

邓双 杨丽 等. 石灰石 - 石膏湿法烟气脱硫的生命周期和可持续性分析 [J]. 环境工程技术学报 2015, 5(3): 186-190.

DENG S , YANG L , LIU Y , et al. Life-cycle and sustainability analysis of limestone-gypsum wet flue gas desulphurization [J]. Journal of Environmental Engineering Technology 2015, 5(3): 186-190.

# 石灰石 - 石膏湿法烟气脱硫的生命周期 和可持续性分析

邓双<sup>1</sup> 杨丽<sup>2</sup> 刘宇<sup>1</sup> 龙红艳<sup>1</sup> 张凡<sup>1</sup>\* 王凡<sup>1\*</sup>

1. 中国环境科学研究院 北京 100012

2. 中国矿业大学(北京) 北京 100083

**摘要:**以燃煤电力行业为例,在确定石灰石 - 石膏湿法烟气脱硫技术分析对象和范围的基础上,进行排放清单分析,并评价其对环境的影响。结果表明,从生命周期全过程来看,石灰石 - 石膏湿法烟气脱硫存在粉尘、噪音和生态破坏等环境问题;且其生态恢复成本及脱硫石膏和脱硫废水的无害化处理成本远高于目前所估算的烟气脱硫成本。根据我国目前的能源结构和环境现状,石灰石 - 石膏湿法烟气脱硫技术不具有可持续性,而烟气循环与梯度利用技术是值得示范和推广的烟气净化技术。

**关键词:**燃煤电力行业;石灰石 - 石膏湿法烟气脱硫;生命周期分析

中图分类号: X32 文章编号: 1674-991X(2015)03-0186-05 doi: 10.3969/j.issn.1674-991X.2015.03.028

## Life-cycle and Sustainability Analysis of Limestone-gypsum Wet Flue Gas Desulphurization

DENG Shuang<sup>1</sup>, YANG Li<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>, LONG Hongyan<sup>1</sup>, ZHANG Fan<sup>1</sup>, WANG Fan<sup>1</sup>

1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

**Abstract:** With a case study of coal fired power plants, and based on the definition of goal and scope, the emission inventory analysis and environment impact evaluation were performed for limestone-gypsum wet flue gas desulphurization (WFGD) technology. From the viewpoint of the whole life cycle, there exist environmental problems in limestone-gypsum WFGD, including dust, noise and ecological destruction, etc. The ecological restoration cost and the cost for harmless treatment of desulphurization gypsum and desulphurization wastewater are far higher than the FGD cost currently evaluated. Considering China's current energy structure and environmental status, the limestone-gypsum FGD technology is not sustainable, and the flue gas recycling technology with cascade utilization should be worthy of demonstration and dissemination.

**Key words:** coal-fired power plants; limestone-gypsum wet flue gas desulphurization; life-cycle analysis

目前我国 90% 以上的燃煤电厂采用石灰石 - 石膏湿法烟气脱硫技术,对二氧化硫的减排起到了

积极的作用。但是这种单一的烟气脱硫方式决定了我国烟气脱硫所采用的石灰石原料用量巨大,常年

收稿日期: 2015-02-25

基金项目: 国家环境保护公益性行业科研专项(201009048)

作者简介: 邓双(1972—),女,副研究员,博士,主要从事大气污染控制技术研究,dengshuang@craes.org.cn

\* 责任作者: 王凡(1972—),男,副研究员,博士,主要从事大气污染控制技术与政策研究,fanwangsd@yahoo.com

如此大规模地开采石灰石矿必然会给地方生态带来较严重的负面影响<sup>[1]</sup>。生命周期评价是一种用于评价产品、工艺过程或活动在其整个生命周期内所有投入及产出对环境造成潜在影响的方法<sup>[2]</sup>。冯超等<sup>[3,4]</sup>应用生命周期评价的方法,对某电厂的石灰石-石膏湿法烟气脱硫项目进行了分析,发现该电厂石灰石-石膏湿法烟气脱硫项目一年内的环境影响负荷低于未经脱硫直接排放的环境影响负荷。但针对燃煤电力行业如此大规模地采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术的现状,非常有必要进行石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术的可持续性和生命周期分析。从工艺源头即石灰石的开采、运输,进而到使用和废弃,也即所谓从“摇篮”到“坟墓”的全过程来分析其对自然环境造成的影响,为我国制定新的大气污染控制政策尤其是烟气脱硫对策提供科学依据。

