

# 选矿工艺学

〔英〕B. A. WILLS 著  
万国贤 译  
陈璧芳 校

74.4  
399  
c1

# 选矿工艺学

MINERAL PROCESSING  
TECHNOLOGY

(英) B. A. WILLS 著

万国贤 译

陈璧芳 校

KS28/16

湖北省黄石市科学技术协会

湖北省黄石市金属学会

一九八六年五月



## 内 容 提 要

本书综述了目前矿山选矿过程的基本原理。主要内容包括：导论、准备作业、指标检测、试验室粒度分析、粉碎、破碎机、磨矿、筛分、分级、重选、重介质选矿、浮选、磁选和高压电选、拣选、脱水、尾矿堆存等。

书中系统地介绍了各种选矿方法的基本原理和应用各种选矿机器的工艺条件，阐述了影响技术经济指标诸因素的控制与测定方法，讨论了最佳工艺流程的选定原则，同时反映了国际先进经验和新的技术成就。

本书可供冶金矿山、地质、化工、煤炭、建筑材料、环保等工业部门的工矿企业专业技术人员阅读，也可供高等院校、中专、职工培训班矿物工程专业教材，亦可供从事生产、科研、设计的工程技术人员和管理干部参考。

编 辑 罗 旭      封面设计 骆铭智

## 译者序言

这本《选矿工艺学》由英国康耶沃耳卡姆波尼矿山学院副教授B. A. 魏尔斯撰著，1979年初版，1981年再版。译者是根据第二版版本翻译的。

本书具有三大特点：叙述系统，概括全面，叙述清晰，结构严谨；理论联系实际，反映了新概念、新设备、新工艺，实例典型；绕开了繁深的数学公式推导，引文丰富，图文并茂，叙述深入浅出，通俗易懂。可以说，它是目前国际上矿物工程专业方面一部质量较好的著作。

“七五”期间我国工业将有大的发展，特别是近年来“星火计划”的实施，不少县镇办起了矿山原料工业。许多主管矿山部门的领导人和有关岗位的新成员们，纷纷要求译者介绍矿物工程学的知识和技艺。译者从事过科研工作，目前又处在生产技术管理岗位，深知冶金行业志士同仁的期托，故把本书奉献给读者。

译者虽然力求完美地表达作者原意，但由于水平有限，时间仓促，加以技术用语国内尚无统一规范，因而误漏之处在所难免，敬请批评指正。

译稿承蒙冶金工业部安全技术研究所陈化韩、陈璧芳两位高级工程师认真审校，精心订正，使译文更加表达准确，对此致以崇高的敬意。

在出版过程中得到中共黄石市委宣传部、市冶金工业公司、市金属矿山公司、市科学技术协会、市金属学会及其秘书长柯美三工程师的大力支持。在此，致以衷心的感谢。

万国贤

一九八六年五月

39166

· 1 ·

## 第二版序言

再版的根本意图是为了满足选矿专业学生的需要，同时为从事实践工作的工程师提供一些有价值的参考资料。为此，扩充了图书目录，其中包括最近出版的优秀著作。为了更加充分地概括重要的科学领域，原版内容有所扩充，进行了修正，增补了实例。为了便于参考，又增补了两个资料目录。

我衷心感谢对第一版提出有益批评的诸位先生。这些有益的批评意见，对本书的再版起到很好的作用。尤其要感谢卡姆波尼矿山学院副院长R.H.帕凯(Parker)先生，该院前任副院长和选矿系主任F.B.米切尔(Michell)先生及R.S.休梅克(Shomaker)先生，比奇特尔(Bechtoll)研究所冶金室主任桑弗朗西斯科(San Francisco)先生。也感谢约翰尼斯布(Johannesburg)威沃特斯頓德(Witwatersrand)大学R.P.金(King)教授，他给我许多有益的启示。

康耶沃耳卡姆波尼      B.A.魏尔斯

1980年9月18日

# 第一版序言

本书的主要目的是供选矿、冶金和采矿专业的学生学习之用，以便对目前矿山工业中所应用的基本选矿原理有所了解。卡姆波尼矿山学院在准备开设选矿工艺学课程期间，对于本书的要求变得迫切起来。虽然有许多内容丰富的选矿教材，其中多数陈旧了，而且所介绍的许多方法已被更先进的技术所取代。

