

基于 LCA 的燃煤锅炉 FGD 超低排放对资源消耗 与环境影响评价

韩涛, 潘卫国, 王文欢

(上海电力学院, 上海 200090; 上海发电环保工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要:为符合严格的环保排放限制,进一步降低燃煤机组烟气硫氧化物排放,达到燃气机组排放浓度限制的超低排放的目标,本研究在火电机组现有烟气脱硫设施基础上,进行了设备增效改造。运用 LCA(生命周期分析法)对某 1 000 MW 超临界燃煤机组改造前后的 FGD(脱硫系统)进行研究,找出石灰石及主要工程材料的生产、运输及脱硫三个过程对环境的影响因素,计算各过程的能源消耗量和对环境的影响潜值。结果表明,经过改造后,二氧化硫排放浓度可以由 56.9 mg/m^3 降低到 30.86 mg/m^3 ,年减少排放 292.8 t。资源耗竭系数增加了 19.98 人当量,造成的环境影响潜值可以降低 32 069.43 人当量。

关键词:生命周期评价;超低排放;烟气脱硫;资源消耗;环境影响

中图分类号: X511 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.09.013

引言

我国的能源消费结构中煤占主要部分,其燃烧产生的硫氧化物排放量巨大,会造成酸雨、呼吸道刺激感染、空气质量下降等问题^[1~5]。石灰石-石膏法烟气脱硫工艺成熟、煤种适应性广、脱硫效率高、吸收剂利用率高、脱硫剂来源丰富且廉价^[6~8]。当前燃煤机组的污染物排放限额越来越严格,因此锅炉污染物超低排放成为研究重点之一。

生命周期分析法是一个评价与产品、工艺或行动相关环境负荷的客观过程,它通过识别和量化能源与材料使用和环境排放,评价这些能源与材料使用和环境排放的影响,并评估和实施影响环境改善的机会^[9]。当前,生命周期法由于其可以对某产品系统整个生命周期的环境影响进行评价,具有可以

得出全面综合结论的优点,所以逐步为大家所接受和采用^[10~14]。

1 FGD 的 LCA 分析评价模型

1.1 LCA 范围的界定

在进行生命周期分析时考虑脱硫剂石灰石粉及 FGD 主要工程材料的生产、运输和 FGD 脱硫 3 个子过程对环境的影响,主要从环境影响和能耗两个方面进行分析。为了便于计算忽略其它非主要工程材料及加工制作过程耗费能源和产生的污染物。FGD 系统范围界定如图 1 所示。

1.2 清单分析

锅炉 FGD 近零排放改造前后烟气中电量消耗及石灰石粉和污染物含量都有差别,钢铁、石灰石粉、标煤、汽油、柴油及水等的消耗,污染物包括烟尘、 NO_x 、 SO_2 、HC 和 CO 等。建立改造前后 FGD 全生命周期生命清单,计算近零排放改造前后的资源投入与污染物减排的效果。

FGD 烟气脱硫项目的辅机有增压风机、振动给料机、湿式球磨机、金属分离器、挡边皮带输送机、皮带称重式给料机、氧化风机以及石灰石浆液泵等,改造前其总耗电量约为 12 000 kW/h。改造后增加了一级脱硫塔,系统功耗增加约 3 000 kW/h。

1.2.1 石灰石及主要工程材料的生产过程

我国生产每吨石灰石消耗柴油 0.15 kg、电力 1.3 kW·h。采用湿式球磨机加工研磨 1 t 石灰石粉耗电 27.54 kW·h,钢球 640 g。生产钢球消耗的标煤量按生产钢材的量计算,根据 2011 年 300 MW 机组能效对标数据可知亚临界蒸汽轮机发电机组,

收稿日期: 2015-08-13; 修订日期: 2015-09-18

基金项目: 火电厂脱硫脱硝节能增效关键技术研究与应用(13dz1202703); 基于高效脱硝、除尘和脱硫的燃煤电站锅炉环保岛集成技术开发与示范(14DZ1200200)

作者简介: 韩涛(1989-)男,安徽合肥人,上海电力学院硕士研究生。

生产 10 MW·h 电力、消耗 3.3 t 标煤和 17.3 t 水。根据火力发电大气污染物排放系数可知生产 10 MW·h 电力燃烧煤炭会向大气排放(8.25 t) CO₂、(80.3 kg) SO₂、(69 kg) NO_x和粉尘 33.5 kg^[15]。每消耗 1 kg 柴油产生 CO₂为 3 188 g、NO_x为 9.29 g、CO 为1.86 g^[16]。

FGD 工程建设主材为钢材,包括喷淋塔、石灰石粉仓、支撑装置钢架及管道等,约需钢材 2 000 t,

假设该项目使用年限为 30 年,超低排放改造过程需要增加钢材约 500 t。每吨钢材消耗标煤 0.7 t、排放废水 3 t^[17]。

1.2.2 石灰石和工程材料运输过程及能耗

对于铁路运输主要考虑内燃机车和电力机车的综合能耗,公路运输主要考虑汽车的汽油机能耗,铁路货运的单位综合能耗合标煤 7.4 g/(t·km),公路运输的单位汽油消耗为 0.07 L/(t·km)^[18]。

