

**CNIC-01589**  
**NHU-0001**

就（原）地破碎浸铀采矿法的机理研究  
**STUDIES OF THE MECHANISM FOR  
IN-PLACE LEACHING OF FRAGMENTED  
URANIUM ORE BY BLASTING**  
*(In Chinese)*

中国核情报中心  
China Nuclear Information Centre

**CNIC-01589**  
**NHU-0001**

# 就（原）地破碎浸铀采矿法的机理研究

伍衡山 王昌汉

（南华大学建筑工程与资源环境学院，衡阳，421001）

## 摘 要

在 745 矿和柏坊铜（铀）矿两个现场试验研究的基础上，以多孔介质液体动力学为基础，对就（原）地破碎浸铀采矿法的性质、最佳应用条件、浸出理论、破碎铀矿石块度的最佳级配、最低溶浸液流速、合理采场结构参数、浸出工艺、浸出方式、溶浸体表示方程、溶浸采矿的名称及其分类等方面进行了较全面深入的探讨。特别是对泥质矿石的浸出理论及强化浸出工艺作了一些创造性工作。这将对设计和生产有一定的参考意义。

**关键词：**就（原）地破碎浸出，采矿法，机理，铀矿

# **Studies on the Mechanism of In-Place Leaching of Fragmented Uranium Ore by Blasting**

*(In Chinese)*

WU Hengshan WANG Changhan  
(School of Architecture, Resources and Environment Engineering,  
Nanhua University, Hengyang, 421001)

## **ABSTRACT**

The report is based on the local test studies at No. 745 Mine and Baifang Copper (Uranium) Mine. According to hydrokinetics of porous medium, the character of mining methods of in-place leaching of fragmented uranium ore, the best application conditions, in-place leaching theory, the fittest composite of fragments of crashing uranium ore, the lowest velocity of flow in solution liquid, the reasonable parameter of stop structure, the technology of leaching, meaning, the equation of solution liquid, the name of solution mining and its classification are studied. Especially some creation in the theory of leaching in mud ore and the technology of strengthened leaching are given. It would be helpful to the design and production.

**Keywords:** In-place leaching, Mining methods, Mechanism, Uranium deposit

## 前 言

就地破碎浸铀法是堆置浸铀法、原地浸铀法之后发展起来的一种溶浸采铀法，又叫原地破碎浸铀法。该法的应用在国外始于 20 世纪 50 年代末，在国内始于 60 年代初。我国是世界使用该法最早的国家之一，当时在安徽松树山铜矿初试告捷，浸出了 1334.8 kg 铜；20 世纪 60 年代在浙江衢州铀矿进行了 3000 t 级现场试验，浸出了 1380 kg 铀，浸出率达 82.2%；90 年代初郴县铀矿在浅眼留矿法采场用井下水浸铀，浸出率超过 70%；同一时期原中南工学院与 745 矿合作，用大直径深孔切割天井和破碎矿石进行了超万吨级铀的原地浸出；核工业六所在陕西 101 矿床 30 号矿体成功地进行了 10000 吨级中深孔破碎矿石的就地浸铀工作。在国外代表性的实例有：（1）美国内华达州毕克迈铜矿，该矿有一扁豆状矿体，倾角 50°，长 200 m，厚 100 m，延深 100 m，用露天法采完以后，在坑底和边帮尚残留  $4.7 \times 10^4$  t (含铜 2%) 混合矿。对该残矿采用了就地浸出法进行回采，并首先用大直径深孔对矿石进行爆破破碎，总装药量 180 t，爆下矿岩  $6 \times 10^4$  t，平均块度 230 mm，1973 年底开始淋浸，平均流量 760~950 L/min，日回收铜 2080 kg，年生产能力 785 t，浸出率达 70%；（2）原苏联贝克铀矿，该矿有一个节理裂隙发育的大型花岗岩型铀矿体，用深孔对矿石进行破碎后就地淋浸，浸出率超过 75%；（3）法国克鲁齐剥山区勃鲁若矿，铀含量 0.02%~0.07%，用浅眼留矿法将矿石崩落，用硫酸作浸矿剂，进行间歇式淋浸，通过浸出循环，浸出液浓度达 1.14 g/L，取得了好的经济效益。

由于就地破碎浸出采矿法具有适应范围较广、经济效益明显、成本低、见效快等优点，日益受到采矿界的重视，近年发展较快，但也存在许多问题有待于探索和研究。本文将讨论就地破碎浸铀法的理论研究、应用实践问题，特别介绍了对泥质矿石的浸出理论及强化浸出工艺的创造性研究成果。