通常生命周期分析包括确定分析对象和范围、清单分析及影响分析3个步骤<sup>[5,9]</sup>: 1) 确定分析对象和范围,是对工艺过程生命周期的输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价,用于表征系统和过程对环境的影响及其程度; 2) 清单分析,是对工艺过程生命周期物质和能量流的抽象和一般化过程,是对其整个生命周期的资源、能源输入和环境排放(包括废气、废水、固体废物等)进行的数据量化分析,其实质是数据的收集、整理与分析; 3) 环境影响分析,说明工艺过程对环境潜在影响的大小。笔者以燃煤电力行业为例,采用以上3个步骤,进行了石灰石-石膏湿法烟气脱硫的生命周期和可持续性分析。

## 1 确定分析的对象和范围

石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术采用石灰石粉制浆液作为脱硫吸收剂,与经降温后进入吸收塔的烟气接触混合,烟气中的SO<sub>2</sub>与浆液中的碳酸钙,以及加入的空气进行氧化反应,最后生成二水石膏。脱硫后的净烟气通过烟囱排入大气。伴随着烟气脱硫,烟气中的汞(Hg)、氟(F)和氯(Cl)等有毒有害元素转移到脱硫石膏和脱硫废水中。因此石灰石-石膏湿法烟气脱硫的生命周期评价系统边界内部是由形成烟气脱硫实体和功能的一系列中间过程及单元过程流组成的集合,包括石灰石开采、运输和研磨以及烟气脱硫3个主要单元(图1)。

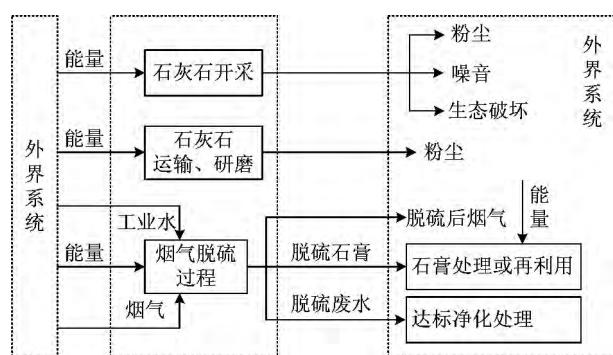


图1 石灰石-石膏湿法烟气脱硫全生命周期分析系统边界

Fig. 1 Whole life cycle analysis system boundary of limestone-gypsum wet flue gas desulphurization

## 2 清单分析

生命周期评价的清单分析内容如图1所示。由于石灰石开采和运输过程造成的粉尘和噪音产生量的基础数据较少,因此主要分析脱硫副产物的产生量及其中Hg、F和Cl等有毒有害元素量。据中国电力企业联合会报道<sup>[10]</sup>,我国2005—2013年火电厂脱硫石膏产生量如图2所示。由图2可见,全国燃煤电厂采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺的副产品石膏产生量几乎呈逐年上升趋势,2010年仅为 $5\ 230 \times 10^4$  t,2013年已经达到 $7\ 750 \times 10^4$  t,比2012年增长11%;综合利用率约72%,与2012年持平。截至2013年底,我国火电装机容量为 $8.70 \times 10^8$  kW,如果按300 MW机组产生4.0 t/h脱硫废水计算,全国火电行业每年的脱硫废水产生量约为 $8\ 300 \times 10^4$  t。

