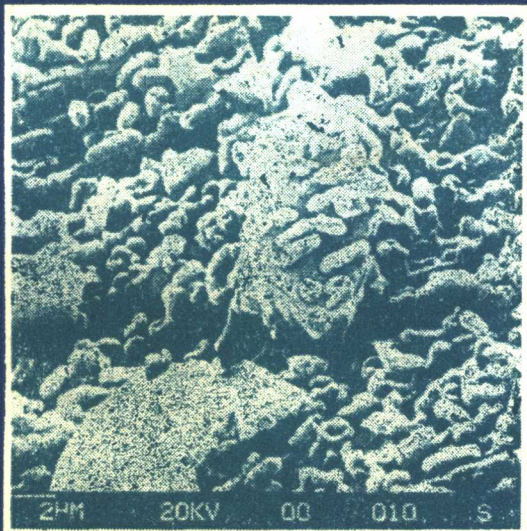


微生物提金工艺

《国外黄金参考》编辑部编译



119
024

中国科学院微生物研究所
国家黄金管理局科技处

1989年7月

前

言

黄金矿产资源是国家的重要财富。国家对发展黄金工业极为重视，一个大找黄金矿、大搞黄金科研的高潮已经兴起。为实现黄金事业大发展的目标，结合我国矿山生产实际，学习和吸取国外黄金选冶新技术和新工艺，对开发和利用我国黄金资源，是十分必要的。

当前，对如何从难处理的金—砷矿石中充分提取金，是人们特别关注的问题，因为这类金矿资源在我国和世界各国都很丰富；现行的焙烧工艺和加压氧化浸出工艺，又存在着严重污染环境和需用高压设备及防腐材料难推广的弊病。因此，人们一直在探索处理高砷高硫金矿石新的方法，细菌氧化浸出工艺即是其中之一。该工艺近年已获得重大突破，证明是一种可行的工艺，已由实验室研究向大规模工业生产发展。该工艺的特点是金银回收率高、投资省、成本低和无环境污染。本专辑着重选择了国外这一工艺的新近资料，同时也选择了一些微生物可望在黄金工业中应用的其他研究资料，以使我国从事黄金生产和科研工作的管理人员和工程技术人员了解与掌握矿冶部门不易注意的微生物提金工艺的研究现状，使微生物提金工艺，特别是处理难浸含砷金矿的工艺在我国早日用于生产。

本书由裘荣庆、张兴仁、陈远望、吴筱锦、郭硕朋、金兴华、程华、徐玉春、黄以群、陈秀珠、黄孔宣等翻译。黄孔宣、裘荣庆校对。

由于译者水平有限，书中难免有不足之处，欢迎批评指正。

译者话

1988年11月

南非建成世界上第一座细菌提金厂

南非已将细菌用于南非型难选矿石提金工艺。在东特兰斯瓦尔矿(Eastern Transvaal)正利用一种特殊的菌种把造成选矿困难的矿物从精矿中“吃掉”。

经过一项为期10年的研究之后,(Gencor)矿业总公司在其巴伯顿地区(Barbeaton)的费尔维尤(Fairview)金矿,一座具有工业规范的提金厂正在运行之中。

金科集团的这座提金厂是去年10月份投产的。它是世界上第一座也是最大的一个细菌提金厂。

由于砷和黄铁矿等障碍性矿物的存在,使传统的氰化工艺受到了限制,该矿的所谓“难浸”矿石确实难以处理。

迄今为止,人们只能用两种比较复杂的工艺流程来处理这类矿石,即焙烧和压力氧化。

焙烧会产生有毒的三氧化二砷和二氧化硫烟气,处理这些烟气成本又较高。而微生物浸出正在得到证明是一种效率高、投资费用省、不污染环境的方法。目前的生产成本略高一些。

这种叫做氧化亚铁硫杆菌的细菌能把黄铁矿氧化成硫酸和硫化铁。微生物浸出过程中滞留下来的砷只是生成无毒的不溶性盐。硫化物可通过细菌氧化成硫酸也可以以硫化物的形式滞留下来,这种硫化物易于生成无害的硫化铁。

一座微生物浸出厂的成本为一座现代化焙烧装置的60%左右。细菌提金的回收率可达90%或更高,相比之下,要比焙烧厂平均90%的回收率要优越。

Gencor公司的这座提金厂每月可处理300吨金精矿(日处理量为10吨左右)。每吨金精矿可生产黄金100~150克。所提高5%的回收率对每月45公斤左右的黄金产量有显著的影响。

为了达到设计产量和效率,随着工艺的进一步完善,Gencor公司正在寻找其它适于生物浸出的矿体。

胡宪铭 译自《South African Mining》Feb,1988

麻伯平 校

美国建微生物浸出厂

美国在Tomkin金矿建一座微生物浸出厂,于1989年夏建成,每年可产5万盎司金。

黄孔直 摘译自《The Northern Miner》1989.3.31

目

录

1.处理难浸含砷金矿用的微生物及其浸出砷的机理.....	(1)
2.Giant Bay公司的微生物预氧化提金工艺.....	(4)
3.Equity银矿公司工业规模连续细菌槽浸试验与经济可行性研究.....	(12)
4.含砷金矿石选冶工艺中的微生物预处理.....	(19)
5.提高金从难浸硫化矿中浸出的微生物氧化工艺的工业应用.....	(23)
6.难浸硫化矿和碳质金矿石的微生物预处理提高金回收的经济效益.....	(31)
7.利用细菌-化学法从矿石和精矿中浸出金.....	(38)
8.苏联用细菌氧化法处理含砷金矿的研究概况.....	(40)
9.我国利用微生物脱除金精矿中砷的研究.....	(44)
10.含金黄铁矿精矿细菌氧化和焙烧预处理的经济效益对比.....	(48)
11.细菌浸出法的经济效益.....	(54)
12.从含银混合硫化矿中连续细菌浸出银.....	(60)
13.为难浸硫化矿石微生物氧化反应系统供氧的技术经济评价.....	(65)
14.从矿山压实的泥质尾矿中细菌浸出金和铀.....	(68)
15.用真菌回收贵重金属.....	(73)
16.用一种新的微生物吸附剂回收金.....	(77)
17.黄金矿山污水的微生物处理.....	(80)
18.用微生物处理废定影液和照相用材回收银.....	(87)
19.西班牙Salave金矿的生物堆浸.....	(91)
20.南非建成世界上第一座细菌提金厂.....	(92)
21.美国建微生物浸出厂.....	(92)

