

(内部参考资料)

# 微生物湿法冶金

《铀与金》编辑部

一九九七年九月

# 微生物湿法冶金

(内部参考资料)

# 前 言

微生物氧化提取金属新工艺已成为从低品位、难处理矿石提取金、铀、铜、镍、钼、锌等有价值金属的具有明显的经济效益及环保效益的先进技术,在世界各地迅速得到了推广应用和完善提高。为了满足我国日益发展中的核工业及金属工业部门提取有用金属,促进国民经济建设发展的需要,《铀与金》编辑部搜集资料,译编了《微生物湿法冶金》一书,作为内部参考资料,介绍微生物湿法冶金技术,以供核工业及金属工业的生产、科研、设计、地勘、教学及管理部的科技人员及管理人员学习、参考和应用。本书包括两部分:第一部分为矿物细菌氧化提取金属,系统地叙述了应用细菌氧化技术,经济有效地提取有价金属的理论和实践。第二部分汇编了一批在科研及生产中实际应用的有关细菌氧化浸出金属的文章,供读者用以与第一部分的内容相互对比融通,以便增强对微生物氧化技术的理解和应用能力。

参与第一部分《矿物细菌氧化提取金属》的译者有王 鉴(第1、2、3章),李大玲(第4、9章),孙 宇(第5章),曾树凡(第6、7、8章)。参与第二部分《微生物湿法冶金文集》的译者有王 鉴、禄福延、曾树凡、李大玲、范家骏、张登福、赵 敏等。全书由王 鉴总校审,由陈星煜、王瑞琛、李大玲、甘日英编辑。

限于我们的技术水平和外语水平,错误之处在所难免,希请专家、读者斧正。

《铀与金》编辑部

一九九七年九月

# 第一部分 矿物细菌氧化提取金属

## 第二部分 微生物湿法冶金文集

# 目 录

## 第一部分: 矿物细菌氧化提取金属

第一章 绪论 .....	(1)
1.1 金属的提取 .....	(1)
1.2 难处理金及焙烧 .....	(1)
1.3 可用焙烧法提取的其他金属 .....	(1)
1.4 替代焙烧的其他方法 .....	(1)
1.5 砷黄铁矿的细菌催化氧化与焙烧及加压氧化的比较 .....	(2)
1.6 细菌氧化介绍 .....	(2)
1.7 细菌介绍 .....	(3)
1.8 本书提要 .....	(4)
1.9 参考文献 .....	(5)
第二章 潜在的可处理矿物 .....	(6)
2.1 导言 .....	(6)
2.1.1 细菌氧化反应分类 .....	(6)
2.1.2 实现细菌氧化反应的方法 .....	(6)
2.2 一些金属的世界生产量 .....	(8)
2.2.1 金 .....	(9)
2.2.2 银 .....	(12)
2.2.3 钴 .....	(12)
2.2.4 铀 .....	(13)
2.2.5 镍 .....	(14)
2.2.6 钼 .....	(15)
2.2.7 锡 .....	(15)
2.2.8 铜 .....	(16)
2.2.9 铋 .....	(17)
2.2.10 锌 .....	(17)
2.2.11 铅 .....	(18)
2.3 结论 .....	(18)
2.4 潜在的可处理元素的分类 .....	(19)
2.4.1 地球化学分类 .....	(19)
2.4.2 化学的分类 .....	(20)
2.5 参考文献 .....	(23)
第三章 起催化作用的细菌 .....	(25)
3.1 导言 .....	(25)

