

DOI: 10.3969/j.issn.1672-0636.2010.01.009

## 中南地区碎裂蚀变花岗岩型铀矿溶浸试验

周青生<sup>1</sup>, 李建红<sup>2</sup>, 罗毅<sup>2</sup>, 王明太<sup>2</sup>, 孙志富<sup>2</sup>, 林利<sup>1</sup>

(1. 核工业 230 研究所, 湖南 长沙 410011; 2. 核工业北京地质研究院, 北京 100029)

**[摘要]** 简要叙述了溶浸采矿的重要意义, 并主要以 GX 铀矿样为例进行碎裂蚀变花岗岩型铀矿溶浸试验。介绍了中南地区碎裂蚀变花岗岩型铀矿样的矿物组成及性质、铀含量、化学组分、原矿筛析、柱浸和富集过程, 以及溶浸采矿的直接成本核算方法与核算结果。该试验结果为本区溶浸采矿的半工业试验提供了基础数据。

**[关键词]** 碎裂蚀变; 花岗岩型铀矿; 溶浸; 富集; 直接成本;

**[中图分类号]** TF803.2; P619.14 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-0636(2010)01-0047-08

### Solvent leaching test on cataclastic altered granite type uranium ores from central south China

ZHOU Qing-sheng<sup>1</sup>, LI Jian-hong<sup>2</sup>, LUO Yi<sup>2</sup>, WANG Ming-tai<sup>2</sup>,  
SUN Zhi-fu<sup>2</sup>, LIN li<sup>1</sup>

(1. Research Institute No. 230, CNNC, Changsha, Hunan 410011, China;

2. Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The paper briefly describes important significance for solvent leaching mining; and solvent leaching test on cataclastic altered granite type uranium ore is conducted with ore samples from GX uranium deposit, and made an introduction on constituents, properties of the minerals, uranium content, chemical components of ore sample, the process of analysis, screening, column leaching and concentration of raw ores, and finally discusses the method and result of the direct cost calculation of solvent leaching mining. The tested results lay a foundation for the pilot industry test of solvent uranium leaching in central south China.

**Key words:** cataclastic alteration; granite type uranium deposit; solvent leaching; concentration; direct cost

#### 1 核事业发展对铀资源的迫切需求

随着现代工业化和城镇化的迅猛发展, 我国对能源(尤其是清洁能源)的需求不断加大。核能以其拥有独特的优点而备受青睐。

为了适应新世纪我国经济可持续发展对核能建设的战略需求, 寻找更多经济可采的铀资源和充分而合理地利用已探明的低品位铀矿是摆在广大科技人员面前义不容辞的责任。多年来, 溶浸采矿技术已广泛应用于产铀大

**[收稿日期]** 2009-12-05

**[作者简介]** 周青生(1951—), 男, 安徽舒城人, 高级工程师, 主要从事岩矿分析和水冶工艺研究。

E-mail: 340116751@qq.com

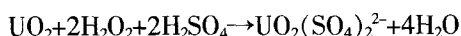
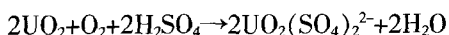
国的铀矿工业生产。国内也逐步得到有关部门重视并进行了大量研究和生产试验,取得了可观的经济效益。针对中南地区已探明、并用常规采矿技术评价为不经济的低品位碎裂蚀变花岗岩型铀矿,按溶浸采矿法来重新研究评价,可以提高我国铀资源的利用率。笔者对我国南方湘南地区 GX 铀矿床、NWL 铀矿床和桂北地区 SZJ 铀矿床、HQ 铀矿床进行了室内扩大柱(溶)浸试验<sup>[1-2]</sup>。试验结果表明:该类型矿样化学成分简单,浸出率较高,其浸出液经离子交换富集分离后沉淀得出的重铀酸盐(“111”)产品质量符合部颁一级品标准。所得技术经济指标对开发同类型铀矿床具有一定的参考价值。

