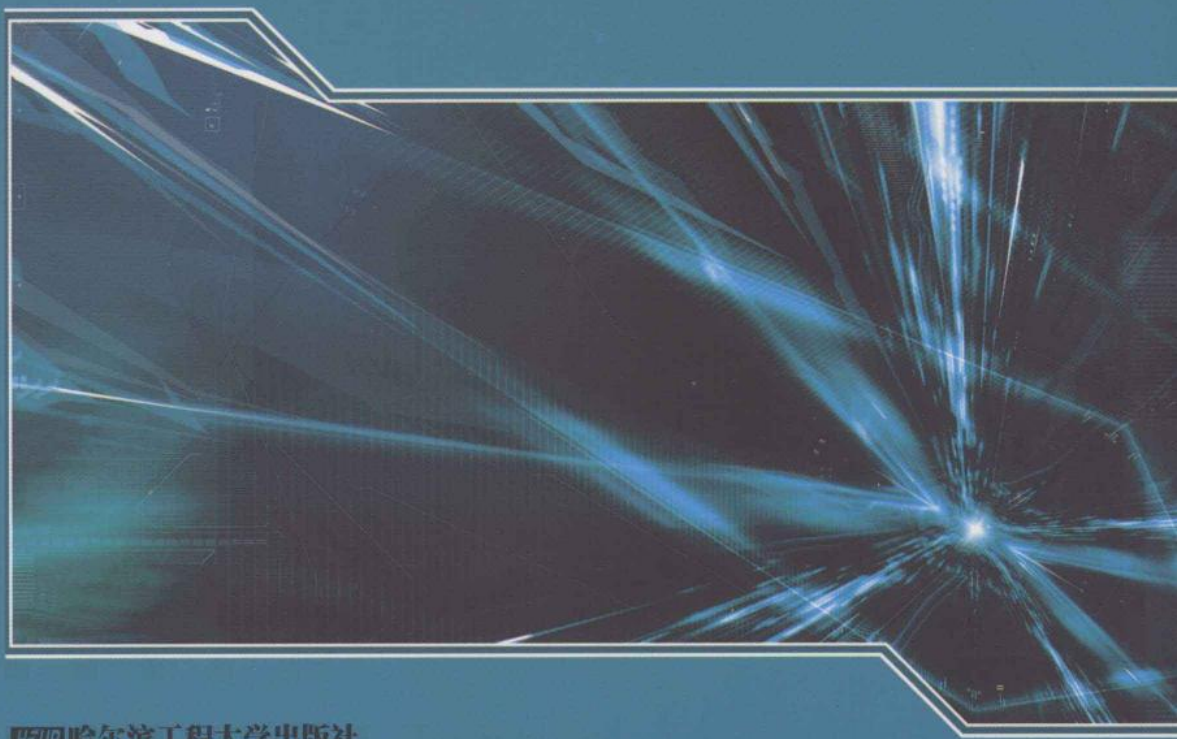




国防特色教材·核科学与技术

现代铀矿床开采科学技术

杨仕教 主编
陶干强 戴剑勇 曾 晟 王清良 杨月平 副主编



HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

北京航空航天大学出版社
哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社
西北工业大学出版社



国防特色教材系列·核科学与技术

现代铀矿床开采科学技术

杨仕教 主编

陶干强 戴剑勇 曾 晟 王清良 杨月平 副主编

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书共分6章。第1章介绍了全球铀矿资源的战略管理;第2章介绍了当今世界上常用的铀矿床矿量、品位估算方法以及三维地质模型的基本原理和方法;第3章介绍了铀矿山常规采矿技术,包括铀矿地下开拓方法、铀矿地下开采采矿方法、铀矿地下开采主要生产工艺和铀矿露天开采的工艺技术;第4章介绍了铀矿山非传统采矿技术,包括溶浸采铀技术、地表原地浸铀技术、地表堆浸、原地破碎浸出法、微生物浸铀技术、高产高效新技术应用和深部开采技术;第5章介绍了数字矿山及其战略意义、数字铀矿山3S技术、数字铀矿山信息系统构成、数字铀矿山扁平化管理模式构建;第6章介绍了铀矿山环境综合治理。

本书资料丰富、体系新颖、方法精炼、详略得当、图件清晰、文句流畅,适合于采矿工程专业的研究生和研究人员使用,也可以作为本科生和采矿技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代铀矿床开采科学技术/杨仕教主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.3

ISBN 978-7-81133-669-6

I. ①现… II. ①杨 III. ①铀床开采 IV. ①FD868

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第025721号

现代铀矿床开采科学技术

主编 杨仕教
责任编辑 刘凯元

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区东大直街124号 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

http://press.hrbeu.edu.cn E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

黑龙江省教育厅印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:18.5 字数:335千字

2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷 印数:1000册

ISBN 978-7-81133-669-6 定价:39.00元

前 言

我国自 20 世纪 50 年代建设第一批铀矿山和水冶厂以来,迄今已形成了从设计、科研到铀矿冶生产的完整系统,为我国的国防和核电建设作出了重要贡献。近几十年来,我国铀矿开采技术取得了长足的发展。从第一个万吨堆浸的成功,到我国第一座堆浸矿山的建成;从地浸技术试生产的成功,到地浸矿山的建成,我国铀矿冶在创新中求生存,在改革中发展前进,以崭新的姿态站到了历史的新起点。

进入 21 世纪,能源和环境成为世界经济发展的一个重要问题,作为清洁能源,发展核电受到人们的高度关注,积极推进核电建设,成为我国能源建设的一项重要政策。目前,我国核电厂每年消耗约 1 300 吨铀,国内产量仅能满足其三分之一的需求。根据我国核电中长期发展规划,到 2020 年,核电运行装机容量要达到 4 000 万千瓦,届时每年将消耗 10 000 吨左右的天然铀。目前,我国铀采冶能力和水平远不能满足核电对天然铀的需求。由于我国铀矿床品位低、规模小、开采难度大,亟需研发铀采冶的新技术和新工艺。

