

# 第一篇

## 尾矿概论

# 第一章 尾矿概述

矿产资源是人类生存和发展的重要物质基础之一。我国 95% 的能源和 85% 的原材料来自矿产资源。随着生产力的发展,科学技术水平的提高,人类利用矿产资源的种类、数量愈来愈多,利用范围愈来愈广。到目前为止,全世界已发现的矿物有 3300 多种,其中有工业意义的 1000 多种,每年开采各种矿产 150 亿 t 以上,包括废石在内则达 1000 亿 t 以上。以矿产品为原料的基础工业和相关加工工业产值约占全部工业产值的 70% 左右,由于矿产资源开发过程中丢弃的大量废石和尾矿所带来的环境污染,成为当今世界持续发展面临的最重要的问题之一。不论从全球还是从中国看,矿产资源开发对社会经济和生态环境的意义都是十分重要的。矿产资源包括金属矿、非金属矿和能源矿三大类。本书重点讨论金属矿山尾矿的综合利用问题,探讨尾矿综合利用的途径。

在工业上用量最大,对国民经济发展有重要意义的金属矿产主要有铁、锰、铜、铅、锌、铝、镍、钨、铬、锑、金、银等。以上矿石储量和开采量都很大,但因矿石的品位普遍较低,多数为贫矿,需要经过选矿加工后才能作为冶炼原料,所以就产生出大量的尾矿,如铁尾矿产出约占原矿石量的 60% 以上。随着经济发展对矿产品需求的大幅度增加,矿产资源开发规模随之加大,尾矿的产出量还会不断增加。为了管理好这些尾矿,就需要上尾矿工程,包括尾矿库的修筑、尾矿输送设备、输送管路的铺设以及平时的经营管理,这样需要耗费大量的人力、物力、财力,并要占用大量的农田、山地。随着尾矿量的增加,尾矿坝越堆越高,堆坝和管理工作量越来越大,越来越困难,细粒尾矿还会对大气、土壤和水资源产生严重污染。尾矿库还有发生事故的危险,一旦发生,后果十分严重。因此,研究尾矿的利用途径,就是将这些尾矿变废为宝,化害为利,作为一种资源来对待,走出一条资源开发与环境保护相协调的矿业发展道路——“绿色矿业”之路。

近年来,国外非常重视尾矿的综合利用研究,如英国、前苏联、加拿大、美国等均投入大量的资金,研究尾矿的综合利用技术,并取得了明显的经济效益和社会效益。我国在金属矿山尾矿综合利用研究方面也取得了一定的进展和成绩。面临矿产资源今后严重短缺的形势,越来越多的人认识到尾矿利用具有经济意义、环境保护效益和矿产资源持续供给的作用。尾矿利用的重要性,现已得到普遍认同,并在“中国 21 世纪议程”第一批优先项目中列入。

## 第一节 尾矿的定义及分类

### 一、尾矿的定义

尾矿,就是选矿厂在特定经济技术条件下,将矿石磨细、选取“有用组分”后所排放的废弃物,也就是矿石经选别出精矿后剩余的固体废料。一般是由选矿厂排放的尾矿矿浆经自然脱水后所形成的固体矿业废料,是固体工业废料的主要组成部分,其中含有一定数量的有用金属和矿物,可视为一种“复合”的硅酸盐、碳酸盐等矿物材料,并具有粒度细、数量大、成本低、可利用性大的特点。通常尾矿作为固体废料排入河沟或抛置于矿山附近筑有堤坝的尾矿库中,因此,尾矿是矿业开发、特别是金属矿业开发造成环境污染的重要来源;同时,因受选矿技术水平、生产设备的制约,也是矿业开发造成资源损失的常见途径。换言之,尾矿具有二次资源与环境污染双重特性。

### 二、尾矿的分类

#### (一)尾矿的选矿工艺类型

不同种类和不同结构构造的矿石,需要不同的选矿工艺流程,而不同的选矿工艺流程所产生的尾矿,在工艺性质上,尤其在颗粒形态和颗粒级配上,往往存在一定的差异,因此按照选矿工艺流程,尾矿可分为如下类型:

1. 手选尾矿
2. 重选尾矿
3. 磁选尾矿
4. 浮选尾矿

- 5. 化学选矿尾矿
- 6. 电选及光电选尾矿

(二)尾矿的岩石化学类型

按照尾矿中主要组成矿物的组合搭配情况 ,可将尾矿分为如下 8 种岩石化学类型：

- 1. 镁铁硅酸盐型尾矿
- 2. 钙铝硅酸盐型尾矿
- 3. 长英岩型尾矿
- 4. 碱性硅酸盐型尾矿
- 5. 高铝硅酸盐型尾矿
- 6. 高钙硅酸盐型尾矿
- 7. 硅质岩型尾矿
- 8. 碳酸盐型尾矿

第二节 尾矿的成分

尾矿的成分包括化学成分与矿物成分 ,无论何种类型的尾矿 ,其主要组成元素 ,不外乎 O、Si、Ti、Al、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、K、P 等几种 ,但他们在不同类型的尾矿中 ,其含量差别很大 ,且具有不同的结晶化学行为。尾矿的化学成分常用全分析结果表示。

尾矿的矿物成分 ,一般以各种矿物的质量分数表示 ,但由于岩矿鉴定多在显微镜下进行 ,不便于称量 ,因此 ,有时也采用镜下统计矿物颗粒数目的办法 ,间接地推算各矿物的大致含量。

根据我国一些典型金属和非金属矿山的资料统计 ,各类型尾矿化学成分和矿物组成范围见表 1-1-1。

表 1-1-1 尾矿的化学成分和矿物组成范围一览表

尾矿 类型	矿物组成	质量分数 /%	主要化学成分/%							
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O
镁铁硅 酸盐型	镁铁橄榄石 (蛇纹石)	25 ~ 75	30.0	0.5	0.5	0.5	25.0	0.3	0.02	0.01
	辉石(绿泥石)	25 ~ 75	至	至	至	至	至	至	至	至
	斜长石(绢云母)	≤15	45.0	4.0	5.0	8.0	45.0	4.5	0.5	0.3

第一篇  尾矿概论

尾矿 类型	矿物组成	质量分数	主要化学成分/%							
		/%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O
钙铝硅 酸盐型	橄榄石(蛇纹石)	0~10	45.0 至 65.0	12.0 至 18.0	2.5 至 5.0	2.0 至 9.0	4.0 至 8.0	8.0 至 15.0	1.50 至 3.50	1.0 至 2.5
	辉石(绿泥石)	25~50								
	斜长石(绢云母)	40~70								
	角闪石(绿帘石)	15~30								
长英 岩型	石英	15~35	65.0 至 80.0	12.0 至 18.0	0.5 至 2.5	1.5 至 2.5	0.5 至 1.5	0.5 至 4.5	3.5 至 5.0	2.5 至 5.5
	钾长石(绢云母)	15~30								
	碱斜长石(绢云母)	25~40								
	铁镁矿物(绿泥石)	5~15								
碱性硅 酸盐型	霞石(沸石)	15~25	50.0 至 60.0	12.0 至 23.0	1.5 至 6.0	0.5 至 5.0	0.1 至 3.5	0.5 至 4.0	5.0 至 12.0	5.0 至 10.0
	钾长石(绢云母)	30~60								
	钠长石(方沸石)	15~30								
	碱性暗色矿物	5~10								
高铝硅 酸盐型	高岭土石类黏土矿物	≥75	45.0 至 65.0	30.0 至 40.0	2.0 至 8.0	0.1 至 1.0	0.05 至 0.5	2.0 至 5.0	0.2 至 1.5	0.5 至 2.0
	石英或方解石等非黏土矿物	≤25								
	少量有机质、硫化物									
高钙硅 酸盐型	大理石(硅灰石)	10~30	35.0 至 55.0	5.0 至 12.0	3.0 至 5.0	2.0 至 15.0	5.0 至 8.5	20.0 至 30.0	0.5 至 1.5	0.5 至 2.5
	透辉石(绿帘石)	20~45								
	石榴子石(绿帘石、绿泥石等)	30~45								
硅质 岩型	石英	≥75	80.0 至 90.0	2.0 至 3.0	1.0 至 4.0	0.2 至 0.5	0.02 至 0.2	2.0 至 5.0	0.01 至 0.1	0.0 至 0.5
	非石英矿物	≤25								
钙质碳 酸盐型	方解石	≥75	3.0 至 8.0	2.0 至 6.0	0.2 至 2.0	0.1 至 0.5	1.0 至 3.5	45.0 至 52.0	0.01 至 0.2	0.0 至 0.5
	石英及黏土矿物	5~25								
	白云石	≤5								
镁质碳 酸盐型	白云石	≥75	1.0 至 5.0	0.5 至 2.0	0.1 至 3.0	0 至 0.5	17.0 至 24.0	26.0 至 35.0	微量	微量
	方解石	10~25								
	黏土矿物	3~5								

另据资料介绍,我国几种典型金属矿床尾矿的化学成分见表1-1-2。

表 1－1－2 我国几种典型矿床尾矿的化学成分

尾矿类型	化学成分/%											
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	烧铁
鞍山式铁矿	73.27	4.07	11.60	0.16	4.22	3.04	0.41	0.95	0.25	0.19	0.14	2.18
岩浆型铁矿	37.17	10.35	19.16	7.94	8.50	11.11	1.60	0.10	0.56	0.03	0.24	2.74
火山型铁矿	34.86	7.42	29.51	0.64	3.68	8.51	2.15	0.37	12.46	4.58	0.13	5.52
矽卡岩型铁矿	33.07	4.67	12.22	0.16	7.39	23.04	1.44	0.40	1.88	0.09	0.08	13.47
矽卡岩型铁矿	35.66	5.06	16.55	—	6.79	23.95	0.65	0.47	7.18	—	—	6.54
矽卡岩型钼矿	47.51	8.04	8.57	0.55	4.71	19.77	0.55	2.10	1.55	0.10	0.65	6.46
矽卡岩型金矿	47.94	5.78	5.74	0.24	7.97	20.22	0.90	1.78	—	0.17	6.42	—
斑岩型钼矿	65.29	12.13	5.98	0.84	2.34	3.35	0.60	4.62	1.10	0.28	0.17	2.83
斑岩型铜钼矿	72.21	11.19	1.86	0.38	1.14	2.33	2.14	4.65	2.07	0.11	0.03	2.34
斑岩型铜矿	61.99	17.89	4.48	0.74	1.71	1.48	0.13	4.88	—	—	—	5.94
岩浆型镍矿	36.79	3.64	13.83	—	26.91	4.30	—	—	1.65	—	—	11.30
细脉型钨锡矿	61.15	8.50	4.38	0.34	2.01	7.85	0.02	1.98	2.88	0.14	0.26	6.87
石英脉型稀有矿	81.13	8.79	1.73	0.12	0.01	0.12	0.21	3.62	0.16	0.02	0.02	
长石石英矿	85.86	6.40	0.80	—	0.34	1.38	1.01	2.26	—	—	—	
碱性岩型稀土矿	41.39	15.25	13.22	0.94	6.70	13.44	2.58	2.98	—	—	—	1.73

## 第二章 矿物加工过程

### 第一节 采 矿

采矿作业的影响之一是开采过程中所使用的油料、化学药品和炸药等造成的污染，这些污染物再经大量的矿山排水而运移。有时这些矿山排水用于后面的单元作业，有时在排至尾矿库之前加以处理，供作它用。然而，大多数矿山将这些矿山水排至尾矿库。

采矿作业的影响之二是开采过程中所产生的废石，这些废石通常排至排土场，或用作筑路材料。在废石含有硫化物的场合，由于空气、阳光和细菌引起风化作用和氧化作用，硫化物氧化最终生成硫酸及再从岩石溶解其它成分。如果这类废石排至尾矿库区，则可能需要拦截和处理酸性渗漏水，以使排放水满足特定的环境规范和准则。

### 第二节 破碎、磨矿和选矿

破碎系统把块状原矿粒度破碎到磨矿设备所能接受的尺寸进入磨矿，磨矿是物理破碎矿石到尾矿粒级的最后阶段。尾矿粒度取决于硬岩碎块研磨过程中颗粒解离的程度和原矿中粘土含量。例如，铜尾矿主要由研磨母岩所产生的硅酸盐颗粒组成，而磷酸盐尾矿主要反映原矿的极高粘土含量，而不是由于磨矿产生的碎粒。

经过破碎和磨矿的猛力物理冲击 ,余下来的尾矿颗粒通常是坚硬的 ,具有棱角状 ,即便磨至粉砂粒级也显示出棱角性 ,但页岩组成的矿物例外 ,它们具有高的粘土含量 ,尾矿反映母岩粉砂和粘土颗粒的形状和硬度。

为了确定经济价值矿物和可能的药剂消耗量 ,必须进行全面的矿物组成检验。这样的检验可能决定性地影响回收有用矿物的加工类型及尾矿库设计。一旦选定加工过程 ,则必须考虑处理前后的矿物学以及排至尾矿库的固体物的矿物学。

磨碎的最佳程度必须考虑溶浸、焙烧—溶浸或可能的选矿循环诸如淘汰选、浮选、高强度磁选、重介质选等。例如溶浸法 ,为最大量提取 ,有时需细磨 ,以促使单体颗粒的比表面积最大。然而 ,对于浮选法 ,磨至极细粒度可能产生不利影响。最佳粒度尺寸通常由中试厂详细选矿试验来确定。

浮选是最广泛应用的成功的选矿方法 ,是在矿物加工顺序中引进化学药剂的第一步骤 ,因此 ,也可以说是尾矿废水造成污染的化学成分的较早指示。表 1 - 2 - 1 示出典型的浮选药剂应用。因所分离的各种矿物类型不同 ,所用药剂亦有显著变化。在某些情况下 ,有些矿物如铝和钼 ,有时也用低浓度的氰化物作为浮选药剂。

表 1 - 2 - 1 一般浮选药剂

类 别	用 途	化 合 物
( 1 )捕收剂	选择性地包覆颗粒以疏水表面 ,吸附众多气泡	溶于水的极化碳氢化合物 ,如脂肪酸
( 2 )调节剂 ( a )pH 调节剂 ( b )活性剂和抑制剂	改变 pH 以促进浮选 酸或碱 选择性地改进化合中存在的矿物浮选效应	NaOH ,CaO ,Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ,H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,H <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> 磁性铁 ,石灰 ,硅酸钠 ,淀粉 ,丹宁酸 ,磷酸盐
( 3 )起泡剂	起浮选介质作用	松油 ,丙二醇 ,脂族醇 ,甲酚酸
( 4 )油	改进泡沫并起捕收剂作用	煤油 ,燃料油 ,煤焦油

与尾矿有关的最普通的问题就是硫化矿物氧化引起尾矿内酸的生成。风化过程将硫化物转变成硫酸亚铁和硫酸铁 ,后成氢氧化铁和硫酸释放。应当防止酸产生及从尾矿库中排出 ,因为酸性废水处理很困难 ,且费用也很高。预防尾矿中酸性条件产生的最有效方法是在尾矿排至尾矿库之前 ,在选厂设置分离过程 ,通过选矿流程将硫化物组分与脉石的非硫化物组分( 硅酸盐、氧化物、碳酸盐等 )分离 ,并将硫化物分存。加拿大矿物能源技术中心采用浮选方法能处理含 2% 黄铁矿的铀尾矿 ,除去 98% 的黄铁矿、70% ~



75%的镭( $Ra_{-226}$ )和60%的铀和钍。最终尾矿包含0.05%~0.08%的(黄铁矿形式)硫、0.003%~0.004%的铀、0.01%的钍和50%~60% $pci/g$ 的镭 $_{226}$ 。当然,由于采用浮选和为能分选所必要的添加剂,废水将含有这些化学药品,必须考虑其环境影响。

由于矿石的性质或特定的工艺设计,有的采用焙烧方法使矿物成还原状态或氧化状态,以为提高金属回收量创造条件,这样,可能放出有毒的挥发物质。因此,依据矿石和工艺过程(氧化、还原、硫化、氯化),可能产生各种挥发性物质,必须把它们隔离在专门设计的系统内。

最近几年,由于先进仪器和计算机控制相结合,应用矿物学领域取得重大进步。图像分析就是一个突出例子,其与现代分析技术、表面化学技术相结合,一定会促进加工流程发展,提高对尾矿风化的认识和降低总成本。

### 第三节 溶 浸

溶浸,通过磨碎的矿石颗粒与溶剂接触,从中提取有用矿物。进入溶浸阶段的材料可能是低品位矿石、精矿或难选的多金属矿石。近些年来,为回收铜、金或银等金属,对重新处理极低品位的尾矿很感兴趣,且在多数情况下是采用溶浸法。由于高品位矿石的减少和重新处理尾矿的极强生命力,现已发展有堆浸、原位浸出、地下破碎岩石的就地浸出。业已证明,如果常温和常压下大气浸出消耗酸量过大,采用压力浸出是很有效的;如果为溶解含沥青铀矿石、铀矿石和钍铀矿石、铜矿石和某些难选的含砷黄铁矿的金矿石,细菌浸出是很有效的。溶剂通常根据矿石类型选用强酸性的,如 $H_2SO_4$ , $HNO_3$ , $HCl$ , $HF$ ,硫脲,或其混合物如 $H_2SO_4 + HF$ , $H_2SO_4 + HNO_3$ , $H_2SO_4 + H_2O_2$ ;或强碱性溶剂如 $Na_2CO_3$  ( $NH_4$ ) $_2CO_3$  或碱性氰化物。

采用硫酸或碳酸盐溶浸铀矿石,可有95%~98%的放射性核素保留在固体尾矿中。如果改作硝酸溶浸或氯化物处理,则大部分放射性核素将溶解。

选金的主要问题之一是有毒的氰化物释放到尾矿中。如果采用能够再循环的各种溶浸,以不把有毒废水排至环境,当然可取。

砷成为尾矿或接受环境的另一潜在问题。由于砷化学复杂,具有几种氧化状态,在提取过程中,砷通常部分被溶解,随残渣进入尾矿。如果砷完全被溶解,则可作为副产品从溶液中回收砷。焙烧技术可能是消除和回收砷的一种有效方法。

溶浸可能改变尾矿的物理性质。例如某铀矿,由于钙—钠置换的结果,酸浸过程中使原矿中蒙脱石粘土矿物转变成尾矿中居优势的高岭土。

随着溶浸技术的改进和矿物学的发展,溶浸回收效果有了显著提高,副产品的回收也得以实现,尾矿特性的改善也将随着某些新技术的应用而得以增进。

## 第四节 固液分离

固液分离是选矿中费用最高的单元作业,约占基建成本和作业成本的50%。为使尾矿中可溶金属量损失最小,必须在提纯之前充分冲洗、沉淀和澄清。多年来曾采用真空过滤机、压力过滤机、叶滤机、滚筒过滤机和圆盘过滤机。较高效的带式过滤机已在许多选厂应用,由于增强了冲洗效果,使可溶金属损失减少。固液分离通过旋流器和浓缩机可以达到。为了提高分离效果,使用各种添加剂如聚丙烯酰胺,其最终将出现在所排至的尾矿库废水中。所以,在固液分离作业中必须进行充分冲洗,即可防止金属量损失,又可防止污染物排至尾矿库。

为了降低流程的总基建成本和作业成本,为了减少进入尾矿的可溶金属量损失并防止尾矿库区增大污染物浓度,应当非常重视这一单元作业。矿浆+溶剂或矿浆+树脂的结合可能是达到成本显著降低的主要因素,并能为减少环境影响创造条件。

## 第五节 溶液提纯与金属回收

为从溶液中回收金属并满足产品高纯度的要求,可以根据所要回收的金属类型和杂质、预期的品位和金属量,选用某种或某几种溶液提纯方法,包括粘结、沉淀、结晶、离子交换、溶剂萃取、碳吸附、反渗透、液膜和电解。

离子交换和溶剂萃取技术在金、铀、贵金属、稀土等金属回收中取得较好的效果。连续的离子交换系统产生浓溶液,送到溶剂萃取系统洗提,获得所要求的纯化。适当的溶剂萃取药剂达到较好的金属选择性,提高提取效率,降低作业成本。但是,某些有机药剂具有不利的环境影响,需要可生物降解的混合物,以促进尾矿中有机物降低。最好是在

金属回收之后,在废液排至环境之前,消除污染物并回收氰化物和贱金属。显然,离子交换和溶剂萃取方法也可用于尾矿坝渗漏水的处理。

碳吸附方法主要用于从碱性氰化物溶浸液、溶浸后的溶浸浆体中回收金,目前因离子交换或溶剂萃取的取代而趋衰落,比较广泛的是用于消除废液中有机物和其它污染物。

资源保护和利用是冶金企业的永久性的重大课题。由于经济和环境的原因,有的公司已经或正在考虑从已排至尾矿库的尾矿中回收金属和副产品,或者充分利用再循环水。

中和废水产生大量矿泥是冶金企业所关注的主要问题之一。矿泥的一部分是由沉淀的铁组成,因此,有些矿山占用很大的库容堆积黄钾铁矾沉淀物。应当设计一种经济上有利、环境上满足要求的方案替代现行技术,其中,一种可能性是采用溶剂萃取,在循环中消除铁,如果能生产可销售产品如  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeCl}_3$ 、铁粉或其它化合物,则可从副产品销售中获得经济利益,并减少尾矿管理的基建成本和作业成本。

回收金、贵金属和稀有金属如用于电子工业的镓、铟、锗等工艺因分离化学和高纯度化学沉淀剂的进步而发展,贱金属如 Co、Ni、Cu、Pb、Zn 的连续处理工艺已经出现。

为降低浸出成本及废液中和处理成本,不断增大浸出溶液的重复使用,氰化物冶金学的应用将增大金属回收,浸出溶液重复使用、副产品回收和无污染尾矿的可能性。

## 第三章 尾矿的形成

### 第一节 矿床与围岩

工业生产赖以生存的矿物资源大都来源于矿床。矿床是由地质作用形成的地质体,其内所含的元素或有用矿物集合体,在当前的经济和技术条件下能被开采利用,并可取得经济效益。

从矿床的概念可以看出,矿床首先是地质作用的产物。它是由原本均匀分布于地壳和上地幔的化学元素,在几十亿年的地球演化过程中,经历不同的地质作用,在某一区域或某一部位发生相对富集的结果。

同时,矿床又是经济活动的产物。如果某一地质体内,某些元素或矿物即使发生了相对富集,但如果开采和利用时成本过高,无利可图,那么,它仍然与普通的岩体无异。

另外,矿床还是一个相对的概念。从形成角度看,既然是元素或矿物的相对富集,而且又是地质作用的产物,那么,它就不可能按照人的意志,孤立地集中于指定的区域或部位。亦即它必然与其赋存的地质体发生紧密的联系,并且无法截然分开;从经济的角度看,就更不能将矿床看成是孤立的东西了,哪些地质体是矿床,哪些不是矿床,除与其所含元素或矿物的丰度有关外,还与它自身的规模、埋深、边帮稳固度、充水条件、可选性、可治性等赋存条件,开采、运输、选冶、加工等技术条件,以及投资、成本、利润等经济条件密切相关。一定时期、一个地区被看作是无用岩体(层)的东西,在另一时期或另一地区却可能成为矿床,相反,一定时期或一定地区作为矿床开采的东西,过一时期,或换作另

一地区,又可能变成一般的岩体(层)。

在地质勘查和矿床开采中,通常是根据工业品位和边界品位,将矿床划分成矿体、表外矿体、围岩三大部分。

矿体是指矿床中,在当前的经济和技术条件下开采和利用,可取得经济效益的那一部分。它是矿床的主体和核心,也是矿山开采的对象。一般是根据一定时期内工业生产和国民经济的发展状况,依照法定的工业品位指标,通过化学分析或工业试验圈定出来的。

表外矿体是指矿床中,在当前的经济和技术条件下开采和利用时,无经济效益,但随着技术和经济的进步,在将来某一时期再开采利用时,可能会产生经济效益的部分。它是根据工业品位和边界品位两种指标圈定出来的中间过渡部分。

围岩是指其有用元素或矿物的品位低于边界品位,开采和利用时不可能产生经济效益的部分。

但是,上述三个组成部分之间,很难有截然的界限。因为地质体并不像某些人工物体那样,纯粹由一种物质组成,它往往是有用的和无用的、低品位的和高品位的、这一用途和那一用途的矿石交错出现、混杂共生。矿体内可能有夹石,围岩内又可能赋存着矿体。工业品位和边界品位,不仅是人为的,而且又是一个平均值的概念,由于评价的出发点不同,矿体的边界就可能随之发生变更。譬如,一些多矿物共生的伟晶岩矿床,若以云母品位划分,有一个边界,若以长石划分,又是另一个边界,若以铌钽矿物划分,则可能又产生一个新的边界。再如,一些脉状矿体,虽然在地质上与围岩有着截然的界限,但由于其厚度不足以允许单独开采和运输,开采时,必须将一部分围岩与矿体同时采出,这时,矿体的边界就不再是其自然边界了。再有,很多金属矿床和燃料矿床,其围岩可能就是重要的非金属矿体,而非金属矿体的围岩,又可能是金属矿体或燃料矿体。

因此,矿床、矿体、围岩,均不是固定不变的东西。矿业上所广泛使用的工业品位、边界品位、最小可采厚度、最小夹石剔除厚度等概念,都是暂时的和相对的。尤其是对于从事矿产综合利用和尾矿建材开发研究的科技人员而言,充分理解这一点尤为重要。

## 第二节 矿石与脉石

矿体主要是由矿石构成的。而矿石又是由矿石矿物和脉石矿物组成的。

矿石矿物,又称有用矿物,是指可被利用的矿物,如铜矿石中的黄铜矿和斑铜矿;石棉矿石中的石棉,铁矿石中的磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿等。

脉石矿物,又称无用矿物,是指矿石中对于主矿而言,目前还不能被利用的矿物。如铜矿中的石英、绢云母、绿泥石;石棉矿石中的蛇纹石、白云石,方解石等;铜矿石中的少量方铅矿、闪锌矿等。

同矿体与围岩一样,矿石矿物和脉石矿物的划分也是相对的和暂时的。随着人们对新矿物原料的需求日益增长和经济技术条件的不断进步,目前被认为无用的脉石矿物,就可能逐渐成为有用的矿石矿物,如矽长岩型铜矿石中的透辉石,过去一直认为是无用的矿物,现在却广泛用作低温快烧陶瓷的原料;相反,原来认为是重要的矿石矿物,如压电石英,现在已被人工压电石英所取代,不再作为矿石开采了。再譬如,在经济发达、交通方便的地区,与煤层伴生的粘土质页岩(煤矸石),已被广泛用于生产砖瓦、陶瓷、水泥、岩棉、铸石、陶粒、耐火砖等工业产品,有的还从中提取硫酸铝、氯化铝、活性高岭土、硫铁矿、钒、钴、镍、镓、锗等元素或化合物,而在经济相对落后的地区,则只能当作无用的废料弃置了。又如,在石灰岩地区,深埋地下的石灰质矿床围岩,一般不再开采,但在石灰岩缺乏的地区,则可能就同主矿体一道开采出来,作为冶金熔剂或用于生产水泥、石灰等。

同时也应当看到,在矿石中,矿石矿物和脉石矿物总是相伴存在、密切共生,也是基本的事实。据资料显示,目前,仍有90%以上的金属矿石不能开采后直接入炉冶炼,约有50%以上的非金属矿石需经过一定形式的选别和加工后方可使用。随着矿产综合利用程度的提高,虽然脉石矿物的范围正在不断缩小,但数量却极为可观。由于我国的金属矿床贫矿较多,每年尾矿的排放量,一般远远大于金属矿物的产量,如黄金,一般当其品位大于 $4\text{g/t}$ 时即可开采,亦即每产出 $1\text{t}$ 黄金,就要产生 $25\text{万t}$ 尾矿,除铁矿石外,一般金属矿的尾矿/精矿石比都在百倍以上。从某些矿区堆积如山的废石堆和星罗棋布的尾矿库,就可以清楚地体会到,脉石矿物的无处不在。

鉴于矿石矿物和脉石矿物的相对性和共生性,就要求我们在矿业开发之前,必须首先认识清楚,哪些矿物应当提取出来,哪些矿物将弃置不用;如何将有用元素或工业矿物提取出来,提取物的纯度能达到何种程度;矿石矿物与脉石矿物在矿石中是以何种方式存在的,其相对比例如何等。要回答这些问题,就需要首先弄明白矿石构造和结构的概念。

一般来说,多数金属元素在矿石中是以独立的矿石矿物存在的,如磁铁矿、辉铜矿、方铅矿、闪锌矿等,但也有很多是呈类质同像、包裹体、吸附、熔离等形式存在。即使是以独立矿物形式存在的矿物,也往往不是由同一矿物单独形成矿石,而是常与其他多种矿

石矿物或脉石矿物共生在一起 ,构成不同的结构与构造。矿石中同一矿物集合体内 ,各矿物的形态特征、结晶状况及其相互关系 ,称为矿石的结构。而各矿物集合体之间的特征、分布及其相互关系 称为矿石的构造。自然界中 ,各种矿石的构造和结构可归纳为图 1-3-1、图 1-3-2 所示的几种形式。

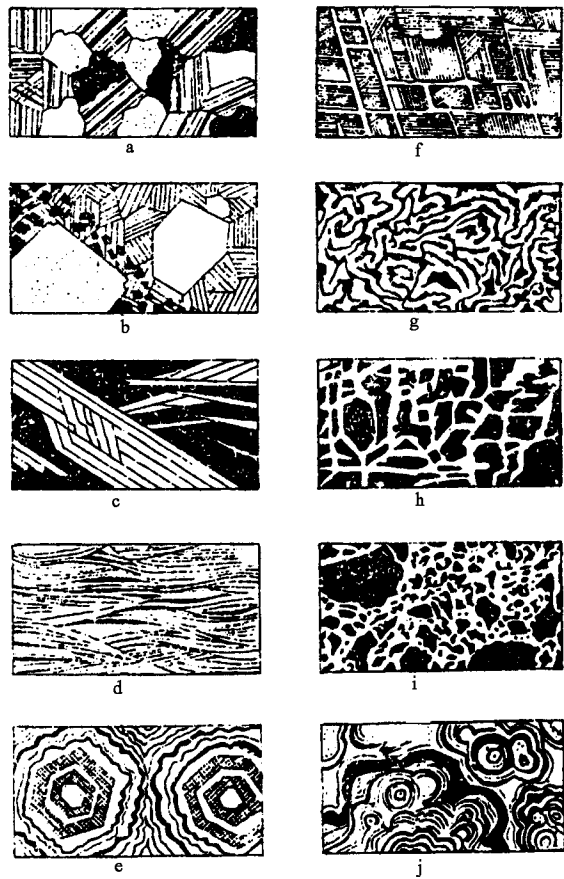


图 1-3-1 主要的矿石结构图

a—等粒结构 b—不等粒结构 c—片状结构 d—纤维结构 ;  
e—带状结构 f—结晶定向结构 g—紧密连晶结构 ;  
h—交代结构 i—破碎结构 j—胶状结构

从矿石的结构、构造看 ,自然界中 ,纯粹由同一种矿物组成大体积、致密状矿体或矿石的情况并不多见 ,相反 ,多数矿石是由多种矿物集合体交叉混生 ,具有十分复杂的结构和构造。然而 ,从工艺角度看 ,却只有当矿石由同种矿物组成时 ,才无需分离即可投入冶

炼或加工。如果采矿时,有选择性的只开采矿石矿物,而放弃脉石矿物,也就不存在矿业废料问题了,然而,为了充分利用有限的矿产资源,采矿时必须坚持“贫富兼采、厚薄兼采”的原则,即采矿时,不允许只开采其中的纯矿石而废弃与脉石矿物共生的低品位矿石,而应当将工业矿体中所有的有用矿石与无用的夹石或部分围岩、含纯净矿石矿物的矿石与含脉石矿物的矿石同时采出,也就是说,采矿所获得的矿石中,既含有矿石矿物,又含有脉石矿物,且脉石矿物的比例一般远远高于矿石矿物。提取有用的矿石矿物,分离出无用的脉石矿物的工作,将由选矿来完成。不同结构构造的矿石,要用不同的选矿工艺流程来分离。

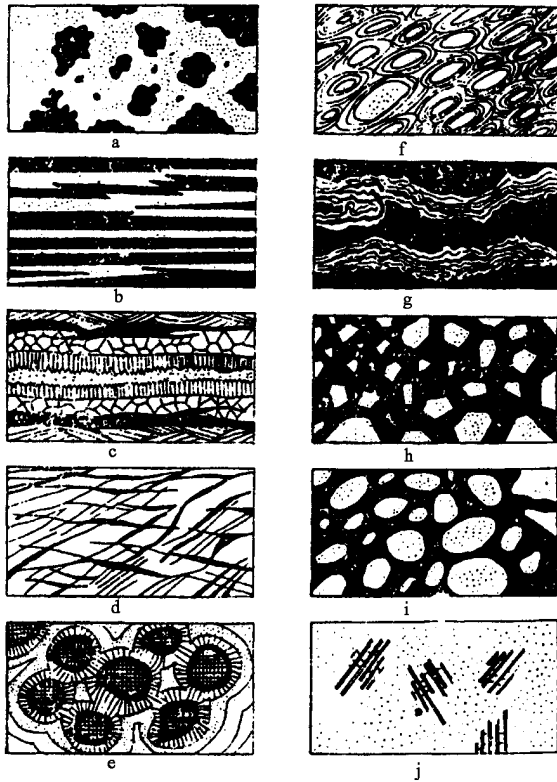


图 1-3-2 主要的矿石构造图

- a—斑点状构造 b—条带状构造 c—梳状构造 d—细脉状构造 ;  
 e—环状构造 f—鲕状构造 g—胶状构造 h—角砾构造 ;  
 i—砾状构造 j—蜂窝状构造



### 第三节 选矿与尾矿

选矿就是对开采出来的原生矿石进行选别和分级,使得有用矿物富集到满足冶炼要求的品位,或使之达到一定使用要求的质量等级的过程。矿石经选矿后,所得到的有用矿物部分称为精矿,暂时尚不能被利用或不打算利用的部分即为尾矿。

一般的选矿工艺主要包括破碎、磨矿、分选三个基本工序,选矿所得的精矿被运送到冶炼厂或使用用户,尾矿则就地或就近排放到尾矿库中。由于通常选矿厂的磨矿与选别工序,是在矿浆状态下进行的,因此,刚刚从选矿厂排出的尾矿一般呈流体状态。从选矿厂排出的尾矿浆,先用浓缩设备初步脱水后,将其用管道输送至尾矿库中,经过一段时间后,水分逐渐被淋失,即形成尾矿砂堆积。由于排矿处口的水力分级作用,在尾矿库中,尾矿的粒度分布及矿物组成往往存在不均匀现象,这一点,对于尾矿开发工作者来说,应引起高度重视,如果采样或取料方式不合理,往往会造成产品质量的波动。

尾矿库的典型断面特征如图 1-3-3 所示。采样或取料时,应根据尾矿的堆积剖面,上下兼采,逐段推进,尽量使混合料均匀一致。

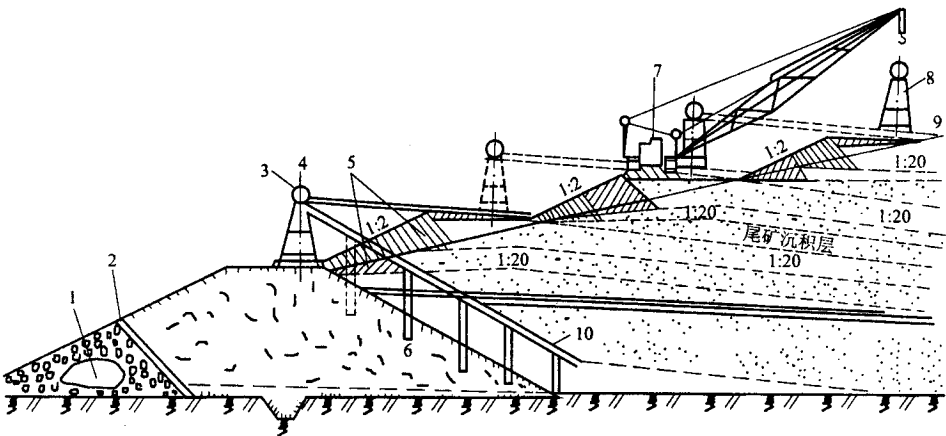


图 1-3-3 用移动管架排放尾矿的尾矿坝堆积过程图

- 1—堆石坝 2—反滤层 3—尾矿排放管 4—尾矿排放管的中心线 5—尾矿堆积堤 6—土坝;  
7—用于移动排放管的起重机 8—木支架 9—尾矿堆积堤的总坡度线 10—木流槽(最初位置)

库存法处理尾矿的方式,虽然具有简便易行的特点,但要占用大量的土地,而且容易

造成环境污染,同时,还需要大量的建库资金和管理费用。据不完全统计,一般尾矿库建设及相应的尾矿输送设备,要占选矿厂基本建设投资的20%~50%,尤其对于处理低品位矿石,如斑岩型铜矿、细脉浸染状金矿等有色金属矿石的选矿厂,这一比例有时还要高些。另据文献报道,每输送1t尾矿,须耗资2~3元,每处理1t原矿,需要11~14t水。为了改变这种不合理的尾矿处理方式,有些选矿厂在大规模利用尾矿方面,已做出了一些有益的尝试,譬如用尾矿充填回采巷道、铺筑厂区道路、复垦土地等。然而,就其附加值而言,将其作为生产建筑材料的原料,是最经济合理的。

