

尾矿资源二次利用 的研究与实践

WEIKUANG ZIYUAN ERCI LIYONG
DE YANJIU YU SHIJIAN

童 雄 著



科学出版社

尾矿资源二次利用的研究与实践

童 雄 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书对尾矿等资源的二次利用与综合利用进行了比较全面的分析与研究,系统地介绍了有色金属、黑色金属、稀贵金属、非金属等尾矿资源的综合利用,煤炭固体废弃物的综合利用,硅、钙、镁的氧化矿物的脱除与综合利用,选择性磨矿在尾矿资源再磨中的应用,选矿设备在尾矿再选中的研究和应用,选矿废水的处理等。本书对尾矿等二次资源的综合利用将起到重要的指导作用,为大力发展循环经济和构建资源节约型、环境友好型社会提供较为坚实的理论与技术支撑。

本书可作为高等院校采矿、选矿、冶金、环保、化学、资源综合利用等专业的本科生和研究生的教材或参考书,也可作为有关科研院所的科研人员和厂矿工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

尾矿资源二次利用的研究与实践 / 童雄著. —北京:科学出版社,2013. 8
ISBN 978-7-03-038252-8

I. ①尾… II. ①童… III. ①尾矿资源-资源利用 IV. ①TD926. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 178539 号

责任编辑:杨 岭 郑述方 / 责任校对:宣 慧

责任印制:邝志强 / 封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 8 月第 一 版 开本:16(787×1092)

2013 年 8 月第一次印刷 印张:18.5

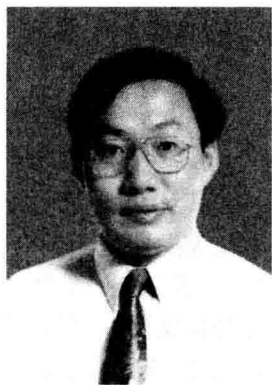
字数:450 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



作者简介



童雄,男,1965年6月生,博士后、教授、博士生导师,“难选资源综合利用及稀贵金属提取理论与工艺”创新团队首席教授、云南省金属矿尾矿资源二次利用工程研究中心主任、国家自然科学基金同行评审专家、云南省首批专家服务团教授、云南省中青年学术技术带头人、云南省冶金集团特聘专家、云锡集团特聘教授、文山州矿业开发技术顾问等。

主要从事复杂难处理多金属矿的浮选理论与工艺、尾矿资源二次利用与稀贵金属的选冶等研究,负责了国家发展和改革委员会重大产业技术开发专项——资源开发综合利用项目“难选锌锡铜钨多金属硫化矿综合回收共伴生金属的选矿关键技术”,国家自然科学基金优先资助领域重点项目“从锡矿山尾矿中综合回收有价金属的理论与应用研究”,国家自然科学基金项目“综合回收文山都龙锌锡矿中稀贵金属的理论与应用研究”、“复杂多金属矿中稀贵金属钨、锑、银载体矿物选择性浮选的理论与应用”、“难处理硫化银矿无氨硫代硫酸盐法浸出机理研究”,教育部高校博士点基金项目“从高钙含钒钢渣中清洁提钒的试验与机理研究”,国家科学技术部“十二五”支撑项目子课题“极低品位钨铋银多金属矿综合回收关键技术”和“高硅质石煤钒矿常压活化浸出关键技术与示范工程”,教育部出国留学人员归国基金项目“硫代硫酸盐法提金的工程化研究”,以及“含易浮脉石难选锌锡铜钨多金属矿综合回收技术研究”、“细菌氧化浸出硫化矿的研究”、“供氧体提高镇沅金矿氰化浸出率的研究”、“镇沅金矿浮选降砷及提金新工艺研究”、“银氰络合物在锰铁氧化矿上的吸附研究”、“硫代硫酸盐柱浸含铜、低品位氧化矿中金银的研究”、“从含锰铁难处理氧化矿中回收银的研究”等国家和省部级项目以及国际合作项目18项、企业委托项目80余项,授权和申请国家发明专利及实用新型专利26项,发表论文160余篇,出版专著4部、教材2部。

负责的“复杂难选高铁锌锡铜多金属矿选矿技术集成及产业化”项目获2011年度云南省科技进步二等奖、中国有色金属工业科学技术二等奖,“工业锅炉智能控制系统研究开发与推广应用”项目获2012年度有色金属工业科学技术二等奖,“提高内蒙撰山子金矿金浸出率的研究”项目获2001年度云南省科技进步三等奖。

