

“十三五”国家重点图书出版规划

土壤污染防治与治理丛书

美国 废弃矿山场地 调查与修复

INVESTIGATION AND
REMEDICATION OF ABANDONED MINE SITES
IN THE UNITED STATES

环境保护部环境保护对外合作中心 编译
南科大工程技术创新中心（北京）

中国环境出版集团

非外借

美国废弃矿山场地 调查与修复

○ 环境保护部环境保护对外合作中心

○ 南科大工程技术创新中心（北京）

编译



中国环境出版集团·北京

图书在版编目 (C I P) 数据

美国废弃矿山场地调查与修复 / 环境保护部环境保护对外合作中心,
南科大工程技术创新中心 (北京) 编译. —北京: 中国环境出版集团,
2018.12

ISBN 978-7-5111-3393-9

I . ①美… II . ①环… ②南… III . ①矿山—废弃物—调查研究—美国
②矿山—废弃物—修复—美国 IV . ① X75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 298049 号

出版人 武德凯
责任编辑 葛莉 孙雪婷
责任校对 任丽
封面设计 彭杉

出版发行 中国环境出版集团
(100062 北京市东城区广渠门内大街16号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67113412 (第二分社)
发行热线: 010-67125803 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2018年12月第1版
印 次 2018年12月第1次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 9
字 数 200千字
定 价 56.00元

【版权所有。未经许可，请勿翻印、转载，违者必究。】
如有缺页、破损、倒装等印装质量，请寄回本社更换。

《美国废弃矿山场地调查与修复》

编写委员会

主 编：方 莉 卢 军

副 主 编：李 佳 汪安宁 李奕杰

编写人员：唐艳冬 张晓岚 刘 昊 沈宗泽 杨 倩

孔 德 杨 烁 王 京 刘兆香 栗 赟

高丽莉 费伟良 蔡晓薇 陈 坤 韵晋琦

林 臻 徐宜雪 郭 昕 周七月 王 媛

陈新颖 李浩源 朱 焰 林斯杰 杨 铭

袁 鹰 王树堂

技术顾问：胡 清 陈 亮 李 远 余立风 肖学智

翟桂英 石效卷

前言

2018年5月18—19日，全国生态环境保护大会在北京召开。习近平总书记出席会议并发表重要讲话，对全面加强生态环境保护、坚决打好污染防治攻坚战作出了系统部署和安排。6月22日，生态环境部部长李干杰在《人民日报》发表署名文章，强调要准确领会习近平总书记关于生态环境保护形势的重大战略判断，坚定打好污染防治攻坚战的信心和决心。

废弃矿山污染防治作为我国土壤污染防治工作的重要内容之一，越来越得到各级政府部门广泛关注。《土壤污染防治法》《土壤污染防治行动计划》明确提出要加强对矿产资源开发区域土壤污染防治的监督管理、严防矿产资源开发污染土壤，但目前我国废弃矿山污染防治管理和技术体系仍较为薄弱。鉴于美国废弃矿山场地调查与修复工作起步较早、经验丰富，其先进的政策管理体系、调查与修复技术体系、丰富的工程案例经验将对我国开展相关工作起到积极的参考作用。环境保护部环境保护对外合作中心充分利用环保技术国际智汇平台（3iPET）战略合作伙伴资源，联合南方科技大学工程技术创新中心（北京）、美国环境健康与科学学会理事卢军博士，共同合作编译了《美国废弃矿山场地调查与修复》一书。

本书介绍了废弃矿山对人体健康和生态环境的影响、废弃矿山场地调查与修复技术流程和主要的修复技术，并在此基础上重点解析了美国废弃矿山场地调查与修复典型案例，这些案例主要基于管理制度创新、资金机制保障、修复技术示范等，可供生态环境管理部门、科研机构、环保企业等开展相关工作参考，具有极高的学习借鉴价值。

