

# 活性炭同时脱硫脱硝系统生命周期评价\*

魏进超 李俊杰 康建刚

(中冶长天国际工程有限责任公司,长沙 410000)

**摘要:**通过生命周期评价(LCA)方法,以活性炭、液氨等原料生产和运输、设备运行为系统边界,对国内某钢铁企业烧结烟气活性炭同时脱硫脱硝系统进行能耗分析和环境影响负荷评价。结果表明:活性炭同时脱硫脱硝系统生命周期内设备运行能耗最大,占总能耗的63%,系统运行过程中脱硫脱硝介质活性炭和液氨生产能耗占比分别为20%和12%,而材料运输能耗占比最小,为1%;活性炭脱硫脱硝系统生命周期内总环境影响负荷为177630 PET<sub>2000</sub>,各环境影响潜值大小依次是温室效应、环境酸化、富营养化、光化学臭氧合成、烟尘、固体废弃物;能源生产过程污染物排放和烟气净化后氮氧化物排放是导致温室效应和环境酸化影响潜值较大的原因。最后,依据生命周期评价结果给出相应建议,以期钢铁企业烟气净化工程提供参考。

**关键词:**活性炭;脱硫脱硝;生命周期评价;能耗;环境影响负荷

## LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ACTIVATED CARBON BASED COMBINED DESULFURATION AND DENITRATION TECHNOLOGY

Wei Jinchao Li Junjie Kang Jiangang

(Zhongyue Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:** The method of life cycle assessment was applied to analysis of energy consumption and environment impact potential for activated carbon based combined desulfuration and denitration technology. The system boundary includes operation of equipment, production and transportation of active carbon, liquid ammonia, et al. The results show that the highest energy consumer is the process of equipment operation, whose proportion is 63%, and the energy consumption of activated carbon and liquid ammonia preparation account for 20% and 12%, respectively. The percentage of energy consumption for transportation is the smallest, accounts for 1%. The total environmental impact potential is 177630PET<sub>2000</sub> for activated carbon based combined desulfuration and denitration technology. For the individual environmental impacts, the order is as follows: GWP > AP > NEP > POCP > SAP > SWP. The production of energy and emission of purified flue gas have been identified to be the most important contributor to GWP and AP. Finally, in order to provide a reference for the study of engineering for flue gas purification in iron and steel enterprises, some suggestions are put forward to the results.

**Keywords:** activated carbon; desulfuration and denitration; life cycle assessment; energy consumption; environmental impact potential

### 0 引言

生命周期评价(Life cycle assessment,简称LCA)是国际上普遍认可的一种可以用来分析产品环境特性和支持决策的方法,被称为“20世纪90年代的环境管理工具”。它是对产品或过程从最初的原材料采集到加工制造、产品使用以及使用后处理的全过程

进行跟踪和定量分析以及定量评价的方法<sup>[1]</sup>。生命周期评价(LCA)在国外应用和发展了近30年,正在成为许多政府和企业的管理工具。我国在LCA领域的研究从1997年起,目前,LCA理论及应用研究越来越受到我国科研工作者的重视,并已成功应用于城市固体废弃物管理<sup>[2]</sup>、化石能源使用带来的环境污染评价<sup>[3]</sup>、铝硅合金生产工业设计<sup>[4]</sup>和铜藻基活性炭的制备工艺选择等方面<sup>[5]</sup>。

活性炭是一种以煤炭为原料生产的,专门用于脱

\* 2016年度“湖湘青年英才”支持计划(2016RS3012);湖南省重大科技成果转化类项目(2016GK4002)。

收稿日期:2016-09-02

硫脱硝工艺的新型成型活性炭质吸附材料。钢铁企业烧结烟气中的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  是形成酸雨的主要原因,活性炭同时脱硫脱硝技术不仅可以回收硫资源,大大降低生产成本,同时不产生二次污染,而且通过加  $\text{NH}_3$  还可将  $\text{NO}$  催化还原为无污染的  $\text{N}_2$  [6],是一种新型的、较为先进的烟气净化技术。目前,关于活性炭制备、性能及脱硫脱硝机理得到了广泛的研究 [6-8],然而有关钢铁企业烧结烟气活性炭同时脱硫脱硝系统生命周期评价的研究并不多,见诸报道的仅以燃煤电厂脱硫脱硝生命周期评价居多 [9-10]。

