

环境保护技术丛书

美国铀的采矿、水冶和 精制工业现状

〔美〕 Don A. 克拉克

69

原子能出版社

内 容 简 介

本书译自美国环境保护局国家环境研究中心出版的环境保护技术丛书第EPA-660/2-74-038号。它综述了美国铀的采矿、水冶和精制工业的概况。讨论的题目包括铀矿储量、地理位置、生产统计、将来的需求量、提取和富选的过程、废物特性（包括放射性的和其他潜在的污染物）及其现行的处理和处置方法、废物对环境的影响、放射防护标准、试验和监测程序、铀工业的工艺进展、今后预期的问题以及建议进一步研究的项目。

目 录

第一节	结论	(1)
第二节	建议	(2)
第三节	引言	(4)
第四节	铀矿的供应	(6)
	铀矿床的探测	(6)
	铀矿储量	(7)
	核动力工业对铀需求量的影响	(16)
	采矿和水冶作业	(9)
第五节	采矿方法	(3)
	露天开采	(23)
	地下开采	(23)
	溶解开采	(25)
第六节	水冶过程	(28)
	矿石处理	(37)
	破碎和磨矿	(37)
	酸浸出法	(38)
	碱浸出法	(39)
	固液分离	(40)
	离子交换	(41)
	溶剂萃取	(41)
	淋萃法	(42)
	沉淀	(42)
	干燥和包装	(43)
	副产金属的回收	(43)

第七节	精制过程	(43)
第八节	废物的特性	(45)
	水冶加工流出液	(46)
	粗砂和细泥	(46)
	水冶流出液中的悬浮固体	(47)
	矿井水排放	(47)
	空气中的放射性	(47)
第九节	废物的化学分类	(48)
	无机污染物	(48)
	有机污染物	(49)
	放射性污染物	(50)
第十节	废物处理和处置	(57)
	废物的贮存	(59)
	化学处理和稀释	(63)
	地下处置	(64)
	排放废液的再循环	(66)
	厂外处置	(67)
第十一节	废物对环境的影响	(69)
	地下水	(70)
	地表水	(73)
	河流沉积物	(78)
	水库沉积物	(80)
	水生物群落	(82)
	农作物	(83)
第十二节	放射防护标准	(84)
	国际放射防护委员会报告	(85)
	国家标准局第69号手册	(85)

	联邦辐射委员会标准	(85)
	美国公共卫生署饮水	
	标准 (1962年)	(87)
	水质标准——美国联邦水污染控制	
	局 (FWPCA)	(87)
第十三节	试验和监测程序	(89)
第十四节	铀工业的工艺进展	(92)
	低品位矿石的物理精选	(92)
	改进的提取铀方法	(93)
	从海水中提取铀	(93)
	用核爆法从地下提取铀	(94)
	从铀水冶厂流出液和尾矿渣中除镭	(94)
参考文献		(96)

第一节 结 论

1. 美国约95%的已知铀矿床位于西部;然而在东部三分之二的地方有许多与西部的那些相类似的沉积铀矿床,而勘探工作还有可能发现一些新的矿体。目前,在美国有40%的地方具有铀矿石生产的潜力。

2. 未来所有预计到的对铀的需求量主要是满足迅猛发展的以铀作燃料的核动力工业。到1977年对铀的需求量可望增加到1974年的两倍,到1981年可望增加到三倍,而且直到2000年还将继续增长。

3. 钻探工作针对发现蕴藏较深的矿体,其平均深度从1958年的148米增加到1970年的409米。目前,铀矿石的平均品位为0.22%;但到二十世纪八十年代初,较富的矿体将被采空,因而就愈感到需要开采品位较低的铀矿石。品位较低的铀矿石的开采和水冶将涉及到相当大量的尾矿的处理和处置问题。

