

· 现代选矿技术丛书 ·

金属矿山 尾矿资源化

张锦瑞 王伟之 李富平
郑卫民 赵树果

编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

现代选矿技术丛书

金属矿山尾矿资源化

张锦瑞 王伟之 李富平 编著
郑卫民 赵树果

北 京

冶金工业出版社

2014

内 容 提 要

本书总结了国内外金属矿山尾矿综合利用方面的研究成果及经验,系统地介绍了金属矿山尾矿的基本定义和性质、尾矿处理方法、尾矿水的净化与回水利用等内容;重点介绍了各种尾矿再选技术,尾矿在建材、公路工程、农业领域、污水处理及充填采矿法中的应用,还介绍了尾矿土地复垦。

本书适合矿山企业、建材企业的工程技术人员及管理人员阅读,也可供矿山科研、设计人员及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属矿山尾矿资源化/张锦瑞等编著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 8
(现代选矿技术丛书)
ISBN 978-7-5024-6727-2

I. ①金… II. ①张… III. ①金属矿—尾矿资源—综合利用 IV. ①TD926. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 202527 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 杨秋奎 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6727-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

2014 年 8 月第 1 版, 2014 年 8 月第 1 次印刷

787mm × 1092mm 1/16; 13.75 印张; 333 千字; 211 页

42.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

尾矿，就是选矿厂在特定经济技术条件下，将矿石碎磨、分离有用组分之后所排放的废弃物，也就是矿石经选别出精矿后剩余的固体废料。尾矿是工业固体废物的主要组成部分，其中含有一定数量的有用金属、非金属矿物，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、污染和危害环境的特点。我国是个矿业大国，由于大多数矿山资源的品位较低，在选矿流程中排出大量的尾矿，随着矿产资源利用程度的提高，矿石的可开采品位相应降低，尾矿产生量在急剧增加。我国尾矿多以自然堆积法储存于尾矿坝中，不仅要侵占大量的土地，污染矿区与周边地区的环境，形成安全隐患，同时也造成大量有价金属与非金属资源流失，成为矿山发展的严重制约因素。因此，大力开展尾矿资源综合利用和减排的工作，使之变废为宝，化害为利，对于改善生态环境、提高资源利用率，促进矿业可持续发展，有着十分重要的意义。

为了更有效地开发利用尾矿这一二次资源，作者在搜集、整理、分析和研究有关资料的基础上，阐述了金属矿山尾矿的成分、分类、现状及特点等，介绍了尾矿资源化的新成果、新工艺和新方法，是一本较系统、较全面地介绍金属矿山尾矿综合利用的著作。

参加本书编写工作的有河北联合大学张锦瑞（第1、5章）、河北联合大学王伟之（第2、4、6、8章）、河北联合大学李富平（第7章）、河北联合大学赵树果（第9章）、河北钢铁集团滦县司家营铁矿有限公司郑卫民（第3章）及河北联合大学许永利（第10章）。全书由张锦瑞教授负责统稿。

本书的编写和出版，得到了河北联合大学各级领导的关怀和支持，也得到了河北钢铁集团滦县司家营铁矿有限公司各级领导的大力协助，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平所限，书中不妥之处敬请广大读者和专家批评指正。

编著者

2014.6

目 录

1 绪论	1
1.1 尾矿的定义、分类及特点	2
1.1.1 尾矿的定义	2
1.1.2 尾矿的分类	2
1.1.3 尾矿的特点	4
1.2 尾矿的成分及性质	5
1.2.1 尾矿的化学成分与矿物成分	5
1.2.2 尾矿的物理、化学与工艺性质	8
1.2.3 尾矿的工程性质	9
1.3 尾矿的污染现状	11
1.3.1 矿产资源浪费严重	11
1.3.2 堆存尾矿占用大量土地、堆存投资巨大	12
1.3.3 尾矿对自然生态环境的影响	12
1.4 尾矿综合利用的途径	13
1.4.1 尾矿再选	13
1.4.2 尾矿的整体利用	14
1.5 国内外尾矿综合利用现状	16
1.5.1 国外尾矿综合利用现状	16
1.5.2 国内尾矿综合利用现状	17
1.6 我国尾矿利用存在的问题与对策	19
1.6.1 存在的问题	19
1.6.2 尾矿利用的对策与建议	21
2 尾矿的处理方法	22
2.1 尾矿的堆存方式及设施	22
2.1.1 尾矿库的选择与计算	23
2.1.2 尾矿坝及其他设施	28
2.1.3 尾矿库的维护管理	39
2.2 尾矿的输送系统	43
2.2.1 干式选矿厂尾矿	43
2.2.2 湿式选矿厂尾矿	43
3 尾矿水的净化与回水利用	45

