

全国矿政管理系列教材

矿物原料 选矿 及深加工

郭秉文 肖云 主编



地质出版社

全国矿政管理系列教材

矿物原料选矿及深加工

郭秉文 肖 云 主编

地质出版社

· 北 京 ·

78743

《全国矿政管理系列教材》编委会

主任 傅鸣珂
副主任 许绍倬 朱思贵 李万亨 陈庆寿
委员 孟澍森 李世法 杜国银 曾键年 金愉中 叶志斌
秘书 胡鹏兴

图书在版编目(CIP)数据

矿物原料选矿及深加工/郭秉文,肖云主编.-北京:地质出版社,1998.6

全国矿政管理系列教材

ISBN 7-116-02022-5

I. 矿… II. ①郭…②肖… III. ①选矿-教材②选矿-后处理-教材 IV. TD9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 10313 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:赵俊磊 郑长胜

责任校对:关风云

*

北京兴谷印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092¹/₁₆ 印张:20.75 字数:480000

1998 年 6 月北京第一版·1998 年 6 月北京第一次印刷

印数:1—3000 册 定价:28.00 元

ISBN 7-116-02022-5

T·18



(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

《矿物原料选矿与深加工》是供矿产开发管理学生(员)学习各种矿物原料精选与加工利用有关基本知识的教材。本书的内容是作者多年来在为矿产资源开发管理专业学生、各类矿管技术干部培训班学员讲授该课程的基础上,结合目前我国矿产资源开发利用的特点和矿管人员实际工作的需要而确定的。

根据我国地矿行政管理工作的特点,要求该专业学生(员)对已往学习“选矿”课程的内容进行相应的改革,其关键问题之一是拓宽学生的知识面,除对学生系统讲授传统的选矿内容外,对一些矿物原料的深加工利用、矿产资源的综合利用、黄金选冶、煤炭精选、尾矿处理等方面知识,应有所加强。为达到此目的,本书在内容安排方面有别于以“选矿概论”、“选矿学”形式的介绍;也不同于像对选矿专业学生那样作详尽介绍,期望学生(员)通过学习本教材,在工作中经过实践锻炼,能独立地解决与本专业有关的各种矿物原料选矿与深加工问题。

本教材第一篇矿物原料选矿方法部分,着重介绍有关选矿的各种方法、矿物原料深加工的某些方法(如微细粉碎、化学处理等)的基本原理、工艺特征、选矿药剂和所用设备等。第二篇主要矿物原料选矿实践和深加工部分,重点介绍对我国目前国民经济发展起主要作用的、有代表性的一般常见矿石的选矿加工工艺流程、技术条件、所用选矿设备、生产技术指标和研究方向等。并适当介绍有关矿石选矿所得精矿产品进一步深加工利用方面的基本知识,为矿产资源综合利用提供思路,从而达到最大限度地合理利用矿产资源的目。在该篇内容安排上,增加了煤炭精选,加强了尾矿处理内容。

我们在编写过程中,在内容取舍方面,尽量做到理论联系实际,取材以国内为主,另外本着“洋为中用”的原则,适当吸收了国外有关一些先进的矿物原料选矿和深加工工艺和设备,以体现现代矿物原料选矿和深加工科学技术的发展水平。

本书除可供矿产开发管理专业学生(员)作教材外,还可供地质类专业学生(员)作教材使用,也可作为采矿、选矿、冶金等专业学生的教学参考书,并可供在地质矿产部门从事工作的技术人员和管理干部学习矿物原料选矿和深加工知识时的参考。

在应用本书作教材时,可根据不同层次学生(员)的学习基础和工作所在地区矿种类别,对书中的内容可选取使用。

本教材由中国地质大学(武汉)郭秉文(第二、三、四、五、十、十一、十二、十三、十四章)和肖云(第一、六、七、八、九章)两位教授编写,在编写过程中得到李万亨教授的大力支持和热情帮助,并得到地矿部矿管局傅鸣珂高级工程师、吴鉴高级工程师、胡鹏兴工程师的指导,在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限,缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1998年2月

目 录

第一篇 矿物原料选矿方法

第一章 概述	(1)
第一节 选矿的目的及在国民经济中的地位和作用	(1)
第二节 选矿发展简史	(3)
第三节 选矿方法和选矿过程	(4)
第四节 选矿的工艺指标	(5)
第二章 破碎与磨矿	(8)
第一节 概述	(8)
第二节 矿石的破碎	(11)
第三节 矿石的筛分	(18)
第四节 破碎筛分车间通风除尘	(26)
第五节 磨矿	(28)
第六节 分级	(42)
第七节 破碎磨矿流程	(45)
第三章 重力选矿	(49)
第一节 概述	(49)
第二节 水力分级	(53)
第三节 洗矿	(58)
第四节 重介质选矿	(63)
第五节 跳汰选矿	(69)
第六节 摇床选矿	(81)
第七节 溜槽选矿	(91)
第八节 几种选金用离心选矿机	(115)
第四章 浮选	(119)
第一节 概述	(119)
第二节 浮选基本原理	(120)
第三节 浮选药剂	(127)
第四节 浮选机	(164)
第五节 浮选流程	(171)
第六节 影响浮选过程的因素	(174)
第五章 磁选和电选	(183)
第一节 磁选	(183)
第二节 电选	(203)

