

# 大宗工业固废 环境风险评估

Environmental Risk Assessment of  
the Staple Industrial Solid Wastes

宁平 孙鑫 唐晓龙 周连碧 著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 大宗工业固废环境风险评价

宁平 孙鑫 唐晓龙 周连碧 著

北京

冶金工业出版社

2014

## 内 容 提 要

大宗工业固体废物环境监管责任重大,构建大宗工业固体废物污染源环境风险评价体系是建立固体废物管理技术体系的重要内容。本书根据大宗工业固体废物污染源的特点及其环境风险特性与评价要求,介绍了生命周期、安全检查表、概率风险、模糊逻辑和层次分析法的应用,并提出了对策性建议。

本书可供环境工程、固体废物管理、矿业工程管理等方面的科研和工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

大宗工业固废环境风险评价/宁平等著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-5024-6655-8

I. ①大… II. ①宁… III. ①工业固体废物—环境生态评价—风险评价—研究 IV. ①X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 156709 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 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王佳祺 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6655-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京佳诚信缘彩印有限公司印刷

2014 年 7 月第 1 版,2014 年 7 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 8 印张; 153 千字; 119 页

30.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 [tougao@cnmp.com.cn](mailto: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](http://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

---

随着中国工业的发展，工业固体废物无论从数量上还是从种类上都在迅速增多。同时，中国制造业、大量资源能源消耗的粗放型经济增长模式在短期内难以发生根本性的改变，导致正以“中国速度”高速增长的中国在未来十几年甚至几十年中，都会面临处理巨量工业固体废物的挑战。2012年，中国工业固体废物产生量高达32.9亿吨，比2000年的8.2亿吨增加了3.0倍，大宗工业固体废物在工业固体废物中的比例超过70%，其中尾矿11.0亿吨、赤泥5300万吨、磷石膏7000万吨。

大宗工业固体废物大量产生与堆放，不仅会造成土地浪费、资源浪费，还会带来潜在的环境风险。近年来，随着尾矿库事故频发，尤其是大宗工业固体废物污染源（尾矿库、渣场）对环境造成的危害日益显现，造成了许多无法挽回的损失，已经引起各级政府和群众的高度重视。大宗工业固体废物污染源（尾矿库、渣场）造成的环境影响范围广，涉及土壤、水、大气、生态平衡等诸多环境因素，不易量化，且因素之间相互制约、相互影响。如尾矿砂成分复杂，易转化；土壤、水等因素相互影响、相互制约；风险高且存在随机性，与时间、雨量、自然灾害等诸多相关不确定因素联系紧密。

虽然环境风险评价方法较多，但目前尚未有一套完整的评价体系来评价典型大宗工业固体废物的尾矿库（渣场）环境风险。因此，迫切需要构建一整套大宗工业固体废物污染源（尾矿库、渣场）环境风险评价体系，以解决大宗工业固体废物污染源（尾矿库、渣场）复杂

的环境系统和多种不确定风险因素的问题，实现大宗工业固体废物污染源（尾矿库、渣场）环境风险定量化评价，为大宗工业固体废物环境管理提供技术支撑。

本书选择产生量大、贮存量高而利用率低，具有潜在环境风险的大宗工业固体废物作为研究对象，通过比对与甄选，选择了铜尾矿、铅锌尾矿、赤泥、锰渣、磷石膏5类工业固体废物作为典型大宗工业固体废物的研究对象，构建典型大宗工业固体废物环境风险评价体系。同时，运用已建立的典型大宗工业固体废物污染源环境风险评价体系，对典型企业进行了风险评价。

通过开展典型大宗工业固体废物污染源环境风险评价，完善了典型大宗工业固体废物污染源环境风险评价技术体系，并对典型大宗工业固体废物的管理提出了对策性建议，为进一步开展典型大宗工业固体废物污染源环境管理提供支持。

本书的内容基于课题组的研究，在研究工作中，易红宏、李凯、李丽、彭新平、马淑花、何丹、胡景丽、普丽、王访、王盼、袁琴、黄彬、赖瑞云、徐先莽、刘烨、李山、刘贵、宋辛、张贵剑、郭惠斌等做了大量的工作。本书的内容得到国家环境保护公益性行业科研专项项目“典型大宗工业固体废物环境管理技术体系研究（201109034）”的支持，在此一并表示感谢！