3.1 尾矿水的净化	45
3.1.1 尾矿颗粒及悬浮物的处理	45
3.1.2 尾矿水的净化方法	45
3.2 尾矿水的回水再用	46
4 从尾矿中回收有用金属与矿物	48
4.1 铁尾矿的再选	48
4.1.1 铁尾矿的类型	48
4.1.2 铁尾矿中铁矿物的回收	49
4.1.3 铁尾矿中多种有用矿物的综合回收	63
4.2 有色金属尾矿的再选	67
4.2.1 铜尾矿的再选	67
4.2.2 铅锌尾矿的再选	79
4.2.3 钼矿尾矿的再选	86
4.2.4 锡尾矿的再选	90
4.2.5 钨尾矿的再选	92
4.2.6 钽铌尾矿的再选	99
4.3 金矿尾矿的再选	99
4.3.1 从金矿尾矿中回收铁	100
4.3.2 从金尾矿中回收金、银、硫等有用矿物	101
5 尾矿在建材工业的应用	104
5.1 利用尾矿制砖	104
5.1.1 铁尾矿制砖	105
5.1.2 铅锌尾矿制砖	112
5.1.3 铜尾矿制砖	113
5.1.4 金尾矿制砖	114
5.1.5 钨尾矿制砖	116
5.2 利用尾矿生产水泥	117
5.2.1 铁矿尾矿生产水泥	118
5.2.2 钼铁矿尾矿生产水泥	118
5.2.3 铜、铅锌尾矿生产水泥	119
5.2.4 其他尾矿生产水泥	120
5.3 生产尾矿人造石	120
5.4 尾矿应用于陶瓷材料	122
5.4.1 钨尾矿制作陶瓷的试验	122
5.4.2 金尾矿生产窑变色釉陶瓷	123
5.5 尾矿生产新型玻璃材料	123
5.5.1 铁尾矿饰面玻璃	123
5.5.2 铜尾矿饰面玻璃	124

5.6 尾矿制取建筑微晶玻璃	125
5.6.1 铁矿尾矿制取微晶玻璃	126
5.6.2 钨尾矿制取液晶玻璃	127
5.6.3 金尾矿制取微晶玻璃	128
5.6.4 钼、镍等其他尾矿制取微晶玻璃	128
5.7 生产加气混凝土	130
5.7.1 铁尾矿生产加气混凝土	130
5.7.2 金尾矿生产加气混凝土	133
5.7.3 铅锌尾矿生产加气混凝土	134
5.7.4 低硅铜尾矿生产加气混凝土	134
5.8 利用尾矿烧制建筑用陶粒	134
5.8.1 尾矿烧制陶粒的可行性	135
5.8.2 尾矿烧制陶粒的发展现状	136
5.8.3 存在的问题	137
5.9 利用铁尾矿制备轻质隔热保温建筑材料	137
5.10 我国金属矿山尾矿生产新型建材实例	139
6 尾矿在公路工程中的应用	141
6.1 尾矿砂作为路面基层材料	141
6.1.1 材料要求	141
6.1.2 施工工艺及控制	142
6.1.3 应用效果	143
6.2 尾矿砂填筑路基	143
6.3 铁尾矿替代河沙用于水泥混凝土路面	144
7 尾矿在农业领域的应用	145
7.1 钼尾矿生产多元素矿质肥	145
7.2 尾矿用作磁化复合肥	146
7.3 尾矿用作土壤改良剂	146
8 尾矿在污水处理中的应用	148
8.1 钨尾矿制备生物陶粒	148
8.2 铁尾矿制备生物陶粒	148
8.2.1 实验原料	149
8.2.2 制备工艺	149
8.3 铅锌尾矿制备生物陶粒	149
8.4 尾矿制备高效絮凝剂	150
8.4.1 硫铁尾矿制备聚合氯化铝铁 (PAFC)	150
8.4.2 赤铁矿尾矿制备聚合磷硫酸铁 (PFPS)	151

