

铀的提取冶金学

〔美〕R. C. 梅里特 著

《核原料》编辑部 译

内 容 简 介

本书主要反映了从1958到1968年铀矿选冶的技术进展情况,包括铀矿石和矿物的配矿、破碎、磨矿、焙烧、浸出、液固分离、离子交换、溶剂萃取、沉淀和铀矿富集等工艺过程。还包括辐射防护和废物管理,工艺过程控制,辅助部门和维修设施,副产品回收,工厂设计和结构材料等。并以较大的篇幅叙述了美国十五个开工的和十五个关闭的铀水冶厂的工艺和设备状况。书末附有铀矿物和含铀矿物表。

本书可供从事原子能事业的矿冶、地质和后处理工作人员参考,也可供其他矿冶、化工等方面的人员和有关专业的师生参考。

R. C. Merritt

THE EXTRACTIVE METALLURGY OF URANIUM

United States Atomic Energy Commission
1971

铀 的 提 取 冶 金 学

[美] R. C. 梅里特 著
《核原料》编辑部 译

*

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年6月第一版 开本:850×1168 1/32

1978年6月第一次印刷 印张:16 1/2 插页:1

印数:0001—3,290 字数:439,000

统一书号:15031·182

本社书号:1063·15—2

定价: 2.90 元

译 者 的 话

《铀的提取冶金学》一书于七十年代初在美国出版，是继 1958 年美国出版《铀矿石的加工》一书之后又一本较有系统的专著。它反映了 1958 年到 1968 年铀矿选冶的技术进展情况。

书中既有单元工艺过程又有工厂生产实际的叙述。全书可大致划分为选冶工艺过程、工厂设计和管理、工厂生产实践三个部分。本书可供从事原子能事业的矿冶、地质及后处理人员参考，也可供其他矿冶、化工等方面的人员和有关专业的师生参考。

遵照毛主席“洋为中用”的教导，我们翻译了这本书。原书的第十四章为投资和生产费用，因关系不大，故在翻译时删去。第十一章辅助部门和工厂维修设施主要是美国工厂的状况，第十三章中的工厂设计部分也只反映美国人的设计指导思想，虽均译出，却应有选择地参阅。由于我们水平有限，缺点和错误在所难免，欢迎读者批评指正。

目 录

译者的话	v
第一章 铀工业	1
1-1 历史	1
1-2 目前的铀工业	4
1-3 今后的铀工业	4
第二章 铀矿石和矿物	9
2-1 绪论	9
2-2 铀资源	9
2-3 铀矿物	20
第三章 工艺操作	25
3-1 绪论	25
3-2 加工方法	25
3-3 加工方法的选择	31
第四章 矿石贮运和准备	37
4-1 绪论	37
4-2 矿石贮运	37
4-3 配矿	37
4-4 矿石取样	40
4-5 破碎车间	43
4-6 磨矿系统	45
第五章 提取	49
5-1 绪论	49
5-2 焙烧	49
5-3 酸浸	57
5-4 碳酸盐浸出	78
5-5 堆浸和地下浸出	102
5-6 分级和液固分离	112

33347

• 1 •

第六章	浓缩和纯化	130
6-1	绪论	130
6-2	树脂离子交换	131
6-3	溶剂萃取	171
6-4	埃利克斯 (Eluex) 法	197
6-5	从加工溶液中除钼	199
第七章	沉淀和产品制备	209
7-1	绪论	209
7-2	产品规格	209
7-3	早期的沉淀方法	211
7-4	从碱性溶液中沉淀	214
7-5	从纯化的酸性溶液中沉淀	226
7-6	产品的脱水和干燥	234
第八章	其它加工方法	245
8-1	绪论	245
8-2	选矿和富集	245
8-3	从其它铀资源中回收铀	262
8-4	其它加工过程	264
第九章	辐射防护和废物管理	280
9-1	绪论	280
9-2	放射性	280
9-3	生产过程中的废物和粉尘	285
9-4	尾矿处置	289
第十章	工艺过程控制, 取样和分析	301
10-1	绪论	301
10-2	控制方法	301
10-3	取样和分析	310
10-4	冶金统计	317
第十一章	辅助部门和工厂维修设施	320
11-1	绪论	320
11-2	公用事业	320
11-3	维修	325