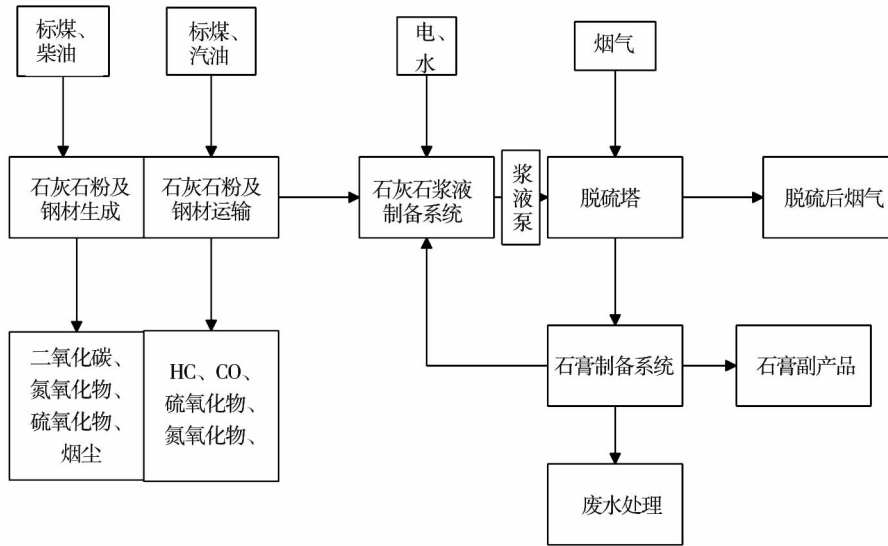


图 1 FGD 项目目标范围

Fig. 1 Range of the target for a FGD project

假设脱硫所需要的材料 40% 由汽车运输 60% 由火车运输,运输距离 200 km。汽车载重 20 t,汽油密度为 0.73 kg/L。根据需运输材料,计算累计出车次数和累计总运输里程,最终得出消耗汽油量及产生污染物量。同理,根据火车载重为 1 200 t,综合能耗考虑标煤消耗。计算消耗标煤量及产生污染物量。

内燃机的排放对人体和环境影响最大的污染物主要是 HC、CO、CO₂、NO_x,其排放水平如表 1 所示^[18]。

表 1 目前国内内燃机车废气排放水平
Tab. 1 Current exhaust gas emissions level of internal combustion engines in domestics

项目	HC	CO	CO ₂	NO _x
汽油机/g·km ⁻¹	1	8.6	170	2.8

2 生命周期影响评价

2.1 环境影响评价方法

2.1.1 环境影响评价的步骤与目的

全生命周期各阶段对环境造成的影响需要通过定量和定性分析,这一过程称为影响评价。根据国际标准化组织的 ISO14040: 2006 的框架,其中包括:影响分类、特征化和量化评价三个步骤。清单分析结果不能直接判定其影响的大小,因为各种排放因子对生态系统和环境变化的贡献值不同,需要进行生命周期影响评价,将清单分析的结果转化为容易理解,能够反映环境影响潜值的指标。在影响评价阶段,影响类型的选择、模拟以及评估等都受到主观因素的影响。因此,需要确保能清楚的说明报告中的假设,透明性对影响评价十分关键^[19]。

2.1.2 环境影响潜值分类

全生命周期整个产品系统释放的所有环境影响的总和被称为产品环境影响潜值。其可以用式(1)表示:

$$Q_{EP}(j) = \sum Q_{EP}(j)_i = \sum [E(j)_i \cdot Q_{EF}(j)_i] \quad (1)$$

式中: $Q_{EP}(j)$ —全生命周期释放环境影响因子对第 j 种潜在环境影响类型的贡献; $Q_{EP}(j)_i$ —第 i 种物质对第 j 种潜在环境影响类型的贡献值; $E(j)_i$ —第 i 种物质排放量; $Q_{EF}(j)_i$ —第 i 种物质对第 j 种潜在环境影响的当量因子^[19]。通常 CO_2 用作全球变暖影响潜值的参考物质,酸化影响潜值采用 SO_2 ,富营养化影响潜值采用 NO_x ,光化学臭氧合成影响潜值采用 C_2H_4 。

2.1.3 环境影响标准化

标准化是将所有环境影响具有相同单位,从而使不同环境影响类型具备可比性。本文以全球人均每年造成的环境影响为基准,标准化后的单位为人当量,得到不同环境影响类型由多少数量人造成影响相同^[20]。

2.2 环境影响评价

2.2.1 环境影响的分类

环境影响主要考虑资源消耗及各种污染气体对环境的影响,包括温室气体排放、富营养、酸雨、光化学臭氧合成、人体毒性和烟尘及灰尘6个方面,分别使用 Q_{GWP} 、 Q_{NEP} 、 Q_{ACP} 、 Q_{POP} 、 Q_{HTP} 及 Q_{SAP} 等6个指数表征^[22]。

2.2.2 环境影响类型的确认

环境影响类型从发生作用的空间尺度看,有全球性影响、区域性影响和局地性影响。本研究中煤矿资源耗竭与全球变暖产生全球性影响;水资源消耗、酸化和富营养化产生区域性影响;烟尘及灰尘产生局地性影响;光化学臭氧合成产生区域性影响。

2.2.3 资源耗竭系数

资源耗竭系数反映了产品系统资源消耗占整个自然资源的份额,同时也反映了资源的稀缺性。其可以为企业在产业设计、材料替代方面提供简单、统一的标准,也可诱导消费者进行绿色消费,还可为生态标志产品标准的制定提供可行的方案。资源耗竭系数通过一次能源消耗来表征,本文将能源作为资源进行评价。