第六章 化学选矿及其它选矿方法	(213)
第一节 化学选矿.....	(213)
第二节 其他选矿方法.....	(223)
第七章 选矿厂产品脱水及金属平衡	(228)
第一节 产品脱水.....	(228)
第二节 金属平衡.....	(235)
第二篇 主要矿物原料选矿 实践及深加工	
第八章 铜、铅、锌矿	(239)
第一节 铜矿选矿及铜的提取方法.....	(239)
第二节 铅、锌多金属矿选矿及铅、锌的提取方法.....	(243)
第九章 钨、锡矿	(250)
第一节 钨矿、选矿及钨精矿加工利用	(250)
第二节 锡矿石选矿及锡的提取方法.....	(253)
第十章 金矿	(256)
第一节 砂金矿选矿.....	(256)
第二节 脉金矿选矿.....	(257)
第三节 从伴生金矿中回收金、银	(262)
第十一章 铁、锰矿	(269)
第一节 铁矿选矿及铁精矿的加工利用.....	(269)
第二节 锰矿选矿及锰和锰铁的生产.....	(277)
第十二章 非金属矿	(286)
第一节 磷矿选矿及加工利用.....	(286)
第二节 高岭土选矿及深加工.....	(291)
第三节 膨润土选矿及深加工.....	(293)
第四节 石墨选矿及深加工.....	(297)
第十三章 选煤	(301)
第一节 概述.....	(301)
第二节 选煤方法.....	(301)
第三节 选煤工艺流程.....	(302)
第四节 煤炭筛选工艺流程.....	(311)
第五节 选煤厂	(314)
第十四章 尾矿处理	(316)
第一节 粗粒干尾矿的输送和堆积.....	(316)
第二节 细粒含水尾矿的输送和堆积.....	(317)
主要参考文献	(325)

第一篇 矿物原料选矿方法

第一章 概 述

第一节 选矿的目的及在国民经济中的地位和作用

一、选矿的目的

选矿,又称有用矿物精选,它是将矿石中有用矿物成分使之富集的一门技术科学。

最早,选矿处理的对象是金属矿石,故称为选矿。随着处理的对象扩展到非金属矿物原料和煤,以及处理方法已包括了矿物的化学处理(化学选矿),“选矿”一词,现已广泛地被“矿物处理”或“矿物工程”所取代,由于历史的原因,在我国人们目前仍习惯地沿用“选矿”这一词语。

矿物在地壳中分布不均,但在地质作用下,可以形成相对富集的矿物集合体,在现代技术经济条件下,可以开采、加工、利用的矿物集合体,叫做矿石;否则,称为岩石。地壳中具有开采价值的矿石积聚区,通常称为矿床。

矿石由有用矿物和脉石矿物所组成。能为国民经济利用的矿物,即选矿所要选出的目的矿物,叫做有用矿物;目前国民经济尚不能利用的矿物,叫做脉石矿物。

矿石和岩石的概念及其划分,需从技术、经济诸方面综合衡量。随着国民经济需要的增长和科学技术的发展,更多的岩石可能升格为矿石。同样,脉石矿物有无经济价值也是相对的,它也随技术条件及场合的变化而变化。例如,一般矿石中的黄铁矿往往作为伴生矿物而抛弃,但若黄铁矿含量较高时,也可选矿回收用以提取硫。

矿产资源种类很多,大都以固体的形式存在,少量呈液体或气体的形式存在,在工业上可分成金属、非金属和可燃性矿产资源。

自然界蕴藏着极为丰富的矿产资源,但是,除少数富矿外,一般品位(即矿石中有价成分含量的百分数)都较低,绝大多数需要加工后才能利用,选矿就是主要的加工过程。

金属矿产资源的加工,最终目的是从矿石中提取纯金属或化合物。但是从地下开采的矿石大都金属含量很低,不可能直接送冶炼加工。例如,许多铜矿石含铜不足1%,铅锌矿石中铅锌含量往往不到10%,铍矿石氧化铍含量0.05%~0.1%,贫铁矿含铁仅30%左右。而冶炼时需要原料的金属含量大都分别为含铜12%~30%,含铅40%~70%,含锌40%~59%,含氧化铍8%~10%,含铁60%~65%。可见,对于开采后的矿石在送往冶炼之前,需将主金属的含量富集几倍、几十倍乃至几百倍才能满足冶炼工艺的要求。这种使矿物富集的过程要用选矿的方法来实现。

对于大多数矿石而言(特别是有色金属和稀有金属的复合矿石),常有多种有用矿物共生和伴生的特点。像铜-钼、铜-镍、铜-铅-锌-银-钨-锡-钼-铋-锂-铍-铌-钽-铅-锑-锡-银等。其

