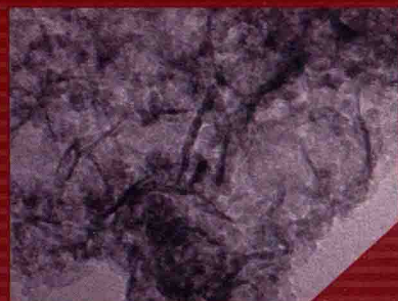
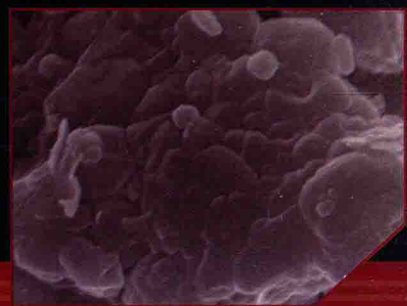
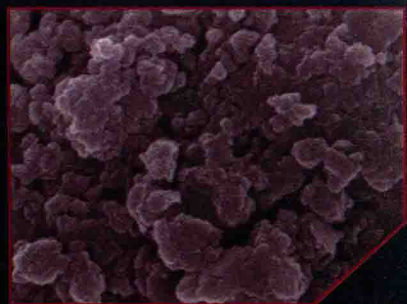


曹建亮 著

赤泥高效利用 与环境能源催化

Environmental and
Energy Catalysis
Application of
Red Mud



化学工业出版社

中南大学图书馆

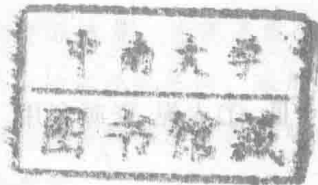


101149460

曹建亮 著

赤泥高效利用 与环境能源催化

**Environmental and
Energy Catalysis
Application of
Red Mud**



化学工业出版社

· 北京 ·

我国是氧化铝生产大国，赤泥是铝加工工业从铝土矿中提炼氧化铝后，残留的固体废渣，其综合利用、改性处理、高效环境资源化已成为氧化铝产业日益关注的热点与难题。

本书倡导赤泥的高附加值利用。全书是以作者近几年在该领域的研究成果，结合国内外新技术与成果为基础编写而成。主要介绍了赤泥的产生，赤泥的基本性质，赤泥的危害，赤泥的综合利用现状，赤泥综合利用中存在的问题、发展趋势，赤泥脱碱及其碱液在烟气脱硫中的应用，赤泥造孔及多孔赤泥在有机污染物脱除中的应用，赤泥负载氧化铜催化剂催化 CO 低温氧化脱除，改性赤泥负载镍催化剂的制备及其氨分解制氢性能等方面的内容。

全书内容丰富，系统性、理论性、指导性、实用性较强，可供环境工程、冶金工业、矿物加工、能源工程等领域研究人员、工程技术人员和管理人员参考，也可作为高等学校相关专业的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

赤泥高效利用与环境能源催化/曹建亮著. —北京:

化学工业出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-122-28635-2

I. ①赤… II. ①曹… III. ①赤泥-资源利用
IV. ①TF821

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 298132 号

责任编辑: 朱 彤

责任校对: 宋 玮

文字编辑: 孙凤英

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市瞰发装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 10 $\frac{1}{4}$ 字数 156 千字 2017 年 11 月北京第 1 版第 1 次印刷


购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究



**Environmental and
Energy Catalysis
Application of
Red Mud**

前言



FOREWORD

环境污染和石油危机是当今世界面临的两大主要问题，能源与环境面临的可持续发展问题成为当前科学家们关注的热点，可再生能源与新能源这类绿色清洁能源的开发和利用成为普遍关注的主要研究方向之一。

赤泥是铝加工工业从铝土矿中提炼氧化铝后，残留的一种红色、粉泥状、高含水量的强碱性固体废渣，其综合利用已成为世界性难题，赤泥中的许多可利用成分不能得到合理利用，造成了严重的二次资源浪费。赤泥是氧化铝工业所产生的固体废物，由于氧化铝生产工艺的不同，所产生的赤泥也不同。采用烧结法或用烧结法和拜耳法联合生产氧化铝，所产生的赤泥分别称为烧结法赤泥和联合法赤泥；采用拜耳法生产氧化铝，所产生的赤泥称为拜耳法赤泥。