11-4	仓库和供应	328
第十二章	附属性生产	331
12-1	副产品回收	331
12-2	硫酸厂	337
12-3	碱稀释设备	338
第十三章	工厂设计和结构材料	341
13-1	绪论	341
13-2	工厂布置	341
13-3	结构材料	345
第十四章	1967年美国开工的铀水冶厂概况	353
14-1	绪论	353
14-2	美国金属克莱马克斯公司的克莱马克斯铀厂	353
14-3	阿纳康达公司布卢沃特铀厂	364
14-4	阿特拉斯公司莫阿布铀厂	371
14-5	科特公司	382
14-6	联邦-美国合股公司	387
14-7	福特矿物公司纳瓦霍铀厂	395
14-8	联合核子-霍姆斯特克合股公司	401
14-9	克尔麦吉公司格兰茨铀厂	412
14-10	矿业开发公司	419
14-11	佩特罗托米克斯公司	428
14-12	萨斯奎哈纳-西部公司得克萨斯州卡恩斯县铀厂	436
14-13	联合碳化物公司尤拉文铀厂	440
14-14	联合碳化物公司加斯山铀厂	445
14-15	犹他建筑和采矿公司拉基麦克铀厂	448
14-16	西部核子公司斯普利特罗克铀厂	456
第十五章	美国停产的铀水冶厂	496
15-1	绪论	496
15-2	科罗拉多州大江克欣原子能委员会中间工厂	496
15-3	原子能委员会犹他州蒙蒂塞洛铀厂	498
15-4	阿特拉斯公司犹他州墨西哥哈特铀厂	499
15-5	道恩采矿公司华盛顿州福特铀厂	500

15-6	埃尔帕索天然气公司图巴城铀厂	501
15-7	冈尼森采矿公司	503
15-8	霍姆斯特克-新墨西哥合股公司新墨西哥州格兰茨铀厂	503
15-9	莱克维尤采矿公司俄勒冈州莱克维尤铀厂	504
15-10	萨斯奎哈纳-西部公司怀俄明州里弗顿铀厂	505
15-11	联合碳化物公司科罗拉多州梅贝尔铀厂	505
15-12	联合碳化物公司科罗拉多州赖弗尔铀厂	507
15-13	联合核子公司新墨西哥州安布罗西亚湖铀厂	508
15-14	美国钒公司科罗拉多州杜兰戈铀厂	509
15-15	美国钒公司科罗拉多州纳图丽塔铀厂	510
15-16	维特罗铀公司犹他州盐湖城铀厂	511
	铀矿物和含铀矿物表	515

第一章 铀 工 业

1-1 历 史

近二十五年来,铀工业经历了一系列显著的变革,这种金属很快就由一种工业价值很小的商品一跃而成为核武器的必需原料,而在目前,又作为发电的重要燃料.随着每次变革,在矿石的勘探、开发以及建立新的和扩建现有的生产设备方面,都出现新的高潮.

从四十年代初期开始,军事上需要的铀不得不由已知的资源提供.扎伊尔欣科洛布韦矿床和加拿大大熊湖矿床的富沥青铀矿,加上处理科罗拉多高原地区的老尾矿堆*,供应了第二次世界大战期间所需要的铀^[1-4].这些矿石及浓缩物是采用分析程序中的乙醚萃取法加以精制的.当时所采用的原矿水冶过程与早在四十年前所采用的方法没有什么不同,是用多段选择性沉淀法从浸出液中回收铀的^[5].用现在的标准来衡量,水冶的成本显然是很高的,总的回收率是低的.随着1946年美国原子能法的通过,加速了对资本主义国家和地区新的铀资源的发现和开发工作;同时也扩大了早期研究工作的范围和规模以便改进加工工艺.这些努力使低品位矿石,如南非地区含铀金矿作为铀资源得到了更好的利用,超过了过去认为可利用的程度;同时还导致了加拿大比弗洛奇、埃利奥特湖和班克罗夫特地区一些大的低品位矿床的发现和开发.

