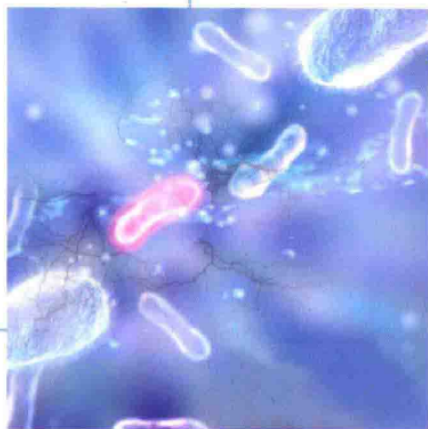


硫化铜矿微生物浸出的 影响因素和机制

INFLUENCING FACTORS AND MECHANISM OF
BIOLEACHING COPPER SULFIDE ORE

■ 林海 董颖博 傅开彬 莫晓兰 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

硫化铜矿微生物浸出的 影响因素和机制

林 海 董颖博 傅开彬 莫晓兰 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2019

内 容 提 要

本书从硫化铜矿类型、脉石矿物和浮选药剂三个角度系统介绍了微生物浸出硫化铜矿过程的影响因素和作用机制。内容包括微生物浸出铜尾矿菌种的选育、不同浮选药剂对菌种活性和黄铜矿浸出体系的影响、脉石矿物对微生物浸出黄铜矿的影响规律、脉石矿物在微生物浸出黄铜矿体系的溶出特性、浸出体系离子胁迫对微生物浸出黄铜矿的影响和机理、不同类型硫化铜矿微生物浸出规律与机理。

本书学术思想新颖、内容系统、理论性强，具有鲜明的实用性。可供从事矿业工程、生物冶金、环境工程及相关专业的科研人员和高等院校相关专业的师生学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

硫化铜矿微生物浸出的影响因素和机制/林海等著. —
北京:冶金工业出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-5024-8051-6

I. ①硫… II. ①林… III. ①硫化铜—铜矿床—细菌
浸出 IV. ①TD862.133.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第029652号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp.com.cn

责任编辑 于昕蕾 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8051-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2019年1月第1版,2019年1月第1次印刷

169mm×239mm;24.5印张;476千字;378页

72.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

矿产资源是不可再生资源，经过逐年开采利用已日渐枯竭。目前高品位易选矿产资源日趋减少，因此低品位矿和复杂难选矿资源化回收技术开发已成当务之急，然而传统选矿方法难以经济有效地处理贫、细、杂矿石，因此人们一直在寻求更为合理、有效和清洁的资源利用途径。近年来，微生物浸矿技术越来越受到国内外矿物加工界的普遍关注，它是利用微生物的作用将有价金属元素（如铜、镍、锰、铀等）从矿石中溶解出来并加以回收利用，具有应用范围宽、过程相对简单、易于管理、基建投资少、生产操作简单、成本低的优点，而且在一定程度上对环境危害较小，因此微生物浸矿技术在矿物加工和湿法冶金领域中有望充当越来越重要的角色，是国内外矿业界研究的热点之一。

铜是重要的有色金属之一，随着国民经济的发展，对铜的需求量逐年增加，国内铜的供求矛盾十分突出。在铜工业中，由于铜矿石开采品位逐年下降、难选冶铜矿石类型和数量增多，导致传统的选别方法难以从中经济有效地回收铜，而采用细菌浸出技术回收铜，经济效益显著。国内德兴铜矿、紫金矿业、山东黄金等已经实现了工业化应用，国外也有许多成功的应用案例，目前采用生物法提取的铜约占世界总铜产量的25%。

近年来，国内外学者围绕微生物浸铜技术开展了大量的研究工作，包括高活性浸矿微生物功能基因组学研究，浸矿体系微生物群落结构与功能活动以及微生物种群之间相互作用、浸矿微生物群落基因组学与种群优化调控研究，高效浸矿微生物铁硫氧化代谢系统调控研究，微生物浸出体系中生物因素、化学因素和物理因素对浸出率、浸出速

