

WEI SHENG WU JIN KANG DE LI LUN YU SHI JIAN

微生物 浸矿的理论 与实践

唐雄 编著

冶金工业出版社

微生物浸矿的理论与实践

童雄 编著

北京
冶金工业出版社

1997

内 容 摘 要

本书论述了与浸矿有关的微生物学基本知识和研究方法,特别是对浸矿微生物的种类、驯化、培养、计数,微生物浸矿的三大作用机理以及影响微生物浸矿过程的四大因素进行了论述。对难处理金矿(含砷、有机碳等)、低品位铜铀矿和黑色金属、稀有金属、贵金属及其他有色金属、复杂多金属共生矿以及煤等矿石的国内外微生物浸出研究和实践,也进行了比较详细的介绍。

本书可作为地质、采矿、选矿、冶金、矿山管理、废弃物处理、化工、生物等专业的本科生、硕士生和工程技术与管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微生物浸矿的理论与实践/童雄编著. —北京:冶金工业出版社,1997.5

ISBN 7-5024-2061-4

I. 微… I. 童… III. 浸出-选矿方法,微生物 IV. TD9
25.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 07678 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

三河市双峰印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

1997年5月第1版,1997年5月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32;5.625印张;147千字;170页;1-1300册

10.80元

序

用微生物提取金属(通称生物湿法冶金)系利用某些微生物或其代谢产物对某些矿物(主要为硫化矿物)和元素所具有的氧化、还原、溶解、吸收(吸附)等作用,从矿石中溶浸金属或从水中回收(脱除)有价(有害)金属。

自1958年美国用细菌浸出铜和1966年加拿大用细菌浸出铀的研究与工业应用成功之后,生物湿法冶金的研究引起20多个国家众多学者的浓厚兴趣,研究日益深入广泛,不仅在低品位铜矿、难处理金矿方面一面生产应用,一面继续完善、提高;而且发现有三四十种微生物可在矿冶工业中有应用远景,在用不同微生物提取金属的机理、在工业应用等方面发表了大量论著。我国在这一领域虽有不少单位做过研究与生产应用,取得一定成效,但其深度与广度,和国外相比,仍有较大差距。

微生物提取铜、铀及黄金,已显示出金属提取率高、投资少、成本低、无环境污染诸多优点,在其他金属的提取或回收方面,应用的可能性也很大。国内对微生物浸矿虽有了一些报道,但较全面的专著还无一书。作者为推动生物湿法冶金在我国得以深入研究与应用,考虑到它跨学科较多,为使矿冶工作者和生物学科技术人员能较完整地、客观地了解这一领域的研究与应用现状,编著成此书,藉此推进对生物湿法冶金的研究与实践。

本书具有理论联系实际、实用性强的特点,可供矿冶与生物学科人员参考学习。

裘荣庆

1996年12月

AP-20/5

前 言

近些年来,微生物技术在处理贫矿、废矿、选矿尾矿、难处理矿和精矿等方面取得了迅猛的发展,日益受到地质、采矿、选矿、冶金、化工、环境保护、废弃物处理和生物等方面科技工作者的重视。国内一些著名大学和中科院微生物研究所等科研单位,在微生物培养、驯化、浸矿等方面,做了许多有益的工作,取得了令人鼓舞的成就。

为了适应微生物高科技与矿业交叉结合的发展需要,昆明理工大学在国内较早为选矿专业确定了“微生物浸矿”这个研究方向,开设了“微生物浸矿的理论与实践”这门学位课。本书就是在原有讲义的基础上,通过多年的研究实践,逐步补充、完善而成的。在编写过程中,云南省矿产资源管理委员会蒋铮副处长和白平工程师,昆明冶金研究院院长王喜良高工,云南省科委衡根华副处长,昆明理工大学钱鑫和杨显万教授及一些同行给予了编者大力支持和鼓励;中科院微生物研究所袁荣庆教授百忙之中仔细地审阅了书稿全文,提出了许多宝贵的建议,并为本书作序,在此一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,在取材、编排等方面肯定存在不足之处,恳请读者批评指正。