本书在编译过程中，得到生态环境部土壤生态环境司及相关合作伙伴的大力

支持与帮助，在此一并致以衷心的感谢！

由于时间仓促，本书在编译过程中难免存在疏漏，敬请国内外专家学者包涵指正。

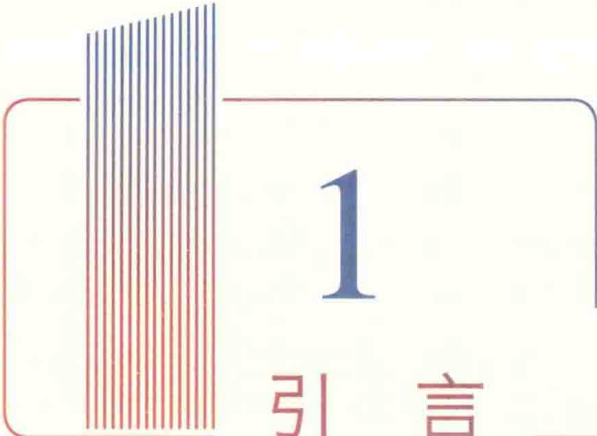
编 者

2018 年 12 月

目 录

1 引 言	1
2 采矿、选矿、矿物加工作业概述	3
2.1 采矿	4
2.2 研磨选矿	7
2.3 浸出选矿	12
2.4 矿物加工	16
3 采矿活动对环境的影响	20
3.1 环境污染	20
3.2 场地安全	27
4 废弃矿山场地调查	30
4.1 初步调查	31
4.2 采样及分析	37
5 废弃矿山场地生态和人体健康风险评估	43
5.1 废弃矿山场地风险评估考虑因素	43
5.2 生态风险评估	45
5.3 人体健康风险评估	48

5.4	清理行动风险评估	51
6	废弃矿山场地修复技术	53
6.1	处理技术	53
6.2	工程管控技术	70
6.3	制度控制	79
7	废弃矿山场地修复案例及分析	82
7.1	铁山矿区	82
7.2	铜盆地矿区	87
7.3	加利福尼亚峡谷矿区	92
7.4	邦克山采矿冶金综合区	97
7.5	伊丽莎白矿区	100
7.6	肯尼科特矿区	105
7.7	巴特银弓溪矿区	111
7.8	卡森河汞矿区	119
	参考文献	127
	附 录	130



1

引言

1949年,我国开采的矿山仅百余处。2005—2013年,我国矿业呈快速发展趋势,矿业集中度不断提高,矿山企业数量从12.8万个下降至10万个。随着我国矿业的飞速发展,产生了大量的废弃矿山,引发的山体破碎、荒芜和环境污染等问题日益受到党和国家的高度关注,相关的治理和修复工作已初步开展并积累了一些经验。然而,仍有许多问题亟待解决,急需借鉴与参考国际经验。美国废弃矿山场地调查与修复工作起步较早、经验丰富,早在1935年,美国就开始了废弃矿山场地的调查与修复工作,仅美国国家环境保护局(U.S. Environmental Protection Agency, EPA)开展的废弃矿山场地修复工程就有677个^[1],其完善的政策管理体系、先进的调查与修复技术体系对开展相关工作具有较好的借鉴意义。

本书通过收集大量美国废弃矿山场地调查与修复的相关资料,从中筛选出具有参考意义的内容,进行系统梳理及编译。本书共7章,第1章为引言。第2章和第3章介绍了矿区和矿物加工场所涉及的典型作业类型、不同作业过程产生的主要废弃物、可能造成的环境污染,以及对人体健康和生态环境的潜在威胁,这些内容是顺利开展废弃矿山场地调查与修复工作的重要基础。第4章和第5章介绍了如何开展废弃矿山场地特征描述、修复技术的筛选,以及修复方案编制。第6章介绍了废弃矿山场地修复技术。第7章对美国8个典型案例进行梳理和深入研究。这些案例主要基于管理制度创新、资金机制保障、修复技术示范等,具有极高的学习价值。通过对这些案例的调查和修复技术要点与特色的总结归纳,可为我国废弃矿山场地的调查与修复工作提供良好借鉴。

本书为了向读者全面客观地介绍美国废弃矿山场地调查与修复经验,在对相

关资料，如采矿活动可能对环境造成的影响等内容进行编译时，尽量遵从美国惯用的理论系统，以期尽量向读者完整系统地呈现美国废弃矿山调查与修复的相关情况。



采矿、选矿、矿物 加工作业概述

本章主要介绍典型遗留矿区以及矿物加工厂涉及的典型作业类型、产生的主要废弃物以及有害物质。在进行矿区范围界定、矿区特征识别，以及最优修复方案确定的过程中，除了要了解矿区的作业历史，还应充分掌握可能产生的废弃物及其环境物质，使人们对废弃物给人体健康和环境带来的潜在威胁，以及修订方案可行性有更深刻的认识。

