

硫化铜矿的生物冶金

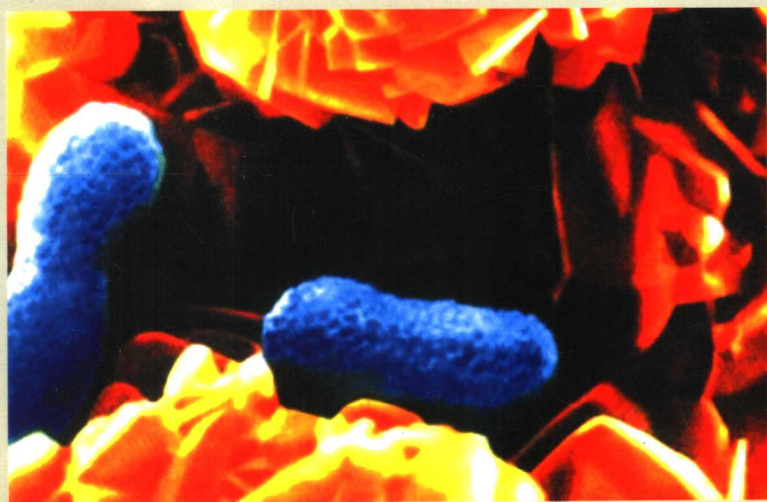
李宏煦 著

冶金工业出版社



# 硫化铜矿的 生物冶金

李宏煦 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

# 硫化铜矿的生物冶金

李宏煦 著

北 京

冶金工业出版社

2007

## 内 容 提 要

生物冶金是近年来发展的矿物资源加工与提取冶金新技术,它是微生物学和矿冶工程学相结合的一门新型交叉性学科。本书以硫化铜的生物冶金为对象,系统地论述了浸矿微生物及其生长规律、微生物与矿物相互作用的界面行为、生物浸出体系的电化学机理、生物浸出反应器过程动力学与反应器设计、生物堆浸工艺与堆浸过程动力学,以及浸出液净化与阴极铜制备等。

本书可供矿物加工、冶金、资源环境、生态工程等领域的科研人员与高校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

硫化铜矿的生物冶金/李宏煦著. —北京:冶金工业出版社, 2007. 9

ISBN 978-7-5024-4350-4

I. 硫… II. 李… III. 硫化铜—细菌冶金  
IV. TF811

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 136226 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张 卫 李 雪 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 王贺兰 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4350-4

北京印刷一厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2007 年 9 月第 1 版, 2007 年 9 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 19.25 印张; 373 千字; 289 页; 1-2500 册

56.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

## 序 1

人类从矿石中提取金属并加以应用，已经有几千年的历史。考古学家和历史学家认为金和铜是人类最早应用的金属。在我国大约距今四千年的夏朝已开始使用红铜；到商朝，铜及其合金的冶炼已达到较高水平，成为青铜器的鼎盛时期。湖北铜录山铜矿的遗址表明，人类逐步掌握冶铜技艺并制取铜的矿物之一是一种与孔雀羽毛颜色相似的翠绿块石——孔雀石。孔雀石的化学成分是碱式碳酸铜，它在高温木炭的还原作用下，生成金属铜。

但是，地壳中铜的矿物主要是硫化矿，包括黄铜矿 ( $\text{CuFeS}_2$ )、辉铜矿 ( $\text{CuS}_2$ ) 和铜蓝 ( $\text{CuS}$ ) 等。要从铜的硫化矿中炼制铜，技术工艺则更为复杂，同时排放二氧化硫。好在古代对铜的需求有限，史料记载，秦统一六国，收集天下兵器，也只铸成十二金（实为铜）人，直到清朝的康乾盛世，全国年产铜也不过万吨，因而还不至于造成不可承受的能源、资源的消耗和环境污染。

随着人类社会的发展，从航空航天到车船运载，从电子通讯到电脑电器，从国防现代化到核能利用，都离不开从矿石提炼及制备的各种各样的金属材料，铜的需求量也是与日俱增。近年来，我国铜的消耗量已达四五百万吨。传统矿冶工艺的主要缺陷在于依赖苛刻条件下的“强烈反应”分解矿物提取制备金属，一般存在流程长、投资大、能耗高、环境污染等问题，不符合可持续发展与和谐社会建设的需要。