同时也要感谢支持本书的同事、同仁、学生和助手。由于时间仓促，加之作者水平有限，书中不足之处，恳请广大读者批评指正。

宁平 孙鑫

2014年5月于昆明

# 目 录

1 典型大宗工业固体废物 .....	1
1.1 典型大宗工业固体废物基本性质 .....	1
1.1.1 铜尾矿 .....	1
1.1.2 铅锌尾矿 .....	2
1.1.3 赤泥 .....	2
1.1.4 锰渣 .....	3
1.1.5 磷石膏 .....	5
1.2 典型大宗工业固体废物的环境影响 .....	6
1.2.1 铜尾矿对环境的影响 .....	6
1.2.2 铅锌尾矿对环境的影响 .....	7
1.2.3 赤泥对环境的影响 .....	8
1.2.4 锰渣对环境的影响 .....	10
1.2.5 磷石膏对环境的影响 .....	11
1.3 我国典型大宗工业固体废物的排放现状 .....	12
1.3.1 铜尾矿 .....	12
1.3.2 铅锌尾矿 .....	14
1.3.3 赤泥尾矿 .....	16
1.3.4 锰渣 .....	17
1.3.5 磷石膏 .....	19
1.4 典型大宗工业固体废物综合利用现状 .....	22
1.4.1 铜尾矿的综合利用现状 .....	22
1.4.2 铅锌尾矿的综合利用现状 .....	23
1.4.3 赤泥的综合利用现状 .....	25
1.4.4 锰渣的综合利用现状 .....	26
1.4.5 磷石膏的综合利用现状 .....	29
2 环境风险评价 .....	31
2.1 环境风险评价的国内外现状 .....	31

2.2 环境风险评价相关概念	34
2.2.1 风险与环境风险	34
2.2.2 风险评价与环境风险评价	35
2.2.3 环境风险评价与环境影响评价的区别	35
2.2.4 环境风险评价与安全评价的区别	36
2.2.5 环境风险评价与生态风险评价	36
2.3 环境风险评价的基本内容及指标	36
2.3.1 环境风险评价的基本内容	36
2.3.2 环境风险评价标准和指标	38
2.4 工业固体废物环境风险评价主要方法	39
2.4.1 生命周期评价法	39
2.4.2 安全检查表评价法	43
2.4.3 概率风险评价法	45
2.4.4 模糊逻辑评价法	47
2.4.5 层次分析法	50
<b>3 典型工业固体废物评价体系的构建</b>	<b>54</b>
3.1 框架构建	54
3.1.1 数据收集和分析	55
3.1.2 毒性评价	56
3.1.3 暴露评价	58
3.1.4 风险表征	60
3.2 评价方法的选取	61
3.3 因素指标的选取	62
3.3.1 一、二、三级指标的选取	62
3.3.2 四级指标的选取	64
3.4 权重的计算	66
3.4.1 专家打分	66
3.4.2 构建矩阵	67
3.4.3 检查一致性	67
3.4.4 计算模糊权重	68
3.4.5 解模糊	68
3.5 风险分值计算	68
3.5.1 评价指标打分	68
3.5.2 构建模糊评价向量	69

3.6 评价结果计算 .....	69
<b>4 实例运用 .....</b>	<b>70</b>
4.1 磷石膏尾矿库环境风险评价 .....	70
4.1.1 专家打分 .....	70
4.1.2 构建矩阵, 检查一致性 .....	77
4.1.3 计算模糊权重, 解模糊 .....	77
4.1.4 评价指标风险分值 .....	80
4.2 铜尾矿环境风险评价 .....	83
4.3 铅锌尾矿库环境风险评价 .....	88
4.4 锰渣库环境风险评价 .....	93
4.5 赤泥库环境风险评价 .....	100
4.5.1 赤泥堆场与周边环境概况 .....	100
4.5.2 三级指标相对风险分数值确定 .....	100
4.5.3 评价结果与风险分析 .....	101
4.6 讨论和总结 .....	102
<b>5 典型大宗工业固体废物污染源环境管理 .....</b>	<b>104</b>
5.1 主要共性问题 .....	104
5.1.1 共性环境问题 .....	105
5.1.2 共性环境管理问题 .....	105
5.2 对策及建议 .....	110
5.2.1 原因分析 .....	110
5.2.2 对策建议 .....	111
<b>参考文献 .....</b>	<b>113</b>





