

KUANGSHAN GUTI FEIWU
ZONGHE LIYONG JISHU

矿山固体废物 综合利用技术

竹涛 舒新前 贾建丽 编著



化学工业出版社

KUANGSHAN GUTI FEIWU
ZONGHE LIYONG JISHU

矿山固体废物 综合利用技术

竹涛 舒新前 贾建丽 编著



化学工业出版社

·北京·

前 言

矿产资源是人类赖以生存和发展的基本条件，矿业开发是人类社会发展活动中的一个重要组成部分，是我们建设现代化强国的物质保障。矿产资源的开发，一方面促进了经济的发展和社会的进步；另一方面其产生的大量固体废物也给环境造成了严重的污染和危害，并同时带来了占用土地、资源浪费等诸多问题。在当今世界经济、社会发展面临的人口、资源、环境三大问题中，矿山固体废物就与其中的两项有关。因此，综合利用矿山固体废物，使之变废为宝、化害为利，对于节约资源、改善环境、提高效益，对于促进经济增长方式的转变，实现矿产资源的优化配置和矿业开发可持续发展，具有十分重要的作用，也是我国矿业工作者面临的重要使命。

鉴于矿山固体废物资源化利用技术相关图书，可参考、可借鉴的太少，而中国矿业大学（北京）在相关方面的研究有一定的积累，故编著此书，希望将我们十多年的科研和工程实践所积累的知识，以及国内外迄今为止较为先进的、具有推广意义的矿山固体废物资源化利用技术介绍给读者，并帮助广大从业者及科研工作者能够较为全面地了解相关概况和经验，以便有选择、有目的地借鉴。

本书共五章，第一章概要地介绍了矿山固体废物产生、分类、组分与性质，以及它所引发的各类环境与生态问题，引出了综合利用的意义；第二～第四章主要介绍了煤矸石、粉煤灰、尾矿相关的基础知识，三类矿山固体废物在各方面的综合利用情况及相关技术，并列举了相应的工程实例；第五章主要介绍了尾矿库（坝）复垦利用的相关基础知识以及综合利用情况，并介绍了相关的技术，进行了相应的经济分析。

参加本书编著的工作人员：第一章为舒新前，第二章为竹涛、贾晋炜，第三、四章为竹涛，第五章为贾建丽。参加本书编著的工作人员还有单志强、万艳东、鲁晓菊等同志。

本书的编著和出版受到“中国矿业大学（北京）本科教育专项资金”、“中央高校基本科研业务费基金”、“环境工程专业建设立项项目”、“国家环保公益项目”的部分资助。

由于编著者编写时间有限，不足和疏漏之处在所难免，希望读者不吝指正。同时对书中所引用文献作者也表示深深的谢意。

竹 涛
2011 年 6 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 矿山固体废物产生、分类与特点	2
一、矿山固体废物的产生与现状	2
二、矿山固体废物的特点	2
三、矿山固体废物的分类	3
四、矿山固体废物的组成	3
五、矿山固体废物的性质	4
第二节 矿山固体废物引发的环境与生态问题	5
一、侵占土地	6
二、引发地质与工程灾害	6
三、污染环境、破坏生态平衡	7
四、造成严重资源浪费与经济损失	7
第三节 矿山固体废物综合利用的意义	7
第二章 煤矸石综合利用技术	9
第一节 煤矸石的来源及危害	9
一、煤矸石的来源	9
二、煤矸石的危害	9
第二节 煤矸石的组成、性质及分类	11
一、煤矸石的组成	11
二、煤矸石的性质	13
三、煤矸石的分类	15
第三节 煤矸石综合利用现状	17
一、作为燃料	17
二、利用煤矸石发电	17
三、煤矸石生产建筑及其他材料	17
四、利用煤矸石充填矿井采空区、回填塌陷区	18
五、煤矸石制取化工产品	18
六、煤矸石回收和生产矿物	18
七、煤矸石的农业利用	18
八、煤矸石用于道路工程	18
九、煤矸石用于注浆技术	18
第四节 煤矸石发电	20
一、煤矸石发电概述	20
二、煤矸石发电的益处与障碍	21
三、煤矸石发电的可行性	22

四、煤矸石燃烧能量计算	22
五、利用煤矸石发电的燃烧设备	23
六、煤矸石电厂经济效益分析	27
七、煤矸石发电工程实例	27
第五节 煤矸石回填与复垦	31
一、煤矸石回填	31
二、煤矸石复垦	33
三、尾矿回填应用实例	34
第六节 煤矸石回收生产有用矿物	36
一、从煤矸石中回收煤炭	36
二、从煤矸石中回收黄铁矿	36
三、煤矸石生产高岭土	40
四、煤矸石生产莫来石	42
五、煤矸石提取镓	43
第七节 煤矸石生产化工产品	44
一、制备铝系化工产品	44
二、制备硅系化工产品	48
三、制备硅铝铁化工产品	50
四、煤矸石生产沸石分子筛	53
五、制备钛系化工产品	55
第八节 煤矸石生产各种材料	56
一、煤矸石制砖	56
二、煤矸石生产水泥	59
三、煤矸石生产陶粒	60
四、煤矸石生产粉体材料	62
第九节 煤矸石在生态、环境保护及农业方面的应用	62
一、煤矸石山的生态治理	62
二、煤矸石浆液作燃煤烟道气的脱硫剂	63
三、利用煤矸石中硫铁矿处理含 Cr(VI) 废水	63
四、活化煤矸石处理废水	64
五、煤矸石在农业方面的应用	64
第十节 煤矸石综合利用工程实例	66
一、四川唐家河煤矿煤矸石综合利用	66
二、准格尔露天煤矿煤矸石综合利用	68
三、淮南矿区煤矸石综合利用	69
四、煤矸石生态治理应用实例	71
第三章 粉煤灰综合利用技术	74
第一节 粉煤灰的来源及其污染	74
一、粉煤灰的来源	74
二、粉煤灰的污染问题	74

