

低低温条件下飞灰工况比电阻特性

刘含笑¹,姚宇平¹,郦建国¹,李文华²,方小伟¹,郭滢¹

(1. 浙江菲达环保科技股份有限公司,浙江 诸暨 311800;2. 浙江浙能温州发电有限公司,浙江 乐清 325602)

摘要:为研究电除尘器低低温工况条件下飞灰工况比电阻特性,探讨采用数学模型计算飞灰工况比电阻的可行性,采用BDL型工况飞灰比电阻测试仪对3个典型项目开展飞灰工况比电阻现场在线测定,同时基于R. E. Bickelhaupt模型计算玉环电厂、温州电厂、长兴电厂3个项目飞灰工况比电阻值,并对计算值和实测值进行对比。结果表明,低低温工况时飞灰工况比电阻值明显低于常温工况,但模型计算值与实测数据尚存一定差距,该模型仍需修正。

关键词:燃煤电厂;工况比电阻;低低温电除尘器;电除尘

中图分类号:X701.2 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)05-0125-04

Resistivity characteristics of fly ash under low-low temperature

LIU Hanxiao¹, YAO Yuping¹, LI Jianguo¹, LI Wenhua², FANG Xiaowei¹, GUO Ying¹

(1. Zhejiang Feida Environmental Science and Technology Co., Ltd., Zhuji 311800, China;

2. Zhejiang Zheneng Wenzhou Power Generation Co., Ltd., Yueqing 325602, China)

Abstract: To study the resistivity characteristics of fly ash under low-low temperature in ESP and discuss the feasibility of using mathematical model to calculate the resistivity of fly ash, the resistivity of fly ash in Yuhuan, Wenzhou and Chengxing power plants was measured on-line by BDL fly ash resistivity tester and calculated by R. E. Bickelhaupt model. Then, the calculated and measured values were compared. Results show that the resistivity under low-low temperature is significantly lower than that under normal temperature. However, there is a certain gap between the calculated and measured values, so the mathematical model needs further correction.

Key words: coal-fired power plant; resistivity; LL-ESP; electrostatic precipitator

0 引 言

当前,国内大气环境形势依然严峻,在国家及地方政策的驱使下,燃煤电厂烟气超低排放呼声日盛,实现燃煤电厂烟气超低排放是国家节能减排战略的重大需求,各地超低排放机组陆续完成改造并投运,取得了较好的排放效果^[1-3]。在除尘方面,低低温电除尘技术作为一种经济、高效的干式电除尘技术,已成为超低排放改造的主流除尘技术之一,尤其在不加湿电情况下,也可实现烟尘的超低排放^[4-7]。

比电阻是影响电除尘性能的关键因素。低低温

电除尘技术通过将烟气温度降低至酸露点以下,使得粉尘性质明显改善,降低比电阻,可大幅提高除尘效率。三菱重工对不同温度条件下煤种类型与粉尘比电阻的关系进行了大量研究^[8-9],低低温状态下,粉尘比电阻均在反电晕临界比电阻值以下。靳星^[10]研究了飞灰工况比电阻与温度的关系,结果表明对于工况比电阻,相同煤种,低低温工况时比电阻值明显低于常温工况。但是国内尚缺乏将粉尘比电阻现场测试和理论计算相结合的系统研究,对于比电阻测试仪器的测试误差较难准确评估。

本文拟通过现场在线测试及数学模型计算相结

收稿日期:2017-02-25;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.05.023

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA065002);国家重点研发计划资助项目(2016YFC0203704,2016YFC0209107);浙江省科技计划资助项目(2013C11G6080001)

作者简介:刘含笑(1987—),男,山东潍坊人,硕士,从事PM_{2.5}治理及测试技术研发工作。E-mail:gutounan@163.com

引用格式:刘含笑,姚宇平,郦建国,等.低低温条件下飞灰工况比电阻特性[J].洁净煤技术,2017,23(5):125-128.

LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. Resistivity characteristics of fly ash under low-low temperature[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5):125-128.

