

我国黄金矿山 尾矿资源的综合利用

于学明 张军 刘渝燕 等编著

地质出版社

我国黄金矿山 尾矿资源的综合利用

于学峰 洪 飞 魏 健 张 军 刘渝燕 等 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

山东省地质科学研究院近 20 年来,在金矿尾矿的综合利用方面系统地开展了应用基础研究,取得了很好成果。本书是作者在这些成果基础上,对金矿尾矿综合利用进行了较为系统的介绍。全书分为 5 章,分别介绍尾矿基础知识、国内外尾矿综合利用现状、我国黄金矿山现状和发展趋势、我国黄金矿山尾矿的综合利用、黄金矿山尾矿综合利用对策。

本书内容丰富、实用,针对性强,相信对于矿产资源综合开发利用、建设“绿色矿产”是有益的。它可供矿山开发、矿山尾矿研究等科技人员,以及相关专业大专院校师生参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

我国黄金矿山尾矿资源的综合利用 / 于学峰等编著.
—北京:地质出版社, 2013. 11

ISBN 978 - 7 - 116 - 08619 - 7

I. ①我… II. ①于… III. ①金矿床 - 尾矿资源 - 综合利用 IV. ①TD926. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 261593 号

Woguo Huangjin Kuangshan Weikuang Ziyuan de Zongheliyong

责任编辑:陈军中 赵俊磊

责任校对:黄苏晔

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话:(010) 82324508 (邮购部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm × 1092mm ¹/₁₆

印 张:14.25

字 数:320 千字

印 数:1—1000 册

版 次:2013 年 11 月北京第 1 版

印 次:2013 年 11 月北京第 1 次印刷

定 价:40.00 元

书 号:ISBN 978 - 7 - 116 - 08619 - 7

山东省地质科学研究所
山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室
国土资源部金矿成矿地质过程与资源利用重点实验室

科技成果出版指导委员会

主 任	翟裕生				
副 主 任	陈毓川	李廷栋	赵鹏大	孙传尧	莫宣学
委 员	(以姓氏笔画为序)				
	于学峰	邓 军	孔庆友	叶天竺	乔恩光
	孙传尧	李宏骥	李廷栋	李勇普	宋明春
	张广隆	张天祯	张增奇	陈毓川	赵鹏大
	洪 飞	韩作振	莫宣学	翟裕生	

科技成果出版编辑委员会

主 任	于学峰				
副 主 任	张增奇	田秀林	洪 飞	毛美桥	回寒星
委 员	(以姓氏笔画为序)				
	于学峰	毛美桥	田秀林	回寒星	刘书才
	刘渝燕	刘耀华	许庆福	寿冀平	杨德平
	李光明	李洪奎	沈 昆	张广隆	张义江
	张天祯	张英明	张连峰	张尚坤	张增奇
	孟舞平	洪 飞	曹丽丽		

《我国黄金矿山尾矿资源的综合利用》编著人员

于学峰	洪 飞	魏 健	张 军	刘渝燕	张英明
石 冰	王 丽	王洪杰	张红亮	巩宝珍	殷继广
许 艳	周 鑫	李 刚	杨 超	陈 峰	

序

山东省居于中国东部沿海的中北段，在地质构造位置上处于华北板块东南缘与秦祁昆造山系相接部位上，并叠加了中生代造山-裂谷体系，地壳演化历程较为复杂。这里记录着 30 亿年以来发生的沉积作用、火山活动、岩浆侵入、变质变形等复杂的地质事件，由此形成了丰富的岩石构造组合等地质景观和能源、金属、非金属等矿产资源，历来为世人所瞩目。

山东省近代地质工作起步较早，地质工作程度较高。新中国成立后的 60 余年来，山东省已在地层、岩浆岩、变质岩、构造等基础地质研究方面取得了全面的和重要的成果；发现各类矿产 150 种，资源储量列全国前 10 位的有 58 种，前 5 位的有 32 种，前 3 位的矿产有 24 种。国民经济赖以发展的 15 种支柱性重要矿产在山东均查明了储量，其中石油、铁、金、铝土矿、钾盐、矿盐等矿产保有储量居全国前 10 位。山东这些丰富的地质矿产资源，在山东经济社会发展中发挥了极为重要的作用。

成立于 1958 年的山东省地质科学研究所，是以承担国家和山东省基础性、公益性、战略性地质研究任务为主的多专业、多学科、综合性研究单位。建院 50 余年来，在地质调查、矿产勘查和地质科研等方面取得了许多成果；近 10 年来，我院又在地质找矿、区域成矿和基础地质研究等方面取得新的重要的进展，积累了丰富的地质成果资料，并出版了《山东矿床》等地质专著，取得了较好的社会效益和经济效益。