中有价元素常以矿物集合体的形式共存于同一矿体之中。开采这类复杂矿石固然具有同时可以获得几种矿产品的优点,但相应地也使矿物原料分离加工过程复杂化。如果在冶炼之前不预先将几种有用矿物相互分离,不但冶炼过程无法进行,而且会造成多种有用元素的损失浪费。这种在冶炼前将同一种矿石中的多种有用矿物相互分离的过程也只能借助于选矿技术才能实现。

矿石中除了有用矿物之外,还常含有对冶炼或其他加工过程有害的杂质。例如,对于高炉炼铁,硫、磷是有害杂质,用于造纸工业的粘土、微量的铁是十分有害的。如果不预先将这些有害元素排除,不仅会影响冶炼或加工产品的质量,还常使工艺过程复杂化,甚至无法进行。这种排除原料中有害杂质的任务也是由选矿来完成的。

由此可见,选矿的目的和任务就是将有用矿物同无用的脉石矿物分离,把彼此共生的有用矿物尽可能分离并富集成单独的精矿,综合回收有价元素,排除对冶炼和其他加工过程有害的杂质,提高选矿产品质量,以便充分、合理、经济地利用矿产资源。

二、选矿在国民经济中的地位和作用

选矿在矿物原料整个加工过程中是介于采矿与化工、冶金之间的学科。广义地说,选矿是综合研究物料分离技术的一门学科。它作为一种有效的分离手段早已在黑色金属、有色金属、煤炭、化工、硅酸盐、陶瓷及建材等工业中广泛应用。近年来在金属的再生工业和环境保护领域也日益发挥着重要作用。

选矿在冶金工业中所起的作用很大。由于选矿可使矿石中的金属含量富集几倍至几百倍,大多数情况下与冶炼过程相比,选矿成本低,在技术经济上有很大的优越性,因此选矿可降低冶炼成本。由于废石量大部分被排除,减少了炉渣量,不仅降低了能耗,也相应地减少了炉渣中的金属损失,使冶炼回收率得以提高。冶金工业的高速发展,要求提高采矿效率,采取经济有效的选矿方法,剔除采矿过程中贫化混入的围岩,恢复矿石地质品位,富集有用矿物,可使露天开采、深孔爆破等高效采矿方法获得应用。另外,选矿技术的应用和发展使矿石的工业品位下限大幅度降低,使大量的原来被抛弃的废石变为可利用的资源,相应地增加了金属矿产的储量。

钢铁工业生产实践表明,为高炉炼铁提供“精料”,可以降低焦炭和石灰石用量,提高高炉利用系数。我国铁矿石地质储量比较丰富,但多为贫矿,除了矿石贫之外,其矿物颗粒嵌布细、组分复杂也给矿石的开发利用带来困难,这种矿石储量大,但“贫、细、杂”的特点,决定了我国绝大多数铁矿石要进行选矿处理。

在有色金属和稀有金属矿产资源中,其金属含量大都很低,各种有用矿物相互之间以及有用矿物与脉石之间共生关系更为复杂,选矿显得更为重要。对于难选共生矿的开发利用,往往需要多种选矿方法的联合和采用选冶联合流程。合理的流程结构应能获得选矿、冶炼两个过程总的技术经济效益来对流程作出综合评价。选矿也有作为冶炼工艺中的一个中间过程采用。例如,我国金川有色金属公司冶炼厂现有的生产流程是将铜-镍混合精矿用电炉熔炼、转炉吹炼,产出高冰镍,经过缓冷后,再破碎磨矿,用浮选法获得铜精矿和镍精矿,用磁选法得到合金,此后分别进入各自的冶炼系统提取金属铜、镍和贵金属。又如,在我国现代化的贵溪冶炼厂中,冰铜经转炉吹炼后的转炉渣中含铜约4.5%,经铸渣机缓冷后进行破碎、磨矿,再用浮选法获得渣铜精矿,返回闪炼炉中熔炼。选矿在其他冶金炉渣的处理方面也有成功的应用。

选矿在煤炭工业方面也获得广泛的应用。选煤的主要任务是排除混杂在原煤中的矸石、煤矸和硫铁矿等杂质,从而降低煤的灰分和含硫量。选煤中常用的选矿方法有重选法(跳汰、溜槽、摇床、重介质等)、浮选法。

非金属矿物资源绝大多数也是多种矿物共生,不经过选矿提纯也无法直接利用。如高级陶瓷和造纸工业用的高岭土,用作化肥原料的磷灰石、其他供建材、电工等工业部门用的矿物原料都有一定的成分要求,对于这些非金属矿物原料的利用,选矿自然是重要的加工过程。

选矿在地质部门的应用,主要是通过矿石的可选性试验来对所发现的矿床进行评价。此外,对岩矿鉴定和重砂工作所需的单矿物的分离,选矿是一种有效的手段。

选矿近年来在不少经济领域内推广应用。例如,在固体废料(包括工业和城市垃圾)的处理和金属的再生工业中的应用。在化纤工业中可排除混入原料的某些杂质(砂粒、玻璃屑等)。在粮食谷物加工过程中用于选种、除杂等。在环境工程中用浮选处理废水。