前 言

尾矿一般是指在特定的经济技术条件下,通过矿物加工过程从碎磨的矿石资源中进行分离与富集后排出的、堆放在尾矿库的“废弃物”,是在特定的技术经济条件下难以分选的物料。

尾矿是个相对概念,不是绝对的废弃物,不是完全无用的废料;如果借助新的选冶技术,回收尾矿及其废水中的有用成分,更不亚于建设一座新矿山。云南个旧地区有 30 多座尾矿库,锡尾矿量约 2.5 亿 t,其中有价元素锡、铁、银、铅、锌、铜、硫大约分别为 40 万 t、6000 万 t、0.3 万 t、100 万 t、185 万 t、50 万 t、3000 万 t,还共伴生一定量的铋、钨、砷、萤石等有用成分,经济价值超过 2000 亿元;尾矿中锡的总金属量大于矿区目前的保有储量,按云锡公司现有的生产能力,堆存的尾矿可供公司生产 25 年以上。玉溪大红山矿业有限公司大红山矿区每年曾经排放尾矿 537 万 t,综合尾矿品位达到 14% 以上,每年排放到尾矿库的铁金属达到了 77.48 万 t,约占我国铁尾矿中铁损失量的 1%,潜在经济价值约 5.81 亿元。可见,与传统的矿产资源一样,尾矿资源也表现出明显的资源属性与经济属性。另外,尾矿及其与之紧密相连的废水中的有害成分会污染环境,存在各种安全隐患,因此,包含废水的尾矿资源也表现出环境属性。因而对尾矿资源的二次利用就显得尤为重要。

我国矿业循环经济当前的主要任务之一就是,对长期搁置的大量尾矿资源进行二次利用与综合利用,通过研发先进的工艺、技术和设备等,加快科技成果的转化和尾矿资源的高效利用。为了响应国家资源综合利用的政策,按照“减量化、再利用、资源化、减量化优先”的原则,力争“十二五”末全国资源产出率提高 15%、资源循环利用产业总产值达到 1.8 万亿元,在国家自然科学基金委员会、云南省发展和改革委员会、云南省金属尾矿资源二次利用工程研究中心、云南缘矿科技发展有限公司等单位及其科技项目的支持下,根据长期的教学、科研与实践,作者编写了《尾矿资源二次利用的研究与实践》。本书较系统、全面地介绍尾矿资源的二次利用,仔细地分析我国尾矿的基本情况及其二次利用的重要意义,着重介绍从有色金属、黑色金属、贵金属、非金属等尾矿资源中回收有用矿物的传统方法、最新技术和设备等,指出了不同尾矿资源二次利用过程存在的难点和关键技术,供相关专业人员参考与深入研究,推进尾矿资源高效利用的深入发展。

本书由昆明理工大学童雄教授主编,编写过程中得到了玉溪大红山矿业有限公司的大力支持,昆明冶金研究院、中国矿业大学、江西理工大学、云南锡业天爵再生矿产资源有限公司等单位的专家对本书的完成也给予了支持和帮助,并参与了部分章节的编写。

书中第 1 章由童雄编写;2.1 节由童雄、蔡正鹏编写;2.2 节由吕晋芳、刘四清编写;2.3 节由童雄编写;2.4 节由谢贤编写;2.5 节由范立编写;2.6 节由叶国华编写;2.7 节由方夕辉编写;3.1 节由蔡正鹏、谢峰编写;3.2 节由叶国华编写;第 4 章由崔毅琦编写;5.1 节由蓝卓越编写;5.2 节由蔡正鹏编写;5.3 节由刘仁刚、刘四清编写;第 6 章由谢贤、曹亦俊编写;7.1 节和 7.2 节由童雄、周永诚编写;7.3 节由童雄编写;第 8 章由肖庆飞编写;

第9章由童雄、黄宋魏编写;第10章由刘四清编写。周永诚、邓政斌、王晓、王成行等博士生以及吕向文、吴宁、任帅鹏、鄢富坤、吕昊子、王祥坤等硕士生整理了部分资料。全书由童雄统稿。