铀采冶技术主要包括溶浸采铀技术(堆浸、原地爆破浸出、原地浸出)、常规采铀技术和微生物浸铀技术。

1. 堆浸

世界主要产铀国,如澳大利亚、法国、俄罗斯、阿根廷、尼日尔、日本等国在堆浸技术方面都开展大量的研究,并有一定的应用规模。堆浸技术也是国内天然铀生产的主体技术,其主要发展特点为:向堆浸方式多样化方向发展,筑堆规模不断扩大,机械化与自动控制程度不断提高。

2. 原地爆破浸出

加拿大、法国、原苏联和东欧国家等国在原地爆破浸出采铀方面开展了研究,并有一定的应用规模。在国内,南华大学(核工业第六研究所)于 1969~1971 年在衢州铀矿率先进行了 300 t 级的浅眼就地破碎溶浸采铀试验,金属浸出率 82.2%。20 世纪 90 年代,南华大学在西北某铀矿、广东某铀矿和江西某铀矿,相继进行了中深孔和深孔爆破筑堆井下原地爆破浸出采铀技术研究,爆破规模达万吨级,浸出率均超过 80%,并采用该技术新建了两座铀矿山。原地爆破浸出采铀的研究方向:矿石块度控制技术的研究、布液技术研究、溶浸范围的控制、就地破

碎溶浸采矿法最佳使用条件的研究。

3. 原地浸出

美国、澳大利亚和前苏联等国在原地浸出采铀方面开展了大量研究,并都达到了很高的水平。在国内,南华大学(核工业第六研究所)于20世纪70年代率先在广东、东北和云南进行了原地浸出采铀的试验研究,并采用该技术在云南和新疆新建了多座铀矿山。原地浸出的发展方向:提高自动监控水平,采用新型浸出剂,开展低渗透铀矿床的地浸技术研究。

4. 常规采铀技术

常规采铀技术为目前我国铀矿山所采用的主要生产技术,存在的主要问题是:机械化程度低、劳动强度大、回收率低、三废排放量高。南华大学在无轨采矿、煤型铀矿床开采、浸出液回收技术与设备、预防和控制铀矿山地质灾害等方面均开展了大量试验研究。从国内外常规采铀发展来看,主要发展趋势是高效、安全、无废和智能开采。

5. 微生物浸铀技术

国外在20世纪60年代开始微生物浸铀技术研究,加拿大、美国、英国、前苏联、葡萄牙等国先后开展了微生物浸铀的试验和工艺生产,其中西班牙几乎所有的铀都是通过细菌浸出提取的。在国内,南华大学是开展微生物浸铀研究较早的单位,率先将微生物浸铀应用到原地浸出、原地爆破浸出工艺中。此外,核工业北京化冶研究院、东华理工大学目前均在开展相关的试验研究。目前,该技术存在的主要问题是浸铀菌种单一,且均是从自然选育获得的,因此生长速度缓慢、适应性差。本技术领域的主要发展方向是选育新的浸铀微生物,利用现代分子生物技术和基因工程手段构建对环境适应性强基因工程菌,对浸出过程进行优化调控,研发高效生物反应器。

本书在广泛资料调研的基础上,结合作者多年的科研实践经验,对现代铀矿床开采的最新技术和工艺作了系统的阐述,同时反映了50年来我国铀矿床开采的理论与实践,丰富和发展了现代铀矿床开采科学技术体系。

本书在编写过程中参考了国内外许多学者的论著和科研成果在此表示衷心地感谢!同时由于时间仓促,书中如有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2009年11月

目 录

第 1 章 全球铀矿资源战略管理	1
1.1 国际铀矿资源分布现状	1
1.2 铀矿石价格趋势与生产勘探定性分析与预测	8
1.3 我国铀矿资源战略定性分析	15
第 2 章 铀矿床地质模型与储量计算	23
2.1 探矿数据的统计学分析	23
2.2 品位和储量计算	29
2.3 三维地质模型	39
2.4 地质统计学	41
第 3 章 铀矿山常规采矿技术	59
3.1 铀矿地下开拓方法	59
3.2 铀矿地下开采采矿方法	68
3.3 铀矿地下开采主要生产工艺	91
3.4 铀矿露天开采	95
第 4 章 铀矿山非传统采矿技术	120
4.1 溶浸采铀方法概述	120
4.2 地表原地浸铀采矿法	121
4.3 地表堆浸	131
4.4 原地破碎浸出法	139
4.5 微生物浸铀	166
4.6 高产高效新技术应用	173
4.7 深部开采	188
第 5 章 数字矿山	223
5.1 数字矿山及其战略意义	223
5.2 数字矿山的 3S 技术	224

第1章 全球铀矿资源战略管理

1.1 国际铀矿资源分布现状

1.1.1 铀矿资源特性

铀(拼音:yóu,英语:Uranium)元素类型为金属,元素原子量为238.0,密度为 $19.05 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$,熔点为 $1\ 132\text{ }^\circ\text{C}$,沸点为 $3\ 818\text{ }^\circ\text{C}$ 。1789年,由德国化学家克拉普罗特(M. H. Klaproth)从沥青铀矿中分离出,以1781年新发现的一个行星——天王星命名,即Uranium,元素符号定为U。1841年,佩利戈特(E. M. Peligot)指出,克拉普罗特分离出的“铀”,实际上为二氧化铀。他用钾还原四氯化铀,成功地获得了金属铀。铀共有三种结晶变体:斜方晶体、四方晶体、体心立方体。铀是一种带有银白色光泽的金属,比铜稍软,具有很好的延展性,很纯的铀能拉成直径0.35 mm的细丝或展成厚度0.1 mm的薄箔。铀的密度很大,与黄金差不多,每立方厘米约重19 g。铀的化学性质很活泼,易与大多数非金属元素发生反应。铀和许多金属作用,生成金属间化合物。铀在空气中易氧化,生成一层发暗的氧化膜,能与酸作用,与苛性碱无作用,但加入过氧化物就生成水溶性的过铀酸盐。铀在自然界中常以三种同位素 ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U 混合体存在于铀矿中,少量存在于独居石等稀土矿石中。 ^{238}U 的半衰期为45亿年。块状的金属铀暴露在空气中时,表面被氧化层覆盖而失去光泽。粉末状铀于室温下,在空气中,甚至在水中就会自燃。美国用贫化铀制造了一种高效的燃烧穿甲弹——“贫铀弹”,“贫铀弹”利用的就是铀极重而又易燃这两种性质。铀元素在自然界的分布相当广泛,地壳中铀的平均含量约为百万分之二点五,即平均每吨地壳物质中约含2.5 g铀,这比钨、汞、金、银等元素的含量还高。1896年有人发现了铀的放射性衰变。1939年,哈恩(O. Hahn)和斯特拉斯曼(F. Strassmann)发现了铀的核裂变现象。