目前，国内外科研工作者开展了一些赤泥改性处理与资源化利用方面的研究工作，如拜耳法赤泥用于选铁分砂，烧结法赤泥用于电厂锅炉脱硫，赤泥作为配料应用于水泥生产，利用赤泥、粉煤灰、煤矸石等固体废物进行配料生产新型环保陶瓷滤料，赤泥用作墙体材料和路基材料，赤泥生产土壤调节剂-赤泥硅肥等。但是以上利用方式均为低附加值利用，而且存在一定的安全隐患和环保问题，且可能对环境造成二次污染。因此，以氧化铝赤泥为原料，进行高附加值利用的应用基础研究是目前亟待开展的工作。

工业固体废物赤泥的改性处理与高效资源化利用已经成为环境和能源领域的研究热点。本书是以笔者在该领域近几年的研究成果为基础编著而成，主要介绍了赤泥的产生，赤泥的基本性质，赤泥的危害，赤泥的综合利用现状，赤泥综合利用中存在的问题及发展趋势，赤泥脱碱及其碱液在烟气脱硫中的应用，赤泥造孔及多孔赤泥在有机污染物脱除中的应用，赤泥负载氧化铜催化剂催化CO低温氧化脱除，改性赤泥负载镍催化剂的制备及其氨分解制氢性能等方面的研究工作。全书做到方法具体、内容新颖充实、分析深入，适宜于作为催化科学、矿物加工工程、能源化工和相关边缘学

科研究的参考书。

本书由曹建亮执笔。在本书写作过程中，还得到王燕的大力帮助。全书在成稿和勘校过程中也得到了马名杰教授、张传祥教授、孟哈日巴拉教授、王晓冬博士、孙广博士、陈泽华博士和研究生秦聪、宫雨晓、王毅、燕昭利、李高杰、刘素珍等的全力协助；出版时还得到国家自然科学基金（51404097，51504083）和河南省高校科技创新团队支持计划（16IRTSTHN005）的资助，在此一并表示感谢！

由于工业固体废物赤泥综合利用的快速发展变化，加之笔者水平所限，疏漏之处在所难免，敬请专家读者批评指正。

著者

2017年5月

目录



CONTENTS

第 1 章 绪论

1.1 赤泥概述	2
1.1.1 赤泥的产生	2
1.1.2 赤泥的基本性质	4
1.1.3 赤泥的危害	6
1.2 赤泥综合利用现状	9
1.2.1 用作建筑和结构材料	11
1.2.2 用作生产硅钙复合肥	14
1.2.3 用作吸附剂	14
1.2.4 金属元素的回收	16
1.2.5 用作催化材料	20
1.3 赤泥综合利用中存在的问题以及发展趋势	25
1.3.1 赤泥利用中存在的问题	25
1.3.2 赤泥综合利用发展趋势	26
参考文献	28

第 2 章 赤泥脱碱及其碱液在烟气脱硫中的应用

2.1 拜耳法赤泥的基本特性	32
2.1.1 矿物组成	32
2.1.2 化学组成	33

2.1.3	粒度和比表面积分析	34
2.1.4	微观形貌分析	34
2.1.5	碱性特征分析	36
2.2	赤泥脱碱	37
2.2.1	赤泥烧结特性	38
2.2.2	赤泥浸碱影响因素及规律分析	46
2.3	赤泥浸碱液在烟气脱硫中的应用	58
2.3.1	赤泥浸碱液中氢氧化钠含量的计算	58
2.3.2	赤泥浸碱液吸收 SO ₂ 的能力	60
	参考文献	64

第3章 赤泥造孔及多孔赤泥在有机污染物脱除中的应用

3.1	聚苯乙烯微球作为规整孔材料模板应用的研究现状	66
3.2	废水有机污染物脱除研究现状	68
3.2.1	吸附法	69
3.2.2	生物法	70
3.2.3	光催化氧化法	71
3.2.4	五氯酚的污染现状及其危害	73
3.2.5	金属氧化物纳米材料应用于废水有机污染物脱除的研究现状	74
3.3	分级孔赤泥的制备	75
3.3.1	原料	75
3.3.2	制备方法	75
3.4	分级孔赤泥结构表征及其在有机污染物脱除中的应用	76
3.4.1	结构表征	76
3.4.2	有机污染物脱除性能	78
	参考文献	80

