

砷污染土壤治理工艺进展

周永兴, 曹建, 田宗平, 李超群, 邓圣为, 陈铮

(湖南省地质测试研究院, 湖南 长沙 410007)

摘要:砷是自然界常见元素, 环境中的砷源自包括含砷金属矿石的开采、焙烧、冶炼、化工、炼焦、火电、造纸、皮革等生产过程中排放的含砷烟尘、废水、废气、废渣, 在冶金工业生产过程中, 约有30%左右的砷进入水、气和土壤中, 使附近土地受到严重的砷污染。砷污染土壤给人类生态环境造成巨大危害, 已经成为全球性的环境问题。人们对清除土壤砷方法进行了大量研究, 当前砷污染土壤治理工艺主要有: 固化/稳定化、焙烧挥发、沉淀、萃取、淋洗、生物法等。本文对砷污染土壤的处理工艺进行了简单介绍。

关键词:砷污染; 土壤治理; 工艺

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2017.05.003

中图分类号:TD989;X53 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2017)05-0013-06

砷是自然界常见元素, 土壤砷污染主要源自含砷金属矿石的开采、焙烧、冶炼、化工、炼焦、火电、造纸、皮革等生产过程中排放的含砷烟尘、废水、废气、废渣, 其中以冶金、化工排放砷量最高。砷可在土壤中累积并由此进入农作物组织中, 并通过水、大气和食物等途径进入人体, 造成危害; 砷对人体有严重的累积性毒性, 也是致癌、致畸物质。砷污染土壤给人类生态环境造成巨大危害, 已经成为全球性的环境问题。曾经被广泛用于杀虫剂、杀菌剂、落叶剂、防腐剂、涂料、医药和合金等的砷, 现在用量日益减少, 人们对清除土壤砷进行了大量研究。

1 固化工艺

固化工艺是用物理或化学方法改变砷的存在形态, 改变含砷物料的工程特性(例如渗透性、可压缩性和强度等), 使砷固定在土壤中, 或固定、包容在惰性固体基质内, 使砷呈现化学稳定性或密封性, 进而减少砷的迁移性和生物可利用性, 达到减少砷危害的处理方法。

1.1 胶泥或塑性材料固化

水泥固化是国际上处理有毒有害废物的主要方法之一, 美国环保局也将水泥固化称为处理有害废物的最佳技术。水泥固化以其固化工艺简单、设备

和运行费用低, 固化体的强度、耐热性、耐久性好而在工业上广泛应用。但水泥固化也有一定的缺点: 水泥固化体的浸出率较高, 需作涂层处理; 水泥固化体的增容比较高; 有的废物需进行预处理和投加添加剂, 使处理费用增高。

有机聚合物固化是将有机聚合物单体与废物在一个特殊设计的容器中完全混合并加入催化剂, 使其聚合、固化。有机聚合固化的优点是可以在常温下操作, 添加的催化剂数量很少, 最终产品体积比其他固化法小, 既能处理干渣, 也能处理湿泥浆。缺点是不够安全, 有时使用的强酸性催化剂在聚合过程中会使重金属溶出, 并要求使用耐腐蚀设备, 固化体耐老化性能差, 且固化体松散, 需装入容器处置, 增加了处置费用。目前, 国内外最常用的热塑性固化技术是沥青固化技术。

李江山等^[1]提出通过添加氯化铁, 使土壤中的三价砷氧化成低毒性的五价砷, 生成铁砷沉淀而实现砷的一次稳定, 再加入电石渣, 形成钙砷沉淀而实现砷的二次稳定, 然后用磷酸镁水泥对砷污染土进行固化, 提高了砷污染土固化体强度, 使砷污染物钝化。该方法通过对砷污染土进行两次稳定, 磷酸镁水泥固化进一步增强砷污染土抗环境侵蚀的能力, 降低了污染土中砷的环境风险, 保证了处理效果。

收稿日期:2016-04-12

作者简介:周永兴(1965-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产综合利用与化学分析工作。

1.2 砷酸盐或硫化砷形式固定^[2-12]

国内外在处理有毒砷渣和污泥时,大都采用化学方法将其稳定,即通过化学反应生成相对难溶的、自然条件下较稳定的金属砷酸盐和亚砷酸盐,常见的如亚砷酸钙、砷酸钙、砷酸铁等。