从开采矿石（其中含有以矿物质形式存在的金属）到生产出具有经济用途的金属，涉及一系列物理和化学过程。本章将分节讨论采矿、选矿（包括磨矿和浸出过程）、冶炼的作业流程，以及不同流程中产生的废弃物情况。

采矿、选矿以及矿物加工作业既可在同一地点进行，也可在不同地点进行。在许多矿区，选矿工厂位于中心地带，从而可为多个独立的矿山分别提供服务；在完成选矿后，再将富集矿物运输至远处的加工厂进行作业。而部分地区矿山（如北爱达荷州的邦克山）的选矿工厂和加工厂可能集中在同一地点，在这种情况下，可能会导致矿物加工废弃物和选矿废弃物互相混杂。

矿区的定义相当广泛，本书采用美国国家环境保护局（EPA）在《清洁水法案》中“矿区污染物排放控制指南”对矿区的定义，即在地球上，通过任何方法从天然矿藏中提取矿物或金属矿石的地区，包括开展这种活动或者自然地表被这种活动扰动的整个地区。根据这一定义，矿区还包括自然地表受到相关作业影响的地区，以及与采矿活动具有较多关联性的毗邻土地（例如，道路、工作区、蓄水池、水坝、通风井、排水隧道、废弃物堆、堆场、储矿堆、覆盖堆、废石堆、尾矿、采空区或洼地、构筑物、工厂等）。

2.1 采矿

采矿和矿物加工作业的第一步是提取围岩或脉石中矿石的有价值矿物，矿物的提取*方法多种多样。大多数的提取方法首先通过爆破将矿物质及相关的围岩或脉石整体地从矿床中取出，再通过各种机械手段，将矿石破碎成可控尺寸的碎块，最后将矿物质与其他无用物质相分离。

为了提高经济效益，提取过程的目标是尽可能去除低品位矿石和废石，并提取出预计（或更高）品位的矿石。然而，在实践过程中分离效果并不理想，一些较低品位的矿石有可能伴随较高品位的矿石被遗留下来。

需要注意的是，“矿石”是一个经济术语，它是指开采出来的岩块中含有足够高经济价值的矿物质。由于矿物质的价值可能发生快速而显著的改变，因此“矿石”与其他开采出的物质（通常含有在当时无法经济地提取有价值的矿物质）之间的区别也会随时间的推移发生变化，这种变化不仅存在于不同矿区之间，也存在于特定矿区内。

2.1.1 采矿类型

采矿可分为地表采矿、地下采矿和原位采矿三种类型。地表采矿是指在地球表层（或接近表层的位置）开采矿石，它包括露天开采、高边坡（条状）采矿（该种采矿方法用于挖掘煤矿或其他矿藏，本书不涉及），以及疏浚开采（该种采矿方法用于挖掘砂矿床）。地下采矿和原位采矿均是指从较深的矿床中开采矿物，前者是在地下进行开采，然后移走矿石；后者是指通过注入井和抽提井浸液方式在原地提取矿物质。采矿方法的选择取决于矿床的性质、位置和成本^[2]。

（1）露天开采

就美国开采的大多数大型金属矿石而言，在露天矿坑进行的地表采矿已成为其主要的采矿作业方式。根据矿床的特征（如品位、规模和位置），如果去除覆盖层（即覆盖在矿石上层的围岩）具有一定经济效益，则可采用露天开采。现如今，在开采高度浸染状矿石（即低品位矿石）时，露天开采是最为经济的采矿方式。露天采矿主要为挖掘、去除覆盖层，然后在挖出的矿坑中开采露出的矿石。基于矿体的厚度，可以进行一次性垂直式开采或连续台阶式（或梯段式）开采。通常来说，金属矿的矿体规模较大，因此在进行台阶式开采时经常采用两种方式：

* 在行业内也将“提取”这一术语用于描述火法冶金和冶金工艺，采矿的定义中不包含这一部分内容。

一是在台阶形工作面的顶部钻出垂直孔，将矿石爆破至相邻的较低层；二是直接通过挖掘 / 刮削进行机械开采（适用于较为松软的矿物）。

在露天开采中使用的炸药通常要满足无氧即可燃烧的要求。早期使用的炸药主要由硝酸甘油、碳质材料和氧化剂组成。近年来，人们开发出一种高爆被性能的炸药，它由硝酸铵（肥料级）以及占比约为 6% 的燃料油混合而成，如今几乎所有的露天开采均使用这种混合炸药（以下简称“ANFO”）用于初次爆破。

