

## 第十三章 固体废物处置

在铀矿的开采和加工过程中，会产生相当数量的固体废物。这些固体废物由于存在放射性，必须妥善处置，以免对环境造成污染。

### 13.1 固体废物的来源

#### 13.1.1 采矿过程产生的固体废物

在铀矿的开采过程中，会产生大量的废矿石和表外矿石。

对于露天开采的铀矿，开采时需要首先剥离围岩，一般剥采比为 4~6，最大可能达到 10。也就是说，露天开采 1 t 铀矿石约产生 4 t~6 t 废石<sup>[13.1]</sup>。

对于地下开采的铀矿，在开拓和采准的过程中，需要开掘一系列的巷道，建立必要的工作环境，也必然产生大量的废矿石和表外矿石。地下开采 1 t 铀矿石约产生 0.6 t~1.6 t 废石，废石和表外矿石的铀含量为 $(1\sim3)\times10^{-4}$  g/g，镭含量为 $(0.1\sim20)\times10^{-8}$  g/g<sup>[13.1]</sup>。

在采矿过程中产生的固体废物数量大，因此一般都需要单独设立废石场。尤其是铀品位低于工业品位的表外矿石，由于在矿石中存在少量的铀和镭，需要集中管理，以免污染环境。

#### 13.1.2 铀矿加工过程产生的固体废物

通过各种浸出方法从铀矿石中提取铀以后，矿石就成为尾矿。但是，在尾矿中仍然存在少量的铀和镭，一般来说，尾矿中的铀含量为 $(0.8\sim3)\times10^{-4}$  g/g，镭含量为 $(0.2\sim15)\times10^{-7}$  g/g，生产 1 t 铀浓缩物约产生 1200 t~2400 t 尾矿<sup>[13.1]</sup>。因此，尾矿的处置是铀矿加工厂的重要问题，一般来说，需要建立专门的尾矿库存放尾矿。

除了尾矿以外，在铀矿加工过程中存在相当数量的需要处理的废水，对废水采用共沉淀法处理后，必然产生大量沉淀物（污泥），这些具有放射性的污泥也必须妥善处置，除了在流程中返回使用的以外，也需要送到尾矿库存放。

### 13.2 固体废物的处置方法

#### 13.2.1 废石场

废石场是用来堆放采矿过程所产生废石的专门场地，大多数选择在矿山附近地区，多数场地是山谷型。为了防止洪水冲毁废石堆，造成大面积污染，必须在废石场的上坡边缘修建完整而有效的排洪沟系统，使洪水不能进入废石堆。同时，在废石场的下边缘需要修建拦石墙（坝），保证废石堆的边坡稳定，也避免废石堆被洪水冲散。

对于具有一定放射性的废石堆，包括表外矿石，除了采用专门场地尽可能进行堆浸处理以外，为了避免表外矿石以及所产生的氢气污染环境，需要在废石堆表面覆土，在覆土层上再进行人工植被（种草或种树）。

利用矿山的采空区回填采矿废石和表外矿石，是一种既经济又安全的处置方法，郴州铀矿就采用这个方法回填了几乎全部采矿废石，既节省了资金，又减轻了对周围环境的放射性污染<sup>[13.2]</sup>。

### 13.2.2 尾矿库

尾矿库是存放铀矿加工厂浸出矿石后产生的尾矿矿浆和其它含铀或镭的放射性浆体（污泥）的专门场地。这些固体废物以浆体状态用泵和管道从铀矿加工厂送到尾矿库，在尾矿库澄清以后的水，可以通过尾矿库的排水（或回水）装置，返回铀矿加工厂使用。尾矿库的一般形式，见图 13-1<sup>[13.2]</sup>。