# 典型大宗工业固体废物

## 1.1 典型大宗工业固体废物基本性质

### 1.1.1 铜尾矿

进入 21 世纪,我国国民经济飞速发展,铜在用量上仅次于钢铁和铝,是一种关乎国计民生的重要战略资源。中国的铜资源储备在世界各国中总体排名不高,据 2008 年中国金属矿产探明矿山数量显示:铜矿资源有 910 处,总保有储量为 6243 万吨,居世界第 7 位。据统计,我国铜资源量主要集中在西部,西藏、云南、新疆和内蒙古 4 个省区的铜资源量约占全国铜总资源量的 52.8%。近十年来,中国查明铜资源储量由 2001 年的 6917 万吨上升至 2010 年的 8041 万吨,上升了 16.2%。铜储量主要集中在东部省区,仅江西、安徽、黑龙江 3 省就占了我国铜储量的 44%。但是随着工业的进一步发展,对铜的需求量逐渐增大,我国铜资源始终处于短缺状态,且我国的铜矿资源品位低、分散、量少,从而导致我国的铜供求矛盾相当突出,据推测,我国铜资源对外依存度高达 70%。

铜尾矿是铜矿石经过粉碎、浮选取中矿、精矿后余下的粉末状固体,属于固体废弃物的一种。近年来,随着铜矿资源需求量的日益增加,矿产资源利用强度不断提高,矿石产量逐年增加,可开采品位相应降低,从而使得铜尾矿排放量激增。据中国国土资源经济研究院的余良晖等人对我国铜尾矿资源进行的详尽统计分析,1949~2007 年期间,全国铜尾矿的排放总量大约为 24 亿吨,且年产出量呈逐年增加的态势,特别是近几年,铜尾矿排放量的增长更加明显,2007 年已高达 1.8 亿吨。根据较新的调查评价,测算全国铜矿尾矿资源排放总量大致为 15 亿吨,当铜价不低于 35000 元/t 时,铜平均品位不低于 0.077%,使得部分尾矿库中的铜元素具有回选再利用的经济价值。

我国铜矿尾矿具有数量大、粒度细、类型繁多、成分复杂的特点。不同地区尾矿,其化学成分、颗粒特性等存在一定差异。有研究者选取落雪选矿厂的铜尾矿具有代表性的矿样进行多种分析,结果如表 1-1 和表 1-2 所示。

表 1-1 试样光谱分析

元素	Al	Si	B	Mn	Mg	Fe	Ti	Ca	Cu	Ba	S	P
概量/%	1~3	>3	0.003	0.03	0.1	>10	0.03	0.03	0.01	0.1~0.03	0.03	0.03

表 1-2 试样多元素化学分析

元素	TFe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	S	P	Cu	Mn	TiO <sub>2</sub>
含量 (质量分数) /%	12.52	40.87	15.47	14.39	6.23	0.42	0.068	0.058	0.17	0.13	0.28

### 1.1.2 铅锌尾矿

铅锌尾矿是指铅锌矿石经过磨细、有用成分选取等步骤后，排放出去的废弃物，是选矿分选作业中 useful 目标组分含量最低的部分。铅锌尾矿通常是选矿后排放的矿浆经过自然脱水后形成的，是主要的工业固体废物。铅锌尾矿中含有多种矿物质，可视为一种复合的硅酸盐、碳酸盐等矿物材料，其中含有多种重金属（金、银、铜等），其主要成分有 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、SO<sub>3</sub> 等，这些有用金属和矿物，可以进行回收利用。随着选矿技术水平的提高以及矿产资源的日渐紧张，尾矿已成为人们开发利用的二次资源，而且某些传统矿物的尾矿将成为非传统矿物的原料。

铅锌矿尾矿含有多种有害成分，如混杂悬浮物、氰化物、重金属离子、浮选药剂等。中国铅锌矿产地，截至 2006 年年底统计数据：铅 887 处，锌 905 处，有 27 个省、区、市发现并勘查了储量。我国铅锌矿的特点是贫矿多、富矿少，结构构造和矿物组成复杂，有的人选矿石达 30 多种矿物，不少矿石嵌布粒度细微，结构构造复杂，属于难选矿石类型，给选矿带来了困难，产生了大量的尾矿，而我国尾矿的综合利用率仅为 7%，与国外综合利用率为 60% 的先进水平相距甚远。