为了摆脱困境，迎接挑战，适应新世纪矿业可持续发展的需要，世界各国都在采用新的科学成果来改造传统技术。综合国内外已有的研究，有一些新的矿物提取技术因为反应温和、过程清洁而具有发展潜力。其中，应用现代生物工程的科学成就开发矿物资源的“生物提取”技术已经开始应用，取得低成本、低污染的效果，特别是可以处理更贫的矿物资源，受到矿冶界的重视。新一代矿物生物提取工艺，其优势在于：（1）反应温和，利用生物催化作用，将矿物冶炼从高温及使用强酸碱的苛刻化学环境下改变为常温及低浓度下的温和反应；

(2) 由于少排放或不排放有毒气体, 环境友好, 被称为清洁工艺; (3) 其能耗低, 大大减少矿物细磨、高温熔炼的能耗; (4) 流程短, 将传统矿冶过程交叉融通, 减少投资和生产费用。

矿物微生物提取的研究, 已有相当长的时间。早在 1922 年, 即有 Rudolf 等用自养型细菌浸出硫化铁及硫化锌矿的报道; 1947 年, Colmer 首次从矿坑水中分离出能氧化分解硫化矿物的氧化铁硫杆菌; 1958 年, 美国 Connecott 铜公司开展了细菌渗滤浸出硫化矿的研究。1980 年以来, 生物提取技术研究与应用有了进一步发展, 美国、智利、澳大利亚等国铜的生物堆浸技术已走上工业化。中国从 20 世纪 90 年代开始关注这一技术。中国科学院、中南工业大学、北京有色金属研究总院等单位和一些矿山企业开展了这方面的研究。经过研究和生产实践, 在江西德兴、福建紫金山等地建立了一定规模的生物堆浸提铜矿山。目前, 国内从事这方面研究的人员越来越多, 队伍逐步壮大。

目前, 矿物的微生物提取研究已取得显著成效, 也有不少论文和著作发表。本书的作者李宏煦从 90 年代后期开始从事该领域研究, 也是我国在该研究方向上最早培养的博士研究生之一。之后, 他又完成了这方面的博士后研究工作, 并负责或参加完成国家自然科学基金、国家重点科技攻关项目多项; 参加了德兴、紫金山项目的实验室和现场技术研究, 具备一定的理论知识和现场实践经验。《硫化铜矿的生物冶金》一书以硫化铜矿的微生物提取为对象, 全面整理了前人大量的文献资料, 并且融入了作者多年来的一系列研究成果, 较系统地论述了硫化铜矿生物冶金的理论与工艺, 可以说是这方面具有特点的一本系统性专著。

这本书主要论述了硫化矿物微生物提取的特征, 涵盖了浸矿微生物及其生长规律; 微生物的浸矿作用; 微生物/矿物的界面行为; 生物浸出体系的电化学作用; 硫化铜精矿的生物反应器浸出及反应器设计; 硫化铜矿的生物堆浸及其过程动力学; 生物浸出液的提纯与电积制备阴极铜等内容。这对于理解和掌握硫化矿物微生物提取的理论与工艺很有帮助。同时, 这本书还讨论了其他硫化矿浸矿微生物生长规律, 微生物矿物相互作用, 浸出过程的电化学、动力学, 堆浸与搅拌反应器过程基本原理与工艺等。这对硫化镍矿、硫化锌矿等其他硫化矿物的微生物提取也有借鉴作用。

这本书的出版对总结已有矿物微生物提取的经验、丰富矿物资源提取新的科技内容、推动矿冶生产技术发展、补充资源加工提取学科知识都会起到应有作用，同时为高校矿物加工、冶金、化工、环境、微生物生态等专业师生、科研人员和矿山企业现场技术人员提供了有价值的参考资料。

王途皓

2007年8月8日

## 序 2

中国正在加速工业化和城市化进程，对有色金属资源的大量需求推动了中国有色金属工业的迅速发展。在有色金属资源中，铜是一种非常重要的金属。2000年以来，我国铜的消费量一直保持15%左右的增长速度。2002年我国铜的消费量达到256万t，并第一次超过美国，成为第一大铜消费国，预计2010年铜的需求量为580万~650万t。但是，有色金属工业的快速发展也带来了严重的资源、能源、环境和交通问题。由于资源、能源和环境的压力，在改进传统火法提取方法的同时，人们一直在寻求更合理的铜的冶金方法。

