细菌在铀矿堆浸中的作用研究

Research on Effect of Microbe During Leaching Uranium

石 健[1] 刘军强[2] 史维浚[3] 刘金辉[3]

（1 中国地质大学水资源与环境工程学院，北京 100083；2 浙江省地球物理地球化学勘察院，浙江 杭州 310017；3 华东地质学院，江西 抚州 344000）

Shi Jian[1], Liu Junqing[2], Shi Weijun[3] and Liu Jinhui[3]

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083, China, 2 Physical geography and geochemistry survey, Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou 310017, Zhejing, China; 3 East China geology institute, Fuzhou 344000, Jiangxi, China)

摘 要 通过试验研究了细菌浸出这一新的浸矿方法，从氧化还原环境、铀的浸出浓度，液固比、铀的日浸出率等技术参术入手，探讨了利用细菌氧化处理铀矿石的浸矿效果，得出细菌在铀矿浸出过程中作用显著，具有广阔的应用前景的结论。

关键词 细菌 氧化还原条件 浸出浓度 液固比 日浸出率

细菌浸出应用于铀矿的地表、井下存留矿石淋浸、原地爆破浸出、原地钻孔浸出，特别是原生矿或硬岩型矿既可以选择性浸出铀，又可以维持最佳浸出氧化条件，改善铀浸出动力学，提高浸出时间，降低原材料消耗。对提高铀浸出率、铀矿资源利用率、综合经济效益，保护环境等方面，起着重要的作用，在铀矿采冶领域有着广阔的前景（李尚远，1997；陈仕安，1999）。

1 浸铀机理

H_2SO_4 及 $Fe_2(SO_4)_3$ 溶液为含铀矿物浸出中普遍使用的有效浸矿剂。但通常依靠自然氧化所生成的 H_2SO_4 及 $Fe_2(SO_4)_3$，其速度是极其缓慢的，若有细菌参与时，则像用了触媒似的，反应速度可急剧加快。氧化硫硫杆菌，聚硫杆菌等具有使元素硫氧化的能力，在溶浸液中生成硫酸。氧化亚铁铁杆菌、氧化亚铁硫杆菌等都具有把 $FeSO_4$ 氧化成 $Fe_2(SO_4)_3$ 的能力，使溶浸液中的 $Fe_2(SO_4)_3$ 含量大大增加。

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \xrightarrow{\text{细菌}} 2FeSO_4 + 2H_2SO_4 + 11\ kJ$$

$$4\ FeSO_4 + O_2 + 2\ H_2SO_4 \xrightarrow{\text{细菌}} 2Fe_2(SO_4)_3 + H_2O$$

$$FeS_2 + Fe_2(SO_4)_3 \xrightarrow{\text{化学作用}} 3\ FeSO_4 + 2S$$

$$2S + 3O_2 + 2\ H_2O \xrightarrow{\text{细菌}} 2\ H_2SO_4 + \Delta 118\ kJ$$

$$Fe_2(SO_4)_3 + H_2O \xrightarrow{\text{化学作用}} Fe(OH)_3 + H_2SO_4$$

细菌浸出在铀矿中的作用是在以下作用的基础上进行的：

$$UO_3\ (\text{易溶}) + H_2SO_4 \xrightarrow{\text{化学作用}} UO_2SO_4 + H_2O$$

$$UO_2\ (\text{极难溶}) + Fe_2(SO_4)_3 \xrightarrow{\text{化学作用}} UO_2SO_4 + FeSO_4$$

第一作者简介 石 健，女，1972 年生，中国地质大学博士研究生，环境工程专业，主要从事环境工程方面的研究工作。

这样便大大增加铀的浸出效率（姜成林等，1997；丁育清等，1996；胡岳华等，1997）。可见，细菌的参与可以大大地提高铀的浸出效果，这对于降低矿石堆浸过程中的酸耗，降低生产成本具有十分重要的意义。