上述消耗量只表示资源消耗的绝对量,没有反映其相对大小,因此需采用人均资源消耗量进行标准化。数据的标准化在实践上须选择同一时期的数

据,本文选用2010年作为参考年。2010年中国主要资源消耗的基准为:煤 $1\ 636\ kg/(人 \cdot a)$;油 $457\ kg/(人 \cdot a)$ ^[23]。本项目服务周期为30a,以平均1a为计算目标,得出煤、油等资源消耗潜值,单位为人当量,反映了所耗资源占人均资源消耗量的比重。由于柴油与汽油都由原油炼制,故将其与汽油一起计算,原油的成品油率约60%。

标准化后的资源消耗仅仅反映各种资源消耗的相对大小,并没有反映该资源的稀缺性。因此需要进一步加权分析,计算资源耗竭系数。对于不可更新资源消耗的加权表述为:

$$Q_{WR}(j) = Q_{WF}(j) * Q_{NP}(j) \quad (2)$$

式中: $Q_{WR}(j)$ —加权后的资源消耗; $Q_{WF}(j)$ —标准化后的资源消耗; $Q_{NP}(j)$ — j 种资源的可供应期的倒数。

通过加权可以累积资源耗竭潜值,得到资源耗竭系数 Q_{RDI} ,表达式如下:

$$Q_{RDI} = \sum Q_{NW}(j) \quad (3)$$

3 案例分析

研究目标为1台1000MW机组FGD脱硫设备,锅炉在负荷为90%工况、校核煤种、标准状况下烟气流量为 $3\ 097\ 060\ m^3/h$ 。如图2所示,主要工艺流程为原烟气经增压风机升压,通过吸收塔烟气入口进入吸收塔,烟气向上流动并与逆向喷淋下降的循环浆液的小液滴相遇,在喷淋区烟气与碱性石灰石浆液得到充分的接触反应,脱除烟气中的二氧化硫后,经除雾器除去烟气中的雾滴,再经由烟囱排出;石灰石浆液由设置在吸收塔内喷淋母管上的多个喷嘴喷出,与烟气接触发生中和反应脱除烟气中的二氧化硫后,氧化风机向脱硫塔鼓入空气,浆液流入吸收塔浆池内。石膏浆液被石膏浆液泵抽入石膏旋流器经过真空皮带干脱水生成石膏,部分浆液重新加入石灰石浆液池。

对FGD的改造是在原有设备的基础上吸收塔标高抬高2m。在原喷淋层的上部增加一层。新增的喷淋层在原有第三层上方2m,喷淋层和喷嘴的规格型号、技术要求与原有要求相同。每套系统增加1台氧化风机和1台电机功率为1200kW的浆液循环泵及配套设备。

3.1 电厂基础数据

根据电厂FGD改造前后运行数据如表2所示:改造后石灰石粉耗量由 $8.8\ t/h$ 增加到 $9.5\ t/h$, SO_2

的排放浓度由 56.9 mg/m³ 降至 30.86 mg/m³ , 烟尘浓度由 16.51 mg/m³ 降至 11.53 mg/m³ , NO_x 浓度由 92.06 mg/m³ 降至 58.52 mg/m³ 。

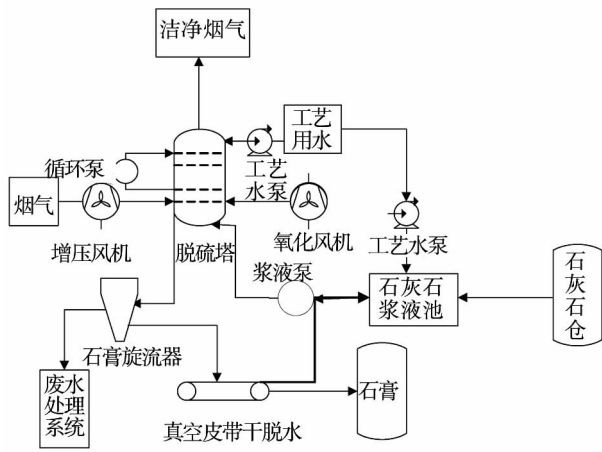


图 2 FGD 工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of the FGD process

假设备年运行时间为 5 200 h , 则根据改造前后资源投入如下: 改造前年石灰石粉耗量 45 760 t , 改造后年耗量 49 400 t 。 则改造前年生产石灰石粉分别消耗电力 1 319.72 MW·h、柴油 6.86 t、钢球 29.29 t; 改造后年生产石灰石粉分别消耗电力 1 424.7 MW·h、柴油 7.41 t、钢球 31.62 t。 改造前年运送货物量为 45 855.96 t , 根据假设则有 18 342.38 t 货物由汽车运送 , 则需出车 918 次 , 消耗汽油 187.46 t。 火车需运送 27 513.58 t 货物 , 火车出车 23 次 , 消耗标煤 40.72 t。 同理可以计算出改造后年需运送货物 49 514.95 t , 其中有 19 805.98 t 由汽车运输 , 需要出车 991 次 , 消耗汽油 202.42 t。 火车运输 29 708.97 t 货物需要出车 25 次 , 消耗标煤 43.97 t。

FGD 运行过程中消耗大量电力 , 改造前电功耗为 12 000 kW/h , 改造后电功耗 15 000 kW/h。 则改造前后 FGD 年资源消耗量如表 3 所示。 通过计算得出改造前后 FGD 年产生污染物质 , 其数值如表 4 所示。

