

燃煤飞灰伏安特性的实验研究

原永涛, 齐立强

(华北电力大学 环境科学与工程学院, 河北保定 071003)

摘 要: 飞灰的介电性质是影响电收尘效率的重要因素。根据自行研制的直流高压试验系统, 对不同燃煤飞灰的漏泄电流和比电阻进行了实测分析, 获得了一系列伏安特性曲线。实验结果表明: 施加在灰层上的电压、通过灰层的漏泄电流和飞灰的比电阻三者之间的关系不总是遵循经典的欧姆定律, 即 $V/I \neq$ 常数; 飞灰的伏安特性曲线在高、中、低 3 个电压段具有不同的形态特征; 随着电压的提高, 飞灰的比电阻呈下降趋势, 下降幅度在 1 个数量级 ($10^4 \Omega \cdot \text{cm}$) 以内。导致这一现象发生的原因是飞灰的高电阻特性, 同时与燃前煤种和飞灰的物化性质密切相关。

关 键 词: 燃煤飞灰; 介电性质; 比电阻; 电除尘器

中图分类号: TK229.6 文献标识码: A

1 前 言

国家最新颁布的《火电厂污染物排放标准》将火电厂烟尘的最低排放浓度从 $200 \text{ mg}/\text{m}^3$ 提高到了 $50 \text{ mg}/\text{m}^3$, 不仅使国内长期、普遍应用的电除尘器面临一次严峻的考验, 也为电除尘技术的深入研究提供了机遇。电除尘器的长期运行实践表明, 对于飞灰颗粒, 尤其 $5 \mu\text{m}$ 以下的微细颗粒能否被收集, 主要取决于以下 4 个环节: (1) 飞灰颗粒在电晕电场中能否充分荷电; (2) 荷电后的颗粒能否被收尘极板成功捕集; (3) 收尘极板表面灰层的反电晕能否得到有效抑制; (4) 极板上飞灰能否被理想清落。所谓“充分荷电”是指进入电除尘器的颗粒具有足够高的荷电率和荷电量, 这是颗粒获得向收尘极板快速迁移能量的必须条件; “成功捕集”是指迁移到极板表面的颗粒不至因比电阻过低而失去电场粘附力, 造成重返气流现象; “有效抑制反电晕”是指极板表面的颗粒不至因比电阻过高而使灰层发生反向放电, 造成飞灰重返气流; “理想清灰”是指极板上的飞灰以块状或片状脱离极板, 借助重力落入灰斗, 最大限度地降低二次扬尘。这里, 不论悬浮颗粒的“荷电”、“迁

移”过程, 还是极板沉积灰层的“反电晕”和“清灰”, 都与飞灰的介电性质密切相关。

2 实验材料与方法

2.1 实验灰样

实验灰样分别采集自国内北方地区 7 家燃煤电厂的电除尘器入口:

灰样 a: 山西大同电厂飞灰; 灰样 b: 北京某热电厂飞灰; 灰样 c: 北京某发电厂飞灰; 灰样 d: 晋北神头电厂飞灰; 灰样 e: 河北保定电厂飞灰; 灰样 f: 晋南漳泽电厂飞灰; 灰样 g: 河南某电厂飞灰; 灰样 h: 晋中阳泉电厂飞灰。

2.2 实验装置

图 1 所示的飞灰伏安特性检测系统由作者自行研制开发(发明专利)^[1]。该装置由调温式高压电极箱、负直流高压电源和电流、电压及温度测控系统组成。电极箱内安装有圆盘型测量电极和温度传感器; 飞灰试样填装在圆盘电极内; 高压电源产生的负直流高压施加在圆盘电极内的灰样上。根据所施加的电压和灰层的漏泄电流, 即得到该灰样的伏安特性曲线。

