

贫铀矿石细菌浸出的研究

欧 津 李维卿 钟慧芳 马德钦

从矿山的酸性矿水中分离出亚铁氧化细菌 O-D 菌株, 属于氧化铁硫杆菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*)。靠细菌的生物氧化作用, 可以浸出某些含黄铁矿的贫铀矿石中的铀 (矿物主要为铀黑、铀钙云母及沥青铀矿)。品位为 0.017%, 粒度 -30 毫米的含铀矿石, 用 pH 1.5 的细菌- $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶液柱浸或堆积浸出, 经 40 天后浸出率可达 50% 以上, 而用 -10 毫米粒度的矿石, 则浸出率达 60% 以上。与 2% H_2SO_4 溶液浸出相比较, 在同样的时间内, 可以达到同样的提取率, 但细菌法酸耗只有 0.08%, 可节省 90% 以上的硫酸。

浸出液中的铀和钼离子在一定浓度下抑制细菌的生长及亚铁的氧化。通过菌种选育, 可以得到耐铀 1000 毫克/升, 耐钼 200 毫克/升的菌株。

据目前所知, 细菌法浸出矿石中有用的金属, 主要是利用在酸性矿水中广泛分布的硫化杆菌属 (*Thiobacillus*) 细菌, 特别是其中的亚铁氧化细菌的作用, 使金属以硫酸盐形式从矿石中溶浸出来。这种湿法冶金新工艺, 用来处理某些贫矿有一定发展前途。近十多年来, 关于利用细菌法从贫矿石中浸出铀, 已在世界许多国家进行了研究^[1-11], 并已应用于采空区矿石的地下浸出及堆浸^[12-14]。

为了充分利用我国的铀矿资源, 需要找到对贫矿、表外矿、选矿后的尾矿、采矿后的残留矿等低品位铀矿石的经济利用方法, 为我国社会主义革命和建设服务。我们以南方某铀矿的含黄铁矿贫铀矿石为对象, 进行细菌浸出的研究。几种浸出方法

试验, 证明细菌对该矿石有明显的浸出效果, 对于贫铀矿石的加工处理, 具有一定的优点。

材料和方法

(一) 矿石的性质

矿石是南方某铀矿山选矿厂排出的尾矿。该矿床属于热液交代矿床, 矿石由硅酸盐、角闪岩等构成。其围岩是炭质页岩、硅质页岩等, 矿石特别坚硬, 结构致密。矿石受强烈的黄铁矿化, 局部受高岭土化。铀矿物以次生铀矿为主, 多呈鞘膜或壳状堆积。原生铀矿多与黄铁矿共生。含铀的主要矿物为铀黑、铁铀云母、磷铀石及沥青铀矿等。脉石主要是二氧化硅(85%以上), 其次是黄铁矿、磷灰石、白铁矿、褐铁矿、磷钼石和有机质等。

原矿粒度为 -150 毫米。共取样 3 吨, 进行破碎与缩分, 平均品位为 0.017%, 主要化学成分及含量如下:

矿 石 的 主 要 成 分

成 分	U	Fe	CaO	MgO	Al	Mo	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	SiO_2
含量(%)	0.017	1.87	1.11	0.56	1.46	0.032	4.32	0.25	75

本文于 1976 年 7 月 12 日收到。

* Leathen 培养基(简称 L 培养基)组成:
(NH_4)₂ SO_4 0.15 克, K_2HPO_4 0.05 克,
 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 克, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 0.01 克,
 KCl 0.05 克, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 30—50 克,

自来水 1000 毫升, 用 10% H_2SO_4 调 pH 至 1.5—2.5。分离纯菌株时, FeSO_4 用无菌过滤, 其他成分高压灭菌, 使用时混合。用作细菌浸出时, 则培养基不灭菌。

(二) 浸矿细菌的分离

取矿山酸性矿水 (pH 2.5), 接种到 Leathen^[19] 培养基*中(对 FeSO_4 的用量有改变), 当观察到有亚铁细菌生长后, 再经过多次的转移培养, 然后在含琼脂的 L 培养基上进行平板分离。挑取单个菌落, 反复 3 次平板分离, 获得对亚铁氧化良好的氧化铁硫杆菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*) O-D 菌株 (见图 1)。

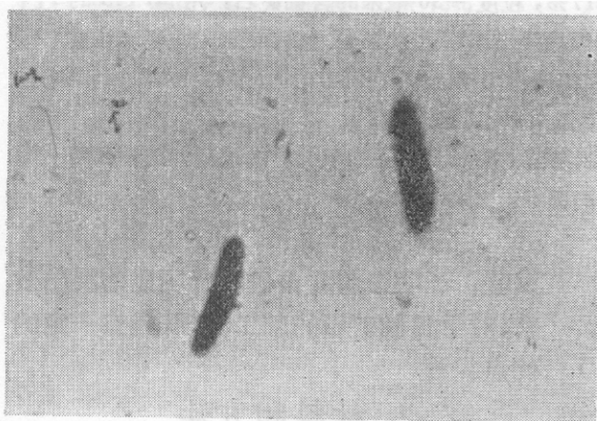


图 1 O-D 细菌电子显微镜照片 10,000×

该菌是能以亚铁和元素硫为能源生长的自养菌, 对硫代硫酸盐有一定的氧化能力, 其特性见表 1。

表 1 O-D 菌株的特性

细胞大小	0.5×1.0—2.0μ
运动性	运动
革兰氏染色	阴性
最适生长温度	28℃
最适生长 pH	2.0—3.5
氧的需要	需氧
氨态氮利用	+
硝酸盐利用	±
硫磺氧化	+
硫代硫酸盐氧化	+
硫酸亚铁氧化	+