总之,国民经济的许多部门都离不开选矿这门技术科学。从以古代的淘金术为代表的重力选矿的初级阶段到今天种类繁多的选矿新技术和新设备的不断出现,选矿已发展成为一个独立的学科,随着科学技术水平的提高和人类对原料、能源需求量的增加,选矿学科的技术水平将不断提高,其应用范围和所发挥的作用也将越来越大。

第二节 选矿发展简史

人类应用选矿技术可追溯到古代。我国远在 4000 年以前就有金器,说明我们的祖先那时就掌握了淘金与炼金术。我国湖北铜录山矿冶遗址中的“船形木斗”就是 2000 多年前淘洗铜矿石的工具。西汉初年(公元前 2 世纪)就发现用铁从胆水(硫酸铜溶液)中置换铜的作用。唐樊著《蛮书》中有“熬金出雨水,盛沙淘汰取之”的记载,描述当时淘金选矿情况;持羽毛蘸油粘捕亲油疏水的金、银细粒,称为鹅毛刮金,迄今仍有应用。明代《天工开物》一书有矿石采出后“先经拣净淘洗”,然后“入炉煎炼”,以及分选铁矿砂和锡矿砂的记载;在古希腊有用油和沥青收集矿物的记载。

自 18 世纪以来,选矿技术获得较快的发展。1848 年在德国出现了第一台机械传动活塞跳汰机。1880 年 T. B. 奥斯本(Osborne)首次发明静电选矿机,用于选别谷物。1890 年美国 C. M. 博尔(Boll)等发明电磁磁系圆筒式磁选机,并用于生产。1893 年美国 A. 威尔弗利(Wilfley)发明了摇床。19 世纪末期在澳大利亚、美国及一些欧洲国家开始用浮选法选别细粒矿物,为冶炼提供精矿。

20 世纪以来,选矿技术发展迅速,1906 年泡沫浮选法取得专利,并推广使用。1907 年美国 G. W. 皮卡德(Pickard)发明电晕选矿机,是电选的重大发展。1915 年蔡斯(Zeise)首次合成黄药。1921 年应用重介质选煤。1922 年用氰化物抑制闪锌矿和黄铁矿,发展了优先浮选工艺。1924 年用脂肪酸皂浮选氧化矿。1925 年推广使用黄药浮选硫化矿,使浮选的工业应用得到重大发展。1943 年美国使用 I. B. 汉弗莱(Humphreys)研制的螺旋选矿机从海滨砂中回收锆。同期化学选矿用于处理氧化铜矿、铀矿,以后又用于处理复杂、难选、细粒浸染的矿物原料。50 年代铁氧体等永磁材料的出现取代了电磁场磁选机;第一台工业型矿用光电拣选机研制成功;化学选矿的应用与联合流程的发展,使过去难以解决的、性质相近的许

多矿物分离问题得到解决;细菌浸出技术的出现,为利用贫矿、废石、尾矿和炉渣找到了途径。20世纪60年代以来,选矿学科的技术水平获得很大的提高,新工艺的应用,大型高效新设备的出现,微细矿粒分选新工艺的创立,选矿药剂品种的增加,选矿过程自动控制技术的推广以及理论研究的深入是选矿技术成就的主要表现。

第三节 选矿方法和选矿过程

一、选矿方法

将矿石中有用矿物和脉石矿物、有用矿物和有用矿物进行分离所采用的方法称选矿方法。矿石中的各种矿物,都具有各自的物理性质、化学性质和物理化学性质,如粒度、形状、颜色、光泽、密度、摩擦系数、磁性、电性、放射性、表面润湿性等。根据这些不同的性质,选择不同的方法,使矿物得到分选。

最常用的选矿方法有:

重力选矿法(简称重选法),是根据矿物密度的不同及其在介质(水、空气或其它密度较大的介质)中具有不同的沉降速度进行分选的方法。它是最古老的选矿方法之一,这种方法广泛地用来选别煤炭和含有铂、金、钨、锡和其它重矿物的矿石。此外,铁矿石、锰矿石、稀有金属矿石、非金属矿石和部分有色金属矿石也常采用重选法进行选别。

磁选法,是根据矿物磁性的不同进行分选的方法。它主要用于选分铁、锰等黑色金属矿石和稀有金属矿石。

浮游选矿法(或叫浮选法),是根据矿物表面的润湿性的不同选分矿物的方法。目前浮选法应用最广,特别是细粒浸染的矿石用浮选处理效果显著。对于复杂多金属矿石的选分,浮选是一种最有效的方法。目前绝大多数矿石可以用浮选处理。

除上述三种常用选矿方法外,还有电选、手选、摩擦选、光电选、放射性选矿、按粒度形状选矿等方法。电选是根据矿物电性的不同来进行选别的方法。手选是根据矿物颜色和光泽的不同来进行选别的方法。摩擦选矿是利用矿物摩擦系数的不同对矿物进行分选的方法。光电选矿是利用矿物反射光的强度不同对矿物进行分选的方法。放射性选矿是利用矿物天然放射性和人工放射性对矿物进行分选的一种方法。粒度、形状选矿是根据矿粒的粒度和形状的不同进行分选矿物的方法。

