

金矿的细菌浸出处理研究

田晓娟¹ 杜德平¹ 彭立娥² 李星洪²

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

2. 北京大学分子与化学工程学院, 北京 100871)

摘要:利用细菌对难处理金矿进行浸出处理,具有成本低廉、环境污染小、处理效率高等突出优点,已成为非常有前途的难处理金矿的预处理方法。笔者以河北遵化滑石峪金矿(含金黄铁矿)样品为例,在几种氧化亚铁硫杆菌中发现 D3 菌种处理此类难浸金矿有显著的增大提金率的效果。在 200 目粒度条件下,氰化提金率从单纯氰化的 63.9% 提高到细菌预处理后再氰化的 88.2%,而且对 100 目以下的大粒度金矿,提金率也普遍提高 10% 以上;此外,还进行了该菌种处理金矿过程的条件实验,如粒度影响、pH 值变化和物理方法强化的研究,得出了金矿在细菌氧化过程中的一些规律和在实际操作时的最优化控制条件。

关键词:湿法冶金;细菌浸出;难浸金矿预处理

中图分类号:P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2008)03-0557-07

金以自然金属状态存在,呈灿烂的黄颜色和具有良好的物理性质可长期保存、经久不变且易采易选易加工。从远古至今人们喜欢用黄金作饰品和铸币,世界各国也采用黄金作为国际贸易结算手段和本国货币信用的基金。货币曾是过去黄金最重要的用途,直至 20 世纪 70 年代才退出世界货币舞台,在世界发展历程中黄金产生了举足轻重的影响^[1]。

难浸金矿石是指不经预处理则不适于直接氰化的矿石。其中的金或为物理包裹,或为化学结合,使之不能被有效地提取。有三类基本的难浸金矿石。第一类难浸是因为非硫化脉石组分,如硅石或碳酸盐包裹金;第二类是金包裹在硫化矿物——主要是黄铁矿和砷黄铁矿中;第三类是炭质金矿石。其中,第二类,也即金的硫化物包裹物是最大的一类难浸金矿^[2]。在此种矿物中,金常以显微和次显微粒浸染或以固溶状态存在,即使细磨也难于使其中被包裹的金完全解离。对这类含砷、含硫难选冶金矿石,用氰化法直接浸金,效果就差。需氧化预处理,使金粒解离,再用氰化物浸取,才能较充分地提取金^[3]。

细菌浸出又称微生物冶金,它在工业生产上已成功应用于从废石、低品位矿石及硫化矿精矿中提取 Cu、U、贵金属以及 Mn、Ni、Co、Sn、Sb、Mo、Bi、V、Ga、Ge 金属及 P、K 等非金属^[4]。

细菌浸出机理是利用细菌自身的氧化或还原性使矿物中某些组分得到氧化或还原,进而以可溶或沉淀形式与原物质分离,此即细菌浸出的直接作用;或者依靠细菌的代谢产物(有机酸、无机酸和三价铁离子)与矿物发生反应,使有用组分进入溶液,此即细菌浸出的间接作用^[5]。

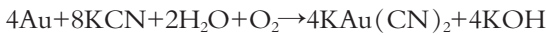
细菌的浸矿速率直接影响黄金生产成本,但影响细菌浸出的因素很多,大致分 3 方面:生物因素,细菌的生活场所和驯化条件、适宜的生存环境因子等;矿物因素,难处理金矿类型、矿石化学成分、矿物组成、硫化物表面性质等;工艺因素,矿石粒度、矿浆浓度、表面活性剂、搅拌充气及反应器的结构等^[6]。

中国陕西省地质矿产局第三地质队于 1994 年进行了 2000 t 级黄铁矿类型贫金矿石细菌氧化预处理—氰化堆浸金现场实验。原矿含金只 0.54g/t,经

细菌氧化预处理后,金实收率 58%;而不经细菌氧化预处理,金仅浸出 22%^[7]。

笔者主要从生物因素的角度(未涉及矿物工艺学因素),通过对河北遵化滑石峪金矿(含金黄铁矿)进行细菌氧化预处理研究,试图从几种氧化亚铁硫杆菌中发现在处理此类难浸金矿时有显著增大提金率的细菌,找到一种有效的提取金手段,提高金的浸取率,并且大幅度降低生产成本,从而使此金矿具有可观的工业开采价值。此项研究有着重要的现实意义,不仅有可能为解决同类型矿石的提炼难题提供有价值的信息,也为其他类型其他矿物的冶炼,做出有益的探索。

