

魏德洲 编著

资源微生物技术



冶金工业出版社

资源微生物技术

魏德洲 编著

北 京

冶金工业出版社

1996

图书在版编目(CIP)数据

资源微生物技术/魏德洲编著. —北京:冶金工业出版社,
1996. 5

ISBN 7-5024-1865-2

I. 资… II. 魏… III. 微生物学-应用-选矿 IV
.TD925. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 05084 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)
北京社科印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
1996 年 5 月第 1 版,1996 年 5 月 第 1 次印刷
850mm×1168mm 1/32;5.375 印张;148 千字;171 页;1-1000 册
9.8 元

序

微生物技术作为生物技术的一个重要分枝，是人类通过实践所掌握的一种最古老的技术，迄今已有 4000~5000 年的应用历史。酿酒、面粉发酵、酱醋制造、家肥沤制等均属于微生物技术的范畴。目前，微生物技术在食品、医药、化工、能源等工业部门以及农业上的应用极其广泛，具有很大的影响，创造了可观的经济效益和社会效益。然而，在矿物资源开发和利用领域内，微生物技术的应用却屈指可数。在国外，近年来已将微生物技术不同程度地用于铀、铜、金矿石的堆浸，坑内保安矿柱的回采以及尾矿处理等方面。据资料报道，美国采用细菌堆浸工艺生产的铜约占全国铜产量的 10%。对于难处理的高砷金矿石，在南非已建成了采用微生物氧化-氰化提金工艺的生产厂。此外，在解决环境污染、提高矿物材料纯度等方面，微生物技术也是大有可为的。我国对资源微生物技术的研究起步并不晚，早在 60 年代初期，东北工学院（现东北大学）采矿工程专业的研究生，就在安徽铜官山铜矿进行了微生物浸铜的试验研究，取得了较好的效果。自 70 年代开始，中国科学院微生物研究所等单位，又对铀矿石和难处理金矿石的微生物处理工艺进行了系统的研究。近 7~8 年来，东北大学的地质、选矿等学科的教师和研究生，在难处理高砷金矿石、高磷锰矿石、石油污染土壤等的微生物处理技术研究中，取得了不少令人鼓舞的研究成果，对反应机制的探讨也得出了许多新的认识，受到了有关方面的重视。

这本书是一本系统地论述资源微生物技术的研究生教学参考书，是作者在微生物技术课题的研究和教学过程中，不断积累、总结和更新的基础上编写而成的。它的问世将对资源微生物处理方面的人材培养和试验研究工作起到一定的推动作用。

资源微生物处理技术是综合地质（矿物学、矿床学）、生物（微生物）和选矿等领域的跨学科研究，是在模拟自然界氧化成矿

的基础上，对某些难处理矿石或特贫矿石进行生物氧化处理，变缓慢的自然成矿过程为快速的人工选冶过程。集认识世界和改造世界为一身，基础研究和工艺研究并举，是本书的特点，也是科学研究不断创新和发展的必然途径。

关广岳

1995年12月16日

前 言

近年来，随着生物技术的飞速发展，矿产资源的微生物处理技术也越来越受到人们的重视，利用微生物处理贫、废矿石和难选冶矿石的研究日益增加，这一新工艺的工业应用实例不断涌现。正是为了适应这一发展趋势的需要，东北大学在国内率先为矿物加工工程学科的硕士研究生开出了“资源微生物技术”这门学位课。本书就是编者经过两年的教学实践，在原有讲稿的基础上，重新整理而完成的。在书稿的编写过程中，东北大学资源与环境工程系的全体老师，特别是陈炳辰、郑龙熙和张维庆三位教授，给予了编者大力支持和鼓励；东北大学的关广岳教授详细审阅了书稿全文，并为本书作序；秦煜民和何良菊两位硕士研究生为书稿的完成做了许多有益的工作，编者在此一并向他们表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，恳请读者不吝予以指正。