度的影响等，但是还存在一系列的理论和实际问题需要深入研究，主要表现在以下几个方面：（1）优良菌种是微生物技术处理低品位铜矿的关键因素，目前缺乏高效的浸矿菌种。（2）虽然国内外学者对不同类型硫化铜矿物的生物浸出规律进行了研究，但得出的规律却是各不相同，其原因应该是对矿物生物浸出规律的内在机制缺乏足够的认识，因此不能针对反应控制步骤及时做出有效调控。（3）影响微生物浸矿的影响因素研究不全面，尤其缺乏铜浮选尾矿中浮选药剂和共伴生脉石矿物对微生物浸铜效果影响的研究。例如，大量有色金属尾矿是通过浮选后排放，尾矿中残余的浮选药剂对细菌活性有较大影响，从而对浸出效果产生影响，微生物浸出技术处理精矿时也会遇到同样的问题。另外，在难选原生铜矿、选铜尾矿以及极低品位铜矿中脉石矿物是含量最多的矿物，甚至在铜精矿中也存在一定含量的脉石矿物，因此脉石矿物的存在对铜的浸出率和浸出速度均会产生影响。然而，国内外在浮选药剂和脉石矿物对浸矿菌种活性和浸矿效率影响领域研究较少。

笔者多年来一直从事微生物冶金技术领域的研究工作，主要开展微生物技术回收尾矿中有价金属、高效菌种开发与应用、微生物与矿物相互作用机制等方面的研究工作。近 10 年来，笔者及科研团队针对上述的影响微生物浸铜效率的三个关键问题，从影响微生物浸矿效果的内因浸矿菌种、矿物性质和外部环境条件三个层面展开研究。首先，进行不同驯化-诱变方法对浸矿细菌活性和浸矿效率的影响研究，优选出最佳诱变方案，选育出高效的铜尾矿浸出菌种。其次，研究不同类型硫化铜矿物的微生物浸出规律，从细菌选择性吸附、表面化学、固体物理、结晶学和矿物学等方面对浸出规律进行研究，通过分析比较获得规律形成的深层次原因，揭示了影响不同类型硫化铜矿微生物浸出规律的机制。然后，从浮选药剂和脉石矿物着手，研究常见铜矿物浮选药剂和与铜矿物共伴生脉石矿物对浸矿菌种氧化活性和浸铜效率的影响规律及机理，以及脉石矿物在生物浸出体系的溶出规律、浸出

体系离子胁迫对微生物浸出黄铜矿的影响和机理。

本书是在上述科学研究和技术开发工作基础上撰写而成，它是笔者及科研团队、合作者在硫化铜矿微生物浸出的影响因素和机制研究成果的系统总结。该书的成果已由中国有色金属学会组织了专家鉴定，以孙传尧院士为组长的专家组认为成果达到了国际先进水平，因此希望本书的出版能够对微生物技术在矿业和其他领域的应用和技术开发提供借鉴与帮助。

本书由林海、董颖博、傅开彬、莫晓兰撰写。感谢博士生周闪闪、许晓芳，研究生王鑫、李甘雨等对研究工作所做的贡献！本书共分7章，具体内容和人员分工如下：第1章，绪论（林海）；第2章，微生物浸出铜尾矿菌种的选育（董颖博）；第3章，不同浮选药剂对菌种活性和黄铜矿浸出体系的影响（董颖博）；第4章，脉石矿物对微生物浸出黄铜矿的影响规律（莫晓兰）；第5章，脉石矿物在微生物浸出黄铜矿体系的溶出特性（林海）；第6章，浸出体系离子胁迫对微生物浸出黄铜矿的影响和机理（林海）；第7章，不同类型硫化铜矿微生物浸出规律与机理（傅开彬）。全书由林海教授进行统稿和审订。

在本书即将出版之际，笔者衷心感谢国家自然科学基金资助项目（51204011）、中国博士后基金资助项目（2013T60063、2012M520171）、北京市优秀博士学位论文指导教师科技计划项目（20121000803）对本书涉及的研究工作的资助，同时感谢本书引用文献的各位作者。