核燃料资源主要是铀资源,即能从矿石中提取核燃料的矿物。铀是亲石元素,化学性质活泼,分布广泛,可在多种地质条件下形成。世界上已发现20多种铀矿类型,具有工业意义的类型主要有不整合脉型、砂岩型、石英卵石砾岩型、钠长岩型、白岗岩型、脉型等。其中砂岩型、不整合脉型、石英卵石砾岩型及脉型4种占世界总储量的90%,铀矿储量有1/2赋存在早元古代岩层中,有1/3赋存在中、新生代岩层中,有15%赋存在晚元古代和晚古生代岩层中。铀矿有土状、粉末状,也有块状、钟乳状、肾状等等。有些土状的铀矿被称为铀黑,而块状的则称为沥青铀矿,土状的铀矿没有什么光泽,块状的则具有沥青光泽。铀矿石是具有放射性的危险矿

物,它们除了可以提取铀用于核工业外,还可以从中提取到镭和其他稀土元素。铀是一种极为稀有的放射性金属元素,铀矿是矿石家族中的“玫瑰花”,色彩绚丽,却具放射性(见图1.1)。铀是核裂变的主要物质,是极其重要的战略资源,是保持国家核威慑力量和维系核大国地位的坚强保障。

千百年来铀一直被用作给玻璃染色的色素,然而现在纯金属铀是核反应堆和原子弹中使用的核燃料,少量用于电子管制造业中的除氧剂和惰性气体提纯(除氧、氢)。铀通常被人们认为是一种稀有金属,尽管铀在地壳中的含量很高,比汞、铋、银要多得多,但由于提取铀的难度较大,所以要比

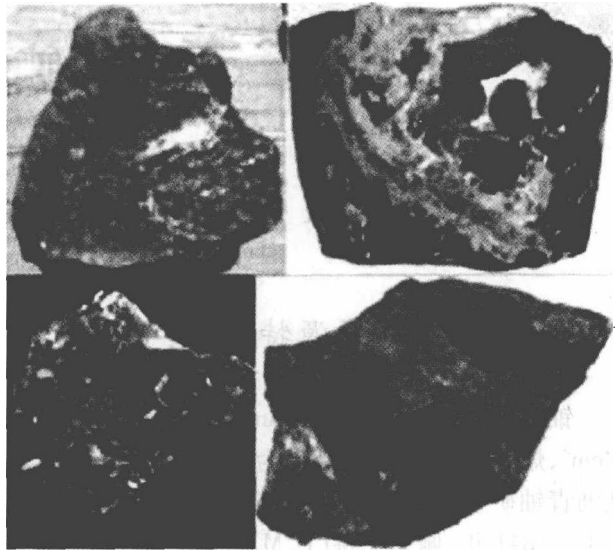


图 1.1 某铀矿石图

汞这些元素发现晚得多。最重的天然元素铀已经成为新能源的主角,在居里夫妇发现镭以后,由于镭具有治疗癌症的特殊功效,镭的需要量不断增加,因此许多国家开始从沥青铀矿中提炼镭,而提炼过镭的含铀矿渣就堆在一边,成了“废料”。然而,铀核裂变现象发现后,铀变成了最重要的元素之一,这些“废料”也就成了“宝贝”,铀的开采工业大大地发展起来,并迅速地建立起了独立完整的原子能工业体系。铀在各种岩石中的含量很不均匀,例如在花岗岩中的含量就要高些,平均每吨含 3.5 g 铀,依此推算,一立方公里的花岗岩就会含有约一万吨铀。海水中铀的浓度相当低,每吨海水平均只含 3.3 mg 铀,但由于海水总量极大,且从水中提取有其方便之处,所以目前不少国家,特别是那些缺少铀矿资源的国家,正在探索海水提铀的方法。由于铀的化学性质很活泼,所以自然界不存在游离的金属铀,它总是以化合状态存在着。已知的铀矿物有 170 多种,但具有工业开采价值的铀矿只有二三十种,其中最重要的有沥青铀矿(主要成分为八氧化三铀)、品质铀矿(二氧化铀)、铀石和铀黑等。很多的铀矿物都呈黄色、绿色或黄绿色。

铀矿石的品位一般很低(约千分之一),而用作核燃料的最终产品的纯度又要求很高(金属铀的纯度要求在 99.9% 以上,杂质增多,会吸收中子而妨碍链式反应的进行),所以铀的冶炼不像普通金属那样简单。首先要采用“水冶工艺”,把矿石加工成含铀 60% ~ 70% 的化学浓缩物(重铀酸铵),再作进一步的加工精制。铀水冶得到的化学浓缩物(重铀酸铵)呈黄色,俗称黄饼子,但它仍含有大量的杂质,不能直接应用,需要作进一步的纯化。为此先用硝酸将重铀酸铵溶解,得到硝酸铀酰溶液,再用溶剂萃取法纯化(一般用磷酸三丁酯作萃取剂),以达到

