

铜矿山尾矿坝帷幕防渗技术研究

陈永贵^{1,2}, 邹银生¹, 张可能³

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 长沙理工大学 岩土工程研究所, 长沙 410076;
3. 中南大学 地学与环境工程学院, 长沙 410083)

[摘要]为满足矿山尾矿坝的渗漏治理,从抗酸稳定性、防渗等级和帷幕完整性三个方面阐述了尾矿坝防渗帷幕的性能要求,基于矿物晶体结构的理论分析和对纯水与酸性渗透液的对比试验,分析了粘土固化浆液的抗酸稳定性,研究了粘土固化注浆帷幕的防渗特性,并结合工程实例,介绍了尾矿坝基础防渗中粘土固化注浆帷幕的设计、施工工艺和质量控制措施。通过对实际工程的质量检查,验证了该防渗技术应用在矿山尾矿坝中的有效性和可靠性。

[关键词]尾矿坝 酸性污水 防渗 粘土固化注浆帷幕

[中图分类号]P641 **[文献标识码]**A **[文章编号]**0495-5331(2007)03-0108-04

尾矿库是矿山的一项重要生产设施,它的运行状况好坏直接关系到矿山的生产和人民的生命财产安全^[1]。由于历史原因,许多矿山的尾矿坝和污水库坝均存在不同程度的渗漏,这些渗漏的酸性水对周围环境造成了严重污染^[2-4]。无论是从环境保护还是经济利益考虑,寻求稳妥可靠的处理方法来治理尾矿坝的工程缺陷,尽量减少酸性废水外流,确保尾矿坝的安全与稳定,是十分重要的。国内关于尾矿坝防渗处理方面的文章主要以工程实例^[5-7]或者综述为主^[8,9],系统性研究鲜有报道。中南大学对粘土固化注浆材料进行了比较系统的研究,并成功应用于城市垃圾卫生填埋场防渗^[10]和矿山尾矿坝与酸性污水库坝基防渗^[11]。本文将对铜矿山尾矿坝的帷幕防渗技术进行介绍。

1 尾矿坝防渗帷幕性能要求

1.1 抗酸稳定性

尾矿坝渗滤液中有害物质成分复杂,通过对帷幕系统的渗流,将对防渗帷幕具有一定的破坏作用,但受各种条件如有害物质的不同存在方式、pH值、氧化-还原电位等因素的影响和制约,防渗帷幕工作性能所受到的影响程度也有所不同。

针对铜矿山尾矿坝,渗流场区中pH值较低的酸性水在帷幕中渗流,与帷幕材料长时间接触,可导

致帷幕结构老化,而引起帷幕介质的收缩开裂和强度下降^[12],并且可以侵蚀帷幕使其防渗能力降低,从而破坏帷幕对酸性渗水的封堵效果。因此,在对铜矿山尾矿坝进行渗漏治理时,要求构筑的防渗帷幕具有较高的抗酸稳定性和抗腐蚀能力。

1.2 防渗等级

在进行防渗帷幕设计时,确定防渗标准是首要一环。只有确定了防渗标准,才能确定灌浆帷幕的必要性和灌浆范围。由于尾矿库中储存的是酸性水,且酸性水内还含有浓度较高的重金属离子(如 Fe^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} 等),其浓度远远超出了我国制订的对农业和生活用水中的酸度及重金属离子浓度标准,而且从尾矿库外泄的酸性水危害极大,因此要求尾矿坝具有较强的防渗能力。受诸多条件的限制,以及考虑到坝址的场区特性,我国矿山的废石、尾矿坝多属于中小型坝,但其防渗等级一般参照中高坝的建设标准,要求其渗透系数在 10^{-5} cm/s 以内^[13]。如永平铜矿西部4号和5号尾矿坝,坝基防渗帷幕要求岩层单位吸水率 $\omega \leq 0.03 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$,永平铜矿南部10号酸性污水库坝要求坝体防渗墙渗透系数 $k \leq n \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。

1.3 帷幕完整性

Kim从数学上分析了未充填裂隙对帷幕堵水效率的影响,他发现,若窄小帷幕中未充填裂隙空间达

[收稿日期]2006-07-07;[修订日期]2007-02-08;[责任编辑]陈仁俊。

[基金项目]教育部高等学校骨干教师资助计划项目(教技司2000[65]号);湖南省教育厅资助科研项目(06C093)

