

# 废铅蓄电池火法冶炼环境影响分析

彭露<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 喻文昊<sup>1</sup>, 胡雨辰<sup>1</sup>, 王俊雄<sup>1</sup>, 李名扬<sup>1</sup>, 董金鑫<sup>1</sup>, 王进<sup>2</sup>, 李富元<sup>2</sup>, 杨家宽<sup>1\*</sup>

(1. 华中科技大学环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;  
2. 湖北金洋冶金股份有限公司, 湖北 襄阳 441700)

**摘要:**以废铅蓄电池为代表的再生铅回收产业是资源循环率较高的典型案例,火法冶炼仍是目前主要的回收工艺。由于工艺水平参差不齐,监管力度不够,许多发展中国家铅污染事件频发。本文从大气、土壤、水及对职工和居民健康影响4个角度分析火法冶炼的潜在铅污染现状,并给出防治火法冶炼污染的建议。

**关键词:**火法冶炼;废铅蓄电池;回收;环境污染

中图分类号:X

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)01-0017-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.01.004

## Environmental impact assessment of recycling spent lead-acid battery by using pyrometallurgical process

PENG Lu<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, YU Wen-hao<sup>1</sup>, HU Yu-chen<sup>1</sup>, WANG Jun-xiong<sup>1</sup>, LI Ming-yang<sup>1</sup>,  
DONG Jin-xin<sup>1</sup>, WANG Jin<sup>2</sup>, LI Fu-yuan<sup>2</sup>, YANG Jian-kuan<sup>1\*</sup>

(1. School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Jinyang Metallurgical Co., Ltd., Xiangyang 441700, China)

**Abstract:** The recycling industry from spent lead acid batteries is a typical case of resource recycling with a higher recovery ratio. The pyrometallurgical process still dominates in the secondary lead recycling industry. However, due to the co-existence of recovery technologies with different technical levels and shortage of effective regulatory enforcement, a great number of lead poisoning incidents have been observed in many developing countries. In this paper, the potential lead pollution during the pyrometallurgical process has been analyzed from four aspects, including atmosphere, soil, water and human exposure. Some suggestions are also proposed to solve the corresponding environmental problems related to the pyrometallurgical route.

**Key words:** pyrometallurgical process; spent lead acid battery; recycling; environmental pollution

随着汽车和电动车行业的快速稳定发展,铅酸蓄电池的使用量随之大幅度增加,以废铅酸蓄电池为代表的再生铅量也迅速增加<sup>[1]</sup>。从2001—2013年,国内原生铅和再生铅的产量均有较大幅度的提高,详见表1。

表1 中国地区2003—2013年原生铅和再生铅产量变化情况<sup>[1]</sup> Mt

年份	2003	2004	2005	2006	2007	2008
再生铅	0.28	0.43	0.54	0.59	0.65	0.89
原生铅	1.28	1.51	1.85	2.13	2.14	2.56
年份	2009	2010	2011	2012	2013	
再生铅	1.15	1.36	1.40	1.36	1.50	
原生铅	2.63	2.79	3.20	3.28	2.98	

然而目前废铅蓄电池回收仍主要依靠传统的火法冶炼工艺,在高温冶炼过程中容易产生大量的PM<sub>2.5</sub>铅尘、铅蒸汽以及SO<sub>2</sub>等有害物质,给周边地区造成潜在二次污染,甚至在部分地区造成严重的

铅污染事件<sup>[2]</sup>。欧美等大部分发达国家采用较先进的炉体设备并执行较为严格的环境标准,铅环境污染事件已大为减少<sup>[3]</sup>。但在许多发展中国家,再生铅火法冶炼污染形势依然严峻。

## 1 废铅蓄电池的火法冶炼工艺现状

废铅蓄电池火法回收主要通过特定炉型的炉体中熔炼实现的。其炉型主要有反射炉、回转短炉、鼓风机等<sup>[4]</sup>。在废铅酸蓄电池中,其主要成分为废电解液11%~30%(质量分数,下同)、铅极柱及铅合金板栅24%~30%、铅膏30%~40%、有机物22%~30%。其中铅膏主要是极板上活性物质经过充放电使用后形成的料浆状物质:PbSO<sub>4</sub>(~55%)、PbO<sub>2</sub>(~28%)、PbO(~9%)、Pb(~4%)等,还可能含有少量Sb(~0.5%)。PbSO<sub>4</sub>熔点高,达到完全分解的温度要在1000℃以上,是熔炼过程中产生SO<sub>2</sub>的主要原因,同时高温下造成大量的铅挥发损

