

CNIC-01749
NHU-0004

原地破碎浸铀的地质条件分析与评估
EVALUATION AND ANALYSIS OF GEOLOGICAL
CONDITION OF IN-SITU FRAGMENTATION
LEACHING URANIUM
(In Chinese)

中国核情报中心
China Nuclear Information Centre

CNIC-01749
NHU-0004

原地破碎浸铀的地质条件分析与评估

杨建明 谭凯旋 黄晓乃

(南华大学建工与资源环境学院, 衡阳, 421001)

摘 要

分析了原地破碎浸铀的矿床地质条件、水文地质条件、工程地质条件和工艺矿物学特征, 认为原地破碎浸铀技术的顺利实施决定于不同的地质因素。以前铀矿床的勘探和地质条件的评价是基于传统的开采方法来评定的。为了采用原地破碎浸出采矿法来开采矿床, 有必要对以前勘探的矿床进行开采前的重新评价, 或在新勘探这类矿床时按原地破碎浸出采矿法所需的地质条件来评价。介绍了莫西涅茨. B. H 所提出的对采用原地破碎浸出采矿法开采的矿床进行可行性评估的方法, 并认为该评估方法对我国铀矿床开采前地质条件的评估具有指导性意义。另外以某铀矿床为例, 采用莫西涅茨. B. H 法进行了原地破碎浸铀的可行性评估。

关键词: 原地破碎浸铀 地质条件 可行性评估 工艺矿物

Evaluation and Analysis of Geological Condition of In-situ Fragmentation Leaching Uranium

(In Chinese)

YANG Jianming TAN Kaixuan HUANG Xiaonai
(Institute of Architecture, resource and environment, NanHua University,
Hengyang, 421001)

ABSTRACT

The ore geological condition, hydrogeological condition, engineering geological condition and technological mineralogical character of in-situ fragmentation leaching uranium are analyzed, and it is considered that the implementation of in-situ fragmentation leaching uranium technology is decided by different geological factor. Previously prospecting and geological condition evaluation of uranium ore is based on traditional mining method. If in-situ fragmentation leaching uranium method is adopted, one must re-evaluate previously prospected deposits before they are mined, or one must evaluate new prospecting deposits according to geological conditions of in-situ fragmentation leaching uranium method. The feasibility evaluation method of uranium deposit by in-situ fragmentation leaching uranium put forward by B. N. Mociniets is introduced, and it is considered that B. N. Mociniets method has guidable significance for geological condition evaluation before uranium deposits are mined. A feasibility study is done by applying B. N. Mociniets' method to a uranium deposit.

Key words: In-situ fragmentation leaching uranium, Geological condition, Feasible evaluation, Technological minerals

前言

原地破碎浸出采铀技术是融合了地质学、采矿、化学、湿法冶金、环境工程等于一体的综合性采矿技术，是各学科交叉和渗透发展的结晶。原地破碎浸铀是在矿体自然埋藏条件下进行原地爆破落矿筑堆；对矿堆进行布液浸出，有选择性地从矿石中浸出铀金属，再通过集液措施将浸出的含金属液收集起来，输送到金属回收厂进行处理，从而达到开采铀矿床的目的^[1]。它适应面广，一些不能用原地浸出（地浸）开采的矿床都可以用原地破碎浸出采矿法加以开采。我国具有工业开采价值的铀矿床主要有四种类型，即花岗岩型、火山岩型、砂岩型、碳硅泥岩型，其中部分砂岩型铀矿床适合于原地浸出开采（地浸），而花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型铀矿床由于矿体形态和产状复杂、岩石坚硬、矿石渗透性差、矿石成分相对复杂，且矿石和围岩的水文地质条件复杂，通常采用原地破碎浸出采铀的开采方法开采。我国先后在五座铀矿进行了工业试验与生产，如核工业第六研究所在浙江某矿进行了 3000 t 级的采场堆浸现场试验，浸出率达 82.2%，20 世纪 80 年代湖南某矿开展了原地破碎浸出采铀工业试验，利用井下含有细菌的废水淋浸，取得较好的经济效益^[2]。20 世纪 90 年代核工业第六研究所又先后在陕西某铀矿进行原地破碎采铀的工业试验，浸出率达 89%^[3]。原中南工学院在广东某铀矿进行了深孔原地破碎浸铀工业试验，浸出率达 82% 左右。江西某铀矿原地爆破浸铀的试验^[4, 5]也获得成功；同时开展了对江西另一铀矿床溶浸地质条件评价和工艺试验研究^[6-9]。该铀矿床规模大，品位低，采用传统水冶工艺开采，生产成本高，被认为是“呆矿”，铀源资源长期得不到开发利用。实验表明，采用原地破碎浸出采铀是可行的。以上实践证明原地破碎浸出采铀在我国是可行的，特别适用于花岗岩型、火山岩型及碳硅泥岩型等铀矿床的开采^[10]。但以前铀矿床的勘探和地质条件的评价是基于传统的开采方法来评定的，为了采用原地破碎浸出采矿法来开采矿床，有必要对以前勘探的矿床进行开采前的重新评价，同时在新勘探这类矿床时，我们也可以按原地破碎浸出采矿法所需的地质条件来评价，因此正确评价适合于原地破碎浸出采矿法的矿床，在当前尤其重要。