3.2	普通微生物学	(25)
3.2.1	细胞壁	(26)
3.2.2	细胞质膜	(26)
3.2.3	细胞质	(27)
3.2.4	包膜及粘质套	(27)
3.2.5	细菌物种分类	(27)
3.2.6	矿质化学自养菌的新陈代谢作用	(27)
3.3	细菌的特性	(28)
3.3.1	硫杆菌属	(28)
3.3.2	微螺菌属	(31)
3.3.3	中等嗜热细菌	(33)
3.3.4	嗜热嗜酸原生菌	(35)
3.3.5	细菌的脱氧核糖核酸的鸟嘌呤及细胞嘧啶含量	(36)
3.4	细菌的催化活度	(36)
3.4.1	细菌与表面的相互作用	(37)
3.4.2	影响反应速率的因素	(40)
3.4.3	细菌生长特征	(40)
3.4.4	结论	(41)
3.5	金属的毒性效应	(41)
3.6	混合培养基	(43)
3.6.1	矿石中微生物分布范围	(43)
3.6.2	微生物之间相互作用的机理	(43)
3.7	细菌培养基的分离	(44)
3.7.1	分离程序	(44)
3.7.2	次级培养程序	(46)
3.7.3	纯培养物的分离	(46)
3.7.4	培养物的保养及储存	(46)
3.8	参考文献	(46)
<b>第四章 细菌氧化反应的化学</b>		(49)
4.1	引言	(49)
4.2	pH 值测定的概况	(49)
4.3	物种形成	(51)
4.3.1	硫酸溶液中硫(VI)的物种形成	(51)
4.3.2	砷(III)	(52)
4.3.3	砷(V)	(52)
4.3.4	铁(II)	(54)
4.3.5	铁(III)	(55)
4.3.6	其他可溶金属	(63)

4.4	化学方程式	(63)
4.5	电极电位	(64)
4.5.1	氧的氧化能力	(64)
4.5.2	铁(III)的氧化能力	(64)
4.6	矿物氧化的热力学	(66)
4.6.1	黄铁矿的氧化	(66)
4.6.2	黄铜矿的氧化	(66)
4.6.3	砷黄铁矿的氧化	(67)
4.6.4	砷(III)氧化成砷(V)	(68)
4.6.5	热力学结论	(69)
4.7	化学氧化	(69)
4.7.1	黄铜矿的化学溶解	(69)
4.7.2	黄铁矿和砷黄铁矿的化学溶解	(69)
4.8	参考文献	(70)
<b>第五章 细菌氧化的一般机理</b>		<b>(71)</b>
5.1	引言	(71)
5.2	过去的一些机械的结论	(71)
5.3	细菌氧化反应的机理	(72)
5.3.1	一些机械的原理的引论	(72)
5.3.2	细菌氧化的机理	(73)
5.3.3	黄铁矿或砷黄铁矿精矿生物氧化一般机理的推导	(75)
5.3.4	有关机理的结论	(80)
5.4	推论性预测	(82)
5.4.1	pH	(82)
5.4.2	铁(III)浓度	(83)
5.4.3	砷(V)浓度	(83)
5.4.4	砷(III)浓度	(83)
5.4.5	铁(II)浓度	(83)
5.4.6	电极电位	(84)
5.4.7	矿浆密度	(84)
5.4.8	细菌密度	(84)
5.5	参考文献	(84)
<b>第六章 细菌氧化技术的应用</b>		<b>(86)</b>
6.1	前言	(86)
6.2	基本操作条件	(86)
6.2.1	硫化物物料参数	(86)



6.2.2	充气	(88)
6.2.3	酸度	(88)
6.2.4	温度	(88)
6.2.5	营养素	(89)
6.2.6	培养物生长	(89)
6.3	细菌氧化的方法	(90)
6.3.1	搅拌反应器	(90)
6.3.2	原矿堆浸	(93)
6.3.3	废矿堆浸	(97)
6.3.4	槽浸	(98)
6.3.5	矿体的原地浸出	(99)
6.4	工艺方法实例	(100)
6.4.1	反应器浸出	(100)
6.4.2	原矿堆浸	(100)
6.4.3	槽浸	(100)
6.4.4	废矿堆浸	(100)
6.4.5	原地浸出	(100)
6.5	参考文献	(101)
<b>第七章</b>	<b>产品和废液处理</b>	<b>(102)</b>
7.1	细菌氧化反应的产物	(102)
7.2	有价金属的回收	(102)
7.2.1	解离金的回收	(102)
7.2.2	被溶解的有价金属的回收	(102)
7.2.3	从固态残渣中回收有价金属	(103)
7.3	水废液的净化	(103)
7.4	矿物学的与热力学技术特性	(103)
7.4.1	含有铁(III)和/或硫(VI)的化合物	(104)
7.4.2	含铁(III)与砷(V)和/或硫(VI)的化合物	(105)
7.4.3	体现最大的热力学稳定性的可能化合物	(108)
7.5	沉淀物稳定度的理论模型	(108)
7.6	沉淀固体的实验研究	(109)
7.7	结论	(110)
7.8	参考文献	(111)
<b>第八章</b>	<b>经济因素</b>	<b>(112)</b>
8.1	前言	(112)
8.2	基建费用	(112)
8.2.1	主要的设备	(112)