2010 年在翟裕生、陈毓川、李廷栋、赵鹏大、裴荣富、孙传尧等院士、教授的关心和指导下，山东省地质科学研究所、山东省金属矿产成矿过程和资源利用重点实验室和国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室规划了当前和近 10 年的地质科研工作目标和方向，把地质调查和地质科研成果进行综合集成、形成地质科学文献出版交流作为地质科研链条的组成部分纳入了地质科研工作序列。

地质勘查和科研成果出版对资料积累、学术交流具有重要价值，对促进我院地质工作进展将起到推动作用。山东省地质科学研究所鼓励本院科技人员和受聘客座研究人员在从事地质调查和科研工作中，注重论文和专著的写作交流，为其发表和出版创造条件；将有计划对近年来完成的基础地质、矿产勘查、地层与古生物、资源利用等方面的调查和研究成果进行进一步总结提升，编辑出版，在总结中进一步提升成果水平；对具有资料积累和交流价值的待完成的地质调查和地质科研项目，在提交成果报告的同时，创造条件编辑出版。这将促进我院地质科研工作不断取得新的进展，为我省和我国地质调查和地质找矿作出新的贡献。

对山东这样一个地质构造背景复杂、矿产资源丰富的陆块的认识，是一个不断深化、不断完善的过程。出版有关山东地质专著，把它留给当今及今后关心或从事地质调查、矿产勘查、科学研究的广大地学工作者，并在此基础上继续探讨和总结，促进和发展我省地质学研究水平，寻找出更多的矿产资源，更好地为山东经济社会可持续发展服务，

这是山东省地质科学研究所广大职工共同心愿。对出版的成果中存在的某些不足和问题，还需要作者和读者共同研究探讨，以求进步。

多年来，山东省地质科学研究所有关地质文献编辑出版一直得到上级领导关心和支持，受到我国老一辈地质学家的关注、鼓励和指导。裴荣富院士、翟裕生院士、李廷栋院士、陈毓川院士、赵鹏大院士、刘宝珺院士、孙传尧院士、张宗祜院士及叶天竺教授、邓军教授等专家学者给予很多具体指导和帮助；山东省国土资源厅、山东省地质矿产勘查开发局，胜利石油管理局、山东省煤田地质局、中国冶金地质勘查工程总局山东局、山东黄金集团等系统对山东省地质科学研究所地质调查及出版工作给予很大帮助和支持，在此表示由衷的感谢！

山东省地质科学研究所
山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室
国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室

科技成果出版编辑委员会

2013 年 10 月

前 言

矿产资源是人类生存和发展的重要物质基础之一，矿产综合利用既是矿产开发的一项重要政策，也是合理利用资源、保护人类环境的一种有效手段。随着我国经济社会的发展，工业化进程的加快，矿产资源的消耗也在急剧增加。伴随着矿产资源的开发和环境保护的要求，如何综合利用矿产资源，使大自然恢复原本的生态环境，愈来愈被人们重视。随着人类关于资源与环境意识的逐渐增强，同时也迫于资源短缺与环境恶化的双重压力，尾矿具有二次资源与环境污染的双重性，已被人们所共识。在世界范围内，已对无废生产工艺给予了极大重视。无废工艺的定义着眼于资源的循环，即把传统的工业的开环过程变成闭环过程，同时强调了工业生产过程和自然环境的相容性。综合利用矿产资源是无废生产的首要目标，又是当前解决资源短缺和环境污染问题的基本对策。

山东省是我国主要矿产资源基地之一，其黄金矿产资源储量及产量均列于全国首位。山东省地质科学研究院早在 20 世纪 60 年代已开展了金矿的分析测试方法、岩石矿物鉴定和选冶试验研究工作，在金矿综合利用方面掌握较多的国内外信息，积累了一定的工作经验。近 20 年来，研究院在金矿尾矿的综合利用方面系统地开展了相关的应用基础研究；对山东省黄金矿山的尾矿现状和地质灾害问题进行了全面调查；采集不同类型金矿尾矿样品进行了岩石化学主要成分和微量成分的分析测试；利用多种手段研究了尾矿样品中的矿物组成和相对含量；根据尾矿的利用方向，选择进行了相关物性特征（密度、堆密度、比表面、粒度分布、形貌、白度、含水率、烧失量等）测量；对选金尾矿进行了综合回收有价金属（金、银、铁、铜、铅、锌等）的选矿试验和尾矿中非金属矿物的超细分级提纯试验；开展了用超细分级提纯产品经表面处理用于生产各种橡胶和塑料制品的应用试验；开展了利用金矿尾矿研制生产地砖、加气混凝土砌块、建筑陶粒、玻璃微珠、玻璃纤维、微晶玻璃和贝利特水泥等建材制品的应用研究；按照尾矿的矿床学类型（主岩类型、矿化类型、围岩蚀变类型和主要矿物组合）、尾矿的选矿工艺类型和尾矿的岩石化学类型的分类方法，对山东省典型金矿尾矿进行了分类。