卢聪等人在砷污染土壤修复过程中加入稳定剂:膨润土加入量占砷污染土壤质量 1% ~ 5%,硫酸钙为 0.1% ~ 1%,铁粉加入量与砷污染土壤中砷的摩尔比为 3 : 1 ~ 10 : 1,草木灰加入量占砷污染土壤质量 2% ~ 8%;先将稳定剂加入砷污染土壤,充分搅拌混合,然后加水继续搅拌,加水量为使土壤含水率 30% ~ 35%。这种方法处理效果较好,基本上不改变污染土壤 pH 值,并且对污染土壤进行营养物质补充,有利于土壤的处理和后续利用。

1.3 熔融固化^[13-14]

熔融固化技术也称之为玻璃固化技术。此法是将待处理的废物与细小的玻璃质,如玻璃屑、玻璃粉混合,经混合造粒成型后,在高温下熔融形成玻璃固化体,借助玻璃体的致密结构确保固化体的长期稳定。一般是在现场使用电加热,将污染土壤熔化,冷却后形成化学惰性的非扩散坚硬玻璃体技术。

唐纳德·R·维勒将含砷渣与纯碱、熟石灰、氧化铝和硝酸钠混合,在 1450 ~ 1500℃ 熔化,形成玻璃状物质,将固体玻璃破碎进行毒性特性沥滤(TCLP)以及 EP 毒性测试,均未发现可检测到的砷。

1.4 焙烧固化

井田彻等提出将可浸出砷量为 0.18 mg/L 的砷污染土壤与熟石灰混合,在空气或氧的参与下于 200 ~ 700℃ 加热 20 min,使污染土壤中的三价砷化合物氧化成五价砷化合物,然后加热后的土壤再与钙化合物和水混合,所加入的钙化合物与五价无机砷化合物反应,形成在水中几乎不溶解的砷钙化合物。钙化合物和与钙化合物一起加入的水和污染土壤中的二氧化硅反应,从而在土壤颗粒表面上形成水不能透过的硅酸钙层。处理后,该土壤其可浸出砷的量降为 0.008 mg/L,合计砷的固定率为 95.6%^[15-16]。

1.5 吸附固定

王瑞刚等人提出了一种砷锌污染土壤的改良剂,其组成为蚕沙、桑叶残体、生石灰、硅钙肥的混合物,所述各组分重量分数比例为 1 : 2 : 2 : 1;先将

蚕沙、桑叶残体、生石灰的天然混合物收集后堆放在阴凉避雨的地方,堆放 5 ~ 6 个月,风干,粉碎,粒径 < 2 mm,按所述比例混合。再采用该土壤改良剂对小白菜种植使用的污染土壤进行改良,改良后的土壤种植小白菜,其地上部砷锌含量降低明显,使小白菜的砷含量合格,同时减少了砷锌对小白菜的毒害,使小白菜获得高产^[17-19]。

2 分离工艺

2.1 磁分离

雷志刚等人针对砷污染农田,提出的解毒方法为:先铲除田间杂草后用不含重金属的灌溉水注入田间,使水面能稳定在 3 ~ 6 cm 2 ~ 3 d,让土壤浸泡充分;再根据砷等重金属含量计算出的土壤耕作层重金属总重量及土壤的性质选择解胶剂,并将解胶剂施入田间的土壤中,然后用旋耕机旋耕,使得土壤成泥浆并处于稳定的悬浊液状;再根据有害重金属的总量配备聚合置换剂,将有毒重金属总量 5 倍的聚合置换剂均匀地散入田间,然后用具备有吸铁氧体功能的旋耕机不停地在田间搅拌,使得聚合置换剂充分地与被置换重金属置换吸附,让有毒重金属充分吸附在磁体上;最后经过集中收集,达到降低农田毒性的目的^[20-23]。

2.2 淋洗或浸出分离^[24-31]

土壤淋洗修复技术是将水或含有冲洗助剂的水溶液、酸/碱溶液、络合剂或表面活性剂等淋洗液注入到污染土壤或沉积物中,洗脱和清洗土壤中的污染物的过程,其技术研究开始于上世纪 70 年代,进入 90 年代后成为重金属污染土壤治理的主流技术之一,根据 2000 年美国国家环保局的报告(U. S. EPA, 2000),在 600 多个政府资助的场地修复示范工程中,有 4.2% 的项目采用了土壤淋洗技术,但是淋洗处理工艺应用过程中存在很多弊端,并受到诸多因素限制。选择有效的淋洗剂是该技术的关键。