第二节 粉煤灰的组成、性质和品质指标	75
一、粉煤灰的形成	75
二、粉煤灰的性质和品质指标	77
第三节 粉煤灰用于建筑材料	79
一、粉煤灰混凝土	79
二、粉煤灰陶粒	81
三、粉煤灰砌块	83
四、粉煤灰用作水泥的混合材料	85
五、粉煤灰砂浆	87
六、粉煤灰制砖	88
第四节 粉煤灰在道路工程中的应用	90
一、粉煤灰在公路面层中的应用	91
二、粉煤灰在路面基层和底基层的应用	91
三、利用粉煤灰填筑公路路堤	92
四、粉煤灰用于结构回填	93
五、粉煤灰在道路工程中的应用前景	93
第五节 粉煤灰用作注浆材料和充填材料	94
一、用于矿井防火注浆	94
二、作井下充填材料	94
三、粉煤灰用于隧道工程的压浆材料	94
四、粉煤灰用作速凝注浆材料	95
五、粉煤灰在注浆充填加固软岩巷道中的应用	96
第六节 粉煤灰的农业利用	100
一、概述	100
二、粉煤灰的直接施用	101
三、生产粉煤灰肥料	102
四、粉煤灰用作土壤改良剂	104
第七节 粉煤灰的其他应用	105
一、粉煤灰的分选	105
二、粉煤灰生产硅铝铁合金	106
三、利用粉煤灰提取氧化铝	109
第八节 粉煤灰综合利用工程实例	112
一、广州粤华发电粉煤灰综合利用	112
二、新疆电厂粉煤灰综合利用	115
三、榆社县滨河路粉煤灰铺路工程实例	118
四、粉煤灰提取氧化铝的工程实例	121
第四章 尾矿综合利用技术	126
第一节 尾矿综合利用的主要途径	126
一、从尾矿中回收有用组分	126
二、用尾矿加工生产建材	127

三、用尾矿生产农用肥料或土壤改良剂·····	128
四、用尾矿充填采空区·····	128
五、在尾矿堆积场覆土造地·····	128
第二节 有价金属回收技术·····	128
一、国内外研究现状·····	129
二、铁尾矿中再回收铁·····	129
三、铁尾矿中多种有用矿物的综合利用·····	131
四、铜尾矿的再选·····	133
五、铅锌尾矿的再选·····	136
六、钼尾矿的再选·····	141
七、锡尾矿的再选·····	142
八、钨尾矿的再选·····	145
九、贵金属矿的再选·····	146
十、废催化剂中综合回收有价金属·····	150
第三节 尾矿综合利用工程实例·····	151
一、河南栾川三道庄矿区尾矿综合利用·····	151
二、霍邱铁矿区尾矿综合利用·····	152
三、四川省会理县拉拉铜矿尾矿综合利用·····	154
四、包官营铁尾矿生态农业复垦应用实例·····	157
第五章 尾矿库（坝）复垦利用·····	161
第一节 尾矿库（坝）概述·····	161
一、尾矿库的作用·····	161
二、尾矿库的特点·····	161
三、尾矿库的构成·····	162
四、尾矿库的类型·····	163
五、尾矿库的选址·····	164
第二节 尾矿坝溃坝及安全研究·····	165
一、尾矿坝溃坝·····	165
二、溃坝理论研究·····	165
三、稳定性分析及安全管理·····	166
第三节 尾矿库（坝）对环境的危害·····	166
一、尾矿库占用土地数量增加·····	166
二、浪费可再生资源·····	166
三、尾砂污染严重·····	166
四、引发严重的次生环境污染·····	167
第四节 尾矿库（坝）复垦的利用方向·····	167
一、复垦作农业用地·····	168
二、复垦作林业用地·····	168
三、复垦作建筑用地·····	168
四、尾砂直接作复土造地·····	168

五、尾矿砂综合利用·····	168
第五节 尾矿库（坝）复垦利用方式与技术的选择依据·····	169
第六节 我国尾矿库（坝）复垦利用现状·····	170
第七节 尾矿库复垦效益分析·····	171
一、尾矿库复垦环境效益·····	171
二、尾矿库复垦社会效益·····	172
三、尾矿库复垦经济效益·····	173
第八节 尾矿库（坝）复垦的环境影响评价研究·····	174
一、生态环境与人体健康影响评价方法·····	174
二、健康风险评估·····	174
第九节 尾矿库（坝）复垦案例分析·····	175
一、山东省莱州市仓上金矿尾矿库复垦工程尾矿库项目概述·····	175
二、区域环境·····	176
三、恢复治理方案·····	176
四、工作量及投资概算·····	178
五、预期效益·····	178
参考文献·····	179