## 1 就地破碎浸铀法应用现状

### 1.1 就地破碎浸出采矿法应用中存在的优点

对坚硬矿石，国内外使用就地破碎浸出采矿法显示了如下优点<sup>[1]</sup>：

(1) 根据国外资料用本法开拓新矿床所需基建巷道工程量比传统开采法少 23%~33%，劳动力少 30%~40%，基建投资减少 1/3~1/2，缩短矿山建设和投资周期 2/5，同时大大减小了选矿和冶炼厂的规模与投资。根据美国统计资料，每吨铜生产能力的基建费用比堆浸法降低 2/3，比传统法降低更多。根据国内资料，新建一个中型矿山，传统方法需要 3~5 年，本法可在 2 年左右建成，基建投资可降低 40%左右，且易于实现边建设边产出。因此，使用就地破碎浸出采矿法能大大地节约基建费用、缩短基建时间。

(2) 降低了生产成本。据美国实际应用资料，本法生产的粗铜比传统的采-选-冶流程生产的粗铜的成本降低 30%~50%，相当于传统露天开采成本；原苏联用本法生产 1 t 铀金属成本比传统方法低 2/5~3/5。

(3) 利于保护环境。因为本法 80%左右的矿石就地留在矿房内，浸出后就地进行中和。这样减少了矿石在运输和加工过程中对环境的污染，同时也大大减少了废石的地表堆积量及其带来的污染。

(4) 扩大了资源利用范围。因为：

a. 本法生产成本较多地低于传统方法，故用本法回采时其最低可采品位要远远低于传统法所确定的最低可采品位。如美国用传统方法采铜的边界品位为 0.5%~0.8%，用本法可降低至 0.12%~0.15%，采铀由 0.05%降至 0.02%~0.03%。故原苏联地质部门作过如下估算：“用就地破碎浸矿法多回收金属的增长量，达到了国家原储量水平”。意即由于用本法降低最低可采品位而增加的金属量可能与已采过的铀金属储量相当。

b. 有利于老采区残留矿柱及残矿体的回采。当用传统方法回采这些残矿难度大、成本高时，则利用原有井巷、空区或适当增加少量工程，利用本法就可以进行回收。如原中南工学院利用本法在柏坊铜（铀）矿回收残矿就是一例。

c. 适于开采分散、孤立的小型矿点。特别用本法开采出露地表或浅矿体，短期即可见成效。

d. 为深部矿体开采创造了新的技术途径。深部矿体的开采一直是采矿界感到困惑的技术难题，若用本法采矿成本可以大幅度降低，矿石提升量大大减少，冲击地压威胁也减少。

(5) 比地表钻孔原地浸出法应用范围广。本法可以开采坚硬和渗透性差的矿体，而我国花岗岩型铀矿占的比重大，所以这种方法在我国铀矿开采有着广阔的应用前景。

(6) 本法比堆浸法成本低 1/5~2/5，且少占地表堆浸场，这对工业场地狭窄的山区矿山更有利。

## 1.2 就地破碎浸出采矿法应用中存在的问题

由于就地破碎浸出采矿法有以上一些突出优点，近十余年来发展较快，且有进一步扩大的趋势。但在我国，该法的试验研究工作还处于初级阶段，且有以下问题值得研究：

(1) 有待进一步研究矿石的矿物工艺学，包括矿石的可浸性、矿石结构、矿物的成因和分布规律等；进一步掌握本法的特点、最佳应用条件及准则，以免出现使用条件不当而导致失败。如江西某铜矿，20 世纪 90 年代初开始试验，由于对矿床的工艺矿物学缺乏研究，连续三年都遭到失败。

(2) 浸出率与矿石块度的关系。美国发展就地浸出法较早，但在近十年来几乎处于停顿状况，究其原因是难以将矿石破碎到该法所要求的块度。可见合理的块度是本法应用成功的关键，包括矿石的节理裂隙发育程度、最佳爆破方法与矿石块度的关系。

(3) 浸出基础理论研究。主要研究在地下矿块浸出情况下，留矿堆水动力学过程和化学反应特点以及两者的相互影响。

(4) 浸出条件对浸出的影响。本法与地表堆浸显著区别之一是高堆浸出，其高一般为一个阶段。实践证明，高堆浸出出现不同高度浸出率的梯度变化，浸出效果下降；浸出周期长，淋浸过程中粉矿不断集聚、矿堆可能发生板结或产生水动力学带，阻碍浸出进行。因此，研究改善矿堆浸出条件具有重要的意义。