收稿日期:2015-08-24

基金项目:武汉市科技攻关计划(2013060501010168, 2013011801010593, 2014030709020313);华中科技大学自主创新基金(HUST, 2013ZZGH015);国家科技支撑计划(2014BAC03B02)

作者简介:杨家宽(1973-),教授,博士生导师,主要研究方向为固废资源化与材料回收,通讯联系人,027-87792207, jkyang@mail.hust.edu.cn。

失并形成污染性的铅尘<sup>[5-6]</sup>。

根据世界各国对废铅蓄电池的研究发展,火法冶炼回收流程主要分为 3 种:①废铅蓄电池经破碎除酸除壳后在高温下直接进行火法混合熔炼,该工艺金属回收率平均为 85%~90%,废酸、塑料及镉等元素未合理利用,污染较严重;②废铅蓄电池经破碎处理后,分别对栅板和铅膏进行火法冶炼,以得到铅镉合金和金属铅,该工艺回收率平均水平为 90%~95%,污染控制较第一类工艺有较大改善;③废铅蓄电池经破碎处理后,对铅膏先进行脱硫转化,然后再分别对栅板和转化后的铅膏进行火法冶炼,以得到铅合金和金属铅,该工艺金属回收率平均为 95%以上<sup>[7]</sup>。

发达国家大多采用回转窑还原冶炼铅,并把栅板与废铅膏分开,此过程既减少了进炉的物料量,提高了炉料的铅品位,又可减少能耗及烟尘、废气、二氧化硫的排放量,提高了金属的回收率、工效和产能。同时采用一定的除尘设备进行铅尘的回收处理,既控制了烟尘的排放量,达到环保要求,又提高了铅的回收率<sup>[8]</sup>。

而在众多的发展中国家,废旧铅酸蓄电池的回收和处理管理工作远没有跟上废旧铅酸蓄电池产生的速度,导致大量的废旧铅酸蓄电池被一些小型非正规工厂拆解提炼,粗糙的处理工艺给环境造成了极其严重的影响。以我国为例,回收的废旧铅酸蓄电池只有 45%~50% 流向专业再生铅企业,而 35%~40% 流向非正规再生铅企业或地下工厂<sup>[9]</sup>,其回收网络如图 1 所示,其中一部分废铅酸蓄电池不可避免地进入非法的再生铅回收企业。众多地下小作坊为大幅度节约成本,仍然采用土法冶炼的方法,生产厂区无环保措施,粉尘、烟雾、废水、废渣都随意排放和倾倒,给厂区周边环境造成极严重的破坏;同时,现场操作工人无防护措施,导致各种有毒有害气体直接吸入人体,给从业者造成严重的身体伤害<sup>[9]</sup>。较大回收企业可达到再生铅行业准入条件,但实际冶炼过程中,无法从根本上避免 PM<sub>2.5</sub> 铅尘和二氧化硫排入环境<sup>[10]</sup>。

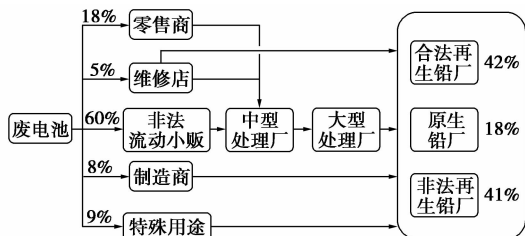


图 1 中国内地再生铅回收物料网络图<sup>[11]</sup>

## 2 再生铅火法冶炼污染分析

据世界卫生组织估计,全世界有 12 亿人生活在铅污染的环境中,而其中大约 99% 的污染事件均发生在中国和其他非发达国家<sup>[1]</sup>。2009—2011 年期间铅污染事件在我国频繁出现。2009 年陕西凤翔铅污染事件中,4 035 人血铅超标,其中,超过 170 名儿童住院治疗,32 人重度铅中毒。2010 年我国发生了 9 起铅污染事件,2011 年发生了 7 起,到 2011 年初已经有超过 60 起铅污染事件<sup>[1]</sup>。图 2 为 2009—2011 年我国主要重大铅污染事件分布图,再生铅企业分布比较集中的中东部地区为铅污染事件的多发区域,若生产过程控制不当,极易对周围环境造成较大影响。