处理难浸含砷金矿用的微生物及其浸出砷的机理

中国科学院微生物研究所 袁荣庆

有一些脉金矿，常伴有以砷黄铁矿 (FeAsS) 形式赋存的砷。砷黄铁矿可浮性好，浮选时，含砷黄铁矿也得到了富集，使金精矿含砷量增加到百分之几甚至到百分之几十。由于金粒被砷黄铁矿及黄铁矿包裹，氰化物不能与金发生反应，致使氰化浸出金回收率降低。砷黄铁矿在氰化物溶液中十分稳定，氰化后全进入尾矿，尾矿长期堆放，在自然因素影响下，使部分砷溶解。若尾矿坝渗漏，会污染地下水源。因此，这类金矿通常被人们称为难浸金矿。为从这类金矿中回收金，必须预先脱砷。

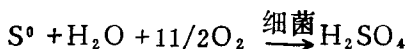
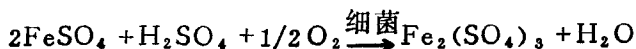
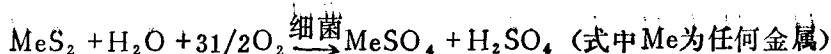
除砷的方法，通常采用焙烧（高温处理）法和加压氧化浸出（湿法处理）法，使包裹在砷黄铁矿中的金粒解离。这两种方法的脱砷效果是好的，但前者存在着焙烧过程中产生含二氧化硫和三氧化二砷的有毒气体污染大气环境，后者由于要建制氧车间及高压釜存在着基建投资大和生产成本高的缺陷。

近年，一种处理难浸金和银的新技术，即微生物预氧化浸出工艺正在成为一种可行技术受到人们的重视。这种技术的独特优点是可明显地提高金银回收率，有些学者认为微生物预氧化工艺有可能代替氧化焙烧工艺和加压氧化工艺。加拿大有两个公司将于1989年内建成可大规模处理（一个处理精矿100吨/日以上，另一个处理尾矿1000吨/日）难浸含砷金矿的微生物预氧化—氰化厂。

用细菌浸出法处理含铜和铀的贫矿或废矿石，多年以来已在十多个国家，至少三、四十个矿山成功地大规模地用于生产。所用的微生物主要为氧化亚铁硫杆菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*)。除此，研究发现，兼性嗜硫杆菌型耐热菌、硫化裂片菌属中一些嗜热菌等在浸出铜中也能起着重要作用。用于处理难浸含砷金矿的微生物也是这一些菌株，但在生产上得到应用的只是氧化亚铁硫杆菌。这是一种生存于含硫化矿（如黄铁矿、黄铜矿、砷黄铁矿等）的酸性水、潮湿矿堆或矿渣中的特殊微生物，系化能自养菌，即它能从氧化硫化矿物、元素硫或硫酸亚铁的过程中释出的能作为能源，能从空气中的二氧化碳为碳源来合成菌体进行繁殖。细菌形状（见图1）呈短杆，端圆，长1.0~1.5微米、宽0.5微米。单个，有时成对，不形成芽孢。有单极鞭毛，能活泼地运动。革兰氏染色阴性。这种细菌能将硫化物、硫酸亚铁和硫磺氧化为硫酸高铁和硫酸，

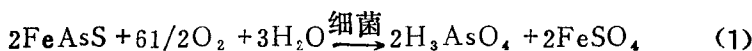


图1 氧化亚铁硫杆菌 (*Thiobacillus ferrooxidans*) 菌株的细胞形态电镜扫描36000倍

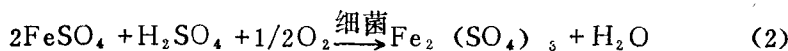


这种细菌生长的主要条件是嗜酸，能在pH1.5~4.0范围内生长，最适为pH1.6~3.0。生长最适温度为25~35℃，16℃以下生长缓慢，45℃以上则死亡。需氧是这种微生物的又一重要特性，培养和浸出金精矿中的砷时，必须充分充气。氮源为铵的硫酸盐。此外，不能利用有机物质。

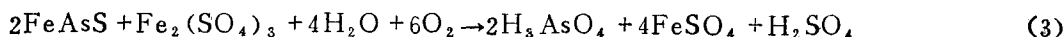
正如上面指出的，由于氧化亚铁硫杆菌具有强烈氧化分解硫化矿物的能力，早在1963年 Ehrlich, H.L 就报道了他用这种细菌浸出雌黄(As₂S₃)中砷的研究结果，次年他又发表了浸出硫砷铜矿(CuAsS₂)和砷黄铁矿(FeAsS)中砷的试验资料。Pinches, A 进一步研究了细菌氧化主要含砷矿物——砷黄铁矿的一些重要条件，并初步阐明细菌氧化浸出砷的机理。Кулебакин В.Г.Т 等和 Таунянскья, З.А 详细研究了作用机理。这些研究者认为，首先是氧化亚铁硫杆菌氧化砷黄铁矿，产生砷酸(H₃AsO₄)和硫酸亚铁(FeSO₄)：



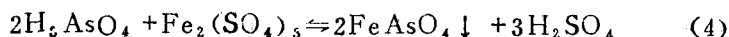
这中间可能有亚砷酸(H₃AsO₃)生成。反应中生成的硫酸亚铁可被细菌进一步氧化成硫酸高铁[Fe₂(SO₄)₃]：



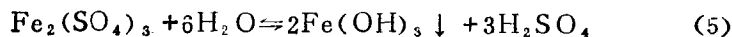
此反应中生成的硫酸高铁也能氧化砷黄铁矿：



反应中生成的硫酸亚铁又能按反应(2)被细菌再氧化，砷酸则可与硫酸高铁反应生成砷酸铁(FeAsO₄)沉淀：



当pH为2.0或更高时，由于硫酸高铁的水解会有高铁离子沉淀：



在较高pH值时，砷酸铁也会水解：



Полькин, С. И 等把上述反应进一步绘成如图2所示的细菌氧化砷黄铁矿和浸出砷的大致模式图。作者根据试验所得资料认为，氧化亚铁硫杆菌生长过程所产生的复合酶(铁氧化酶和硫氧化酶)能催化矿物晶格中离子的氧化反应，使晶格结构强烈地被破坏。氧化砷黄铁矿过程中所形成的硫酸高铁，也是一种强氧化剂，它也会加强对硫化矿的氧化分解，这样就形成了一个连续的矿物分解过程。

以上反应式表明了细菌氧化脱除金精矿中砷起着两方面的作用，一是微生物对砷黄铁矿的直接氧化作用，如反应式(1)和(2)所示；而反应式(3)表明了细菌对砷黄铁矿的间接氧化作用。但是，微生物氧化分解硫化矿物并不像上述反应式表示的那么简单，因为参与氧化硫化矿的微生物除上述氧化亚铁硫杆菌外，还有氧化硫杆菌及其他铁、硫杆菌。