本文以国内某钢铁企业烧结烟气活性炭同时脱硫脱硝系统为研究对象,对系统运行阶段能耗和污染物排放数据进行收集、整理和计算,进而对影响评价结果做出分析解释,并根据加权评估结果识别出系统的薄弱环节和潜在改善机会,为达到系统最优化目的提出改进建议。

## 1 研究方法

1993年SETAC在《生命周期评价纲要:使用指南》中将生命周期评价的结构归纳为4个有机联系的部分,如图1所示:目标定义和范围界定;清单分析;影响评价;改善评价 [11]。本文根据LCA的基本概念和研究框架,按照四步走的方法对国内某钢铁企业烧结烟气净化工程活性炭同时脱硫脱硝系统进行生命周期评价。

本文生命周期评价涉及到的活性炭法脱硫脱硝系统输入输出数据均来自于国内某钢厂实际运行阶段,在对数据进行简化、取舍时兼顾了数据的合理性、数据获得的难易程度以及数据对结果的影响程度。

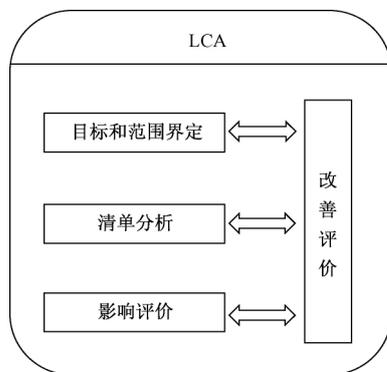


图1 生命周期评价的基本结构

## 2 活性炭同时脱硫脱硝技术 LCA 评价

### 2.1 目标定义和范围界定

本文研究对象为国内某钢铁企业烧结烟气活性炭同时脱硫脱硝系统,烧结烟气量为  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ ,通

过生命周期评价,定量计算各个环节的能耗和污染物排放,确定能耗多、污染物排放严重的环节,并根据评估结果识别出系统的薄弱环节和潜在改善机会,为达到系统最优化目的提出改进建议。表1为活性炭法烟气净化系统主要能源介质消耗。

表1 活性炭同时脱硫脱硝系统主要能源介质消耗

能源介质	年耗量
活性炭/t	4 200
液氨/t	3 100
电/(kW·h)	62 548 000
氮气/ $\text{m}^3$	8 600 350

活性炭同时脱硫脱硝系统生命周期包括建设阶段、运行阶段和退役阶段,由于建设阶段包括土建、消防和设备制造安装等复杂的能源投入和环境污染排放过程,难以全面准确的评价,且建设阶段和退役阶段各项指标在整个生命周期的占比很小,所以,本文仅就活性炭法脱硫脱硝系统运行阶段进行生命周期评价,以系统正常运行1年为功能单位进行能耗和污染物排放数据的整理计算。由于在追溯投入到系统各种产品要素时,还会涉及到新的产品能耗投入和污染物排放,依次追溯将使得计算非常复杂至难以进行,而且很多数据无法获得,所以本文仅以投入系统运行阶段的主要产品如活性炭、液氨、氮气生产和运输,以及系统运行电力消耗相对应的能源投入和污染物排放为系统边界。图2为活性炭同时脱硫脱硝系统边界。

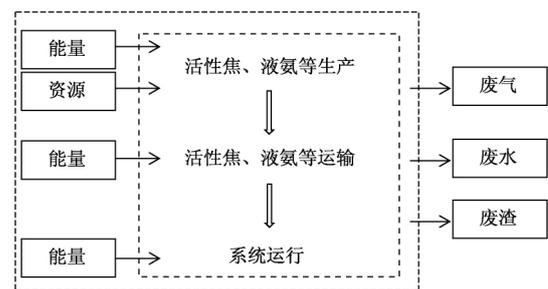


图2 活性炭同时脱硫脱硝系统边界

### 2.2 清单分析

对活性炭同时脱硫脱硝系统进行分析可知,输入该系统的产品流为烧结过程产生的烟气,输出产品流为处理后的烟气;由环境输入系统的基本流包括烟煤、水资源等原材料和资源,输出的基本流为废气、废水、废渣等。运行阶段包括液氨、活性炭、氮气等原料的生产和运输能耗,脱硫脱硝系统和氨气供应系统等设备的运行能耗。

