

程钰 主编

赤泥资源化 公路工程应用

Chini Ziyuanhua
Gonglu Gongcheng
Yingyong

大学出版社

赤泥资源化公路工程应用

程 钰 主编

山东大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

赤泥资源化公路工程应用 / 程钰主编. -- 济南: 山东大学出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-5607-6286-9

I. ①赤… II. ①程… III. ①赤泥—资源利用—应用—道路工程—研究 IV. ①U41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 006693 号

责任策划: 李孝德

责任编辑: 李昭辉 李孝德

封面设计: 牛 钧

出版发行: 山东大学出版社

社 址 山东省济南市山大南路 20 号

邮 编 250100

电 话 市场部 (0531) 88363008

经销: 新华书店

印刷: 济南景升印业有限公司

规格: 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

11.5 印张 4 插页 201 千字

版次: 2018 年 12 月第 1 版

印次: 2018 年 12 月第 1 次印刷

定价: 28.00 元

版权所有, 盗印必究

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社营销部负责调换

《赤泥资源化公路工程应用》 编委会

主 编 程 钰

编 委 程 钰 马士杰 田 伟

孙兆云 陈婷婷 袁海涛

靳 露 程冠军 齐文静



赤泥堆场



堆场取料



改性赤泥生态试验 1

改性赤泥生态试验 2



改性赤泥生态试验 3



赤泥厂拌基层施工



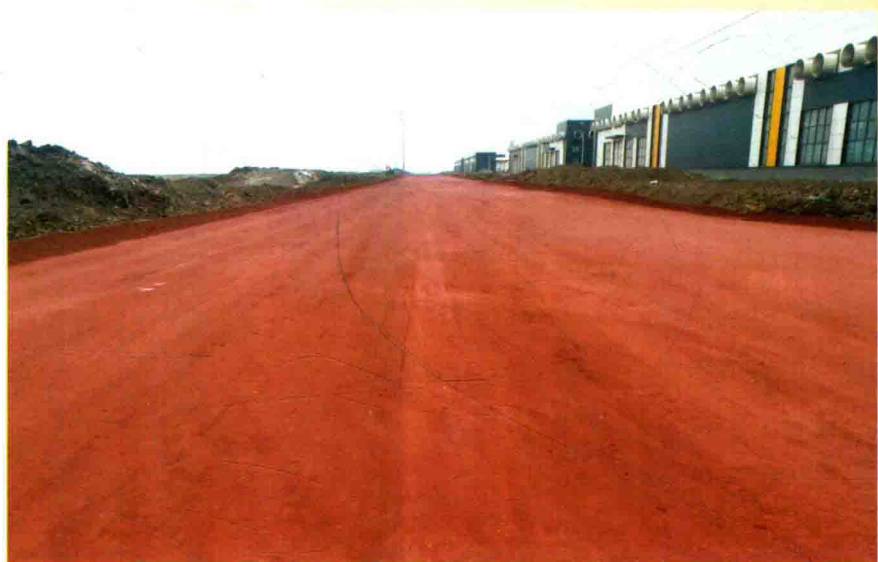
赤泥路拌路基施工



赤泥路基压实



赤泥路基养护



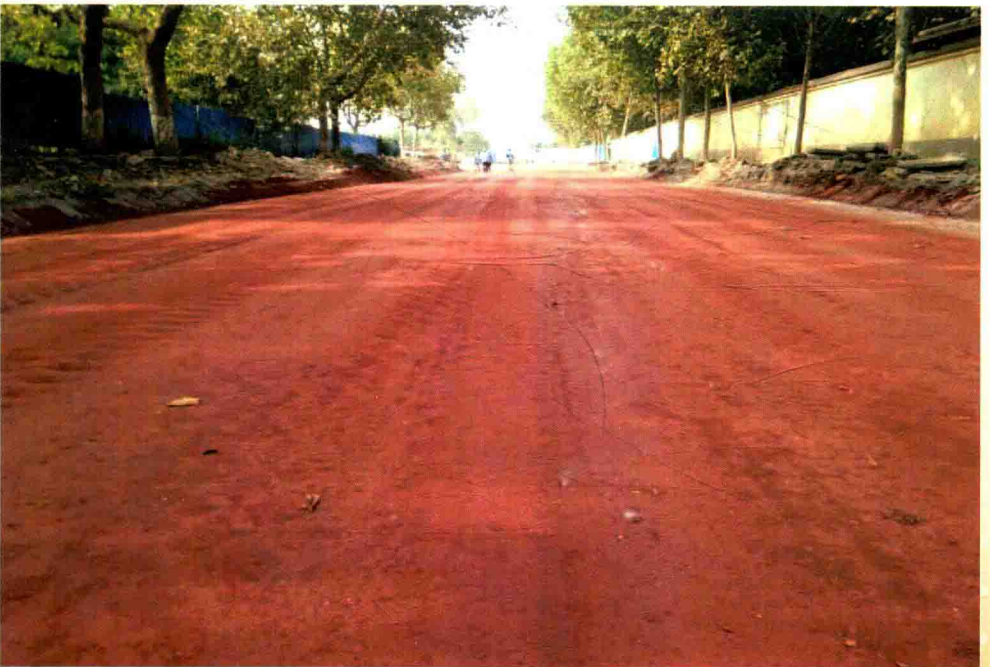
滨州北海市政道路赤泥路用工程



济青高速改扩建赤泥路用工程



聊城茌平美丽乡村赤泥路用工程



淄博市政东一路赤泥路用工程

前 言

铝在我们的日常生活中几乎无处不在，由于密度较低、耐腐蚀性能好，加之储量丰富，在许多领域都有着非常重要的应用。然而，当人们享受着铝所带来的便利时，可能并没有意识到，铝的生产过程也带来了严重的环境危害——赤泥。