氰化提金原理:金在稀薄的氰化物溶液中,有氧(氧化剂)存在时,生成一价金的络合物而被溶解。



金的溶解速度与溶液中的氰化物浓度和氧的浓度及其扩散情况有关,与发生反应的阴极和阳极的表面积及单位金表面上的氰化物、氧的浓度有关,与溶液内部和饱和液之间的扩散层厚度有关。而当氰化物浓度低时,金的溶解速度仅取决于氰化物浓度;当氰化物浓度高时,金的溶解速度仅随氧浓度而定^[8]。

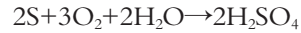
1 实验材料和方法

1.1 菌种

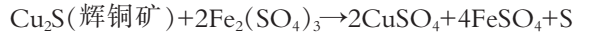
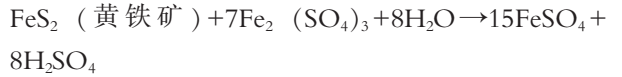
本实验所用 D3 菌种,是从广东浮云硫铁矿 pH=2.33 的酸性坑道水中分离出的;951 菌种是从湖南含硫酸性煤矿水中分离得到,均为氧化亚铁硫杆菌。

氧化亚铁硫杆菌是一种靠硫化矿物氧化或二价铁离子氧化获得能量而生长的化学自养微生物^[9],

能够将矿石中的硫氧化成硫酸,硫酸亚铁氧化成硫酸铁。其反应式如下^[10]:



通过上述反应,细菌得到了所需要的能量,而硫酸铁可将矿石中的铁或铜等,转变为可溶性化合物而从矿石中溶解出来,其化学过程是:



1.2 细菌生长及浸矿过程的动力学模型

1.2.1 细菌生长的动力学模型

1942 年法国 Monod 在研究大肠杆菌的生长规律时,通过大量实验发现细菌生长速率是营养物质浓度的双曲线函数,建立了著名的 Monod 方程:

$$\mu(S) = dX/(xdt) = \mu_m \cdot S / (K_S + S) \quad (I)$$

下式示出酶的氧化速率和速率控制物浓度的关系:

$$V = K_m \cdot S / (K_S + S) \quad (II)$$

其中:

μ —菌体的比生长速度;

S—控制速率的营养物浓度;

μ_m —一定营养物浓度下菌体的最大生长速率;

K_S —饱和常数,即为 $\mu = \mu_m/2$ 时控制速率的营养物浓度;

X—菌体浓度(亿/mL);

t—时间(小时)

T—温度

Y, Y1, Y2, Y3, Y4, Y_{max} —模型的化学计量系数。

(I)和(II)式的相似性推动了“速率控制理

表 1 氧化亚铁硫杆菌氧化 Fe²⁺的数学模型

Table 1 Mathematic model of Fe²⁺ oxidation by Thiobacillus ferrooxidans

| 模型 | 数学模型 |
|--|--|
| 模型 I (控制步骤符合 Monod 动力学规律) | $dx/dt = \mu_m \cdot Fe^{2+} \cdot x / (K_S + Fe^{2+})$ $dFe^{2+}/dt = -\mu_m \cdot Fe^{2+} \cdot x / [Y(K_S + Fe^{2+})]$ |
| 模型 II (控制步骤是 Fe ²⁺ 的氧化及 Fe ³⁺ 的水解过程,生物量与产生的 Fe ³⁺ 成正比,无维持能力) | $dFe^{2+}/dt = -\mu_1(Fe^{2+}, pH, T) \cdot Fe^{2+}$ $dFe^{3+}/dt = [\mu_1 - \mu_2(Fe^{3+}, pH, T)] \cdot Fe^{3+}$ $dpH/dt = [-\mu_1/Y_2 + \mu_2/Y_3] \cdot Fe^{3+}$ |
| 模型 IIa (在模型 II 的基础上考虑水解反应的可逆性) | $dFe_{sol}/dt = [\mu_1 \cdot Fe^{2+}/Y_1 - \square_2] \cdot Fe_{sol}$ $dpH/dt = [-\mu_1 \cdot Fe^{2+}/Y_2 + \square_2 \cdot Fe^{3+}/Y_3 + \square_2 \cdot Fe_{sol}/Y_3]$ $Fe^{3+} = Fe^{2+} + Fe^{3+} - Fe^{2+}$ |