## 2 溶浸技术流程

### 2.1 溶浸采矿法的基本原理、条件及试验样品的采集

#### 2.1.1 溶浸采矿法的基本条件、原理

溶浸采矿又称化学采矿,它综合矿山地质、采矿、选冶等科学技术和工艺手段,在矿石埋藏原地或附近使用某种化学溶剂从矿体或矿石堆中溶解有用组分,并从浸出液中提取金属产品<sup>[3]</sup>。适宜溶浸采矿法的矿床应具备3个基本条件:(1)矿体或矿石堆具备溶液渗透、运移并走向封闭汇集的流体运动条件;(2)矿石结构、构造和矿物化学组分应选择适合某种化学溶剂充分,且有选择并能经济地溶解出有用组分;(3)可以选用溶剂萃取、离子交换、碱液沉淀和电解还原、渗析等方法从浸出液中经济地提取金属。以稀硫酸浸出碎裂蚀变花岗岩型铀矿石为例:铀矿石中的金属铀大部分以六价铀酰酸盐形式存在于矿物表面或裂隙中,在稀硫酸作用下较容易以硫酸铀酰离子形式进入溶液,而四价铀矿物的矿石在较长时间置于有氧环境下,当接触到稀硫酸时也较容易以铀酰离子形式进入溶液。只有部分裂隙深部的铀矿物需要借助加入氧化剂(如  $H_2O_2$ )促进其反应。基本反应式如下:



#### 2.1.2 试验样品的采集

本试验的4个矿样(样号分别为 GX、NWL、SZJ、HQ)分别采自与样号名相对应的上述4个矿床的坑道中,各矿样重量:GX, 2 400 kg; NWL, 2 857 kg; SZJ, 2 700 kg; HQ, 500 kg。

### 2.2 矿石的物质组成及性质

GX 铀矿床属单铀型矿床,矿石主要类型为铀-黄铁矿类型。铀的存在形式主要以显微沥青铀矿存在,少量呈吸附状态,并常见超显微沥青铀矿。矿石构造类型为变余花岗岩结构,沥青铀矿则成胶状结构。矿石构造类型为浸染状,即沥青铀矿(包括超显微沥青铀矿)及吸附铀浸染于变余碎裂花岗岩中。显微沥青铀矿呈微粒状、微团块状、微短脉状嵌布于黄铁矿及绿泥石周围和附近。吸附铀呈浸染状稀疏或零星分布于石英、钾长石、斜长石和绿泥石裂隙中,局部较密集。超显微沥青铀矿常见与吸附铀在一起。黄铁矿主要为团块状和聚集团块状及短脉状,少量粒状和微粒状。聚集团块状黄铁矿常与粒状黄铁矿密集相聚;而团块状黄铁矿往往与粒状黄铁矿难以分开,其形态极不规则,常与绿泥石伴生或共生。短脉状黄铁矿常分布在绿泥石解理中。微脉状黄铁矿常分布在长石、石英的微裂隙中或其边部,褐铁矿一般为黄铁矿氧化而成。绿泥石呈包体,个别呈微脉状分布在造岩矿物间或在粗晶钾长石、粗晶斜长石中。

NWL 铀矿床矿化类型以铀-黏土型为主,其次为铀-玉髓-硫化物。铀的存在形式:矿石中85%的铀呈沥青铀矿形式存在,15%呈吸附状态存在于黏土矿物、微裂隙风化的黑云母中。沥青铀矿约有2/3呈显微浸染状(<0.1 mm)嵌布于黄铁矿、萤石、绿泥石及碎裂长石、石英中。其余是以细脉状、微脉状充填矿石裂隙中。呈类质同像形式存在的铀甚少,主要分布在花岗岩副矿物锆石、磷灰石和独居石中。

SZJ 铀矿床矿化类型属花岗岩型硅质脉亚型。按沥青铀矿在矿石中的赋存状态可分为3种:(1)显微、超显微脉状浸染状矿石,铀浸染于碎裂花岗岩中,沥青铀矿与赤铁矿共生为主要矿石类型;(2)角砾状(细脉状)矿石,

分布不广, 为非主要矿石类型; (3)脉状矿石, 沥青铀矿呈单脉穿插于前述矿石中。矿石主要呈细脉状、微脉状和块状、角砾状。以碎裂结构为主, 其次为镶嵌和块状结构。

HQ 铀矿床矿石矿物成分除花岗岩造岩矿物外, 主要有玉髓、赤铁矿、黄铁矿、萤石、绢云母、绿泥石、高岭土, 少量方解石、褐铁矿等。铀矿物以沥青铀矿及铀的次生矿物(如硅钙铀矿等)形式存在。矿石类型有 3 种: (1)浸染状矿石, 铀呈微粒、细脉浸染状存在于矿石中; (2)脉状矿石, 沥青铀矿呈细脉状产出; (3)角砾状矿石, 沥青铀矿以胶结物形式胶结岩石角砾。矿石为碎裂结构, 块状与角粒状构造。

