

Chemical Analysis of Uranium Mine



铀矿山化学分析

杨金辉 胡鄂明 王清良 等编著

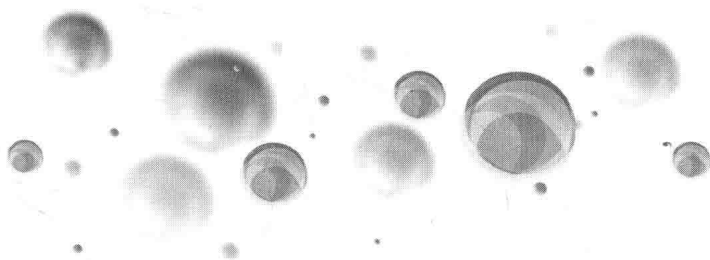


化学工业出版社

Chemical Analysis of Uranium Mine

铀矿山化学分析

杨金辉 胡鄂明 王清良 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书结合我国铀矿冶工艺技术特点,围绕铀矿山生产实践过程中所涉及的铀矿石、原材料、工艺溶液、产品、废液、废渣等,系统介绍了我国铀矿山生产过程中所涉及的相关分析项目和分析方法,主要内容包括铀矿采冶技术发展历史、铀的基本性质和铀矿石、铀矿山原材料、生产工艺溶液、铀矿山产品和铀矿山废水废渣等的分析;同时,为了让读者更好地了解和掌握这些分析方法,书中对分析方法的原理、主要试剂、操作中的关键问题以及注意事项等都做了详尽说明。

本书注重理论与实践相结合,着重实践操作技术,可供从事铀矿山分析工作的科研人员及厂矿分析技术人员使用,也可供高等学校矿冶工程、化学工程及相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

铀矿山化学分析/杨金辉等编著. —北京:化学工业出版社, 2017. 5

ISBN 978-7-122-29342-8

I. ①铀… II. ①杨… III. ①铀矿床-化学分析
IV. ①P619.140.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 060974 号

责任编辑:刘兴春 卢萌萌

装帧设计:王晓宇

责任校对:宋 夏

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张15 1/4 字数337千字 2017年8月北京第1次印刷



购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 85.00 元

版权所有 违者必究

铀资源是关系国家安全的重要战略资源,是我国核大国地位的基础保障;铀矿冶是核工业的基础。经过核工业铀矿采冶研究人员近 60 年的不断创新和实践,铀矿采冶由原来搅拌浸出为主发展为地浸为主、堆浸为辅的新格局。进入 21 世纪,核电的发展为我国铀矿采冶业的发展提供了新的契机,国家核电发展战略已由“适度发展”转变为“积极发展”,从原先的“稳步有序推进核电建设”升级到“抓紧启动东部沿海地区新的核电项目建设”、“加快步伐核准一批核电项目”。核电发展对天然铀提出了新的需求,在新形势下对铀矿采冶技术提出了新的要求,铀矿采冶行业面临新的机遇和挑战。随着铀矿采冶技术的发展和不断创新,铀矿山对分析技术和分析方法也提出了新要求。

为了适应铀矿冶发展的需求,提高铀矿山分析工作的理论与技术水平,在吸收已有相关出版物精华的基础上,结合作者和铀矿山分析领域其他研究者的一些新成果,编著了《铀矿山化学分析》一书。本书共分 10 章,第 1 章为我国铀矿采冶技术发展概述;第 2 章为铀的基本性质;第 3 章为铀的定性分析;第 4 章为铀矿石分析;第 5 章为铀矿山原材料分析;第 6 章为铀矿山生产工艺溶液的控制分析;第 7 章为树脂铀容量及杂项分析;第 8 章为树脂、萃取有机相中铀及杂项分析;第 9 章为铀矿山产品分析;第 10 章为铀矿山废水、废渣分析。书中系统介绍了我国铀矿山生产过程中所涉及的相关分析项目和分析方法,主要内容包括铀矿采冶技术发展历史、铀的基本性质和铀矿石、铀矿山原材料、生产工艺溶液、铀矿山产品和铀矿山废水、废渣等的分析;同时,为了让读者更好地了解 and 掌握这些分析方法,书中对分析方法的原理、主要试剂、操作中的关键问题以及注意事项等都做了详尽说明。

全书主要由杨金辉、胡鄂明、王清良等编著,其中第 1 章由王清良编著;第 2 章由戴漾泓编著;第 3 章由杨金辉、杨斌编著;第 4 章由杨金辉、邓钦文、罗慰祖编著;第 5 章由杨金辉、周佳权编著;第 6 章、第 9 章由杨金辉编著;第 7 章由胡鄂明、杨金辉编著;第 8 章、第 10 章由胡鄂明编著。全书最后由杨金辉、王清良、王海峰、胡鄂明统稿、定稿。

本书的编著得到了南华大学谢水波教授、陈振富教授的大力支持和指导,杨江柳老师及常哲、韩科昌、张希晨、赵海东、孙兰等硕士研究生在编著过程中也给予了鼎力帮助,在此一并表示感谢。

