

浅谈燃煤电厂烟气脱硫脱硝工艺技术路线分析及设备选择

车金虎

中国华电科工集团有限公司国际贸易分公司, 北京 100071

[摘要]此文参考越南沿海二期2×660MW超临界燃煤发电机组、结合目前国内外电厂烟气治理工艺技术发展现状,对燃煤电厂烟气脱硝、脱硫、除尘等环保系统、设备选型等进行探讨,提出相应的排放控制方案。

[关键词]电厂; 烟气; 脱硫脱硝; 技术路线; 设备选型

DOI: 10.33142/sca.v5i8.8147

中图分类号: X773

文献标识码: A

Brief Discussion on Technical Route Analysis and Equipment Selection of Flue Gas Desulfurization and Denitration in Coal-fired Power Plants

CHE Jinhu

International Trade Branch of China Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing, 100071, China

Abstract: This article refers to Vietnam Coastal Phase II 2 × 660MW supercritical coal-fired power generation unit, based on the current development status of flue gas treatment technology in power plants at home and abroad, this paper discusses environmental protection systems and equipment selection for flue gas denitrification, desulfurization, and dust removal in coal-fired power plants, and proposes corresponding emission control schemes.

Keywords: power plants; flue gas; desulfurization and denitrification; technical route; equipment selection

引言

本参考项目配套建设烟气脱硝、脱硫、除尘等环保设施,烟气污染物排放限值分别为:氮氧化物排放浓度 $\leq 50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、二氧化硫排放浓度 $\leq 300\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、烟尘排放浓度 $\leq 20\text{mg}/\text{Nm}^3$ (标态、干基、6% O_2)。结合项目实际煤质、环境等具体情况,以上参数对烟气处理系统设计选择、设备的选项要求相对较高,因此有必要对烟气系统及设备选型进行研究,以满足要求。

1 环保发展趋势和本工程环保排放要求

近年,由于煤炭、燃油等燃料燃烧过程中排放出的 SO_2 、 NO_x 和粉尘颗粒物等产生的环境问题,如雾霾和酸雨等,对自然环境和人类健康都造成了巨大的危害,引起了全世界各国的高度重视,环保政策将越来越严。本工程烟气污染物排放浓度需满足越南环保标准要求以及华电集团公司节能降耗、超低排放的要求,排放浓度限值分别为:氮氧化物排放浓度 $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、二氧化硫排放浓度 $300\text{mg}/\text{Nm}^3$ 、烟尘排放浓度 $20\text{mg}/\text{Nm}^3$ (标态、干基、6% O_2)。

表1 烟气污染物排放浓度限值(标态、干基、6% O_2)

序号	名称	锅炉出口污染物浓度	排放浓度限值	单位
1	NO_x	200	≤ 50	mg/Nm^3
2	SO_2	1261/1912	≤ 300	mg/Nm^3
3	粉尘	10477(湿态,实际氧)	≤ 20	mg/Nm^3

经核算,锅炉排烟中污染物的脱除效率如下:

表2 锅炉排烟中污染物的脱除效率

序号	名称	脱除效率
1	NO_x	$\geq 80\%$
2	SO_2	$\geq 85\%$
3	粉尘	$\geq 99.86\%$, 综合除尘效率

表3 项目煤质参数

项目	符号	单位	设计煤种	校核煤种
1、煤种			印尼褐煤	印尼褐煤
2、元素分析				
收到基碳	Car	%	53.10	50.40
收到基氢	Har	%	3.80	3.30
收到基氧	Oar	%	7.06	5.16
收到基氮	Nar	%	1.53	1.44
收到基全硫	St, ar	%	0.53	0.76
3、工业分析				
收到基水分	Mt	%	25.00	28.0
空气干燥基水分	Mad	%	16.50	20.00
收到基灰分	Aar	%	8.98	10.94
干燥无灰基挥发分	Vdaf	%	57.14	41.17
4、收到基低位发热量	Qnet, ar	MJ/kg	20.93	19.68
5、哈氏可磨性指数	HGI		45	40
6、灰熔点				
变形温度	DT	$^{\circ}\text{C}$	1150	1150
软化温度	ST	$^{\circ}\text{C}$	1150	1180