8.2.2	建设器材	(112)
8.2.3	辅助设施	(113)
8.3	生产费用	(113)
8.4	细菌氧化作业的费用	(115)
8.5	参考文献	(117)
<b>第九章</b>	<b>分析方法</b>	<b>(118)</b>
9.1	前言	(118)
9.2	元素的总浓度	(118)
9.2.1	原子吸收光谱: 火焰法及电加热法	(118)
9.2.2	原子发射光谱法	(119)
9.2.3	感应耦合等离子体质谱法	(119)
9.3	特殊化学物质的测量方法	(119)
9.3.1	pH 的测量	(119)
9.3.2	极谱法	(121)
9.3.3	紫外光和可见光方法, 包括比色测量法	(121)
9.3.4	离子色谱	(121)
9.3.5	金的分析	(121)
9.4	生物体的测量	(122)
9.4.1	一般评论: 在矿物上和不在矿物上的生物体的测量	(122)
9.4.2	蛋白质分析	(122)
9.4.3	自由细胞与矿物结合细胞间、生长中细菌与非生长中 细菌间的区分	(122)
9.5	参考文献	(123)

## 第二部分: 微生物湿法冶金文集

1.	提高各种硫化物浓度对氧化铁硫杆菌群体生长变化的影响	(124)
2.	用细菌细胞从废液中除汞及铀	(127)
3.	砷黄铁矿中的可溶金	(131)
4.	在薄矿堆的生物氧化中扩散受限制的充气	(137)
5.	硫脲——金、银提取的可替换浸出剂	(142)
6.	活性炭的吸附特性	(154)
7.	含金硫化矿精矿的细菌氧化	(159)
8.	嗜酸细菌在难处理含金和贱金属硫化矿精矿加工及环境保护中的应用	(163)

9. 对土耳其含砷金矿石常规氰化法的生物氧化预处理研究的因子实验 .....	(168)
10. 尤恩米金矿细菌氧化厂的中试、设计和试运转 .....	(176)
11. 从难处理硫化物-碳质矿石回收金 .....	(180)
12. 难处理含金黄铁矿的两段细菌浸出 .....	(192)
13. 印度 Malanjkhand 贫硫化矿的微生物生态学与细菌浸出状况 .....	(198)
14. 混合硫化物生物浸出中的电偶作用 .....	(203)
15. 含铂族金属之转炉冰铜的微生物浸出 .....	(208)
<b>附录 1</b> 科技术语英汉对照 .....	(214)
<b>附录 2</b> 矿物名英汉对照 .....	(221)
<b>附录 3</b> 地名、人名、机构名英汉对照 .....	(223)

# 第一章 绪 论

## 1.1 金属的提取

不断提取金属以支持现代化生产技术,这对工业、经济、环境及社会都是极为重要的。现在,在矿石开采及金属提取中必须对环境问题给予更多的关注,这已经为人们所接受。有必要进一步研制出能允许更有效地应用低品位矿石的,以及研制出能处理常规提取技术难于处理的矿石新工艺。这样的进步在进入 21 世纪后,确保有各种金属可资利用极为必要。

