

第十四章 铀矿冶设施的退役和环境治理

铀矿加工企业（包括：铀矿山和铀矿加工厂）在生产终结以后，需要对铀矿冶设施（包括：设备、建筑物和附属设施）进行妥善处理。国际原子能机构对“退役”定义为：铀矿冶设施最终退出运行的过程^[14.1]。

退役可以是永久性的，也可以是非永久性的。永久性的退役是指铀矿冶设施完全被拆除，环境得到全面整治，设施场地可以不受限制地使用。非永久性的退役是指铀矿冶设施部分被拆除或封闭，环境得到治理，设施场地和设备在一定的限制条件下可以使用或不再使用。

铀矿冶设施退役的主要内容是：对放射性废物（包括：设备、建筑物和附属设施）安全、经济地进行处理，使放射性辐射和其它可能的危害降低到允许水平以下。

14.1 铀矿冶设施退役的特点和要求

14.1.1 铀矿冶设施退役的特点

14.1.1.1 数量大和分布广

我国铀矿床的规模小，铀矿石品位低，因此矿石的开采量和处理量很大，产生的废石和尾矿数量很大。据初步统计，现有废石和尾矿的总量已达几千万吨，占地面积达百万平方米^[14.1]。

为了避免矿石长途运输，铀矿加工厂一般都建在铀矿山附近。因此，铀矿加工厂与铀矿山一样十分分散。我国的铀矿山与铀矿加工厂分布在 14 个省、区，30 多个地、县，废石场和尾矿库等固体废物的堆存场地有 150 多处，分布情况见表 14-1^[14.2]。

表 14-1 我国退役铀矿冶企业废石和尾矿的分布

地 区	废 石		尾 矿	
	按重量计 / %	按面积计 / %	按重量计 / %	按面积计 / %
华东	47	43	19	41.8
华中	20	18	58	33.6
华南	15	10.7	18	17
西北	11.2	16.9	4.2	6.5
西南	5.5	9.5	0.3	0.3
东北	1.3	1.9	0.5	0.8
合 计	100	100	100	100

由表 14-1 的统计,按废物的重量计,约 82 % 的废石和 92 % 的尾矿分布在人口稠密的湘、赣、粤地区,铀矿冶设施与农田、鱼塘、河溪相邻,与老百姓的生息密切相关。

14.1.1.2 放射性辐射危害时间长

铀矿开采的废石和加工产生的尾矿,虽然放射性的比活度不高,但是约有 30 % 以上的核素为长寿命放射性元素,例如: ^{238}U 的半衰期为 $4.51 \times 10^9 \text{ a}$; ^{230}Th 的半衰期为 $7.7 \times 10^4 \text{ a}$; ^{226}Ra 的半衰期为 $1.6 \times 10^3 \text{ a}$,它们会长期释放氡以及长寿命的氡子体 ^{210}Pb 、 ^{210}Bi 和 ^{210}Po ,这些核素会对环境构成长期的潜在危害,见表 14-2^[14.2]。

表 14-2 废石和尾矿中的放射性核素含量

样品	U 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	^{226}Ra 含量 ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Rn 析出率 ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	α 辐射 ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)	γ 辐射 ($10^{-8}(\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1})$)
铀废石	30 ~ 300	370 ~ 7400	1.95 ~ 11.83	4199 ~ 25900	61.4 ~ 309.5
铀尾矿	80 ~ 100	8510 ~ 55500	1.85 ~ 16.53	4100 ~ 92500	162.3 ~ 848.9
普通岩石	1.2 ~ 60	260 ~ 1400	0.015 ~ 0.67	~ 2626	7.9 ~ 13.1
土壤	0.74 ~ 1.8	184 ~ 278	0.02 ~ 0.047	1290 ~ 2170	5.5 ~ 12.2

14.1.1.3 放射性危害与非放射性危害并存

在铀矿冶企业的废石、尾矿和废水中,同时存在镉、砷、汞、锰、锌、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 等对环境造成污染的有害物质。从环境保护角度,必须与铀、镭等放射性元素同时治理,达到相应的环境标准。