O-D 菌株对 Cu^{++} 、 Zn^{++} 、 Ni^{++} 、 Co^{++} 、金属离子有较高的耐性, 在酸度为 pH 1.5 的培养基上能正常生长。

(三) 浅层静置浸出

在 100 毫升三角瓶中盛—40 目的矿石 20 克, 加入 L 培养基, 接种入 10% 的菌液, 固液比 1:1, 置 28℃ 恒温箱中静浸, 每天适当摇动, 使固体和液体均匀接触, 同时用硫酸调节, 保持 pH 2.0 左右。

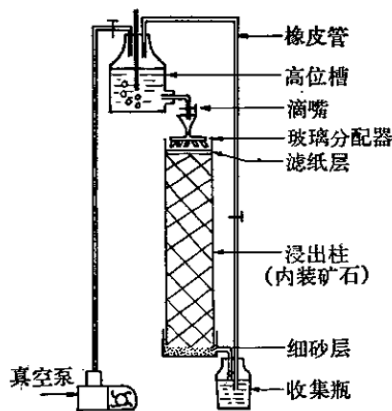


图 2 渗滤柱装置简图

(四) 柱浸试验装置

试验用两种类型的渗滤柱。一种用于浸出粒度—30 毫米的矿石, 装矿石 250 公斤, 使用高为 160 厘米, 内径 40 厘米的铁皮筒作柱, 内壁涂一薄层沥青以防酸腐蚀。柱底连接一个圆铁盘, 铁盘与矿石接触面填充细砂。如图 2 所示, 含有细菌- $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 的浸矿剂, 加于高位槽的玻璃瓶中, 然后通过多支管的玻璃分配器到滤纸层, 再均匀渗透经过矿石及细砂层流到收集瓶中。浸矿剂的流速依恒压法借螺旋夹调节。在收集瓶中经常通入压缩空气, 以促进细菌生长。当高位槽浸矿剂全部渗滤完毕, 加酸调节 pH 至 1.5, 再用真空泵从橡皮管抽至高位槽, 作第二次循环浸出。

第二种渗滤柱用于浸出粒度—10 毫米的矿石, 装矿石 10 公斤或 40 公斤, 使用高为 100 厘米, 内径 10 厘米的硬塑料筒, 或用油毛毡卷成的圆筒代替 (见图 3)。

(五) 柱浸方法

1. 细菌- $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 浸矿剂的制备: 在大缸中配制 50 升 L 培养基(含 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 50 克/升, pH 1.5), 接种入 10% 的 O-D 菌液, 通气培养 4 天, 待 FeSO_4 完全氧化为 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 时, 即可应用。

2. 浸出: 按图 2 法进行多周期渗滤浸出, 每一周期约为 6 天。各柱在浸出前先用 pH 1.5 的硫酸溶液渗滤矿石, 以中和碱性矿物。待流出液 pH 降到 2.0—1.5 时, 即开始浸出。第一周期用上述浸矿剂浸出, 以后各周期的浸矿剂是在 L 培养基中加入 5% 的菌液, 不另加入 FeSO_4 。每天渗滤 12 小时, 停 12 小时。流速为 20 升/米²·小

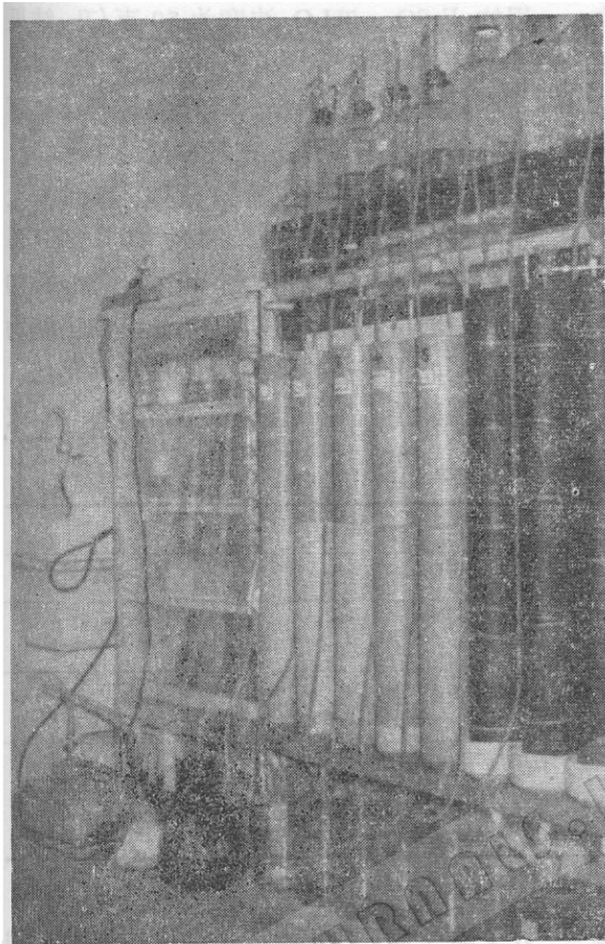


图3 渗滤柱装置(硬塑料管及油毛毡制)