所要求的纯度标准。纯化后的硝酸铀酰溶液需经加热脱硝,转变成三氧化铀,再还原成二氧化铀。二氧化铀是一种棕黑色粉末,很纯的二氧化铀本身就可以用作反应堆的核燃料。为制取金属铀,需要先将二氧化铀与无水氟化氢反应,得到四氟化铀,最后用金属钙(或镁)还原四氟化铀,即得到最终产品金属铀。如欲制取六氟化铀以便进行铀同位素分离,则可用氟气与四氟化铀反应。至此,能作核燃料使用的金属铀和二氧化铀都生产出来了,只要按要求制成一定尺寸和形状的燃料棒或燃料块(即燃料元件),就可以投入反应堆使用了。

1.1.2 中国铀矿资源的分布情况

几代核地质工作者经过不懈努力,利用数字找矿技术的创新和发展实现了铀矿勘探工作主流程的现代化改造,经过50多年的努力探索,掌握了我国铀矿资源的分布情况和不同类型铀矿床的成矿规律,完成了全国铀矿产分布图、全国铀矿成矿规律图和全国铀矿预测图等众多基础性图件的编制工作;圈定出20余条铀成矿带,找到了各种类型的铀矿床数百个,使我国探明的铀资源量位居世界前列,成为铀资源最为丰富的国家之一。尤其近几年来,核工业地质局进一步突出找矿主业,依靠科技进步,优化地质部署,主攻我国北方中生代沉积盆地地浸砂岩型铀矿床,取得了可喜的成果,突破了几个重点地区,找到了几个万吨级以上的铀资源基地。

据近年我国向国际原子能机构陆续提供的一批铀矿田的储量推算,我国铀矿探明储量居世界第10位以后,不能适应发展核电的长远需要。矿床规模以中小为主(占总储量的60%以上),矿石品位偏低,通常有磷、硫及有色金属、稀有金属矿产与之共生或伴生。矿床类型主要有花岗岩型、火山岩型、砂岩型、碳硅泥岩型铀矿床4种;其所拥有的储量分别占全国总储量的38%,22%,19.5%,16%。含煤地层中铀矿床、碱性岩中铀矿床及其他类型铀矿床在探明储量中所占比例很小,但具有找矿潜力。中国铀矿成矿时代的时间跨度为距今1900年至3 Ma之间,即古元古代到第三纪之间,以中生代的侏罗纪和白垩纪成矿最为集中。空间分布上我国铀矿床分南、北两个大区,北方铀矿区以火山岩型为主,南方铀矿区则以花岗岩型为主。我国至今已探明大小铀矿200多个,矿石以中低品位为主,0.05%~0.3%品位的矿石量占总资源量的绝大部分。矿石组分相对简单,主要为单铀型矿石,仅在极少矿床有其他金属元素共生,形成铀钼、铀汞、铀铜等多金属和铀、钍、稀土矿床。矿床规模以中小型为主(占总储量的60%以上),在一些矿田内,矿床往往成群出现,有的几个,有的几十个,而其中常有1~2个主体矿床存在,探明的铀矿体埋深多在500 m以内。

全国铀矿资源分布不均衡,已有23个省(区)发现铀矿床,但主要集中分布在赣、粤、黔、湘、桂、新、辽、滇、冀、蒙、浙、甘等省(区),尤以赣、湘、粤、桂四省(区)资源为富,占探明工业储量的74%。我国共探明大小铀矿床(田)200多个,主要分布在江西、广东、湖南、广西,以及新疆、辽宁、云南、河北、内蒙古、浙江、甘肃等省(区)。矿床以中小型为主,其中主要的铀矿床有:相山铀矿田、郴县铀矿床、下庄铀矿田、产子坪铀矿田、青龙铀矿田、腾冲铀矿床、桃山铀矿

床、小丘源铀矿床、黄村铀矿床、连山关铀矿床、蓝田铀矿床、若尔盖铀矿床、芟岭铀矿床、伊犁铀矿床、白杨河铀矿床。已经建成和新建的厂矿有：衡阳铀矿、郴州铀矿、大浦街铀矿、上饶铀矿、抚州铀矿、乐安铀矿、翁源铀矿、衢州铀矿、澜河铀矿、仁化铀矿、本溪铀矿、蓝田铀矿、伊犁铀矿等。中国铀矿成矿时期以中生代为主，并主要集中在 87 ~ 45 Ma。成矿的先后顺序是：混合岩型、伟晶岩型、花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型和砂岩型。据铀矿床矿化类型、成矿时代和大地构造单元中的分布特征，划分了东部铀成矿省、天山、祁连山铀成矿省、滇西铀成矿区。并据矿床成因、赋矿围岩和成矿特征将中国主要铀矿床分为内生铀矿床（岩浆型、热液型）、外生铀矿床（成岩型、后生淋积型）和复成因铀矿床三类。在先进的技术支撑和优秀的勘查队伍保障下，我国铀矿资源潜力前景也相当可观。目前，我国还有十多个铀成矿带及大面积的勘查空白区尚待开展系统的勘查评价，找矿前景十分广阔。目前中国铀矿地质勘查已取得突破，北方地区落实了大型及特大型铀矿基地，开辟了一批有潜力的找矿新区；南方老矿田资源潜力挖掘取得明显效果，其中，伊犁和鄂尔多斯铀矿地质勘查成效显著。在伊犁地区，中核集团发现并提交中国第一个万吨级砂岩铀矿床，伊犁盆地成为中国第一个特大砂岩铀矿田。在鄂尔多斯地区，中核集团提出“古层间氧化带铀成矿观点”，先后探明中国迄今为止最大的铀矿床。目前看来，我国铀资源完全可以满足国内核电发展的需求。