合的研究方式,针对典型项目,一方面采用BDL型工况飞灰比电阻测试仪现场测试飞灰工况比电阻,另一方面基于R. E. Bickelhaupt模型计算飞灰工况比电阻值,比较两者的差异。同时探讨烟气温度对飞灰工况比电阻的影响,尤其是烟气温度低于酸露点时,低低温工况条件下的飞灰比电阻特性,旨在获取第一手数据,为研究低低温电除尘技术对我国煤种的适应性及有效性提供数据支撑。

1 工况比电阻测试

1.1 测试仪器

研究采用华北电力大学研发的BDL型工况飞灰比电阻测试仪(型号:TH2681A)测定不同工况条件下飞灰比电阻。该仪器是专门用于烟道内部飞灰比电阻的检测,配有可直接插入烟道内的测量探头,其灰样及电信号采集均在烟道内完成,因此能较真实地反映电除尘器实际运行工况下的飞灰比电阻特性^[11-14]。

1.2 测试方法

飞灰比电阻现场测量系统如图1所示。通过调整采样枪进入烟道尺寸来调整采样点位置。烟气中的飞灰颗粒在抽气泵的抽吸作用力下进入测量探头内,并沉积在刚玉滤筒内,在同心圆环电极之间的环形空间中形成粉尘层,电极经高温导线与主机连接,可在主机上读取仪表值,并根据探头的电极系数换算得到所采集到飞灰的比电阻值。每个样的采集时间为40 min,测试方法符合GB/T 16913—2008《粉尘物性测试方法》的规定^[15]。

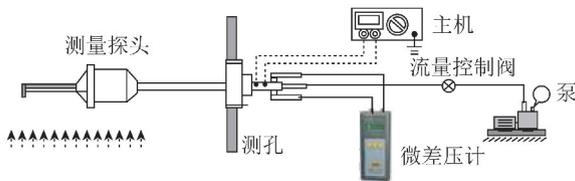


图1 飞灰工况比电阻测试系统

Fig. 1 Measurement system of the resistivity of fly ash

1.3 工程实测结果

华能玉环电厂1号炉1000 MW机组,测点分别在低低温省煤器入口和低低温电除尘器入口烟道,烟气温度分别为95、121℃,通过多次测量求平均值,2种温度下测得飞灰的工况比电阻分别为 2.50×10^9 、 $1.410 \times 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

浙能温州电厂8号炉660 MW机组,测点布置在低低温电除尘器入口烟道,分别测定烟气冷却器

投运、停运时飞灰工况比电阻,烟气温度分别为98、129℃,2种温度条件下测得飞灰的工况比电阻分别为 5.59×10^7 、 $7.81 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

上述2个工程实测案例表明,低低温工况下飞灰工况比电阻明显较常温工况低,且下降幅度有较大差异。为进一步探讨烟气温度对飞灰工况比电阻的影响,增加了温度测点。

华能长兴电厂660 MW机组,分别测试不同温度条件下设计煤种和校核煤种1的工况比电阻值,测点位于低低温电除尘器入口烟道,通过调整烟气冷却器出力来调整低低温电除尘器入口烟气温度。燃用设计煤种时,烟气温度分别为85.9、90、111.7、125℃;燃用校核煤种1时,烟气温度分别为88.5、122℃。不同温度条件下测得设计煤种飞灰的工况比电阻分别为 6.46×10^9 、 8.02×10^9 、 1.74×10^{11} 、 $5.48 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$,2种温度条件下校核煤种1飞灰的工况比电阻分别为 9.99×10^9 、 $1.07 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