简单来说，赤泥就是生产氧化铝的过程（生产金属铝的一个重要环节）中所产生的碱性固体废弃物。在实际生产中，铝土矿被开采出来之后，首先要经过粉碎和研磨，使大块的矿石变成颗粒非常小的粉末。接下来，铝土矿粉末被加入到高浓度的氢氧化钠溶液中，在高温高压条件下，铝土矿中的氧化铝会与氢氧化钠反应生成水溶性的铝酸钠，而其他成分则不能与碱反应，仍然以固体形式存在。经过过滤，我们就可以把氧化铝与铝土矿中的其他化合物分离开来。而后，我们将含有铝酸钠的碱溶液冷却，随着温度的降低，铝酸钠在水中的溶解度会不断减小。通过调整铝土矿和氢氧化钠的比例，我们可以使高温时的铝酸钠在碱溶液中近乎饱和。温度一旦降低，碱溶液中就不能溶解那么多的铝酸钠，这时，我们再向溶液中加入少量氢氧化铝作为“晶种”；在晶种的诱导下，溶液中的铝酸钠就会围绕着氢氧化铝的晶体生长，于是大量的氢氧化铝会从溶液中沉淀出来。这些氢氧化铝经过高温煅烧会重新变成氧化铝，再经过电解就可以得到金属铝。也有一小部分氧化铝会有其他用途。这种从铝土矿中分离出氧化铝的方法由一百多年前的奥地利人卡尔·约瑟夫·拜耳发明，因此被称为“拜耳法”。今天，世界上绝大部分氧化铝工厂都在使用拜耳法生产氧化铝。

综上所述，拜耳法至关重要的一步就是用碱溶液去处理氧化铝，从而将氧化铝和铝土矿的其他成分分开。不能被碱溶解的 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 等化合物对铝的生产毫无帮助，所以必须以过滤的形式从溶液中分离出来。在过滤

过程中，一些氢氧化钠溶液也随着固体被分离出来，所以最终得到的废弃物通常是暗红或者砖红色的像泥浆一样的流体。这些废弃物之所以呈现红色，是因为其中主要成分是暗红色的 Fe_2O_3 。因此，人们给这种废弃物起了一个非常形象的名字“赤泥”。

目前，赤泥最常见的处理方法是露天堆积，根据堆存方式的不同，可以分为湿法堆存和干法堆存两种堆积方式。早期由于赤泥压滤技术尚不成熟，无法在赤泥出厂时脱掉其中多余的水分，主要采用泥浆泵将其输送到场地中。赤泥进场时表现为近似于泥浆的流质状态，含水率高，强度很低，虽经过晾晒和长期堆存，其含水率有所下降、强度有所增长，但其力学指标依然不高。而干法堆放的赤泥则是通过压滤机将赤泥中的孔隙水部分去掉后而形成的一种非饱和土，其具有较高的强度，能够在具有一定坡度的地方自然堆积，甚至不用借助尾矿坝等构筑物的支撑，其主要采用隔膜泵或汽车运输到尾矿库。干法堆存赤泥是在压滤技术已日趋成熟的当今主要采用的赤泥堆存方式。