编者

一九九五年十一月

目 录

1 绪论	1
1.1 资源微生物技术的研究对象和任务	1
1.2 资源微生物技术的历史回顾	2
1.3 资源微生物技术的研究及应用概况	4
1.4 资源微生物技术的发展趋势	6
2 微生物学基础	8
2.1 微生物概述	8
2.1.1 微生物的概念	8
2.1.2 微生物的分类和命名	9
2.1.3 微生物的共同特点及特性	10
2.2 原核微生物	11
2.2.1 细菌	11
2.2.2 放线菌	26
2.2.3 蓝绿细菌	28
2.3 微生物的生理	30
2.3.1 微生物的酶	30
2.3.2 微生物的营养	34
2.3.3 微生物的产能代谢	39
2.4 微生物的生长	41
2.4.1 微生物的生长繁殖	41
2.4.2 影响微生物生长的环境因素	45
3 处理含硫矿石的微生物及其特性	49
3.1 还原硫的细菌	49
3.2 氧化硫的细菌	50
3.2.1 无色硫细菌	50
3.2.2 光合自养硫细菌	52
3.3 氧化亚铁硫杆菌的生物学	53

3.3.1	氧化亚铁硫杆菌的化学组成和培养基	53
3.3.2	氧化亚铁硫杆菌的代谢	54
3.3.3	氧化亚铁硫杆菌的生态学	57
4	处理非含硫矿石的微生物及其特性	67
4.1	氧化锰的微生物	67
4.1.1	氧化锰的微生物种类	67
4.1.2	锰氧化细菌的生长特性	67
4.1.3	微生物对锰氧化过程的催化机制	71
4.2	还原锰的微生物	72
4.2.1	还原锰的微生物种类及其特性	72
4.2.2	微生物对锰还原过程的催化机制	73
4.3	分解难溶磷酸盐的微生物	73
4.3.1	分解难溶磷酸盐的微生物种类	73
4.3.2	分解难溶磷酸盐的微生物的特性	73
5	浸矿用微生物与浸矿工艺	76
5.1	浸矿用微生物	76
5.1.1	浸矿用微生物的来源	76
5.1.2	浸矿用微生物的培养与驯化	76
5.1.3	浸矿用微生物的计量方法	80
5.2	微生物浸矿工艺及其影响因素	80
5.2.1	微生物浸矿工艺	80
5.2.2	微生物浸矿流程	84
5.2.3	微生物浸矿设备	86
5.2.4	浸矿用微生物的连续培养	89
5.2.5	微生物浸出剂的再生与循环利用	91
5.2.6	微生物浸矿过程的影响因素	91
5.2.7	微生物浸矿的动力学特性	104
6	资源微生物技术的应用	105
6.1	铜矿石的微生物浸出	105
6.1.1	微生物浸铜的基本反应	105

6.1.2	铜矿石微生物浸出的工艺流程	107
6.1.3	铜矿石微生物浸出的应用实例	108
6.2	难处理金矿石的微生物氧化预处理	116
6.2.1	难处理金矿石微生物氧化的试验研究 新进展	117
6.2.2	微生物氧化难处理金矿石的作用机理	123
6.2.3	难处理金矿石微生物氧化浸出的工艺 流程	125
6.2.4	难处理金矿石微生物氧化过程的影响 因素及工艺条件控制	128
6.2.5	扩大试验及半工业试验厂实例	135
6.3	铀矿石的微生物浸出	145
6.3.1	微生物浸铀的工艺流程	145
6.3.2	铀矿石微生物浸出工艺的应用	147
6.4	其他资源的微生物浸出	152
6.4.1	镍和钴矿物的微生物浸出	152
6.4.2	铅和锌矿物的微生物浸出	153
6.4.3	钼矿物的微生物浸出	154
6.4.4	锰矿物的微生物浸出及氧化	154
6.4.5	稀有金属矿石的微生物浸出	156
6.4.6	煤炭的微生物脱硫	158
7	微生物浸出工艺的技术经济分析	161
7.1	金矿石的微生物氧化工艺与其他工艺的 技术经济指标对比	161
7.2	建厂投资费用对比	162
7.3	不同氧化工艺的生产费用对比	163
7.4	微生物氧化工艺与焙烧工艺的经济效益对比	166
附录		168
参考文献		171