除非为了阐明特殊工艺的应用，对于具体矿石的处理方法，一般不予介绍。因为即使是同类型的矿石，各个矿山的选矿方法也存在着差别。学生们应当研读有关矿业期刊，这些期刊会定期详细介绍各厂的选矿流程。

任何内容广泛的著作，在其公开发表以后，将会对某些观点有争论。我衷心感谢读者提出评论与改进建议，并在再版中采纳。

对于在编写过程中提供过宝贵资料的单位与个人，以及提供书中插图的单位，在此一一致谢。向我的朋友和同事 *D.G. 奥索尼 (Oshorne)* 博士致以诚挚的谢意，没有他当初的鼓励，本书就不可能写成。同样感谢卡姆波尼矿山学院选矿工艺教研室主任 *J.F. 特纳 (Turner)* 先生，副院长 *H. 帕凯 (parker)* 先生的劝导和鼓励。更要感谢斯旺西 (*swansea*) 大学的丛书编辑 *D.W. 霍普金斯 (Hopkins)* 先生在我编写过程中进行有益的讨论，并提出了宝贵的意见。最后，向书中插图提供图片服务的 *W.J. 沃顿 (Watton)* 先生、耐心誊抄书稿的 *H.A. 泰勒 (Taylor)* 夫人和 *K.E. 贝内特 (Bennett)* 小姐致以谢意。

法莫斯·康郁沃耳

B. A. 魏尔斯

1978年3月9日

# 目 录

译者序言	.....	I
第二版序言	.....	II
第一版序言	.....	III
第一章 导论	.....	1
第二章 准备作业	.....	21
第三章 指标检测	.....	37
第四章 试验室粒度分析	.....	65
第五章 粉碎	.....	100
第六章 破碎	.....	109
第七章 磨矿	.....	143
第八章 工业筛分	.....	179
第九章 分级	.....	205
第十章 重选	.....	242
第十一章 重介质选矿	.....	275
第十二章 浮选	.....	305
第十三章 磁选与高压电选	.....	377
第十四章 拣选	.....	408
第十五章 脱水	.....	446
第十六章 尾矿堆存	.....	455
附录 I 金属有用矿物	.....	466
附录 II 常见的非金属矿石	.....	477

# 第一章 导论

## 第一节 矿物和矿石

### 矿物

金属在地壳和海底矿床中存在的形式取决于各自的环境，特别是氧、硫和二氧化碳的作用。金和铂主要呈天然或金属态，银、铜和汞呈天然态，或呈硫化物、碳酸盐和氯化物状态。多数活泼金属常呈化合物形式存在着，如铁的氧化物和硫化物，铝和铍的氧化物和硅酸盐。天然产出的化合物称为矿物，其中大部分根据其化学组份命名（即方铅矿—铅的硫化物 $PbS$ ；闪锌矿—锌的硫化物 $ZnS$ ；锡石—锡的氧化物 $SnO_2$ ）。

矿物是具有某种固定化学成份和原子结构的天然无机物。然而该定义并不十分严格，许多矿物呈现同晶型现象，在其晶格内的原子被相似的原子取代，而不改变原子结构。例如橄榄石矿物，有着同一的化学成份 $(Mg, Fe)_2SiO_4$ ，但 $Mg$ 原子与 $Fe$ 原子之比对不同橄榄石却不一样。所有橄榄石的 $Fe$ 和 $Mg$ 原子总数相同，而 $Si$ 和 $O$ 原子的比率也相同。有些矿物也呈现多晶型现象，不同的矿物有着相同的化学成份，由于原子结构的差异，却表现出不同的物理性质。如石墨和金刚石两种矿物，有着完全相同的化学成份，都是碳原子组成，由于碳原子在晶格内的排列方式不同，物理性质却完全不一样。“矿物”术语包含着更加广泛的含义，包括从地球中开采出来的一切有经济价值的矿物。尽管煤、白垩、粘土和石墨生产的情况通常列入国家矿物产量统计数字，然而它们不属矿物之列。事实上，这些矿物是岩石，在化学和物



