

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.06.007

# 烟气“消白”改造项目设计参数的确定

Setting for design parameters of a wet plume treatment project

杨鹏飞,吴冲,张锡乾,王凯亮,张起

YANG Pengfei, WU Chong, ZHANG Xiqian, WANG Kailiang, ZHANG Qi

(中国华电科工集团有限公司,北京 100070)

(China Huadian Engineering Company Limited, Beijing 100070, China)

**摘要:**自2017年,燃煤电厂消除石膏雨及有色烟羽受到社会广泛关注,河北、天津及江苏等地相继出台大气污染物排放标准,明确提出通过采取相应技术降低烟气温度及含湿量,减少可溶性盐及SO<sub>3</sub>等可凝结颗粒物的排放。以江苏某电厂630 MW机组烟气消白改造项目为研究对象,调取该机组2017—2018年间的历史运行数据,采用正态分布的统计方法,分析了该电厂煤质水分及吸收塔入口烟温、出口烟温出现的概率分布,确定了项目改造的设计参数。

**关键词:**燃煤电厂;烟气消白;正态分布;节能减排;项目改造;超低排放;有色烟羽

**中图分类号:**X 773 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2020)06-0031-04

**Abstract:** Since 2017, the treatment on gypsum rain and wet plume from coal-fired power plants have attracted a lot of public attention. Hebei, Tianjin, Jiangsu and other districts published emission standards of air pollutants, and corresponding techniques have been taken to lower the temperature and moisture content of flue gas, and reduce the emission of condensable particles such as soluble salts and SO<sub>3</sub>. Taking a 630 MW coal-fired unit in a Jiangsu power plant as the research object, its historical data from 2017 to 2018 were obtained and analyzed with normal distribution statistical method. The coal moisture content and the probability distribution of the smoke temperature at the inlet and outlet of the absorption tower were analyzed, and the design parameters of the project were determined.

**Keywords:** coal-fired power plant; wet plume removal; normal distribution; energy saving and emission reduction; project transformation; ultra-low emission; colored plume

## 1 研究背景

近年来,随着环保政策的持续收紧,国内电力行业的燃煤锅炉已基本完成烟气脱硫、脱硝、除尘等超低排放改造<sup>[1-3]</sup>。但是大气环境形势依然十分严峻。为进一步加强火电污染物排放控制、改善环境,地方和电力行业均加大了节能减排政策的执行力度,区域性环保新标准陆续出台,排放限值要求进一步提高。

自2017年,河北、天津以及江苏等地相继出台大气污染物排放标准,提出通过采取相应技术降低烟气温度及含湿量,减少可溶性盐及SO<sub>3</sub>等可凝结颗粒物的排放,进一步消除石膏雨及有色烟羽<sup>[4-11]</sup>。对于通过烟气降温冷凝消除石膏雨及有

色烟羽的技术<sup>[12]</sup>,各地均提出了排烟温度及含湿量的具体控制要求<sup>[13]</sup>。

对于烟气“消白”改造项目,煤质水分、吸收塔入口烟温及出口烟温等设计参数的确定,直接影响系统设备选型及改造成本。

常规改造项目设计参数的确定方法一般有以下2种。

(1)通过现场摸底试验确定设计参数。

(2)根据机组历史运行数据确定设计参数。

现场摸底试验受试验期间的煤质成分、机组运行工况及气象条件限制较大,而根据机组历史运行数据,盲目采取最高历史运行数据作为设计参数,改造成本较高。本文以江苏某电厂630 MW机组烟气消白改造为例,机组吸收塔出口烟温可达59.50℃,较其他项目吸收塔出口烟温偏高,达标排放温度至少下降12.00℃,据此进行设计,工程量大,经济成本高,因而通过调取其全年的历史运行数据,采用正

收稿日期:2019-11-25;修回日期:2020-02-10

基金项目:中国华电集团科技项目(CHDKJ19-01-62)

态分布的统计方法,分析煤质水分、吸收塔入口烟温及出口烟温的概率分布,确定项目改造的设计参数<sup>[14-15]</sup>。

### 2 正态分布统计下的设计参数

经吸收塔喷淋后的烟气为饱和湿烟气或近饱和湿烟气,本文调取了机组 2017 年 8 月至 2018 年 8 月的历史运行数据,研究发现烟气含水量对应的饱和烟气温度平均低于显示的排烟温度(1.60℃),吸收塔出口烟气为近饱和湿烟气。同时为了便于数据的处理分析,做出如下简化。

(1)吸收塔入口烟温、出口烟温只考虑机组负荷 80% (500 MW) 以上的历史数据。

(2)采用正态分布的统计方法,认为发生概率小于 5% 的事件为小概率事件,在一次试验中该事件是几乎不可能发生的。

#### 2.1 煤质水分的确定

机组 2017 年 8 月至 2018 年 8 月的煤质水分分布统计见表 1。

表 1 煤质水分分布统计

Tab. 1 Coal moisture annual distribution

煤质水分区间/%	平均煤质水分/%	个数	概率
5~7	5.80	1	0.18
7~9	8.53	2	0.37
9~11	10.46	21	3.86
11~13	11.96	52	9.54
13~15	14.15	107	19.63
15~17	15.99	102	18.72
17~19	17.81	94	17.25
19~21	20.00	64	11.74
21~23	22.13	49	8.99
23~25	23.76	30	5.51
25~27	26.19	13	2.38
27~29	27.86	8	1.47
29~31	34.53	2	0.36

根据正态分布规律可知

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

其中

$$\mu = \sum \bar{X}_i P_i, \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i (X - \bar{X}_i)^2}, \quad (3)$$

式中:  $X_i$  为样本;  $\bar{X}$  为样本平均值;  $P_i$  为随机变量出现概率;  $n$  为样本数量。

由式(2)、式(3),根据表 1 计算得:  $\mu = 17.24$

℃,  $\sigma = 4.13$ ℃。

2017 年 8 月至 2018 年 8 月煤质水分概率分布如图 1 所示,由图 1 可知,全年煤质水分最小为 5.80%,最大为 30.70%,主要分布区间为 9.00%~25.00%。由式(1)可知:正态分布下,横轴区间  $[\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma]$  范围内的出现概率为 95.44%,即煤质水分出现在  $[9.14, 25.33]$  范围内的概率为 95.44%。由于发生概率小于 5% 的小概率事件认为在一次试验中该事件是几乎不可能发生的,故本项目煤质水分可取 25.00%。

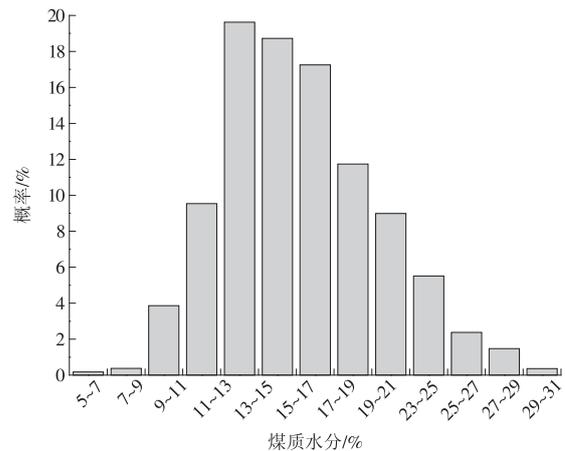


图 1 煤质水分分布概率

Fig. 1 Coal moisture distribution probability

#### 2.2 吸收塔入口烟温的确定

机组 2017 年 8 月至 2018 年 8 月吸收塔入口烟温分布统计见表 2。

表 2 吸收塔入口烟温分布统计

Tab. 2 Annual distribution of temperature at the FGD inlet

温度区间/℃	平均温度/℃	个数	概率/%
94~98	96.63	82	1.96
98~102	100.23	527	12.57
102~106	104.13	948	22.61
106~110	107.74	1011	24.11
110~114	112.03	773	18.44
114~118	115.71	555	13.24
118~122	119.51	206	4.91
122~126	123.58	91	2.17

由式(2)、式(3),根据表 2 计算得:  $\mu = 108.53$ ℃,  $\sigma = 6.07$ ℃。

机组负荷 80% 以上,吸收塔入口烟温的概率分布如图 2 所示。由图可知,吸收塔入口最低烟温 94.50℃,最高烟温 124.50℃,主要分布区间在 97.0~120.0℃。由式(1)可知:正态分布下,横轴区间  $[\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma]$  范围内的出现概率为 95.44%,即吸收塔入口烟温出现在  $[96.60, 120.40]$  范围内的概率为 95.44%。由于发生概率小于 5%

的小概率事件认为在一次试验中该事件是几乎不可能发生的,故本项目吸收塔入口烟温取 120.00℃。

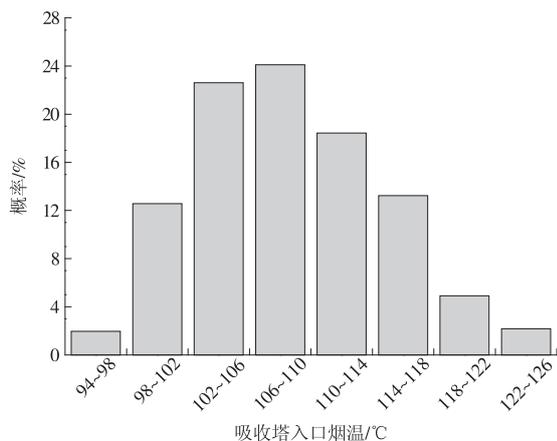


图2 吸收塔入口烟温分布概率

Fig.2 Probability distribution of the temperature at the FGD inlet

### 2.3 吸收塔出口烟温的确定

机组 2017 年 8 月至 2018 年 8 月吸收塔出口烟温分布统计见表 3。

表3 吸收塔出口烟温分布统计

Tab.3 Distribution of the temperature at the FGD outlet

温度区间/℃	区间平均温度/℃	个数	概率/%
48~49	48.50	0	0.00
49~50	49.69	40	0.95
50~51	50.46	65	1.55
51~52	51.61	196	4.68
52~53	52.55	563	13.43
53~54	53.52	758	18.08
54~55	54.52	979	23.35
55~56	53.87	905	21.59
56~57	56.41	354	8.44
57~58	57.48	212	5.06
58~59	58.36	114	2.72
59~60	59.28	6	0.14

由式(2)、式(3),根据表3计算得: $\mu = 54.10$ ℃,  $\sigma = 1.73$ ℃。

机组负荷 80% 以上,吸收塔出口烟温的分布概率如图 3 所示。由图 3 可知,吸收塔出口最低烟温 48.20℃,最高烟温 59.50℃,主要分布区间在 50.0~58.00℃。由式(1)可知:正态分布下,横轴区间 $[\mu - 1.96\sigma, \mu + 1.96\sigma]$ 范围内的出现概率为 95.44%,即吸收塔出口烟温出现在 $[50.70, 57.50]$ 范围内的概率为 95.44%。由于发生概率小于 5% 的小概率事件认为在一次试验中该事件是几乎不可能发生的,故本项目吸收塔出口烟温的设计参数为 57.50℃,考虑到机

组吸收塔出口烟温与烟气湿度不匹配,平均不饱和温差为 1.60℃,故本项目吸收塔出口烟温为 55.90℃,取整 56.00℃,饱和湿烟气。

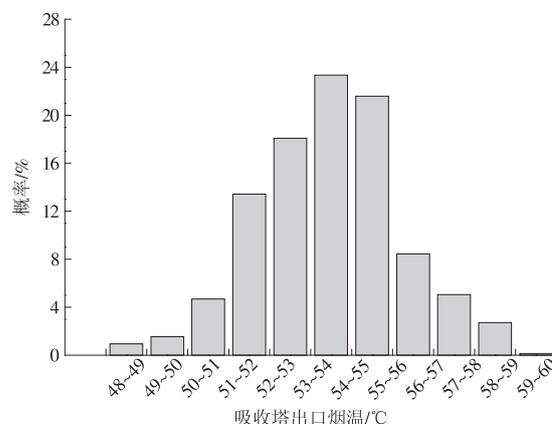


图3 吸收塔出口烟温分布概况

Fig.3 Probability distribution of the temperature at the FGD outlet

### 3 结束语

本文采取正态分布的统计方法对历史运行数据进行分析,综合考虑性能保证及改造成本,得出煤质水分、吸收塔入口烟温及出口烟温的优化设计参数,本次项目改造可按煤质水分 25%,吸收塔入口烟温 120.00℃,吸收塔出口烟温 56.00℃,饱和湿烟气设计。当运行工况超出设计参数,而造成排放超标时,应适当采取控煤措施。

### 参考文献:

- [1] 吕刚,向轶,吕文豪,等. 燃煤锅炉烟气消白技术的应用现状及研究进展[J]. 煤化工,2019,47(1):1-5.  
LYU Gang, XIAN GYi, LYU Wenhao, et al. Application status and research progress on white smoke elimination technology in coal-fired boiler [J]. Coal Chemical Industry, 2019,47(1):1-5.
- [2] 裘立春. 大型燃煤电站锅炉冒白烟的研究[J]. 锅炉技术,2015,46(3):26-29.  
QIU Lichun. The research on stack white fume in large utility boiler burning coal[J]. Boiler Technology, 2015,46(3):26-29.
- [3] 吴春华,颜俭,柏源,等. 无 GGH 湿法烟气脱硫系统烟卤石膏雨的影响因素及策略研究[J]. 电力科技与环保, 2013,29(3):15-17.  
WU Chhua, YAN Jian, BAI Yuan, et al. Influence factors and strategy research on gypsum rain of wet FGD system without GGH [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2013,29(3):15-17.
- [4] 朱法华,孙尊强,申志勇. 超低排放燃煤电厂有色烟羽成因及治理技术的经济与环境效益研究[J]. 中国电力, 2019,52(8):1-7.

ZHU Fahua, SUN Zunqiang, SHEN Zhiyong. Cause analysis of colored smoke plume and related studies on economic and environmental benefits of its treatment technologies for ultra-low emission coal-fired power plants [ J ]. Electric Power, 2019, 52(8) : 1 - 7.

[ 5 ] 欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 等. 燃煤电厂湿烟囱降雨成因分析[ J ]. 环境科学, 2015, 36(6) : 1975 - 1982.

OUYANG Lihua, ZHUANG Ye, LIU Kewei, et al. Analysis on mechanism of rain out carried by wet stack of thermal power plant[ J ]. Environmental Science, 2015, 36(6) : 1975 - 1982.

[ 6 ] 郭彦鹏, 潘丹萍, 杨林军. 湿法烟气脱硫中石膏雨的形成及其控制措施[ J ]. 中国电力, 2014, 47(3) : 152 - 154, 159.

GUO Yanpeng, PAN Danping, YANG Linjun. Formation and control of gypsum rain in wet flue gas desulfurization[ J ]. Electric Power, 2014, 47(3) : 152 - 154, 159.

[ 7 ] 赵萍, 王明浩, 包洪亮, 等. 烟气消白技术的分析研究[ J ]. 环境工程, 2019, 37 : 600 - 603.

ZHAO Ping, WANG Minghao, BAO Hongliang, et al. Analysis and study of flue gas whitening technology[ J ]. Environmental Engineering, 2019, 37 : 600 - 603.

[ 8 ] 谭厚章, 熊英莹, 王毅斌, 等. 湿式相变凝聚器协同多污染物脱除研究 [ J ]. 中国电力, 2017, 50(2) : 128 - 134.

TAN Houzhang, XIONG Yingying, WANG Yibin, et al. Study on synergistic removal of multi-pollutants by WPTA[ J ]. Electric Power, 2017, 50(2) : 128 - 134.

[ 9 ] 李军状, 朱法华, 李小龙, 等. 燃煤电厂烟气中可凝结颗粒物测试研究进展与方法构建[ J ]. 电力科技与环保, 2018, 34(1) : 37 - 44.

LI Junzhuang, ZHU Fahua, LI Xiaolong, et al. Progress and method construction of condensable particles in flue gas of coal-fired power plants [ J ]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2018, 34(1) : 37 - 44.

[ 10 ] 郭静娟. 燃煤电站烟囱排放有色烟羽现象研究[ J ]. 华电技术, 2017, 39(1) : 73 - 74.

GUO Jingjuan. Coal-fired power plant stack emission colored smoke plume study[ J ]. Huadian Technology, 2017, 39(1) : 73 - 74.

[ 11 ] 胡鑫, 潘响明, 李啸, 等. 湿法脱硫烟气“消白”工艺探索[ J ]. 化肥设计, 2018, 56(2) : 28 - 30.

HU Xin, PAN Xiangming, LI Xiao, et al. Exploration on the process of white smoke elimination in wet flue gas desulfurization[ J ]. Chemical Fertilizer Design, 2018, 56(2) : 28 - 30, 37.

[ 12 ] 吴冲, 王争荣. 烟气冷凝技术在火电厂超低排放工程中的应用[ J ]. 华电技术, 2018, 40(8) : 72 - 73.

WU Chong, WANG Zhengrong. Application of flue gas condensation technology in ultra-low emission project of thermal power plants[ J ]. Huadian Technology, 2018, 40(8) : 72 - 73.

[ 13 ] 火电厂大气污染物排放标准: DB 12/810—2018[ S ].

[ 14 ] 王东雷, 许家明. 浆液冷却烟气脱白设计边界条件的选择及应用[ J ]. 环境工程, 2019, 37 : 528 - 531.

WANG Donglei, XU Jiaming. Application and selection of boundary conditions for design of desulphurization slurry cooling flue gas [ J ]. Environmental Engineering, 2019, 37(S1) : 528 - 531.

[ 15 ] 王争荣, 耿宣, 汪洋, 等. 燃煤电厂湿烟羽消除设计方案对比分析[ J ]. 华电技术, 2018, 40(9) : 5 - 9.

WANG Zhengrong, GENG Xuan, WANG Yang, et al. Comparative analysis of design schemes for wet plume removal in coal-fired power plant[ J ]. Huadian Technology, 2018, 40(9) : 5 - 9.

( 本文责编: 齐琳 )

作者简介:

杨鹏飞(1987—),男,河北任丘人,工程师,工程硕士,从事燃煤电厂环保改造项目工艺设计及研发方面的工作(E-mail: yangpf@ chec. com. cn)。

2006(3) : 201 - 210.

( 本文责编: 张帆 )

作者简介:

牛犇(1994—),男,河南驻马店人,工程师,工学硕士,从事电厂化学水处理方面的工作(E-mail: 1245242375@ qq. com)。

( 上接第 21 页 ) 2008 : 21 - 29.

[ 20 ] 曹征良, 袁雄洲, 邢锋, 等. 美国混凝土硫酸盐侵蚀试验方法评析[ J ]. 深圳大学学报(理工版), 2006(3) : 201 - 210.

CAO Zhengliang, YUAN Xiongzhou, XING Feng, et al. American test methods for evaluating the durability of cement based materials against external sulfate attack [ J ]. Journal of Shenzhen University( Science and Engineering ),