经分别用无铁的氧化亚铁硫杆菌细胞悬浮液、硫酸高铁溶液和稀硫酸氧化浸出金精矿中砷的试验表明,单用稀硫酸,精矿中的砷几乎不溶出;硫酸高铁虽能氧化砷黄铁矿,但仅溶解除去少部分砷;而当有细菌参与时,金精矿中的砷可除去大部分。这表明从砷黄铁矿中脱砷,细菌的直接氧化作用是最主要的。

至于氧化亚铁硫杆菌对砷黄铁矿等硫化矿物如何直接氧化,还阐明得不太清楚。有些学者提出硫代硫酸盐氧化的假设,包括硫代硫酸盐被分解为硫(或硫化物)和亚硫酸盐,随后,由细胞

色素C氧化还原酶或有腺苷基硫酸盐的中间形式而把硫氧化为亚硫酸盐,并把亚硫酸盐氧化为硫酸盐。业已证明,氧化亚铁硫杆菌的提取物中存在硫代硫酸盐氧化酶、硫氰酸酶和还原需要的谷胱甘肽的硫氧化酶,这些酶起着催化硫代硫酸盐氧化的作用。氧化时,细菌必须能直接附着在硫化矿物表面上。通常在培养物中添加湿润剂后,细菌对硫的氧化才增强,但细菌本身也分泌出起润湿剂作用的磷脂物质,可使硫和细胞被膜相互接触。因此,在被膜上可能进行氧化。不溶解的硫化矿物的氧化也可用表面活性剂来增强,这也表明需互相接触。至于细菌对矿石是否产生直接的物理—化学侵蚀,不溶性矿石中的金属和硫化物在细胞被膜上的催化位置及能溶解这种矿物的硫杆菌的胞外酶,这些问题还在研究之中。比较一致的看法是,硫化物至少应进入细胞的外膜而被硫氧化系统所氧化。正由于细菌需与硫化矿物直接接触才能氧化矿物,所以在工艺上应采用通气搅拌或通气与机械搅拌相结合的方式培养细菌和浸出除去矿物中的砷、硫、铁等金属。同时注意搅拌勿过强或过弱,搅拌强烈,细菌难以附着于矿物上;相反,矿粉沉底,使细菌难以与矿物充分接触。

如上所述,依靠细菌对砷黄铁矿等硫化矿的直接氧化分解可脱除大部分砷,选育对这些硫化矿分解能力强、对溶液中所溶解的砷离子的毒害耐力高的菌株,就十分重要。方法是:或到砷黄铁矿矿山酸性水中去筛选,或通过多次移接于含砷黄铁矿的培养介质中驯化,使其能在高砷溶液中生长。

含砷硫化矿除砷黄铁矿(毒砂)外,还有雄黄、雌黄、砷黝铜矿,细菌对这些含砷硫化矿的氧化机理及氧化分解效果,研究很少。

细菌氧化分解砷黄铁矿过程中,除矿物中的砷以砷酸或亚砷酸进入浸出溶液外,砷黄铁矿和黄铁矿中的铁也部分被溶解出来,且被细菌氧化成硫酸高铁,砷酸可与硫酸高铁反应生成砷酸铁沉淀(见前反应4),砷的沉淀量又与pH值的高低密切相关(见表1),当pH在2.0以上时,就有50%以上砷沉淀;pH1.5时,所有的砷实际上都在溶液中。

以砷酸铁形态再沉于精矿中的砷,还需用稀盐酸溶解洗脱。加盐酸量的多少,需视沉淀砷

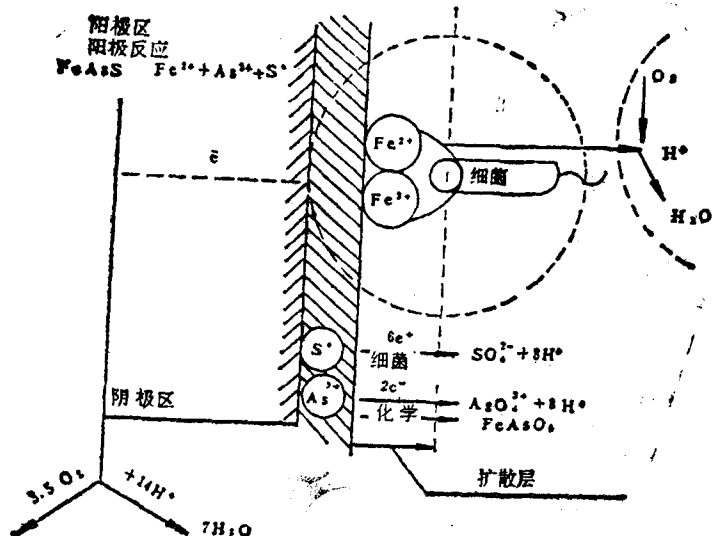


图2 砷黄铁矿细菌氧化和砷浸出的大致模式

细菌氧化砷黄铁矿时溶液中砷的沉淀量与pH值间的关系 表1

pH	沉淀中的砷 (%)
1.6~1.8	21~34
1.8~2.0	34~38
2.0~2.2	38~50
2.2~2.5	50~63
2.5~2.7	63~67
2.7~2.9	67~69
2.9~3.5	69~76

注：根据 Полякин С.И.等人资料

量多少而定。实际试验发现，为洗脱沉淀之砷，需用较多的盐酸。因此，为减少这一后处理手续，又使经细菌氧化分解处理后有高的脱砷效果，氧化浸出过程中以控制溶液pH值 ≤ 1.8 为宜，如细菌活性好，pH值还可低一点。

参考文献 (略)

Giant Bay公司的微生物预氧化提金工艺

在1984~1985年期间，加拿大Giant Bay微生物工艺公司对北美洲和澳大利亚30多种金精矿（矿物成分和贵金属含量各不相同）进行了实验室微生物预氧化的试验研究。研究了能够氧化各种硫化物的细菌菌株。这些硫化物包括黄铁矿、砷黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、黝铜矿、雄黄和雌黄。此外，试验了几种含吸附性碳的试样，以确定细菌浸出能否产生足够的氧化条件，使碳失去活性。除了两个试样外，所有经微生物氧化过的试样，贵金属回收率都提高了。

试验结果表明，黄铁矿氧化成硫酸高铁的 $\Delta H_{298}^{\circ} = +369$ 千卡/克分子，砷黄铁矿氧化成硫酸高铁的 $\Delta H_{298}^{\circ} = +350$ 千卡/克分子。铁和砷最终氧化成 Fe^{3+} 和 As^{5+} 。研究了氧化亚铁硫杆菌在该工艺产生的酸性溶液中的适应性和繁殖问题。对于黄铁矿和砷黄铁矿而言，此种细菌能在pH值为0.5，铁浓度为50克/升、砷浓度为20克/升的条件下繁殖。