第一章 绪 论

众所周知，矿产资源是人类赖以生存和发展的基本条件，矿业开发是人类社会发展活动中的一个重要组成部分，是我们建设现代化强国的物质保障，充分、有效、合理地利用矿产资源是关系到国计民生、长期的战略问题。矿产资源的开发，一方面促进了经济的发展和社会的进步；另一方面其产生的大量固体废物也给环境造成了严重的污染和危害，并同时带来了占用土地、资源浪费等诸多问题。在当今世界经济、社会发展面临的人口、资源、环境三大问题中，矿山固体废物就与其中的两项有关。因此，综合利用矿山固体废物，使之变废为宝、化害为利，对于节约资源、改善环境、提高效益，对于促进经济增长方式的转变，实现矿产资源的优化配置和矿业开发可持续发展，具有十分重要的作用，也是我国矿业工作者面临的重要使命。

近年来，随着国民经济的发展、工业产值的增加，我国固体废物也逐年增大。2008 年工业固体废物达到 19 亿吨，其中矿山直接产生固体废物近 6.7 亿吨；2000 年，工业固体废物达到 7.5 亿吨，其中矿山直接产生固体废物近 3.7 亿吨；1995 年，工业固体废物产生量为 6.7 亿吨，其中矿山直接产生固体废物近 3.4 亿吨。2008 年矿山固体废物产生、排放和综合利用情况见表 1-1，2000~2008 年我国历年工业固体废物产生、排放和综合利用情况见表 1-2。

表 1-1 矿山固体废物产生、排放和综合利用情况（2008 年）

年份	工业固体废物 产生量 /万吨	工业固体废物 排放量 /万吨	工业固体废物 综合利用量 /万吨	工业固体废物 处置量 /万吨	工业固体废物 综合利用率 /%	“三废”综合 利用产品产值 /亿元
2008	67018	385	27530	29338	47.36	41

表 1-2 我国工业固体废物产生、排放和综合利用情况（2000~2008 年）

年份	工业固体废物 产生量 /万吨	工业固体废物 排放量 /万吨	工业固体废物 综合利用量 /万吨	工业固体废物 贮存量 /万吨	工业固体废物 处置量 /万吨	工业固体废物 综合利用率 /%	“三废”综合利用 产品产值 /亿元
2000	81608	3186.2	37451	28921	9152	45.9	310.5
2001	88840	2893.8	47290	30183	14491	52.1	344.6
2002	94509	2635.2	50061	30040	16618	51.9	385.6
2003	100428	1940.9	56040	27667	17751	54.8	441.0
2004	120030	1762.0	67796	26012	26635	55.7	573.3
2005	134449	1654.7	76993	27876	31259	56.1	755.5
2006	151541	1302.1	92601	22399	42883	60.2	1026.8
2007	175632	1196.7	110311	24119	41350	62.1	1351.3
2008	190127	781.8	123482	21883	48291	64.3	1621.4

如表 1-2 所列，工业固体废物产生、处置、贮存量逐年增加，2000 年分别为 81608 万吨、9152 万吨和 28921 万吨；2008 年分别达到 190127 万吨、48291 万吨和 21883 万吨。固体废物产生量增加很快，2008 年是 2000 年的 2.33 倍。2000 年固体废物综合利用率提高到

45.9%，排放量为 3186.2 万吨，综合利用量为 37451 万吨；对比 2008 年综合利用率提高到 64.3%，排放量控制在 781.8 万吨，综合利用量为 123482 万吨，年均增加 9559 万吨。2000 年“三废”综合利用产品产值为 310.5 亿元，至 2008 年“三废”综合利用产品产值增加到 1621.4 亿元，比之 2000 年提高了 1310.9 亿元，年增长率达 145.67 亿元。

总体上，矿山固体废物与工业固体废物相比较，产生总量占 90% 以上（含使用矿产品间接产生的固体废物）；而矿山直接产生的固体废物（主要为尾矿、废石及煤矸石）综合利用价值较低，综合利用量不到整个工业固体废物的 35%，综合利用效益占整体工业固体废物产生效益的 35% 左右；处置率占 60% 以上；排放量占 40%~50%；“三废”综合利用产品产值则占到 2.5% 左右。污染控制需投入的财力、物力、人力较重，污染控制费用占整个工业固体废物控制总额的 45% 以上，特别是用于矿山尾矿、废石治理的费用比例更大。

从总的发展趋势上看，矿山所产生的固体废物逐年增加，其所造成的环境污染也尤为严峻。国家在治理矿山固体废物投入的资金逐年递增，由“八五”的 20 亿增加到“九五”近 30 亿，“十五”期间更是增加到近 36 亿元，而综合利用率则由最初“八五”期间的 20% 提高到 2008 年的 47.36%。