山东省地质科学研究院承担的与金矿尾矿综合利用相关的部省级课题任务有：“泰山金矿尾矿综合利用研究”、“山东省莱州市金矿尾矿资源化研究”、“山东省矿山尾矿、固（液）体废料，土地复垦及地质环境研究”、“金矿尾矿的资源化研究”、“山东省重点矿山（金、铁、煤）尾矿及固体废弃物整体利用研究”、“山东省金矿尾矿的资源化研究”、“山东省沂南县龙头旺金矿地质环境治理与尾矿综合利用研究”、“山东省沂南金矿尾矿综合利用研究及地质灾害治理”、“山东省黄金矿产资源开发利用与监督管理研究”等。以上研究成果均获得较高的评价，有些研究成果分别获部省科技成果奖并推广应用。

基于我们从事金矿尾矿综合利用研究的工作基础，将已有的资料和现搜集的资料进行

分析研究整理，以山东省地质科学研究院矿产应用研究部门专业技术人员为主，在矿产地质研究、岩石矿物研究、实验测试研究部门的专业技术人员共同参与下，编写了本书。全书由于学峰、洪飞负责统编和定稿。

本书是一部系统、全面介绍黄金矿山尾矿综合利用的著作，内容包括有关尾矿的基础知识；国内外金属矿山尾矿的综合利用概况；着重介绍了黄金矿山尾矿的综合利用的有关新成果、新技术、新工艺和新方法；参照国家有关部委金属尾矿综合利用规划，提出黄金矿山尾矿综合利用的对策。希望本书在推动矿产资源的整体开发利用，建设“绿色矿业”经济，发挥一定的作用。由于编者水平有限，书中不妥之处敬请同行专家和读者批评指正。

本书的编写和出版，承蒙中国地质科学院尾矿利用中心、中国计量测试学会地矿专业委员会和地质出版社的支持和协助，在编写过程中得到了张广隆教授级高工的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

作者

2013 年 7 月

目 录

序

前 言

第1章 尾矿基础概论	(1)
1.1 尾矿概述	(1)
1.1.1 尾矿的定义及分类	(1)
1.1.2 尾矿的成分	(1)
1.2 矿物加工过程	(3)
1.2.1 采矿过程	(3)
1.2.2 破碎、磨矿和选矿	(3)
1.2.3 溶液浸出	(4)
1.2.4 固液分离	(5)
1.2.5 溶液提纯与金属回收	(5)
1.3 尾矿的形成	(6)
1.3.1 矿床与岩围	(6)
1.3.2 矿石与脉石	(7)
1.3.3 选矿与尾矿	(9)
1.4 尾矿的类型	(11)
1.4.1 尾矿的矿床学类型	(11)
1.4.2 尾矿的选矿工艺类型	(13)
1.4.3 尾矿的岩石化学类型	(14)
1.4.4 典型尾矿分类示例	(15)
1.5 尾矿的成分和性质	(16)
1.5.1 尾矿的化学成分与矿物成分	(16)
1.5.2 尾矿的物理性质	(18)
1.5.3 尾矿的化学性质	(20)
1.5.4 尾矿的工艺性质	(20)
1.6 尾矿库的排放	(22)
1.6.1 导引	(22)
1.6.2 地表排放	(24)
1.6.3 地下排放	(35)
1.6.4 深水排放	(37)
1.7 尾矿排放、堆存引发的问题	(42)
1.7.1 浪费资源	(42)

1.7.2 占用土地 (43)

1.7.3 污染环境 (43)

1.7.4 安全隐患 (43)

第2章 国内外尾矿综合利用现状 (45)

2.1 国外尾矿综合利用现状 (45)

2.1.1 注重政策与法规建设 (45)

2.1.2 加强对尾矿资源的综合评价 (46)

2.1.3 研制选(冶)新工艺,回收各种有用组分 (46)

2.1.4 研发尾矿新材料和新产品,高效整体利用尾矿 (47)

2.2 我国尾矿综合利用现状及问题 (47)

2.2.1 政府重视,专项规划 (47)