编者

1996年12月于昆明

作者简介

童雄, 博士,
副教授, 31 岁。
1988 年毕业于
武汉化工学院选
矿专业, 1991 年
3 月和 1995 年 3
月分别获得昆明
理工大学硕士和
博士学位, 研究
方向为黄金选矿
和湿法治金。
1991 年 4 月~
1992 年 8 月, 曾
在成都理工大学
任教, 现任教于
昆明理工大学资
源开发工程系。
作者一直从事选
矿、黄金湿法治
金和微生物选矿
的研究, 负责和
承担了多项国家
和省部级研究课
题, 在国内外刊
物和学术会议上
发表论文近 30
篇并多次获奖。

目 录

第一章 微生物学基本知识.....	(1)
第一节 微生物的化学组成与营养物质.....	(1)
一、微生物的化学组成.....	(1)
二、微生物的营养物质.....	(2)
三、微生物的营养类型.....	(4)
四、微生物的营养物质的摄取.....	(8)
五、微生物的生理和形态特征鉴定.....	(8)
第二节 微生物的代谢.....	(9)
一、酶.....	(9)
二、微生物的呼吸作用.....	(19)
第三节 微生物的遗传与变异.....	(22)
一、遗传变异的物质基础.....	(22)
二、微生物的变异.....	(24)
第二章 浸矿微生物.....	(27)
第一节 概述.....	(27)
第二节 浸矿微生物的种类和特性.....	(28)
第三节 浸矿微生物的培养基.....	(30)
一、配制培养基的原则.....	(31)
二、培养基的类型.....	(33)
第四节 浸矿微生物的采集、分离、培养及保藏.....	(34)
一、浸矿微生物的采集与繁殖.....	(34)
二、浸矿微生物的分离与纯化.....	(35)
三、菌种保藏.....	(37)
四、浸矿菌种的驯化与改良.....	(37)
第五节 细菌计数和细菌生长特征.....	(41)
一、浸矿微生物生长的测定方法.....	(41)
二、浸矿细菌活性的测定.....	(42)
三、微生物生长特征曲线.....	(44)
第三章 微生物浸矿的理论.....	(48)

第一节	微生物浸矿的基本原理	(48)
一、	微生物浸矿直接作用理论	(48)
二、	微生物浸矿间接作用理论	(51)
三、	微生物浸矿复合作用理论	(53)
第二节	微生物浸矿的动力学研究	(54)
第三节	影响微生物浸矿过程的因素	(56)
一、	微生物因素	(56)
二、	物理化学因素	(65)
三、	工艺技术因素	(70)
四、	其他影响因素	(71)
第四章	微生物浸矿研究方法和工艺过程	(78)
第一节	微生物浸矿的实验室研究方法	(79)
一、	摇瓶试验	(80)
二、	微生物柱浸试验方法	(81)
三、	实验室微生物搅拌浸出试验方法	(83)
第二节	微生物浸矿工艺过程	(87)
一、	微生物堆浸	(87)
二、	微生物搅拌浸出	(90)
三、	微生物地浸	(91)
四、	微生物槽浸	(92)
第五章	难处理金矿的微生物氧化浸出	(94)
第一节	难处理金矿采用微生物浸出的原因	(94)
一、	物理因素	(94)
二、	化学因素	(95)
第二节	含砷难处理金矿的微生物氧化	(98)
一、	砷矿石微生物氧化化学	(98)
二、	影响含砷矿物微生物氧化的因素	(101)
第三节	含碳质物难处理金矿的微生物氧化浸出	(107)
第四节	含金黄铁矿的微生物浸出	(110)
第六章	铜铀矿石的微生物浸出	(114)
第一节	铜矿物的微生物浸出	(114)
一、	铜矿物微生物浸出的理论	(111)