2 工况比电阻计算

2.1 计算模型

美国南方研究院的R. E. Bickelhaupt基于实验室模拟工况条件测试的多组飞灰比电阻数据,通过统计分析,建立了较完整的比电阻预测模型。本文采用R. E. Bickelhaupt模型计算飞灰比电阻值,该模型对表面比电阻、体积比电阻分别进行计算,涉及飞灰成分、场强和烟气条件等因素^[16-17]。飞灰体积比电阻、表面比电阻的计算公式分别为

$$\rho_V = \exp(-1.8916 \ln X - 0.9696 \ln Y + 1.237 \ln Z + 3.62876 - 0.069078E + 9980.58/T) \quad (1)$$

$$\rho_S = \exp[27.59774 - 2.233348 \ln X - 0.00176W - 0.069078E - 0.00073895W \exp(2303.3/T)] \quad (2)$$

式中, ρ_V 、 ρ_S 分别为飞灰体积比电阻、表面比电阻, $\Omega \cdot \text{cm}$;X、Y、Z分别为Li+Na、Fe、Mg+Ca原子质量分数,%;E为电场强度,kV/cm;T为温度,K;W为水汽含量,%。

当 $Z > 3.5\%$ 或 $K < 1.0\%$ 时(K为钾元素的原子质量分数),总工况比电阻 ρ_{vs} 计算公式为

$$\rho_{vs} = \frac{1}{1/\rho_V + 1/\rho_S} \quad (3)$$

工况比电阻需考虑飞灰表面沉积硫酸雾对比电阻的影响时,其修正量 ρ_a 可用下式表示:

$$\rho_a = \exp(59.0677 - 0.854721C(\text{SO}_3) - 13049.47/T - 0.069078E) \quad (4)$$

此时,考虑飞灰表面沉积硫酸雾的工况比电阻 ρ_{vsa} 计算公式为

$$\rho_{\text{vsa}} = \frac{1}{1/\rho_{\text{vs}} + 1/\rho_a} \quad (5)$$

2.2 飞灰成分分析

3个测试项目的飞灰成分分析数据见表1。

表1 3个项目的飞灰成分

Table 1 Composition of fly ash in three projects

飞灰成分	玉环电厂设计煤种	温州电厂设计煤种	长兴电厂	
			设计煤种	校核煤种1
$w(\text{SiO}_2)$	44.10	51.60	42.98	45.80
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	24.66	18.97	27.92	37.17
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	13.14	10.62	8.61	7.09
$w(\text{CaO})$	5.30	11.59	11.75	4.98
$w(\text{MgO})$	2.25	1.37	2.05	0.70
$w(\text{P}_2\text{O}_5)$	0.90	—	0.12	0.10
$w(\text{SO}_3)$	1.04	2.28	2.70	1.50
$w(\text{Na}_2\text{O})$	0.29	0.92	2.98	0.38
$w(\text{K}_2\text{O})$	1.99	1.22	0.94	0.39
$w(\text{TiO}_2)$	—	0.87	0.78	1.18

2.3 计算结果

根据式(1)~(5)及表1中3个测试项目飞灰成分分析数据,结合玉环电厂、温州电厂、长兴电厂烟气冷却器入口 SO_3 实测数据(采用GB/T 21508—2008规定的控制冷凝法采集 SO_3 样品,采用哈希DR6000紫外可见光分光光度计滴定样品,测试位置在烟气冷却器入口处),计算得到3个项目的飞灰工况比电阻计算数据,如图2所示。结果表明,烟气中 SO_3 可有效降低飞灰比电阻,且温度越低, SO_3 质量分数对飞灰比电阻的影响程度越大。

3 测试与计算结果的比对

根据前文所述,飞灰工况比电阻测试值与 ρ_{vsa} 计算值对比如图3所示。计算值与实测值趋势一致,但具体数值尚有些出入,当 SO_3 质量分数较高时,如长兴电厂,实测值高于计算值;当 SO_3 质量分数较低时,如温州电厂,实测值小于计算值。究其原因,本文所采用的比电阻计算模型主要依据国外燃煤飞灰数据拟合而成,众所周知,国外煤种较好且稳

