，并制定防止坝体出现局部垮塌的施工安全保证措施；

（2）施工过程中应考虑施工过程对坝体的局部破坏和影响，并针对此采用施工破坏小的工艺和施工顺序；

（3）施工过程应注意对泄水孔和防渗膜等的保护，不能因加固施工而破坏这些设施。

五、结论和建议

（1）砂浆含泥量高、强度低、砂浆不饱满、砂浆与石块之间粘结强度不足、表面石块与内部石块未搭接易分离等问题是坝体开裂破坏的内因；磷石膏矿渣推力和矿渣渗滤液的侵蚀结晶作用均是加速坝体变形和开裂破坏的外因。

（2）由于施工质量缺陷和物理化学原因坝体安全性在持续降低，若不及时处理坝体存在垮塌风险，故需立即对坝体进行加固补强，加固设计和施工时应考虑加固施工工艺对坝体的短期不利影响。

（3）坝体强度对整个坝体安全影响很大，且目前坝体强度存在下降趋势，整体安全度在降低，需要及时对坝体进行加固补强，现状工况下其加固补强的主要方向是采取措施弥补砂浆强度不足对坝体造成的自身强度不足问题。

参考文献

- [1] 《磷石膏库安全技术规程》（AQ2059-2016）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.
- [2] 《尾矿设施设计规范》（GB50863-2013）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.
- [3] 《尾矿库安全技术规程》（AQ2006-2005）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2005.
- [4] 《砌石坝设计规范》（SL25-2006）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2006.
- [5] 《砌体结构设计规范》（GB50003-2011）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
- [6] 《尾矿设施施工及验收规程》（GB50864-2013）[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.