9 尾矿在充填采矿法中的应用	152
9.1 概述	152
9.1.1 国内外充填采矿技术的发展现状	152
9.1.2 尾砂充填技术	155
9.1.3 充填材料	157
9.1.4 应用实例分析	160
9.1.5 尾砂充填采矿技术发展趋势	162
9.2 全尾砂胶结充填技术	164
9.2.1 概述	164
9.2.2 全尾砂胶结充填系统	165
9.2.3 国内外全尾砂胶结充填技术应用典型案例	167
9.2.4 全尾砂胶结充填技术改进及发展方向	172
9.3 高水固结尾砂充填技术	174
9.3.1 高水固结充填采矿研究现状	174
9.3.2 高水固结充填采矿工艺	177
9.3.3 高水固结充填系统实例	181
10 尾矿土地复垦	188
10.1 概述	188
10.1.1 尾矿复垦特点	188
10.1.2 尾矿复垦利用方式	188
10.1.3 尾矿土地复垦的一般程式	189
10.2 尾矿复垦规划	189
10.2.1 尾矿复垦规划的意义	189
10.2.2 尾矿复垦规划的任务	190
10.2.3 尾矿复垦规划的原则	191
10.3 尾矿工程复垦	191
10.3.1 尾矿工程复垦基本要求	191
10.3.2 尾矿工程复垦技术	192
10.4 尾矿生物复垦	193
10.4.1 生物复垦的概念及任务	193
10.4.2 尾矿生物复垦技术	194
10.4.3 复垦植物配置模式	196
10.4.4 唐山首钢马兰庄铁矿公司尾矿库复垦实践	198
10.5 生态农业复垦技术	202
10.5.1 生态农业复垦概念	202
10.5.2 生态农业复垦基本原理	203
10.5.3 尾矿生态农业复垦实例	204
参考文献	208

1 绪 论

矿产资源是人类生存和发展的主要物质基础之一。我国 95% 的能源和 85% 的原材料来自矿产资源。随着生产力的发展,科学技术水平的提高,人类利用矿产资源的种类、数量愈来愈多,利用范围愈来愈广。到目前为止,全世界已发现的矿物有 3300 多种,其中有工业意义的 1000 多种,每年开采各种矿产 150 亿吨以上,包括废石在内则达 1000 亿吨以上。以矿产品为原料的基础工业和相关加工工业产值约占全部工业产值的 70%。矿产资源开发过程中丢弃的大量废石和尾矿所带来的环境污染,已成为当今世界持续发展面临的最主要的问题之一。不论从全球还是从中国看,矿产资源开发对社会经济和生态环境的意义都是十分重要的。矿产资源包括金属矿、非金属矿和能源矿三大类。本书重点讨论金属矿山尾矿的综合利用问题,探讨尾矿综合利用的途径。

在工业上用量最大,对国民经济发展有重要意义的金属矿产主要有铁、锰、铜、铅、锌、铝、镍、钨、铬、锑、金、银等。以上矿石储量和开采量都很大,但因矿石的品位普遍较低,多数为贫矿,需要经过选矿加工后才能作为冶炼原料,所以就产生出大量的尾矿。如铁尾矿产出量约占原矿石量的 60% 以上,有色金属矿尾矿量占入选矿石的 70% ~ 95%。随着经济发展对矿产品需求的大幅度增加,矿产资源开发规模随之加大,尾矿的产出量还会不断增加。目前我国尾矿多以自然堆积法储存于尾矿坝中,不仅要侵占大量的土地,污染矿区与周边环境,形成安全隐患,同时也造成大量有价金属与非金属资源流失,成为矿山发展的严重制约因素。因此,大力发展尾矿资源综合利用和减排的工作,使之变废为宝,化害为利,对于改善生态环境、提高资源利用率,促进矿业可持续发展,有着十分重要的意义。

近年来,国外非常重视尾矿的综合利用研究。如英国、俄罗斯、加拿大、美国等均投入大量的资金,研究尾矿的综合利用,并取得了明显的经济效益和社会效益。我国在金属矿山尾矿综合利用研究方面也取得了一定的进展和成绩,尾矿资源开发利用和环境综合治理越来越受到政府部门的高度重视。《中国 21 世纪议程》已将尾矿从潜在资源提高到现实资源的地位,把尾矿的处置、管理及资源化示范工程列入中国 21 世纪议程中的优先项目计划。2010 年,工业和信息化部、科技部、国土资源部、国家安全监管总局等有关部门组织编制了《金属尾矿综合利用专项规划(2010~2015)》(以下简称《规划》)。《规划》中指出:做好尾矿的综合利用是落实科学发展观、统筹人与自然和谐发展,发展生态文明,建筑节能型、环境友好型社会的具体表现;金属矿山尾矿综合利用坚持的基本原则:(1)鼓励掺入比例大、低耗能和无二次污染的技术和项目快速发展,实现经济效益、社会效益和环境效益的有机统一;(2)因地制宜,实施符合具体尾矿特征、适应当地条件的高效的尾矿综合利用方案;(3)坚持政策激励原则,在现有资源综合利用的各项激励政策的基础上,对于目前尾矿整体、高效利用和大宗利用的项目和技术给予特殊优惠政策,调动市场主体开展尾矿综合利用

的积极性。《规划》指出,改变中国经济增长方式、大力发展循环经济、提高资源利用率,是解决当前我国资源、环境对经济发展制约的必由之路。

1.1 尾矿的定义、分类及特点

1.1.1 尾矿的定义

尾矿,就是选矿厂在特定技术经济条件下,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里,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,尾矿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。