二、铜矿石微生物浸出的工艺·····	(117)
三、铜矿石微生物浸出的实践·····	(122)
第二节 铀矿石的微生物浸出·····	(128)
一、微生物浸出铀矿石的现状·····	(128)
二、铀矿石微生物浸出的工艺与实践·····	(129)
第七章 其他矿石微生物浸出的理论和实践·····	(134)
第一节 引言·····	(134)
第二节 有色金属矿物的微生物浸出·····	(135)
一、铅矿物及其废料·····	(136)
二、锌矿物·····	(137)
三、镍矿物·····	(138)
四、钴矿物·····	(142)
五、钼矿物·····	(143)
第三节 黑色金属矿物的微生物浸出·····	(144)
一、锰矿物及其微生物浸出·····	(144)
二、微生物浸锰的机理·····	(148)
三、铁矿物及其微生物浸出·····	(149)
第四节 稀有金属矿物的微生物浸出·····	(151)
一、锑矿物·····	(151)
二、锡矿物及其废料·····	(152)
三、镓矿物·····	(152)
四、其他稀有金属的微生物浸出·····	(154)
第五节 非金属矿的微生物浸出·····	(154)
一、铝土矿的微生物脱硅·····	(154)
二、磷矿石的微生物浸出·····	(157)
第六节 复杂多金属矿石的微生物浸出·····	(158)
第七节 煤中硫的微生物浸出·····	(160)
一、煤脱硫的重要性及微生物法脱硫的优势·····	(160)
二、煤脱硫的微生物种类及实践·····	(162)
参考文献·····	(166)

第一章 微生物学基本知识

第一节 微生物的化学组成与营养物质

一、微生物的化学组成

微生物细胞的化学元素分析表明,它和其他生物一样,都是由碳、氧、氮、磷、硫、钾、钙、镁、钠、铁等主要元素组成;此外,还有含量极微的锌、铜、锰、钼、钴等微量元素。由它们组成微生物体内的各种有机物与无机物。

微生物细胞中含量最多的是水分,约占菌体鲜体重的70%~90%。除去水分的干物质中,碳、氢、氧、氮4种元素占全部干重的90%~97%,其余的3%~10%为矿质元素,亦称无机元素。各种微生物细胞干物质的含碳量比较稳定,约占干重的 $50\pm 5\%$ 。氮素含量在各类微生物中差别较大,约为5%~13%。在矿质元素中以磷的含量为最高,约占全部矿物质含量的50%,占干细胞干物质总量的3%~5%;其次为钾、镁、钙、硫、铁及钠等。

微生物矿质元素的含量,可随着微生物生理活性的不同而有很大的变化。如硫细菌细胞中可积存大量的硫,铁细菌的鞘中可含大量的铁,硅藻外壳主要由硅组成,而海洋微生物细胞中氯化钠的含量较高。同一种微生物在生长的不同时期及不同环境条件下,其细胞内各元素的含量也会有改变。

微生物细胞中绝大部分元素都组成细胞的各种有机物质,包括细胞的结构物质、细胞中的营养物质与贮藏物质。主要的有机物是蛋白质、核酸、碳水化合物及脂类等,其含量见表1-1。此外,尚有维生素、色素、抗菌素或毒素等有机物。

表 1-1 微生物细胞中主要有机物的含量(占细胞干重%)

有机物	微 生 物		
	细 菌	酵 母 菌	霉 菌
蛋 白 质	5080	3275	14~52
核 酸	1020	68	1~2
碳 水 化 合 物	1228	2763	7~40
脂 类	520	215	4~40

二、微生物的营养物质

微生物和其他生物一样,需要自外界不断地吸收和利用各种营养物质,用以合成新的细胞物质并从中获取生命所需的能量。各种微生物的营养物质来源各不相同,尤其是碳素与氮素的来源差别很大。就碳素而言,有的微生物能像高等植物一样利用 CO_2 ,有的能像高等动物那样利用现成的有机物;就氮素而言,微生物中有的能利用无机氮化物,有的需要有机氮化物,有的还能利用空气中的 N_2 。微生物除了能利用其他生物所利用的营养物外,还能利用其他生物不能利用甚至是有毒的化合物,如酚、硫化氢、一氧化碳、黄曲霉毒素等。