3 实验结果与分析

3.1 燃煤飞灰的“电压—比电阻”特性和“电压—电流”特性实验结果

表 1 给出了国内部分燃煤电厂飞灰的比电阻、漏泄电流随电压的变化关系。

3.2 分 析

表 1 显示, 随着施加电压的增高, 通过灰层的漏泄电流呈持续上升趋势, 不过其伏安特性曲线 ($V-I$) 并非呈线性分布, 这一现象显然有别于一般密质

性物质所遵循的欧姆定律。

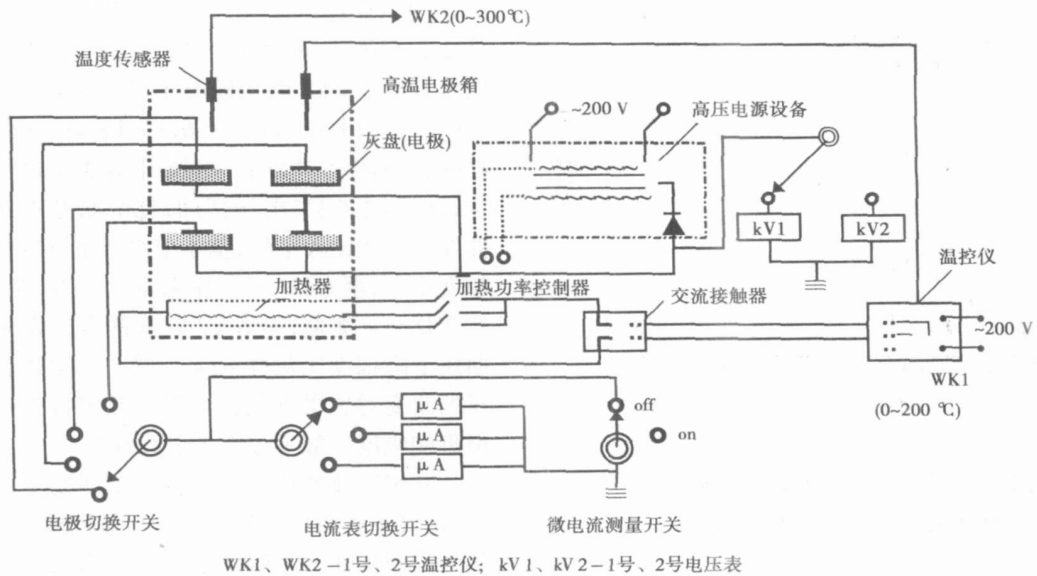


图 1 灰伏安特性试验系统原理图

表 1 国内部分燃煤电厂飞灰在不同电压下的电阻、电流的变化

灰样	介电参数	测量电压/kV								击穿电压/kV
		1	2	3	4	5	6	7	8	
a	比电阻/ $\Omega \cdot \text{cm}$	5.4×10^9	5.4×10^9	5.6×10^9	4.7×10^9	3.8×10^9	—	—	—	5.8
	漏泄电流/ $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.74	1.50	2.13	3.4	5.2	—	—	—	
b	比电阻/ $\Omega \cdot \text{cm}$	4.0×10^{10}	3.7×10^{10}	3.2×10^{10}	3.0×10^{10}	3.1×10^{10}	3.0×10^{10}	2.6×10^{10}	2.6×10^{10}	8.5
	漏泄电流/ $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.08	0.22	0.37	0.53	0.64	0.80	1.06	1.22	
c	比电阻/ $\Omega \cdot \text{cm}$	1.6×10^{12}	1.7×10^{12}	1.3×10^{12}	9.4×10^{11}	7.8×10^{11}	9.2×10^{11}	8.3×10^{11}	6.1×10^{11}	8.3
	漏泄电流/ $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.002 4	0.004 8	0.009 5	0.017	0.026	0.035	0.043	0.061	
d	比电阻/ $\Omega \cdot \text{cm}$	4.7×10^{10}	3.75×10^{10}	3.9×10^{10}	3.0×10^{10}	3.1×10^{10}	2.8×10^{10}	2.6×10^{10}	1.6×10^{10}	9.0
	漏泄电流/ $\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$	0.043	0.106	0.155	0.266	0.320	0.426	0.533	0.855	