1 原地破碎浸铀的地质条件

原地破碎浸出地质条件主要分为：（1）铀矿床地质条件；（2）水文地质条件；（3）工程地质条件；（4）矿石的工艺矿物学特点。

1.1 矿床地质条件

矿床能否适应原地破碎浸出采矿法开采，与矿床的地质条件和技术经济条件密切相关，主要包括：矿体形态、产状和规模，矿石与围岩的矿物组成和化学成分，矿石品位、金属储量，铀金属在矿石内的分布特征，矿石中碳酸盐的含量，矿床的经济地理位置等。原地破碎浸出采矿法是目前基于地质学、化学、湿法冶金、采矿学科的综合性采矿方法，是在常规铀采矿的基础上运用浸矿技术实现的，因此对矿床的矿石组成和围岩组分有相当严格的要求，同时还对矿体形态产状有一定的要求，下面分叙如下：

矿体的形态是决定爆破设计、采场参数、布液方式的主要因素之一，爆破设计必须适合矿体形态及减小环境污染的要求，爆破孔排列的形式及孔距的大小、药包的设置必须使整个矿体均匀破碎。另外在矿体形态较规则（规则脉状），分支、复合较少，厚度较大，且矿体空间分布较密集的情况下，可使用较规则的网度，孔距可适当放大。因此形态规则与否，直接影响爆破方案的选择。同样矿体的形态影响到采场参数的选择和布液方式。

矿体的产状、厚度对爆破筑堆的形式和布液方式有较大影响，倾角大于 60° 的急倾斜的矿体，爆破后可形成较大高度的矿堆，对浸出最有利^[10]；倾角为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的矿体，若辅以注液措施，仍有利浸出；而倾角小于 30° 的缓倾斜矿体，若矿厚度大，也有利于浸出^[11]。张得宽等^[12]研究表明，矿石堆的淋润率随矿体倾角的变大、矿体厚度的加大而增高，而随采矿中段高度的增高而降低。当矿石堆的倾角为 90° 时，其淋润率才能达到 100%。但根据实验资料，当中段高度在 30~50 m，矿石堆倾角为 $80^\circ \sim 75^\circ$ 时，亦可以达到完全淋润的效果。而一般小厚度的矿石堆倾角小于 75° 时，欲取得较高的淋润率，则需导流设施。

矿体的埋藏深度较浅（矿体接近地表或出露地表）既可考虑钻孔爆破法，也可考虑峒室爆破法。一般而言，矿体埋藏深度浅较埋藏深有利。若在坑道内使用钻孔爆破，厚度较大的铀矿体（矿体厚度为 10~20 m），每吨破碎矿石的采准工程费用将大大降低。

矿石的矿物成分也是影响铀浸出的重要因素之一，用酸法浸出铀，按浸出程度，矿物一般可分为三类：

（1）易于浸出的矿物，如碳酸盐、铁和锰的氧化物与氢氧化物，六价的铀矿物和其他金属矿物。

（2）浸出效果较差的矿物，如水云母、长石和硫化物。

（3）浸出效果极差的矿物，即实际不能溶解的矿物，如石英、玉髓、蛋白石、角闪石和辉石等。

溶浸剂的消耗量主要取决于第一类矿物，其次是第二类矿物，第三类矿物实际不影响硫酸的消耗，因为赋矿围岩是长石、石英为主组成的花岗岩和火山岩或者由石英组成的硅质岩或石英岩，其浸出工艺流程中耗酸低，而含方解石的矿石耗酸量大。

呈六价铀的氧化物、氢氧化物及粉末状铀石、铀黑，其浸出性能最好，而呈四价铀的晶质铀矿、沥青铀矿，用酸法浸出，必须应用氧化剂使四价铀转为六价铀。被炭质、泥质吸附的铀及类质同像状态的铀，可浸性最差。

矿石中的化学成分： CaO ， MgO ， CO_2 ， Al_2O_3 ， Fe_2O_3 ， FeO 和 MnO 等氧化物含量低，有利于酸法浸出。 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} > 1$ 、铀呈六价状态的氧化物、氢氧化物，不需加氧化剂，即可酸浸。若 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} < 1$ ，一般需加氧化剂，方可酸浸。

对于酸法浸出还要求碳酸盐含量 $< 2\%$ （以 CO_2 计），耗酸矿物含量要低，而对于碱法浸出则要求黄铁矿含量要低。

矿石的结构（铀矿物颗粒特征与大小）也影响矿石的溶浸效果，铀矿物颗粒特征决定它与溶浸液接触表面积大小，复杂形态铀矿物较之球状晶体有较大表面积。此外，对一定体积的铀矿物，较小粒度的矿物颗粒，具有较大的表面积，有利于浸出。矿石构造也同样影响浸铀的重要因素，如细脉状矿化有利于浸出，而浸染状矿化不利于浸出^[11]。

矿床的经济地理位置也决定原地破碎浸铀的顺利实施^[10]。

影响原地破碎浸出采铀的因素是多方面的，而矿石品位、矿石的组分与结构、矿体厚度、矿体形态产状、围岩的渗透性能是影响原地破碎浸出采铀的重要条件。只有在深入研究和综合评价铀矿床的各种地质条件的基础上，才能对某矿床是否适合原地破碎浸出采铀作出科学的评价，才能得出该矿床是否可以采取原地破碎浸出采铀的依据，否则仓促采用原地破碎浸出采铀，可能得不偿失。矿床地质条件对原地破碎浸出采铀的影响如表 1 所示。表 2 给出了生产参数与矿床条件的关系。