论”的发展,并成为建立细菌生长模型的基础。表 1 列出迄今为止文献已报道的氧化亚铁硫杆菌氧化 Fe^{2+} 的数学模型。其中模型 I 直接由 Monod 方程导出,模型 II, IIa 和 IIb 均是半经验模型。其共同特点是,试图用同一数学式描述细菌氧化的全过程,但拟合结果往往并不理想。

1.2.2 细菌浸矿过程的动力学模型

与一般湿法冶金过程不同,细菌浸出矿石过程往往要受生物因素的制约,致使动力学研究有一定难度,在扩散孔隙和收缩核心模型基础上提出了以下混合模型:

$$V_2 = 4/3 \pi R_1^3 - n \pi r^2 [L - (R_0 - R_1)]$$

其中:

V_2 —收缩之后的颗粒体积; r —平均孔半径;

R_1 —收缩之后的颗粒半径; L —平均孔长;

R_0 —初始颗粒半径; n —孔隙数;

由于一些参数 n 、 r 、 L 等难于测定,使用有一定困难。

1.3 树脂交换柱及分离富集装置

如图 1,称取 3 g TBP 萃淋树脂于烧杯中,加水搅匀按常规湿法上柱,柱顶部铺一层玻璃棉,用 20 mL 金洗脱液洗涤,再用蒸馏水洗至中性,使用前用 10%王水饱和平衡。

1.4 试剂

金标准溶液: GBW(E)080175,浓度 100ug/mL;

操作液浓度: $4 \mu\text{g/mL}$;

TMK(硫代米蚩酮)乙醇溶液:0.01%;

混合掩蔽缓冲溶液:称取 120 g 柠檬酸和 25 g EDTA,加入 120 mL 冰乙酸及 50 mL 水,在不断搅拌下加入氨水至固体盐类溶解,用 1:1 HCl 调节 pH=4.0,用水稀至 1L;

十二烷基硫酸钠(SDS):2.5%水溶液;

TBP(磷酸三丁酯)萃淋树脂:核工业部北京化工冶金研究院产品;

金洗脱液:0.25%亚硫酸钠与 0.05% 抗坏血酸混合溶液;

金矿消解液:饱和溴水:30%NaCl:浓 HNO_3 =1:5:4(体积比);

改进后的 3 L 培养基:(NH_4) $_2$ SO $_4$ 0.45g/L, K_2 HPO $_4$ 0.15 g/L, KCl 0.15 g/L, MgSO $_4$ ·7H $_2$ O 0.05 g/L, Ca(NO $_3$) $_2$ ·2H $_2$ O 0.01 g/L,蒸馏水 1000 mL, pH 1.8~2.0;

NaCN:操作液浓度为 0.9%。

1.5 金的分析

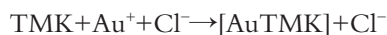
1.5.1 原理

本实验采用 TBP 树脂富集, Na_2SO_3 -抗坏血酸还原解脱的方法,并用 Au-TMK-SDS 体系显色的方法^[1],测定体系中的微量 Au。

其中, TBP 富集 Au 反应式^[2]:



TMK 显色反应式^[3]:



1.5.2 步骤

(1)溶矿:在 250 mL 烧杯中,加入准确称量的矿样或一定量的金标准液,再加入 20 mL 金消解液,置于可调压电炉上保持微沸状态至烧杯中剩余少量液体,再加入 20 mL 1:1 王水,同样使之微沸至剩余少量液体,取下,加入约 40 mL 水,过滤(该硫铁矿在溶矿前需进行高温焙烧以除去硫,方法是将矿样置于瓷坩锅中在马弗炉里于 400℃和 600℃温度分别培烧 1 h,冷却后取出)。

(2)富集及解脱:将(1)的滤液缓慢通过交换柱,滤液流尽后,先用 10 mL 4 mol/L HCl 洗涤柱体,再用蒸馏水洗至中性,然后用 20 mL 金解脱液,缓慢通过交换柱以洗脱金。

(3)比色分析:以上解脱液用 50 mL 容量瓶承接,然后加入 3.0 mL 缓冲溶液,2 mL SDS,4 mL TMK,用水稀释至刻度,摇匀,放置 30 min,于 545 nm 波长处以 2 cm 比色皿用 72 型光电分光光度计测吸光度。