[第一作者简介]陈永贵(1976年—),男,2004年毕业于中南大学,获博士学位,现主要从事岩土工程方面的研究工作。

到4%,其帷幕堵水效率将小于8%^[14]; Felix 在室内构建防渗帷幕物理模型试验也证实了上述结论^[15]。所以帷幕的完整性对防渗能力的影响较大,完整密实的帷幕其耐久性好,否则酸性水和有害物质易于从帷幕的残余通道中渗流,或者由于帷幕结构疏松不完整而受到渗滤液的长期冲刷侵蚀,形成新的导流通道,从而大大缩短帷幕的使用寿命,影响帷幕的使用效率。因而,在尾矿坝体中构筑完整的防渗帷幕是对酸性库水进行有效封堵的关键。

2 粘土固化注浆技术

2.1 粘土(高岭土)的晶体结构特征

粘土固化浆液是由主成分、结构剂、添加剂与水组成的,粘土作为粘土固化浆液的主要组成部分,对注浆帷幕的抗渗阻滞效能有着举足轻重的作用,其成分类型、晶体结构特征与阳离子交换容量等都是重要的影响因素。

本研究中所采用的粘土为高岭土,由硅氧四面体与铝(或镁、铁)氧(或氢氧)八面体组成构造单元体。在每个单位晶层的四面体片中,四个氧原子位于四个顶点,一个硅原子位于四面体的中心。Si-O四面体群的三个顶点氧原子分别与相邻的三个硅氧四面体连接,组成二维延伸的平面;第四个顶点氧原子仅与四面体中的硅原子相连,处于Si-O四面体的同一侧并和铝氧八面体层的铝连接,为四面体和八面体所共同拥有。这种晶胞间形成的氢键连接紧密,不易分散,因而具有良好的化学惰性,其结石体具有良好的抗地下水、各种矿化水以及各种酸根离子的侵蚀能力,不易受外部化学物质的侵蚀而破坏。

2.2 帷幕对酸性溶液的渗透试验

配置不同组成的粘土固化浆液结石体若干组,分别以纯水和酸性溶液作为渗透液进行渗透试验,根据式(1)计算相应的渗透系数,通过渗透系数的变化情况来评价粘土固化注浆帷幕的抗酸稳定性。

$$k = \frac{Q}{F \cdot i \cdot t} \quad (1)$$

式中 k 为渗透系数,与渗流介质孔隙和渗滤液性质有关; F 为渗透液渗流面积,即结石体断面面积; Q 为渗出液体积; i 为水力梯度; t 为测定时间。

本试验所用粘土固化浆液由粘土、水泥、水玻璃和水组成,浆液配比和试验结果见表1。结果表明粘土固化浆液结实体在酸性条件下防渗效果好,其抗酸稳定性能可靠。

表1 粘土固化浆液结石体的抗酸稳定性试验结果

浆液组成				渗透系数($\times 10^{-5} \text{ cm/s}$)	
$V_{\text{水}}$ (ml)	$M_{\text{粘土}}$ (g)	$M_{\text{水泥}}$ (g)	$V_{\text{水玻璃}}$ (ml)	纯水	酸性溶液
1000	200	200	30	8.75	9.09 (pH=3)
1000	400	120	15	7.66	7.67 (pH=4)
1000	300	150	25	9.33	9.00 (pH=5)
1000	350	150	20	8.02	7.87 (pH=6)

2.3 粘土固化注浆工艺

首先通过钻机在预定的帷幕线上按一定的间距钻孔至预定深度,利用压浆设备分段均匀地将粘土固化浆液注入土体中,排挤出空隙中的水分、空气,并充填空间,提高密实度和强度。经过一段时间后,浆液凝固,把原松散的颗粒或孔隙胶结成一整体,堵塞渗水通道,从而达到防渗加固、治理病害的目的。其工艺流程见图1。

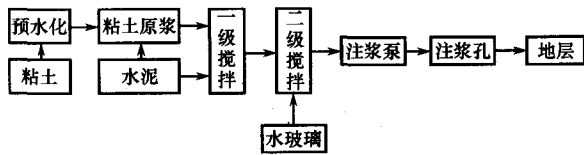


图1 施工工艺流程

3 工程实例

3.1 场地工程地质条件

该工程位于永平铜矿西部排土场,设计为一座碾压式土石坝,坝顶高程为110.00m,分4号坝、5号坝和5号副坝三个坝段。场地内地层主要有第四系残坡积土,下伏基岩为震旦-寒武系混合岩。该场地地层比较简单,自上而下依次为:耕植土及表土、粉质粘土、强风化混合岩、中风化混合岩。

场地水文地质条件简单,地下水主要赋存于混合岩的风化裂隙带中,以潜水为主,具有连续的地下水面,并随地形起伏而变化,局部承压。

由于场地内强风化混合岩是透水、含水的主要地层,在库区中分布面积大;中风化混合岩上部风化裂隙发育,透水性好;库内污水pH值在2~4之间,酸性较强,而粘土固化浆液具有前述特点,所以设计采用粘土固化浆液对坝进行帷幕灌浆,使注浆后岩层单位吸水率 ω 降至0.03L/(min·m·m)以下,防止坝内酸性污水向库外泄漏。