1 绪 论

1.1 资源微生物技术的研究对象和任务

资源微生物技术是在初步掌握了微生物学的基本概念和微生物基本特性的基础上,结合资源常规加工方法的基本知识,着重研究矿产资源微生物处理的一般原理和工艺。

资源微生物技术可以说是随着特贫、特细或有害元素包裹型矿石的开发利用而问世的。自从浮游选矿方法和磁电选矿方法继重力选矿方法之后,于20世纪20年代在工业上得到成功应用以后,使许多种矿石的分选问题得到了合理解决。然而,贫、细、杂矿石的开发利用问题,却依然不断地向磁、重、浮三种常规的选矿方法提出严峻的挑战。尤其是对于那些矿物共生关系特别密切或有用成分被有害元素或载体矿物所包裹的矿石,不仅三种常规选矿方法力所不及,就是普通的化学浸出方法也无能为力。针对这一实际问题,从20世纪50年代起,一些学者又相继研究成功了焙烧-浸出、热压浸出和微生物浸出3种特殊处理方法,这3种特殊工艺的工业实施,使选矿技术达到了一个新水平。尤其是微生物浸矿工艺,因具有设备投资少、生产费用低、环境污染轻且容易治理等突出优点,而倍受人们的青睐,已成为低品位硫化铜矿石、铀矿石和难处理金矿石的优先考虑工艺。

当然,微生物浸出工艺也并非尽善尽美,反应速度慢、生产流程长是这种工艺的突出缺点。它之所以能受到人们的重视,关键在于能被用来处理那些用常规选矿方法无法处理或经济上不合算的矿产资源。尤其是对于那些特贫、特细或有用成分被包裹型的矿石,资源微生物技术已显示出无法比拟的独特优点。

1.2 资源微生物技术的历史回顾

资源微生物技术是在地质微生物学和微生物地球化学的研究基础上形成的。

人们首先认识到，在自然界中，微生物参与了碳、氮、硫、硅、铁、锰等多种元素的循环，从而使 67 种元素在自然界中的分布与微生物的作用密切相关，地球上许多种元素的迁移和矿床的形成都与微生物的活动有着千丝万缕的联系。随着科学技术的发展，人们对这种关系的研究也不断深入，于是便形成了专门的学科——地质微生物学和微生物地球化学。

微生物成矿作用机理的研究成果，启发了人们对微生物浸矿工艺的思考。起初，一些选矿工作者注意到有些矿山利用酸性矿坑水从贫矿、废矿堆中浸出铜这一生产实用工艺，推断这类矿坑水中可能存在有某种微生物，于是便开始了资源微生物处理技术的初期探索研究。经过多年的不懈努力，柯尔默 (Colmer) 于 1947 年首次发现酸性矿坑水中含有一种可以将 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} 的细菌，认为这种细菌在铜的浸出过程中或矿坑水的进一步酸化过程中起着主要作用。此后，坦波尔 (Temple) 和幸凯尔 (Hinkle) 于 1951 年从煤矿的酸性矿坑水中首次分离出一种能氧化金属硫化物的细菌。坦波尔和柯尔默于 1951 年将这种细菌命名为氧化亚铁硫杆菌。3 年后，布莱涅 (Bulyner) 等人在从废铜矿石堆流出的酸性水中也分离出了氧化亚铁硫杆菌。用氧化亚铁硫杆菌在实验室中对硫化铜矿石进行的浸出试验结果表明，这种细菌对硫化矿具有明显的氧化作用。基于这些研究结果，美国肯尼柯特 (Kennecott) 铜矿公司率先利用氧化亚铁硫杆菌进行渗滤浸出硫化铜矿石的工业应用试验研究，试验工作进行得非常顺利，不久这种新型的微生物浸铜工艺即在肯尼柯特铜矿公司所属的犹他 (Utah) 矿获得成功，并于 1958 年申请到了这项技术的专利。这是资源微生物技术发展历史中获得的第一项技术专利，它有力地推动了资源微生物技术的发展。