产品生产能耗的计算方法为产品总量乘以相应的单位生产能耗,活性炭、液氨和氮气的单位生产能耗分别为45.237 MJ/kg、36.86 MJ/kg和0.47 kW·h/m<sup>3</sup>(99.99%纯度氮气);产品运输能耗全部按公路运输计算,单位运输能耗为556.83 kJ/(t·km),结合相应的运输距离计算得到运输能耗;设备运行耗电以火力发电方式作为能源消耗计算的基础,1 kW·h相当于9.319626 MJ。活性炭烟气净化系统生命周期年能耗汇总见表2。

表2 活性炭同时脱硫脱硝系统年能耗汇总表 MJ

活性炭生产能耗	液氨生产能耗	氮气生产能耗	设备运行能耗	运输能耗
189 995 400	114 266 000	37 671 461	582 923 967	5 785 494

运行阶段污染物排放包括能源、液氨、活性炭等生产过程的污染物排放、液氨和活性炭运输过程的污染物排放和经脱硫脱硝后排向大气的少量SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>等污染物。污染物排放数据参考文献报道的Gabi软件数据<sup>[12]</sup>,各阶段污染物排放数据汇总如表3所示。

表3 活性炭同时脱硫脱硝系统年污染物排放汇总表

序号	名称	总计/kg	序号	名称	总计/kg
1	氨	19 450.37	15	氨盐	5 611.45
2	氯化氢	280 389.35	16	硝酸盐	7 498.21
3	氟化氢	110 600.07	17	磷酸盐	12.11
4	硫化氢	54.76	18	磷	0.45
5	氮氧化物	1 660 208.48	19	芳香烃	0.13
6	二氧化硫	682 307.70	20	乙苯	0.13
7	二氧化碳	241 512 741.08	21	甲醇	5 837.48
8	一氧化二氮	14 951.11	22	苯酚	5.44
9	NM VOC	16 549.97	23	多环芳烃	0.10
10	甲烷	967 823.44	24	二甲苯	2.66
11	一氧化碳	44 796.99	25	BOD	51.74
12	粉尘	341 835.44	26	AOX	455.75
13	硫酸盐	196 399.94	27	COD	95 720.98
14	亚硫酸盐	148.76	28	废料	446.02

### 2.3 影响分析

在LCA中,影响评价是将清单分析所得的结果以技术定量或定性方式评估重要且具有潜在性的环境影响。ISO SETAC将影响评价分为3步:分类、特征化、量化<sup>[13]</sup>。

分类是一个将清单分析的结果划分到影响类型的过程,影响分类主要考虑的问题是将清单分析中得来的数据归到哪类环境影响中。关于环境影响类型的选择,国际上有很多不同的标准,本文结合UNEP、SETAC和中科院生态环境研究中心对生命周期评价中的影响类型所做的划分<sup>[14-15]</sup>,考虑钢铁企业烧结

烟气污染物排放的特点,选择温室效应、酸化、富营养化、光化学臭氧合成、烟尘和固体废弃物6种环境影响类型。

特征化即针对所确定的环境影响类型,以某种物质作为基准,根据各环境影响因子与参照物之间的当量关系<sup>[14]</sup>,计算出每种影响类型的环境影响潜力,结果见表4—表9。

表4 温室效应影响潜值(GWP)

排放物	排放值/kg	当量因子 <sup>[14]</sup>	影响潜值/(kg CO <sub>2</sub> -eq)
二氧化碳	241 512 741.1	1	241 512 741.08
氮氧化物	1 660 208.48	320	531 266 713.60
NM VOC	16 549.97	3.390386	56 110.79
甲烷	967 823.44	25	24 195 586.00
一氧化碳	44 796.99	2	89 593.98
芳香烃	0.13	3	0.39
合计			797 120 745.84