根据经典的欧姆定律, 一个物体的电阻 R 与施加在物体两端的电压 V 和流经物体的电流 I 存在确定不变的关系, 即 $R = V/I$ 。根据这一定律, 当外加电压提高时, 流经物体的电流也将成比例的增大, 而测量出的阻值仍为常数 R 。通常意义上的“电阻”只是一个推导参量, 对物质施加不同大小的电压 (V), 将测出一系列不同的电流值 (I)。欧姆定律 $R = V/I$ 描述了这样一种现象: V 变化, I 也变化, 但 V 与 I 之比始终是一个常数, 即 $V/I = C$ 。这个常数值就被定义为电阻值 R 。这就是说, 如果对一个 $1 \text{ k}\Omega$ 的电介质施加 10 V 电压, 流过它的电流必为 10 mA (10

$V/10 \text{ mA} = 1 \text{ k}\Omega$); 而对它施加 5 V 电压, 电流必为 5 mA ($5 \text{ V}/5 \text{ mA} = 1 \text{ k}\Omega$), 比值总是常数 $1 \text{ k}\Omega$ 。

上述实验数据表明, 燃煤飞灰的伏安特性并不完全遵循欧姆定律。以灰样 b 为例 (见图 2), 在 1 kV 条件下测出电流为 $8.0 \times 10^{-2} \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 比电阻 $\rho = 4.0 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 。而在 0.5 kV 条件下测出的电流不是 $4.0 \times 10^{-2} \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 而是 $3.2 \times 10^{-2} \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 其比电阻 $\rho = 6.2 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 。这里 V/I 不再是常数。

问题不仅仅限于此。仔细观察上述各条曲线, 不难发现一个共同特征, 即每条曲线由不同斜率的 3 条线段组成:

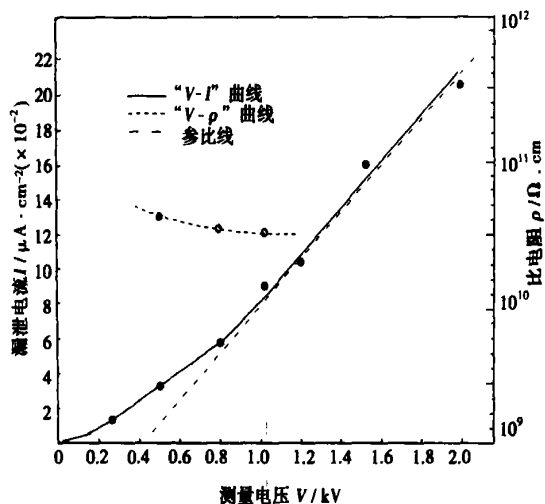


图 2 灰样 b 在低电压段的“电压—漏泄电流”(V-I)实验曲线

- (1) 曲线的中部线段,“V-I”变化较平缓,接近于线性分布规律;
- (2) 曲线的高电压段,漏泄电流的增幅随电压升高而加大,直至击穿。越临近击穿点,“V-I”曲线的斜率越大;
- (3) 在低电压段,“V-I”曲线的斜率与中部曲线明显不同,或大或小,但多数飞灰的“V-I”曲线斜率小于中部直线段。