根据矿物分选时的机理不同,选矿方法可分为重选、磁选、浮选、电选、光电选、化学选等。对于尾矿建材工作者而言,无论那种选矿方法,所得到的尾矿,并没有实质性的区别。但因矿山所采出的原生矿石中,除极少数呈致密块状的矿石外,一般都是由矿石矿物和脉石矿物镶嵌分布、共同组成的,且脉石矿物含量往往远远高于矿石矿物含量。为了实现矿石矿物与脉石矿物的分离,无论何种选矿方法,第一道工序就是磨矿。不同磨矿工艺所得到的尾矿,在颗粒分布特征上是有区别的,这一点对于选择尾矿的利用途径是有意义的。根据矿石的结构构造不同,磨矿工序可采用一段磨矿工艺或多段磨矿工艺,一段磨矿是直接将矿石磨至矿物分离粒度,因此,尾矿的颗粒一般较细,并且分布均匀,宜于用作烧结类尾矿建材或水化合成类尾矿建材;多段磨矿是逐级将矿石磨至分离粒度,中间插入多次分级和选别工序,因此,尾矿呈现多粒级混杂,并符合一定颗粒级配的分布,因此,宜于用作混凝土的骨料或生产无粗骨料的硅酸盐建筑制品。经过烧结处理的矿石尾矿,由于在烧结过程中积存了一定能量,因而显示一定的化学活性,因此,适合用作生产水化合成材料或混凝土材料的混合材。对于不同类型的矿石,因其结构构造的不同,以及选矿精度的要求不同,其尾矿的颗粒组成差别是很大的,有的尾矿砂呈碎石状,有些则是一些比水泥还细的细粉。目前,选矿企业一般以0.074mm作为磨矿控制下限。

对于一些非金属矿或富金属矿,有时无须磨矿,而是仅仅通过破碎或手选,即可加以选别与分级,此时所排放的废渣,由于颗粒较大,有时不称其为尾矿,而称作废石或矸石,但从开发角度看,除颗粒粗细有差别外,废石与尾矿在性质上并无根本的区别,因此,本书亦将这类废石归为尾矿。

## 第四章 尾矿的类型

鉴于尾矿是由矿石选别出精矿后,所剩余的固体废料。因此,就其成因而言,与矿石是完全一致的。在其物质组成中,既包含着与矿石一道开采出来的部分围岩及夹石,又包含着与矿石矿物共生在一起的脉石矿物,另外,尚含有少量未选净的矿石矿物。由此还可以进一步判断,除因选矿使得矿石矿物的含量有所降低外,尾矿在物质成分方面,基本上是原矿石的继承物。亦即,尾矿的成分主要取决于原矿石或含矿岩石的成分。基于这一点,可按照岩石学和矿床学的分类方法,对尾矿做出地质学划分。

同时,尾矿又是人类活动的产物,其组成和性质与选矿工艺流程也必然具有一定的关系。就尾矿建材而言,尾矿的化学成分与应用技术性能对于建材的形成与工艺,必然具有重要影响。因此,尾矿的类型,又可根据选矿学和建材学的理论进行划分。

到目前为止,还没有一种科学的尾矿分类方案。许多研究工作者常常根据排放尾矿的主要矿种,将其命名为铁尾矿、铜尾矿、金尾矿等等,事实上,这样的分类方案与命名方法是缺乏科学依据的,也是没有实际意义的。因为它既不能反映尾矿的地质学特征,又不能反映其工艺学特点,无论对于尾矿本身的研究,还是对于其开发利用,都没有直接的指导作用。

本书为了研究尾矿及尾矿建材的方便,分别根据尾矿的矿床学特征、选矿工艺和岩石化学特点,进行了分类尝试,并以此作为描述和叙述的依据。

第一节 尾矿的矿床学类型

按尾矿的矿床地质特征划分尾矿类型 ,是基于这样的考虑 :尾矿既然是矿床的继承物或衍生物 ,那么 ,矿床的成因类型、矿体的形状、产状和大小 ,矿石的结构和构造、含矿母岩及围岩蚀变情况等 ,就必然会在尾矿的化学成分、矿物组合及其理化性质上得到一定程度的反映。利用该方案 ,在对尾矿自身进行研究时 ,倘若因颗粒细小 ,不便查清尾矿的矿物成分和结构构造时 ,可先根据其矿床学类型和地质勘查报告 ,对其基本成分、性能特点以及开发方向 ,做出一个基本的推断。

根据矿体所赋存的主岩类型和围岩蚀变类型 ,并考虑到尾矿的矿物组合情况 ,可将我国主要类型矿床的选矿尾矿 ,划分为 28 个基本类型。其具体划分方案见表 1 - 4 - 1。

表 1 - 4 - 1 尾矿的矿床学类型

序号	主岩类型	寄主矿化类型	代表性围岩蚀变类型	主要矿物组合
1	超基性岩浆岩	铬铁矿、铜镍硫化物	蛇纹石化	镁橄榄石、斜方辉石、蛇纹石、绿泥石等
2	基性岩浆岩	钒钛磁铁矿	纤闪石化	基性斜长石、辉石、纤闪石、绿泥石等
3	基性 - 碱性岩浆岩	磷灰石 - 磁铁矿		钠辉石、钠闪石、石英、方解石等
4	自变质花岗岩	稀有 - 稀土金属矿	钾钠长石化	钾微斜长石、钠长石、石英
5	金伯利岩	金刚石	蛇纹石化	镁橄榄石、镁铝榴石、透辉石、蛇纹石、金云母、绿泥石、方解石等
6	玄武 - 安山岩	赤铁 - 磁铁矿		斜长石、辉石、角闪石、磷灰石等
7	碱性伟晶岩	磷灰石		霓石、霓辉石、钠钙闪石、方钠石、钠沸石等
8	花岗伟晶岩	稀有 - 稀土金属		钾长石、钾微斜长石、石英、白云母等
9	钙砂卡岩	钨、锡、铋、钼、铁、铜、铅、锌	砂卡岩化	石榴子石、透辉石、透闪石、方柱石、阳起石、绿帘石、绿泥石、绢云母、石英、方解石等
10	镁砂卡岩	铁、铜、硼	砂卡岩化	镁橄榄石、硅镁石、尖晶石、透辉石、金云母、透闪石、蛇纹石等

序号	主岩类型	寄主矿化类型	代表性围岩蚀变类型	主要矿物组合
11	酸性侵入岩	钨、锡、铋、钼	云英岩化	钾长石、石英、白云母、电气石、符山石等
12	酸性侵入岩及其情性围岩	金、铜、铅、锌、水晶	硅化、绿泥石化、绢云母化	石英、钾长石、碱性斜长石、绢云母、绿泥石等
13	酸性侵入岩的情性围岩	铅、锌、汞、锑、萤石、重晶石	硅化、绢云母化、绿泥石化	石英、长石、绢云母、白云母、绿泥石等
14	陆相火山岩	金、铜、铅、锌、汞、锑、萤石、明矾石、叶蜡石	次生石英岩化	石英、绢云母、明矾石、高岭土、红柱石、水铝石、叶蜡石等
15	陆相次火山岩	铜、铁	钾化、钠化、绢英岩化、青盘岩化	钾长石、石英、绢云母、绿泥石、绿帘石、高岭土、方解石或透辉石、阳起石、金云母、绿帘石、绿泥石、磷灰石等
16	海相火山岩	铜、铅、锌	青盘岩化、绢英岩化、次生石英岩化	石英、绢云母、绿泥石、方解石、硬石膏等
17	层控碳酸盐岩	铅、锌、汞、锑		方解石、白云石、萤石、重晶石、菱铁矿等
18	层控碎屑岩	铜、钼、铀、水晶		石英、长石、粘土矿物等
19	风化壳	铁、铝、磷、镍、铀、高岭土		石英、长石、氧化铁、粘土矿物等
20	河沙、海沙	金、金刚石、锆石		石英
21	蒸发沉积岩	盐、碱、硝、钾、硼、石膏		白云石、石膏、硬石膏、粘土
22	海相沉积岩系	铁、锰、铝、磷		石英、粘土、方解石、白云石、海绿石
23	陆相生物沉积岩	煤、油页岩、硅藻土、硫、磷		粘土矿物、二氧化硅质、长石、方解石、黄铁矿等
24	陆相火山碎屑蚀变岩	珍珠岩、沸石岩、膨润土		火山凝灰碎屑、珍珠岩、沸石岩、膨润土等
25	重结晶碳酸盐	大理岩、石墨		方解石、白云石、透辉石、硅灰石
26	蚀变白云岩	石棉、滑石、菱镁矿	蛇纹石化、绿泥石化	白云石、蛇纹石、透辉石、透闪石、绿泥石等
27	变质火山沉积岩	铁、铜、铅、锌	石榴石化、绿泥石化	石英、石榴石、绿泥石、钠长石等
28	变质含矿沉积岩	铜、磷、硼、石墨、红柱石、蓝晶石、刚玉		石英、长石、云母、角闪石、阳起石等

## 第二节 尾矿的选矿工艺类型

不同结构构造的矿石,需要不同的选矿工艺流程,而不同的选矿工艺流程所产生的尾矿,在工艺性质上,尤其在颗粒形态和颗粒级配上,往往存在一定的差异,为此便形成了尾矿的选矿工艺流程分类依据。按照选矿工艺流程,尾矿可分为如下类型:

### 一、手选尾矿

因为手选主要适合于结构致密、品位高、与脉石界限明显的金属或非金属矿石,因此,尾矿一般呈大块的废石状。根据对原矿石的加工程度不同,又可进一步分为矿块状尾矿和碎石状尾矿。前者粒度差别较大,但多在 100 ~ 500mm 之间,后者多在 20 ~ 100mm 之间。这类尾矿适合于作混凝土质材料的粗骨料使用。

### 二、重选尾矿

因为重选是利用矿石矿物与脉石矿物的密度差和粒度差选别矿石,一般采用多段磨矿工艺,致使尾矿的粒级范围比较宽,分区存放时可得到单粒级尾矿,混合储存时,可得到符合一定级配要求的连续粒级尾矿。按照作用原理及选矿机械,还可进一步分为跳汰选尾矿、重介质选尾矿、摇床选尾矿、溜槽选尾矿等,其中,前两种尾矿粒级较粗,一般大于 2mm;后两种尾矿粒级较细,一般小于 2mm。这类尾矿对于高温熔制时的透气性与压制成型时的排气性均十分有利,在尾矿建材中适用面最广。

### 三、磁选尾矿

磁选主要用于选别磁性较强的铁锰矿石,尾矿一般为含有一定量铁质的造岩矿物,粒度范围比较宽,可从 0.05mm 到 0.5mm 不等;当磁选弱磁性矿物时,需要先对矿石进行焙烧处理,由于尾矿在焙烧过程中获得了一定的反应活性,因此尤其适合于生产水化合成的硅酸盐建筑制品。

### 四、电选及光电选尾矿

目前这种选矿用的较少,通常用于分选砂矿床或尾矿中的贵重矿物。尾矿粒度一般

小于 1mm。

### 五、浮选尾矿

浮选是有色金属矿产的最常用选矿方法,其尾矿的典型特点是粒级较细,通常在 0.5~0.05mm 之间,且小于 0.074mm 的极细颗粒占绝大部分。新排尾矿颗粒的表面有时附着选矿药剂,对建材生产有一定影响,但经过一定存储期的尾矿,选矿药剂的影响将自动消失。鉴于这类尾矿已经过深度磨细,因此,用于烧结类建材或生产加气混凝土材料时,将节省大量的磨细能耗。

### 六、化学选尾矿

由于化学药液在浸出有用元素的同时,也对尾矿颗粒产生一定程度的腐蚀或改变其表面状态,一般能提高其反应活性,对于水化反应型建材的形成较为有利,但有时残余的化学药剂,也会对建材的耐久性产生不利影响,使用时应根据具体情况加以具体分析。

选矿工艺流程的选择,主要是根据矿石的物质组成、物化性质、结构构造确定的。尾矿的成分和技术特性,仍然主要取决于原矿石的成分和性质。选矿工艺对尾矿的影响,主要体现在颗粒形态、细度和颗粒级配上,其中,磨矿段数又是其中的主要决定因素,一般来说,具有块状、斑状、条带状构造,且矿石矿物又呈粗大的自形晶、半自形晶结构时,磨矿段数可多一些,因而尾矿颗粒相对较粗,颗粒级配良好;而当矿石的结构、构造比较复杂,矿物镶嵌交生,分布又极不均匀时,往往需要单段深度磨矿,这时,尾矿颗粒往往颗粒细小,且呈现较窄的粒级分布。

不同的选矿方法虽然对于矿料的粒级范围有一定的要求,但对于不同的矿石类型,采用相同的选矿工艺所得的尾矿,在颗粒分布及技术特性上,仍可能存在很大的差别,相反,不同的选矿工艺所形成的尾矿,其颗粒分布和技术性能可能并无多大差别。故该分类方案,也只能作为宏观上考察尾矿颗粒分布状态的参考依据。对于揭示尾矿的本质特性与建材意义,仍不具备判据条件。

## 第三节 尾矿的岩石化学类型

对于作为建筑材料生产原料的尾矿而言,其用途、用法、用量等技术开发要素,除受

矿床学类型和颗粒分布状态影响外,起决定性作用的因素,应主要体现在如下几个方面:①尾矿的化学成分、矿物成分和有害杂质含量等物质组成特点;②化学键性、晶体结构、表面状态等物理化学特性;③可磨性、可熔性、可溶性、可烧结性等工艺技术性能;④强度、坚固性、化学稳定性等应用性能。而所有这些因素,归根结底,将取决于尾矿的矿物组成。按照尾矿中主要组成矿物的组合搭配情况,可将其分为如下 8 个岩石化学类型:

### 一、镁铁硅酸盐型尾矿

该类尾矿的主要组成矿物为  $Mg_2[SiO_4]-Fe_2[SiO_4]$  系列橄榄石和  $Mg_2[Si_2O_6]-Fe_2[Si_2O_6]$  系列辉石,以及它们的含水蚀变矿物:蛇纹石、硅镁石、滑石、镁铁闪石、绿泥石等。一般产于超基性和一些偏基性岩浆岩、火山岩,镁铁质变质岩,镁矽卡岩中的矿石,常形成此类尾矿。在外生矿床中,富镁矿物集中时,可形成蒙脱石、凹凸棒石、海泡石型尾矿。其化学组成特点为,富镁、富铁,贫钙、贫铝,且一般镁大于铁,无石英。

### 二、钙铝硅酸盐型尾矿

该类尾矿的主要组成矿物为  $CaMg[Si_2O_6]-CaFe[Si_2O_6]$  系列辉石、 $Ca_2Mg_5[Si_4O_{11}](OH)_2-Ca_2Fe_5[Si_4O_{11}](OH)_2$  系列闪石、中基性斜长石,以及它们的蚀变、变质矿物:石榴子石、绿帘石、阳起石、绿泥石、绢云母等。这类尾矿在中基性岩浆岩、火山岩,区域变质岩,钙矽卡岩型矿石时较为常见。与镁铁硅酸盐型尾矿相比,其化学组成特点是:钙、铝进入硅酸盐晶格,含量增高,铁、镁含量降低,石英含量较小。

### 三、长英岩型尾矿

该类尾矿主要由钾长石、酸性斜长石、石英及其它们的蚀变矿物:白云母、绢云母、绿泥石、高岭石、方解石等构成。产于花岗岩自变质型矿床、花岗伟晶岩矿床、与酸性侵入岩和次火山岩有关的高、中、低温热液矿床、酸性火山岩和火山凝灰岩自蚀变型矿床、酸性岩和长石砂岩变质岩型矿床、风化残积型矿床、长英砂及硅质页岩型沉积矿床的矿石,常形成此类尾矿。它们在化学组成上具有高硅、中铝、贫钙、富碱的特点。

### 四、碱性硅酸盐型尾矿

这类尾矿在矿物成分上以碱性硅酸盐矿物,如碱性长石、似长石、碱性辉石、碱性角闪石、云母以及它们的蚀变、变质矿物,如绢云母、方钠石、方沸石等为主。产于碱性岩中的稀有、稀土元素矿床,可产生这类尾矿。根据尾矿中的  $SiO_2$  含量,可分为:碱性超基性



岩型、碱性基性岩型、碱性酸性岩型三个亚类。其中,第三亚类分布较广,建材中多用此类。在化学组成上,这类尾矿以富碱、贫硅、无石英为特征。

### 五、高铝硅酸盐型尾矿

这类尾矿的主要组成成分为云母类、粘土类、蜡石类等层状硅酸盐矿物,并常含有石英。常见于某些蚀变火山凝灰岩型、沉积页岩型以及它们的风化、变质型矿床的矿石中,煤系地层中的煤矸石亦多属此类。化学成分上,表现为富铝、富硅,贫钙、镁,有时钾、钠含量较高。

### 六、高钙硅酸盐型尾矿

这类尾矿主要矿物成分为透辉石、透闪石、硅灰石、钙铝榴石、绿帘石、绿泥石、阳起石等无水或含水的硅酸钙岩。多分布于各种钙矽卡岩型矿床和一些区域变质矿床。化学成分上表现为高钙、低碱, $\text{SiO}_2$ 一般不饱和,铝含量一般较低的特点。

### 七、硅质岩型尾矿

这类尾矿的主要矿物成分为石英及其二氧化硅变体。包括石英岩、脉石英、石英砂岩、硅质页岩、石英砂、硅藻土以及二氧化硅含量较高的其他矿物和岩石。自然界中,这类尾矿广泛分布于伟晶岩型、火山沉积-变质岩型、各种高、中、低温热液型、层控砂(页)岩型以及砂矿床型的矿石中。 $\text{SiO}_2$ 含量一般在90%以上,其他元素含量一般不足10%。

### 八、碳酸盐型尾矿

这类尾矿中,碳酸盐矿物占绝对多数,主要为方解石或白云石。常见于化学或生物-化学沉积岩型矿石中。在一些充填于碳酸盐岩层位中的脉状矿体中,也常将碳酸盐质围岩与矿石一道采出,构成此类尾矿。根据碳酸盐矿物是方解石,还是白云石为主,又可进一步分为钙质碳酸盐型尾矿和镁质碳酸盐型尾矿两个亚类。

上述8类岩石化学类型的尾矿,在化学成分和矿物组成上,均具有各自的特点,从而可根据其各自的成分或性质,选择不同的生产工艺,制造不同性能的建材。但应当指出,分类只是为了研究问题的方便,不可以作为指导生产的依据。何况,上述的分类方案,只是根据主要的影响组分划分的,并没有反映尾矿的具体矿物组合。任何尾矿,都不可能仅仅由少数几种元素或矿物所构成,除主量元素和主要矿物外,都或多或少的含有其他次要组分,好在建材生产中,主要是利用其主要组分,对于其他组分,可作为杂质看待,只

要不超过限量 ,即可加以利用。

尾矿建材 ,主要是利用尾矿的主要化学组分和矿物成分 ,以及由化学组成和矿物组成而体现出来的物理化学性质 ,因此 ,尾矿的岩石化学分类 ,更能体现其建材意义。在以后的讨论中 ,将主要以尾矿的岩石化学类型为线索 ,必要时 ,采用其矿床学类型和选矿工艺类型作为补充。

## 第五章 尾矿的成分和性质

尾矿的成分包括化学成分和矿物成分,尾矿的性质既包括尾矿自身的物理性质,也包括与建材生产有关的物理化学性质。不同成分和性质的尾矿,除影响到建材生产过程中的工艺参数外,也是决定其开发方向的主要依据。

### 第一节 尾矿的化学成分与矿物成分

如前所述,尾矿是由矿体的部分围岩和夹石,以及矿石中的脉石矿物所构成,因此,其化学成分和矿物成分一方面受矿体主岩岩性的控制,另一方面,又受到矿化类型与围岩蚀变的制约。一般来说,岩浆堆积型、火山喷溢型、同生沉积型、区域变质型矿床的尾矿,其化学成分与主岩成分基本近似,而接触交代型、热液型、风化型矿床的尾矿,则主要取决于矿化和围岩蚀变类型。此外,选矿回收率,也对尾矿成分具有一定影响。

无论何种类型的尾矿,其主要组成元素,不外乎 O、Si、Ti、Al、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、K、P、H 等几种,但它们在不同类型的尾矿中,其含量差别很大,且具有不同的结晶化学行为。

在镁铁硅酸盐型尾矿中, Si 以  $[\text{SiO}_4]$  四面体形式组成岛状、链状、层状硅酸盐骨干,形成橄榄石、辉石、蛇纹石、水镁石、蒙脱石、海泡石、凹凸棒石等镁、铁硅酸盐矿物; Ti 除一部分以类质同像形式进入辉石晶格外,主要形成钛铁矿;少量的 Al 此时主要以  $[\text{AlO}_6]$  六面体形式取代 Fe、Mg,共同组成硅酸盐矿物, Mn 有时也可取代部分 Fe; Ca 主要组成少

量斜长石 ;Na、K 含量很低 ;P 一般以磷灰石形式存在 ;H 在蚀变矿物中以  $[\text{OH}]^{-1}$  及  $[\text{H}_3\text{O}]^{+1}$  进入矿物晶格。

在钙铝硅酸盐型尾矿中 ,Ca 一方面与 Fe、Mg 一道组成辉石、角闪石、石榴石等硅酸盐矿物 ,一方面与 Na、Al 一起形成斜长石等铝硅酸盐矿物。当这些矿物遭受蚀变时 ,上述 12 种元素均可进入矿物晶格 ,并有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等组分加入 ,形成绿帘石、绿泥石、绢云母等含水矿物。

在长英岩型尾矿中 ,Si 不仅与 Ca、Na、K、Al 组成碱性长石和与 Fe、Mn、Mg 组成云母等层状硅酸盐矿物 ,还常形成独立的  $\text{SiO}_2$ 。在未遭受蚀变和风化的尾矿中 ,独立的  $\text{SiO}_2$  多为结晶态的石英 ,在沉积型矿床中 ,有时以无定型的蛋白石、燧石、硅藻土等形式存在。蚀变严重的这类尾矿 ,主要具有绿泥石 + 绢云母 + 石英或高岭石 + 石英蚀变组合。外生条件下 ,常以石英 + 长石、石英 + 粘土组合出现。在某些酸性火山岩型矿床中 ,还常见到沸石类矿物 ,Ca、Na、K 以不稳定的吸附状态 赋存于 Si - Al - O 骨架的空穴中。

在碱性硅酸盐型尾矿中 ,Na、K 含量比长英岩型尾矿高得多 ,它们既可以与 Fe、Mg、Si 组成碱性辉石、碱性角闪石、霓石等暗色矿物 ,也常与 Si、Al 一起形成霞石、白榴石等似长石矿物 ,此时 ,无独立的  $\text{SiO}_2$  矿物出现。由于建材中主要是利用其第三亚类——碱性酸性硅酸盐型尾矿 ,霞石、白榴石、钾长石、碱性斜长石等是其主要组成矿物。当矿床受到蚀变时 ,碱性似长石类矿物常形成方钠石、方沸石、钾沸石等 ,碱性长石蚀变为绢云母、高岭石等。

在高铝硅酸盐型尾矿中 ,Si、Al 往往结合成无水或含水的硅酸铝 ,赋存于粘土矿物或红柱石族矿物中 ,Si 呈四面体配位 ,Al 多呈六面体配位。Fe、Mg、Na、K 进入八面体孔穴 ,以黑云母、白云母、水云母、伊利石等形式存在。Ca 一般很少进入硅酸盐晶格 ,而以独立的碳酸盐形式存在。

在高钙硅酸盐型尾矿中 ,Ca 一方面与 Si 结合成透辉石、透闪石、硅灰石、钙铝榴石等 ,另一方面以方解石形式残留于碳酸盐中。Fe、Mg、Na、K 等主要赋存于绿帘石、绿泥石、阳起石等含水硅酸盐中。其中 ,有些 Fe 以氧化物或硫化物形式存在。

硅质岩型尾矿中 ,Si 的主要赋存方式为结晶状态的氧化物 - 石英 ,有些以燧石、蛋白石等微晶或不定型氧化物形式存在。Al、Fe、Ca、Mg、Na、K 等以杂质矿物形式赋存于胶结物中。

碳酸盐型尾矿中 ,Ca 可进入方解石、白云石晶格 ,Mg 可形成白云石、菱镁矿。但在一些成分不纯或遭遇蚀变的碳酸盐型尾矿中 ,也不免有 Si、Al、Fe、Mn 元素的混入。

尾矿的化学成分 ,可用全分析结果表示 ,但一般常以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、FeO、

MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub> 等主要造岩元素的含量来标度。各种未选净的金属元素,可从选矿工艺参数中获得。一般选矿厂都有尾矿品位的记录。只有当确定某种金属元素对建材生产工艺或产品性能具有重大影响时,才要求作全分析。

尾矿的矿物成分,一般以各种矿物的质量分数表示,但由于岩矿鉴定多在显微镜下进行,不便于称量,因此,有时也采用镜下统计矿物颗粒数目的办法,间接地推算各矿物的大致含量。

根据我国一些典型金属和非金属矿山的资料统计,各类型尾矿化学成分和矿物组成范围列于表 1-1-1。

另据地科院尾矿利用中心李章大介绍,我国几种典型金属矿床尾矿的化学成分如表 1-1-2。

由表 1-1-1、1-1-2 可以看出,不同成因类型的矿床,其尾矿成分变化范围是相当大的,这就要求用作建筑材料的原料时,必须先对尾矿的化学成分作详细的分析研究。应当注意,表中所列不同类型尾矿的化学成分,仅可作为选择开发方向时参考,具体应用时,还需比照有关的建筑材料用原材料标准,具体分析哪些成分超标,哪些成分不足,哪些是有害的,哪些是有益的,以便取舍或掺配。为了满足建材生产需要,必要时,还可以配合选矿流程,进行有针对性的分选或分级。

另外,在作尾矿成分分析时,应与建材配方通盘考虑,不能孤立地根据尾矿成分,得出可用不可用的结论。

第二节 尾矿的物理性质

与建材生产有关的尾矿物理性质,主要包括密度、硬度、熔点、热膨胀系数等。由于各个具体矿山的尾矿组成各具特点,很难取得完整的数据,在此仅对组成尾矿中,一些常见重要矿物的物理性质列出(见表 1-5-1、1-5-2)。

表 1-5-1 一些常见尾矿组成矿物的物理性质

矿 物	密 度 /g·cm <sup>-3</sup>	莫氏硬度	熔融(分解) 温度/℃	矿 物	密 度 /g·cm <sup>-3</sup>	莫氏硬度	熔融(分解) 温度/℃
石 英	2.65	7	1713	透辉石	3.25~3.3	6~7	1300~1390
玉 髓	2.60	6	1713	钙铁辉石	3.5~3.6	5.5~6	1100~1140

矿 物	密 度 /g·cm <sup>-3</sup>	莫氏硬度	熔融(分解) 温度/℃	矿 物	密 度 /g·cm <sup>-3</sup>	莫氏硬度	熔融(分解) 温度/℃
鳞石英	2.31	6.5	1670	角闪石	3.1~3.3	5~6	
方石英	2.33	6~7	1713	蓝闪石	3.1~3.5	5~6.5	
蛋白石	2.0~2.2	6~6.5	100~250	钠闪石	3.3~3.4	5.5~6	
黄铁矿	5.0	6~6.5	600~660	正长石	2.57	6	1185~1250
无水石膏	2.96	3~3.5	1100~1150	微斜长石	2.57	6	1150~1180
方解石	2.72	3	880~910	霞 石	2.6	5.5~6	1170~1220
白云石	2.87	3.5~4	750~800	钠长石	2.61	6~6.5	1100~1250
菱镁矿	2.96	4~4.5	600~650	钙长石	2.76	6~6.5	1290~1340
橄榄石	3.2~3.5	6.5~7	1250~1400	钠沸石	2.24	5~5.5	910~950
绿帘石	3.25~3.4	6.5	950~1000	辉沸石	2.16	3.5~4	800~900
紫苏辉石	3.4~3.9	5~6	1180~1370	丝光沸石	2.15	4~5	600~700
顽火辉石	3.2~3.25	5~6	1400~1450	方沸石	2.25	5.5	880~910
硅灰石	2.91	5~6	1540	堇青石	2.6~2.7	7~7.5	1400~1450

表 1-5-2 一些常见尾矿组成材料的热膨胀系数

材料名称	不同温度条件下的线膨胀系数 $\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$							
	- 40	- 20	0	20	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 350	20 ~ 900
花岗岩	$3.8 \times 10^{-6}$	$4.7 \times 10^{-6}$	$6.2 \times 10^{-6}$	$8.3 \times 10^{-6}$	$(6 \sim 11) \times 10^{-6}$	$(10 \sim 15) \times 10^{-6}$	$(13 \sim 18) \times 10^{-6}$	
玄武岩					$(4 \sim 5) \times 10^{-6}$	$(4 \sim 5) \times 10^{-6}$	$(4.5 \sim 5.5) \times 10^{-6}$	
辉绿岩	$5.3 \times 10^{-6}$	$6.2 \times 10^{-6}$	$6.6 \times 10^{-6}$	$7.1 \times 10^{-6}$	$(6 \sim 7) \times 10^{-6}$	$(6 \sim 7.5) \times 10^{-6}$	$(6.5 \sim 8) \times 10^{-6}$	
正长岩					$(6 \sim 7) \times 10^{-6}$	$(6 \sim 7.5) \times 10^{-6}$	$(6.5 \sim 8) \times 10^{-6}$	
闪长岩					$(6 \sim 7) \times 10^{-6}$	$(6 \sim 7.5) \times 10^{-6}$	$(6.5 \sim 8) \times 10^{-6}$	
安山岩	$6.3 \times 10^{-6}$	$6.8 \times 10^{-6}$	$7.2 \times 10^{-6}$	$7.6 \times 10^{-6}$				
砂 岩	$8.2 \times 10^{-6}$	$9.0 \times 10^{-6}$	$8.7 \times 10^{-6}$	$10.4 \times 10^{-6}$	$(11 \sim 15) \times 10^{-6}$	$(11.5 \sim 16) \times 10^{-6}$	$(11.5 \sim 16.5) \times 10^{-6}$	

材料名称	不同温度条件下的线膨胀系数 $\alpha/^{\circ}\text{C}^{-1}$							
	- 40	- 20	0	20	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 350	20 ~ 900
石灰岩	$3.8 \times 10^{-6}$	$4.7 \times 10^{-6}$	$5.7 \times 10^{-6}$	$6.5 \times 10^{-6}$	$(5 \sim 8) \times 10^{-6}$	$(8 \sim 12) \times 10^{-6}$	$(12 \sim 15) \times 10^{-6}$	
白云岩	$5.4 \times 10^{-6}$	$7.4 \times 10^{-6}$	$5.7 \times 10^{-6}$	$6.5 \times 10^{-6}$	$(4 \sim 0) \times 10^{-6}$	$(8 \sim 14) \times 10^{-6}$	$(10 \sim 16) \times 10^{-6}$	
石英砂	$10.3 \times 10^{-6}$	$10.7 \times 10^{-6}$	$11.3 \times 10^{-6}$	$12.1 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$	$12.5 \times 10^{-6}$	$13.5 \times 10^{-6}$	
磁铁矿								$(9 \sim 15) \times 10^{-6}$
铬铁矿								$(8 \sim 11) \times 10^{-6}$
石榴子石								$(12 \sim 20) \times 10^{-6}$
十字石								$(7 \sim 10) \times 10^{-6}$
符山石								$(10 \sim 12) \times 10^{-6}$
辉 石								$(7 \sim 11) \times 10^{-6}$
褐铁矿					$(15 \sim 20) \times 10^{-6}$			
铝矾土					$(15 \sim 20) \times 10^{-6}$			
水镁石					$20 \times 10^{-6}$			
石 膏					$25 \times 10^{-6}$			
蛇纹石					$(12 \sim 15) \times 10^{-6}$			

根据硅酸盐物理化学理论 ,其中 ,复合材料的密度和热膨胀系数 ,均符合加和性法则 ,即 :

$$a = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n$$

( 1 - 5 - 1 )

式中  $a_i$ ——各矿物的加和性参数 ;

$x_i$ ——各矿物的质量分数，%。

因此，尾矿的这些性质，可通过各组成矿物的性质计算得到。

第三节 尾矿的化学性质

尾矿的化学性质，是指尾矿参与化学反应的能力或在化学介质中抵抗腐蚀的能力。对于作建材原料的尾矿来说，主要是指其在碱性的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液中，所表现的化学反应活性。它对于低温条件下水化合成建材的形成，或是否可用于混凝土类材料的掺合料，起着决定性作用。

常见的尾矿组成矿物，在不同温度条件下，与含  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  材料反应硬化时所表现的化学活性，如表 1-5-3 所示。

表 1-5-3 尾矿与含  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  材料的化学反应活性

尾矿类型	主要组成	不同环境条件下的化学活性( $\text{pH} = 12.5 \sim 13$ )		
		标养( 20℃ )	蒸养( 95 ~ 100℃ )	蒸压( 175 ~ 185℃ )
镁铁硅酸盐	苦橄岩、橄辉岩	-	-	+
	蛇纹岩、水镁石岩	-	-	
	磁铁、赤铁、褐铁矿	-	+	+
钙铝硅酸盐	玄武岩	++	++	++
	辉绿岩	+	++	++
	斜长岩、辉长岩、闪长岩	-	+	++
长英岩	花岗岩	-	-	+
	流纹岩、凝灰岩	+	++	++
碱铝硅酸盐	正长岩、霞石岩	-	-	+
	粗面岩、响岩	+	++	++
	沸石岩、珍珠岩	+	++	++
高铝硅酸盐	铝矾土	++	++	++
	烧煤矸石	+	++	++
硅质岩	石英岩、石英砂	-	-	+
	硅藻土、蛋白土、海绵岩	++	++	++

注：++ 表示高活性；+ 表示具有活性；- 表示不显示活性。



第四节 尾矿的物理化学性质

如前所述,除硅质岩型尾矿和碳酸盐型尾矿外,绝大多数尾矿属于复杂的硅酸盐矿物混合体。

硅质岩型尾矿的主要化学成分为  $\text{SiO}_2$ 。以无定型  $\text{SiO}_2$  形式存在的蛋白石、燧石岩、硅藻土、硅质页岩等,在中性水中的溶解度约  $1.6 \times 10^{-6}$ ,但在碱性水环境中,可自发地与碱性金属离子发生化合,生成沸石或水化硅酸钙等不溶性矿物。而以结晶态形式存在石英,须在高压水热环境中,方具有这一性质。当此类尾矿受到高温时,其主要的物理化学性状表现为石英的同质多晶转变。在常压下,石英的晶型转变如图 1-5-1 所示。石英的各种高温变体,虽说在尾矿建材结构中性能差别并不明显,但其相变时的体积效应,却对生产过程起着制约作用。对于较纯净的石英砂或石英岩型尾矿,由于其较高的熔点,可用作酸性耐火材料,也可熔制成耐酸和耐高温的石英玻璃。

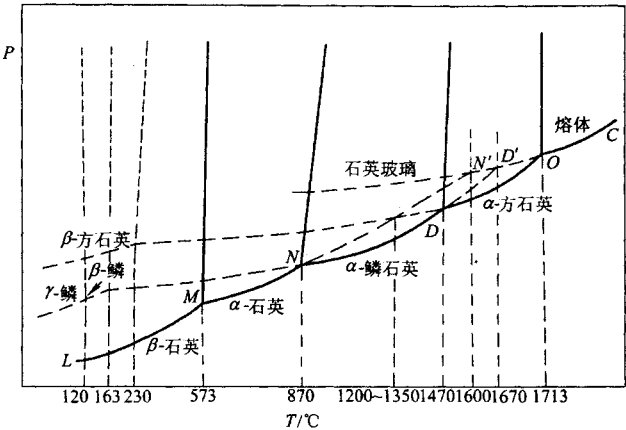


图 1-5-1  $\text{SiO}_2$  相图

碳酸盐型尾矿的主要化学成分为  $\text{CaCO}_3$  或  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ,主要存在形式是石灰岩和白云岩。当受到高温时,主要物化性质表现为分解反应。石灰岩在  $900 \sim 1000^\circ\text{C}$  条件下分解为活性石灰;白云石在  $650 \sim 750^\circ\text{C}$  条件下分解为苛性白云石。这两种碱性化合物遇水可水化成碱性氢氧化物,具有气硬性胶凝特性,当尾矿中富含  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等杂质时,又可与之反应而具有水硬性胶凝特性。当将其置于  $1300^\circ\text{C}$  以上的高温下焙烧时,

活性石灰和苛性白云石将发生重结晶,而失去水化-硬化特性,表现为良好的耐火性。在含水的硅酸盐体系中, $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 与水化合成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 而呈现碱性,并与含 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的材料发生反应生成水化硅酸盐凝胶或微晶体。在无水的硅酸盐体系中, $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 在高温下与酸性材料可发生固相反应或共同熔融,形成一系列具有特殊性能的硅酸盐材料。在高温熔制建材和高温烧结建材生产中, $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 组分均具有降低烧成温度的作用。