14.1.2 铀矿冶设施退役的要求

铀矿冶设施退役的基本要求是:通过退役治理,对废水和废物(废石和尾矿)进行最终处置,达到保护现在和将来广大公众的健康和环境安全的目的,不给后代造成不适当的负担。

铀矿冶设施的退役治理是对整个设施的全面治理,可以按照退役的深度,划分退役的级别。国际原子能机构(IAEA)对核设施退役分为三级,见表 14-3^[14.1]。

表 14-3 国际原子能机构对核设施退役的分级

退役级别	退役方式	退 役 最 终 状 态	退 役 深 度
I	安全封闭	厂址和设备不再利用 (在长期进行安全监护情况下)	核设施存在或埋葬* (在能保证安全监护的条件下)
II	局部拆除	厂址和设备受限制利用	核设施部分拆除和部分去污
III	完全拆除	厂址和设备不受限制利用	核设施全部拆除,恢复绿洲

* 埋葬是指:把核设施封闭并维持在一个牢固和长寿命的材料中保存,直到放射性衰减到允许水平。

铀矿冶设施的退役方式,基本属于 II 级或 III 级退役,除了废石堆和尾矿库经过治理后,不允许无限制使用以外,其它设施经过治理后,基本上可以不受限制地使用^[14.1]。

铀矿冶设施退役处理的放射性物质主要是固体废物,也有少量废水需要处理。经过退役处理后,要求不再产生新的放射性废物,包括:固体、液体和气体。尤其对出露地表的各类坑(井)口,要进行封闭(堵),杜绝井下废气或废水外溢。

铀矿冶设施的废物一般进行就地处理或处置，由于废物具有放射性，因此处理的原则是采取与公众有效隔离的措施，使废物的放射性在隔离期内降低到无害水平。

对于较分散的放射性废石堆尽可能集中处理，以减少工程量，节省经费。尽可能用废石回填废矿井或因开采矿石造成的废墟坑和塌陷区，对废石堆和尾矿库复土植被，并努力实现土地复垦。对污染的设备和厂房，尽可能进行去污处理，对于严重污染无法利用的设备进行解体后掩埋处理。

14.1.3 铀矿冶设施退役的工作程序

铀矿冶设施退役的工作程序，具体包括：（1）前期准备工作，（2）施工管理，（3）竣工验收三个阶段^[14.3]。

14.1.3.1 前期准备工作

前期准备工作包括：设计、环境评价、安全分析和试验研究等工作。

设计工作是铀矿冶设施退役工作的重要环节，包括：退役工程项目的调研、考察和论证，编制设计文件，配合施工，参加验收和进行工程总结。编制设计文件可以分为：可行性研究、初步设计和施工图设计三个阶段。设计工作要求符合实际情况，在保证施工质量的前提下，努力减少工程量和节省投资。

环境评价工作的主要内容是两项：（1）退役工程的污染现状。调查和监测污染源，收集影响环境的水文、气象、社会等各种因素，进行全面分析。（2）在确定退役治理方案以后，对方案进行科学的预测和评价。

为了保证铀矿冶设施退役后的安全，保护国土和环境，需要对尾矿库和镭厂的退役编制安全分析报告，对预防事故的措施、潜在事故的后果和质量保证等问题进行评价。

铀矿冶设施退役的环境治理是一项环境要求高、技术难度大、涉及面广的复杂系统工程。因此，对一些治理工作中的技术问题需要进行必要的试验研究，为确定科学、可行的治理方案提供依据。

14.1.3.2 施工管理

现场施工是实现设计要求的關鍵，必须严格按图纸施工，确保工程质量和环境治理的效果。要求退役工程一百年不损坏，尾矿坝一千年不垮，二百年不维修^[14.3]。

必须由有经验的管理人员、技术人员和老工人组成施工管理机构，施工中严把质量关并进行跟踪监督，发现质量问题，及时采取措施解决。

对隐蔽工程要做好施工工程记录，对整个工程，在施工前、后应该保存有价值的照片或录像。

编制年度计划，及时上报工程进度。用好管好退役资金，确保施工经费按时到位。严格管理制度，精心施工，保证工程质量和治理效果。

14.1.3.3 竣工验收

铀矿冶设施退役工程的竣工验收是全面考核退役效果，检验设计和施工质量的重要步骤，分为预验收和竣工验收两个阶段。

退役工程的某个子项工程完工后进行的验收，称为：预验收。当全部退役工程完工并达到退役目标时，对全部退役工程进行考核，作出评价，称为：竣工验收。竣工验收以后把治理好的退役工程移交当地政府，由地方进行管理。