由于编著者水平有限,书中不足和疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编著者

2017 年 2 月

第 1 章 我国铈矿采冶技术发展概述 / 001

- 1.1 引言 / 001
- 1.2 我国铈矿采冶工业的发展历史 / 001
- 1.3 我国铈资源状况 / 003
- 1.4 我国铈矿采冶工艺 / 004
 - 1.4.1 常规采冶 / 004
 - 1.4.2 铈矿堆浸 / 004
 - 1.4.3 原地爆破浸出 / 006
 - 1.4.4 原地浸出 / 006
- 1.5 浸出液回收工艺 / 008
- 1.6 我国铈矿采冶技术研究的主要方向 / 009
- 1.7 分析任务需求 / 010

第 2 章 铈的基本性质 / 011

- 2.1 铈的物理性质 / 011
 - 2.1.1 单质性质 / 011
 - 2.1.2 元素性质 / 012
 - 2.1.3 原子性质 / 012
 - 2.1.4 同位素 / 013
- 2.2 铈的化学性质 / 014
- 2.3 铈的主要化合物 / 014
 - 2.3.1 铈酰盐和铈酸盐 / 014
 - 2.3.2 铈的络合物 / 015
 - 2.3.3 铈的氧化物 / 016
 - 2.3.4 铈的卤化物 / 020
 - 2.3.5 其他铈化合物 / 027

第 3 章 铈的定性分析 / 028

- 3.1 发射光谱法鉴定铈 / 028
- 3.2 在显微镜下鉴定铈 / 029
 - 3.2.1 碳酸铈酰胺晶体 / 029
 - 3.2.2 苯甲酸铈酰 / 029

- 3.3 用化学反应鉴定铀 / 029
 - 3.3.1 用氯磷偶氮Ⅲ铀试纸鉴定铀 / 029
 - 3.3.2 用荧光素鉴定铀 / 030
 - 3.3.3 用亚铁氰化钾鉴定铀 / 030
 - 3.3.4 用磷酸盐鉴定铀 / 031
 - 3.3.5 用溶剂熔融法鉴定铀 / 031
- 3.4 紫外线荧光法鉴定铀 / 031
 - 3.4.1 固体荧光法 / 033
 - 3.4.2 液体荧光法 / 036
 - 3.4.3 激光诱发磷光技术及其应用 / 038
 - 3.4.4 结束语 / 038
- 3.5 伽马射线光谱仪定性测定铀 / 039
 - 3.5.1 地面 γ 测量 / 039
 - 3.5.2 射线能谱测量 / 040

第4章 铀矿石分析 / 042

- 4.1 分析样品的制备 / 042
 - 4.1.1 矿样的缩分 / 042
 - 4.1.2 加工系数的确定 / 043
 - 4.1.3 矿样的加工程序 / 044
- 4.2 铀矿石分析样品的分解方法 / 046
 - 4.2.1 熔融法 / 047
 - 4.2.2 酸分解法 / 051
 - 4.2.3 烧结法 / 056
- 4.3 铀矿石中铀的常用测定方法 / 057
 - 4.3.1 重量分析法 / 057
 - 4.3.2 容量分析法 / 066
 - 4.3.3 铀的分光光度法 / 075
 - 4.3.4 荧光分析法 / 083
 - 4.3.5 电化学分析法 / 087
- 4.4 矿石中其他元素的测定 / 092
 - 4.4.1 水分的测定 (吸附水 H_2O^-) / 092
 - 4.4.2 镭的测定 / 092
 - 4.4.3 TU-1901 双光束紫外分光光度法测定矿石中的钍 / 095
 - 4.4.4 二氧化硅的测定 / 097
 - 4.4.5 非水滴定法测定碳酸根 / 099
 - 4.4.6 过硫酸铵氧化分光光度法测定锰 / 101
 - 4.4.7 氟的测定 / 102
 - 4.4.8 硫的测定 / 103

- 4.4.9 原子吸收光谱法测定钙、铁、镁、钼、钛、钒 / 105
- 4.4.10 磷的测定 / 107
- 4.4.11 铝的测定 / 108
- 4.4.12 烧失量的测定 / 109
- 4.4.13 火焰光度法测定氧化钾、氧化钠 / 110
- 4.4.14 稀土的测定 / 111

第5章 铀矿山原材料分析 / 115

- 5.1 硫酸、盐酸、硝酸、双氧水的分析 / 115
 - 5.1.1 硫酸的测定 / 115
 - 5.1.2 盐酸的测定——中和法 / 116
 - 5.1.3 硝酸的测定——中和法 / 117
 - 5.1.4 双氧水的测定 / 118
- 5.2 氢氧化钠、碳酸钠、碳酸氢钠、碳酸铵、碳酸氢铵、氨水分析 / 119
 - 5.2.1 氢氧化钠的测定 / 119
 - 5.2.2 碳酸钠的测定 / 119
 - 5.2.3 碳酸氢钠的测定——总碱量的测定（中和法） / 120
 - 5.2.4 碳酸铵的测定 / 121
 - 5.2.5 碳酸氢铵的测定 / 121
 - 5.2.6 氨水的测定 / 122
- 5.3 工业食盐、硝酸铵的分析 / 123
 - 5.3.1 工业食盐的测定 / 123
 - 5.3.2 硝酸铵的测定 / 123
- 5.4 树脂分析 / 124
 - 5.4.1 树脂粒度的测定 / 124
 - 5.4.2 树脂强度的测定（离子交换树脂强度测定方法——渗磨法） / 124
- 5.5 常用萃取剂的分析 / 127
 - 5.5.1 磷酸三丁酯（TBP）的测定 / 127
 - 5.5.2 三烷基氧膦（TRPO）的测定 / 128
 - 5.5.3 三辛基氧膦（TOPO）的测定 / 129
 - 5.5.4 二（2-乙基己基）磷酸（P-204）的测定 / 129