第4章 赤泥负载氧化铜催化剂催化 CO 低温氧化脱除

4.1	CO 低温氧化催化剂研究现状	84
4.1.1	CO 的危害和脱除方法	84

4.1.2	CO 低温催化氧化机理	85
4.1.3	CO 低温氧化催化剂	87
4.2	赤泥负载氧化铜催化剂制备和表征	101
4.2.1	催化剂制备	101
4.2.2	催化剂表征手段	102
4.2.3	催化剂表征分析	103
4.3	赤泥负载氧化铜催化剂 CO 低温氧化性能	109
4.3.1	CuO 的负载量对催化性能的影响	109
4.3.2	催化剂预处理条件对催化性能的影响	110
4.3.3	赤泥负载氧化铜催化剂 CO 低温催化氧化性能总结	110
	参考文献	112

第 5 章 浸渍法制备赤泥负载镍催化剂及其氨分解制氢性能

5.1	清洁能源氢气获取方法研究现状	116
5.1.1	常用的氢气获取方法	116
5.1.2	氨分解制备氢气的优势和研究中存在的问题	118
5.2	赤泥负载镍催化剂的浸渍法制备、表征	119
5.2.1	催化剂制备	126
5.2.2	催化剂表征	128
5.3	浸渍法制备赤泥负载镍催化剂的氨分解制氢性能	134
5.3.1	Ni 负载量对氨分解性能的影响	134
5.3.2	催化剂预处理条件对催化性能的影响	135
5.4	总结与分析	137
	参考文献	137

第 6 章 均相沉淀法制备赤泥负载镍催化剂及其氨分解制氢性能

6.1	赤泥负载镍催化剂的均相沉淀法制备和表征	140
6.1.1	催化剂制备	140
6.1.2	催化剂表征	140
6.2	均相沉淀法制备赤泥负载镍催化剂的氨分解制氢性能	149

6.2.1 Ni 负载量对氨分解性能的影响	149
6.2.2 焙烧温度对氨分解性能的影响	151
6.2.3 Ni 元素分散度对氨分解性能的影响	152
6.3 总结与分析	153
参考文献	153

第1章

绪论

1.1 赤泥概述

1.1.1 赤泥的产生

因为氧化铝既能溶于碱，也能溶于酸，所以生产氧化铝的方法有许多种，其中包括酸法、碱法、酸碱联合法以及热法等。因为酸法在生产过程中所用的酸具有强烈的腐蚀性，所以目前工业上普遍采用碱法生产氧化铝。碱法生产氧化铝主要是利用氢氧化钠或者碳酸钠溶液和氧化铝发生反应制备成铝酸钠溶液，同时铝土矿中的大量钛、铁以及二氧化硅等杂质进入赤泥中；然后经过固液分离后，对分离出的液体进行净化处理，即可获得氧化铝。常见的碱法生产氧化铝包含三种，即烧结法、拜耳法和联合法。采用以上三种不同的氧化铝生产工艺，就会产生三种不同类型的氧化铝赤泥。

我国烧结法和联合法生产氧化铝过程中所产生的赤泥一般具有高硅、高钙、低铁的特点，不适宜作为催化剂在环境和能源催化过程中进行利用。因此，本书提到的赤泥的环境和能源催化应用均针对拜耳法赤泥。

(1) 拜耳法赤泥

拜耳法生产氧化铝工艺是由 K. J. 拜耳在 1889 年~1892 年所提出并以其名字命名的。最初的拜耳法生产氧化铝工艺由两个过程组成：一是铝酸钠溶液的晶种分解过程，氧化钠和氧化铝物质的量比为 1.8 的铝酸钠溶液在常温下，添加氢氧化铝作为晶种，不断搅拌，溶液中的铝酸钠便可转化为氢氧化铝而徐徐析出，直到其中的氧化钠和氧化铝物质的量比提高到 6 为止；二是利用种分母液溶出铝土矿的过程，在上一过程中析出的大部分氢氧化铝溶液，在加热时又可以溶出铝土矿中的氧化铝水合物^[1]。

具体的化学反应过程如下：



该反应是在一定的温度和高压条件下，以 NaOH 溶液溶出铝土矿，使其中的氧化铝水合物按式(1-1)反应向右进行得到铝酸钠溶液；溶出铝土矿后，形成赤泥和铝酸钠的混合浆液，浆液经过稀释沉降或过滤使赤泥和铝酸钠溶液