以上这些选矿方法,只能使有用矿物与脉石矿物、有用矿物与有用矿物达到机械的分离,并不改变矿物本身的物理性质和化学性质,习惯上叫做机械选矿法。为了处理成分复杂的难选矿石,只用常规的机械选矿法往往难以达到。近代人们利用矿物和矿物组分化学性质的差异,采用化学方法改变矿物组成,然后用相应的方法使有用组分富集。这种矿物加工工艺叫做化学选矿。另外,随着矿石综合利用的被充分重视及开采矿石的品位日益贫化和复杂化,一些新兴的选矿方法正在形成和被利用,例如,离子浮选、细菌选矿、离子-浮选等方法。

二、选矿过程

选矿是一个连续的生产过程,由一系列连续的作业所组成。表示矿石连续加工的工艺过程称为选矿工艺流程(图1—1)。

矿石的选矿处理过程是在选矿厂里完成的。不论选矿厂的规模大小(小型选矿厂日处

理矿石几十吨,大型选矿厂日处理矿石高达数万吨以上),工艺和设备如何复杂,一般包括以下三个最基本的过程:

1. 选别前的准备作业

该作业包括破碎和筛分、磨矿和分级。其目的主要是使有用矿物与脉石矿物,有用矿物与有用矿物相互分开,达到单体分离,为分选作业做准备。有时这种准备作业是将物料分成若干适宜的粒级,为分选作业做准备。

2. 选别作业

这是选矿过程的关键作业(或称主要作业)。它根据矿物的不同性质,采用不同的选矿方法,如浮选法、重选法或磁选法等等。

3. 产品处理作业

主要包括精矿脱水和尾矿处理。精矿脱水通常由浓缩、过滤、干燥(有时需要)三个阶段组成。尾矿处理通常包括尾矿贮存和尾矿水处理。

有的选矿厂根据矿石性质和分选的需要,在选别作业前设有洗矿,预选抛废(即在较粗的粒度下预选排除部分废石)以及物理、化学预处理等作业,如赤铁矿的磁化焙烧,氧化铜矿的离析焙烧等作业。

矿石经过选别之后,可得到几种产品:精矿、尾矿和中矿。

精矿是原矿经过选别之后,得到的有用矿物含量较高,适合于冶炼或其他工业部门要求的最终产品。尾矿是原矿经过选别之后,得到的有用矿物含量很低,不需要进一步处理的或目前技术经济上不适合于进一步处理的产品。中矿是原矿经过选别之后,得到的中间产品(或称半成品),其中有用矿物的含量比精矿低,但比尾矿高,因此中矿还需要进一步加工处理。

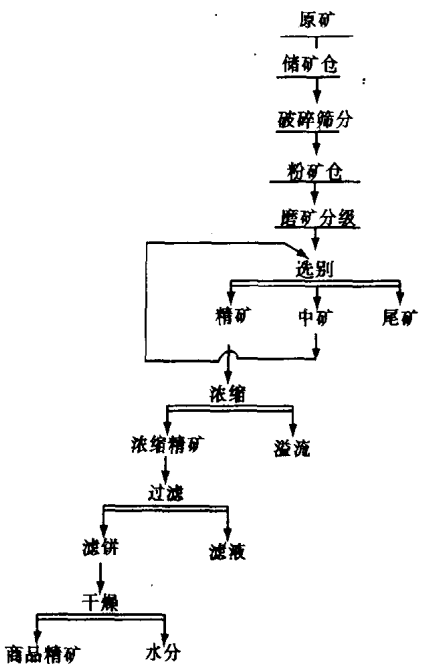


图 1—1 选矿工艺流程示意图

第四节 选矿的工艺指标

为了评价选矿过程进行得好坏,通常采用一些技术指标来表示。常用的选矿指标有:产品的品位、产率、金属回收率、选矿比和富矿比、选别效率等等。

一、品位

矿物原料及选矿产品中有用成分含量的质量百分比;对金银等贵金属矿,用 g/t 表示。原矿、精矿和尾矿品位的高低,分别表示原矿的贫富、精矿的富集和尾矿的贫化程度。

通常用希腊字母 α 、 β 、 δ 三个字母分别表示原矿、精矿、尾矿的品位。

二、产率

产品的重量通常以 Q 表示。产品重量与原矿重量之比的百分数称产品的产率,并以希腊字母 γ 表示。Q 是绝对量,而 γ 是相对量。

例如,某选矿厂每昼夜处理 500t 原矿石,获得 30t 精矿,则精矿产率为:

$$\gamma_{\text{精矿}} = \frac{\text{精矿重量}}{\text{原矿重量}} \times 100\% = \frac{Q_{\text{精矿}}}{Q_{\text{原矿}}} \times 100\% = \frac{30}{500} \times 100\% = 6\%$$

尾矿产率为：

$$\begin{aligned}\gamma_{\text{尾矿}} &= \frac{\text{尾矿重量}}{\text{原矿重量}} \times 100\% = \frac{\text{原矿重量} - \text{精矿重量}}{\text{原矿重量}} \times 100\% \\ &= \frac{Q_{\text{原矿}} - Q_{\text{精矿}}}{Q_{\text{原矿}}} \times 100\% \\ &= \frac{500 - 30}{500} \times 100\% = 94\%\end{aligned}$$