世界上第一例利用微生物浸出铀矿石的工业应用,于20世纪50年代初期出现在葡萄牙。葡萄牙的“镭公司”从1953年开始进行铀矿石自然浸出的试验研究,镭公司的科技人员利用铀矿石中存在的或人为添加的黄铁矿,在酸性矿坑水和空气的作用下产生 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} ,从而使金属铀氧化成 UO_2^{2+} ,而从矿石中溶解出来。在1956年召开的第二届国际和平利用原子能会议上,他们发表了题为“铀的自然浸出法”的研究报告。此后,葡萄牙的一些公司又利用这种方法开发出了铀矿石的自然堆浸工艺,用于从中、小型矿山产出的铀矿石中回收铀。很显然,这种铀矿石的浸出工艺,并不完全是一个自然过程,而是一个有氧化亚铁硫杆菌参与的微生物浸出过程,只是由于受科学技术发展水平的制约,当时没有被人们所认识罢了。

自从美国获得了微生物浸铜技术的专利以后,人们将葡萄牙的自然浸铀工艺与之联系起来,勾画出了硫化矿石微生物处理技术的框架,于是在世界范围内掀起了一个利用微生物浸出贫硫化矿石的研究热潮,许多国家相继开展了用细菌浸出法从贫矿、废矿及表外矿石中回收铜和铀的研究工作。这一新技术自20世纪60年代起开始用于工业生产。据统计,美国当时利用微生物堆浸工艺从贫、废铜矿石中回收铜的矿山达十多个,产铜量约占美国铜产量的10%。

由于细菌浸铜工艺处理贫硫化铜矿石的生产成本仅为传统工艺的三分之一(包括选矿和冶炼),因而继美国之后,1964年苏联在俄罗斯的第二大铜矿建成了微生物堆浸工艺处理场,处理低品位表外矿石。我国东北工学院(现东北大学)系矿工程专业的研究生,也于1965年前后,在安徽的铜官山铜矿,进行了利用微生物浸出坑道中残存矿柱上铜的研究,获得了良好的浸出指标,只是因坑道漏水而未能获得工业应用。

与此同时,铀矿石的微生物浸出工艺也得到了迅速发展。加拿大的伊利奥特湖地区是世界上有名的铀产地,位于这一地区的斯坦洛克矿,从1964年起在采空区利用微生物浸出坑道中残存的

铀, 平均每月回收 U_3O_8 达 6800 多 kg, 占当时全矿总产量的 7%。其他产铀国家(如美国、南非、前苏联、澳大利亚、法国等), 也在不同程度上利用微生物浸出一些贫矿石中的铀, 获得了可观的经济效益。

从 20 世纪 70 年代起, 资源微生物技术开始用于高碳、高砷金矿石的氧化预处理, 为难处理金矿石的开发利用开辟了一条新途径。我国在这方面最先开展研究工作的单位是中国科学院微生物研究所。此后, 东北大学又于 80 年代, 在成矿过程研究中, 系统地研究了硫酸盐的微生物还原机理和金属硫化物矿床的微生物氧化机理, 并于 80 年代后期, 将这些研究结果移植到高砷金矿石的氧化预处理研究中。进入 90 年代以后, 中国科学院化工冶金研究所、吉林省黄金研究所、武汉化工学院、中南工业大学、沈阳黄金学院等单位, 也相继开展了这方面的研究工作。与此同时, 东北大学还开始了高磷酸碳酸锰矿石的微生物氧化富锰脱磷研究, 并首次从锰矿坑水中分离出了两种氧化锰的微生物。