时。每天取浸出液分析其中的 U 、 Fe^{++} 、 Fe^{+++} 及 pH 的变化,并调节浸出液的 pH 为 1.5。待浸出液铀浓度不再升高时,换新浸出剂开始下一周期浸出。各柱浸出结束时,再用 pH 2.0 酸化水冲洗,至流出液铀浓度约 5 毫克/升时为止。浸渣经缩分后取样分析剩余的金属。各周期浸出过程中控制温度为 $25-35^{\circ}C$,并经常在浸液中通入空气,促进细菌的生长。

(六) 堆浸

使用矿石为矿山尾矿,用量为 3000 公斤,经破碎至 -50 毫米。平均铀品位为 0.0177%,主要粒度组成列于表 2。

浸出在大水泥槽进行。堆矿石高度为 1.85 米。浸出条件:

浸矿剂 自来水,用 H_2SO_4 调节 pH 1.5,每周期接种入 5% 的 O-D 菌液。

表 2 堆浸矿石的粒度组成

粒级(毫米)	-50+30	-30	混 合
比例 (%)	55.4	44.6	100
品位 (%)	0.0156	0.0204	0.0177

固液比 每周期用浸矿剂为矿石量的 2.5%,整个流程用量为 34.5%。

喷淋速度 约 40 升/米²·小时。

浸出温度 $25-37^{\circ}C$ 。

浸出时间 每天 12 小时,共 42 天。

浸矿剂用小型不锈钢泵从胶管压上,通过若干塑料喷头喷淋在矿石上。渗滤出的溶液由一塑料槽承接,然后再不断抽上喷淋,以造成一个反复循环喷淋系统(图 4)。

浸出共进行 13 个周期。每周期 2—4 天,用浸矿剂 80 升。每天喷淋 12 小时,停歇 12 小时。每浸完一周期后,再另换 80 升新的浸矿剂。其他步骤与柱浸法相同。流程见图 4。

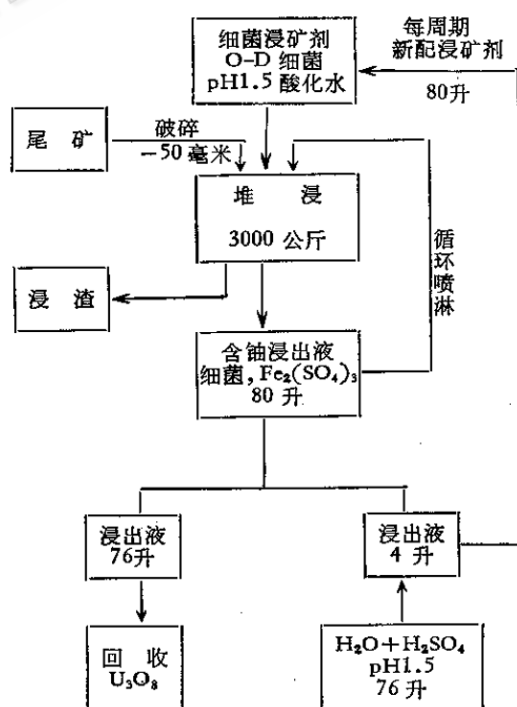


图4 细菌堆浸试验流程图

实 验 结 果

(一) 不同菌株、接种量对浸出效果的影响

从矿水中分离了若干亚铁氧化细菌菌株。经过比较它们对亚铁氧化能力，从中选出了 O-D 及 9 号(此菌是从铜官山酸性矿水分离的)两株较强的菌株，进一步比较了它们的浸出能力。

浸出方法是用浅层静浸。浸出培养基

用的 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 浓度为 50 克/升。结果列于表 3。

从结果可以看出，O-D 菌株对此矿石有较好的浸出作用，在接种量为 10% 时，比无菌的浸出率高 9%。此外，接种量大小对浸出率也有影响。接种 10% 比 1% 的浸出率增加 8.5%。如接种量增加，对初期浸出率提高，但后期则相同。浸出能力的比较，O-D 菌株比 9 号菌株效果稍佳。由于接种量不同，造成浸矿液中 Fe^{+++} 浓