由于笔者能力和水平有限，加之撰写过程有些仓促，所以不当之处在所难免，敬请各位读者批评指正。

林 海

2019年1月于北京科技大学

目 录

1 绪论	1
1.1 铜矿资源概况	1
1.1.1 世界铜矿资源及分布特点	1
1.1.2 我国铜矿资源及分布特点	2
1.1.3 硫化铜矿类型及其共伴生脉石矿物	4
1.2 影响硫化铜矿微生物浸出的因素	6
1.2.1 浸矿菌种的选育	7
1.2.2 矿物性质	11
1.2.3 环境条件	13
1.3 共伴生脉石矿物微生物浸出研究	17
1.3.1 硅酸盐矿物的微生物浸出研究	17
1.3.2 磷矿石的微生物浸出研究	18
1.3.3 其他非金属矿物的微生物浸出	19
1.4 不同类型硫化铜矿的浸出及规律	19
1.4.1 不同类型铜矿的微生物浸出	19
1.4.2 硫化矿微生物浸出规律研究	22
参考文献	23
2 微生物浸出铜尾矿菌种的选育	32
2.1 概述	32
2.2 浸矿细菌的筛选	32
2.2.1 样品的采集及预处理	33
2.2.2 菌种的筛选	33
2.2.3 菌种的鉴定	34
2.3 浸矿细菌的培养特性	36
2.3.1 培养基初始 pH 值	36
2.3.2 温度的影响	37
2.3.3 溶氧量的影响	38
2.3.4 接种量的影响	39

2.3.5 主要营养物质的影响	40
2.4 <i>At.f</i> 菌的驯化和诱变	43
2.4.1 浸矿细菌的阶段驯化	43
2.4.2 紫外线诱变	50
2.4.3 微波诱变	55
2.4.4 化学诱变	58
2.4.5 复合诱变	61
2.5 不同能源物质对 <i>At.f</i> 菌浸出铜尾矿的影响	64
2.5.1 初始 Fe^{2+} 浓度的影响	64
2.5.2 初始 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 浓度的影响	66
2.5.3 黄铁矿含量的影响	68
参考文献	70
3 不同浮选药剂对菌种活性和黄铜矿浸出体系的影响	73
3.1 概述	73
3.2 浮选药剂对菌种活性的影响	73
3.2.1 捕收剂对菌种活性的影响	73
3.2.2 起泡剂对菌种活性的影响	80
3.2.3 不同组合浮选药剂对菌种活性的影响	82
3.2.4 浮选药剂对菌种生长及活性的影响规律	84
3.3 浮选药剂对铜浸出率的影响	87
3.3.1 单一浮选药剂对铜浸出率的影响	87
3.3.2 组合浮选药剂对铜浸出率的影响	89
3.4 浮选药剂对浸矿菌种的抑制作用机理	91
3.4.1 不同浮选药剂在菌体表面的吸附	91
3.4.2 浮选药剂对浸矿菌种的毒害作用	95
3.5 浮选药剂对铜浸出率的影响机理	98
3.5.1 菌种在浮选药剂作用后黄铜矿表面的吸附	99
3.5.2 浮选药剂作用下黄铜矿浸渣 SEM-EDS 分析	103
3.5.3 浮选药剂作用下黄铜矿浸渣 XPS 分析	108
3.5.4 浮选药剂作用下黄铜矿浸渣 FTIR 分析	115
参考文献	122
4 脉石矿物对微生物浸出黄铜矿的影响规律	124
4.1 概述	124

4.2 单一脉石矿物对黄铜矿微生物浸出的影响研究	124
4.2.1 矿样的制备与分析	124
4.2.2 黄铁矿-黄铜矿体系的浸出研究	125
4.2.3 石英对微生物浸铜的影响	131
4.2.4 硅酸盐类矿物对微生物浸铜的影响	134
4.2.5 碳酸盐磷酸盐卤化物类矿物的影响	145
4.2.6 单一脉石矿物对微生物浸铜的影响规律	150
4.3 不同脉石矿物组合对微生物浸铜的影响研究	155
4.3.1 组合脉石矿物对微生物浸铜的影响	155
4.3.2 模拟铜尾矿微生物浸出研究	160
4.4 脉石矿物对黄铜矿微生物浸出的影响机理	163
4.4.1 矿物颗粒表面电位的变化	163
4.4.2 矿物微生物浸出前后的物相分析	168
4.4.3 微生物浸出后矿物的微观形貌变化分析	175
参考文献	187
5 脉石矿物在微生物浸出黄铜矿体系的溶出特性	189
5.1 概述	189
5.2 单一脉石矿物在微生物浸出体系的溶出特性	189
5.2.1 石英的溶出规律和动力学特性	190
5.2.2 绢云母的溶出规律和动力学特性	199
5.2.3 磷灰石的溶出规律和动力学特性	206
5.2.4 萤石的溶出规律和动力学特性	214
5.2.5 白云石的溶出规律和动力学特性	218
5.2.6 微生物和化学浸出对脉石矿物溶出的影响	221
5.3 共伴生脉石矿物组合在微生物浸出体系的溶出特性	222
5.3.1 石英-绢云母体系	223
5.3.2 石英-绢云母-白云石体系	225
5.3.3 石英-绢云母-萤石体系	227
5.3.4 石英-绢云母-磷灰石体系	229
5.3.5 石英-绢云母-白云石-萤石体系	231
5.3.6 石英-绢云母-白云石-磷灰石体系	233
5.3.7 石英-绢云母-白云石-萤石-磷灰石体系	235
5.4 矿石性质和不同共伴生关系对脉石矿物溶出的影响	237
5.4.1 矿石性质的影响	237