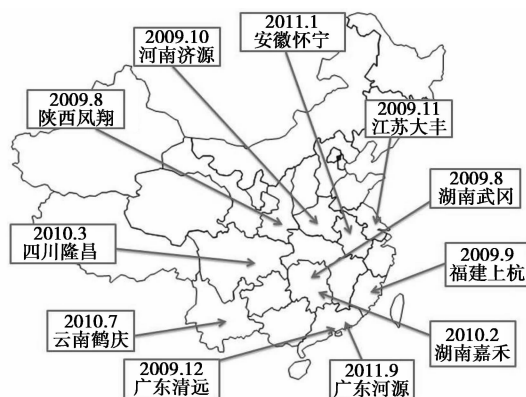


图 2 2009—2011 年中国发生的主要铅污染事故地区<sup>[11]</sup>

铅污染的来源之一便是废铅蓄电池的火法冶炼。冶炼厂周围环境的铅含量远高于其他地区的平均水平<sup>[1]</sup>。以下从铅污染角度分析火法冶炼的环境污染。

### 2.1 对大气的污染

再生铅高温冶炼过程中产生的铅尘排放到大气中主要以颗粒物的形式存在。2010 年联合国环境规划署关于铅污染的研究报告中称<sup>[12]</sup>,铅颗粒物的平均直径为 1.5 μm,而统计显示直径在 10 μm 以下的颗粒物占 86% (质量分数)。高温燃烧过程中还会有直径小于 1 μm 的颗粒物产生。由于粒径小,铅尘很容易扩散和转移,降雨时又会随雨水进入土壤和水体中,从而造成大范围的铅污染。

相关研究表明,每回收 1 t 铅会排放约 40 g 铅到大气中。21 世纪初,全世界一年的铅排放量为 119 259 t,部分国家的排放情况:加拿大 288.9 t (2004),澳大利亚 1 022 t (2003-4),美国 1 126 t

(2002), 欧洲 10 923 t(2000)<sup>[12]</sup>。我国火法冶炼厂附近空气中铅平均含量为 5.74  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 是规定限制的 3.83 倍<sup>[1]</sup>。埃及的一份研究中指出, 开罗附近的大气铅含量超过世界卫生组织标准 30 倍以上, 其中至少 70% 的排放来源于周围的再生铅冶炼厂<sup>[13]</sup>。

陈来国等人在 2011 年 5 月对广东省河源市一铅酸蓄电池工厂及周围环境的铅污染进行了研究<sup>[14]</sup>。研究表明, 在工厂内, 粉尘中铅含量为 441 460 ~ 708 560  $\text{mg}/\text{kg}$ (平均 601 030  $\text{mg}/\text{kg}$ ), 办公室和职工宿舍内的粉尘铅含量为 13 570 ~ 28 740  $\text{mg}/\text{kg}$ (平均 19 820  $\text{mg}/\text{kg}$ )。被污染地区的居民住宅内粉尘样品铅含量为 506 ~ 10 950  $\text{mg}/\text{kg}$ (平均 5 200  $\text{mg}/\text{kg}$ ), 远高于未受污染区域(234 ~ 610  $\text{mg}/\text{kg}$ , 平均 331  $\text{mg}/\text{kg}$ )。分析结果表明, 该厂是当地主要的铅污染来源, 铅尘随大气的扩散是导致周边地区铅污染问题的主要原因。为了进一步了解工厂向周边环境的铅排放, 研究人员从生产过程和空气污染处理过程采集颗粒物样品并用激光粒径分析仪进行了分析, 结果表明, 可吸入颗粒物( $<10 \mu\text{m}$ )、细颗粒物( $<2.5 \mu\text{m}$ )和超细颗粒物( $<1 \mu\text{m}$ )分别占 90%、50% 和 25%, 这说明如果工厂没有安装除尘设备或者除尘不完全, 铅尘将很容易扩散到周围环境中。对袋式除尘器收集的粉尘进行分析, 发现可吸入颗粒物与细颗粒物占 32% 和 18%, 说明很大一部分(约 60%)的可吸入铅尘未有效收集从而散逸至大气中。