表 3 不同菌株、接种量对浸出效果的比较*

浸 矿 时 间 (天)	浸 出 菌 株									
	O-D								No. 9	
	接种 1% (含 0.01% Fe^{+++})		接种 10% (含 0.1% Fe^{+++})		接种 50% (含 0.5% Fe^{+++})		接种 10% (5% 甲醛灭菌)		接种 10% (含 0.1% Fe^{+++})	
	渣品位 (%)	浸出率 (%)	渣品位 (%)	浸出率 (%)	渣品位 (%)	浸出率 (%)	渣品位 (%)	浸出率 (%)	渣品位 (%)	浸出率 (%)
14	0.0046	67	—	—	0.0039	71	0.0071	49	0.0056	59
28	0.0055	61	0.0049	65	0.0038	71.5	0.0056	60	0.0052	63
42	0.0049	65	0.0037	73.5	0.0037	73.5	0.0050	64.5	0.0040	70.5

* 原矿品位为 0.014%。

度不同，因而对浸出率也有影响，这方面的工作有待进一步试验。

(二) 细菌浸出与纯酸浸出的比较

实验是用渗滤柱进行，均用 O-D 菌株。我们从生产实际出发，把细菌浸出的

效果与 2% H_2SO_4 相比较，而不是与相同酸度的(无菌)浸矿剂比较。浸出分 7 周期，每周期 6 天左右，共 42 天。固液比为 1:0.1。浸出条件及结果见表 4。

1. 浸出率：在相同条件下，40 天的总

表 4 各柱的浸出条件及结果

柱 序 号	矿 石 粒 度 (毫米)	浸 出 条 件						浸出率 (%)	
		浸 矿 剂	柱内径 (厘米)	矿层高度 (米)	矿石重量 (公斤)	渗透 (升/米 ² · 小时)		渣 计	液 计
1	-30	pH 1.5 培养基, 细菌	40	1.50	250	10		53.5	51.5
2	-30	2% H_2SO_4	40	1.40	250	10		56.5	52.7
3	-10	pH 1.5 培养基, 细菌	20	0.95	40	10		66.5	64.3
4	-10	2% H_2SO_4	20	0.92	40	10		65.9	67.3
5	-10	pH 1.5 培养基, 细菌, 表面活性剂*	20	0.93	40	10		67.1	65.3