5.4.2 共伴生关系的影响	248
参考文献	252
6 浸出体系离子胁迫对微生物浸出黄铜矿的影响和机理	257
6.1 概述	257
6.1.1 矿样	257
6.1.2 试验菌种及培养基	258
6.2 单一阳离子对 <i>At.f</i> 菌浸出黄铜矿的影响	258
6.2.1 钾离子和镁离子	259
6.2.2 钙离子和铝离子	264
6.2.3 不同离子之间的差异	270
6.3 复合离子对 <i>At.f</i> 菌浸出黄铜矿的影响	272
6.3.1 硅与钾、镁离子组合	272
6.3.2 硅与钙、铝离子组合	275
6.3.3 不同组合之间的影响比较	279
6.4 离子对 <i>At.f</i> 菌浸出黄铜矿的影响机理	279
6.4.1 黄铜矿浸渣 XRD 分析	279
6.4.2 黄铜矿浸渣 SEM-EDS 分析	281
6.4.3 黄铜矿浸渣 FTIR 分析	287
6.4.4 黄铜矿浸渣 AFM 和 Zeta 分析	291
参考文献	301
7 不同类型硫化铜矿微生物浸出规律与机理	303
7.1 概述	303
7.1.1 试验方法	303
7.1.2 检测方法	304
7.2 不同类型硫化铜矿铜浸出规律研究	305
7.2.1 接种量对不同类型硫化铜矿浸出的影响	305
7.2.2 矿浆浓度对不同类型硫化铜矿浸出的影响	309
7.2.3 $[\text{Fe}^{2+}]$ 对不同类型硫化铜矿浸出的影响	311
7.2.4 最佳条件下不同类型硫化铜矿的浸出规律	318
7.3 不同类型硫化铜矿微生物浸出热力学分析	319
7.3.1 不同类型硫化铜矿浸出的主要反应	319
7.3.2 反应可能性判断	320
7.3.3 浸出体系的 E - pH 图	322

7.4 细菌对不同类型硫化铜矿的选择性吸附及机理	324
7.4.1 不同类型硫化铜矿的比表面积	324
7.4.2 细菌在不同类型硫化铜矿表面的吸附	327
7.4.3 细菌对不同类型硫化铜矿的吸附特征	330
7.4.4 傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 研究	331
7.4.5 Zeta 电位研究	335
7.5 细菌对不同类型硫化铜矿吸附作用力性质研究	338
7.5.1 浸出体系的表面热力学	338
7.5.2 EDLVO 理论研究	339
7.5.3 费米能级研究	344
7.6 不同类型硫化铜矿矿物表面演变研究	346
7.6.1 不同类型硫化铜矿 XPS 分析	346
7.6.2 中间产物对不同类型硫化铜矿的浸出影响	352
7.6.3 浸渣 XRD 分析	355
7.6.4 浸渣 SEM-EDS 分析	358
7.6.5 浸渣 XPS 分析	359
7.7 不同类型硫化铜矿物性质与其浸出规律关系研究	361
7.7.1 不同类型硫化铜矿的晶体结构	362
7.7.2 静电位	371
7.7.3 黄铁矿/硫化铜摩尔比	372
7.7.4 半导体类型	372
7.7.5 晶格能	373
7.7.6 可溶性	373
参考文献	374