(4)重复使用:洗脱完全的色层柱,可用蒸馏水洗至中性,再用 10%的王水平衡,即可使用。如此反复至少使用 15 次左右。

(5)绘制标准曲线:首先测定溶液吸光度-波长

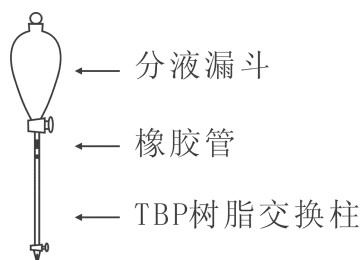


图 1 金的分离富集装置

Fig.1 Apparatus of gold removal and concentration

曲线以找到最佳工作波长(图 2)。再将一定量金标准液,按上述方法分析测出吸光度,作出标准曲线(图 3)。

由图 2 可选定 $\lambda = 545\text{nm}$ 为工作波长。

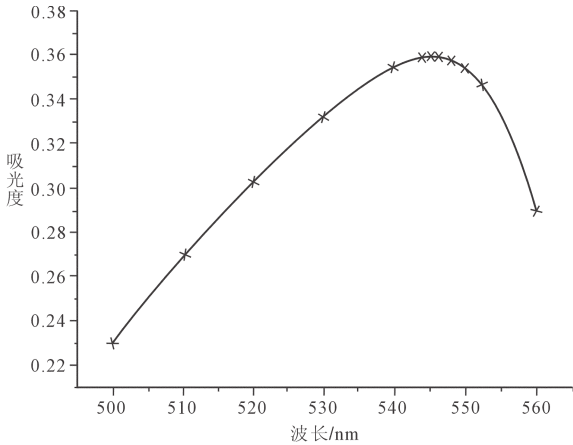


图 2 Au-TMK 体系吸光度曲线
($8 \times 10^{-6}\text{Au}$, 2cm 比色皿)

Fig.2 Absorbance curve of the Au-TMK system
($8 \mu\text{g Au}$; 2 cm colorimetric utensil)

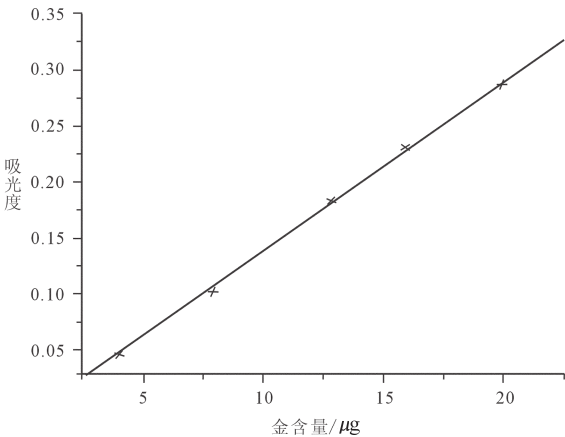


图 3 Au 含量工作曲线
(波长 545 nm, 2 cm 比色皿)

Fig.3 Working curve of the Au content
($\lambda = 545\text{ nm}$; 2 cm colorimetric utensil)

2 细菌培养及浸出矿石

采用旋转摇床振荡法培养细菌和氧化含金硫铁矿。用于 250 mL 洁净锥形瓶,按矿浆浓度 10%~20% 加入试剂,盛入改进的 3 L 培养基 80 mL,再用 1:1 H_2SO_4 调 pH 至 1.8~2.3, 再按接种量的 20% 加入活

化菌液,然后于摇床上培养。如此,细菌一面生长繁殖,一面将矿石逐步氧化。

2.1 氰化提金

本实验采用静置提取的方法。先将细菌浸出处理后的矿石用饱和石灰水浸泡一天使 pH 稳定在 11~12 后,再按矿量:0.9%NaCN 溶液=1:1.5(重量比)的比例加入氰化钠溶液,然后用蒸馏水将溶液稀释 5 倍。浸出时间 4~5 d,其间应保持溶液 pH>11,若 pH 变小可酌量加入 CaO 固体粉末调节。浸取结束后分离浸出液和残渣。

对浸出液,先稀释后按一定比例定量取出进行 1.3 的方法测定金含量;对残渣,需先全部溶矿之后,再将溶矿后溶液稀释取样分析,由此可算出浸取率。

用上述方法,测得 200 目该金矿含金量为 45.9%。

2.2 筛选菌种

本实验所选 D3 和 951 菌种,目视脱硫效果都相当明显,在培养 2~3 d 后,已经明显使矿石变黑,且使上层溶液变成淡红色(Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+}),为了定量比较二者处理效果及提高氰化浸出率的作用,做了 D3、951 及空白三组细菌处理-氰化提金条件平行实验(表 2)。