根据相关数据统计，每生产1吨的氧化铝，就会随之产生1.0~2.0吨的赤泥。截至2017年年底，我国赤泥的年排放量超过1.12亿吨，累计堆存量超过11.8亿吨，仅山东省堆存量就超过3.0亿吨。与日益增长的赤泥排放量相比，赤泥几乎没有得到任何有效利用。随着我国氧化铝产量的逐年增长和铝土矿品位的逐渐降低，赤泥的年产生量还将不断增加。赤泥的大量堆存，既占用土地，浪费资源，又易造成环境污染和安全隐患。

要想从根本上解决这一问题，可行的办法只能是将赤泥的处理方式从简单的堆存变成资源化综合利用。既然赤泥中含有大量的 Fe_2O_3 ，我们能否从中提炼出铁呢？当然可以，也确实有许多人进行了相关的研究。我们不仅可以以赤泥为原料生产铁，还可以从赤泥中提取其他许多有价值的元素。但是实际操作起来，在生产成本、技术水平上并没有太大的优势，而且在生产过程中还会继续造成环境问题。因此，人们宁愿开采铁矿石再从中冶炼铁，以至于对赤泥的综合利用一直处于发展缓慢的境地。

除了从赤泥中回收铁等金属元素，研究人员还研发出了其他利用赤泥的方法。例如，赤泥可以被用作生产砖瓦、水泥和陶瓷等的建筑材料。赤泥的粉末颗粒非常小，很容易吸附其他物质，所以一些研究人员尝试利用赤泥吸附污水中的有害物质。还有人尝试将赤泥用作化学反应的催化剂。这些研究

虽然取得了不错的进展，但是仍然存在很多的问题。许多利用赤泥的方法成本较高，得到的产品的性能也不完全令人满意，所以很难得到大规模的推广应用。另外，许多时候赤泥的利用率较低。例如，赤泥用于污水处理虽然效果不错，但是处理污水一般只需要很少量的赤泥，所以希望用这种方法消化掉每年产生的上亿吨赤泥无疑是不现实的。因此，到目前为止，大量的赤泥仍然只能通过堆放的办法来处理。

随着经济的发展、科技的进步和我们生活的需要，越来越多的铝将会被生产出来，这也意味着随之而来的赤泥会对环境产生越来越严重的影响。寻找合适的方法对赤泥进行再利用，已是刻不容缓的事情。因此，最大限度地减少赤泥堆存，实现赤泥的减量化、无害化、资源化综合利用是解决其环境污染和安全隐患的治本之策，也是我国铝工业持续发展的必由之路。

由于水平和条件所限，书中内容肯定存在许多不足，挂一漏万和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2018年12月于济南

目 录

第一章 赤泥的来源与组成	(1)
1.1 赤泥的来源	(1)
1.2 赤泥的分类	(2)
1.2.1 拜耳法赤泥	(3)
1.2.2 烧结法赤泥	(4)
1.2.3 联合法赤泥	(6)
1.3 赤泥的物质组成	(8)
1.3.1 赤泥的主要矿物组成	(8)
1.3.2 赤泥的主要化学成分	(9)
1.3.3 不同铝土矿赤泥的组成	(10)
1.3.4 中铝山东有限公司赤泥的组成	(14)
1.4 赤泥的基本物理力学特性	(15)
1.4.1 赤泥的基本物理特性	(15)
1.4.2 赤泥的颗粒特征	(16)
1.4.3 赤泥的水理性质	(18)
1.4.4 赤泥的工程力学特性	(21)
第二章 赤泥资源化工程利用现状	(23)
2.1 概述	(23)
2.2 赤泥资源化工程利用现状	(24)
2.2.1 赤泥的产生	(24)
2.2.2 赤泥的危害	(25)
2.2.3 赤泥利用的研究现状	(27)
2.2.4 赤泥路用的研究现状	(30)