无机物也是微生物生长不可缺少的营养物质。它们的主要作用是:构成细胞的组成成分;作为酶的组成部分,维持酶的作用;调节细胞渗透压、氢离子浓度、氧化还原电位等。某些无机物尚可作为微生物的能源。微生物可以从无机盐类中获取有关的无机营养,也可以在含无机离子的有机物分解过程中摄取无机营养。自养微生物可以利用无机盐作能源。

一般微生物需要的无机盐分别介绍如下:

(1)磷 所有研究过的细菌,它们的生长都需要磷酸盐,这与磷在细胞中的重要作用有关。磷是微生物细胞合成核酸、核蛋白、磷脂和其他含磷化合物的重要元素,也是许多重要辅酶,例如辅酶 I (NAD)、辅酶 II (NADP)、辅酶 A、辅羧化酶、各种磷酸腺苷 (ADP 和 ATP) 的组成成分。高能磷酸键在能量贮存与传递中有重要的作用。此外,磷酸盐还是重要的缓冲剂。

(2)硫 硫是蛋白质组成中的某些氨基酸,例如:胱氨酸、半胱

氨酸、蛋氨酸的成分。硫是在代谢过程中起重要作用的物质,例如硫酸素、生物素、辅酶 A 和谷胱甘肽等也都含有硫。硫或硫化物是某些自养微生物的能量。微生物可以从含硫无机盐或有机硫化物中得到硫。

(3) 镁 镁是有机体中一些重要酶,例如己糖磷酸化酶、异柠檬酸脱氢酶、肽酶、羧化酶等的活化剂,也是光合细菌菌绿素的重要组成成分。此外,镁在细胞中还起着稳定核糖体、细胞膜和核酸的作用。因此,微生物生长需要一定量的镁,而且革兰氏阳性细菌需要量比革兰氏阴性细菌多。如果缺乏镁,细胞的生长就会停止,而首先遭到破坏的是核糖体和细胞膜,因为它们对镁的依赖性最大。微生物可以利用硫酸镁或其他镁盐作为镁源。

(4) 铁 铁是细胞中过氧化氢酶、过氧化物酶、细胞色素、细胞色素氧化酶的组成成分。缺铁会使这些酶的合成受到阻碍,并使生长受到影响。大肠杆菌缺铁,则甲酸脱氢酶不足,因此分解葡萄糖时不产气。铁对细菌毒素的形成影响很大,这里一个值得注意的例子是,铁对白喉棒状杆菌形成白喉毒素的影响。白喉棒状杆菌在有充足的铁的培养基中不形成毒素,而在缺铁的培养基中产生大量的毒素。因此,在白喉棒状杆菌所生存的组织中,铁的浓度控制着毒素的产生和疾病的症状。

自养菌中的铁细菌可以从铁的氧化中得到能量。微生物可以从硫酸铁或其他铁盐中得到铁。

(5) 钾 钾是细胞中的重要阳离子之一,它是许多酶的激活剂。钾与原生质胶体特性和细胞质膜透性有重要关系,钾在细胞内积累的浓度往往要比细胞外的浓度高许多倍。各种无机钾盐,特别合适的是磷酸盐或磷酸二氢钾、磷酸氢二钾,可以作为微生物的钾源。

(6) 钙 钙也是细胞内的重要阳离子,它是某些酶(例如蛋白酶)的激活剂。此外,它是细菌芽孢的重要成分。在细菌芽孢的耐热性方面起着关键的作用。各种水溶性钙盐可以作为微生物的钙盐。

除无机盐以外,微量元素也是微生物正常生长发育所需的,这

些微量元素有钼、锌、锰、钴、镍、铜、碘、溴、钒等，它们往往非常强烈地刺激微生物的生命活动。这是由于许多微量元素参加酶蛋白的组成或者很多酶受它们的活化。因此微量元素的缺少，常常引起微生物生命活动强度的降低，甚至不能生长发育。不过微生物对微量元素的需要量是极少的，一般在培养基中含有 1×10^{-7} 或更少就可满足需要。由于这些微量元素常混在其他营养物 and 水中，所以在培养基中一般不另行添加。过量的微量元素反而会引起毒害作用，特别是一种过量微量元素单独存在时更为严重。因此在各种微量元素之间需要有恰当的配比。