各种硅酸盐型尾矿,一般系多组分、多矿物共生体系。组成硅酸盐型尾矿的常量化学组分主要有 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 等8种氧化物,其中,在同一种具体的尾矿中,往往只有2~3种氧化物占据主导地位,因此,对于硅酸盐型尾矿的物理化学性质,可以用一些二元或三元相图模型来描述。

镁铁硅酸盐型尾矿,由于Fe、Mg在橄榄石、辉石中可以完全相互取代,因此可由 $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ 二元相图(图1-5-2)简要说明其高温物理化学性质。

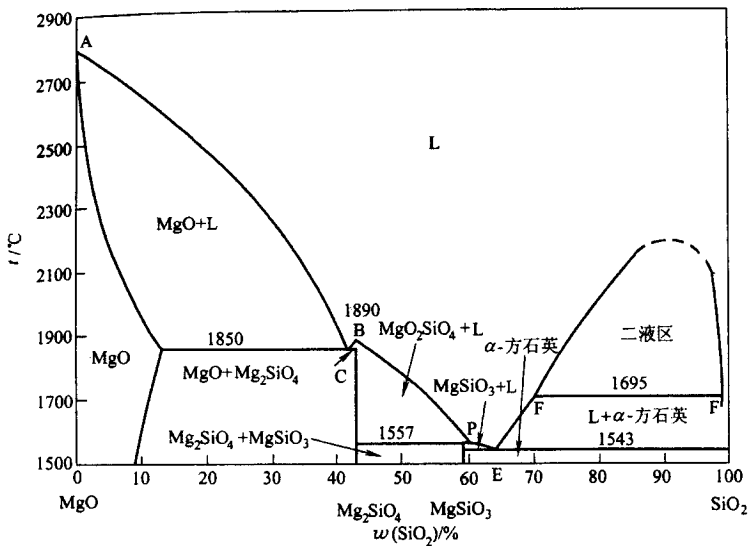


图 1-5-2  $\text{MgO}-\text{SiO}_2$  二元相图

在该系统中,有一个低共熔化合物-橄榄石( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ )。橄榄石的熔点非常高( $1890^\circ\text{C}$ ),可作为高级耐火材料,若尾矿中含有辉石( $\text{MgSiO}_3$ )时,耐火温度将急剧下降,但不会低于 $1543^\circ\text{C}$ ,它是镁质陶瓷中的重要晶相。含镁橄榄石和顽火辉石的尾矿,在地质热液或人工蒸压作用下,都很容易与水结合,生成蛇纹石、水镁石、滑石、透闪石、绿泥石等含水的镁硅酸盐矿物,据此可用于生产蒸压硅酸镁材料。相反,这些含水镁硅酸盐

矿物加热时,又会失水,形成无水矿物,因此,即便是蚀变严重的尾矿,也可用来生产高温制品。

钙铝硅酸盐型尾矿的高温物理化学性质,可以简化为  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  系统相图 (图 1-5-3)。

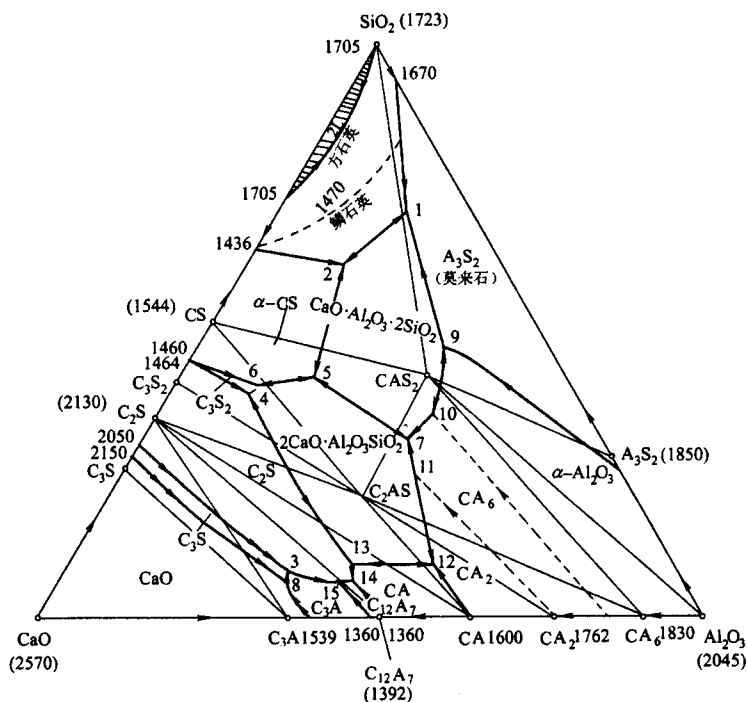


图 1-5-3  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  系统相图

该系统可生成 10 个二元化合物和 2 个三元化合物。其中,在高钙区,二元、三元化合物  $C_3S$ 、 $C_2S$ 、 $C_3A$  多具有水化-硬化性质,可作为水泥原料。钙铝区的  $CA$ 、 $C_{12}A_7$  为高铝水泥的主要矿物成分。硅铝区的莫来石是耐火材料。三元化合物钙长石( $CAS_2$ )、铝方柱石( $C_7AS$ )等具有化学性质稳定、强度高的特点,可用于生产陶瓷材料和微晶玻璃。

长英岩型尾矿富含  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  及  $\text{CaO}$ ，其中，以钾长石-石英组合的尾矿的物理化学性质，可用  $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  系统相图表示（图 1-5-4）。

该系统中的低铝区即  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{K}_2\text{O} < 1:1$  时,有好几个温度不超过  $1000^\circ\text{C}$  的三元低共熔点,易形成玻璃结构。自  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{K}_2\text{O} = 1:1$  的分解线向右的高硅铝区,液相面陡升,说明温度在一个较大范围内波动时,液相的生成量都很小,这对于防止烧结制品的变形极为有利。该区析出相为莫来石( $\text{Al}_3\text{S}_5$ )。该矿物是一个耐高温、热膨胀系数小、化学性质稳



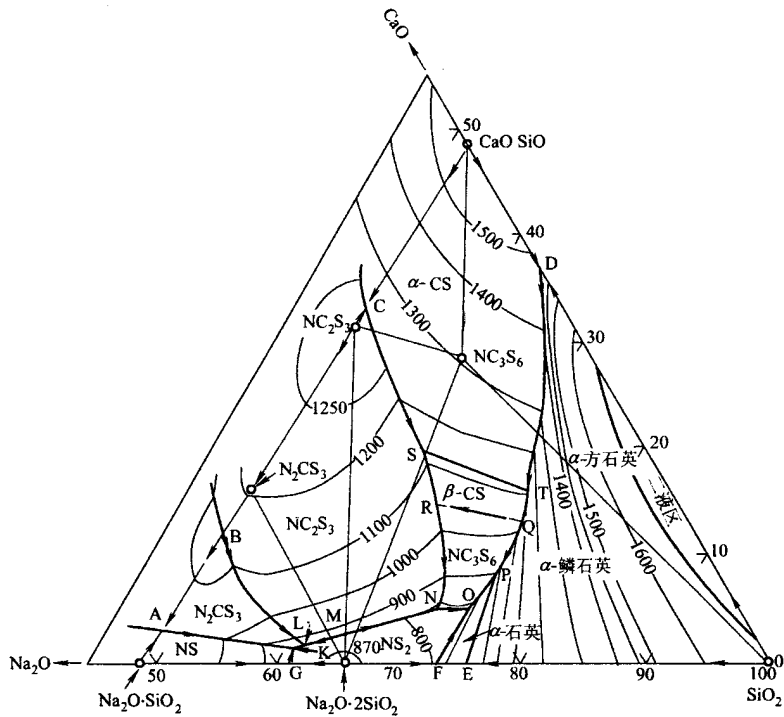


图 1-5-5  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$  系统相图

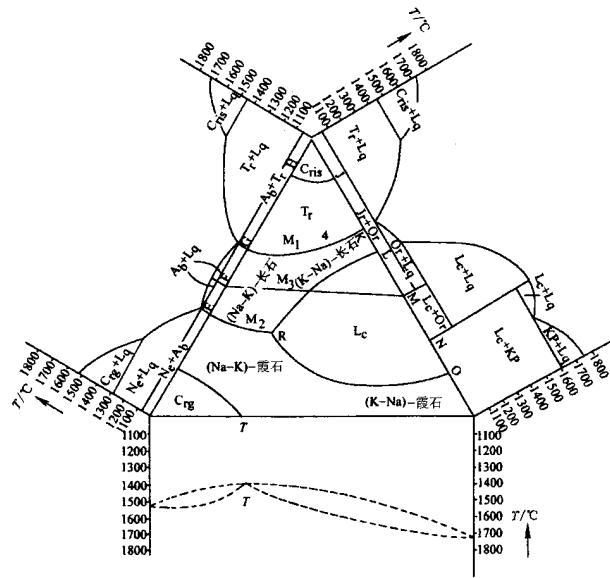


图 1-5-6 霞石 - 钾霞石 -  $\text{SiO}_2$  相图

$L_q$ —溶液 ;  $T_r$ —磷石英 ;  $C_{rg}$ —三斜霞石 ;  $C_{ris}$ —方英石 ;  $L_c$ —白榴石 ;  
 $K_p$ —钾霞石 ;  $N_e$ —霞石 ;  $A_b$ —钠长石

高铝硅酸盐型尾矿的高温性质可用  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  相图来表示,如图 1-5-7 所示。

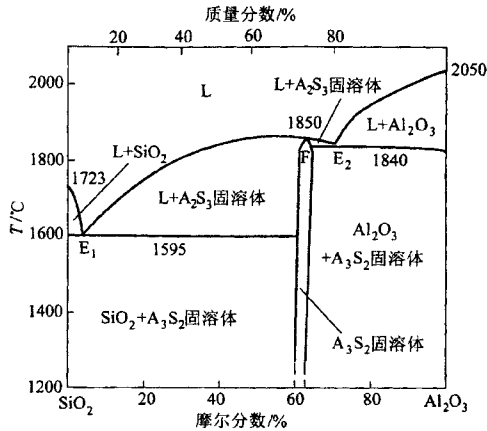


图 1-5-7  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  系统相图

该系统在一个相当宽的范围内烧制时,都有莫来石( $\text{A}_3\text{S}_2$ )生成,最低共熔温度为  $1590^\circ\text{C}$ 。也就是说,该系统是一个耐高温系统。因此,可用于烧制耐火材料。当尾矿中含有部分碱金属(通常为  $\text{K}_2\text{O}$ )时,其成分构成  $\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  系统,如图 1-5-4 所示。由于尾矿中  $\text{K}_2\text{O}$  含量一般很少高于 15%,即  $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{K}_2\text{O}$  的分子比不可能小于 1:1,因此,其成分点也多落于莫来石的初晶区,故可作为陶瓷、砖瓦等尾矿烧制建材的原料使用。当这类尾矿在较低温度下( $700 \sim 800^\circ\text{C}$ )煅烧时,硅酸铝矿物处于分解而又尚无合成莫来石的阶段, $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  彼此分离,呈现出很高的化学反应活性,当与石灰混合后,能发生很强烈的水化合成反应,形成水化硅酸钙。因此,可用作生产硅酸盐建筑制品和混凝土混合材。

高钙硅酸盐型尾矿,若成分点落于图 1-5-8 的  $\text{C}_3\text{S}_2$  右边,即当  $\text{CaO}$  含量大于 60% 时,高温生成物为  $\text{C}_2\text{S}$  和  $\text{C}_3\text{S}$ ,可用作水泥原料。当落于  $\text{C}_3\text{S}_2$  左边时,高温生成矿物为  $\text{CS}$ 、 $\text{C}_3\text{S}_2$  和石英,这些矿物烧成收缩小,热膨胀系数低,是低温快烧陶瓷的优质原料。

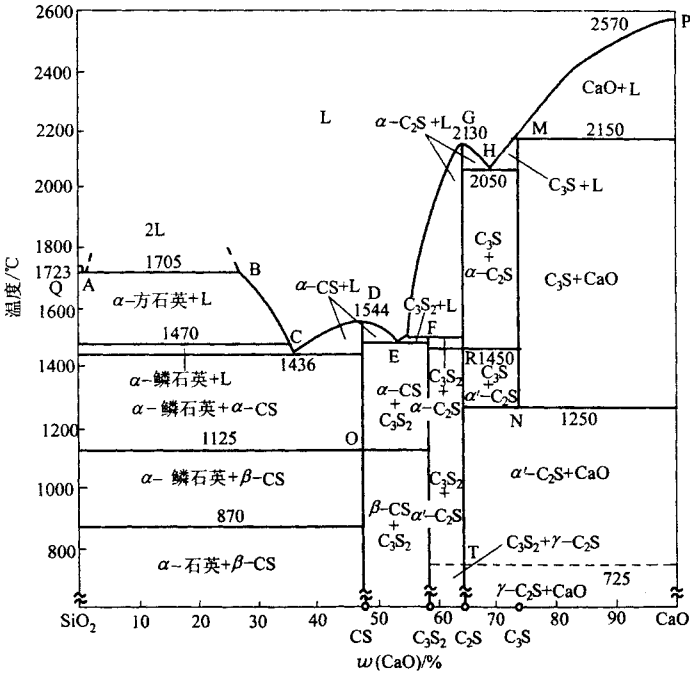


图 1-5-8 CaO-SiO<sub>2</sub> 系统相图

第五节 尾矿的工艺性质

尾矿的工艺性质主要是指其可加工性。尾矿虽然在选矿阶段已经经历了破碎和粉磨过程,但在用于生产某些建筑材料时,其细度可能仍不满足要求,需要进一步磨细。这样一来,就提出了可磨性要求。有时,为了调整颗粒级配,需要对尾矿进行筛分,因此,也存在一个易筛性问题。

尾矿的可磨性可参考榜德磨耗功率学说,根据尾矿的组成矿物或岩石类型作出推断。设将理论上无限大的某一物料粒度磨到 80% 可通过 0.1mm 筛孔的产品时所做的功 (kW·h/t),那么,一些常见矿石的磨耗功指数  $W_i$  见表 1-5-4。

表 1-5-4 一些常见尾矿类型的磨矿平均功指数

岩 矿	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	功指数/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$	岩 矿	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	功指数/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$
辉长岩	2.83	20.5	钛矿石	4.01	13.6

岩 矿	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	功指数/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$	岩 矿	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^3$	功指数/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1}$
辉绿岩	2.87	21.4	钼矿石	2.70	13.6
闪长岩	2.82	23.2	锰矿石	3.53	13.5
安山岩	2.84	20.3	铅矿石	3.35	13.1
玄武岩	2.91	19.0	锌矿石	3.64	12.8
花岗岩	2.66	16.8	金矿石	2.81	16.5
正长岩	2.73	14.5	铜矿石	3.02	14.1
片麻岩	2.71	22.4	锡矿石	3.95	12.0
砾 岩	2.66	17.9	铅锌矿石	3.36	11.9
砂 岩	2.65	28.9	磁铁矿	3.88	11.0
页 岩	2.63	17.5	磁黄铁矿	4.04	10.5
石英岩	2.68	10.6	赤铁矿	3.53	14.3
石灰岩	2.66	14.0	镜铁矿	3.28	15.2
铁燧岩	3.54	16.1	菱镁矿	3.06	12.3
石 英	2.65	15.0	萤 石	3.01	9.8
长 石	2.59	11.9	石 膏	2.69	7.8
白云石	2.74	12.5	重晶石	4.50	5.3
粘 土	2.51	7.0	铁矿渣	2.74	11.3
石英砂	2.67	15.5	水泥熟料	2.15	14.8
铝土矿	2.20	9.8	玻 璃	2.58	13.3

根据矿石的磨耗功指数 ,利用榜德公式 ( 1 - 5 - 2 ) ,可计算继续磨细所要消耗的功 :

$$W = 10 W_i ( 1/P^{1/2} - 1/F^{1/2} ) \qquad ( 1 - 5 - 2 )$$

式中  $W$ ——将 1 短吨( 907.18kg )的物料从粒度  $F$  磨到粒度  $P$  时所消耗的功  $\text{kW}\cdot\text{h}$ /短吨 ;

$W_i$ ——功指数 ;

$F$ ——给矿粒度( 80% 的给矿通过的筛孔宽 )  $\mu\text{m}$  ;

$P$ ——产品粒度( 80% 的产品通过的筛孔宽 )  $\mu\text{m}$ 。

当然 ,对于具体的磨细设备和磨细工艺流程 ,计算所得的功 ,还需要通过一系列调整系数进行校正 ,方符合真实情况。

尾矿的易筛性与尾矿的颗粒分布、颗粒形状、湿度等多种因素有关。其相对难易程度 ,若用数字表示 ,上述各因素的影响系数见表 1 - 5 - 5。



表 1－5－5 尾矿的易筛性影响系数

影响因素	评价指标	影响系数相对值									
细颗粒影响	粒度小于筛孔之半的颗粒质量分数/%	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	影响系数 K	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
粗颗粒影响	粒度大于筛孔的颗粒质量分数/%	10	20	25	30	40	50	60	70	80	90
	影响系数 L	0.94	0.97	1.00	1.03	1.09	1.18	1.32	1.55	2.00	2.36
颗粒形状影响	颗粒形状	碎石状					圆球状				
	影响系数 N	1.0					1.25				
湿度影响	物料含水情况	干燥状态			湿润状态			粘附状态		粗粒	
	影响系数 O	1			0.25～0.75			0.2～0.6		0.9～1	

根据尾矿的易筛性系数 ,在结合筛分机械与筛分方式 ,可以用累乘的办法 ,计算筛分效率与筛分能力。

## 第六章 尾矿的工程性质

尾矿是普遍用于后期尾矿坝构筑的工程材料。由于尾矿的特定加工过程和排放方法,又经受水力分级和沉淀作用,形成了各向异性的尾矿沉积层,其压缩变形和强度特性、渗流状态、振动响应特性不仅因尾矿类型、沉积方式、时间和空间而变化,就总体性质而言,既有似于又有别于天然土壤,既符合又不完全适用传统土力学理论。此外,尾矿坝大多是在分期升高中构筑,在构筑中使用,其结构和功能也完全不同于普通的蓄水坝,尾矿坝的工作状态不仅取决于坝体本身的工程特性,更重要地取决于坝后沉积的尾矿工程特性。这是一个特殊的岩土工程问题,因此,必须对尾矿工程性质进行专门研究。

### 第一节 沉积特性

尾矿的工程性质,一方面是由尾矿的物理性质和状态决定的,另一方面是由尾矿的沉积特性决定的。从工程意义上讲,认识尾矿工程行为的基本点是了解尾矿所经受的沉积过程和特性。

通常,尾矿是以周边排放方式经水力沉积的。这样,靠近尾矿坝则以水力分级机理形成尾矿砂沉积滩,沉淀池中则以沉淀机理形成细粒尾矿泥带,其分异程度取决于全尾矿的级配、排放尾矿浆浓度和排放方法等因素。因此,在尾矿沉积层内,尾矿砂和尾矿泥或以性质不同的两个带交汇,或者高度互层化。尾矿砂和尾矿泥工程性质的差异在于,前者与松散至中密的天然砂土相似,而后者则极为复杂,在某些情况下显示出天然砂土

性质,在另一些情况下显示出天然粘土性质,或者两个联合性质。

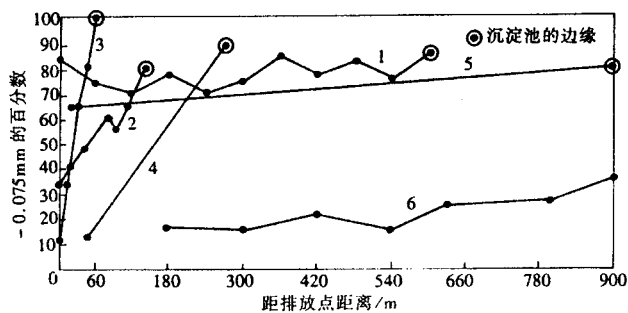
大多数尾矿类型,沉积滩坡度向沉淀池倾斜,且在头几十米,平均坡度  $0.5\% \sim 2.0\%$ ,较陡坡度的范围是由全尾矿排放的较高浓度和(或)较粗粒级所决定的;在沉积滩的较远地方,平均坡度可缓达  $0.1\%$ ;再远地方,沉积过程则与连续变迁的网状水流通道的沉积相似。

这样的沉积过程产生高度不均匀的沉积滩,在垂直方向上,尾矿砂的沉积是分层的,在厚度几厘米范围内,细粒含量变化一般可高达  $10\% \sim 20\%$ ,如果排放点或排放管间隔大,在短的垂距上,细粒含量可发生  $50\%$  以上的变化。此外,在尾矿砂沉积滩内,尾矿泥薄层所造成的这样急剧分层也可能由于沉淀池水周期性浸入沉积滩、而细粒薄层由悬浮液中沉淀下来所致。

水平方向上的变化往往也很大,尾矿浆在沉积滩上运移过程中,较粗颗粒首先从尾矿浆中沉淀下来,只有当尾矿达到沉淀池的静水中时,较细的悬浮颗粒和胶质颗粒才沉淀下来,形成尾矿泥带。Kealy 等在实验室模型中研究了沿沉积滩发生的粒度分级。在尾矿从尾矿浆中沉淀时,颗粒通过跳动和滚动沿沉积滩表面传输,水力分级使得沉积滩上较细颗粒总的趋势是向更远处传送和沉积。

然而,在尾矿沉积滩上实测的粒度横向变化性表明,其变化形式要比实验室模拟结果复杂得多。图 1-6-1 示出几个尾矿沉积滩的细颗粒含量随距离的变化。粒度分级程度从很高变化到几乎无分级,显然取决于全尾矿排放的级配特性,粒度变化范围宽的尾矿浆很可能比级配不良尾矿浆更明显地显现出沉积滩的粒度分级。可是,因为大多数选厂磨矿过程所产生的粒度范围颇为相近,单单依据级配不足以说明所观察的差异。实际上,排放的尾矿浆体浓度控制沉积滩颗粒的分级,较低的浆体浓度往往有助于较大颗粒分离。一般认为,浆体浓度之差如达  $10\% \sim 20\%$ ,则可能引起横向粒度分布的较大变化。

尾矿泥沉积过程按照完全不同于尾矿沉积滩的沉积方式,尾矿泥从池中悬浮液中沉淀下来不包含颗粒跳动或滚动的分级,而是比较简单的垂直沉降过程。尾矿泥的沉降速率可能对澄清水所必须的沉淀池尺寸及可用作选矿循环水量有重大影响。在实验室,通过向玻璃圆筒内灌注一定浓度的均匀尾矿浆测定沉降速率,随时记录水与沉淀固体之间的界面变化。图 1-6-2 示出典型的沉降速度测定结果,由曲线的线性部分求出沉降速率。完全沉积之后,可以按圆筒估计沉积尾矿泥的孔隙比,给出野外条件下尾矿泥将采用的初始孔隙比。表 1-6-1 示出各种尾矿泥的典型沉降速率,就各种尾矿泥的塑性和比重变化而言非常相近。



曲线	尾矿类型	比重 $G$	排放尾矿 -0.075mm 的 %	排放尾矿 浆体浓度
1	金			
2	铜	2.7	45	45
3	铅—锌尾矿泥	3.4	75	<40
4		2.7	38	30
5		2.7	60	50
6	铜	3.0		

图 1-6-1 沿尾矿沉积滩的粒度分级

表 1-6-1 尾矿泥沉降速率

尾矿泥类型	比重 $G$	塑性指数/%	沉降速率/ $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$
铜	2.7	10	9.45
	2.7	9	4.27
磷酸盐粘土	2.8	125	5.18
铜—锌	2.9	0	11.58
	4.0	0	16.46

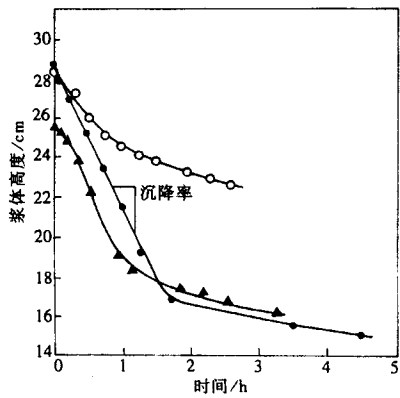


图 1-6-2 铜尾矿泥试样的典型沉降速率测定结果

在缺乏实验室沉降试验数据时,确定沉淀池尺寸的经验准则是允许 5 天的澄清时间,每天排放尾矿每 1000t 约占 40000 ~ 100000m<sup>2</sup> 池表面积。

第二节 密 度

一、原地密度

尾矿原地密度的估计在尾矿库规划的早期阶段是特别重要的,因为,特定选厂尾矿生产率所需要的库容积通常要根据尾矿的沉积密度来确定。

原地密度可以用干密度( $\gamma_d$ )或孔隙比( $e$ )表示。表 1-6-2 示出几种尾矿的实测的典型值,其中,在特定尾矿的孔隙比或干密度的范围内,较低的孔隙比或较高的干密度通常与沉积层内较大深度相关,相反地,最高孔隙比或最低干密度通常与沉积后浅表材料有关。

表 1-6-2 典型的原地密度

尾矿类型	比 重 $G$	孔隙比 $e$	干密度 $\gamma_d/g\cdot cm^{-3}$
油砂			
尾矿砂		0.9	1.39
尾矿泥		6 ~ 10	
铅—锌			
尾矿泥	2.9 ~ 3.0	0.6 ~ 1.0	1.49 ~ 1.81
	2.6 ~ 2.9	0.8 ~ 1.1	1.28 ~ 1.65
金—银			
尾矿泥		1.1 ~ 1.2	
钼			
尾矿砂	2.7 ~ 2.8	0.7 ~ 0.9	1.47 ~ 1.59
铜			
尾矿砂	2.6 ~ 2.8	0.6 ~ 0.8	1.49 ~ 1.76
尾矿泥	2.6 ~ 2.8	0.9 ~ 1.4	0.99 ~ 1.44
铁燧石			
尾矿砂	3.0	0.7	1.76
尾矿泥	3.1	1.1	1.47

尾矿类型	比 重 $G$	孔隙比 $e$	干密度 $\gamma_d/g \cdot cm^{-3}$
磷酸盐	3.1 ~ 3.3	0.9 ~ 1.2	1.55 ~ 1.68
尾矿泥	2.5 ~ 2.8	11	0.22
石膏	2.4	0.7 ~ 1.5	0.96 ~ 1.44
铝矾土			
尾矿泥	2.8 ~ 3.3	8	0.32
天然碱			
尾矿砂	2.4 ~ 2.5	0.7	1.47
尾矿泥	2.4 ~ 2.5	1.2	1.09

用孔隙比可以比较好地表示一般趋势 ,其可以排除比重变化性的隐蔽影响。粒度和粘土含量控制原地孔隙比。大多数坚硬岩石尾矿 ,甚至软弱岩石尾矿 ,其尾矿砂的原地孔隙比一般变化范围为 0.6 ~ 0.9。低至中等塑性的尾矿泥显示出比较高的原地孔隙比 ,变化范围为 0.7 ~ 1.3。但高塑性粘土或异常组成 ,特别是磷酸盐粘土、铝矾土和油砂的尾矿泥则例外 ,这类尾矿泥的原地孔隙比很高 ,变化范围一般为 5 ~ 10。这些材料占据很大的库容 ,往往产生重大的处置问题。

任何单一种尾矿沉积物 ,原地密度都显示出颇大的离散 ,但因水力沉积尾矿的可压缩性 ,一般表现出随深度而增大。图 1 - 6 - 3 示出几种尾矿平均干密度随深度的变化。尾矿泥密度一般每加深 30m 平均增大约 0.16g/cm<sup>3</sup> ,而可压缩性差的尾矿砂 ,增加速率略小 ,平均约 0.08 ~ 0.16g/cm<sup>3</sup> ,石膏密度以高速率增加 ,其原因除了土结构压缩外 ,还由于颗粒的长期蠕变而引起的。

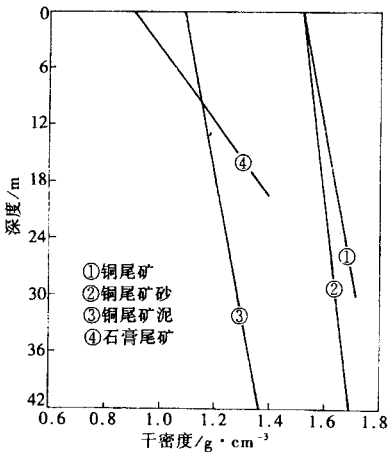


图 1 - 6 - 3 平均原地密度随深度的增加

二、相对密度

水力沉积尾矿砂的相对密度( $D_{\gamma}$ )对动力强度特性有重大影响。相对密度是原地密度的量度,与实验室试验时尾矿可能达到的最致密和最松散状态有关,所以,必须针对所研究的尾矿砂进行最小和最大密度的专门测定。

表 1-6-3 列出几个水力排放尾矿砂的原地相对密度的变化范围,包括管路排放尾矿和旋流尾矿,全部都未经机械压密。虽然沉积层内各点相对密度变化很大,但可以看出,大多数沉积滩尾矿砂能达到相对密度 30%~50% 范围,只是需要比较干净的尾矿砂,或者通过旋流从中分离出尾矿泥的尾矿砂,或者在尾矿浆正常排放过程中经过高度的粒度分级的尾矿砂。

表 1-6-3 尾矿砂的平均原地相对密度

尾矿类型	$D_{\gamma}/\%$	尾矿类型	$D_{\gamma}/\%$
焦油尾矿砂	30~50	钼尾矿砂	31~55
旋流的铜尾矿砂	33~54	旋流的铜尾矿砂	45~68
旋流的铜尾矿砂	10~55	旋流的铅—锌尾矿砂	30
铅—锌尾矿砂	17~43	铜尾矿砂	37~60

第三节 渗透性

尾矿的渗透性是比其它任何工程性都难以概括的一个基本特性。平均渗透系数可以跨越 5 个以上数量级,从干净、粗粒尾矿砂的  $10^{-2}$  cm/s 到充分固结尾矿泥的  $10^{-7}$  cm/s。渗透性的变化是粒度、可塑性、沉积方式和沉积层内深度的函数。表 1-6-4 示出尾矿的典型渗透系数范围。

表 1-6-4 尾矿的渗透系数范围

尾矿类型	平均渗透系数/cm·s <sup>-1</sup>
干净、粗粒或旋流尾矿砂 细粒含量小于 15%	$10^{-2} \sim 10^{-3}$
周边排放的沉积滩尾矿砂 细粒含量达 30%	$10^{-3} \sim 5 \times 10^{-4}$
无塑性或低塑性尾矿泥	$10^{-5} \sim 5 \times 10^{-7}$
高塑性尾矿泥	$10^{-4} \sim 10^{-8}$

尾矿平均渗透系数随着  $-0.075\text{mm}$  的细粒含量增加而降低,但是,细粒百分含量并不是渗透系数的最有效指示,Mittal 和 Morgenstern 证明,尾矿的平均渗透系数最好以众所周知的 Hazen 公式预测:

$$K = d_{10}^2 \quad (1-6-1)$$

式中  $K$  为平均渗透系数; $d_{10}$  为重量 10% 颗粒通过的粒度尺寸,mm。Mabes 等证明,Hazen 公式可以推广应用到无塑性尾矿泥。然而,根据颗粒尺寸估计的平均渗透系数不能考虑总体上决定尾矿沉积层渗透性的各个重要因素。这一点,下面将作简要讨论。

### 一、各向异性的影响

由于尾矿沉积的层状性质,使得沉积层水平方向和垂直方向渗透性显示出显著差异,对于比较均匀的尾矿砂层和水下沉积的尾矿泥带,水平渗透系数与垂直渗透系数之比  $k_h/k_v$  一般变化在  $2 \sim 10$  范围。对于比较干净尾矿砂与尾矿泥之间的过渡带,由于较细颗粒和较粗颗粒的互层,可能有较高的各向异性比。在排放方法不能得以充分控制的场合,尾矿沉积形成广泛的尾矿砂与尾矿泥的互层,其  $k_h/k_v$  可能高达 100 以上。

### 二、距排放点距离的影响

尾矿渗透性随距排放点距离的变化程度是一个重大争议问题。根据实验室模拟研究,可以形成一个概念模型,即靠近排放点的高渗透性尾矿砂带、中间渗透性带和低渗透性的尾矿泥带,每个带的相对宽度取决于排放尾矿浆中砂质粒级和泥质粒级含量的相对比例,以及沉淀池水相对于排放点的位置。图 1-6-4 的数据表明,某些尾矿沉积层的渗透性变化确实与上述概念模型相符,水平方向和垂直方向渗透性都随距排放点距离增大而呈规则的降低。

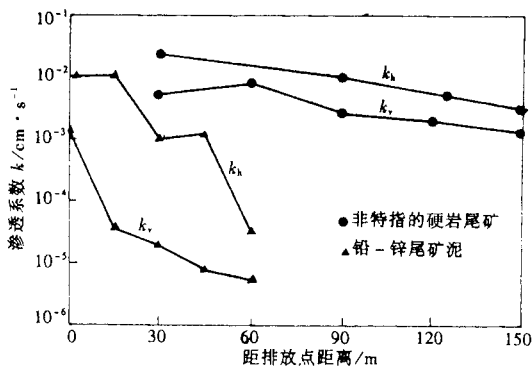


图 1-6-4 充分分级的尾矿沉积滩渗透系数及其各向异性随距排放点距离的变化



但据 Volpe 报告 ,某些铜尾矿沉积滩平均渗透系数随距离的总体变化并不很显著 ,以浓度 45% ~ 50% 排放的尾矿 ,其变化仅约 10 倍。Soderberg 等介绍的数据表明 ,某些沉积层的渗透系数变化不尽规则 ,几乎显示出随距离的随机变化。

在尾矿沉积过程中 ,粒度分级程度和排放方法在一定意义上控制渗透系数随距离的系统变化程度 ,变化较大的沉积层很可能是尾矿排放颗粒尺寸范围相当宽的地方 ;以低浓度排放的地方 ;为使沉积滩上尾矿泥层沉积最小而非常靠近的间隔排放点和排放管的地方。为了比较准确地估计渗透系数随距离的变化 ,任何特定的尾矿类型都需要进行专门的沉积层取样试验。

三、孔隙比的影响

孔隙比(或干密度)对尾矿渗透性的影响已在实验室进行了广泛研究 ,图 1-6-5 示出各种尾矿孔隙比与平均渗透系数之间的关系。虽然大多数尾矿砂和低塑性尾矿泥渗透系数相差很大 ,但随孔隙比降低的变化趋势基本上是一致的。就大多数尾矿沉积层逐深度所达到的孔隙比变化范围而言 ,尾矿砂渗透系数可降低约 5 倍 ,而尾矿泥渗透系数大体可降低 10 倍 ,因为尾矿泥具有较高的可压缩性。由于尾矿泥层显示出渗透系数较大降低的原因 ,在尾矿砂和尾矿泥互层的沉积层中 ,其总体上控制垂直渗透性 ,各向异性比  $k_h/k_v$  往往随深度而增大。

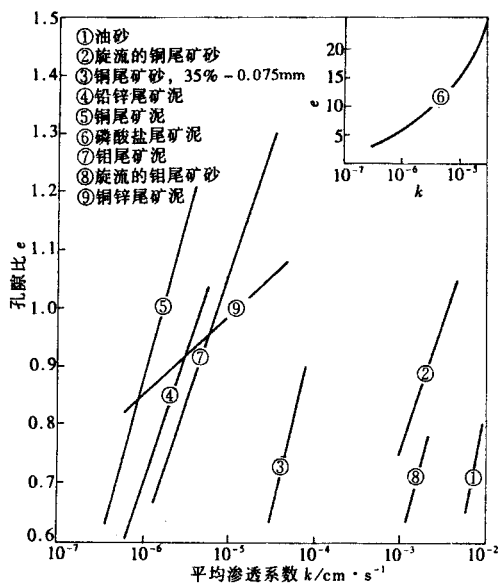


图 1-6-5 平均渗透系数随孔隙比的变化

磷酸盐尾矿泥和油砂矿泥则例外,尽管其具有高塑性和高粘土含量,但这些材料在沉积后具有极高的孔隙比,渗透系数变化可高达  $10^{-4} \text{ cm/s}$ ,在高度固结所产生的孔隙比下,渗透系数可能接近  $10^{-8} \text{ cm/s}$  或更低。

## 第四节 变形特性

### 一、压缩性

尾矿是三相体,在荷载作用下的压缩包括尾矿颗粒的压缩、孔隙中水的压缩和孔隙的减小。在常见的工程压力  $100 \sim 600 \text{ kPa}$  范围内,尾矿颗粒和水本身的压缩是可以忽略不计的,因此,尾矿沉积层的压缩变形主要是由于水和空气从孔隙中排出引起的。可以说,尾矿的压缩与孔隙中水的排出是同时发生的。粒度越粗,孔隙越大,透水性就越大,因而尾矿中水的排出和尾矿沉积层的压缩越快,颗粒很细的尾矿则需要很长的时间。这个过程叫做渗透固结过程。