## 2.2 土壤和水体的污染

未受污染地区的土壤中铅含量一般在 10 ~ 30  $\text{mg}(\text{Pb})/\text{kg}$ , 公路旁或城镇的土壤中铅含量一般为数千  $\text{mg}(\text{Pb})/\text{kg}$ , 而在靠近火法冶炼厂的土壤中铅含量最高甚至可达到 60 000  $\text{mg}(\text{Pb})/\text{kg}$ <sup>[12]</sup>。土壤中铅污染来源主要是废渣的随意倾倒, 以及冶炼过程中产生的粉尘烟雾。降雨时土壤、大气中的铅随着雨水进入水体, 从而污染地表水和居民的饮用水。

我国火法冶炼厂附近地区土壤中铅含量为 625  $\text{mg}/\text{kg}$ , 是标准值的 2.03 倍, 河水中铅含量为 1.8  $\text{mg}/\text{m}^3$ , 是标准值的 1.8 倍<sup>[1]</sup>。有超过一半的电池回收厂直接将有毒的废水向环境排放<sup>[15]</sup>。在埃及 Awadallah 再生铅冶炼厂的土壤样品含铅量为 3 000  $\text{mg}/\text{kg}$ , 是美国环保总署规定值(600  $\text{mg}/\text{kg}$ )的 5 倍, 在工厂厂址及其周围抽取的地面水样铅含量为 0.033 ~ 0.036  $\text{mg}/\text{L}$ , 超过美国环保总署规定值的 2 倍以上<sup>[13]</sup>。在巴基斯坦 1 个电池回收厂采

集的土样铅含量为 90.0  $\text{mg}/\text{kg}$ , 附近地区土壤铅含量为 78.2  $\text{mg}/\text{kg}$ , 而未受污染地区含量仅为 18.7  $\text{mg}/\text{kg}$ , 采集的水样中铅含量为 23.1  $\mu\text{g}/\text{L}$ , 超过世界卫生组织标准的 2 倍<sup>[16]</sup>。

## 2.3 对工人和居民健康的影响

铅是一种有毒的重金属。铅摄入人体后, 将很快被血液和软组织吸收, 再慢慢转移到骨骼中积累, 不易排出。铅对人体的许多器官和系统都有损害, 包括神经系统、消化系统、造血系统和肾脏<sup>[12]</sup>。处于生长发育期的儿童对铅的毒性作用尤为敏感, 将造成不可逆的损害。因此火法冶炼厂产生的大气、土壤和水污染问题, 会给工人和附近居民的健康带来严重威胁。

目前已经有许多研究报告分析了工业铅污染对健康的影响。一份全球范围的评估报告指出, 分布在发展中国家的小型电池回收厂是铅污染的一个重要源头。非正规的回收操作和落后的工艺水平, 造成了严重的污染<sup>[16]</sup>。吸入工作场所的粉尘、烟雾、蒸汽都可能造成急性铅中毒事件。对工人来说, 即使达标排放, 也容易出现慢性铅中毒的情况。牙买加、菲律宾、多米尼加共和国的一些研究均表明, 住在工厂周围甚至是在工厂工作的儿童血铅含量极大提高, 是未受污染地区儿童的近 5 倍<sup>[17]</sup>。由于这些儿童经常协助破碎、清洗、拆卸铅蓄电池, 通过吸入含铅粉尘及其他一些方式摄入铅的几率大大增加<sup>[18]</sup>。

上述巴基斯坦的某电池回收厂为节省薪酬雇佣未成年人作为其劳动力, 研究人员采集分析了在该厂工作的青少年、工厂周围生活的青少年及未受污染的青少年的血铅含量, 结果显示, 在该厂工作的青少年血铅浓度平均值为 281  $\mu\text{g}/\text{L}$ , 生活在该厂周围的青少年则为 197  $\mu\text{g}/\text{L}$ , 而未受污染地区的青少年为 87.4  $\mu\text{g}/\text{L}$ <sup>[16]</sup>。有研究人员在 2007—2011 年这 4 年中对越南 Dong Mai 的 1 个废铅蓄电池回收村中居民的健康情况进行了调查分析, 结果表明该村的所有成年人还有儿童血铅含量均超过 10  $\mu\text{g}/\text{dL}$ , 平均浓度为 34  $\mu\text{g}/\text{dL}$ <sup>[19]</sup>。血铅水平在 10  $\mu\text{g}/\text{dL}$  左右时, 虽尚不足以产生特异性的临床表现, 但已能对儿童的智能发育、体格生长、学习能力和听力产生不利影响<sup>[20]</sup>。在墨西哥 Torreon 地区一个冶炼厂附近约有 65 000 名儿童的血铅浓度达到 83.8  $\mu\text{g}/\text{dL}$  以上<sup>[21]</sup>。在塞内加尔一个电池回收地区, 周围居民区域中有 18 个儿童因急性铅中毒事件死亡<sup>[19]</sup>。