表 1 矿床地质条件对原地破碎浸出采铀的影响

影响因素	对原地破碎浸出采铀的影响程度
矿石中铀的存在形式及赋存状态	金属矿物在弱酸性或弱碱性溶液中不溶解时，是决定性因素；金属矿物溶解时是影响浸出剂消耗量的主要因素，也是影响浸出过程经济效益的主要因素
矿体厚度、品位和金属储量	影响浸出过程经济效益的主要因素
矿体形状	影响原地破碎浸出采铀的采场参数设计
矿体产状	影响原地破碎浸出采铀布液方式选择
矿石的矿物成分、化学成分	影响浸出过程经济效益的主要因素，也可以是影响原地破碎浸出采铀能否成功的因素。矿石的化学成分也是如此，有时也是决定性的否定因素，因此在决定是否采用原地破碎浸出采铀时必须考虑这些因素
围岩的渗透性	影响集液工程布置
矿石的结构与构造	影响铀的浸出率
矿床的经济地理位置	决定矿床开采的经济效益

表 2 主要生产参数与矿床条件的关系

参数	主要影响因素
采用原地破碎浸出采铀的可能性	矿石的矿物成分和化学成分
布液方式与间距	取决于矿石的渗出透性和矿体的产状，产状倾斜的矿体浸矿过程中易形成浸矿死角，影响浸矿的效果
围岩的渗透性能	影响到原地破碎浸出采铀的集液方式和施工
浸出剂量的选择	矿层的矿物和化学成分以及矿石中铀的赋存状态和嵌布特征
浸出液浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	矿石品位
浸出剂的单位耗量	含矿层铀含量、渗透性、筑堆高度
浸出时间	矿石矿物、化学成分
浸出率	矿石的矿物和化学成分，矿石中铀的赋存状态及品位，矿石渗出透性，矿石和岩石的传导性和渗透性比值

1.2 水文地质条件

一个矿床是否适应于原地破碎浸出采铀采矿法开采，不但与矿床的地质条件有关，而且还与矿床水文地质条件有关，如矿岩孔隙度、矿石渗透性、围岩的渗透性、矿床地下水水位与涌水量等。硬岩铀矿床原地破碎浸出采铀的工艺特点是溶浸液直接接触采场矿堆的

矿石，铀的浸出是毛细管和化学的共同作用，而矿石渗出透性既影响溶浸液在重力和静压力作用下的传递，又影响已溶解的铀从孔隙至溶浸液流的传递效率及溶浸剂渗流速度。

矿石的渗透性是影响原地破碎浸出采铀的条件之一，若矿床的矿石渗透系数小于 0.1 m/d，必须用工程手段，将矿石预先破碎，增大矿石渗透系数。当矿石的渗透系数大于围岩渗透系数时有利于浸矿。

同时矿石的渗透性能与矿石孔隙度、矿石中碳酸盐含量及粘土矿物有关。矿体裂隙发育，且贯通好，其矿石的有效孔隙 $\geq 2\%$ ，有利于浸矿。用酸法浸出时，矿石中碳酸盐矿物与硫酸生成石膏，将堵塞孔隙，不利于铀的浸出。矿石中粘土矿物如高岭土、蒙脱石、伊利石，在硫酸的作用下易分解或吸水膨胀，影响浸矿顺利进行。

若围岩的透水性好 ($K > 1 \text{ m/d}$)，其溶浸过程可能产生溶浸液流向矿房的外部、贵液的损失或贫化、污染环境等不良效果，所以原地破碎浸出法要求围岩透水性小，否则要实施防漏工程，如采用帷幕和防漏底垫来消除漏损，以减少溶浸液流失对设备与环境的损害。

矿床地下水水位与涌水量也是影响原地破碎浸铀的重要因素，它不但增加矿坑排水费用，同时造成溶浸液的流失。

矿床水文地质条件对原地破碎浸出采铀的影响如表 3 所示。

表 3 矿床水文地质条件对原地破碎浸出采铀的影响

影响因素	对原地破碎浸出采铀的影响程度
矿石渗透性	决定性因素。低的渗透性矿石必须用工程预破碎，矿石渗透系数大于围岩有利于浸出
矿石的孔隙度、矿石中碳酸盐含量、粘土矿物	决定原地破碎浸铀的效率
围岩渗透性	决定溶浸液是否流失，是否采取工程措施集液
矿床地下水水位及涌水量	决定溶浸液是否流失及矿山防水费用

1.3 工程地质条件

原地破碎浸出采矿法同样需要通过传统采准工程接近或进入矿体内部，同时也使采场矿石破碎到适宜粒度，构筑原地破碎矿石堆，保证原地破碎浸出采矿布液的顺利进行，达到顺利从铀矿石堆浸出铀金属。因此必须了解岩、矿石的物理机械性质。通常主要了解岩（矿）石比重，岩（矿）石的抗压强度和岩（矿）石普氏系数。