回顾工业发展的历史，大致出现了三种生产模式：第一种是“资源-产品-污染”的单向线性开放模式，人类从自然中获取资源，又不加任何处理地向环境排放废物；第二种是“生产过程末端治理”，即“先污染，后治理”；第三种就是全过程治理模式，即强调源头治理，清洁生产，资源循环利用的模式。三种模式中，只有第三种才符合科学发展观及人类可持续发展的要求。在矿物资源加工与提取冶金中，生物冶金正是这样一种生产模式，它仅用自然界中天然物质——水、空气和微生物，使有价金属铜从铜矿石或精矿中浸出，从而加以利用，生产出高纯阴极铜，反应在温和的自然状况下进行，过程低温低压，浸出后的废石可以自然堆放且废矿区可以复垦。它是现代生物科学与传统冶金科学结合形成的新技术，它将铜的传统选冶过程和金属制备工艺的几十道工序缩短为浸出-萃取-电积三个基本步骤，充分体现了投资省、运行成本低、能耗低、环境友好等特点，是生态化工业的典型例子。

生物冶金是涵盖矿物学、微生物学、矿物资源加工学、冶金反应工程学、反应过程动力学、表面化学、电化学、数学、仿真学等学科的交叉学科。该书是作者多年研究成果的总结。书中将硫化铜矿的生物冶金归纳总结为浸矿微生物及其生长规律、微生物的浸矿作用、微生物/矿物的界面行为、生物浸出体系的电化学、硫化铜精矿的生物反

反应器浸出及反应器设计、硫化铜矿的生物堆浸及其过程动力学、生物浸出液的提纯与阴极铜制备八个方面进行论述。该书理论和实践相结合，同时体现了多学科交叉的特点，适合高校相关专业师生和科技人员阅读参考。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized characters that appear to be '李' (Li) and '海' (Hai), with a small '+' sign between them.

2007年8月10日



# 前 言

生物冶金是近年来发展的矿物资源加工提取新技术，由于其具有投资省、工艺流程短、环境友好、设备简单、规模可大可小、灵活机动等特点，近年来在工业上开始应用，特别是在次生硫化铜矿物方面，以及在原生铜矿和其他硫化矿物的提取冶金中发挥越来越重要的作用。

目前，生物冶金技术正在迅速发展之中，许多研究者和生产单位都进行了相关的研究，对一些内容和学术观点的探讨也不断深化，如在浸矿微生物的选育培养、微生物浸矿试验、微生物浸矿作用机理等方面已做了大量研究工作，并发表了相关论文；国外出版过论文集，如第16届国际生物冶金学术会议论文集等；在已出版的有关微生物学、湿法冶金等方面的书籍中，也有些章节介绍生物冶金的内容，这些出版物对生物冶金工作和普及生物冶金知识起到了一定的作用。近十年来，作者一直从事该领域的研究及现场实践工作，亦发表了不少综述和研究性论文，并不断关注着该领域的动态和最新研究报道，关于微生物浸矿的著述，尤其是系统介绍硫化铜矿生物冶金基础性研究成果的专著还不曾多见，鉴于此，作者不揣冒昧，将多年的研究成果结合国外相关文献报道撰写成书，介绍给同行，希望能够起到抛砖引玉的作用。

生物冶金是微生物学、矿物学、表面化学、电化学、动力学、冶金学、化学反应工程学等多学科结合的一门新型交叉性学科，涉及的知识点较多。本书试图将硫化铜矿的生物冶金分为浸矿微生物生长规律、微生物的浸矿作用、浸矿过程界面行为与物质传递、硫化矿微生物浸出时氧化分解机理、硫化铜矿精矿的生物反应器浸出与过程动力学、堆浸工艺及堆浸过程动力学、浸出溶液净化与材料制备等几个方面展开论述，以浸矿微生物-微生物/矿物相互作用-浸出的实际反应器过程-浸出溶液处理为主线安排章节结构，同时在着重介绍微生物浸矿过程机理的基础上，对浸出工艺也做简要介绍。