由空气中的氧供应浸出反应所需要的氧化剂，黄铁矿氧化需氧量为1.88克分子 O_2 /克分子 S^{2-} ，而砷黄铁矿氧化需氧量为3.5克分子 O_2 /克分子 S^{2-} 。因此，设计细菌浸出反应器时，要考虑最有效和最快的吸收氧以及有效地除去浸出反应产生的热的方法。

大量数据表明，在结晶不完全或错位——常常存在金的弱点上细菌优先溶解硫化矿物颗粒，部分硫化矿物氧化常常足以解离全部金。部分硫化矿物氧化可大大地提高工艺的经济性，减少浸出时间、充气量以及中和所需的石灰量。

细菌浸出后的矿浆进行液固分离，然后中和溶液，以黄钾铁矾、砷酸铁和石膏的形式沉淀的铁、砷和硫酸盐。氧化残渣氯化前中和。石灰和石灰石是两种有效的中和剂，其消耗量与精矿中的 FeS_2 、 $FeAsS$ 的比例有关。每氧化1克分子硫化矿物需要0.67~1克分子石灰或石灰石。因此，在理论上，每氧化1%硫化矿物，石灰石消耗量为21~31公斤/吨，石灰消耗量为15~23公斤/吨。

对黄铁矿和砷黄铁矿混合精矿 (Fe 22.9%、As 8.5%、S 17.3%、Au 278克/吨、Ag 42克/吨) 进行了间断浸出试验。结果表明, 微生物预氧化工艺可行, 氰化金回收率由未微生物预氧化的65%提高到98%。

选择了3个难浸精矿详细地进行连续实验室规模试验。在这3个难浸精矿中, 有2个精矿含 FeS_2 和 FeAsS , 一个含 FeS_2 和吸附性质碳, 其成分如表1。

精 矿 成 分 表1

试 样	铁 %	砷 %	硫 %	碳 %	金(克/吨)	银(克/吨)
黄铁矿—砷黄铁矿	20~25	5~7	15~18	—	240	30~50
黄铁矿—砷黄铁矿	20~24	6~8	16~21	—	61~77	18~27
黄铁矿—碳	14~14	0.3	15~17	7	110~150	160~200

连续试验系统内一个给料槽、三个串联的5升容量的空气搅拌浸出槽和一个产品接受器组成。浸出槽温度控制在 35°C 。如果有必要的话, 采取措施供微生物和微生物氧化产生的酸返回。

定期过滤最后一个浸出槽的矿浆, 洗涤滤饼, 以减少氰化物的消耗量。用石灰石中和浸出液与洗涤液, 以沉淀铁、砷和硫酸盐, 然后过滤, 滤液返回到装料槽。连续浸出 2~8 个月, 以便确定下列参数:

①贵金属达到最高回收率所要求的硫化物氧化率, ②浸出前精矿再磨的好处; ③矿浆浓度, 浸出时间对每段浸出的影响, ④有害杂质的积累对细菌的影响。

图1 表明了三种精矿金回收率与硫化物氧化率的关系。所有试样仅要求部分氧化, 以解离全部金。试样1和2分别要求硫化物氧化 75%和84%, 而试样3 ($\text{FeS}_2 + \text{C}$) 要求硫化物氧化51%。在三种情况下, 金回收率都急剧地提高到97~98%。

硫化物氧化的理想条件列于表2。

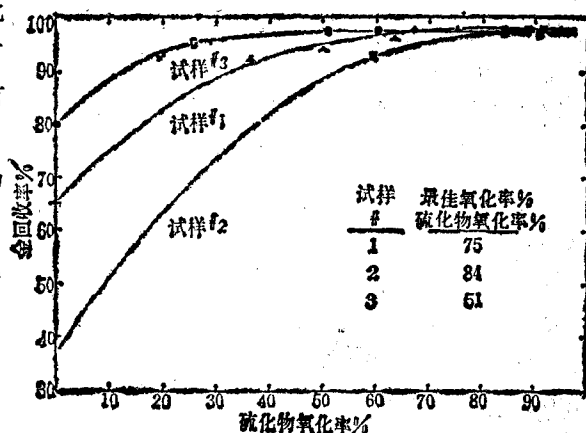


图1 金回收率与硫化物氧化率的关系

三种精矿试样微生物氧化的条件

表2

	精矿1($\text{FeSs} + \text{FeAsS}$)	精矿2($\text{FeS}_2 + \text{FeAsS}$)	精矿3($\text{FeS}_2 + \text{C}$)
精矿再磨	再磨	再磨	没有
矿浆浓度 (克/升)	200	200	200
浸出段数	2	2	1
总浸出时间 (小时)	94	100	36
硫化物氧化率 (%)	77.6	88.7	49.3
硫化物氧化速度 (毫克/升小时)			
第一段	415	353	458
第二段	104	179	
平 均	206	266	458

由此可以看出，精矿经再磨可大大提高硫化物氧化率，并且当矿浆浓度为200克固体/升时，获得最快的浸出速度和氧化速度，对细菌活性没有任何影响。在实验室高浓度矿浆下操作有可能，但是，在工业上要求矿浆吸收氧的能力超过现有搅拌设备的能力。为达到硫化物充分氧化，所要求的停留时间为36小时（一段， $\text{FeS}_2 + \text{C}$ 精矿）至100小时（二段， $\text{FeS}_2 + \text{FeAsS}$ 精矿）。

连续试验结果表明，在连续试验时获得的微生物浸出速度大大超过了间断试验时的浸出速度。这是由于在连续浸出时产生对细菌生长和适应的理想条件，砷黄铁矿比黄铁矿优先浸出；约有70%硫化物氧化时，金回收率达到97%，硫化矿氧化率再提高时，金回收率只有少量增加；没有任何有害于细菌的杂质积累。

用加拿大东部的黄铁矿—砷黄铁矿混合精矿作为原料，于1985年8月~12月进行了中间厂试验，规模为3吨/日，其目的在于：①证实和改进实验室试验确定的细菌浸出条件；②获取浸出时氧的可能利用率的数据；③确定下一步产品浓缩和过滤的速度；④证实工艺产生的尾矿的长期稳定性；⑤获取整个工艺过程的详细物料平衡。

中间试验厂的工艺流程图示于图2。浸出系统由一个玻璃纤维给料槽和三个胶质玻璃微生物浸出槽组成。给料槽规格为 $\phi 0.70 \times 1.52$ 米，容量为600升。给料槽装有隔板，用安装在上部的搅拌器搅拌。搅拌器为两组不锈钢轴向运动的叶轮。由精矿、循环水、补充水和细菌营养液组成的矿浆从给料槽以一定的流量连续地泵入第1个浸出槽。三个浸出槽是串联的，矿浆从前一个槽自流到下一个槽。浸出槽规格为 $\phi 0.61 \times 0.9$ 米，其容积为167升矿浆。槽内矿浆面与槽的直径之比是固定的。浸出槽装有隔板，用安装在上部的搅拌器搅拌。搅拌器为不锈钢片状径向流动的叶轮，空气在叶轮的下面直接吹入每个槽的底部。