岩（矿）石的比重是采矿设计的重要参数，原地破碎浸出采铀也不例外。

岩（矿）石的抗压强度是岩（矿）石的物理机械性质的重要参数，也是采场设计的重要依据。一般岩（矿）石的抗压强度同岩（矿）石的蚀变类型和成分变化有关。

矿石的普氏系数是矿石物理机械性质的一个重要参数。通常普氏系数 8 以下有利于浸矿^[10]。而花岗岩类岩石普氏系数为 10，属中等坚硬岩石。

1.4 工艺矿物学特点

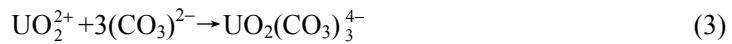
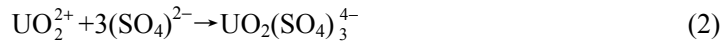
决定铀矿床能否正确采用原地破碎浸铀开采方法不但取决于铀矿石的品位，而且也取决于铀矿石的工艺矿物学特点。铀矿石的工艺矿物学特点对原地破碎浸出采铀工艺的实行

和经济性有着重要的影响，因此在评价铀矿床地质条件时，了解铀矿石的工艺矿物特性和矿石在特定工艺条件下的行为是很重要的。

在酸性和碱性的氧化条件下，铀的活动性很大，生成铀酰离子（ UO_2^{2+} ），而铀酰离子又会同各种阴离子或其它阳离子生成大量的通常是复杂的矿物（硫酸盐、磷酸盐、碳酸盐、硅酸盐、钒酸盐、砷酸盐等）。四价铀（理想的晶质铀矿）变成可活动前需要氧化到六价。铀矿物可用酸性溶液或碱性溶液（碳酸盐）溶解。自然界铀存在两种价态——六价形式铀（其氧化物是 UO_3 ）和四价形式铀（其氧化物是 UO_2 ）。六价形式的铀按反应方程式（1）所示直接进入溶液：



而铀酰离子在酸性溶液中同硫酸根离子生成络合物；在碱性溶液中则同碳酸根离子生成络合物，如下面反应式所示：



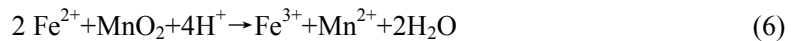
对于反应（1），当用于碱法碳酸盐流程时，氢离子是由碳酸氢盐提供的，因此浸出时必须有碳酸氢盐存在。当铀以四价形式（ UO_2 ）存在时，需要氧化成六价，如下式所示：



氧化反应可能是相当复杂的，在酸性介质中，主要是由于溶液中存在三价铁离子而使铀迅速地氧化^[13]：



氢离子不参与这个反应。但为了保持 UO_2 不断溶解，必须使反应式（5）中生成的 Fe^{2+} 重新氧化成 Fe^{3+} ，而这个反应需要氢离子。例如用二氧化锰作氧化剂，则可用下面反应式表示：



在用酸溶解 UO_2 时三价铁离子的作用是十分重要的。它实质上起着传递电子的“催化剂”作用^[13]。溶浸液中三价铁离子浓度高，对铀的浸出极为有利^[14]。三价铁离子不能存在于碱性碳酸盐溶液中，因为碳酸盐浸出需要比较高的压力和温度，而且往往需要较长的浸出时间和较细的磨矿粒度。

脉石矿物的反应活性及其在浸出液中的溶解产物对于提取铀的化学和经济性有着深远的影响。如：（1）石英，石英是不活泼的矿物。（2）碳酸盐，碳酸盐的存在需要消耗一定的酸，同时形成的物质堵塞矿石的孔隙，影响浸矿的进行。（3）磷酸盐，在较低的酸度下它或多或少地要消耗一些酸，同时进入溶液的磷酸能够络合三价离子，因而妨碍三价铁离子在氧化过程中所起的作用。（4）硅酸盐，对浸矿的影响不明显。（5）铁的氧化物，在酸法浸出铀矿石的 pH 范围内，它的溶解速度通常很快，提供了对于氧化反应非常重要的三价铁离子^[13]。（6）硫化物，硫化物的存在就预示着可能需要消耗较多的氧化剂，

因此也就需要消耗较多的酸。但如存在较多黄铁矿，可以考虑用细菌浸出。(7) 含碳成分，它们对浸染铀矿物的物理阻塞可能有问题。

花岗岩型铀矿床的矿石组分比较简单，工业铀矿物主要为沥青铀矿、其次为铀石。沥青铀矿在矿石中的产出形态主要有：(1) 呈单矿物或复矿物细脉、微脉、网脉等；(2) 沿脉石矿物解理、粒间间隙、溶蚀洞穴等充填、交代；(3) 呈显微胶粒状散染于微晶石英、绿泥石、萤石、石英等脉石矿物中，或可与微晶石英、方解石交互沉淀；(4) 胶结、环边先存岩石、矿物角砾，或呈密集浸染状充填碎裂岩石的裂隙，构成富矿石。沥青铀矿可交代硫化物，也可被硫化物交代。在沥青铀矿中常见含有分散状方铅矿包裹体。铀石常与沥青铀矿显微状连生。伴生的金属矿物主要有：黄铁矿、闪锌矿、水针铁矿、方铅矿、白铁矿等矿物。脉石矿物主要有微晶石英、萤石、方解石、水云母、蒙脱石、斜长石、钠长石、绿泥石、磷灰石、白云母等矿物。