Wang S、Zhang J 的关于我国儿童血铅水平的报告表明, 从 1995—2003 年, 我国儿童的平均血铅浓

度在 92.9  $\mu\text{g/L}$ , 并且 34% 的受试者超过 100  $\mu\text{g/L}$ , 这一结果远远高出发达国家的平均水平 (30  $\mu\text{g/L}$ )<sup>[22]</sup>。而从 2001—2007 年, 平均血铅浓度为 80.7  $\mu\text{g/L}$ , 仍有 24% 的儿童超过 100  $\mu\text{g/L}$ <sup>[23]</sup>。

Ye X, Wong O 从 618 篇文献中收集了从 1990 年到 2005 年铅污染的数据, 涵盖了我国 23 个行政区。其重点研究对象是铅蓄电池厂及冶炼厂, 大量的数据揭示了铅蓄电池工厂对铅污染的产生有着极大的关联<sup>[24]</sup>。污染数据主要来源于东部沿海省份的工业区, 如福建、浙江、江苏、山东、广东、上海。污染地理位置上的高度集中正是由于铅生产在这些区域的集中分布<sup>[18]</sup>。

陈来国等人对广东河源一铅蓄电池厂的研究得出, 由于污染物排放, 周围有数百名居民的血铅浓度超过 100  $\mu\text{g/L}$ , 这表明铅蓄电池的生产不仅使得该厂工人血铅含量升高, 也极大地影响了周围的居民。进一步研究还发现, 距离工厂 1 000 ~ 2 500 m 的参考区域里的血铅含量远低于距工厂 500 m 以内的污染区域里的血铅含量, 并且随着距工厂距离的增加而血铅含量逐渐减少<sup>[14]</sup>。

在世界范围内, 例如巴基斯坦、塞内加尔、墨西哥、越南的村庄, 以及中国的许多城镇等, 铅蓄电池回收导致的污染事件频繁出现, 对人们的健康造成了极大危害。

### 3 反思与建议

近年来发达国家的铅污染事件已经大为减少。例如美国埃克赛德公司是全球最大的铅蓄电池制造商之一, 有从废电池回收生产新的铅蓄电池的一整套工艺, 一年大约可以回收 50 万 t 铅。在上世纪 90 年代中期, 周围的居民曾因担心污染问题反对该厂的扩建。此后该厂投入了大量资金提升工艺水平, 购置低污染的设备。1988 年时, 该厂每年排放 5 430 lb (1 lb = 0.454 kg) 铅, 而到 2000 年时已降至 2 650 lb, 减少了接近一半<sup>[25]</sup>。在 1982—2002 年这 21 年间, 美国铅排放量减少了 95%。从 1990—2004 年, 欧洲的铅排放量减少了 92%, 而加拿大减少了近 1/3<sup>[12]</sup>。

目前大部分的污染事件均出现在发展中国家<sup>[1]</sup>。究其原因, 主要是在这些国家废铅蓄电池回收工厂往往规模较小, 工艺水平较落后, 环境监管力度不严谨。