### 1.1.3 赤泥

赤泥 (red mud) 是从铝土矿中提炼氧化铝后排出的工业固体废物 (废渣)。一般含氧化铁的量较大，外观与赤色泥土相似，因而得名。但有的因含氧化铁较少而呈棕色，甚至灰白色。赤泥的产生量与生产方法及矿石品位有关，一般每生产 1t 氧化铝产出 1.5t 左右赤泥。中国作为世界第 4 大氧化铝生产国，每年排放的赤泥高达数百万吨。据不完全统计，1997 年我国排放赤泥约 163.5 万吨，历年累计堆存量为 2164 万吨，堆存量占地面积为 137.8 万平方米。然而，全世界氧化铝工业每年产生的赤泥超过 7000 万吨，而

2007年中国的赤泥产生量超过3000万吨。

赤泥是氧化铝生产过程中产生的固体废物，其物理性质为：外观呈红色，颗粒直径 $0.08 \sim 0.25 \mu\text{m}$ ，相对密度 $2.7 \sim 2.9$ ，表观相对密度 $0.8 \sim 1.0$ ，碱度 $\text{pH} = 10 \sim 12$ ，熔点 $1200 \sim 1250^\circ\text{C}$ 。赤泥中放射性物质按可比性放射强度计，总 $\alpha$ 值在 $3.7 \times 10^{10} \sim 1.1 \times 10^{11} \text{Bq/kg}$ ，不属于放射性废渣。其化学成分随不同的生产工艺有所不同。山东铝厂、郑州铝厂、贵州铝厂的化学组成见表1-3。就矿物组成而言，烧结法赤泥的矿物组成为硅酸二钙、碳酸钙和铝硅酸钙，并含有大量活性矿物 $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 。拜耳法赤泥在烧结过程中对温度较为敏感，主要矿物组成为铝硅酸钙、铝钛硅酸钙和铝硅酸钠，只是赤泥的综合利用较困难。

表 1-3 不同工艺排出的赤泥的化学成分 (质量分数/%)

赤泥名称	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	烧失量
贵州铝厂拜耳赤泥	12.41	31.00	2.52	23.73	0.69	0.54	4.27	5.70	16.54
贵州铝厂烧结赤泥	20.97	8.10	6.24	45.06	—	0.06	2.76	5.19	9.43
山东铝厂烧结赤泥	21.80	6.00	9.50	47.10	—	—	2.10	2.40	10~12
郑州铝厂混联法赤泥	20.40	7.60	8.20	44.70	—	—	3.00	7.30	10~12
山西铝厂烧结法赤泥	21.44	6.54	5.22	48.16	—	—	2.23	3.40	8.03

#### 1.1.4 锰渣

锰是一种重要的金属元素，主要用作金属材料的合金元素和脱氧剂、脱硫剂，是钢中除铁以外用量最大的元素，有“无锰不成钢”之称。在现代工业中，锰及其化合物作为重要的工业原料，不仅应用于钢铁工业，还应用于化学工业、轻工业、建材行业等国民经济的各个领域。锰矿资源是我国经济建设的重要战略物资。锰矿资源的大量开采促进了经济的快速增长，但由于我国技术落后、环保意识薄弱、约束和监督机制缺乏等多方面原因，开采引发的资源、环境、生态问题也越来越严重。锰矿资源开发利用的可持续性发展面临严峻考验。因此，正确把握当前锰矿资源的开采现状，有针对性地采取相应措施，扬长补短，是社会经济持续、快速、健康发展的保障。我国锰矿资源分布很广，但不平衡。截至2007年年底保有锰矿资源量7.93亿吨，广西、湖南、贵州、重庆、湖北、云南6省（市、自治区）的锰矿资源储量占到了全国资源储量84.2%。

电解锰作为一种重要的冶金、化工原材料，为我国工业发展和地区经济建设作出了巨大贡献。但电解锰行业作为典型的湿法冶金行业，在其快速发展的同时，也引发了严重的环境污染，其中电解锰废渣污染尤为突出。

锰渣主要是湿法电解锰工艺中酸浸工序产生的工业废渣，是用硫酸溶液处理

菱锰矿残留的固体废弃物，硫酸盐、氨氮、锰的浓度极高。锰渣成分复杂，不仅含锰、有机物质和氮、磷、钾、钙、硅等元素，还含有锌、铅、铜、砷等因子，现属一般工业废弃物（Ⅱ类）。

#### 1.1.4.1 锰渣的化学成分及矿物成分

不同产地的锰渣化学成分略有不同，锰渣的化学成分主要以  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$  为主，两者含量在 55% 以上，其次是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$ ，另含有  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SO}_3$  等。表 1-4 列举了不同产地锰渣的化学成分。