第6章 铀矿山生产工艺溶液的控制分析 / 131

- 6.1 铀的分析 / 131
 - 6.1.1 亚钛还原钒酸铵毛细管微量滴定法 / 131
 - 6.1.2 亚钛还原钒酸铵滴定法 / 133
 - 6.1.3 亚铁还原钒酸铵滴定法 / 135
- 6.2 生产过程工艺溶液中杂项分析 / 136
 - 6.2.1 硝酸根的测定 / 136

- 6.2.2 钙镁的测定-EDTA 络合滴定 / 138
- 6.2.3 硫酸根的测定——联苯胺容量法 / 139
- 6.2.4 氯的测定 / 140
- 6.2.5 硅钼蓝比色法测定硅 / 141
- 6.2.6 CYDTA 容量法测定铝 / 142
- 6.2.7 磷钼蓝比色法测定磷酸根 / 142
- 6.2.8 甲醛法测定铵离子 / 142
- 6.2.9 浸出液中总铁、铁(Ⅲ)、铁(Ⅱ)的测定 / 143
- 6.2.10 硫氰酸盐比色法测定钼 / 144
- 6.2.11 离子选择电极法测定氟 / 145
- 6.2.12 非水滴定法测定碳酸根 / 146
- 6.2.13 总碱度、重碳酸根及碳酸根的测定 / 148
- 6.3 碱度的分析 / 150
 - 6.3.1 酒石酸钾钠法 / 150
 - 6.3.2 氯化钡法 / 151
- 6.4 酸度的分析 / 152
 - 6.4.1 草酸钾-氯化镁法 / 152
 - 6.4.2 六偏酸钠法 / 153
 - 6.4.3 EDTA-Ca 法 / 153
- 6.5 工艺溶液的电位和 pH 值的测定 / 154
 - 6.5.1 pH 值的测定 / 154
 - 6.5.2 氧化还原电位的测定 / 156

第 7 章 树脂铀容量及杂项分析 / 157

- 7.1 树脂中铀的测定 / 157
 - 7.1.1 树脂中铀的化学法测定 / 157
 - 7.1.2 γ 能谱法测定离子交换树脂中的铀 / 159
- 7.2 树脂中杂项分析 / 160
 - 7.2.1 树脂中 NO_3^- 的测定 / 161
 - 7.2.2 树脂中 SiO_3^{2-} 的测定 / 163
 - 7.2.3 树脂中 MoO_4^{2-} 的测定 / 163
 - 7.2.4 树脂中 SO_4^{2-} 的测定 / 163

第 8 章 树脂、萃取有机相中铀及杂项分析 / 164

- 8.1 有机相中铀的测定 / 164
 - 8.1.1 有机相的处理方法 / 164
 - 8.1.2 有机相中铀的测定方法 / 165
- 8.2 邻菲罗啉比色法直接测定有机相中微量铁 / 167

第9章 铀矿山产品分析 / 173

9.1 产品中水分的测定 / 173

9.2 产品中铀的分析 / 173

9.2.1 硫酸亚铁还原/重铬酸钾氧化滴定法测定重铀酸盐中的铀 / 173

9.2.2 硫酸亚铁还原/重铬酸钾氧化称量电位滴定法测定

三碳酸铀酰铵中的铀 / 176

9.2.3 三碳酸铀酰胺中铀的亚钛还原钒酸铵滴定法 / 179

9.2.4 二氧化铀中四价铀的测定 / 180

9.2.5 二氧化铀中总铀量的重量法测定 / 181

9.2.6 三碳酸铀铵中铀的重量法测定 / 182

9.3 产品中杂项分析 / 183

9.3.1 硫酸根的分析——比浊法 / 183

9.3.2 氟和氯的测定——离子选择性电极法 / 184

9.3.3 重铀酸盐中磷的测定-磷钼蓝分光光度法 / 185

9.3.4 微量硅的比色测定 / 187

第10章 铀矿山废水、废渣分析 / 189

10.1 铀矿山废水分析 / 189

10.1.1 废水中铀的分析 / 189

10.1.2 铀矿山废水中硝酸根离子 (NO_3^-) 的分析 / 193

10.1.3 铀矿废水中氟离子的分析 / 194

10.1.4 铀矿废水中氯离子的分析 / 197

10.1.5 硫酸根离子 (SO_4^{2-}) 的测定 / 198

10.1.6 酸度 (H^+) 的测定 / 200

10.1.7 铀矿山废水中重金属离子的测定 / 202

10.1.8 镭的测定 / 219

10.1.9 铀矿山废水中钍的测定 / 221

10.1.10 工业废水中几种微量有机物的测定 / 223

10.2 铀矿山废渣分析 / 227

10.2.1 铀矿山废渣中铀的测定 / 227

10.2.2 铀矿山废渣中镭的测定 / 230

10.2.3 铀矿山废渣中钍的测定 / 232

参考文献 / 234

第1章

我国铀矿采冶技术发展概述

1.1 引言

铀资源是关系国家安全的重要战略资源，是我国核大国地位的基础保障；铀矿冶是核工业的基础。我国铀矿冶工业是从 20 世纪 50 年代末开始创建与发展起来的，经过几代人的不懈努力，先后在全国十几个省、市、自治区建设了若干座铀矿山和铀水冶厂，以及铀矿冶研究所、设计院、机修厂、建筑公司等，建立了完整的铀矿冶工业体系，为我国原子弹、氢弹、核潜艇及时提供了充足的核燃料，为壮大国威、军威等做出了历史性贡献，为我国核电工业发展打下了坚实基础。其业务范围包括铀矿开采、铀矿选冶、铀纯化、铀氧化物的生产、机械加工、放射性辐射防护、放射性环境评价、矿山退役治理等，目前主要生产的铀产品有重铀酸钠（铀）、三碳酸铀酰胺、过氧化铀、八氧化三铀、二氧化铀等。进入 21 世纪，核电的发展为我国铀矿冶工业的发展提供了新的契机。