1 绪 论

铜是人类最早使用的金属。早在史前时代，人们就开始采掘露天铜矿，获取的铜，制造武器、式具和其他器皿，铜的使用对早期人类文明的进步影响深远。难处理铜矿选冶技术研究从未停歇。

1.1 铜矿资源概况

1.1.1 世界铜矿资源及分布特点

目前为止，已经发现的含铜矿物有 280 多种，其中主要的有 16 种，包括自然铜、赤铜矿、黑铜矿、孔雀石、辉铜矿、铜蓝、黄铜矿、斑铜矿和黝铜矿等。

世界铜资源主要集中在智利、美国、秘鲁、澳大利亚、赞比亚、刚果、加拿大中东部和俄罗斯等国家。从表 1-1 可以看出，智利是世界上铜资源最丰富的国家，其铜金属储量约占全球总储量的 1/4。而在产量方面，智利是全球最大铜产国，2010 年其产量约占全球产量的 34%。在消费方面，2000 年前在铜消费市场唱主角的是西方欧美国家，但在 2000 年后铜消费市场的主角换成了中国、俄罗斯、印度和巴西。

至 2010 年 1 月年世界铜储量为 6.3 亿吨，储量基础为 13 亿吨，2000 年世界铜储量为 3.4 亿吨，储量基础为 6.5 亿吨，探明储量增长 98.6%，储量基础增长 100%。据美国地质调查局估计，2011 年 1 月陆地铜资源量为 30 亿吨，深海底和海山区的锰结核及锰结壳中的铜资源量为 7 亿吨，主要分布在太平洋^[1]。另外，洋底或海底热泉形成的贱金属硫化物矿床中含有大量的铜资源。

世界上已经查明的铜矿类型主要有：斑岩型铜矿占 55.3%，砂页岩型铜矿占 29.2%，黄铁矿型铜矿占 8.8%，铜镍硫化物型铜矿占 3.1%，其他类型占 3.6%。斑岩型铜矿主要产于环太平洋、特提斯-喜马拉雅带和中亚-蒙古带中，矿床规模巨大，埋藏较浅，易于露天开采，缺点是通常矿石品位较低；砂页岩型铜矿也是矿床规模大，矿体形态稳定，易于开采，而且矿石品位高。目前世界开采的铜矿类型以这两种为主^[2]。

表 1-1 世界铜矿产量及储量表

国 家	产量/万吨		储量/万吨
	2016 年	2017 年 ^e	
美国	1430	1270	45000
澳大利亚	948	920	88000
加拿大	708	620	11000
智利	5550	5330	170000
中国	1900	1860	27000
印度尼西亚	727	650	26000
墨西哥	752	755	46000
秘鲁	2350	2390	81000
刚果（金沙萨）	846	850	20000
赞比亚	763	755	20000
其他国家	4160	4300	260000
全球总量	20100	19700	790000

注：1. 资料来源为 U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2018。

2. e 表示估计结果。

1.1.2 我国铜矿资源及分布特点

中国是世界上铜矿资源总量较多的国家之一。大矿、富矿少，小矿、贫矿多，在已探明的铜资源中含铜品位在 0.7% 以下的占总储量的 56%，氧化铜矿的储量有 800 多万吨金属量。我国有很多著名的铜矿区，如江西德兴、湖北大冶、安徽铜陵、山西中条山、云南东川、甘肃白银厂和西藏玉龙，还有正在勘察的西藏驱龙铜矿，号称亚洲第一大铜矿。铜矿分布广泛，除香港和天津外，包括上海、重庆和台湾在内的全国各省（市、区）均有产出。江西是铜矿大省，铜储量位居全国榜首，占 20.8%，其次是西藏，占 15%；另外还有云南、甘肃、安徽、内蒙古、山西、湖北等省（自治区），铜储量均在 300 万吨以上。

我国铜矿主要有六大类型，分别是斑岩型铜矿、矽卡岩型铜矿、黄铁矿型铜矿、铜镍硫化物型铜矿、沉积岩中层状铜矿和陆相杂色岩型铜矿，它们的代表性矿床如表 1-2 所示。目前，在我国各种铜矿床类型中，以斑岩型铜矿最为重要，但平均品位一般仅达到 0.5% 左右，其他类型铜矿床平均品位较高，但也只有 1% 左右。其次为海相（火山）沉积型铜矿、矽卡岩型铜矿。斑岩型铜矿、矽卡岩型铜矿、黄铁矿型铜矿、铜镍硫化物型铜矿分别占我国总资源储量的 45.5%、30%、8% 和 7.5%，合计占总储量的 91%，为我国主要铜矿类型。截至 2006 年年底^[3]，我国铜矿查明资源储量 7048 万吨，其中，基础储量 3070 万吨，占 43.6%。