4. 每处理一吨铀矿石有约1960磅尾矿渣;换句话说,在满负荷运转的条件下美国水冶厂每年将累积900万吨尾矿渣。到1972年,美国尾矿累积总量达110百万吨左右,其中含镭-226 60000克。对尾矿堆的防风和防水侵蚀的稳定措施的各种方法进行了研究,但对最后应当采取什么样的防治措施还没有提出明确的规定。实验室研究表明,仅用水接触即可从固体废物中浸出镭-226,其浸出率最高达50%。

5. 每年从生产的铀矿山、水冶厂和精制厂所排出的废物,其放射性总量达41000居里(6822微居里/吨矿石)。其中有20500居里放射性的放射性同位素符合最大容许浓度

规定而废弃。危害最大的放射性同位素是半衰期为 1620 年的镭-226。镭不作为商品回收，是由于目前国际上的供应量已足够了的缘故。最近铀的生产每年向外排出 3400 克镭（568 微克/吨矿石），较国际每年估计的供应量 3000 克为多。其中 98% 以上的镭-226 是随固体废物排出的。其他可能存在的污染物有铀和其他放射性同位素、钒、硒、钼、砷、硝酸盐、硫酸盐、氯化物、有机萃取剂和悬浮细泥等。

6. 目前有少数铀水冶厂把工艺过程的废流出液排入河流并在排放前进行处理；然而，有几个矿山并未采取用化学法处理排出的含有污染物的矿井水。去除镭-226 的标准处理方法是加入氯化钡，使镭呈硫酸钡-镭复盐形式沉淀。该法除镭效率可达 99%，但必须进行严格控制，否则效率就会降低。

7. 不向厂外排放废液的水冶厂则不采用化学处理过程；因此，无机废物和放射性废物均保持溶解状态并常会从尾矿池渗漏出去。对由此而产生的地下水污染的程度或对这些污染物的最终行踪还掌握得不够清楚。

8. 由于环境监测规划和本底调查工作进行得还不够全面，故不能对铀矿开采、水冶和精制作业所造成环境污染的程度作出适当的评价。除科罗拉多河流域外，从其他铀产区所搜集到的资料均残缺不全，而且有些是不可靠的。

第 二 节 建 议

1. 正着手进行全面的研究计划工作以查明铀的采矿、水冶和精制工业在各个方面对环境的污染效应，并为日益扩大的铀工业研究发展适当的废物处理方法和控制技术。

2. 研究应是发展新的方法或改进旧的方法以去除铀水冶厂工艺废物和矿井水中的放射性核素、钋、硒、钼、砷、硝酸盐、硫酸盐、氯化物、有机萃取剂、悬浮细泥以及其他无机污染物,借助絮凝剂和机械的方法能更好地去除悬浮固体从而得以更大限度地重新利用处理过的废水。

3. 对在废物处置之前,从铀固体废物中去除能够被浸出的镭-226的处理方法应进行研究。采用固体尾矿逆流洗涤和随后进行沉淀或离子交换浓集镭的方法可能证明是合理可行的。对来自不同类型水冶加工工序的粗砂和细泥的浸出特性应当进行研究。

4. 由于铀浓缩物中镭-226浓度的变化取决于所采用的加工方法,因而要测定通过精制过程的镭-226量。如果发现放射性核素水平高,则就表明应进行去污处理以去除这部分放射性废物。

5. 应对铀矿石的物理精选过程进行研究,并应用来减少尾矿渣的体积;而这些尾矿则必须保存和稳定在限定的地区内。

6. 必须确定一种或几种最有效的方法以存放尾矿堆并加以稳定,这对所有水冶作业都是必需的。尾矿堆应在一定的年限内不断地进行查究,以确定稳定方法的效率及其耐久性。

7. 应研究查明由尾矿池和尾矿堆渗漏而造成的对周围土壤和地下水放射性和无机物污染的程度和范围。由此可预测出潜在的长期的环境污染效应。研究和采用不渗透性尾矿池的封闭层可以大大地减少渗漏污染。