表 1-4 不同产地锰渣的化学成分 (质量分数/%)

产地	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{MnO}$	$\text{SO}_3$
湘潭	28.32	10.00	1.65	39.56	3.16	11.42	—
桂北	24.90	18.35	2.40	33.75	1.64	17.70	0.68
新余	28.42	16.60	0.04	39.95	9.35	3.97	0.74
重钢	29.39	12.30	0.52	40.40	7.08	9.81	1.47
阳泉	30.48	12.90	0.68	43.24	6.15	6.96	0.62
昆明	29.31	16.86	0.32	40.16	9.98	4.01	0.76

锰渣的矿物组成与锰渣的冷却工艺和温度有关。水淬锰渣的主要矿物组成为玻璃体（90% 以上），其余为镁蔷薇辉石（ $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ ）、镁黄长石（ $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ ）、钙铝黄长石（ $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ）、硅酸二钙（ $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ）以及少量的硅酸三钙（ $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ）等结晶矿物。大量的玻璃体结构使得锰渣具有较高的潜在活性。

#### 1.1.4.2 锰渣的颗粒特征与放射性

锰渣磨细后颗粒大小不均，大颗粒呈多菱角的不规则多面体，细小颗粒多接近球状或立方体状，颗粒表面或多或少地覆盖着一些其他矿物，这些覆盖在颗粒表面存在着孔洞或者凹面，说明锰渣颗粒表面结构疏松，比完整的晶体易于结构再次破坏而参与化学反应。杨林对贵州两厂的锰渣放射性进行测定，结果表明锰渣可用于生产建筑物室内、外饰面用的建筑材料，以及用于制备室外地砖的建筑材料。

#### 1.1.4.3 锰渣的活性

锰渣具有一定的潜在活性。影响锰渣活性的因素主要有化学组成、玻璃化程

度、细度以及激发组分的种类和掺量等。从化学成分上来看,矿渣的活性一般以碱性系数、活性系数和质量系数来评定。韩静云、安庆锋等对锰渣的3个评定系数进行了评定,结果表明锰渣的各项系数指标都符合活性矿渣的标准,尤其是质量系数与活性系数比标准高出较多。锰渣是活性低于矿渣, S95级水淬锰渣微粉28d活性指数只相当于S75级28d活性指数水平。

### 1.1.5 磷石膏

磷石膏是湿法磷酸生产时排放的固体废弃物,是一种重要的再生石膏资源。然而磷石膏的资源化利用并不令人满意,目前全世界磷石膏的有效利用率仅为4.5%左右。日本、韩国和德国等发达国家磷石膏的利用率相对高一些。以日本为例,由于日本国内缺乏天然石膏资源,磷石膏有效利用率达到90%以上,其中75%左右用于生产熟石膏粉和石膏板。其他不发达国家磷石膏的利用率相对很低,一般以直接排放(抛弃)为主。

2009年中国磷石膏排放量约5840万吨,占工业副产石膏的70%以上。磷石膏是用硫酸分解磷矿制取磷酸过程中的副产物,是生产高浓度磷复肥(如磷酸二铵、磷酸一铵、重钙、磷酸基复合肥等)的主要原料,每生产1t磷酸约副产磷石膏5.0~6.0t(干基),实物量约7.5t,并且磷石膏的产生量还将随着磷矿贫化和高浓度磷复肥产量的提高而大幅度增加,到“十二五”末期年产生量将超过7500万吨(干基)。目前综合利用率不足20%,距国家“十一五”规划工业固体废物综合利用率达到60%的目标尚有较大差距。放置这些废渣不仅占用大量土地,且易造成环境污染,特别是临近江、河、湖、海等环境敏感地区。在20%的磷石膏利用上,主要是用做矿井填充以及生产水泥缓凝剂、石膏粉、纸面石膏板、石膏砌块(含石膏砖)等各种建材产品。

此外,据中国化工矿业协会预测,2015年中国将需硫1720万吨,2020年将需硫2100万吨。中国现有硫铁矿和伴生硫保有储量的保证年限仅为16年,在中国硫资源紧缺的情况下,磷石膏的资源化利用已成为一种必然的选择。鉴于国外磷石膏资源化利用的成熟经验和中国硫资源匮乏的现状,从循环经济的角度来审视磷石膏,磷石膏就不再是一种污染废物,而是一种很好的资源。国家“十一五”规划明确提出要大力发展循环经济,加大环境保护力度。综上所述,进行磷石膏资源化利用研究具有重要的现实意义,既是解决环境污染的需要,也是发展循环经济、有效利用资源的需要。做好磷石膏的硫资源循环和无害化利用,已成为中国磷肥工业能否实现可持续发展的关键。