2.2.2 有价值组分再选回收技术有了较大进展 (48)

2.2.3 尾矿整体利用已起步 (49)

2.2.4 无尾矿、少尾矿生产工艺有所突破 (49)

2.2.5 我国尾矿综合利用存在的问题 (49)

第3章 我国黄金矿山资源现状及发展趋势 (50)

3.1 我国黄金矿床的主要类型 (50)

3.1.1 产于太古宙—古元古代变中基性火山沉积岩(绿岩带)中的金矿 (51)

3.1.2 产于元古宙变碎屑岩、泥质岩、碳酸盐岩中的金矿 (52)

3.1.3 产于震旦纪—三叠纪粉砂岩、泥质岩、碳酸盐岩中的金矿 (52)

3.1.4 产于花岗岩类侵入体中的金矿 (53)

3.1.5 产于碱性侵入岩中的金矿 (54)

3.1.6 产于显生宙基性、超基性岩(包括蛇绿岩套)中的金矿 (54)

3.1.7 产于中、新生代陆相火山岩(包括次火山岩)中的金矿 (55)

3.1.8 产于风化壳中的金矿 (55)

3.1.9 产于砾岩中的金矿(砾岩型金矿) (56)

3.1.10 砂金矿 (56)

3.2 我国黄金资源的特点 (56)

3.2.1 成矿时代广泛,矿床种类繁多 (56)

3.2.2 资源分布广泛,储量相对集中 (57)

3.2.3 矿石品位偏低,大型矿床较少 (57)

3.3 我国黄金矿山的分布 (57)

3.3.1 华北克拉通板块 (57)

3.3.2 扬子克拉通板块 (58)

3.3.3 塔里木克拉通板块 (58)

3.4 我国黄金矿山存在的主要问题 (59)

3.4.1 大型、超大型金矿甚少 (59)

3.4.2 地质勘探基础工作相对落后 (59)

3.4.3 地质勘探深度不够 (59)

3.4.4	多金属综合开发利用有待加强	(59)
3.5	我国黄金尾矿综合开发利用的现状和发展趋势	(59)
3.5.1	黄金尾矿的资源属性	(59)
3.5.2	金矿尾矿回收的现状	(60)
3.5.3	金矿尾矿综合利用现状	(62)
3.5.4	黄金尾矿回收的发展趋势	(62)
3.5.5	金矿尾矿开发利用的发展趋势	(63)
第4章	我国黄金矿山尾矿的综合利用	(65)
4.1	尾矿中有价金属及其他高值组分的回收	(65)
4.1.1	尾矿中金的再选	(65)
4.1.2	尾矿中回收银	(69)
4.1.3	尾矿中回收铁	(78)
4.1.4	尾矿中回收硫	(83)
4.1.5	尾矿中回收铜	(87)
4.1.6	尾矿中回收锌	(91)
4.1.7	尾矿中回收铅	(94)
4.1.8	尾矿中回收砷	(96)
4.1.9	尾矿中回收钨	(96)
4.1.10	尾矿中回收铋	(99)
4.1.11	尾矿中回收绢云母	(102)
4.1.12	尾矿中回收石英砂	(105)
4.1.13	尾矿中回收重晶石	(107)
4.1.14	尾矿中非金属矿提纯	(107)
4.1.15	尾矿中有价金属综合回收	(110)
4.2	尾矿整体利用生产建筑材料	(113)
4.2.1	生产硅酸盐水泥	(113)
4.2.2	生产贝利特水泥	(114)
4.2.3	生产砂浆	(115)
4.2.4	生产免烧砖	(118)
4.2.5	生产烧结砖	(121)
4.2.6	生产瓷砖	(130)
4.2.7	生产墙地砖	(134)
4.2.8	生产空心砖	(140)
4.2.9	生产加气混凝土砌块	(144)
4.2.10	生产色釉陶瓷材料	(152)
4.2.11	生产建筑轻质陶粒	(155)
4.2.12	生产塑料填料	(161)
4.2.13	生产橡胶填料	(166)
4.2.14	生产微晶玻璃	(171)

4.3 尾矿充填采空区及露天矿坑 (177)

4.3.1 非胶结充填 (177)

4.3.2 胶结充填 (180)

4.3.3 露天矿坑（塌陷）回填 (187)

4.4 尾矿库复垦 (189)

4.4.1 工程复垦 (189)

4.4.2 生态复垦 (193)

第5章 我国黄金矿山尾矿综合利用的对策 (198)

5.1 黄金矿山尾矿综合利用的重点领域和重点技术 (198)

5.1.1 黄金矿山尾矿综合利用的重点领域 (198)