针对目前火法冶炼回收铅蓄电池的许多非正规操作现象, 要减轻环境污染, 必须要逐步淘汰不能满

足环境要求的土法冶炼工艺和小型再生铅企业, 采取先进回收工艺, 建立产业化规模化生产模式, 并且严格执法, 严惩非法炼铅企业。

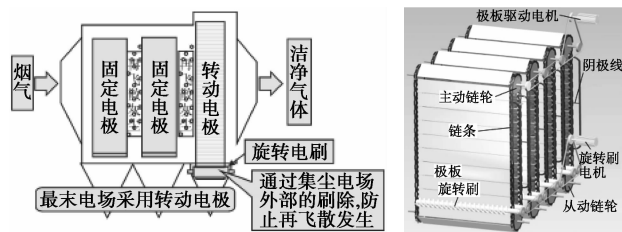
### 参考文献

- [1] Tian X, Gong Y, Wu Y, *et al.* Management of used lead acid battery in China; Secondary lead industry progress, policies and problems [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 93: 75–84.
- [2] 潘斌. 开启铅酸蓄电池的节能环保新时代——五院士首肯“原子经济法铅回收技术”达到世界领先水平[J]. *世界有色金属*, 2014, 5(005): 22–27.
- [3] 胡小芳. 议中国废铅蓄电池回收与再生铅生产[J]. *广东科技*, 2014, 24(109): 184, 196.
- [4] 沈越, 陈扬, 孙阳昭, 等. 我国废铅酸蓄电池污染防治技术及政策探讨[J]. *中国环保产业*, 2011, (4): 49–52.
- [5] 杨家宽, 朱新锋, 刘万超, 等. 废铅酸电池铅膏回收技术的研究进展[J]. *现代化工*, 2009, (3): 32–37.
- [6] 韩业斌. 铅酸蓄电池中铅泥回收处理技术研究[J]. *蓄电池*, 2013, 50(5): 209–212.
- [7] 陈曦, 祁国恕, 惠怀胜, 等. 我国废铅酸蓄电池火法冶炼污染防治最佳可行技术研究[J]. *资源再生*, 2012, (6): 54–56.
- [8] 靖丽丽. 国内外废铅酸蓄电池回收利用技术与污染防治[J]. *蓄电池*, 2012, (1): 38–40.
- [9] 唐爱军, 万玲. 关于遏制废旧铅酸蓄电池环境污染现象的建议[J]. *再生资源与循环经济*, 2014, 7(5): 13–18.
- [10] 方海峰, 黄永和, 黎宇科, 等. 铅酸蓄电池回收利用体系研究[J]. *蓄电池*, 2008, 44(4): 174–179.
- [11] Ji A, Wang F, Luo W, *et al.* Lead poisoning in China: A nightmare from industrialisation [J]. *The Lancet*, 2011, 377(9776): 1474–1476.
- [12] UNEP. Final review of scientific information on lead [C]. United Nations Environment Programme Chemicals Branch, DTIE, 2010.
- [13] Dawoud W A, Negm A M, Bady M F, *et al.* Environmental impact assessment of abundant lead landfill on groundwater and soil quality [J]. *Iwte Info*, 2014, 4: 142–151.
- [14] Chen L, Xu Z, Liu M, *et al.* Lead exposure assessment from study near a lead-acid battery factory in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 429: 191–198.
- [15] Chen H, Li A, Finlow D. The lead and lead-acid battery industries during 2002 and 2007 in China [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 191(1): 22–27.
- [16] Shah F, Kazi T G, Afridi H I, *et al.* Exposures of lead to adolescent workers in battery recycling workshops and surrounding communities [J]. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2012, 22(6): 649–653.
- [17] Falk H. International environmental health for the pediatrician: Case study of lead poisoning [J]. *Pediatrics*, 2003, 112(Supplement 1): 259–264.
- [18] Van Der Kuijp T J, Huang L, Cherry C R. Health hazards of China's lead-acid battery industry: A review of its market drivers, production processes, and health impacts [J]. *Environmental Health*, 2013, 12(1): 61.

除尘器(WESP)与干式电除尘器(DESP)区别较大。DESP通常采用机械振打或声波来清灰,而WESP则采用冲刷液来定期洗涤电极,粉尘随着冲刷液的运动而被清除。WESP对含湿烟气、微细颗粒物、高比电阻的微细粉尘处理效果较好。因为在水和被集尘板所捕获的粉尘之间存在黏着力,WESP不会产生二次扬尘。张会君等<sup>[8]</sup>研究发现,试验采用湿式电除尘器(WESP)处理高比电阻的微细粉尘除尘效率较好,所脱除的粉尘中粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的微细粉尘占60%。杨志燕<sup>[9]</sup>依据微细颗粒物在WESP中被脱除过程的分析,对不同极配型式下电晕放电流的性能展开了研究,结果表明,90%以上微细颗粒物均被湿式电除尘器有效去除。莫华等<sup>[10]</sup>利用2亿kW的煤电机组加装WESP在京津冀、长三角、珠三角等重点区域进行测算,结果表明,每年排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 可减少约63.8万t。当前,在湿法烟气脱硫系统后面会加装WESP,使微细粉尘能被有效捕集<sup>[11]</sup>。WESP只适用于处理高湿、低温以及较低负荷烟气的烟气。为了清理颗粒物,防止水的消耗,应增加循环和污水处理设备;且电场构件的材质必须耐腐蚀,WESP系统不仅运行成本较高,而且投资成本也较高<sup>[11-12]</sup>。