（2）疏浚开采

疏浚开采是另一种地表采矿方法，一直被用于开采砂矿床，其中的矿物质是一种在沉积矿床（与当前或古老的水道相关）中产生的重金属矿富集物。在一些采矿区，砂矿开采与疏浚作业会带来大面积的流动干扰。

（3）地下采矿

在美国，地下采矿一直是生产特定金属的主要采矿方法，但近年来使用该开采方式的矿区越来越少。20 世纪 90 年代中期，几个主要露天矿山的深度已达到经济利用的上限，因此地下采矿业逐渐复苏。通常地下采矿对地表环境的影响要小于地表开采。被弃置的大型地下矿体有时会引起地面沉降或塌陷，并对建筑物、道路以及地表水排放造成干扰。此外，地下矿井水的排放可能对地下水质造成重大影响，同时也可能影响地表水。矿山排水的水质与围岩的特征有关，因此会产生较大的差异。

（4）原位采矿

原位采矿是指直接从矿体中提取矿物质的方法。在此过程中，矿体仍留在原处，无须被碾碎并挖掘。其采用的原位浸出操作与 2.3 节中讨论的选矿方式原理相同，只是选矿中处理的对象是挖掘出的矿石。采用这种采矿方式时，通常会在矿体中钻探一系列的矿井，然后向矿井中注入溶剂，并通过特殊构造使溶剂在矿体中循环，最后提取浸出液。原位采矿方案并不常用，主要应用于具备适当水文地质环境的铀矿床和铜矿床。原位作业对地表和地下的干扰很小，但由于灌入的溶剂和泵送操作会彻底改变地下水的化学成分，因此对地下水质可能产生重大影响。此外，除目标矿物以外，其他物质也可能发生溶解，进一步影响地下水，而受污染的地下水经流动导致周围区域也可能受到污染。

原位采矿过程中涉及的地表作业包括对地面围塘（或近期常用的储罐）中贫液（即注入溶剂前的浸出液）和富液（即提取的浸出液，其中含有有价值矿物质）的管理工作。

2.1.2 采矿废弃物和有害物质

采矿作业产生最多的两大废弃物*是矿井水和废石,对于地表矿山而言,第三大废弃物是覆盖层,但在美国,它们被排除在危险废弃物的监管范围外,享受特别豁免权。

(1) 矿井水

进入地表或地下矿井的水体被称为矿井水。这些水体来自地下水渗透、地表水流入或直接降水。在没有自然(或人工)排水的情况下,若要在地下水位以下的空间开展有效的矿井作业,则必须抽出矿井水。可根据矿井的水文地质条件,简单地从矿井抽水,并在矿井中的岩石上灌注水泥浆防止进水,或者在矿井周围钻取一系列抽水井,在地下水位下形成一个漏斗,从而减少水体渗透。

在某些矿山的开采作业过程中,需连续地向矿体泵送大量矿井水,矿井水可用于控制开采中的矿山粉尘,也可用于磨矿流程中的加工用水。如果要排放矿井水,通常需要美国国家污染物排放(控制)系统(NPDES)获批的许可证或其他类似的州许可证。开采中的矿井在排放矿井水时通常受到管制,以避免矿井水在矿石或矿山中停留时间过长而形成高酸性的或溶解高浓度金属的水体。但是,矿井水排放前的预处理要求则取决于矿区的具体情况。

在关停矿井时,通常会停止抽取矿井水。此时,地下矿体中的矿井水会借助开放通道(如平硐)或者直达地面的裂缝/裂隙流出。如果有人工建造的重力排水设施,矿井水也会沿此继续流动。矿山在开采时,因抽水作业地下水位一般较低,当停止抽水时,地下水会回升至某水位线,从而在坑中形成一个水塘,可能会淹没并浸透填充材料。停止抽水后,地下水若要恢复至(或接近于)采矿前的水位可能需要相当长的一段时间,而地下水下降所带来的影响可能会持续数十年。