1.1.2 尾矿的分类

1.1.2.1 尾矿的选矿工艺类型

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,因此按照选矿工艺流程,尾矿可分为如下类型:

(1) 手选尾矿。由于手选主要适合于结构致密、品位高、与脉石界限明显的金属或非金属矿石,因此,尾矿一般呈大块的废石状。根据对原矿石的加工程度不同,又可进一步分为矿块状尾矿和碎石状尾矿,前者粒度差别较大,但多为100~500mm,后者多为20~100mm。

(2) 重选尾矿。重选是利用有用矿物与脉石矿物的密度差和粒度差选别矿石,一般采用多段磨矿工艺,致使尾矿的粒度组成范围比较宽。分别存放时,可得到单粒级尾矿,混合贮存时,可得到符合一定级配要求的连续粒级尾矿。按照作用原理及选矿机械的类型不同,还可进一步分为跳汰选矿尾矿、重介质选矿尾矿、摇床选矿尾矿、溜槽选矿尾矿等,其中,前两种尾矿粒级较粗,一般大于2mm;后两种尾矿粒级较细,一般小于2mm。

(3) 磁选尾矿。磁选主要用于选别磁性较强的铁锰矿石,尾矿一般为含有一定量铁质的造岩矿物,粒度范围比较宽,一般为0.05~0.5mm。

(4) 浮选尾矿。浮选是有色金属矿产的最常用的选矿方法,其尾矿的典型特点是粒级较细,通常为0.5~0.05mm,且小于0.074mm的细粒级占绝大部分。

(5) 化学选矿尾矿。由于化学药液在浸出有用元素的同时,也对尾矿颗粒产生一定程度的腐蚀或改变其表面状态,一般能提高其反应活性。

(6) 电选及光电选尾矿。目前这种选矿方法用得较少,通常用于分选砂矿床或尾矿中的贵重矿物,尾矿粒度一般小于1mm。

1.1.2.2 尾矿的岩石化学类型

按照尾矿中主要组成矿物的组合搭配情况,可将尾矿分为如下8种岩石化学类型:

(1) 镁铁硅酸盐型尾矿。这类尾矿的主要组成矿物为 $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4] - \text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ 系列橄榄石和 $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6] - \text{Fe}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ 系列辉石, 以及它们的含水蚀变矿物: 蛇纹石、硅镁石、滑石、镁铁闪石、绿泥石等。一般产于超基性和一些偏基性岩浆岩、火山岩, 镁铁质变质岩, 镁矽卡岩中的矿石, 常形成此类尾矿。在外生矿床中, 富镁矿物集中时, 可形成蒙脱石、凹凸棒石、海泡石型尾矿。其化学组成特点为富镁、富铁、贫钙、贫铝, 且一般镁大于铁, 无石英。

(2) 钙铝硅酸盐型尾矿。这类尾矿的主要组成矿物为 $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6] - \text{CaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ 系列辉石 $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}](\text{OH})_2 - \text{Ca}_2\text{Fe}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}](\text{OH})_2$ 系列闪石、中基性斜长石, 及其蚀变、变质矿物: 石榴子石、绿帘石、阳起石、绿泥石、绢云母等。这类尾矿在中基性岩浆岩、火山岩、区域变质岩、钙矽卡岩型矿石时较为常见。与镁铁硅酸盐型尾矿相比, 其化学组成特点是: 钙、铝进入硅酸盐晶格, 含量增高; 铁、镁含量降低, 石英含量较小。

(3) 长英岩型尾矿。这类尾矿主要由钾长石、酸性斜长石、石英及其蚀变矿物: 白云母、绢云母、绿泥石、高岭石、方解石等构成。产于花岗岩自变型矿床, 花岗伟晶岩矿床, 与酸性侵入岩和次火山岩有关的高、中、低温热液矿床, 酸性火山岩和火山凝灰岩自蚀变型矿床, 酸性岩和长石砂岩变质岩型矿床, 风化残积型矿床, 石英砂及硅质页岩型沉积矿床的矿石, 常形成此类尾矿。它们在化学组成上具有高硅、中铝、贫钙、富碱的特点。

(4) 碱性硅酸盐型尾矿。这类尾矿在矿物成分上以碱性硅酸盐矿物(如碱性长石、似长石、碱性辉石、碱性角闪石、云母以及它们的蚀变、变质矿物, 如绢云母、方钠石、方沸石等)为主。产于碱性岩中的稀有、稀土元素矿床, 可产生这类尾矿。根据尾矿中的 SiO_2 含量, 可分为: 碱性超基性岩型、碱性基性岩型、碱性酸性岩型三个亚类。其中, 第三亚类分布较广, 在化学组成上, 这类尾矿以富碱、贫硅、无石英为特征。

