

尾矿库工程

分析与 管理

祝玉学 戚国庆 鲁兆明 臧秀平 编著

冶金工业出版社

T0926.4

9900402

尾矿库工程分析与管理

祝玉学 戚国庆 编著
鲁兆明 臧秀平

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
1999

内 容 简 介

全书由十章组成,系统讲述了尾矿的产生及其工程性质,尾矿库场地选择、设计和方案评价,尾矿排放方法;介绍了尾矿坝静力和动力稳定性分析方法;着重阐述污染物在土壤—地下水系统中的迁移,酸性水的生成和控制方法以及土地恢复工程。

本书可供从事尾矿库工程设计、研究和管理人员参考,亦可作为环境岩土工程专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

尾矿库工程分析与管理/祝玉学等编著. —北京:冶金工业出版社, 1999.1

ISBN 7-5024-2288-9

I. 尾… II. 祝… III. 尾矿—处理 IV. TD926.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 30717 号



出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 林 聪 美术编辑 王耀忠 责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波
北京新兴胶印厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1999 年 1 月第 1 版, 1999 年 1 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 12.875 印张; 343 千字; 394 页; 1-1500 册

27.00 元

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

矿物原料的大规模采取，必然带来对环境的巨大扰动。全世界每年采出金属和非金属矿石、煤、石材、粘土、砂砾约 90 亿 t，而相应排弃废石和尾矿约 300 亿 t。我国现有尾矿库约 1500 余座，每年排弃尾矿近 3 亿 t，需占用土地面积约 20km^2 。由于尾矿坝稳固、废水处理、污染控制、土地恢复技术发展与矿物工业发展的不适应，已经开始显露出或预示出潜在的环境问题，严重阻碍可持续发展战略的实施。因此，尾矿库工程已成为各国政府、矿山企业和学术界所关注的重大问题。

尾矿库工程是一个大系统，包容了选厂内尾矿处理、尾矿浆浓密和输送、尾矿坝构筑、尾矿排放、防渗与排渗、防洪与排洪、水循环、废水处理与污染控制、库区土地恢复与植被、尾矿库监测与管理等子系统；容集了尾矿库系统内部（尾矿与尾矿废水）、尾矿库系统与环境之间（渗漏水—基础土壤—地下水或地表水体）复杂的物理、化学、生物地球化学反应和溶质迁移过程；涉及了尾矿库设计、基建和运营、闭库和土地恢复以及后期污染治理等工程问题。反映出岩土工程问题与环境工程问题的相互交织、渗透、一体化和时空广大的工程特点。而孤立地解决坝体结构和安全问题，或者孤立地评价尾矿库区生态环境破坏问题，都不可能从总体上认识尾矿库工程的内在关联和实现尾矿库工程的最优化。实际上，闭库后若干年的生态环境控制应从矿石入选工艺的改进开始。本书基于系统工程的思想，把尾矿库的岩土工程结构、环境影响、尾矿管理融汇一起，比较系统、比较完整地阐述这些特点及相关控制因素的相互作用。

由于人类环保意识的增强和安全、健康要求的提高，尾矿库工程管理的主要目标是以最小的代价，采用最实用技术，达到尾矿的物理稳定、化学稳定和生物地球化学稳定，使尾矿在长期堆置过程中基本上不受风化作用的影响，使排放废水达到水质标准。