第一节 矿山固体废物产生、分类与特点

一、矿山固体废物的产生与现状

矿山一般指采矿、选矿及其对所生产矿石进行破碎、切割等粗加工的生产单位，即进行采矿作业的场所，包括开采形成的开挖体、运输通道和辅助设备等。矿山固体废物则是指包括矿山开采过程中所产生的废石及矿石经选冶生产后所产生的尾矿或废渣，其以量大、处理工艺复杂而成为环境保护的一大难题。

基于矿山固体废物所含的种类与产生环节，基本上，在矿山各种生产活动包括矿产资源开采、运输、加工，及矿山辅助设施开挖、使用、维修等过程中均会产生大量的固体废物。主要包括采矿后产生的废石和矿山选矿产生的尾矿。据统计，全球采掘工业每年排放的工业固体废物总量达数百亿吨，在我国，黑色金属矿山每年排放的废石尾矿约 6.2 亿吨，有色金属矿山每年排出的废石尾矿达 11500 万吨，煤矸石约 1.3 亿吨。矿山废石的堆积和尾矿坝的构筑，一方面侵占大量土地和农田，另一方面，这些废石、尾矿的大量排放，严重破坏了土地资源的自然生态环境，不仅侵占大量土地，破坏自然景观，而且其成分十分复杂，含有多多种有害成分甚至放射性物质，可污染矿区和周围环境，构成严重的社会公害。目前，我国对矿山固体废物的利用率较低。鉴于此，如何针对各类型矿山固体废物的特点，对其进行合理的处理与处置，同时实现高效资源化与综合利用，既可起到改善矿山生态环境的作用，同时，又可充分利用矿山固体废物中的有用成分，变废为宝，起到缓解我国矿产资源供需相对紧张的矛盾，已成为资源、环境、生态等多学科、领域共同面临的重要课题。

二、矿山固体废物的特点

由于采矿废石和选矿尾矿堆积占用土地并存在一定的危害，故需要进行针对性处理，同时矿山固体废物中含有和原矿一致的组分并未完全提取，很多金属矿及煤矿等的废石和尾矿亦有许多具有经济价值的伴生组分或其他组成成分，因此对其回收利用又具有一定的经济意义。总体上矿山固体废物有以下几个特点。

① 排放量大，组成复杂。世界各国每年采出的金属矿、非金属矿、煤、黏土等达 100 亿吨以上，其中产生的固体废物约 50 亿吨。以有色矿山堆存的固体废物为例，美国达 80 亿

吨，前苏联为 41 亿吨，我国金属矿山堆存的固体废物则达到 50 亿吨以上。

- ② 破坏和污染生态环境。
- ③ 处理处置方式多元化。
- ④ 处理花费较大，见效则相对较慢。
- ⑤ 固体废物综合利用率低，资源浪费明显。

目前我国矿山固体废物的综合利用率仅为 7% 左右，大量的废物只有长期堆放在尾矿库或矿山周围的排土场，有些边远地区的乡镇矿山甚至直接将固体废物排放到山谷等自然场地。如山西省的几十座矿山，仅 1/10 建有尾矿库，其他均排入沟河，堆积成灾。即使排放到尾矿库的尾矿，也对矿区周围环境造成了严重的污染。

三、矿山固体废物的分类

矿山固体废物较一般的固体废物组成相对固定，一般依其来源和产生环节的不同，可分为两大类。

(1) 采矿废石（包括煤矸石） 采矿废石为在开采矿石过程中剥离出的岩土物料，堆放废石地则称为排土（石）场。

在矿山开采过程中，无论是露天开采剥离地表土层和覆盖岩层，还是地下开采开掘大量的井巷，必然产生大量废石。如在我国露天开采矿山中，冶金矿山的采剥比为 1:2~1:4；有色矿山采剥比大多在 1:2~1:8，最高达 1:14；黄金矿山的采剥比最高达 1:10~1:14。矿山每年废石排放总量超过 6 亿吨，仅我国露天铁矿山每年剥离废石就达 4 亿吨。目前全国剥离废石的堆存总量已达数百亿吨，是名副其实的废石排放量第一大国。另外，矿山采出的矿石中也夹有大量的废石。如金属和非金属矿每采 1t 矿石将产出 0.2~0.3t 废石，煤矿采掘和洗煤等过程中产生的煤矸石可达原煤产量的 70%。每年我国煤矿排矸量达 1 亿~2 亿吨，历年煤矸石堆积量已达 40 亿~50 亿吨。

(2) 选矿尾矿 选矿尾矿指的是在选矿加工过程中排放的固体废物，其堆放场地则称之为尾矿库（坝）。

大多数金属和非金属矿石经选矿后才能被工业利用，选矿也会排出大量的尾矿，如每选 1t 铁约排出 0.3t 尾矿。据统计，我国目前年采矿量已超过 50 亿吨，尾矿排放量 2000 年达 6 亿多吨，仅金属矿山堆存的尾矿就达 50 余亿吨，并以每年 4 亿~5 亿吨的量递增。大量的尾矿堆积大面积占用土地，且治理较困难，引发诸多的环境与生态问题，故其治理及再回收利用受到越来越多的关注。