1.3 资源微生物技术的研究及应用概况

近 20 年来, 资源微生物技术逐渐成为湿法冶金领域的热门研究课题。研究人员对浸矿用微生物的分离和鉴定、微生物浸出工艺、浸出动力学及浸出机理等都进行了广泛深入的研究, 提出了微生物浸出的直接作用说和间接作用说。与此同时, 浸矿用微生物的种类也不断增多, 除了人们通常熟知的自养菌外, 还对有浸矿作用的异养菌、真菌等进行了系统研究。用微生物浸出的金属种类已扩大到铜、铀、镍、钴、锌、锰、金、银等十多种有色金属和贵金属以及某些稀有金属。目前, 资源微生物技术已逐渐成为一个新的科学分支, 它的研究领域日趋扩大, 其内容既包括用微生物从矿石中提取金属, 也包括借助于微生物的作用从矿石中除去用其他工艺方法提取金属时的干扰成分, 甚至还包括利用微生物对资源加工工程产出的污水进行处理。

在工业生产上, 微生物浸出技术目前主要用于提取铜、铀和

难处理金矿石的氧化预处理,作业形式包括微生物堆浸、地浸、槽浸和搅拌浸出4种。

迄今为止,资源微生物技术在工业生产中应用最多的是回收铜,所处理的矿石都是贫矿、废矿或表外矿,矿石中的铜品位一般低于0.5%,由于微生物浸铜工艺的生产成本低廉,才使得这部分废弃矿石得以利用。因此,低品位铜矿石的微生物堆浸工艺目前具有很大的吸引力,对许多老铜矿山的生存起着极其重要的作用。

其次是难处理金矿石的微生物氧化预处理工艺。这类难处理金矿石主要是因为金属硫化矿物(如黄铁矿、砷黄铁矿、毒砂等)对金颗粒形成包裹,浸出剂无法与金接触所致。利用微生物对这类金矿石进行氧化预处理,可以将硫化矿物包裹层破坏掉,从而提高金的氰化浸出率。由于利用微生物进行氧化生产成本低、投资少且不污染环境,所以这种工艺被普遍认为是一种很有发展前途的新技术。截止目前,世界上已建起了20多个不同规模的高砷金矿石的微生物氧化-氰化提金试验厂和生产厂,其中位于南非的一个最大规模的生产厂,日处理浮选精矿达20t。

就微生物浸出速度而言,通过多方面的研究,已使其得到了大幅度提高。目前黄铜矿的微生物槽浸速度已达到800mg/(L·h)以上。为了缩短金矿石的细菌氧化周期,英国的戴维麦基(Davy McKee)公司与加的夫里工学院合作,研究成功了一种新的微生物浸出工艺,这种工艺将微生物繁殖和金矿石的氧化两个过程分开进行,从而避免了两个过程所要求的最佳工艺条件之间发生矛盾,使金矿石的氧化脱砷周期由7d~10d缩短到3d~4d。

与此同时,为了克服金属硫化矿物氧化过程中释放出的热量对微生物的浸矿过程产生不利影响,近年来,一些研究者在设法提高氧化亚铁硫杆菌耐热性的同时,又培育出了一种嗜热硫杆菌和一种中等耐热菌。前者可耐60℃~80℃的高温,后者是混合培养菌,可耐40℃~50℃的温度。试验结果表明,处理高砷、高硫金矿石时,这两种菌的作用效果均优于氧化亚铁硫杆菌。

此外，为了进一步加快微生物的浸矿速度，最近又有人利用某些金属离子（如 Cu^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ag^+ 等）作催化剂来加快微生物氧化的反应速度，取得了很好的效果，研究者认为，这些金属离子之所以能催化金属硫化矿物的氧化反应，主要是由于它们取代了矿粒表面的硫化矿物晶格中原来的金属离子（如 Fe^{2+} 、 Cu^{2+} 等），从而增加了硫化矿物的导电性，加快了硫化矿物的电化学氧化反应速度。

