

河南省自然科学
基金资助项目

黄科技 HX-2003-15

灰坝渗流问题研究 总报告

水利部 黄河水利科学研究院
黄河水利委员会

二〇〇〇年四月一日

河南省自然科学
基金资助项目

黄科技 HX-2003-15

灰坝渗流问题研究 总报告

水利部 黄河水利科学研究院
黄河水利委员会

二〇〇〇年四月一日

课题名称：灰坝渗流问题研究

委托单位：河南省科学技术委员会

河南省电力工业局

承担单位：水利部黄委会黄河水利科学研究院

院长：李文学 高级工程师

院总工：赵文林 教授级高工

初审：陈士俊 教授级高工

复审：潘 恕 教授级高工

审定：赵文林 教授级高工

课题负责人：汪自力 张俊霞 陈士俊 张宝森

报告编写人：汪自力 张俊霞 张宝森 李 莉

主要完成人：汪自力 张俊霞 陈士俊 张宝森 李 莉

杨静熙 施玉芬 丁玉玺 王立功 朱登峰

李海晓 陈 生 李 斌 李 信 高 骥

参加人员：盛和晞 孙东海 刘太正 安旭平 贾国勤

冯荣周 周钰洁 刘茂兴 高玉玲 袁明华

秦曰章

致 谢

本课题得到了河南省科学技术委员会、河南省电力工业局的关心和支持，并得到了河南省电力设计院、姚孟电厂、焦作电厂、首阳山电厂的大力支持和配合，也先后得到了河南省自然科学基金、水利水电科学基金、黄委会治黄基金的资助，使得该课题能以较高水平顺利完成，在此谨向有关单位领导和同志们表示衷心的感谢。

内 容 摘 要

火电厂灰坝在其坝体结构、筑坝技术、运行方式等方面都有其显著的特点，其排渗系统复杂，是设计的一个重点和难点。在运行过程中，灰坝常出现坝体浸润线异常升高、局部滑坡、灰面坍塌，甚至垮坝等与渗流有关的问题，严重威胁着电厂的正常运行和周围群众的生命财产安全。对于某个实际工程出现的具体问题，分析其发生的主要原因并提出相应的处理措施，确保灰坝的安全运行是十分必要的，但其难度也较大。近 10 年来，本课题结合灰坝存在的具体问题开展了大量的室内外研究工作，现已基本形成一套较为完善的分析方法。在取得较好的经济效益和社会效益的同时，还取得了一些具有学术价值的研究成果。其研究方法和步骤可概括为：

- ①针对灰坝在生产运行中出现的具体问题，收集分析有关勘测、设计、施工、运行等资料，并在现场进行电测、测压管地下水位观测、流量观测、PH 值检测等工作，初步判断出现问题的原因；
- ②根据地质资料和排渗体布

置及运行状况，确定边界条件，将渗流计算的不动网格有限元法与数学规划中的复合形法结合起来建立三维饱和-非饱和渗流反演分析的数学模型，以分析确定排渗体等介质的渗透系数，为评价排渗系统工作状态提供依据；③综合室内外研究成果，找出发生问题的具体原因并预测其发展趋势；④提出处理措施并预测其处理效果。

关键词：灰坝渗流 电测法 不动网格有限元 参数反演
饱和-非饱和渗流 渗控措施

目 录

前言	1
1. 灰坝概述	2
1.1 灰场型式	2
1.2 灰坝的坝型	3
1.3 灰坝的初期坝	3
2. 灰坝的特点	4
3. 研究内容及技术路线	5
4. 现场查勘	6
4.1 电法测量的目的及基本原理	6
4.2 测压管埋设及观测	7
4.3 其它方法	8
5. 室内计算分析	9
5.1 渗流计算	9
5.1.1 数学模型	9
5.1.2 模型的求解	11
5.2 计算参数的反演	12
5.2.1 反演问题概述	12
5.2.2 优化模型	14
5.2.3 优化模型的求解	14
6. 渗流控制措施	17
7. 工程实例	18
7.1 姚孟电厂程寨沟灰坝渗流研究	18
7.2 焦作电厂老君庙南灰场灰水渗漏对地下水影响的综合调研	22
7.3 首阳山电厂徐家沟灰场排渗系统工作状态评价	24
7.4 首阳山电厂省庄灰场渗流研究	26
8. 结语	29
有关文献	30
附件	31

灰坝渗流问题研究总报告

前 言

火电厂运行中必然要产生大量的粉煤灰，目前对粉煤灰的贮存方法多采用湿贮法，即在厂内将粉煤灰与水按一定比例混合后，再用高压泵站加压，通过输灰管道将粉煤灰从电厂输送到灰场贮存。