项目	符号	单位	设计煤种	校核煤种
半球温度	HT	°C	1260	1200
流动温度	FT	°C	1340	1250
7、灰成分				
二氧化硅	SiO ₂	%	37	58.10
三氧化二铝	Al ₂ O ₃	%	23	23.50
三氧化二铁	Fe ₂ O ₃	%	17	9.97
氧化钙	CaO	%	8	2.80
氧化镁	MgO	%	3	0.30
三氧化硫	SO ₃	%	9	3.10
氧化钠	Na ₂ O	%	0.3	0.19
氧化钾	K ₂ O	%	0.7	0.76
五氧化二磷	P ₂ O ₅	%	0.2	0.32
四氧化三锰	Mn ₂ O ₄	%	0.02	0.05
二氧化钛	TiO ₂	%	1.28	0.78
其它		%	0.5	0.73
8、煤灰比电阻				
测量电压 500V, 测试温度 20°C		Ω·cm	1.10×10 ¹²	1.0×10 ¹²
测量电压 500V, 测试温度 80°C		Ω·cm	2.30×10 ¹³	2.10×10 ¹³
测量电压 500V, 测试温度 100°C		Ω·cm	2.90×10 ¹³	2.50×10 ¹³
测量电压 500V, 测试温度 120°C		Ω·cm	3.40×10 ¹³	2.90×10 ¹³
测量电压 500V, 测试温度 150°C		Ω·cm	5.80×10 ¹²	6.20×10 ¹²
测量电压 500V, 测试温度 180°C		Ω·cm	5.40×10 ¹¹	4.9×10 ¹¹
9、冲刷磨损指数	Ke		1.6	3.2
10、煤中游离二氧化硅含量	SiO ₂ (F)	%	1.74	1.91
11、煤中微量元素				
煤中汞	Hgar	μg/g	0.098	0.105
煤中氟	Far	μg/g	104	110
煤中砷	Asar	μg/g	3	3
煤中氯	Clar	%	0.011	0.010

2 NO_x 减排系统及设备选型

燃煤电站通常采用低氮燃烧技术,降低 NO_x 的产生量;通过二次脱硝工艺,进一步降低烟气中的 NO_x 含量。

2.1 低氮燃烧技术

动力燃烧过程中生成的氮氧化物主要是 NO 及 NO₂,还有少量 N₂O 等,统称 NO_x。NO_x 有三种生成机理:热力型、燃料型和瞬发型。

热力型生成量与温度、在高温区停留时间以及氧的分压有关;

燃料型生成量与温度关系不大,但与氧浓度关系较密切,煤粉与空气的混合过程也对其有显著影响;

瞬发型 NO_x 转化率与化学当量及温度有关。

燃料型 NO_x 含量较大,约为 60%~80%,热力型约

为 20%~40%,而瞬发型 NO_x 占很小的比例。锅炉燃烧采用低氮燃烧技术可从燃烧过程中降低 NO_x 排放浓度。国内三大锅炉厂主要采用低 NO_x 燃烧器和优化配风达到目的,且该技术在不断升级优化。东方锅炉有限公司采用 II 代燃烧器+深度燃烬低 NO_x 燃烧技术;上海锅炉有限公司上锅采用高级复合空气分级低 NO_x 燃烧系统;哈尔滨锅炉有限公司采用 MPM 新型燃烧器+深度燃烬低 NO_x 燃烧技术。在国内各锅炉生产企业不断的技术创新下,锅炉出口 NO_x 含量不断降低。

越南沿海二期 2×660MW 超临界燃煤发电机组设计燃煤为褐煤,和烟煤比起来,生成 NO_x 略高。本工程采用东方锅炉成熟可靠的低 NO_x 燃烧技术,保证炉膛出口 NO_x 排放浓度≤200mg/Nm³,以达到设计要求。

2.2 二次脱硝工艺

锅炉尾部出口 NO_x 排放浓度为≤200mg/Nm³,而烟囱出口要求 NO_x≤50mg/Nm³,因此必须建设二次烟气脱硝系统。并且要考虑一定的富裕量,以及未来可能得更严格的排放妖气,脱硝系统必须要预留、创造改造的条件。

到目前为止,较为成熟的工艺有 SCR 脱硝工艺(高含尘布置)、SNCR 脱硝工艺和 SNCR-SCR 混合脱硝工艺。这三种工艺详细比较见下表:

表 4 SCR、SNCR 和 SNCR-SCR 烟气脱硝工艺综合比较

项目	SCR 工艺	SNCR 工艺	SNCR-SCR 混合脱硝工艺
所需还原剂	主要为液氨	主要为尿素	液氨和尿素
喷射位置(还原剂)	锅炉省煤器与 SCR 反应器间烟道内	锅炉炉膛壁上设置 2~3 层喷嘴,位置需与锅炉设计配合	前段:同 SNCR 一致;后段:锅炉转向室或省煤器与 SCR 反应器间烟道内。
反应温度	280°C~420°C	850°C~1100°C	前段:850°C~1100°C 后段:280°C~420°C
催化需要量	多	不用	多
脱硝效率	≥90%	30%~50%	≥90%
SO ₂ 变为 SO ₃	≤1%	无	≤1%
NH ₃ 逃逸率(μL/L)	3~5	5~15	3~5
系统产生阻力	高	无	较高
影响效率的主要因素	烟气成分、烟气温度	烟气温度、速度、均匀性	结合 SCR 和 SNCR
对锅炉本体效率的影响	无	降低≤0.05%	结合 SNCR 和 SCR
对锅炉空气预热器的影响	逃逸的 NH ₃ 与 SO ₃ 会形成 NH ₄ HSO ₄ , 会使空预器堵塞积灰	影响基本为零	逸的 NH ₃ 与 SO ₃ 会形成 NH ₄ HSO ₄ , 会使空预器堵塞积灰
系统难易程度	简单	简单	比较复杂
适用范围	锅炉燃烧褐煤、烟煤和贫煤时	主要适用于循环流化床机组	主要适用于老厂改造

由表可得出结论,SNCR 效率约为 40%,不能满足本

工程要求,而且将来升级改造空间很小,还会降低锅炉效率、且面临 NH₃ 逃逸率较高等,因此在本工程中不采用。

相比来看 SNCR—SCR 混合脱硝工艺效率相对高,但是系统比较复杂。而且本工程锅炉参数高,在炉内喷尿素,对锅炉效率、受热面会造成腐蚀,因此在本次中也不采用。

SCR 脱硝技术因其脱硝效率高、氨逃逸率低、对锅炉本体影响较小等特点,目前已成为世界上应用最广泛、技术最成熟的烟气脱硝技术,而且在将来改造条件较好,故作为本工程脱硝方案。

3 SO₂减排工艺

3.1 海水脱硫工艺简介

根据本工程客观环境、成本等因素,本工程用海水脱硫工艺。海水脱硫工艺属于湿法烟气脱硫工艺中的一种,适合在海边建厂、用海水直接冷却的项目。其最大特点是系统简单可靠、投资成本低、且不产生废弃物。

目前掌握海水脱硫技术的有 Alstom、Bischoff、ABB、Fujikasui、Mitsubishi、Ducon 已经我国的东方锅炉有限公司。其中 Alstom 发展最早,且全球市场占有率高达 60%以上。

3.2 海水脱硫技术流派

烟气海水脱硫技术经过多年发展,形成了 Alstom 填料塔技术;日本富士化水筛板塔技术以及德国鲁奇喷淋塔技术。

(1) Alstom 填料塔技术:

吸收塔型式为填料塔,脱硫效率高达 90%~99%。600MW 等级机组及以下可按一炉一塔配置,1000MW 机组按一炉两塔配置。海水曝气采用纯塔外曝气方式。Alstom 技术为目前主流技术,应用最为普遍。

(2) 日本富士化水筛板塔技术:

吸收塔型式为钢制、筛板塔,脱硫效率高达 90%以上。600MW 等级机组按一炉两塔配置。海水曝气采用纯塔外曝气方式。

(3) 德国鲁奇喷淋塔技术:

吸收塔为逆流喷淋塔,喷淋层采用单元制。脱硫效率高达 95%;海水水质恢复系统采用吸收塔塔内曝气加曝气池辅助曝气的方式。

以上三种海技术中,阿尔斯通为主流技术流派,应用较多;日本富士化水技术应用业绩较少;德国鲁奇技术运行业绩较少。国内东方锅炉有限公司自主研发的喷淋塔技术类似于德国鲁奇技术,并成功运用成功,脱硫效率大于 95%。

3.3 海水水质

本项目水质指标为:

pH 值 6.75;

碱度(按 HCO₃⁻浓度): 0.972mmol/L。

海水脱硫适宜的海水水质为 pH 值 ≥7.5,碱度约为 2mmol/L。

3.4 海水、烟气排放标准

当地排放海水主要水质指标为:

pH 值 6~9;

溶解氧 DO: >3mg/L;