表 1-2 我国的铜矿分类及其代表矿床

铜矿类型	代表铜产地	特 点
斑岩型铜矿	江西德兴、黑龙江多宝山、西藏玉龙铜矿、内蒙古东部乌奴格吐山铜矿	占全国铜矿储量的 45.5%，矿床规模巨大，矿体成群成带出现，且埋藏浅，适于露天开采，矿石可选性能好，又共生钼、金、银和多种稀散元素，可综合开发、综合利用。多数矿床是大型贫矿，铜品位一般在 0.5% 左右
矽卡岩型铜矿	湖北铁山、铜绿山，江西城门山、武山，安徽铜官山、狮子山、凤凰山、大团山，广西钦甲，湖南宝山、河北寿王坟，辽东台隆的垣仁、弓棚子	占全国铜矿储量的 30%，仅次于斑岩型铜矿。而且以富矿为主，并共生铁、铅、锌、钨、钼、锡、金、银以及稀散元素等，颇有综合利用价值
黄铁矿型铜矿	江西城门山、武山，辽宁红透山，云南大红山铜铁矿，四川拉拉厂铜钴矿、彭县铜锌矿，甘肃白银厂折腰山铜锌矿床、火焰山铜锌矿床、小铁山铜铅锌矿床，青海红沟富铜矿、青海堆积山铜锌钴，新疆阿舍勒铜锌，福建紫金山、宁芜娘娘山、大平山	占全国铜矿储量的 8%，其中海相火山岩型铜矿储量占 7%，陆相火山岩型铜矿占 1%。并常与铅、锌共生，还伴生有丰富的金、银、钴以及稀散元素，有很大的综合利用价值
铜镍硫化物型铜矿	吉林红旗岭 1 号岩体铜镍矿，新疆黄山铜镍矿，四川力马河铜镍矿；超镁铁质岩，如甘肃金川铜镍矿、吉林红旗岭 7 号岩体铜镍矿；镁铁质岩，如新疆喀拉通克铜镍矿、新疆哈密黄山镍矿、陕西煎茶岭	镁铁质-超镁铁质岩中铜镍矿床既是我国镍矿资源的最主要类型，也是铜矿重要类型之一。铜矿储量占全国铜矿储量的 7.5%
沉积岩中层状铜矿	李伍铜矿、东川-易门、通安、山西中条山篦子沟、胡家峪铜矿床和内蒙古狼山地区的霍各乞、炭窑口等铜铅锌矿床	以沉积岩或沉积变质岩为容矿围岩的层状铜矿床，容矿岩石既有完全正常的沉积岩建造，也包括凝灰岩和火山凝灰物质的喷出沉积建造
陆相杂色岩型铜矿	大姚县六直铜矿、大村铜矿，牟定县郝家河铜矿、清水河、杨家山、青龙厂	已探明的储量不多，仅占全国铜矿储量的 1.5%，但铜品位较高，以富矿为主，铜品位为 1.11%~1.81%，并伴生富银、富硒等元素

从矿床规模、铜金属品位、矿床物质组成和开采条件等因素来看，中国铜矿资源具有如下特点^[4]：

(1) 矿床规模通常较小。在中国铜金属储量大于 50 万吨大型铜矿床仅占 2.7%，中型矿床占 8.9%，以小型铜矿床为主，高达 88.4%。储量大于 500 万吨的特大型矿床较少，目前勘查比较详细的只有江西德兴铜矿（524 万吨）和西藏玉龙铜矿（650 万吨）。已开采的 329 个铜矿区所生产的铜精矿铜金属含量不及

国外一个矿山的产量, 仅为 56 万吨。

(2) 铜品位偏低, 且多为共生伴生矿床。中国共伴生铜矿所占比例为 72.9%, 单一矿仅占 27%, 平均品位为 0.87%。在大型矿床中, 铜品位大于 1% 的矿床, 铜储量仅占 13.2%, 国内斑岩型铜矿床的金属铜平均品位为 0.55%, 低于智利和秘鲁的 1.0%~1.6%; 砂页岩型铜矿床的平均品位为 0.5%~1%, 低于刚果、赞比亚和波兰的 2%~5%。