四、矿山固体废物的组成

矿山固体废物源自矿山开采、加工、运输等各个环节，所以其矿物组成与原矿大体相同。而各种类型的矿山原矿通常由多种矿物组成，主要包括自然元素矿物、硫化物及其类似化合物矿物、含氧盐矿物、氧化物和氢氧化物矿物、卤化物矿物等。而矿山固体废物中的主体矿物种类则以含氧盐矿物、氧化物和氢氧化物矿物为主。掌握各种类型矿山固体废物的矿物组成及其基本特性，对其合理的处理、处置措施的选取及资源化利用的途径、工艺等具有重要的指导意义。

(1) 硅酸盐矿物 硅酸盐矿物作为岩石最为主要的成分之一，是原矿和矿山固体废物的重要组成部分。已知硅酸盐矿物约 800 种，占矿物种类的 1/4 左右，占地壳总质量的 80% 左右。硅酸盐矿物是许多非金属矿产和稀有金属矿产的来源，如云母、长石、高岭石、滑石等。硅酸盐矿物的性质常随其结构不同发生较大变化。

(2) 碳酸盐矿物 碳酸盐矿物约有 80 多种，在自然界中分布较为广泛，占地壳总质量的 1.7%。碳酸盐矿物是金属阳离子与碳酸根相结合的化合物。金属阳离子主要有钠、钙、镁、钡、稀土元素、铁、铜、铅、锌、锰等，与配位阴离子碳酸根以离子键结合，形成岛状、链状和层状三种结构类型，以岛状结构碳酸盐为主。碳酸盐矿物组成的矿藏种类较多，如白云石、菱镁矿等为非金属矿产的重要原料，而在金属矿产中，碳酸盐矿物常为脉石矿物。无色、白色，若含过渡型离子则呈现彩色，以玻璃光泽为主。一般硬度、密度都不大，其中三方晶系者具有菱面体解理。碳酸盐矿物一般无磁性，是电和热的不良导体。矿物表面亲水，化学稳定性较差，在水中溶解度较大。

(3) 硫酸盐矿物 此类矿物分布不广，占地壳质量的 0.1%，是金属阳离子与硫酸根相结合的化合物，常有附加阴离子。矿物中呈阳离子的主要有铁、钙、镁、钾、钠、钡、锶、铅、铝、铜等。阳离子以离子键与硫酸四面体结合，形成岛状、环状、链状与层状四种结构类型，其中主要是岛状结构硫酸盐矿物，矿物形态以粒状、板状为主。灰白色、无色，含铜、铁者呈蓝色和绿色。玻璃光泽，少数金刚光泽。透明至半透明。硬度低，含结晶水者更低。密度除含铅、钡和汞者较大外，一般属中等。

(4) 其他含氧盐矿物 主要包括磷酸盐矿物、钨酸盐矿物、钼酸盐矿物等，另有硼酸盐、砷酸盐、矾酸盐、硝酸盐矿物等，这些含氧盐矿物对一般的矿产形成作用不大。

(5) 氧化物矿物和氢氧化物矿物 氧化物矿物和氢氧化物矿物是一系列金属阳离子和某些非金属阳离子与 O^{2-} 或 OH^- 化合而成的矿物。此两类矿物种类繁多，占地壳总质量的 17% 左右，其中石英族矿物就占到了 12.6%，Fe 的氧化物和氢氧化物占 3.9%。石英为重要的造岩矿物，而其他氧化物矿物则常为提取金属元素和放射性元素的重要矿物，有的为宝石（如玛瑙）的矿物来源。氧化物矿物一般莫氏硬度大于 5.5，熔点高、溶解度低，物理化学性质较稳定。氧化物中普遍存在的同类混合物，若是有益元素则有利于综合利用；若为有害元素则会造成某些精矿中有害杂质增高，以及所含金属之间不能分选而造成的金属损失。氢氧化物的晶体结构主要是层状或链状，由于分子键或氢键的存在，以及 OH^- 的电价较低而导致阳离子与阴离子间键力的减弱，与相应的氧化物比较，其相对密度和硬度都减小。

(6) 硫化物及其类似化合物 硫化物及其类似化合物包括一系列金属、半金属元素与 S、Se、Te、As、Sb、Bi 结合而成的矿物。此类矿物种数有 350 种左右，其中硫化物就占了 2/3 以上，其他为硒化物、碲化物、砷化物，及个别锑化物和铋化物。本大类矿物只占地壳总质量的 0.15%，其中绝大部分为铁的硫化物，其他元素的硫化物及其类似类似化合物只相当于地壳总质量的 0.001%。尽管其分布量有限，但却可以富集成具有工业意义的矿床，主要有有色金属，如 Cu、Pb、Zn、Hg、Sb、Bi、Mo、Ni、Co 等均以本大类矿物为主要来源，故本大类矿物在国民经济中具有重大意义。

(7) 其他矿物 矿山固体废物除以上常见矿物外，还包括卤化物和单质矿物，但是数量较少。自然界中最常见和重要的卤化物矿物包括萤石、石盐和钾盐等，常见的自然元素矿物则包括自然金、铂族矿物、金刚石和石墨等。