由于尾矿的松散沉积状态,高棱角性和级配特性,它们的压缩性都比类似的天然土大。在传统土力学中,一维压缩(固结)试验极广泛地用来评价土的压缩性。但是,尾矿试验解释则比较复杂,因为加荷曲线的“原始压缩”段和“再压缩”段之间不总是象天然粘土一样完全明显分开。按照经典土力学理论,有些尾矿泥可能显示出前期固结作用,有似于粘土所表现出来的前期固结。然而,大多数尾矿砂,即使在前期固结之后,孔隙比与压力关系曲线( $e-\log P$  曲线)显示出较大曲率。所以,压缩系数的分析必须说明所施加的压力范围。表 1-6-5 列出一维压缩试验确定的压缩指数的典型值,以及测定这些值的应力范围和相应的初始孔隙比。

应力历时变化对尾矿泥压缩性的影响与天然粘土相似。超固结使  $e-\log P$  压缩曲线的初始再压缩段比较平缓。水上尾矿泥沉积层,由于干燥作用或毛细吸取,可能产生超固结,但是,大多数尾矿泥沉积层前期固结作用在量值上和垂直深度上都有限。在典型的深度范围内,处于正常固结状态的压缩是最有意义的。

正如表 1-6-5 中数据所说明的,尾矿砂与尾矿泥之间的差异是影响压缩指数的最基本因素,尾矿砂的  $C_c$  一般变化在 0.05 到 0.10 范围,而大多数低塑性的尾矿泥的  $C_c$  值一般变化在 0.20 到 0.30 范围,后者高于前者 3 到 4 倍。另一重要因素是尾矿砂和尾

矿泥在沉积层中的密度或孔隙比 ,初始状态越疏松或越软弱 ,在荷载作用下压缩越大。

表 1－6－5 尾矿压缩指数  $C_c$  的典型值

尾矿类型	初始孔隙比 $e_0$	压缩指数 $C_c$	应力范围/kPa
铁燧石细粒尾矿	1.37	0.19	24 ~ 958
铜尾矿泥	1.3 ~ 1.5	0.20 ~ 0.27	1 ~ 958
铜尾矿砂(旋流)		0.28	
	1.10	0.05	10 ~ 96
	( $D_{\gamma} = 0$ )	0.11	96 ~ 958
油砂尾矿砂		0.09	
	1.00	0.06	10 ~ 958
	( $D_{\gamma} = 0$ )		
钼沉积滩尾矿砂	0.72 ~ 0.84	0.05 ~ 0.13	24 ~ 958
金尾矿泥	1.7	0.35	144 ~ 4788
铅—锌尾矿泥	0.7 ~ 1.2	0.10 ~ 0.25	48 ~ 575
细煤粉碴	0.6 ~ 1.0	0.06 ~ 0.27	
磷酸盐尾矿泥	> 20	3.0	5 ~ 77
铝矾土尾矿泥	1.6 ~ 1.8	0.26 ~ 0.35 <sup>①</sup>	48 ~ 958
石膏尾矿	1.3	0.07 <sup>①</sup>	24 ~ 239
		0.28	239 ~ 958

注 ①压缩性决定于荷载持续时间。

表 1－6－5 中 ,有几种材料具有极好的压缩性。磷酸盐粘土尾矿泥 ,因为高的初始孔隙比和高活性粘土矿物的存在而具异常的可压缩性。此外 ,铝矾土尾矿泥和石膏尾矿也都显示出异常的时间相关变形特性 ,可能是由于颗粒间的粘结和(或)各颗粒的蠕动所致。这些材料的压缩性是荷载持续时间的函数 ,难以用传统方法评价。

二、固结

尾矿沉积层在荷载作用下孔隙中自由水逐渐排出 ,孔隙体积逐渐减小 ,孔隙压力逐渐转移到尾矿骨架承担 ,这一过程称之尾矿固结作用。固结使尾矿沉积层产生压缩变形 ,同时也使尾矿的强度逐渐增长 ,因此 ,固结既引起坝体(和基础)沉降 ,又控制坝体(和基础)稳定性 ,是尾矿库工程中最重要工程性质之一。

按照太沙基理论 ,材料固结的时率可分作主固结和次固结阶段。主固结控制常荷载下孔隙压力消散的速度 ,其对某些类型稳定性问题和渗漏问题有重要意义。

尾矿砂主固结发生很迅速 ,甚至难以在实验室测定。获得的少量数据表明 ,沉积滩

尾矿砂固结系数  $C_v$  变化从  $5 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$  到  $10^2 \text{ cm}^2/\text{s}$  ,尾矿泥的固结系数  $C_v$  一般在  $10^{-2} \sim 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$  范围 ,处于与天然土相同的量级。表 1-6-6 列出一些尾矿砂和尾矿泥  $C$  的典型值。

表 1-6-6 固结系数  $C_v$  的典型值

尾矿类型	$C_v/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	尾矿类型	$C_v/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
铜尾矿砂(沉积滩)	$3.7 \times 10^{-1}$	铅—锌尾矿泥	$10^{-4} \sim 10^{-2}$
铜尾矿泥	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	细煤粉碴	$3 \times 10^{-3} \sim 10^{-2}$
钼尾矿砂(沉积滩)	$10^2$	铝土矿尾矿泥	$10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2}$
金尾矿泥	$6.3 \times 10^{-2}$	磷酸盐尾矿泥	$2 \times 10^{-4}$

然而 ,尾矿泥的固结系数  $C_v$  随孔隙比  $e$  的变化趋势很不一致 ,这一点与天然粘土完全不同 ,如图 1-6-6 所示。铜尾矿泥  $C_v$  随孔隙比降低而增大 ,在相应于前期固结压力范围内应力的孔隙比下 ,天然粘土一般显示出相反的形态。金尾矿  $C_v$  随孔隙比降低略降低。磷酸盐粘土尾矿泥的  $C_v$ — $e$  关系曲线形态更为特殊 ,其在孔隙比很宽的变化范围内  $C_v$  显示为常数。铜—锌和钼尾矿泥显示出更为异常的变化趋势。

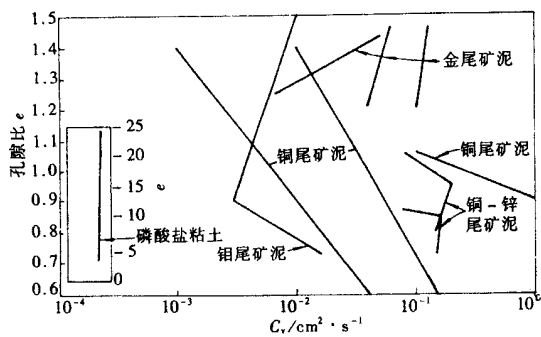


图 1-6-6 各种尾矿泥固结系数  $C_v$  随孔隙比  $e$  的变化

固结特性是渗透性和压缩性的函数 ,因此 ,固结系数可依据渗透性和一维压缩的应力—应变特性表达如下：

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \tag{1-6-2}$$

式中  $k$ ——渗透系数；

$\gamma_w$ ——水的密度：

$m_v$ ——体积变化系数 , $m_v = \frac{\partial e}{\partial \sigma}$  ,其中  $e$  为应变变量 , $\sigma$  为应力值。

这样,  $C_v$  随孔隙比的变化则与渗透性的相应变化、应变对应力的变化率建立起关联。天然土壤的固结系数主要受渗透性变化的控制, 而尾矿泥则比较复杂, 渗透性可能在一定孔隙度范围内起决定性作用, 在另一些场合, 应力—应变特性则起决定性作用。这种复杂性使得有关孔隙比对  $C_v$  的影响不能通则化, 因而每种材料的  $C_v$  变化都必须通过实验室实际测定。

大多数类型尾矿, 在常荷载下, 甚至在主固结引起的孔隙压力消散基本完成之后, 次压缩常产生连续变形。尾矿砂和无塑性尾矿泥的次压缩可能是由于荷载作用下连续的颗粒重新排列和颗粒间滑动造成的。而且, 由于颗粒间水的存在, 促使颗粒间接触处连续的裂隙扩展, 这也可能是造成某些高棱角的尾矿颗粒的次压缩的原因。然而, 尾矿的次压缩性是很小的, 从实用观点讲, 与主固结相比, 没有什么实际意义。但石膏尾矿则例外, 它是蠕变作用支配固结性态, 以致于经典的太沙基固结理论不再适用。

## 第五节 抗剪强度特性

为坝体稳定性分析, 普遍采用三轴剪切试验, 在改变排水条件下测定材料的强度特性。最基本试验方法有固结排水 (CD) 和固结不排水 (CU) 试验。开始, 两者都要把试样固结到固结应力  $\bar{\sigma}_c$ , 其相当于剪切之前坝体 (或基础) 中某一点的初始有效应力。固结之后, 或者按排水条件剪切试样, 迫使剪切过程产生的全部孔隙压力充分消散; 或者按不排水条件剪切试样, 阻止剪切过程产生的孔隙压力消散。不同排水条件的试验得到不同的强度包线, 应用于不同的孔隙压力环境。

### 一、排水抗剪强度

固结排水试验只得到有效应力包线和有效摩擦角  $\bar{\phi}$ , 一般适合于不需要考虑剪切作用产生孔隙压力场合的分析。图 1-6-7 示出根据固结排水试验得出的有效应力莫尔包线的一例。在此例中, 假设为描述坝体内某一特定点的应力条件只进行一个试验。首先, 根据覆盖层垂直压力计算所讨论点的总应力, 然后, 应减去初始孔隙压力, 即渗流产生的静孔隙压力或预先加荷产生的超孔隙压力, 以及到用于试验的有效固结应力  $\bar{\sigma}_c$ 。为防止剪切过程中孔隙压力上升, 应以足够缓慢的速率通过增加主应力进行试样剪切, 得到破坏时莫尔包线 (图 1-6-7) 表示出初始有效应力  $\bar{\sigma}_c$  与破坏时破坏面上可调动的最

大排水抗剪强度的关系。

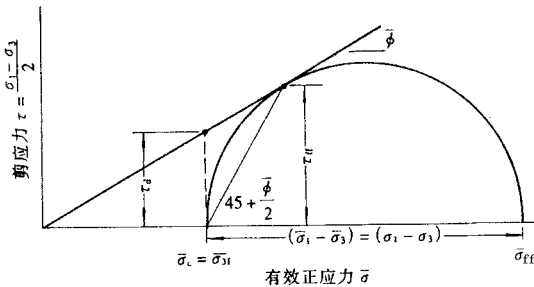


图 1-6-7 固结排水三轴试验得到的有效应力强度包线

理论研究表明,破坏时破坏面上最大剪应力( $\tau_{ff}$ )以初始有效固结应力为原点成  $45^\circ + \bar{\phi}/2$  角发生。但在稳定性分析中,通常根据莫尔包线上相应于  $\bar{\sigma}_c$  点选取设计强度  $\tau_d$ , 因此,设计抗剪强度值一般略低于莫尔包线的判断值。

尾矿常处于松散沉积状态,但因其颗粒具有高度的棱角性,使之仍有较高的排水(有效应力)抗剪强度,在同样密度和应力水平情况下,尾矿的有效摩擦角  $\bar{\phi}$  一般比类似的天然土壤高出  $3^\circ \sim 5^\circ$ 。尾矿基本上无粘结力,因此,在实验室试验中通常显示出有效粘结力  $\bar{c} = 0$ 。从这个意义上讲,尾矿抗剪强度决定于有效正应力和内摩擦角。

初始密度(或孔隙比)对尾矿的有效应力强度的影响很小,在尾矿沉积层常见的密度范围内,尾矿砂有效摩擦角  $\bar{\phi}$  变化很少超过  $3^\circ \sim 5^\circ$ ,尾矿泥如果出现超固结,则可对  $\bar{\phi}$  有较小的影响。

影响尾矿有效摩擦角的最重要因素是测定  $\bar{\phi}$  时的应力范围。即便施加较低的应力水平,在有棱角颗粒的接触点上应力也很高,足以使颗粒压碎,结果往往得到弯曲的强度包线,特别是在低应力水平段尤为明显,例如如图 1-6-8 示出的金—银尾矿砂的排水直剪试验结果,应力变化  $0 \sim 150 \text{ kPa}$ ,包线正切变化  $41^\circ \sim 29^\circ$ 。图 1-6-9 示出较致密尾矿砂在较高应力范围的数据,可以看出,在应力约达  $280 \text{ kPa}$  时,旋流铜尾矿砂和油砂尾矿颗粒压碎和扩张的联合作用都非常明显,在较高应力下,  $\bar{\phi}$  保持相对恒定。

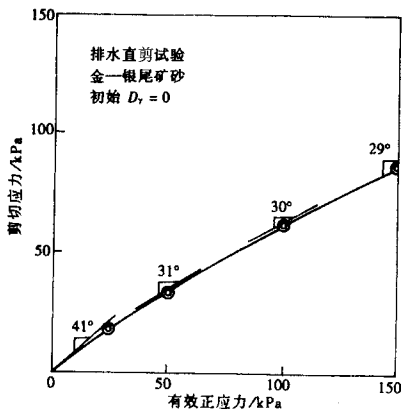


图 1-6-8 低应力水平下强度包线弯曲

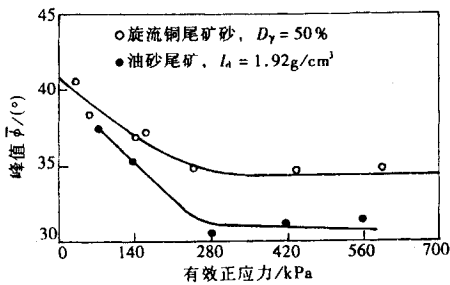


图 1-6-9  $\bar{\phi}$  随应力水平的变化

表 1-6-7 示出各种尾矿基于原状试样和扰动试样的实验室试验测定的有效摩擦角值。大多数尾矿材料的  $\bar{\phi}$  值一般在  $30^\circ \sim 37^\circ$  范围内,这是在很宽的应力范围内平均求得的。还可以看出,尾矿砂和尾矿泥的  $\bar{\phi}$  值差异很小,但细煤粉碴例外,其可能因包含较高塑性的粘土,峰值较低。另外,只有原地粘结的石膏尾矿具有明显的有效粘结力  $\bar{c}$ 。

表 1-6-7 排水剪切试验测定的有效摩擦角  $\bar{\phi}$  值

尾矿类型	$\bar{\phi} / (^\circ)$	有效应力范围/kPa
铜尾矿		
尾矿砂	33 ~ 37	0 ~ 670
尾砂泥	33 ~ 37	0 ~ 670
钼		
沉积滩尾矿砂	32 ~ 38	
铁燧石		
尾矿砂	34.5 ~ 36.5	
尾矿泥	33.5 ~ 35	

尾矿类型	$\bar{\phi} (^\circ)$	有效应力范围/kPa
铅—锌—银		
尾矿砂	33.5 ~ 35	
尾矿泥	26 ~ 30	
金尾矿	28 ~ 40.5	0 ~ 960
细煤粉	22 ~ 39	0 ~ 290
	22 ~ 35	0 ~ 1200
铝矾土尾矿泥	42	0 ~ 190
石膏尾矿	32	0 ~ 480
	$(\bar{C} = 24\text{kPa})$	

二、不排水抗剪强度

不排水抗剪强度隐含地考虑快速施加剪应力所产生的孔隙压力,这对评价众多尾矿沉积层破坏所表现的流态状态是非常重要的。普遍采用固结不排水三轴剪切试验测定不排水抗剪强度,其得到总应力强度参数即总应力摩擦角  $\phi_T$  和总应力粘结力  $C_T$ 。在固结不排水剪切试验中,某些尾矿可能表现出总应力粘结力,它不同于“假象”的有效应力粘结力,它是“真实”现象。但是,它的量测需在试验过程中有足够的反压力,以防孔隙水空化。

图 1-6-10 示出典型的固结不排水试验结果。试验中,试样固结到与前面同样的  $\bar{\sigma}_c$ ,其通过上部覆盖层应力减去初始静孔隙压力或超孔隙压力而确定。因为在固结不排水试验中防止剪切过程中排水,所以当孔隙压力产生时,部分作用荷载由孔隙水传递,得到的不排水抗剪强度和相应的总应力摩擦角  $\phi_T$  均低于固结排水试验结果。

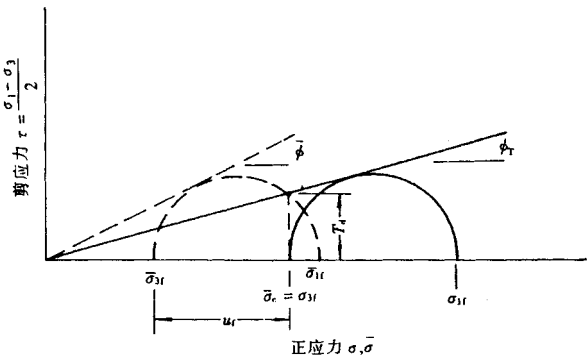


图 1-6-10 固结不排水三轴试验得到的总应力强度包线



如果在固结不排水试验中测定孔隙压力,也可以据此得到有效应力包线。正如图 1-6-10 所示,有效应力莫尔圆是以量值等于试验破坏时产生的孔隙压力  $u_f$  向左移。

不排水莫尔包线提供初始有效应力  $\bar{\sigma}_c$  与破坏时破坏面上调动的不排水抗剪强度之间的关系,它不同于有效应力包线,因为它包含剪切过程中产生的孔隙压力,一般适合于外部荷载变化比材料排水能力快的场合的稳定性分析。

在应用三轴固结不排水试验得到的不排水强度包线时,存在一定理论缺陷:固结不排水试验中各向同性固结过高估计了原地各向异性固结的材料强度;三轴试验的不排水抗剪强度受剪切过程中所作用力系的影响,为近似沿滑动面出现的条件,须改变试验加荷条件,否则可能产生误差。

表 1-6-8 示出各种尾矿未扰动的正常固结试样进行的固结不排水三轴剪切试验测定的  $\phi_T$  和  $C_T$  值。与表 1-6-7 数据对比可以看出,在尾矿沉积层典型的初始孔隙比范围内,与之相应的总应力摩擦角  $\phi_T$  较同样材料的有效应力摩擦角  $\bar{\phi}$  略低  $15^\circ$  左右,即多在  $14^\circ \sim 24^\circ$  范围。总应力粘结力  $C_T$  一般变化在  $30 \sim 70\text{kPa}$  之间,而且尾矿砂与尾矿泥的  $C_T$  值相差不大。在试验的初始孔隙比范围内,似乎孔隙比对  $\phi_T$  有较小的系统影响,对  $C_T$  有较明显的影响,较致密尾矿初始孔隙比在  $0.5 \sim 0.8$  范围时,产生较高的总应力粘结力,而当初始孔隙比超过  $1.0$  的较松散材料(主要是尾矿泥),其总应力粘结力往往很低,甚至没有。

表 1-6-8 典型的总应力抗剪强度参数

尾矿类型	初始孔隙比 $e_0$	总应力摩擦角 $\phi_T/(^\circ)$	总应力粘结力 $C_T/\text{kPa}$
细煤粉碴	0.5 ~ 0.8	16 ~ 24	30 ~ 72
钼尾矿砂	0.8	14	38
铜全尾矿		13 ~ 18	0 ~ 96
铜尾矿砂	0.7	19 ~ 20	34 ~ 44
铜尾矿泥	0.6	14	62
	0.9 ~ 1.3	14 ~ 24	0 ~ 19
	1.1	14	0
铅—锌尾矿泥	0.8 ~ 1.0	21	0
金尾矿泥		28	0
铝矾土尾矿泥		22	5

此外,还需叙及不固结不排水(UU)三轴试验,即按不排水方式剪切试样,但剪切前不固结。理论上,应得到平缓的或  $\phi = 0$  的强度包线。这种试验考虑了剪切作用产生的

孔隙压力,但是,只有当能够获取原位已经受过固结的试样时,当加荷发生得快,使之不能预期消散剪切过程产生的孔隙压力时才适用。实际上,不固结不排水试验取得的不排水抗剪强度实用于软粘土基础上快速的初始坝施工场合,或者在尾矿泥上快速堆置后期坝的某些场合。

确定不排水抗剪强度随有效固结应力或深度变化的试验方法还有不排水直剪试验和现场十字板试验。

某些天然粘土表现出“标准化”的不排水强度特性,这样,最好以直剪试验测定固结不排水抗剪强度,其与三轴试验不同,不因各向异性固结而人为地引起高的不排水抗剪强度,只是快剪不足以产生剪切过程中的真实不排水条件,务须在整个剪切过程中改变正应力,以产生等体积条件。

标准化强度比  $S_u/\bar{\sigma}_c$  与有效固结应力  $\bar{\sigma}_c$  大小无关,只随超固结比( $OCR$ )变化。图 1-6-11 所介绍的数据表明,磷酸盐尾矿泥与天然粘土相当,显示出这样标准化强度特性。图 1-6-12 示出无塑性铜-锌尾矿泥沉积样的试验结果。很明显,  $S_u/\bar{\sigma}_c$  与固结应力相关,两条曲线之间的散度随超固结比( $OCR$ )增大而扩大。一般地说,这种尾矿材料不符合标准化强度特性,然而,对于正常固结的材料( $OCR = 1.0$ ),曲线散度极小,  $S_u/\bar{\sigma}_c = 0.2\alpha$  (图 1-6-12)。有趣的是这个值完全相当于图 1-6-11 中正常固结的磷酸盐尾矿泥的数据。因此说,正常固结的尾矿泥的不排水抗剪强度,对估计其下限值是有用的。

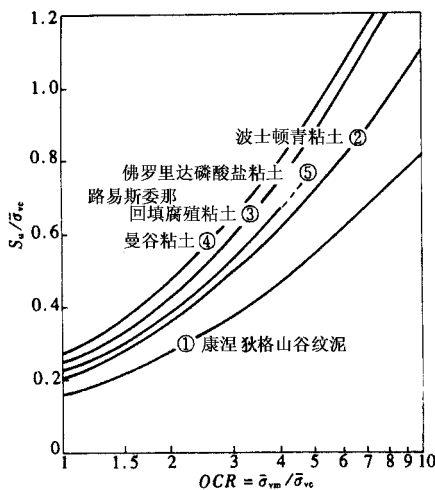


图 1-6-11 不排水直剪试验求得的  $S_u/\bar{\sigma}_c$

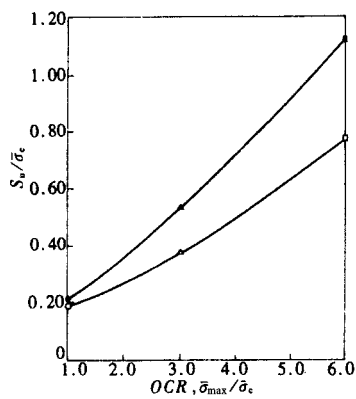


图 1-6-12 无塑性铅—锌尾矿泥沉积试样不排水直剪试验结果

也可以用十字板剪切仪直接在现场测定不排水抗剪强度，为尽力保持试验过程中不排水条件而采用快剪。然而，对于无塑性尾矿泥，即便采用快剪也不能保证在等体积条件下测定不排水抗剪强度。而且，由于尾矿沉积的成层性质，特定尾矿泥沉积层中完全可能存在薄层的尾矿砂层，其促进试验过程中排水，这不只是可能的，而且会实现的。有人主张采用十字板剪切仪进行慢剪试验，实现完全排水，测定尾矿的有效抗剪强度参数，但同样也受到成层性的类似困扰。慢剪是以防止“平均”材料孔隙压力上升，但不能考虑孔隙压力消散很慢的试验段内有很细颗粒或塑性尾矿泥层的存在。十字板剪切过程中，无论旋转速率如何，尾矿中实际排水特性难以确定。因此，尽管十字板剪切试验可以得到有用的指数数据，但在为稳定性分析选用排水或不排水抗剪强度时应谨慎处之。

三、三轴试验的应力—应变特性

在三轴剪切试验中，尾矿的应力—应变特性大体与类似级配的松散至中等密度的天然土相似。在水力沉积的尾矿密度下，很少发生显著的扩张。应力—应变数据通常以破坏时较大应变以及在大应变情况下破坏后强度的很小或没有降低为标志。

图 1-6-13 示出铜尾矿泥的剪应力、有效应力比和孔隙压力对应变的典型曲线，数据是在代表性初始孔隙比 ( $e_0 = 0.9 \sim 1.2$ ) 下以固结不排水三轴试验取得的。图 1-6-13a 示出剪应力—应变曲线，在整个试验过程中基本上按照 5% ~ 10% 应变连续上升，往往显示不出明显的峰值或破坏后的降低。这可能与所采用的应变控制试验方法有关，因为应变控制方式不可能精确地反映不排水条件下发生的峰值后强度的降低。因此，如果峰值后强度降低成为尾矿坝设计的关键性因素，例如在尾矿沉积层内可能发生大应变的场合，应力控制试验方式则可能为评价峰值后强度降低所必须的。

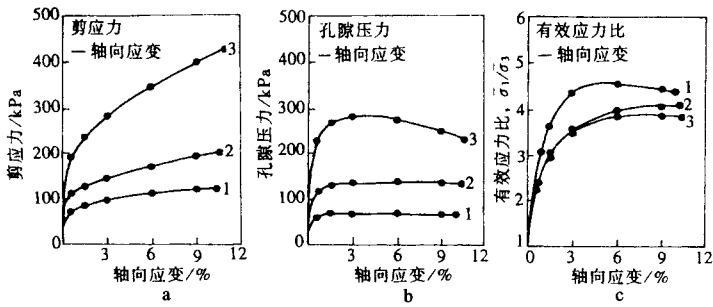


图 1-6-13 铜尾矿泥的典型应力—应变特性

a—剪应力—应变曲线, b—孔隙压力—应变曲线, c—有效应力比—应变曲线

1— $\bar{\sigma}_c = 100$  kPa, 2— $\bar{\sigma}_c = 200$  kPa, 3— $\bar{\sigma}_c = 400$  kPa

较低初始孔隙比的尾矿试样,相当于经受过机械压密,常常发生剪应力的峰值后降低,在较低侧限应力(50~100 kPa 以下)条件下,这种降低最为明显。峰值抗剪强度普遍发生在轴向应变约 2%~4% 处,且在大应变情况下,峰值后抗剪强度可能仅为峰值的 50%。随着侧限应力的增加,这种降低变得不甚明显,在较高侧限应力条件下,相应于峰值剪应力的轴向应变增大到约 5% 以上。

图 1-6-13b 示出铜尾矿泥的孔隙压力—应变响应曲线。在典型的初始孔隙比条件下,孔隙压力变化显示出与剪切强度变化相似,但有达到峰值的趋势,然后在大应变状态下保持常数或略降低。高初始孔隙比的尾矿,相当于初始沉积,直到发生应变 10% 以上,孔隙压力还可能达不到最大值。

图 1-6-13c 示出铜尾矿泥的有效应力比—应变响应曲线。在较低的侧限压力条件下,明显地显示出峰值。峰值有效应力比出现在较高应变区,而随着侧限压力的增加则非清晰可辨。这种状态与较低相对密度的有棱角的天然砂极为相近。

#### 四、循环抗剪强度

影响沉积土层循环抗剪强度的因素主要有相对密度、粒度特性、沉积方法、时效和以前地震史。而尾矿具有明显的棱角性,水力沉积的,且往往时间很新,未必经受过以前的地震振动。因此,在同样相对密度条件下,尾矿与天然土壤的循环抗剪强度之间可能没有什么直接关联。

与天然无粘结力土一样,尾矿的循环抗剪强度受相对密度控制,但尾矿的相对密度比大多数天然土低,因此,在较少的应力反向循环之后,尾矿可能经受大的循环应变。通常,以循环应变达 10% 作为应变相关破坏准则,这时大多数尾矿或多或少地同时发生初

始液化( 孔隙压力等于侧限压力 )。

图 1-6-14 示出水力沉积产生的典型密度条件下尾矿循环剪应力与侧限应力比 ( $\Delta\sigma/2\sigma_c$ ) 对初始液化或循环应变 10% 的循环数变化曲线。图中所介绍的所有材料 ,其造成破坏状态所需要的循环数对所施加的循环剪应力比都非常敏感。相对密度对循环抗剪强度也有较大影响。

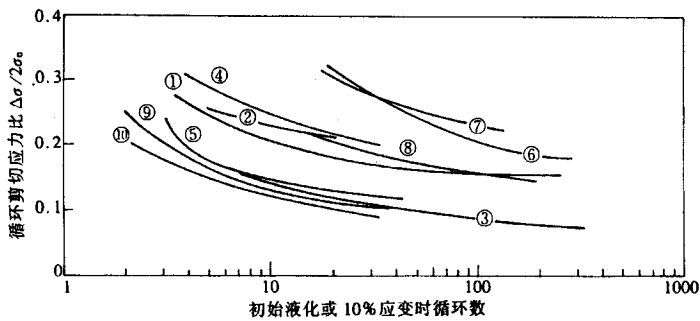


图 1-6-14 循环抗剪强度

- ①—铀尾矿 , $D_r = 40\% \sim 60\%$  ;②—铜尾矿 ,未扰动试样 ;
- ③—铅—锌—银尾矿 , $D_r = 30\%$  ;④—铜尾矿泥 ,未扰动试样 ;
- ⑤—金尾矿 , $e = 0.9$  ;⑥—铜尾矿泥 ,未扰动试样 , $e = 1.7$  ;
- ⑦—铜尾矿泥 ,未扰动试样 ,三轴试验 ;
- ⑧—铜尾矿泥 ,未扰动试样 ,直剪试验 ;
- ⑨—尾矿砂 , $D_r = 60\%$  ;⑩—尾矿砂 , $D_r = 58\%$

从图 1-6-14 的数据可以看出 ,尾矿泥总体上比尾矿砂或全尾矿有较高的循环抗剪强度。这个概念与粉砂土的观察结果相符 ,其有较大的抗液化阻力。与尾矿循环抗剪强度相应的是在循环剪切过程中产生孔隙压力。

据级配、相对密度、沉积方式类似于沉积尾矿的无塑性粉砂土循环三轴试验结果 ,在低的有效侧限压力下 ,循环剪切阻力相对恒定。比率  $\Delta\sigma/2\sigma_c$  意味循环剪切阻力与有效侧限压力之间成正比例 ,如果把它应用到整个深度范围内 ,特别是较浅的尾矿沉积层时 ,可能使人产生误解。Volpe 报告的铜尾矿砂和尾矿泥数据表明 ,只有在有效应力大于 100kPa 时 ,循环抗剪强度才正比于有效侧限压力。因此 ,在确定沉积尾矿的循环抗剪强度时 ,必须明确地考虑侧限压力和深度的影响。

## 第七章 尾矿排放方式

### 第一节 导 引

尾矿库设计是至关尾矿库工程质量的事前决策过程,系统地讲,应当包括 6 个设计单元,即:

- (1)天然容积区和构筑物;
- (2)输送管路和渗流控制措施;
- (3)尾矿管理系统;
- (4)稳固和土地恢复工程;
- (5)废水处理系统;
- (6)尾矿库监测。

这 6 个单元各自拥有不同的辅助系统和支持系统,但在设计思想上,在总成本上彼此相互影响,构成一个有机整体。

尾矿库设计和建设需要了解尾矿的物理力学性质如抗剪强度、固结、渗透、沉降特性,需要分析尾矿固料和废水的矿物、化学组分,需要确定尾矿库场地条件,包括地质、水文、地形和土壤剖面等资料。图 1-7-1 示出新矿山尾矿系统设计程度。本书旨在论述尾矿库工程的分析与管理,因此而不按 6 个单元的设计体系编排本书结构,但为了建立工程的整体概念,在开始涉及有关尾矿库设计内容之前,简要地说明尾矿库设计的一般性准则和方法。

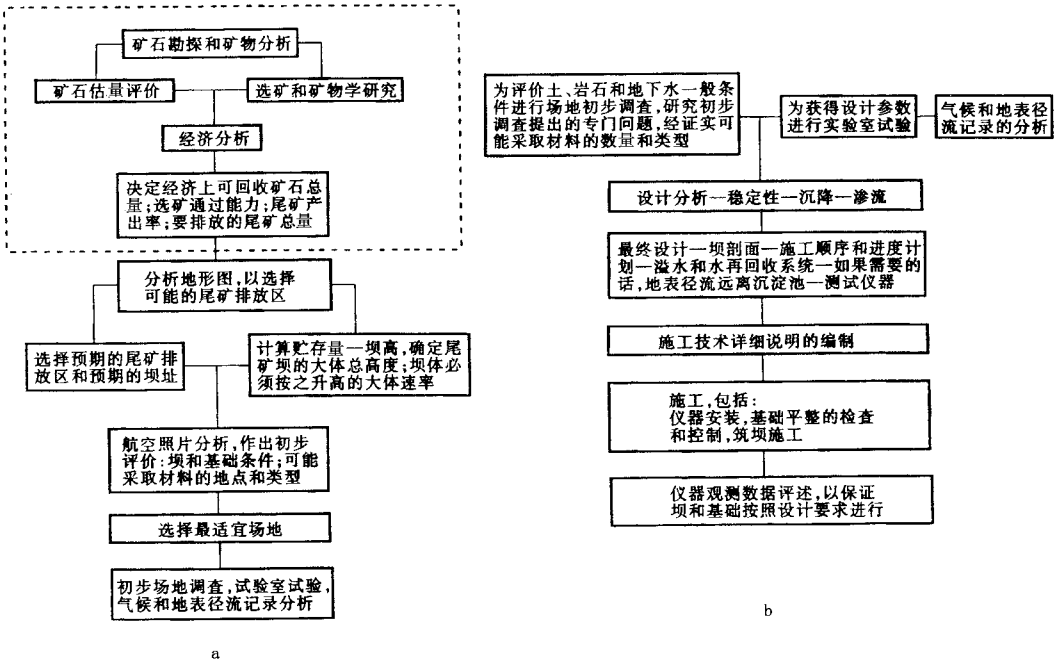


图 1-7-1 尾矿库设计程序

尾矿库设计所要考虑的问题包括：

- (1) 尾矿排放系统的选择；
- (2) 库区的选择；
- (3) 水力输送系统的选择(例如有无预先浓密、重力、压力及重力—压力结合)；
- (4) 尾矿坝构筑方法与排放方式的选择；
- (5) 根据容积和澄清水质要求进行沉淀池选择；
- (6) 废水处理流程的选择。

由于经济上原因,尾矿库一般尽可能靠近矿区建设,所以,从某种意义讲,库址选择是尾矿库设计的强制性约束条件,因而必须精心评价。首先,备选尾矿库区必须具有良好的地质、工程地质条件,以保证坝体的长期稳定性;其次,尾矿库区要有适宜的地形条件,以使地表径流绕过坝体或穿经尾矿排出;再者,必须考虑适宜的排放方法(本章将详细讨论)。如果在矿区附近无适宜场地可选,则要远距离泵送尾矿浆至满意场地。据我国 20 个矿山的调查表明,尾矿平均泵送距离为 3400m,加拿大 60 个矿山尾矿平均泵送距离为 2000m,据日本报道,最长尾矿管路 70km。

如果尾矿需要远距离泵送,则在总体设计中需要考虑以下几个技术问题：

(1)尾矿浆浓度尽可能高,最好在 40% ~ 65% 范围内,不仅使之容易泵送,也使泵的规格和管路直径最小。如果要循环用水,较高的浆体浓度则意味要泵回选厂的水量减少;

(2)排放速度至关重要,如果排放速度低,容易造成粗粒尾矿析出,则需要大直径输送管路;如果速度太高,则将磨损管路并增加动力消耗;

(3)泵型选择:对于短距离输送,最好采用离心泵,而长距离输送,最好采用正排量泵;

(4)为了减少泵和管路的磨蚀,必须考虑制造材料的耐磨性能,例如业已使用合成聚合物、耐磨橡胶等。

全面的尾矿管理应当包括:

- (1)容积区和垫层;
- (2)尾矿沉积方法(点、线或周边排放,高浓度排放,旋流分级);
- (3)尾矿库排水方法(汇集与排泄、溢流、虹吸、暗渠);
- (4)废水处理;
- (5)未污染地表水道的分流;
- (6)水的再循环;
- (7)矿山排水的再利用;
- (8)尾矿库作业技术(湿、半干或干态)和最佳沉积条件;
- (9)为实现尾矿优化管理,监控:
  - 库区内尾矿的分级与分布,从而了解细粒尾矿和尾矿泥的位置与数量;
  - 作业期间,影响地下水渗流和坝体破坏的水位;
  - 尾矿区内不同沉积带的密度和渗透性;
  - 控制 pH 的添加剂;
- (10)失效的预防措施,以保证最大的可靠性。

从上面的概念性论述中可以看出,至关尾矿排放规划的不仅是尾矿的自然性质和场地的工程性质,还有适宜排放方法的选择。地表排放是目前最普遍使用的排放方法,仍在尾矿管理中占有重要地位。然而,由于经济条件、技术条件和管理条件的发展,必将产生更实用的、更有创新性的排放方法。本章以下几节仅就当前采用的几种排放方法作以简要介绍。图 1-7-2 列出可选择的几种排放方案。