14.2 氡的析出和退役治理

在铀、镭的放射性平衡体系中，氡是唯一的放射性气体，氡对人体的危害主要是通过呼吸道进入人体，由于氡本身及其衰变产生的子体具有 α 放射性， α 粒子的辐射会破坏人体的器官和组织，从而最终导致肺癌。

铀矿冶设施退役工作中，废石堆和尾矿坝是辐射环境评价中氡的主要来源。铀尾矿堆释放的氡对周围居民造成的剂量当量最大，约占铀水冶厂总的集体有效剂量当量的90%以上^[14.4]。因此，氡是对影响环境最大的放射性元素。

14.2.1 氡的析出和影响析出率的因素

14.2.1.1 氡的析出

在铀矿开采的废石和铀尾矿中，氡与铀和镭达到放射性衰变平衡，存在于废石和铀尾矿中。废石和尾矿都是多孔介质，根据氡在多孔介质中迁移的理论，推动氡在充满流体（空气或水）的空隙中运动的动力有两种：体积活度梯度和压力梯度，也可以称为氡的两种迁移方式：扩散和对流。

氡迁移的扩散理论在四十年代就提出来了，几十年来始终是解释氡迁移的主要理论依据。氡是由铀和镭的衰变产生，本身也在不断衰变的一种放射性气体。在多孔介质中氡的体积活度比大气中要高，氡分子热运动的结果必然向体积活度低的方向移动，因此氡会穿过多孔介质的表面进入大气，这就是氡析出的原因。氡的扩散可以用扩散系数来描述，扩散系数在数值上等于体积活度梯度为一个单位时，单位时间通过单位面积的氡气量，因此也可以称为扩散速度。

造成氡迁移的另一个重要作用是对流，由于在多孔介质空隙中的流体（空气或水）会由于压力差，从压力高的地方向压力低的地方迁移，流体作为氡的载体，可以夹带氡进行迁移。风力和温度的变化，会造成多孔介质空隙中的气压与大气的压力差，使多孔介质空隙中的气体流向大气，这种对流促进了氡的析出。由对流作用引起氡的迁移，可以用多孔介质中流体的流通系数来描述。

在低渗透性（小于 $10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ ）的土壤中，扩散是氡迁移的主要方式。在较高渗透性（大于 $10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ ）的土壤中，对流是氡迁移的主要方式。然而在多数实际情况中，氡的迁移是两种方式的结合。

14.2.1.2 影响氡析出率的因素

由上述分析可见，影响多孔介质（土壤或尾矿）中氡析出的主要因素是：多孔介质的特性和气象因素。

多孔介质的特性包括：铀和镭的含量、颗粒大小、空隙度、渗透性和含水量等。气象因素包括：气温、气压、湿度和地表温度等。

在土壤或尾矿不变条件下，影响氡析出率最大的因素是气象因素。

降雨可以使废石或尾矿中含水量增加，由于水堵塞废石或尾矿中的空隙，导致氡析出率的快速下降，见表14-4^[14.4]。

空气湿度的增加，也会导致氡析出率的下降。一般来说，在干燥的土壤中，氡的扩散距离可达1 m~2 m，而在水分饱和的土壤中氡的扩散距离只有1 cm~2 cm^[14.4]。

表 14-4 降雨对氡析出率的影响

废物种类	氡析出率 / ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)		降低率 / %
	非 雨 天	雨 天	
废 石	1.07	0.10	90.7
尾 矿	1.45	0.83	42.8

气压的下降, 导致废石或尾矿表面氡的析出率增加, 反之则减少。但是, 如果气压的变化不是突变, 而是渐变, 由于废石或尾矿中的气压容易与大气压力的变化达到平衡, 减少了压力梯度, 氡的析出也就减少。

氡的析出率与地温和气温之间的差有密切关系。地温和气温之间的差增加, 会增加废石或尾矿中的气压与大气的压力差, 从而增加氡的析出率。

应当指出, 氡的析出率受气象因素的影响是很复杂的, 经常是多种气象因素共同作用的结果, 不但随季节变化, 而且在一天之内随时间变化, 氡的析出率也有很大差别。国内许多单位对影响氡析出率的因素, 尤其是气象因素进行了大量试验研究工作, 通过研究认为, 采用年平均氡析出率 J_0 作为废石和尾矿的治理标准是合理的。