而要实现这一目标，在我国，由于尾矿库设计与管理的特定历史背景，以及缺乏有效的知识创新体系，许多基础理论研究工作和新技术开发工作只能艰辛地向前推进。

我国和南非是当今世界上两个近乎单一采用上游坝的国家，成功地构筑了许多大型高坝，积累了丰富的设计经验，政府部门也很重视，相继颁发了《上游法尾矿堆积坝工程地质勘察规程》(YBJ11—86)、《选矿厂尾矿设施设计规范》(ZBJ1—90)(下称《规范》)、《尾矿设施安全监督管理办法》(1995)、以及相关专业性设计、施工和管理规程，比较全面地记录和反映了我国目前尾矿库工程建设的技术与管理水平。然而，由于种种原因，尾矿库工程灾害频频发生，造成惊人的人员伤亡和财产损失。为了保证尾矿库工程技术的不断进步，就必须严格执行《规范》，开展尾矿库工程的系统研究，不断接纳当代最新科技成果，不断充实和修订《规范》，不断提高尾矿库工程质量。因为，只有最大限度地增强尾矿库工程的高科技含量，才能最大限度地保证尾矿库工程的安全，只有实现《规范》与技术进步的同步、设计过程与最新科技成果的结合、结构问题与环境问题的一体化、工程管理与政府行为的协调，才能建设出反映时代技术特征的最优尾矿库工程。

之所以强调政府行为，是考虑到尾矿库工程的特殊性质，它不同于市场上对手交换式的回报工程，更多地是不遗害于或造福于子孙后代的社会公益性工程，因此，必须有行政立法的支持。目前，我国正处在新旧体制交替时期，由于长期缺乏代表矿山企业和当地民众的利益主体，很多关系远未程序化，例如谁来为尾矿库及其环境的现期和长期、乃至数百年后的安全、污染危害、生态恢复负责？怎么负责？等等。如果没有法规约束，没有现代科技的投入，势必延续目前的无序竞争，使一代人无法履行其历史责任，拉大技术落后的差距，愧对民族。

当代科技发展的一大特点就是综合，交叉科学的最伟大贡献在于综合。基于此，本书的主要目标是在尾矿库工程领域建立环境岩土工程的基础工作平台。因此，在全书的十章布局上，尽可

能考虑工程分析和管理的系统性,揭示系统内在相互作用的关联,而舍去具体结构物设计的讨论,省略繁复的建模、数学—力学方程推导、数值分析和程序化过程,因为这些材料可以在其它有关设计参考资料、教科书或专著中找到。

尾矿库工程分析与管理方法研究是马鞍山矿山研究院以国家重点研究院试点扶持资金首批启动的基础理论研究项目之一,本书仅作为该项目的阶段性成果报告于世,诚盼批评指正。

王运敏

1998年10月18日

目 录

1 矿物加工及其对尾矿的影响	1
1.1 导引	1
1.2 矿物加工过程	3
1.2.1 采矿	3
1.2.2 破碎、磨矿和选矿	3
1.2.3 溶浸	5
1.2.4 固液分离	6
1.2.5 溶液提纯与金属回收	7
1.3 尾矿输送与选矿用水返回	8
1.4 尾矿的物理和化学性质	9
1.4.1 相关系	9
1.4.2 毒性	11
1.4.3 黄铁矿氧化	16
1.4.4 各种尾矿	17
1.4.5 尾矿的分类	21
1.4.6 尾矿废水的分类	23
2 尾矿的工程性质	25
2.1 沉积特性	25
2.2 密度	28
2.2.1 原地密度	28
2.2.2 相对密度	30
2.3 渗透性	31
2.3.1 各向异性的影响	32
2.3.2 距排放点距离的影响	32
2.3.3 孔隙比的影响	33
2.4 变形特性	34

2.4.1	压缩性	34
2.4.2	固结	36
2.5	抗剪强度特性	38
2.5.1	排水抗剪强度	39
2.5.2	不排水抗剪强度	42
2.5.3	三轴试验的应力—应变特性	46
2.5.4	循环抗剪强度	47
3	尾矿排放方式	50
3.1	导引	50
3.2	地表排放	54
3.2.1	挡水坝	54
3.2.2	上升坝	56
3.2.2.1	上游坝	57
3.2.2.2	下游坝	59
3.2.2.3	中心线坝	62
3.2.2.4	上升坝工程特性对比	63
3.2.3	环形坝	65
3.2.3.1	高浓度中央排放	65
3.2.3.2	半干性喷洒排放	67
3.2.4	干处置	69
3.3	地下排放	69
3.3.1	地下矿山充填	70
3.3.2	露天矿坑排放	71
3.3.3	专门掘坑排放	73
3.4	深水排放	74
3.4.1	深湖排放	75
3.4.2	近海排放	77
4	地表尾矿库选择、设计及方案评价	82
4.1	尾矿库选择因素	82
4.2	Robertson 初步评价方法	86