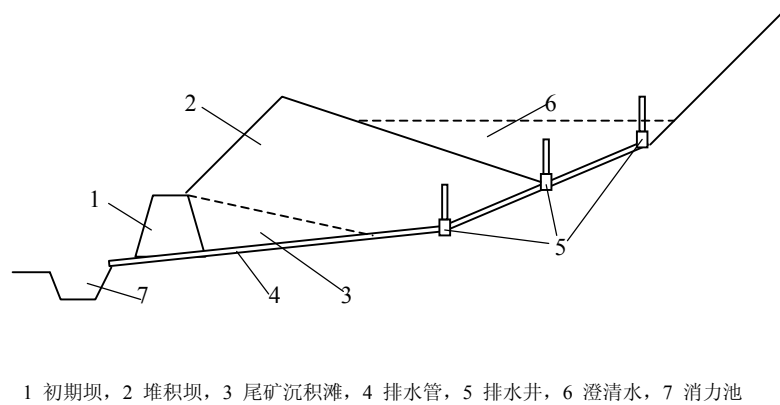


图 13-1 尾矿库示意图

#### 13.2.2.1 尾矿库场地的选择

尾矿库的型式通常分为三大类：山谷型、山坡型和平地型。山谷型是利用四面由山坡包围，只有一个谷口的地形特征，在谷口筑坝形成尾矿库。山谷型尾矿库的初期坝短，工程量和基建费用省，管理维护简单，是尾矿库首选的方案。只有在没有合适的山谷做尾矿库时，才按照地形特征选择山坡型（以山坡为依托，两面或三面筑坝）或平地型（在平地四面筑坝）的尾矿库。

选择尾矿库场地的原则为：

- （1）尽量不占或少占耕地，尽可能不拆迁或少拆迁居民住宅。
- （2）要有足够储存尾矿的容积。
- （3）尾矿库的汇水面积要尽可能小，库区内工程和水文地质条件较好。尽可能减少库区水的渗漏，必要时修筑拦洪坝，避免洪水涌入。
- （4）库区离厂区和居民区的距离，符合环保和工业卫生的要求。
- （5）库区附近要有足够的土、石筑坝材料。

尾矿库的基建投资取决于工程量和尾矿输送距离，见表 13-1<sup>[13.3]</sup>。

表 13-1 尾矿库的基建投资

厂、矿	仁化铀矿	赣州铀矿	若尔盖铀矿	息峰铀厂
初期坝土石方 / m <sup>3</sup>	35000	25900	145249	70000
初期坝高度 / m	22	17.5	40	28
尾矿输送扬程 / m	127	50	自流	
尾矿输送距离 / (m • t <sup>-1</sup> )	1100		1670	2500
基建投资 / 万元	885.2	361.6	721.1	1381.2

1980 年 ~ 1985 年的单项工程决算

13.2.2.2 尾矿坝

尾矿坝是尾矿库的主要建筑物。通常，尾矿坝由两部分组成：在尾矿库使用前修建的初期坝和尾矿库使用后由尾矿堆积形成的堆积坝。当尾矿不能堆坝或不允许堆坝时，需要一次性建成较高的初期坝，用以储存全部尾矿。

13.2.2.2.1 初期坝

初期坝一般应当采用堆石透水坝，有利于由尾矿形成的堆积坝排水固结和降低堆积坝内的浸润线。坝址应当选择在稳定的基岩或地层上，避开有断层、溶洞、泉眼或淤泥层的地方。

土坝由于渗透性差，不利于上部堆积坝内的渗水排出，使堆积坝不容易固结，造成堆积坝内的浸润线较高，容易出现管涌、流土，甚至于局部滑坡。因此，初期坝一般不采用土坝。

初期坝高应达到以下要求：保证所形成的库容能储存半年至一年的尾矿量；尾矿浆在尾矿库的沉淀池内有足够的澄清距离，以保证排水的水质符合环保要求；在预计的洪水条件下，尾矿库有足够的调洪库容和安全的尾矿坝高度。

初期坝的宽度一般为 2.5 m ~ 4 m，下游坡为 1/(1.3 ~ 1.5)，上游坡为 1/(1.5 ~ 1.75)。当坝高超过 15 m 时，在下游坡增设马道，马道宽度为 1 m ~ 2 m；在上游坡可以用砂石料或土工布设置反滤层<sup>[13.2]</sup>。