* 聚氧乙烯蓖麻油。

浸出率大致相同。— 30 毫米粒度的矿石，达 50% 以上。— 10 毫米粒度为 65% 左

右。但在浸出初期(30 天内)，细菌浸出的速度稍快(图 5)。

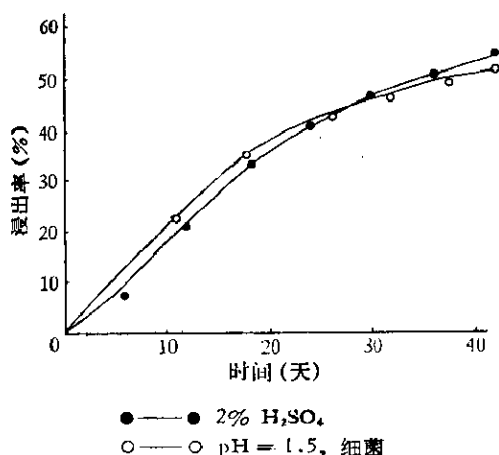


图5 细菌与稀酸柱浸-30毫米矿石比较

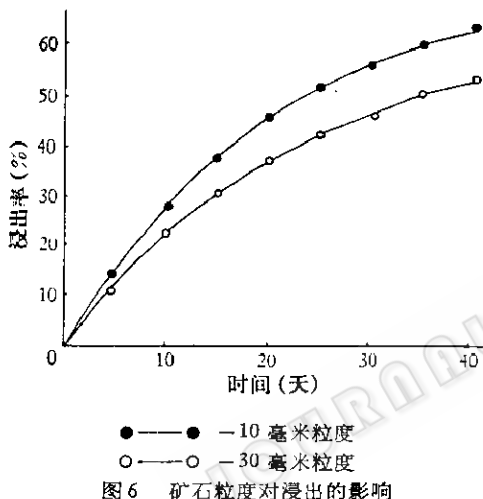


图6 矿石粒度对浸出的影响

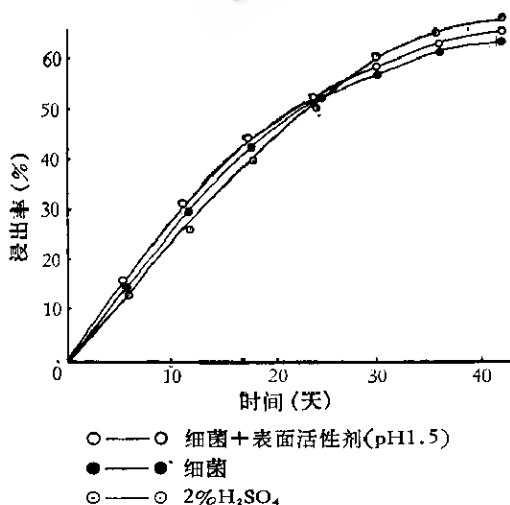


图7 不同浸出剂对浸出的影响

不同酸度对贫铀矿石的浸出效果不同。从使用最低的酸度以获得最佳的浸出

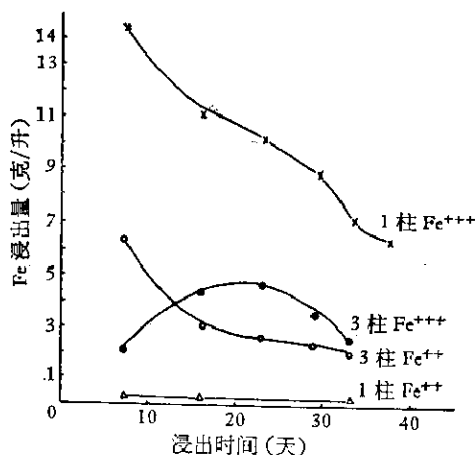
效果出发,选用了2%的硫酸浓度。而用细菌法的浸出结果与用2%硫酸相似,表明细菌浸出的效果明显。

2. 粒度大小对浸出的影响: 由表4和图6看出,粒度大小对浸出速度影响很大。无论细菌或稀酸浸出,粒度愈小,浸出速度越快。

3. 表面活性剂对浸出率的影响: 在浸矿剂中加入0.005%浓度(V/V)的聚氧乙烯蓖麻油进行浸出,实验观察到在有菌液存在的情况下,它对矿石的浸出有一定的促进作用,可能与提高浸矿液的渗透性有关(图7)。

4. 浸出过程中细菌的生长情况: 细菌的生长以浸出液中铁的变化表示。从图8看出,一30毫米粒度矿石,每周期的浸出液不用通入空气,只经几次循环,到周期终结时 Fe^{++} 全氧化成 Fe^{+++} ,表明通过反复循环渗滤,细菌生长很活跃。而粒度一10毫米的矿石,即使在浸出液中经常通入空气,每周期循环浸出终结时 Fe^{++} 仍很多,特别在第一周期, Fe^{+++}/Fe^{++} 比值只有0.136,说明溶液的氧化电位很低。可见在浸出粒度较细的矿石时,细菌生长较差。

5. 耗酸量比较: 以浸出一30毫米矿

图8 细菌浸出中铁的周期变化
(图中各点的数值代表每周期测定的平均值)

石计算,用2% H_2SO_4 时,每公斤矿石需硫酸 0.0117 公斤,而细菌法则只需 0.0026 公斤,比对照少用硫酸 80% 以上。

(三) 营养条件对细菌浸出的影响

实验是用柱浸进行。使用 — 10 毫米矿石 10 公斤,分多周期循环浸出,共浸 41 天,温度为 25—28℃。实验条件及总结果列于表 5。

表 5 各柱的浸出条件及浸出率

柱序号	浸 出 条 件					浸 出 率(%)	
	浸 矿 剂 组 成 ¹⁾	柱内径(厘米)	矿层高度(米)	渗透速(升/米 ² ·小时)	每周液比	渣 计	液 计
1	矿水	10	0.90	20	1:0.2	58.8	65.0
2	矿水,细菌	10	0.90	20	1:0.2	61.5	72.5
3	自来水, HgCl_2 ²⁾	10	0.90	20	1:0.2	47.0	47.7
4	自来水,细菌	10	0.90	20	1:0.2	60.0	67.4
5	自来水,细菌, N源 ³⁾	10	0.90	20	1:0.2	60.0	60.9
6	自来水,细菌, P源 ⁴⁾	10	0.90	20	1:0.2	60.6	60.7
7	自来水,细菌, N、P源	10	0.90	20	1:0.2	60.6	67.5
8	自来水,表面活性剂 ⁵⁾	10	0.90	20	1:0.2	51.7	51.0

- 1) 各浸矿剂均用 H_2SO_4 调节,保持浸出液中 $\text{pH} = 1.5$ 。
- 2) 加入 0.2% HgCl_2 灭菌。
- 3) 加入 N源为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1 克/升。
- 4) 加入 P 源为 K_2HPO_4 0.1 克/升。
- 5) 加 0.005% 聚氧乙烯蓖麻油。

1. 浸出率: 由表 5 结果看出,用 pH1.5 硫酸酸化水或矿坑水,每周周期浸出时接种 5% 新鲜的菌液,不需加入任何营养,都有明显浸出效果,与使用 L 培养基及 2% H_2SO_4 浸出率相似。浸矿剂中加入单个营养,如 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_2HPO_4 , 与不加者区别不大。即使单独用酸性矿水浸出,效果也不错,因它本身就含有一定量细菌,在循环浸出时把矿石中的铁氧化,不断生长繁殖,加速金属溶出。加表面活性剂不接种细菌者,浸出率也不高,说明表面活性剂本身对浸出没有多大作用。

凡有细菌的浸矿剂,比无细菌浸矿剂浸出速度要快。

2. 浸出中铁的变化: 取细菌浸出中有代表性的一柱(第 7 柱),分析浸出时铁的变化。实验所使用浸矿剂,除由接种细菌时带进的铁外,并未另外加入亚铁,而且每周周期(6 天)都新更换浸矿剂。因此,溶液