1.2 我国铀矿采冶工业的发展历史

我国铀矿冶工业从 1958 年创建至今，可分为 3 个发展阶段。

① 创立发展期 时间为 20 世纪 50~80 年代中期。矿山开采方式以地下采掘为主、露天采掘为辅，铀矿石处理以搅拌浸出为主，并开展了低品位矿石井下堆浸和地浸采铀探索性试验。

② 保军转民期 时间为 20 世纪 80 年代中期到 2000 年。该时期铀矿采冶技术取得了较大的突破，地浸采铀、堆浸提铀等技术得到工业应用，相继建成了我国第一座堆浸铀矿山、原地爆破浸出采铀矿山、井下无轨开采矿山和地浸采铀矿山。

③ 恢复发展期 时间为 2001 年至今。由于我国核能事业的迅猛发展，对天然铀的需求旺盛，该时期 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸技术、渗滤浸出技术和细菌氧化助浸等新技术得到工业应用，铀资源利用率进一步提高。

经过近 60 年的发展，我国铀矿采冶技术从无到有，从发展到壮大，到目前为止我国铀矿冶生产已经形成了地浸、堆浸、常规搅拌浸出等加工工艺并存的新格局。地浸采

铀技术的成功应用为北方砂岩铀矿的开发提供了技术保障；精细化堆浸、细菌浸出、渗滤浸出、原地爆破浸出等技术使低品位、难处理的硬岩铀矿成为经济可采资源；近年研发出的 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀工艺、多金属铀矿综合回收工艺等已成功实现工业化应用。 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀工艺作为绿色开采工艺的示范，2015 年获得国家科技进步二等奖。我国铀矿采冶技术水平在世界铀矿采冶技术中已处于举足轻重的地位。

我国于 1958 年建立了主管铀矿冶工作的二机部十二局，同时成立了新疆矿冶公司和中南矿冶公司，组建了北京铀矿选冶研究所、铀矿冶设计研究院和铀矿开采研究所。

第一批建设的铀矿冶企业，即三矿（郴州铀矿、衡山大浦铀矿和上饶铀矿）一厂（衡阳铀水冶厂）于 1962 年 9 月～1963 年 10 月陆续建成并顺利投产，实现了从矿石到 UO_2 的工业生产，成功解决了原子能工业的原料问题。它的特点是自力更生解决有无问题，全力为国防建设服务，铀矿开采技术同样处在创建、完善、发展阶段。在此期间，北京铀矿选冶研究所（现核工业北京化工冶金研究院）的科技人员用最快的速度生产出制备第一颗原子弹需要的 UO_2 和 UF_4 ，为 1964 年 10 月我国第一颗原子弹爆炸成功做出了贡献。

1963 年国家决定建立第二批铀矿冶企业，到 1967 年先后建成了广东和抚州两个铀矿冶联合企业，开发建设了新的铀矿、放射分选厂和铀水冶厂，包括衢州铀矿、本溪铀矿（草河口）、修水铀矿、兴城铀矿和伊宁铀矿及水冶厂等。第二批铀矿冶企业的铀矿开采和提取的工艺流程都是我国自行研究设计的。采矿工艺方面，试验采用了水泥隔离墙代替人工矿柱，水泥垫板代替木垫板，研究解决了含铀煤矿的开采技术，改进了缓倾斜薄矿层的采矿工艺。水冶工艺方面，成功研究了处理各种不同类型矿石的多种工艺流程，包括：处理花岗岩型矿的固液分离-清液萃取流程，处理含铀煤矿的低温燃烧发电和从煤灰中浸出并用萃取法提取铀的流程，处理泥质矿的流态化分级洗涤技术，处理火山岩矿的半连续逆流离子交换和用磷类萃取剂萃取合格解吸液的淋萃流程，处理碱交代型花岗岩铀矿和含碳酸盐较多的碳硅泥岩铀矿的加压碱浸流程。

到 20 世纪 70 年代末，建设了第三批铀矿冶企业。在铀矿冶科研方面推广了喷锚支护等高效率的施工技术，开展了原地浸出采铀试验，成功研究了从矿石浸出液直接制备三碳酸铀酰胺或四氟化铀的新工艺，突破了从含磷、钼等复合矿石中提取铀的技术和从含铀富矿中提取铀的工艺流程。