1.1.3 世界铀矿资源的分布情况

铀资源勘查始于 20 世纪 40 年代中期，当时主要用于制造核武器。20 世纪 70 年代因核电发展需要，在世界范围出现找铀高潮。在澳大利亚、加拿大相继发现了不整合脉型铀矿床，储量大、品位富；在美国、澳大利亚、巴西、非洲和欧洲等地也发现了新的铀矿床，如含铀钠长岩型、砂岩型、花岗质角砾岩型（Cu - U - Au - Ag 型）及钙结岩型等。1980 年以后，铀矿勘查和生产走向低潮，这一时期铀矿勘查投入减少，但仍取得一些新的成果，如加拿大西加湖矿床，澳大利亚奥林匹克坝矿床（属世界上规模巨大的 Cu - U - Au - Ag 矿床，铜储量 3 200 万吨，铀 120 万吨，金 1 200 吨），引起世界地质工作者的瞩目。进入 20 世纪 90 年代，铀矿勘查仍未走出低谷，世界铀矿资源的分布是不均匀的，有 80 多个国家和地区发现铀矿床和铀矿化，主要产铀区分布在美国、加拿大、澳大利亚、南非、纳米比亚、尼日尔、加蓬、俄罗斯、乌克兰、乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦、德国东部、捷克、法国及巴西。据联合国国际原子能机构于 1990 年 1 月公布的世界铀资源（不含前苏联、东欧及中国）低成本储量为 230 万吨（见表 1.1）。按国家统计，以澳大利亚为最多，其次为南非、加拿大、美国、尼日尔、纳米比亚等国。国际原子能机构于 1991 年正式公布，前苏联铀资源可靠储量 69 万吨、潜在资源量 120 万吨，德国和捷克的铀资源也都在几十万吨以上。

表 1.1 铀矿资源分布情况及储量

矿山名称(所在州)	探明和预测储量/t			推测资源量/t	合计/T
	<40 \$/kg	< 80 \$/kg	小计	< 80 \$/kg	
Caldas(MG)		500	500	4 000	4 500
Lagoa real/Caetité(BA)	24 200	69 800	94 000	6 770	100 770
Santa Quitéria(CE)	42 000	41 000	83 000	59 500	142 500
其他地区				61 600	61 600
合计	66 200	111 300	177 500	131 870	309 370

根据巴西原子能工业公司(INB)提供的资料,巴西的铀矿资源丰富,其储量居世界第六位,可满足国内长远需要,其出口远景也十分看好。全球铀矿的总储量约为4 416 000吨,居前五位的是:哈萨克斯坦(957 000吨)、澳大利亚(910 000吨)、南非(369 000吨)、美国(355 000吨)、加拿大(332 000吨)。巴西目前仅对25%的国土进行了铀矿资源探测,勘探结果显示,已探明、预测和推测资源量约为30.9万吨 U_3O_8 ,加上含有其他矿产的混合矿床,如位于亚马孙州(AM)的Pitinga矿山、pará州(PR)的Carajás矿山均发现有铀矿资源,预计储量为15万吨。根据现有的勘探资料,铀矿资源主要分布在巴伊亚州(BA)、塞阿拉州(CE)、巴拉那州(PN)和米纳斯州(MG)。澳大利亚为世界铀资源最丰富的国家,铀产量和铀出口均居世界第2位(见表1.2、图1.2)。据WISE(World Information Service on Energy)资料,截至2005年1月1日,世界已知常规铀可靠资源回收成本 ≤ 130 美元/千克铀的可回收资源量约329.67万吨。其中回收成本 ≤ 40 美元/千克铀资源量约194.74万吨;回收成本 ≤ 80 美元/千克铀资源量约264.33万吨。澳大利亚回收成本 ≤ 130 美元/千克铀的可回收资源量约74.7万吨,居世界首位,其中回收成本 ≤ 80 美元/千克铀资源量约71.4万吨。按2007年铀产量7 802吨铀计,现有低成本铀资源量(≤ 80 美元/千克铀)可供矿山生产约92年。澳大利亚重要的矿山为兰杰矿和奥林匹克坝。20世纪60年代末随着世界核电建设,澳大利亚铀勘探不断加强,发现了一大批铀矿床。2007年澳大利亚铀工业从业人员1 200人,其中勘探500人。

表 1.2 澳大利亚主要矿山和预计矿山储量与资源概况

矿山	位置	品位 U_3O_8 /%	资源量 U_3O_8 /t	类型
兰杰	北部	0.15	49 671	探明+预测储量
		0.11	31 809	预测资源
		0.13	18 759	推断资源
奥林匹克坝	南部	0.063	38 400	探明储量
		0.057	193 200	预测储量

表 1.2(续)

矿山	位置	品位 $U_3O_8/\%$	资源量 U_3O_8/t	类 型
		0.036	472 000	计算储量
		0.026	907 000	预测资源
		0.03	857 500	推测资源
贝利佛	北部	0.18	21 000	储量
Jabiluka	北部	0.50	59 000	储量
		0.43	21 700	计算和预测的资源
		0.54	54 700	推测资源
Koongarra	北部	0.8	14 540	储量
Mt Fitch	北部	0.046	6 600	资源
Angela	北部	0.1	10 250	资源
Biglyi	北部	0.14	5 200	资源
Nolans Bore	北部	0.02	3 977	资源
Napperby	北部	0.036	670	推断资源
Kintyre	西部	0.15 ~ 0.4	36 000	储量 + 资源
Yeelirrie	西部	0.15	52 500	预测资源
Mulga Rock	西部	0.11	46 500	资源
Manyingee	西部	0.09	12 000	资源
Obagoona	西部		10 700	推断资源
Lake Maitland	西部	0.03	7 900	资源
Lake Way	西部	0.054	4 600	资源
Centipede	西部	0.063	4 400	资源
Thatchers Soak	西部	0.03	4 100	资源
Honeymoon	南部	0.42	2 900	预测资源
Billeroo(Gould Dam)	西南部	0.045, 0.33	2 500	预测资源
Beverley Four Mile	南部	-	15 000	推断资源
Prominent Hill	南部	0.012	9 900	推断资源
Mt Gee	南部	0.063	26 900	推断资源
Crocker Well	南部	0.048	8 576	资源
Curnamona	南部	-	-	-
Valhalla	昆士兰	0.080/0.075	16 900/9 000	预测资源/推断资源