第三章 赤泥的改性固化机理	(33)
3.1 固体废弃物的基本固化原理	(33)
3.1.1 高效复合激发机理	(33)
3.1.2 颗粒表面活化机理	(33)
3.1.3 赤泥的物化活性	(35)
3.1.4 赤泥的活性评价方式	(36)
3.2 HeinCem 固化机理	(37)
3.3 改性赤泥的环保机制	(40)
第四章 赤泥路用环保特性	(43)
4.1 概述	(43)
4.1.1 对水环境的污染	(43)
4.1.2 对大气环境的影响	(44)
4.1.3 对土壤环境的影响	(44)
4.2 赤泥的主要污染物	(44)
4.2.1 不溶性碱	(45)
4.2.2 可溶性碱	(45)
4.3 赤泥的放射性特征	(46)
4.3.1 放射性的评价标准	(47)
4.3.2 赤泥的放射性检测	(48)
4.3.3 赤泥的放射性结论	(49)
4.3.4 赤泥的放射性屏蔽机制	(50)
4.4 赤泥的浸出毒性试验	(51)
4.4.1 浸出的评价标准	(52)
4.4.2 浸出毒性的试验方法	(53)
4.4.3 浸出试验结果	(57)
4.5 赤泥的碱物质试验分析	(58)
4.5.1 赤泥的 pH 值	(58)
4.5.2 赤泥 pH 值的变化情况	(59)
4.5.3 赤泥“泛碱”的条件和过程	(61)
4.5.4 赤泥中的碱物质分析	(64)
4.6 赤泥路用环境风险评估	(70)

4.6.1	赤泥的改性过程及对污染物的固化稳定化	(70)
4.6.2	赤泥的道路利用方式	(72)
4.6.3	评估的暴露场景与保护目标	(72)
4.6.4	环境风险的评估过程与结果	(73)
4.7	改性赤泥的环保特性	(78)
第五章	烧结法赤泥路用工程特性	(79)
5.1	概述	(79)
5.2	赤泥的基本特性	(80)
5.2.1	石灰	(80)
5.2.2	粉煤灰	(81)
5.2.3	赤泥	(82)
5.3	烧结法赤泥室内试验研究	(82)
5.3.1	改性赤泥的配合比	(84)
5.3.2	改性赤泥的抗压强度	(87)
5.3.3	冻融稳定性试验	(89)
5.3.4	改性赤泥的承载力试验	(90)
5.4	改性烧结法赤泥试验	(92)
5.4.1	二灰改性烧结法赤泥的机理	(92)
5.4.2	烧结法赤泥性能试验	(96)
5.5	烧结法赤泥基轻质免碾压台背回填	(99)
5.5.1	技术方案	(99)
5.5.2	原材料试验研究	(100)
5.5.3	室内与现场性能评价	(101)
5.5.4	回填浇筑质量检测控制	(112)
5.5.5	烧结法赤泥免碾压台背回填优势	(112)
第六章	拜耳法赤泥路用性能研究	(114)
6.1	概述	(114)
6.2	改性赤泥室内试验工程特性	(114)
6.3	改性固化赤泥试验场	(117)
6.3.1	试验场方案	(117)

6.3.2	赤泥试验场施工	(118)
6.3.3	顶面弯沉检测	(120)
6.3.4	原位动力触探检测	(121)
6.4	改性固化赤泥试验段	(122)
6.4.1	试验段概况	(122)
6.4.2	改性固化赤泥路用材料的性能要求	(123)
6.4.3	改性赤泥填料的施工及检测标准	(126)
6.4.4	改性赤泥路基质量控制与评价	(127)
6.4.5	改性赤泥试验段污染性分析	(140)
6.5	赤泥路用可行性	(146)
第七章	拜耳法赤泥在高速公路工程的应用	(147)
7.1	概述	(147)
7.2	济青高速改扩建工程概况	(148)
7.2.1	工程实施的必要性	(148)
7.2.2	工程技术特点与需求	(149)
7.2.3	示范工程可行性与方案	(150)
7.3	改性赤泥 HeinCem 路用指标	(151)
7.3.1	示范段赤泥的物理力学特性	(151)
7.3.2	赤泥的强度特性	(152)
7.3.3	HeinCem 赤泥的路用指标	(153)
7.3.4	赤泥路用各层力学检测结果	(156)
7.4	赤泥路基施工指南	(157)
7.4.1	对赤泥的基本要求	(157)
7.4.2	施工准备工作	(158)
7.4.3	赤泥路基施工	(161)
7.4.4	赤泥路基质量检测	(166)
7.4.5	环境技术要求	(167)
7.5	赤泥在高速公路建设中的应用可行性	(170)
	参考文献	(171)