从 20 世纪 80 年代中期开始，随着核工业的战略转移，铀产品由面向国防建设转移到面向核电工业，国家对铀矿冶行业进行了大幅度调整，部分生产线下马、关停，天然铀产量一度降到历史最低水平，整个行业出现了阶段性的萧条。要改变我国铀矿冶企业的面貌，提高经济效益，必须采用新的工艺技术对传统的采冶工艺进行改造。为此开展了地浸、堆浸、原地爆破浸出等新技术及其工业化应用研究，经过不懈努力，取得了多方面的技术成果，铀矿冶全行业的生产工艺流程和主要装备得到了更新，虽然铀矿冶企业大大减少，但总的产能有所提升，企业劳动生产率、经济效益得到了大幅度的提高。铀矿冶生产已经形成了以地浸、堆浸、原地爆破浸出等工艺为主的新格局，特别是地浸采铀工艺将在今后一段时间内占据越来越重要的位置。目前，天然铀生产产量常规开采占 10%～15%，堆浸占 25%～30%，原地爆破浸出占 5%～10%，地浸占 40%～50%。

至今地浸采铀采铀工艺技术已成为我国天然铀生产的主体,其产能和所占天然铀的生产比例将进一步扩大。

进入21世纪,随着核电的发展,天然铀的需求日益增长,同时国际铀价也持续攀升,给我国铀矿冶工业带来了新的发展机遇。作为国内唯一从事天然铀生产的企业——中核金原铀业有限责任公司正在抓紧实施天然铀生产大基地的战略,采用新工艺、新技术,进一步提升天然铀的生产能力,以满足核电发展的需要。

1.3 我国铀资源状况

我国自1955年开展铀矿地质勘查工作以来,已探获的主要铀矿床类型有以下几种。

(1) 花岗岩型

此类型主要分布在桃山-诸广山矿化带,大多数与燕山期花岗岩有空间和成因关系。铀矿化多产于构造断裂的低级别构造中,其中以含沥青铀矿及品质铀矿的硅酸盐单铀型矿床为主;其次为含沥青铀矿、萤石的硅酸盐铀-铅-锌矿床。

(2) 火山岩型

此类矿床主要分布在赣-杭矿化带,成矿时代多为侏罗纪及白垩纪。含矿岩石为熔岩、次火山岩、火山碎屑岩。矿化受区域断裂及火山构造控制。以沥青铀矿、硅钙铀矿的硅酸盐单铀矿床为主;此外,也有一些含有较多钛铀矿、铀石、钍铀矿的硅酸盐铀钍型矿床及铀铜矿床。

(3) 砂岩型

此类矿床产于中生代、新生代,赋存于长石、石英砂岩及花岗质砂岩、砂砾岩,少数为粉砂岩、泥岩。岩石中常含有一定的有机质及黄铁矿。矿床以含沥青铀矿及吸附铀的硅酸盐型单铀矿床为主,其次为含沥青铀矿的碳酸盐铀铜矿床。

(4) 碳硅泥岩型

此类矿床含矿岩石复杂,一般富含有机质、泥质及黄铁矿。铀多以吸附状态存在。有震旦-寒武纪的含沥青铀矿的碳硅泥岩型矿床及泥盆纪的受构造控制的硅酸盐、碳酸盐型铀钼矿床。

(5) 含铀煤型

此类矿床主要产于中生代、新生代的陆相盆地中的劣质煤及碎屑岩,分布于滇西及西北地区。矿床受岩性控制,有含铀煤型及含铀-锆煤型。

(6) 其他类型

包括碳酸盐岩型、碱性岩型、石英岩型及磷块岩型等。

我国铀矿床以前4种类型为主,已探明铀资源中各类型矿床储量所占比重为:花岗岩型38%,火山岩型22%,砂岩型19%,碳硅泥岩型16%,其他类型共5%。在已开采的铀矿山中,花岗岩型铀矿床的储量占总储量的37%,火山岩型占24%,碳硅泥岩型占22%,而砂岩型铀矿床占17%。

1.4 我国铀矿采冶工艺

在我国铀矿采冶技术发展过程中,先后研发了铀矿常规采冶、铀矿堆浸、原地爆破浸出、原地浸出等工艺技术,这些技术均在生产中得到应用。

1.4.1 常规采冶

我国铀矿开采技术在过去近 60 年时间里通过移植、改进、推广、独创的过程逐步得到提高。20 世纪 50 年代铀矿山建设起步时,采掘技术主要是移植有色金属矿山及煤矿的工艺及设备。60 年代中期,为了提高速度、效率和产量,结合铀矿特点,进行了采矿工艺的改进和小型机械化的推广,采掘技术有了提高。70 年代后期,推广国际上的新工艺、新技术,引进了无轨开采设备,同时开始推广应用全面质量管理、网络技术、线性规划、计算机应用等科学管理方法。在 80 年代又推行了矿石按质计价、合理选用边界品位、资源经济评价等技术及经济管理工作,提高了矿山生产的经济效益。通过这些工作,铀矿山的开采技术及技术管理有了进一步的发展。

常规水冶主要采用搅拌浸出工艺,搅拌浸出顾名思义就是磨细的矿石与浸出剂在槽中进行充分地搅拌混合。常规搅拌浸出适合于各种不同类型的铀矿石,根据矿石性质可选择酸法浸出和碱法浸出。但搅拌浸出水冶厂的建设周期长,投资大,生产成本低,特别是磨矿费用在搅拌浸出中占有很大的比重,对某些矿石的固液分离也是一个比较难的问题。因此,在 20 世纪 80~90 年代,为了简化流程,节省投资,一般不采用搅拌浸出。目前为了充分利用有效资源又开始进行了搅拌浸出的研究,一般在矿石铀含量比较高的情况下大多采用搅拌浸出工艺。虽然它的磨矿和固液分离费用所占的比重较大,但由于铀的回收率比其他几种浸出方法的浸出率高出近 10%,所以搅拌浸出仍然是高品位铀矿浸出的优选方法。