(7) 铜 铜是一些酶的组成成分，例如多酚氧化酶和抗坏血酸氧化酶等都是含铜的特殊蛋白质；锰是黄嘌呤氧化酶的组成成分，也为羧化酶作用所必需；钴参入维生素 B_{12} 的组成；锌是乙醇脱氢酶和乳酸脱氢酶的活性基，许多酶的活性也靠锌来激活；钼与钒在微生物的固氮中有特殊的作用。微量元素的来源可以是这些元素相应的盐类。

有些微生物在正常生活时，除必须由外界供应一定的碳、氮、无机元素和微量元素等营养外，还需要一些微量的特殊有机物，统称之为生长因素（也叫作生长因子）。例如维生素类物质，主要是维生素 B 族化合物，重要的有：硫胺素 (B_1)、核黄素 (B_2)、泛酸 (B_3)、烟酸 (B_5)、吡哆醇 (B_6)、叶酸 (B_c) 和维生素 B_{12} 以及生物素 (H)、肌醇、维生素 K 等。此外，在生长因素中还包括某些氨基酸、嘌呤、嘧啶等。有些微生物能自行合成生长因素，故不需外界供应。

综上所述，微生物是杂食性生物，能够“食用”多种多样的无机和有机物质。因此，微生物对人类浸矿技术能发生重要的影响。

三、微生物的营养类型

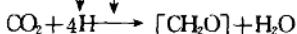
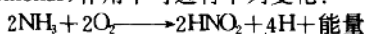
微生物种类繁多，营养条件各异。根据碳素来源不同，可将微生物分为自养型（利用 CO_2 ）及异养型（利用有机物）两大类；根据能量来源的不同，也可将其分为光能营养型（利用日光能）及化能营养型（利用无机或有机物氧化作用所产生的化学能）两大类。

通常根据碳素来源与能量来源的不同，并兼及电子供体的不

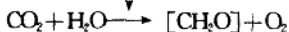
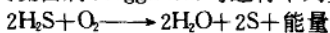
同情况,将微生物分作光能自养型、光能异养型、化能自养型与化能异养型 4 种营养类型。藻类和大部分浸矿细菌如氧化铁硫杆菌属于自养型,大部分细菌及全部霉菌、酵母菌都属于异养型。自养型亦称无机营养型,异养型亦称有机营养型。

(一)化能自养型微生物

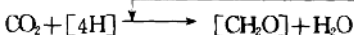
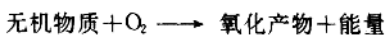
化能自养型微生物(chemoautotroph)生长需要无机物,在氧化无机物的过程中获取能源,同时,无机物又作为电子供体,使二氧化碳还原为有机碳化物。用作产生能源的无机物有 NH_3 、 NO_2^- 、 Fe^{2+} 、 H_2S 、 S 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 及 H_2 等。如在亚硝化单胞菌属(Nitrosomonas)作用下可进行下列变化:



贝氏硫菌属(Beggiatoa)可进行下列变化:



化能营养型的一般通式如下:



几乎全部化能自养型菌为专性需氧菌。自然界中此类菌种虽少,仅 30 余种,但其专性很强,一种菌只能氧化一种特定的无机物,它们在自然界物质循环中的作用至为重要。化能自养菌的主要生理性状见表 1-2。

表 1-2 化能自养型细菌主要生理性状

生物类型	碳源	能源	电子受体	与氧气关系	利用有机物能力
硝化菌 氢氧化菌	CO_2	NH_4^+	O_2	需氧	极为有限

续表 1-2

生物类型	碳源	能源	电子受体	与氧气关系	利用有机物能力
亚硝酸氧化菌	CO ₂	NO ₂ ⁻	O ₂	需氧	极为有限
硫细菌					
专性	CO ₂	H ₂ S, S, S ₂ O ₃ ²⁻	O ₂	需氧	极为有限
兼性或混合型	CO ₂ 和(或)有机物	H ₂ S, S, S ₂ O ₃ ²⁻ 和(或)有机物	O ₂	需氧	有限
铁细菌	CO ₂ 或有机物	Fe ²⁺	O ₂	需氧	绝大多数菌可能为无限
氢细菌	CO ₂	H ₂	O ₂	需氧	无限
产甲烷菌	CO ₂	H ₂	CO ₂	厌氧	极为有限
利用甲烷菌	CH ₄ , CH ₃ OH	CH ₄ , CH ₃ OH	O ₂	需氧	极为有限