理组份上不是均匀的。岩石一般由各种矿物组成，地壳大部分由岩石组成。例如花岗岩，属最丰富的火成岩，即由融熔物料或地壳内的岩浆冷却成为岩石，它由三种主要矿物，即长石、石英和云母组成。对于不同的花岗岩，三种均匀矿物的组份不同，甚至在同一花岗岩体中的不同部位，其组份也不一样。

煤在地质学上的概念不属矿物，煤床由植物沉积而成。绝大多数煤层，是在3亿年以前，由地壳某一区域密集的热带植物分解而成。在煤层形成的早期，腐烂植物形成厚厚的泥炭层，植物分解的不稳定产品，进而形成沼泽地和泥泽池。随后由于油页岩、砂石、泥浆和砂浆的覆盖，并在高压高温和长时间的作用下，泥床受交变作用形成沉积岩，即所谓的煤。交变次数决定煤的等级，低等级煤（褐煤）表示绝无交变作用，而最高等级的煤（无烟煤）几乎是纯石墨（碳）。

## 金属矿石

J·纳丁（Nutting）教授向金属学会<sup>(1)</sup>的致词中，着重谈了文明社会对金属的基本需求，不断需要金属作为“承载的载体和能量的传递器”的论证，立即提出了未来金属的利用价值问题。冶金工业由于用能源处理矿石并由此提炼纯金属，已经改变了自然资源的分布状况。

可能除铁矿以外，被处理矿石的金属品位不断下降，未来金属的利用价值将关系到什么是具有“工业价值矿”<sup>(1)</sup>这一概念。

“工业价值矿”是暂时性的工业性术语，它受着海底和陆地地壳岩石极低品位矿床的开发水平的限制。

地壳金属储量的估计列于表1. 1<sup>(2)</sup>。一些常见有用金属

的实际数量指的是距地表3.5公里深<sup>(1)</sup>的储量。

金属在海洋中的储量，在某种程度上是与地壳的储量相关的，因为他们与地壳岩石受气候作用而演变来的，而上述作用可看成是酸性雨水对矿物的溶浸过程；表1.2<sup>(2)</sup>所列海水中金属可获量，不能精确地反映地壳的金属储量。在不久的将来，海底似乎可以成为开采金属资源的重要地方，所称的“锰结核”，除含锰以外，尚含有多种金属<sup>(4,5)</sup>，这些锰结核是长期在含氧高的水中形成的，尤其是在太平洋。

表1.1 金属在地壳中的储量

元素	含量 (%)	地壳3.5公里厚的总储量 (吨)	元素	含量 (%)	地壳3.5公里厚的总储量 (吨)
氧	46.4	10 <sup>18</sup> —10 <sup>18</sup>	钪	0.04	10 <sup>14</sup> —10 <sup>15</sup>
硅	28.2		铈	0.010	
铝	8.2		镨	0.0075	10 <sup>12</sup> —10 <sup>14</sup>
铁	5.6		铈	0.0070	
钙	4.1		铈	0.0055	
钠	2.4		铈	0.0025	
镁	2.3		铈	0.0013	
钾	2.1		铈	0.00027	
钛	0.57	10 <sup>12</sup> —10 <sup>14</sup>	铈	0.00020	10 <sup>11</sup> —10 <sup>13</sup>
锰	0.095		铈	0.00015	
钒	0.043		汞	8 × 10 <sup>-6</sup>	
铷	0.038		钨	7 × 10 <sup>-6</sup>	
锂	0.023	10 <sup>14</sup> —10 <sup>16</sup>	金	< 5 × 10 <sup>-6</sup>	< 10 <sup>11</sup>
铯	0.017		铂	< 5 × 10 <sup>-6</sup>	

从表1.1可以看出，前八种元素占地壳总储量的99%以上，硅和氧占74.6%，唯独具有重要工业价值的三种金属（铝、铁和镁）占2%以上。其他所有有用金属占0.1%以

表 1.2 海洋中金属的储量

元素	海水中的储量 (吨)	元素	海水中的储量 (吨)
钨	$10^{15}$ — $10^{16}$	钒	$10^9$ — $10^{10}$
钍	$10^{12}$ — $10^{13}$	钛	
钼	$10^{10}$ — $10^{11}$	钴	$10^8$ — $10^9$
铁		银	
钨		铀	
钾		金	
铀	$10^9$ — $10^{10}$	铂	$< 10^5$
铯		铱	
钽		锇	
铷		钨	