本书的中心主题是金属提取新的细菌氧化方法的应用。这些方法给开发经济的、能源有效性的、无污染的工艺提供了机会,本章对这些方法予以概述,并对可利用细菌氧化处理的矿石予以说明。这些矿石通常含有硫化物(或是含有黄铁矿夹杂物),而按常规是在金属提取以前用焙烧方法作为预处理手段。虽然在历史上,在铜的提取中第一次应用了细菌催化氧化的工艺,但是把这种工艺用来游离出难处理矿石中的金的注意力成为促进研究工作的动力,这一种推动力又导致了该工艺的更广泛的应用。

## 1.2 难处理金及焙烧

金以元素状态自然产出。如果金的粒度小(直径在 - 50 微米范围),由于被砷黄铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿及黄铜矿等矿物包裹,它们就可能成为难处理的金属。这种包裹妨碍了氰化法的有效应用。氰化法是回收金属的常规方法。包裹矿物在金属及氰化钠溶液之间形成一个不渗透的实际屏障。氰化钠溶液与作为氧化剂的溶解的大气氧一起,通常能溶解金和银并使它们有效地回收。难处理矿石及精矿的传统处理法是焙烧它们以便游离出金属,氧化剂是大气氧。焙烧工艺使矿物中的硫被氧化成气态二氧化硫。任何的砷成分被氧化成砷(III)氧化物  $As_2O_3$ ,而铁成分被氧化成铁(III)氧化物  $Fe_2O_3$ 。在气态砷(III)氧化物中含有  $As_4O_6$  分子。为了必不可少的环境保护而控制砷(III)氧化物的产出成为处理费用提高的原因。防止二氧化硫对大气的污染及其可能变成酸雨也是增加工艺费用的主要原因。焙烧方法会因为硅酸盐对金和银的再包裹而变得无效。

## 1.3 可用焙烧法提取的其他金属

许多种金属成为硫化矿产出,通常是用焙烧矿石或精矿的办法来提取。生产这些金属(包括铜、锌、镍、钴、锑、锡、铅、铋及钼)存在着从气态排出物除去二氧化硫及砷(III)氧化物的相关问题。

## 1.4 替代焙烧的其他方法

氧化各种矿物的其他化学方法包括:(1)高压及高温气态氧(加压氧化)氧化;(2)氯气氧化;(3)硝酸氧化;及(4)硫酸氧化。但所有这些方法都受到工厂复杂性及无竞争的经济性的困扰。

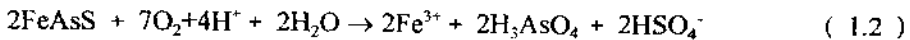
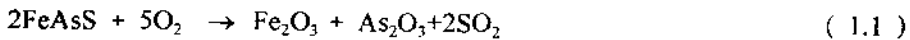
经过满负荷运转的工厂所证实的化学方法的例子是加压氧化法。这种方法应用从液态氧提供的氧的高压(一般为 20 大气压),在高温(200 °C)条件下,来促进相应的氧化作用。在此

情况下,溶液产品是硫酸、砷(V)酸  $H_3AsO_4$  及铁(III)离子。这一工艺过程不产生大气污染物,而面临着可替代的细菌氧化方法所具有的废液问题。加压氧化法的严格条件需要高标准的工厂设计及物料。早期投产的工厂承受着泵、阀、叶轮、管道、衬垫,以及高压釜衬砖损坏的危害。

本书主题是矿物的细菌氧化,包括使用适当的细菌来催化反应。在所有情况下,氧化剂是大气氧,反应式与加压氧化的相同。在某些反应中,铁(III)用作氧化剂,但它的还原产物铁(II)会被氧再氧化。

## 1.5 砷黄铁矿的细菌催化氧化与焙烧及加压氧化的比较

以砷黄铁矿  $FeAsS$  的氧化为例,应用焙烧或加压氧化及细菌氧化时,代表氧化的化学反应式分别如下:



反应式(1.1)在  $600\text{ }^\circ\text{C}$  至  $800\text{ }^\circ\text{C}$  范围发生,且在一般的 8 小时停留时间内反应十分快速。反应式(1.2)在加压氧化时发生于  $\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$  及  $\sim 20$  大气压(停留时间在 2 至 4 小时)。在细菌氧化时,由于细菌的催化效应,反应式(1.2)发生于  $30\text{ }^\circ\text{C}$  至  $55\text{ }^\circ\text{C}$  及常压(停留时间 4 至 6 天)。催化剂通常在很低的浓度起作用,所有细菌对此均无例外。在操作系统中观察到的细菌密度为每毫升  $10^{10}$  细胞的数量级( $10^{13}$  细胞/升)。把细菌细胞视作一个巨大的分子集合物,一个容模浓度将含有每升  $6 \times 10^{23}$  细胞(根据阿伏伽德罗数)。所以操作密度相当于含有约  $1.7 \times 10^{11}$  细胞的容模溶液。这样极低的浓度是所期望的催化物质的典型。上述化学反应的详细内容将在第四章充分讨论。

## 1.6 细菌氧化介绍

从难处理矿石及精矿游离出金(及任何银含量)的细菌氧化的应用形成了快速发展的生产技术的基础。硫化矿矿石的细菌氧化是自然地发生的,且是矿坑水呈酸性的主要原因。1991 年在英国康瓦尔关闭的回尔珍锡矿山产生了流入发尔河的严重的细菌溶解的毒性金属流出物。在矿山不再用泵排水以保持矿坑干燥的情况下,就导致了酸性排泄水积蓄并最后流到周围环境中去。

细菌氧化是在硫化矿铜矿床中引人注目的铜的溶解的主要原因,该工艺被称做罗曼司工艺,目前已被用于铜的商业生产(如在美国毕斯比及宾汉峡谷诸矿山)。直到 1947 年被叫做氧化铁硫杆菌从酸性矿坑水中分离出来后应用细菌的加工工艺才得到推广。

1986 年哈钦斯等人曾出版了细菌浸出综述的文章。1989 年休斯及普尔的一本书包含着标题为“金属、微生物及生物工艺学”的章节,描述有关主题的一般处理方法。1990 年罗西的一本书论及微生物湿法冶金学的各个方面并附有大量的参考文献。1988 年卡拉威柯等人编辑的一本书也完全论述了生物湿法冶金。1990 年伊尔里奇及贝莱尔雷编辑的一本书包含有诺里斯、托维能、劳伦斯与麦克纳尔特、及汤普森所写的与主题有关的章节。1985 年及

1990年分别由卡拉威柯与格罗德夫及卡拉威柯等编辑的两次国际会议的论文集专门论述“微生物湿法冶金的现状”及“从矿石用废矿堆浸及地下细菌浸出提取金属”。每逢奇数年召开的国际学术讨论会的两年一次生物湿法冶金丛书的论文集是一本有用的信息源及有关主题各个方面的论述。细菌氧化工艺是兰道尔黄金论坛的每年出版的论文集的特色。

除了用于从难处理矿石及精矿游离出金外,细菌氧化法还有另外的两个用途。第一个是从金属的硫化矿矿石及(或)精矿溶解金属,第二个是利用铁及硫化矿矿物的细菌氧化的产物,即液相铁(III)及硫酸来从氧化物矿石溶解金属。第一用途可从辉砷钴矿溶解钴,从镍黄铁矿溶解镍,从辉钼矿溶解钼,从黄锡矿溶解锡,从黄铜矿、辉铜矿及铜蓝溶解铜,从辉铋矿溶解铋,以及从闪锌矿溶解锌。

第二个用途可从沥青铀矿溶解铀。在矿物矿床中几乎普遍存在的黄铁矿使两种效果的区分发生困难。极大可能是,黄铁矿的细菌氧化产物铁(III)在称为非铁(有色金属)硫化矿的氧化中产生一项重要的中介作用。这一点将在第五章的工艺机理讨论中评述。