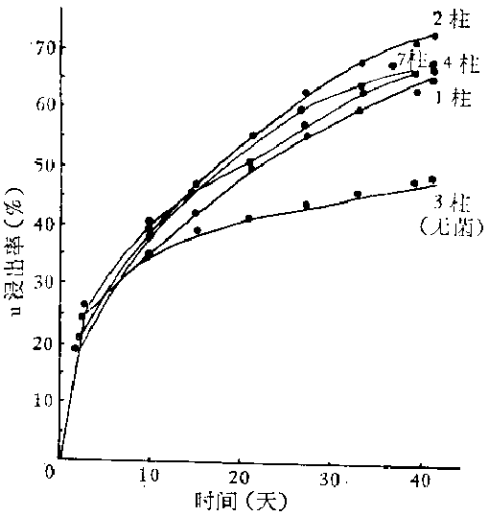


图 9 几种浸矿剂浸出效果比较

表 6 细菌对矿石中铁的浸出

浸出周期	1	2	3	4	5	6	7
Fe^{++} (克/升)	4.2	1.96	0.4	0.4	0	0	0
Fe^{+++} (克/升)	1.68	1.96	6.0	6.0	12.6	8.0	3.5
$\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$	0.4	1.00	6.0	6.0	12.6	8.0	3.5

中的铁离子都是细菌从矿石中溶解出来的。从表 6 可见, 在浸出第 1、2 周期中, 溶液以 Fe^{++} 为主, 细菌生长较差。从第 3 周期开始, 溶液中主要以 Fe^{+++} 为主, 细菌生长良好。实验也可见到, 细菌对矿石中的铁溶出量很大, 足以满足浸出时所需的 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 溶剂, 不需补加 FeSO_4 。

3. 浸出液主要组成分析: 以 8 柱为例

表 7 浸出液及矿坑水组成分析

(单位: 克/升)

成 分	U	Fe	NH_4^+	NO_3^-	PO_4^{--}	Mo
矿 坑 水	0.04	0.720	0.360	微	0.078	0.022
浸 出 液	0.110	2.94	0.432	0.095	0.510	0.072

前述实验指出, 用 — 10 毫米粒度矿石浸出时, 前几周期有抑制细菌生长的现象, 浸出液中 $\text{Fe}^{+++}/\text{Fe}^{++}$ 的比值 < 1 。用浸出液直接培养细菌, 则细菌不能生长。只有稀释 10 倍以后, 才能消除抑制作用。

表 8 O-D 菌株对 Mo 的敏感性 & 适应力*

Mo ⁺⁺ 浓度 (毫克/升)	氧化培养基中全部亚铁所需时间(天)			
	开 始	第 1 次 转移	第 2 次 转移	第 3 次 转移
0	4	4	4	4
10	4	4	4	4
15	4	4	4	4
20	6	4	4	4
30	10	4	4	4
40	11	7	4	4
50	11	7	4	4
80	11	7	4	4
100	11	7	4	4
150	不长	7	4	4
200	不长	不长	7	6

* 1. 试验方法: 于 100 毫升三角瓶中加入 L 培养基和钼离子, 按菌 5%, 总体积 20 毫升, 28℃ 恒温培养。

2. 培养基中 Fe^{++} 浓度为 0.6%。

3. 钼离子 (Mo^{++}) 是以钼酸铵 $[(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4]$ 形式加入的。

4. 每次转移是把前一次最高浓度生长的细菌作下一次试验的接种物。

(对照柱), 分析浸出液中所含主要离子, 结果见表 7。浸出液含有一定量的铵、磷酸盐及铁离子, 其量足以满足细菌生长的需要。此外, 细菌所需的无机盐, 如钙、镁、钾等, 矿石中也含有, 因此在浸矿时不用添加营养细菌也能生长, 这与上述结果一致。

(四) 浸出液中影响细菌生长的金属离子

从浸出液的组成分析可知, 矿石在浸出过程中, 溶解有大量的铀和钼。文献已大量报道了钼离子对细菌有毒害。通过实验证明, 钼浓度在 20 毫克/升, 铀浓度 350 毫克/升时, 对细菌有明显抑制作用, 使亚铁的氧化下降。通过把在低浓度铀、钼培养基上生长的细菌逐步转移到高浓度的培养基上培养而获得抗性。培育出耐钼 200 毫克/升、铀 1000 毫克/升的变异株(表 8, 9)。

表 9 O-D 菌株对 U 的敏感性 & 适应力*

U 浓度 (毫克/升)	氧化培养基中全部亚铁所需时间(天)				
	开始	第 1 次 转移	第 2 次 转移	第 3 次 转移	第 4 次 转移
0	4	4	4	4	4
100	4	4	4	4	4
200	4	4	4	4	4
300	4	4	4	4	4
400	7	4	4	4	4
500	7	4	4	4	4
600	7	4	4	4	4
700	不长	10	7	7	4
800	不长	10	10	7	7
900	不长	不长	10	8	7
1000	不长	不长	不长	10	10