火山岩型铀矿床的矿石物质成分比花岗岩型铀矿床的要复杂。工业铀矿物和含铀矿物有沥青铀矿、钍沥青铀矿、钍铀矿、铀石、铀方钍石、含铀氟磷灰石（胶磷矿）及含铀萤石等。沥青铀矿通常呈球粒状、胶状或浸染状、网脉状形式分布于矿石内。也有一部分铀呈分散状分布于粘土矿物（水云母为主）、绿泥石、胶状黄铁矿和红化围岩。铀主要以沥青铀矿、铀石形式产出，少量存在于含铀矿物内。伴生的金属矿物主要有：辉钼矿、胶硫钼矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、赤铁矿、黄铜矿、白铁矿、磁黄铁矿、毒砂、胶锆石、银矿物（硫银矿、辉银矿、淡红银矿）。脉石矿物有石英、玉髓、萤石、方解石、水云母、绿泥石、钠长石、重晶石、迪开石、微晶高岭石。常见的共生及伴生元素有 Be, Cu, Pb, Zn, Ag, Mo, Y, Sr, Mn, As, Ni, Co 和 P 等，其中 Mo, Ag, P 和 Y 元素含量较高，有时可被综合利用。

碳硅泥岩型铀矿床矿石的矿物组成比较复杂。工业铀矿物主要有沥青铀矿、铀石。其次呈有机质、粘土矿物、铁氧化物等吸附态存在。个别矿床中也可出现有晶质铀矿。伴生金属矿物主要有黄铁矿、胶黄铁矿（后者与铀矿化关系密切）、闪锌矿、硫铁镍矿、胶硫钼矿、辰砂、辉锑矿、雄黄、辉镍矿及 Fe, Cu, Ni, Zn, Mo 和 Hg 的硫化物和砷化物。矿床氧化带中的次生铀矿物主要有钡铀云母、钙铀云母、铜铀云母、铀黑等含铀矿物。

上述三大类型铀矿床的矿石特点表明，工业铀矿物主要为四价的沥青铀矿、铀石，以单矿物形式存在或分布于脉石矿物的裂隙内，矿石成分简单，碳酸盐含量较少，适宜采用酸法浸矿；但部分方解石（碳酸盐矿物）含量高的矿石，特别是碳硅泥岩型铀矿床，其含矿围岩为碳酸盐，可能更适用碱法浸矿。此外部分铀呈有机质、粘土矿物、铁氧化物吸附态存在，可能不利于浸矿进行。伴生金属矿物主要有黄铁矿、方铅矿和赤铁矿，黄铁矿和方铅矿等硫化物的存在可能消耗部分酸，但黄铁矿的存在有利于采用细菌浸矿，而赤铁矿的存在增加溶浸液中 Fe^{3+} 的浓度，有利于铀的浸出^[14]。

2 原地破碎浸出采铀的可行性评估

前苏联学者莫西涅茨 B. H^[15, 16] 在分析坚硬岩石矿床地浸矿山的天然条件（物质成分、矿化性质、矿体性质、矿产有用组分）、矿石的地质工艺性质、浸出过程的定量和定性指

标等条件时,发现矿化特征、矿石中有益组分的赋存形式、围岩渗出透性、矿石中碳酸盐含量、矿石在物质交换过程中有杂质的含量、矿床的经济地理位置、矿床开采现状、开采深度等条件是影响坚硬岩石矿石浸出的基本因素。莫西涅茨. B. H 提出了原地破碎浸出采矿法开采坚硬矿石矿床的典型条件(如表4)。

表4 原地破碎浸出采矿法开采坚硬矿石矿床的典型条件

主要因素名称	不同类型矿床的主要因素的特征		
	I-非常有利的	II-有利的	III-不利的
矿化特征	细脉状、张开裂隙壁上的薄膜和复层(X ₁)	胶结岩石裂隙的微细脉状,细脉浸染状(X ₂)	细粒浸染状、浸染状,沿全矿岩分散状(X ₃)
矿床充水性	不充水,涌水量在100 m ³ /h以下(X ₄)	弱充水,涌水量100~300 m ³ /h(X ₅)	强充水,涌水量大于300 m ³ /h(X ₆)
围岩集水性	围岩是不透水的,K ₀ =0~0.1 m/d(X ₇)	围岩为弱透水性的,K ₀ =0.1~1 m/d(X ₈)	围岩为强透水性的,K ₀ >1.0 m/d(X ₉)
矿石中的碳酸盐含量	3%以下(X ₁₀)	3%~5%(X ₁₁)	大于5%(X ₁₂)
开采深度	400~1100 m(X ₁₃)	200~400 m, 1100~1200 m(X ₁₄)	200 m以下(X ₁₅)
矿石中有害杂质含量	生产过程中必须排出的母液5 g/L以下(X ₁₆)	生产过程中必须排出的母液5~15 g/L(X ₁₇)	生产过程中必须排出的母液50 g/L以上(X ₁₈)
矿床的经济地理位置	远离工业发展中心(X ₁₉)	靠近矿区(X ₂₀)	位于疗养区和自然保护区(X ₂₁)
矿床的矿山工程状态	未进行矿山-采准工程(X ₂₂)	主要矿山采准工程已完成并处于良好状态(X ₂₃)	采用地浸法会给新的采准中段造成困难(X ₂₄)
矿石中金属的赋存形式	单独的氧化物(X ₂₅)	表生矿物,类质同像混合物(X ₂₆)	有用组分与沥青、磷酸盐或有机物共生(X ₂₇)

概算的基础为贝叶斯公式,利用该公式可以计算具体矿床的特征值,并按公式计算出矿床属于那一类型的概率。

$$p(x_{0j}, i) = \frac{p_i p'(j/i)}{\sum_{i=1}^n p_i p'(j/i)} \quad (7)$$

式中: $P(x_{0j}, i)$ ——具有 x_{0j} 特征的新矿床的属性概率, ($j=1, 2, \dots, m=9$) 为模式(类型)

i ($0 \leq p(x_{0j}, i) \leq 1$);

p_i —— i 模式出现的可能几率;