4.3	尾矿库布置	91
4.3.1	尾矿库布置型式	91
4.3.1.1	环型	91
4.3.1.2	跨谷型	92
4.3.1.3	山坡型	93
4.3.1.4	谷底型	93
4.3.2	材料有效利用系数的概念	94
4.4	水的控制	97
4.4.1	正常流入量处理	97
4.4.1.1	水平衡	97
4.4.1.2	析例	100
4.4.2	洪水处理	101
4.4.2.1	设计准则	101
4.4.2.2	控制方法	103
4.5	渗漏控制	107
4.5.1	渗漏控制目标	107
4.5.2	垫层	109
4.5.2.1	尾矿泥垫层	110
4.5.2.2	粘土垫层	112
4.5.2.3	合成垫层	115
4.5.3	渗流障	118
4.5.3.1	截流沟	119
4.5.3.2	防渗墙	119
4.5.3.3	注浆幕	120
4.5.4	渗漏返回系统	121
4.6	方案评价	122
4.6.1	系统方法	122
4.6.2	矩阵评价方法	126
4.6.2.1	级序方法	126
4.6.2.2	评分方法	130
4.6.2.3	敏感度分析	131

4.6.2.4 不确定性分析	132
5 尾矿坝设计	135
5.1 地下水位控制	135
5.1.1 心墙	137
5.1.2 排水带	137
5.1.3 尾矿的利用	139
5.2 渗滤层的要求	140
5.3 材料选择	141
5.3.1 天然土	141
5.3.2 矿山废石	142
5.3.3 旋流尾矿	143
5.4 基础条件的影响	145
5.4.1 强度	145
5.4.2 压缩性	146
6 尾矿坝的稳定性分析	147
6.1 尾矿坝地下水渗流场分析	147
6.1.1 尾矿坝与普通水坝流网型式的对比	148
6.1.2 地下水渗流分析的有限元方法	150
6.1.2.1 基本原理	150
6.1.2.2 二维有限元方法	152
6.1.2.3 三维有限元方法	155
6.1.3 实用分析方法	159
6.1.3.1 上游型尾矿坝	160
6.1.3.2 下游型尾矿坝	163
6.1.3.3 中心线型尾矿坝	166
6.2 孔隙压力与超孔隙压力	167
6.2.1 孔隙压力效应	167
6.2.2 基本孔隙压力问题	169
6.2.3 孔隙压力的估计	170

6.3	边坡稳定性分析	171
6.3.1	尾矿坝稳定性分析的真确性	172
6.3.2	极限平衡分析方法	173
6.3.3	总应力分析与有效应力分析的对比	175
6.3.4	尾矿坝的分析条件	178
6.3.4.1	初期坝施工结束期	178
6.3.4.2	分段施工期	179
6.3.4.3	长期稳定渗流条件	181
6.3.5	可靠性分析方法	186
7	尾矿坝的地震稳定性分析	193
7.1	导引	193
7.2	地震参数	199
7.3	地震危险性分析	203
7.3.1	历史地震方法	203
7.3.2	确定性方法	204
7.3.3	概率方法	205
7.3.3.1	分析方法	205
7.3.3.2	极值理论的应用	209
7.4	设计地震的选择	211
7.5	砂土对循环荷载的响应特性	214
7.6	地震稳定性分析	219
7.6.1	基础振动液化的判别	220
7.6.1.1	经验方法	220
7.6.1.2	总应力方法	222
7.6.1.3	简化总应力方法	226
7.6.1.4	有效应力方法	228
7.6.2	压密坝或粘土坝的分析	230
7.6.2.1	拟静力方法	230
7.6.2.2	变形方法	234
7.6.2.3	动力分析方法	238
7.6.3	未压密尾矿坝的分析	241