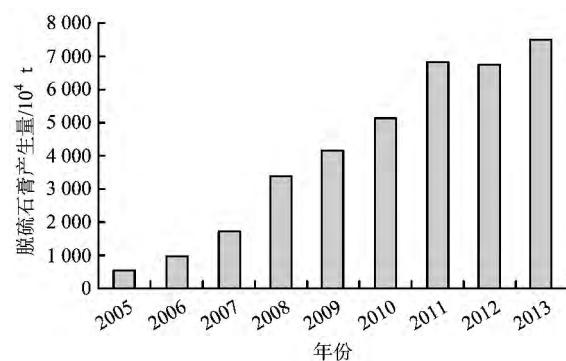


图2 2005—2013年全国火电厂脱硫石膏的产生量

Fig. 2 Production of desulfurized gypsum from Chinese coal-fired power plants in 2005–2013

脱硫石膏和脱硫废水中存在Hg、F和Cl等有

毒有害元素,表 1 为实测的 10 家燃煤电厂的脱硫石膏和脱硫废水中 Hg、F 和 Cl 浓度<sup>[11-12]</sup>。由表 1 可见,大部分脱硫石膏中 Hg 浓度已超过我国原煤中 Hg 浓度的平均值(0.22 μg/g)<sup>[13-14]</sup>,并且脱硫石膏

中 Hg 浓度的最高值达到了 4.02 μg/g,平均值为 0.51 μg/g。我国土壤中 Hg 的背景值为 0.009~0.080 μg/g<sup>[14]</sup>,由此可见,脱硫石膏的平均 Hg 浓度远高于土壤中 Hg 的背景值。

表 1 脱硫废水和脱硫石膏中 Hg、F 和 Cl 浓度

Table 1 The concentration of Hg, F and Cl in desulfurized gypsum and desulfurized waste water

锅炉编号	脱硫废水			脱硫石膏		
	Hg/(μg/L)	F/(mg/L)	Cl/(mg/L)	Hg/(μg/g)	F/(μg/g)	Cl/(μg/g)
1	20.797 1	141.81	3 214	0.416 3	4 190	375
2	51.013 4	132.97	1 978	0.504 3	5 720	254
3	19.378 2	140.89	2 001	0.516 5	6 180	295
4	2.620 9	45.29	2 730	0.302 6	590	103
5	33.547 1	47.02	2 654	0.256 5	596	124
6	0.583 4	126.31	8 300	0.446 8	1 275	410
7	11.428 7	—	—	0.181 6	—	—
8	13.382 4	—	—	0.192 7	—	—
9	9.811 9	—	—	4.020 2	—	—
10	0.674 9	—	—	0.295 4	—	—

脱硫石膏中 F 浓度为 590~6 180 μg/g,Cl 浓度为 103~410 μg/g; 脱硫废水中 F 浓度为 45.29~141.81 mg/L,Cl 浓度为 1 978~8 300 mg/L。脱硫废水中 F 和 Cl 浓度都已明显超过 GB 8978—1996《污水综合排放标准》<sup>[15]</sup>,必须经过处理才能排放。

通过 2013 年脱硫石膏和脱硫废水产生量以及其中的 Hg、F 和 Cl 元素平均浓度,可计算出 2013 年我国燃煤电力行业产生的脱硫副产物中 Hg、F 和 Cl 总量(表 2)。2013 年生成的脱硫石膏中 Hg、F 和 Cl 总量分别为  $38.76 \times 10^4$  和  $1.98 \times 10^4$  t; 脱硫废水中 Hg、F 和 Cl 总量分别为  $1.34 \times 10^4$  和  $28.53 \times 10^4$  t。由此可见,如果这些脱硫副产物没有得到妥善处理,大量 Hg、F 和 Cl 等有毒有害元素将重新排入环境,会对环境造成严重影响。