五、矿山固体废物的性质

矿山固体废物的组成和物理、化学等性质是其进行处理和资源化的重要参考依据。其密度、粒度、化学组成等方面与原矿组成的相似性及差异性均可指导矿山固体废物处理和资源化工艺的选择。

矿山固体废物的性质主要分为物理性质和化学性质。其中物理性质主要包括矿山固体废

物的光学性质、力学性质、电学性质、磁性和润湿性等，而化学性质则包括可溶性、氧化性等。

1. 光学性质

矿物在光波作用下表现出的性质，一般指矿物对可见光的吸收、折射和反射等。它是鉴定矿物的重要依据之一，也是评价宝石和某些特殊矿物原料的重要内容。矿物颜色与色调的浓淡，决定着这些矿物的价值，提取矿山固体废物中的有用矿物，可借助于其与脉石矿物在光泽、颜色上的差异而进行光电分选；而透明度则是鉴定矿山固体废物能否作为光学材料使用的特征之一，也是能否作为填料使用的特征之一，如石英、 CaCO_3 就常作为无色透明的填料使用。

2. 力学性质

矿山固体废物的力学性质是指受外力作用（刻划、敲打等）后所呈现的性质，如硬度、解离和断口等，亦包括固体废物的相对密度及韧性等。硬度不同的废物，其应用价值不同，硬度大的可作磨料使用，硬度小的则可作为填料；另外矿山固体废物的硬度也关系到废物粉碎时流程的选择和粉碎设备的选用；相对密度则在选择矿山固体废物资源化方法具有重要的指导意义，如依密度高低的浮选方法使用等。

3. 电学性质

矿物的电学性质包括其导电性和荷电性，是指矿物导电的能力及其在外界能量作用下带电荷的性质。根据矿物导电性的差异，在矿山固体废物处理中可利用静电分离法提纯有用矿物；根据荷电性差异，则可将不同矿物废料用作不同的材料。

4. 磁性和润湿性

矿物的磁性是指矿物能被永久磁铁或电磁铁吸引，或矿物本身能吸引铁质物件的性质。自然界具有磁性的矿物极为普遍，但磁性显著的矿物则不多。依矿物磁性的差异，可利用磁分离来筛选和分离各种有用的矿物组分，这对矿山固体废物的处置尤其是资源化具有重要的意义。矿物表面被液滴润湿的可能性的程度大小称为矿物的润湿性，是对矿山固体废物进行浮选的理论基础。

5. 可溶性

矿物及其成分的可溶性是矿物中有价成分浸出和回收的重要依据，其度量指标为矿物的溶解度。决定矿物溶解度的因素包括内在的晶格类型及化学键、电价和离子半径大小，阴、阳离子半径之比等，同时外部环境包括 pH 值、温度及共存离子的影响等。

6. 氧化性

原生矿物在氧、二氧化碳和水的作用下，遭到破坏而形成一些新的氧化物、氢氧化物和含氧盐。矿物的氧化与其化学成分和环境中的氧和二氧化碳的含量、水溶液的性质以及矿物的共生组合有关。矿物受氧化后，其成分、结构及表面性质等都发生不同程度的变化，给选矿带来一定影响。但又能使某些金属进一步富集或使新的次生矿物富集，而成为可利用的对象，对矿山废物的处理、处置及其资源化可提供重要的依据。

第二节 矿山固体废物引发的环境与生态问题

矿山固体废物作为我国固体废物的重要来源，是周边区域环境污染的重要贡献者。矿山固体废物因其含有多种化学成分及有机物等可能引发环境污染及危害的物质，若处理不当则可能引发各类环境污染与生态问题，从而造成对生态环境或人体健康的危害，其危害途径和

主要问题如图 1-1 所示。

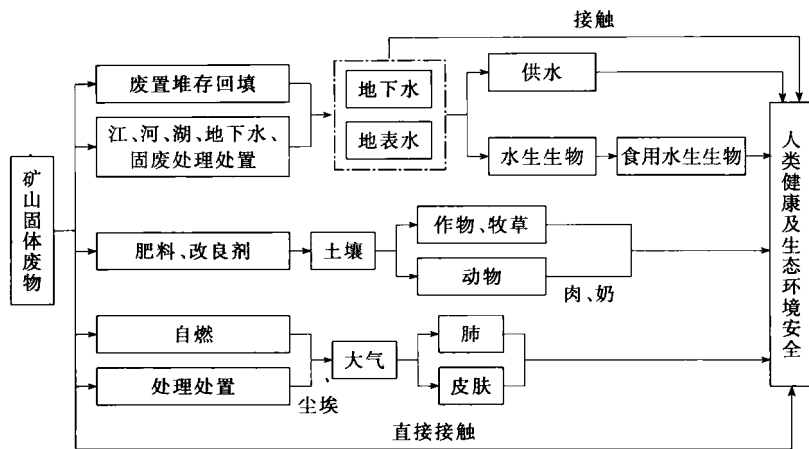


图 1-1 矿山固体废物对生态环境与人体健康的危害途径

一、侵占土地

由于大量采矿废石和选矿尾矿的排放与堆置，致使侵占土地问题成为矿山固体废物首要突出的危害。另外，由此带来的对地表的损伤和对土壤、水体及大气等一系列的危害也越来越严重。