13.2.2.2.2 堆积坝

当尾矿库内的尾矿沉积滩逐渐升高，接近初期坝顶时，可以继续利用尾矿冲积，形成一个稳定的、有比较规则外坡的堆积体，即：尾矿堆积坝。

堆积坝可以采用多种筑堆方式，最常用的是冲积法，也就是把放矿管设置在坝顶，向坝内冲填尾矿，随堆积坝高度的增加，逐步提高放矿管的位置，逐层堆积。

排放的矿浆液固比要适当，避免出现液固比过大，把已沉积的细泥冲走，影响砂粒之间的团聚性能，从而影响堆积坝的稳定性。沉积的尾矿浆应当是粗砂和细泥混杂，只在沉积层的最上面有一层致密而粘性很强的细泥，成为层与层之间天然的粘结剂。尾矿浆的 pH 值必须大于 7，可以保证马鞭草的生长，起到凝土固砂作用<sup>[13.4]</sup>。

当尾矿库存在两个以上初期坝时，如果两个坝形成堆积坝的时间有先后之分，则在后

形成堆积坝的初期坝底部会由于先形成堆积坝的尾矿冲积，形成一个细泥层。后形成的堆积坝将建立在这个细泥层的地基上，因此堆积坝的稳定性存在问题。但是，试验发现，尾矿细泥是一种性质比较特殊的粘性土。由于尾矿浆在送到尾矿库之前，都需要用石灰乳中和到 pH 值大于 7，形成的污泥在尾矿冲积过程中，都聚集在细泥中，因此尾矿细泥的物理力学性质比一般粘土好，具有一定的结构强度<sup>[13.5]</sup>。但是，对于具有两个以上初期坝的山坡型尾矿库或平地型尾矿库，在几个坝上同时排放尾矿的方法，对于堆积坝的稳定性是有利的。

### 13.2.2.3 排水系统

为了使尾矿库内的澄清水能有计划地排出尾矿库，外排到下游水系或返回使用，需要在尾矿库内设置排水系统。为了防止洪水，还需要有排洪系统。但是，一般都把排水和排洪系统统一考虑。

尾矿库的排水-排洪系统由排水井（或排水斜槽）、排水管（或隧洞）、消力池、溢洪道和截洪沟等一系列水工建筑物组成。

排水井（或排水斜槽）应当设置在大于尾矿水所需澄清距离的地方，保证排出水的澄清程度达到要求。

选择排水井和排水管的型式时，必须按照可能发生最大的洪水考虑，具备可靠的泄洪能力。悬挂环式档板排水井的泄水量大、操作方便、投资省、兼有窗口式和半圆档板式两者的优点，在赣州铀矿得到应用<sup>[13.6]</sup>。

### 13.2.3 浓密排放法处置尾矿

长期以来，我国铀矿加工厂的尾矿始终采用常规处置法处置，即：固体含量为 15 % ~ 20 % 的尾矿浆用泵和管道（或流槽）送到尾矿库排放和堆积。这种尾矿浆的流变特性服从 Newton 粘性定律，剪切应力  $\tau$  为：

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (13-1)$$

式中：  $\tau$  为剪切应力，(Pa)

$\mu$  为粘度，(Pa · s)

$\frac{dv}{dy}$  为速度梯度。

服从 Newton 粘性定律的流体，称为 Newton 流体。这种矿浆排放后，矿浆中的粗砂和细泥会在尾矿库沉积时自然分级，在排放口处基本是粗砂，而沉积滩内主要是细泥。

1965 年，加拿大的 E. I. Robinsky 提出浓密排放法处置尾矿的设想，并在 Kid Creek 矿得到应用<sup>[13.7]</sup>。这个方法的特点是：首先把尾矿浆浓密到固体含量为 40 % ~ 60 %，然后用泵和管道（或流槽）把尾矿浆送到尾矿库排放和堆积。这种矿浆不再服从 Newton 粘性定律，而呈现 Bingham 流变特性：

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{dv}{dy} \quad (13-2)$$

式中：  $\tau_0$  为初始剪切应力，(Pa)

$\eta$  为刚度系数，(Pa · s)

呈现 Bingham 流变特性的流体，称为 Bingham 流体。这种矿浆排放后，在尾矿库沉积时不出现粗砂和细泥自然分级的现象，而是粗、细颗粒均匀混合同时沉积，使整个尾矿沉