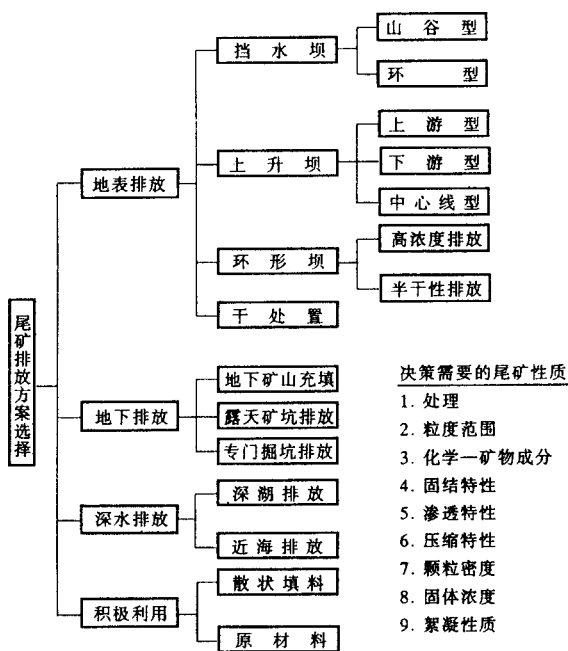


图 1-7-2 尾矿排放方案的选择

第二节 地表排放

按一般概念，尾矿的地表排放是采用某种类型堤坝形成拦挡、容纳尾矿和选矿废水的尾矿库，使尾矿从悬浮状态沉淀下来形成稳定的沉积层，使废水澄清再返回选厂使用。因尾矿排放浓度及与之相应坝型的差异，地表排放方式可有挡水坝、上升坝、环形坝和干处置。

一、挡水坝

尾矿排放用的挡水坝是在开始向尾矿库排放之前一次性地按全高构筑的坝。筑坝材料通常取用各种天然土。图 1-7-3 示出典型的挡水坝结构，其包括不透水心墙、排水带、渗滤层和上游堆石。可依据普通土坝技术进行渗滤层、内部渗流控制和坡度设计，但因尾矿坝上游边坡不经受陡然的水位下降，故可采用陡于普通蓄水坝上游坡度。

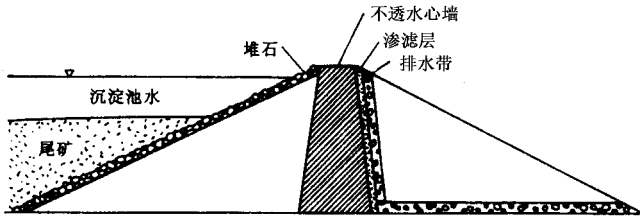


图 1-7-3 挡水坝结构

挡水坝适宜于蓄水要求高的尾矿库,例如暴雨径流流入量大的尾矿库,或者因选矿工艺的制约限制尾矿废水再循环的场合,或者尾矿沉淀需要大的贮水容积和蒸发面积的场合,或者为控制尾矿废水污染当地水系的场合。

挡水坝因建库地势不同可分山谷坝和环形坝。山谷坝是在山谷排泄区起始段、跨过山谷筑坝,通常坝内设不透水心墙,库底铺不透水垫层,如图 1-7-4 所示。设计须利用天然地形,形成三面环山的库区,从而缩短坝长,降低筑坝成本。山谷坝地处低势,风蚀的可能性极小。但若山谷底面形状很复杂,可能增大垫层铺设成本。山谷坝的突出特点是汇水面积大,区内地表径流将全部汇集库内(除非绕库周布设截洪沟),也因此而增大了环境影响和闭库后的土地恢复费用。

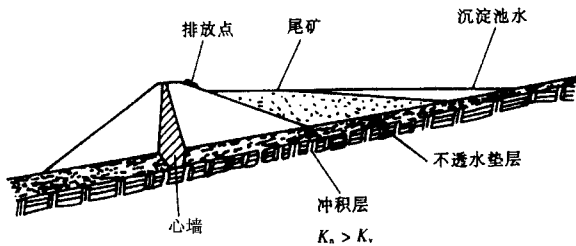


图 1-7-4 山谷坝型尾矿库

环形坝结构与山谷坝类似,外周坝设不透水心墙,库底铺不透水垫层,如图 1-7-5 所示。环形坝建在平坦地段,因此在地形上不象山谷坝那样严格约束,比较灵活,适于靠近采场和选厂选址,以便于利用废石筑坝和降低尾矿运送成本。因可以构造积水系统,从而使之不受可能的侵蚀和洪水影响,可以按一定通道排放废水,使之对地表水污染最小。由于底面平缓,形状规则,便于铺设垫层。由于能够附加筑坝,便于随意扩大库容。但因坝长则需要大量筑坝材料,同时也增大了风蚀的可能性和坝体破坏的风险。

从工程角度看,挡水坝适用于任意类型和级配的尾矿,适用于任意排放方法,抗震性能较好,坝体一次筑就,无升高速度的限制,防渗性能要求较高,因此,筑坝成本较高。

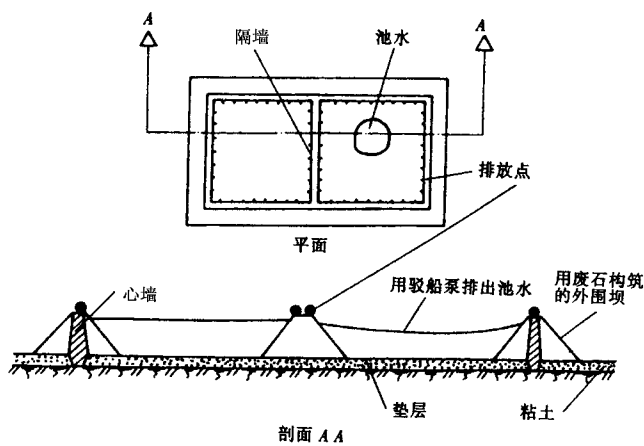


图 1-7-5 环形坝型尾矿库

二、上升坝

地表尾矿库使用最普遍的是上升坝,其与挡水坝不同,是在尾矿库整个服务期间分期构筑的坝。首先构筑初期坝,初期坝高设计一般考虑尾矿库使用头 2~3a 的尾矿产量以及适当的洪水流入量。继后按照预定的尾矿上升高程、库中允许洪水蓄积量齐步并升。上升坝采用来源广的建筑材料,包括天然土、露天和地下开采的废石、水力沉积或旋流尾矿砂。

上升坝的优点很明显:第一,由于在尾矿库整个服务期间分配建设费用,初期工程费用低,只是初期坝构筑所必要的成本。在较长时间内间隔支出将使贴现的总成本降低并取得较大的现金流量受益。第二,由于不必在筑坝初期一次性备齐筑坝材料,这样,在筑坝材料的选择上可有很大的灵活性。如果在采选期间,坝体上升与其生产率同步,则采矿废石或尾矿砂可以提供理想的筑坝材料。在不能取得适合的天然土的某些场合,则可能必须利用矿山废石筑坝,更何况,即便有适合的天然土可用,废石也要处置,在运输距离不过长的情况下,除了发生一定数额的压密费用外,材料是“免费”提供的。

上升坝,依据坝体上升过程中坝顶线相对于初期坝位置的移动方向,可分作三类:上游坝、下游坝和中心线坝。

(一)上游坝

图 1-7-6 示出上游坝升高方法。首先构筑初期坝并从坝顶周边排放尾矿,形成沉积滩,以后逐次以前一期沉积滩为基础,逐次排放尾矿,坝体随之升高,直至达到最终设计高度。

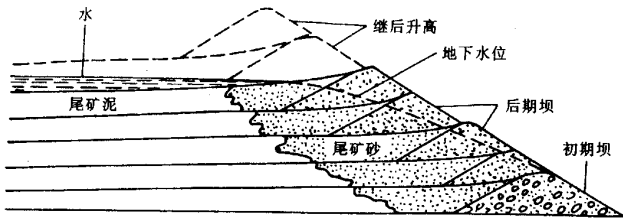


图 1-7-6 上游坝升高方法

上游方法适用的关键是尾矿形成一定承载能力的沉积滩,其为周边坝提供有力的支撑。一般地,要求排放的全尾矿中砂粒级含量不少于 40%~60%。软岩尾矿和细尾矿、或为地下采矿充填旋流出尾矿砂的尾矿有碍于上游方法筑坝。上游方法主要优点有二:第一,周边坝施工只需要少量的填料,沉积滩尾矿砂往往是极便利的筑坝材料,因此,可以很低的成本形成最终坝;第二,周边坝施工简单,极少量的设备如挖土机和推土机及人员即可完成正常的挖掘和填筑作业。限制上游方法使用的因素主要有地下水位控制、蓄水量和地震液化敏感性。

地下水位是决定坝体稳定性的关键性因素。以尾矿砂构筑的上游坝,坝内没有控制地下水位的结构措施,正如图 1-7-7 所表明的,影响地下水位的最重要因素是尾矿库基础相对于尾矿沉积层的渗透性、颗粒分级程度和尾矿沉积层渗透性的侧向变化,以及沉淀池水相对于坝顶的位置。一般可以采用水力旋流促使尾矿砂和尾矿泥分异,可以采用象排水暗渠等措施提高基础渗透性,但作业期间能够控制地下水位的惟一因素是沉淀池水位置。

当沉淀池水浸入沉积滩时,靠近坝面则产生很高的地下水位,危及稳定性。在极端情况下,可造成漫坝和继之的溃坝,许多上游坝破坏实例证明,大都是因沉淀池和坝顶之间距离不适宜造成的。采用适当的尾矿排放方法和溢水方法可以把池水从坝顶向后推移,提高溢水速度,从而降低池水位高程,可以增大池水与坝顶之间的相对距离;在池水浸入沉积滩的关键地段增大尾矿排放量,通过形成较高和较宽的沉积滩也可向后推移池水位置。这些措施在正常作业期间可能是有效的,但在暴雨期大的径流流入量情况下,池水及其对地下水位影响的控制是很难的。例如,假设尾矿沉积滩坡度为 1%,则池水每升高 0.1m 将使池水浸入沉积滩 10m。因此,在预期发生洪水、季节径流长期蓄积、或选厂水高速蓄积的场合,不尽适宜上游坝升高方法。为使径流、洪水流入量快速而大量分流,上游坝不能作成挡水坝。

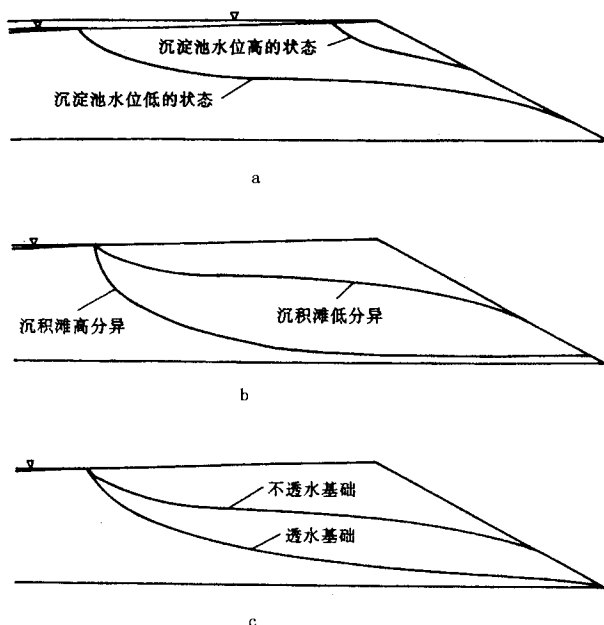


图 1-7-7 影响上游坝地下水位的因素  
a—沉淀池水位置的影响 ,b—沉积滩尾矿粒度分级和  
侧向渗透性的影响 ,c—基础渗透性的影响

上游坝对地震液化敏感、尾矿沉积层相对密度低、饱和度高 ,易使尾矿液化流动 ,造成灾难性后果 因此 ,上游坝不适用于强震区。

上游坝升高速度是由尾矿生产率和库区场地地形决定的。快速升高可能在沉积层内产生超孔隙压力 ,特别是在尾矿泥带中 因为其固结系数低。一般地 ,当坝升高速度超过 5 ~ 10m/a ,在尾矿泥中可引起超孔隙压力 ,升高速度超过 15m/a 必将遭受超孔隙压力引起的破坏。

(二)下游坝

图 1-7-8 示出下游坝升高方法。开始 ,在初期坝后面排放尾矿 继后 ,在下游坝坡面上填充尾矿 ,逐期形成上升坝。为了切实地控制地下水位 ,往往在坝体内采取结构措施 ,例如不透水心墙和内部排水系统。采用这些措施便可以直接贴近坝体内面蓄积大量水。但是 ,在某些情况下 ,假如池水不贴近坝体内面 ,假如坝体本身充分透水 ,这样 ,在没有坝体内部不透水心墙和排水系统情况下 ,通过控制沉积滩的周边排放 ,形成宽的干坡段 ,也能很好地控制地下水位。

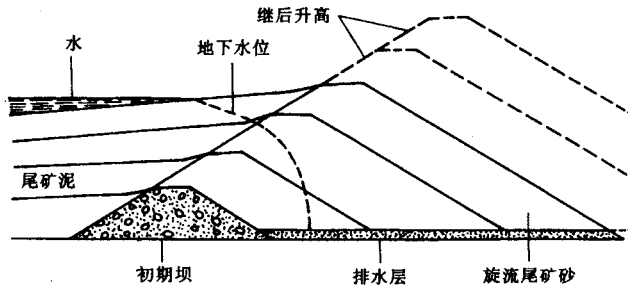


图 1-7-8 下游坝升高方法

一般地,下游坝升高方法适于蓄积大量水和尾矿的条件,由于坝内能保持低地下水位,且整个充填体可得以压实,故下游坝具有较好的抗液化能力,可用于强震区。与上游坝升高方法不同,下游坝升高速度基本上不受约束,因为从结构上讲,其与所排放的尾矿沉积层无关。下游坝结构坚固性和工程行为本质上等效于挡水坝。

下游坝升高方法需要精心制订推进规划。随着坝体升高,坝脚不断向外推移,初期坝的布置必须预先留有充足的排放空间。下游坝的最终高度往往受到坝脚条件的制约,诸如矿山占地界限、道路、公共设施、沟渠或地形约束。

下游坝升高方法的主要缺点是需要大量的筑坝材料和相应的较高费用。后期所用材料的来源可能制约坝的施工,特别是采用矿山废石和尾矿砂筑坝的场合,这些材料近乎以恒率产生,而每个相继的下游坝的升高所需要的材料量则随着坝体升高成指数律增加。因此,必须保证材料生产率在坝的整个服务期间始终充足供应。

现以图 1-7-9 说明这个问题。尾矿库容量随尾矿库表面高程而增大(图 1-7-9a),在尾矿排放率一定情况下,尾矿库高程随时间以渐降速率提高(图 1-7-9b)。此外,库深增量还必须足以贮积暴雨径流量,如图 1-7-9b 上线所示。在整个时期内暴雨径流量取作常量,时间 0 时的库深容限则表示为初期坝贮积洪水的能力。尽管这是个常量,但因随库高程升高而库面积增大,要保持这个常量所需深度则随时间而减小。图 1-7-9c 示出筑坝填料量随坝顶高程的变化,显见,尽管每期坝高增量一定,但为保持坝顶高程高出库表面高度所需要的填料量按指数律随时间增加。图 1-7-9d 上直线表示填料(例如矿山废石)产量恒速变化,显然,后期的填料量不足,可能需要取用天然土构筑较高的初期坝,使填料产量曲线上移来解决这个问题。

### (三)中心线坝

中心线坝升高方法在许多方面兼顾上游坝和下游坝升高方法,因此,在一定程度上它兼具这两种方法的各自优点。图 1-7-10 说明中心线坝升高方法。开始,构筑初期

坝 从坝顶周边排放尾矿 形成沉积滩 通过向下游坡面和上游沉积滩排放填料使坝体相继升高。

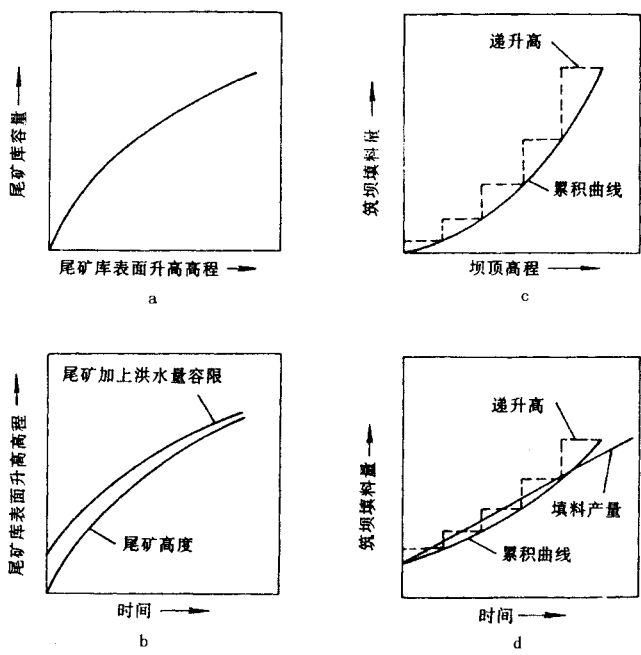


图 1-7-9 尾矿库高程、筑坝填料量与坝高、时间的关系

a—库容积—库高程变化曲线 ;b—库高程—时间变化曲线 ;  
c—筑坝填料量—坝顶高程变化曲线 ;d—筑坝填料量—时间变化曲线

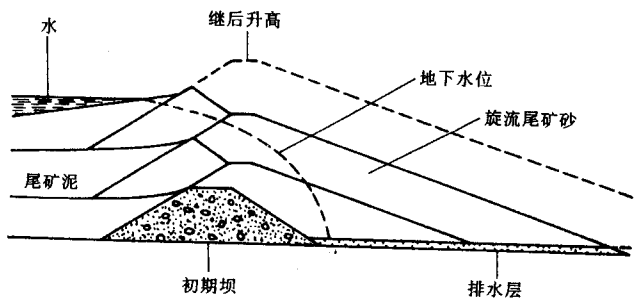


图 1-7-10 中心线坝升高方法

由于坝内能够提供内部排水带 地下水位控制不象上游坝对池水位置那么敏感。周边排放,即使是以尾矿泥为主包含少量尾矿砂也足以在排放点附近沉积成一个较窄的沉积滩,完全可以在坝升高过程中支承填料。

与下游坝不同 ,中心线坝升高方法不能永久性地贮积很深的水 ,但是 ,假如尾矿坝设计中采用了内部不透水带和排水带 ,则允许池水在洪水期临时上升 ,不会对坝体结构稳定性产生不利影响。

中心线坝升高速度总体上不受孔隙压力消散等有关因素控制 ,但是 ,上游沉积滩上排放高度受沉积滩材料的不排水抗剪强度的限制。由于能够压密筑坝材料的本体 ,内部排水能够控制饱和程度 ,因此中心线坝一般具有良好的抗震性 ,即使沉积滩尾矿液化 ,也只能在上游沉积滩局部发生破坏 ,只要坝的中心和下游部分保持完整 ,且池水不直达坝体 ,一般地 ,坝总体完整性和稳定性不会受很大影响。

对于指定坝高所需筑坝填料和相应费用介于上游坝和下游坝方法之间。如果采用矿山废石或旋流尾矿砂筑坝 ,则也存在填料需求量与生产率相一致的问题。

(四)上升坝工程特性对比

为了选择切合的地表尾矿库方案 ,必须精心地论证特定坝体类型与特定场地条件、尾矿与废水、矿山生产的适应性。各种上升坝对不同条件的适应性概述于表 1-7-1。

表 1-7-1 上升坝的工程特性对比

坝体类型	尾矿要求	排放要求	蓄水适应性	抗震性	升高速度限制	筑坝填料要求	筑坝相对成本
上游坝	全尾矿至少含 40% ~ 60% 的尾矿砂 ,低密度浆体有助于粒度分级	周边排放 ,必须充分控制沉积滩	不适合大量蓄水	差	< 5 ~ 10m/a 可取 ; > 15m/a 可能造成危险	天然土、尾矿砂或矿山废石	低
下游坝	适用于任意类型尾矿	按设计要求改变	好	好	没限制	尾矿砂或矿山废石(如生产率满足)或天然土	高
中心线坝	尾矿砂或低塑性尾矿泥	周边排放 ,至少要形成窄的沉积滩	不永久性蓄水 ,但在适当设计下可临时蓄积洪水	一般	上、下游坝升高的限制可能都适用	尾矿砂或矿山废石(如生产率满足)或天然土	中

在多数情况下 ,特别是高坝和高尾矿生产率矿山 ,筑坝材料费用是很可观的 ,因此 ,往往根据材料费对各坝类型进行比较。在筑坝材料费用正比于材料总量的条件下 ,对于相同的坝高 ,按照图 1-7-11 所示剖面比较面积计算 ,下游坝或挡水坝需要材料大致为上游坝的 3 倍 ,中心线坝为上游坝的 2 倍 ,而且 ,它们的差值随坝高增加而扩大。但是 ,筑坝材料费在尾矿处置总费用中所占份额变化很宽。在某些场合 ,库区基础表土剥离、



库底垫层或土地恢复费用远远超过材料费,单纯地根据材料费用进行坝类型对比可能引入歧途,必须综合考虑。

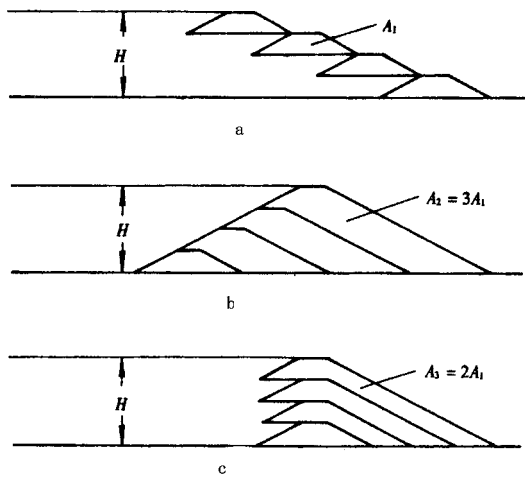


图 1-7-11 各种坝型筑坝材料量的对比

在坝型选择中,还必须充分认识地区性工程经验,尽管以往的、甚至现今的尾矿库设计多采用历史先例、经验观察和规章要求综合方法,而乏于特定背景、环境下对各备选方案的严格理论评价,然而,基于长期工程实践的自然选择结果,这些经验证明是有效的。因此,不应忽略不同地区成功先例的作用。例如,美国西南部铜矿区和南非金矿区广泛采用上游坝,因为这些地区气候干燥,视水珍贵,选厂再循环用水使沉淀池水位保持很低,加之处于弱震区,有助于上游坝成功应用。爱达荷州北部铅—锌—银矿区也广泛采用上游坝,则因地势陡峭,限定尾矿库址布于谷底,这里,透水性良好的冲积层使坝内地下水位显著降低。在我国,近乎全部采用上游坝,且积累了许多成功筑高坝的经验,这可能与北方地区广泛使用循环水、南方地区作业中采取人工排渗降低地下水位、以及改善溢洪能力增长干坡段有关。而在密苏里铅矿区和不列颠哥伦比亚铜矿区多倾向于旋流尾矿砂构筑下游坝和中心线坝,因为这两个地区降雨量和径流量大,同时由于地震风险而不利于使用上游坝。最后必须指出,成功的工程先例需要不断的充实,且不可取代特定坝型选择中完整的、理性的规划和分析。

### 三、环形坝

尾矿坝设计不同于普通水坝,核心在于它们贮存介质和功能的不同。仅尾矿坝而言,又侧重于在尾矿浆体浓度、状态和排放方式上区别尾矿库功能和确定坝型。本节所

讨论的环形坝非系坝形区分,乃是适应于高浓度和半干状态尾矿排放的一种坝形,恰在这一点上,它不同于挡水坝和上升坝。

### (一)高浓度中央排放

高浓度排放方法首先是由 Robinsky 于 1975 年提出来的。它通过尾矿区周边设围堤和中央固定点排放,使尾矿呈锥形堆积,借以消除上升坝的陡坝坡和坝上水池。

首先把选厂全尾矿浆或旋流后细尾矿浆浓密到浓度 60% ~ 70%,呈高粘性流态,经支架支承的管路泵送到尾矿堆中央的排放点,沉积后自然形成坡度 5% ~ 6% 的锥形尾矿堆。随着尾矿堆的升高,定期地抬高中央排放点。图 1-7-12 示出加拿大基德克里克锌铜矿高浓度排放尾矿的库区布置图。

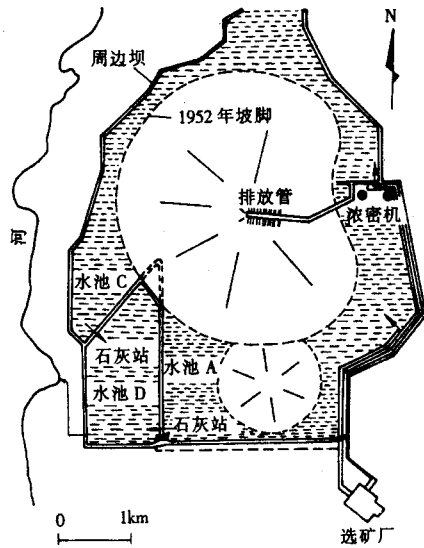


图 1-7-12 基德克里克矿尾矿排放系统布置图

在尾矿库系统的总体设计中,需要考虑的有关水管理和环境控制的技术要求包括:

- (1) 在上坡的周边设置排水沟,并在库区周围形成导流,以拦截地表径流水;
- (2) 在周边坝与尾矿堆脚之间保持足够的空间供作澄清池,池内最低蓄水能力为 30 天(尾矿水、区域径流水),最大蓄水能力为 60 天,以为降解和水澄清提供充足的时间;
- (3) 需在溢出口设置普通的二次水处理池,应在排放到环境或再循环之前最低有 2 天的澄清时间,同时监测池水 pH、流量和杂质,以满足排放标准;
- (4) 应设计应急的溢洪系统,以安全地控制池水位;
- (5) 为了降低管路投资和泵送成本,应尽可能使浓密机靠近尾矿库布置。

高浓度中央排放方法的主要优点是:初期资本投资较少;显著地减少回水泵送量,基

本上取消尾矿坝 ,因而降低了作业期间尾矿坝维护费用 ,取消了溢水系统及相应的问题 ;与同样坝高的周边坝相比 ,库容较大 ,由于尾矿堆坡度平缓且均匀 ,便于尾矿库废弃后土地恢复 ;由于基本上取消了沉淀池 ,可以减少废水向周围地域的渗漏 ;由于尾矿浆周期性地湿润尾矿堆 ,减少了粉尘污染 ,尾矿沉积层较稳定 ,在静荷载作用下发生破坏的风险较低。

虽然 ,高浓度排放方法大大节省筑坝费用 ,但这笔费用可能为浓密机建设和作业的较高费用所抵消。由于能源需求较大 ,管路磨损较大 ,高浓度浆体泵送成本较高 ,技术较难 ,更需要靠近尾矿堆布置浓密机。因所占用土地面积比一般尾矿库大 ,可能造成更大面积需要恢复。因浓密机没有贮存能力 ,一旦浓密机停工 ,只有排放未浓密尾矿 ,或者其排放浓度降低 ,致使尾矿堆平展 ,很可能侵蚀周边坝。

高浓度排放方法必须慎重考虑径流疏导的技术要求。如果不能从尾矿堆周围引流全部洪水径流 ,则可能造成坡脚尾矿的侵蚀和搬移。这种方法的抗液化课题是一个未解决的问题 ,如果尾矿含水量较高且尾矿堆较低部分被饱和 ,即便是平缓到 1% 的坡度也可能发生液化流动滑坡 ,特别是在粘土颗粒含量高的场合 ,更易受地震触发液化。因此 ,建议最大堆积角为 3.5°。

有的矿山 ,为扩大库容量 ,试图在普通尾矿库顶上再采用高浓度排放方法堆置尾矿堆 ,其潜在的径流处理问题和液化问题可能变得更为严重。在这种情况下 ,尾矿堆可能占用原设计预备的防洪库容。在发生强烈地震时 ,作为基础的原先排放的尾矿可能发生液化。因此 ,洪水或地震都可能引起原始尾矿坝的漫顶和破坏。

高浓度排放方法极适合于平坦地形的排放场地 ,不发生集中径流的地方 ,以及地震风险低的地区。

(二)半干性喷洒排放

半干性喷洒排放方法是使用环形坝、从周边向里形成沉积滩 ,如图 1-7-13 所示。通过在连续的整个库区沉积层上控制性排放尾矿 ,使尾砂沉积层在排出水的同时得以干燥 ,呈半干状。

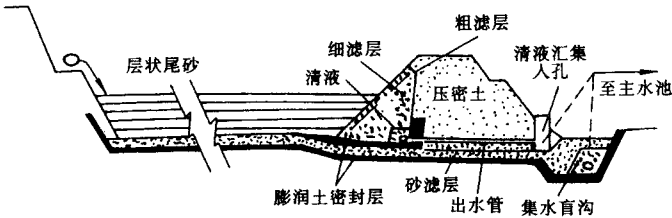


图 1-7-13 半干性喷洒排放

这种排放方法的主要结构特征是在尾矿库下面埋设集水系统,汇集的渗漏水 and 径流水导至蓄水池,以便在排入环境之前进行处理。起初积水少时,可通过底部砂滤层排水。当排放和沉积新尾矿时,下部干燥层立即吸收其水分,并可能通过之后的蒸发作用消耗掉这部分水。尾矿排放方法是通过喷洒栏条使尾矿浆在整个沉积滩上平和流动,形成约 100mm 厚的沉积层。在覆盖一个区段之后,移动排放点,让这个区段干燥,在干燥过程中便产生负孔隙压力,继之引起密度和抗剪强度的增加以及渗透系数的相应降低。细颗粒往往在上部表面集中,干燥后形成有粘结力的外壳,抵抗风蚀。

Ferguson 研究结果表明,硫化物矿物可能因其较高密度而在喷洒栏条附近优先离析和富集,富集程度随排放距离增大而逐渐降低。由整个尾矿库区取样分析结果发现,在表面铁、铜、锌、镉、镍和钒含量较高,而铝、钡、钙、钴、铬、镁、钠、二氧化硅、锑和钛含量较低。

这种排放方法的主要优点是:尾矿体可以达到较高的密度,可以充分地利用库容;由于尾矿的排水性质以及消除了坝体附近的积水,增大了抗液化能力,且可以采用上游法筑坝,闭库后,尾矿可以完全排水和固结,立即能在其上构筑密封层或覆盖层,消除长期渗漏。

这种排放方法的主要缺点是:尾矿沉积层需要保持潮湿,否则可能发生粉尘污染,这种方法不适合非常寒冷期;与其它方法相比,初期建筑费可能较高,且需要单独的贮水池,以便于选矿废水和径流水的再循环或排入环境。

#### 四、干处置

尾矿以固体形式干处理就是在尾矿沉淀之前,通过带式过滤机把水从中排出,形成干尾矿,从而减少尾矿废水的渗漏。

带式过滤在法国和南非已广泛应用,后成为欧洲某些铀矿选矿流程的组成部分。带式过滤工作原理简单,随着尾矿在合成橡胶支托的过滤编织带上移动,采用真空装置从尾矿中汲取液体,使尾矿含水量从约 50% 降低到 20% ~ 30%,处理成“干饼”状堆放。

对尾矿带式过滤的经济效果、可行性存在很大争议。磨矿工艺和石膏含量等因素都影响过滤效果,高粘土含量的矿石根本不能采用这种方法。带式过滤的基建费和作业费都很高,只有作为选矿作业的一部分,而不是附加的脱水流程才是合理的。

Webb 等详细报告过带式机过滤尾矿的应用。由于尾矿基本上呈固体形式处置,所以土地恢复可与尾矿处置同时进行,有很大优点。但固体尾矿 20% ~ 30% 含水量可近乎使原位孔隙率下尾矿饱和,与普通浆体排放的尾矿库相比,渗漏量的减少在很大程度上

决定于基础材料的渗透性,在没有垫层或低渗透的基础材料情况下,饱和尾矿的渗漏仍会很大。

### 第三节 地下排放

虽然地表尾矿库是最广泛应用的尾矿排放方法,但长期以来,地下采矿已采用尾矿砂充填空区以支护岩层,客观上也起到第二作用,即减少尾矿的地表处理量。近些年来,由于地表排放的成本和环境管理规程压力的增大,日趋把地下排放视作正规的排放方案。特别是所排放尾矿属惰性、无潜在危险的场合,地下排放更有突出优点。因此而产生单纯以处置尾矿为目的的地下排放,包括采空的露天矿坑排放和专门掘坑排放。

尾矿排至地下,人们最关注的问题是可发生的化学的、生物地球化学的、微生物的和物理反应,在水穿过尾矿渗滤、硫化物氧化和酸生成的情况下,各种金属污染物可能溶解。如此受污染的地下水可能在垂向上扩展到地表,横向上扩展数公里。为了确定可能发生的各种作用,需要在受控和加速条件下进行渗滤试验,以预测地下排放的长期效果。

#### 一、地下矿山充填

地下矿山尾矿充填的目的有三:提供工作平台,提供围岩支护,最大化回采矿石。

在脉状矿床分层充填采矿方法中,采矿从矿房底板向上推进,尾矿砂充填是该采矿作业的基本组成部分。当工作面抬高时,为了提供一个便利而稳定的工作平台,则将尾矿砂排放矿房。

在受高原岩应力作用的较深矿山,可能产生严重的岩爆问题,矿柱或围岩在这种应力作用下发生猛烈破坏,危及矿工安全。在这样矿山,尾矿充填能提供足够的侧向支承,显著地降低岩石应力和岩爆发生。

为上述目的充填的尾矿必须具有高渗透性和低压缩性。尾矿必须快速排水,因为地下不可能有足够的空间用作沉淀池,这就限定充填尾矿为砂级,需要在地表旋流分离,尾矿砂用作井下充填,尾矿泥排至地表尾矿库。如果充填是为了提供围岩或矿柱岩石支护,除了高渗透性外,还必须具有低压缩性。从全尾矿中旋流出尾矿泥能显著地降低压缩指数,达到高的原位密度也进一步降低压缩性。Sprute 等证明,采用电渗方法可以提高排水速度,完全可以采用尾矿泥充填为分层充填采矿作业提供稳定的工作平台。表 1

- 7 - 2 的数据表示出 4 个矿山充填尾矿的各种物理性质。

表 1 - 7 - 2  充填料的物理性质

矿  山	A	B	C	D
比重	2.89	2.83	2.82	2.96
渗透率/cm·h <sup>-1</sup>	5	5	10	60
平均密度( 原位 )/kg·m <sup>-3</sup>	1600	1664	1520	1552
相对密度 g/%	51	66	65	23
平均孔隙比( 原位 )	0.81	0.70	0.86	0.91
平均孔隙率( 原位 )/%	45	41	47	47.5
平均湿度( 原位 )/%	15.0	9.0	8.5	18.0
饱和度/%	53.0	39.0	27.0	58.1
均匀系数	3.7	4.9	2.1	2.3
有效粒径	0.026	0.030	0.033	0.105

为提高矿石回采率采用尾矿充填 ,最重要的技术要求是尾矿的强度特性。例如 ,房柱法开采 ,矿房充填考虑到嗣后的再开采和矿柱回采 ,能够显著地增加矿体总回采率。为了使充填体有效地起到支承作用 ,它必须具有足够的强度 ,成独立式的 ,以便在开采矿柱时承受顶板传递的荷载。在某些矿山 ,为使充填尾矿达到这一工程性质 ,还需要掺加一定比例的水泥 ,同时 ,通过改变尾矿的级配、原位密度和浆体浓度来改善充填体的强度和刚度。

当然 ,也有单纯为处置尾矿的地下排放。地下矿山开采之后 ,在一定范围内产生相当大而又无用的地下空间 ,利用这些空间排放尾矿可以显著地减少地表尾矿库面积和对自然地貌的扰动。在尾矿库需要垫层或复垦的场合 ,地表排放尾矿的经济负担可能过大 ,而在地下空区排放尾矿可能获得巨大的经济节省。对于高含硫化物的尾矿 ,堆置在地下水位以下 ,永久性的保持饱和状态 ,从而减少氧化可能引起的强酸性条件和重金属污染问题 ,具有特殊的优点。

二、露天矿坑排放

近些年来 ,由于环境保护规程的要求 ,有力地促进了露天矿坑尾矿排放 ,既可实现土地恢复目的 ,又能降低地表尾矿库的面积和成本。

从采空矿坑排放尾矿工艺上讲 ,作业简单 ,或者围绕采场边界周边排放 ,或者单点排

放。因为大多数矿坑地表面积比较小 ,可用作沉淀池的面积受到限制。如果露天矿坑边坡岩体透水性极弱 ,或者所排放尾矿无潜在污染危险 ,最典型方法是在不筑坝、不铺垫层的情况下排入完全采空的矿坑。如果需要铺设垫层以防渗漏 ,则可以在全深或回填到一定深度后 ,再铺设垫层 ,务使尾矿贮存在地下水位以上 ,如图 1 - 7 - 14 所示。在尾矿废水过剩于选厂再循环水的场合 ,特别是酸浸出铀作业 ,必须把矿坑内过量的澄清水泵至地表专门开挖的池内或者在排放之前进行处理。