氡析出率的合适测量时间, 南方地区一般在 9、10 月份选择天气晴朗、气象稳定的日子, 在上午 8 时至 10 时测定为好; 北方地区, 要根据氡析出率测定试验结果确定测量方法和时间。

14.2.2 覆盖层的降氡效果

降低废石和尾矿中氡的析出最有效的方法是覆盖, 覆盖层的主要作用是: 阻挡氡的扩散析出和降低空气渗流的速度。

14.2.2.1 覆盖材料

覆盖废石和尾矿的材料主要是土壤、石块、水和人工合成材料。各种材料覆盖废石和尾矿的降氡效果, 见表 14-5^[14.5]。

表 14-5 各种材料覆盖废石和尾矿的降氡效果

覆盖材料	覆盖厚度 / m	覆盖状况	防氡效率 / %	防 γ 效率 / %
黄土 (粘土)	0.5	$\sim 1300 \text{ kg/m}^3$	~ 68.7	~ 66.0
	1.0	$\sim 1200 \text{ kg/m}^3$	65.8 ~ 83.6	~ 85.0
	1.5	$\sim 1250 \text{ kg/m}^3$	87.8 ~ 89.4	~ 85.6
	2.0	-	~ 98.5	~ 95.0
混凝土	0.02	2150 kg/m^3	~ 86.4	~ 22.9
	0.04	2150 kg/m^3	~ 96.6	~ 41.0
	0.06	2150 kg/m^3	~ 99.0	-
	0.10	2150 kg/m^3	~ 99.6	~ 52.5
聚乙烯	-	薄膜	~ 72.7	-
沥青	0.01	-	~ 99.6	-

人工合成材料（例如：塑料薄膜、沥青、混凝土）对于降低氡的析出和控制风和水的浸蚀效果都很好，但是投资费用高和使用寿命短，因此应用受到限制^[14.5]。

水覆盖层能有效消除尘土，可以降低氡的析出。澳大利亚的 Rum Jungle 铀矿、Moline 铀矿、Koongarra 铀矿和 Pine Creek 铀矿由露天采矿形成的废墟，采用水覆盖法处理，形成的人工湖泊给环境增添了几分姿色^[14.6]。上饶铀矿有一个露天采场，面积 45000 m²，最深处达 38 m，被积水覆盖后，氡析出率和辐射剂量都很低^[14.7]。但是，水覆盖法受自然条件的限制，一般用于露天采矿废墟，尤其是坑深超过 50 m 的废墟。

14.2.2.2 覆土的降氡效果

对于大多数废石和尾矿来说，可采用的方便而经济的覆盖材料是粘土或天然土壤，既能有效降低氡的析出，有效防止 γ 辐射，又有利于各种植物生长。

双区扩散理论通过推导认为：覆土厚度与覆土前、后氡的析出率比值的对数成线性关系^{[14.8][14.9]}：

$$X_c = (D_c / \lambda)^{1/2} \ln (J_t / J_c) \quad (14-1)$$

式中：X_c 为覆土层厚度，(cm)

λ 为氡的衰变常数，($\lambda = 2.1 \times 10^{-6}$ /s)

D_c 为氡在覆土层的扩散系数，(cm²/s)

J_t 和 J_c 分别为覆土前、后氡的析出率，(Bq/m²s)

按我国“铀矿冶设施退役环境管理规定”的标准：J_c = 0.74 Bq/m²s，要求覆土以后氡的析出率小于 0.74 Bq/m²s，因此，覆土层厚度：

$$X_c \geq (D_c / \lambda)^{1/2} \ln (J_t / 0.74) \quad (14-2)$$

选择不同的覆土层厚度 X_c 进行现场覆土试验，分别测定覆土前、后氡的析出率 J_t 和 J_c，可以计算氡在覆土层的扩散系数 D_c：

$$D_c = \lambda / b_c^2 \quad (14-3)$$

式中：b_c 为氡在覆土内有效扩散长度的倒数，(1/cm)

$$b_c = \frac{1}{X_c} \ln \frac{J_t}{J_c} \quad (14-4)$$

采用上述方法，通过试验测定，计算大浦铀矿废石堆覆盖的亚粘土的 D_c = 0.0393 cm²/s^[14.9]，抚州铀矿废石堆覆盖的黄粘土的 D_c = 0.052 cm²/s^[14.10]，按式 (14-2) 计算合理的覆土层厚度 X_c，都取得了良好的降氡效果。