积体中粒级分布基本一致。

因此，浓密排放法处置尾矿的优点：

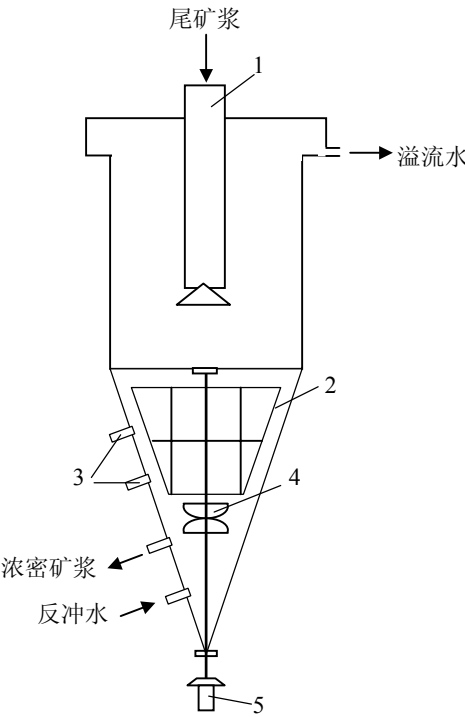
（1）减少尾矿库的基建工程量和基建费用。在地形合适的条件下，可以采用中心放矿或山坡放矿的方式，不需要高的初期坝或堆积坝，不需要庞大的排水排洪工程，减少工程隐患。

（2）尾矿浓密以后的溢流水，可以就近返回工厂使用。同时，可以减少尾矿浆的输送量，节省泵输送回水的动力消耗。

（3）尾矿沉积体中粗、细粒级分布均匀，使沉积体密实、孔隙率低、干密度大，既增加尾矿库的储存量，又提高了堆积坝的稳定性。

（4）由于尾矿中和后的铀、镭沉积物在沉积体中均匀分布，减少了氡的析出，有利于环境保护。

为了实现尾矿浆浓密，可以采用深锥浓密机，设备结构见图 13-2<sup>[13.8]</sup>。



1 中心加料筒，2 耙子，3 取样口，4 双头螺旋刮板，5 耙机传动装置

图 13-2 深锥浓密机设备结构示意图

虽然在实际生产过程中，石灰乳中和工序的操作不太稳定，造成中和后尾矿浆的 pH 值波动较大，从而影响尾矿浆的沉降速度。但是，通过试验证明，采用深锥浓密机浓密石灰乳中和以后的尾矿浆，底流矿浆的固体含量可以达到 47.6%，溢流中的固体含量小于 100 mg/L，见表 13-2<sup>[13.8]</sup>。

表 13-2 深锥浓密机的试验结果

尾矿浆 pH	尾矿浆处理量 ( $\text{t} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$ )	浓 密 机 底 流		絮凝剂用量 ( $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$ )	溢流中固体含量 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
		液固质量比	固体含量 / %		
7 ~ 10	4.72	1.10	47.6	38.0	<100
4 ~ 6	6.69	0.96	51.0	28.2	<100

矿浆的流变特性与矿浆液固质量比的关系，见表 13-3<sup>[13.8]</sup>。由表 13-3 可见，当矿浆的液固质量比大于 2.4 时，没有初始剪切应力出现，呈 Newton 流体特性；当矿浆的液固质量比小于（或等于）2.4 时，出现初始剪切应力，呈 Bingham 流体特性。随初始剪切应力增加，矿浆的有效粘度增加，沉降时矿浆中粗、细颗粒越不容易分离。

表 13-3 矿浆的流变特性与矿浆液固质量比的关系

液固 质量比	矿浆密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	温度 / $^{\circ}\text{C}$	初始 剪切应力 / Pa	理论初始 剪切应力 / Pa	有效粘度 / $10^{-3}(\text{Pa} \cdot \text{s})$	刚度系数	备注
1.5	1.33	20	-	88	16.5	0.077	Bingham 流体
2.4	1.22	19	-	18	4.0	0.022	
3.4	1.15	21	0	0	2.4	-	Newton 流体
4.5	1.12	20	0	0	1.8	-	

浓密以后的尾矿浆用泵和管道输送到尾矿库，当矿浆输送速度比较大时，管道内的固体颗粒全部处于悬浮状态；矿浆输送速度下降到一定程度，管道内就会出现固体沉积，形成淤积层，影响矿浆输送的稳定性。