1.4.2 铀矿堆浸

堆浸是堆置浸出法的简称,是将配制好的溶浸液喷洒到预先堆置好的矿石堆上,选择性地溶解浸出矿石中的目标成分,形成离子或络合离子并使之转入溶液,以便进行进一步的提取或回收的浸出方法。堆浸的矿石仅需粗碎即可,溶液在矿堆中处于非饱和流状态。我国堆浸提铀技术研究始于 20 世纪 60 年代,经过几代铀矿冶科技工作者的不断探索,已经在许多技术领域取得了突破,一大批科研成果已成功应用于堆浸提铀工业生产,并且取得了显著的经济效益。堆浸提铀工艺是我国铀矿冶生产的主要工艺之一,工艺流程示意如图 1-1 所示。

(1) 浓酸熟化-高铁淋滤堆浸

该技术的特点是首先将破碎矿石进行浓酸熟化预处理,使矿石中的二价铁氧化为三价铁,铀大部分转化为可溶性盐,然后采用含硫酸高铁的清水进行淋浸。此工艺既缩短了矿石的浸出周期,也提高了浸出合格液的铀浓度。

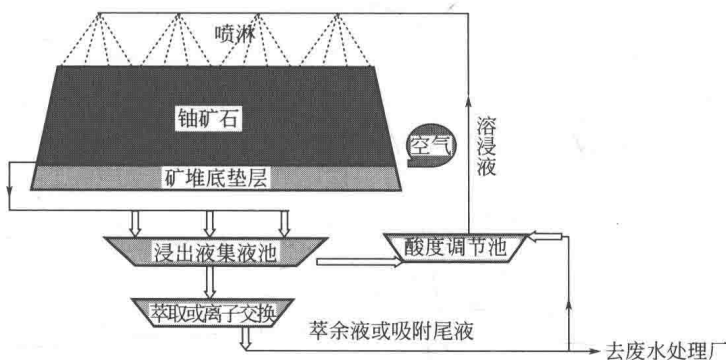


图 1-1 铀矿堆浸工艺流程示意

(2) 低渗透性矿石制粒堆浸

低渗透性含泥矿石化学黏合进行酸法制粒，该黏合剂通过参与化学反应，可在矿粒内部形成以水化物晶核为基础的结晶结构网，从而大幅度提高了矿堆的渗透性。

(3) 串联堆浸

为了尽可能提高矿石堆浸合格液铀浓度，降低原材料消耗，针对多种铀矿石进行了系统的串联堆浸技术试验研究，开发了计算矿石串联堆浸各阶段操作参数的数学模型。

(4) 细菌氧化堆浸

我国细菌氧化堆浸提铀技术的研究始于 20 世纪 60 年代，主要是利用氧化亚铁硫杆菌对矿石中的黄铁矿或吸附尾液中的 Fe^{2+} 进行氧化，使 Fe^{2+} 转变成 Fe^{3+} ，从而完成对矿石中低价铀的氧化浸出。细菌氧化堆浸工艺流程如图 1-2 所示。

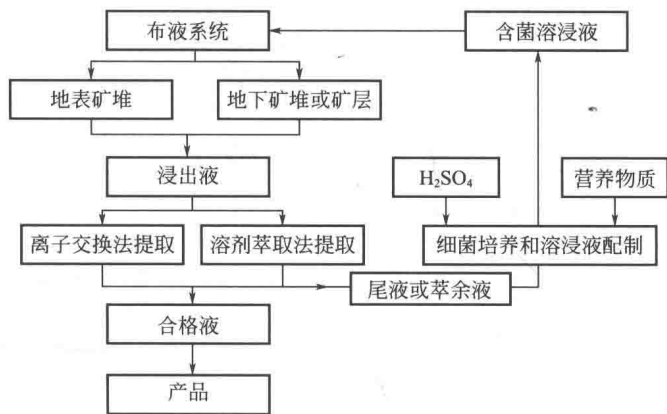


图 1-2 细菌氧化堆浸工艺流程

(5) 渗滤浸出

对于一些铁、镁、钙、铝等杂质含量高的复杂铀矿，常规堆浸过程中，堆内溶液的酸度随着溶液的运移会不断消耗，导致铁、镁、钙、铝在堆内不断迁移-积累-沉淀，使矿堆板结，降低了矿堆的渗透性。渗滤浸出工艺由于改变了溶液与矿石的接触方式，可保持溶液酸度的相对稳定，有效地避免矿堆板结。

(6) 伴生铀矿综合堆浸回收

目前已探明的铀矿资源中铀钼共生矿床占有一定的比例，此类型矿床在常规浸出时

往往浸出时间长、浸出率低，且浸出液中铀钼的分离效果不够理想。

1.4.3 原地爆破浸出

原（就）地爆破浸出开采是利用井巷工程和挤压爆破技术，就地崩落矿石，构筑矿石微细裂隙发育、级配合理、孔隙度均匀适度、渗透性良好的采场矿堆，然后向矿堆布洒溶浸剂，有选择性地浸出矿石中的有价金属，浸出的含金属溶液被收集转输至地面加工回收金属，矿渣留采场就地处置，兼有地浸与堆浸的优点，是在地浸与堆浸的基础上发展起来的。其特点是：80%左右的矿石留在原采场就地布液浸出，20%左右的矿石出露地面堆浸；采切工程量少，废石、尾渣排放量少，是一种少废料的矿床开采方法；减少了矿石搬运和破碎工作量，减少了放射性对地表环境的污染；由于与矿体靠近的表外矿石很容易与矿体一道浸出来，从而可以提高资源回收率；生产成本在堆浸的基础上还可降低 1/3。