(二) 化能异养型微生物

化能异养型(chemoheterotroph)是微生物最普遍的代谢方式。这类微生物的碳源与能源均来自有机物,它们在分解有机化合物的过程中产生能量,利用其中一部分供给自己合成作用之需。化能异养型微生物又可分为腐生的和寄生的两类,前者是利用无生命的有机物,而后者则依靠活的生物体而生活。在腐生和寄生之间存在着不同程度的既可腐生又可寄生的中间类型,称为兼性腐生或兼性寄生。

化能异养微生物广泛存在于自然界,无论有氧无氧、酸性碱性、高温低温等各种生态条件下,只要有有机质存在,均可见它们的踪迹。它们在自然界物质循环中的作用至关重要,与人类关系极其密切。

然而,上述四大代谢类型的划分并非绝对的。例如,按能源不同而划分的光能型与化能型之间存在着2种能源均可利用的兼性型或混合型,红螺菌在有光厌氧条件下可利用光能,而在黑暗通气条件下又可利用有机质氧化产生的化学能以推动其代谢作用。又如,按碳源不同分成自养型与异养型之间也没有绝对的界限,氢细菌在完全无机的环境中可以从氧化氢的过程中取得能量,还原CO₂成为自身有机质,而当环境中含有有机物时,它们便直接利用

氧型。大多数菌种在有光与黑暗条件下均生长良好。在有氧条件下不能合成光合色素。光能型微生物主要生理性状见表 1-3。

表 1-3 光能型微生物主要生理性状

生物类型	电子供体	与 O ₂ 关系	主要碳源	固氮作用	在黑暗中生长
真核:藻类	H ₂ O	需氧	CO ₂	不能	能
原核:蓝细菌	H ₂ O	需氧	CO ₂	能	不能
紫细菌					
硫菌	H ₂ S, H ₂	厌氧	CO ₂	能	不能
非硫菌	有机物	兼性	有机质	能	能
绿细菌	H ₂ S, H ₂	厌氧	CO ₂	能	不能

四、微生物的营养物质的摄取

微生物细胞的全部表面都是营养物质的吸收面。单细胞细菌具有最大与外界接触比表面,多细胞微生物的比表面也较大,使微生物在生活环境中能迅速吸收营养物质。

微生物摄取营养物质的方式因微生物种类不同而异。总的讲来,原生动物的靠吞噬作用或胞饮作用摄取食物;细菌、藻类和真菌都是通过细胞质膜吸收。吞噬作用是由细胞表面直接包围固体食物,形成食物泡进入细胞内而后被消化;胞饮作用是由细胞包围液体或胶体物形成食物泡。细菌、真菌、藻类等所摄取的营养物质必须先经微生物分泌出外酶将之分解为可溶性物质后才能吸收。

关于营养物质进入细胞,可有多种途径,包括被动扩散、促进扩散、主动运输、基团转位等。关键在于微生物细胞质膜的结构与化学组成不同,因而表现出不同的选择吸收性能;另一方面,细胞内进行的代谢过程和代谢强度,亦决定吸收营养物质的数量与速度,并影响细胞质的结构状态及其渗透性。然而,营养物质如何进入细胞的问题至今并未全部弄清。

五、微生物的生理和形态特征鉴定

当获得一株纯培养细菌时,应该对其生理形态进行观察和鉴定,确定其类别。

细菌经过染色后,即可在光学显微镜下观察微生物的形状和结构。观察细菌的形态可用单染色法或革兰氏染色法,这里只介绍