管道内开始出现淤积层时的断面平均流速，可以称为：临界流速  $V_k$ ，试验表明，当矿浆液固质量比为 1.0 ~ 1.6 时， $V_k = 0.7 \text{ m/s} \sim 0.8 \text{ m/s}$ ；当矿浆液固质量比小于 1.0 时， $V_k$  小于  $0.5 \text{ m/s}$ <sup>[13.8]</sup>。

对在尾矿库排放的浓密尾矿浆形成的沉积滩各部位，取样进行粒级分析，分析结果证明，沉积过程没有粗、细颗粒分级现象。浓密法的沉积物干密度可达  $1.5 \text{ t/m}^3$ ，比常规法（干密度为  $1.15 \text{ t/m}^3$ ）高得多<sup>[13.8]</sup>。

### 13.3 铀矿加工厂尾矿浆的处理和输送

#### 13.3.1 铀矿加工厂尾矿浆的处理

铀矿加工厂产生的尾矿矿浆，必须通过石灰乳中和处理，一方面降低矿浆的酸度，使矿浆的 pH 值达到 7 左右，避免矿浆输送泵和管道的腐蚀；另一方面可以从溶液中去除大部分有害物质，使尾矿库回水可以返回使用。

一般来说，由于尾矿矿浆中  $\text{SO}_4^{2-}$  离子含量较高，因此采用石灰乳中和处理时，溶液中的铀和镭可以有效地被去除，形成与矿泥混合的沉淀物<sup>[13.9]</sup>。

#### 13.3.2 处理后尾矿浆的输送

尾矿浆的输送方式分为自流输送和压力输送两种。

自流输送是利用地形，使尾矿浆通过自流管、槽，流入位置较低的尾矿库。

大部分铀矿加工厂的尾矿浆的输送采用压力输送方式，即：尾矿浆用泵提升，通过输送管道，逐级提升到尾矿坝，进入尾矿库。

尾矿输送最常用的是离心式砂泵和油隔离泥浆泵。离心式砂泵安装和操作简便，但是使用过程中磨损严重<sup>[13.10]</sup>。曾研制过气动隔膜泵，但是扬程低、流量小、部件易损坏，用于尾矿矿浆输送仍不理想<sup>[13.11]</sup>。上饶铀矿的尾矿输送系统随尾矿坝的不断增高和规模的扩大，经过几次改扩建，由原来使用的离心式砂泵改为油隔离泥浆泵，采用钢管内衬辉绿岩铸石管作为矿浆输送管道，取得很好的效果<sup>[13.12][13.13]</sup>。

油隔离泥浆泵（又称：玛尔斯泵）是一种双缸双动的往复泵，结构上与一般往复泵的区别在于：在活塞缸和阀箱之间增设了油隔离缸，使矿浆不进入活塞缸内，从而避免了主要部件的磨损，提高了泵的使用寿命。油隔离泥浆泵的扬程可以达到 400 m（离心式砂泵的扬程只有 90 m），而且可以输送固体浓度高达 60 % 的矿浆<sup>[13.2]</sup>。

## 13.4 尾矿库的管理和环境监测

尾矿库的管理十分重要，尾矿输送系统的事故将迫使铀矿加工厂停产，尾矿库的沉积尾矿和外排水管理不善会污染大气、水体和土壤，尾矿坝塌陷将给国家和人民生命财产造成巨大损失。

### 13.4.1 尾矿库的管理

尾矿库管理的主要内容包括：

- （1）保证尾矿输送系统（包括：管道、泵站和坝顶矿浆排放管等）的正常运行。
- （2）坚持对尾矿坝（包括：初期坝和堆积坝）的定期观测，包括：观测坝体变形和坝内浸润线，观测坝体的渗透流量，观测坝下排水管道的压力和变形等。及时发现问题并及时解决。
- （3）注意库内排洪设施的工作情况，尤其是雨季和汛期，遇到险情及时排除。
- （4）及时对堆积坝的外坡做好护坡工作，尽可能保持沉积滩的湿润，避免扬尘。
- （5）尾矿库服务期满以后，及时制定覆土、植被或复田的退役方案。