下。例如铜是最重要的有色金属，仅占0.0055%，更有趣的是，通常所称的普通金属锌和铅比稀土金属（铈、钕等）的储量还少。

显而易见，假如各重要金属的矿物遍及整个地球，均匀分布，高度分散，那么要经济地回收就变得不可能了。

然而矿物在自然界的出现，是通过地质条件形成的(4)。个别矿物可能主要与一种岩石共生。即锡石与花岗岩共生，或与火成岩和沉积岩两种岩石共生。由于早期岩石受雨水、冰和化学分解及地质构造力的作用而形成矿床。当花岗岩受风化作用，锡石或许经天然迁徙再一次沉积而成冲积矿床。由于上述许多自然因素的作用，矿床不断受到充分的富集，以促使这些金属得到有效的回收。经过这些富集作用和需求的发展，从而研究并发现某一矿床转化为矿石，多数矿石是由可提取的矿物和被称为矽石的外来脉石矿物的混合物。

矿石可以简单地理解为矿物积累到足够数量并能经济地

提取。临界开采品位的确定取决于金属的市场价格，并根据商业需求而变化。随着时间的推移，富矿或较易开采的矿物日益贫化，而某一低品位矿藏则可能升级为可开采的矿石。由于冶炼技术的改进和新方法的采用，也可能使得至今认为无用的矿藏变得有利用价值。这样，在选矿中引入浮选工艺后，就能够从含铜只有0.5%而从前只当作废石的物料中回收铜。同样地，溶剂萃取方法的采用，使赞比亚吕戈(Nchan-ga)铜矿每年能够处理9百万吨浮选尾矿，从过去废弃的尾矿中生产8万吨成品铜(7)。

出窿矿石和入选矿石的品位(金属含量)取决于一系列因素，一般地说，大型选厂处理较底品位的矿石。

为了经济地开采和选矿，评价矿床的因素归纳如下：

(1) 矿床的地理位置与储量规模。

(2) 原矿品位，矿物组成和矿石结构，矿石结构含集合体(粒度)和有用矿物在矿石内的浸染(分布)程度。在某些情况下，矿物可能是粗粒集合体，以致肉眼可以看见，但是，常呈细粒浸染，为了研究矿物形态，需用显微镜观察(8)。了解矿物天然性质是重要的。为了选矿的进行，必须明瞭有用矿物和脉石矿物间的物理性质的差异。

(3) 财经方面——投资额，有效投资，贷款利息，税金，以及矿区开采权费用的支付。

(4) 采矿成本。地下采矿成本较露天开采和开采冲积矿床高，地下采矿只适用于开采较高品位的矿石。以地下开采锡矿石为例，锡的品位介于0.3~1.5%之间(9)。而对冲积锡矿床来说，开采品位低得多，例如马来西亚(Malaysia)采用大型挖泥船，入选品位可以降到Sn0.02%或更低。

(5) 辅助服务成本，如供电，供水，道路，以及尾矿

## 处置。

(6) 矿石处理的可行性——选矿流程，生产成本，精矿品位，以及能达到的回收率。

(7) 金属价格，市场精矿粉价格，以及矿山精矿粉销售价格。

必须明白，金属的市场价格不完全符合精矿粉所含的金属量的价格。精矿粉收购价通常是冶炼厂根据额定的精矿品位提出来的。较低品位精矿直接与其金属含量有关，价格偏低；扣除金属冶炼和精炼成本，还需扣除加工损失的百分率；精矿中含杂质超过规定的标准时，尽管可从中回收到贵重金属而盈利，但仍然被压价。因此，精矿粉的市场价格是根据品位和杂质含量而变化的。

要确定某一矿床矿石的最低金属含量是否符合开采要求，须根据上列诸因素综合考虑。许多有色金属矿，其开采品位低于1%，甚至更低。对于金矿来说，矿石含量达到百万分之五就可开采，而铁矿石含铁低于20%的才看成低品位矿石。