1.4 资源微生物技术的发展趋势

近几十年来，随着科学技术的发展，生物技术越来越受到人们的普遍重视，利用生物技术开发的新工艺、新产品层出不穷。生物技术在各个科学研究领域中的应用都已取得了巨大的经济效益和社会效益。

在资源的开发利用领域，被称作“生物选矿”的资源微生物技术也同样受到了人们的极大关注。除了进一步研究铜矿石、铀矿石和高砷金矿石的氧化亚铁硫杆菌氧化浸出工艺的作用机理和最佳应用条件之外，还就资源微生物技术的广范应用开展了多方面的研究工作。例如利用一些真菌的代谢产物——柠檬酸来溶解石英砂中的铁，为玻璃制造工业提供高质量原料，这项技术在保加利亚已用于工业生产。其次是利用资源微生物技术除去含锰银矿石中的锰，以提高银的回收率，这项技术包括两个方面，其一是利用锰还原细菌，还原高价锰，使之从矿石中溶解出来；其二是利用真菌的代谢产物直接溶解低价态的锰矿物（如菱锰矿）。与此同时，资源微生物技术在煤炭脱硫方面的应用近年来也有了长足的发展，不仅利用氧化亚铁硫杆菌等嗜酸细菌，在搅拌条件下浸出细磨煤中的黄铁矿技术正在向工业生产过渡，一些研究者还利用氧化亚铁硫杆菌能快速附着在黄铁矿表面的特性，在煤泥浮选过程中（浮选柱），利用这种微生物对入选的煤进行预处理，借以增加黄铁矿颗粒表面的亲水性，从而大大地降低了浮选精煤的硫含量。此外，资源微生物技术在矿物脱硅和高磷锰矿石的富锰

降磷方面的应用研究，也已取得了令人鼓舞的成果。

综合上述，可以看出，资源微生物技术的应用范围在日益扩大，研究工作正在日益深入，所取得的经济效益和社会效益正在日益增加。随着人们保护环境的意识和对环境质量的要求不断提高，可以预见，资源微生物技术的应用前景将会越来越广阔。正如一些学者曾预言的那样，21 世纪将是资源微生物技术得以蓬勃发展的一个世纪，这一技术甚至有可能成为占主导地位的选矿工艺。

2 微生物学基础

在系统地探讨资源微生物处理技术的基本原理和工艺之前，需要介绍一些微生物学的基本知识。

2.1 微生物概述

2.1.1 微生物的概念

微生物并不是一个生物分类上的专门名词，而是对所有形体微小的、单细胞和个体结构简单的多细胞的、甚至没有细胞结构的低等生物的统一称谓。这类生物包括病毒、细菌、蓝细菌或蓝绿藻等原核生物和藻类、真菌等真核生物，它们均属原生生物界，是有别于植物界和动物界的第三界生物。其中细菌属裂殖菌纲，蓝细菌属裂殖藻纲。

原核生物是具有原核细胞的生物。原核细胞的核发育很不完全，只是一个核物质高度集中的核区（叫作似核结构），它没有核膜，核物质裸露，与细胞质没有明显的界限。其次，原核生物的细胞中没有明显的与膜相结合的细胞器，只有膜体系的不规则泡沫结构，不进行有丝分裂。由于所有的原核生物都非常微小，在显微镜下才能看到，所以习惯上称它们为原核微生物。原核生物可看作是生物进化最早期的遗存者，而真核生物的发展则代表了在生物进化中最重大的跳跃。

与原核生物不同，真核生物的细胞内部含有一个发育完好的细胞核，有核膜使细胞核和细胞质之间有明显界限，具有高度分化的特异细胞器，可以进行有丝分裂。属于真核生物的有酵母菌、霉菌、原生动物、动物和植物等。真核生物中有的是肉眼可见的，有的需要借助于显微镜才能看清楚。为了有别于其他真核生物，我们把在显微镜下才能看到的这一部分真核生物称作真核微生物。