2.3 物料准备与试验方法

2.3.1 主要试剂

硫酸: GB 534-2002《工业硫酸》, 质量分数为 92.5%;

过氧化氢: GB 1616-2003《工业过氧化氢》, 质量分数为 27.5%;

强碱性阴离子交换树脂: 201×7 型号;

工业盐(氯化钠): GB 5462-2003《工业盐》, 优级, 质量分数为 95.5%;

氨水: 工业用, NH<sub>3</sub> 质量分数为 20%。

2.3.2 试验规模

在柱浸时用不同规格的溶浸柱进行不同规模的试验。其规格分别为小柱内径 0.14 m, 高 1.50 m, 高/内比 10, 装样 30 kg; 中小柱内径 0.35 m, 高 2.00 m, 高/内比 6, 装样 70 kg; 中柱内径 0.43 m, 高 3.00 m, 高/内比 7, 装样 600 kg; 大柱内径 0.64 m, 高 3.00 m,

高/内比 5, 装样 1 200~1 400 kg。

2.3.3 溶浸试验方法

首先在溶浸柱的滤板上面填一层砾石, 再用过滤料覆盖其上, 以避免矿料穿透。矿石从柱底至顶装填, 矿层上部留有空间装入小砾石, 小砾石上铺层玻璃丝, 然后用水湿润矿层, 使矿样达到适宜的湿度, 以便溶浸液能以规定流速均匀地进入柱中矿层。试验期间定时测量浸出液体积, 分析浸出液中铀浓度、Eh、pH 及余酸。

2.4 矿石的铀品位、化学全分析及筛分分析结果

为了解矿床矿样的铀品位、物质组成及各粒级矿石中铀的分布特点, 将上述 4 个矿床的矿样均按切乔特公式  $Q=Kd^2$  ( $Q$ 、 $d$  分别为矿石试样的最少取样质量、最大颗粒直径;  $K$  为矿石特性参数)进行破碎缩分, 得出了各自的铀品位和化学全分析样、筛分分析样及柱浸试验用样。

2.4.1 铀品位及化学全分析结果

表 1 列出了上述 4 个矿样的铀品位及化学全分析结果。由表 1 可见, 矿样物质成分简单, 没有可综合利用的元素, 也无 Mo、V 等对下一步分离富集的有害元素。仅 SZJ 矿样铀品位较高, 而 HQ 矿样铀品位过低, 对浸出试验有不利影响。以下仅以 GX 铀矿样为例叙述溶浸试验过程(注: 为简明起见, 下文叙述中省去了 GX 矿床矿样条件试验数据)。

2.4.2 矿样的筛分分析结果

GX 矿样筛分分析结果(表 2)表明, 矿样中细粒矿石铀质量分数偏高, 导致产生这种

表 1 4 个矿样的铀品位及化学全分析结果

Table 1 Uranium grade and chemical analysis results of 4 uranium ore samples

矿样号	w <sub>B</sub> /%							
	U 品位	H <sub>2</sub> O	烧失量	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
GX	0.068	1.96	3.95	67.89	0.858	1.70	12.95	0.194
NWL	0.05	0.568	1.35	73.81	0.876	1.36	12.40	0.300
SZJ	0.329	0.617	2.55	75.38	1.387	0.489	12.57	0.173
HQ	0.033	0.614	1.40	75.97	0.732	0.547	12.42	0.161

矿样号	w <sub>B</sub> /%								总量
	MnO <sub>2</sub>	CaO	MgO	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	
GX	0.089	2.80	1.23	0.063	0.162	5.13	0.194	—	99.17
NWL	0.048	0.622	0.775	0.034	0.115	4.72	2.60	—	99.58
SZJ	0.043	0.560	0.184	—	0.205	4.22	0.83	0.062	99.60
HQ	0.031	0.430	0.375	—	0.137	4.66	1.97	0.062	99.54

表 2 GX 铀矿床原矿样(1 200 kg、-160 mm 粒度)筛分分析结果

Table 2 Screening result and uranium content of raw ore samples(1 200 kg、-160 mm grain size) from GX uranium deposit					
粒度 $D / \text{mm}$	质量 $m / \text{kg}$	产率 / %	$w_U / \%$	铀金属量 / g	铀分布率 / %
-160+100	609.93	50.83	0.071	433.05	50.68
-100+80	107.73	8.98	0.066	71.10	8.32
-80+50	171.02	14.25	0.075	128.27	15.01
-50+25	140.60	11.72	0.065	91.39	10.70
-25+10	67.59	5.63	0.056	36.73	4.30
-10+5	39.02	3.25	0.055	21.46	2.51
-5	64.11	5.34	0.113	72.44	8.48
合计	1 200.00	100.00		854.44	100.00
计算原矿品位 / %			0.071		