彻底分离，分离后从铝酸钠溶液中生产出氧化铝，而赤泥需多次洗涤才能降低氧化钠和氧化铝的损失；最后，经过沉降压滤所得的滤渣即为常见的拜耳法赤泥。

目前，全世界生产的氧化铝和氢氧化铝，有90%以上是采用拜耳法工艺获得的。拜耳法赤泥粒度较细，化学成分中 Al_2O_3 含量较高， SiO_2 和 CaO 含量较低，主要由水化石榴石、水合硅铝酸盐以及霞石所组成^[2]。

拜耳法氧化铝生产工艺主要用于低硅铝土矿处理，尤其是在三水铝石型铝土矿处理时，作业方便、流程较简单、经济效益大、产品质量高。

(2) 烧结法赤泥

早在拜耳法提出之前，法国人勒·萨特里在1858年就提出了碳酸钠烧结法生产氧化铝技术。但是，由于其成品氧化铝质量差、流程复杂且耗能大，所以拜耳法氧化铝生产工艺问世后，烧结法就被淘汰了。后来，人们也研究了几种不同的烧结法，但目前用在工业上的只有碱石灰烧结法，即通常所说的烧结法。

烧结法是由碱、石灰和铝土矿组成的炉料经过烧结，使炉料中的氧化物在回转窑中于 1200°C 以上的温度下烧结转变为铝酸钠($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)、铁酸钠($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)、原硅酸钙($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)和钛酸钙($\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$)；用水或稀碱液溶出时，铝酸钠进入溶液，铁酸钠水解为 NaOH 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 沉淀，而难溶性原硅酸钙和钛酸钙转入泥渣中被排出，得到的铝酸钠溶液经过净化精制，通入二氧化碳进行碳酸化分解，便能析出 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。碳分母液（碳酸化分解后的溶液，其主要成分为 Na_2CO_3 ）经蒸发浓缩后返回配料烧结，循环使用。 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 经过焙烧即可获得产品 Al_2O_3 ，而排出的泥渣即为烧结法赤泥^[1]。由于与拜耳法生产氧化铝所用原料铝土矿品位不同，烧结法赤泥经高温焙烧，其中含有大量的硅酸二钙；相应的，氧化钙和氧化硅含量也比较多，并且由于硅酸二钙的难磨性，烧结法赤泥粒度较粗^[2]。

(3) 联合法赤泥

烧结-拜耳联合法可以分为并联、串联以及混联三种基本流程，该法不仅可以扬长避短，而且为流程中两个系统工艺和设备的最佳化提供了新的可能

性。但是，联合法较适宜处理铝硅比值为 5~7 的铝土矿，而且流程比较复杂。只有当生产规模较大时，采用联合法才是可行和有利的，而且各种联合法都应以拜耳法为主，才能取得更好的经济效益^[3]。由于其生产工艺的特点，联合法赤泥同时具有拜耳法赤泥和烧结法赤泥两种赤泥所具有的性质。

现从赤泥的产生方式和过程来比较拜耳法赤泥、烧结法赤泥和联合法赤泥的特性。烧结法赤泥和联合法赤泥都是经过高温反应生成的不可溶物和溶出过程中的水解、水化产物的衍生物以及二次副反应生成的新生不可溶物。相对来说，拜耳法赤泥则是铝土矿和苛性碱、石灰经过高压过程，氢氧化铝溶出后产生的废渣，主要成分是水化石榴石、钙霞石、钙钛矿、一水硬铝石以及方解石等，其中的氧化铁、氧化铝以及 Na_2O 含量都比较大，氢氧化钠、氧化钙和氧化硅的含量相对较小^[4]。

我国氧化铝生产从无到有，至今已有近 70 年历史。我国第一家氧化铝厂——原山东铝厂于 1954 年投产，采用碱石灰烧结法生产工艺，后来进行扩产改造。

目前，因矿石资源不同，国内上述三种工艺路线并存^[5]。

1.1.2 赤泥的基本性质

赤泥是一种在氧化铝生产过程中排放出来的工业固体废物，因其内含大量氧化铁而呈红色粉末状，故被称为赤泥。赤泥具有放射性和强碱性，含有天然放射性元素镭、钍、铀^[6,7]。赤泥的产出量和成分因矿石的品位和氧化铝的生产方法、技术水平而异。据估计，每生产 1t 氧化铝同时会产出 0.5~2.0t 赤泥。