(5) 布液方法、布液制度及注液量的研究。布液方法有渗滤浸出法、渗透浸出法和休克浸出法。渗滤法用得最广，包括喷淋法、堰塘法、钻孔注液法、预埋管网滴淋法、喷雾法等；渗滤制度有连续式和间隔式；渗透浸出法有池浸、泡浸。以上浸出方法均有其相应的应用条件，主要取决于矿石的性质及块度的级配。

(6) 防渗漏方法的研究。根据地压理论，地下矿块矿堆是一卸压区，矿块周边岩石的

裂隙水向矿块内汇集。但较大裂隙或断层渗水性过多地汇入矿块，会冲淡溶浸液浓度，影响浸出效果或降低浸出液含量，延伸到矿块下部的裂隙，将造成浸出液流失。这不但减少浸出率，而且造成地下区域性污染，因此必须研究封闭矿块和防渗漏措施。

(7) 环境保护方面。本法保护环境比传统方法好，但主要的问题是浸后矿渣处理、矿块封闭及区域性水质和环境复原等问题。

(8) 最佳的浸矿剂选择及其使用方式、浓度配比。

## 2 研究方法及结果

### 2.1 研究方法

针对就地破碎浸出采矿法当前存在的问题，采取了理论研究、室内试验和现场检验（如 745 矿、柏坊铜（铀）矿）三者相结合的研究方法。其中：在理论研究方面，我们重点从矿石的工艺矿物学、矿石浸出流体动力学、矿石的浸出原理、混合泥质矿石的淋浸机理和科学学原理等，研究和分析矿石的物理-化学性质、矿石的可浸性、溶浸液在浸出过程中流动规律、高泥矿石强化浸出的措施以及对溶浸采矿法进行分类。在室内试验方面，通过杯皿和柱、池浸试验，研究两个就地破碎浸出采矿法现场实验的矿石的最佳浸矿剂及其浓度、浸出周期、喷淋方式、合理矿石块度的级配、防渗漏的方法以及其经济效益和社会效益的预测等。现场以“国营 745 矿 504 工区焦坪 1 号矿体”和“柏坊铜