3.2 防渗帷幕布置

根据勘察报告,防渗工程主要针对帷幕线位置埋深30m以内的岩土层来进行。由于库区最高洪

水位标高 109.17m,设计的坝顶标高为 110m,为防止库内酸性污水坝肩绕流,设计防渗帷幕线向两坝肩方向各延长至标高 120m 地形等高线,延长后 4 号坝帷幕线长 151m,5 号主坝及副坝帷幕线长 224m,两坝帷幕线总长 375m。注浆孔采用单排布置,依据现场注浆试验结果确定的孔距为:深孔(注浆段两段以上)孔距 3m,两相邻深孔中间加密一浅孔补强孔,加密补强浅孔孔距 3m,则 4 号坝帷幕线布置注浆深孔 50 个,浅孔 49 个,5 号主坝及副坝帷幕线布置注浆深孔 75 个,浅孔 75 个,共计注浆深孔 125 个,加密补强浅孔 124 个。深孔平均孔深 18m,钻探总进尺 2250m,单个深孔平均注浆段 15m,深孔注浆段总长 1875m;补强浅孔平均孔深 8.0m,钻探总进尺 992m,浅孔补强孔注浆段总长 620m。

3.3 施工工艺

(1) 注浆材料

① 粘土

选用细度为 200 目的高岭土;

② 水泥

425 号普通硅酸盐水泥;

③ 水玻璃

模数为 3.2,浓度为 38~42Be。

(2) 施工工序

根据本次防渗帷幕的设计特征,结合场地条件,分段分序进行施工。该工程为单排帷幕,在较平缓的地段注浆孔分三序施工,在坡度较大的山坡上,由于钻机搬迁困难,且注浆时极少串浆,在不影响注浆质量的情况下,注浆孔分两序施工。

(3) 注浆方式、段长及压力选择

静压注浆采用下行式分段注浆,即第 1 段钻完后就灌注,再钻进第 2 段、第 3 段灌注,直至终孔,注浆段长 5m 左右,根据地层的完整程度和压水资料进行合理调整,但一般不超过 10m。注浆压力按设计要求进行控制,根据地层实际情况适当调整,较完整的基岩段注浆终压取较大值,接触带、破碎带注浆时,为避免地表冒浆和控制浆液不必要扩散,压力宜适当减小。

(4) 浆液浓度、配合比的选择及交换

浆液浓度总体上遵循由稀至浓的原则逐级变换,水灰比由 8:1 到 2:1,干灰成分正常情况下粘土与水泥之比为 3:1 到 2:1,水玻璃加量为水量的 1%~3%,对吸浆量较小或严重漏失等地段可作相应调整。

(5) 注浆结束标准及封孔

注浆过程中测量浆液的注入率,在设计注浆终压下,当注入率连续 60 min 不大于 0.4 L/min,或连续 90 min 不大于 1.0 L/min 时可结束注浆。坝肩全孔注浆结束后采用浓水泥浆(水灰比 0.5:1)充填,孔口部位 1~2 m 用水泥砂浆封堵。

(6) 特殊情况处理

① 绕塞返浆 提止浆塞重新阻塞,或适当加长止浆塞长度,并增加膨胀度。

② 冒浆 采用低压、浓浆、限流、限量、间歇注浆的方法进行灌注,必要时在浆液中适当增大水玻璃掺加量。

③ 大量漏失 在施工过程中个别注浆孔段漏失严重,加大粘土、水泥、水玻璃的掺加量以增加浆液浓度,并结合间歇灌注等方法进行施工。

在 5 号坝注浆施工过程中,出现吸浆量很大,灌浆压力上不去的异常情况。通过打孔勘查,发现该地段岩层有溶蚀现象且裂隙较发育,采用粘土掺量 70% 以上或水泥掺量 70% 以上的高固相粘土固化浆液进行注浆,取得了一定效果。

3.3 注浆质量控制与检验

帷幕注浆是地下隐蔽工程,注浆质量的好坏将直接影响防渗效果。为确保粘土固化注浆帷幕的质量,在施工过程中采取了一系列措施进行质量控制与检验。

(1) 孔斜检查及孔深校正

本工程所设计的注浆孔和检查孔都是直孔,钻孔偏斜将影响帷幕质量,因此在开孔前、成孔后、终孔时都必须测斜、测深,达到要求方能终孔。

(2) 帷幕的渗透性检查

在帷幕注浆孔竣工后 14 天,打检查孔,采取单孔压水试验,本工程设计的防渗标准为透水率 $w \leq 0.03 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$ 。根据 38 个检查孔 51 段压水试验结果显示,有 3 段不合格,其余均达到设计要求。对不合格孔段进行了二次灌注,直至满足防渗要求。