赤泥的基本物化性质如下：一般情况下，赤泥的平均粒径不大于 $10\mu\text{m}$ ，并且粒径小于 $75\mu\text{m}$ 的赤泥占总赤泥量的 90% 以上。赤泥的比表面积为 $10\sim 25\text{m}^2/\text{g}$ ，塑性指数 $17.0\sim 30.0$ ，孔隙比为 $2.53\sim 2.95$ ，含水量 $79.03\%\sim 93.23\%$ ，pH 值在 $10\sim 12$ 之间，氟化物含量为 $4.89\sim 8.6\text{mg}/\text{L}$ ^[8]。赤泥属于一般固体废物，具有强碱性。除此之外，赤泥还具有含水量大、抗剪强度低、压缩性高以及塑性良好等特点^[9]。铝土矿中的杂质主要有铁、硅、镁、钛以及钙的氧化物，钒、镓、磷、镍和锆等元素的含量很低。在不同的氧化铝生产工

艺过程中,所产生的赤泥除含有上述杂质以及没有被溶出的铝氧化物以外,还含有因其他因素在生产过程中加入石灰而生成的钙氧化物等。

X射线衍射分析(XRD)结果表明:赤泥中包含金红石(TiO_2)、石英(SiO_2)、赤铁矿($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)、针铁矿($\alpha\text{-FeOOH}$)、一水软铝石($\gamma\text{-AlOOH}$)、方钠石($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$)、钙霞石型钠铝硅酸盐(CAN)和石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),以及少量的三水铝石 $[\text{Al}(\text{OH})_3]$ 、草酸钙石($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)和方解石(CaCO_3)等。由于所采用的铝土矿原料的不同和氧化铝生产工艺的不同,所产生的赤泥的化学成分也不一样^[10],不同氧化铝生产过程中所产生的赤泥的化学组成如表1-1所示。

表1-1 不同氧化铝生产工艺所产生赤泥的化学组成(质量分数)^[10] 单位: %

名称	Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Na_2O	TiO_2	K_2O
烧结法赤泥	5.0~7.0	19.0~22.0	44.0~48.0	8.0~12.0	2.0~2.5	2.0~2.5	—
联合法赤泥	5.4~7.5	20.0~20.5	44.0~47.0	6.1~7.5	2.8~3.0	6.0~7.7	0.5~0.73
拜耳法赤泥	13.0~25.0	5.0~10.0	15.0~31.0	21.0~37.0	0.6~3.7	—	—

赤泥的性质和成分的差别决定了赤泥利用方法的不同。赤泥及其附液具有的强碱性、其含有的可再生利用的氧化物、多种金属元素均是其可再生利用的基础。利用赤泥中的二氧化硅、氧化铝、氧化钙、氧化镁以及少量的氧化铬、氧化锰和二氧化钛可以生产特殊玻璃;利用赤泥中含量较高的氧化钙和二氧化硅可以用来生产硅酸盐水泥和其他建材;利用赤泥中的二氧化硅、氧化铝、氧化钙、氧化镁,以及其特殊的结构特征,可以用来生产吸附剂、催化剂载体和催化剂。

新堆放的赤泥易液化和变形,结构强度低,呈流塑状态;在一定条件下堆放一段时间之后,经过脱水、析水和干燥硬化过程而产生一定的结构强度。它在这一过程中会发生一系列物理和化学变化,经结晶和凝胶作用,形态会发生变化,从流塑状态变成硬塑或者可塑状态,因此产生了一定的结构强度。最后,赤泥将会形成以胶结和结晶连接的多孔架空结构的结构形态。

Ordóñez 等^[11]利用程序升温还原法研究比较了赤泥和赤铁矿,发现两者程序升温还原谱与化学计量值相近,表明 Fe_2O_3 是影响赤泥还原性的唯一有效成分。Barbosa 等^[12]对 Fe_2O_3 的程序升温还原研究结果显示,其还原过程为

$\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ 。Na₂O 和 CaO 的存在会促进催化剂在高温下烧结，降低其比表面积^[13]。

1.1.3 赤泥的危害

由于赤泥中含有大量的强碱性物质，其浸出液 pH 值为 12.10~13.00，氟化物含量为 11.50~26.70mg/L；稀释 10 倍后，其 pH 值仍为 11.25~11.50，极高的 pH 值决定了赤泥对生物、金属、硅质材料具有强烈腐蚀性。高碱度的污水渗入地下或进入地表水，使水体 pH 值升高，而 pH 值的高低与影响水中化合物的毒性息息相关，因此还可能会造成严重的地表水和地下水污染。同时，赤泥具有放射性，其对人类生产、生活环境和人类身体健康也造成了极大地危害。