或 $\gamma_{\text{尾矿}} = 100\% - \gamma_{\text{精矿}} = 100\% - 6\% = 94\%$

三、选矿比

原矿重量与精矿重量之比称选矿比。它表示选出一吨精矿需处理几吨原矿。如上例的选矿比为：

$$\text{选矿比} = \frac{\text{原矿重量(t)}}{\text{精矿重量(t)}} = \frac{500}{30} = 16.7$$

四、富矿比

精矿品位(β)和原矿品位(α)之比称富矿比。这个比值表示精矿中有用成分的含量比在原矿中有用成分的含量提高的倍数。如硫化铜矿,原矿中铜品位为1%,精矿中铜品位为24%,其富矿比为：

$$\text{富矿比} = \frac{\text{精矿品位}(\%) }{\text{原矿品位}(\%) } = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{24}{1} = 24$$

五、回收率

原矿或给矿中所含被回收的有用成分在精矿中回收的质量百分数称回收率。此用来评价该有用成分的回收程度。精矿的实际回收率表示为：

$$\epsilon_{\text{(实际)}} = \frac{\beta Q_K}{\alpha Q_a} \% \quad (1-1)$$

精矿的理论回收率表示为：

$$\epsilon_{\text{(理论)}} = \frac{\beta(\alpha - \delta)}{\alpha(\beta - \delta)} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中： α ——原矿或给矿品位；

Q_a ——原矿重量；

δ ——尾矿品位；

β ——精矿品位；

Q_K ——精矿重量。

回收率包括选矿作业回收率和选矿最终回收率。由于取样、计量、分析及矿浆机械流失等原因,计算出的理论回收率和实际回收率往往不一致。

六、选别效率

表示选别效果好坏的综合指标。理想的选矿是将原矿中的有用成分全部回收的精矿中去,而不回收脉石。因而,用精矿中有用成分回收率与脉石回收率之差作为衡量选别作业成绩的标准,即选别效率。选别效率 V 表示为：

$$V = \frac{\epsilon - \gamma_K}{1 - \alpha/\beta_{\text{纯}}} \times 100\% \quad (1-3)$$

或
$$V = \frac{\beta_{\text{纯}}(\beta - \alpha)(\alpha - \delta)}{\alpha(\beta - \delta)(\beta_{\text{纯}} - \alpha)} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中： $\beta_{\text{纯}}$ ——有用矿物的纯矿物品位；

γ_K ——精矿产率。

第二章 破碎与磨矿

第一节 概 述

一、破碎与磨矿在选矿中的意义

破碎与磨矿在选矿厂通常包括破碎筛分和磨矿分级,它是为下一步选别准备矿料,它是选矿厂的几个领头工序。矿石通过破碎与磨矿使有用矿物与脉石矿物单体解离,达到入选粒度的要求。有时在选别过程中,为满足下一个选别作业粒度的要求,还可在中间加入一定的粉碎作业。随着工业技术的发展,某些矿物原料如非金属矿物深加工的超细磨也获得广泛的应用。

选别过程所要求的粒度取决于矿石中有用矿物与脉石矿物的嵌布粒度。嵌布粒度越细,要求将矿石粉碎得越细。但合理的破碎粒度必须经过技术、经济全面比较确定。根据目前选矿厂常用粉碎设备的技术性能,欲将采出的矿石(井下开采达 300~600mm,露天开采达 1000~1500mm)粉碎单体解离,一般不能一次完成,而需连续几次粉碎。通常将最终粉碎产品粒度为 5mm 以上的粉碎过程,称为破碎。取得更细产品粒度的粉碎过程,称为磨矿。当然,它们的划分不是绝对的。

破碎和磨矿过程在选矿厂占有重要的地位。矿石经粉碎后,有用矿物与脉石矿物的单体解离程度直接影响分选指标。选矿厂的破碎和磨矿设备基建费几乎占全厂总基建费的一半以上。其生产费用约占选厂总成本的 30%~50%。因此,确定合理的粉碎粒度和工艺流程,合理选择、使用、维护破碎和磨矿设备,对于提高生产能力,减少基建投资,节约能耗,降低选矿成本和改善选矿指标,具有重要作用。

二、岩矿的机械强度

破碎磨矿的对象是岩石和矿石。岩矿的机械强度直接影响破碎过程的成效,并且也对破碎机械的结构提出力学上的要求。研究岩矿的机械强度及其特点,对岩矿的破碎磨矿是必要的。

岩矿的机械强度是指岩矿单位面积所能承受的外力(以 10^5Pa 为单位),也就是岩矿抗破坏的阻力。岩矿被破碎的难易程度就与这种阻力有关。通常用静载下测定的抗压强度、抗拉强度、抗剪强度和抗弯强度等来表示岩矿的抗破坏的阻力。这几种抗破坏强度中,抗压强度最大,抗剪强度次之,抗弯强度较小,抗拉强度最小。如以抗压强度为 1,则其他抗破坏强度只是它的很小的分数。有时还用普氏系数 f (M. M. 普罗托吉雅可诺夫用作岩石坚固性分类的系数)来表示岩矿的机械强度。按普氏系数 f 可将岩石按坚固性分为十级, f 值由 0.3 到 20,最坚固的岩石 f 值为 20,流沙性岩石 f 值为 0.3,其他岩石坚固性程度介于中间各级。 f 值愈大表示岩石愈坚固。选矿工艺计算上,常将矿石简化为硬、中硬、软三级,也有简化为很硬、硬、中硬、软及很软等五级。