本书编写过程中,许多专家无私地给予了热情鼓励 and 大力支持,提供了很多宝贵的意见,作者表示由衷的感谢。本书引用了相关的文献资料,谨向文献作者致以诚挚的谢意。

本书虽经多次修改和补充,由于水平和条件所限,疏漏在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2013年4月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 尾矿的概念、尾矿研究的目的	1
1.2 尾矿的分类	1
1.3 我国尾矿与尾矿库的基本情况	6
1.4 尾矿综合利用的背景	7
1.4.1 尾矿库占用土地,运营费用高	7
1.4.2 尾矿库存在直接或潜在的安全隐患和环境危害	8
1.5 尾矿是一种丰富的二次资源	9
1.5.1 有色金属尾矿	10
1.5.2 黑色金属铁尾矿	11
1.5.3 含稀贵稀土金属的尾矿	11
1.5.4 含非金属矿物的尾矿	12
1.6 从尾矿中回收有价成分的水平现状与迫切性	12
1.6.1 对尾矿资源中矿物物性等的研究比较缺乏	13
1.6.2 尾矿资源综合利用的理论研究比较欠缺	14
1.6.3 缺乏系统的对尾矿资源综合利用的浮选药剂研究	17
1.6.4 尾矿资源综合利用的选矿设备有待进一步的研发	17
1.6.5 尾矿中有害元素脱除的研究需要深入	18
1.7 尾矿资源的物性特点及二次利用需解决的关键技术	19
1.7.1 尾矿中微细颗粒回收存在的问题	19
1.7.2 尾矿中 有用成分含量低,杂质对综合利用影响大的问题待解决	20
1.7.3 尾矿与原矿性质差异大,常规技术难以保证有用成分的高效利用	20
1.7.4 尾矿中含量高的微细粒氧化矿物的干扰与回收有待进一步研究	20
1.7.5 尾矿中低含量的稀贵金属的回收技术有待深入研究	20
1.7.6 尾矿堆放时间与矿物物性有明显关联,导致富集存在很大难度	21
参考文献	22
第 2 章 从有色金属尾矿资源中回收有用成分	23
2.1 从铜尾矿中回收有用成分	23
2.1.1 我国铜矿资源的基本特征	23
2.1.2 我国铜资源的消费状况	24

2.1.3	我国铜矿资源开发利用的现状	25
2.1.4	我国铜矿尾矿资源的现状	27
2.1.5	铜尾矿中有用成分的回收	32
2.1.6	铜尾矿回收利用的技术难点与建议	38
2.2	从镍尾矿中回收有用成分	40
2.2.1	镍尾矿资源的现状	40
2.2.2	硫化铜镍矿中主要的矿物及其性质	41
2.2.3	镍尾矿中回收有价金属的意义	42
2.2.4	镍尾矿中有价金属回收的难点	43
2.2.5	镍尾矿中有价金属回收需要解决的关键技术	44
2.2.6	镍尾矿中有价金属回收的现状	45
2.3	从钼尾矿中回收有用成分	50
2.3.1	我国钼矿资源概况	50
2.3.2	钼矿资源的利用状况	51
2.3.3	钼尾矿中有用成分的回收	52
2.4	从铅锌尾矿中回收有用成分	57
2.4.1	我国铅锌矿的资源概况	57
2.4.2	我国铅锌尾矿的现状	59
2.4.3	铅锌尾矿中有价成分的回收	61
2.5	从锡尾矿中回收有用成分	70
2.5.1	锡资源现状及其特点	70
2.5.2	锡尾矿的资源现状	73
2.5.3	锡尾矿中有价矿物回收利用的难点和关键点	75
2.5.4	锡尾矿中有用矿物回收利用的研究	77
2.6	从铝尾矿(赤泥)中回收有用成分	90
2.6.1	赤泥的组成和性质	91
2.6.2	赤泥中有价金属的综合回收	94
2.7	从钨尾矿中回收有用成分	99
2.7.1	从钨尾矿中回收钨的研究及应用	99
2.7.2	从钨尾矿中回收钼铜铋的研究及应用	102
2.7.3	从钨尾矿中回收萤石的研究及应用	105
2.7.4	从钨尾矿中回收石英的研究及应用	105
	参考文献	107
第3章	从黑色金属尾矿资源中回收有用成分	117
3.1	从铁尾矿中回收有用成分	117
3.1.1	铁矿资源的现状及其特点	117