表 1.2(续)

矿山	位置	品位 $U_3O_8/\%$	资源量 U_3O_8/t	类型
Skal	昆士兰	0.119	5 000	资源
Andersons Lode	昆士兰	0.143	6 500	推断资源
Westmoreland	昆士兰	<0.2/-	7 000/15 000	预测资源/推断资源
Ben Lomond	昆士兰	0.27/0.21	3 600/1 250	预测资源/推断资源
Maureen	昆士兰	0.123	2 490	资源

资料来源: Geoscience Australia. April 2006

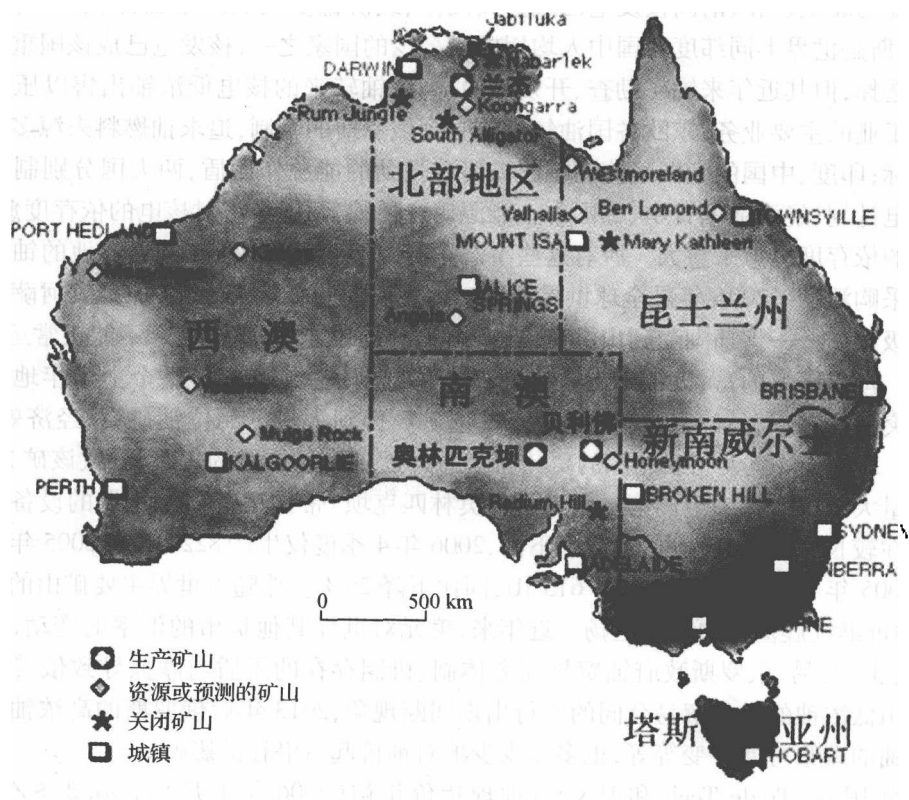


图 1.2 澳大利亚铀矿资源分布图

1.2 铀矿石价格趋势与生产勘探定性分析与预测

1.2.1 铀矿石价格定性分析

世人普遍认同与看好全球核电的现状与未来。包括稳固核发电为基调之一的美国新能源政策正在得到贯彻与落实,反恐工作促使各核电厂加大各自的铀燃料储备;铀矿资源殷实的澳大利亚的“三矿”政策(全澳同时生产的铀矿山有三座:兰杰、奥林匹克坝、贝弗利)未有松动;地处高纬度的北欧、西欧诸国核发电已成为其民生、经济稳步发展的基础,但铀原料主要取自海外;俄罗斯是世界上同纬度各国中人均用电量最少的国家之一,核发电已成该国重塑世界强国的必然选择,但其近年来铀矿勘查、开发缓慢,高浓铀转来的核电低浓铀出售以压库存而获利是俄铀工业的主要业务;东欧各国油气供应受到俄罗斯的牵制,追求铀燃料来源多样化成为他们的目标;印度、中国的大国经济的崛起需要有强劲的能源作后盾,两大国分别制订了各自未来核发电计划;经济强国日本、韩国本土能源矿产稀缺,两国经济对核电的依存度愈来愈高,对海外铀的依存度也愈来愈大。所有这些事态孕育、促进各国加强在世界各地的铀的探、采、冶及商业采购活动。2006年是全球世界级铀矿山生产的一个多灾之年,加拿大阿萨斯卡盆地中世界级大矿——雪茄湖受到山洪袭击,矿山生产竖井进水,矿山生产不能正常运行长达6个月之久。世界著名的富、大铀矿山之一的麦克莱恩湖铀矿,2006年整个上半年地下掘进中地质情况突然变差,高品位富矿“神秘尖灭”,选矿厂得到大量低品位铀矿石,经济效益变差,产量萎缩。2006年,澳大利亚北部的贾比鲁卡意外遭到一场旋风的侵袭,导致该矿2006年上半年铀产量大减。世界铀生产第一大户——奥林匹克坝“带伤运行”,不定期的设备维修致使矿山生产在较长时间里断续进行,产量下滑,2006年4季度仅生产822 tU,较2005年同期下降23%;与2005年下半年比,只生产1 615 tU,同比下降25%。伴随着世界主要矿山的铀产量下降,导致铀价继续震荡并向高位上扬。近年来,美元对世界其他货币的汇率的变动,铀市场上出现的“套头”交易,俄罗斯政府铀贸易新老体制、机制存在的矛盾与摩擦导致俄美高浓铀转换为核电用低浓铀的供货贸易合同的履行出现间断现象,2013年后俄罗斯的高浓铀转换为核电用低浓铀的政策可能有变等等,也多多少少地对铀价起着潜在的影响。