每个槽都装有温度控制器。它通过固定在每浸出槽中的不锈钢冷却蛇形管输送冷或热水来控制温度。开始浸出时矿浆加热到 35°C ，一旦微生物开始繁殖和浸出金属，由于反应是放热的，温度会再升高。一般控制在 35°C 。如果温度再升高时，要进行冷却，但是，温度偶尔高到 43°C 也是允许的，它对浸出不会造成有害影响。随着浸出进一步进行，细菌能够耐较高的温度。在连续试验16周期间内，冷却蛇形管定期检查表明，没有发现任何结垢的迹象。

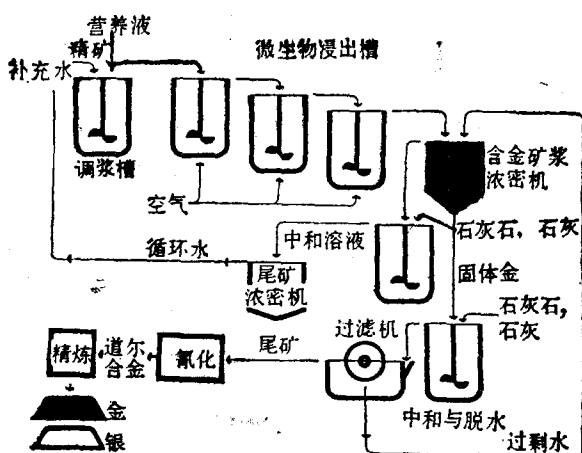


图2 中间试验厂微生物浸出工艺流程图

所有浸出槽都装有pH值，空气喷射速度和搅拌速度（转/分）的控制设备。由于优良细菌适应性强，在浸出系统中不需要控制pH值，通过测量排出废气中的含氧量来计算氧的消耗量。

往最后一个浸出槽流出来的矿浆中加絮凝剂，以加快固体沉淀，然后泵入浓密机中。浓密机底流中含有全部金和银、未反应的硫化物以及脉石，可以洗涤后再浓缩和储存，或不洗涤储存，用于氧化试验。含有溶解的铁、砷、硫和其它微量元素的溶液从浓密机溢流到一个槽内，用浆状石灰进行连续中和，使pH值达到3.5~4，如果有必要的话，把部分微生物浸出的酸性溶液返回到给料槽中。实际上，中和使全部溶解的砷、铁和硫以石膏、黄钾铁矾

和砷酸铁混合物形式沉淀。然后浓缩这些沉淀，并储存在桶内，浓密机溢流返回浸出作业。

试验期间变化的参数有浸出时间、矿浆浓度、搅拌充气量。对微生物氧化过程的产品以及该工艺产出的尾矿进行了沉淀和过滤试验。为了确定所需浸出时间和氰化物浓度，对微生物氧化的产品进行详细的氰化浸出试验。定期进行了铁、砷、硫、金和银的全部质量平衡。

中间试验厂连续浸出试验的结果证实了实验室试验确定的基本参数，即采用下列最佳条件：精矿粒度90%—400目，矿浆浓度200克/升（17.5%固体），充气量 0.066升/升·分。在41天的试验期间，第一个槽的停留时间从84个小时逐渐减少到40小时，铁和砷的氧化速度逐渐分别增加到660毫克/升小时，280毫克/升小时，而铁和砷的氧化率相当稳定，分别为55~65%，80~90%。氧的利用率也逐渐增加，在47个小时的氧化时间内，氧的利用率达54.5%证明了在试验条件下，用细菌培养物最能控制第一浸出阶段。看来细菌适应氧化时间的突然变化并不困难。这些结果也证明了微生物浸出时可以达到氧的合理利用，进一步减少浸出时间，相应地增加浸出速度是有可能的。

在连续试验进行到第34天时，进行了物料全平衡（每个槽浸出47小时），第一段以后累计硫化物氧化率为62%，第二段以后为78%，第三段以后为94%。微生物浸出总固体重量减少30%。大约有10%被氧化的铁和砷以黄钾铁矾、砷酸铁形式沉淀，仍然和固体在一起。为了减少氰化物消耗量，在氰化以前，使固体在碱性溶液中浸泡10个小时，氰化浸出8个小时，金银浸出率就达到最大值，分别为98%和68%。银浸出不完全可能是银被黄钾铁矾包裹。减少黄钾铁矾的形成可提高银的浸出率。氰化浸出8个小时后，氰化物消耗量为4公斤/吨。氰化物消耗量高主要是由于副反应形成硫代氰酸盐。减少氰化物消耗量的进一步试验工作正在进行之中。

以前的研究者们认为微生物浸出可能引起部分金和银溶解，回收它们很困难。用甲基异丁酮萃取法定期分析浓密机的溢流，从未发现金浓度大于0.1ppb，银也未大于0.1ppm。因此，用这种精矿时，损失到微生物浸出液中的贵金属不是一个问题。

在艾姆科工艺设备公司人员的帮助下，进行了微生物氧化过的产品和尾矿的沉淀与过滤试验。这些试验有助于帮助整个工艺过程的设计。在两升有刻度、装有耙动装置的圆筒内进行沉淀试验，用标准过滤法进行过滤试验。

氧化过的产品在达到充分沉淀以前需要进行絮凝。试验了各种性质不同的絮凝剂，用果阿胶阳离子絮凝剂可以获得较好的结果。这种絮凝剂是美国亚利桑那州图森市Henkel公司生产的，又叫Guartec CD。。絮凝剂最适用量为144克/吨氯化固体（相当于100克/吨精矿）。

浓密机底流固体浓度为50%，84%的总浸出液与固体分离。艾姆科公司用 Wilhelm—Naide法经计算机分析得出浓密机单位面积的处理能力为0.52吨/米²·日。

为把氰化系统水量平衡问题减少到最小，氰化以前固体产品必须过滤脱水。从浸出作业来的酸性矿浆直接进入真空过滤机不好，然而，用石灰石或石灰中和，使固体pH值达到10.5时非常好过滤。因此，应该首先浓缩固体，然后中和浓密机底流，使其pH值达到10.5时再进行真空过滤。浓密机底流中和后用圆筒过滤机过滤的试验表明，易于产出含30%水分的滤饼。