我国是氧化铝生产大国，据中国钢铁现货网有关报道显示：2014 年世界氧化铝总产量达 1.04×10^8 t 以上，我国全年氧化铝生产量为 4.71×10^7 t，占世界总量的 45.23%，消费量占全球总消费量的 51.46%，是世界最大的氧化铝生产与消费大国。随着氧化铝工业的发展和铝土矿品位的降低，赤泥的产生量越来越大。据统计，自 1888 年铝的工业化生产以来，全球铝工业排放的赤泥已超过 45 亿吨，现在每年的排放量都在 1.7 亿吨以上。目前，全球赤泥只有约 10% 被综合利用，而我国整体利用率还不到 4%。

如此大量的赤泥，不仅增加了氧化铝生产企业的赤泥处理成本、造成了严重的环境污染，还导致了极大的资源浪费。目前，我国氧化铝生产企业的赤泥大都采用筑坝堆存的方式处置。赤泥堆放过程中，其表面往往会形成一层白“霜”，而这层“霜”即为从赤泥中析出的可溶性碱^[14]。由于氧化铝生产过程中加入了氢氧化钠，赤泥中存在的氢氧化物、碳酸盐、铝酸盐等使其具有很高的碱性^[15]。以未除“霜”的赤泥作为建材时，由于其中的碱含量很高而必须减少原料中赤泥的配比才能保证建材的质量，使得大量赤泥不能有效利用。

因为赤泥属于有害工业固体废物，其长期堆放会导致淋滤液渗透到地下，污染水资源以及使周围土壤碱化。随着全社会对环境保护方面重视程度的加强，人们日益关注赤泥堆放给环境带来的危害。赤泥对环境的影响，主要体现在以下几个方面。

(1) 对空气的污染

赤泥的粒度因生产工艺的不同有很大的差异,当赤泥脱水风化后,表层的黏结性变差,容易引起粉尘的污染。并且干燥的赤泥容易形成飘尘,造成细颗粒物($PM_{2.5}$)浓度的增加,赤泥的有害元素中大于 $2\mu m$ 的沉积在鼻咽区,小于 $2\mu m$ 的沉积在肺泡和支气管区,被血液吸收,输送到人体的各个器官,对人类和动物的健康造成极大的危害;而且由于风蚀扬尘的影响,赤泥会降低储灰场的能见度,破坏生态环境,造成严重污染。但是在生产运行期间,由于堆放场表层一直在排放赤泥浆液,湿度比较大,暂时不会引起粉尘污染^[16]。

(2) 对土地和农田的占用与污染

赤泥的存放占用大量的农田和宝贵的土地资源,除此之外筑坝堆存还需要投入大量的建设和日常维护管理费用。据统计,用于堆放赤泥的土地费用占 Al_2O_3 产值的 $1\% \sim 2\%$ 。而且,赤泥堆场溃坝泄漏事故也时有发生,对当地和周边环境造成严重污染,并带来巨大的经济损失。其中影响最大的是2010年匈牙利Ajkai氧化铝厂发生的赤泥堆坝决堤事故。当时约有 $100 \times 10^4 m^3$ 赤泥外泄,流入至少7座村庄,造成4人死亡、3人失踪,还有一百多人受伤。之后,溃坝泄漏的赤泥开始流入多瑙河,并顺水漫延,引发欧洲多国恐慌,纷纷采取紧急措施防止这场生态灾难进一步扩散。据称这是有史以来,匈牙利发生的最严重的工业意外事故,灾后清理工作至少需要18个月的时间,同时还必须耗费大量金钱^[17]。我国贵州铝厂和郑州铝厂的赤泥堆场也曾发生过类似的赤泥溃坝事故^[18],贵州铝厂直接经济损失达一百万元,郑州铝厂经济损失则在两千万元以上。2014年9月,中铝河南分公司位于河南省荥阳市高山镇潘窑村的第五赤泥库二号坝发生管涌渗漏,随后造成局部溃坝,受灾农田被洪水浸泡、村民被迫外迁,生产生活受到很大影响。

(3) 对建筑物表面和土壤的影响

赤泥呈碱性,在潮湿空气中赤泥对建筑物表面没有侵蚀性,降落地面的悬浮微粒则使土壤碱性化,污染土壤表面,影响种植及放牧。赤泥及其附液对地下的黏土层具有极强的盐碱化作用,可改变地下黏土层的结构和化学成分。土壤的强度碱化,会扰乱植物根系正常的生理活动,影响植物对养分的吸收,大