表 2 FGD 改造前后数据对比

Tab. 2 Contrast of the data before and after the FGD reconstruction

项目	石灰石粉耗量/t·h ⁻¹	电功率/kW·h ⁻¹	出口 SO ₂ 浓度/mg·m ⁻³	脱硫效率/%	液气比	出口烟尘浓度/mg·m ⁻³	出口 NO _x 浓度/mg·m ⁻³
FGD 改造前	8.8	12 000	56.9	96.6	9.3	16.51	92.06
FGD 改造后	9.5	15 000	30.86	98.2	12.4	11.53	58.52

表 3 改造前后 FGD 年资源消耗量

Tab. 3 Annual resource consumption rate before and after the FGD reconstruction

		钢铁/t	电力/MW·h	柴油/t	煤炭/t	汽油/t
FGD 改造前	材料生产	95.95	1 319.72	6.86	67.17	0
	材料运输	0	0	0	40.72	187.46
	脱硫过程	0	62 400	0	0	0
	总计	95.95	63 719.72	6.86	117.89	187.46
FGD 改造后	材料生产	114.95	1 424.7	7.41	80.47	0
	材料运输	0	0	0	43.97	202.42
	脱硫过程	0	78 000	0	0	0
	总计	114.95	79 424.7	7.41	124.44	202.42

表 4 改造前后 FGD 年产生污染物质

Tab. 4 Amount of pollutants produced each year before and after the FGD reconstruction

		CO/kg	HC/kg	烟尘/t	CO ₂ /t	NO _x /t	SO ₂ /t
FGD 改造前	材料生产	1.3	0	5.1	1 278.58	10.51	12.23
	材料运输	1 578.96	183.6	0.41	133.01	1.37	1
	脱硫过程	0	0	209.04	51 480	430.56	501.01
	总计	1 580.26	183.6	214.55	52 891.59	442.44	514.24
FGD 改造后	材料生产	1.41	0	5.59	1 376.55	11.52	13.4
	材料运输	1 704.52	198.2	0.45	143.62	1.47	1.07
	脱硫过程	0	0	261.3	64 350	538.2	626.34
	总计	1 705.93	198.2	267.34	65 870.17	551.19	640.81

表5 FGD脱硫项目改造前后一次能源消耗量

Tab.5 Primary energy source consumption rate before and after the reconstruction in the FGD desulfurization project

	能源	数量	热值	总热值/GJ
FGD改造前	标煤/t	117.89	29 308 MJ/t	3 455.12
	电/MW	63 719.72	3 600 MJ/MW	229 390.99
	柴油/t	6.86	42 705 MJ/t	293
	汽油/t	187.46	41 868 MJ/t	7 848.58
	总计	—	—	240 986.7
FGD改造后	标煤/t	124.44	29 308 MJ/t	3 647.09
	电/MW	79 424.7	3 600 MJ/MW	285 928.92
	柴油/t	7.41	42 705 MJ/t	316.44
	汽油/t	202.42	41 868 MJ/t	8 474.92
	总计	—	—	298 367.37

资源耗竭系数通过一次能源消耗来表征,本文将能源作为资源进行评价。根据FGD项目改造前后数据可以得出其一次能源消耗量,如表5所示。根据前面的假设将表5中电能折算成标煤可以发现改造前消耗标煤为21 145.38 t而原油量为323.87 t;同理可以得出改造后消耗26 334.59 t标煤和349.72 t原油。根据煤炭与石油的供应年限^[24],将改造前后FGD项目年消耗资源进行标准化与加权化处理,其结果如表6所示。

表6 FGD改造前后年消耗资源量标准化与加权化处理

Tab.6 Standardization and weighting processing of the amount of resources annually consumed before and after the FGD reconstruction

能源	标准化后的资源消耗/人当量	可供应年限/年	加权后的资源消耗	
改造前	煤	12 925.05	170	76.03
	石油	708.69	43	16.48
	总计	13 633.74	—	92.51
改造后	煤	16 096.94	170	94.69
	石油	765.25	43	17.8
	总计	16 862.19	—	112.49

由表6可以得出改造前后FGD脱硫项目的资源耗竭系数分别为92.51标准人当量和112.49标准人当量。标准化后煤占改造前FGD项目年资源消耗量的94.8%,通过加权后煤所占比例降为82.2%;同理可以得出煤占改造后FGD项目年资源消耗量由95.5%降为84.2%。

3.2 环境影响潜值计算与分析

3.2.1 全球变暖

将各种废气排放转化为全球变暖潜值,得出改造前的全球变暖潜值为668 907.55 t如表7所示,改造后的全球变暖潜值为543 902.39 t,改造后全球变暖的环境影响潜值降低125 005.16 t,降低约18.7%。

表7 改造前后FGD烟气脱硫项目全球变暖潜值
Tab.7 Global warming - up potential value of the FGD flue gas desulfurization project before and after the FGD reconstruction

	排放物质	排放量/t	影响当量因子 $Q_{EF}^{[24]}$	环境影响潜值/t
改造前	CO ₂	52 891.59	1	52 891.59
	NO _x	1 925.04	320	616 012.8
	CO	1.58	2	3.16
	总计	54 818.21	—	668 907.55
改造后	CO ₂	65 870.17	1	65 870.17
	NO _x	1 493.84	320	478 028.8
	CO	1.71	2	3.42
	总计	67 365.72	—	543 902.39