美国原子能委员会**通过保证固定的矿石价格、额外津贴、运输津贴、收购站、公路及其他形式的资助来刺激对铀的勘探和采矿

* 指以前提取镭和钒后的尾矿堆。——译者注

** 根据美国1974年10月11日签署的新法案,解散原子能委员会,设立“能源研究和发展署”和“核条法委员会”两个机构。——译者注

工作^[6]。这些刺激导致美国西部可采矿石的已知储量由 1946 年的 1,000,000 吨*增加到 1959 年的 89,000,000 吨。同时也开始调查常规矿石以外的其它可能的铀资源,并研究对此类矿石资源的处理方法。从 1948 到 1970 年的计划完成时,美国原子能委员会的收购总量约达 330,000 吨 U_3O_8 ,其中价值约为三十亿美元的近 180,000 吨 U_3O_8 是由美国国内资源提供的^[7]。

美国的工艺发展计划先是由曼哈顿工程区**主管的,后来移交美国原子能委员会;从 1944 到 1958 年与 20 多个单位订立了合同^[8]。其他国家和地区也差不多同时开始进行了类似的工作,合作和交换情报,特别是与英国、南非地区、加拿大和澳大利亚的合作和交换情报,有助于整个工作的开展。许多对铀的采矿及水冶有兴趣的私人公司也在这个时期获得了工艺经验。这个时期的主要发展为采用树脂离子交换法和溶剂萃取法来浓缩和纯化浸出液,并对各种化学絮凝剂和液固分离技术进行改进。在浸出系统的参数研究方面有:矿石粒度,铀在矿石中的氧化状态对溶解速度的影响,氧化剂的使用,温度,接触时间等。这些研究有助于提高浸出率,并在处理各种不同的矿石时获得同样的高回收率。操作技术和设备设计方面的发展,也有助于提高工艺可靠性和最终生产高纯度浓缩物产品。这一整个发展时期的标志是单位产量的加工费不断下降,这种趋势一直继续到现在。

从 1960 到 1962 年的生产高峰时期,美国开工的工厂数目(不包括由磷酸盐副产铀的工厂)为 24 到 26 个,每年约处理 8,000,000 吨矿石,年产量超过 17,000 吨 U_3O_8 。在 1959 高峰年,加拿大有 19 个开工的工厂,处理了 14,000,000 多吨矿石,约产 16,000 吨 U_3O_8 。生产总值超过了 330,000,000 加拿大元,按出口总值来说,居于所有金属的首位^[9]。1959 年也是南非地区产量最高的一年,17 个铀回收工厂处理了将近 24,000,000 吨金矿石,作为副产品生产了 6,400