$p'(j/i)$ ——假定新矿床属于 i 类型条件下 j - x 综合特征出现的假定概率。

根据上述条件编制了信息群共含有 5892 个对象,其中 184 种情况的矿床属于 I 类,

3784 种情况属于 II 类, 1864 种情况属于 III 类 (见表 5)。

表 5 矿床 (类型) 数量统计表

指标	矿床 (类型) 数量		
	I	II	III
1、模式频率	184	3784	1864
2、特征频率 X_1, X_{19}, X_{22}	141	1843	932
X_2, X_{20}, X_{23}	43	1941	932
$X_4, X_7, X_{10}, X_{13}, X_{16}, X_{25}$	133	1403	408
$X_5, X_8, X_{11}, X_{14}, X_{17}, X_{26}$	42	1494	408
$X_6, X_9, X_{12}, X_{15}, X_{18}, X_{27}$	9	887	1048
X_3, X_{21}, X_{24}	0.0	0.0	0.0

手算方式的程序如下:

- (1) 借助于二进位代码将每个对象编成代码, 使其具有一组零和 1;
- (2) 此后按特征出现的频率编制成表 6, 来自 5892 个对象的数据分别填入相应的格中, 这样就可确定各种因素按特征值的分布情况;
- (3) 找出特征的假定概率, 表 6 中的数应除以模式出现频率并编制表 7, 从表 7 中即可看出特征的假定概率;
- (4) 如果要判别一个具有特征的新矿床是否适应原地破碎浸出采矿法开采, 则需要计算以下概率:

表 6 矿床分布频率表

指标	各种类型矿床数		
	I	II	III
1、模式 (p_i) 的假定概率	0.032	0.649	0.32
2、模式 (p_{ij}) 中的特征的假定概率	0.767	0.487	0.500
X_1, X_{19}, X_{22}			
X_2, X_{20}, X_{23}	0.233	0.513	0.500
$X_4, X_7, X_{10}, X_{13}, X_{16}, X_{25}$	0.722	0.371	0.218
$X_5, X_8, X_{11}, X_{14}, X_{17}, X_{26}$	0.228	0.304	0.218
$X_6, X_9, X_{12}, X_{15}, X_{18}, X_{27}$	0.049	0.234	0.562
X_3, X_{21}, X_{24}	0.0	0.0	0.0

(a) 该矿床可能归入表 4 中哪一类的非标准概率。

$$p'(x_0, i) = p_i \prod_j^m p_{ij} \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

式中: $\prod_j^m p_{ij}$ ——表中具有代码 $x_{0j}=1$ 特征的 p'_{ij} 行的概率乘积。

(b) 按公式得出标准的概率。

$$p(x_0, i) = \frac{p'(x_0, i)}{\sum_{i=1}^n p'(x_0, i)} \quad (9)$$

式中： $p(x_0, i)$ ——矿床属于某一类型的最可能有概率。

表 7 矿床分布假定概率表

指标	各种类型矿床数		
	I	II	III
模式中特征的信息量			
X ₁ , X ₁₉ , X ₂₂	0.0045	-0.0036	0.0
X ₂ , X ₂₀ , X ₂₃	-0.0024	0.0037	0.0
X ₄ , X ₇ , X ₁₀ , X ₁₃ , X ₁₆ , X ₂₅	0.0076	0.0111	-0.0128
X ₅ , X ₈ , X ₁₁ , X ₁₄ , X ₁₇ , X ₂₆	-0.0012	0.0188	-0.0128
X ₆ , X ₉ , X ₁₂ , X ₁₅ , X ₁₈ , X ₂₇	-0.0012	-0.0233	0.0407
X ₃ , X ₂₁ , X ₂₄	0.0	0.0	

在进行上述工作时必须考虑下述基本情况：

(1) 属于非常有利的矿床是除具有 I 类特征外还含有不超过 3 个 II 类特征或 II 和 III 类各一特征 (X₃, X₂, X₂₄ 除外) 的矿床。

(2) 含有第 III 类一个以上特征的矿床不属于最有利于用原地破碎浸出采矿法开采之列。

(3) 属于不利的是含有第 III 类以上特征或至少 X₃, X₂, X₂₄ 之一特征的矿床。

(4) 所有特征综合后属于有利原地破碎浸出采矿法开采的矿床。

叶庆森^[10]根据我国花岗岩、火山岩和碳硅泥岩型铀矿床的地理、地质特征，也提出了花岗岩、火山岩和碳硅泥岩型铀矿床采用原地破碎浸出采矿法的评价标准，将此类铀矿床分为非常有利、有利和不利三种类型，对我们采用原地破碎浸出开采铀矿床具有指导性意义。

3 矿床实例

某铀矿床位于某构造岩浆岩带桃山岩体中，赋矿围岩为花岗岩。铀矿化的产出严格受蚀变带与构造裂隙带或碎裂岩带复合控制，矿体形态复杂，多为不规则脉状透镜状，呈鱼群状、群脉状产出。工业铀矿物主要有沥青铀矿及次生铀矿物。伴生金属矿物主要有黄铁矿、赤铁矿、少见方铅矿、闪锌矿、针铁矿、褐铁矿。脉石矿物为长石、石英、云母。铀在矿石中的存在形式主要有两种：其一是沥青铀矿呈微细脉充填在微裂隙或超显微裂隙中；其次是沥青铀矿呈吸附状态见于铁质矿物或粘土矿物集合体中。矿石类型为铀-水针铁矿型、铀-绿泥石、水云母型、铀-萤石型、铀-碳酸盐型。矿石呈微脉浸染型结构、块