在浸矿微生物知识方面，在系统阐述了各浸矿微生物生长、代谢

特性基础上,介绍了微生物生长动力学知识,这为  $\text{Fe}^{2+}$  利用与  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  转化的生长动力学的研究和理解生物浸矿反应动力学与电化学提供了基础;在微生物浸矿作用方面,着重介绍了不同硫化矿以  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  为中间过程和以  $\text{S}_n^{2-}$ 、 $\text{S}_8$  为中间过程的氧化机理,不同菌种浸出铜蓝、辉铜矿,以及目前难以处理的黄铜矿和多金属硫化矿的生物浸出技术;在微生物/矿物的界面行为方面,以大量 AFM、TEM、SEM 显微照片,揭示了浸矿微生物在矿物表面的黏附状态、微生物对矿物不同晶面的选择性吸附与腐蚀、微生物表面的矿化与纳米矿化粒子的形成等,以及对微生物在矿物表面形成 EPS 层的观察;之后,介绍了矿物与浸矿微生物表面物质传递动力学知识,动态地揭示了微生物浸矿过程的界面行为。本书首次从电化学理论角度系统介绍了浸出体系溶液电位与矿物氧化的关系,硫化矿生物氧化机理与阳极过程动力学、多金属硫化矿浸出体系的原电池效应及控制电位的选择性浸出等内容。此外本书还着重分析了反应器浸出过程的动力学,从强化反应器过程动力学传质与微生物生长及生物浸出速率这些关键因素出发,介绍与分析了目前国际上出现和正在设计的生物浸出反应器及其特点。本书在系统介绍堆浸工艺因素的前提下,着重讨论了堆浸过程气体流与浸出液流动过程物质传递及其影响堆浸的动力学,用数学仿真结果揭示堆浸过程机理,使之不仅限于经验的总结层面。关于多雨、高寒、缺氧、易地震区域等极端环境下的生物堆浸工艺及堆衬垫选择的经验介绍,很值得参考。本书在浸出液萃取方面主要介绍了溶液萃取过程优化控制和第三相防治等内容,着重从电化学角度系统论述了电解液质量控制,  $\text{Fe}^{3+}$ 、酸度等对电积的影响,电解液流速及电流密度与电积的关系,添加物影响电积过程机理等内容。本书所介绍的一些阶段性的研究成果还有待进一步的完善和提高。

本书可供从事矿物加工、冶金、化工、环境、资源环境、生态工程、应用微生物学等领域的师生与科研人员阅读参考。

作者在攻读博士学位(1998~2001)期间,在王淀佐院士、邱冠周教授、胡岳华教授的指导下开始从事微生物浸矿研究,之后进入生物冶金这一新的研究领域,并完成了博士后科研工作和国家自然科学基金等多项科研项目;在福建紫金山生物堆浸现场工作期间,得到了杨显万教授、陈景河教授级高工等专家的指导;在北京科技大学工作

期间得到了苍大强教授的指导与帮助。作者在学习和工作期间还得到了北京科技大学、中南大学、北京有色金属研究总院、福建紫金矿业股份有限公司许多老师、同事、同学的帮助。我的导师王淀佐院士手术未愈，就在病榻上审定本书稿，并撰写了序言；苍大强教授在百忙之中审稿并作序。在本书出版之际，谨向所有长期培养和关心作者的导师和专家表示衷心的感谢和崇高的敬意，并向多年来关心和支持作者的同事、同学们表示由衷的感谢！

由于水平和时间有限，书中不妥之处恳请读者批评指正。

作 者  
2007年8月

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 生物浸出提铜的发展现状 .....	1
1.2 生物浸出提铜的基本方法 .....	5
1.3 生物浸出提铜的成本考虑 .....	7
1.4 硫化铜矿生物浸出的发展趋势 .....	8
参考文献 .....	8
<b>2 浸矿微生物及其生长规律</b> .....	11
2.1 浸矿微生物的种类与属性 .....	11
2.1.1 嗜温浸矿菌 .....	12
2.1.2 中等嗜热菌 .....	14
2.1.3 极端嗜热菌 .....	16
2.1.4 浸矿微生物代谢的基本属性 .....	18
2.2 浸矿微生物的生长趋势 .....	24
2.2.1 浸矿微生物生长的一般趋势 .....	24
2.2.2 各因素对浸矿微生物生长的影响 .....	26
2.3 浸矿微生物生长动力学 .....	31
2.3.1 浸矿微生物生长动力学方程 .....	31
2.3.2 动力学方程的比较与修正 .....	35
参考文献 .....	39
<b>3 微生物的浸矿作用</b> .....	43
3.1 生物浸出的直接作用与间接作用 .....	43
3.1.1 直接作用与间接作用 .....	43
3.1.2 关于直接作用和间接作用的讨论 .....	46
3.1.3 间接作用过程的两种机理 .....	49
3.2 微生物对硫化铜矿浸出的影响 .....	54