(3) 适合采用浸出-萃取-电积工艺开发利用的斑岩型铜矿较少, 降低采选冶成本的空间受到限制。

(4) 外部建设条件差, 目前正在勘查或未发现铜矿区中, 规模大且品位高的矿床多处于边、远和高地区。

总体而言, 中国铜矿资源在数量和品质方面均比较差, 国际竞争力低, 特别是富铜资源不足, 已是公认的事实。因此必须采用先进技术开发和综合利用。

1.1.3 硫化铜矿类型及其共伴生脉石矿物

1.1.3.1 硫化铜矿类型

我国主要铜矿类型有斑岩型铜矿、矽卡岩型铜矿、黄铁矿型铜矿、铜镍硫化物型铜矿, 其代表矿床矿物组成如下。

A 斑岩型铜矿代表矿床

我国典型的大型斑岩型铜矿有江西德兴铜矿、黑龙江多宝山铜矿、西藏玉龙铜矿和内蒙古东部乌奴格吐山铜矿。这类铜矿有用矿物以黄铜矿、黄铁矿居多, 脉石矿物以石英、绢云母为主。

江西德兴铜矿矿石中有用矿物含量占矿石总量的 4%~5%, 其中以黄铁矿、黄铜矿较多, 约占主要铜矿物的 90%, 辉钼矿次之, 再次为砷黝铜矿、斑铜矿等, 金、银矿物甚微; 脉石矿物主要有石英、绢云母、水白云母等, 其次为黑云母、绿泥石等^[5]。

黑龙江省嫩江县多宝山铜钼矿矿石主要为原生硫化物矿石, 主要金属矿物为黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿、赤铜矿、铜蓝、辉钼矿等; 非金属矿物主要为长石、石英、水白云母、方解石和绿帘石等^[6]。

西藏玉龙铜矿矿石的铜矿物以辉铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝为主 (占 2.07%); 黄铜矿、斑铜矿次之 (占 0.87%); 此外还含有少量孔雀石蓝铜矿 (占 0.44%); 主要其他金属矿物是黄铁矿 (占 36.54%)、针铁矿和水针铁矿 (占 16.54%)、磁铁矿 (2.25%); 脉石矿物主要是黏土矿物 (18.61%) 和石英 (18.68%), 此外还有石榴石、绿泥石等 (3.7%)^[7,8]。

内蒙古东部乌奴格吐山铜矿主要金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿, 其次

是闪锌矿、方铅矿、斑铜矿、锌砷黝铜矿、铜蓝、金红石等。与铜矿物共生的脉石矿物有绢云母、水白云母、石英和铁白云石^[9]。

B 矽卡岩型铜矿和黄铁矿型铜矿代表矿床

湖北铜绿山矿体为大型矽卡岩铜铁矿体，属接触交代高-中温热液型矿床，原生铜铁矿石主要金属矿物为磁铁矿、黄铜矿、赤铁矿、斑铜矿、辉铜矿等，铜矿物的嵌布粒度在 $(-1.8+0.1)$ mm 之间的达 90%，属中细粒嵌布。脉石矿物有方解石、白云石、透灰石、绢云母、石榴石、石英等，铜矿物与脉石矿物及与其他金属矿物之间主要为毗连嵌镶及包裹嵌镶关系^[10]。

许多铜矿床并不是单一类型的铜矿，常常含有两种类型及以上。如江西城门山铜矿主要有含铜黄铁矿矿石和含铜矽卡岩矿石，矿石构造主要为细脉浸染状^[11]。含铜黄铁矿矿石，其金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿，以及少量的白铁矿、黝铜矿等，总计占矿物总量的 65%~83%；非金属矿物主要以石英、方解石为主。含铜矽卡岩矿石，其金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、磁铁矿等，非金属矿物主要为石榴石、石英、方解石、透辉石等，非金属矿物与金属矿物比为 4:1 左右。