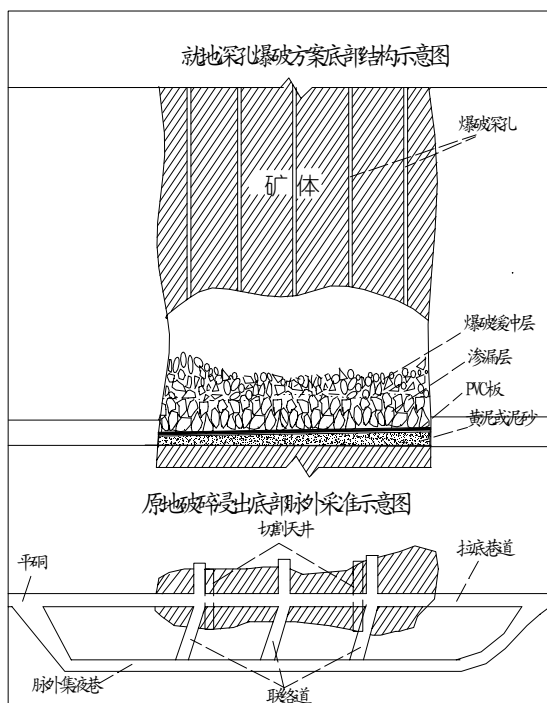


图 1 745 矿焦坪 1 号矿体铀矿回收方案示意图

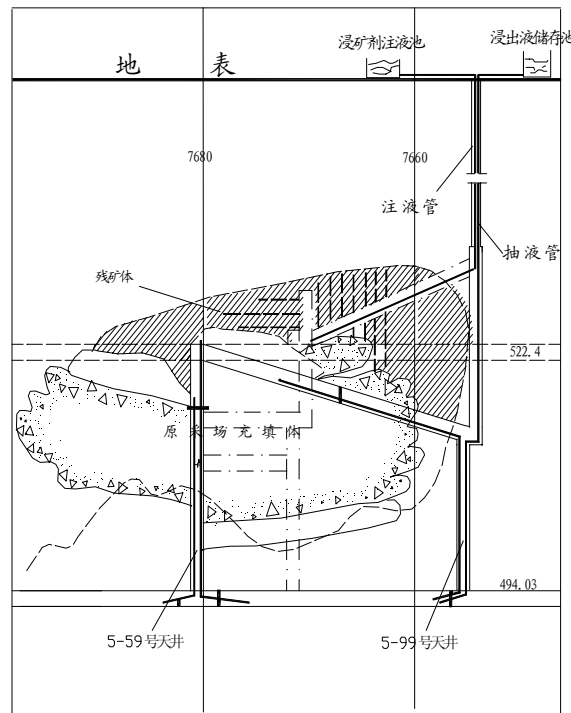


图2 柏坊铜（铀）矿 5401 残矿回收方案示意图

（铀）矿 5401 残矿”为试验点，检验“就地破碎浸出采矿法”现场适应性。经多年实践证明该法在该二矿应用是成功的，特别是柏坊铜矿已获直接经济效益愈百万元，社会效益也显著（两矿的施工方案见图 1<sup>[2]</sup>和图 2<sup>[3]</sup>）。

## 2.2 研究结果

根据理论研究、室内试验和现场检验，及近年来对就地破碎浸出采矿法探讨和研究。现将研究结果概括如下：

（1）为推广就地破碎浸铀（矿）法进行必要的宣传。由于就地破碎浸矿法在我国尚处于初试成功阶段，因此必须对他作实事求是的宣传，为此在《全国第二届溶解采矿学术会议》和《化工矿山技术》刊物上分别发表了“人类工效学与溶解采矿”与“浅谈我国铀矿开采特点”两文，前文从人类工效学的观点出发阐述了溶浸采矿是进入 21 世纪信息时代的采矿学科领域的代表；后文从铀矿山的特点论述了大力发展就地破碎浸铀法的前景。

（2）为了确保就地破碎浸铀法在推广应用过程中不致失误和取得良好的技术经济效益及社会效益，详细讨论了：①根据其不同的矿石有用组分的可浸性、矿化性质、围岩的蓄水性、矿体充水性、有用组分的存在状态、矿石中碳酸盐和盐类含量、矿体的形态和产状、围岩和矿体稳定性、开采深度等天然条件和不同的矿床的开采情况、矿床的经济地理位置等非天然条件，对就地破碎溶浸采矿法的适用条件划分为：非常有利、有利

和不利三个浸出准则；②根据就地破碎浸矿法的特点，将其归纳为五性即矿石破碎块度的重要性、堆高的超常规性、堆形不规整性、溶浸采场的封闭性和爆破破碎矿石的一次性。

(3) 为了验证工业试验前工艺矿物学研究的作用及矿石可浸性研究的必要性，以柏坊铜（钼）矿 5401 残矿为实际结合点开展了研究。首先对 5401 残矿体的工艺矿物学，包括矿体成因、产状、矿石和围岩物理力学性质、矿石结构、矿石成分、含泥量等作了较系统的研究；其次，利用多孔介质流体动力学原理对含泥超过 30% 的柏坊铜矿的矿石进行了分析，得出了满足流动液体函数微分方程的浸出动力学条件方程<sup>[4]</sup>：

$$V_x \frac{dC}{dx} + V_y \frac{dC}{dy} + V_z \frac{dC}{dz} = \frac{1}{Pe} \left( \frac{d^2C}{dx^2} + \frac{d^2C}{dy^2} + \frac{d^2C}{dz^2} \right)$$

式中： $V$ ——液体流动速度；

$C$ ——液膜两边扩散物质浓度，它的变化引起溶液中平衡条件破坏；

$x, y, z$ ——坐标方向；

$V_x, V_y, V_z$ ——分别为  $x, y, z$  轴方向的分速度；

$Pe$ ——佩克莱准数，若其值较小，则上式左边为高阶无限小，这表示浸出过程主要靠分子扩散进行，相反浸出主要由对流扩散完成，若为中值，则两种传质作用均存。矿石含泥量高时，溶液流速小， $Pe$  极小，对流扩散接近零，主要为速度极慢的分子扩散。这显示液膜厚度与溶液流速成反比关系，同样也揭示了  $Pe$  值与浸出方式的关系，即  $Pe$  大，用渗透浸出，相反用透浸出；针对该残矿含泥量高（含泥量 30%~80%）的特点，为了强化泥质矿石的浸出，采用了加疏松物浸出、负压浸出、加气浸出、分层离子浓度极差扩散浸出、渗透（泡浸）浸出和休克浸出等综合浸出方式，试验效果是明显的；在工艺矿物学、泥矿浸出机理及矿石可浸性研究的基础上，提出了残矿回采方案，其内容包括中深孔爆破筑堆工艺、浸出方法的选择（渗透浸出〈泡浸〉和休克浸出）、淋浸及集液系统、防止环境污染措施等。通过试验均达到了预期效果。