据统计，全球采掘工业每年排放的工业固体废物总量达数百亿吨。如美国露天开采所破坏的土地面积每年以约 6 万公顷的速度递增。有色金属矿山尾矿堆积量累计约 11 亿吨，占地约 8000hm²。尾矿在受到腐蚀时，以及某些进入尾矿的可迁移元素发生化学迁移时，将会对大气和水土造成严重污染，并导致土地退化，植被破坏，甚至威胁到人畜的安全。尾矿库表面产生的粉尘可飞扬很远的距离，从而恶化周边的卫生条件；固体废物中的有害成分以及残存选矿药剂，也会对生态环境造成严重的危害。这些废石、尾矿的大量排放，严重破坏了土地资源的自然生态环境，固体污染物占据如此多的地表面积，其后果是不仅大量侵占了农业耕地，直接影响农业生产，而且覆盖大片森林，大批植被被掩埋，造成植物、动物的物种减少。

二、引发地质与工程灾害

规模较大的废石堆在风力、水力、重力等自然力的作用下，容易引起滑坡、塌落，雨水量大时易导致泥石流的发生。可见，矿山固体废物的危害之一就是対生态环境造成难以恢复的破坏。

金属矿山固体废物长期堆放，不仅在经济上造成巨大的损失，还会诱发重大的地质与工程灾害，如排土场滑坡、泥石流、尾矿库溃坝等，给国家及社会带来极大的损害。对我国规模较大的 2000 多座排土场和 1500 多座尾矿库的统计表明，20 世纪 80 年代以来，发生泥石流和溃坝事故近百起。如 1986 年 4 月黄梅山铁矿尾矿库溃坝，冲倒了尾矿库下游 3km² 的所有建筑，尾矿掩埋了大片土地，19 人在事故中死亡，95 人受伤；2000 年广西南丹县大厂镇鸿图选矿厂发生尾矿坝溃坝，殃及附近住宅区，造成 70 人伤亡，其中 28 人死亡，几十人失踪。金属矿山地质灾害频发，治理难度又大，而且代价高昂，有时甚至超出了开采矿产品的价值。

三、污染环境、破坏生态平衡

矿山固体废物成分十分复杂，含有多种有害成分甚至放射性物质，在堆置、处理等过程中均可对矿区及周边地区的大气环境、水环境及土壤环境等各子系统产生污染，破坏生态平衡和环境质量，构成严重的社会公害。

矿业的固体废物常常占据大面积的地表土地（包括山林和耕地），加剧了水土流失，引起生物链的不良反应、动物种群的迁移，导致大面积的地表变态，也引起了小区域的气候变异。例如：我国的某些砂金矿区，现已造成大面积地表植被破坏，导致了严重的风沙化，引起了小区域气候变异。某些矿产区绿山变成了石山、秃山，水土流失逐年加剧。规模较大的废石堆在风力、水力、重力等自然力的作用下，容易引起滑坡、塌落，雨水量大时易导致泥石流的发生。生态环境的破坏，使植物、动物的物种减少。可见，与其他矿业一样，危害之一就是对我国的环境造成难以恢复的破坏。

在煤矸石等矿山固体废物堆置及处理过程中，由于自燃等现象的时有发生，不停排放出飘尘、污染气体等，对大气环境产生严重污染。废石中硫化物的分解会释放二氧化硫等有害气体。特别是选矿厂的尾矿库，服务期满的库区是大气中 TSP 指标的主要污染源。在我国北方的金矿，干旱少雨，季风的起动力度大，粒度特别细的尾矿易扬尘，其尾矿库周围数平方公里是尾矿砂污染严重的区域。金矿等选矿药剂分解产生的气体和氰化尾矿释放的氰化物在空气中的含量也较高。有些个体小型金矿因使用金属汞，其尾矿库局部汞蒸气超标。而煤矿的煤矸石堆放则由于未压实等原因引起一定的透气、透水性，含一定的黄铁矿等，致使煤矸石的自燃在我国已成为频发的矿山环境与生态问题，其释放的 CO_2 会加剧温室效应，CO 则可能危害人体健康，另外煤矸石自燃时还会释放 NO_x 、 SO_x 和挥发性与半挥发性有机物如 PAHs 等其他有害气体，综上所述，矿山固体废物的堆放会导致空气污染。

通过对尾矿库周围土壤研究，表明尾矿库周围土壤中 Cu、Pb、Zn、Cd 等重金属元素含量都显著地高于对照样品，土壤已经受到重金属元素的严重污染。生长在尾矿污染区土壤中的微生物数量和生物类群均显著降低，另外矿区土壤 Pb、Cr、Zn 污染与小麦种子发芽率降低有关。