2　试验部分

2.1　试验菌种

本文中主要研究对象是硫杆菌属（Thiobacillus）中的氧化亚铁硫杆菌T.ferrooxidans，它由山南矿区野外矿样中分离筛选而得，并经培养驯化后用于试验。

2.2　试验装置

试验柱为Φ100×1000 mm 的有机玻璃柱。矿样粒度为<20 mm。矿柱厚 500 mm，矿柱上有 200 mm 的卵石（d=5 mm）作扩散层，上覆滤纸以增加其渗透的均匀性，底部有 150 mm 卵石作渗滤层。

3　试验结果及讨论

3.1　氧化条件对比

氧化还原条件是通过柱内的氧化还原电位来反映的，它是制约四价铀氧化为六价铀的关键性因素。由于山南铀矿石其原生性较好，在未加氧化剂的情况下，无菌浸出过程中 E_h 值相对来说是较低的，而当细菌参与浸出后其氧化还原电位发生了变化，如表 1 所示。

表 1　加菌前后浸出液 Eh 值(mV)对比

E_h	硫　酸			
	0.5g/L		5g/L	
	加菌前	加菌后	加菌前	加菌后
$E_{h\,最小}$	555.5	607.5	375.2	703.8
$E_{h\,最大}$	608.5	773.8	611.5	756.8
$E_{h\,平均}$	584.0	662.4	576.7	724.2

通过比较，加菌后浸出液的 *Eh* 值比加菌前普遍提高，这预示着柱内氧化还原环境由弱氧化向强氧化环境的方向转变，具体表现为：硫酸浓度同为 0.5 g/L 时，加菌后浸出液的 Eh 值比加菌前的 Eh 值提高了 50~170 mV，平均提高了约 80 mV；硫酸浓度同为 5 g/L 时，加菌后浸出液的 Eh 值比加菌前的 E_h 值提高了 140~330 mV，平均提高了约 170 mV，这对矿石中的四价铀转化为六价铀是非常有利的，从而为铀的浸出提供了有利的氧化还原条件。

3.2　加菌前后铀浸出浓度对比

据浸出液体积相近的原则，取加菌前喷淋液酸度为 5 g/L 时浸出液及加菌后喷淋液酸度为 0.5 g/L、5 g/L 时浸出液，对比它们的铀浓度。

将数据绘于图 1，数据显示，加菌后铀浸出浓度明显提高，可以清楚地看出①在同一酸度（5 g/L）条件下，未加菌时铀浸出平均浓度为 17.977 mg/L，加菌后铀的浸出浓度可达 98.0877 mg/L，加菌后是加菌前的 4.47 倍，细菌的作用是明显的。②加菌后的酸度为 0.5g/L 时，虽然酸度下降了，但铀平均浓度为 49.917mg/L 是加菌前的 2.44 倍 。也就是说，当有细菌作用时，喷淋液用酸量减小，浸出液中的铀浓度（与无菌时相比）仍然保持上升的趋势，就其原因来说，是因为细菌通过其生物氧化作用产生的硫酸可以替代喷淋液中一部分酸，这正是细菌