由该工艺产出的尾矿相当好沉淀。在有效的时间内，为找到有效的絮凝剂企图用絮凝的方法加速沉淀过程，但是结果失败了。然而应该进一步研究产出一种稳定的絮凝剂。如果没

有进行絮凝的话，艾姆科工艺设备公司计算的浓密机单位面积生产能力为0.96吨/米²·日时，其底流固体浓度达52.5%。

该工艺过程中产出的尾矿，除了有些金属氢氧化物外，如铜、钴、镍和锌等，主要是石膏、黄钾铁矾和磷酸铁。最近有些专家担心磷酸铁与空气中二氧化碳反应，最后可能分解使砷再次溶解。为了验证这种理论，设置了一个试验槽，把尾矿配制成固体浓度为20%左右的矿浆搅拌，并通入含二氧化碳5%的空气。这个试验进行了6个月，发现溶液中砷的浓度从来没有超过0.1ppm。这表明实际上砷没有再溶解。试验结果证明了在长时间内尾矿是很稳定的，没有环境污染问题。

1987年夏天，Giant Bay微生物工艺公司在加拿大西北地区Giant Yellowknife 矿山的Salmita金矿建了一个规模为10吨/日的微生物预氧化的中间试验厂，投资45万美元。该矿的矿石金品位高，用常规氰化法处理，金回收率只有65~75%，而用细菌预氧化后再氰化浸出，金回收率高达95.6%。在约一个月的试验期间内，生产金量达311盎司。

Wright工程有限公司根据中间试验厂的试验结果进行了微生物槽浸工业化可行性研究，并对投资和生产成本与工厂规模进行了比较，其结果示于图3。

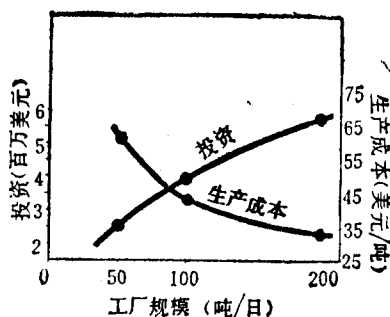


图3 微生物槽浸的投资和生产成本与工厂规模的关系。

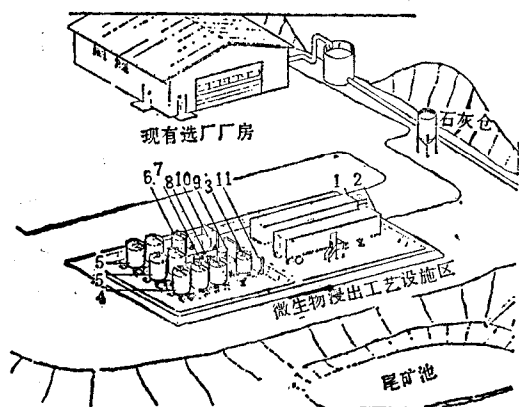


图4. 移动式微生物预氧化氰化厂工艺流程图
1. 贵金属矿浆和药剂配制系统； 2. 氧化和过滤系统； 3. 微生物预浸出尾矿浓密机； 4. 第二段微生物浸出槽（3个槽）； 5. 第一段微生物浸出槽（2个槽）； 6. 熟石灰储槽； 7. 浓密机溢流储槽； 8. 微生物浸出后的中和槽（3个槽）； 9. 硫酸储槽； 10. 鼓风机； 11. 电动机控制中心

加拿大Giant Bay微生物工艺公司董事会已批准建一座移动式微生物槽浸厂，基建投资估计为120万美元。1987年1月开始建设，计划在1988年5月完工。该厂的规模为5~10吨精矿/日，其工艺流程图示于图4。整套设备可以移动。这种移动式厂很适合于处理储量小、品位高的边远地区的难浸金矿，可以就地产出金锭。

Wright工程公司根据Giant Bay微生物工艺公司中间试验厂48周的试验结果设计了一个工业规模的微生物浸出厂，规模为100吨/日，1989年底可以建成投产。该厂投资为650万美元，其中一半用于厂房和微生物浸出，其余用于浸渣氰化回收金。据估计一个规模为100吨/日的工厂，基建投资为510万美元，而用焙烧工艺的投资约为660万美元。而微生物浸出的生产成本为58美元/吨，焙烧工艺的生产成本为75美元/吨，加压氧化工艺生产成本为58美元/吨。

Giant Bay微生物工艺公司已与几个公司联营，以使在工业上试验用微生物浸出工艺处理难浸矿石。1987年该公司与Wright工程公司联合成立国际微生物浸出工艺公司，负责设计和推广微生物浸出工艺，并向

黄金界提供用微生物浸出工艺处理难浸金矿的示范性工厂。该公司已评价了36个金矿采用微生物浸出工艺的可能性。国际微生物浸出工艺公司使陷入困境的加拿大Carolyn矿山公司的金矿复活，投资66万美元，1988年2月完成了评价和冶金试验。目前又为加拿大Congress设计了一个规模为250~300吨/日的工厂，年产金量为25000~31000盎司。

微生物堆浸金也已完成了实验室试验。品位为1.2克/吨的矿石堆在堆浸场上，用含细菌的酸性溶液喷淋几周至几个月。细菌在结晶不完全或错位的地方优先氧化硫化物解离金。随后用碱性溶液洗涤矿堆，使之呈碱性，再用稀的氰化物溶液喷淋浸出金。与普通堆浸工艺相比，微生物堆浸所增加的成本仅占总成本的很少部分。用常规堆浸法处理难浸矿石的金回收率仅为20%，而用微生物堆浸——氰化物堆浸工艺的回收率达70%。目前还未进行工业性试验。

虽然，目前世界上已有几个金矿采用加压氧化工艺或焙烧工艺处理难浸矿石，有些公司把精矿卖给冶炼厂处理。基于微生物预氧化工艺具有金银回收率高，投资少，不需要制氧厂和烟气处理设备，生产成本低，无污染的优点，对某些含金砷黄铁矿，尤其矿物比较单一的矿，用本工艺是可行的，有效的，并有可能取代焙烧和加压氧化工艺。

温哥华Wright工程有限公司用半工业厂规模实验的结果进行微生物槽浸工艺的可行性研究，并且和焙烧，压力浸出工艺比较其基建投资和作业成本。

Wright工程公司利用安达略北部一个旧厂，假如能够利用现有矿山设施建厂，那么将减少基础工程的投资。已详细地计算出精矿处理能力100吨/日规模的建厂投资，和列出50吨/日，200吨/日的建厂投资。

设计的氧化厂是采用含固体55%的浓缩的浓密机底流作为给矿。这种物料大约有60%是小于37微米的。物料给入与水力旋流器构成闭路的小球磨机。旋流器的溢流小于37微米的占90%固体，浓度20%。在给入微生物浸出系统以前先放在一个缓冲槽内。精矿再磨的粒度，精矿和精矿之间不一样，有的精矿不需要再磨。处理每吨精矿需用电5度，这是有代表性的。