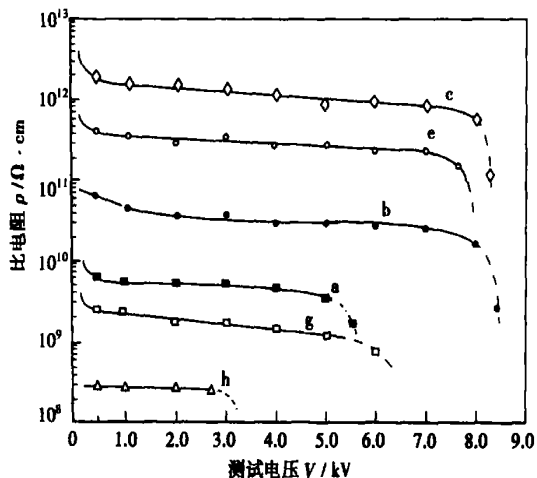


图 3 部分燃煤电厂飞灰的“电压—比电阻”(V-ρ)实验曲线

图 3 给出了不同电压下燃煤飞灰的比电阻变化曲线。曲线显示,随着测量电压的上升,飞灰的比电

阻并不都是沿水平线延伸,而是呈下降趋势。以曲线 g 为例,当电压升至 5 kV 时,比电阻发生陡降,至 6 kV 时灰样被击穿,在 1~5 kV 电压区间,比电阻 ρ 从 $2.2 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 降至 $1.2 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$; 曲线 c 显示:电压升至 8.0 kV 时灰样击穿,在 1~8 kV 电压区间, ρ 从 $1.6 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 降至 $6.1 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$; 曲线 h: 灰样的比电阻相对较低,电压升至 3.0 kV 时发生击穿,在 1~2.6 kV 电压区间,比电阻基本保持平稳; 曲线 e 变化比较平稳,基本成直线下下降规律,但下降幅度不大,至 6 kV 时灰样未发生击穿; 灰样 c 的曲线变化与 e 类似,至 6 kV 时灰样也未发生击穿,但曲线下下降幅度比灰样 e 大一些。总得来看,测试电压的改变对燃煤飞灰比电阻的测定数据一定影响,但影响幅度一般不大于 1 个数量级。

欧姆定律的科学性不容置疑,问题缘于两方面: (1) 燃煤飞灰的高电阻属性。在高阻材料领域,除了某些按照特殊工艺制造的标准电阻元件之外,绝大部分天然和人工材料并不存在一个确定不变的阻值。当外加电压升高或降低时,通过物体的电流并不一定成比例地增大或减小。也就是说,高阻物质的电气性质并不完全遵从欧姆定律^[2-3]。实验表明,绝大多数燃煤飞灰都属于这类物质; (2) 燃煤飞灰的非密质属性。燃煤飞灰是大量细小颗粒的聚集体,具有很宽的分散性,而且由于构成颗粒本身物质的化学成份和矿物成份非常复杂,因此具有多质性。在烟气工况下或室内条件下,颗粒表面及其内部所吸附的物质其还具有多相性(固、气、液)。电压的改变必然会对电流的传导方式(如表面导电或容积导电)及传导机理(如电子导电或离子导电)产生影响。因此燃煤飞灰的比电阻并不总是常数,比电阻越高,其电流、电压之间的线性关系就越差。

上述实验曲线的中部直线段是“V-I”曲线的主体部分,此线段的长短与飞灰的物化性质有关。灰中的二氧化硅和三氧化二铁含量高,且氧化钾、氧化钠和三氧化硫低时,灰的击穿电压灰会很高。根据实际测量,国内燃煤电厂 80% 飞灰的击穿电压分布在 1~6 kV 之间,少数灰种低于 1 kV 或高于 6 kV,个别灰种的击穿电压高达 10 kV。对于这样的灰种,其伏安特性曲线中的直线段会很长。当然也有相反的情况,灰的伏安特性曲线很短,这种情况通常发生在灰的含碳量较高,且燃用煤种的煤化程度也较高时。比如:当燃用可燃基挥发份 $V^r < 10$ 的烟煤时,如果灰的含碳量达到 10% 以上,其击穿电压就会低于 1 kV,有的甚至会低至 0.1 kV 以下^[4]。这