3.2.1	不同菌种对铜蓝浸出的影响 .....	54
3.2.2	极端嗜热菌对黄铜矿浸出的影响 .....	59
3.2.3	辉钼矿精矿中黄铜矿的选择性浸出 .....	62
3.2.4	铜铅锌复合硫化精矿的浸出 .....	64
3.2.5	Ag 对黄铜矿生物浸出的催化作用 .....	66
	参考文献 .....	70
<b>4</b>	<b>微生物/矿物的界面行为 .....</b>	<b>74</b>
4.1	微生物在矿物表面的黏附 .....	74
4.1.1	微生物在矿物表面的黏附过程 .....	74
4.1.2	微生物在矿物表面的黏附形态及作用 .....	78
4.1.3	微生物的矿化与腐蚀作用 .....	86
4.1.4	微生物对矿物晶面的选择性吸附与腐蚀 .....	89
4.2	生物浸出矿物界面物质传递宏观动力学 .....	95
4.2.1	界面的物质传递动力学方程 .....	95
4.2.2	固体-溶液界面物质传递与浸出反应 .....	97
4.2.3	表面物质传递速率与矿物总氧化反应速率的关系 .....	98
4.3	细菌表面流体动力学 .....	103
4.3.1	细菌表面流体动力学模型与假设 .....	103
4.3.2	细菌周围及细菌-矿物间的流体和 $\text{Fe}^{3+}$ 分布 .....	104
4.3.3	多个固定细菌周围流体流速与 $\text{Fe}^{3+}$ 浓度的分布 .....	106
4.4	生物浸出时硫化矿/溶液界面电子、空穴转移理论浅析 .....	108
4.4.1	硫化矿的半导体性质与固体的能带模型 .....	108
4.4.2	半导体/溶液界面理论 .....	110
4.4.3	生物浸出过程硫化矿/溶液界面理论 .....	115
	参考文献 .....	119
<b>5</b>	<b>生物浸出体系的电化学 .....</b>	<b>123</b>
5.1	生物浸出体系溶液电位与浸出的关系 .....	123
5.1.1	$\text{Fe}^{3+}$ 浸出时溶液电位与浸出的关系 .....	123
5.1.2	细菌存在时电位与浸出的关系 .....	129
5.2	生物浸出体系硫化矿的阳极氧化机理 .....	133
5.2.1	黄铁矿阳极氧化过程机理 .....	133

5.2.2 辉铜矿阳极氧化过程机理 .....	137
5.2.3 斑铜矿阳极氧化过程机理 .....	141
5.2.4 黄铜矿阳极氧化过程机理 .....	143
5.2.5 硫砷铜矿阳极氧化过程机理 .....	151
5.3 硫化矿生物浸出体系的原电池效应 .....	154
5.3.1 硫化矿的静电位与原电池效应 .....	154
5.3.2 原电池效应下不同硫化矿的氧化规律 .....	154
5.3.3 原电池效应对不同硫化矿浸出的影响 .....	157
5.4 控制电位下硫化铜矿的生物浸出 .....	161
5.4.1 外控制电位对浸出的强化作用 .....	161
5.4.2 控制电位下多金属硫化矿的选择性浸出 .....	162
参考文献 .....	163
<b>6 硫化铜精矿的生物反应器浸出及反应器设计 .....</b>	<b>167</b>
6.1 反应器中微生物生长与矿物浸出动力学基础 .....	167
6.1.1 反应器中微生物的生长动力学 .....	167
6.1.2 与微生物生长关联的浸矿动力学 .....	168
6.2 反应器中各因素对微生物生存的影响 .....	171
6.2.1 机械搅拌器的作用 .....	171
6.2.2 搅拌器速度/形状的影响 .....	172
6.2.3 固体颗粒尺寸/形状的影响 .....	174
6.2.4 反应器内气体物质传递的影响 .....	177
6.3 反应器中各因素对硫化铜精矿生物浸出的影响 .....	180
6.3.1 矿浆中矿物粒度和质量分数的影响 .....	180
6.3.2 温度和 pH 值的影响 .....	182
6.4 生物浸出反应器的设计 .....	183
6.4.1 反应器设计的一般原则 .....	183
6.4.2 叶轮搅拌生物浸出反应器 (BIO-STR) .....	183
6.4.3 Pachuca 槽生物浸出反应器 .....	186
6.4.4 通风槽生物浸出反应器 .....	187
6.4.5 低能耗生物浸出反应器 .....	187
6.4.6 Delft 斜板生物浸出反应器 .....	188
6.4.7 转鼓生物浸出反应器 .....	189