8. 对所有的铀的采矿、水冶和精制的地区应制订连续监测规划,以确保放射性核素和其他无机组分不超过最大容许

浓度。在新的地区于开始生产前应作本底调查以取得基线数据。

9. 应制订一些标准来控制排放的矿井水中污染物的浓度。应研究确定水中容许的铀浓度和悬浮固体中镭-226的容许浓度是否过大；并制订钋的最大容许浓度。

10. 不管预先选定的镭-226的最大容许浓度如何，均应尽力把排放到环境中的污染物的浓度降低到尽可能低水平。

第 三 节 引 言

从第二次世界大战结束以来，铀的生产在美国已成为一个较重要的工业。原子的裂变在1942年已成功地被证实，并为核动力的巨大发展开辟了道路。由于需要用铀来生产核武器，就大力开展含铀矿床的勘探工作。较重要的铀矿床位于科罗拉多高原，包括科罗拉多州西部，犹他州东部，亚利桑那州东北部和墨西哥西北部。其他大的矿床位于怀俄明州和新墨西哥州的格兰茨-安布罗西亚湖地区。较小的矿床位于得克萨斯州，北达科他州，南达科他州和华盛顿州。

到五十年代后期，在这些地区建的铀水冶厂每天处理20000吨以上的矿石，其平均氧化铀(U_3O_8)含量为0.28%。从这些矿石中提取铀留下了大量的固体和液体废物需要加以处置。最初，几乎很少注意到铀水冶厂废物会对环境产生严重的污染。结果，无论是固体的或是液体的废物都大量地抛弃在河流中，以致引起受影响地区的普遍污染。在五十年代期间，为确定环境中放射性废物的来龙去脉及其对人体健康

的影响进行了广泛的研究工作。

曾制订饮用水中放射性同位素最大容许浓度的标准；当对辐射的危害性了解得更多时，对上述标准进行了修订，降低了浓度水平。

为使污染降低到符合规定的标准，对废物处理和控制的办法进行了研究。铀加工工业在工艺过程中实行了防止污染的措施，解决了一些问题。由于对环境进行适当的监测，当问题发生时就能很快地得到认识，并制订治理方法以防止污染。

在六十年代初期和中期，因为铀的需要由军事转为较小的商业市场，铀生产曾出现下降趋势。虽然核动力是可能用铀的，但在经济上不能与其他燃料相竞争。因此，许多工厂关闭，其余的工厂则减少了产量。勘探工作比水冶加工作业缩减得更厉害。

在1954年以前，核能仅用于军事目的^[1]。从1954年开始应用于发电、医疗和诊断、食品和材料的辐照以及非军用核爆炸等方面。

到1966年，以铀作燃料的发电用反应堆已发展到能在经济上与其他能源相竞争的地步，因此，就开辟了铀的新市场。1968年美国总发电量中核动力发电不到1%，但到2000年核动力发电可望达到全国总发电量的40—60%。为了满足未来的需要，铀矿勘探工作已事先有了显著的增加。

在铀矿勘探、开采和加工工艺方面可望获得许多新的进展，借以降低成本和增加供应量。较新的加工方法可能遇到要求在防治污染方面更先进的工艺技术问题。

第 四 节 铀矿的供应

铀矿床的探测

在铀矿勘探的初期使用盖革计数器探测地表下18英寸以内的铀矿床^[2]。目前,用勘查钻孔探测较深的矿床,并用闪烁计数器测定岩心放射性,或者用荧光法或比色法专门对铀进行分析。

钻探是一种最经济和广泛使用的勘探方法。大多数的勘探钻是在蕴藏有铀矿床的区域内进行的。这些区域内许多新发现矿点的深度更大,品位也较以前开采的矿石为低。勘探钻通常采用200英尺网度,然后再用50英尺的开拓钻来完成。当用100英尺网度时,一些小矿体常被漏掉。开拓钻探可为采矿设计和成本估算提供所需的资料。