(4) 为了研究就地破碎浸矿法筑堆方式、爆破方案及参数与块度和浸出率的关系、采场结构及防渗漏诸问题。以 745 矿 504 工区蕉坪 1 号矿体为研究结合点，在该矿三年的现场试验中，着重研究了以下几个问题。

a. 在矿体厚度不大（4~6 m），夹制性较大的条件下，研究了深孔大爆破方案、补偿空间的形成、挤压崩矿、降低自由面附近大块率及深孔拉槽等问题。实践证明：本次爆破达到了预期效果，满足了该矿体浸出块度的要求，这是我国第一次用大直径（100 mm）深孔爆破超万吨级筑堆的就地破碎浸矿法；

b. 考虑到蕉坪 1 号矿体的上下各赋存一条厚 0.2~1 m 的透水性较好的破碎夹泥层，并穿插矿体，选择了脉外防渗漏的底部结构。为了防止大爆破冲击波对底部的影响，采用了相应的技术措施；为了防止渗漏，底层采用了黄泥加 PVC 板等构造。爆破后，防渗漏层保持完好，达到了防渗漏的目的；

c. 分析和研究了矿石破碎块度及钼浸出率的关系、矿石块度与溶浸液流速的关系、矿石块度与液膜厚度的关系等，并得出就地破碎浸矿法不要求细碎全部参浸矿石，但同样能达到较好的浸出效果的结论。



d. 结合就地破碎浸矿法的浸出条件，得出了溶液淋浸过程中溶浸体的解析方程：

$$x^2 = -2py$$

两淋浸点的最佳间距为：

$$a = (hx/y)^{1/2}$$

式中： $x, y$ ——分别为溶浸体的水平轴和流轴（详见图 3）；

$p$ ——溶浸抛物体的焦准距，它决定溶浸抛物体外轮廓形状和位置；

$h$ ——溶浸抛物面宽为  $2a$  时的拱高。

同时还提出了保证松散矿石堆淋浸区均匀流速的工程措施等。

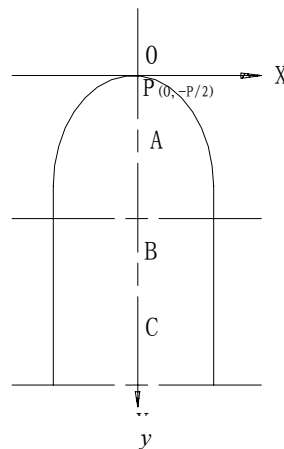


图 3 点淋浸时溶浸体形状

e. 溶浸采矿是将传统的采、选、冶融于一体的一种新型采矿法，他的发展历史相对于传统方法是短暂的。因此，国内外对他的名称、分类、定义等比较混乱，这不但妨碍学术交流，也不利于方案对比和人才培养，也使读者莫衷一是。为此，根据近年从事现场试验和理论研究的体会，提出了将溶浸采矿法分为：原地浸出（矿）法、就地破碎浸出（矿）法、联合浸出（矿）法和堆置浸出（简称堆浸）法等四大类。

## 参 考 文 献

- 1 王昌汉[编著]. 溶浸采铀（矿）. 北京: 原子能出版社, 1998
- 2 DING Dexin, et al. The Design and Construction of the Bottom Working for In-Situ Leaching of Fragmented Uranium Ore by Blasting in No. 745 Mine. China Nuclear Science and Technology Report, CNIC-01293, HYIT-0009, Nov.1998
- 3 伍衡山, 李蒲姣. 溶浸采矿法回收柏坊铜矿 5401 残矿可行性研究. 中国矿业, 2000, 4: 38~41
- 4 王昌汉. 论溶浸液在松散矿石堆渗滤浸出中流动速度的意义. 中南工学院学报, 1997, 2: 50~55



伍衡山：南华大学建筑工程与资源环境学院副院长，副教授。1987年毕业于原中南工业大学采矿工程专业。

WU Hengshan: Associate Professor and Associate dean of the School of Achitecture, Resources and Environmental Engineering, Nahua University. Graduated from the former Central South University of Technology in 1987.