3.2.2 富营养化

富营养化影响潜值计算如表8所示。改造前富营养化影响潜值为2 598.8 t(以为参照物),改造后富营养化影响潜值为2 016.68 t,其中全部来源于,改造后减少582.12 t,减少比例为22.4%。

3.2.3 酸化

酸化影响潜值计算如表9所示。改造前酸化影

响潜值为 2 778. 13 t,贡献比率为 SO₂(51. 5%) , NO_x(48. 5%) ;改造后酸化影响潜值为 2 183. 49 t ,贡献比率为 SO₂(52. 1%) ,NO_x(47. 9%) 。改造后酸化影响潜值减少 594. 64 t ,改造后降低酸化影响潜值 21. 4% 。

表 8 改造前后 FGD 烟气脱硫项目富营养化潜值
Tab. 8 Nutrient enrichment potential value of the FGD flue gas desulfurization project before and after the FGD reconstruction

	排放物质	排放量/t	影响当量因子 Q _{EF} ^[24]	环境影响潜值/t
改造前	NO _x	1 925. 04	1. 35	2 598. 8
改造后	NO _x	1 493. 84	1. 35	2 016. 68

表 9 改造前后 FGD 烟气脱硫项目酸化潜值
Tab. 9 Acidification potential value of the FGD flue gas desulfurization project before and after the FGD reconstruction

	排放物质	排放量/t	影响当量因子 Q _{EF} ^[24]	环境影响潜值/t
改造前	NO _x	1 925. 04	0. 7	1 347. 53
	SO ₂	1 430. 6	1	1 430. 6
	总计	3 355. 64	—	2 778. 13
改造后	NO _x	1 493. 84	0. 7	1 045. 69
	SO ₂	1 137. 8	1	1 137. 8
	总计	2 631. 64	—	2 183. 49

3. 2. 4 光化学臭氧合成

FGD 脱硫项目中 CO 的排放属于光化学臭氧合成的参与物,其当量因子为 0. 03^[23],则改造前(1 580. 26 kg) CO的环境光化学臭氧合成影响潜值为 47. 41 kg(以 C₂H₄为参照物),改造后(1 705. 93 kg) CO 的环境光化学臭氧合成影响潜值为 51. 18 kg。

3. 2. 5 人体毒性潜值

人体毒性潜值(Q_{HTP}) 包括人体摄入毒性影响和人体暴露毒性影响。人体毒性潜值采用 1,4-二氯苯为基准进行计算。与人体毒性作用相关的物质有 SO_x、NO_x、CO 和烟尘(PM) 等。人体毒性潜值计算如表 10 所示。改造前总人体毒性潜值为 2 841. 21 t,其中烟尘的贡献率为 13. 9% ,SO_x和 NO_x贡献率

分别为 4. 8% 和 81. 3% ,CO 的贡献率可以忽略。改造后造成的人体毒性潜值为 2 268. 5 t,可以发现改造后 FGD 烟气脱硫项目可以减少人体毒性潜值排放 572. 71 t。

表 10 改造前后 FGD 烟气脱硫项目人体毒性潜值
Tab. 10 Human body toxicity potential value of the FGD flue gas desulfurization project before and after the FGD reconstruction

	排放物质	排放量/t	影响当量因子 Q _{EF} ^[22]	环境影响潜值/t
改造前	SO _x	1 430. 6	0. 096	137. 34
	NO _x	1 925. 04	1. 2	2 310. 05
	CO	1. 58	0. 012	0. 02
	烟尘(PM)	480. 24	0. 82	393. 8
	总计	3 837. 46	—	2 841. 21
改造后	SO _x	1 137. 8	0. 096	109. 23
	NO _x	1 493. 84	1. 2	1 792. 61
	CO	1. 71	0. 012	0. 02
	烟尘(PM)	447. 12	0. 82	366. 64
	总计	3 080. 47	—	2 268. 5

3. 2. 6 烟尘及灰尘

由于烟尘及灰尘环境影响潜值当量因子 Q_{EF} 为 1^[21],可以得出改造前烟尘及灰尘环境影响潜值 480. 24 t,改造后烟尘及灰尘环境影响潜值 447. 12 t。

3. 3 环境影响潜值的标准化

以上计算的环境影响潜值需要经过标准化后,才能进行比较并得出各环境影响潜值的贡献率。各项环境影响潜值标准化结果如表 11 所示,由表可以看出改造后总影响潜值减少 126 215 036. 2 kg,标准化总环境影响潜值减少 42 263. 34 人当量。由于缺乏人体毒性潜值的标准化基准数据,故不对人体毒性潜值进行标准化处理。

3. 4 环境影响潜值对比

根据 Q_{GWP}、Q_{NEP}、Q_{ACP}、Q_{POP} 及 Q_{SAP} 的权重因子分别为 0. 83、0. 73、0. 73、0. 53 和 0. 61 对标准化后数据进行加权处理将改造后 FGD 烟气项目环境影响潜值与改造前大气环境影响潜值对比^[19],其对比值如表 12 所示。可以发现改造前总环境影响负荷为 167 563. 47 人当量,改造后造成总环境负荷为 135 494. 04 人当量,可以得出改造 FGD 脱硫项目后