* 本书中的“吨”皆为短吨,即 907 公斤。——译者注

** 曼哈顿工程区 (Manhattan Engineering District) 是美国制造第一颗原子弹组织的代号。——译者注

表 1-1 1952—1967 年¹⁾资本主义国家和地区的轴生产量

国家或地区	生 产 量, 短 吨 U ₃ O ₈															
	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967 ^{b)}
阿根廷	—	—	—	—	20	20	19	13	7	6	4	10	37	50	8	c)
澳大利亚	—	—	小	30	300	400	700	1,100	1,300	1,400	1,300	1,200	370	370	330	330
扎伊尔	2,000	2,000	2,000	2,000	1,300	1,300	2,300	2,300	1,200	1,000	—	—	—	—	—	—
加拿大	500	1,000	1,300	1,300	2,280	6,636	13,403	15,892	12,748	9,641	8,430	8,352	7,285	4,443	3,761	3,753
芬兰	—	—	—	—	—	—	—	—	40	20	—	—	—	—	—	—
法国	—	—	—	—	—	465	660	950	1,379	1,619	1,978	1,987	1,911	1,887	1,260	c)
加蓬	—	—	—	—	—	—	—	—	d)	428	514	582	586	724	600	500
马达加斯加	—	—	—	—	—	70	95	115	d)	94	111	123	169	65	65	c)
葡萄牙	—	—	—	—	120	120	120	120	120	132	24	11	22	42	46	c)
南非 ¹⁾	200	1,500	2,000	3,300	4,365	5,700	6,245	6,445	6,409	5,468	5,024	4,532	4,445	2,942	3,286	3,300
西班牙	—	—	—	—	—	—	—	—	60	55	55	—	100	130	c)	c)
瑞典	—	—	—	—	6	10	10	10	10	10	10	10	10	20	50	50
美国	1,000	2,300	2,500	5,000	6,000	8,640	12,570	16,420	17,760	17,399	17,010	14,218	11,847	10,442	9,587	9,125
其它 ²⁾	—	—	—	—	—	25	50	41	3	12	12	12	—	—	—	—
资本主义国家和地区总产量	3,700	6,800	7,800	11,630	14,470	23,270	36,250	43,350	41,130	36,300	34,600	31,024	26,782	21,115	18,993	17,058

注: a) 数据来源于美国矿业局矿物年鉴 (1956—1967) 和加拿大动力、矿业及资源部矿物资源局³⁾。1956年以前的数据和其它一些项目是估计的。 b) 初步数据。 c) 无数据。 d) 包括在法国总产量内。 e) 西德、津巴布韦及马拉维。
1) 南非矿业公会第 78 届年度报告。

多吨 U_3O_8 。1952 到 1967 年各国和地区的总产量列于表 1-1。

从 1962 到 1967 年，美国及其它等国开工的铀厂数目和生产量都有相当大的缩减。显然，早在 1957 年就已看出，大的矿石资源已经开发，而且由于合同的扩大使订购量超过美国政府直到 1966 年的需要量。1958 年美国原子能委员会声明不再购买以后开发的矿石资源中的铀。因此一些工厂在合同期满后关闭，并使在美国、加拿大及南非地区所订的长期合同最后延期交货。与美国一些工厂所订的合同最后延期到 1970 年。这些合同的延期使美国政府的购买量稍高于需要量的水平。

1-2 目前的铀工业

1967 和 1968 年期间美国有 16 个厂作为铀浓缩物的主要生产厂开工生产。1968 年这些工厂的总产量约为 12,300 吨 U_3O_8 ，不过其中几个厂开工不足^[10]。

1968 年，加拿大只有四个厂，澳大利亚有一个厂，南非地区有七个厂生产铀。国外其他的一些工厂还处于备用状态，在需要时可重新开工。例如，加拿大在两年到五年的期间内，在目前的最高年产量 5,700 吨 U_3O_8 之外，至少还可增加 5,300 吨 U_3O_8 ^[9,12]。各资本主义国家和地区目前正进行勘探工作，一些新厂也处于筹建阶段。法国的铀产量在欧洲占首位，1962 和 1963 年四个厂生产了近 2,000 吨 U_3O_8 ^[9]，但 1967 年的产量下降到大约 1,300 吨。加蓬的铀厂把粗浓缩物运到法国进一步加工。此外，在西班牙、瑞典、葡萄牙、西德、澳大利亚、阿根廷和印度都各有一个厂进行生产。

1-3 今后的铀工业

制备核电站燃料的铀浓缩物，目前正处在由政府市场转为商业市场的过渡时期。人们对于核动力在经济上可与其他传统能源进行竞争一事已无疑义，但何时何处究竟需要多少铀，仍在推测之