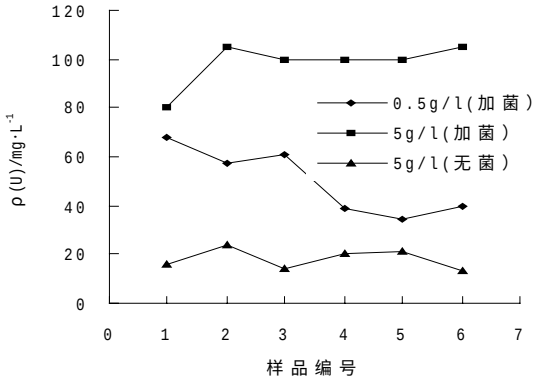


图 1　不同酸度下加菌与不加菌铀浓度对比曲线

能降低酸耗的原因所在。③在同样都是加菌条件下，用 5g/L 硫酸进行喷淋比用 0.5g/L 硫酸进行喷淋效果好。

上述认识表明，在柱浸试验中有菌与无菌的差别是显然的，细菌可以更加有效地浸出矿石中的铀，并同时降低酸耗。采用细菌浸出对提高浸出液中铀的浸出浓度具有切实的意义。

3.3 加菌前后浸出效果对比

日浸出率及液固比是评价浸出工作效率的重要指标。日浸出率指的是日浸出液中铀含量与入柱矿石铀总含量的比值；而液固比是在给定浸出率时，单位体积的矿石与所需的浸出剂的体积比。实验选取喷淋条件为供液流速为 15 mL/min。溶浸液硫酸浓度为 0.5 g/L,对比加菌前与加菌后的浸出效率（图 2、3）。

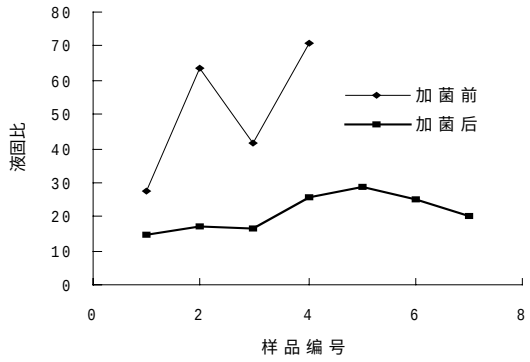


图 2 加菌前后液固比变化曲线

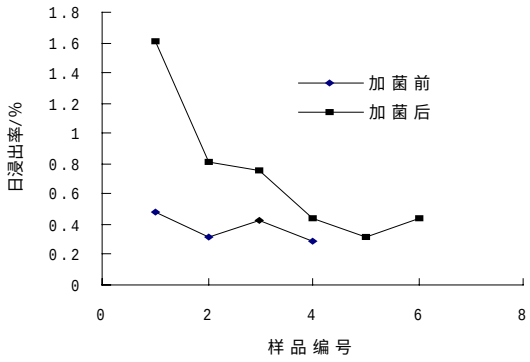


图 3 加菌前后铀日浸出率变化曲线

由图 2、3 可知①加菌后日浸出率明显提高。在加菌前平均日浸出效率为 0.38 %，而加菌后提高到了 0.67%，（与此相应，加菌后日平均铀含量为加菌前的 2 倍以上），②液固比减小，加菌前为 50.8 ml 溶浸剂/mg 铀。而加菌后为 21.18 ml 溶浸剂/mg 铀，即平均液固比不到原来的 1/2，而日均浸出效率提高了 76%，这就大大降低了酸耗，使铀的浸出效率得以大幅度提高。也就是说在溶浸液减少 50%的情况下，铀的日浸出率却提高了 76%。这再次充分展示了细菌在浸铀中的作用。

3.4 加菌喷淋与无菌喷淋方式

为研究探讨细菌对铀矿石的浸铀效果，在实验室进行加菌液喷淋和无菌液喷淋柱浸试验，并对二类试验进行对比。试验过程如下：对一柱采用将培养好的菌液加到硫酸溶液中，混合后作溶浸剂进行喷淋。对另一柱仍采用单一的硫酸溶液进行喷淋，然后对比它们的铀浸出效率。

试验结果如图 4 所示。从实验数据分析，带菌液喷淋柱的平均日浸出率为 1.428%，平均液固比为 6.49，而非带菌喷淋柱的平均日浸出率为 1.174%，平均液固比为 7.71，带菌液喷淋柱平均日浸出率比非带菌喷淋柱提高了 19.4%，而液固比比非带菌喷淋柱减少 19.5%。这说明喷淋液中采用菌液喷淋的方式优于单一的酸液喷淋。由图 4 可以看出：用菌液喷淋的效果要比稀酸喷淋好，在喷淋量基本相同的条件下，加菌喷淋柱的日平均铀含量比不加菌喷淋提高了 14%～48%，日浸出率提高 16%～46%。