原地破碎工艺流程示意如图 1-3 所示。

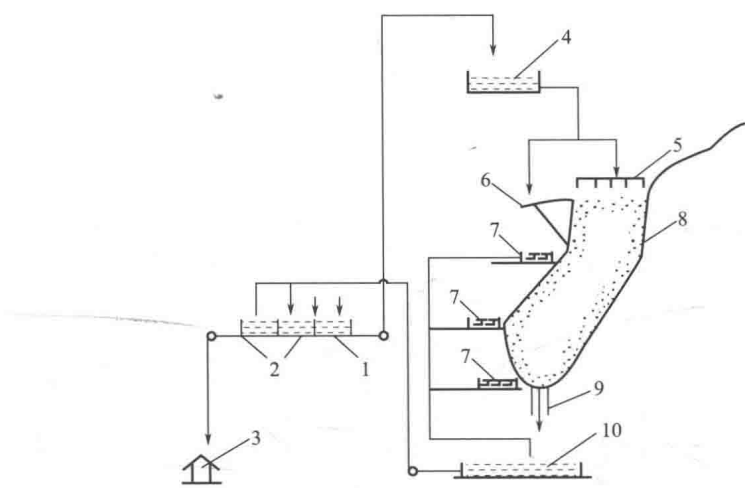


图 1-3 原地爆破浸出采铀工艺示意

1—溶浸液配制池；2—浸出液中转计量池；3—水冶车间；4—高位池；5—布液管；
6—注液孔；7—分段集液池；8—地下矿堆；9—导液井；10—总集液池

我国 20 世纪 60 年代末开始在铀矿山开展 3000 t 级的浅孔落矿筑堆的原地爆破浸出开采试验研究，80 年代末在爆破落矿筑堆、采场布液浸出和集液防渗堵漏三大关键技术及相关理论有所突破之后，在陕西某铀矿进行了万吨级的中深孔爆破落矿筑堆的原地爆破浸出开采工业性试验，并将该矿山建成我国第一座全溶浸型原地爆破浸出开采矿山。

1.4.4 原地浸出

原地浸出简称地浸，是一种在天然埋藏条件下，通过溶浸液与矿物的化学反应选择性地溶解矿石中的铀，而不使矿石产生位移的集采、选、冶于一体的新型铀矿开采方法。它改变过去常规矿山的生产模式，没有昂贵而繁重的井巷或剥离工程，也没有矿石运输、选矿、破碎和尾矿坝建设等工序；被采的是矿石，但采出的是含有有用组分的溶

液。地浸采铀具有工艺简单、基建投资少、生产成本低、环境保护和安防条件好、资源利用率高等优点，已受到世界采矿业的普遍关注。

地浸采铀是通过从地表钻进至含矿层的注液井将按一定比例配制好的溶浸液注入矿层，注入的溶浸液与矿石中的有用成分接触发生化学反应，生成的可溶性化合物在扩散和对流作用下离开化学反应区进入沿矿层渗透迁移的溶液液流中形成浸出液；浸出液经过矿层从抽液井提升至地表，抽出的浸出液输送至回收车间进行离子交换等工艺处理，最后得到合格产品。原地浸出采铀原理如图 1-4 所示。