表 2 2013 年全国燃煤电力行业产生的脱硫副产物中 Hg、F 和 Cl 总量

Table 2 Production of Hg, F and Cl in desulfurized gypsum and desulfurized waste water from Chinese power plants in 2013

副产物	产生量/ $10^4$ t	Hg 总量/t	F 总量/ $10^4$ t	Cl 总量/ $10^4$ t
脱硫石膏	7 750	38.76	23.50	1.98
脱硫废水	8 300	1.34	0.87	28.53

### 3 环境影响

石灰石开采和运输过程中会产生粉尘、噪音和生态破坏,且脱硫过程会产生大量的石膏和脱硫废水等副产物。由于粉尘和噪音环境影响的基础数据匮乏,因此仅对石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术产生的生态、废水和固体废物等的环境影响及消除这些影响的成本进行分析。

#### 3.1 生态

石灰石开采对生态产生的影响主要表现在以下几个方面:破坏地形地貌;占用大量土地;对地表植被破坏;对动物生活的影响以及水土流失侵蚀。

据统计与估算,我国 2007 年在脱硫方面使用的石灰石原材料为  $1 300 \times 10^4$ ~ $1 500 \times 10^4$  t,按照利用率为 50% 来计算,则需开采矿约  $3 000 \times 10^4$  t 的矿,约相当于湖南省某县探明储量的一半<sup>[1]</sup>。2013 年燃煤电力行业用于烟气脱硫的石灰石原材料约  $5 600 \times 10^4$  t,比 2007 年有明显增加,按利用率为 50% 计,则需开采矿约  $7 200 \times 10^4$  t 的石灰石矿。这就意味着会有大面积的地形地貌和植被遭到破坏,严重影响自然生态。

矿区植被保护与生态恢复的治理成本主要包括土地整理费、植被恢复费和辅助费用三部分。而土

地整理费由工程设施费和造林地整理费组成;植被恢复费包括植被恢复调查设计费、种苗费、辅助材料费、栽植费、幼林抚育费、年管护成本和其他费用;辅助费用主要是灌溉费用中的人工费。参照研石山矿区生态修复费成本<sup>[16]</sup> 2013年按开采  $7200 \times 10^4$  t 的石灰石矿粗略计算 2013年全国石灰石矿区的生态修复成本为  $1.404 \times 10^{13}$  元。由此可见,修复开采的石灰石矿区需要巨额资金。

### 3.2 废水

清单分析表明,全国火电行业 2013 年的脱硫废水产生量约为  $8300 \times 10^4$  t。脱硫废水具有以下特点:1) pH 较低(一般为 4~6);2) 悬浮物浓度很高(石膏颗粒、 $\text{SiO}_2$ 、Al 和 Fe 的氢氧化物),浓度可达几万 mg/L;3) 氟化物、COD 和重金属超标,其中包括我国严格限制排放的第 1 类污染物如 Hg、As、Pb 等;4) 盐分极高,含有大量的  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{SO}_3^{2-}$  等离子。脱硫废水的水质与燃煤的种类、电除尘器的极数、脱硫氧化风量、吸收塔内  $\text{Cl}^-$  的控制浓度、脱硫工艺用水的水质情况等因素有关,因此需要单独设置一套完整的化学水处理系统,即通过氧化、中和、沉淀、凝聚等方法去除脱硫废水中的污染物。主要包括 COD 处理、重金属处理、氟离子处理、悬浮物处理和污泥处理等过程。国内的杭州半山电厂、北京热电厂等均采用该系统,例如废水处理系统处理量为 10 t/h,投资 300 万~500 万元<sup>[17]</sup>。按该标准计算,2013 年燃煤电力行业需要投资约 340 亿~570 亿元进行脱硫废水的处理,目前一台百万 kW 燃煤发电机组的年产值约 50 亿元。在烟气脱硫的同时,会产生高额的废水处理设备、运行和人工等附加费用。