5.1.2 黄金矿山尾矿综合利用的重点技术 (198)

5.2 黄金矿山尾矿综合利用的重点技术示范工程 (199)

5.2.1 尾矿提取有色组分 (199)

5.2.2 尾矿生产建筑材料 (202)

5.2.3 尾矿充填采空区 (207)

5.3 黄金矿山尾矿综合利用的重点项目 (210)

5.3.1 尾矿中有价金属及其他高值组分的回收 (210)

5.3.2 尾矿整体利用生产建筑材料 (210)

5.3.3 尾矿充填采空区及露天矿坑 (210)

5.3.4 尾矿的农用 (211)

5.3.5 尾矿库复垦 (211)

5.4 黄金矿山尾矿综合利用的对策 (211)

5.4.1 开展统计调查工作，加强尾矿综合利用统计与评价能力建设 (211)

5.4.2 加强政府的政策引导和资金支持 (211)

5.4.3 加强尾矿综合利用的前瞻性、基础性科学技术研究，建立尾矿综合利用产品标准体系 (212)

5.4.4 实施有效的监督管理 (212)

5.4.5 加强宣传，提高尾矿综合利用意识 (212)

5.4.6 加大国内外交流力度 (213)

参考文献和参考资料 (214)

第1章 尾矿基础概论

1.1 尾矿概述

1.1.1 尾矿的定义及分类

(1) 尾矿的定义

尾矿，就是选矿厂在特定经济技术条件下，将矿石磨细、选取“有用组分”后所排放的废弃物，也就是矿石经选别出精矿后剩余的固体废料。一般它是由选矿厂排放的尾矿矿浆经自然脱水后所形成的固体矿业废料，是固体工业废料的主要组成部分。其中含有一定数量的有用金属和矿物，可视为一种“复合”的硅酸盐、碳酸盐等矿物材料，并具有粒度细、数量大、成本低、可利用性大的特点。通常尾矿作为固体废料排入河沟或抛置于矿山附近筑有堤坝的尾矿库中。因此，尾矿是矿业开发，特别是金属矿业开发造成环境污染的重要来源；同时，因受选矿技术水平、生产设备的制约，也是矿业开发造成资源损失的常见途径。换言之，尾矿具有二次资源与环境污染双重特性。

(2) 尾矿分类

不同种类和不同结构构造的矿石，需要不同的选矿工艺流程；而不同的选矿工艺流程所产生的尾矿，在工艺性质上尤其在颗粒形态和颗粒级配上，往往存在一定的差异，同时也可推断出尾矿（浮选尾矿、化学选尾矿）中可能残留的药剂。因此按照选矿工艺流程，尾矿可分为如下类型：手选尾矿、重选尾矿、磁选尾矿、浮选尾矿，化学选尾矿，电选尾矿和光电选尾矿。

按照尾矿中矿物的组成不同，其主要化学成分（ SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 等）会有不同的变化，形成不同的岩石化学类型尾矿。通常有镁铁硅酸盐型尾矿，钙铝硅酸盐型尾矿，长英型尾矿，碱性硅酸盐型尾矿，高铝硅酸盐尾矿，高钙硅酸盐型尾矿，硅质岩型尾矿，碳酸盐型尾矿。

1.1.2 尾矿的成分

尾矿的成分包括化学成分与矿物成分。无论何种类型的尾矿，其主要组成元素，不外乎O、Si、Ti、Al、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、K、P等几种，但它们在不同类型的尾矿中，其含量差别很大，且具有不同的结晶化学行为。尾矿的化学成分常用全分析结果表示。