表 2 细菌处理矿石效果对比
Table 2 Comparison of the effects of bacteria treatment of ore

| 菌种 | D3 | 951 | 空白 |
|-----|-------|-------|-------|
| 浸出率 | 71.0% | 57.4% | 45.1% |

条件:第三代菌种,处理时间 10 d,氰化浸取时间 5 天,浸取液 NaCN 浓度 0.18%。

结果表明 D3 菌种的处理效果最好,由此选出 D3 菌种作为下一步实验的工作菌种。

该实验的目的在于尽早筛选出工作菌种以利下一步实验,因此选用了活性并不太高的第三代菌种,而且增加了处理时间,其结果是相对的。即使是这样,D3 菌种也显现了可观的应用潜力。可以预期,随着细菌的不断适应繁殖,其活性将越来越强,处理效果会更好。

2.3 浸取率与矿石粒度的关系

无论是细菌处理,还是氰化浸出,其实质都是表面作用过程,所以处理结果必将与矿石粒度有关,下面以 6 种粒度的遵化滑石峪金矿作平行处理实验,

包括有菌处理和无菌对照实验,以确定实际生产中的最佳粒度。

条件:第五代菌种,处理时间 5 d,氰化浸取时间 5 d,NaCN 浓度 0.18%。

从实验结果(图 4)可以看出,浸取率是随着粒度减小,即目数增大而增大的。到 200 目时,细菌处理后的矿石提金率已提高到接近 90%,而且当目数大于 100 目时,浸取率提高坡度变缓,一般说来,100 目以后的矿石经细菌处理后浸取率都能提高 20%以上,而粒度较大的矿石,浸取率也普遍能提高 10%以上。

随着目数增加,处理原矿的成本也会增加,由实验结果可以看出,在目数 > 100 目,氰化浸取率提高幅度基本稳定,因此,粉碎原矿至 200 目左右已经足够。

2.4 pH 随时间的变化

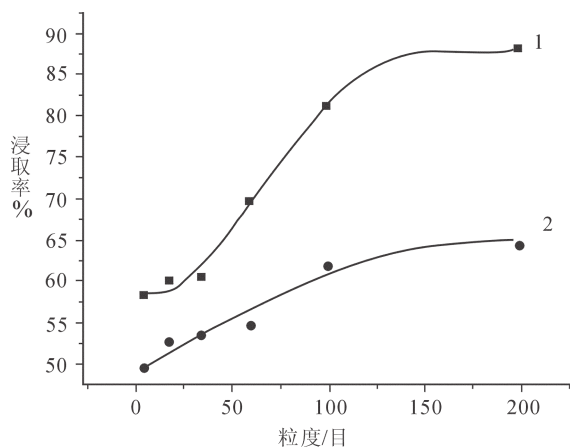


图 4 浸取率与矿石粒度的关系

1—经过细菌预处理;2—未经过细菌预处理

Fig.4 Relation of the rate of extraction to the grain size of ore

1-Test group (after bacteria pretreatment);

2-Contrast group (with no bacteria pretreatment)

从实验的 pH 条件可以看出,实验所用菌种在酸性条件下具有很高的活性,为了进一步分析该细菌浸矿过程中的机理,作了 pH 与时间关系的测定实验(图 5)。

条件:静置处理。

两种粒度的矿石在细菌处理过程中,pH 值的变化过程存在差异与其反应速率不同有关。可以看出,尽管 100 目的矿石反应速率在前期较快,但后期与 200 目的矿石变化速率相近,而后的 pH 比前者小,因而处理效果要比 100 目的好。