种情况下伏安特性曲线几乎不存在直线段。

图 3 曲线还显示, 随着电压的升高, 飞灰的比电阻呈下降趋势, 下降幅度在一个数量级以内 ($10^1 \Omega \cdot \text{cm}$)。这表明, 燃煤飞灰的比电阻并非非常量。这一特性与其它物质, 尤其是密质性物质有所不同, 后者仅在接近电击穿时, 比电阻才会发生明显改变。因此, 在给出飞灰的比电阻数据时, 应同时说明测量电压值。电压对飞灰比电阻影响规律的研究具有实际的应用意义。比如: 电除尘器内高压电场的变化必然影响到收尘极板表面集灰层的比电阻特性, 这一点应引起电除尘器设计和运行工程技术人员的充分注意。

4 结 论

(1) 与一般的密质性材料不同, 燃煤电厂飞灰的比电阻特性不完全遵循经典的欧姆定律;

(2) 燃煤电厂飞灰的伏安特性曲线在不同的电压下伏安特性曲线具有不同的特征。在大约 1 kV 以下, 电流密度随施加电压的增大缓慢上升, 此阶段

的伏安特性曲线斜率一般较小; 随着施加电压的进一步升高, 伏安特性曲线逐渐演变为一条近似直线, 这一直线段通常构成飞灰整条曲线的主体, 其长度与飞灰的击穿电压有关, 击穿电压越高, 直线段越长; 在飞灰临近击穿前的某个阶段, 伏安特性曲线斜率开始急剧增大, 直至灰样击穿;

(3) 燃煤飞灰的比电阻不是一个常量, 随着电压的升高, 其比电阻呈下降趋势, 下降幅度通常在一个数量级以内 ($10^1 \Omega \cdot \text{cm}$)。

参考文献:

- [1] 原永涛, 雷应奇. DR 型高压粉尘比电阻试验台的研制与应用 [J]. 中国环境科学, 1998(5): 368-370.
- [2] 原永涛, 林国鑫. 火力发电厂电除尘技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] 清华大学, 西安交通大学. 高电压绝缘 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1980.
- [4] 原永涛. 不同煤化程度煤种对飞灰导电特性影响的实验研究 [J]. 中国环境科学, 1997(5): 458-461.

(何静芳 编辑)

新 设计

改进的大功率船用减速齿轮箱

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2005 年 11 月号报道, 在最近几年 KHI (日本川崎重工) 已研制了用于汽轮机装置驱动的 LNG (液化天然气) 运输船的 UA400/90 型、UA420/80-S 型和 UA500/84-S 型齿轮箱。这些齿轮箱传递功率分别为 29 400、30 900 和 36 800 kW。它们包含了用于减少质量和尺寸, 并增加可靠性、性能的高强度、轻质量材料。

应用先进的设计、材料和机加工技术, 1997 年研制出的 UA400/90 型减速齿轮箱能以 90 r/min 的转速传递 29 400 kW 功率。与前期相当功率级齿轮箱比较, UA400/90 的质量减少 20%, 外部尺寸减少 30%。该齿轮箱总的质量为 130 t, 尺寸为 7 400 mm (宽) × 5 300 mm (高) × 5 600 mm (长)。

2001 年研制出的 UA420/80-S 型减速齿轮箱能以 80 r/min 的转速传递 30 900 kW 功率, 可用于大型 LNG 运输船。它的尺寸为 8 400 mm (宽) × 5 700 mm (高) × 5 900 mm (长)。

2004 年研制出的 UA500/84-S 型减速齿轮箱能以 84 r/min 转速传递 36 800 kW 功率, 可用于超大型 LNG 运输船的大型汽轮机动力装置。

减少尺寸并增加了可靠性的新 UA 型减速齿轮箱的大齿轮轮缘和小齿轮使用了新材料, 以便减少其尺寸并增加疲劳强度。采用的新材料是 Ni-Cr-Mo-V 钢, 它的硬度比原使用的材料增加 30%。

(吉桂明 供稿)

Key words: natural gas, small-scale combustion, combustion characteristics, heat conduction