3.1.2 铁矿的类型	118
3.1.3 铁矿的选矿状况	118
3.1.4 铁尾矿资源的现状	119
3.1.5 铁尾矿中有用矿物回收利用的难点和关键技术	120
3.1.6 铁尾矿的选矿回收	122
3.1.7 多金属铁尾矿中共伴生有用成分的回收	129
3.2 从含钒钢渣中回收有用成分	135
3.2.1 含钒钢渣资源的特性分析	135
3.2.2 含钒钢渣提钒的研究进展	137
3.2.3 思考与建议	140
参考文献	141
第4章 从尾矿等资源中回收贵金属和稀土元素	145
4.1 从尾矿等二次资源中回收金	145
4.1.1 国内外金矿资源概述	145
4.1.2 我国金矿资源的特点	145
4.1.3 尾矿资源中金品位较高的原因	146
4.1.4 从选冶二次资源中回收金	146
4.1.5 从选冶尾矿中回收金存在的问题	156
4.2 从尾矿等二次资源中回收银	157
4.2.1 银矿资源	157
4.2.2 银矿物原料的特点	157
4.2.3 尾矿等二次资源中银品位较高的原因	158
4.2.4 从选冶二次资源中回收银	158
4.2.5 从选冶尾矿渣中回收银存在的问题	167
4.3 从尾矿中回收铂、钯、铑等贵金属	167
4.4 从尾矿中回收稀土	168
4.4.1 世界稀土资源	169
4.4.2 中国稀土资源	169
4.4.3 回收尾矿中稀土的技术	169
4.4.4 结语	172
参考文献	172
第5章 从非金属矿尾矿资源中回收有用成分	174
5.1 从萤石尾矿中回收有用成分	174
5.1.1 我国萤石矿的资源分布及特点	174
5.1.2 萤石的性质	175

5.1.3	萤石的选矿特点	175
5.1.4	我国萤石矿的浮选概况	176
5.1.5	萤石矿尾矿中有价成分的回收实践	177
5.2	从尾矿中回收重晶石	182
5.2.1	我国重晶石资源的分布及特点	182
5.2.2	重晶石的性质	182
5.2.3	重晶石的应用	183
5.2.4	我国重晶石的选矿现状	183
5.2.5	从尾矿中回收重晶石的研究与实践	184
5.3	从尾矿中回收绢云母	192
5.3.1	绢云母的性质、我国绢云母矿资源的分布与特点	192
5.3.2	绢云母的应用	193
5.3.3	绢云母的选矿概况	194
	参考文献	200
第 6 章	煤炭固体废弃物的综合利用	202
6.1	煤炭的构成与性质	202
6.2	煤炭资源的分布与特点	202
6.3	我国的选煤厂概况	203
6.4	煤炭固体废弃物的主要类型	203
6.4.1	煤矸石	204
6.4.2	粉煤灰	204
6.4.3	煤泥	205
6.5	煤矿尾矿的回收利用	206
6.5.1	煤矸石的回收利用	206
6.5.2	粉煤灰的回收利用	207
6.5.3	煤泥的应用	207
6.6	小结	209
	参考文献	209
第 7 章	硅、钙、镁的氧化矿物的脱除与综合利用	211
7.1	选矿过程中脱硅的研究与应用	211
7.1.1	黑色金属矿的脱硅	211
7.1.2	有色金属矿的脱硅	212
7.1.3	非金属矿的脱硅研究	216
7.1.4	结论与建议	218
7.2	选矿过程中脱镁及其综合利用研究	218

7.2.1 含镁矿物的矿物学特性	218
7.2.2 浮选脱镁的研究进展	219
7.2.3 化学浸出法脱镁研究	222
7.2.4 其他脱镁方法	223
7.2.5 脱镁废弃物的综合利用	224
7.2.6 结语	225
7.3 选矿过程中脱钙的研究与应用	226
7.3.1 物理选矿法	226
7.3.2 化学选矿法	228
7.3.3 生物选矿法	229
参考文献	229
第8章 选择性磨矿在尾矿资源再磨中的应用	234
8.1 尾矿的可筛性与可磨性	234
8.2 选择性磨矿在尾矿再磨中的要求与发展方向	235
8.2.1 选择性磨矿在尾矿再磨中的要求	235
8.2.2 选择性磨矿在尾矿再磨中的发展方向	236
8.3 磨矿设备在尾矿再磨中的应用现状	236
8.3.1 溢流型球磨机在尾矿再磨中的应用	237
8.3.2 立式搅拌磨在尾矿再磨中的应用	238
8.3.3 其他新型磨机在尾矿再磨中的应用	238
8.4 选择性磨矿的介质工作制度在尾矿再磨中的调节	239
8.4.1 磨矿介质尺寸的调节	239
8.4.2 磨矿介质形状和材质的调节	240
8.4.3 磨矿介质装补球制度的调节	242
8.5 选择性磨矿在尾矿再磨中的应用	243
8.5.1 铜矿尾矿再磨	243
8.5.2 铅锌矿尾矿再磨	244
8.5.3 铁矿尾矿再磨	245
参考文献	245
第9章 选矿设备在尾矿再选中的研究和应用	247
9.1 尾矿二次利用的磁选设备	247
9.1.1 BKW 型尾矿再选磁选机	247
9.1.2 SLon 高梯度磁选机	248
9.2 尾矿二次利用的重选设备	248
9.2.1 离心机	249