废弃矿山的水体可能含有高浓度的重金属和总溶解固体(TDS),温度较高,pH也可能波动较大,这些指数均取决于矿体的性质以及当地的地球化学条件。当这些水体暴露于氧气中时,其中的黄铁矿或其他硫化矿物质随着时间的推移可能产生酸性废水,酸性废水可以溶解矿物和开采物质中所含的金属,继而产生高浓度的金属,这些含金属的酸性废水将可能污染下游的地下水和地表水。另外,在中性和碱性的矿井水中也可能含有超出水质标准含量的金属,将会对人类健康和环境造成重大影响。

* 本书中涉及的废弃物概念,并不都满足《资源保护和回收法》(RCRA)中对固体废物的定义。

(2) 废石

废石由采矿期间从矿体周围（或其内部）移除的非矿化和低品位矿化岩组成。低品位废石与矿石区分的标准是两者之间的经济差异，因此，过去的废石在未来可能成为有价值的矿石。

废石包括颗粒状或破碎的岩石和土壤，就大小而言，既可以是细粒也可以是大石块，细粒物质的内含物很大程度上取决于地层的性质以及采矿中采用的提取方法。废石通常被弃置在提取点相邻和 / 或下坡处的大型石堆中，以及附近的旧矿井和外露巷口处，这些位置均为地表水的汇集和渗透使废石堆发生自然浸出而形成的自然排水点。在矿区，废石经常用于填充尾矿坝或其他建筑用途。目前通常使用工程控制措施来避免汇集（如河流改道工程）或径流（如在施工期间安装的排水系统）形成废弃矿山废石对环境的影响。

不同矿山产生的废石的地球化学特征相差甚远，而在同一矿山里，随着时间的推移、不同岩层的暴露，废石也会因地球化学过程发生改变，形成不同特征的、含有一定目标开采矿物以及其他金属含量的废石。例如，在金属矿山的废石中通常含有作为围岩成分的亚硫酸盐物质，硫化矿物质和中和矿物质的浓度是废石产生酸性排放物的重要成因。废石中任何特定矿物成分的迁移性取决于矿场的特定条件，如气候、水文、处理设备、含矿岩石的地球化学特征，以及其本身的矿物特性和粒径。如果废石易于产生酸性物质，利用此类废石就可能造成各种隐患，如大面积的污染、产生酸性物质或者其他的长期污染。

(3) 覆盖层

覆盖层是指在地表采矿作业期间移除的地表物质（即表层土和岩石），移除后将暴露出地下的矿石。近年来，美国联邦和各州的土地管理机构制订的采矿管理计划均要求在关停或弃置矿区后，将表层土进行再利用和堆积，以供回收使用。

根据 40 CFR 261.4 (b) (3) 规定 [美国联邦法规危险物豁免清单 Identification and Listing of Hazardous Waste. 40 CFR § 261.4 (b) : exclusions: Solid Wastes Which are Not Hazardous Wastes.]，特别豁免的覆盖层“移回矿区”时，可不列入《资源保护和回收法》（RCRA）中界定的危险废弃物范围内。

2.2 研磨选矿

完成最初的采矿作业后，通过破碎和 / 或球磨流程来减小矿石的尺寸，并且通过各种方法来富集目标矿物质，这些富集过程统称为选矿。矿石筛分和破碎通

常是选矿作业中的必要步骤，也是本节的重点。

美国国家环境保护局颁布的《资源保护和回收法》（RCRA）中将选矿定义为将有价值的矿物质从废弃物中分离和富集出来并去除杂质，或者处理矿石以便于进一步精炼的活动。除通过减小（如破碎或球磨）或增大（如造球或压块）颗粒尺寸便于加工以外，选矿活动通常不会改变矿物本身的价值，矿物质也不会发生化学变化。

2.2.1 研磨选矿方法

大多数矿石中的有价值金属，均广泛分布于具有较低价值的母岩中，也就是所谓的脉石。选矿的目的是将有价值矿物与脉石相分离，从而使选出的矿石中有价值矿物质的含量大大高于初始含量。选矿作业按作用可分为破碎和富集，破碎是指将开采的矿石破碎和球磨，从而在物理上将目标矿物分离出来；富集是指将有价值矿物质从粉碎后的矿石中分离出来。这两个步骤通常连续进行，利用有价值矿物质和围岩之间的物理差异来实现分离，产生含有价值的矿物富集物与含废弃物和试剂的尾矿。选矿方法的选择取决于脉石中待提取的有价值矿物的诸多物理性质，如比重、电导率、磁导率、对某些化学物质的亲和力，以及在浸出液中的溶解度（浸出作业相关问题将在 2.3 节中讨论）等。分离方法包括重力选矿法、磁选法、静电选矿法和浮选法。