有许多选矿厂利用再选方法从尾矿中回收矿物，尾矿金属品位比可开采的最低品位矿石低得多。如钨矿开采的矿石品位介于0.5~1.5%  $WO_3$ ，但美国克里马克斯 (Climax) 钨选厂，日处理45000吨含钨小于0.1%的尾矿，却成为美国产钨精矿的两大主要厂家之一<sup>(10)</sup>。

英属哥伦比亚 (British Columbia) 苏利伐 (Sullivan) 铜铅锌选矿厂，蒂明斯 (Timmins) 得克萨斯古耳夫 (Texas-gulf) 基德河 (Kidd Creek) 选矿厂，各自从铅锌尾矿中回收锡，日处理尾矿10000吨。入选尾矿含锡品位各为0.06%和0.15%<sup>(9)</sup>。

处理老尾矿坝的成本较常规开采成本低得多，在许多老矿区建立大型尾矿选矿厂是合适的(11)。远东金铀公司从南非东部金区矿山的老选厂尾矿中回收金、铀和生产硫酸。尾砂实行控制采用，在工作面引入高压喷射水，形成的矿浆沿各个溜槽流至砂泵站，由泵扬送到中心选矿厂。该厂每月处理150万吨尾砂，尾砂含Au 0.53ppm，含 $V_2O_5$  40ppm，含S 1.04% (12)。

世界各国正在意识到利用有限资源要花很大代价，建立大型新矿山要花费巨大投资。因此，建立大型尾矿再选厂，重新回收尾砂中的金属，是值得认真研究的(13)。

矿石经常根据其有用矿物的特性进行分类，因而在天然矿石中，金属以金属元素形式存在；硫化矿含的金属呈硫化物形式，而在氧化矿中，有用矿物可能呈氧化物、硫酸盐、硅酸盐、碳酸盐或呈这些矿物的水合物形式存在。复合矿含有一种以上有用矿物，金属矿物常在一起（见附录I），它们呈不同粒度，或固溶共生体，或化合物的混合物。例如方铅矿和闪锌矿有时共生，铜的硫化矿物和闪锌矿共生程度较小，黄铁矿（ $FeS_2$ ）常常和上述矿物共生。

矿石同样可按脉石性质分类，如含钙的、碱性的（富石灰）、含硅的或酸性的（富硅）脉石等。

### 非金属矿

有经济价值的矿石，根据矿物用途，可分为金属矿和非金属矿。开采或选出某些矿物，可能兼有一种以上的目的。一种类型是，矿物可能是金属矿石，即当它用以提取金属时，例如当铝土矿（氧化铝的水合物）被用于冶炼铝时；另一种是铝土矿的化合物，应划归非金属矿石，即当铝土矿

或天然氧化铝被用作耐火砖的材料或研磨材料时。

许多非金属矿物与金属矿物共生（见附录Ⅰ），同时开采，同时选矿。如方铅矿是铅金属的主要来源，通常同萤石（ $CaF_2$ ）和重晶石（ $BaSO_4$ ）共生，后两种是重要的非金属矿。

金刚石矿是当前世界开采矿石品位最低的一种，金刚石的矿石品位常介于 $0.03ppm$ 和 $0.15ppm$ 之间。开采的矿石主要用于工业金刚石，占整个产量的80%，也有当做宝石开采的。金刚石宝石开采费是昂贵的，主要用于制作宝石装饰品。开采低品位矿石矿床中的工业金刚石，开采费相对低些。目前所开采的最低品位金刚石矿是累索梭（Lesotho）的累森—拉—特腊（Letseng—La—Terai）矿，金刚石品位仅为 $0.007ppm$ 。开采该矿是合算的，偶尔也可发现优质的大块金刚石宝石(14)。

## 第二节 选矿的范围

“采下的矿石”或“出窿矿石”由有用金属矿物和废石（脉石）组成，矿物选别有时称矿石选矿或矿物选矿，在有金属矿石的情况下，继采矿之后并把矿石制备用于提取有用金属，但生产非金属和煤的商业性最终产品除外。除要求控制矿石的粒度外，从脉石矿物中分离有用矿物是物理分离过程，产出的富集部分称为精矿，含有多数有用矿物。而废弃部分或尾矿绝大多数含的是脉石矿物。浓集或富集过程，可大量减少冶炼所需处理的物料量，因此降低了能源消耗和生产纯金属所需的药剂。