(5) 高铝硅酸盐型尾矿。这类尾矿的主要组成成分为云母类、黏土类、蜡石类等层状硅酸盐矿物, 并常含有石英。常见于某些蚀变火山凝灰岩型、沉积页岩型以及它们的风化、变质型矿床的矿石中。化学成分上, 表现为富铝、富硅、贫钙、贫镁, 有时钾、钠含量较高。

(6) 高钙硅酸型尾矿。这类尾矿主要矿物成分为透辉石、透闪石、硅灰石、钙铝榴石、绿帘石、绿泥石、阳起石等无水或含水的硅酸钙岩。多分布于各种钙矽卡岩型矿床和一些区域变质矿床。化学成分上表现为高钙、低碱, SiO_2 一般不饱和, 铝含量一般较低的特点。

(7) 硅质岩型尾矿。这类尾矿的主要矿物成分为石英及其二氧化硅变体, 包括石英岩、脉石英、石英砂岩、硅质页岩、石英砂、硅藻土以及二氧化碳含量较高的其他矿物和岩石。自然界中, 这类矿物广泛分布于伟晶岩型、火山沉积-变质型、各种高、中、低温热液型、层控砂(页)岩型以及砂矿床型的矿石中。 SiO_2 含量一般在 90% 以上, 其他元素含量一般不足 10%。

(8) 碳酸盐型尾矿。这类尾矿中, 碳酸盐矿物占绝对多数, 主要为方解石或白云石。常见于化学或生物-化学沉积岩型矿石中。在一些充填于碳酸盐岩层位中的脉状矿体中, 也常将碳酸盐质围岩与矿石一起采出, 构成此类尾矿。

1.1.3 尾矿的特点

1.1.3.1 尾矿是丰富的二次资源

新中国成立以来,我国尾矿的堆积量巨大,由于开采设备陈旧,开采工艺落后,开采模式单一,尾矿中仍然残留品位较高的矿石,甚至比目前国家的最低工业品位还要高,即所谓的“老尾富矿”。尾矿成为丰富的二次资源,回收利用潜力巨大。如我国的铁矿尾矿中仍还有8%~12%的铁,而我国的铁尾矿堆存量超过26亿吨,如能回收50%,则能收获超过1亿吨的铁;又如有些铜矿尾矿中,有些铜矿排出含铜0.25%的“废石”;又比如,由于我国早期选金水平较低,金尾矿中的含金量普遍很高,品位小于1g/t的矿石也被一些金矿列为废石。上述尾矿中的有用矿物均可进行有效回收利用。

我国大多数矿种品位低,并且具有两种以上有用组分的矿床比例高达82%,很多矿山受条件所限,只开采含量最为丰富的主矿种,那些伴生矿种则遗留于尾矿中。如广西南丹矿区尾矿堆存量为2522万吨,尾矿中遗留了大量的硒、锑、铅、锌、金、银、镉等有色金属及砷、硫等非金属,都超出了国家工业品位的要求;四川攀枝花铁矿尾矿中的伴生组分多达十几种,相当于一座大型的金属矿山。湖北三鑫金铜股份有限公司年产尾矿量约52.8万吨,尾矿中具有再回收利用价值的元素有金、铜、铁,按每年选矿处理矿石量60万吨计,该尾矿每年可回收金8928g、银6510g、铜3.72t、铁精矿1.248万吨、硫65.1t。尾矿中绝大部分是非金属矿物,有石英、长石、绢云母、石榴子石、硅灰石、透辉石、方解石等,是许多非金属材料的原料。陕西双王金矿选金尾矿中含有纯度很高的钠长石,储量达数亿吨,成为仅次于湖南衡山的第二大钠长石基地,如只作为金矿回收金时,尾矿中就浪费了相当可观的重要的非金属矿资源钠长石,若加工成半成品钠长石粉,其价值就高达200亿元。因此,随着采选业的蓬勃发展,尾矿资源将源源不断的增加,这是一个尚未被挖掘且潜力很大的“二次资源”。若能充分加以开发和利用,则可创造出不可估量的财富。

1.1.3.2 尾矿粒度细、泥化严重

尾矿的粒度大小与矿石性质以及选矿过程有关,但一般多为细砂至粉砂,具有较低的孔隙度,水分含量也较高,并具有一定的分选性和层理。我国多数矿山矿石嵌布粒度细,共生复杂,为获得高品位精矿,多数采用细磨后选别。因此,排出的尾矿中的有价物质多以细粒、微细粒存在,尾矿泥化与氧化程度较高,同时还有未单体解离的连生体存在,相对难磨难选。