尾矿的矿物成分，一般以各种矿物的质量分数表示。由于岩矿鉴定多在显微镜下进行，不便于称量，因此，有时也采用镜下统计矿物颗粒数目的办法，间接地推算各矿物的大致含量。

根据我国一些典型金属和非金属矿山的资料统计，各类型尾矿化学成分和矿物组成范

围见表 1.1.1。

表 1.1.1 尾矿的化学成分和矿物组成范围一览表

尾矿类型	矿物组成	$w_B/\%$	主要化学成分含量/%							
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	NaO	K ₂ O
镁铁硅酸盐型	镁铁橄榄石	25 ~ 75	30.0 ~ 45.0	0.5 ~ 4.0	0.5 ~ 5.0	0.5 ~ 8.0	25.0 ~ 45.0	0.3 ~ 4.5	0.02 ~ 0.5	0.01 ~ 0.3
	(蛇纹石)	25 ~ 75								
	辉石 (绿泥石)	≤15								
	斜长石 (绢云母)		45.0 ~ 65.0	12.0 ~ 18.0	2.5 ~ 5.0	2.0 ~ 9.0	4.0 ~ 8.0	8.0 ~ 15.0	1.50 ~ 3.50	1.0 ~ 2.5
	橄榄石 (蛇纹石)	0 ~ 10								
	辉石 (绿泥石)	25 ~ 50								
	斜长石 (绢云母)	40 ~ 70								
角闪石 (绿帘石)		15 ~ 30								
长英岩型	石英	15 ~ 35	65.0 ~ 80.0	12.0 ~ 18.0	0.5 ~ 2.5	1.5 ~ 2.5	0.5 ~ 1.5	0.5 ~ 4.5	3.5 ~ 5.0	2.5 ~ 5.5
	钾长石 (绢云母)	15 ~ 30								
	碱斜长石 (绢云母)	25 ~ 40								
	铁镁矿物 (绿泥石)	5 ~ 15								
碱性硅酸盐型	霞石 (沸石)	15 ~ 25	50.0 ~ 60.0	12.0 ~ 23.0	1.5 ~ 6.0	0.5 ~ 5.0	0.5 ~ 3.5	0.5 ~ 4.0	0.5 ~ 12.0	0.5 ~ 10.0
	钾长石 (绢云母)	30 ~ 60								
	钠长石 (方沸石)	15 ~ 30								
	碱性暗色矿物	5 ~ 10								
高铝硅酸盐型	高岭土石类黏土矿物	≥75	45.0 ~ 65.0	30.0 ~ 40.0	2.0 ~ 8.0	0.1 ~ 1.0	0.05 ~ 0.5	2.0 ~ 5.0	0.2 ~ 1.5	0.5 ~ 2.0
	石英或方解石等非黏土矿物									
	少量有机质、硫化物	≤25								
高钙硅酸盐型	大理石 (硅灰石)	10 ~ 30	35.0 ~ 55.0	5.0 ~ 12.0	3.0 ~ 5.0	2.5 ~ 15.0	5.0 ~ 8.5	20.0 ~ 30.0	0.5 ~ 1.5	0.5 ~ 2.5
	透辉石 (绿帘石)	20 ~ 45								
	石榴子石 (绿帘石、绿泥石等)	30 ~ 45								
硅质岩型	石英	≥75	80.0 ~ 90.0	2.0 ~ 3.0	1.0 ~ 4.0	0.2 ~ 0.5	0.02 ~ 0.2	2.0 ~ 5.0	0.01 ~ 0.1	0.0 ~ 0.5
	白石英矿物	≤25								
钙质碳酸盐型	方解石	≥75	3.0 ~ 8.0	2.0 ~ 6.0	0.2 ~ 2.0	0.1 ~ 0.5	1.0 ~ 3.5	45.0 ~ 52.0	0.01 ~ 0.2	0.0 ~ 0.5
	石英及黏土矿物	5 ~ 25								
	白云石	≤25								
镁质碳酸盐型	白云石	≥75	1.0 ~ 5.0	0.5 ~ 2.0	0.1 ~ 3.0	0 ~ 0.5	17.0 ~ 24.0	26.0 ~ 35.0	微量	微量
	方解石	10 ~ 25								
	黏土矿物	3 ~ 5								

另据有关资料介绍，我国几种典型金矿尾矿的化学成分见表 1.1.2。

表 1.1.2 我国几种典型金矿尾矿的化学成分

尾矿类型	化学成分含量/%											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	LOI
石英脉型金矿	81.12	8.29	1.73	0.12	0.01	0.12	0.21	3.62	0.16	0.02	0.02	—
石英脉型金矿	73.72	13.49	1.36	0.16	0.46	1.44	1.40	4.90	—	0.05	0.06	2.90
蚀变岩型金矿	80.96	11.09	1.94	0.12	0.37	0.31	0.34	3.82	—	0.04	0.03	1.30
蚀变岩型金矿	70.14	15.56	1.13	0.13	0.38	2.21	1.88	5.00	—	0.08	0.09	2.20
矽卡岩型金矿	47.94	5.78	5.74	0.24	7.97	20.22	0.90	1.78	—	0.17	6.42	—
矽卡岩型金矿	23.36	4.16	16.31	0.40	7.63	21.43	0.32	0.60	—	0.15	0.24	12.00

1.2 矿物加工过程

1.2.1 采矿过程

采矿作业的影响之一是开采过程中所使用的油料、化学药品和炸药等造成的污染，这些污染物再经大量的矿山排水而运移。有时这些矿山排水用于后面单元作业，有时在排至尾矿库之前加以处理，供作他用。然而，大多数矿山将这些矿山水排至尾矿库。