2006年国际(Trade Tech和U x C)铀现货价年初(2006年1月)为96.2 \$/kgU,年末(2006年12月)飚升至187.2 \$/kgU,全年平均达到121.71 \$/kgU。2006年的铀现货价格不但是2000年以来的最高值(2001年11月和12月为18.46 \$/kgU),而且也创造了铀价史上的最高值(1978年6月和7月为112.48 \$/kgU)。2006年现货铀交易量为12 705 tU,期货铀交易量为77 000 tU;与2005年的现货铀交易量13 860 tU,期货铀交易量92 400 tU相比,均有小幅下降,但总体还维持在历史较高水平。澳大利亚、加拿大、哈萨克斯坦的铀产量占全球

总产量的90%,是2006年度世界铀生产量三强。虽然2006年上半年澳大利亚和加拿大的铀产量较2005年同期分别下降了27%和33%,但是哈萨克斯坦2006年铀生产稳中有升,达到历史新高,为5 279 tU,较2005年增加25%左右。哈萨克斯坦在20世纪90年代初刚独立时,铀产量仅列世界20位之后,到1999年时还只列世界第16位,在2001年时,其年产铀1 925 tU,2005年时达到4 357 tU,2006年则高达5 279 tU,仅次于澳大利亚、加拿大,跻身世界三强,让世人刮目相看。按照目前的态势,到2010年时,该国的铀产量将达到7 161 tU,在2015年时预计可能达到15 400 tU。

1.2.2 铀矿石勘查分析

铀价上涨,促使世界各地铀的勘查、开发活动逐步升温。2001年时,来自美国新墨西哥州、怀俄明州、犹他州、科罗拉多州欲开发铀矿的申请项目为2 000项左右,而到2005年时就达到18 000多项。西方国家的铀矿勘查、开发公司现在在蒙古国的找铀、开发铀的租赁地多达20~30块,在加拿大阿萨巴斯卡盆地中从事找铀的公司目前也有30多家(也包括个别中资公司),西方国家渗入前苏联卫星国及非洲实施铀的探、采、冶活动加剧。所有事实表明,一股新的铀活动高潮正在世界各地涌动。哈萨克斯坦境内的铀矿勘查活动始于1948年,现拥有6个铀成矿省、50多个铀矿床。1970年地浸采铀试验成功后,找矿工作发生战略转移(由硬岩转向砂岩)。因盛产“层间氧化带型砂岩铀矿”而使楚萨雷苏伊盆地、锡尔达林盆地与加拿大的阿萨巴斯卡盆地同样成名。印度是一个正在形成市场经济的潜在人口-经济大国,未来欲新建核电厂十余座。印度一方面铀资源匮乏,另一方面铀活动依旧执行世界上为数不多的国家所实施的计划经济管制,尽管该国拥有完整的铀工业体系,但是铀矿勘查与开发长期不成功,为此政府目前打算进一步放开铀活动并朝私营化方向发展,到海外(如加拿大)收购、勘查、开发铀矿等措施都是印度铀工业正在采取和实施的重大改革。日本、韩国是两个能源矿产奇缺的经济大国,年核发电量分别占全国总发电量的34%、40%,可以毫不夸张地说,没有核电,两国的经济大国地位就会遭受致命打击。两国国内现无铀矿业活动,为此他们与多个海外铀公司谈判、签合同买铀;与多个国家谈判以合资、合作形式勘查铀矿、开发铀矿,在哈萨克斯坦、加拿大、乌兹别克斯坦、纳米比亚、尼日尔等国境内的多个铀勘查、铀生产项目和计划中占有一定股份。虽然日、韩在几年前就建立了其稳固的铀原料供应保障体系,核电铀原料储备仅次于法国,但是2006年的铀储备降到历史最低。美国2006年前三季度的铀产量已创其近10年新高(达到1 117 tU),大部分产量来自用原地浸出开发的砂岩型铀矿,位于亚利桑那州境内的一些塌陷角砾岩筒铀矿会在2006年后用露采方法开发。铀矿从业雇员也从2003年的300多人到2004年的400多人,再到2005年的600多人,2006年达到了七百多人。铀矿从业人员的年薪也由上年度的31 250美元增至当年度的46 154美元。美国矿山铀生产量、钻探费用和钻探工作量等多项铀工业指标达1999年来最高。

亚洲的铀勘活动主要集中在蒙古、吉尔吉斯斯坦、伊朗和印度、巴基斯坦等国;非洲的铀勘活动则主要在马拉维、坦桑尼亚、赞比亚、尼日尔、马达加斯加、南非、埃及、博茨瓦纳等国;东欧的匈牙利、斯洛维尼亚、捷克和北欧的瑞典、芬兰等国也有少量铀勘活动;一向少有地浸砂岩发现实例报道的南美在 2006 年也有所发现。铀勘活动最活跃的地方可能还是在加拿大和澳大利亚两国。铀勘活动的目标类型选择按各地的实际地质条件为依据,由市场作导向。例如:美国的铀勘活动主要集中在寻找砂岩型和塌陷角砾岩筒铀矿;加拿大以勘查与不整合有关的铀矿为主,澳大利亚集中精力寻找角砾杂岩型和砂岩型铀矿。蒙古和中国的内蒙古自治区同属亚洲四大高原之一的蒙古高原,前者面积 1 565 000 km²,后者略小,为 1 183 000 km²。蒙古立国后不久,前苏联就渗入开始零星地找铀活动,20 世纪 70 年代起就获进展。随着近年来前苏联势力的退出,西方国家的多家铀公司以收购、合资勘查和开发等名义,以较低的价格(与西方国家比)几乎“全盘接收”了早年前苏联-蒙古联合发现的矿床、矿点、异常点带。2006 年蒙古境内的铀勘活动集中在乌兰巴托—二连铁路沿线两侧,首都乌兰巴托周边地区以及蒙古—中国东部边界的蒙古东方的乔巴山周围(中生代的赛德希尔盆地)。前两者以寻找砂岩型铀矿为主,后者在已知的古尔凡布拉格和多尔诺特硬岩矿床所在地——赛德希尔盆地里扩大已知矿床的深部矿化和向周边地区找新矿化。铀勘工作包括赛德希尔盆地里的航空和地面车载 γ 测量;赛音山达镇周边地区的地面 γ 测量、土壤铀金属量测量,浅孔 γ 测量等;乌兰巴托周边地区的地面氡累积性测量、地面 γ 测量、浅孔 γ 测量、土壤铀金属量测量、垂直测深、激发极化和磁测等等。西方铀勘工作在严格质量控制和质量管(室内样品分析测试、 γ 总量测井等)、规范、有序地使用物化探方法(航空、地面)等方面有不少值得同在蒙古高原上找铀的中国同行借鉴。从衡量地质科技进步的“四新”标志(新的地质成矿理论、新的成矿与找矿模式、新的找矿、勘查方法)来看,西方铀勘人员提出了赛德希尔盆地里的深部铀矿化(受构造控制的、位于基底花岗岩与火山沉积岩基板上强烈黏土化蚀变带中的铀)酷似阿萨巴斯卡盆地中的铀产出特征的研究认识,借鉴、运用与不整合有关铀矿的地质-找矿模式在蒙古高原上进一步探索,这种带研究性的实践有利于东北亚地区探索雪茄湖式的、与不整合有关的矿床的勘查。对此,业内人士会乐观其成,对其结果也将拭目以待,对中国满洲里地区长期未有进展的找矿工作也将有所启迪。