9.2.2 摇床和螺旋溜槽	249
9.2.3 其他新型尾矿重选设备	250
9.3 尾矿二次利用的浮选设备	250
9.3.1 浮选机	250
9.3.2 浮选柱	251
9.4 脱水设备在尾矿处理中的研究和应用	253
9.4.1 浓缩脱水型水力旋流器	253
9.4.2 浓密机	253
9.4.3 过滤机与压滤机	256
9.4.4 高频振动脱水筛	258
9.4.5 结语	258
参考文献	258
第 10 章 选矿废水的处理	262
10.1 选矿废水的来源	263
10.2 选矿废水的分类及其特点	264
10.3 选矿废水的危害	265
10.4 废水处理的主要方法	266
10.4.1 物理处理法	268
10.4.2 化学处理法	270
10.4.3 物理化学处理法	272
10.4.4 生物化学处理法	273
10.5 选矿厂废水的处理	273
10.5.1 含悬浮物废水的处理	273
10.5.2 酸、碱废水的中和处理	276
10.5.3 含氰废水的处理	276
10.5.4 含重金属离子废水的处理	279
10.6 选矿厂废水处理的发展方向	281
参考文献	282
附表 尾矿资源的矿床学类型	284

第 1 章 绪 论

1.1 尾矿的概念、尾矿研究的目的

尾矿就是在特定的经济技术条件下,从碎磨的矿石资源中提取有用成分后排出的“废弃物”,包括浆体尾矿、膏体尾矿和滤饼尾矿。尾矿中主要有用组分的含量称为尾矿品位,它是选择经济合理的再选方案、评价尾矿再选性的重要参数之一。在特定的技术经济条件下,尾矿不宜进一步分选;但随着科学技术的进步和发展,有用目标组分还有进一步回收利用的经济价值。因此,尾矿是个相对概念,不是绝对的废弃物,不是完全无用的废料,往往含有一定用途的有用组分,很多时候可视为一种复合的硅酸盐、碳酸盐等矿物材料,可以进行综合利用;如果借助新的选冶技术,回收这些有用成分,将不亚于建设一座新矿山。因此,与传统的矿产资源一样,尾矿资源表现出明显的资源属性、经济属性和环境属性。

此外,与尾矿特别是有浮选流程的尾矿紧密联系在一起的是含有大量有用和有害的浮选药剂和金属离子等的选矿废水,这种资源的外排不仅浪费可再利用的药剂,而且有害的金属离子和药剂等对周围的生态环境将造成严重的污染。因而与尾矿“唇齿相依”的选矿废水的处理与治理也是尾矿资源再利用过程的一个重要研究内容。

我国工业固体废弃物的综合利用率大约为 60%,而金属矿尾矿的综合利用率还不到 10%,相比之下,尾矿的综合利用大大滞后于其他大宗固体废弃物。因此,对尾矿资源利用的研究及应用是非常必要的。

尾矿的再利用主要有 4 个目的:其一是对老尾矿和新尾矿进行再选,回收其中的有用成分;其二是通过对尾矿物性的分析,研究原矿分选过程中所采用的工艺流程、药剂制度、设备配置等是否科学合理,为进一步优化原矿选矿工艺流程提供更加合理、科学的依据;其三是对尾矿废水进行净化和处理,回收利用其中的有用药剂,并将净化的废水返回原流程进行循环利用,力争实现零排放;其四是利用尾矿属于一种复合的矿物材料的特点,制作矿山采空区的填充物(如尾砂填充等)和建筑材料,如微晶玻璃、人造石、建筑陶瓷、水泥、玻化砖、耐火材料等。

尾矿的综合利用问题是一项复杂的系统工程,涉及地质、采矿、选矿、冶金、玻璃、陶瓷、建筑、材料、环保、化工等相关专业,需要进行多学科的联合攻关,才能够取得对尾矿资源的深入认识和更好的利用。

1.2 尾矿的分类

由于尾矿种类多样、组分复杂,含有硫、氧、硅、铝、铁、钙、镁、钠、钾、钛、锰、磷、氢等常

见元素,因此不同尾矿的可利用性也不尽相同,所以为了更好地开发利用尾矿资源,需要对尾矿进行分类,系统、科学地认识各类尾矿的共性和特性,有利于对尾矿的深入认识和利用。然而,由于对尾矿分类的角度不同,存在不同的分类方法。