* 试验方法同表 8。

(五) 堆积浸出

用粒度 — 50 毫米的矿石 3000 公斤堆

浸 44 天, 浸出率(液汁)为 41.6%。不同粒级的渣计浸出率列于表 10。

表 10 不同粒级的矿石渣汁浸出率

粒 级	混合矿	+30—50 毫米	-30 毫米
原矿品位(%)	0.0177	0.0156	0.0204
渣 品 位(%)	0.0102	0.0122	0.0095
浸 出 率(%)	42.3	21.8	53.5

浸出速率及每周期中铁的变化见图 10, 11。

浸出第 1 周期中, 溶液中的铀浓度最

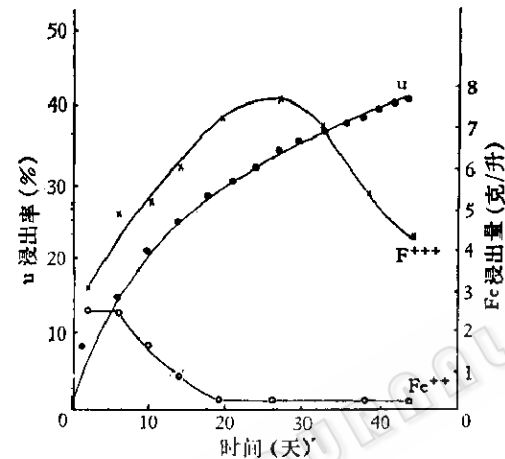


图 10 -50 毫米粒度矿石堆浸中铀的浸出率及铁的周期浸出变化

表 11 浸出液的组成分析(平均取样)

成分	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Fe ⁺⁺	Fe ⁺⁺⁺	Mo
含量(%)	18.7	0.39	微	0.023	2.0	1.48	0.051	5.72	0.192

在堆浸中由于矿石粒度大, 矿堆内通气良好, 而且使用的 O-D 菌株又是经过选育能耐高浓度 Mo, U 离子的, 从浸出第一周期起, 细菌便生长很快, 浸出液中 Fe⁺⁺⁺/Fe⁺⁺ 的比值 >1。至第 5, 6 周期(20—30 天内), 细菌大量繁殖, 浸出液含有 7 克/升的 Fe⁺⁺⁺, 几乎没有 Fe⁺⁺。从浸出液的组成成分来看(表 11), 它含有很多细菌生长所需的无机盐。因此, 浸出大粒度矿石也不需另加入任何营养。

高, 达 500 毫克/升。以后各周期则成直线下降。末期则只有 40 毫克/升, 且浸出速度越来越慢。

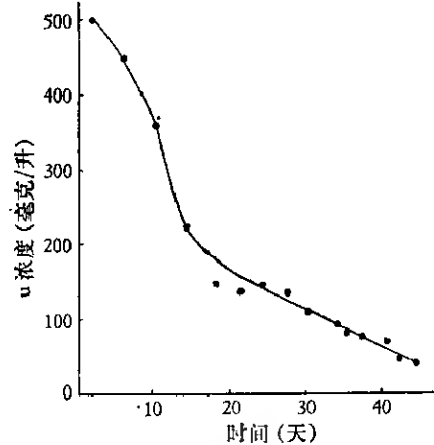


图 11 -50 毫米粒度矿石浸出中铀浓度的周期变化 浸出液数量: 每 1000 公斤矿石约产浸出液 0.3 米³, 平均 U 浓度 240 毫克/升。

由于堆浸所用的矿石粒度大, 品位低, 因此浸出率比较低。但从表 10 可以看到, 不同粒级的浸出率分别计算结果, -30 毫米粒度矿石的浸出率也达 50% 以上, 因此, 堆浸的结果与柱浸是相似的。

堆浸所消耗的硫酸(包括培养细菌及由铁屑制造硫酸亚铁, 调节浸出液 pH 等)为 2.43 公斤, 耗酸率为矿石重量的 0.081%。

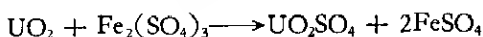
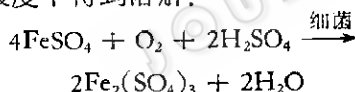
讨 论

在浸出含铁硫化矿物中起着重要作用的氧化铁杆菌, 至今已报道了三个种, 即氧化铁硫杆菌(*T. ferrooxidans*), 氧化铁铁杆菌(*F. ferrooxidans*)和氧化硫铁杆菌(*F. sulfooxidans*)。虽然它们对亚铁, 元素硫及硫代硫酸盐氧化力不同, 但都能进行氧化, 并且进一步证明, 还能利用元素硫和硫代硫酸盐作能源来同化二氧化碳, 因

此一些研究者对这样的分类有不同的看法^[15], 认为把它在分类上定为二个属三个种是不确切的。近十多年来, 许多研究者把这类菌合并为一个种, 称为氧化铁硫杆菌 (*Th. ferrooxidans*)。