探测铀储量的另一种方法是航测法。用此法可对未勘探过的高放射性地区进行快速扫描。飞机在离地面约500英尺的上空和以同一网度飞行。飞行愈接近地面灵敏度愈高,但是,这就必须把飞行网度缩得更小从而增加勘探成本。所获各点的辐射强度可绘于图上并用这份资料指导地面仪器测量或钻探,从而查出该矿床的范围。

另外一种找矿方法是检测地表空气中的氡气,用这种方法探矿有一定效果^[2]。 α 放射性的测量是在1.5—3英尺深的螺旋钻孔内进行的。用这种方法证明可以探测具有厚盖层的含铀矿石上面的氡气。

铀矿储量

美国铀矿主要来源于由砂岩、泥质岩和石灰岩组成的沉积层中。铀矿物呈孔隙充填、木质组织交代或其他含碳物质交代、以及在石英颗粒间或破碎岩石间呈胶结物形式存在^[1]。

铀矿床有两种类型，即层状矿床或脉状矿床^[3]。美国约95%的铀矿储量分布在砂岩、砾岩、石灰岩和褐煤建造中的层状矿床。这些铀矿床与层面平行，其长度和宽度远远大于厚度。其它储量的脉状矿床产在沿断裂和构造断层的陡斜坡。

美国已知重要铀矿床位于以下三个主要地区内^[4]：

1. 怀俄明盆地——希尔利盆地，鲍德河和加斯山；
2. 科罗拉多高原——尤腊文矿带，大印第安、拉古纳和安布罗西亚湖；
3. 得克萨斯海湾沿岸。

表1示出1971年1月各铀矿资源区铀矿储量分布。所示

各铀矿资源区铀矿储量分布^[7]

表 1

(回收成本 8 美元/磅 U_3O_8)

铀矿资源区	品位, % U_3O_8	占 U_3O_8 总吨数的百分数
科罗拉多高原	0.24	51.08
怀俄明盆地	0.19	38.63
落基山脉北部	0.13	4.26
海湾沿岸平原	0.16	4.22
北部平原	0.24	0.63
其 他	0.35	1.18

铀矿储量均指 8 美元/磅 U_3O_8 的储量。各州铀矿储量分布的状况示于表 2, 1960 年到 1970 年四个主要产铀州的铀矿产量列于表 3。美国目前已知的铀矿储量均蕴藏在西部的上千个

表 2 各州铀矿储量分布^[7]
(回收成本 8 美元/磅 U_3O_8)

州 名	品位, % U_3O_8	占 U_3O_8 总吨数的百分数
新 墨 西 哥	0.24	44.04
怀 俄 明	0.19	38.71
犹 他	0.31	3.68
科 罗 拉 多	0.27	4.14
得 克 萨 斯	0.16	4.22
其 他 州	0.14	5.21

表 3 美国四个主要产铀州的铀矿产量^[7, 8]

年	总 产 量 的 百 分 数			
	新墨西哥州	怀俄明州	科罗拉多州	犹 他 州
1960	48	17	14	13
1961	—	—	—	—
1962	50	18	16	11
1963	—	—	—	—
1964	37	26	15	13
1965	46	24	13	9
1966	48	25	15	5
1967	—	—	—	—
1968	51	25	11	7
1969	50	28	12	—
1970	46	25	12	7