现象的原因是硬岩型铀矿在成矿过程中，铀沿裂隙沉淀富集。而细粒级矿石是由于破碎加工中分布在裂隙中的铀矿物会部分脱落导致铀质量分数高，这类碎屑表面积大，有利于铀的浸出。

2.5 溶浸试验及尾渣筛分分析结果

2.5.1 各矿样的搅拌浸出、小柱条件试验方法及目的

在矿样大柱柱浸试验之前做了系列条件试验(如搅拌浸出试验、小柱条件试验)，简述如下：搅拌浸出试验样品粒度-5 mm，用量 100 g，在烧杯中进行，试验目的是为了了解硫酸和氧化剂的消耗情况；在前述试验基础上再用小柱作喷淋强度、分级酸浓度、降低

酸耗量试验，样品粒度-10 mm，用量 30 kg，试验目的仍是为了了解硫酸和氧化剂的消耗情况、喷淋速度及周期、利用交换尾液余酸后的耗酸情况。总结选择出最优参数再进行大粒度规模的柱浸试验。

2.5.2 大柱溶浸试验

大柱溶浸试验是在系列小柱条件试验的基础上进行的。因大柱浸出矿量多，要使试验能按设计的参数正常运转，必须经常根据浸出液的余酸、电位和铀含量变化情况调整溶浸液的硫酸浓度、氧化剂浓度和液体加入量。大柱浸出采用间断不循环的方法进行。

2.5.3 GX 矿床大粒度矿样柱浸试验

GX 铀矿床矿样(1 200 kg、-160 mm 粒度)

表 3 GX 铀矿床矿样(1 200 kg、-160 mm 粒度)柱浸试验结果

Table 3 Column leaching test result of raw ore samples(1 200 kg、-160 mm grain size)from GX uranium deposit

淋浸时间 <i>t</i> /d	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 用量		H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 用量		余酸 <i>ρ</i> /(g·L <sup>-1</sup> )	不循环淋浸液			浸出率 /%	累计浸出率 /%
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	耗量	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	耗量		pH	电位 <i>V</i> /mV	U <i>ρ</i> /(g·L <sup>-1</sup> )		
	<i>ρ</i> /(g·L <sup>-1</sup> )	/%	<i>ρ</i> /(g·L <sup>-1</sup> )	/%						
5	15	0.375			9.27	1.18	355	0.418	15.209	
10	10	0.625			6.32	1.30	374	0.161	7.382	22.591
15	10	0.875			6.35	1.25	382	0.185	3.773	36.364
20	10	1.000	0.605	0.008	3.79	1.54	420	0.169	3.872	30.236
25	10	1.125	0.605	0.016	4.01	1.49	439	0.227	4.177	34.413
30	10	1.250	0.605	0.024	3.79	1.50	452	0.196	3.667	38.080
35	10	1.375	0.605	0.032	4.64	1.41	449	0.118	3.326	41.406
40	10	1.500	0.605	0.040	4.00	1.50	445	0.145	2.759	44.165
45	10	1.625			5.06	1.35	452	0.102	2.332	46.497
50	10	1.750	0.605	0.048	3.61	1.51	458	0.237	3.080	49.577
55	10	1.875	0.605	0.056	6.31	1.28	485	0.076	2.223	51.800
60	10	2.000	0.605	0.064	5.77	1.33	512	0.083	1.726	53.526
65	10	2.125			5.59	1.25	431	0.083	1.591	55.117
70	10	2.250			6.14	1.28	433	0.063	1.506	56.623
75	5	2.312 5			4.33	1.38	469	0.084	1.802	58.425
80	5	2.375			3.79	1.32	492	0.058	1.479	59.904
85	5	2.437 5			2.71	1.35	502	0.047	1.046	60.950
90	水洗				0.18	2.27	549	0.025	0.480	61.430
合计		2.44		0.064					61.430	

柱浸试验结果(表 3)表明: GX 铀矿床矿样(-160 mm)铀浸出率仅为 61.67%, 浸出率较低的原因是大粒级矿石裂隙深部的铀矿物在短时间内难以浸出。由 GX 矿样柱浸时的浸出时间与铀浓度、铀浸出率变化曲线(图 1)可见, GX 矿样柱浸时铀浓度在短时间内变化达