## 1.2 转动极板电除尘技术

与传统的电除尘器相比,转动极板电除尘器在以下2个方面做了变动(图2),一是将末电场中阳极板变成可旋转的形式,二是除尘方式由原来的振打变成旋转刷。杨继发等<sup>[13]</sup>研究表明,与常规电除尘器相比,转动极板电除尘器从工艺结构上改变了清除和捕获灰尘的方式,同时可用于捕获很细或比电阻很高的粉尘,一般出口排放的粉尘浓度 $\leq 30\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,并提高了除尘效率。张涛等<sup>[14]</sup>研究发现,转动极板电除尘器利用旋转刷清灰避免了二次扬尘,可使 $\text{PM}_{2.5}$ 等细颗粒物达到99.89%的去除效率。



(a) 除尘器结构

(b) 转动极板结构

图2 转动极板电除尘器

采用常规电除尘器,由于振打清灰使得出口粉尘浓度出现周期性波动,而转动电极电场的应用不但可以降低电除尘器出口中粉尘浓度,而且能够保证出口粉尘浓度稳定不变,常规电除尘器的改造特别适合利用这种技术。但由于该技术具有相对复杂的结构,制造、安装工艺及维护相对要求较高。

## 1.3 高压电源改造技术

电除尘器的高压电源也会影响其除尘的效率,因此可以通过改进高压电源来提升脱除颗粒物效率。樊兴超<sup>[15]</sup>研究发现,改变直流-交流交替供电的方式可以提高除尘装置对 $\text{PM}_{2.5}$ 等细小颗粒物的除尘效率,粒径 $2.5\ \mu\text{m}$ 的粒子除尘效率最高可达到97.3%。姚福德<sup>[16]</sup>研究发现,当除尘器电源采用的是恒流电源时,将恒流电压从20kV上升至50kV, $\text{PM}_{2.5}$ 级别的细颗粒物脱除率从28.3%提高至53.1%。

电源改造的应用可取得良好的效果。针对提高烟尘排放标准,如果在火电行业普遍采用高压电源改造,可以降低投资且满足烟尘排放的新标准,并能取得良好的节能减排效果<sup>[17]</sup>。

## 1.4 其他技术

随着烟气调质技术的工业化,传统电除尘被动地适应粉尘和工况参数的特点可得到极大改变。烟气条件和粉尘的特性对常规电除尘有很大的影响,使烟气调质技术不能用于所有的工况,这就要求首先应展开理论分析,随后利用试验来确定其对烟气条件的适应性。

(上接第20页)

- [19] Noguchi T, Itai T, Tue N M, et al. Exposure assessment of lead to workers and children in the battery recycling craft village, Dong Mai, Vietnam [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2014, 16(1): 46-51.
- [20] 毋嫫, 叶知新, 张炯理, 等. 铅污染对儿童行为与神经功能的影响[J]. 中国妇幼保健, 2012, 10(15): 82-86.
- [21] Lugo A M. Longitudinal study to monitor blood lead level reduction in 0 to 15 year old children residing at a large community near a lead smelter in Mexico [D]. Minnesota: University of Minnesota, 2013.

- [22] Wang S, Zhang J. Blood lead levels in children, China [J]. Environmental Research, 2006, 101(3): 412-418.
- [23] He K, Wang S, Zhang J. Blood lead levels of children and its trend in China [J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(13): 3986-3993.
- [24] Ye X, Wong O. Lead exposure, lead poisoning, and lead regulatory standards in China, 1990-2005 [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2006, 46(2): 157-162.
- [25] Randy Lee L. Frisco, Texas, Lead smelter a reminder of industry before suburban boom [N]. Knight Ridder Tribune Business News, 2003 Apr 14(1). ■