江西另一大型含铜黄铁矿类型的铜矿为武山铜矿，原矿中金属矿物主要有黄铜矿和黄铁矿，其次为方铅矿、闪锌矿、辉铜矿、黝铜矿、铜蓝、菱铁矿，脉石矿物有方解石、石榴石、石英、云母等^[12]，黄铁矿一般占 80%以上^[13]。

云南易门大红山铜矿原矿的矿物组成主要为黄铜矿、磁铁矿，其次是斑铜矿和黄铁矿、赤铁矿、极少量的褐铁矿、铜蓝及孔雀石等。脉石矿物以黑云母、长石（大部分为斜长石）、白云石、石英及绿泥石为主，其次是方解石、石榴石等其他微量矿物^[14]。

辽宁抚顺红透山铜矿为一典型含铜黄铁矿型多金属硫化矿床，并伴生有金银及其他有价元素，主要矿物组成：黄铁矿 21.73%，磁黄铁矿 6.48%，黄铜矿 3.06%，闪锌矿 1.78%，方铅矿 0.17%等，脉石矿物占 65.44%^[15]。

C 铜镍硫化物型铜矿代表矿床

金川铜镍硫化物矿床是我国乃至世界最大的铜镍硫化物矿床之一，矿体中的主要有用矿物成分有镍黄铁矿、紫硫铁镍矿、针镍矿、黄铜矿、方黄铜矿、墨铜矿、辉铜矿、斑铜矿，脉石矿物主要有蛇纹石、橄榄石和辉石^[16, 17]。

因此，我国原生硫化铜矿伴生脉石矿物主要有石英、硅酸盐矿物和碳酸盐类矿物。

1.1.3.2 黄铜矿共伴生脉石矿物

我国主要代表铜矿类型为斑岩型铜矿、矽卡岩型铜矿、黄铜矿型铜矿、铜镍硫化物型铜矿，其代表矿床矿物组成^[9, 11, 15, 18~30]如表 1-3 所示。

表 1-3 我国主要代表铜矿床及其矿物组成

矿床类型	代表矿床	有用金属矿物	脉石矿物
斑岩型铜矿矿床	江西德兴铜矿	黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿	石英、绢云母、水白云母、绿泥石
	黑龙江多宝山铜矿	黄铜矿、斑铜矿、黄铁矿、赤铜矿、铜蓝	长石、石英、水白云母、方解石和绿帘石
	西藏玉龙铜矿	黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、蓝辉铜矿、铜蓝	黏土矿物、石英、石榴石、绿泥石
	内蒙古东部乌奴格吐山铜矿	黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿	绢云母、水白云母、石英、白云石
矽卡岩型铜矿矿床	湖北铜绿山铜矿	磁铁矿、黄铜矿、赤铁矿、斑铜矿、辉铜矿	方解石、白云石、磷灰石、绢云母、石榴石、石英
黄铁矿型铜矿矿床	江西武山铜矿	黄铜矿、黄铁矿	方解石、石榴石、石英、云母、萤石
	云南易门大红山铜矿	黄铜矿、磁铁矿、斑铜矿、黄铁矿	黑云母、长石、白云石、石英、绿泥石
	辽宁抚顺红透山铜矿	黄铁矿含量、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿	石英、长石、辉石、绢云母、碳酸盐矿物、绿泥石、磷灰石
矽卡岩型铜矿+黄铁矿型铜矿矿床	江西城门山铜矿	含铜黄铁矿矿石：黄铁矿、黄铜矿； 含铜矽卡岩矿石：黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、磁铁矿	含铜黄铁矿矿石：石英、方解石； 含铜矽卡岩矿石：石榴石、石英、方解石、透辉石
铜镍硫化物型铜矿矿床	金川铜镍硫化物矿床	镍黄铁矿、紫硫铁镍矿、针镍矿、黄铜矿、方黄铜矿、墨铜矿、辉铜矿、斑铜矿	蛇纹石、橄榄石、辉石

因此，我国硫化铜矿共伴生脉石矿物主要有氧化类矿物石英、硅酸盐类矿物、碳酸盐类矿物、磷酸盐类矿物、卤化物类矿物。

1.2 影响硫化铜矿微生物浸出的因素

矿物的微生物浸出是一个复杂的过程，影响因素很多，包括内因和外因，内因主要是指浸矿菌种和矿物的性质，外因主要是环境条件，在实际生产中还包括操作因素，这些因素共同作用决定矿物浸出效果。