状构造。

该铀矿床水文地质条件简单，矿床含水层（带）可分为：第四系孔隙含水层、花岗岩似层状风化裂隙含水层及构造破碎带脉状裂隙水三种类型。统计表明地下水平均埋深 5.73 m，水位埋深 32.81 m，矿床地下水都位于矿床顶板以上。地下水水质类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca, nA}$ 型为主，pH 值 7.3~7.5，地下水矿化度 0.1~0.18 g/L，平均水温 20 °C 士。岩、矿石的孔隙率在 1.13%~5.66%。矿石的孔隙率明显大于围岩的孔隙率。某铀矿床岩、矿渗透系数均不高，一般在 0.0018~0.03 m/d，地下水与地表水的联系较弱。

该铀矿床岩、矿石比重相近，一般为 2.64~2.66 g/cm³，干单轴抗压强度为 155.7~174.1 MPa，矿石的抗压、抗剪、抗拉强度均小于围岩，说明矿石的力学性质弱于围岩。矿石的普氏系数为 5~7，岩石的普氏系数为 5~11，松散系数 1.65，说明岩、矿石具有较好的爆破性能。

根据表 4 中 9 个要素，该铀矿床具有以下特征^[8]：

- (1) 矿化特征：微细脉状、网脉状、葡萄状、细脉浸染状。（X₂）
- (2) 矿床充水性：不充水，涌水量 < 100 m³/d。（X₄）
- (3) 围岩集水性：不透水围岩，K < 0.1 m/d。（X₇）
- (4) 矿石中碳酸盐含量：< 3%。（X₁₀）
- (5) 矿床埋深：绝大多数矿体埋深于 130~350 m 处。（X₁₄）
- (6) 矿石中有害杂质含量：极少。（X₁₆）
- (7) 矿床经济地理位置：远离工业发达中心。（X₁₉）
- (8) 矿床矿山工程状况：未进行任何采矿。（X₂₂）
- (9) 矿石中金属矿物存在形式：单独氧化物。（X₂₅）

根据该铀矿床特征（X₂, X₄, X₇, X₁₀, X₁₄, X₁₆, X₁₉, X₂₂ 和 X₂₅）查表 6 得出其相应特征的假定概率，并作如下计算：

(1) 求非标准概率

(a) 该铀矿床属于第 I 类非标准概率

$$p'(x_0, \text{I}) = p_i \prod_j^m p_{ij} = 0.032 \times 0.233 \times 0.722 \times 0.722 \times 0.722 \times 0.228 \times 0.722 \times 0.767 \\ \times 0.767 \times 0.722 = 0.000196208$$

(b) 该铀矿床属于第 II 类非标准概率

$$p'(x_0, \text{II}) = p_i \prod_j^m p_{ij} = 0.649 \times 0.513 \times 0.371 \times 0.371 \times 0.371 \times 0.304 \times 0.371 \times 0.487 \\ \times 0.487 \times 0.371 = 0.000127384$$

(c) 该铀矿床属于第 III 类非标准概率

$$p'(x_0, \text{III}) = p_i \prod_j^m p_{ij} = 0.32 \times 0.500 \times 0.218 \times 0.218 \times 0.218 \times 0.218 \times 0.218 \times 0.500 \\ \times 0.500 \times 0.218 = 0.000004293$$

(2) 求标准概率

(a) 该铀矿床属于第 I 类标准概率

$$\begin{aligned} p(x_0, \text{I}) &= \frac{p'(x_0, \text{I})}{p'(x_0, \text{I}) + p'(x_0, \text{II}) + p'(x_0, \text{III})} = \frac{0.000196208}{0.000196208 + 0.000127384 + 0.000004293} \\ &= \frac{0.000196208}{0.000327885} = 0.598 \end{aligned}$$

(b) 该铀矿床属于第 II 类标准概率

$$\begin{aligned} p(x_0, \text{II}) &= \frac{p'(x_0, \text{II})}{p'(x_0, \text{I}) + p'(x_0, \text{II}) + p'(x_0, \text{III})} = \frac{0.000127384}{0.000196208 + 0.000127384 + 0.000004293} \\ &= \frac{0.000127384}{0.000327885} = 0.389 \end{aligned}$$

(c) 该铀矿床属于第 III 类标准概率

$$\begin{aligned} p(x_0, \text{III}) &= \frac{p'(x_0, \text{III})}{p'(x_0, \text{I}) + p'(x_0, \text{II}) + p'(x_0, \text{III})} = \frac{0.000004293}{0.000196208 + 0.000127384 + 0.000004293} \\ &= \frac{0.000004293}{0.000327885} = 0.013 \end{aligned}$$

计算结果表明, 该铀矿床 ($p=59.8\%$) 属于第 I 类型, 即适宜原地破碎浸出采铀法开采。

4 结论

浸铀的地质条件是影响花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型铀矿床开采的关键因素, 甚至是决定性因素。以前对铀矿床开采的评价大多是针对传统开采法进行的, 不利于采用原地破碎浸铀技术, 因此对以前勘探的矿床或新勘探的矿床进行原地破碎浸铀的地质条件评估显得日益迫切。