采矿作业的影响之二是开采过程中所产生的废石，这些废石通常排至排土场，或用作筑路材料。在废石含有硫化物的场合，由于空气、阳光和细菌引起风化作用和氧化作用，硫化物氧化最终生成硫酸及再从岩石溶解其他成分。如果这类废石排至尾矿库区，则可能需要拦截和处理酸性渗漏水，以使排放水满足特定的环境规范和准则。

1.2.2 破碎、磨矿和选矿

破碎系统把块状原矿粒度破碎到磨矿设备所能接受的尺寸进入磨矿，磨矿是物理破碎矿石到尾矿粒级的最后阶段。尾矿粒度取决于硬岩碎块研磨过程中颗粒解离的程度和原矿中黏土含量。例如，金尾矿主要由研磨母岩所产生的硅酸盐颗粒组成，而磷酸盐尾矿主要反映原矿的极高黏土含量，而不是由于磨矿产生的碎粒。

经过破碎和磨矿的猛力物理冲击，余下来的尾矿颗粒通常是坚硬的，具有棱角状，即便磨至粉砂粒级也显示出棱角性。页岩组成的矿物例外，它们具有高的黏土含量，尾矿反映母岩粉砂和黏土颗粒的形状和硬度。

为了确定经济价值矿物和可能的药剂消耗量，必须进行全面的矿物组成检验。这样的检验可能决定性地影响回收有用矿物的加工类型及尾矿库设计。一旦选定加工过程，则必须考虑处理前后的矿物以及排至尾矿库的固体物的矿物。

磨碎的最佳程度必须考虑溶浸、焙烧－溶浸或可能的选矿循环，诸如淘汰选、浮选、高强度磁选、重介质选等。例如，溶浸法，为最大量提取，有时需细磨，以促使单体颗粒的比表面积最大。然而，对于浮选法，磨至极细粒度可能产生不利影响。最佳粒度尺寸通常由中试厂详细选矿试验来确定。

浮选是最广泛应用的成功的选矿方法，是在矿物加工顺序中引进化学药剂的第一步骤，因此也可以说是尾矿废水造成污染的化学成分的较早指示。表 1.2.1 示出典型的浮选药剂应用。因所分离的各种矿物类型不同，所用药剂亦有显著变化。在某些情况下，有些矿物如铝和钼，有时也用低浓度的氰化物作为浮选药剂。

表 1.2.1 一般浮选药剂

类别	用途	化合物
(1) 捕收剂	选择性地包覆颗粒以疏水表面，吸附众多气泡	溶于水的极化碳氢化合物，如脂肪酸
(2) 调节剂 (a) pH 调节剂 (b) 活性剂和抑制剂	改变 pH 以促进浮选，酸或碱选择性地改进化合中存在的矿物浮选效应	NaOH、CaO、Na ₂ CO ₃ 、HSO ₄ 、H ₂ SO ₃ 、磁性铁、石灰、硅酸钠、淀粉、丹宁酸、磷酸盐
(3) 起泡剂	起浮选介质作用	松油、丙二醇、脂族醇、甲酚酸
(4) 油	改进泡沫并起捕收剂作用	煤油、燃料油、煤焦油

与尾矿有关的最普通的问题就是硫化矿物氧化引起尾矿内酸的生成。风化过程将硫化物转变成硫酸亚铁和硫酸铁，后生成氢氧化铁和硫酸释放。应当防止酸产生及从尾矿库中排出，因为酸性废水处理很困难，且费用也很高。预防尾矿中酸性条件产生的最有效方法是在尾矿排至尾矿库之前，在选厂设置分离过程，通过选矿流程将硫化物组分与脉石的非硫化物组分（硅酸盐、氧化物、碳酸盐等）分离，并将硫化物分存。加拿大矿物能源技术中心采用浮选方法能处理含 2% 黄铁矿的铀尾矿，除去 98% 的黄铁矿、70% ~ 75% 的镭（镭-226）和 60% 的铀和钍。

最终尾矿包含 0.05% ~ 0.08% 的（黄铁矿形式）硫、0.003% ~ 0.004% 的铀、0.01% 的钍和 50% ~ 60% pcg 的镭-226。当然，由于采用浮选和为能分选所必要的添加剂，废水将含有这些化学药品，必须考虑其环境影响。

由于矿石的性质或特定的工艺设计，有的采用焙烧方法使矿物呈还原状态或氧化状态，为提高金属回收量创造条件，这样可能放出有毒的挥发物质。因此，依据矿石和工艺过程（氧化、还原、硫化、氯化），可能产生各种挥发性物质，必须把它们隔离在专门设计的系统内。