磷石膏是磷肥工业湿法生产磷酸时排放出的工业废渣,主要成分是 $\text{CaSO}_4 \cdot$

2H<sub>2</sub>O，并含有少量的 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO 和 MgO 等氧化物，微量的重金属离子及放射性元素，以及未分解的磷矿粉、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、F 和游离酸等杂质，如表 1-5 所示。

表 1-5 磷石膏的化学组成

成分	w/%	成分	w/%	成分	w/%	成分	w/%	成分	w/%
CaSO <sub>4</sub>	70.28	MgO	0.05	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.19	SiO <sub>2</sub>	9.84	K <sub>2</sub> O	0.087
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.128	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.28	总 F	0.54	Na <sub>2</sub> O	0.054	其他	17.55

## 1.2 典型大宗工业固体废物的环境影响

### 1.2.1 铜尾矿对环境的影响

金属尾矿废弃地常常因为物理化学上的一些不良特性而成为寸草不生的裸地，不仅压占土地，也是持久而严重的重金属污染源。由于尾砂颗粒细小，易于随风飘散，对周围环境产生影响的范围更大，因此对其治理已成为热点和难点。铜尾矿也不例外，因尾矿中铜含量很高，植物在尾矿上的自然定居极其困难，而且铜等重金属的流失对周边水环境、生态环境、居民的生活环境都会造成危害。具体表现在以下几个方面：

(1) 侵占土地，损伤地表。2011 年我国铜尾矿产生量为 3.07 亿吨，占全国尾矿总量的 19%。大量的尾矿堆积带来了严重的污染和资源浪费。

(2) 引发地质与工程灾害。尾矿库的固体废物长期堆放，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。一般规模较大的废石堆在风力、水力、重力等自然力的作用下，更容易引起滑坡、塌落，雨水量大时易导致泥石流的发生。因此，可见，矿山固体废物的危害之一就是生态环境造成难以恢复的破坏。

(3) 污染环境、破坏生态平衡。尾矿中通常含有较高浓度的有毒重金属，对周围生态环境会产生严重的危害。随着物理、化学条件的改变，尾矿中重金属元素的释放、迁移会对附近土壤等表生环境产生严重的污染。谢建春等研究了铜陵铜尾矿对油菜生长和生理功能的影响，研究表明，油菜种子能在铜尾矿上萌发，但发芽率和发芽速率均小于正常土壤。

(4) 造成严重资源浪费与经济损失。铜尾矿中常含有多种金属元素，如果长期堆放和流失，不及时进行回收和综合利用，不仅污染环境，而且对于国家矿产资源来说也是一个极大的浪费。我国矿产资源利用率很低，其总回收率比发达国家低 20%。

### 1.2.2 铅锌尾矿对环境的影响

铅锌尾矿中含有多种重金属及其他有毒、有害的物质，属于危险固体废物，大量的尾矿对周围环境造成了很大的威胁。大量的尾矿堆弃在尾矿库中，不仅占据了大量的土地，而且尾矿中的有害物质对周围环境及人畜健康造成威胁，严重影响环境质量。

(1) 占用大量土地。矿山固体废物的危害，首先体现在对土地的占用和破坏上。原矿经选矿后 80% 作为废渣堆放在尾矿库中。截至 2006 年年底，我国累计堆放的铅锌尾矿大约在 1.6 ~ 2.0 亿吨，占地 0.2 万公顷。目前，我国每年增加的尾矿堆放量约为 2000 万吨。随着国内铅锌金属需求的不断增加，有关统计表明，我国铅锌尾矿的排放以约 2.5% 的速度逐年增加。由于我国的许多铅锌矿山地处城市和风景区，这些堆放的铅锌尾矿，不仅占据了大量越来越宝贵的土地，而且破坏景观，影响生态健康。

(2) 污染水质和土壤，危害生物生长，破坏生态平衡。铅锌尾矿中含有铅、锌、镉等重金属，残留在尾矿中的选矿药剂含有砷等有毒物质，这些物质对周围环境及生物存在巨大的威胁。大量实验和事实证明，铅锌尾矿中的有害物质污染矿区及周围的土壤、水质以及空气等环境质量，危害矿区生物的生存和发育，威胁人类和矿区其他动物的健康。