### 13.4.2 尾矿和库区渗漏的监测

为了保护环境，避免尾矿库的废物和废水对周围环境的污染，需要随时观测尾矿坝的渗漏和尾矿坝的稳定性，注意输送管道的损坏和破裂，及时更换。

需要随时测定尾矿库内废水中有害物质的浓度；测定废水中的悬浮固体量，pH 值和溶解氧，温度和电导率；测定废水中的生化需氧量（BOD）、化学需氧量（COD）和总需氧量（TOD）的值。

发现有害物质的浓度超标，必须及时采取必要措施，对尾矿库废水进行处理。外排废水必须达到环境保护要求的标准，才能外排，避免对周围环境造成污染。

### 13.4.3 尾矿的风化和水的循环

在尾矿坝中的尾矿由于长期存放，会受到降雨、阳光、干燥、冰冻和融化中出现的温度和湿度变化的作用，还会受到洪水和细菌的影响，空气中的氧、二氧化碳、氮和硫也会

对尾矿产生不同的作用，由这些作用过程形成的“风化作用”，会使尾矿的化学和物理性质发生变化。

由于尾矿的风化，虽然尾矿的外表没有变化，但是当水溶液流过尾矿时，会产生各种相关元素的沉淀、吸附或溶解，结果造成一些原有有害物质的消除，也会造成一些新的有害物质的溶解。例如：在细菌的作用下，叔胺萃取剂在 3 年内逐渐消失，磺化煤油在 11 年内也逐渐消失。但是，对于存在一定量黄铁矿的铀尾矿，由于黄铁矿受氧化作用和水浸蚀，会造成水的酸化。酸化水在尾矿堆中渗透，会引起铁、铀、镭的溶解。因此，随时观测污染物的迁移和变化是十分重要的。

尾矿区内水的自然循环也是需要十分注意的。尾矿库中水的蒸发和渗漏，降雨和洪水的涌入，回水的使用以及水的外排，构成尾矿区的水平衡。

尾矿库是铀矿加工厂可以利用的尾矿脱水方式，从尾矿库回收可以利用的水，对铀矿加工厂来说也是重要的经济问题。通过排放高密度矿浆的方法，可以使排放到尾矿库的水量下降，把尾矿含水控制在一定限度之内，从而减少库区面积。

总之，从节约试剂和节约用水的角度，需要减少废液排放的体积，在工艺流程允许的条件下，努力达到零排放的要求。

## 参考文献

- [13.1]李韧杰. 我国铀矿冶放射性废物的现状及其防治对策. 铀矿冶, 1988, 7(4): 35~39.
- [13.2]“三废治理与利用”编委会. 三废治理与利用. 北京: 冶金工业出版社, 1995. 328~374.
- [13.3]中国技术经济研究会. 技术经济手册(矿山卷). 沈阳: 东北大学出版社, 1993. 868.
- [13.4]七四一矿. 尾矿山谷堆坝初步实践. 铀矿选冶, 1977, (1): 46~48.
- [13.5]李玉玮, 刘树金. 在尾矿细泥地基上加高堆积坝坝体的稳定性问题. 铀矿冶, 1984, 3(4): 58~66.
- [13.6]董俊恺, 胡汝洲. 悬挂环式档板排水井. 铀矿选冶, 1981, (4): 68~72.
- [13.7]Robinsky E I, et al. 用浓密排放法处置尾矿以降低费用和改进环境控制. 铀矿选冶, 1981, (3): 56~65.
- [13.8]王志章, 董俊恺. 浓密法处置铀尾矿的试验研究. 铀矿冶, 1999, 18(1): 14~22.
- [13.9]郑官庆, 刘惠莲, 王治厚. 石灰-氯化钡沉淀法处理某铀水冶厂废水——在尾矿浆中直接沉淀铀和镭. 铀矿冶, 1984, 3(2): 40~46.
- [13.10]唐启根, 单惠芬. PNJFA型衬胶泵现场试验中的磨损情况. 铀矿选冶, 1981, (6): 32~38.
- [13.11]胡资平, 季振万, 赵晓明. 4QB-双缸气动隔膜泵的研制. 铀矿选冶, 1980, (6): 41~47.
- [13.12]董俊恺, 罗顺先. 某矿尾矿输送工程设计及试车总结. 铀矿选冶, 1979, (2): 49~60.
- [13.13]七一三矿. 钢管内衬辉绿岩管施工总结. 铀矿选冶, 1979, (2): 61~71.