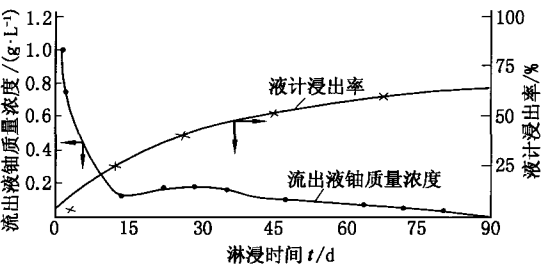


图 1 GX 铀矿床矿样(-160 mm)柱浸时间与铀质量浓度及浸出率的变化关系(两箭头相交点为曲线拐点)  
Fig. 1 Uranium content and leaching rate changing with column leaching time of raw ore samples (-160 mm)from GX uranium deposit

到最高值, 铀浸出率的曲线随铀浓度的变化到淋浸后期呈缓慢上升状态。说明该矿耗酸矿物少, 溶浸液到达各粒级矿石表面时细粒级矿样中的铀顺利溶解。随着淋浸时间的延长, 溶浸液向较大矿块内部的裂隙延伸, 浸出过程逐渐为扩散因素控制。当加入适量的氧化剂时铀浓度有所提高但作用有限。

表 4 为 GX 铀矿床矿样(1 200 kg、-160 mm)浸出尾渣筛分分析结果。可见, 矿样中-160+50 mm 粒度矿石铀浸出率较低, 而该粒级范围的矿石量占总重量的 74%, 未浸出的铀占渣中总铀量的 95%。-50 mm 以下粒度的矿石铀浸出率较高, 但其在总矿石中占有量不多, 这说明 GX 矿床大粒级矿样用于铀的溶浸其浸出率低, 不够理想。

GX 矿床两种大粒度矿石柱浸试验结果(表 5)说明, 与-100 mm 矿样浸出比较, 被溶浸的矿石粒度越细, 浸出率越高。

表 4 GX 铀矿床矿样(1 200 kg、-160 mm)浸出尾渣筛分分析结果  
Table 4 Screening result and uranium content of tailings of raw ore samples (1 200 kg、-160 mm grain size) from GX uranium deposit

粒度 D/mm	质量 m/kg	产率/%	渣含铀/%	铀金属量/g	铀分布率/%	浸出率/%
-160+100	593.16	50.83	0.038 0	225.40	72.05	46.49
-100+80	104.77	8.98	0.034 0	35.62	11.39	62.95
-80+50	166.31	14.25	0.022 0	36.59	11.67	70.68
-50+25	136.74	11.72	0.004 5	6.20	1.98	93.02
-25+10	65.73	5.63	0.007 1	4.67	1.49	87.31
-10+5	37.94	3.25	0.003 0	1.14	0.36	94.54
-5	62.34	5.34	0.005 2	3.24	1.04	95.40
合计	1 167.00	100.00		312.86	99.98	
渣计浸出率	渣重 1 167.00 kg		渣中含铀 0.026 8%		铀浸出率 61.67%	

表 5 GX 铀矿床两种大粒度矿石柱浸试验结果  
Table 5 Column leaching test result of 2 kinds of large grain size ores from GX uranium deposit

矿石粒度 D/mm	原矿铀质量分数 $w_U$ /%	矿石质量 m/kg	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 浓度 $\rho/(g \cdot L^{-1})$	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 浓度 $\rho/(g \cdot L^{-1})$	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 耗量 /%	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 耗量 /%	喷淋强度 $/(L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	浸出周期 T/d
-100	0.068	600	25、10、5、3	0.605(8 次)	2.875	0.064	9	93
-160	0.068	1 200	15、10、5	0.605(8 次)	2.44	0.064	9	90
备注			先高后低	中途加入				
最高铀质量浓度 $\rho/(g \cdot L^{-1})$	平均铀质量浓度 $\rho/(g \cdot L^{-1})$	平均氧化 还原电位	平均 pH 值	总液固比 $/(g \cdot g^{-1})$	尾渣质量 $/m \cdot kg^{-1}$	渣中铀质量分数 /%	渣计浸出率 /%	液计浸出率 /%
1.660	0.186	437	1.49	2.575	593.90	0.022 0	67.98	70.62
0.531	0.159	450	1.42	2.625	1 167.00	0.026 8	61.67	61.43