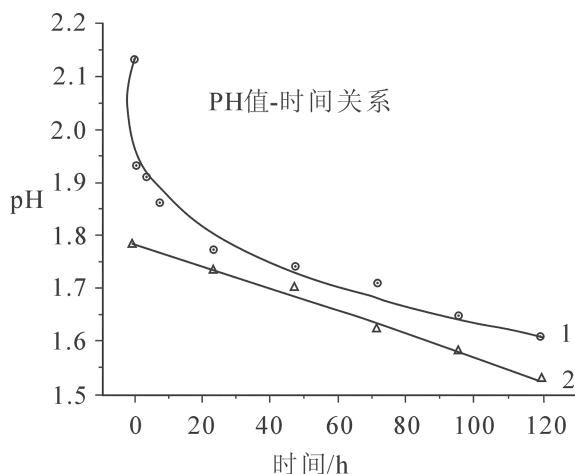


图 5 细菌处理过程中 pH 值-时间关系

Fig.5 Diagram of pH vs. time during bacteria treatment

由于 pH 值随时间增加而不断减小,支持了间接氧化机理的解释,同时反应过程中细菌不断产生的 H_2SO_4 在局部的高浓度也使矿石加速溶解,从而暴露出其包裹的金。另外,当 pH 达 1.3 左右时,即 $[H^+]=0.05 \text{ mol/L}$ 时,细菌仍有很高的活性,也充分说明了该菌的耐酸性。

2.5 浸取方式的影响

由于前面的实验均采用静置氰化浸取的方法,而浸取提金率的高低,取决于浸取液与暴露的金颗粒的表面接触状况以及氧气在浸取液中的浓度。裘荣庆^[7]认为,影响金氰化浸出的因素有:氰化物及氧浓度、矿浆的温度、矿石中金粒的大小和形状、矿浆的浓度和矿泥的含量、在金粒表面形成的薄膜及浸出的时间。

资料表明^[13]浸出作业当氰化物浓度大于 0.03% 时,金溶解速度主要由矿浆中溶解氧浓度决定。若采用振荡、通空气等手段,可以加强 CN^- 与 Au 的接触和提高 O_2 浓度,从而提高浸取率(表 3)。此方法对实际工作有着直接的指导意义。

条件:第五代菌种,细菌处理 3 d,氰化浸取(振

表 3 物理手段强化后的提金效果

Table 3 Effect of gold extraction after the physical means is reinforced

| 试样 | 细菌处理 | 无菌对照 |
|-----|-------|-------|
| 浸取率 | 90.3% | 70.5% |

摇)4 d,浸取液中 NaCN 浓度为 0.18%。

实验结果表明,与前面的数据比较,100 目含金矿石的提金率在有菌及无菌的情况下分别提高了约 9%,这说明通过物理方法强化,提高氧浓度和增大固液接触表面积,的确可以提高金的浸出率。

3 结 论

本次实验研究了氧化亚铁硫杆菌在生物湿法冶金中对金矿的预处理应用。主要进行了选菌、pH 值变化及粒度、物理强化方式的影响等研究工作。综合分析实验结果,得出以下结论:

(1)D3 菌种具有显著的提高金的浸取率的作用,在矿石粒度足够小时,即目数大于 100 目时,提金率从不到 70%提高到接近 90%;

(2)D3 菌种处理含金黄铁矿时,属于间接氧化机制,即产生局部高浓度的 H^+ 以促进矿石溶解;

(3)矿石粒度大小直接影响金矿的细菌处理效果和氰化提金效果,操作中应控制粒度目数 >100 目为宜;

(4)物理方法(提高氧浓度和加强矿液接触)可以加强氰化提金效果,在实际工业生产中,采用常规方法如搅拌、通空气等就可大幅度提高浸取率;

(5)初步估算工业效益:该矿金含量约 50 g/t,按提金率提高 20%计,以中等规模矿床(产矿 10 万 t)估算,可增产金 100 万 g,以每克黄金 100 元人民币计算,增加了约一亿元的利润,经济效益是巨大的。

4 建 议

本实验完成了选菌、机理推测、粒度条件等初步研究,但与实际工业应用尚有很长的距离,对机理的探讨还不够深入,建议从以下几个方面开展进一步的研究工作:

(1)用数学手段对细菌浸矿机理作精确拟合;

(2)探讨其他条件对细菌浸出效果的影响,如 pH 值、温度、离子浓度等;

(3)扩大试验规模,并进一步估算应用细菌浸矿于工业生产的成本和效益影响。

参 考 文 献 (References):

- [1] 肖松文,梁经冬,邱良邦. 贵金属提取冶金的过去、现在和将来[J]. 国外金属矿选矿, 1993, (10):5-8, 13.
Xiao Songwen, Liang Jingdong, Qiu Liangbang. Noble metal draw