（1）重力选矿法

重力选矿是指利用密度差异将矿石与脉石相分离。重力选矿将受到各种要素的影响，如矿石必须破碎或球磨至一定的尺寸方可将有价值矿石与脉石相分离、密度差异以及其他因素。以下三种方法中，前两种在历史上常用于黄金的提取。

①粗/细富集法。该方法基于颗粒密度而非粒径来进行选矿，通常使用流槽，也可以使用夹具和筛网。密度大的矿物质沉积在流槽的衬垫料之内，而较轻的矿物质则被冲洗出去。进入流槽的大部分物料均被冲洗掉而成为废渣，并排放到尾矿库中，或进行进一步的富集。在粗富集之后，大部分废料被去除，只留下了富集物。随后可以对富集物进行精富集，使用工具包括夹具、螺旋分级机、振动台和尖缩流槽，这个阶段形成的废弃物是矿泥。在精富集之后，有时会采用混汞法继续提取矿物质。

②混汞法。通过使用液态汞形成汞齐提取天然金或游离金，然后利用帆布锥过滤汞合金来回收黄金，以去除过量的汞。尽管过去人们在粉碎矿石和沉淀砾石中提取黄金时广泛使用混汞法，但近年来该方法已在很大程度上被氰化物提取法

(即浸出)取代。在美国,目前混汞法仅限于针对少量高品位重力富集金矿使用,且采用小规模桶装方式,通过蒸馏使汞与黄金相分离。在过去,使用混汞法会有一些汞或者汞合金在选矿过程中逸出;几个超级基金场地因采用混汞法而造成严重的汞污染,其中一个典型案例为卡森河汞污染(见本书 7.8 节)。

③重介质选矿。重介质选矿是指基于各种矿物质的密度,利用浮力将其分选出来的方法。该方法要求首先将矿石送入含有相关介质的储槽中,该介质的密度应高于脉石但低于有价值矿物质,脉石漂浮在介质上并流出分离室,而密度较大的有价值矿物则沉淀下来,并在底部被提取出来。在矿石加工行业,重介质选矿通常使用的介质是粒径非常细的硅铁或方铅矿(PbS)颗粒的悬浮液。由于漂浮的废弃物已被粉碎,因此可将其用于其他用途,如用作骨料。

(2) 磁选法

磁选法一般用于铁、镍、钽和钨金属的选矿作业中。这种方法既可以从矿石中提取有价值的矿物质,还可以从回收的复合矿石中分离不同的有价值矿物质,其原理是各矿物质分别对应不同的磁导率(尽管磁导率的数值较低,但是几乎所有的材料均可测出相应的磁导值),另外还可以有效地处理不具有磁性的矿物质。该方法基本的选矿过程是矿石通过具有高磁场梯度的区域,磁导率最高的颗粒被吸引至一个移动床,由于床后方装有大型电磁体的磁极。从矿石流中将这些颗粒选出后,再对其做进一步加工。

(3) 静电选矿法

静电选矿法是指基于导电性来分离矿物质的方法。静电选矿过程是干式的,且使用高电压。在典型的应用范例中,矿石被施加 $20\,000 \sim 40\,000\text{V}$ 的电压,然后带电荷的颗粒落在导电旋转滚筒上,带电荷的颗粒很快失去引力电荷,然后落下并被收集;而不导电的颗粒则继续带着电荷,因静电引力而被吸附,最后将其从滚筒中分离出去。

(4) 浮选法

浮选法是指在破碎后获得的矿石—水混合泥浆中加入化学物质,从而使一种或一组矿物质的颗粒附着在气泡上的过程。当空气通过泥浆时,气泡会携带矿物颗粒上升,从而与基质相分离。在此过程中,通常会在泥浆中加入发泡剂,防止气泡到达表面时发生破裂,此后,在浮选槽的表面会形成一层含矿物质的泡沫,将其提取即可回收矿物。

浮选法适用于极小粒度的矿石,现已成为金属矿石加工行业中的主要选矿方法。此外,对难以通过物理方法实现回收的矿物质,浮选法也具有高度的回收能力,