中。铀的需要量正在迅速上升，按 1967 年估计：1980 年对 U_3O_8 的需要量可能是 1962 年原来估计的三倍^[13]。图 1-1 示出美国、其它资本主义国家和地区到 1980 年止对 U_3O_8 的年需要量^[14]，这是美国原子能委员会 1967 年所做的中等估计。其他估计者提出的消费数字为美国原子能委员会数字的 80% 到 140%。关于将来电能总来源的各种设想表明，1980 年核发电将占美国电力生产的三分之一左右，2000 年时将占一半^[15]，而 1966 年仅占百分之一。

表 1-2 美国铀矿石加工厂

	近似的处理能力 (吨/日)
科罗拉多州	
克莱马克斯铀公司, 大江克欣 ^{c)} 铀厂	500
科特公司, 坎农城铀厂	400
联合碳化物公司, 尤拉文及赖弗尔 ^{c)} 铀厂	1,000
新墨西哥州	
阿纳康达公司, 格兰茨铀厂	3,000
福特矿物公司, 希普罗克 ^{a)} 铀厂	400
克尔麦吉公司, 格兰茨铀厂	6,000
联合核子-霍姆斯特克合股公司, 格兰茨铀厂	3,500
南达科他州	
矿业开发公司, 埃奇蒙特 ^{b)} 铀厂	650
得克萨斯州	
萨斯奎哈纳西部公司, 福尔斯城铀厂	1,000
犹他州	
阿特拉斯矿物公司, 莫阿布 ^{c)} 铀厂	1,500
怀俄明州	
联邦-美国合股公司, 弗里蒙特县铀厂	900
佩特罗托米克斯公司, 卡尔邦县铀厂	1,000
联合碳化物公司, 纳特罗纳县铀厂	800
犹他建筑和采矿公司, 弗里蒙特县铀厂	1,000
西部核子公司, 杰弗里城铀厂	1,200

a) 1968年7月1日停工。

b) 主要为生产钒而开工。

c) 生产铀及钒。

铀工业发展的新周期已经开始，这可由勘探的大力加强和美国矿石估计储量自 1959 年停滞以来又重新首次开始增加得到证明。据估计，美国、其他资本主义国家和地区 1980 年铀工业的生产能力将接近 1959 和 1960 年最高年产量的一倍。

表1-3 美国各铀厂的单元操作(1967年)

单 元 操 作	工厂数
加盐焙烧	2
浸出系统	
酸浸	13
碱浸	3
分级和液固分离	
泥砂分级	7
逆流倾析	9
过滤	3
树脂离子交换	
篮式矿浆吸附	2
篮式矿浆吸附(碱法系统)	1
连续矿浆吸附	3
固定床	1
移动床	1
溶剂萃取	
胺体系	7
烷基磷酸体系	3
埃利克斯 (Eluex) 法	4
沉淀	
两段(石灰和 MgO)	1
苛性钠(碱法系统)	3
氨	8
MgO	3
H ₂ O ₂	1
回收钒的操作	5