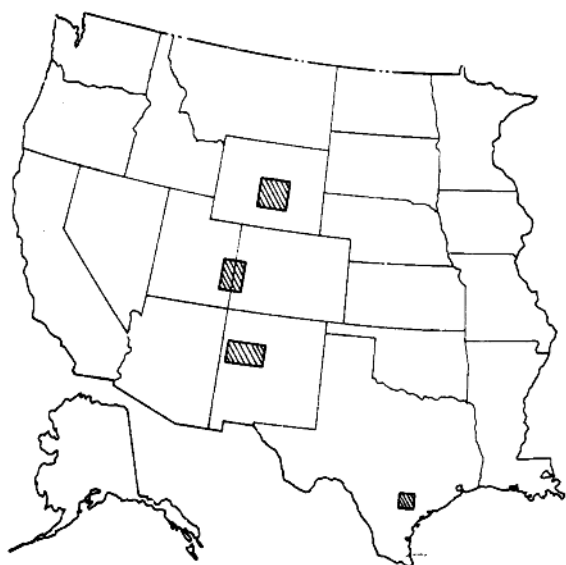


图 2 美国主要铀矿开采区的地理位置

褐煤铀矿位于北达科他州、南达科他州和得克萨斯州。科罗拉多高原的尤腊文矿带含有含钒铀矿物，从矿石中可以有利回收铀和钒。许多铀矿石中含有钼，其量足以从经济上考虑回收。

一些加拿大公司正在美国进行地质勘探工作^[9]。里奥阿尔戈姆有限矿业公司在犹他州莫阿布东南约30英里的里斯本谷地区已发展一个铀矿，并与米丘比施金属矿业公司一道完成在怀俄明州的庞大的勘探规划。从未来对铀的需要着眼，美国几家主要的产铀公司也卷入了加拿大铀的地质勘探工作。许多新公司也参加了铀矿勘探。从1965年到1967年铀矿

勘探公司的数量比过去增加一倍以上。在过去的产铀区域内钻探见矿率为每英尺约 6 磅氧化铀。如今钻探已扩展到过去未曾勘探的区域,再加上要对深部矿床进行研究,因而降低了见矿率,为每英尺约 3 磅氧化铀^[10]。

现有 17 个州已发现和生产铀,但 95% 集中在亚利桑那州、犹他州、新墨西哥州和怀俄明州^[41]。美国东部三分之二地区具有和产铀区相似的沉积矿床。由于钻探已扩展到较新的区域,故可能会发现新的矿体从而大大扩大铀储量。美国约 40% 的地区拥有出产铀矿石的可能。

从 1967 年以来,钻探工作有了迅速的增加。表 4 示出从 1967 年到 1970 年底地表钻探进尺和从 1971 年到 1973 年底的钻探进尺设想计划。过去钻探进尺的峰值出现在 1957 年,这一年钻探进尺为 9.2 百万英尺。与此相比,从 1951 年到 1960 年底年钻探进尺仅有 52 百万英尺。

表 4 地 表 钻 孔 总 量^[7]

年	百 万 英 尺
1967	10.7
1968	23.8
1969	29.9
1970	24.0
1971—1973	54.2 (设想的钻探计划)

表 5 示出从 1966 年到 1970 年底勘探钻孔和地表钻孔的钻探量。勘探钻孔较开拓钻孔量增加得更快,这标志着在突击寻找新储量以满足未来的需要。1957 年出现有勘探钻孔的最高值,其年进尺为 7.3 百万英尺。

表 5 勘探和开拓钻孔量 [7]

年	勘探钻孔量, 千英尺	开拓钻孔量, 千英尺
1966	1 800	2 400
1967	5 435	5 329
1968	16 227	7 527
1969	20 470	9 385
1970	17 981	5 547
1971	12 200 (估计)	7 000 (估计)
1972	11 600 (估计)	6 700 (估计)
1973	9 900 (估计)	6 800 (估计)

表 6 示出各州 1970 年地表钻孔分布的情况。值得注意的是在得克萨斯州出现有较多寻找新的铀矿储量的钻探活动。虽然该州当时的铀矿产量仅占 5%, 但其钻探量却居第二位, 这可能意味着该州铀的生产率即将得到提高。

表 6 各州 1970 年地表钻孔的分布 [7]

州 名	钻孔量, 千英尺	百 分 数
怀 俄 明	9 812	41.7
得 克 萨 斯	6 075	25.8
新 墨 西 哥	5 180	22.0
科 罗 拉 多	1 007.8	4.3
犹 他	641.3	2.7
南 达 科 他	436.9	1.9
其 他 州	374.9	1.6
合 计	23 528	100.0