飞灰回燃对燃烧福建无烟煤 CFB 锅炉运行影响的研究 = **An Investigation of the Impact of Fly-ash Reburning on the Operation of an Anthracite-firing CFB (Circulating Fluidized Bed) Boiler** [刊, 汉] / HE Hong-zhou (Institute of Energy and Power Engineering under the Jimei University, Xiamen, China, Post Code: 361021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 53 ~ 57

The reactivity of fly-ash carbon and that of other coals fed into a boiler was investigated and compared through experiments with the help of a thermobalance. A theoretical analysis was conducted of the impact of fly-ash reburning on the combustion efficiency of a CFB (circulating fluidized bed) boiler. Moreover, by way of industrial tests investigated and measured was the impact of the fly-ash quantity recycled for reburning on the following items: the operating temperature of a recycle-to-boiler device, fly-ash particle distribution and its carbon content, boiler combustion efficiency and other operating parameters. The results of the investigation indicate that the reactivity of fly-ash carbon of the CFB boiler burning Fujian anthracite is higher than that of other corresponding coals fed into the boiler. In addition, other parameters, such as carbon content of the reburnt fly ash, the ratio of the reburnt fly ash amount to other coals fed into the boiler, have a major influence on the combustion efficiency of the boiler. The use of fly-ash reburning technology will be conducive to reducing the carbon content of the fly ash and the operating temperature of recycle-for reburning device as well as enhancing the combustion efficiency of the boiler. However, a relatively large amount of fly ash assigned for reburning will affect the stable operation of the boiler. **Key words:** Fujian anthracite, circulating fluidized bed boiler, fly ash, reburning

燃煤飞灰伏安特性的实验研究 = **Experimental Study of the Volt-ampere Characteristics of Fly Ash Resulting from Coal Firing** [刊, 汉] / YUAN Yong-tao, QI Li-qiang (Institute of Environmental Science & Engineering under the North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 58 ~ 61

The dielectric character of fly ash is a major factor having an impact on the efficiency of electrostatic precipitators. By employing a self-developed direct-current high voltage test system the current leakage and specific resistance of the fly ash of various kinds of coal being fired were measured and analyzed, and a series of volt-ampere characteristic curves obtained. It has been found that the relation among the following three items, i. e., the voltage applied to the ash layer, the current leakage through the ash layer and fly-ash specific resistance, does not always conform to the classic Ohm's law, namely, $V/I \neq \text{constant}$. At the three segments of high, middle and low voltage the volt-ampere characteristic curves of the fly ash have different configuration features. With an increase in voltage the specific resistance of the fly ash assumes a descending tendency with the range of descending amount being within one order of magnitude ($10^1 \Omega \cdot \text{cm}$). The cause leading to the occurrence of this phenomenon consists in the high-resistance feature of the fly ash. Meanwhile, this is also closely related with the physical-chemical properties of the coal rank and fly ash. **Key words:** fly ash of coal fired, dielectric properties, specific resistance, electrostatic precipitator

考虑两相流音速时气固两相流激波研究 = **A Study of Two-phase Shock Waves with a Two-phase Flow Sonic Velocity being Taken into Account** [刊, 汉] / ZHAO Liang-ju, GAO Li-juan, YUAN Yue-xiang, et al (Institute of Power Engineering under the Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 62 ~ 65, 69

On the basis of a two-phase flow sonic velocity a gas-solid two-phase flow shock-wave model was set up, and calculations and analyses were performed. When compared with the calculation results of a shock wave model based on a single-phase flow sonic velocity it has been found that in the case of a relatively large gas-phase volume the sonic velocity difference as calculated by using the above two kinds of models is relatively small and the shock wave results for the two models are in good agreement. When the gas phase volume is relatively small, the sonic velocity value calculated through the use of the two-phase sonic velocity model is in better correspondence with the actual value, resulting in more rational shock wave re-