由于种种原因，灰场的灰坝在运行过程中常常出现与渗流有关的问题，如浸润线抬高异常、局部滑坡、灰面坍塌等影响灰坝安全运行的事故隐患，甚至出现垮坝这样的恶果。由于灰水中某些有害离子的浓度大大超出环境保护所要求的极限浓度，灰坝一旦垮坝除直接影响电厂生产（如无备用灰场则需停产）和周围群众生命财产安全外，还将对周围环境造成长久的污染。鉴于此，在灰坝运行过程中如发现异常现象，应及时查找原因并采取措施以确保灰坝安全。众所周知，查找异常现象出现的原因是反演问题，难度很大，同时由于是已有工程的处理，找出合适的处理方案难度也较大。

“灰坝渗流问题研究”这一课题正是基于以上工程背景开展的。本课题的研究始于 80 年代末三门峡龙沟灰场渗流研究，至今已逐步形成了一套较为完善的方法。即针对某个灰坝存在的具体问题，在现场查勘、资料分析的基础上，进行室内渗流计算反演分析，确定有关排渗体的渗透系数，以对排渗系统工作状态进行客观评价。在现场查勘资料和室内综合分析的基础上，找出异常现象发生的原因

并对其发展趋势做出预测，以决定是否需要处理。如需要处理，则提出处理方案并预测处理效果，供设计、运行单位参考。在实践中，确实解决了工程实际问题，起到了较好的效果，因此该课题不但对反问题的研究进行了有益的探索，而且还产生了较大的经济效益和社会效益。

该课题在研究过程中，始终得到了河南省电业局及所属的河南省电力设计院的大力支持，也得到了姚孟电厂、焦作电厂、首阳山电厂的积极配合，研究中也还到了河南省自然科学基金和黄委会治黄基金、水利水电基金的资助，在此谨表示衷心的感谢。

1. 灰坝概述

1.1 灰场型式

灰场型式按所在地形可分为山谷型、山坡型、平地型三种。

山谷型灰场选择在山沟的峡谷中，即先修一定高度的初期坝，然后再用水力冲填法将粉煤灰贮存在库中。随着灰面的升高，达到一定高度后，再用修子坝的方法分期加高灰坝。如姚孟电厂程寨沟灰坝、首阳山电厂的徐家沟灰场和省庄灰场都属这类灰场。其优点是初期坝短，工程量小，基建费低，填筑子坝工作量小，管理维护简单，应优先选用。

山坡型灰场利用山坡阶地两面或三面筑坝。

平地型灰场在平地四周筑坝。即在平原地区，灰场用围堤型式修成初期坝，然后再加高。如焦作电厂老君庙南灰场和开封电厂灰场都属平原灰场。

山坡型及平地型灰场的初期坝长，工程量大，基建费高，子坝加高工作量大，管理维护复杂，安全性差，只在无合适的山谷做灰场时才选用。

1.2 灰坝的坝型

灰坝坝型可分为两大类：

一类是初期坝用当地土、石材筑成，子坝用粉煤灰筑成。初期坝可做成透水坝（以有利于灰场排水固结），也可做成不透水坝。子坝一般用上游法筑坝，而在地震较多的国家常采用下游法筑坝。

另一类是整个坝体全部用当地土、石料筑成。为延缓投资，此类坝型也可分期修筑。

后一类坝型仅用于粉煤灰颗粒很细不能用于筑坝的情况，或灰场周围有大量的废石可用作修坝材料的情况；前一类坝型采用较广，也是本课题研究的重点。

初期坝是在电厂基建时期修筑的，而子坝是在生产过程中修筑的。因此灰坝的设计不但要选择合理的初期坝坝型，做好初期坝的设计，更重要的是根据粉煤灰的特性、坝址地形地质条件、地震烈度、气候条件、施工条件 and 生产特点等因素选好灰坝的整体坝型，做好整体坝的设计，确保整体坝的稳定与安全。

1.3 灰坝的初期坝

初期坝作为灰坝的支撑棱体，应具有较好的透水性，以便使灰场子坝迅速排水，加快固结，有利于稳定。其常用坝型有：

1) 透水堆石坝

由堆石体及其上游面的反滤层和保护层构成，其透水性好，可降低灰坝的浸润线，有利坝体稳定。平顶山平东电厂灰场初期坝原设计即为透水堆石坝，但后因反滤失效进行了改造。

2) 土坝

土坝造价低、施工方便，在缺少砂石料地区是常用的坝型。由于土料的透水性较粉煤灰差，当子坝加高到一定高度时，浸润线可能从子坝坝坡逸出，易造成管涌，甚至垮坝。为此必须切实做好土坝的排渗设施，以降低灰坝的浸润线。其排渗设施型式可归为以下几种型式的组合：①褥垫排渗；②排渗管或网形排渗带；③斜卧排渗层；④排水棱体。姚孟电厂程寨沟灰坝、首阳山电厂省庄和徐家沟灰场的初期坝均属土坝，并设有相应的排渗系统。