微生物浸出系统用8个搅拌槽，每个槽的直径6.4米，高6.4米。这些槽的布置如图5所示。第1段浸出用4个槽，氧化时间48小时，第2段和第3段每段用2个槽，每段氧化时间24小时，总共停留96小时。这些槽子分两行平行布置。如果需要时，可以分成4段，每段氧化24小时。通入槽子的空气总量174米³/分，由83千帕压力的鼓风机供风。设计氧的用量要留有余地，氧利用率保守估计为40%。细菌需要碳源为二氧化碳，但是，精矿中的碳酸盐有足够CO₂可以利用，以保证微生物快速浸出。用工业品位的肥料将供给少量的营养液。

混合设备有限公司J. 奥尔德许博士（第一流专家），在按比例加大搅拌反应系统把搅拌器的尺寸应放大，以保证能吸收足够的氧。第1段反应器需要75千瓦的搅拌器，第2段需要56千瓦的搅拌器，第3段需要37千瓦的搅拌器。

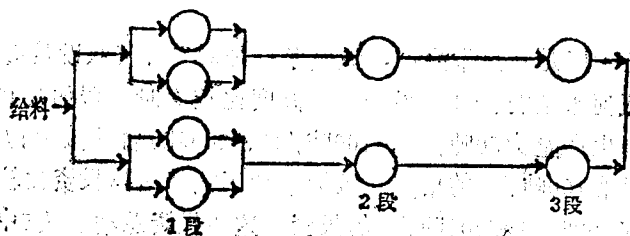


图5 槽浸设备布置图

由于氧化反应是放热反应，所以矿浆需要进行冷却，特别是第1段放出热量占60%以

上。每个槽都装有冷却塔构成闭路的不锈钢蛇形冷却管，水在内流动。

由最后浸出段浸渣（73吨/日）进行7.3米浓密机浓缩到固体50%。经浓缩过的固体首先用磨过的石灰石乳进行中和到pH4左右，再用石灰中和到pH10.5。中和过程是在4个串连的槽子内进行的。总的中和时间10小时。中和过的产品用 $\phi 3 \times 3.7$ 米长的圆筒型过滤机进行脱水，然后直接氰化。

为了沉淀磷酸铁，黄钾铁矾和石膏，对浓密机的溢流用两段中和。中和是在串连的4个槽内进行的，总的时间10小时。为了产出具有比较好的浓缩性质的粗粒沉淀物，矿泥从第4槽再循环到第1槽。

尾矿（89吨/日）在 $\phi 11$ 米的浓密机内浓缩到固体52.5%。浓密机的底流泵到选厂尾矿砂泵池，再排到尾矿库。浓密机溢流泵到磨矿回路的给矿制备作业，其中部分到石灰和石灰石的准备系统。

热 平 衡（设计）

表3

条 件	夏季	冬季
设计空气温度（°C）	25	-25
空气湿度（%）	50	0
浸出槽作业温度（°C）	35	35
旋流器作业溢流温度（°C）	25	15

热量平衡利用夏季和冬季的条件示于表3。浸出回路冷却水以31°C进入冷却塔，冷却塔出口水的温度26°C。热量平衡的详细计算示于表4。

如果浸出矿浆浓度增加，结果冷却水需要量仅在一定程度上增加，若是硫化物含量从16%增加到20%时，冷却水需要增加到

21.047米³/日，硫化物含量减少到10%时，冷却水要减到9.83米³/日。

热 平 衡 计 算

表4

条 件	夏 季	冬 季
供入热量，千卡/日，	-92 000 670	-92 004 670
热量损失，千卡/日，	-10 422 137	29 739 675
供净热量，千卡/日，	81 582 533	-62 264 995
冷却水量，米 ³ /日，	16 415	12 528
浸出槽尺寸 $\phi 6.4$ 米 $\times 6.4$ 米		
空气供入量，米 ³ /分，	174	174
冷却蛇形管数量	58	58

如果工厂是在热带生产，大气条件是35°C，（假设是最坏的条件），一度曾用温度22°C的海水或河水进行冷却。另一方，温度比较高时，假如是43°C，也能进行浸出。

编制生产能力50吨/日、100吨/日、200吨/日的微生物槽浸工艺的基建投资和生产成本，并且和100吨/日的焙烧和压力氧化工艺的估算投资比较。用以100吨/日的基础近似因素估算了50吨/日和200吨/日的投资。这些投资总结在表5中。

估算细菌浸出厂的生产和维修直接费用如表6所示。在安达略省，药剂费用是高的，因为增加了运输费用，若是氰化厂在其它地区，这些费用可以大量地减少。

这些费用不包括资金摊销、流动资金和存库管理费。此外，也不包括假设采用的矿山

基础结构部分和下列费用，（1）尾矿和污水处理系统；（2）水、蒸气、仪表以及供给空气的设备；（3）环境监测和报告；（4）管理费。

微生物槽浸基建投资（美元） 表5

	规 模		
	50 吨/日	100 吨/日	200 吨/日
直接总费用	2 081 000	3 121 000	4 712 000
EPCM	250 000	375 000	556 000
不可预见费	188 000	282 000	436 000
总投资	2 519 000	3 778 000	5 704 000

直接作业成本摘要 表6

	规 模		
	50 吨/日	100 吨/日	200 吨/日
药剂	20.81	20.81	20.81
人工	28.32	14.16	7.08
备品、备件	2.12	1.80	1.33
易耗品	0.50	0.37	0.27
动力	8.91	5.93	3.96
总作业成本			
美元/吨, 精矿	60.66	43.08	33.45

工艺费用比较 表7

工艺方法	基建投资, 美 元/吨	作业成本 美元/吨
焙烧工艺	4 889 000	55.90
加压氧化工艺	7 481 000	42.79
微生物槽浸工艺	3 778 000	43.09

100吨/日微生物槽浸基建投资和生产成本与焙烧和压力浸出工艺的相比较，其结果汇总在表7中。

微生物槽浸工艺总的投资比焙烧和压力氧化浸出工艺都少得多。焙烧工艺由于净化二氧化硫烟气费用高，因此基建、生产成本高。压力氧化工艺基建投资比上述两个都高

很多，这是由于包括了制氧车间的投资342.6万美元。

处理难浸的贵金属矿石和精矿，Giant Bay的微生物槽浸工艺是可以代替普通的工艺。微生物槽浸工艺具有基建、生产成本低，能把任何可溶的砷转换成不污染环境的废弃产品等固有优点。