选矿厂处理的矿石,其结构及力学性质是不均匀的。矿石中各种矿物成分的机械强度不

同;各种矿物集合体之间的聚合力比同种矿物内部的小;同样矿物集合中,晶体内部质点间的聚合力比晶面上的要大,美国国家矿业局作过测定,晶面之间的聚合力只有晶体内部的75%,再加上矿物晶体形成过程中存在的不连续性及不均匀性,以及矿石开采过程中的受力作用,使矿石内部形成许多微观的及宏观的裂纹。上述原因使原矿的力学性质极不均匀。一般来说,随着矿石粒度的减少,各种影响强度的宏观裂纹逐渐消失,不同的矿物聚合体的逐渐解离及同种矿物聚合物粒子增多,因此细矿粒的机械强度愈大。矿粒愈细,机械强度愈大,愈难破碎磨碎。

选矿工艺上引用“可碎性系数”及“可磨性系数”来定量地考虑岩矿机械强度对碎磨的影响。这是用相对单位来表示矿石的可碎性及可磨性,即:

$$\text{可碎性系数} = \frac{\text{该破碎机在同样条件下破碎指定矿石的生产率}}{\text{某破碎机破碎中硬矿石的生产率}} \quad (2-1)$$

$$\text{可磨性系数} = \frac{\text{该磨矿机在同样条件下磨细指定矿石的生产率}}{\text{某磨矿机磨细中硬矿石的生产率}} \quad (2-2)$$

通常用石英代表中等硬度矿石,它的可碎性及可磨性系数取为1。矿石硬度大,可碎性及可磨性系数都小于1,表示碎矿机处理它的生产率比处理中硬矿石低。反之,软矿石的可碎性及可磨性系数大于1,破碎机处理它的生产率比处理中硬矿石的高。

可碎性及可磨性的表示方法有许多种,还可以用绝对单位表示。

三、破碎方法

针对岩矿的机械强度特点实施恰当的破碎方法可以使破碎更有成效。所谓破碎方法,是指破碎力对待破碎物料的作用方式。目前,岩矿的破碎几乎都是采用机械破碎法,破碎机械的施力方式基本上是压碎、劈开、折断、磨剥及冲击等(图2—1)。

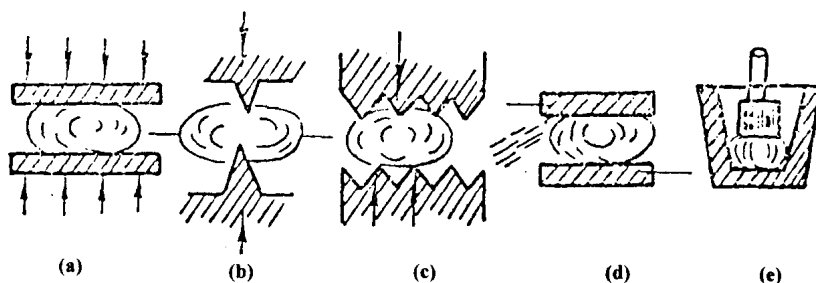


图2—1 破碎机械对矿石的施力情形

(a)—压碎; (b)—劈开; (c)—折断; (d)—磨剥; (e)—冲击

采用抗破坏强度最小的破碎力最容易破碎矿石,但实际破碎过程中还是取决于破碎机械的施力情况。就目前采用的破碎(磨矿)机械来说,一般都是上述几种方法的联合作用,但碎矿和磨矿有着明显的不同,碎矿机中以压碎为主,配之以弯折,磨矿机中是冲击加磨剥。劈碎作用只能对强度低的煤块可以采用。

冲击破碎矿石是以动载荷形式作用,破坏作用比静载荷的大。而破碎机工作时工作部件也以动载荷形式作用于矿石,也有一定的冲击效果。如果载荷超过疲劳极限,增加反复冲击次数也可以减少发生破坏所需的应力。因此,高频冲击破碎矿石也有好的效果,功耗低,破碎比高,过粉碎轻,容易在较粗粒度下解离有用矿物,如反击式破碎机和振动球磨等,都具有高

频冲击的特点。

破碎的施力方式要与矿石性质相适应才会有好的破碎效果。对于硬矿石,应当用弯折配合冲击来破碎,如果用磨剥,机器必遭严重磨损。对于脆性矿石,弯折和劈开较为有利,如果用磨剥,则产品中细粉末就很多。对于韧性及粘性较大的矿石,采用磨剥方式为好。