以上结果充分说明加菌喷淋效果更好，也就是说细菌可以从铀浸出浓度、日浸出率及液固比等多方面提高铀浸出效率。

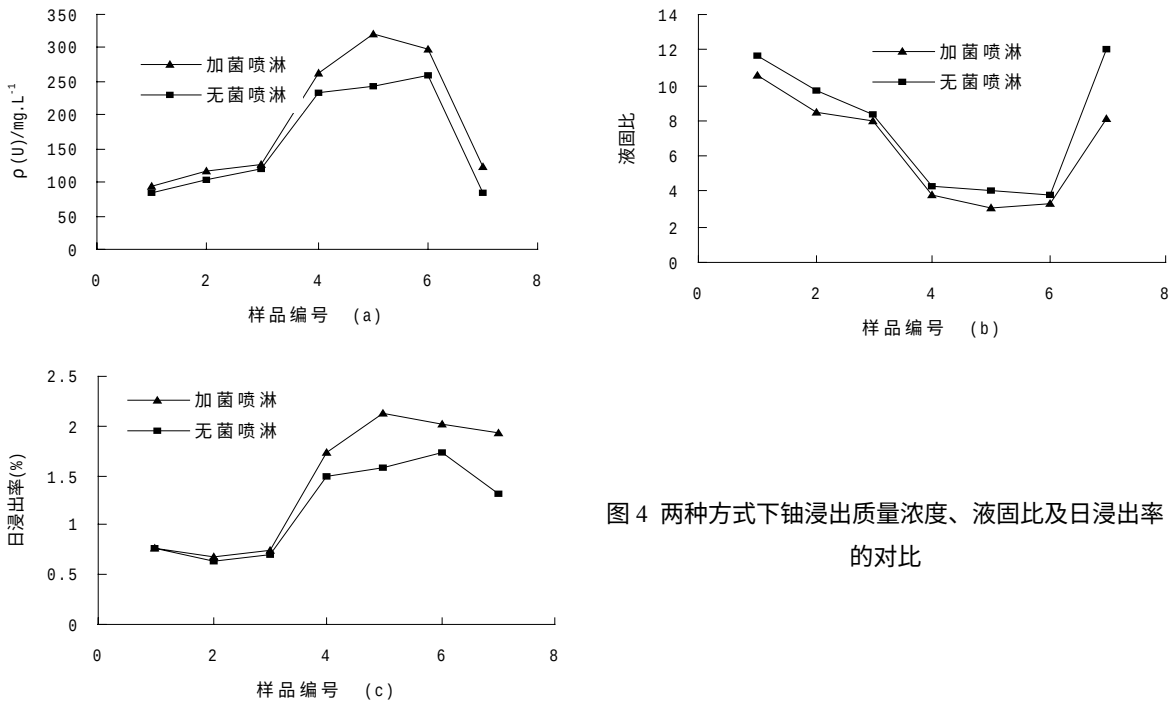


图 4 两种方式下铀浸出质量浓度、液固比及日浸出率的对比

4 小 结

通过以上实验，可以对细菌在铀浸出过程中产生的明显效果有更加深刻的认识，细菌的作用是显著的，在铀矿浸出过程中细菌可以起到提高铀的浸出浓度、降低液固比，增加日浸出率的作用，在铀矿采冶领域中有着广阔的前景。

参 考 文 献

李尚远. 1997. 铀、金、铜矿石堆浸原理与实践. 北京：原子能出版社.

陈仕安. 1999. 细菌浸出在我国铀矿采冶领域中的应用及前景. 铀矿冶，18（4）：8~13

姜成林，徐丽华. 1997. 微生物资源学. 北京：科学出版社.

丁育清，卢寿慈，安蓉. 1996. 难处理金矿石的细菌氧化提金技术及工业应用. 黄金，17 卷（6）：32~37

胡岳华，康自珍，王军，等. 1997. 黄铜矿的细菌氧化. 国外金属矿选矿，(8)：42~52