参 考 文 献

- 1 全爱国. 原地爆破浸出采铀的工艺技术研究及应用前景[J]. 铀矿冶, 1998, 17(1): 1~5
(QUAN Aiguo. Technical research and application prospect on uranium extraction by stope leaching [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1998, 17(1): 1~5)
- 2 刘荪基. 应用溶浸法回收老采区残留铀金属初探[J]. 铀矿冶, 1993, 12(1): 63~65
(LIU Sunji. Previously study of reclaimed remained uranium in old mining area by solution leaching method [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1993, 12(1): 63~65)
- 3 李明. 就地破碎浸出采铀的研究与进展[J]. 铀矿冶, 1996, 15(2): 81~85

- (LI Ming. Research and development of in-situ leaching of blasted ore [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1996, 15(2): 81~85)
- 4 施祖远. 黄峰岭露天矿底部改用原地爆破浸出可行性探讨[J]. 铀矿冶, 1992, 11(4): 12~16
(SHI Zuyuan. Exploration on feasibility of using in-situ leaching after explosion on the bottom of Huangfengling open pit [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1992, 11(4): 12~16)
- 5 施祖远. 深孔爆破原地破碎浸出采铀在赣州铀矿的应用及探讨[J]. 铀矿冶, 2000, 19(1): 17~22
(SHI Zuyuan. Exploration and application of stope leaching uranium after longhole blasting in Ganzhou uranium mine [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2000, 19(1): 17~22)
- 6 刘小平, 汤森进, 窦小平, 曾文乐, 杜兴胜. 江西桃山大布铀矿床实验室溶浸工艺试验研究[J]. 铀矿地质, 1999, 15(4): 246~253
(LIU Xiaoping, TANG Senjin, DOU Xiaoping, ZENG Wenle, DU Xingsheng. Study on experimental leaching technique of Dabu uranium deposit of MT. Taoshan in Jiangxi province [J]. Uranium Geology, 1999, 15(4): 246~253)
- 7 徐小奇. 大布铀矿床原地破碎浸出的可行性分析[J]. 华东铀矿地质, 1997, (1): 29~32
(XU Xiaoqi. Feasibility study of in-situ fragmentation leaching uranium in Dabu uranium deposit [J]. East China Uranium Geology, 1997, (1): 29~32)
- 8 林振湘. 桃山铀矿田溶浸地质条件初步探讨[J]. 华东铀矿地质, 1996, (2): 24~33
(LIN Zhenxiang. Previously study of solution leaching geological condition in Taoshan uranium ore area. East China Uranium Geology, 1996, (2): 24~33)
- 9 张鸿. 江西大布铀矿床溶浸地质条件及溶浸方法研究[J]. 铀矿地质, 2000, 16(3): 180~186
(ZHANG Hong. Study on geological conditions and method of solution leaching at Dabu uranium deposit in Jiangxi [J]. Uranium Geology, 2000, 16(3): 180~186)
- 10 叶庆森. 硬岩铀矿原地破碎浸出技术及其在我国的应用前景[J]. 国外铀金地质, 2000, 17(2): 159~164
(YE Qingsen. In-situ fragmentation leaching technology and application prospect in hard rock type uranium ore [J]. Foreign Uranium and Gold Geology, 2000, 17(2): 159~164)
- 11 吕古与. 评价可地浸硬岩铀矿床的主要依据[J]. 铀矿地质, 1997, 13(1): 25~29
(LU Guyu. Main basis for the evaluation on in-situ leaching feasibility of uranium deposits in hard rocks [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1997, 13(1): 25~29)
- 12 张得宽, 陈祥标. 矿体倾角、厚度对地下堆浸淋润率的影响[J]. 铀矿开采, 1989, (4): 13~15
(ZHANG Dekuan, CHEN Xiangbiao. Underground stope leaching ratio affected by ore body obliquity and thickness [J]. Uranium Mining, 1989, (4): 13~15)
- 13 高席丰, 傅秉一. 铀的冶金矿物学与铀加工[M], 国际原子能机构技术报告丛书第 196 号. 北京: 原子能出版社, 1986

(GAO Xifeng, FU Bingyi. Uranium metallurgical mineralogy and uranium process [M], Technological Bulletin Series No. 196 of International Agency. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 1986)
- 14 林嗣荣, 高锡珍, 郭尔华, 陆诗洁. 某高品位铀矿石淋滤浸出研究[J]. 铀矿冶, 1996, 15(1): 16~22
(LIN Sirong, GAO Xizhen, GUO Erhua, LU Shijie. Study on trickle leaching of a high-grade uranium ore [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 1996, 15(1): 16~22)

- 15 莫西涅茨. В. Н. 地浸矿山的建设与开采[M]. 铀与金编辑部, 1992
(В. Н. Мосинец. Building and mining of underground leaching mine [M]. Uranium and Gold Newsroom, 1992)
- 16 莫西涅茨. В. Н. 无废料(少废料)开采放射性矿石——地下溶浸法[J]. 刘金祥译. 铀矿开采, 1989, (4): 16~24
(В. Н. Мосинец. Mining radioactive ore without waste (few waste) ——underground solution leaching method [J]. LU Jinxiang. Uranium Mining, 1989, (4): 16~24)