3 离子交换及沉淀试验

3.1 吸附原液组分

4 个矿样浸出液组分简单, 不含对树脂吸附分离有害的组分。NWL 矿样由于绿泥石等层状硅酸盐溶浸时易分解造成 Fe、Al 含量较高, 但还不至于影响用交换法吸附分离。SZJ 矿样溶液铀含量偏高(截取部分峰值高的含铀溶液采用萃取法分离, 此处省略), 仅以贫液进行交换分离。

3.2 吸附试验

本试验采用 201×7 型强碱性阴离子交换树脂从浸出液中富集分离铀<sup>[3]</sup>。所用的离子交换柱内径 37 mm, 树脂床高度为 684 mm, 湿树脂装入量为 735 mL(实际干树脂量为 313 g), 吸附原液铀质量浓度达 525.5 mg·L<sup>-1</sup>, 吸附速度为 0.9 m·h<sup>-1</sup>, 温度为室温。铀的离子交换吸附曲线(图 2)表明, 树脂对铀的吸附能力强,

铀饱和和容量高, 由该曲线计算出穿透点、铀饱和和容量等数据为: 穿透点( $V_{\text{穿}}/V_0$ )=105; 饱和点( $V_{\text{饱}}/V_0$ )=135( $V_0$  为湿树脂体积);  $V_{\text{穿}}/V_{\text{饱}}$ =0.78。

树脂达饱和容量时, 铀金属与干树脂的比值为 166; 铀金属与湿树脂体积的比值为 70.68。铀的吸附率达 99.63%。

3.3 淋洗试验

将铀饱和树脂用 1 mol·L<sup>-1</sup> NaCl+0.05 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液在室温条件下淋洗, 淋洗流速 0.7 m·h<sup>-1</sup>。淋洗曲线(图 3)表明, 此淋洗剂淋洗效果好, 所得产品液峰值体积小(注: 淋洗贫液留作下次使用)。

铀的淋洗结果和试剂消耗量列于表 6。由表 6 可见, 采用 1 mol·L<sup>-1</sup> NaCl+0.05 mol·L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 作淋洗剂, 可得到铀质量浓度>6.0 g·L<sup>-1</sup> 的合格液。合格液体积占淋洗液总体积的 58.3%, 铀解吸率达 97.89%。

3.4 沉淀试验

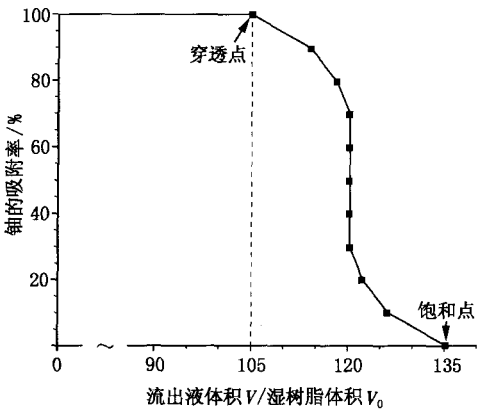


图 2 铀的离子交换吸附曲线

Fig. 2 Curve showing absorbed uranium by ion exchange

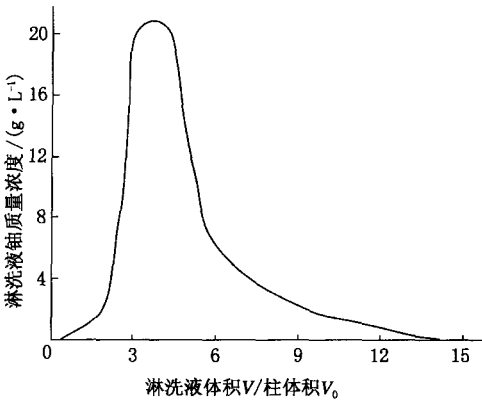


图 3 铀的淋洗曲线

Fig. 3 Curve showing uranium leaching

表 6 铀的淋洗结果与试剂消耗量  
Table 6 Uranium leaching results and reagent consumption

淋洗液体积比 $I/(V \cdot V_0^{-1})$	合格液体积比 $I/(V \cdot V_0^{-1})$	合格液铀质量浓度 $I/(g \cdot L^{-1})$	最高铀质量浓度 $I/(g \cdot L^{-1})$	铀解吸率 /%
16.32	9.52	6.4	20.43	97.89
淋洗剂组成	合格液体积/淋洗液体积 /%	生产 1 kg 铀所耗试剂		
		试剂名称	淋洗剂耗量/(g·L <sup>-1</sup> )	铀耗量/(kg·kg <sup>-1</sup> )
		NaCl	58.5	9.14
1 mol·L <sup>-1</sup> NaCl+0.05 mol·L <sup>-1</sup> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	58.3	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.9	0.77