据有关资料统计,各矿山尾矿-0.074mm含量占50%以下的为28.57%,占50%~70%的为42.86%,占70%以上的为28.57%。多数矿山尾矿平均粒径为0.04~0.15mm,如西石门铁矿的尾矿,-0.074mm占70%;-0.038mm占50%,这样的尾矿不需要磨矿就可直接进行回收和加工利用。由于尾矿是矿石磨选后的最终剩余物,因此含有大量的矿泥,且矿泥以细粒、微细粒形式存在,严重干扰尾矿中有价物质的回收,而且粒度细的尾矿会对制备的建材制品强度会产生不利影响,需要根据尾矿粒度、性质采用适宜的回收利用途径。

1.1.3.3 尾矿资源量庞大、种类繁多

由于矿床成矿条件和成因不同,故各矿山矿石类型及主要伴生元素也存在差异,相应

的选矿厂尾矿的性质也有所不同。据不完全统计,国内每年排放的6亿多吨矿山尾矿中,铁尾矿1.3亿吨,各种有色金属尾矿1.4亿吨,其余为黄金、煤炭、化工、建材、核工业等矿山所生产的尾矿。同时,尾矿种类繁多,性质复杂,以铁矿山为例,鞍山式铁尾矿中90%是石英(玉髓)和绿泥石、角闪石、云母、长石、白云石和方解石等矿物;宁芜式铁尾矿中以透辉石、阳起石、磷灰石、碱性长石、黄铁矿及硬石膏等为主;马钢型铁尾矿以透辉石、阳起石、磷灰石、长石、石膏、高岭土、黄铁矿为主,含铝量较高;邯鄹型铁尾矿以透辉石、角闪石、阳起石、硅灰石、蛇纹石、黄铁矿为主,钙、镁含量较高;酒钢型铁尾矿以石英、重晶石、碧玉为主,钙、镁、铝含量均较低;大冶、攀枝花、白云鄂博等矿山尾矿中含有铜、钴、钒、钛,有的含有价值很高的贵金属和稀有元素等。

1.2 尾矿的成分及性质

尾矿的成分包括化学成分和矿物成分,尾矿的性质既包括尾矿自身的物理性质,也包括与建材生产有关的物理化学性质。不同成分和性质的尾矿,除影响到建材生产过程中的工艺参数外,也是决定其开发方向的主要依据。

1.2.1 尾矿的化学成分与矿物成分

尾矿由矿体的部分围岩和夹石,以及矿石中的脉石矿物所构成,因此,其化学成分和矿物成分既受矿体主岩岩性的控制,又受到矿化类型与围岩蚀变的制约。一般来说,岩浆堆积型、火山喷溢型、同生沉积型、区域变质型矿床的尾矿,其化学成分与主岩成分基本近似;而接触交代型、热液型、风化型矿床的尾矿,则主要取决于矿化和围岩蚀变类型。此外,选矿回收率也对尾矿成分具有一定影响。

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、H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。

在镁铁硅酸盐型尾矿中,就以 $[\text{SiO}_4]$ 四面体形式组成岛状、链状、层状硅酸盐骨干,形成橄榄石、辉石、蛇纹石、水镁石、蒙脱石、海泡石、凹凸棒石等镁、铁硅酸盐矿物;Ti除一部分以类质同象形式进入辉石晶格外,主要形成钛铁矿;少量的Al此时主要以 $[\text{AlO}_6]$ 八面体形式取代Fe、Mg共同组成硅酸盐矿物,Mn有时也可取代部分Fe;Ca主要组成少量斜长石;Na、K含量很低;P一般以磷灰石形式存在;H在蚀变矿物中以 $[\text{OH}]^-$ 及 $[\text{H}_3\text{O}]^+$ 进入矿物晶格。

在钙铝硅酸盐型尾矿中,Ca一方面与Fe、Mg一起组成辉石、角闪石、石榴石等硅酸盐矿物,一方面与Na、Al一起形成斜长石等铝硅酸盐矿物。当这些矿物遭受蚀变时,上述元素均可进入矿物晶格,并有 CO_2 、 H_2S 等组分加入,形成绿帘石、绿泥石、绢云母等含水矿物。

在长英岩型尾矿中,Si不仅与Ca、Na、K、Al组成碱性长石和与Fe、Mn、Mg组成云母等层状硅酸盐矿物,还常形成独立的 SiO_2 。在未遭受蚀变和风化的尾矿中,独立的 SiO_2 多为结晶态的石英;在沉积型矿床中, SiO_2 有时以无定型的蛋白石、燧石、硅藻土等形式存在;蚀变严重的这类尾矿,矿物主要为绿泥石+绢云母+石英或高岭石+石英蚀变组合;外生条件下,矿物常以石英+长石、石英+黏土组合出现。