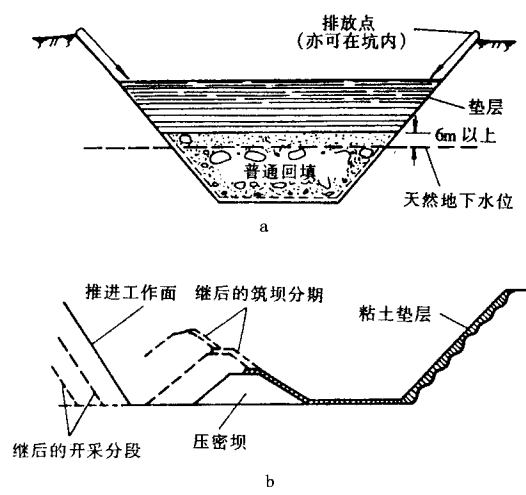


图 1 - 7 - 14 露天矿坑排放

a—排入完全采空的矿坑 b—排入继续开采的矿坑

露天矿坑排放尾矿 ,最好利用一个以上单独的采完矿坑 ,因为单一矿坑内同时进行开采作业与尾矿排放十分复杂。在矿体产出形态大体呈线状场合 ,可以把最初的采场采到全深 ,继后沿走向推进 ,随之在推进工作面后方构筑一系列挡水坝或下游升高坝。一般 ,采场深度不大 ,坝体本身体积可能占整个容积的很大比例。如果这种隔离坝发生渗漏 ,可能引发出坝体和采场边坡稳定性、矿山排水等严重问题。据 Williams 报告 ,西澳大利亚某露天矿坑尾矿坝破坏就是由于采场底板过高水压力引起的。

露天矿坑排放尾矿的基本特点是 :

- 由于体积松散的原因 ,矿坑最多只能回填剥离量的 75% ;
- 覆盖层设计及其材料选择易于保证抵抗侵蚀和良好排水 ;
- 陡边坡深矿坑回填尾矿需覆盖和植被的面积小 ,易于实现美化环境 ;
- 空气污染最小 ;
- 在高边坡情况下 ,可能发生采场边坡稳定性问题和垫层完整性问题 ;

- 矿坑边坡轮廓不规则,需要大面积的高代价的垫层;
- 难以掌握有关污染物迁移和渗流的水文地质参数。

地下排放尾矿存在一定局限性,主要是不能完全取消地表尾矿库,旋流尾矿砂充填地下矿山,仍需要地表尾矿库排放尾矿泥,而且从岩土工程技术上讲,难度更大。单纯排放全尾矿的地下矿山或露天矿坑,由于材料密度差异,也只能处理一部分。其次,尾矿排放与开采计划、作业之间相互制约,限制了生产过程中调整的灵活性。最后,矿坑内尾矿回填可能妨碍将来开采边界上有价值矿石,矿坑一旦填满尾矿,也不可能再加深开采低品位矿石。尽管如此,由于地下排放尾矿有它固有的优点,必将得以迅速的发展。

### 三、专门掘坑排放

这种排放方法如图 1-7-15 所示,专门为排放尾矿设计并挖掘坑,挖出材料筑成环形坝,既用作蒸发池,又防止地表径流。

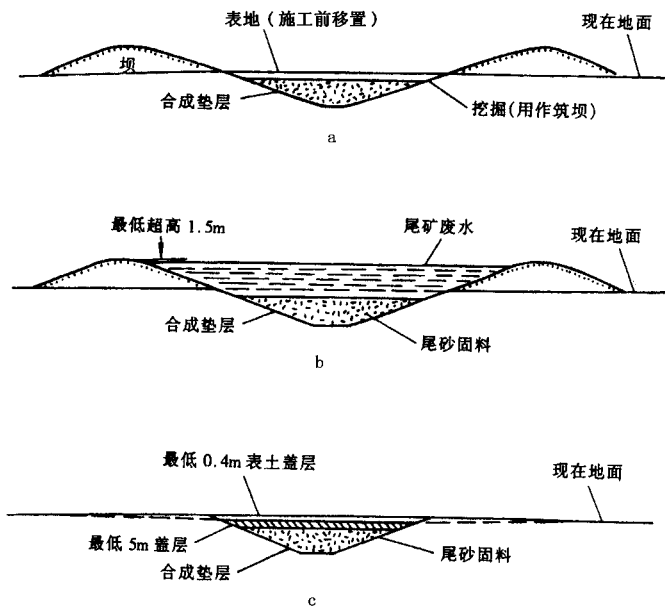


图 1-7-15 专门掘坑排放

a—典型的单元结构 b—作业后—复垦前 c—复垦



第四节 深水排放

世界上大部分矿尾矿沉积在陆地上 ,尾矿库废弃后再进行土地恢复 ,但人们总是关注尾矿库污染物向环境、地下水和水源地渗流的长期效果。另一种方法是把尾矿泵入深湖或近海 ,但因环境生态问题的争议而一直未普及应用。表 1 - 7 - 3 对陆地排放与海洋排放进行了对比。

表 1 - 7 - 3 陆地与海洋尾矿排放的对比

序号	陆 地	海 洋
( 1 )	在可通达的条件下 ,全部固料存积和限定在陆地上	固料往往不受限制、相对不可通达
( 2 )	污染控制或物理和化学改良 ,在技术上是可能的	由于不可通达 ,改良困难或不可能
( 3 )	为处理或再利用 ,能使水相与固相分离	除了限定的浓密过程外 ,不能简便地处理 ,也不能再利用
( 4 )	在将来要回收有价值矿物 ,可实现	几乎全部丢失尾矿
( 5 )	尾矿库构筑费和作业费往往很高	排放设施几乎不发生作业费用
( 6 )	闭库后需要昂贵的复垦和连续的污染控制 ,即便复垦了 ,直观上也存有异议	不需要复垦和污染控制 ;尾矿沉积地几乎始终被隐蔽
( 7 )	存在结构物破坏引起公害的风险	基本上没有结构物破坏的公害风险
( 8 )	尾矿库易受侵蚀、溶滤作用	不受侵蚀或溶滤作用
( 9 )	污染完全控制几乎不可能	污染完全控制几乎不可能
( 10 )	坝区具有有限的库容	贮存量往往无限
( 11 )	黄铁矿矿物成分可能氧化	不存在氧化问题 ,不产生酸
( 12 )	机械破坏的几率高	几乎没有机械破坏的可能

深湖和近海排放的主要特点是：

- ( 1 )尾矿上面的水位形成一个理想的输氧障 ,从而抑制硫化物的生成酸反应；
- ( 2 )减少了细菌出现 ,有助于防止氧化；
- ( 3 )节省了昂贵的尾矿库建设费用，
- ( 4 )如果这种排放在环境上允许 ,深湖或近海排放少占土地 ,具有美化环境的优点。

一、深湖排放

假若湖水的流动是以在不发生淤积情况下传输或容纳尾矿 ,假若能够避免 pH 变化、金属含量或浊度增大造成的污染 ,无论尾矿粒度粗与细 ,深湖排放尾矿是可以接受的 ,但在尾矿含有可溶的放射性核素的情况下 ,则必须经严密试验和论证 ,为矿山企业、政府机构和社会公众提供科学分析和实际数据 ,以便作出最后选择。

加拿大哈得逊湾矿冶有限公司已废弃的曼迪矿是深湖排放尾矿的一例。尾矿中硫化物以黄铁矿为主( 15% ~ 17% S ),以及相当含量的锌和铜。时至 1976 年 ,对已在水下沉积 20a 的尾矿进行现场取样和分析 ,观察了水生生物 ,分析了溶液中铝、硅、硫化物( 固体 ) 硫酸盐、铜、锌、铅、镉、钙、镁、pH 和电导率 ,并与附近的已有 20a 开采史的卡普鲁斯矿地表尾矿取样分析结果相对照 ,如表 1 - 7 - 4 所示。卡普鲁斯尾矿经历常见的氧化过程 ,顶部 15cm 高度氧化 ,下伏 10 ~ 15cm 硬红土层 ,再下为基本未风化带。由于风化作用 ,硫化物变成不可溶的三氧化二铁和可溶的硫酸铁。而曼迪矿水下尾矿有极少量硫化铁变成三氧化二铁 ,湖滨尾矿指示较高的三氧化二铁和硫酸盐。通过测定尾矿固体颗粒的溶解度( 尾矿/蒸馏水 1 : 5 ) ,也指示风化作用和可溶性盐的生成 ,可溶性盐含量依次是卡普鲁斯表面氧化尾矿最高 ,曼迪湖滨尾矿相当低 ,而水下尾矿极低。同样地 ,pH 值和电导率测定结果亦与盐度分析结果相一致。而且 ,暴露在大气中的尾矿没有植物生长 ,而水下尾矿上部发现了水草。

表 1 - 7 - 4 曼迪矿和卡普鲁斯矿尾矿成分

成分/ %	曼迪矿		卡普鲁斯矿
	水 下	湖 滨	上部剖面
全铁/ %	17.4	19.8	24.5
铁( Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/ %	0.8	2.9	15.8
全硫/ %	15.5	15.8	6.6
硫化物硫/ %	15.4	15.5	2.7
硫酸盐硫/ %	0.03	0.30	3.9
铝( Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/ %	8.4	6.7	2.9
硅石( SiO <sub>2</sub> )/ %	35.7	37.7	27.7
铜/ %	0.91	2.70	0.19
锌/ %	4.70	1.60	0.18

成分/%	曼迪矿		卡普鲁斯矿
	水下	湖滨	上部剖面
铅/%	0.13	0.12	0.08
镉/%	0.01	< 0.01	< 0.01
钙/%	1.04	0.51	2.87
镁/%	1.75	1.03	0.54
pH	6.9	4.9	2.5
电导率/S·m <sup>-1</sup>	0.4 × 10 <sup>-5</sup>	2.45 × 10 <sup>-5</sup>	7.20 × 10 <sup>-5</sup>

二、近海排放

在没有适合场地供建地面尾矿库、在排除其它所有处置方法的可能性、又有适合海洋排放场地的条件下 ,可以把近海排放尾矿作为不得已的最后选择。近海排放主要有两种方法 :海下通过管道或隧道连续排放 ;采用驳船或挖泥船间歇排放。

由于排放过程中许多尾矿悬浮在海水中 ,最引入关注的是缕流上升的性态 ,即尾矿散布的速率 ,缕流轴心线的速度、温度和尾矿浓度 ,缕流横向剖面 and 缕流高度。影响缕流上升的因素有排放喷口的直径、排放速率、排放深度和相对密度变化。

如同地面排放决策一样 ,在作近海排放和场地选择的决策之前 ,必须充分研究尾矿性质和排放场地条件 ,包括现有海流和沉积速度的测定 ,排放点到发生沉积地点的距离 ,对沉积区附近海洋动物群系和植物群系的可能不利影响(底栖动物群落的埋葬、增大需氧量、毒害等 )。归结起来 ,在进行近海排放和可能性评价时 ,所要考虑的准则包括环境和水力两个方面 ,如图 1 - 7 - 16 所示。

为此 ,应进行一系列有关的试验性初步研究 ,包括 :

- ( 1 )确定排放的尾矿量和化学、矿物成分 ;
- ( 2 )在海水箱内进行模拟排放试验 ,以识别尾矿浆与海水混合特性 ;
- ( 3 )测定对鱼、水生贝壳类动物的毒性 ;
- ( 4 )评价各种成分在海水中的溶解度 ;
- ( 5 )观测排放区内海水运动以及动植物。

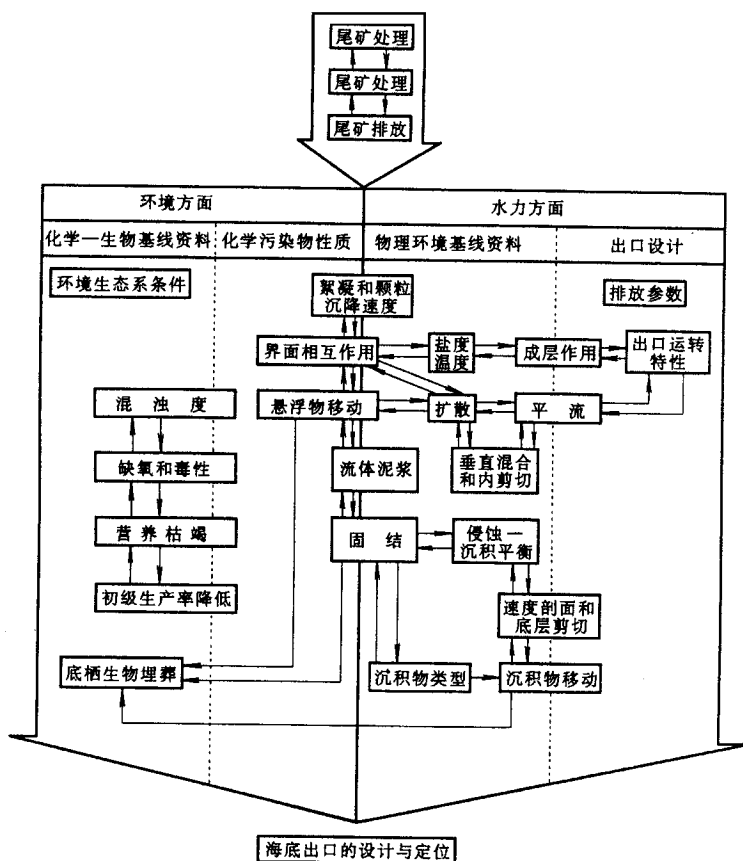


图 1-7-16 预测海洋排放影响的各因素间关系

表 1-7-5 列出某些近海排放的实例。图 1-7-17 示出加拿大艾兰铜矿海下尾矿排放系统布置图。该矿位于温哥华岛北端,浮选厂日处理能力为 40000t,硫化物主要有黄铁矿(3%)和黄铜矿(1.5%)。在尾矿排放的规划阶段,考虑到(1)20a 的生产期,每年尾矿量约 1000~1200 千万 t,容纳如此大量的尾矿库需占地 810 万 m<sup>2</sup> 以上(2)地处强震区,地震危险性高(3)长时期的过大降雨量,平均径流量超过 1270mm。这些条件限制地面尾矿库的建设、作业和管理,因此决定把尾矿排至鲁伯特海湾。选厂距海湾约 1.6km,深度在水面以下 50m。在尾矿排放之前,使用石灰(0.3kg/t)和聚丙烯酰胺(5g/t)使尾矿稠化至浓度约 40% pH11.3~11.5。这样的浆体在混合箱内混合以等量的海水,然后通过海下尾矿排放系统排放(图 1-7-17)。在此设计中,海水位以下 50m 排放尾矿与海水混合浆所引起的压差可使预计数量的海水从深度 6m 虹吸到浆体混合箱。

表 1－7－5 海洋排放实例

公司与地址	尾矿数量与 类型干料 /t·d <sup>-1</sup>	排放点	距选厂 距离 /m	系统说明
菲律宾 宿务 阿特拉斯联合采矿和开发公司 DAS 选厂	35650 Cu	塔尼翁海峡 ;距海 岸 490m ,深 9m	13400	重力 ,500 和 300mm 管路 ; 46% 固料 ;1.9 ~ 2.1m/s 流 率 ;1.06% 坡度
比加选厂	33020 Cu		18290	重力 ,450 和 400mm 管路 ; 46.9% 固料 ;1.9m/s 流率 ; 1.2% 坡度
菲律宾 马林杜克岛 马尔科珀采矿公司	25400 Cu	卡兰坎湾 ;距海岸 2440m ,深 5m	12000	重力 ,600mm 管路和溜槽 ; 50% ~ 52% 固料 ;1.0% ~ 0.5% 坡度
加拿大 温哥华岛 犹他矿业有限公司艾兰铜矿	30480 Cu	鲁珀特岛 ;距海岸 250m ,深 45m	邻近	按 1:1 比例与海水先混合 ; 1m 管路
加拿大 温哥华岛 考伊琴铜业有限公司 乔丹河铜矿	1525 Cu	靠近海岸 ,深 3m	3960	4 × 50 马力泵 ;150mm 管 路 ;1.9m/s 流率 ,24% 固料
法国 马赛 不列颠铝业有限公司	2000 ~ 3000 Fe	地中海 ;距海岸 2000m ,深 350m	—	—
西班牙 卡塔赫纳 佩尼亚罗亚矿冶公司 罗布托选厂	6100 Pb – Zn – Fe	波特曼湾	1490	250mm × 200mm 泵 ; 250mm 管路
英国 约克郡 克利夫兰钾盐有限公司 布尔比钾盐矿	4200 ( 溶液中盐 94% )	北海 ;距海岸 1820m ,深 25m	2590	预先与海盐混合
挪威 马尔姆 福斯达伦斯采矿有限公司	510 磁铁矿—黄铁矿	峡湾 :深 60m ,近 海岸	400	粗尾矿用驳船运载 ,细尾矿 用溜槽
挪威 楸达尔工业有限公司 雷帕菲约德铜矿	1600 Cu	峡湾 ;深 50m ;近 海岸	1500	200mm 塑料管 ,在 600m 长 管路上开口排放
挪威 诺斯克内费林矿	400 正长石 , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	阿尔塔峡湾 ;深度 线 ,水深 650m	邻近	水下管路

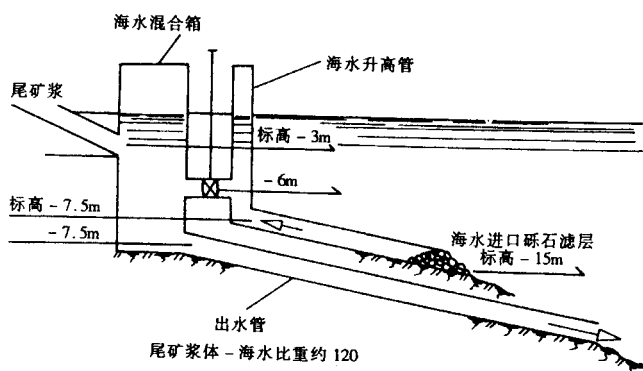


图 1-7-17 海下尾矿排放系统

尾矿排放后,鲁伯特海湾水环境监测结果表明,海水浊度增大,但深度 50m 以下保持正常;从固料中释放的金属不稳定;溶解重金属量除  $\text{Mo}$  以外,与天然水系组分相比相差无几;尾矿沉积层埋设了底栖有机体,在尾矿排放终了时应重新定殖;没有证据说明大量重金属进入食物链。

## 第八章 尾矿的污染现状

随着现代工业化生产的迅速发展和新开矿山数量的陆续增加,尾矿的排放、堆积量也越来越大。目前,仅我国在国民经济中运转的矿物原料约 50 亿 t。世界各国每年采出的金属矿、非金属矿、煤、黏土等在 100 亿 t 以上,排出的废石及尾矿量约 50 亿 t。以有色金属矿山累计堆存的尾矿为例,美国达到 80 亿 t,前苏联为 41 亿 m<sup>3</sup>。在我国,全国现有大大小小的尾矿库 400 多个,全部金属矿山堆有的尾矿则达到 50 亿 t 以上,而且以每年产出 5 亿 t 尾矿的速度增加。目前我国铁矿山年排出尾矿量约 1.3 亿 t,有色矿山年排出尾矿量约 1.4 亿 t,黄金矿山每年排出的尾矿量达 2450 万 t。而且随着经济的发展,对矿产品需求大幅度增加,矿业开发规模随之加大,产生的选矿尾矿数量将不断增加;加之许多可利用的金属矿品位日益降低,为了满足矿产品日益增长的需求,选矿规模越来越大,因此产生的选矿尾矿数量也将大量增加,而大量堆存的尾矿,给矿业、环境及经济等造成不少的难题。

### 第一节 矿产资源浪费严重

由于尾矿中不仅含有可再选的金属矿和非金属矿等有用组分,而且就是不可再选的最终尾矿也有不少用途,因此浪费于尾矿中的有用组分数量是相当可观的。在我国由于大多数矿山的矿石品位低,大多呈多组分共(伴)生,矿物嵌布粒度细,再加上我国选矿设备陈旧、老化现象普遍,自动化水平低、管理水平不高、选矿回收率低,其结果是必然造成

资源的严重浪费。特别是老尾矿,由于受到当时条件的限制,损失于尾矿中的有用组分会更大一些。例如云锡老尾矿数量已达 1 亿 t 以上,其中平均含锡为 0.15%,损失的金属锡达 20 万 t 以上;吉林夹皮沟金矿老矿区金矿尾矿存量约 30 万 t,含金品位约 0.4 ~ 0.6g/t(新尾矿库) 1 ~ 1.5g/t(老尾矿库),损失的金的金属量约 1.6t、钼 280t、银 2t、铅 500t;陕西双王金矿,选金尾矿中含有纯度很高的钠长石,储量达数亿 t,成为仅次于湖南衡山的第二大钠长石基地,若加工成半成品钠长石粉,其价值就高达 200 亿元,如只作为金矿回收金时,尾矿中就浪费了相当可观的重要的非金属矿资源钠长石。

目前,我国有色金属矿山的采选综合回收率只有 33%,可见有色金属在尾矿中流失的严重性。就铁矿山而言,年排出尾矿量 1.3 亿 t,平均含铁 11%,相当于有 1410 万 t 的金属铁损失于尾矿中,1997 年全国黄金矿山金的总回收率为 86.46%,约有 18 ~ 20t 金存在于尾矿中。

## 第二节 堆存尾矿占用大量土地、堆存投资巨大

目前,除了少部分尾矿得到应用外,相当数量的尾矿只有堆存,占用土地数量可观,而且随着尾矿数量增加而利用量不大的状况仍然继续,占用土地数量必将继续扩大。据粗略统计,我国 2000 年尾矿废石破坏土地和堆存占地达到 1.87 ~ 2.47 万 km<sup>2</sup>,且每年以 300 ~ 400km<sup>2</sup> 的速度增加,其中包括大量的农用、林用土地。即使占用的土地目前尚未耕种或暂不宜耕种,但毕竟减少了今后开垦耕种的后备土地资源,对我国这样一个人口众多、人均耕地面积很少的农业大国显然是严重的威胁,给社会造成的压力和难题将是久远的。

另外,修建、维护和维修尾矿库及因建尾矿库征地所需的费用也是相当可观的。尾矿处理设施是结构复杂、投资巨大的综合水工构筑物,其基建投资占整个采选企业费用的 5% ~ 40%,尾矿库的维护和维修更要消耗大量的资金。据统计,我国冶金矿山每吨尾矿需尾矿库基建投资 1 ~ 3 元,生产经营管理费用 3 ~ 5 元。全国现有的 400 多个尾矿库,每年的营运费用就达 7.5 亿元。



### 第三节 尾矿对自然生态环境的影响

尾矿对自然生态环境的影响具体表现在：

(1)尾矿在选矿过程中经受了破磨,体重减小,表面积较大,堆存时易流动和塌漏,造成植被破坏和伤人事故,尤其在雨季极易引起塌陷和滑坡。而随着尾矿数量的不断增加,尾矿库坝体高度也随之增加,安全隐患日益增大。我国已发生过大小事故数十次,其中7次造成人身伤亡,死亡人数近300人。最严重的一次是云锡大谷都尾矿库溃坝事故,368万t尾矿和泥浆像泥石流一样向下游倾泻,淹埋万亩农田和村庄,伤亡近200人,导致选矿厂停产3年之久。而在气候干旱、风大的季节和地区,尾矿粉尘在大风推动下飞扬至尾矿坝周围地区,造成土壤污染,土地退化,甚至使周围居民致病。

(2)尾矿成分及残留选矿药剂对生态环境的破坏严重,尤其是含重金属的尾矿,其中的硫化物产生酸性水进一步淋浸重金属,其流失将对整个生态环境造成危害。残留于尾矿中的氯化物、氰化物、硫化物、松油、絮凝剂、表面活性剂等有毒有害药剂,在尾矿长期堆存时会受空气、水分、阳光作用和自身相互作用,产生有害气体或酸性水,加剧尾矿中重金属的流失,流入耕地后,破坏农作物生长或使农作物受污染,流入水系则又会使地面水体和地下水源受到污染,毒害水生生物;尾矿流入或排入溪河湖泊,不仅毒害水生生物,而且会造成其他灾害,有时甚至涉及相当长的河流沿线。目前,我国因尾矿造成的直接污染土地面积已达百万亩,间接污染土地面积1000余万亩。

大量尾矿已成为制约矿业持续发展,危及矿区及周边生态环境的重要因素。纵观发展矿业所遇到的严峻挑战,在矿石日趋贫化、资源日渐枯竭、环境意识日益增强的今天,解决困扰的根本出路在于依赖于二次资源的开发利用,尾矿综合利用是矿业持续发展的必然选择。

## 第九章 尾矿综合利用的途径

当前科学技术的进步,尤其是选矿、冶金及非金属材料在各个领域广泛的应用,都为尾矿利用奠定了坚实的技术基础。尾矿的综合利用主要包括两方面:一是尾矿作为二次资源再选,再回收有用矿物,精矿作为冶金原料,如铁矿、铜矿、锡矿、铅锌矿等矿的尾矿再选,继续回收铁精矿、铜精矿、锡精矿、铅锌精矿或其他矿物精矿。二是尾矿的直接利用,是指未经过再选的尾矿直接利用,即将尾矿按其成分归类为某一类或几类非金属矿来进行利用。如利用尾矿筑路、制备建筑材料、作采空区填料、作为硅铝质、硅钙质、钙镁质等重要非金属矿用于生产高新制品。

尾矿利用的这两个途径是紧密相关的,矿山可根据自身条件进行选择,也可二者结合共同开发,即先综合地回收尾矿中的有价组分,再将余下的尾矿直接利用,以实现尾矿的整体综合利用。

从目前国内外尾矿利用成果看,应该说还停留在少量的尾矿利用上,尚无法实现大幅度减少或免除尾矿的排放。因此,立足长远,应着手进行无尾工艺的研究。实现无尾排放的基本路线是:先分离出尾矿中的粗中粒级物料,用其代替碎石、黄砂作为建筑用骨料使用,对余下的细粒尾矿进行再选,综合回收尾矿中的有价金属、非金属成分,再对剩余部分固化处理,生产出不同档次的建筑材料或固化块体充填塌陷区或尾矿土地复垦。

### 第一节 国内外尾矿综合利用现状

在矿冶领域里,世界上工业发达国家已把无废料矿山作为矿山的开发目标,把尾矿

综合利用的程度作为衡量一个国家科技水平和经济发达程度的标志。其利用目的不仅仅是追求最大经济效益,而且还从资源综合回收利用率、保护生态环境等综合加以考虑。20 世纪 70 年代以来国际上有关废料利用的技术交流活动十分活跃,1973 年和 1975 年在波兰召开了第一、二届国际现代采矿工艺和冶金环境保护会议,交流采选冶技术和废料利用经验;1977 年在赞比亚召开“发展中国家资源利用会议”;1979 年在华沙的第十三届国际选矿会议上讨论了矿物原料处理和所有组分全部利用问题;1980 年在芝加哥第六届矿物废料利用国际会议上专门研究了矿物废料综合利用问题;1981 年、1983 年、1986 年在捷克斯洛伐克召开了一、二、三届“新型矿物原料讨论会”,讨论了利用岩石、矿物及其元素的途径和非传统矿物原料资源的利用问题,把废料提高到了资源的高度来认识,提出了人类在 21 世纪重点开发无污染的绿色产品的战略口号。

前苏联、美国、加拿大等矿业发达国家尾矿的综合回收工作做得较好。例如,前苏联克里沃罗格磁铁矿石岩,仅回收磁铁矿,每年便可多产铁品位 65% 的铁精矿 200 万 t。美国国际矿产和化学公司综合回收明尼苏达州铜、镍尾矿中的铅,每年可得 60 万 t 铅金属。前捷克斯洛伐克最大的重晶石—菱铁矿矿床选厂尾矿库约存 800 万 t 尾矿,该尾矿含铁 17% ~ 22%、重晶石 3.5% ~ 12%。采用强磁选机磁选,可获得品位 34.6%、回收率 70% 的菱铁矿精矿;回收率 65% ~ 70%、 $\text{BaSO}_4$  含量为 95% 的重晶石精矿。

随着科技的发展和学科间的相互渗透,尾矿利用的途径越来越广阔。国外尾矿的利用率可达 60% 以上,欧洲一些小国已向无废物矿山目标发展。前苏联将尾矿用作建筑材料的约占 60%,现已能用铁矿尾矿制造微晶玻璃、耐化学腐蚀玻璃制品和化工管道等;保加利亚把从尾矿中回收的石英用作水泥惰性混合料和炼铜熔剂;原捷克的一些矿山将浮选尾矿的砂浆、磨细的石灰和重晶石加入颜料压制成彩色灰砂砖。

尾矿的利用问题是一项系统工程,涉及到的相关知识较多,如地质、选矿、材料、玻璃、陶瓷、建筑等,需多学科联合攻关才能在短期内出效果。前苏联已建立了从矿物原料、选矿、化学和非金属工艺实验室至实验厂这样的联合体,专门研究处理矿物废料问题,前苏联矿物原料综合利用率也从 20 世纪 60 年代的 30% ~ 50% 提高到现在的 50% ~ 70%。

我国的尾矿综合利用研究起步较晚,近几年发展迅速。其原因一方面和国家重视有关,另一方面和我国的资源特点及利用状况有关。我国的金属矿产资源贫矿多、伴生组分多、中小型矿床多,目前不少矿山进入中晚期开采,资源紧张加上开采成本越来越高,经济效益日趋降低,形势已逼迫一些矿山不得不走多种矿物产品共同开发和综合利用的路子。1992 年国家召开了综合利用的学术讨论会并出版了论文集。1994 年“中国 21 世

纪议程”高级圆桌会议在北京举行,在 21 世纪议程的首批优先项目计划中便有尾矿利用这一项,国家计划每年拨款 1.5 亿元用于资源循环与再生综合利用发展协调计划,资助尾矿开发与利用的产业化,要求做到保护自然资源、矿产资源的可持续供给能力,走经济、社会、资源与环境协调发展的道路。1990 年,成立了我国首家尾矿利用研究机构——中国地质科学院尾矿利用技术中心。

20 世纪 80 年代以来,随着尾矿矿物学及工艺矿物学研究的深入,对许多尾矿中可以利用的矿物组分,研究了它们的再选性质,对不可再选或再选技术经济效果较差的尾矿,研究了将它们作为非金属整体应用的性能及适当的分类,为尾矿综合利用开辟了新的前景。在尾矿再选方面,选矿技术有了较全面的完善和提高,为细粒微细粒、品位低下、结构复杂的尾矿研制出了一些再选别的有效方法,如浮选、重选、高梯度磁选,甚至堆浸及选冶联合工艺。对不可再选的尾矿,根据它们的矿物和化学成分、物理和机械性质分别按相近的各类非金属矿应用方法开辟应用途径。

近几年,一些科研院所、高等院校等单位与矿山企业紧密合作,在从尾矿中回收有价金属与非金属元素、尾矿制作建筑材料、磁化尾矿作土壤改良剂等方面已取得了一些实用性成果。多年来从矿山废渣中已回收铜 148 万 t、铝 8.7 万 t、铅 39 万 t、锌 15 万 t,分别占其消耗量的 19%、1%、11%、4%。尾矿综合利用搞得较早和较好的矿山如金川、攀枝花、梅山铁矿、白云鄂博等矿山企业。例如金川矿除镍外,已能综合回收钴、铂、钼、钨、铀等元素。

## 第二节 我国尾矿综合利用存在的问题与对策

### 一、存在的问题

我国在尾矿综合利用方面虽然取得了很大成绩,但远不能适应经济和社会可持续发展的要求,与国内其他领域工业固体废弃物的利用水平及国际先进水平相比,存在着较大差距:

#### (一) 综合利用率低

我国目前矿产资源的总回收率只能达到 30% 左右,平均比国外水平低 20%。就采选的回采率而言,铁矿为 67%,有色金属矿为 50% ~ 60%,非金属矿为 20% ~ 60%。有

益组分综合利用率达到 75% 的选厂只占选厂总数的 2% ,而 70% 以上的伴生综合矿山 ,综合利用率不到 2.5% 。更值得注意的是有些矿山的共(伴)生组分甚至超过矿产的价值 ,但这些共(伴)生组分在主矿产选矿时进入尾矿未得到利用。仅以有色矿山为例 ,每年损失在尾矿中的有色金属就达 20 万 t ,价值在 20 亿元以上。国外尾矿的利用率可达 60% 以上 ,欧洲一些小国已向无废物矿山目标发展 ,而我国尾矿的利用率仅为 7% 左右 ,差距很大。

### (二)高附加值产品少、缺乏市场竞争力

目前 ,我国尾矿在工业上的应用 ,大多仅停留在对尾矿中有价元素的回收上或直接作为砂石代用品(粗、中粒)销售 ,开发出的高档建材产品如微晶玻璃花岗石、玻化硅等 ,因工艺过程相对复杂 ,成本较高 ,而比重又较大 ,无法与市场上出售的各种装饰建材相竞争 ,因此 ,到目前为止 ,还基本上处于试验室及中试阶段 ,很难在工业上推广应用。

### (三)投入不足 ,政策扶持力度有待加强

长期以来 ,尾矿利用项目在资金上得不到保证 ,投入严重不足。目前 ,我国没有专项资金支持资源综合利用 ,融资渠道没有解决 ,再加上矿山行业普遍效益较差 ,尾矿利用资金筹措非常困难。在政策扶持上 ,国家先后出台了资源综合利用减免所得税、部分资源综合利用产品企业减免增值税的优惠政策 ,但尚没有具体制定针对尾矿利用的鼓励性政策。

### (四)资源意识、环境意识不高

资源利用的法律、法规建设落后 ,尾矿利用基础管理薄弱 ,缺少尾矿利用的基础资料等 ,皆成为制约尾矿利用的影响因素。

## 二、尾矿利用的对策与建议

在第二次工业污染防治工作会议上国家强调 :“综合利用 ,变废为宝 ,既保护了国家的资源 ,又充分利用了国家资源 ,同时又净化了环境 ,可谓一举多得。”报告高度概括了资源综合利用的必要性和迫切性。在面向 21 世纪新的历史发展阶段 ,我国有限的资源将承载着超负荷的人口、环境负担 ,仅靠拼资源、外延扩大再生产的经济增长 ,是不可能持续的。结合尾矿利用的现状以及大量尾矿所带来的诸多问题 ,尾矿利用工作应当进一步引起有关部门、矿业企业的高度重视 ,应从政策、经济、法律以及技术等方面采取切实可行的措施。

### (一)进一步转变观念、提高尾矿利用意识

国家有关部门应确定尾矿利用在资源综合利用中的重要地位 ,矿山企业应当树立长远观念 ,要把尾矿利用作为实现矿业持续发展的必要措施。要运用各种手段和形式 ,加

强尾矿利用的宣传教育,使全行业真正认识到尾矿利用对节约资源、保护环境、提高矿山经济效益、促进经济增长方式的转变,实现合理配置资源和可持续发展,有着重要的意义。

## (二)完善法律和政策体系,强化政策导向作用

1986年我国颁布了《矿山资源法》,对矿产资源的合理开发和有效保护起到了积极的保护作用。但这项法规还不能完全适应新形势的要求,希望尽快出台《资源综合利用法》、《再生资源综合利用法》,使资源综合利用包括尾矿综合利用工作能够纳入到法制化轨道。同时继续贯彻现有的一些鼓励资源综合利用的政策,如《国务院批转国家经贸委等部门关于进一步开展资源综合利用意见的通知》,财政部、国家税务总局《关于继续对部分资源综合利用产品实行增值税优惠政策的通知》等。

## (三)强化管理工作,增加对尾矿利用的投入

尾矿利用是社会性公益事业,除充分发挥市场机制的作用外,还应加强综合部门的宏观管理,将尾矿利用纳入国家、行业发展规划和制订分步实施的计划。矿山企业要对尾矿利用工作统筹规划,要设立或指定具体的管理机构,加强企业内部尾矿利用的管理与协调。

鉴于尾矿利用是集环境、社会、经济效益于一体的长期性、公益性事业,国家应当加大科技投入的力度,建立工程化研究基地和示范工程。建议国家设立资源综合利用专项基金,在政策性银行设立资源综合利用贷款专项,并给予贴息、低利率、延长还款期等方面的信贷优惠政策,引导企业增加对尾矿利用的投入,使我国尾矿利用工作走上健康发展的道路。

## (四)加强尾矿资源的调研工作,加大尾矿利用科技攻关力度

由于我国的尾矿量大、分布广、性质复杂,因此加强对尾矿资源的调研工作,摸清基本情况,找出存在的问题以对症下药,是推进尾矿利用的重要基础。通过调研,摸清现有尾矿堆存的数量、年排出量、尾矿的基本类型、粒度组成、各种有用金属矿物和非金属矿物含量、有害成分的含量等,根据地域和不同类型尾矿的特点,从技术、经济上指出其合理利用的途径。

搞好尾矿综合利用,还有许多技术问题需要解决,因此,必须加大科技攻关的力度,应重点解决尾矿中伴生元素的综合回收技术,经济地生产高附加值以及大宗用量的尾矿产品的实用技术等,开展尾矿矿物工艺学的研究。国家应大力支持尾矿利用科技攻关工作,通过科技攻关及成果的推广,使我国尾矿利用率由目前的7%提高到30%左右,逐步提高我国工业固体废弃物综合利用的整体水平,缩小与世界先进水平的差距。