表5 酸化影响潜值(AP)

排放物	排放值/kg	当量因子 <sup>[14]</sup>	影响潜值/(kg SO <sub>2</sub> -eq)
氨	19 450.37	1.88	36 566.70
氯化氢	280 389.35	0.88	246 742.63
氟化氢	110 600.07	1.6	176 960.11
硫化氢	54.76	1.88	102.95
氮氧化物	1 660 208.48	0.7	1 162 145.94
二氧化硫	682 307.7	1	682 307.70
硫酸盐	196 399.94	0.65	127 659.96
亚硫酸盐	148.76	0.8	119.01
合计			2 432 604.99

表6 富营养化影响潜值(NEP)

排放物	排放值/kg	当量因子 <sup>[14]</sup>	影响潜值/(kg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -eq)
氨	19 450.37	3.64	70 799.35
氮氧化物	1 660 208.48	1.35	2 241 281.45
一氧化二氮	14 951.11	2.82	42 162.13
氨盐	5 611.45	3.64	20 425.68
硝酸盐	7 498.21	1	7 498.21
磷酸盐	12.11	10.45	126.55
磷	0.45	32.03	14.41
BOD	51.74	1.79	92.61
COD	95 720.98	0.23	22 015.83
合计			2 404 416.22

表7 光化学臭氧合成影响潜值(POCP)

排放物	排放值/kg	当量因子 <sup>[14]</sup>	影响潜值/(kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq)
NM VOC	16 549.97	0.389694	6 449.42
甲烷	967 823.44	0.007	6774.76
一氧化碳	44 796.99	0.03	1343.91
芳香烃	0.13	0.8	0.10
乙苯	0.13	0.6	0.08
甲醇	5 837.48	0.1	583.75
苯酚	5.44	0.8	4.35
多环芳烃	0.1	0.8	0.08
二甲苯	2.66	0.8	2.13
合计			15 158.59

表8 烟尘和灰尘影响潜值(SAP)

排放物	排放值/kg	当量因子 <sup>[14]</sup>	影响潜值(kg TSP-eq)
粉尘	341 835.44	1	341 835.44

表9 固体废弃物影响潜值(SWP)

排放物	排放值/kg	当量因子 <sup>[14]</sup>	影响潜值/kg(固废-eq)
废料	446.02	1	446.02

特征描述需要进一步对数据进行标准化,得到潜在影响的相对大小。对活性炭同时脱硫脱硝系统的各种环境影响潜值采用其相应的标准化基准得到标准化后的影响潜值,但这并不意味着各种环境影响潜值之间具有了可比性,因而需要对环境影响类型的严重性进行排序,即赋予不同影响类型不同的权重,然后才能进行比较。本文权重的确定采用“目标距离法”的思想,即某种环境效应的严重性用该效应当前水平和目标水平(标准或容量)之间的距离来表征<sup>[14]</sup>。特征化结果及量化结果见表10。

表10 特征化及量化结果

项目	标准化基准 <sup>[14]</sup> (kg xx-eq/ person*a)	标准化后 环境影响 潜值 (person*a)	权重 因子 <sup>[16]</sup>	加权后 环境影响 潜值 (PET <sub>2000</sub> )
温室效应/kg(CO <sub>2</sub> -eq)	8 700	91 623.07423	0.83	76 047.15161
酸化/kg(SO <sub>2</sub> -eq)	36	67 572.36082	0.73	49 327.8234
富营养化/kg(NO <sub>3</sub> -eq)	62	38 780.90671	0.73	28 310.0619
光化学臭氧合成/kg(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -eq)	0.65	23 320.90429	0.53	12 360.07927
烟灰尘/kg(TSP-eq)	18	18 990.85778	0.61	11 584.42324
固体废弃物/kg(固废-eq)	251	1.776972112	0.62	1.101722709