通过覆土试验计算得到的覆土层厚度 X_c，还应当在现场确定实际的降氡效果。覆土层的压实程度对降氡效果有一定的影响，压实的覆土层降氡效果更好。

在实际施工中，低氡析出率的废石可以作为高氡析出率的废石或尾矿的覆盖材料，例如：临沧铀矿采用采矿废石作为尾矿的覆盖层之一，息峰铀厂采用磷渣作为废石的覆盖材料，这对于土源比较紧张的铀矿山退役治理具有推广意义^[14.11]。

14.3 铀矿冶设施退役的环境治理

14.3.1 铀矿山

14.3.1.1 露天采场

露天开采的结果多数会形成深坑，在退役治理时，必须把采场底部、平台和边坡清理

整平,对裸露的含矿层必须全部用 20 cm~40 cm 厚的混凝土覆盖,对无矿层的底部和平台用黄土或三合土覆盖,边坡砌筑毛石护坡。整治后的废坑可以植被或用水覆盖,绿化和美化环境,增加经济效益。

露天采场或由于地下开采造成的塌陷区,也可以用来堆放废石,使地面恢复平整。堆放的废石按照废石堆治理的要求覆土,最后再覆盖 0.5 m 厚的可耕土壤,达到复垦的基本要求^[14.12]。

14.3.1.2 地下矿井

为了防止地下矿井的含铀污水和氡气排出地表,污染环境,必须把地下矿井通往地表的各种出口和通道进行封闭,这种封闭必须坚固、牢靠和严实,通过封闭使矿井形成一个与地面完全隔绝的封闭体。

井巷工程的封闭分为永久性封闭和非永久性封闭两类,按照矿山的实际情况决定。

对于铀资源已经探清采尽,在深部和两翼都没有铀的工业储量或远景储量,也没有其它矿种的工业储量或远景储量的矿井,可以进行永久性封闭。

设计永久性封闭时,如果矿井地下水位高于封闭体,必须进行永久防水的设计。永久性封闭的封闭体服务年限必须超过 100 a^[14.13]。

对于由于某种原因停止开采,但是还存在一定量的铀矿资源,或在深部和两翼(或一翼)还有铀的工业储量或远景储量,或还存在其它矿种的工业储量或远景储量的矿井,可以进行非永久性封闭。

在设计非永久性封闭时,需要考虑在若干年后矿井恢复生产的可能性。因此,非永久性封闭设计,既要考虑封闭体的安全可靠,又要考虑恢复矿井时的安全和方便^[14.14]。

对于永久性封闭的矿井,可以用废石填充,然后封闭井口。对于井深超过 20 m 的竖井,应当采用分段封闭方法。斜井和平峒无法用废石填充,一般都采用二段封闭方法,但是必须注意地下水位,当地下水位高于封闭体时,需要按水压大小确定防水墙的形式和有关技术参数。

进行退役治理后的矿井,在井口应当设置永久性标志。

14.3.1.3 废石场

铀矿开采以后在矿井附近堆积的废石堆,首先回填矿井或露天采场,剩下的废石应当尽可能集中堆放,减少处置的工程量。

为了便于植被,需要对废石堆进行降高、变坡和整形。废石堆的坡面应当形成高 1 m~2 m,宽 0.5 m~1 m 的阶梯形,然后在废石堆上覆土,种草或种树。也可以覆盖超过 0.5 m 的可耕土壤,进行复垦。