## 第十章 尾矿的处理方法

原矿进入选矿厂经过破碎、磨矿和选别作业后,矿石中的有用矿物分选为一种或多种精矿产品,大量的尾矿则以矿浆状态排出,其中常还含有目前技术水平暂不能回收的有用成分。浮选厂尾矿中含有大量药剂,有些甚至是剧毒物质。为了综合利用国家资源及消除对环境的污染,必须采取有效措施对尾矿进行处理,变废为宝,化害为利,这是尾矿处理的重要原则。

选矿厂的尾矿设施一般包括尾矿贮存系统、尾矿输送系统、回水系统以及尾矿水净化系统。

### 第一节 尾矿的堆存方式及其设施

选矿厂尾矿的堆存方式,有干式堆存和湿式堆存两种。

干式选矿后的尾矿或经脱水后的粗粒尾矿,可采用带式输送机或其他运输设备运到尾矿库堆存,这种方法称为干式堆存法;湿式选矿的尾矿矿浆一般采用水力输送至尾矿库,再采用水力冲积法筑坝堆存,这种方法称为湿式堆存法。目前,我国绝大部分选矿厂的尾矿都采用这种堆存方法。

作为尾矿堆积场地的尾矿库,一般是由以下设施组成,如图 1-10-1 所示。

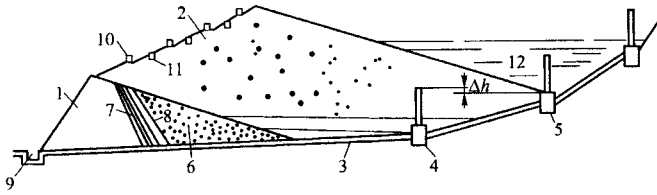


图 1-10-1 尾矿库纵剖面示意图

1—初期坝 2—堆积坝 3—排水管 4—第一个排水井 5—后续排水井 6—尾矿沉积滩；  
7—反滤层 8—保护层 9—排水沟；10—观测设施；11—坝坡排水沟；12—尾矿池

(1) 尾矿坝通常包括初期坝和后期坝(也称尾矿堆积坝)两部分。前者是尾矿坝的支撑棱体,具有支撑后期堆积体的作用和疏干堆积坝的作用;后者是选矿厂投入生产后,在初期坝的基础上利用尾矿本身逐年堆筑而成,是拦挡细粒尾矿和尾矿水的支承体。尾矿坝的作用是使尾矿库形成一定容积,便于尾矿矿浆能堆存其内。

(2) 排洪设施,是排泄尾矿库内澄清水和洪水的构筑物,一般由溢水构筑物和排水构筑物组成。

(3) 排渗设施,是汇集并排泄尾矿堆积坝内渗流水的构筑物,起降低堆积坝浸润线的作用。

(4) 回水设施,是回收尾矿库内澄清水的构筑物。

(5) 观测设施,是监测尾矿库在生产过程中运行情况的设施。

(6) 其他设施,有为排泄尾矿库堆积边坡和坝肩地表水的坝坡、坝肩排水沟;通讯照明设施;管理设施(如值班房、工具房、器材室等);交通设施;筑坝机具等。一些大型尾矿库还有简易的检修设施,距选矿厂比较远的尾矿库,必要时还应设生活福利设施。

## 一、尾矿库的选择与计算

### (一) 尾矿库址的选择

尾矿库址选择的基本原则为:

(1) 不占或少占耕地,不拆迁或少拆迁居民住宅。

(2) 选择有利地形、天然洼地、修筑较短的坝堤(指坝的轴线短)即可形成足够的库容(一般应满足贮存设计年限内的尾矿量)。当一个库容不能满足要求时,应分选几个,每个库容年限不应低于 5 年。

(3) 尾矿库地地址应尽可能选择近于和低于选矿厂,尽量做到尾矿自流输送,尾矿堆置应位于厂区、居民区的主导风向的下风向。

(4) 汇雨面积应当小,如若较大,在坝址附近或库岸应具有适宜开挖溢洪道的有利地



形。

(5)坝址和库区应具有较好的工程地质条件 ,坝基处理简单 ,两岸山坡稳定 ,避开溶洞、泉眼、淤泥、活断层、滑坡等不良地质构造。

(6)库区附近需有足够的筑坝材料。

(7)库址、尾矿输送和储存方式、设施的确定 ,应进行方案比较。

(二)尾矿库的型式

尾矿库是堆存尾矿的场所 ,多由堤坝和山谷围截而成。按照地形条件及建筑方式 ,尾矿库可分为山谷型、山坡型、平地型 3 种 ,按筑坝的方式划分 ,可分为一次筑坝型(包括废石筑坝 )和尾矿堆坝型两种。

1. 河谷型的尾矿库

此种尾矿库系由封闭河谷口而成。其优点是坝身短 ,初期坝工程量较小 ,生产期间用尾矿堆坝也容易。缺点是积水面积大 ,因而流入尾矿库内的洪水量大 ,使排水构筑物复杂。

2. 河滩型和坡地型的尾矿库

利用河滩或坡地筑成的尾矿库 ,通常是由三面围筑而成。其优点是积水面积小 ,排水构筑物简单。缺点是三面筑坝 ,坝身较长 ,初期坝工程量较大 ,生产期间用尾矿堆坝也较不便。

3. 平地型的尾矿库

比种尾矿库系利用平坦地段由四面围坝而成。其优点是积水面积小 ,排水构筑物简单。缺点是四面筑坝 ,坝身长 ,初期坝工程量大 ,生产期间操作管理不便。这类尾矿库通常是在当地缺乏适当的河谷、河滩、坡地或在上述两类尾矿库都不合适时才采用。

(三)尾矿库等级的划分

尾矿库的等级根据其总库容的大小和坝高按表 1 - 10 - 1 确定。

表 1 - 10 - 1 尾矿库等级表

级别	库容/亿 m <sup>3</sup>	坝高/m	工程规模
二	> 1.0	> 100	大型
三	1.0 ~ 0.1	100 ~ 60	中型
四	0.1 ~ 0.01	60 ~ 30	小一型
五	< 0.01	< 30	小二型

注 ①库容系指校核洪水位以下尾矿库的容积 ;  
②坝高系指尾矿堆积标高与初期坝轴线处坝底标高的高差 ;  
③坝高与库容分级指标分属不同的级别时 ,以其中高的级别为准 ,当级差大于或等于两级时可降低一级。

有下列情况之一者,按表 1-10-1 确定的尾矿库等级可提高一级:

- (1)当尾矿库失事将使下游重要城镇、工矿企业、铁路干线遭受严重的灾害者;
- (2)当工程地质及水文条件特别复杂时,经地基处理后尚认为不彻底者(洪水标准不予提高)。

#### (四)尾矿场的计算

##### 1. 库容计算

为明确起见,先说明各种库容名称的含义,由图 1-10-2 可以看出:

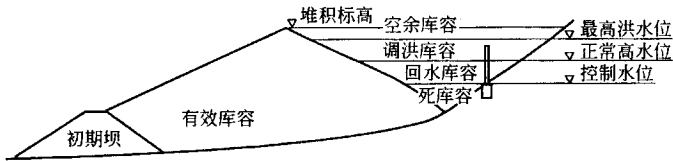


图 1-10-2 尾矿库库容示意图

几何库容:是指初期坝、堆积坝边坡与地形等高线封闭所形成的容积;

总库容:是根据总尾矿量、调洪、矿浆水澄清及渗流控制条件所确定的与尾矿库最终堆积标高相应的几何库容;

有效库容:是指尾矿在尾矿库中所占据的实际容积,以  $V_r$  表示;

回水库容:是指正常高水位与控制水位之间水的容积,以  $V_x$  表示;

调洪库容:是指最高洪水水位与正常高水位之间水的容积,以  $V_T$  表示;

死库容:是指控制水位以下水所占的容积,以  $V_0$  表示;

空余库容:是指最终堆积标高与最高洪水水位之间未被尾矿充填的容积,以  $V_k$  表示。

所有尾矿库的  $V_k$  相应高度应满足安全超高要求。

上述尾矿库的库容是经常变化的。

(1)几何库容的计算。在地形图上绘出初期坝坝坡和堆积坝坝坡,用求积仪测量出各封闭等高线的面积,按式(1-10-1)计算:

$$V = \sum_{i=0}^n \frac{k \sum_{j=0}^3 x_{ij}}{6} (H_i - H_{i-1}) \quad (1-10-1)$$

式中  $V$ ——几何容积,  $m^3$ ;

$i$ —— $i=0, 1, 2, 3, \dots, n$  标高线序号;

$j$ ——用求积仪测量封闭等高线 3 次,每次求积仪读数序号;

$k$ ——求积仪的面积系数 ,与地形图的比例有关 ,求积仪说明书中给出 ;  
 $x_{ij}$ ——第  $i$  个标高第  $j$  次求积仪读数 ;  
 $H_i$ ——第  $i$  条等高线的标高 ,m。

(2)尾矿库所需库容的计算。尾矿库的库容应满足选矿厂服务年限的要求。其所需库容与选矿厂每年排出的尾矿量和服务年限有关 ,可按式 (1-10-2) 计算 :

$$V_z = \frac{WN}{\rho_d \eta_z} \tag{1-10-2}$$

式中  $V_z$ ——选矿厂在生产服务年限内所需尾矿库的容积 , $\text{m}^3$  ;  
 $W$ ——选矿厂每年排入尾矿库的尾矿量 , $\text{t/a}$  ;  
 $\rho_d$ ——尾矿的松散密度(即平均堆积干容重) , $\text{t/m}^3$  ;  
 $N$ ——选矿厂生产服务年限 , $\text{a}$  ;  
 $\eta_z$ ——尾矿库库容利用系数。

$\rho_d$  的确定 ,一般参考类似尾矿的勘察资料或实验室的试验资料确定 ,在无上述资料时 ,可参考表 1-10-2 确定。

表 1-10-2 堆积尾矿的密度参考表

尾矿分类 名称	各粒组颗粒的含量/%			尾矿的松散密度 $\rho_d/\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$
	黏粒组 < 0.005mm	粉粒组 0.005 ~ 0.05mm	砾砂组 0.05 ~ 2.0mm	
中尾砂	< 5	< 20	> 0.25mm 多于 50	1.50 ~ 1.40
细尾砂	< 5	< 20	> 0.10mm 多于 75	1.40 ~ 1.35
尾粉砂	< 5	< 45	> 50	1.35 ~ 1.30
尾亚砂	5 ~ 10	< 60	> 30	1.30 ~ 1.20
尾亚粘	10 ~ 30	< 60	> 10	1.20 ~ 1.10
尾矿泥	> 30	< 60	> 10	1.10 ~ 1.00

注 :表中系按尾矿密度  $\rho_g = 2.70\text{t/m}^3$  编制的 ,若尾矿密度不等于  $2.70\text{t/m}^3$  时 ,堆积密度数值应乘以校正系数  $\beta = \rho_g/2.70$ 。

$\eta_z$  值的确定 ,一般应根据尾矿堆积的实际边坡、尾矿沉积滩的水上、水下冲积纵坡 ,绘出尾矿堆积平面图 ,计算出尾矿的实际堆积容积(尾矿库的有效库容) ,按下式计算尾矿库库容利用系数 :

$$\eta_z = \text{尾矿库的有效库容 } V_r / \text{尾矿库的总库容} \tag{1-10-3}$$

在缺少尾矿沉积滩水上、水下纵坡资料时 ,可按表 1-10-3 确定。

表 1-10-3 尾矿库库容利用系数参考表

尾矿库形状及放矿方式	库容利用系数 $\eta_z$	
	初 期	终 期
狭长曲折的山谷形、坝顶放矿	0.30	0.60 ~ 0.70
较宽阔的山谷形、单向或两向放矿	0.40	0.70 ~ 0.80
平地或山坡形、三面或四周放矿	0.50	0.80 ~ 0.90

根据式(1-10-2)的计算结果,查库容曲线可得尾矿所需的堆积标高。

2. 尾矿澄清距离的计算

在尾矿水力冲积过程中,细粒尾矿随矿浆水进入尾矿池,并需在水中停留一定时间(流过一定距离——澄清距离)细颗粒才能下沉,使尾矿水得以澄清而达到一定的水质标准,澄清距离的计算参考图1-10-3,采用式(1-10-4)计算。

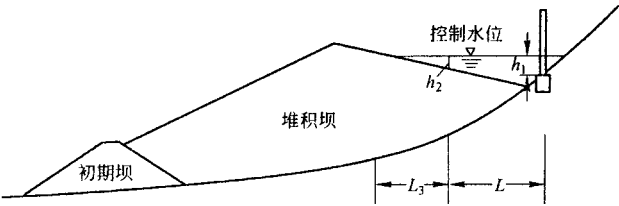


图 1-10-3 澄清距离计算示意图

$$L = \frac{h_1}{u} v = \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{Q}{nau} \tag{1-10-4}$$

式中  $L$ ——所需澄清距离,  $m$  ;  
 $h_1$ ——颗粒在静水中下沉深度(即澄清水层的厚度),一般不小于 0.5 ~ 1.0m,视溢水口的溢水深度而定,要求  $h_1$  大于溢水口的溢水水头,  $m$  ;  
 $v$ ——平均流速,  $m/s$  ;  
 $Q$ ——矿浆流量,  $m^3/s$  ;  
 $h_2$ ——矿浆流动平均深度,一般取为 0.5 ~ 1.0m ;  
 $n$ ——同时工作的放矿口个数,根据放矿管和分散管(主管)直径而定,要求同时工作的放矿管断面面积之和等于分散管断面面积的两倍,参考表 1-10-4 ;  
 $a$ ——放矿管间距,一般取 5 ~ 15m ;  
 $u$ ——颗粒在静水中的沉降速度,  $m/s$  ;可参考有关专业资料按公式计算或查

表取值。

表 1－10－4 分散管直径和放矿管直径参考表

分散管直径/mm	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
放矿管直径/mm	50	50	75	100	100	125	150	150	200	200	250	300

这里介绍公式算法 ,首先应判别所属流态 ,再按公式进行计算。

当  $d < 0.726 \sqrt[3]{\frac{\nu^2}{\rho_g - 1}}$  时 ,属层流区。

$$u = 0.408(\rho_g - 1) \frac{d^2}{\nu}$$

( 1－10－5 )

当  $d > 28.8 \sqrt[3]{\frac{\nu^2}{\rho_g - 1}}$  时 ,属紊流区。

$$u = 3.58 \sqrt{(\rho_g - 1)d}$$

( 1－10－6 )

当  $0.726 \sqrt[3]{\frac{\nu^2}{\rho_g - 1}} \leq d \leq 28.8 \sqrt[3]{\frac{\nu^2}{\rho_g - 1}}$  时 ,属介流区。

$$\left[ \lg \frac{u}{\sqrt[3]{(\rho_g - 1)\nu}} + 3.46 \right]^2 + \left[ \lg \frac{d \sqrt[3]{\rho_g - 1}}{\sqrt[3]{\nu^2}} \right]^2 = 39$$

( 1－10－7 )

式中  $u$ ——颗粒沉降速度 ,m/s ；  
 $\rho_g$ ——固体颗粒密度 ,t/m<sup>3</sup> ；  
 $d$ ——截流的最小颗粒直径 ,m ；  
 $\nu$ ——清水运动黏滞系数 ,m<sup>2</sup>/s ,由表 1－10－5 查得。

表 1－10－5 清水运动黏滞系数表

温度 t/℃	$\nu/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	温度 t/℃	$\nu/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	温度 t/℃	$\nu/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
0	0.0179	12	0.0125	24	0.0091
1	0.0173	13	0.0120	25	0.0089
2	0.0167	14	0.0117	26	0.0087
3	0.0162	15	0.0114	27	0.0085
4	0.0157	16	0.0111	28	0.0084
5	0.0152	17	0.0108	29	0.0082
6	0.0147	18	0.0106	30	0.0080
7	0.0143	19	0.0103	31	0.0078
8	0.0139	20	0.0101	32	0.0077
9	0.0135	21	0.0098	33	0.0075
10	0.0131	22	0.0096	34	0.0074
11	0.0127	23	0.0094	35	0.0072

温度 t/℃	$\nu/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	温度 t/℃	$\nu/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	温度 t/℃	$\nu/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
36	0.0071	45	0.0060	70	0.0041
37	0.0069	46	0.0059	75	0.0038
38	0.0068	47	0.0058	80	0.0036
39	0.0067	48	0.0057	85	0.0034
40	0.0066	49	0.0056	90	0.0032
41	0.0064	50	0.0055	95	0.0030
42	0.0063	55	0.0051	100	0.0028
43	0.0062	60	0.0047		
44	0.0061	65	0.0044		

注  $\nu$  代入公式时应进行单位换算,即乘以  $10^{-4}$  得  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

3. 最终堆积标高的确定

确定尾矿库最终堆积标高的最主要因素是选矿厂在生产服务年限内排出的总尾矿量,或按矿山原矿储量计算的总尾矿量所需要的库容。由几何库容曲线初定尾矿库的最终堆积标高,并给出堆积平面图,见图 1-10-4,随后进行调洪计算、渗流计算和澄清距离计算,若满足下述 3 个条件的要求,初定标高满足要求。

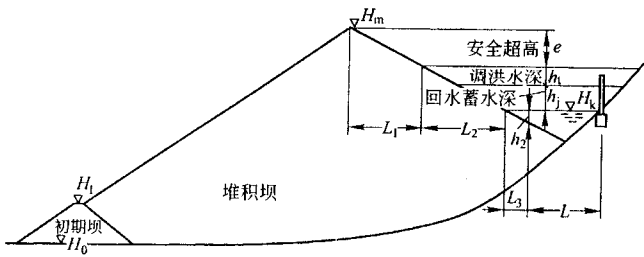


图 1-10-4 尾矿库最终堆积标高示意图

(1) 满足回水蓄水水深  $h_j$ 、调洪水深  $h_t$ 、安全超高  $e$  的要求：

$$(H_m - H_k) \geq (h_j + h_t + e) \tag{1-10-8}$$

式中  $H_m$ ——尾矿库最终堆积标高, m；

$H_k$ ——尾矿池控制水位, m；

$h_j$ ——回水蓄水水深, m；

$h_t$ ——调洪水深, m；

$e$ ——尾矿库防洪安全超高, m。

(2) 满足尾矿水澄清距离要求。控制水位时, 沉积滩水边线至溢水口的最小距离  $L_k$

应为：

$$L_k \geq (L + L_3) \tag{1-10-9}$$

式中  $L$ ——澄清距离 ,m；

$L_3$ ——达到尾矿矿浆平均流动水层厚度  $h_2$ (见图 1-10-3)的水面距离 ,m。

(3)满足渗流控制的最小沉积滩长度  $L_1$  的要求。为了确保尾矿堆积坝的稳定 ,应控制堆积坝的浸润线高度和渗流坡降 ,满足此渗流控制条件的最高洪水位时沉积滩长度应大于设计提出的最小沉积滩长度  $L_1$  的要求。

上述 3 个条件 ,若其中之一不满足要求 ,应提高最终堆积标高 ,直至满足要求为止。

二、尾矿坝及其他设施

尾矿坝是尾矿库的主要建筑物 ,由初期坝和堆积坝组成 ,初期坝是尾矿坝的支撑棱体 ,采用当地的土和石料筑成 ,初期坝的设计尾矿量一般为 0.5 ~ 1.0 年。堆积坝是选矿厂投产后利用尾矿堆积而成。此外还有其他构筑物。

(一)尾矿库的初期坝

初期坝是尾矿库的基础构筑物 ,不仅可以堆存初期尾矿 ,给管理人员为堆筑后期堆积坝以必要的准备时间 ;它又是尾矿库的支承结构 ,是堆积坝的基础 ,与堆积坝共同作用 ,达到拦挡尾矿的目的。初期坝宜采用透水坝 ,以利于尾矿的排水固结和降低堆积坝的浸润线 ,从而提高坝体的稳定性(包括渗流稳定和动力稳定)。

1. 初期坝坝高的确定

确定初期坝坝高(图 1-10-5)的最主要因素是初期尾矿量。一般以选矿厂初期生产半年到 1 年的尾矿量为初期尾矿量 ,以此按式(1-10-2)计算初期坝所需形成的库容 ,由库容曲线查得初期坝坝顶标高。与堆积坝一样 ,初期坝坝顶标高也应用 3 个条件进行校核：

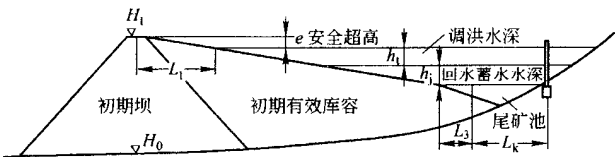


图 1-10-5 确定初期坝坝高示意图

(1)满足回水蓄水水深  $h_j$ 、调洪水深  $h_i$ 、安全超高  $e$  的要求：

$$(H_i - H_k) \geq (h_j + h_i + e) \tag{1-10-10}$$

式中  $H_1$ ——初期坝坝顶标高, m;

其余符号意义同式(1-10-8)。

(2) 满足尾矿水澄清距离要求。按式(1-10-9)计算。

(3) 满足堆积坝渗流控制的要求。有些尾矿库, 采取增加沉积滩长度达到渗流控制的要求受到限制, 或排渗设施不经济, 只能增加初期坝的高度来实现渗流控制, 此时初期坝坝顶标高应满足此要求。

如上述3个条件均能满足, 由库容曲线查得的初期坝坝顶标高为所确定的标高, 否则应提高初期坝坝顶标高直至满足要求为止。

初期坝坝顶标高  $H_1$  减去初期坝坝轴线下的最低地面标高即为初期坝的高度。

(4) 对坝前有积水区的尾矿库(如坝后放矿的尾矿库), 式(1-10-10)还应考虑风浪爬高  $h_{BB}$ , 即:

$$(H_1 - H_k) \geq (h_j + h_t + e + h_{BB}) \quad (1-10-11)$$

式中  $h_{BB}$ ——风浪爬高, 与坝的上游边坡坡比、水面长度及风力级别有关, 其计算参考有关专业书籍。

下游法和中游法堆坝的尾矿库, 初期尾矿量以生产初期坝上旋流器溢流部分的尾矿量和旋流器非工作时间的全尾矿量之和作为确定初期坝坝高的主要依据。这种情况下的初期坝坝高只需式(1-10-9)和式(1-10-10)进行校核, 而其下游滤水坝应满足堆积坝渗流控制要求。

## 2. 初期坝的结构形式及筑坝材料

初期坝的结构形式可分为两大类: 即透水坝和不透水坝。

透水坝一般是堆石坝, 见图1-10-6, 它是由堆石体、上游面铺设反滤层和保护层构成所谓的透水堆石坝, 利于尾矿堆积坝迅速排水, 降低尾矿坝的浸润线, 加快尾矿固结, 有利于坝的稳定。反滤层系防止渗透水将尾矿带出, 是在堆石坝的上游面铺设的, 另外在堆石与非岩石地基之间, 为了防止渗透水流的冲刷, 也需设置反滤层。堆石坝的反滤层一般由砂、砾、卵石或碎石三层组成, 三层的用料粒径沿渗流流向由细到粗, 并确保内层的颗粒不能穿过相邻的外层的孔隙, 每层内的颗粒不应发生移动, 反滤层的砂石料应是未经风化、不被溶蚀、抗冻、不被水溶解, 反滤层厚度不小于400mm为宜。为防止尾矿浆及雨水对内坡反滤层的冲刷, 在反滤层表面需铺设保护层, 其可用干砌块石、砂卵石、碎石、大卵石或采矿废石铺筑, 以就地取材, 施工简便为原则。如有可能, 可利用矿山剥离废石筑坝, 见图1-10-7。由于透水坝具有拦砂滤水的作用, 能降低堆积坝的浸润线, 对尾矿库的稳定(包括动力稳定)有利, 因此大、中型尾矿库和地震区的尾矿库大都采用



这种坝型。在一些缺乏石料的地区,也有将土坝上游坡建成反滤式坝坡,见图 1-10-8。

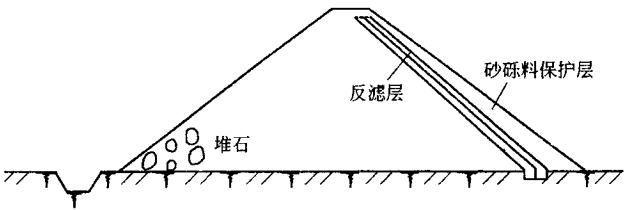


图 1-10-6 透水堆石坝剖面示意图

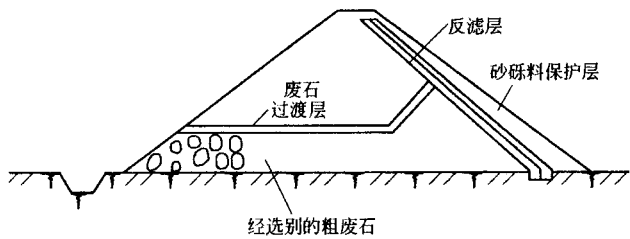


图 1-10-7 透水废石坝剖面示意图

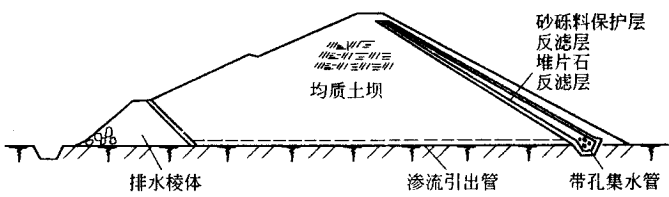


图 1-10-8 反滤式上游坡均质土坝示意图

不透水坝大都是土坝,少数为砌石坝或混凝土坝。由于土坝可就地取材,施工方便,筑坝工艺简单,故得到广泛应用。土坝要求筑坝土料级配良好,压实性好,可得到较高的干容重,较小的渗透系数,较大的抗剪强度。但由于坝体不能起滤水作用,所以堆积坝的浸润线较高,对其稳定不利,故只适用于小型尾矿库,或需在堆积坝内设置大量排渗设施来降低浸润线。实践证明,不透水初期坝的尾矿库,堆积坝的高度超过 20~30m 以后,浸润线会在初期坝顶以上的堆积坝坡逸出,易造成管涌,导致垮坝事故的发生。因此,在采用这种坝型时,一般需采取一些降低浸润线的排渗措施,以利于堆积坝的稳定。

采用中游法堆坝和下游法堆坝的尾矿库,初期坝分成两部分——上游拦挡坝和下游滤水坝。初期坝分别位于最终堆积坝坝轴线的下部和堆积坝的上游坡坡脚,可建成不透水坝。滤水坝总是设在最终堆积边坡下游坡的坡脚,必须采用透水坝。

初期坝的筑坝材料 ,只要分别满足筑坝土料或石料要求即可 ,也可采用任意料 ,但必须经过坝料设计。首先 ,坝料应是渗流稳定的材料 ;此外 ,不同的坝料应堆置在不同的部位 ,如不透水坝的土料 ,透水性小的置于上游坡部位 ,透水性大的置于坝轴线的下游 ,且忌用这两种土料混杂和分层分布 ;对透水坝的石料 ,过水部分应采用稍风化或未风化石料 ,不过水部分可采用任意料。对可能产生渗流破坏的坝料 ,必须采取防止渗流破坏的措施。对坝基土料也应如此。

3. 初期坝的构造

(1)初期坝的坝顶宽度。一般应满足交通要求和坝顶放矿的操作要求 ,但不得小于表 1 - 10 - 6 的值。

表 1 - 10 - 6 坝顶最小宽度表

坝高/m	< 10	10 ~ 20	20 ~ 30	> 30
坝顶宽度/m	≥ 2.5	≥ 3.0	≥ 3.5	0.4

对采用废石堆坝的尾矿库 ,坝顶宽度还应满足排废石的特殊要求。

(2)初期坝的坝基处理。初期坝是一种水工构筑物 ,作为尾矿库基础的初期坝坝基 ,必须严格按水工构筑物有关规范、规程的要求 ,进行认真的处理 ,将初期坝置于稳定可靠的基础上。

①软土地基 ,应按软弱坝基进行处理 ;

②以砂砾(卵)石组成的地基 ,首先应研究有无集中漏水通道和地基本身的渗流稳定性 ,如可能产生集中漏水 ,应以截水墙截断其通道 ;对可能产生渗流破坏的地基 ,应采取防止渗流破坏的措施 ,如铺设反滤层或挖除 ;

③初期坝的反滤层 ,应嵌入强度稳定和渗流稳定可靠的地层中 ;

④初期坝与岸坡接触地段 ,可适当开挖成齿槽 ,反滤层及斜墙应嵌入齿槽内。

(3)初期坝的坝坡。坝坡坡比与坝身结构、坝坝材料的性质、坝基地质条件、施工方法、坝高、地区地震烈度有关 ,一般应通过稳定计算最终确定。

初期坝的静力稳定计算 ,土坝一般采用圆弧滑动法或改良圆弧法进行 ;堆石坝按折线法计算。其动力稳定计算 ,一般采用拟静力法计算 ,其参数的选取 ,应考虑动荷载的影响。

稳定计算是根据拟定的坝剖面进行的 ,一般根据坝料的性质 ,参考类似工程拟定坝剖面 ,也可参考表 1 - 10 - 7 和表 1 - 10 - 8 初步拟定坝坡 ,再进行稳定计算 ,要求边坡稳定最小安全系数达到表 1 - 10 - 9 的要求。

表 1－10－7 土坝边坡参考表

坝 坡	一级坡	二级坡	三级坡	四级坡	五级坡
上游坡	1:2.00～1:2.500	1:2.500～1:2.75	1:2.75～1:3.0	1:3.00～1:3.25	1:3.25～1:3.50
下游坡	1:2.00	1:2.00～1:2.50	1:2.50～1:2.75	1:2.50～1:3.00	1:2.75～1:3.25

注 ①尾矿库初期坝可取上游边坡等于下游边坡值；  
②填土的碾压松散密度( 碾压干容重 )为 1.7～1.8t/m<sup>3</sup>。

表 1－10－8 斜墙堆石坝边坡参考表

坝 坡	一级坡	二级坡	三级坡	四级坡	五级坡
上游坡	1:2.50～1:2.75 <sup>①</sup>				
下游坡	1:3.0～1:5.0				

①堆石的碾压松散密度( 碾压干容重 )为 1.85～2.1t/m<sup>3</sup>。  
注 :初期坝上游坡取决于斜墙及反滤层的稳定 ,由计算确定。一般较表中边坡值陡。

表 1－10－9 边坡稳定最小安全系数表

荷载组合	坝的等级			
	一	二	三	四
基本组合	1.30	1.25	1.20	1.15
特殊组合 <sup>①</sup>	1.20	1.15	1.10	1.05
特殊组合 <sup>②</sup>	1.10	1.05	1.05	1.00

①表中安全系数不适用于动力稳定分析。  
②荷载组合情况见表 1－10－10。

表 1－10－10 荷载组合表

荷载组合		荷载名称					
		设计洪水 位的渗透 压力	坝体 自重	土壤中的 孔隙 水压力	校核洪 水的渗 透压力	地震 荷载	排渗失效时 校核洪水位的 渗透压力
基本组合	总应力法	✓	✓				
	有效应力法	✓	✓	✓			
特殊组合	总应力法		✓		✓	✓	
	有效应力法		✓	✓	✓	✓	
特殊组合	总应力法		✓			✓	✓
	有效应力法		✓	✓		✓	✓

初期坝的下游边坡,每隔 10 ~ 15m 高差设置宽度为 1 ~ 2m 的戗道。土坝的下游坝坡应当根据需要设置坝坡排水,并在坡面种植草皮作为护坡。

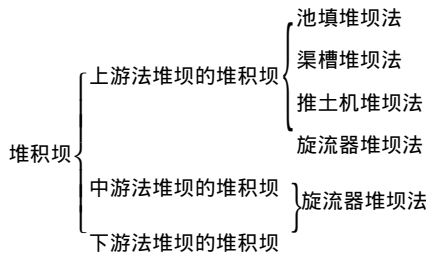
初期坝中的反滤层,是坝体的重要部分,拟在排渗设施中一起讨论。

## (二)尾矿库的堆积坝

堆积坝是指用尾矿本身堆积而成的尾矿堆积体,又称后期堆积坝。

### 1. 堆积坝的形式及堆坝方法

堆积坝的型式与堆坝方法相联系,可概括如下:



一次筑坝的(包括废石筑坝)尾矿库不用尾矿堆坝,故没有堆积坝,是尾矿库的特殊情况。

上游法堆坝的堆积坝,如图 1-10-1 所示。自初期坝坝顶开始以某种边坡比向上游逐渐推进加高,初期坝相当于堆积坝的排水棱体。这种堆积坝堆坝工艺简单,操作方便,基建投资少,经营费低,是我国目前广泛应用的堆积坝坝型。但其支承棱体底部由细尾矿堆积而成,力学性能差,对稳定不利,且这种堆积坝浸润线高,有待改进。

中游法堆坝的堆积坝,如图 1-10-9 所示,是以初期坝轴线为堆积坝坝顶的轴线始终不变,以旋流器的底流沉砂加高并将堆积边坡不断向下游推移,待堆至最终堆积标高时形成最终堆积边坡。旋流器的溢流排入堆积坝顶线的上游。这种堆积坝改善了尾矿库支承棱体的基础条件,支撑棱体基本上由旋流器底流的粗尾矿堆积而成,浸润线也有所降低,对堆积坝的稳定有利,因此生产上希望采用这种堆积坝,但用旋流器筑坝又给生产带来很多麻烦,如旋流器的移动和管理,临时边坡的稳定及扬尘等问题,使其应用受到限制,加之基建投资高,目前实际应用还不多。

下游法堆坝的堆积坝,如图 1-10-10 所示,自初期坝坝顶开始,用旋流器底流沉砂(溢流排入坝内)以某种坡比向下游逐渐加高推移,先逐渐形成上游边坡,直至堆到最终堆积标高时才形成最终下游边坡。这种堆积坝采用大量旋流器底流沉砂筑成堆积坝,彻底改善了支承棱体的基础条件,降低了浸润线,稳定性和抗震性能均好。但旋流器堆坝工作量大,应考虑旋流器底流沉砂量与堆坝工程量的平衡。也存在中游法堆坝所存在的问题,因此目前应用较少。

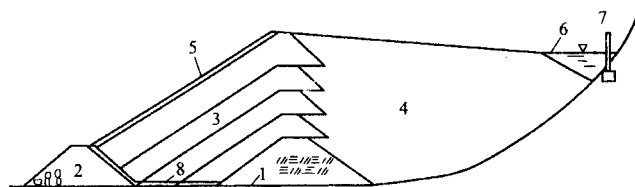


图 1-10-9 中游法堆坝的堆积坝剖面示意图

1—初期坝 2—滤水坝 3—堆积粗尾矿 4—细尾矿 5—护坡；  
6—尾矿池 7—排洪设施 8—排渗设施

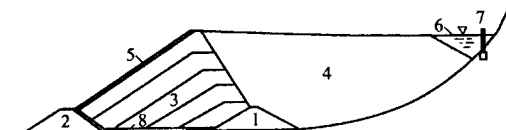


图 1-10-10 下游法堆坝的堆积坝剖面示意图

1—初期坝 2—滤水坝 3—堆积粗尾矿 4—细尾矿 5—护坡；  
6—尾矿池 7—排洪设施 8—排渗设施

## 2. 堆积坝的边坡

堆积坝的边坡应根据尾矿的物理力学指标,参考类似工程初步拟定,也可参考表 1-10-11 拟定,其一般值在 1:3.0~1:5.0 之间,然后进行稳定计算,采用能满足边坡稳定最小安全系数要求的边坡作为设计边坡值。在拟定边坡及稳定计算中,对地震区的尾矿库还应考虑地区的地震烈度。

表 1-10-11 堆积坝边坡参考表

尾矿抗剪强度指标	堆积高度/m (初期坝顶算起)	坝 坡 坡 比	
		沉积滩长度 100~200m	沉积滩长度 200~400m
$\phi = 15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ $C \geq 19.6 \text{ kPa}$	10 以下	1:3.0	1:3.0
	10~20	1:3.0~1:4.0	1:3.0~1:3.5
	20~30	1:3.5~1:5.0	1:3.0~1:4.0
$\phi = 21^{\circ} \sim 25^{\circ}$ $C \geq 9.81 \text{ kPa}$	20 以下	1:3.0	1:3.0
	20~30	1:3.0~1:4.0	1:3.0~1:3.5
	30~50	1:3.5~1:5.0	1:3.0~1:4.0
$\phi = 26^{\circ} \sim 30^{\circ}$	30 以下	1:3.0	1:3.0
	30~50	1:3.0~1:4.0	1:3.0~1:3.5
	50~70	1:3.5~1:5.0	1:3.0~1:4.0

尾矿抗剪强度指标	堆积高度/m (初期坝顶算起)	坝 坡 坡 比	
		沉积滩长度 100 ~ 200m	沉积滩长度 200 ~ 400m
$\phi = 31^{\circ} \sim 35^{\circ}$	40 以下	1:3.0	1:3.0
	40 ~ 70	1:3.0 ~ 1:4.0	1:3.0 ~ 1:3.5