1.2.3 铀矿石及核电生产经营分析

在成熟市场经济国家里,铀矿地勘活动属于经济地质范畴,政府基本不投资,即便有,也只是政策导向性的,具象征意义,铀勘费用主要来自公司。公司的资金则来源于银行的借贷或上市发行股票融资。借贷或发行股票募集资金需遵守一定“游戏规则”,公司的地勘活动费用财务报告须经独立的第三方——注册会计师事务所审计后向社会公示,成熟市场经济国家的铀勘费用也由此获得;在计划经济国家或正在形成市场经济的国家里,铀勘费用属于特殊敏感数

字或为公益地质范畴,通常由政府买单,更有极少数国家不惜成本地勘查铀矿。例如,在成熟市场经济国家里找矿前要租赁土地,获取铀矿勘查土地租赁费一项,在西非地区每英亩仅为2美元,在东非地区每英亩也只为4美元,在美国本土则高达每英亩226美元。美国本土20世纪60年代每英亩铀矿勘查土地租赁费为1.37美元,20世纪70年代为4.80美元,现在竟高达226美元。在计划经济国家或正在形成市场经济的国家里,租赁土地就不是大问题,或无需此项支出。虽然世界各地铀勘费用的发布具有一定“滞后性”“不确定性”及“不准确性”,但对世界各国政策制定仍有重要参考价值。有西方国家的业内人士根据历史上的铀价(西方)与历史上的地勘费用间的相互关系推得:目前世界每年的铀矿地勘费约为 100×10^6 \$ (2003年约为 117×10^6 \$,2005年达到近 200×10^6 \$),在2010年时每年的铀矿地勘费会上升到 230×10^6 \$左右,而到2020年时有可能达到 350×10^6 \$。2006年全球的铀需求达到65 450 tU,预计在2020年时会达到84 700 tU,到2030年时就增加到110 880 tU。若按地区分析,在2030年时,北美与西欧核电需铀量会比现在增加35%~40%,东亚、东欧与东南欧的需要量则会在2006年的基础上翻一番。世界经济发展、人口增加需要能源作为支撑,一座铀矿的勘查、开发通常需要10~20年,未来新建和现在运营中的核电厂的铀原料将取自何方?何时可以到货?除了建立国家、核电厂两级铀储备机制与保障供应体系外,从现在起“加强铀矿勘查,尽快探明一批新的矿产地”是当务之急。

哈萨克斯坦的铀工业为1997年成立的国家原子能公司(Kazatomprom)掌控,麾下拥有17个地下开发、地浸生产的铀矿山及铀矿床。如今该国有4座铀加工厂在运营,处理加工来自8个地浸砂岩铀矿床和1个地下常规开采的硬岩铀矿的地浸液和铀矿石。现在哈萨克斯坦境内的铀开发活动计划比找铀活动计划多,与哈萨克斯坦合资、合作开发铀矿的国家有加拿大、美国、日本、韩国及中国等国家的多家铀业公司。此外,由于历史上的原因,哈萨克斯坦至今未建立起独立的国家电力网,只有其北部与俄罗斯相连的输电线及与其南部的吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦连接的输电线,为此该国欲建核电厂,完善、健全国家电力网。2006年7月25日哈萨克斯坦与俄罗斯签署了一份联合投资营建核电厂的协议。该协议价值 10×10^9 \$,双方各出资50%,包括建造一座核发电厂和一座年生产能力可以达5 000~5 775 tU的大型现代化铀处理加工厂。该铀工厂设在俄罗斯境内西伯利亚南部的安加尔斯克,它将是世界上第一个国际铀工厂,包括铀的处理、加工、转换及浓缩等全过程。现在,哈萨克斯坦境内大部分地浸铀矿的生产成本在18.2~39.0 \$/kgU之间。纳米比亚的罗辛铀矿是唯一位于非洲大陆的世界十大铀矿之一,该寒武纪时代的侵入体白岗岩型铀矿是1966年航空放射性测量发现的,1974年起断续投产,2006年该露采铀矿的产量达到3 080 tU。历经32个年头,矿山步入枯竭期,原打算2009年停产,后经全面评估后,正式宣布延长生产并到2017年退役。此外,在2007年前该国另一个大型表生钙质壳型铀矿——兰格海音利奇(确定、推定储量19 120 tU、推测储量21 460 tU)铀矿床会有一家澳大利亚公司投资,用露采方法生产。值得一提的是,该矿床的生产成本仅为在澳大利亚开发本土的霍尼穆恩地浸砂岩铀矿的87%(前者为33.8 \$/kgU,后者为