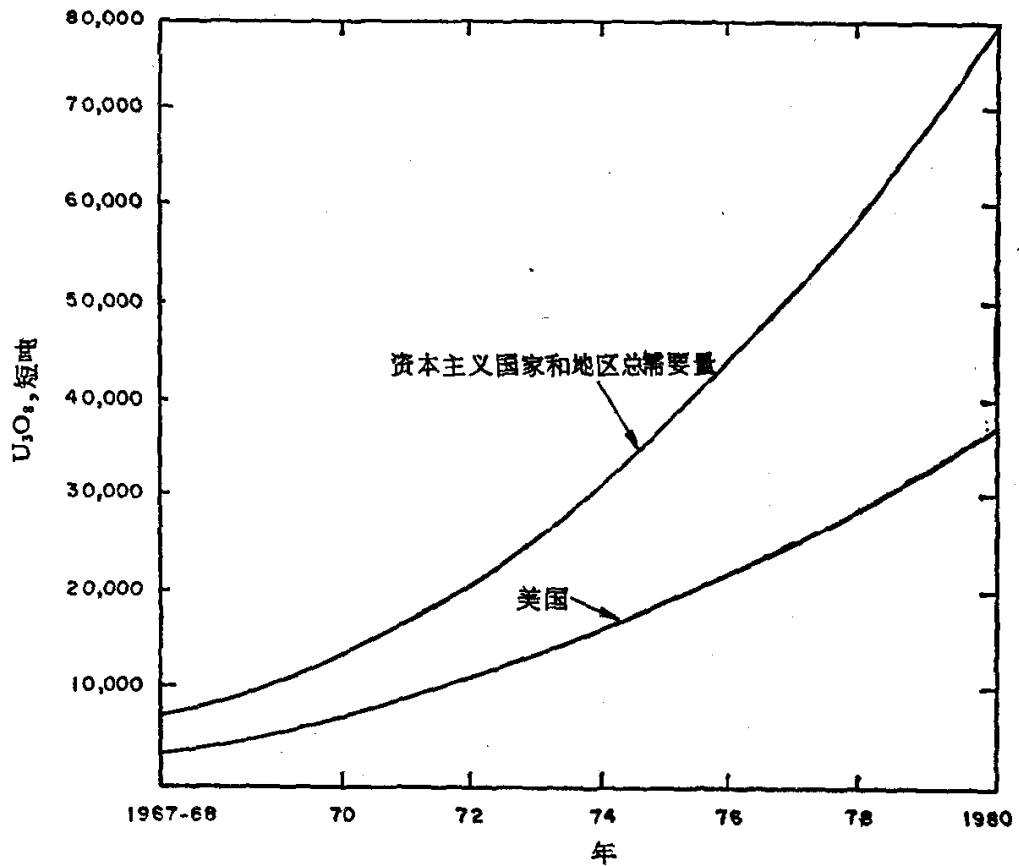


图 1-1 美国、其它资本主义国家和地区核动力对 U_3O_8 的年需要量(估计)^{[1][4]}

参 考 文 献

- [1] Richard G. Hewlett and Oscar E. Anderson, *The New World*, Vol. I of a History of the United States Atomic Energy Commission, The Pennsylvania State University Press, 1962, p. 65.
- [2] L. Taverner, An Historical Review of the Events and Developments Culminating in the Construction of Plants for the Recovery of Uranium from Gold Ore Residues, *J. South African Institute Min. Met.*, 57 (4), 125—143 (1956).
- [3] Robert D. Nininger, *The Market for Uranium*, USAEC Report IN-819, Sept. 12, 1967.
- [4] R. L. Doan, Past and Future Uranium Utilization, *Mining Eng.*, September 1957, pp. 1009—1012.

- [5] A. Q. Lundquist and J. L. Lake, History and Trends of the Uranium Plant Flowsheet, *Mining Cong. J.*, November 1955. pp. 37—42.
- [6] Al Knoerr and George Lutjen et al, U₃O₈—Formula for Profits, *Eng. Mining J.*, 155, No. 9, pp. 87—118, September 1954.
- [7] Robert D. Nininger, *The Outlook for Uranium and Atomic Energy*, USAEC Report IN-765, Mar. 7, 1967.
- [8] J. W. Barnes, Process Development in Western United States Uranium Procurement, *Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy*, Geneva, 1958, Vol. 3, pp. 183—191.
- [9] J. W. Griffith, *The Uranium Industry—Its History, Technology and Prospects*, Mineral Report 12, Mineral Resources Division, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1967.
- [10] USAEC Annual Report to Congress—1968, p. 25.
- [11] U. S. Atomic Energy Commission, *Statistical Data on the Uranium Industry*, January 1969, p. 43.
- [12] R. M. Williams, Uranium, *Canadian Mining J.* 89, No. 2, 129—133 (1968).
- [13] Rafford L. Faulkner, *The Uranium Mining Industry and its Market*, USAEC Report IN-831, Nov. 2, 1967.
- [14] Rafford L. Faulkner, *Reserves*, USAEC Report S-24-68, May 23, 1968.
- [15] Robert P. O'Brien, Comparison of Energy Sources for the Electric Power Industry, *Mining Cong. J.*, February 1968, pp. 88—95.