Δ COD: <6mg/L。

烟囱出口 SO₂ 排放浓度 ≤300mg/Nm³(标态,干基,6%O₂)。

3.5 海水脱硫技

项目燃煤含硫量分别为:0.53%/0.76%(设计/校核),烟气 SO₂ 浓度约为 1261/1912mg/Nm³(设计/校核, BMCR 工况,标态,干基,6%O₂)。为满足排放要求,需同步建设烟气脱硫装置,脱硫效率需 85%。

结合项目的外部条件,采用填料塔技术和喷淋塔技术,都可实现脱硫效率 85%。为进一步推动绿色环保建设,实现全球可持续发展,本项目采用海水法脱硫工艺,全烟气脱硫,脱硫效率按照 90%进行设计,烟囱入口烟气 SO₂ 浓度分别为 126.1/191.2mg/Nm³(干基,6%O₂),排放标准要求(≤300mg/Nm³,干基,6%O₂)。

3.6 结论及建议

本项目 SO₂ 治理采用海水脱硫工艺,脱硫效率 90%,烟囱入口烟气 SO₂ 浓度分别为 126.1/191.2mg/Nm³(干基,6%O₂),满足排放标准要求(≤300mg/Nm³(干基,6%O₂))。

4 粉尘减排方案

锅炉空预器出口烟气中粉尘浓度最大 14.35g/Nm³(校核煤质、湿态、实际氧),为了实现烟囱出口粉尘浓度 ≤20mg/Nm³(标态、干基、6%O₂),机组综合除尘效率应 ≥99.86%。

4.1 除尘器技术选择

国内火电厂的除尘设备主要分为静电除尘器、电袋除尘器、布袋除尘器。以口烟温区分,高于烟气酸露点为常规静电除尘器,低于烟气酸露点为低低温静电除尘器。几种除尘器的特点比较见下表。

表 5 静电、布袋和电袋除尘器技术特点比较

序号	项目	静电除尘器		布袋除尘器	电袋除尘器
		常规静电除尘器	低低温静电除尘器		
1	除尘效率	≥99.8%	≥99.9%	≥99.99%,出口粉尘浓度可控制在 10mg/Nm ³ 以下	≥99.99% 出口粉尘浓度可控制在 10mg/Nm ³ 以下。
2	影响除尘器效率的因素	飞灰比电阻、烟尘浓度、烟尘粒度、烟尘黏度和烟尘的平均漂移速度		烟气温度、水分、硫分	综合静电除尘器和布袋除尘器影响因素
3	运行温度	~100℃—150℃	~85℃—100℃	~100℃—150℃	~100℃—150℃
4	产生阻力	~300Pa。		1200~1500Pa。	900~1200Pa。
5	设备结构	复杂,有大量电气设备。		简单	复杂

序号	项目	静电除尘器		布袋除尘器	电袋除尘器
		常规静电除尘器	低低温静电除尘器		
6	检修与维护	只有停机检修,运行维护简单,主要是电气及机械部分的维护与检修。		可在线检修,运行维护复杂,主要更换滤袋及脉冲阀。	可在线检修,运行维护复杂,既要更换滤袋又要电气及机械部分的维护与检修。
7	启动与停止	方便,随时停启动		方便,长期停机需保护好滤袋。	方便,长期停机需保护好滤袋。
8	能耗	风机能耗小,除尘器能耗较大 采用高频电源节能效果明显。		风机能耗大,除尘器能耗小。	介于静电和布袋除尘器之间
9	适用范围	比电阻不高的煤种		不适宜黏结性或吸湿性很强的粉尘	不适宜黏结性或吸湿性很强的粉尘
10	占地面积	大	较小	小	介于静电和布袋除尘器之间

由以上得出,静电除尘器、布袋除尘器和电袋除尘器因除尘机理不同,其除尘效率、影响收尘因素、适应性、能耗等也不相同。布袋和电袋除尘器除尘效率高,粉尘浓度可控制在 $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 以内,但不在黏结性、硫含量高的粉尘情况下,不能胜任;且相对于低温静电除尘器,袋式除尘器前不能将烟温降至酸露点以下;布袋和电袋除尘器本体能耗低,引风机能耗高。静电除尘器除尘效率稍低,常规静电除尘器除尘效率约为 99.8% (考虑旋转电极、脉冲电源或高频电源等措施后,除尘器效率可达到 99.86%),低低温静电除尘器除尘效率可达 99.9% ,除尘效率主要受粉尘比电阻影响;常规静电除尘器本体能耗较高,但引风机能耗低,且系统更简单、可靠。