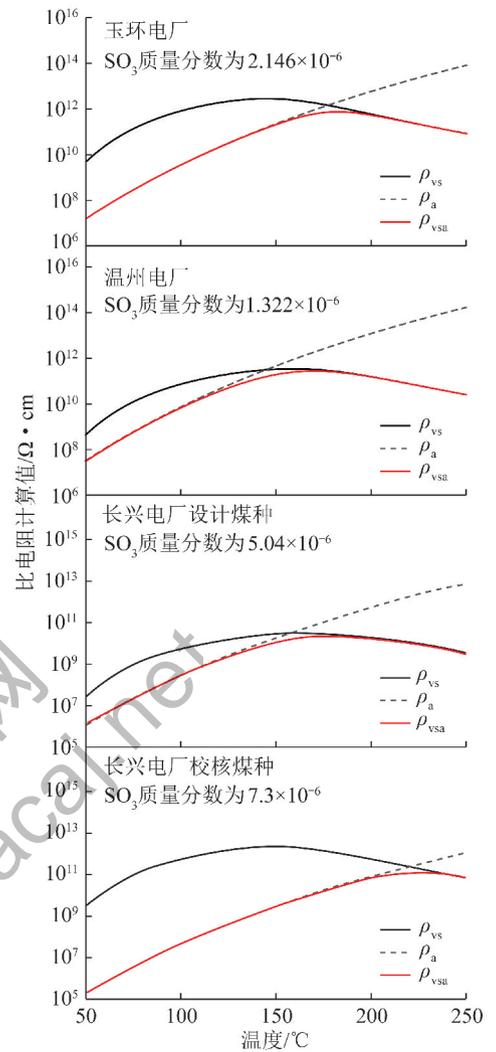


图2 飞灰工况比电阻计算值

Fig. 2 Calculated values of the resistivity of fly ash

定,而国内煤种条件更为复杂,若需准确预测国内燃煤飞灰比电阻值,需采用国内燃煤飞灰比电阻数据对公式进行一定修正。

4 结 语

通过现场在线测试及数学模型计算相结合的研究方式,探讨了烟气温度对飞灰工况比电阻的影响,尤其是烟气温度低于酸露点时,低低温工况条件下,因烟气中 SO_3 冷凝成了硫酸雾,并吸附在粉尘表面,改善了粉尘性质和烟气工况,使得飞灰工况比电阻大幅降低,可有效提高低低温电除尘器的除尘效率。本文的测试及计算可为进一步探索低低温电除尘技术对我国煤种的适应性及有效性提供数据和技术支撑。课题组后续的研究重点将放在以下几个方面: ① 进一步积累工况比电阻实测数据,建立数据库,

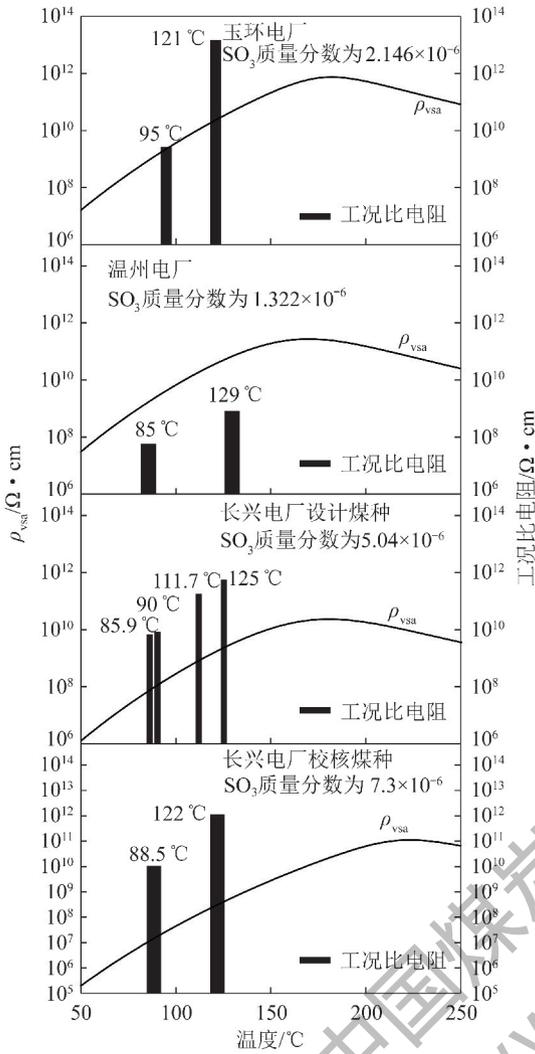


图3 飞灰工况比电阻计算值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of the calculated and measured values of the resistivity of fly ash

对比电阻预测公式进行修正;② 基于修正后的比电阻计算公式,探讨不同 SO_3 质量分数及不同烟气温度时,粉尘比电阻特性,为低低温电除尘技术的深化研究提供数据支撑。

参考文献 (References):

[1] 国家发改委. 关于印发《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》的通知[EB/OL]. (2014-09-12) [2017-02-25]. <http://bgt.ndrc.gov.cn/zcfb/201409/t20140919626242.html>.
 [2] 国家统计局,环境保护部. 中国环境统计年鉴(2014)[M]. 北

京:中国统计出版社,2015.

[3] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2015[M]. 北京:中国市场出版社,2015.
 [4] 郦建国,郦祝海,何毓忠,等. 低低温电除尘技术的研究及应用[J]. 中国环保产业,2014(3):28-34.
 LI Jianguo, LI Zhuhai, HE Yuzhong, et al. Research and application on electric precipitation technology with low-low temperature [J]. China Environmental Protection Industry, 2014(3):28-34.
 [5] 中国环境保护产业协会电除尘委员会. 超低排放进一步促进煤电绿色发展[N]. 中国环境报,2015-01-15(10).
 [6] 中国环境保护产业协会电除尘委员会. 燃煤电厂烟气超低排放技术[M]. 北京:中国电力出版社,2015.
 [7] 张绪辉. 低低温电除尘器对细颗粒物及二氧化硫的协同脱除研究[D]. 北京:清华大学,2015.
 [8] YOSHIO Nakayama, SATOSHI Nakamura, YASUHIRO Takeuchi, et al. MHI high efficiency system-proven technology for multi pollutant removal [R]. Japan: Hiroshima Research & Development Center, 2011:1-11.
 [9] MASAMI Kato, TADASHI Tanaka, YASUKI Nishimura, et al. Method and system for handling exhaust gas in a boiler: USA5282429[P]. 1994-02-01.
 [10] 靳星. 静电除尘器内细颗粒物脱除特性的技术基础研究[D]. 北京:清华大学,2013.
 [11] 原永涛,潘小琳. 粉尘比电阻参数在电除尘器技改工程中的科学运用:第15届中国电除尘学术会议论文集[C]. 北京:中国环境保护产业协会,2013.
 [12] 刘含笑,郦建国,姚宇平,等. 燃煤电厂粉尘比电阻及其测试方法研究[J]. 电力与能源,2015,36(4):558-561.
 LIU Hanxiao, LI Jianguo, YAO Yuping, et al. Dust specific resistance and its test method in coal-fired power plants[J]. Power & Energy, 2015, 36(4):558-561.
 [13] 原永涛. 飞灰比电阻的现场测量[J]. 华北电力技术,1995(2):18-20.
 YUAN Yongtao. On site measurement of specific resistance of fly ash[J]. North China Electric Power, 1995(2):18-20.
 [14] 原永涛,齐立强. 飞灰比电阻现场和实验室测定方法对比分析[J]. 华北电力技术,2002(2):22-23.
 YUAN Yongtao, QI Liqiang. Comparison of measuring fly-ash resistivity at field with that in laboratory[J]. North China Electric Power, 2002(2):22-23.
 [15] GB/T 16913—2008, 粉尘物性试验方法[S].
 [16] 李晓颖. 燃煤飞灰比电阻预测模型[D]. 杭州:浙江大学,2015.
 [17] BICKELHAUPT R E, SPARKS L E. Predicting fly ash resistivity—an evaluation[J]. Environment International, 1981, 6(1):211-218.