国内外多项研究表明，铅锌尾矿对生态环境及周围生物存在威胁。云南会泽废弃铅锌矿复垦地中 Cd、Zn、Pb 3 种重金属的总含量分别为国家三级标准的 35.0、28.0 和 11.3 倍，3 种重金属均达到重污染级。束文圣等所做的凡口铅锌尾矿对植物定居影响的实验结果表明，在栽培试验中，重金属毒性严重抑制格拉姆柱花草根系的活力，使得植物无法利用无机养分，并可导致明显的白化症状，严重影响格拉姆柱花草的生长。滕应等对浙江省天台铅锌银尾矿污染区土壤微生物区系组成及主要生理类群进行了研究。由于尾矿污染区环境的重金属污染，尾矿区土壤微生物区系组成和各生理类群发生了明显变化，土壤细菌、真菌、放线菌以及各种生理类群数量均显著降低。墨西哥的 Texco 的矿区尾矿，河水及沉积物的测定结果显示，所有样品都受到了严重污染：Pb 达到 2750mg/kg，Zn 达到 690mg/kg，As 浓度达到 3530mg/kg。韩国约有 1500 个已经关闭的金属矿山，已经成为矿区农用土地和庄稼重金属污染的主要来源。

(3) 引发重大地质灾害。铅锌尾矿长期堆放，不仅在经济上带来巨大损失，还会引发重大的地质与工程灾害，如尾矿库溃坝，给社会带来极大的损失。在过去的 30 多年里，全世界几乎每年都会发生尾矿存储设施破坏的事故。2001 年 1 月 30 日，罗马尼亚乌鲁尔金矿废水大坝发生泄漏，10 万多升含有氰化物、铜、铅等重金属的污水流入多瑙河支流蒂萨河。污水流经之处，所有生物一律暴毙。

由于我国尾矿综合利用率低,约93%堆放在尾矿库中。有关专家统计,我国主要矿山企业的尾矿库,正常运行的不足70%,甚至有的行业大约44%的尾矿库处于险、病、超期服务状态。我国把尾矿库的危害列为95种重大灾害的第18位。统计表明,我国20世纪80年代以来,发生溃坝事件近百起。

(4) 资源浪费。我国铅锌矿多金属矿产资源丰富,矿石常伴有铜、银、金、铋、碲、锑、硒、钼、钨、锆、镓、铊、硫、铁及萤石等。铅锌尾矿中许多有价金属没有得到利用,尾矿中的大半乃至90%以上的非金属组分更是极少开发利用,严重浪费了资源。我国银产量的70%来自铅锌矿石。铅锌尾矿还可以回收金、钨、铜、重晶石、萤石等,生产水泥熟料和回收绢云母是铅锌尾矿综合利用价值比较高的方式。但是,我国尾矿的综合利用率只有7%,远远落后于发达国家60%的综合利用率。另外,铅锌尾矿还给采矿企业带来了沉重的经济负担。一些企业的尾矿库已快到服务年限,有的还在超期服役。随着尾矿量不断增加,建立新的尾矿库已势在必行。但是,由于征地费用越来越高,尾矿库的维护和维修也需大量的资金,给企业带来巨大的经济负担。全国现有400多座尾矿库,每年的营运费用达7.5亿元。

### 1.2.3 赤泥对环境的影响

赤泥是氧化铝工业排放的红色粉泥状废料,属强碱性有害残渣,含水率高,容重 $700 \sim 1000 \text{kg/m}^3$ ,比表面积 $0.5 \sim 0.8 \text{m}^2/\text{g}$ 。组成和性质复杂,并随铝土矿成分,生产工艺(烧结法、混联法或拜耳法)及脱水,陈化程度有所变化。

赤泥主要组分是 $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ 等,此外还含灼减成分和微量有色金属等。由于铝土矿成分和生产工艺的不同,赤泥中成分变化很大。赤泥中还含有丰富的稀土元素和微量放射性元素,如铷、镓、铊、钽、钼、铈、钍和镧系元素等。赤泥主要成分不属对环境有特别危害的物质,赤泥对环境的危害因素主要是其含 $\text{Na}_2\text{O}$ 的附液。附液含碱 $2 \sim 3 \text{g/L}$ ,pH值可达 $13 \sim 14$ 。赤泥附液的主要成分是 $\text{K}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ 等多种成分,pH值在 $13 \sim 14$ 之间,赤泥对环境的污染以碱污染为主。