2. 灰坝的特点

从渗流角度看，灰坝与水坝相比有以下特点：

1). 从筑坝过程看，水坝是一次性完成的，而灰坝是随着灰面升高通过修建初期坝和子坝而不断加高的，这就决定了灰场排渗系统的特殊性和计算边界条件的复杂性。

2). 从排渗系统设置看，灰场初期坝在运行初期以挡水为主，后期则以排渗为主；其排渗体不但在下游设置，而且可在初期坝上游、坝体中部设置，根据需要也可在加高过程中在灰库中设置。由此可见其排渗系统较为复杂，在设计上是一个重点，也是一个难点。

3). 从分析计算角度看，灰体的分层沉积导致灰体呈明显的各向异性；灰面升高起到了加厚坝前防渗铺盖的作用，使渗流场的边界

条件发生变化；灰坝的作用水头小，在运行时又需要保持一定的干滩长度，使得坝体，尤其是灰库中相当一部分区域处于非饱和水分转移状态，故分析时易选用饱和-非饱和渗流模型；这些都给分析处理工作带来一定难度。

4). 从环保角度看，灰水呈碱性并含有其它一些离子，下渗后对环境有一定影响，故应采取工程或生化措施处理。

5). 从管理上看，水坝从勘测、设计到施工、运行的各个环节都得到足够重视，勘测设计所需的时间也较长；灰坝所处的地质条件一般都不好，在电厂建设中又常常得不到应有的重视，往往存在着先天不足，运行过程中容易出现問題，而一旦出现问题影响又很大，处理起来难度也很大。因此，对灰坝渗流状态做出客观评价，并提出处理措施，为设计、运行提供科学依据是非常必要的。

3. 研究内容及技术路线

本课题在研究中紧密结合生产中急需解决的灰坝工程渗流问题，综合有关专业的技术成果，围绕灰坝出险原因分析及其处理措施两个关键问题，将现场查勘和室内分析有机地结合起来，较好地解决了有关难题。具体步骤如下：

①. 针对具体灰坝在设计、运行中出现的问题，通过现场查勘、电测、资料收集整理等手段，了解坝体浸润线和密实度分布情况，初步判断出现问题的原因；

②. 根据灰场所处的地质条件、排渗体情况等建立二维或三维渗流计算数学模型。通过室内模拟计算分析，反演坝体排渗系统的参

数, 评价排渗系统的工作状态。

③. 预测后期运行中可能出现的问题, 提出并论证处理措施, 供设计、运行参考。

4. 现场查勘

4.1 电法测量的目的及基本原理

电测的目的主要是了解坝体有无集中渗漏和坝体填筑的均匀性及坝内地下水水位和走向。本课题主要采用高密度电测仪, 在具体量测时, 应针对灰坝存在的具体问题, 选择不同的电测法。常用的有自然电场法(V_{sp} 法)、高密度电阻率法、激发极化法(IP 法)等。

1) 自然电场法

即 V_{sp} 法, 是通过测量地下岩土层由于电动耦合、热效应耦合和化学反应在地表所产生的电场来判断坝体内水文地质情况。在水文地质和工程地质方面 V_{sp} 法经常用于调查坝基、库底等工程地下的破碎裂隙带、岩溶发育带, 确定地下水的排泄与补给地段及水库渗漏情况。其观测成果为剖面自然电位曲线和 V_{sp} 平面等值线图, 从中可以分析坝体是否有异常现象, 为进一步的分析研究提供条件。

2) 高密度电阻率法

若了解坝体内部是否存在孔洞及其位置时, 可应用高密度电阻率法进行现场测试。高密度电阻率法与常规电阻率法相比具有布点密度大, 观测精度高, 一次布点可以完成纵横二维探测过程等优点。其基本原理是利用测得地下某一深度的电阻率分布情况而达到探测

地质构造的目的。其测试结果可通过绘制视电阻率等值线图或用计算机绘制的视电阻率灰阶图表示。根据此图，就可以分析坝体内部有无电阻率异常现象，以此来判断坝体薄弱地带的位置及填筑的均匀性，为进行下一步分析提供依据。