按化学成分的不同,可简单地把尾矿分为以下 7 种类型。

- (1) 高硅型: $\text{SiO}_2 > 80\%$ 。
- (2) 钙镁质型: $\text{CaO} + \text{MgO} > 30\%$ 、 $\text{SiO}_2 > 30\%$ 。
- (3) 铝硅质型: $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ 、 $\text{SiO}_2 > 60\%$ 。
- (4) 铁硅质型: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} > 20\%$ 、 $\text{SiO}_2 > 60\%$ 。
- (5) 碱铝硅质型: $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} > 10\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 10\%$ 、 $\text{SiO}_2 > 60\%$ 。
- (6) 钙铝硅质型: $\text{CaO} > 10\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 10\%$ 、 $\text{SiO}_2 > 40\%$ 。
- (7) 复合成分型: $\text{SiO}_2 40\% \sim 60\%$ 。

根据排出尾矿的矿山及其选别成分的不同,通常,人们将尾矿分为有色金属矿山尾矿、黑色金属矿山尾矿、贵金属尾矿、非金属矿山尾矿、煤炭资源固体废弃物 5 大类。有色金属矿山尾矿包括铜矿尾矿、锡矿尾矿、铅锌矿尾矿、钼矿尾矿、镍矿尾矿等;黑色金属矿山尾矿可细分为铁矿尾矿、锰矿尾矿等;稀有金属尾矿包括金矿尾矿、银矿尾矿、铂族金属尾矿、稀土尾矿等;非金属矿山尾矿包括磷矿尾矿、萤石尾矿、重晶石尾矿等;煤炭固体废弃物包括煤泥、粉煤灰、煤矸石等。有人认为这种分类方法缺乏科学依据,因为它不能反映尾矿的地质学特征及其工艺学特点。

一般来说,不同种类和结构构造的矿石,需要不同的选矿工艺流程加以回收,从而产生不同性质的尾矿,它们在颗粒形态和颗粒级配上,往往存在一定的差异,不同类型的尾矿均有不同的粒度范围,因此按照选矿工艺流程,尾矿大致可分为如下 6 种类型。

(1) 手选尾矿:因为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,两者粒度差别较大,但多为 $+20 \sim -100\text{mm}$ 。

(2) 重选尾矿:因为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。尾矿如果分别存放时,可得到单粒级尾矿;混合储存时,可得到符合一定级配要求的连续粒级尾矿。按照重选原理和选矿设备的不同类型,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,前两种尾矿的粒级较粗,一般大于 $+2\text{mm}$,后两种尾矿的粒级较细,一般小于 $+2\text{mm}$ 。

(3) 磁选尾矿:磁选主要用于选别弱磁性和强磁性的铁矿石和锰矿石等,尾矿一般为含有一定量铁质的造岩矿物,粒度范围比较宽,为 $0.05 \sim 0.5\text{mm}$ 不等。

(4) 浮选尾矿:浮选是有色金属等矿产资源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 $+0.3 \sim +0.05\text{mm}$,且 -0.074mm 的细粒级占绝大部分;此外,尾矿中含有对生态环境有害的浮选药剂。

(5) 电选与光电选矿尾矿:目前这种选矿方法较少使用,通常用于分选砂矿或尾矿中的贵重矿物,尾矿粒度一般小于 1mm 。

(6) 化学选矿尾矿或尾渣:由于化学选矿(如浸出等)有用元素的同时,对尾矿或尾渣

颗粒产生一定程度的腐蚀,或改变有用元素矿物的表面状态,提高或降低矿物的反应活性,并产生一定的次生泥质矿粒,对后续的综合利用产生不利的影响。

从物质成分和总体上看,尾矿基本上是原矿石的“继承物”,其成分主要取决于原矿石或含矿岩石的成分。基于这一点,有人按照岩石学、矿床学以及矿体赋存的主岩类型和围岩蚀变类型等对尾矿进行了28种类型的地质学划分,见书末附表。

按照尾矿中矿物成分的不同,可把尾矿简单地分为以下5种类型。

- (1) 石英型:组成矿物以石英为主。
- (2) 石英-长石型:组成矿物以石英和长石为主。
- (3) 碳酸盐矿物型:组成矿物以方解石和白云石为主。
- (4) 黏土矿物型:各类黏土矿物总量达50%以上。
- (5) 复成分型:矿物组成复杂,通常以钙、镁和铁硅酸盐矿物居多。

对于作为建筑材料生产原料的尾矿,除受颗粒分布状态和矿床学类型影响以外,起根本作用的因素主要体现在尾矿的矿物组成,具体地说表现在4个方面:①尾矿中有害杂质含量、化学成分、矿物成分等物质组成特点;②晶体结构、化学键性、表面状态等物理化学特性;③矿的可磨性、可溶性、可烧结性等工艺技术性能;④尾矿的强度、坚固性和化学稳定性等应用性能。据此可将尾矿分为8种类型^[1]。