注:标准化基准为1990年各地区及全国标准化人当量基准值;权重因子为根据2000年削减目标所确定的权重;PET<sub>2000</sub>是环境影响负荷的单位,1 PET<sub>2000</sub>表示每个中国公民2000年的平均环境影响负荷。

## 2.4 改善评价

图3为活性炭同时脱硫脱硝系统能耗构成,可以发现:运行阶段设备运行能耗最大,占总能耗的63%;其次,系统运行过程中脱硫脱硝介质活性炭和液氨生产能耗占比分别为20%和12%;而材料运输能耗占比最小,为1%。因此,设法降低设备运行期间的电耗是降低整个烟气净化系统能耗的关键。本文依据工程现场运行的活性炭法脱硫脱硝系统提出降低能耗的改进建议如下:

1) 烟气由增压风机引入吸附塔是高耗能过程,主要是由烟气通过活性炭吸附床层时阻力较大导致的,故合理设计活性炭煤层厚度和活性炭下料速度对降低能耗意义重大。

2) 优化吸附塔结构设计,增大吸附塔床层多孔板流通面积,降低烟气通过阻力。

3) 生产过程中余热余能的利用,例如解析塔热

风循环系统外排的部分高温气体可以用来预热作为燃料的焦炉煤气或高炉煤气。

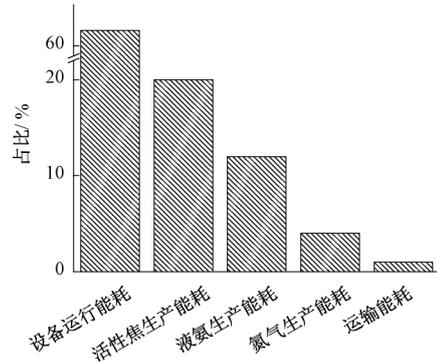


图3 活性炭同时脱硫脱硝能耗的占比

量化后的各类环境影响潜值具有了可比性,而且也反应了其相对重要性。活性炭同时脱硫脱硝系统的总环境影响负荷为177630 PET<sub>2000</sub>。各种环境影响类型的相对贡献见图4。结果表明,在钢铁企业烧结烟气活性炭脱硫脱硝系统生命周期内(包括原材料的生产及运输过程、设备运行过程)环境影响主要为温室效应(占比为43%),其次是酸化(占比为28%),固体废弃物的环境影响最小(占比可以忽略不计)。

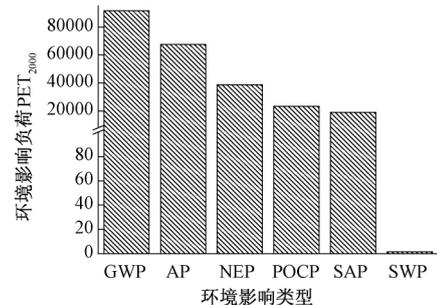


图4 活性炭同时脱硫脱硝生命周期影响的加权分析

表4和表5分别为温室效应影响潜值和酸化影响潜值,可以发现导致温室效应影响潜值大的原因主要来自于二氧化碳和氮氧化物排放的贡献(占温室效应影响潜值总量的比例达到96.94%),而追溯其来源可以发现能源生产过程是导致二氧化碳排放量较大的原因(贡献占比为95.54%),而烟气净化后氮氧化物残余是氮氧化物排放量较大的原因(贡献占比为84.77%);导致酸化效应影响潜值大的原因主要来自于氮氧化物排放的贡献(占酸化效应影响潜值总量的比例达到47.78%),同样,氮氧化物来自于烟气净化后残余氮氧化物的排放。

分析可知,活性炭脱硫脱硝系统生命周期内温室

效应和酸化的影响不容忽视,而相应的行之有效的办法是应该从能源消耗量和烟气排放中氮氧化物含量两个方面改进。通过图3可知,减少能源消耗的重要手段应该从系统运行电耗着手,设备设计更环保节能、生产过程余热余能利用等方面的优化是减少能耗的最有效方法;虽然活性炭烟气净化系统完全满足相关排放指标,但需要改进优化现有的活性炭脱硫脱硝系统进一步减少排放到大气中氮氧化物残余量,做到更加绿色环保;另外,研发新型的活性炭催化剂来提高氮氧化物脱除效率,从而减少排向大气中的氮氧化物。