3) 激发极化法（或称 IP 法）

针对有测压管观测断面的灰坝，可选择激发极化法（或称 IP 法）。其电测的目的主要为校核原有测压管断面上的自由面位置，以便确定测压管实测资料的可靠性，故其探测点一般均选在设置有测压管处。其基本原理是向地质体（初期坝）施加一个人工电场，使之产生极化效应，形成极化电场。根据极化电场的强度、衰减速度与地质体的物质性质密切相关的原理来确定地质体的含水饱和度，从而确定自由面的具体位置。当地质体干燥时极化电位小，衰减速度快。反之，当其处于饱和状态时则极化电位大，衰减速度慢，可根据参数极化率 $\eta(T, t)$ 随深度的变化曲线对探测结果进行判断。在非饱和区，因含水量变化不大， η 值亦较小且变化缓慢。当接近自由面时，由于毛细作用，含水量逐渐增大， η 值呈增大趋势。当处于饱和时， η 值达极大值。自由面以下 η 值处于极大值的稳定状态。

4.2 测压管的埋设与观测

测压管观测资料对分析坝体安全有至关重要的作用，但由于灰坝自身地质条件复杂，加上施工、管理方面的原因，灰坝原来安装的测压管大多已失效，以往观测资料很少。

在灰坝上安装测压管与在一般挡水土坝上不同。表现在：

① 灰坝初期坝填筑时对上坝土质要求不严，机械化施工时常将较多的大石块也填筑进坝体，使坝内密实度不均，用干钻法无法施工，只能采用泥浆护壁钻进，但钻进过程中又常因遇到石块而影响钻进速度，甚至移位重新开钻；

② 钻进时漏浆严重，内部坍塌，甚至造成地表下蛰，钻机倾斜被迫移位重打；

③ 钻孔漏浆处以上无法清孔，以下则是清水跟进，无需专门清孔；

④ 成孔后，钻孔孔壁所含石块不稳定，下管时易滑出，影响管子正常下放，有时不得不重新冲孔；

⑤ 在子坝上的测压管，其上半部分是在粉煤灰中，而下半部分却是在初期坝中，这样在粉煤灰部分有可能造成塌孔，而在煤灰与初期坝交界处的坝坡有可能漏浆；

⑥ 灰水的 $\text{PH}=12\sim13$ ，对经过打孔的镀锌化管段有腐蚀，影响测压管使用年限；

⑦ 灰坝管理不严，测压管管口保护设备要做到既便于开启又能防盗防损坏。

为确保重新安装测压管的质量，本课题也对灰坝上安装测压管技术进行了试验研究，针对以上所述的特殊问题，提出了测压管的型式以及在加工、埋设、灵敏度测试等各个环节应注意的问题，并在实际工程中得到成功应用。

4.3 其它方法

1) **化学分析**: 由于灰水呈碱性并含有其它一些离子, 为此在研究灰水扩散范围, 确定水的来源时可按照取样方法进行水样的现场PH值检测和室内其它离子的检测。

2) **其它资料收集**: 包括地质勘测资料、设计文件、施工日志及竣工报告等, 还应注意对知情人的走访, 以尽可能准确了解施工及运行中出现的问题。

5. 室内计算分析

5.1 渗流计算

5.1.1 数学模型

渗流分析的数学模型按其求解区域的不同可分为饱和渗流模型、饱和-非饱和渗流模型两大类, 且各有其优缺点。

① 饱和渗流模型在工程上已得到广泛运用, 在参数选择方面经验较多;

② 饱和-非饱和渗流模型是将饱和区与非饱和区耦合在一起分析, 自由面不再作为边界条件处理, 而只是等压线中的零压力线, 从而避开了力学上所说的自由边界问题。在处理复杂地层条件时有明显优势, 可模拟计算饱和区与非饱和区相间分布的情形, 但应用于非稳定流计算时其计算参数测试和选择经验尚不多。

上述两类模型均是以达西定律为基础而建立的, 即假设渗透水流满足下述条件:

- ①. 通过任意断面的流量与真实水流通过同一断面的流量相等;
- ②. 在某断面上某点的压力或水头应等于真实水流的压力或水

头:

③. 在任意土体或岩体体积内所受到的阻力应等于真实水流所受到的阻力。

渗透水流所占有的空间区域称为渗流场, 且其遵循连续性方程, 即:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (5-1)$$

在稳定渗流情况下, 同一时间流入和流出的水量相等。根据达西定律, x 、 y 、 z 方向的渗透流速可分别表示为:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= -k_x \frac{\partial H}{\partial x} \\ v_y &= -k_y \frac{\partial H}{\partial y} \\ v_z &= -k_z \frac{\partial H}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (5-2)$$

将式(5-2)代入式(5-1)有:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 \quad (5-3)$$

式(5-3)即为描述无内源和各向异性三维稳定渗流场的基本微分方程。

对于各向同性稳定渗流场, 即当 $k_x = k_y = k_z$ 时, 式(5-3)变为:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (5-4)$$

上式即为著名的拉普拉斯(laplace)方程。

对于稳定渗流, 基本微分方程的定解条件仅为边界条件。若所研究渗流区域边界上的水头值是已知的, 则这种边界条件可表示为: