# 大型电站粉煤灰灰度影响因素分析

王 亮<sup>1</sup>,何长征<sup>2</sup>,盛昌栋<sup>3</sup>,周克毅<sup>3</sup>,韦红旗<sup>3</sup>
 (1.中国联合工程公司,浙江杭州 310022; 2.南京博沃科技有限公司,江苏南京 210001;
 3.东南大学能源与环境学院,江苏南京 210096)

[摘 要] 粉煤灰作为大型电站的副产品,通过多年的综合开发利用,已成为混凝土的重要原材料。然而,当粉煤灰颜色变深,成分有所变化时,其品质会有所下降,进而影响粉煤灰的销售。对此,本文通过获取粉煤灰灰度值的方法,对其颜色进行量化,并对相关影响因素进行了试验研究。结果表明,影响粉煤灰灰度的因素有粉煤灰含碳量、粒径大小、化学成分及炉内还原性气氛,通过适当提高运行氧量及减小两侧氧量偏差可预防粉煤灰颜色加深。该结果对采用低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术的对冲燃烧机组有一定指导意义。

[关 键 词]粉煤灰;灰度;含碳量;粒径;还原性气氛;铁氧化合物 <

[中图分类号] TK16 [文献标识码] A [文章编号] 1002-3364(2016)02-0116-06

[**DOI** 编 号] 10.3969/j.issn.1002-3364.2016.02.116

# Factors affecting gray scale of fly ash in large scale power plant

WANG Liang<sup>1</sup>, HE Changzheng<sup>2</sup>, SHENG Changdong<sup>3</sup>, ZHOU Keyi<sup>3</sup>, WEI Hongqi<sup>3</sup>

China United Engineering Corporation, Hangzhou 310022, China; 2. BOWO Technology Co., Ltd., Nanjing 210001, China;
 School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: As a by-product of large scale power plant, fly ash has become an important raw material of concrete through comprehensive exploitation and utilization for many years. However, fly ash composition changes when its color get darker. Its quality will decrease, which affects the sale of fly ash. In order to solve the existing problems, by means of analyzing the gray scale of fly ash, this paper quantified its color and studied the related influence factors. The results show that, carbon content, particle size, chemical composition and reducing atmosphere in the furnace are the factors affecting gray scale of the coal ash. Properly increasing the oxygen content and decreasing the oxygen deviation of both sides are effective means of operation adjustment to prevent the fly ash color from getting darker. In terms of opposed firing boiler applying low  $NO_x$  combustion technology, research on gray scale of fly ash is of certain reference and guidance significance.

Key words: coal fly ash, gray scale, carbon content, particle size, reducing atmosphere, iron oxide

粉煤灰是燃煤发电厂烟气除尘的副产品,其年 产量约为2亿t,是生产混凝土的重要原料<sup>[1-2]</sup>。随 着近几年国家环保力度的加大,各大发电厂为了降 低NO<sub>x</sub> 排放,均进行了低NO<sub>x</sub> 燃烧器及空气分级 燃烧改造,使得炉内燃烧时有恶化,导致粉煤灰含碳 量(烧失量)和其他特性(如颜色)有所改变,影响粉 煤灰的品质和销售。

粉煤灰中除铁的氧化物、残碳及 MnO 外,其他 成分均呈现白色或无色,而 MnO 的比重通常又很 小,因此前两者对粉煤灰颜色的影响相对较大。其 中,铁的氧化物主要以 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 形式存在于 粉煤灰中。当炉内燃烧处于高温、短停留时间及低

收稿日期: 2015-06-20

作者简介:王亮(1980-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为发电厂热力系统设计。

E-mail: hczemail@sina.com

表1 各工况主要运行参数

Table 1 Main operation parameters of each working condition

向 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 转化 <sup>[3-8]</sup> ,这使得煤粉炉中铁氧化物多以
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 形式存在,而循环流化床锅炉中铁氧化物则
多以 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 形式存在 <sup>[3]</sup> 。由于 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (黑色)及
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (红色)在颜色上的差异,导致铁氧化物的组
成对粉煤灰颜色产生影响。

氧量环境时,有利于 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 的生成,却不利于 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

某 660 MW 机组锅炉运行中发现,CO 排放质 量浓度较高,且粉煤灰颜色时有加深。测量结果表 明,其粉煤灰含碳量(质量分数,下同)在相关标准<sup>[1]</sup> 规定的 I 级灰范围内,但由于该电厂缺乏含碳量连 续测量和监测手段,其粉煤灰颜色的加深会引起用 户对含碳量高的担心。对此,本文以该机组为研究 对象,分析粉煤灰灰度的影响因素,并提出相关建议 及措施,为机组的安全经济运行提供指导。

# 1 设备概述

某超超临界机组锅炉为 DG2060/26.15-Ⅱ2660 型变压运行直流炉,采用单汽包、前后墙对冲燃烧、 Π型布置。制粉系统为正压直吹式,配备 6 台北京 电力设备总厂生产的 ZGM113G 中速磨煤机,每台 磨煤机对应 6 只低 NO<sub>x</sub> 旋流燃烧器,分 3 层布置, 在燃烧器上方布置有 1 层分离燃尽风,以实现空气 分级燃烧。由于该机组采用了低 NO<sub>x</sub> 燃烧器及炉 内空气分级技术,主燃烧器区域保持在缺氧、富燃料 环境下,以控制 NO<sub>x</sub> 排放<sup>[9+11]</sup>。

但是,该机组锅炉长期存在 CO 分布不均及其 质量浓度过高的问题,在排烟烟道宽度方向进行的 CO 质量浓度分布测试中,甚至出现过"最高质量浓 度 9 000 mg/m<sup>3</sup>(标准状态,下同)、最低质量浓度 55 mg/m<sup>3</sup>、平均质量浓度 2 193 mg/m<sup>3</sup>"的分布状 态,分析认为这是由于主燃烧器区域保持了较强的 还原性气氛,以及运行中风粉分配不均匀,使得炉内 局部区域缺氧严重所致。

# 2 试验内容及方法

## 2.1 燃烧调整试验

本次试验共进行了 7 个工况,通过燃烧器外二 次风门、磨煤机进口风量、运行氧量及负荷的调整, 将 CO 排放质量浓度及两侧偏差降低至合理范围, 以提高锅炉运行的经济性,同时分析相关因素对粉 煤灰颜色的影响。试验中,对烟气的成分及温度进 行了测试,并对原煤、飞灰(粉煤灰)及炉渣进行了取 样分析,各工况主要运行参数见表 1。

工况	试验负荷/ (t・h <sup>-1</sup> )	运行氧量/ %	磨煤机进口 风量/(t•h <sup>-1</sup> )	燃烧器外 二次风门
T1	652	3.5	113	_
Τ2	651	3.6	101	_
Т3	650	3.5	108	—
T4	491	3.1	85	_
Τ5	616	3.6	93	_
Τ6	615	3.7	93	调整后
Τ7	615	3.5	92	调整前

## 2.2 粉煤灰灰度测量

试验中,各工况均对静电除尘器电场的4个落 灰斗进行了粉煤灰的取样,其中沿炉膛宽度方向由 A侧至B侧分别取灰样A2,A3,B2,B3,7个工况共 有28个灰样。为了对粉煤灰颜色进行量化,试验后 期通过拍摄成像技术及图像分析软件获取了所有灰 样的灰度值,该值范围为0~255,当其为下限时,即 为黑色,当其为上限时,则为白色。

## 2.3 粉煤灰化学成分、粒径及含碳量分析

采用 X 射线荧光光谱仪、激光粒度分析仪、振动筛及马弗炉等仪器,对粉煤灰的化学成分、粒径分布、R<sub>200</sub>/R<sub>90</sub>、含碳量等指标进行分析,以了解各项指标对其灰度的影响。

# 3 燃烧调整试验结果

通过试验数据分析计算,所得出的主要热损失与 锅炉热效率(修正)的关系曲线如图 1一图 3 所示。 由图 1一图 3 可见:锅炉热效率的 3 项主要热损失中, 干烟气热损失与未燃尽碳热损失的变化幅度相对较 小,对锅炉热效率的影响有限;但未燃尽 CO 热损失 的变化幅度较大,且变化趋势与锅炉热效率基本一 致,可见其对锅炉热效率的影响较为显著。





#### 图 2 未燃尽碳热损失与锅炉热效率的关系

Fig. 2 Curves showing the relationship between heat

loss of the unburned-out carbon and boiler efficiencies



图 3 未燃尽 CO 热损失与锅炉热效率的关系

Fig. 3 Curves showing the relationship between heat loss of the unburned-out CO and boiler efficiencies

同时,也说明炉内燃烧是否处于缺氧状态(或还 原性气氛)对锅炉经济性的影响较大,而这也是低氮 旋流燃烧器锅炉较为突出的现象<sup>[10-12]</sup>。为避免炉内 燃烧处于较为严重的还原性气氛下,建议适当提高 运行氧量,并通过外二次风门的调整尽量减小炉膛 两侧氧量偏差。

# 4 灰度影响因素分析

## 4.1 粉煤灰含碳量

不同工况下落灰斗灰样含碳量与灰度值之间的 变化曲线如图 4—图 7 所示。





Fig. 4 Curves showing the relationship between the gray scale and carbon content of ash in A2 dust hopper



图 5 A3 落灰斗煤粉灰含碳量与灰度值的关系

Fig. 5 Curves showing the relationship between the gray

scale and carbon content of ash in A3 dust hopper



图 6 B2 落灰斗煤粉灰含碳量与灰度值的关系 Fig. 6 Curves showing the relationship between the gray







从图 4一图 7 可见:当粉煤灰含碳量在 0.5%~ 1.9%范围内,4 个落灰斗所采集煤粉灰的灰度值与 含碳量的相关性总体较好,即含碳量高时灰度值一 般较低,可见含碳量对灰度值的影响较大。

### 4.2 粉煤灰粒径

在对试验工况中所有灰样进行细度分析发现, 落灰斗 A2,A3,B2 和 B3 灰样的平均 R<sub>200</sub>/R<sub>90</sub>分别 为 8.1%/55.0%,2.2%/21.8%,1.7%/19.3%, 3.4%/31.7%,且 A2 灰样各工况的粒径均明显大 于其他 3 个灰样。

为分析灰样粒径对同一工况下各灰样含碳量与 灰度值之间变化规律的影响,将不同工况下各灰样 含碳量与灰度值的关系汇总于图 8。





http://www.rlfd.com.cn http://rlfd.periodicals.net.cn

从图 8 可见:同一工况的 4 个粉煤灰灰样中, A3,B2,B3 灰样含碳量与灰度的相关性很好(仅工 况 5 除外),即含碳量越高,灰度值越小,颜色越深。 可见,在一定条件下,灰样的灰度值对于含碳量大小 的反映较为准确、灵敏。而同一工况的 4 个灰样中, A2 灰样含碳量与灰度的相关性较差,其中 T1,T2, T4,T7 工况中 A2 灰样含碳量为 4 个灰样中的最低 值,但灰度值却不是最高。综合其他影响因素,分析 认为导致 A2 灰度值下降的主要原因是其粒径明显 大于其他灰样。

相关文献<sup>[13]</sup>研究表明,粉煤灰粒径越大,颜色 越浅,但本文认为这主要是由于目测和灰度判断颜 色的差异所致。上述多个工况 A2 灰样目测的颜色 确实相对较浅,然而相同成像条件下的灰度值却反 映出相反的结果,可见粉煤灰颜色深浅的判断并不 能简单地通过目测完成。

## 4.3 炉内还原性气氛

为分析还原性气氛对粉煤灰灰度值的影响,特 将相关数据汇总如图 9一图 11 及表 2 所示。由图 9一图 10 可见:所有 7 个工况中,A 侧粉煤灰的灰度 均高于 B 侧,也即 A 侧粉煤灰颜色较 B 侧浅,其主 要原因是由于灰样中含碳量偏小所致。但是,工况 5 却有所不同,虽然其 A 侧粉煤灰灰度也高于 B 侧,但其含碳量却大于 B 侧(通过配风调整后所 致),这说明除粉煤灰含碳量及粒径对粉煤灰颜色有 影响以外,还有其他影响因素。

由表 2 及图 11 可见:工况 T1 与 T3、工况 T5 与 T7 粉煤灰含碳量的平均值较为接近,然而工况 T3和T7灰样颜色却相对较深(灰度值较低),这也 说明有其他因素对粉煤灰颜色有所影响。结合相关 运行状况发现,工况 T3 和 T7 CO 排放质量浓度相 对较高,且两侧浓度存在明显偏差,然而通过提高运 行氧量及减小两侧氧量偏差后,工况 T1 和 T5 有明 显改善,且灰样颜色变浅(灰度值明显提高)。因此, 分析认为炉内 CO 质量浓度的高低及其偏差对粉煤 灰颜色也有一定影响,其主要原因分析如下。



图 9 各工况 A/B 侧粉煤灰灰度值

Fig. 9 Histograms showing the gray scale of A/B

side ash under various conditions



图 10 各工况 A/B 侧粉煤灰含碳量





第2期

2016 年

表 2 部分工况相关参数汇总 Table 2 Collection of related parameters under partial conditions

工况	电负荷/ MW	粉煤	灰含碳量	₫/%	粉	煤灰灰度	ŧ值	CO 排 (1	⊧放质量 mg•m <sup>-</sup>	浓度/ <sup>3</sup> )	排	烟氧量/	%
	101 00	A 侧	Β侧	平均	A 侧	В侧	平均	A 侧	В侧	平均	A 侧	В侧	平均
T1	650	0.65	1.18	0.91	182	161	172	54	358	206	5.3	4.9	5.1
Т3	650	0.70	1.31	1.00	166	116	141	1 279	2 922	2 101	5.0	3.9	4.4
T5	615	1.49	1.39	1.44	154	139	147	303	550	427	4.9	4.2	4.6
Τ7	615	1.04	1.72	1.38	146	114	130	21	1221	621	5.3	4.0	4.6

1) 灰样中铁氧化物含量(质量分数,下同)为 3%~6%,明显高于含碳量。为了解粉煤灰中铁氧 化物对其颜色的影响,在高温、氧化气氛及较长时间 条件下对粉煤灰进行煅烧,通过煅烧前后颜色对比 可知,粉煤灰在煅烧前呈黑灰色(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 较多),而煅 烧后则呈橙灰色(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 较多)。由此可见,当铁氧 化物含量较高时,氧化物组成的变化对灰样颜色的 影响很大。

2)由于采用低氮燃烧技术及低氧运行方式,炉 内时常呈现出较为严重的或局部的还原性气氛条件 (如工况 T3 和 T7),这在一定程度上抑制了颜色较 浅的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的生成。

3)低氧或还原性气氛不利于燃烧初期挥发分与 氧气的快速混合燃烧,却有利于碳烟生成<sup>[14]</sup>。由于 碳烟一般具有由超细碳颗粒形成的分形结构,因而 密度低,虽然在飞灰中碳烟所占质量分数很小,但体 积较大,因此当其生成较多时不仅导致飞灰含碳量 升高,颜色也会所有加深。

## 4.4 粉煤灰化学成分

运行中时常发现,本厂2台机组粉煤灰的颜色 差异较大,怀疑其化学成分有所差异,因此取2台机 组灰库中代表性的粉煤灰样进行分析,其相关化学 成分、粒径分布及含碳量等分析结果见表3。

由表 3 可见:1)5 号、6 号炉粉煤灰灰度值分别 为 83.8 和 109.2,前者灰度值偏小、颜色明显偏深; 2)5 号、6 号炉粉煤灰中的 MnO 含量很少,且 2 灰 样的 MnO 含量差异也较小,可见所有成分中仅有 铁氧化物及残碳对灰样颜色有所影响;3)5 号炉粉 煤灰的含碳量及粒径均偏低,而铁氧化物含量却高 出 6 号炉 2.17%,可见铁氧化物含量的不同是导致 两炉飞灰差异的原因之一。分析认为,这主要是由 于厂方为多煤种掺烧,各磨煤机所配煤种及磨煤机 运行方式有所不同,导致入炉煤中铁矿石含量有较 大波动。加之,5 号炉运行中时常出现 CO 排放质 量浓度过高、两侧 CO 排放质量浓度偏差很大的现 象,由于还原性气氛相对更为严重,因此导致5号炉 粉煤灰颜色时常深于6号炉。

表 3 2 台同型号锅炉灰库粉煤灰成分分析结果 Table 3 Ash component analysis in two boilers

with the same model

参数	5号炉灰样	6号炉灰样	两者偏差
灰度值	83.8	109.2	25.4
$R_{75}/\%$	19.4	22.4	-3.0
$R_{90} / \%$	15.5	18.5	-3.0
$R_{150}/\%$	3.0	4.4	-1.4
$R_{200} / \%$	0.2	0.6	-0.4
$w(SiO_2)/\%$	51.85	48.10	3.75
$w(Al_2O_3)/\%$	25.47	33.77	-8.30
w(CaO)/%	8.45	7.01	1.44
$w(\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3)/\%$	6.00	3.83	2.17
$w(SO_3)/\%$	1.48	1.54	-0.06
$w(K_2O)/\%$	1.48	1.00	0.49
w(MgO/%	1.39	0.70	0.69
$w(Na_2O)/\%$	1.14	0.48	0.66
$w(TiO_2)/\%$	0.90	1.16	-0.27
$w(P_2O_5)/\%$	0.36	0.44	-0.09
$w(SrO)/\frac{0}{0}$	0.20	0.27	-0.07
w(MnO)/%	0.08	0.06	0.02
LOI(烧失量)/%	0.94	1.41	-0.47

# 5 结 论

1)粉煤灰的颜色是由其含碳量、粒径大小、铁氧 化物含量及炉内还原性气氛共同决定。在一定条件 下,灰样的灰度值对于含碳量大小的反映较为准确、 灵敏,这为在线预测飞灰含碳量提供了一种新思路。

2)入炉煤中铁矿石含量波动较大,以及炉内缺 氧状态严重是导致2台机组粉煤灰颜色差异较大的 主要原因。在不改变煤质、配煤方式及制粉系统运 行方式的情况下,通过适当提高运行氧量及减小两 侧氧量偏差,可避免炉内燃烧处于较为严重的还原 性气氛下,以提高锅炉热效率,防止粉煤灰颜色的加 深及高温腐蚀的发生,这对于大型机组的安全、经济 运行有一定指导意义。

# [参考文献]

[1] 用于水泥和混凝土中的粉煤灰:GB/T 1596-2005 [S].

Fly ash used for cement and concrete: GB/T 1596-2005[S].

[2] 李勇.电厂粉煤灰质量现状分析及效益质量控制建议 [J].工业技术,2014(25):138.

LI Yong. The situation analysis of fly ash quality in power plant and the suggestions for its quality control [J]. Technology Innovation and Application, 2014 (25):138.

 [3] 裴亚利.循环流化床粉煤灰的特征及其综合利用研究
 [D].吉林:吉林大学,2006:23-26.
 PEI Yali. Study on characteristic and comprehensive utilization of circulating fluidized bed ash[D]. Jilin;Jilin

University,2006:23-26.

[4] 高正平,沈来宏,肖军,等.基于 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 载氧体的煤化学
 链燃烧试验[J].工程热物理学报,2009,30(7):
 1249-1252.

GAO Zhengping, SHEN Laihong, XIAO Jun, et al. Multicycle reduction of coal as fuel for chemical-looping combustion with Fe-based oxygen carrier [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(7): 1249-1252.

- [5] 宋涛,沈来宏,肖军,等.铁矿石载氧体化学链燃烧高温还原表征[J].燃料化学学报,2011,39(8):567-574.
  SONG Tao, SHEN Laihong, XIAO Jun, et al. Characterization of hematite oxygen carrier in chemical-looping combustion at high reduction temperature [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2011, 39 (8):567-574.
- [6] 赵志龙,唐惠庆,郭占成. CO 气氛下 MgO 对 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 还 原时金属铁析出微观行为的影响[J]. 有色金属,2012 (5):43-47.

ZHAO Zhilong, TANG Huiqing, GUO Zhancheng. Effect of MgO on micro-behavior for precipitation of metallic iron in  $Fe_2O_3$  reduction under CO atmosphere [J]. Nonferrous Metals, 2012(5):43-47.

 [7] 覃吴,李渠,董长青,等. CO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米载氧体作用下CO化学链燃烧富集CO<sub>2</sub>[J].化工学报,2014,65(8): 3136-3143.

> QIN Wu,LI Qu,DONG Changqing, et al. CO chemical looping combustion using CO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano oxygen carrier for enrichment of CO<sub>2</sub>[J]. CTFSC Journal, 2014, 65(8):3136-3143.

[8] 石司默. CO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/粉煤灰作用下 CO 化学链燃烧特性研究[D].北京:华北电力大学,2013: 37-41.

SHI Simo. Study on Co-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/coal ash for CO oxidation in CLC system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013:37-41.

- [9] 彭玲,王恩禄,罗永浩,等.分级燃烧降低燃煤锅炉 NO<sub>x</sub> 排放的机理及影响因素分析[J].锅炉技术, 2004,35(3):27-30.
  PENG Ling, WANG Enlu, LUO Yonghao, et al. Analysis of the influence Factors and the mechanism of fuel staging to reduce the NO<sub>x</sub> emissions in the coal fired boiler[J]. Boiler Technology, 2004, 35(3):27-30.
- [10] 洪荣坤,沈跃良,赵振峰.600 MW 超临界对冲燃烧锅 炉 CO 和 NO<sub>x</sub> 排放特性的研究[J].动力工程学报, 2012,32(12):922-927.

HONG Rongkun, SHEN Yueliang, ZHAO Zhenfeng. Emission characteristics of CO and NO<sub>x</sub> from opposed firing boiler in a 600 MW supercritical unit[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2012, 32 (12):922-927.

[11] 夏文静,衡丽君,何长征,等.660 MW 超超临界燃煤锅 炉降低 CO 排放的试验研究[J]. 热能动力工程,2014, 29(1):58-64.

XIA Wenjing, HENG Lijun, HE Changzheng, et al. Experienmental study of a 660 MW ultra-supercritical opposed combustion coal-fired boiler for reducing CO emission [J]. Engineering for Thermal Energy and Power, 2014, 29(1):58-64.

[12] 黄志彬,易勇智,刘宝富,等. 超超临界 660 MW 机组锅 炉运 行 氧 量 控 制 [J], 热 力 发 电, 2012, 41 (12): 106-108.

HUANG Zhibin, YI Yongzhi, LIU Baofu, et al. Oxygen content control for a boiler in ultra supercritical 600 MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2012, 41(12):106-108.

- [13] 孙帅. CuO/煤灰作用下 CO 化学链燃烧机理研究[D]. 北京:华北电力大学,2013:8.
  SUN Shuai. Mechanism study on chemical looping combustion of CO using CuO/fly ash [D]. Beijing: North China Electric Power University,2013;8.
- [14] 熊刚.煤和生物质燃烧碳烟生成的实验研究[D].北京:清华大学,2011:2-3.
  XIONG Gang. Experimental study of soot formation during the combustion of coal and biomass[D]. Beijing:Tsinghua University,2011:2-3.

(责任编辑 马昕红)