已经预测到，由于某些化学方法能得到较高的回收率，随着冶金学家采用水冶和火冶取代所采用的物理选矿方法，金属矿选矿重要性可能日渐降低。当有用矿物在矿石中呈微

粒散布，而又不能与脉石充分解离时，在这种情况下，化学方法和选矿工艺技术的联合，或许有其优点(15,16,17)。然而，在许多情况下，低品位矿石或直接熔炼或溶浸，所消耗的能源将如此巨大，以致成本高得惊人。对比这些工艺，选矿方法的成本是不贵的，从经济角度也易于考证。选矿减少必须运往冶炼厂的物料量，因而减少了装运费；由于减少了必须处理的矿石数量，也就大大地降低了冶炼成本；无用脉石的减少而得到较少的炉渣，提高了熔炼的金属回收率。当然缺点是必须支付选矿费用。塔卡特( Taggart ) (18) 已经分析了不经选矿而直接从矿石中熔炼出金属，和经过选矿从物料中熔炼金属的生产成本情况，其结果表明，选矿的经济意义是极其明显的。

尽管如此，在选矿生产中所消耗的能源可以认为是生产粗金属所需消耗的能源总和可观的一部分，尤其对低品位矿石。以某种铜矿石为例，若品位约为0.6%，则生产每吨粗铜的总能耗约为 $33 \times 10^3$ 千瓦时(19)。选矿消耗能源占其总能耗的三分之一(20)。另一方面，从品位24%的铁矿石中生产一吨生铁的能耗约为 $7 \times 10^3$ 千瓦时，而选矿只占其总能耗的10%。因此，随着矿石品位降低，在决定矿床是否开采时，选矿的能耗可能变为最重要的因素，这是显而易见的。

从经济角度看，能耗是头等重要的。尽管世界上有丰富的矿物矿床，以满足本世纪对普通金属的需求，然而却没有足够的能源去生产这些金属。巴索提( Barsotti ) (21) 曾研究三种金属——铝、铜和铁。为了寻求经济繁荣，对任何国家来说，上述三种金属是基础，要生产这些金属，须耗费大量能源。石油、煤和水电是生产金属的主要能源。巴索提( Barsotti ) 结论说：“在三十年到四十年内，石油将基本



上凋竭，由其它能源取代，包括核能。要消除这种巨大的冲击，尚缺乏足够的对策。”巴索提指出，能源有效利用和储备的重大改进将变得重要。

如矿石中含有一种以上的有用矿物，通常用选矿方法分离。同样地，如含有不希望有的杂质矿物，因它干扰下步精炼过程，在选矿过程中也需除去。多数有色金属矿物必须经过选矿。然而，有许多很高品位的铁矿石矿床，至今不需经过选矿，但瑞典（Swedish）含磷灰石磁铁矿（ $Fe_3O_4$ ）则是例外。然而铁矿石的选矿，对于开采出的低品位矿石是很重要的。美国目前生产的铁精矿多数是来自低品位铁磁石矿（在硅石中铁矿物呈细粒嵌布）。

选矿厂的部分或全部常常被归属为工厂，虽然通常这类工厂处理的矿石来自许多矿山的产地，但这种厂通常仍设置在矿山。

选矿过程中有两种基本作业，即从含废弃脉石的矿物中进行有用矿物的单体分离或解离，或从脉石中进行有用矿物的分离，后者称为选矿。

从脉石中进行有用矿物的解离，是借助粉碎作用来完成的，它包含破碎。如果需要的话，还有研磨，即把产品研磨成矿物和脉石相对纯净粒子的混合物这样的一种粒度。解离的适当程度是选矿成功的关键。有用矿物应该从脉石中分离出来，但仅仅是恰好的分离。过度磨细的方法是浪费的，因为它不但要消耗研磨的动力，而且更加难以取得有效的回收。因此避免过度磨细显得如此重要，以后将可见到，在初选前，一些矿石被粉碎到比解离更粗的粒度。

在矿物从脉石中解离以后，矿石需经过某些选矿法，使矿物分离成两种或更多的产品。常常利用矿石中有用矿物和