我们在鉴定该菌的过程中, 观察到该菌的一些特征是随着培养条件起变化的。在元素硫为能源的培养基上转移多代后, 硫氧化的能力提高, 亚铁氧化的能力就降低。可见菌株氧化元素硫和硫化物的能力很可能同它所处的原始环境的营养条件和菌种分离后人们所提供的营养条件密切相关。因此, 我们认为本实验分离的菌株, 定名为氧化铁硫杆菌 (*Th. ferrooxidans*) 是较为合适的。

关于氧化铁硫杆菌浸出硫化矿石中金属的原理, 目前有直接作用及间接催化作用两种意见。而对于铀矿的浸出, 现在的实验结果都认为属于间接作用, 即细菌把黄铁矿 (或 FeSO_4) 氧化产生硫酸高铁, Fe^{+++} 可把四价铀氧化为六价铀, 六价铀在低酸度下得到溶解:



我们的试验结果表明, 硫酸高铁的作用是重要的, 因为单独用酸性硫酸高铁搅拌浸出, 铀的浸出率也高。但是, 我们从实验中观察到, 在浸出第三周期后, 每一周期的第一次循环浸出, 虽然使用的浸矿剂只含有少量 Fe^{+++} (接种 5% 菌种带来的), 但浸出液全是 Fe^{+++} 没有 Fe^{++} , 且随着循环次数增加, 从矿石中溶出的 Fe^{+++} 愈多。显然, 浸出液中存在的大量高铁及金属, 是由于细菌附在矿石表面与硫化矿物起作用的结果。因此, 细菌除间接作用外, 是否有直接作用仍待进一步考察。

渗滤浸出中, 使用粒度大的矿石 (—30

毫米) 比粒度小的 (—10 毫米) 矿石对细菌生长繁殖更好, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 形成更多。一方面, 可能粒度大的矿石之间空隙大, 通气良好, 浸矿剂在循环浸出中又带进了大量空气。另外浸出的对细菌有毒的金属离子 (如 Mo) 浓度低, 为细菌提供良好的生长条件。小粒度矿石在柱内通气条件差, 而最初几周的浸出液中钼离子浓度高, 对细菌生长不利。因此, 在细粒度矿石堆浸时, 需要把细菌加以培育, 以便能耐一定浓度的铀、钼离子。本试验已使 O-D 菌株耐铀 1000 毫克/升, 耐钼 200 毫克/升, 使细菌能在浸矿时正常生长。

参 考 资 料

- [1] 裘荣庆: 铜铀矿石的细菌浸出。微生物学通报, 3 (1): 18—20, 1976。
- [2] Tomizuka, N. & Takahara, Y.: Proc. IV IFS: Ferment. Technol. Today, 513, 1972.
- [3] Fisher, J. R.: Can. Min. Met. Bull., 59 (649): 588, 1966.
- [4] Harrison, V. F. et al.: Can. Min. J., 87 (5): 64, 1966.
- [5] Gow, W. A. et al.: The Recovery of Uranium (Proc. Symp.), 195, 1971.
- [6] White, P. A. F. & Smith, S. E.: J. Brit. Nucl. Energy Soc., 8 (2): 93, 1969.
- [7] 栗原一男: 原子力工業, 16 (12): 23, 1970。
- [8] Кузнецова, Е. Т. и Кулигина, И. П.: Атомн. Энерг., 32 (2): 153, 1972.
- [9] Барбич, Ф. Ф. и Крайничанич, Б. Б.: Микробиология, 41: 346, 1972.
- [10] Mouret, M.: Rev. l'Ind. Min., 50 (5): 397, 1968.
- [11] Bjoerling, T.: Nucl. Sci. Abstr., 29 (5): 9907, 1974.
- [12] MacGregor, R. A.: CIM Trans., 69: 162, 1966.
- [13] MacGregor, R. A.: Nuclear Applications, 6 (1): 68, 1969.
- [14] Maget, P. et al.: Industrie Minérale, 54 (5): 229—246, 1972.
- [15] Leathen, W. W. et al.: J. Bacteriol., 72: 700, 1956.
- [16] Hutchinson, M. et al.: J. Gen. Microbiol., 47: 397, 1969.

BACTERIAL LEACHING OF LOW-GRADE URANIUM ORES

Ou Jin, Li Weiqing, Zhong Huifang, Ma Deqin

An iron-oxidizing bacterial strain, O-D has been isolated from acid mine drainage and identified as *Thiobacillus ferrooxidans*. Through bacterial oxidation, Uranium in certain low-grade ores containing pyrite (essential mineral ingredients as Uranite, Autunite, Uraninite) was readily leached out. When ore containing 0.017% U was treated with bacteria- $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ solution at pH 1.5 in columns or heaps for 40 days, more than 50% or 60% of uranium was leached out from ore with grain size of 30 mm or 10

mm respectively. This leaching efficiency was equal to that obtained by leaching with H_2SO_4 for the same duration, but the bacteriological method saved more than 90% of H_2SO_4 .

The bacterial growth and the oxidation of ferrous ions were inhibited by the U and Mo at certain concentration during leaching process. However, desirable strains which can tolerate 1000 mg/l of uranium and 200 mg/l of molybdenum in the leaching solution have been selected by adaptation method.