### 3.3 固体废物

截至 2013 年底,燃煤电厂脱硫石膏仍有库存  $8000 \times 10^4$  t。目前 28% 脱硫石膏没有得到综合利用,如果对脱硫石膏进行填埋和堆积处理,需考虑其对土壤和地下水的污染;且中国的土地资源有限,填埋不是理想的选择。即使进行脱硫石膏的综合再利用,仍需谨防 Hg、F 和 Cl 等元素的二次污染。

世界上也有很多国家使用石灰石-石膏湿法脱硫工艺,但因为其火电总装机容量不大,所以消耗的资源与产生的脱硫石膏总量均不大,因此对环境造成负面影响不大。而我国燃煤消耗量巨大,到 2013 年底,燃煤消耗量已经达到约  $35 \times 10^8$  t。烟气脱硫是一个长期的工作,通过对我国石灰石-石膏

湿法烟气脱硫的生命周期分析可知,长期如此大规模地采用该烟气脱硫技术,将对我国的生态环境产生严重的影响;并且生态恢复以及固体废物和废水无害化处理需要花费大量经费,而目前烟气脱硫成本<sup>[18-19]</sup>的计算并没有将这些计算在内。

目前计算烟气脱硫成本主要包括工程投资和运行费用,其中工程投资主要是工程建设费用(包括设备费、土建费、安装费和建设周期利息)、工程设计费、不可预见费和其他费用(按一定比例估算);运行费用则主要包括脱硫剂的费用、能耗费用(水、电和汽等)、维修费(即每年检修和大修费用)、人工工资和其他管理费用等。通过计算,得到 2013 年火电行业的脱硫成本为 177 亿元,明显低于 2013 年用于火电厂烟气脱硫的石灰石开采所破坏的石灰石矿区的生态修复成本  $1.404 \times 10^5$  亿元。由此可见,常此以往,石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术不具有可持续性。

我国是硫资源缺乏的国家,2012 年我国进口硫磺总量为  $1120 \times 10^4$  t。如果按我国煤中硫的平均浓度(算术平均)为 1.40% 计算<sup>[20]</sup>,燃煤电厂烟气排出的硫量为  $4900 \times 10^4$  t。如果能将烟气中的硫回收,即可消除由于石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺带来的环境负面影响,又可缓解我国硫资源的匮乏,可谓一举两得。烟气循环与梯度利用技术是一种减少污染物排放量的技术,可提高烟气中硫的浓度,以有利于进一步回收利用。因此,建议积极开展烟气循环与梯度利用技术的研究与示范。

## 4 结论

以燃煤电力行业为例,通过确定分析对象和范围、清单分析和环境影响分析 3 个步骤对石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术进行了生命周期和可持续性分析。结果表明,石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术存在粉尘、噪音和生态破坏等环境问题。2013 年燃煤电力行业用于烟气脱硫的石灰石原材料约  $5600 \times 10^4$  t,生成的脱硫石膏中 Hg、F 和 Cl 总量分别为  $38.76, 23.50 \times 10^4$  和  $1.98 \times 10^4$  t,而脱硫废水中 Hg、F 和 Cl 总量分别为  $1.34, 0.87 \times 10^4$  和  $28.53 \times 10^4$  t;形成的这些脱硫副产物需大量资金进行无害化处理。生态恢复以及固体废物和废水无害化处理成本使得石灰石-石膏湿法烟气脱硫成本明显提高,常此以往,石灰石-石膏湿法烟气脱硫技术不具有可持续性。根据我国的能源结构,烟气循环