目前国内外氧化铝厂大都将赤泥输送堆场,筑坝湿法堆存,且靠自然沉降分离对溶液返回再用;该法易使大量废碱液渗透到附近农田,造成土壤碱化,沼泽化,污染地表地下水源。另一种常用的方法是将赤泥干燥脱水和蒸发后干法堆存。此外,国外氧化铝厂也有填海和特殊植被覆盖处理赤泥的方法,其中填海对环境污染很严重。我国赤泥的处理主要是筑坝堆存。我国氧化铝生产过程中每年产生的赤泥量超过600万吨全部露天堆存,并且大部分堆场坝体用赤泥构筑。目前,人们日益关注赤泥堆放给环境带来的危害。赤泥的堆放不仅占用大量土地,耗费较多的堆场建设和维护费用,而且存在于赤泥中的碱向地下渗透,造成地下



水体和土壤污染。裸露赤泥形成的粉尘随风飞扬，污染大气，给人类和动植物的生存造成负面影响，恶化生态环境。

赤泥对环境的影响主要表现在如下几方面。

(1) 土地和农田的占用。赤泥的存放占用大量土地和珍贵的农田。赤泥的贮存不仅需要占用大面积的土地及投入巨额资金筑坝，同时也需要耗费较多的堆场建设和维护费用，用于堆放赤泥的土地费用占  $\text{Al}_2\text{O}_3$  产值的 1% ~ 2%。

(2) 空气污染。赤泥的粒度因生产工艺有很大的差异，当赤泥脱水风化后，表层的黏结性变差，容易引起粉尘污染。晒干的赤泥形成的粉尘到处飞扬破坏生态环境，而且贮灰场中的赤泥由于风蚀扬尘影响能见度，造成严重污染。但在生产运行期，由于堆场表层一直在排放赤泥浆液，湿度较大，不会引起粉尘污染。此外，在赤泥中有害元素大于  $2\mu\text{m}$  沉积在鼻咽区，小于  $2\mu\text{m}$  的沉积在支气管、肺泡区，被血液吸收，送到人体各个器官，对人类和其他动物的健康的危害极大。

(3) 对建筑物表面、土壤的影响。赤泥呈碱性，因此在潮湿空气中赤泥对建筑物表面有侵蚀性，降落地面的悬浮微粒则使土壤碱性化，造成土壤表面污染，影响种植及放牧。赤泥的强度碱化，会扰乱植物根系正常的生理活动，影响植物对养分的吸收，所以大多数植物都不适宜在赤泥堆场过的土壤中生长。赤泥及其附液的强碱性对地下的黏土层具有极强的盐碱化作用，其强碱性和附液可改变地下黏土层的结构和化学成分。赤泥堆存过的土壤基本不可能被复垦和种植植物。

(4) 地下水污染。赤泥对水体的污染表现为，一方面直接排灰入水体，形成沉淀物、悬浮物、可溶物等，造成污染；另一方面赤泥淋滤液下渗，将会引起地下水体的水质硬度增加，有时甚至造成更严重的砷、铬等元素污染水体。赤泥及其附液的含碱量均很高，赤泥堆场下游的地下水是受赤泥影响的主要对象，在未采取防渗措施的赤泥堆场附近，高碱度的污水渗入地下或进入地表水，使水体 pH 值升高，存在地下水中总硬度及 pH 值升高，超过地下水Ⅲ类水质标准的现象，地下水总硬度最高的接近  $1600\text{mg/L}$ （超标 2.53 倍），pH 值达 11.2（标准为 6.5 ~ 8.5）。赤泥中所含的氟化物也是水体污染的另一个主要的污染物质。氟化物来自氧化铝生产所需的原料，在我国和世界其他一些一体化设备中它也跟随赤泥被一起堆放到堆放场地里。

同时由于 pH 值的高低常常影响水中化合物的化学性质和毒性，因此随着水体的流动，还会造成更为严重的水污染。一般认为碱含量为  $30 \sim 400\text{mg/L}$  是公共水源的适合范围，饮用水中氟化物的含量标准为  $0.5 \sim 1.0\text{mg/L}$ ，而赤泥附液的碱度高达  $26348\text{mg/L}$ ，浸出液的 pH 值为 12.1 ~ 13.0，氟化物含  $11.5 \sim 26.7\text{mg/L}$ ；当赤泥中污染元素在水中聚集到一定程度时，水体便具有了毒性。例