表 7 沉淀结果与氨水消耗量

Table 7 Deposition results and ammonia consumption

沉淀剂名称	铀沉淀率/%	母液铀质量浓度 $\rho/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	合格液耗量/ $(\text{mL}\cdot\text{L}^{-1})$	铀耗量/ $(\text{L}\cdot\text{kg}^{-1})$
氨水	99.97	1.7	20	3.125

合格液铀质量浓度  $6.4\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 余酸 ( $\text{SO}_4^{2-}$ )  $0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 为 1.4。

沉淀条件: 沉淀剂为氨水(含量 20%), 沉淀温度  $60^\circ\text{C}$ 。

沉淀时在缓慢搅动下滴加氨水至 pH 为 7.5 左右, 静置 2 h 后吸取上层清液, 以大于合格液 10 倍体积的清水分多次洗涤, 直至氯离子含量 $\leq$ 自来水中的氯离子(用  $\text{AgNO}_3$  检测)。然后过滤并烘干称重, 测定各组分。沉淀结果与试剂消耗量(表 7)说明, 沉淀效果好, 母液含铀低, 所耗试剂少。

沉淀产品重铀酸铵组分测定结果列于表 8。结果表明, 采用上述沉淀条件, 铀沉淀率达 99.97%, 母液中铀质量浓度低于  $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 所得重铀酸铵产品符合部颁一级品标准。

4 4 个矿样柱浸技术指标及每吨金属铀原材料消耗

由 4 个矿样铀的柱浸技术指标(表 9)可见, GX 和 SZJ 矿样耗酸虽低, 但尾渣含铀较高; HQ 矿样耗酸和尾渣含铀都低, 但浸出率较低; 只有 NWL 矿样虽然耗酸较高, 但其浸出率、回收率都较高, 尾渣含铀低, 浸出周期也短, 是 4 个矿样中较理想的。

由于受取样条件限制, 本试验矿样铀品位(SZJ 为 0.329%、HQ 为 0.033%)与矿床平均铀品位(分别为 0.231%、0.082%)相差较大。SZJ 矿床取样品位偏富, HQ 矿床取样品位偏贫, 实际试验是根据矿样品位进行的。若仍然按照试验所得数据计算势必给经济评价带

表 8 重铀酸铵组分

Table 8 Constituent of ammonia diuranate

组 分	$w_B/\%$						
	U	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{SiO}_2$	$\text{PO}_4^{3-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{F}^-$	$\text{H}_2\text{O}$
部颁一级品标准	$\geq 50$	$\leq 20$	$\leq 2$	$\leq 5$	$\leq 0.3$	$\leq 0.2$	$< 30$
GX	59.12	1.33	1.231	4.29	0.149	0.017	27.70
NWL	57.88	5.81	0.556	1.97	0.014	0.027	26.80
SZJ	65.44	3.79	0.78	2.46	0.078	0.019	21.56
HQ	80.00	0.50	0.064	0.32	$< 0.05$	0.04	10.52

表 9 4 个矿样铀的柱浸技术指标

Table 9 Technical index of column leaching for 4 ore samples

矿样	矿样品位	柱浸粒度	溶浸液酸浓度	溶浸液流速	矿石酸容量	硫酸耗量	$\text{H}_2\text{O}_2$ 耗量
	$/\%$	$D/\text{mm}$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$L/(\text{m}^2\cdot\text{h})$	$/\%$	$/\%$	$/\%$
GX	0.068	-160	20、10、5	9	1.18	2.66	0.064
NWL	0.05	-200	30、10、5、3	12、27	2.20	4.95	-
SZJ	0.329	-200	30、10、5、2.5	6	0.6~0.7	1.46	-
HQ	0.033	-50	40、20、10	6	0.8	1.054	-

矿样	浸出液固比	尾渣铀质量分数	铀浸出率	回收率	峰值铀质量浓度	平均铀质量浓度	浸出周期
	$l/(\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	$/\%$	$/\%$	$/\%$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$T/\text{d}$
GX	2.60	0.027	61.43	61.97	0.42	0.16	90
NWL	2.58	0.006 6	89.89	87.10	0.54	0.19	50
SZJ	1.31:1	0.02~0.038	89.86	89.00	6~8	1.7~2.7	64~90
HQ	0.8:1	0.007	77.7	76.44	0.84	0.33	63