## 1.7 细菌介绍

在此介绍某些用作催化细菌的微生物学名词术语是有用的。能够催化矿物氧化反应的各种细菌被划分为矿质化学自养菌类(化学无机自养菌)(施莱格尔基础微生物学,1986)。矿质化能营养菌是具有能力通过氧化无机物质,如矿物,获得能量的一类细菌。而自养菌则是利用二氧化碳作为唯一碳源的一类细菌。本书所描述的是过着矿质化学自养学的严格生活的细菌。其中某些细菌是严格的矿质化学自养的(专性的矿质化学自养物,即它们必须是矿质化学自养物)。而其他的某些细菌,虽然它们能使有机化合物新陈代谢,但具有成为自养的附加功能(兼性自养菌),这取决于它们的特殊环境。异养性细菌是应用有机化合物作为它们的碳源的细菌。

通常,是按能有效地活动的温度范围进行细菌分类的。有4类温度范围宽的类别,见表1.1。嗜冷微生物有时称为低温微生物。嗜冷微生物对本书所研究的主题没有实际意义。在

表 1.1 按最佳温度范围的矿质化能营养菌分类

细菌类别	嗜冷微生物	嗜中温微生物	中等嗜热微生物	非常嗜热微生物
最佳温度范围 °C	<20	20~40	40~55	>55

嗜中温微生物中至少有3种对硫化矿及砷硫化矿矿物的氧化有适应性。研究和使用的最多的嗜中温微生物是氧化铁硫杆菌,氧化硫硫杆菌及氧化铁微螺菌。这3种菌是主要的矿质化学自养菌。中等嗜热微生物并不如嗜中温微生物得到充分描述,只有嗜热氧化硫磺杆菌属被命名(1978年戈洛瓦乔瓦及卡拉威柯)。其他的则于1977年由贝莱尔雷及勒罗克斯,于1987年由贝莱尔雷等及于1977年由勒罗克斯及马歇尔用代码标名为TH-1、TH-2及TH-3,或是于1987年由诺巴尔等标名为M4。磺杆菌及其他中等嗜热微生物是兼性的矿质化能营养物。非常嗜热微生物属于叶硫球菌或硫化裂片菌及双向酸酐菌属,两者是兼性矿质化能营养物。1973年由C.L.贝莱尔雷及J.A.贝莱尔雷,1974年由C.L.贝莱尔雷命名的贝莱尔雷双向酸酐菌有降解硫化矿矿物的本领。

所有的矿质化能营养菌被认为是专性的需氧菌,在其中作为最终电子接收器或氧化剂

的氧是必不可少的。有证据说明,在适合条件下,某些矿质化学自养物可能展现兼性的厌氧性质,它们通过应用铁(III)为氧化剂而获得能量。在实验室及工厂的条件下,除了氧及一种适当的硫化矿物质外,它们需要一种含有铵、镁、钙、钾、氯化物、硫酸盐、硝酸盐及磷酸盐离子的培养液(希尔维尔曼及朗德格林,1959)。在矿物物质中常常会含有一定量的锌及锰,它们通常不参与到反应体系中去。在自然条件下,除了供给氧及二氧化碳以催化矿物氧化反应外,细菌必须有上述的一种培养液源。

工业上用以从难处理矿石游离出金的极大多数培养液是诸种细菌型式的天然混合物。这种混合物展现出协同相互作用,这种作用促进了各组分的成长及提高了细菌氧化反应动力学。

嗜中温微生物及中等嗜热微生物形成了对难处理矿物的细菌氧化的中间规模及全规模工厂的试验及试生产的主要工作基础。重要的细菌及它们的特性将在第三章详细讨论。

图 1.1 显示了从世界不同地区的难处理精矿用氰化法提取金的回收率的 3 个例子。所列结果是从精矿的实验室试验得出的。其中澳大利亚精矿的数字已在中试厂规模得到进一步证实。