(1) 镁铁硅酸盐型:其主要矿物组成是 $\text{Mg}[\text{SiO}_4]$ - $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$, Si 以 $[\text{SiO}_4]$ 四面体形式组成岛状、链状、层状硅酸盐骨干,形成系列橄榄石和系列辉石,以及它们的诸如蛇纹石、硅镁石、蒙脱石、凹凸棒石、海泡石、滑石、绿泥石和镁铁闪石等含水蚀变矿物。除部分钛以类质同象形式进入辉石晶格外,主要形成钛铁矿;少量的铝此时主要以 $[\text{AlO}_6]$ 六面体形式取代铁和镁,并共同组成硅酸盐矿物,锰有时也可取代部分铁;钙主要组成少量的斜长石;钠、钾含量很少;一般磷以磷灰石的形式存在;氢在蚀变矿物中以 $[\text{OH}]^-$ 以及 $[\text{H}_3\text{O}]^+$ 进入矿物晶格。该类尾矿一般产于超基性和一些偏基性岩浆岩、火山岩,镁铁质变质岩以及镁夕卡岩中的矿石。在外生矿床中,富镁矿物集中时,可形成蒙脱石、海泡石和凸棒石型尾矿。其化学组成特点是富镁、富铁,贫钙、贫铝,而且一般镁大于铁,没有石英。

(2) 长英岩型:硅不仅与钙、钠、钾、铝组成碱性长石以及与铁、锰、镁形成云母等层状硅酸盐矿物,而且还形成独立的二氧化硅,因此该类尾矿主要由钾长石、石英、酸性斜长石及其蚀变矿物(如绢云母、白云母、高岭石、绿泥石和方解石等)组成。它通常产于花岗岩自变质型矿床,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,酸性盐和长石砂岩变质岩型矿床,风化残积型矿床,长英砂及硅质页岩型沉积矿床的矿石,具有高硅、中铝、贫钙、富碱等特点。在未遭受蚀变和风化的尾矿中,独立的二氧化硅常为结晶态的石英,主要具有绿泥石+绢云母+石英或高岭石+石英蚀变组合。在外生条件下,通常形成石英+长石、石英+黏土组合。在某些酸性火山岩型矿床中,还可见到沸石类矿物,钙、钠、钾呈不稳定的吸附状态赋存于 Si-Al-O 骨架的空穴中。

(3) 钙铝硅酸盐型:主要矿物组成是 $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ - $\text{CaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ 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(如绿帘石、阳起石、石榴子石、绿泥石和绢云母等)。钙不仅可以与铁和镁一起组成辉石、角闪石、石榴子石等硅酸盐矿物,而且可以与钠、铝形成斜长石等铝硅酸盐矿物。当这些矿物遭受蚀变时,尾矿中的一些元素都可以进入矿物晶格,并有二氧化碳、硫化氢等组分加入,形成绿帘石、绿泥石和绢云母等含水矿物。这类尾矿在中基性岩浆岩、火山岩、区域变质岩、钙夕卡岩型矿石中比较常见,而且钙、铝进入硅酸盐晶格,含量增多,而铁、镁含量降低,石英含量较小。

(4) 碱性硅酸盐型:该类尾矿以碱性硅酸盐矿物(如碱性长石、似长石、碱性辉石、碱性角闪石、云母)及其蚀变、变质矿物(如绢云母、方钠石、方沸石等)为主,以富碱、贫硅、无石英为特征,钠、钾含量比长英岩型尾矿高得多;产于碱性岩中的稀有、稀土元素矿床可形成这类尾矿。根据尾矿中的二氧化硅含量,它可以分为碱性超基性岩型、碱性基性岩型、碱性酸性岩型(也称碱性酸性硅酸盐型)3个亚类,其中第3亚类分布较广,主要组成矿物有霞石、白榴石、钾长石、碱性斜长石等,建材中多用此类尾矿。当矿床受到蚀变时,碱性似长石类矿物通常形成方沸石、方钠石和钾沸石等,碱性长石蚀变为绢云母和高岭石等。

(5) 高铝硅酸盐型:硅、铝通常结合成无水或含水的硅酸铝,赋存于黏土或红柱石族矿物中,硅呈四面体配位,铝多呈六面体配位;铁、镁、钾、钠进入八面体孔穴,以黑云母、白云母和伊利石等形式存在,钙很少进入硅酸盐晶格,而以独立的碳酸盐形式存在。因此,该类尾矿的主要成分为云母类、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、沉积页岩型及其风化、变质型矿床的矿石中,煤系地层中的煤矸石也多属此类;在化学成分上,表现为富铝、富硅,贫钙、贫镁,有时钾、钠含量较高。