张焕桢等通过试验指出,人工外源添加砷制成的含砷 107.86 mg/kg 污染土壤经风干、去杂和研磨后,过 0.85 mm 尼龙筛,加入 0.1 mol/L 柠檬酸溶液,液土比为 20 mL/g,淋洗 21 h,可淋洗出砷 85.51%,处理后的土壤经浸出毒性监测符合《危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别》(GB 5085.3-2007)要求的无害化堆放标准。

2.3 生物分离^[32-51]

植物修复技术是一种利用植物去除环境中污染物、净化受砷污染土壤的“绿色”环保技术,按其机理和过程可分为植物萃取、植物固定、植物挥发、根系过滤、植物降解。其中,植物萃取是利用植物根系吸收土壤污染物并运送至植物地上部分,通过收割地上部分物质而达到去除土壤中砷污染物的方法。

2001年,陈同斌等在湖南郴州建立了世界上第一个砷污染土壤的植物修复基地,在植物修复过程中会产生大量待处理的收获物(其产量约为5000 kg/(ha·a)干重)。如果应用蜈蚣草修复1000 km²的砷污染土壤,每年至少产生50万t(干重)高含砷量的植物收获物,每年可从土壤中去掉8%的砷。

2.4 焙烧分离

何理等人提出了一种针对土壤有机砷污染的联合微波氧化复合修复系统及方法。该修复系统包括微波热脱附系统、土壤氧化系统及废气处理系统;污染土壤进入到微波热脱附系统,加入催化剂并经过加热、微波辐射及热脱附处理,土壤中大部分污染物挥发成气态传出,土壤由微波热脱附系统的出料口传出进行后续处理;气态物传入氧化设备底部,含砷有机物经过强氧化反应生成稳定的含砷化合物;处理后的气体经活性污泥池进一步降解达标后,排入大气;土壤进入氧化反应池,经过氧化液的氧化作用,送入回收设备。该方法能彻底、有效地修复有机砷污染土壤^[52-53]。

2.5 电场分离

利用电场所产生的动电效应驱动土壤中的污染物沿电场方向定向迁移,污染物在电极处得到富集或分离。对于渗透性不高,传导性差的粘性土壤中的砷,可先浸出土壤中的砷,再用电场分离溶液中的砷。

张曙等^[54]采用常规的铁电极板的平行板电场装置,用直流间歇电场对水中的砷离子进行处理,其参数为:可调电压10~50 V,作用时间30~150 s,间歇时间10~140 s。该法能缩短除砷的作用时间、降低能耗,除砷效率高、无污染的优点,且总体成本低、工程量小、操作方便、不易产生二次污染。

2.6 复合方法分离

曾敏等人提出了一种中轻度砷污染稻田修复方法,包括污染土壤的整地、深翻耕、修复剂(还原铁粉)的施用、修复剂施用后的平衡稳定等步骤。该

修复方法通过修复剂固定稻田土壤中砷,改变土壤中砷的形态和价态,降低土壤中有效砷含量并抑制水稻对砷的吸收,从而使大米中砷的含量达到国家食品中污染物限量标准(无机砷 ≤ 0.2 mg/kg, GB2726-2012)^[55-58]。

3 换土、稀释工艺

主要包括客土、换土和深耕翻土等。换土就是把污染土壤取走,换入新的干净土壤。客土法是向污染土壤内加入大量的干净土壤,覆盖在表层或混匀,使污染物浓度降低。翻土可使聚集在表层的污染物分散到深层,达到稀释和自处理的目的。

贾永锋等^[59]在待处理的砷污染土壤中加入液体培养基,使待处理的砷污染土壤处于还原环境,刺激土壤微生物生长,将砷从土壤固相分配至土壤液相中,并随后迁移至耕作层以下并被固定在深层土壤中,从而降低浅层土壤中的砷浓度。

4 控制环境条件,降低土壤砷毒性

雷鸣等人在As污染的水田里加入基肥和粒径为20 nm的纳米锰氧化物,充分混合均匀后加水反应7 d。再将水稻秧苗移栽在水田,并保持土壤淹水。水稻成熟后发现,稻米中砷含量比未加锰氧化物稻田稻米中的砷含量要低82%^[60-72]。