续表 1-1

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

另据中国地质科学院尾矿利用中心李章大介绍,我国几种典型金属矿床尾矿的化学成分见表 1-2。

表 1-2 我国几种典型矿床尾矿的化学成分

尾矿类型	化学成分/%											
	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 ₃	MnO	烧失量
鞍山式铁矿	73.27	4.07	11.60	0.16	4.22	3.04	0.41	0.95	0.25	0.19	0.14	2.18
岩浆型铁矿	37.17	10.35	19.16	7.94	8.50	11.11	1.60	0.10	0.56	0.03	0.24	2.74
火山型铁矿	34.86	7.42	29.51	0.64	3.68	8.51	2.15	0.37	12.46	4.58	0.13	5.52
矽卡岩型铁矿	33.07	4.67	12.22	0.16	7.39	23.04	1.44	0.40	1.88	0.09	0.08	13.47
矽卡岩型铁矿	35.66	5.06	16.55	—	6.79	23.95	0.65	0.47	7.18	—	—	6.54

续表 1-2

尾矿类型	化学成分/%											
	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 ₃	MnO	烧失量
砂卡岩型钼矿	47.51	8.04	8.57	0.55	4.71	19.77	0.55	2.10	1.55	0.10	0.65	6.46
砂卡岩型金矿	47.94	5.78	5.74	0.24	7.97	20.22	0.90	1.78		0.17	6.42	—
斑岩型钼矿	65.29	12.13	5.98	0.84	2.34	3.35	0.60	4.62	1.10	0.28	0.17	2.83
斑岩型钼矿	72.21	11.19	1.86	0.38	1.14	2.33	2.14	4.65	2.07	0.11	0.03	2.34
斑岩型铜矿	61.99	17.89	4.48	0.74	1.71	1.48	0.13	4.88	—	—	—	5.94
岩浆型镍矿	36.79	3.64	13.83	—	26.91	4.30	—	—	1.65	—	—	11.30
细脉型钨锡矿	61.15	8.50	4.38	0.34	2.01	7.85	0.02	1.98	2.88	0.14	0.26	6.87
石英脉型稀有	81.13	8.79	1.73	0.12	0.01	0.12	0.21	3.62	0.16	0.02	0.02	
长石石英矿	85.86	6.40	0.80	—	0.34	1.38	1.01	2.26	—	—	—	
碱性岩型稀土	41.39	15.25	13.22	0.94	6.70	13.44	2.58	2.98	—	—	—	1.73

由表 1-1 和表 1-2 可以看出，不同成因类型的矿床，其尾矿成分变化范围是相当大的。如果将尾矿用作建筑材料的原料时，就必须先对尾矿的化学成分作详细的分析研究。应当注意，表中所列不同类型尾矿的化学成分，仅可作为选择开发方向时参考，具体应用时，还需比照有关的建筑材料用原材料标准，具体分析哪些成分超标，哪些成分不足，哪些是有害的，哪些是有益的，以便取舍或掺配。为了满足建材生产需要，必要时，还可以配合选矿流程，进行有针对性的分选或分级。另外，在作尾矿成分分析时，还应与建材配方通盘考虑，不能孤立地根据尾矿成分，得出可用不可用的结论。

1.2.2 尾矿的物理、化学与工艺性质

与建材生产有关的尾矿物理性质，主要包括密度、硬度、熔点、热膨胀系数等。由于各个具体矿山的尾矿组成各具特点，很难取得完整的数据。在此仅对组成尾矿中，一些常见重要矿物的物理性质列出（表 1-3 和表 1-4）。

表 1-3 一些常见尾矿组成矿物的物理性质

矿 物	密度 /g·cm ⁻³	莫氏硬度	熔融（分解） 温度/℃	矿 物	密度 /g·cm ⁻³	莫氏硬度	熔融（分解） 温度/℃
石 英	2.65	7	1713	透辉石	3.25~3.3	6~7	1300~1390
玉 髓	2.60	6	1713	钙铁辉石	3.5~3.6	5.5~6	1100~1140
磷石英	2.31	6.5	1670	角闪石	3.1~3.3	5~6	
方石英	2.33	6~7	1713	蓝闪石	3.1~3.5	5~6.5	
蛋白石	2.0~2.2	6~6.5	100~250	钠闪石	3.3~3.4	5.5~6	
黄铁矿	5.0	6~6.5	600~660	正长石	2.57	6	1185~1250
无水石膏	2.96	3~3.5	1100~1150	微斜长石	2.57	6	1150~1180
方解石	2.72	3	880~910	霞 石	2.6	5.5~6	1170~1220
白云石	2.87	3.5~4	750~800	钠长石	2.61	6~6.5	1100~1250

