

冶金过程污染控制与资源化丛书

冶金企业污染土壤和 地下水整治与修复

孙英杰 孙晓杰 赵由才 主编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

冶金过程污染控制与资源化丛书

冶金企业污染土壤和 地下水整治与修复

孙英杰 孙晓杰 赵由才 主编

北京
冶金工业出版社
2008

图书在版编目 (CIP) 数据

冶金企业污染土壤和地下水整治与修复/孙英杰, 孙晓杰, 赵由才主编. —北京: 冶金工业出版社, 2008. 1
(冶金过程污染控制与资源化丛书)
ISBN 978-7-5024-4416-7

I. 冶… II. ①孙… ②孙… ③赵… III. ①冶金-过程-土壤污染-污染防治 ②冶金-过程-地下水污染-污染防治 IV. X53 X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 184114 号

出版人 曹胜利

地址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 程志宏 美术编辑 李心 版式设计 张青

责任校对 符燕蓉 李文彦 责任印制 丁小晶

ISBN 978-7-5024-4416-7

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2008 年 1 月第 1 版; 2008 年 1 月第 1 次印刷

850mm×1168mm 1/32; 8.75 印张; 254 千字; 263 页; 1-3000 册

29.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

冶金过程污染控制与资源化丛书

编 委 会

主 任 赵由才

副主任 刘 清

委 员	马建立	唐 平	曹先艳	孙晓杰
	孙英杰	宋立杰	李鸿江	招国栋
	钱小青	肖 灿	王金梅	牛冬杰
	柴晓利	郭 斌		

丛书前言

冶金工业是一门既古老又现代的工业门类。黑色金属(钢铁)、有色金属(包括铜、锌、铅、铬、镍等)、稀有金属(包括钨、钼、钽、铌等)、贵金属(包括金、银、铂、钯等)、放射性金属(铀、钋等)、稀土金属等的各种形态物质的生产、加工等均属于冶金工业的范畴。

冶金工业是我国国民经济的支柱产业之一,为社会的发展做出了重要贡献。然而,冶金企业造成的环境污染与资源浪费也是相当严重的。每生产1t钢的总耗水量为100~300t。虽然水的循环使用率已大大提高,但每吨钢需要处理的废水一般仍达50t左右。废水中带有大量有害的悬浮泥渣及溶解物质,而且温度较高(30~60℃),直接外排会造成热污染。钢铁工业造成的大气污染尤为严重,每生产1t钢要产生废气10000m³,粉尘100kg,废气中含有一氧化碳、二氧化硫及氧化铁等有害物质。此外,生产1t钢还要产生近0.5t钢铁废渣。由于冶金工业产生的污染物数量大、毒性强、品种多,造成的环境问题极为严重,因此对冶金工业污染的处理处置及资源化有着巨大的环境价值、经济价值和社会价值。多年来,我国各级政府、相关企业对冶金污染控制与资源化做了大量研究开发和整治工作,取得了明显的成效,积累了大量的经验教训。然而,国内外相关资料比较分散,部分冶金学术著作中对其污染控制与资源化虽有所描述,但并不全面和系统,读者难以系统深入了解和掌握,故实用性较差。

本丛书全面系统地描述了国内外冶金污染控制与资源化

的原理、技术、应用工艺、管理、法律和法规等内容，包括冶金过程固体废物处理与资源化、冶金过程大气污染控制与资源化、冶金过程废水处理与利用、矿山固体废物处理与资源化、冶金企业废弃生产设备设施处理与利用、冶金企业污染土壤和地下水整治与修复、绿色冶金与清洁生产等。

这套丛书适合于大、中专院校教学使用，也可供从事环境保护的工程技术人员、国家和地方政府的工业管理部门以及科技管理部门的相关人员阅读和参考。

本丛书中所引用的国内外文献资料均在参考文献或文中列出，但由于参考文献来源广泛，如编者在归纳、整理中出现遗漏，请有关资料作者谅解。

赵由才

2007年1月

于同济大学明净楼

前 言

在矿山开采、选矿及金属冶炼一系列过程中，大量的废气、废渣和废水被排放到了自然环境中，这些废弃物所含的污染物（主要是重金属）对土壤和地下水造成了巨大的污染，严重影响了生态平衡，给人类健康带来极大的隐患。例如，全国受重金属污染的耕地多达 2000 万公顷，每年生产出来受重金属污染的粮食达到 1200 万 t。据不完全统计，在我国，不经处理而外排的矿井水约 $2.2 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ ，这些矿井水中含大量悬浮物和重金属离子等污染物，必然对土壤和地下水造成污染。在许多重点地区，土壤及地下水污染已导致癌症等疾病的发病率和死亡率明显高于没有污染的对照区。因此，对冶金行业所污染的土壤和地下水进行治理和修复迫在眉睫。