5 基因方法控制植物对砷的吸收

中国科学院网报道,生态中心等人在土壤-植物系统砷污染控制研究中取得进展,中国科学院生态环境研究中心研究员朱永官领导的团队以模式植物拟南芥为研究对象,通过基因突变能使植物韧皮部和荚果中的砷浓度显著降低,特别是种子中的砷浓度能减少约一半,该研究填补了植物韧皮部中砷转运机制研究的空白,这对于降低大米砷积累、减少大米砷污染是一个很大的进步。

6 展 望

(1) 砷污染土壤的修复方法包括电化学法、土壤淋洗法、玻璃化法、微生物法等,但是多数方法在砷污染中的修复效果较为普通,效果仍有待提升。

(2) 通过磁场、淋洗、生物富集、焙烧、电场等方法可将污染土壤中的砷分离出来,生成高浓度的砷化合物,一般过程成本较高,富集物需后续处理。

(3) 固化法需大量的固化剂和能源, 容易对土壤造成破坏, 一般用于砷污染严重的小面积土壤修复。

(4) 现有砷污染土壤处理工艺, 仅能改变砷的空间位置(换土、填埋、提取运输等)、存在价态(三价砷变成五价砷或单质)和结合状态(磷酸钙、磷酸钠、磷酸铁、亚磷酸盐等), 并且成本高昂。

(5) 在矿产开发中综合利用砷资源, 从源头制止污染, 和开发高效的基因方法控制植物对砷的吸收, 是土壤砷污染防治的发展趋势。

(6) 开发砷的环保型用途, 提高砷的使用价值, 是彻底改变治理砷污染土壤被动局面的途径。

参考文献:

- [1] 李江山, 薛强, 王平, 等. 一种砷污染土修复方法[P]. 中国: 201410263518. 4, 2014-06-13.
- [2] 贺前锋, 陈四海, 刘代欢, 等. 一种用于砷污染土壤的固化稳定剂及其应用[P]. 中国: 201510078509. 2, 2015. 02. 13.
- [3] 吴卫林, 葛茂清, 徐国义, 等. 一种砷污染土壤的处理方法[P]. 中国: 201210057382. 2, 2012-03-06.
- [4] 吴峰, 丁魏, 李进军. 一种三价砷污染土壤的光化学氧化修复方法[P]. 中国: 201310262194. 8, 2013-06-27.
- [5] 张文辉, 吴竞宇, 元妙新. 一种砷污染土壤的修复方法[P]. 中国: 201110024577. 2, 2014-04-24.
- [6] 张焕祯, 赵慧敏, 赵茜, 等. 一种砷污染土壤的治理方法[P]. 中国: 201010204184. 5, 2010-06-11.
- [7] 吴烈善, 莫小荣, 蒙惠琴, 等. 一种适用于砷污染土壤的修复药剂及使用方法[P]. 中国: 201410805173. 0, 2014-12-22.
- [8] 栾兆坤, 梁震, 彭先佳, 等. 一种修复砷污染土壤的处理方法[P]. 中国: 201010170746. 9, 2010-05-06.
- [9] 杨志辉, 柴立元, 刘琳, 等. 一种修复砷污染土壤固定剂及其制备和应用方法[P]. 中国: 201410006537. 9, 2014-01-07.
- [10] 卢聪, 张庆, 吕东, 等. 一种用于砷污染场地土壤修复的稳定剂[P]. 中国: 201410189191. 0, 2014-05-07.
- [11] 郑犁. 一种用于治理土壤砷污染的组合物及其使用方法[P]. 中国: 201110437565. 2, 2011-12-23.
- [12] 魏清伟, 杨博豪, 许振成, 等. 一种利用水泥回转窑处理含砷污泥的方法[P]. 中国: 201410478496. 3, 2014-09-18.