最近Giant Bay微生物浸出实验室继续研究和发展取得了一个处理砷黄铁矿和精矿的新的化学—生物学工艺的专利权。期望研究室的工作人员要继续改进微生物工艺，使它不仅适用于处理难浸的金矿，也能适应处理其它金属硫化矿。

Giant Bay正在建设第一个工业规模的微生物槽浸厂，这个厂除了处理他们自己生产的精矿以外，还要购买一些。

黄孔宣 编译

Equity银矿公司工业规模连续细菌槽

浸试验与经济可行性研究

P Brad Marchant

基本情况

Equity银矿公司的露天银矿，位于加拿大不列颠哥伦比亚省中北部地区Houston 东南37公里处。矿山由两个不同性质的矿区组成：一个叫Southern Tail，一个叫Main Zone。Southern Tail矿区产出的尾矿，平均含金0.9克/吨，含银20克/吨；Main Zone矿区产出的尾矿大约含金0.5克/吨。Southern Tail矿区尾矿中的金是与砷黄铁矿伴生在一起的，银是随未离解的黝铜矿损失的，或者是随较少的含银磺酸盐流失的。而Main Zone 尾矿中的金是与含银的矿物和黄铁矿伴生在一起，银（40~50克/吨）是与未离解的含银、锑矿物伴生在一起。为了提高Equity银矿金的回收率，曾做过许多提取浮选尾矿中金银方法的研究。

浮选尾矿直接氰化的结果

表1

矿 区	浮选尾矿		氰化浸出率	
	金 (克/吨)	银 (克/吨)	金 (%)	银 (%)
Main Zone	0.5	30~40	50~70	10~30
Southern Tail	0.9	20	10~20	10~20

很显然，Main Zone矿区的浮选尾矿是适合氰化的，而Southern Tail 矿区的浮选尾矿不适合直接氰化处理。从Southern Tail矿区浮选尾矿中提取金、银在经济上是否合算，取决于或者产出一一种高品位的、含砷富的黄铁矿硫化物精矿，以减少后步工序的处理成本，或者是寻找一种优先氧化砷黄铁矿的方法，提高氰化反应的效果。对于优先氧化砷黄铁矿而言，细菌浸出和加压氧化是最有希望的方法。但在 Sheritt Gordon 矿做的初步试验表明，由于精矿品位低，加压氧化是不经济的。

加拿大温哥华不列颠哥伦比亚研究所用现场的氧化亚铁硫杆菌的特殊菌种做的探索性浸出试验表明，在黄铁矿总氧化率低时，金的回收率就提高了。这可能是由于优先使砷黄铁矿氧化的结果。砷黄铁矿氧化率(%)：4、10、13、15、50、65，氧化后金的回收率(%)：55.7、70.1、75.4、73.4、76.5、74.5。

不列颠哥伦比亚研究所的初步试验表明，为了进一步确定是否用细菌浸出法处理Southern Tail 矿区混合硫化物精矿，以评价该法作为一个工业生产法来预处理含砷硫化精矿的可行性，有必要确定和尽可能完善模拟现场条件下严密的操作参数和处理方法。

这里所说的细菌浸出，是指用实验室间歇和连续试验的数据，确定建立中间试验厂的设备和在Equity银矿建一细菌浸出 主产厂的必要条件。所有的实验室试验和中间试验都是由

作者和技术助理们在Equity做的。1983年产出的用于浮选试验目的的3万吨Southern Tail矿区混合硫化物精矿堆，按照浸出的要求，分别堆存和取样，进行了间歇的实验室试验，结果很满意。

间歇的和连续的实验室试验

间歇的实验室试验得出如下结论：浸出时间和最终浸出率没有明显的关系；物料粒度与浸出率之间关系密切，80%的物料达到-74微米，浸出率最高；矿浆浓度在10%以下，浸出率对其反应不敏感，当浓度提高到30%时，浸出率与矿浆浓度成反比；培养液采用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ，其有效用量是0.05克/升；pH值对最终浸出率没有明显影响；作业温度在30~40°C之间，不能低于25°C，也不能高于45°C；充气率是0.1升/分·升矿浆。

对上述影响因素，用连续的实验室试验进行了验证，结果表明：As的优先溶解是很明显的，在第一个反应器中，停留时间不到20小时，便产生微生物的“侵蚀”作用；细菌浸出液的循环明显地“冲击”着微生物系统；大约50%的细菌浸出液循环足以维持工业规模第一个反应器中新料的酸度；大多数培养液可以除掉；微生物氧化实际上是在25%矿浆浓度条件下进行，停留时间是50小时，而不是40小时。

在25%矿浆浓度条件下需要增加停留时间的原因，可能是由于氧或 CO_2 耗尽所致。注意，在25%矿浆浓度条件下，培养液中下列营养份要提高到 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.6公斤/吨、 KH_2PO_4 0.12公斤/吨的浓度。很明显，为了一个详细的工厂设计，对选择固定投资和生产成本，需要对矿浆浓度、充气率、停留时间有详细的分析。

中间试验厂的微生物氧化

实验室的基本参数，主要是从间歇试验得来的。在10%矿浆浓度和停留时间为40小时的条件下，最大的设计能力是2吨/日。图1和图2概括了中间试验的流程和整体布置。

为获得扩大一些试验的经验和在整个较长时间内得到中间厂需要的新鲜细菌培养液，在实验室里先使用了一个500升的连续槽。

中间厂试验的目的是：

(1) 为了验证实验室细菌浸出的数据和规模大小对微生物氧化的影响；

(2) 产出足够的产品（残渣和细菌浸出液），为决定工厂规模设计和生产成本做可行性研究；

(3) 为了提供工厂规模的概念设计和成本，确定在接近真实条件下的较大规模的过程控制方案，确定严密的操作参数。

图3表明第一个中间厂试验的浸出数据；头36天表明是一个缓慢的间歇时期，为

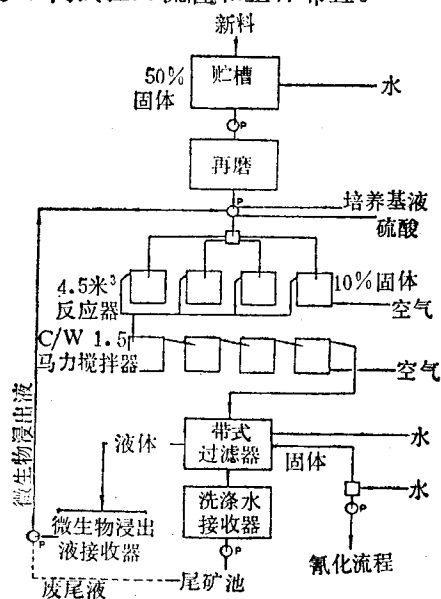


图1 中间工厂流程图