总环境影响负荷可以减少 32 069.43 人当量。改造后 FGD 脱硫项目与改造前相比 Q_{GWP} 减少 11 925.78 人当量, Q_{NEP} 减少 6 966.35 人当量, Q_{ACP} 减少 12 057.97 人当量, Q_{POP} 增加 3.07 人当量, Q_{SAP} 减少 1 122.4 人当量。

表 11 改造前后 FGD 影响潜值标准化处理

Tab. 11 Standardization processing of the FGD influencing potential value before and after the FGD reconstruction

环境影 响类型	影响潜 值/kg	标准化基准/ kg · (人 · a) ⁻¹ [22]	标准化后影响 潜值/人当量
改造前			
Q_{GWP}	668 907 550	8 700	76 885.93
Q_{NEP}	2 598 800	61	42 603.28
Q_{ACP}	2 778 130	36	77 170.28
Q_{POP}	47.41	0.65	72.94
Q_{SAP}	480 240	18	26 680
总计	674 764 767.4	—	223 412.43
改造后			
Q_{GWP}	543 902 390	8 700	62 517.52
Q_{NEP}	2 016 680	61	33 060.33
Q_{ACP}	2 183 490	36	60 652.5
Q_{POP}	51.18	0.65	78.74
Q_{SAP}	447 120	18	24 840
总计	548 549 731.2	—	181 149.09

表 12 进行超低排放加权后烟气 FGD 改造项目环境影响潜值与改造前大气环境影响潜值对比

Tab. 12 Contrast of the environment-influenced weighted potential value of the ultra low emission FGD flue gas desulfurization project with the atmospheric environment influencing potential value before the reconstruction

标准化后 影响潜值	FGD 改造 后/人当量	FGD 改造 前/人当量	减少/人当量
Q_{GWP}	51 889.54	63 815.32	11 925.78
Q_{NEP}	24 134.04	31 100.39	6 966.35
Q_{ACP}	44 276.33	56 334.3	12 057.97
Q_{POP}	41.73	38.66	-3.07
Q_{SAP}	15 152.4	16 274.8	1 122.4
总计	135 494.04	167 563.47	32 069.43

4 结 论

通过对烟气 FGD 脱硫项目超低排放改造前后

进行全生命周期分析,可以得出以下结论:

(1) FGD 改造后资源耗竭系数由 92.51 标准人当量上升为 112.49 标准人当量,可以看出改造后其资源消耗增加;

(2) 改造前后脱硫过程都是烟气 FGD 脱硫项目耗能最多的过程,占总热值消耗量的 90% 以上,此过程对环境影响贡献率也最大,如何降低该过程的能耗和环境影响是 FGD 研究重点之一;

(3) 改造后全生命周期过程中可以降低全球变暖影响潜值 125 005.16 t,富营养化潜值降低 582.12 t,酸化潜值减少 594.64 t,光化学臭氧合成影响潜值增加 3.77 kg,减少人体毒性潜值排放 572.71 t,烟尘及灰尘环境影响潜值减少 33.12 t,可以缓减锅炉排放污染物的影响;

(4) FGD 脱硫项目改造前造成的总环境影响负荷为 167 563.47 人当量,改造后总环境影响负荷为 135 494.04 人当量,减少了 32 069.43 人当量的环境影响负荷,对环境影响明显改善;

(5) FGD 烟气脱硫项目改造可以在原基础上显著减少全球性影响及地区性影响,仅增加了区域性影响,系统环境性完善,所以 FGD 脱硫设备改造是一种环境友好型烟气净化项目。

参考文献:

[1] 闻雪平,潘卫国,王文欢,等. 火用理论在电站锅炉经济性与环保性分析中的应用[J]. 上海电力学院学报, 2012, 28(5): 451-456.
WEN Xue-ping, PAN Wei-guo, WANG Wen-huan, et al. Applications of the exergy theory in the cost-effective and environmental protection analysis of utility boilers[J]. Journal of Shanghai College of Electric Power 2012, 28(5): 451-456.

[2] 熊杰. 传统燃煤发电系统及 CO₂ 减排系统的热经济学成本分析和优化[D]. 华中科技大学, 2007.
XIONG Jie. Thermoeconomic cost analysis and optimization of a traditional coal-fired power generation system and a carbon dioxide emissions reduction system [D]. Central China University of Science and Technology 2007.

[3] 刘敬尧,钱宇,李秀喜,等. 燃煤及其替代发电方案的生命周期评价[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 133-138.
LIU Jing-yao, QIAN Yu, LI Xiu-xi, et al. Life cycle evaluation of a coal-fired power generation version and its alternatives[J]. Journal of Coal 2009, 34(1): 133-138.

[4] 刘淑敏,国文学,范莉娟,等. 零排放煤基发电及其技术发展[J]. 东北电力学院学报, 2004, 24(6).
LIU Shu-min, GUO Wen-xue, FAN Li-juan, et al. Zero emission