- [13] 刘维, 杨康, 蔡练兵, . 一种砷碱渣玻璃固化的处理方法[P]. 中国: 201210507038. 9, 2012-12-03.
- [14] 唐纳德·R·维勒. 浸有毒物滤饼的处理[P]. 中国: 88108742. 4, 1988-10-22.
- [15] 井田彻, 村上裕, 稻田裕. 砷污染土壤的处理方法[P]. 中国: 200510136982. 8, 2005-12-13.
- [16] 杉田觉, 清水拓, 岩下浩一郎, 等. 处理含砷污泥的方法[P]. 中国: 00100967. 2, 2000-01-13.
- [17] 黄可龙, 刘耀驰, 刘素琴, 等. 一种有机废水微电解废渣利用与处置的方法及固定土壤中砷和重金属的方法[P]. 中国: 201010301238. X, 2010-02-04.
- [18] 王瑞刚, 郭军康, 冯人伟, 等. 一种阻控小白菜重金属砷锌累积的土壤改良剂[P]. 中国: 201410230381. 2, 2014-05-28.
- [19] 李萌, 余红辉, 王浩, 等. 一种砷污染土壤稳定剂及修复污染土壤的方法[P]. 中国: 201210491208. 9, 2012-11-22.
- [20] 柏连阳, 齐绍武, 雷星宇, 等. 一种分离水田土壤中镉、铅、铬、砷、汞的方法[P]. 中国: 201410285259. 5, 2014-06-24.
- [21] 柏连阳, 齐绍武, 雷星宇, 等. 一种分离水田土壤中有害重金属的方法[P]. 中国: 201410285463. 7, 2014-06-24.
- [22] 雷志刚, 雷星宇. 一种分离水田中有害重金属的方法[P]. 中国: 201510186798. 8, 2015-04-18.
- [23] 张翔宇, 王浩, 邹正禹, 等. 一种利用磁分离修复砷污染土壤的淋洗方法[P]. 中国: 201410480304. 2, 2014-09-19.
- [24] 张焕祯, 唐敏, 张国臣, 等. 砷污染土壤的淋洗修复方法[P]. 中国: 201210468149. 3, 2012-11-19.
- [25] 廖晓勇, 唐敏, 阎秀兰, 李尤, . 一种砷和重金属污染土壤异位分级淋洗修复成套工艺[P]. 中国: 201510316716. 7, 2015-06-10.
- [26] 程功弼, 陈磊. 一种砷污染土壤的淋洗修复方法[P]. 中国: 201410567067. 3, 2014-10-23.
- [27] 阎秀兰, 廖晓勇, 王建益. 一种砷污染土壤及废弃物的淋洗修复装置与修复方法[P]. 中国: 201210563898. 4, 2012-12-21.
- [28] 熊华斌, 熊艳, 高云涛, 等. 一种砷污染土壤淋洗剂的制备方法及其使用方法[P]. 中国: 201410721155. 4, 2014-12-03.
- [29] 卜庆国, 张春禹, 王新民, . 等. 一种砷污染土壤淋洗装置以及对砷污染土壤的处置方法[P]. 中国: 201410171464. 9, 2014-04-25.
- [30] 仇荣亮, 邹泽李, 张涛等. 一种用于同时去除土壤中重金属和砷的化学淋洗剂及其修复方法[P]. 中国: 200810198393. 6, 2008-09-12.
- [31] 陈寻峰, 李小明, 杨麒, 等. 一种修复砷污染土壤的复合淋洗剂及其应用方法[P]. 中国: 201510322931. 8, 2015