7.6.3.1	经验评价方法	241
7.6.3.2	简化的液化分析方法	242
7.6.3.3	拟静力方法	244
7.6.3.4	动力分析方法	244
8	渗漏分析与污染物迁移	248
8.1	导引	248
8.2	渗漏效应的影响因素	250
8.2.1	尾矿特性	250
8.2.2	渗流体系	252
8.2.3	地质结构	255
8.2.4	工程因素	257
8.2.5	地球化学	257
8.3	污染物迁移	259
8.3.1	迁移与迁移率	259
8.3.2	毛细作用	263
8.3.3	溶解与沉淀	264
8.3.4	吸附—离子交换	268
8.3.5	生物过程	270
8.3.6	地球化学障	271
8.3.7	向周围土壤的迁移	275
8.4	研究方法	276
8.4.1	水文地质研究	276
8.4.2	地球化学研究	279
8.4.2.1	实验室研究	280
8.4.2.2	分布系数的估计	283
8.5	估计渗漏和迁移的方法	284
8.5.1	集总参数方法	285
8.5.1.1	尾矿库水平衡	285
8.5.1.2	部分饱和带的蓄水	285
8.5.1.3	盐分平衡	288

8.5.1.4	中和能力	289
8.5.1.5	衰减距离	290
8.5.2	解析方法	290
8.5.2.1	Darcy 定律	290
8.5.2.2	一维部分饱和渗流	292
8.5.2.3	水堤方程	294
8.5.2.4	迁移预测	296
8.5.3	数值方法	300
8.5.3.1	数值方法与模型	301
8.5.3.2	应用	301
8.5.3.3	实例	303
9	酸性水的生成与控制	306
9.1	问题	306
9.2	酸性水的生成	309
9.3	生物氧化过程	310
9.4	酸性水的预防和控制	315
9.4.1	限制氧	319
9.4.2	限制水	320
9.4.3	分离出硫化物	320
9.4.4	还原三价铁	320
9.4.5	控制 pH	320
9.4.6	采用杀菌剂	320
9.4.7	控制粒度	321
9.4.8	控制温度	321
9.5	酸性水的指示器	322
9.6	酸性水的预测	324
9.7	酸性水的处理	330
9.7.1	沉淀方法	336
9.7.1.1	中和—沉淀	336
9.7.1.2	硫化物沉淀	341
9.7.1.3	污泥的絮凝	343

9.7.2	硫代盐氧化	344
9.7.3	超滤、微滤和反渗透方法	344
9.7.4	褐煤吸附	345
9.7.5	离子交换	346
9.7.6	生物学方法	347
9.7.6.1	泥炭地吸附	347
9.7.6.2	生物吸附	351
9.7.6.3	生物控制	353
9.7.6.4	微生物纤维素降解	354
9.7.6.5	生物障	355
10	闭库与恢复工程	357
10.1	导引	357
10.2	恢复工程的目标	360
10.2.1	长期坝体稳定性	360
10.2.2	长期浸蚀稳定性	361
10.2.3	环境污染控制	362
10.2.4	土地有效使用	362
10.3	稳固、固化与恢复方法	363
10.3.1	概述	363
10.3.2	岩土覆盖	363
10.3.3	堆肥覆盖	366
10.3.4	湿地覆盖	367
10.3.5	水覆盖	368
10.3.6	化学稳固与固化	369
10.3.6.1	化学稳固	369
10.3.6.2	化学固化	370
10.3.6.3	地质聚合物	374
10.3.7	植物覆盖	376
10.3.7.1	植物生长的环境因素	376
10.3.7.2	植物种的选择	379