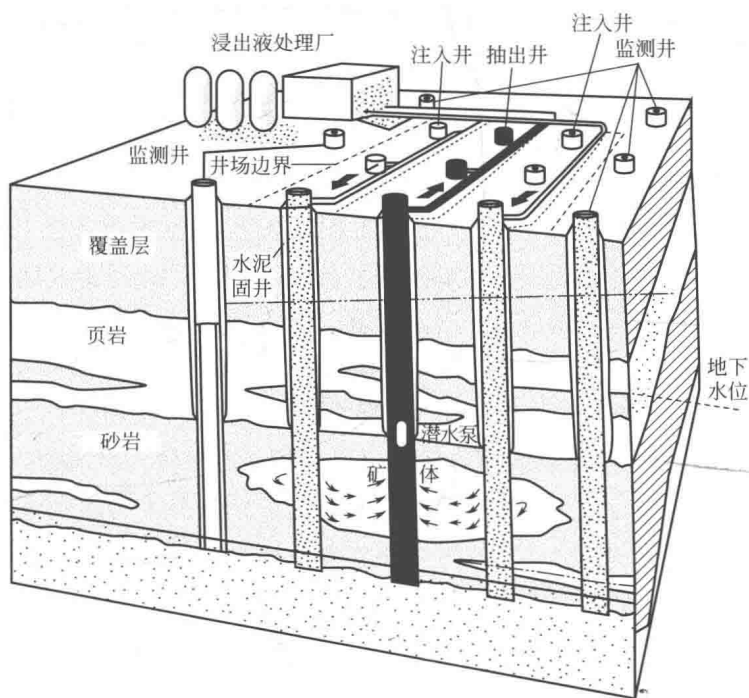


图 1-4 原地浸出采铀原理示意

地浸采铀技术的成功不仅有效地降低了我国天然铀生产的投资和成本，提高了生产效率，而且扩大了我国铀矿资源的开发利用范围，拓展了我国可供开发的铀资源量。但是，随着核电对天然铀需求持续增长、铀矿开采难度加大、成本上升，以及铀资源的分布特点，我国对地浸采铀的工艺技术、生产规模、劳动生产率等提出了越来越高的要求。新疆铀矿基地和内蒙古铀矿基地均采用地浸开采工艺，从目前掌握的情况来看，地浸基地建设条件虽然已基本具备，但一些关键技术和流程还需要突破。因此，只有依靠地浸采铀技术、设备、材料的不断进步，才能逐步拓展我国可供开发的铀资源量，提高我国砂岩型铀矿资源利用率，实现基地建设，提高地浸采铀生产能力，改善我国天然铀生产结构。2015 年地浸采铀产量占比达到 50%，预计 2020 年占比将达到 80%。

我国地浸采铀技术的研究始于 20 世纪 70 年代初，通过 40 多年的试验研究与生产实践，地浸采铀技术已成为我国铀矿开采的重要手段，其主要工艺技术和指标已达到或接近国际先进水平。现已形成了一套以地浸铀资源评价、溶浸剂配制和使用方法、地浸钻孔结构与施工工艺、钻孔排列方式和钻孔间距的优化确定、溶浸范围模

拟与控制、浸出液处理工艺技术、地浸矿山环境保护等为主体的地浸采铀技术体系。

地浸采铀技术的成功应用为北方砂岩铀矿的开发提供了技术保障；地浸采铀技术先后经历了酸法、碱法浸出的研究与实践，尤其是酸法地浸采铀工艺在新疆、内蒙古得到了良好的推广应用。近年研发出的 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 地浸采铀工艺已成功实现工业化应用，作为绿色开采工艺的示范，于 2015 年获得国家科技进步二等奖。

1.5 浸出液回收工艺

我国铀水冶工业于 1958 年起步，经历了半个多世纪的创业、发展、坚持走自力更生之路，从无到有、从小到大，在有关科研院所、设计院和厂矿几万职工的共同努力下，逐渐形成了具有中国特色的铀水冶工业体系，成为中国核工业体系的重要组成部分，为我国国防事业和国民经济发展做出了重大贡献。

从 1958 年起到 20 世纪 90 年代中期，我国共建设 16 座常规水冶厂，2 座铀选矿厂，1 座镭选厂，1 座镭冶炼厂，1 座铀、煤、锕综合回收厂。其中，1962~1963 年建成以消化吸收前苏联的矿浆吸附工艺为主的第一批铀水冶厂；1963~1967 年建成第二批铀水冶厂，这些水冶厂完全是我国自行研究设计的。处理花岗岩型铀矿石，采用的是清液萃取与清液离子交换工艺流程；处理含铀煤型铀矿石，采用的是低温焙烧发电-煤灰浸出铀-矿浆萃取铀的工艺流程；处理火山岩型铀矿石，采用的是吸附-淋萃工艺流程；处理碳硅泥岩型铀矿石，采用的是加压碱浸-季铵盐萃取工艺流程；1970 年后建成第三批铀水冶厂，成功开发出从矿石浸出液中直接制备三碳酸铀酰胺和四氟化铀新工艺，从含钼、铯等复合矿石中提取铀和从含铀富矿中提取镭的工艺流程。伴随铀水冶生产工艺的发展，关键铀水冶设备和新型有机材料的研制与应用，也产生了许多创新性成果，诸如各种形式的混合澄清器、流态化粗砂分级洗涤塔、多层全逆流混合澄清矿浆萃取塔，以及多种牌号的磷类、胺类萃取剂和离子交换树脂等。总之，我国已发现的铀矿资源多数具有品位低、规模小、组成复杂的特点，使得我国铀水冶厂的生产工艺各具特色、不尽相同，形成了中国特色的铀水冶工艺技术。

回顾铀矿冶生产历史，早期铀矿石品位较高，铀水冶采用萃取工艺较多。到 20 世纪 80 年代后，铀水冶行业出现大幅亏损，关闭和停产一些铀矿冶企业，同时也对一些厂矿生产工艺进行调整，开发了用堆浸和地浸采铀工艺。经过不断努力和 innovation，铀水冶工艺水平和企业经济效益都有了显著提高。目前，以地浸工艺为主、堆浸工艺为辅浸出回收铀，采用的铀水冶工艺主要包括如下几种。

(1) 密实移动床

主要工艺过程包括：浸出液吸附—饱和树脂再吸附—回收吸附—淋洗—贫树脂转型等工序，简称饱和再吸附工艺。该工艺主要特点表现为：a. 工艺较完整，树脂吸附后又用淋洗合格液再吸附，提高树脂吸附铀容量后，再去淋洗，铀合格液浓度高；b. 淋洗工艺液的循环利用，降低了淋洗剂的消耗，减少或避免杂质离子在溶液中的积累；c. 处理能力大，吸附空塔线速度可达 50m/h 以上。该工艺主要应用于地浸采铀矿山。有的堆浸铀矿山由于吸附原液铀浓度较高，不需要饱和再吸附，也能得到较高铀浓度的淋