- 06-12.
- [32] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰. 利用植物修复砷污染土壤的方法[P]. 中国: 200510134467. 6, 2005-12-15.
- [33] 廖晓勇, 陈同斌, 谢华, 等. 磷肥对砷污染土壤的植物修复效率的影响: 田间实例研究. 环境科学学报, 2004, 24(3): 455-462.
- [34] 袁艺宁, 卢明. 一种利用超富集植物蔊草治理镉、砷、铅及锌污染土壤或水体的方法[P]. 中国: 201310201011. 1, 2013-05-27.
- [35] 曾清如, 杨洋, 彭亮等. 一种利用黄姜, 修复重金属污染土壤的方法[P]. 中国: 201210271638. X, 2012-08-01.
- [36] 周睿人, 刘家女, 周启星. 一种利用四季春花卉修复镉、铅和砷多重污染土壤的方法[P]. 中国: 201310470919. 2, 2013-10-11.
- [37] 尹睿, 沈生元, 林先贵, 等. 一种提高低浓度砷污染土壤植物修复效率的方法[P]. 中国: 200910031462. 9, 2009-04-28.
- [38] 沈生元, 尹睿, 陈文华, 等. 一种提高低砷汞复合污染土壤植物修复效率的方法[P]. 中国: 200910213281. 8, 2009-10-23.
- [39] 吴剑, 杨柳燕, 肖琳, 等. 砷污染土壤的治理方法[P]. 中国: 200610038301. 9, 2006-02-15.
- [40] 方炎明, 邓滔, 沈羽等. 一种用井栏边草修复砷-铅污染土壤的方法[P]. 中国: 201210556113. 0, 2012-12-20.
- [41] 陈同斌, 廖晓勇, 肖细元等. 一种用于植物修复砷污染土地的添加剂及其制备方法[P]. 中国: 200610078211. 2, 2006-05-12.
- [42] 王海娟, 宁平, 曾向东, 等. 一种治理砷铅镉复合污染土壤的植物修复方法[P]. 中国: 200810233447. 8, 2008-10-16.
- [43] 王宏斌, 叶志鸿, 蓝崇钰, 等. 一种治理土壤或水体砷污染的方法[P]. 中国: 200510100644. 9, 2005-10-28.
- [44] 南通惠然生物科技有限公司. 用生物技术从砷污染土壤中提取砷和可燃气的方法[P]. 中国: 201410305893. 0, 2014-07-01.
- [45] 朱毅彬, 朱天南. 用生物技术从砷污染土壤中提取砷和可燃气的方法[P]. 中国: 201210080158. 5, 2012-03-23.
- [46] 吴剑, 杨柳燕, 肖琳, 等. 砷污染土壤的治理方法[P]. 中国: 200610038301. 9, 2006-02-15.
- [47] 周启星, 刘家女, 周睿人. 一种利用四季春修复镉、铅和砷多重污染土壤的方法[P]. 中国: 201310470919. 2, 2013-10-11.
- [48] 孙约兵, 徐志强, 刘维涛. 等. 一种利用三叶鬼针草修复镉-砷复合污染土壤的方法[P]. 中国: 200810229333. 6, 2008-12-05.
- [49] 沈生元, 尹睿, 陈文华等. 一种提高低砷汞复合污染土壤植物修复效率的方法[P]. 中国: 200910213281. 8, 2009-10-23.
- [50] 陈保冬, 李晓林, 刘于, 等. 一种提高砷污染土壤植物修复效率的方法[P]. 中国: 200310123407. 5, 2003-12-26.
- [51] 潘响亮, 宋文娟, 张道勇, 等. 利用诱导固化作用的耐砷细菌原位修复砷污染土壤的方法[P]. 中国: 201310070138. 4, 2013-03-05.
- [52] 井田彻, 村上裕, 稻田裕, 砷污染土壤的处理方法[P]. 中国: 200510136982. 8, 2005-12-13.
- [53] 何理, 李小萌, 卢宏伟, 等. 针对土壤有机砷污染的联合微波氧化复合修复系统及方法[P]. 中国: 201310586047. 6, 2013-11-20.
- [54] 张曙, 王娟. 一种用间歇电场水中除砷的方法[P]. 中国: 201010271250. 0, 2010-09-03.
- [55] 何理, 李小萌, 任丽霞, 等. 一种砷污染土壤变周期性复合修复装置[P]. 中国: 201410438917. X, 2014-09-01.
- [56] 何理, 李小萌, 卢宏伟. 一种砷污染土壤变周期性复合修复方法[P]. 中国: 201410439309. 0, 2014-09-01.
- [57] 何理, 李小萌, 卢宏伟, 等. 一种针对土壤中含砷有机物的多重联合修复系统及方法[P]. 中国: 201310687341. 6, 2013-12-16.
- [58] 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 等. 一种中轻度砷污染稻田修复方法[P]. 中国: 201310437525. 7, 2013-09-24.
- [59] 贾永锋, 宋雨, 许丽英, 等. 一种砷土壤污染的原位修复方法[P]. 中国: 201310086323. 2, 2013-03-18.
- [60] 刘建国, 张雯, 王明新. 一种降低重度砷污染稻田中稻米砷浓度的罐水方法[P]. 中国: 201410461813. 0, 2014-09-11.
- [61] 曾敏, 廖柏寒, 龙水波, 等. 一种中轻度砷污染稻田水稻种植水分管理方法[P]. 中国: 201310437560. 9, 2013-09-24.
- [62] 杨志辉, 柴立元, 廖映平, 等. 一种用于砷污染土壤修复的菌株及其应用方法[P]. 中国: 201410266798. 4, 2014-06-16.
- [63] 杨志辉, 柴立元, 刘琳, 等. 一种修复砷污染土壤固定剂及其制备和应用[P]. 中国: 201410006537. 9, 2014-01-07.
- [64] 雷鸣, 兰砥中, 潘雨齐, 等. 一种利用纳米锰氧化物降低稻米中砷含量的方法[P]. 中国: 201410001734. 1, 2014-01-03.
- [65] 潘响亮, 高磊, 张道勇, 等. 利用诱导固化作用的耐砷细菌原位修复砷污染土壤的方法[P]. 中国: 201310070138. 4, 2013-03-05.