- coal-based power generation and development of its technologies [J]. Journal of Northeast China College of Electric Power 2004, 24(6).
- [5] 何伯述, 陈昌和. 污染物的脱除率对燃煤电站生态效率的影响 [J]. 北方交通大学学报 2003 27(1): 1-5.
HE Bo-shu, CHEN Chang-he. Effects of the removal rate of pollutants on the eco-efficiency of a coal-fired power plant [J]. Journal of Northern Jiaotong University 2003 27(1): 1-5.
- [6] 李喜, 李俊. 烟气脱硫技术研究进展 [J]. 化学工业与工程 2006 23(4): 351-354.
LI Xi, LI Jun. Advances in the study of the flue gas desulfurization technology [J]. Chemical Industry and Engineering 2006 23(4): 351-354.
- [7] 郝吉明, 王书肖, 陆永琪. 燃煤二氧化硫污染控制技术手册 [M]. 化学工业出版社 2001.
HAO Ji-ming, WANG Shu-xiao, LU Yong-qi. Coal-fired sulfur dioxide pollution control technical handbook [M]. Chemical Industry Press 2001.
- [8] 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.
WU Yi-wei. Study of the limestone-gypsum wet-method flue gas desulfurization waste water treatment [J]. China Electric Power, 2006 39(4): 75-78.
- [9] 孙启宏, 万年青, 范与华. 国外生命周期评价(LCA)研究综述 [J]. 世界标准化与质量管理 2000 12(12): 24-26.
SUN Qi-hong, WAN Nian-qing, FAN Yu-hua. A survey of the study of the life cycle assessment (LCA) in abroad [J]. World Standardization and Quality Control 2000 12(12): 24-26.
- [10] 周亮亮, 刘朝. 洁净燃煤发电技术全生命周期评价 [J]. 中国电机工程学报 2011 31(2): 7-14.
ZHOU Liang-liang, LIU Chao. Assessment of the whole life cycle of the clean coal-fired power generation technology [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2011 31(2): 7-14.
- [11] Wang Y, Zhang J Y, Zhao Y C et al. Exergy life cycle assessment model of "CO₂ zero-emission" energy system and application [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(12): 3296-3303.
- [12] Mann M, Spath P. A life cycle assessment of biomass cofiring in a coal-fired power plant [J]. Clean Products and Processes 2001 3(2): 81-91.
- [13] Pehnt M, Henkel J. Life cycle assessment of carbon dioxide capture and storage from lignite power plants [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control 2009 3(1): 49-66.
- [14] 周燕, 龚光彩. 基于火用分析和生命周期评价的既有建筑围护结构节能改造 [J]. 科技导报 2010 28(23): 99-103.
ZHOU Yan, GONG Guang-cai. Exergy analysis and life cycle assessment-based currently existing building enclosure structure energy-saving reconstruction [J]. Science and Technology Review, 2010 28(23): 99-103.
- [15] 王庆一. 节能手册 2006 [J]. 北京: 节能与环保杂志社 2006.
WANG Qing-yi. Energy conservation handbook 2006 [M]. Beijing: Energy Conservation and Environmental Protection Journal Publishing House 2006.
- [16] 王红. 燃煤电厂烟气脱硫工艺生命周期评估 [D]. 浙江大学 2012.
WANG Hong. Life cycle assessment of the flue gas desulfurization process in coal-fired power plants [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2012.
- [17] 邢李志. 钢铁工业生态化评价体系研究 [D]. 北京工业大学 2009.
XING Li-zhi. Research of an index system for evaluating the ecological tendency of the iron and steel industry [D]. Beijing University of Technology 2009.
- [18] 邹治平, 马晓茜, 赵增立, 等. 水力发电工程的生命周期分析 [J]. 水力发电 ISTIC PKU 2004 30(4). DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2004.04.016.
ZOU Zhi-ping, MA Xiao-qian, ZHAO Zeng-li, et al. Life cycle analysis of hydropower projects [J]. Hydropower 2004. 04. 016.
- [19] 梁增英, 马晓茜. 选择性催化还原烟气脱硝技术的生命周期评价 [J]. 中国电机工程学报 2009 (17): 63-69.
LIANG Zeng-ying, MA Xiao-qian. Life cycle assessment of the selective catalytic reduction flue-gas denitrification technology [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2009 (17): 63-69.
- [20] 陈亮, 刘玫, 黄进. GB/T 24040-2008《环境管理生命周期评价原则与框架》国家标准解读 [J]. 标准科学, 2009, 02: 76-80.
CHEN Liang, LIU Mei, HUANG Jin. Explanations and understanding of the national standard GB/T24040 — 2008 Environmental management-life cycle assessment principles and framework [J]. Standardization Science 2009 02: 76-80.
- [21] Pennington D W, Potting J, Finnveden G et al. Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice [J]. Environment International 2004 30(5): 721-739.
- [22] 李璟. 能源化工系统的火用分析与生命周期评价 [D]. 华南理工大学 2011.
LI Jing. Exergy analysis and life cycle assessment of an energy source and chemical industry system [D]. South China University of Science and Technology 2011.
- [23] 中国统计年鉴-2011 [J]. 中国统计 2011.
China statistical yearbook 2011 [J]. China Statistics 2011.
- [24] 杨建新, 王如松. 生态产品生命周期评价方法及应用 [M]. 气象出版社 2002.
YANG Jian-xin, WANG Ru-song, SHENG Tai. Product life cycle assessment method and applications [M]. Meteorological Publishing House 2011

(刘瑶 编辑)

the pulverized coal and air flow in the chain grate boiler can obviously enhance the disturbance in the furnace, the distribution of the temperature in the furnace will be more uniform, the filling degree of the flame in the furnace will be better, the temperature of the flue gases in the furnace will increase by about 100 to 200 K as a whole and attain 1 500 to 2 000 K in the high temperature zones, thus enhancing the thermal efficiency and capacity of the chain grate boiler. **Key words:** chain-grate boiler, compound combustion, speed field, temperature field, numerical simulation