在废石堆的周围应当设置一定高度的混凝土围墙,防止暴雨和洪水的冲刷造成废石流失,对环境造成污染。

14.3.2 铀矿加工厂

14.3.2.1 铀矿加工厂的设备和建筑物

在退役治理时,铀矿加工厂的设备和建筑物必须进行清洗,使表面的放射性污染降低到环境允许的水平。

对于经过清洗达到环境标准的设备和建筑物,可以用于其它用途。对于经过清洗达不

到环境标准的设备和建筑物，必须拆除或分解，就地或运到尾矿库进行掩埋。

14.3.2.2 尾矿库

尾矿库是铀矿加工厂退役治理的重点，世界各国都是根据自己国情和环境的特点，制定铀尾矿库退役治理的环境辐射标准的，见表 14-6^[14.15]。

表 14-6 各国铀尾矿库退役治理的环境辐射标准

国家 (机构)	公众剂量 /(mSv·a ⁻¹)	氡析出率 /(Bq·m ⁻² ·s ⁻¹)	氡子体浓度 /WL*	γ 照射率 /(μ Gy·h ⁻¹)	维持安全年限 /a
IAEA	0.1	0.8(设计标准 0.4)	0.02	本底 + 0.2	1000, 至少 200
美国	0.1	0.74	尽量达到 0.02(含本底) 不得超过 0.03(含本底)	本底 + 0.2	1000, 至少 200
加拿大		0.74	0.02	0.2	1000, 至少 500
法国			表面污染 < 20 Bq/cm ²	0.5 ~ 1.0	
德国	0.5		250 Bq/m ³	0.3	
澳大利亚	1.0				300
俄罗斯		1.0	总 α 比放为 10 ⁸ Bq/m ³	1.0(1 m 高)	
西班牙	0.1	0.8			1000, 至少 200
中国	0.25	0.74	尽量达到 0.02(含本底) 不得超过 0.03(含本底)		100

* 1 WL = 2.08 × 10⁻⁵ J/m³

铀尾矿库退役治理的基本模式是就地处置，对尾矿坝整治加固以后，平整尾矿堆积层的表面，然后采用覆盖隔离的方法。

尾矿堆积层的覆盖方式各国也不完全一致^[14.15]，但是都要求在尾矿表面首先覆盖足够厚度的粘土防氡层，然后再覆盖阻隔层或排水层，防止水进入尾矿，造成尾矿返溶。在阻隔层或排水层上覆盖植被，种草或种树，有条件的可以进行复垦。

从 1985 年起，我国铀矿冶企业已有两批，几十个厂、矿退役并进行环境治理。退役工作的实践表明，如果铀矿冶企业在建设初期就考虑退役和环境治理问题，就可能大大减少退役治理经费。

参考文献

[14.1]李韧杰. 对我国铀矿冶设施退役问题的探讨. 铀矿冶, 1994, 13(4): 217~222.

[14.2]潘英杰. 我国铀矿冶设施退役环境治理现状及应采取的对策. 铀矿冶, 1997, 16(4): 227~236.

[14.3]李韧杰. 铀矿冶设施退役的工作程序. 铀矿冶, 1995, 14(3): 158~162.

[14.4]李韧杰. 氡析出率的测定及其影响因素的探讨. 铀矿冶, 2000, 19(1): 56~61.

[14.5]张晓文. 铀矿冶的废渣污染及其治理. 铀矿冶, 1996, 15(2): 118~122.

[14.6]铀矿冶退役技术考察团. 澳大利亚铀矿冶设施退役技术考察报告. 铀矿冶, 1995, 14(4): 217~223.

[14.7]李韧杰. 铀矿冶设施退役工程治理技术及有关问题的研究. 铀矿冶, 1999, 18(2): 129~133.

[14.8]Rogers V C, Nielson K K. Radon Attenuation Handbook for Uranium-Mill Tailings Cover Design. Report NUREG/CR-3533, PLN-4878. Washington: U. S. Nuclear Regulatory Commission. 1984.

- [14.9]吴桂惠, 周星火. 铀矿废石堆覆土厚度探讨. 铀矿冶, 1994, 13(3): 149~155.
- [14.10]吴卫红, 夏登桂. 721-18废石场覆土实验. 铀矿冶, 1997, 16(2): 110~114.
- [14.11]徐乐昌, 戴兴业, 唐天征, 等. 覆盖材料降氡效果的野外确定. 铀矿冶, 1999, 18(3): 179~184.
- [14.12]王德舫. 退役铀矿山土地复垦实践. 铀矿冶, 1993, 12(4): 230~232.
- [14.13]王德舫. 铀矿山退役后环境整治与实践. 铀矿冶, 1991, 10(2): 27~31.
- [14.14]王德舫. 退役铀矿山井巷工程封闭. 铀矿冶, 1993, 12(1): 1~6.
- [14.15]潘英杰. 浅谈国外铀尾矿库的退役治理. 铀矿冶, 1998, 17(2): 102~110.