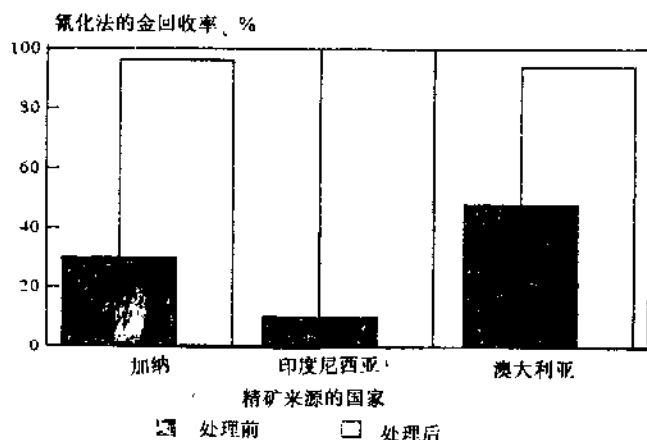


图 1.1 从 3 个难处理精矿的细菌氧化处理提高金回收率的实例

所有的 3 个精矿都含有砷(澳大利亚样品含有多到 14%(重量比)的元素)。加纳样品含有 5%的碳。图中细菌氧化处理前的金回收率数字代表存在的游离金部分。处理后的回收率介于 95%及 100%之间。加纳样品中的碳没有被活化,不消耗额外氰化物溶液。在其他的工艺过程中可能也存在这种情况。

## 1.8 本书提要

本书包含潜在的可处理矿物的讨论(第二章);可用作催化剂的细菌的描述(第三章);硫化矿物的细菌氧化化学的详细讨论(第四章);根据公布的试验数据对细菌氧化所遵循的可能机理进行讨论(第五章);中等规模及大规模工厂设计与运行的描述以及与工艺的理解有关的说明(第六章);废料产物的处置及与环境方面可以接收的贮存有关问题的讨论(第七章);工艺的经济性及讨论(第八章);用以监测细菌氧化过程的主要分析方法详述(第九章)。

## 1.9 参考文献

- Brierley, C.L. (1974) *J. Less Common Metals* 36, 237.
- Brierley, C.L. & Brierley, J.A. (1973) *Can. J. Microbiol.*, 19, 183.
- Brierley, J.A. & Le Roux, N.W. (1977) *Bacterial Leaching*. Schwartz, W. (ed.) Verlag Chemie, p.55.
- Brierley, J.A., Norris, P.R., Kelly, D.P. & Le Roux, N.W. (1978) *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 5, 291.
- Carvalho, T.M., Haines, A.K., da Silva, R.E.J. & Doyle, B.N. (1988) *Randol International Gold Conference, Perth, 1988*, p.152.
- Colmer, A.R. & Hinkle, M.E. (1947) *Science* 106, 253.
- Ehrlich, H.L. & Brierley, C.L. (eds) (1990) *Microbial Mineral Recovery*. McGraw-Hill.
- Golovacheva, R.S. & Karavaiko, G.I. (1978) *Mikrobiologiya* 47, 5815.
- Hughes, M.N. & Poole, R.K. (1989) *Metals & Micro-organisms*. Chapman & Hall.
- Hutchins, S.R., Davidson, M.S., Brierley, J.A. & Brierley, C.L. (1986) *Ann. Rev. Microbiol.*, 40, 311.
- Karavaiko, G.I. & Groudev, S.N. (eds) (1985) *Biogeotechnology of Metals. Proceedings of an International Seminar on Modern Aspects of Microbiological Hydrometallurgy and International Training Course on Microbiological Leaching of Metals from Ores, Moscow, Sophia, 1982*. Centre for International Projects GKNT, Moscow.
- Karavaiko, G.I., Rossi, G., Agate, A.D., Groudev, S.N. & Avakyan, Z.A. (eds) (1988) *Biogeotechnology of Metals*. Centre for International Projects GKNT, Moscow.
- Karavaiko, G.I., Rossi, G. & Avakyan, Z.A. (eds) (1990) *Proceedings of an International Seminar on Dump and Underground Bacterial Leaching of Metals from Ores, Leningrad, 1987*. Centre for International Projects, USSR State Committee for Environmental Protection, Moscow.
- Le Roux, N.W. & Marshall, V. (1977) *Bacterial Leaching*. Schwartz, W. (ed.) Verlag Chemie, p.21.
- Matthews, D.C. (1990) *Randol Gold Forum, Squaw Valley, 1990*, p.143.
- Nobar, A.M., Ewart, D.K., Al Saffar, L., Barrett, J., Hughes, M.N. & Poole, R.K. (1988) *Biohydrometallurgy - 87, Warwick, 1987, Science and Technology Letters* P.R.Norris, P.R. & Kelly, D.P. (eds) p.530.
- Rossi, G. (1990) *Biohydrometallurgy*. McGraw-Hill.
- Schlegel, H.G. (1986) *General Microbiology*. 6th edn, Cambridge University Press.
- Silverman, M.P. & Lundgren, D.G. (1959) *J. Bacteriol.*, 77, 642.