(下转 26 页)

- [26] 沈旦申. 粉煤灰混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989. 92.
- [27] 李亚峰, 杨辉, 赵红. 粉煤灰处理废水的理论与实践[J]. 工业用水与废水, 1999, 30(3): 1-3.
- [28] 朱静, 李天翔. 粉煤灰改性及其在工业废水中的应用[J]. 贵州化工, 2009, 34(3): 36-39.
- [29] 彭荣华, 陈丽娟, 李晓湘. 改性粉煤灰吸附处理含重金属离子废水的研究[J]. 材料保护, 2005, 38(1): 48-50.
- [30] 王卓琳, 施钟毅, 李向民. 低品质粉煤灰在结构混凝土中的研究进展[J]. 结构工程师, 2015, 31(3): 176-177.
- [31] 吴元峰, 仪桂云, 刘全润, 等. 粉煤灰综合利用现状[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(6): 100-103.

Current Situation of Comprehensive Utilization of Fly Ash and Analysis of Existing Problems

Zhang Jinshan, Li Yanxin, Cao Yongdan

(Mining Engineering Institute of Inner Mongolia Science and Technology University, Inner Mongolia Engineering Technology Research Center of Coal Safety Mining and Use, Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Technology Research Center of Solid Waste Resources Comprehensive Utilization, Inner Mongolia, Baotou, China)

Abstract: As a kind of solid industrial waste which is produced in great amounts every year, it should be a trend to achieve a comprehensive utilization of fly ash and to turn it into something valuable. By discussing the current application status of fly ash on such fields as building materials, fine utilization, agriculture and environmental protection in detail, the paper analysis the problems in its utilization and then gives corresponding reasonable suggestions. In the end, the development of utilization of fly ash in future was prospected.

Keywords: Coal fly ash; Comprehensive utilization; Circular economy; Environmental protection

(上接 17 页)

- [66] 黄可龙. 一种有机废水微电解废渣利用与处置的方法及固定土壤中砷和重金属的方法[P]. 中国: 201010301238. X, 2010-02-04.
- [67] 吴峰, 丁魏, 李进军. 一种三价砷污染土壤的光化学氧化修复方法[P]. 中国: 201310262194. 8, 2013-06-27.
- [68] 李萌, 余红辉, 王浩, 等. 一种砷污染土壤稳定剂及修复污染土壤的方法[P]. 中国: 201210491208. 9, 2012-11-22.
- [69] 栾兆坤, 梁震, 彭先佳, 等. 一种修复砷污染土壤的处理方法[P]. 中国: 201010170746. 9, 2010-05-06.
- [70] 张文辉, 吴竞宇, 元妙新. 一种砷污染土壤的修复方法[P]. 中国: 201410167453. 3, 2014-04-24.
- [71] 张焕祯, 赵慧敏, 赵茜, 等. 一种砷污染土壤的治理方法[P]. 中国: 201010204184. 5, 2010-06-11.
- [72] 雷鸣, 周爽, 彭亮, 等. 一种利用纳米锰氧化物降低稻米中砷含量的方法[P]. 中国: 201410001734. 1, 2014-01-03.

Progress in Treatment of Arsenic Contaminated Soil

Zhou Yongxing, Cao Jian, Tian Zongping, Li Chaoqun, Deng Shengwei, Chen Zheng
(Hunan Province Geological Testing Institute, Changsha, Hunan, China)

Abstract: Arsenic is a common element in nature, environmental arsenic from arsenic metal ore mining, roasting, smelting, chemical, metallurgical, power, paper, leather and other production process emissions containing arsenic dust, waste water, waste gas and waste residue. In the production process of metallurgical industry, about 30% of the arsenic emitted in water, air and soil in land near by caused serious arsenic contamination. Arsenic contaminated soil has caused great harm to human ecological environment, and has become a global environmental problem. There has been a lot of research on the removal of soil arsenic, the arsenic contaminated soil remediation process mainly include: solidification/stabilization, volatilization roasting, precipitation, extraction, leaching and biological method. In this paper, the processing technology of arsenic contaminated soil at home and abroad is introduced briefly.

Keywords: Arsenic pollution; Treatment; Technology