最近几年，由于先进仪器和计算机控制相结合，应用矿物学领域取得重大进步。图像分析就是一个突出例子，其与现代分析技术、表面化学技术相结合，一定会促进加工流程发展，提高对尾矿风化的认识和降低总成本。

1.2.3 溶液浸出

磨碎的矿石颗粒与溶剂接触，提取有用矿物。进入溶浸阶段的材料可能是低品位矿石、精矿或难选的多金属矿石。近些年来，为回收铜、金或银等金属，对重新处理极低品位的尾矿很感兴趣，且在多数情况下是采用溶浸法。由于高品位矿石的减少和重新处理尾矿的极强生命力，现已发展有堆浸、原位浸出、地下破碎岩石的就地浸出。业已证明，如果常温和常压下大气浸出消耗酸量过大，采用压力浸出是很有效的。如果为溶解含沥青铀

矿石、铀矿石和钍矿石、铜矿石和某些难选的含砷黄铁矿的金矿石，细菌浸出是很有效的。溶剂通常根据矿石类型选用强酸性的，如 H_2SO_4 、 HNO_3 、 HCl 、 HF 、硫脲，或其混合物如 $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HF}$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HNO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ ，或强碱性溶剂如 Na_2CO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 或碱性氰化物。

采用硫酸或碳酸盐溶浸铀矿石，可有 95% ~ 98% 的放射性核素保留在固体尾矿中。如果改作硝酸溶浸或氯化物处理，则大部分放射性核素将溶解。

选金的主要问题之一是有毒的氰化物释放到尾矿中。如果采用能够再循环的各种溶浸，以不把有毒废水排至环境，这是可取。

砷成为尾矿或接受环境的另一潜在问题。由于砷化学复杂，具有几种氧化状态，在提取过程中，砷通常部分被溶解，随残渣进入尾矿。如果砷完全被溶解，则可作为副产品从溶液中回收砷。焙烧技术可能是消除和回收砷的一种有效方法。

溶浸可能改变尾矿的物理性质。例如，某铀矿由于钙 - 钠置换的结果，酸浸过程中使原矿中蒙脱石黏土矿物转变成尾矿中居优势的高岭土。随着溶浸技术的改进和矿物学的发展，溶浸回收效果有了显著提高，副产品的回收也得以实现，尾矿特性的改善也将随着某些新技术的应用而得以增进。

1.2.4 固液分离

固液分离是选矿中费用最高的单元作业，约占基建成本和作业成本的 50%。为使尾矿中可溶金属量损失最小，必须在提纯之前充分冲洗、沉淀和澄清。多年来曾采用真空过滤机，压力过滤机、叶滤机、滚筒过滤机和圆盘过滤机，较高效的带式过滤机已在许多选厂应用。由于增强了冲洗效果，使可溶金属损失减少。固液分离通过旋流器和浓缩机可以达到。为了提高分离效果，使用各种添加剂如聚丙烯酰胺，其最终将出现在所排至的尾矿库废水中。所以，在固液分离作业中必须进行充分冲洗，即可防止金属量损失，又可防止污染物排至尾矿库。

为了降低流程的总的基建成本和作业成本，为了减少进入尾矿的可溶金属量损失并防止尾矿库区增大污染物浓度，应当非常重视这一单元作业。矿浆 + 溶剂或矿浆 + 树脂的结合可能达到成本显著降低，并能为减少环境影响创造条件。

1.2.5 溶液提纯与金属回收

为从溶液中回收金属并满足产品高纯度的要求，可以根据所要回收的金属类型和杂质、预期的品位和金属量，选用某种或某几种溶液提纯方法，包括黏结、沉淀、结晶、离子交换、溶剂萃取、碳吸附、反渗透、液膜和电解。

离子交换和溶剂萃取技术在金、铀、贵金属、稀土等金属回收中取得较好的效果。连续的离子交换系统产生浓溶液，送到溶剂萃取系统洗提，获得所要求的纯化。适当的溶剂萃取药剂达到较好的金属选择性，提高提取效率，降低作业成本。但是，某些有机药剂具有不利的环境影响，需要可生物降解的混合物，以促进尾矿中有机物降低。最好是在金属回收之后，在废液排至环境之前，消除污染物并回收氰化物和贱金属。显然，离子交换和溶剂萃取方法也可用于尾矿坝渗漏水的治疗。

碳吸附方法主要用于从碱性氰化物溶浸液、溶浸后的溶浸浆体中回收金。目前因离子