### 3 结论与建议

1) 活性炭同时脱硫脱硝系统生命周期内设备运行能耗最大,占总能耗的63%;其次,系统运行过程中脱硫脱硝介质活性炭和液氨生产能耗占比分别为20%和12%;而材料运输能耗占比最小,为1%。

2) 活性炭脱硫脱硝系统生命周期内环境影响主要为温室效应(占比为43%),其次是酸化(占比为28%),固体废弃物的环境影响最小。

3) 针对活性炭脱硫脱硝系统生命周期内能耗高、环境污染严重的环节,提出的改进建议如下:

a. 烟气由增压风机引入吸附塔是高耗能过程,主要原因是烟气通过活性炭吸附床层阻力较大导致的,故合理设计活性炭煤层厚度和活性炭下料速度对降低能耗意义重大。

b. 优化吸附塔结构设计,增大吸附塔床层多孔板流通面积,降低烟气通过阻力。

c. 生产过程中余热余能的利用,例如解析塔热风循环系统外排的部分高温气体可以用来预热作为燃料的焦炉煤气或高炉煤气。

d. 研发新型的活性炭催化剂提高氮氧化物脱除效率,从而减少排向大气中的氮氧化物。

#### 参考文献

[1] Rebitzer G, Ekvall T, Frischknecht R, et al. Life cycle assessment: Part I: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications [J]. *Environment International*, 2004, 30(5): 701-720.

[2] Wei Z, Voet E V D, Zhang Y, et al. Life cycle assessment of

municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(5): 1517-1526.

[3] Liu Y, Langer V, Høgh-Jensen H, et al. Life cycle assessment of fossil energy use and greenhouse gas emissions in Chinese pear production [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(14): 1423-1430.

[4] Hong J, Zhou J, Hong J, et al. Environmental and economic life cycle assessment of aluminum-silicon alloys production: a case study in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 24(24): 11-19.

[5] 窦鑫,曾淦宁,艾宁,等. 铜藻基活性炭全生命周期温室气体排放分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(12): 262-266.

[6] 李兰廷,解伟,梁大明,等. 活性炭脱硫脱硝的机理研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(8): 79-83.

[7] Zuo Y, Yi H, Tang X. Metal-Modified Activated carbon based combined desulfuration and denitration technology from sintering flue gas [J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(1): 377-383.

[8] Jiang J C, Jiang X, Yang Z S. Flue gas desulfurization and denitrification by activated coke: a mini-review [J]. *Recent Patents on Chemical Engineering*, 2013, 6(3): 143-151.

[9] 周建国,周春静,赵毅. 基于生命周期评价的选择性催化还原脱硝技术还原剂的选择研究[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(3): 102-104.

[10] 马韵哲,郭丽颖,王东歌,等. 燃煤电厂湿式电除尘生命全周期环境影响评估研究[J]. *环境保护前沿*, 2015, 05(3): 54-62.

[11] Qingxin F, Hongguang A, Chao M. Life cycle assessment [J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(6): 177-180.

[12] 洪巧巧. 燃煤电厂烟气脱硫脱硝除尘技术生命周期评价[D]. 杭州:浙江大学,2015.

[13] Lecouls H. ISO 14043: Environmental management life cycle assessment life cycle interpretation [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1999, 4(5): 245-245.

[14] 杨建新,徐成,王如松. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京:气象出版社,2002: 81-99.

[15] 夏青,于洁,尹航,等. ISO14020 系列国际标准教程[M]. 北京:中国环境科学出版社,2004: 220-225.

[16] Yang J, Nielsen P H. Chinese Normalization References and Weighting Factors [C] // Proceedings of the third international conference on ecobalance. Tsukuba Research Center, Agency of industrial sciences and technology, 1998.

第一作者:魏进超(1981-),男,博士,所长/高工,主要研究方向为烧结烟气净化研究。40559802@qq.com