随着环保要求日益严格,针对反电晕、二次扬尘和 $\text{PM}_{2.5}$ 收尘率等问题,生产厂家开发了一系列除尘提效技术:

- ★增加电场,增大比集尘面积,控制流速,优化振打;
- ★末级电场配置旋转电极,可以减少二次扬尘;
- ★用高频电源降低能耗,提升效率;
- ★优化流场等。

经计算,组合应用以上提效技术,除尘效率可达 99.9% 以上。

本项目采用静电除尘器,除尘效率 $\geq 99.86\%$,满足烟囱出口粉尘浓度 $\leq 20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

4.2 除尘器升级改造分析

锅炉空预器出口烟气中粉尘浓度最大为 $14.35\text{g}/\text{Nm}^3$ (校核煤质、湿态、实际氧),实现烟囱出口粉尘浓度 $\leq 5\text{mg}/\text{Nm}^3$

(标态、干基、 $6\%\text{O}_2$),机组综合除尘效率 $\geq 99.965\%$ 。常规静电除尘器很难实现,只能选择袋式除尘器。

袋式除尘器目前主要有布袋除尘器和电袋除尘器两种,且这两种除尘器在 600MW 等级均有投运业绩。电袋除尘器结合静电除尘器和布袋除尘器优点,先通过静电除尘器去除 80% 以上粉尘,降低布袋区粉尘浓度,减少粗颗粒对滤袋的冲刷磨损,延长清灰周期,延长滤袋寿命,减少除尘器阻力。因此,本项目采用电袋除尘器。

本工程现阶段推荐采用静电除尘器(双室五电场),除尘效率 $\geq 99.86\%$ (五电场全部投运),满足烟囱出口粉尘浓度 $\leq 20\text{mg}/\text{Nm}^3$,并预留将来升级改造条件;若未来环保排放要求进一步提高,可通过电袋除尘器改造,效率提高到 99.93% 以上,实现粉尘浓度 $\leq 10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的目标。

5 结论

采用低氮燃烧技术,控制锅炉尾部烟气 NO_x 排放浓度 $\leq 200\text{mg}/\text{Nm}^3$;二次脱硝采用 SCR 工艺,脱硝效率 $\geq 80\%$ 满足 NO_x 排放浓度 $\leq 50\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。

SO_2 治理采用海水脱硫工艺,脱硫效率 90% ,烟囱入口烟气 SO_2 浓度分别为 $126.1/191.2\text{mg}/\text{Nm}^3$ (干基, $6\%\text{O}_2$),满足当地排放标准要求 ($\leq 300\text{mg}/\text{Nm}^3$, 干基, $6\%\text{O}_2$)。

采用双室五电场静电除尘器,当其中四电场运行,除尘效率 ≥ 99.79 ,烟囱出口粉尘浓度 $\leq 30\text{mg}/\text{Nm}^3$;五电场全部投运,除尘效率 $\geq 99.86\%$,满足烟囱出口粉尘浓度 $\leq 20\text{mg}/\text{Nm}^3$ 。还预留未来升级改造条件,若未来环保排放要求更加严格,通过电袋除尘器改造,将除尘效率提高到 99.93% 以上,以实现粉尘浓度 $\leq 10\text{mg}/\text{Nm}^3$ 的排放目标。

[参考文献]

- [1] 周立军. 火电厂烟气脱硫技术[J]. 中外企业家, 2014, 4(1): 33-36.
 - [2] 李一安. 燃煤电厂脱硫工艺及工艺选择要素分析[J]. 资源节约与环保, 2015, 9(7): 12-14.
 - [3] 刘艳虹. 叶海丽. 燃煤发电厂减排技术路线研究[J]. 资源节约与环保, 2015, 7(2): 25-28.
 - [4] 刘涛. 烟气脱硝一体化技术研究现状[J]. 工业炉, 2009, 8(29): 78-80.
 - [5] 周芸芸. 烟气脱硫脱硝技术进展[J]. 北京工商大学学报, 2006, 6(24): 35-36.
 - [6] 陶宝库. 固体吸附再生法同时脱硫脱硝的技术[J]. 辽宁城乡环境科技, 2008, 5(6): 8-12.
- 作者简介: 车金虎, 男, 毕业院校: 山东大学; 学历: 本科, 专业: 热能与动力工程, 单位: 中国华电科工集团有限公司国际贸易分公司, 职务: 工程师, 职称: 中级职称。