续表 1-3

矿 物	密度 /g·cm ⁻³	莫氏硬度	熔融（分解） 温度/℃	矿 物	密度 /g·cm ⁻³	莫氏硬度	熔融（分解） 温度/℃
菱镁矿	2.96	4~4.5	600~650	钙长石	2.76	6~6.5	1290~1340
橄榄石	3.2~3.5	6.5~7	1250~1400	钠沸石	2.24	5~5.5	910~950
绿帘石	3.25~3.4	6.5	950~1000	辉沸石	2.16	3.5~4	800~900
紫苏辉石	3.4~3.9	5~6	1180~1370	丝光滑石	2.15	4~5	600~700
顽火辉石	3.2~3.25	5~6	1400~1450	方沸石	2.25	5.5	880~910
硅灰石	2.91	5~6	1540	堇青石	2.6~2.7	7~7.5	1400~1450

表 1-4 一些常见尾矿组成材料的热膨胀系数

材料 名称	不同温度条件下的线膨胀系数 $\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$						
	-40	-20	0	20	50~100	100~200	200~350
花岗岩	3.8×10^{-6}	4.7×10^{-6}	6.2×10^{-6}	8.3×10^{-6}	$(6 \sim 11) \times 10^{-6}$	$(10 \sim 15) \times 10^{-6}$	$(13 \sim 19) \times 10^{-6}$
玄武岩					$(4 \sim 5) \times 10^{-6}$	$(4 \sim 5) \times 10^{-6}$	$(4.5 \sim 5.5) \times 10^{-6}$
辉绿岩	5.3×10^{-6}	6.2×10^{-6}	6.6×10^{-6}	7.1×10^{-6}	$(6 \sim 7) \times 10^{-6}$	$(6 \sim 7.5) \times 10^{-6}$	$(6.5 \sim 8) \times 10^{-6}$
正长岩					$(6 \sim 7) \times 10^{-6}$	$(6 \sim 7.5) \times 10^{-6}$	$(6.5 \sim 8) \times 10^{-6}$
闪长岩					$(6 \sim 7) \times 10^{-6}$	$(6 \sim 7.5) \times 10^{-6}$	$(6.5 \sim 8) \times 10^{-6}$
安山岩	6.3×10^{-6}	6.8×10^{-6}	7.2×10^{-6}	7.6×10^{-6}			
砂 岩	8.2×10^{-6}	9.0×10^{-6}	8.7×10^{-6}	10.4×10^{-6}	$(11 \sim 15) \times 10^{-6}$	$(11.5 \sim 16) \times 10^{-6}$	$(11.5 \sim 16.5) \times 10^{-6}$
石灰岩	3.8×10^{-6}	4.7×10^{-6}	5.7×10^{-6}	6.5×10^{-6}	$(5 \sim 8) \times 10^{-6}$	$(8 \sim 12) \times 10^{-6}$	$(12 \sim 15) \times 10^{-6}$
白云岩	5.4×10^{-6}	7.4×10^{-6}	5.7×10^{-6}	6.5×10^{-6}	$(4 \sim 10) \times 10^{-6}$	$(8 \sim 14) \times 10^{-6}$	$(10 \sim 16) \times 10^{-6}$
石英砂	10.3×10^{-6}	10.7×10^{-6}	11.3×10^{-6}	12.1×10^{-6}	12×10^{-6}	12.5×10^{-6}	13.5×10^{-6}

尾矿的化学性质，是指尾矿参与化学反应的能力或在化学介质中抵抗腐蚀的能力。对于作建材原料的尾矿来说，主要是指其在碱性的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中，所表现的化学反应活性。它对于低温条件下水化合成建材的形成，或是否可用于混凝土类材料的掺和料，起着决定性作用。

尾矿的工艺性质主要是指其可加工性。尾矿虽然在选矿阶段已经经历了破碎和粉磨过程，但在用于生产某些建筑材料时，其细度可能仍不满足要求，需要进一步磨细。这样一来，就提出来可磨性要求。有时，为了调整颗粒级配，需要对尾矿进行筛分，因此，也存在一个易筛性的问题。

1.2.3 尾矿的工程性质

尾矿是普遍用于后期尾矿坝构筑的工程材料。由于尾矿的特定加工过程和排放方法，又经受水力分级和沉淀作用，形成了各向异性的尾矿沉积层，其压缩变形和强度特性、渗流状态、振动响应特性随尾矿类型、沉积方式、时间和空间而变化，就总体性质而言，既有似于又有别于天然土壤，既符合又不完全适用传统土力学理论。此外，尾矿坝大多是在分期升高中构筑，在构筑中使用，其结构和功能也完全不同于普通的蓄水坝，尾矿坝的工