- metallurgy pass, now and future [J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 1993, (10): 5-8, 13(in Chinese).
- [2] 中国科学院化工冶金研究所编译,黄金提取技术[M]. 北京:北京大学出版社, 1991:1-343.
Chemical Metallurgical Research Institute of the Chinese Academy of Sciences. *Gold Extraction Technology* [M]. Beijing:Peiking University Press. 1991:1-343(in Chinese).
- [3] 裴荣庆,蔡文六,刘乃忠,等. 含金硫化矿石的细菌氧化预处理[J]. 黄金科学技术, 1994, 2(2), 34-42.
Qiu Rongqing, Cai Wenliu, Liu Naizhong, et al. Contain the germ oxidize pretreatment of golden vulcanization ore [J]. *Gold Science and Technology*, 1994, 2(2), 34-42(in Chinese).
- [4] 田晓娟,杜德平,王艳,等. 解磷菌分离及其对内蒙古布龙图低品位磷矿利用研究[J]. 地球学报, 2007, 28(4):377-381.
Tian Xiaojuan, Du Deping, Wang Yan, et al. Isolation of phosphate solubilizing bacteria and study on its utilization for low grade phosphorus rocks in Bulongtu Area, Inner Mongolia [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(4):377-381 (in Chinese with English abstract).
- [5] 马荣骏. 湿法冶金新发展[J]. 湿法冶金, 2007, 26(1):1-12.
Ma Rongjun. New development of hydrometallurgy [J]. *Hydrometallurgy of China*, 2007, 26 (1):1-12 (in Chinese with English abstract).
- [6] 杨丽丽,杨洪英,范有静. 难处理金矿石细菌氧化的影响因素研究[J]. 贵金属, 2007, 28(1):58-62.
Yang Lili, Yang Hongying, Fan Youjing. Study on influencing factors of bacterial oxidation of refractory gold ores [J]. *Precious Metals*. 2007, 28(1), 58-62(in Chinese with English abstract).
- [7] 裴荣庆. 微生物冶金的研究和应用现状 [J]. 微生物学通报, 1995, 22(3), 180-183.
Qiu Rongqing. Progress of research on biologic metallurgy and its application[J]. *Microbiology*, 1995, 22(3):180-183(in Chinese).
- [8] 马巧霞. 黄金回收 600 问[M]. 北京:科学技术文献出版社,1992:1-647.
Ma Qiaogu. *Gold Recovery 600 Asks* [M]. Beijing:Scientific and Technical Documents Publishing House 1992:1-647(in Chinese).
- [9] D. 内斯托. 用氧化亚铁硫杆菌生物浸出难处理金矿物的机理[J]. 国外金属矿选矿, 2001, 11:10-14.
Nestor D. Soak hard to get along with reason with oxidize inferior iron sulphur bacillus biology the mechanism of golden mineral [J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*. 2001, 11:10-14.
- [10] 张春生,刘刚. 谈谈湿法冶金新技术在矿产资源开发中的应用 [J]. 有色金属设计, 2006, 33(4):6-9.
Zhang Chunsheng, Liu Gang. Application of new hydrometallurgical technology in the development of mineral resouruces [J]. *Nonferrous Metals Design*. 2006, 33(4):6-9(in Chinese with English abstract).
- [11] 石威,汪炳武. 金的快速分离富集研究 [J]. 冶金分析, 1994, 14 (4):7-9.
Shi Wei, Wang Bingwu. Study on the method of high separation and Preconcentration of Gold [J]. *Metallurgical Analysis*. 1994, 14

- (4):7-9(in Chinese).
- [12] 薛光. 金的分析化学[M]. 北京:宇航出版社, 1990:1-597.
Xue Guang. Analytic Chemistry of Gold [M]. Beijing:Aerospace Publishing House, 1990:1-597(in Chinese).
- [13] 岩石矿物分析编写组. 岩石矿物分析(第三版)[M]. 北京:地质出版社, 1991:845.
Rock and Mineral Analysis Compilation Team. Rock and Mineral Analysis (3rd edition) [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1991:845(in Chinese).
- [14] 刘志亮. 加大浸出充气量稳定金浸出率 [J]. 黄金, 1996, 17(8): 45-46.
Liu Zhiliang. Stallizing the leaching rate by increasing leaching gas [J]. Gold, 1996,17(8):45-46(in Chinese).
- [15] 向兰. 生物湿法冶金的研究与应用 [J]. 化工冶金, 1990, 11(3): 276-282.
Xiang Lan. Study and Application of Bio-hydrometallurgy [J]. Chemistry & Metallurgy, 1990, 11(3.):276-282(in Chinese).
- [16] F. 哈伯斯. 湿法冶金-提取冶金原理(第二卷)[M]. 冶金工业出版社, 1975:105.
F. Harbors. Hydrometallurgy Extraction Metallurgical Principle (second volume) [M]. Metallurgical Industrial Press, 1975:105 (in Chinese).
- [17] 向兰, 裘荣庆. 含砷金矿石细菌预氧化-氰化提金的渗滤柱浸研究[J]. 黄金, 1994, 15(3):30-34.
Xiang Lan, Qiu Rongqing. Biooxidaton and cyanidation of arsenic-bearing gold ore in percolation columns[J]. Gold, 1994, 15 (3):30-34(in Chinese).