对被污染土壤和地下水的修复是当今环境科学和环境工程的热点领域，涉及环境工程、环境科学、水利工程、生态工程、土壤学等学科。本书针对冶金工业的污染问题，详细介绍了冶金工业对地下水和土壤的污染及其危害以及重金属在土壤和地下水中的迁移转化规律和存在形态。在此理论基础之上，着重介绍了被污染土壤和地下水修复的基本概念、适用于冶金工业污染土壤和污染地下水的修复技术以及土壤修复后的生态评价等内容。

全书共分为六章，主要编写人员：孙晓杰、赵由才（第一章）；孙晓杰、孙英杰、赵由才（第二章）；王文超、张华、孙英杰（第三章）；孙晓杰、谢震震、赵由才（第四章）；孙英杰、赵由才（第五章）；王文超、张华、孙英杰（第六章）。

本书由孙晓杰、孙英杰、赵由才担任主编，并负责全书统稿工作。

由于编者水平有限，书中不妥之处，敬请有关专家及广大读者批评指正。

编 者

2007年5月

于同济大学污染控制与
资源化研究国家重点实验室

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
产业循环经济	69.00
环境保护及其法规 (第2版)	45.00
可持续发展的环境压力指标及其应用	18.00
环境污染控制工程	49.00
材料环境学	30.00
环境地质学	28.00
环境生化检验	18.00
环境噪声控制	19.00
矿山环境工程	22.00
环境材料导论	18.00
工业固体废物处理与资源化	39.00
钢铁冶金的环保与节能	39.00
水资源系统运行与优化高度	10.00
工业企业防震减灾工指南	55.00
绿色冶金与清洁生产	49.00
冶金过程固体废物处理与资源化	39.00
矿山固体废物处理与资源化	26.00
冶金过程废水处理与利用	30.00
冶金过程废气污染控制与资源化	
冶金企业废弃生产设备设施处理	55.00

目 录

1 土壤及土壤修复	1
1.1 土壤的组成	1
1.1.1 土壤矿物质	2
1.1.2 土壤有机质	2
1.1.3 土壤生物	3
1.1.4 土壤溶液	3
1.1.5 土壤气体	4
1.2 土壤性质	4
1.2.1 物理性质	4
1.2.2 化学性质	6
1.2.3 微生物性质	13
1.3 土壤污染与自净	14
1.3.1 土壤污染及其危害	14
1.3.2 土壤自净	18
1.4 污染土壤修复的发展概况、趋势及内容	19
1.4.1 土壤修复的发展概况	19
1.4.2 土壤修复的发展趋势	20
1.4.3 土壤修复学的特征及研究任务	21
1.4.4 土壤修复学的未来研究与发展战略、前沿科技 问题和重要方向	21
1.5 污染土壤修复基本方法	23
1.5.1 物理修复法	23
1.5.2 化学修复法	24
1.5.3 生物修复法	25

2 冶金工业污染土壤	28
2.1 冶金工业对土壤的污染.....	28
2.1.1 冶金工业废物分类及对土壤的污染.....	28
2.1.2 冶金工业污染土壤的特点.....	29
2.1.3 冶金工业污染土壤的危害.....	30
2.1.4 冶金工业污染土壤的控制措施.....	31
2.2 重金属对土壤的污染.....	33
2.2.1 土壤重金属污染.....	33
2.2.2 重金属污染的特点.....	34
2.2.3 重金属在土壤中的迁移转化.....	35
2.2.4 重金属在土壤体系中的生物效应.....	43
2.3 重金属在土壤-植物系统中迁移积累规律.....	44
2.3.1 重金属在土壤-植物系统中迁移及影响因素.....	44
2.3.2 土壤-植物系统的净化功能.....	46
2.4 汞污染土壤.....	49
2.4.1 土壤中汞的背景值.....	49
2.4.2 土壤汞污染的来源.....	50
2.4.3 土壤中汞的存在形态.....	50
2.4.4 汞在土壤中的迁移转化.....	51
2.4.5 汞污染的危害.....	53
2.5 镉污染土壤.....	54
2.5.1 土壤中镉的背景值.....	54
2.5.2 土壤镉污染的来源.....	55
2.5.3 镉在土壤环境中的形态.....	55
2.5.4 镉在土壤中的迁移转化.....	56
2.5.5 镉污染的危害.....	57
2.6 铬污染土壤.....	58
2.6.1 土壤中铬的背景值.....	58
2.6.2 土壤铬污染的来源.....	59