参考文献 .....	191
<b>7 硫化铜矿的生物堆浸及其过程动力学 .....</b>	<b>194</b>
7.1 硫化铜矿生物堆浸工艺与实践 .....	194
7.1.1 生物堆浸各工艺因素 .....	195
7.1.2 硫化铜矿堆浸筑堆衬垫的选择 .....	200
7.1.3 极端环境下的堆浸工艺 .....	202
7.1.4 某次生硫化铜矿的生物堆浸实践 .....	203
7.2 生物因素影响下的堆浸过程动力学 .....	210
7.2.1 生物堆浸中存在的动力学问题简析 .....	210
7.2.2 堆中微生物生长影响下的堆浸过程动力学 .....	212
7.3 溶液电位与堆结构影响下的堆浸过程动力学 .....	216
7.3.1 基于溶液电位影响的堆浸过程动力学方程 .....	216
7.3.2 溶液电位与堆结构影响堆浸过程的动力学规律 .....	219
7.4 气体流动影响下的堆浸过程动力学 .....	222
7.4.1 自然空气供给下的堆浸过程动力学 .....	222
7.4.2 充气时堆浸过程动力学 .....	228
7.5 生物堆浸过程温度场分布与相关动力学 .....	236
7.5.1 温度场分布对生物堆浸的重要性 .....	236
7.5.2 堆浸过程热平衡模型 .....	236
7.5.3 不同液气体流速对堆中温度变化与分布的影响 .....	242
7.5.4 不同堆高时堆中温度的变化与分布 .....	249
7.5.5 排液层对堆中温度变化与分布的影响 .....	250
7.5.6 顶盖对堆中温度变化与分布的影响 .....	251
参考文献 .....	252
<b>8 生物浸出液的提纯与电积制备阴极铜 .....</b>	<b>255</b>
8.1 生物浸出液的提纯 .....	255
8.1.1 浸出液铜萃取化学原理 .....	255
8.1.2 生物浸出液萃取过程的优化控制 .....	257
8.1.3 反萃过程的优化控制 .....	259
8.1.4 萃取系统物质平衡 .....	260
8.1.5 除杂与第三相防治 .....	261

---

8.2 电积制备阴极铜 .....	264
8.2.1 铜电积的基本原理 .....	264
8.2.2 阴极、阳极材料的影响 .....	267
8.2.3 电解液质量控制 .....	270
8.2.4 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、酸度对电积过程的影响 .....	272
8.2.5 电解液流速、电流密度与电积的关系 .....	276
8.2.6 添加物影响电积过程机理 .....	279
参考文献 .....	283
符号表 .....	285
术语索引 .....	287



# 1 绪 论

## 1.1 生物浸出提铜的发展现状

目前,矿产资源日渐贫杂,资源、能源、环境问题越发引起人们重视。传统的冶金工艺适用于品位较高的矿物资源,且资源利用率低,能源消耗大,环境污染严重。几十年来,人们一直在寻求更为合理、有效、清洁的资源利用途径。根据美国国家研究委员会(NRC)2001年的研究报告,在未来20年,美国矿业最重要的革新将是采用湿法冶金工艺取代有色金属行业传统的熔炼工艺<sup>[1]</sup>。目前应用湿法冶金生产的铜已占世界铜总产量的30%,浸出-萃取-电积生产电铜的发展趋势如图1-1所示。

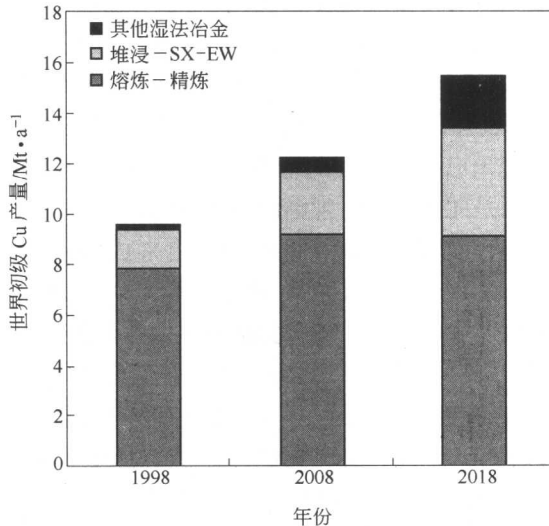


图 1-1 铜湿法冶金发展趋势

在湿法冶金工艺中生物浸出技术有望充当越来越重要的角色,其原因在于该技术具有如下特点<sup>[2,3]</sup>:

- (1) 低成本,低能耗,低药剂消耗量,低劳动力需求;
- (2) 工艺流程短,设备简单,易于建筑,资金消耗小;
- (3) 资源利用广,能使更多不同种类及低品位矿物得到有效、经济的利用;