四、造成严重资源浪费与经济损失

金属矿山固体废物的排放给环境增加了严重的压力，打破了原始的生态平衡，对地球环境、生态平衡、人类健康及生命财产安全造成了极大危害和潜在威胁，给国民经济带来的直接和间接损失十分巨大。这些固体废物中常含有多种金属元素，有价金属数量还不少，若不加以利用，对于国家金属矿产资源来说也是一种极大的浪费。目前，我国金属矿产资源利用率很低，铁锰等黑色金属矿山采选平均回收率仅为 65%，国有有色金属矿山采选综合回收率只有 60%~70%，而有色金属矿山尾矿的利用率仅为 6%。以铁矿为例，我国铁矿资源共生伴生组分很丰富，大约有 30 余种，但目前能够回收的仅有 20 余种。大量有价金属元素及可利用的非金属矿物遗留在固体废物中，造成每年矿产资源开发损失总值约 1000 亿元。

第三节 矿山固体废物综合利用的意义

鉴于矿产资源在人类生存和社会发展中的重要物质基础作用，加上随着社会发展对矿产资源需求的与日俱增，矿产资源日趋减少，甚至枯竭，致使原材料紧张，资源供需矛盾加剧。同时随着矿山开发力度的增大，矿山产生的废石、尾矿等固体废物将大量增加，对生态环境造成的影响日趋严重。因此，如何综合利用矿山固体废物，在改善矿山生态环境的同

时，又达到变废为宝的目的，即充分利用矿山固体废物中的有用成分，缓解矿产资源供需紧张矛盾，是人类社会面临的重要课题。

随着人们环境意识的提高，矿山固体废物综合治理及应用研究成为矿山发展中的一个重要问题。几十年来中国矿山出现了许多有借鉴意义的治理废石、尾矿的经验和做法，特别是本世纪以来，一些矿山企业从提高经济效益考虑开始从尾矿中回收有价值金属元素，并取得明显效果。但是，中国矿产资源的总回收率仅为 30%~50%，比发达国家低 10%~30%。这说明我国矿产资源综合利用的整体水平还比较低，矿山固体废物处置面临问题仍然十分严峻，国家应出台一些相关法规和固体废物排放标准，矿山企业要进一步解放思想，建立与市场经济接轨的固体废物管理与运行机制，多方筹集资金，实现企业化经营，走产业化道路，发展中国的矿山经济，全面改善矿山环境。

第二章 煤矸石综合利用技术

第一节 煤矸石的来源及危害

一、煤矸石的来源

煤矸石的主要来源有：露天剥离以及井筒和巷道掘进过程中开凿排出的矸石；在采煤和煤巷掘进过程中，由于煤层中夹有矸石或削下煤层底板，使运到地面上的煤炭中含有矸石；煤炭洗选过程中排出的矸石，其生产情况见表 2-1。

表 2-1 煤矸石的主要来源

煤矸石来源	露天开采剥离及井筒和巷道掘进排出的矸石	采煤过程煤巷产生的矸石	选煤厂产生的矸石
所占比例/%	45	35	20

煤矸石产生量占原煤产量的 15%~20%。我国能源结构是以煤炭为主，2009 年我国煤炭产量 30.5 亿吨，新增煤矸石约 4.3 亿吨。2008 年我国煤矸石利用率为 58%，其余部分就近自然混杂堆积。全国已有 2000 多座煤矸石山，目前储存煤矸石超过 50 亿吨。煤矸石已成为我国积存量和年产生量最大，占用土地最多的一种工业废渣。分布在全国产煤的省市与地区，如乌鲁木齐、阳泉、平顶山、抚顺、阜新、沈北、徐州、宝坻等。

二、煤矸石的危害

大量的煤矸石露天堆放形成矸石山，其中的有害成分和化学物质可以进入大气、土壤、地表、地下水造成环境污染。通过环境介质直接或间接进入人体，威胁人体健康。如图 2-1 所示为煤矸石进入环境与其中的化学物质危害人类，传播疾病的途径。

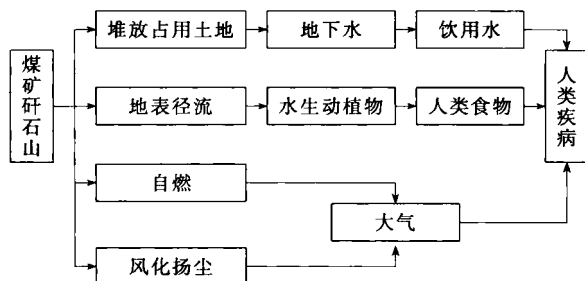


图 2-1 煤矸石污染途径

煤矸石的危害，主要表现在下述几个方面。

（一）自然危害

煤矸石中所含的硫化铁等物质被空气氧化时，不断释放热量，热量逐渐积累导致温度不断升高。当温度达到燃点时（煤的燃点一般为 360℃），矸石中的残煤及其他可燃物便可自燃。煤矸石中含有残煤、炭质泥岩和废木材等可燃物，其中 C、S 可构成煤矸石自燃的物质基础。煤矸石露天堆放，日积月累，矸石山内部的热量逐渐积累。当温度达到可燃物的燃烧点时，矸石堆中的残煤便可自燃。自燃后，矸石山内部温度为 800~1000℃，使矸石融结并