(6) 高钙硅酸盐型:该类尾矿中钙既与硅结合成透辉石、透闪石、硅灰石和钙石榴子石,又以方解石的形式残留于碳酸盐中;铁、镁、钠、钾等主要赋存于绿帘石、绿泥石、阳起石等含水的硅酸盐中。因此,该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,多分布于各种钙夕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,二氧化硅一般不饱和,铝含量一般较低的特点。

(7) 硅质岩型:硅的主要赋存方式为结晶状态的氧化物石英,有些以燧石、蛋白石等微晶或不定形氧化物形式存在,因此该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、脉石岩、石英砂岩、硅质页岩、石英砂、硅藻土以及二氧化硅含量较高的其他矿物和岩石。自然界中,该类尾矿广泛分布于伟晶岩型,火山沉积-变质岩型,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,二氧化硅含量一般在90%以上,其他元素含量一般不足10%。

(8) 碳酸盐型:钙可以进入方解石、白云石晶格,镁可以形成白云石和菱镁矿;但在一些成分不纯或遭遇蚀变的碳酸盐型尾矿中,不免有硅、铁、铝、锰等元素混入。该类尾矿中,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。在一些填充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。根据碳酸盐矿物是方解石还是白云石为主,又可进一步分为钙质碳酸盐型尾矿和镁质碳酸盐型尾矿两个亚类。

以下8种类型的尾矿具有不同的特点,其化学成分和矿物组成也不相同(表1-1),据

此可初步选择不同的工艺制造性能差异的建筑材料。

除 5 种铁矿尾矿(表 3-1)以外,我国 9 种典型的金属矿尾矿的化学成分见表 1-2。

表 1-1 尾矿的化学成分和矿物组成的范围

尾矿类型	矿物成分	质量分数/%	化学成分/%							
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
镁铁硅酸盐型	镁铁橄榄石(蛇纹石)	25~75	30.0	0.5	0.5	0.5	25	0.3	0.02	0.01
	辉石(绿泥石)	25~75	~	~	~	~	~	~	~	~
	斜长石(绢云母)	≤15	45.0	4.0	5.0	8.0	45	4.5	0.5	0.3
钙铝硅酸盐型	橄榄石(蛇纹石)	0~10	45.0	12.0	2.5	2.0	4.0	8.0	1.5	1.0
	辉石(绿泥石)	25~50	~	~	~	~	~	~	~	~
	斜长石(绢云母)	40~70	65.0	18.0	5.0	9.0	8.0	15	3.5	2.5
	角闪石(绿帘石)	15~30								
长英岩型	石英	15~25	65.0	12.0	0.5	1.5	0.5	0.5	3.5	2.5
	钾长石(绢云母)	15~30	~	~	~	~	~	~	~	~
	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	50.0	12.0	1.5	0.5	0.1	0.5	5.0	5.0
	钾长石(绢云母)	30~60	~	~	~	~	~	~	~	~
	钠长石(方沸石)	15~60	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	高岭土类黏土矿物	≥75	45.0	30.0	2.0	0.1	0.05	2.0	0.2	0.5
	石英或方解石等	~	~	~	~	~	~	~	~	~
	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(石灰石)	10~30	35.0	5.0	3.0	2.0	5.0	20	0.5	0.5
	透辉石(绿帘石)	20~45	~	~	~	~	~	~	~	~
	石榴子石(绿帘石、绿泥石等)	30~45	55.0	12.0	5.0	15	8.5	30	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	3.0	2.0	0.2	0.1	1.0	45	0.01	0.02
	石英及黏土矿物	5~25	~	~	~	~	~	~	~	~
	白云石	≤5	8.0	6.0	2.0	0.5	3.5	52	0.2	0.5
镁质碳酸盐型	白云石	≥75	1.0	0.5	0.1	0	17	26		
	方解石	10~25	~	~	~	~	~	~	微量	微量
	黏土矿物	3~5	5.0	2.0	3.0	0.5	24	35		

表 1-2 我国几种典型金属矿床尾矿(除铁矿尾矿)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 ₅	MnO	烧铁
夕卡岩型铜矿	47.51	8.04	8.57	0.55	4.71	19.77	0.55	2.10	1.55	0.10	0.65	6.46
夕卡岩型金矿	47.94	5.78	5.74	0.24	7.97	20.22	0.90	1.78	—	0.17	6.42	—
斑岩型铜钼矿	65.29	12.13	5.98	0.84	2.34	3.35	0.60	4.62	1.10	0.28	0.17	2.83