第二章 铀矿石和矿物

2-1 绪 论

本章阐述铀矿石和矿物的一般知识。有关本题目的详细讨论可参阅所列文献[1—13]。

2-2 铀 资 源

2-2.1 铀矿石的成因

铀广泛地分布于自然界，它在地壳中的平均含量估计为 2—4ppm，与钼、钨、砷和铍的含量相近，但高于镉、铋、汞和银等金属。象花岗岩这样含氧化硅较高的火成岩中，铀含量稍高，约为 6 ppm；在氧化硅含量低而镁、铝和铁含量高的岩石中，铀含量可能低于 1ppm。在科罗拉多前岭和其它某些含碱高而含钙低的花岗岩中，铀含量可高于 100ppm。

由于处在氧化状态的铀易于溶解，所以它分布广泛，许多大的铀富集区含量低于 0.20% U_3O_8 。铀酰离子在酸性和碳酸盐-碳酸氢盐溶液中的溶解度都很高，它与碳酸根和硫酸根离子能形成稳定的络合物。在岩浆冷却过程中释出热液的高温高压条件有利于铀的溶解。

花岗岩或凝灰岩受风化作用所析出的铀可由地下水运送到岩层的含水层、孔隙、裂隙和裂缝中。这种移动可使铀分散，而在有利的条件下也可使铀富集。原沉积物的物理特性对溶液起疏导作用，有助于铀的富集。

在自然界中，温度与压力的降低，还原作用，离子交换，中和作

用或化学置换作用都可能引起溶液中铀的沉淀。其主要机理是由于可溶性铀酰离子的还原而从热液和地下水溶液中形成四价铀的矿物。这种还原可能是通过碳质物、硫化氢或其它还原剂的作用来实现的。曾认为象去磺弧菌属 (*Desulfovibrio desulfuricans*) 之类的硫还原厌氧菌对以有机物和硫酸盐为原料产生硫化氢气体时是起作用的^[10]。美国许多砂岩型矿床中与铀矿物伴生的硫化矿物就证明了由细菌生产的硫化氢的还原作用。碳质物不仅可作为一种还原剂,而且当与某些粘土在一起时还能从溶液中吸附铀而起一种离子交换剂的作用。该机理对含铀碳氢化合物的形成和高粘土矿中铀的富集很重要。

海水中的铀能沉淀或吸附到海相沉积物中^[11]。含铀的黑色页岩和磷钙土就是这一过程的产物。

沉积岩和变质岩中的铀矿床所呈现的产状和形状不一定与原矿床相同,在某些地区可能发生过溶解、再沉淀以及变质作用等多次旋迴^[10]。旋迴迁移的概念有助于说明关于成因的各种地质解释之间的矛盾。

各种主要物料的典型铀含量列于表 2-1。

2-2.2 采矿区和矿石储量

资本主义国家和地区的主要铀资源分布在美国、加拿大和南非。1967年10月估计的铀储量列于表 2-2^[14,15]。表中所列“可靠储量”是以在品位、数量和赋存状态方面可用现行采矿和加工工艺加以利用的已知矿床为依据的。高价格范围的数据可靠性差。“估计储量”是属于对已知矿床中未勘探的延伸部分或对已知或预计的产铀区中未发现的矿床的推测资源,而这类储量可在指定的价格范围内经济地开发和生产。这后一类的可靠性显然是不足的,但至少可反映出新的勘探工作将增加新储量的实际可能性。

美国 美国已知的主要铀矿床分布在三个主要地区,包括怀俄明盆地(即希尔利、鲍德河和加斯山)、科罗拉多高原(即尤拉文矿带、大印第安、拉古纳和安布罗西亚湖)和得克萨斯的墨西哥湾