表 10 4 个矿样每吨金属铀原材料消耗

Table 10 Material consumption producing 1 ton of metal uranium, calculating on basis of 4 ore samples

矿床名称	矿石品位/%	渣计浸出率/%	液计浸出率/%	矿石量/t	双氧水/t	工业硫酸/t	工业盐/t	氨水/t
GX	0.068	61.67	61.43	2 394	1.53	58.41	9.14	3.44
NWL	0.05	87.18	93.87	2 305	—	114.10	9.14	3.44
SZJ 矿样	0.329	89.86	89.00	342	—	10.22	1.16	2.81
	平均	0.231	89.86	89.00	486	—	13.33	1.16
HQ 矿样	0.033	77.70	76.44	3 964	—	48.01	1.16	2.81
	平均	0.082	87.80	86.40	1 411	—	21.10	1.16

来更大误差，因此，工艺技术指标应根据经验予以修正。在表 10 中也列出了经修正的 SZJ 和 HQ 矿床铀平均品位每吨金属铀的原材料消耗。由表 10 可见，对于较低品位较大块度碎裂蚀变花岗岩铀矿石采用溶浸技术处理不但能达到较理想的浸出率，而且所耗原材料直接成本较低。

每吨铀成本则会下降。关于该溶浸技术的经济可行性，笔者认为，它应是一个牵涉很多方面的动态评估问题。因此，价格参考标准相差甚远，影响因素繁杂，限于篇幅，在此不予评述。

[参考文献]

5 结果与讨论

中南地区碎裂蚀变花岗岩型铀矿石溶浸试验表明：虽然模拟的是原地爆破浸出(低品位而且含大块度)，浸出率也不太高，但仍达到了实验目的，即在技术上为半工业试验提供了基础数据。若采用异地筑堆堆浸，降低铀矿石粒度，铀的浸出率毋庸置疑会上升，

[1]李建红, 罗毅, 王明太, 等. 鹿井碎裂蚀变花岗岩型铀矿床溶浸评价研究[J]. 铀矿地质, 2001, 17 (3): 171-173.

[2]李建红, 周青生, 李德平. 资源铀矿田溶浸采冶法的地质技术及经济评价[C]//当代矿山地质地球物理新进展. 长沙: 中南大学出版社, 2004: 197-199.

[3]李尚远, 陈明阳, 李从奎. 铀、金、铜矿石堆浸原理与实践[M]. 北京: 原子能出版社, 1996: 146-184.

(上接第 5 页, Continued from page 5)

[参考文献]

[1] 程裕淇. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 379-384.

[2] 李子颖, 李秀珍, 林锦荣. 试论华南中新世地幔柱构造、铀成矿作用及其找矿方向[J]. 铀矿地质, 1999, 15(1): 9-17.

[3] 方锡珩. 中国火山岩型铀矿的主要地质特征[J]. 铀矿地质, 2009, 25(2): 98-104.

[4] 章邦桐. 内生铀矿床及其研究方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1990: 349-378.

[5] 覃慕陶, 刘师先. 南岭花岗岩型和火山岩型铀矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 67-116.

[6] 邵飞, 徐恒力, 邹茂卿. 相山铀矿田火山岩浆期后成矿热液系统[J]. 铀矿地质, 2009, 25(3): 137-143.

[7] 张展适, 华仁民, 巫建华, 等. 下庄铀矿田 337 矿床成矿机理及动力学背景[J]. 铀矿地质, 2009, 25

(1): 1-6.

[8] 黄志章, 李秀珍, 蔡根庆. 热液铀矿床蚀变场及蚀变类型[M]. 北京: 原子能出版社, 1999: 74-169.

[9] 邵飞, 陈晓明, 徐恒力, 等. 相山铀矿田成矿物质来源探讨[J]. 东华理工大学学报, 2008, 31 (1): 39-44.

[10] 邵飞, 陈晓明, 徐恒力, 等. 江西省相山铀矿田成矿模式探讨[J]. 地质力学学报, 2008, 14 (1): 65-73.

[11] 李学礼, 孙占学, 周文斌. 古水热系统与铀成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 112-115.

[12] 邵飞, 徐恒力. 水-岩相互作用及其与铀成矿关系研究: 以相山矿田为例[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 113-116.

[13] 戚华文, 胡瑞忠. 华南花岗岩岩浆期后热液与铀成矿热液的初步对比[J]. 矿物学报, 2000, 20 (4): 401-405.