四、破(磨)碎比

破(磨)碎比是破碎(磨矿)机的给矿最大矿块尺寸(D)与该段破碎(磨矿)机的产品中最大矿块尺寸(d)之比,即破(磨)碎比 $i = \frac{D}{d}$ 。它的大小,说明矿石经过破(磨)以后,其粒度缩小的倍数,是衡量矿石破(磨)碎前后粒度变化的程度和均衡分配各段破碎(磨矿)机工作的参数。

最大粒度分别由原料及产品中 95% 或 80% 物料过筛计的正方形筛孔宽表示。我国习惯按 95% 过筛计最大粒度。欧美各国习惯按 80% 过筛计最大粒度。

五、破碎(磨矿)阶段

物料经过破(磨)碎的次数为破碎(磨矿)阶段的段数。生产实践中,大致可分为以下阶段:

阶段名称	给矿最大粒度/mm	产品最大粒度/mm
碎矿	粗碎	1500~300
	中碎	350~100
	细碎	100~40
磨矿	粗磨	30~10
	细磨	1.0~0.3
		0.1~0.075 或更细

每阶段达到的破碎比称部分破碎比,所有各阶段总共达到的破碎比称为总破碎比。总破碎比等于各阶段破碎比的连乘积,即:

$$i_{\Sigma} = i_1 \times i_2 \times i_3 \times \cdots \times i_n$$

破碎(磨矿)阶段的划分是相对的。它与选矿厂的规模和其他条件有关,随着破碎(磨矿)新设备、新工艺的出现和应用而发生变化。如大型破碎机、自磨和半自磨机的应用,使粉碎流程阶段简化,而且效率提高。又如,处理微细嵌布矿石的一些新工艺的出现,要求要有超细磨技术与之适应,因此,要求研究新的粉碎设备与工艺。

六、破碎的功耗学说——破碎理论

矿石的破碎过程是外力对矿石作功及克服矿石内部质点间的内聚力而使大块矿石破碎成小块的过程。破碎过程既不能自发进行,也是不可逆过程。破碎时机械对矿石作功,功转变为矿石变形位能,当变形达到极限时矿石即发生破碎。破碎以后,矿石接受的能有少部分变为矿石新生的表面能,大部分呈热能损失于周围介质空间。因此,从外观形态上看,破碎是一个粒度减小的过程,从力学实质上看,破碎是一个功能转变过程。为了寻找破碎中能量的消耗规律,不少人从不同角度提出问题及总结规律,提出了一些破碎的功耗学说,较公认的有面积学说、体积学说及裂缝学说。

1. 面积学说

1876 年德国学者 P. 雷廷格(Rittinger)教授提出面积学说。他认为破碎过程的功耗与物料新生成的表面积成正比。由于破碎的粒度越细,所产生的新生表面也越多,因此,破碎过

程的功与破碎比成正比。

$$A_1 = K_1 Q \left(\frac{i-1}{D_0} \right) \quad (2-3)$$

式中： A_1 ——破碎过程的功耗；

Q ——破碎物料的重量；

i ——破碎比；

D_0 ——破碎前的物料粒度的平均直径；

K_1 ——与物料性质有关的比例系数；

面积学说适用于完全均匀的脆性物料及破碎比大、变形较小(如磨碎)的情况。用于10~1000 μm 的细磨范围,相当适宜。

2. 体积学说

1874年俄国学者B. Л. 吉尔皮切夫(Кирпичев), 1885年F. 基克(Kick)分别提出了“体积学说”。他们认为:破碎物料时的功耗与物料的体积(或重量)成正比。其数学式表示为:

$$A_2 = K_2 Q \ln i \quad (2-4)$$

式中： A_2 ——破碎物料时的功耗；

Q ——破碎物料的重量；

i ——破碎比；

K_2 ——与物料性质有关的系数。

体积学说较适用于各向同性的脆性物料、产生新生表面不多的粗、中碎,以及作用力为压力时的情况。用于大于1cm的破碎较正确。

3. 裂缝学说

1952年由美国学者F. C. 榜德(Bond)在整理碎矿和磨矿试验资料时建立的。他认为不规则物料被破碎时的功耗与生成的裂缝长度成正比。若用破碎比来表示时,其数学式为:

$$A = \frac{K_3 Q}{\sqrt{D_0}} (\sqrt{i} - 1) \quad (2-5)$$

式中： A ——破碎物料时的功耗；

Q ——破碎物料的重量；

D_0 ——破碎前物料的平均直径；

i ——破碎比；

K_3 ——比例系数。

裂缝学说一般用于常规的棒磨和球磨范围是较适应的。

第二节 矿石的破碎

选矿厂矿石的破碎主要靠破碎机械来实现。选矿厂所采用的破碎机的种类,主要取决于矿石性质、选矿厂的生产能力和破碎产物的粒度等等。

目前选矿厂矿石破碎作业应用的破碎机大致情况是:粗碎采用颞式破碎机及旋回破碎机,中碎采用标准圆锥或中型圆锥破碎机,细碎采用短头圆锥破碎机(小厂细碎还采用反击破碎机或对辊机)。处理松软矿石(如粘土矿或煤矿),一般采用冲击作用的破碎机(如反击式