## 第二章 潜在的可处理矿物

### 2.1 引言

一种特定矿物或矿物混合物是否能够,或一定能够用细菌氧化技术处理取决于科学的及经济的因素的组合。本章内容包含在任何给定情况下,为确定细菌氧化处理技术的可行性而必须考虑的各种因素的纲要讨论。

应用细菌氧化反应对一种矿物进行处理依赖于矿物的化学特性,以及金属含量的品位及价值。有3种类型的细菌氧化反应,这些反应可以通过采用5种方法中的某种或另一种实现。

#### 2.1.1 细菌氧化反应分类

为了使细胞的保养和成长能获得能量,矿质化学自养细菌要求它们的培养基里含有铁(II),或还原硫(包括硫化物,二硫化物及砷硫化物),或者是两者都含有,这要依据细菌种类而定。这一要求决定着能由细菌氧化过程初级溶解的矿物的性质。此外,相适应的矿物的氧化产物(硫酸及(或)铁(III))可被用以溶解存在于矿石或精矿中的次级矿物。因此,如果能被酸或铁(III)溶解,或者被两者反应剂溶解,但不含铁(II)也不含还原硫的矿物用细菌氧化处理也是可能的。这一因素扩大了可用细菌氧化处理的矿物的数目及范围。在这些情况下,矿物中需要存在有,或是加入有足够量的黄铁矿含量(或存在一种可替代含铁(II)及硫的矿物)

基于这些见解,细菌氧化工艺可分为3类,可称为金属解离细菌氧化工艺、原生矿物细菌氧化工艺及次生矿物细菌氧化工艺。下面将对它们作扼要的描述。

##### I类: 金属解离细菌氧化工艺

在这些过程中,包裹金(或银)粒的各种矿物被氧化及溶解,使有价值的金属解离出来。

##### II类: 原生矿物细菌氧化工艺

这一类包括这样一些过程,在其中硫化物矿物被氧化及溶解(或是转换为不溶性硫酸盐)而使金属组分得到回收。天然含在矿物中的,或是有意识地添加进入的黄铁矿被细菌氧化所生成的铁(III)或硫酸通常将提高反应速率。由于铁(III)的存在而产生的细菌催化氧化反应总速率的提高是因为铁(III)直接参与了初级氧化过程,而不纯粹是由于化学作用(参阅 5.3.3.1节)。

##### III类: 次生矿物溶解工艺

此类包括次生矿物(氧化物及碳酸盐)被溶解的各过程。从生物湿法冶金学目的出发,次生矿物可定义为含有有价值的金属的那些矿物,它们既不含铁(II),也不含还原硫,因此不能够参与初级矿物细菌氧化。它们的有价金属可以通过黄铁矿,或是类似的含铁及硫的矿物的初级氧化以提供可以溶解金属含量的铁(III)及硫酸溶液。溶解反应也可能把金属氧化到比它在矿物中的较高的氧化态。在任何的特定生产作业中(包括矿物混合物在内),3种类型中的任何两种或是3种都可能对回收金属起作用。

#### 2.1.2 实现细菌氧化反应的方法

通常,把细菌氧化技术用到适合的可处理的成分有5种方法。被处理的矿石的品位及能否产出恰当的精矿,加上金属的单位价格是决定可采用的方法的因素。本章将对这一些方法