(3) 岩芯浆液结石情况

注入的粘土固化浆液在岩石裂隙、洞穴中充填、凝结的情况如何,可以从检查孔采取的岩芯中观察结石体的固结情况。从检查情况看,粘土固化浆液结石紧密,完整性较好。

(4) 注浆前后地层的渗透性对比

将注浆施工前后帷幕线地层渗透性剖面图进行对比,可以发现不同渗漏地段占剖面面积的比例显著下降,不渗透地段比例显著增大,地层整体防渗性

能增强。

另外,为了长期监测帷幕渗漏情况,在下游不同位置布置了4个观测孔,在库内蓄水后将定期或不定期地从观测孔内提取水样进行水质分析。

4 结 语

1) 由于矿山尾矿成分复杂,污染性强,废水呈强酸性,因此其基础防渗帷幕必须具备较强的抗酸稳定性和抗腐蚀性能,化学稳定性好。

2) 理论和实验研究表明,粘土固化注浆帷幕能够满足铜矿山尾矿坝的防渗要求,并通过工程实践,证明了该技术是行之有效的,其防渗效果良好。

3) 由于粘土注浆材料来源广、价格低,抗酸稳定性强,十分有利于各类矿山尾矿库坝基础防渗,有利于减少矿山对其周边环境造成的污染,改善矿山环境,具有推广应用价值。

[参考文献]

- [1] 周信金,吴小平. 尾矿库管理实践[J]. 湖南有色金属, 2001, 17(1): 55-57.
- [2] 饶运章,侯运炳. 尾矿库废水酸化与重金属污染规律研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004, 23(3): 143-145.
- [3] 罗 凯,张建国. 矿山酸性废水治理研究现状[J]. 资源环境与工程, 2005, 19(1): 49-53.
- [4] 陈永贵,张可能. 中国矿山固体废物综合治理现状与对策[J]. 资源环境与工程, 2005, 19(4): 59-61.
- [5] 张振亭. 论全泥氰化选矿厂尾矿库防渗漏[J]. 有色矿山, 1997(6): 42-44.
- [6] 邱云胜. 浅谈三山岛金矿尾矿库防渗工程[J]. 矿业快报, 2001(9): 18-20.
- [7] 赵传卿,王红岩. 铺塑防渗技术在焦家金矿尾矿库的应用[J]. 有色矿山, 2002, 31(2): 34-36.
- [8] 李庶林. 论我国金属矿山地质灾害与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(4): 46-50.
- [9] 王凤江,王来贵. 尾矿库灾害及其工程整治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(3): 79-83.
- [10] 陈永贵. 粘土固化注浆帷幕对渗漏液的阻渗机理与环境效应[D]. 长沙:中南大学, 2004.
- [11] 陈永贵. 含硫铜矿尾矿坝的渗漏认识与治理研究[D]. 长沙:中南大学, 2002.
- [12] 杨 明. 粘土固化注浆在固体废物填埋场防渗工程中的试验研究[D]. 长沙:中南工业大学, 1998.
- [13] 杨春福. 中下游式尾矿坝设计概要[J]. 有色矿山, 1999(3): 33-36.
- [14] Kim J Y, Edil T B, Park J K. Effective porosity and seepage velocity in column tests on compacted clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 1997, 123(12): 1135-1142.
- [15] Felix K. Determination of the grouting parameters for polymeric materials[J]. Journal of Polymer Engineering, 1999, 19(1): 53-59.

STUDY ON ANTI-SEEPAGE CURTAIN OF TAILING DAM IN COPPER MINE

CHEN Yong-gui^{1,2}, ZOU Yin-sheng¹, ZHANG Ke-neng³

(1. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076;

3. School of Geosciences and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract: Based on the demands for leakage harness of tailing dam in copper mine, three aspects of acid-resistant reliability, anti-seepage grade and curtain integrity were described to the required characteristics of anti-seepage curtain constructed in tailing dam. Used the combination of the method of theoretic analysis on mineral crystal structural characteristic and the contrast permeability experiments on water and acid solution, the acid-resistant reliability of clay-solidified grouting curtain was analyzed and its anti-seepage characteristics were studied. An actual engineering was presented to introduce the design, the procedure, and the quality controlling measure of clay-solidified grouting. The application in the actual engineering shows the validity and reliability of the curtain.

Key words: tailing dam, acidity water, anti-seepage, clay-solidified grouting curtain