300 MW 循环流化床锅炉稀相区的传热研究 = **Study of the Heat Transfer in the Sparse Phase Zones of a 300 MW Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉]/SUO Jiang-shun, CUI Zhi-gang (College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, China, Post Code: 030024), HOU Zhi-fu (Shanxi Pingshuo Gangue Power Generation Co. Ltd., Shuozhou, China, Post Code: 036800) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(9). -69 ~74

The heat transfer in a CFD boiler burning gangue was studied. With a 300 MW CFD boiler in Shanxi Pingshuo Power Plant serving as an example, the core-annulus model and particle cluster update model were used to model establish and calculate the distribution of the heat transfer coefficient in the sparse phase zones as the focus. The model thus established has taken account of the actual characteristics of the distribution of the temperature in the circulating fluidized bed in the furnace and was corrected and updated according to the data of the temperature actually measured on the spot. Finally, changes of the convection and radiation heat exchange coefficient at various loads along the height of the furnace were studied. It has been found that when the boiler is operating at a relatively high load, the fluctuation in load has relatively small influence on the time-averaged particle cluster wall surface covering share and therefore, so does the fluctuation in load on the convection heat exchange inside the furnace. The deviation of the temperature in the annulus zones in the furnace along the height of the circulating fluidized bed will somehow decrease and has bigger influence on the radiation heat exchange than on the convection heat exchange. With an increase of the load, the decline of the convection heat exchange coefficient along the height of the furnace will increase while the decline of the radiation heat exchange coefficient along the height of the furnace will decrease. At a high load, the total in-furnace heat exchange coefficient along the height of the furnace will decrease by around 25% while at a low load will decrease by about 28%. At a high load, the temperature difference in the furnace along the height of the furnace will become smaller and the heat transfer will be more stable. **Key words:** underpants-leg type CFD boiler, gangue, sparse phase zone, heat transfer coefficient

基于 LCA 的燃煤锅炉 FGD 超低排放对资源消耗与环境影响评价 = **Resource Consumption of the Ultra Low Emissions from a Coal-fired Boiler in the Process of Flue Gas Desulfurization (FGD) and Evaluation of the Impact on the Environment Based on the Life Cycle Assessment (LCA)** [刊, 汉]/HAN Tao, PAN Wei-guo, WANG Wen-huan (Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090), DING Cheng-gang (Power Plant Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Shanghai Electrical Group Corporation, Shang-

hai ,China ,Post Code: 200090) ,HAN Tao ,PAN Wei-guo ,WANG Wen-huan ,DING Cheng-gang (Shanghai Research Center for Power Generation and Environmental Protection Engineering Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200090) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(9) . -75 ~82

To meet the stringent quota for emissions for the purpose of environmental protection ,further reduce the sulfur oxide emissions from flue gases outgoing from coal-fired units and realize the ultra low emissions meeting the quota for the emissions concentration of a gas-fired unit ,on the basis of the existing flue gas desulfurization devices in a thermal power plant in operation ,an efficiency-enhancement reconstruction of the foregoing equipment items was performed. The life cycle assessment (LCA) was employed to evaluate the FGD system of a 1 000 MW supercritical coal-fired unit before and after the reconstruction ,study the potentials that the production ,transportation and desulfurization totaling three processes of the limestone and other main engineering materials influence the environment and calculate the energy consumption rates of the foregoing processes and their impact on the environment. It has been found that after the reconstruction ,the sulfur dioxide emissions concentration can decrease from 56.9 mg/m³ to 30.86 mg/m³ , each year reducing the emissions by 292.8 t. The resource depletion coefficient will increase by 19.98 population equivalent and the potential influencing the environment will decrease by 32 069.43 population equivalent. **Key words:** life cycle evaluation ,ultra low emissions ,flue gas desulfurization ,resource consumption ,environmental impact

基于低温省煤器的回热系统最佳焓升分配研究 = **Study of the Optimum Enthalpy Rise Distribution of a Low Temperature Economizer Recuperative System** [刊 ,汉] /TAN Liang-hong ,HU San-gao ,CAO Sheng-lei (College of Energy Source ,Power and Mechanical Engineering ,North China University of Electric Power ,Beijing , China ,Post Code: 102206) ,AN Feng-bo (Huaneng Linyi Power Generation Co. Ltd. ,Linyi ,China ,Post Code: 276016) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(9) . -83 ~87

For a N300 unit equipped with a low temperature economizer ,established was a mathematical model for optimum enthalpy rise distribution when a large quantity of heat was being introduced from the outside world and utilized was the genetic algorithm to optimize the enthalpy rise. The calculation results show that the optimized version can utilize more steam extracted at low parameters ,thus save more steam extracted at high parameters. Compared with the units not optimized ,the coal consumption rate of the optimized unit will decrease by 0.54 g ,thus achieving an obvious energy-saving result and indicating that to conduct an enthalpy rise distribution once again is most necessary for a recuperative system into which a large quantity of heat is being introduced from the outside world. **Key words:** recuperative system ,low temperature economizer ,enthalpy rise distribution ,genetic algorithm

三室电除尘器前烟道的数值模拟与结构优化 = **Numerical Simulation and Structural Optimization of the Flue Gas Duct Before a Three-chamber Electrostatic Precipitator** [刊 ,汉] /JIA Yan ,CUI Hao (China Electric Power Engineering Consultancy Group ,South China Electric Power Designing Institute Co. Ltd. ,Wuhan ,China ,Post