与梯度利用技术是目前值得示范和推广的烟气净化技术。

## 参考文献

- [1] 田贺忠,郝吉明,赵喆,等.燃煤电厂烟气脱硫石膏综合利用途径及潜力分析[J].中国电力,2006,39(2):64-69.
- [2] CURRAN M A. Grid-based environmental life cycle assessment [J]. Environment Science & Technology, 1993, 27 (3): 431-436.
- [3] 冯超,马晓茜.石灰石/石膏湿法烟气脱硫的生命周期评价[J].电力与能源,2011,32(5):379-382.
- [4] FENG C , GAO X , TANG Y , et al. Comparative life cycle environmental assessment of flue gas desulphurization technologies in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 68: 81-92.
- [5] 宋晓东,付延冰,刘恒斌,等.基于生命周期评价的高速铁路减排效果[J].中南大学学报:自然科学版,2014,45(9):3302-3307.
- [6] 钱宇,杨思宇,贾小平,等.能源和化工系统的全生命周期评价和可持续性研究[J].化工学报,2013,64(1):134-147.
- [7] 郑元,桂萌.生命周期分析在能源技术比较中的应用[J].上海环境科学,2000,19(8):358-360.
- [8] GUINEE J B , HEI J S R , HUPPES G , et al. Life cycle assessment: past, present, and future [J]. Environment Science & Technology, 2011, 45(1): 90-96.
- [9] REBITZER G , SEURING S. Methodology and application of life cycle costing [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, 8(2): 110-111.
- [10] 中国电力企业联合会.2014 中国电力行业年度发展报告[M].北京:中国市场出版社,2014.
- [11] 邓双,张辰,刘宇,等.基于实测的燃煤电厂氯排放特征研究[J].环境科学研究,2014,27(2):127-133.
- [12] 邓双,刘宇,张辰,等.基于实测的燃煤电厂氟排放特征研究[J].环境科学研究,2014,27(3):225-231.
- [13] WANG S X , ZHANG L , LI G H , et al. Mercury emission and speciation of coal-fired power plants in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(3): 1183-1192.
- [14] 张辰,邓双,张凡,等.燃用高灰高硫煤电厂的汞排放规律研究[J].环境工程技术学报,2013,3(1):53-58.
- [15] GB 8978—1996 污水综合排放标准[S].北京:中国环境科学出版社,1996.
- [16] 陆研,张绍文.矿区生态恢复治理成本测算方法初探[J].草地科学,2009,26(2):19-26.
- [17] 吴怡卫.石灰石-石膏湿法烟气脱硫废水处理的研究[J].中国电力,2006,39(4):75-78.
- [18] 李忠华,薛建明,韩琪.火电厂烟气脱硫工程建设方案的经济评价[J].电力建设,2003(8):60-63.
- [19] 燕丽,杨金田,薛文博.火电机组湿法石灰石-石膏烟气脱硫成本与综合效益分析[J].能源环境保护,2008(5):6-9.
- [20] 罗陨飞,李文华,姜英.中国煤中硫的分布特征研究[J].煤炭转化,2005,28(2):14-18.▷

## 欢迎订阅 2015 年《环境工程技术学报》

《环境工程技术学报》是由中华人民共和国环境保护部主管,中国环境科学研究院主办的综合性学术期刊。主要刊载国内外环境工程技术领域的最新研究成果,报道环境工程及环保实用技术应用的典型案例,关注环保产业政策和行业动态,以及环境工程新技术、新成果的转化应用。本刊主要面向环境、生态、管理工程技术学领域的科研人员、技术研发人员、各级环保管理人员、环保企业经营者与生产者以及相关专业大专院校师生。

《环境工程技术学报》为双月刊,大16开,单月20日出版。每期定价40元,全年240元。欢迎国内读者到当地邮局订阅,邮发代号:2-620;中国国际图书贸易总公司承担本刊国外发行,发行代号:6338BM。如有漏订可直接与编辑部联系。

编辑部地址:北京市朝阳区安外大羊坊8号 中国环境科学研究院

邮 政 编 码: 100012

电 话 / 传 真: 010-84915126

网 址: www.hjgcjsxb.org.cn

电 子 邮 箱: hjgcjsxb@vip.163.com