2.6.3	土壤中铬的形态	59
2.6.4	铬在土壤中的迁移转化	59
2.6.5	铬污染的危害	61
2.7	铅污染土壤	61
2.7.1	土壤中铅的背景值	61
2.7.2	土壤铅污染的来源	62
2.7.3	土壤中铅的形态	62
2.7.4	铅在土壤中的迁移转化	63
2.7.5	铅污染的危害	64
2.8	砷污染土壤	64
2.8.1	土壤中砷的背景值	64
2.8.2	土壤砷污染的来源	65
2.8.3	土壤中砷的形态	65
2.8.4	砷在土壤中的迁移转化	66
2.8.5	砷污染的危害	67
2.9	铜污染土壤	67
2.9.1	土壤中铜的背景值	67
2.9.2	土壤铜污染的来源	68
2.9.3	土壤中铜的形态	69
2.9.4	铜在土壤中的迁移转化	70
2.9.5	铜污染的危害	71
2.10	锌污染土壤	72
2.10.1	土壤中锌的背景值	72
2.10.2	土壤锌污染的来源	72
2.10.3	土壤中锌的形态	72
2.10.4	锌在土壤中的迁移转化	73
2.10.5	锌污染的危害	74
3	冶金工业污染土壤的修复技术	75
3.1	概述	75

3.1.1	污染土壤修复技术	75
3.1.2	冶金工业污染土壤的修复技术	77
3.2	冶金工业污染土壤的植物修复技术	78
3.2.1	植物修复技术的含义和特点	78
3.2.2	植物修复重金属污染土壤的作用机理及方式	82
3.3	冶金工业污染土壤的微生物修复技术	95
3.3.1	概述	95
3.3.2	影响微生物修复功能的环境因素	96
3.3.3	微生物对重金属污染土壤的修复机理	98
3.3.4	土壤重金属污染的微生物修复工程设计	101
3.3.5	微生物修复技术分类	102
3.3.6	冶金工业中几种重金属污染的微生物修复	104
3.4	冶金工业污染土壤的化学修复技术	108
3.4.1	原位化学淋洗修复技术	108
3.4.2	异位化学淋洗技术	109
3.4.3	原位化学氧化还原技术	123
3.5	冶金工业污染土壤的物理化学修复技术	124
3.5.1	固化-稳定化土壤修复技术	124
3.5.2	电动力学修复技术	132
3.5.3	物理分离修复技术	144
4	污染土壤诊断与修复效果的检测	150
4.1	污染土壤诊断	150
4.1.1	污染土壤诊断的概念	150
4.1.2	污染土壤诊断类型	150
4.1.3	污染土壤诊断方法	153
4.2	污染土壤修复基准	157
4.2.1	修复技术	157
4.2.2	环境背景值	158
4.2.3	仪器检测水平	161

4.2.4 法律法规	164
4.3 污染土壤修复效果评价	178
4.3.1 土壤环境背景值	179
4.3.2 生物-土壤系统法(土壤污染临界值)	180
4.3.3 化学法	180
4.3.4 土壤动物	181
5 地下水与地下水污染	184
5.1 地下水概述	184
5.1.1 地下水的含义	184
5.1.2 地下水分类	184
5.2 地下水物理环境和化学环境	187
5.2.1 物理环境	187
5.2.2 化学环境	188
5.3 地下水环境背景值	190
5.3.1 地下水环境背景值的概念	190
5.3.2 地下水环境背景值的形成	191
5.3.3 地下水环境背景值的确定	192
5.4 地下水污染	197
5.4.1 地下水污染的含义	197
5.4.2 地下水污染物与污染源	198
5.4.3 地下水污染的方式	202
5.4.4 地下水污染途径	202
6 冶金工业污染地下水的修复技术	205
6.1 用于冶金工业污染地下水的修复技术	205
6.1.1 物理化学修复	205
6.1.2 生物修复	209
6.2 传统修复技术	211
6.2.1 技术原理	212