注 适用条件：

- ①初期坝为透水坝 ,初期坝坝高与总坝高的比例 1/4 ~ 1/6 ；
- ②非地震地区 ；
- ③坝基良好 ；
- ④尾矿抗剪强度指标为试验所得的小值平均值。

为了便于检修 ,坝坡上每隔一定高差留一戽道 ,其宽度根据管理和交通条件确定。

坝坡应设护坡 ,以防雨水冲刷和尘土飞扬 ,一般可用山坡土护坡 ,并可以在山坡上种花草或小灌本林 ,禁止种乔木林 ,并设坝坡排水及坝肩排水沟。

3. 堆积坝的稳定及其计算

堆积坝的稳定包括静力稳定、动力稳定和渗流稳定 ,均应进行相应的计算。

静力稳定计算的目的是验证拟定坝坡的稳定安全程度 ,一般采用圆弧滑动法或静力有限元法进行计算 ,要求堆积边坡的最小安全系数满足表 1 - 10 - 9 的要求。

动力稳定分析是为验证坝坡在动力(一般是地震)条件下的稳定性及产生振动液化的可能性、液化的范围及液化深度。一般采用有限元分析法 ,同时采用现场试验进行判别 ,以资互相验证。对一般小型工程 ,可采用拟静力法进行计算。

渗流稳定计算的目的是验算堆积坝在渗流条件下的稳定性 ,是否会产生渗流破坏 ,并应控制渗流出逸坡降小于尾矿的允许坡降。

稳定分析一般按下述步骤进行：

(1)通过工程地质勘察或工程类比的方法取得稳定计算所需资料及参数 ,并拟定计算断面；

(2)进行渗流分析 ,确定堆积坝的浸润线 ,并进行渗流稳定分析 ,求得满足渗流稳定要求的断面；

(3)对不进行动力稳定分析的堆积坝 ,应进行边坡稳定计算 ,求得边坡稳定最小安全系数 ,判断边坡稳定与否 ,若不稳定或安全系数不满足要求 ,应修改断面或采取有利于稳定的工程措施 ,重做渗流分析和稳定计算 ,直至满足边坡稳定最小安全系数要求；

(4)需进行动力稳定分析的尾矿库 ,先进行静力分析确定静力工作状态 ,在此基础上进行动力分析 ,求得动应力及应力水平 ,判断液化与否及液化区的范围。必要时再采用圆弧滑动法进行边坡滑动计算 ,从而确定所拟定的边坡是否稳定 ,如不稳定 ,应修改边坡

或增设有利于稳定的工程措施重新计算 ,直至满足稳定要求。

(三) 排洪构筑物

排洪构筑物是排泄尾矿库内洪水的工程措施 ,是保证尾矿库洪水安全的重要设施 ,一般由溢水构筑物和排水管(洞或渠)及其出口消能设施组成。

1. 尾矿库洪水设计标准

按现行规范规定 ,尾矿库洪水设计标准列于表 1－10－12。

表 1－10－12 尾矿库洪水设计标准

尾矿场等级	1	2	3	4	5
正常运行洪水重现期/a	500	100	50	30	20
非正常运行洪水重现期/a	5000	1000	500	300	200

注 1. 失事后对下游将造成较大灾害的大型尾矿库和重要的中型尾矿库 ,终期应以可能最大降雨量的洪水作为非正常运行洪水标准。

2. 尾矿库的等级应根据不同时期的库容坝高按表 1－10－1 确定。

2. 排水构筑物的形式及其选择

尾矿库排洪构筑物有以下几种形式：

(1) 溢洪道排洪 ,一般布置在坝肩或尾矿库周围的垭口地形上 ,以浆砌片石或混凝土砌筑成的溢流堰、排水陡槽和消力池组成 ,适用于各种大小的泄流量。但对堆积标高不断上升的尾矿库 ,只能用于尾矿库终了以后的排洪或某种特定条件下的临时排洪。一般在一次筑坝的尾矿库中应用。

(2) 斜槽式排洪 ,由斜槽、结合井(消力井)、排水管(或隧洞)及出口消力组成 ,适用于小流量的尾矿库。

(3) 溢水塔式排洪 ,由溢水塔和排水管(或隧洞)及其出口消能设施组成 ,适用于各种流量的排洪。溢水塔有窗口式和框架式两种 ,前者用于小流量 ,后者用于大流量。

以上各种排洪构筑物 ,可根据最大下泄流量选择 ,拟定其尺寸 ,进行水力计算 ,必要时 ,选取不同形式 ,通过经济技术比较确定。

3. 洪水计算的方法和内容

尾矿库洪水计算内容包括设计暴雨、设计洪峰流量、设计洪水过程线及洪水总量 ,并进行调洪计算 ,通过调洪计算确定排洪构筑物的最大下泄流量 ,据此确定排洪构筑物的形式和尺寸。

尾矿库都是没有实测径流资料的小汇水面积 ,只能利用暴雨资料推算设计洪水。洪水计算宜采用多种方法 ,并通过洪水调查进行比较 ,采用接近洪水调查的计算结果。各

省、各地区水文部门编制的水文计算资料及水文图集是水文计算的重要参考资料。

#### (四) 排渗构筑物

排渗构筑物是降低尾矿库浸润线的工程措施。其作用是降低堆积坝的浸润线,以免浸润线在堆积边坡逸出,尽量缩小堆积坝坡的饱和区,扩大疏干区,促进尾矿的排水固结,从而提高堆积坝的稳定性,堆积坝坡面下一定范围内的尾矿被疏干,能有效地防止尾矿砂产生振动液化,提高堆积边坡的动力稳定性。由此可见,排渗构筑物是尾矿库的重要工程设施,特别是大中型尾矿库和强地震区尾矿库不可缺少的设施。

排渗设施设计应以渗流稳定和动力稳定所要求的渗流控制条件为依据。

##### 1. 排渗构筑物的形式及其选择

尾矿库的排渗是近几十年才开始广泛采用的,其结构形式仍在不断发展和完善,目前大致有两类:即水平排渗和垂直排渗。

水平排渗是采用接近水平的排渗盲沟或水平排渗层,将渗水截流汇集起来并集中排出坝外,以达到降低浸润线的目的。如图 1-10-11 所示,其结构形式有无砂混凝土管,带孔钢筋混凝土管(或铸铁管)外包反滤层,还有采用堆石外包反滤层的。实践证明,水平排渗盲沟在粗颗粒尾矿中效果良好,在细颗粒尾矿或水平细尾矿夹层较多的条件下,反滤层容易被堵塞,也难以降低水平细尾矿夹层以上的悬挂水层,一般效果欠佳。

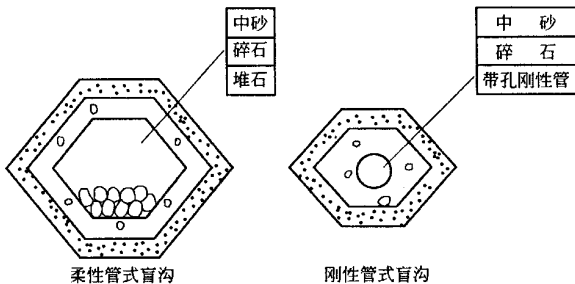


图 1-10-11 几种盲沟形式示意图

垂直排渗是以垂直渗水井汇集渗水集中排出坝外。渗水井的形式有无砂混凝土管井、拼装式带孔钢筋混凝土井圈外包反滤层,也有采用堆石外包反滤层的渗水井。在不能自流的条件下。有的采用潜水泵抽水,因要求泵的抽水能力与井的渗水量一致难以控制,目前应用较少。

无论水平排渗或垂直排渗,其集中起来的渗水需用排水管引出坝外,有时可能通过浸润线以上的疏干区,为防止水流再渗回尾矿内,因此应采用不渗水管引出。

##### 2. 排渗设施的平面布置



排渗设施的平面布置根据尾矿库的地形条件、尾矿的渗透特性和尾矿的堆积高度通过渗流计算或渗流电模拟试验来确定。一般先根据一般原则初拟布置方案,再进行计算或试验,直至满足渗流控制要求。排渗设施平面布置的一般原则为:

(1)排渗设施一般与透水初期坝共同起排渗作用,排渗设施距初期坝坝顶约 1 倍尾矿砂的影响半径处开始布置,对透水初期坝影响不到的堆积坝坝肩或不透水初期坝坝前的堆积坝,应距初期坝坝顶约 0.5 倍尾矿砂的影响半径处开始布置;

(2)堆积坝的浸润线一般在  $1/2 \sim 2/3$  的堆积高度范围逸出(不包括悬挂水的逸出点)故排渗设施只需在此范围内布置,尾矿粒度细者取大值,尾矿粒度粗者取小值;

(3)排渗构筑物的间距,与尾矿砂的影响半径、排渗构筑物尺寸及降水深度有关,一般可取略小于 1 倍影响半径的值;

(4)尾矿堆积体与地形相交处,由于原地面的透水性小,渗流在此条件下产生壅高,在排渗设施影响不到的地段,宜设坝肩排渗盲沟。

### 3. 反滤层的设计和施工

反滤层的设计,一般应通过试验确定参数,再进行设计。在无试验资料的情况下,一般采用工程类比法进行设计。

(1)反滤层必须满足的条件如下:

- ①任意一层的反滤料不应穿过粒径较粗一层的孔隙;
- ②每一层内的颗粒不应发生移动;
- ③被保护土层的颗粒不应被渗水携带出反滤层,但特别微细的土粒是允许被水带走的;
- ④反滤层不应被淤塞,即特别微细的土粒能通过反滤层的孔隙。

(2)反滤层设计控制方法。为满足上述条件,建议用下列方法控制:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 4 \sim 5 \quad (1-10-12)$$

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 5 \quad (1-10-13)$$

式中  $D_{15}$ ——反滤料的粒径,小于该粒径的土占总土重的 15%;

$d_{85}$ ——被保护土的粒径,小于该粒径的土占总土重的 85%;

$d_{15}$ ——被保护土的粒径,小于该粒径的土占总土重的 15%。

对于以下的情况,建议作某些简化后,仍用以上方法初步选择反滤料,然后通过试验确定。

①对于不均匀系数较大的被保护土,可取  $\eta \leq 5 \sim 8$  细粒部分的  $d_{85}$ 、 $d_{15}$  作为计算粒

径。

对于不连续级配的土,应取级配曲线平段以下(一般是  $1 \sim 5\text{mm}$  以下)粒组的  $d_{15}$ 、 $d_{85}$  作为计算粒径。

②不均匀系数  $\eta > 5 \sim 8$  的砂砾石作为反滤料第一层时:

选用小于  $5\text{mm}$  以下的细粒部分的  $D_{15}$  作为计算粒径;

要求大于  $5\text{mm}$  的砾石含量应  $\leq 60\%$ 。

③不能以上述方法确定的反滤料,均应由试验确定。

反滤层的施工是一项较细致的工作,一则厚度小,不便于大机械施工;二则质量要求严格,必须精心施工才能达到要求。首先应按设计要求选择合适的料场,按要求的粒径、级配、不均匀系数、含泥量等进行精心备料;同时,按照有关规范和设计要求进行反滤层的基础处理,做好铺填反滤层的准备。铺填反滤层时,必须严格控制厚度,一般宜每  $10\text{m}$  设一个样板,并经常检查。砂和砾料应适当洒水,相邻层面必须拍打平整,保证层次清楚,互不混杂。铺好反滤层后,应铺填保护层。在施工过程中,搬运反滤料时应保持湿润状态以免颗粒分离,防止杂物或不同规格物料混入。铺填反滤层须自底部向上进行,不得从坡面上向下倾倒,分段铺筑时,必须做好接缝处各层之间的连接。反滤层施工应按有关施工技术规范进行,每道工序经过验收合格后,方可进行下一道工序的施工。

化纤反滤布是反滤层的良好代用料,其施工方便,比较经济,现在在尾矿库设计中已有大量应用,今后应进一步加强试验研究,使其更适合尾矿库反滤层的设计要求。目前反滤布的应用中要注意反滤布的透水性与尾矿的透水性相适应,特别是与在高压状态下的透水性要相适应。

### (五)尾矿库的回水构筑物

很多选矿厂利用尾矿库的回水代替水源供水,取得了良好的经济效益,节省了能源,避免了与农民争水,也减少了对下游的污染。

决定尾矿库是否回水,主要根据技术经济比较确定,有时也根据环境保护要求而决定回水。

尾矿库回水的回水量,应根据来水量、用水量及损失水量,通过水量平衡计算确定。

尾矿库回水往往与堆积坝的安全有矛盾。堆积坝的稳定要求沉积滩有一定长度,也就是对尾矿池的池水位与堆积坝坝顶之间的高差有一定要求,为了多回水,又希望这个高差要小,以便多蓄水。此时,堆积坝的稳定是主要的,回水应服从坝体稳定的要求。

随取水方式的不同,有不同的取水构筑物,见表  $1-10-13$ 。

表 1－10－13 取水构筑物形式一览表

型 式		配 置 特 点	优 缺 点
固 定 式 泵 站	坝内式	于池内、岸边设临时泵站吸水 ,随池内水位升高 ,定期移动泵站位置	( 1 )可利用池内水头 ; ( 2 )泵站多
	坝外承压式	在坝外排水管出口处设置泵站取水 ,水泵的吸水管与排水管直接连接	( 1 )可充分利用池内水头 ; ( 2 )排水管承受内水压力 ,一旦损坏 ,影响回水
	坝外吸入式	在坝外排水管出口设集水池和泵站	( 1 )设备简单 ; ( 2 )操作管理方便 ; ( 3 )不能利用池内水头
移 动 式 泵 站	缆车式	在池内岸边设斜坡卷扬和缆车	( 1 )可充分利用池内水头 ; ( 2 )能适应较大的风浪 ; ( 3 )投资较高 ,管理较麻烦
	围船式	在池内设围船式泵站	( 1 )可充分利用池内水头 ; ( 2 )船体维护检修较频繁 ; ( 3 )取水较缆车灵活

( 六 )排水沟

为了确保尾矿库的安全和便于尾矿库的管理 ,还应根据需要设置下述排水沟。

1. 坝肩排水沟

为防止尾矿库两坝肩以上山坡的洪水冲刷坝坡 ,需在坝肩坚实地基上修建浆砌片石或混凝土排水沟 ,其断面尺寸一般应通过洪水计算及水力计算确定。

2. 坝坡排水沟

为防止暴雨径流冲刷尾矿库的边坡 ,不仅要采取护坡措施 ,还应设置坝坡排水沟。一般每隔 10 ~ 15m 高设一条水平排水沟 ,向两坝肩流入坝肩排水沟 ;当堆积坝轴线较长时 ,宜设人字形排水沟。

( 七 )尾矿库的管理设施

1. 观测设施

为了监测尾矿库的运行情况 ,需设置长期观测设施。观测设施的项目包括 :位移观测、渗水量及水质观测、水位观测、浸润线观测和孔隙水压力观测等。大型尾矿库应设置较全面的观测设施 ,其他尾矿库也应视具体情况设置必要的观测设施。

2. 管理设施

为方便尾矿库的维护与管理 ,应适当配备下述设施 :

( 1 )值班房 :包括值班室、工具室、器材室、会议室等。

(2) 机具 :主要是筑坝机具 ,如推土机、装载机具及水上交通工具等。必要时可设简易检修设施。

(3) 其他附属设施 如道路、照明、通讯设施等。

对远离厂区的尾矿库 ,必要时应配备生活福利设施。

### 三、尾矿库的维护管理

尾矿库是一种边施工边生产的工业设施 ,其维护管理过程既是生产管理过程 ,又是尾矿库加高的施工过程 ,因此 ,尾矿库的维护管理具有特殊重要的意义。尾矿库的管理部门既是生产组织机构 ,又是施工组织机构。

尾矿库维护管理的基本任务是根据尾矿库生产运行的客观规律和设计要求 ,组织好尾矿堆积坝的堆坝施工、尾矿的正常排放、尾矿澄清水的回收及尾矿设施的检查维修。

#### (一) 尾矿排放及尾矿堆坝

尾矿排放过程就是尾矿堆积坝加高的施工过程 ,是相互联系和密切相关的。

##### 1. 尾矿排放

尾矿库的堆坝方法决定了尾矿的放矿方式及放矿位置。采用一次筑坝的尾矿库 ,放矿灵活 ,可以分散放矿 ,也可集中放矿 ,放矿位置可以在尾矿水澄清区以外的任何位置。上游法堆坝的尾矿库 ,一般采用坝前分散放矿 ,除冰冻期采用冰下集中放矿或溶岩地区尾矿库要求周边放矿外 ,不允许在任意位置放矿 ,也不能集中放矿。中游法和下游法堆坝的尾矿库 ,一般采用旋流器分级放矿 ,旋流器沉砂用来堆坝 ,溢流放入坝内。为了保证堆坝所需的旋流器沉砂量 ,不能无故不经旋流器分级就直接往坝内放矿。

对高浓度堆坝及高浓度放矿 ,比中低浓度有明显的差别 ,如放矿口的大小、间距需要改变 ,沉积滩纵坡变陡 ,粗细粒尾矿的分布规律等均会发生变化 ,这些都需通过试验和生产实践不断积累经验 ,逐步解决放矿过程中出现的新问题。

尾矿排放应注意以下问题 :

(1) 保持均匀放矿 ,使尾矿沉积滩均匀上升 ;

(2) 放矿过程中 ,不能出现沿子堤上游坡脚的集中矿浆流和旋流 ,以免形成冲刷。如出现这种情况 ,应移动放矿口矿浆的落点 ,或以尾矿堆消除此种水流 ,或以草袋护坡脚 ;

(3) 冰冻季节宜采取库内冰下集中放矿 ;

(4) 尾矿排放过程中 ,应避免在沉积滩面形成大面积的细尾矿及矿泥层。如生产过程中出现短时间含泥量大的细尾矿波动情况 ,应在尾矿池内放矿 ,放矿过程中最末两个放矿口尾矿粒度过细的条件下 ,此种放矿口的尾矿直接至尾矿池内排放。

### 2. 尾矿堆坝

堆筑堆积坝是尾矿库生产管理中工作量较大的施工内容,其质量好坏关系到尾矿库的安全,因此原则上应按设计规定的堆坝方法和有关的操作规程进行堆筑。

(1)应与设计部门密切配合,不断总结堆坝经验,不断探索和创造堆坝新工艺、新技术。

(2)堆坝过程中,应按设计边坡、设计平台宽度堆筑,不得任意改陡边坡,也不宜未经设计同意放缓边坡可在坝坡上留宽平台。

(3)为保证堆坝质量良好,原则上应以粗颗粒尾矿堆坝,当原尾矿出现含泥量过大的波动时,应暂时停止堆坝,并将此时的尾矿送入尾矿池排放,待尾矿粒度正常后继续堆坝。冰冻季节不宜堆坝。若未采用水力冲积堆坝,必须分层碾压密实。

(4)应保持堆积坝顶均匀上升,每次堆坝结束,不应出现缺口或低标高地段。

(5)沉积滩范围内(包括两侧的天然冲沟)如出现独立的积水区时,应及时放矿充填。

(6)当尾矿堆坝改为废石堆坝或需采用废石压坡时,要求废石部分有足够的基础宽度,不允许以堆积边坡为基础,基础宽度应通过稳定计算确定。堆废石时,应由初期坝坡脚开始自下而上的逐渐堆高,不允许在堆积坝顶或堆积边坡的戗道上自上而下地翻倒废石。

(7)堆积坝每堆成一段,应及时进行护坡,修好排水沟。

(8)尾矿库堆积到设计最终堆积标高以后,应进行善后处理设计,未取得设计部门的加高设计,不允许继续加高使用。

### (二)有关水的控制

水是影响尾矿库稳定和安全的關鍵性因素之一,所以必须控制得当。这里所说的水包括地下水和地表水两部分。

#### 1. 地表水的控制

尾矿库地表水的来源有3个方面:尾矿浆带来的尾矿水、周围地区渗入尾矿库的地下水和天然降水。前已述及,尾矿库堆积边坡及两坝肩的地表水通过坝坡坝肩排水沟排出坝外,其余的水都汇集在尾矿池内形成积水区,其水位称池水位(或库水位),控制尾矿池内的水位是尾矿库地表水控制的主要内容。

(1)首先应保证尾矿库的排洪、排水系统的畅通,为尾矿池的水位控制创造良好的条件。

(2)尾矿池的最低水位(控制水位)应满足尾矿水澄清的要求,在满足澄清距离要求的条件下,尾矿池水位越低,对尾矿库的稳定有利,也对尾矿库的防洪有利。

(3)尾矿池的水位至沉积滩坡顶标高之间的高差应满足回水蓄水水深、调洪水深和安全超高的要求,同时安全超高相应的沉积滩长度应满足最小沉积滩长度的要求。各个时期的调洪水深和安全超高(或最小沉积滩长度)是必须保证的,其他任何矛盾均应服从此要求。

(4)尾矿池的最高洪水位应满足堆积坝稳定的要求,也就是最小沉积滩长度要求,最高洪水位时的沉积滩长度应大于或等于最小沉积滩长度,否则应降低控制水位或增大泄洪能力。

2. 尾矿库的度汛

汛期是尾矿库地表水控制的关键时期,如果这个时期尾矿池水位控制不当,洪水暴发时可能造成洪水漫顶,引起溃坝事故。因此每年汛期前应做好度汛准备和排洪验算。

度汛准备包括防洪抢险所需的物资、材料、用具等的准备和防洪抢险组织准备、人员组织准备,一旦发现险情,有物质、用具随时取用,立即能有劳动大军投入,随时会有人组织,以免失去抢险战机。

汛期前的洪水验算也是度汛准备的重要部分,洪水验算可靠并得到实现,正常情况下就可能实现安全度汛或减少险情。所以汛期前的洪水验算是重要的一环。汛期前洪水验算的主要内容是验算在已建成的泄水构筑物之泄水能力条件下的调洪库容、安全超高及沉积滩长度是否符合设计要求。洪水验算可按下述步骤进行(参考图 1-10-4):

(1)实测汛期前沉积滩顶最低标高  $H_1$ (相当于图中的  $H_m$ )、汛期前尾矿池水位  $H_3$ (相当于图中的  $H_k$ )。

(2)确保本汛期允许的最高洪水位  $H_2$

$$H_2 = H_1 + e \tag{1-10-14}$$

式中  $e$ ——防洪安全超高,由规范中确定,现行规范规定见表 1-10-14。

表 1-10-14 防洪坝顶安全超高表 (m)

坝的等级 运行情况	一	二	三	四
正常	2.0	1.5	1.0	0.7
非正常	1.5	1.0	0.7	0.5

(3)实测  $H_2$  所相应的沉积滩长度  $L_1$ ,取沉积滩上  $L_1$  的最小值,此值应大于或等于设计提出的最小沉积滩长度要求,否则应降低  $H_2$ ,使其达到此要求。

(4)实测尾矿库内  $H_2$ 、 $H_3$  相应的面积  $S_2$  和  $S_3$ 。

(5) 计算调洪库容  $V_T$ 。

$$V_T = \frac{S_2 + S_3}{2} \times (H_2 - H_3) \quad (1-10-15)$$

(6) 判断实际调洪库容  $V_T$  是否满足设计提出的调洪库容  $V_P$  的要求：

$$V_T \geq V_P$$

若不满足此要求，应降低  $H_3$ ，使其满足要求。若降低  $H_3$  以后不满足澄清距离要求，应与设计部门联系，采取其他措施。

(7) 需要在汛期蓄水供回水用的尾矿库， $V_P$  应加上回水蓄水库容进行判断。

### 3. 地下水的控制

这里所说的地下水，主要是指尾矿库渗流水。

(1) 对中、小型尾矿库，堆积坝的浸润线，除按设计浸润线控制外，浸润线不宜在坝坡逸出，如有逸出，应观测其水量和水质，判断其渗流稳定性，一般水质清澈者为正常稳定渗流，如水质浑浊，说明已出现渗流破坏，此时宜降低尾矿池水位，并立即以反滤料或反滤布铺盖，再加适当的压重。如渗水量突变，应分析其原因和加强观察。比较彻底的办法是采取降水措施，使其不在坝坡上逸出。

(2) 对大型尾矿库和地震区的尾矿库，为满足堆积坝稳定性的要求，要求浸润线有一定的埋深，这种尾矿库应定期进行浸润线观测，控制其低于设计提出的控制浸润线。如实测浸润线高于控制浸润线，应分析其原因，与设计部门联系，采取适当工程措施进行处理。

### (三) 尾矿库的监测

监测是了解尾矿库运行情况的重要手段，也是尾矿库安全的指示灯，所以尾矿库的监测工作是尾矿库管理的重要内容。

对设置有观测设施的尾矿库，应充分利用这些设施加强观测，首先应组织监测小组，并制定专门的监测制度和操作规程，进行定期观测。观测成果应及时整理、分析、归档，不断积累观测资料。未设置观测设施的尾矿库，应创造条件设置观测设施，或采取简易的办法加强观测。

对尾矿库进行巡回检查是及时发现尾矿库异常情况的重要途径，应纳入尾矿库管理人员的岗位责任制。检查的内容包括：尾矿库边坡有无变形和异常；排水构筑物是否畅通；排渗设施的水量、水质有无异常变化；尾矿排放是否正常、有无漏矿现象；矿浆流是否产生冲刷；回水的水质是否符合要求等。如发现异常，应及时处理，如不能处理，应立即上报，以便进一步采取措施。

(四)尾矿库的维修

进行尾矿库的维修是尾矿库管理的基本任务的一部分。每年洪水期和化冰期后 ,应进行一次全面检查和分析 ,列出维修项目和补充措施项目 ,安排维修计划 ,要求按时完成。如有地震预报 ,应组织设计与有关部门共同研究 ,提出尾矿库抗震方案 ,并抓紧实施。

平时巡回检查发现的问题 ,应及时处理 ,如填补塌坑、冲沟 ,修补排水设施 ,清除排水设施内的淤积物等。

(五)尾矿库的事故及其处理措施

在尾矿库的生产运行过程中 ,难免会出现一些异常、事故 ,对这些现象 ,必要时首先采取应急措施 ,然后分析其原因 ,确定处理措施。部分异常迹象的处理措施见表 1－10－15。

表 1－10－15 尾矿库事故迹象及处理措施参考表

迹 象	原 因	处 理 措 施
坡脚隆起	坡脚基础变形	先降库水位 ,再坡脚压重
坝坡渗水及沼泽化	浸润线过高	先降库水位 ,加长沉积滩 ,采取降低浸润线措施
	不透水初期坝导致浸润线高	在略高于初期坝顶部部位设排渗设施
	矿泥夹层引起悬挂水的逸出	打砂井穿透矿泥夹层
坝坡或坝基冒砂	渗流失稳	先降库水位 ,铺反滤布 ,压上碎石或块石 ,设导流沟 ,必要时加排渗设施
坝坡隆起	边坡太陡	先降库水位 ,再放缓边坡或加固边坡
	矿泥集中 ,饱和强度太低	先降库水位 ,加排渗设施或加固边坡
坝坡向下游位移或沿坝轴向裂缝	基础强度不够	先降库水位 ,坝坡脚压重加固基础
	边坡剪切失稳	先降库水位 ,再降低浸润线或加固边坡
堆积坝塌陷	排水管破坏或漏矿	先降库水位 ,加固或新建排水管 ,再填平塌坑
	排渗设施破坏	先降库水位 ,再抛少量小块石 ,再抛碎石、砂 ,或开挖处理
	岩溶溶洞塌陷	先降库水位 ,抛树枝、块石、碎石、砂 ,再以黏土分层夯实填平
洪水位过高	调洪库容小或泄水能力小	先降低控制水位 ,改造排洪设施 ,增大泄水能力或利用后期排洪设施截洪



## 第二节 尾矿的输送系统

### 一、干式选矿厂尾矿

尾矿一般可采用箕斗或矿车、皮带运输机、架空索道或铁道列车等运输。

利用箕斗或矿车沿斜坡轨道提升运输尾矿,然后倒卸在锥形尾矿堆上,这是一种常用的方法。根据尾矿输送量的大小可采用单轨或双轨运输。地形平坦,尾矿库距选矿厂较近时可采用此法输送。

利用铁路自动翻车运输尾矿向尾矿场倾卸,此方案运输能力大,适用于尾矿库距选矿厂较远,且尾矿库是低于路面的斜坡场地。

利用架空索道运输尾矿,适于起伏交错的山区,特别是业已采用架空索道输送原矿的条件,可沿索道回线输送废石,尾矿场在索道下方。

利用移动胶带运输机输送尾矿,运至露天扇形底的尾矿堆场。适于气候暖和的地区,距选矿厂较近。

### 二、湿式选矿厂尾矿

尾矿多以矿浆形式排出,所以必须采用水力输送。常见的尾矿输送方式有自流输送、压力输送和联合输送三种。

自流输送是利用地形高差,使选厂的尾矿矿浆沿管道或溜槽自流到尾矿库。自流输送时,管道或溜槽的坡度应保证矿浆内的固体颗粒不沉积下来。这种方式简单可靠,不需动力。

压力输送是借助砂泵用压力强迫扬送矿浆的方式。由于砂泵扬程的限制,往往需设中间砂泵站和压力管道进行分段扬送,故比较复杂。在不能自流输送时,只能用这种方式。

联合输送即自流输送与压力输送相结合的方式。某段若有高差可利用,可采取自流输送,某段不能自流,则采用砂泵扬送。

尾矿输送系统一般应有备用线路。特别是压力输送时应进行定期检修。

为应付意外事故,应该在某些地段设事故沉淀池。

## 第十一章 尾矿水的净化与回水利用

尾矿水成分与原矿矿石的组成、品位及选别方法有关,其中可能超过国家工业“三废”排放标准的项目有:pH 值、悬浮物、氰化物、氟化物、硫化物、化学耗氧量及重金属离子等。

### 第一节 尾矿水的净化

尾矿水的净化方法,取决于有害物质的成分、数量、排入水系的类别,以及对回水水质的要求。常用的方法有:

- (1)自然沉淀。利用尾矿库(或其他形式沉淀池),将尾矿液中的尾矿颗粒沉淀除去。
- (2)物理化学净化。利用吸附材料将某种有害物质吸附除去。
- (3)化学净化。加入适量的化学药剂,促使有害物质转化为无害物质。

#### 一、尾矿颗粒及悬浮物的处理

主要是利用尾矿库使尾矿水在池中进行沉淀,以达到澄清的目的。如尾矿颗粒的粒径极细(如钨锡矿泥重选尾矿,某些浮选尾矿),尾矿水往往呈胶状,为了使尾矿水很快地澄清,可加入凝聚剂(如石灰,硫酸铝等),以加速颗粒的沉淀。

如某锡矿选厂的尾矿,其颗粒粒径极细,经 20 昼夜的沉淀后,还不能澄清。但在每  $1\text{m}^3$  尾矿水中加入 75g 有效成分为 40% 的石灰溶液后,尾矿即能很快沉淀,沉淀约 2h

后 ,透明度达 300mm。

二、尾矿水的净化方法

尾矿水中如含有铜、铅、镍等金属离子时 ,常采用吸附净化的方法予以清除。常用的吸附剂有白云石、焙烧白云石、活性炭、石灰等。净化前 ,需将吸附剂粉碎到一定的粒度 ,然后与尾矿水充分混合、反应 ,达到沉淀净化尾矿水之目的。

铅锌矿石粉末有吸附有机药剂的特性 ,因此常用以清除黄药、黑药、松节油、油酸等有机药剂。用量为每 1mg 有机药剂需耗 200mg 的铅锌矿石。

尾矿水如含有单氰或复氰化合物时 ,一般常用漂白粉、硫酸亚铁和石灰作净化剂进行化学净化。也可以采用铅锌矿石和活性炭作为吸附剂 ,进行吸附净化。

总之 ,尾矿水的净化方法主要根据尾矿水中含有的有害物质种类及要求净化的程度来选择。同时应该考虑优先采用净化剂来源广、工艺简单、经济有效的方法。常用的尾矿水净化方法归纳如下 ,见表 1－11－1。

表 1－11－1 尾矿水净化方法

净化方法	适用范围	净化方法	适用范围
石 灰	清除铜、镍离子	漂白粉	清除氰化物
未焙烧的白云石	清除铅离子	硫酸亚铁	清除氰化物
焙烧的白云石	清除铜、铅离子	活性炭	吸附重金属离子 吸附氰化物
铅锌矿石粉末	清除有机的浮选药剂 清除氰化物		

一些净化方法、净化效果见表 1－11－2、表 1－11－3。

表 1－11－2 石灰、漂白粉对有机选矿药剂的净化效果

投加药剂名称	投加量/g·L <sup>-1</sup>	尾矿水中黄药含量/mg·L <sup>-1</sup>	
		处理前	处理后
石灰	0.33	0.28	0.028
石灰	0.66	0.28	0.025
石灰	0.99	0.33	0
漂白粉	0.17	0.71	0.002
漂白粉	0.33	0.70	0.002
石灰	0.33	1.4	0

投加药剂名称	投加量/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	尾矿水中黄药含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
		处理前	处理后
石灰	0.66	1.2	0
石灰	0.99	1.8	0
漂白粉	0.17		
漂白粉	0.33		

表 1－11－3 活性炭吸附法处理效果

投加量/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	尾矿水中黄药含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		尾矿水中松根油含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
	处理前	处理后	处理前	处理后
16	0.23	0.002	2.8	0
33	0.71	0	1.8	0

第二节 回水再用

尾矿水循环再用 ,并尽量提高废水循环的比例 ,以达到闭路循环 ,这是当前国内外废水治理技术的重点。只有在不能做到闭路循环的情况下 ,才作部分外排。尾矿废水经净化处理后回水再用 ,既可以解决水源 ,减少动力消耗 ,又解决了对环境的污染问题。据资料报道 ,美国有六个选矿厂的废水回用率达 95%。

尾矿回水一般有下列几种方法：

一、浓缩池回水

由于选矿厂排出的尾矿浓度一般都较低 ,为节省新水消耗 ,常在选矿厂内或选矿厂附近修建尾矿浓缩池或倾斜板浓缩池等回水设施进行尾矿脱水 ,尾矿砂沉淀在浓缩池底部 ,澄清水由池中溢出 ,并送回选矿厂再用。浓缩池的回水率一般可达 40% ~ 70% 以上。大型选矿厂或重力选矿厂 ,采用浓缩池回水 ,一方面可在浓缩池中取得大量回水 ,减小供水水源的负担 ;另一方面 ,由于提高了尾矿浓度而使尾矿矿浆量减小 ,因此可降低尾矿的输送费用。

### 二、尾矿库回水

将尾矿排入尾矿库后,尾矿矿浆中所含水分一部分留在沉积尾矿的空隙中,一部分经坝体池底等渗透到池外,另一部分在池面蒸发。尾矿库回水就是把余留的这部分澄清水回收,供选矿厂使用。由于尾矿库本身有一定的集水面积,因此尾矿库本身起着径流水的调节作用。

尾矿库排水系统常用的基本形式有:排水管、隧洞、溢洪道和山坡截洪沟等。应根据排水量、地形条件、使用要求及施工条件等因素经过技术经济比较后确定所需要的排水系统。对于小流量多采用排水管排水;中等流量可采用排水管或隧洞,大流量采用隧洞或溢洪道。排水系统的进水头部可采用排水井或斜槽。对于大中型工程如果工程地质条件允许,隧洞排洪常较排水管排洪经济而可靠。国内的尾矿库一般多将洪水和尾矿澄清水合用一个排水系统排放。尾矿库排水系统应靠在尾矿库一侧山坡进行布置,选线力求短直,地基均一,无断层、滑坡、破碎带和弱地基。其进水头部的布置应满足在使用过程中任何时候均可以进入尾矿澄清水的要求。当进水设施为排水井时,应认真考虑其数量、高程、距离和位置,如第一井(位置最低的)既能满足初期使用时澄清距离的要求,又能满足尽早地排出澄清水供选矿厂使用的要求,其余各井位置逐步抬高,并使各井筒有一定高度的重叠(重叠高度 $\Delta h = 0.5 \sim 1.0\text{m}$ ),图 1-10-1 已示出。澄清距离的目的是确保排水井不跑浑水。当尾矿库受水面积很大,在短时间内可能下来大量洪水。为能迅速排出大部分或部分洪水,可靠尾矿库一侧山坡上,在尾矿坝附近修筑一条溢洪道。所有流经排水系统设施的排水井窗口、管道直径、沟槽断面、隧洞断面等尺寸和泄流量需经计算后再结合实际经验给予确定。

尾矿库回水率一般可达 50%。如矿区水源不足,尾矿库集水面积较大,并有较好的工程地质条件(如没有溶洞、断层等严重漏水的地质构造),则回水率可高达 70%~80%。

尾矿库回水的优点是:回水的水质好,有一部分雨水径流在尾矿库内调节,因此回水量有时会增多。缺点是回水管路长,动力消耗大。

### 三、沉淀池回水

沉淀池回水的利用,一般只适用于小型选矿厂。由于沉淀在池底的尾矿砂,需要经常清除,花费大量人力,故选矿厂生产规模大、生产的年限长时,不宜采用沉淀池回水。