Bacterial leaching of refractory gold ore

TIAN Xiao-juan¹, DU De-ping¹, PENG Li-e², LI Xing-hong²

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. School of Molecules and Chemical Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The leaching pretreatment of refractory gold ores by bacteria has advantages of lower operating costs, less environmental pollution and higher efficiency of treatment. So it is considered to be a promising effective method for pretreatment of refractory gold ores. In this study, samples were taken from the Huashiyou gold deposit, Zunhua, Hebei. The samples are refractory ore, a kind of pyrite containing gold. Several strains of *Thiobacillus ferrooxidans* were used in pretreatment of the samples. Among those, D3 strain was found to decompose sulfide ores effectively. If the size of the ore is 200-mesh, the cyanidation rate of gold rises from 63.9 (without biooxidation) to 88.2% (after biooxidation). For gold ore with a grain size < 100 mesh, the cyanidation rate of gold may also generally rises >10%. In addition, some conditional experiments for the process of treatment of gold ore by this strain were also performed; for example, the size influence, pH change and strengthening of the physical method were studied. Some rules in the biooxidation process of gold ore and the optimum controlling conditions during practical operations were obtained from the experimental results.

Key words: hydrometallurgy; bacterial leaching; pretreatment of refractory gold ore

About the first author: TIAN Xiao-juan, female, born 1954, associate senior researcher, mainly engages in rock and mineral analysis and geochemical research; E-mail: chenycugb@126.com.

2006 年度地质、地球科学类期刊前 40 名影响因子排序表

| 序次 | 期刊名称 | 影响因子 | 序次 | 期刊名称 | 影响因子 |
|----|-------------|--------------|----|-------------|-------|
| 1 | 岩石学报 | 2.649 | 21 | 地球科学 | 1.023 |
| 2 | 地质学报 | 2.326 | 22 | 岩石矿物学杂志 | 0.867 |
| 3 | 地质科学 | 2.212 | 23 | 地球学报 | 0.776 |
| 4 | 中国科学(D 辑) | 2.062 | 24 | 矿物岩石地球化学通报 | 0.758 |
| 5 | 大地构造与成矿学 | 1.906 | 25 | 西北地质 | 0.681 |
| 6 | 中国地质 | 1.576 | 26 | 沉积与特提斯地质 | 0.676 |
| 7 | 地质论评 | 1.495 | 27 | 吉林大学学报地球科学版 | 0.667 |
| 8 | 地球化学 | 1.487 | 28 | 铀矿地质 | 0.667 |
| 9 | 第四纪研究 | 1.478 | 29 | 地层学杂志 | 0.641 |
| 10 | 地学前缘 | 1.447 | 30 | 中国岩溶 | 0.636 |
| 11 | 地质通报 | 1.398 | 31 | 地质力学学报 | 0.630 |
| 12 | 高校地质学报 | 1.388 | 32 | 矿物岩石 | 0.603 |
| 13 | 工程地质学报 | 1.374 | 33 | 地球科学与环境学报 | 0.598 |
| 14 | 石油实验地质 | 1.371 | 34 | 海洋地质与第四纪地质 | 0.513 |
| 15 | 古地理学报 | 1.311 | 35 | 地质与勘探 | 0.500 |
| 16 | 天然气地球科学 | 1.243 | 36 | 地球与环境 | 0.448 |
| 17 | 矿床地质 | 1.213 | 37 | 地质科技情报 | 0.421 |
| 18 | 现代地质 | 1.191 | 38 | 世界地质 | 0.404 |
| 19 | 沉积学报 | 1.142 | 39 | 新疆地质 | 0.403 |
| 20 | 地球科学进展 | 1.105 | 40 | 水文地质工程地质 | 0.391 |

注:表中数据引自中国科学技术信息研究所编《2007 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》,北京:科学技术文献出版社。