10.3.7.3 再植被的程序	380
10.3.7.4 鹰桥镍矿植被试验	382
10.4 可能的闭库方案	384
参考文献	389



矿物加工及其对尾矿的影响

1.1 导 引

尾矿是以浆体形态产生和处置的破碎、磨细的岩石颗粒,常视作为矿物加工的最终产物,即选矿或有用矿物提取之后剩余的排弃物。人们正名尾矿为排弃物,而不定义为固体废料,意在承认它可能作为资源再利用的价值。

尾矿已成为大多数矿山企业的最重要的环境影响源。然而,长期以来由于偏重于有用矿物提取,而把尾矿看作单纯的废料,因而局限了人们对尾矿影响的环境意识和技术意识,很少作为独立的整体系统地论述尾矿—选矿废水—尾矿库基础土壤—地下水之间的极其复杂的物理的、化学的、生物的作用过程和特性。由于在尾矿库选址、设计和渗漏影响方面的缺陷,使许多作业矿山因尾矿管理不当而长期蒙受重大经济损失。近些年来,出于各国政府和公众对未来的关注,环境立法逐渐形成,环境影响当然地成为建设约束,许多拟建矿山因尾矿库环境工程不当而使矿山投资陷于困境。

尾矿是矿物提纯的副产物,矿物加工过程在很大程度上决定尾矿的性质。因此,认识尾矿性质的基础当是了解尾矿产生过程的基础知识,这正是本章的初衷。图 1.1 示出矿物加工的一般过程和现行工艺。很显然,如果在尾矿库总体设计中充分考虑采矿和选矿过程引起的各种化学、物理、生物作用,就可能非常有效地减少尾矿管理问题和经费。如果矿山在运营之中,也可能有比较多的机会改变加工流程,以在一定程度上改善或缓解尾矿库问题。

实际上,所有单元作业构成一个有机整体,工艺过程的选择、设计和优化必然关系到尾矿库工程的经济、能源和环境。总体上讲,在确定工艺流程之前应当回答以下问题:

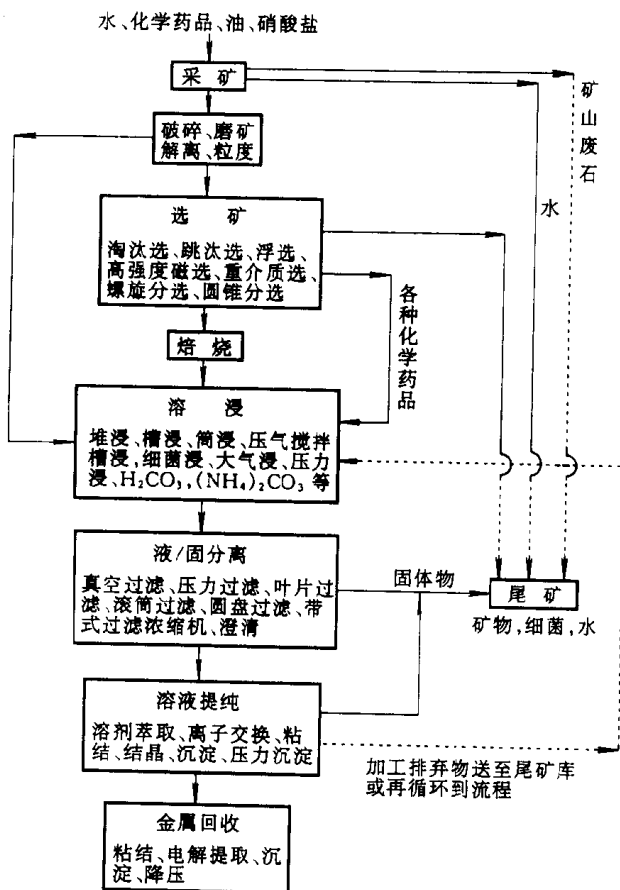


图 1.1 矿物加工过程

- 矿石特性
- 选矿的前景
- 可能的浸出剂
- 预计溶浸液中的杂质
- 要回收的金属种类
- 可能的提纯工艺
- 可能的副产品