6.2.2	实施方法	213
6.3	生物修复技术	218
6.3.1	概述	218
6.3.2	地下水生物修复的微生物原理	220
6.3.3	地下水生物修复过程	221
6.3.4	生物修复设计原理	223
6.3.5	典型原位生物修复系统	225
6.3.6	地下水的自然生物修复	227
6.4	污染带阻隔墙技术	230
6.4.1	概论	230
6.4.2	活性渗滤墙修复原理	233
6.4.3	PRB的结构类型	235
6.4.4	技术优势及存在问题分析	236
6.4.5	应用状况	237
6.4.6	与之相关的修复技术	240
6.5	原位化学反应技术	242
6.5.1	重金属沉淀	242
6.5.2	原位化学氧化	243
6.6	重金属污染地下水的电动力学修复技术	248
6.6.1	技术原理	248
6.6.2	技术优缺点	252
	参考文献	253

土壤是指地球陆地表面具有一定肥力且能生长植物的疏松表层。它是自然环境要素的重要组成部分之一，是岩石风化和母质的成土两种过程综合作用下形成的产物，是人类和生物赖以生存的物质基础。一般说来，在气候、生物等自然因素作用下形成的土壤称为自然土壤；在耕种、施肥、灌排等人为因素作用下，改变着土壤的自然特性，从而使之成为耕作土壤。由于各地的自然和人为因素不同，因而可形成各种不同类型的土壤。土壤类型也会因某些因素的改变而发生变化。如人们不合理地利用土壤，可能引起土壤沙化、土壤次生盐渍化等不良后果。

土壤修复是在传统土壤化学等分支学科体系的基础上，借鉴并汲取了土壤生物、植物营养、化学地理、农业化学、生物化学、环境化学、环境工程、环境信息相关学科的基本理论、方法和技术，逐步发展成为以污染场地、土壤特征、污染风险评估与预测、污染土壤控制与修复原理及技术研发应用、土壤修复效率及功能指示与标准、修复后土壤保育、综合管理和生物资源处理处置等为核心研究内容，并且具有鲜明学科交叉特点的土壤学分支学科。它的形成和发展与全球范围土壤污染的普遍性、严峻性和复杂性有着密切的关系。

1.1 土壤的组成

土壤是由矿物质、有机质和活的生物有机体以及水分、空气等固体、液体、气体三相组成的，它们的相对含量因地因时而异。土壤固相部分包括矿物质和有机质，按重量计，矿物质可占固相部分 90%~95% 以上，有机质约占 1%~10%，因此，土壤是一个以矿物质为主的物质体系；土壤液相是指土壤中水分及其

水溶物；土壤气相是指土壤空隙中充满的空气。

1.1.1 土壤矿物质

土壤矿物质是构成土壤的主体物质，来源于成土母质，是岩石经物理和化学风化形成的。土壤矿物质的组成、结构和性质对土壤物理性质、化学性质和生化性质均有深刻影响。研究土壤矿物质是认识土壤的基础。

土壤矿物质按其成因可分为原生矿物和次生矿物两大类。

(1) 原生矿物是各种岩石（主要是岩浆岩）受不同程度物理风化的碎屑物，其未改变原有的化学组成和结晶构造，主要包括长石类、云母类、辉石类、角闪石类、石英、赤铁矿、金红石、黄铁矿、磷灰石等。土壤中原生矿物的种类和含量因母质类型、风化强度和成土过程不同而不同，主要有硅酸盐、氧化物、硫化物和磷酸盐 4 类矿物。土壤中 1~0.001mm 的砂和粉砂几乎全部是原生矿物。

(2) 次生矿物主要是由原生矿物经化学风化后重新形成的新矿物，其化学组成与结构已发生了变化。次生矿物的种类和数量很多，因土壤的不同而不同，主要有简单盐类、三氧化物类和次生铝硅酸盐类 3 类。土壤中次生矿物的颗粒很小，粒径一般小于 0.25 μm ，具有胶体的性质。常见的次生矿物有方解石(CaCO_3)、白云石[$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、芒硝、针铁矿($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、褐铁矿($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)、伊利石、蒙脱石和高岭石等。

1.1.2 土壤有机质

土壤有机质是指以各种形态存在于土壤中的含碳有机化合物，是土壤中最活跃的部分，一般来源于动植物残体和微生物残体。土壤中的有机质在微生物的作用下，有矿化和腐殖化两个转化过程。矿化过程是将有机物完全转化为无机物的过程；腐殖化过程是将土壤中难降解态的物质转化为一种复杂的高分子有机化