

DOI: 10.19666/j.rlfed.202403024

飞灰粒径对金属波导内 飞灰含碳量测量影响

姚启航¹, 牛玉广¹, 杜鸣¹, 崔召飞¹, 王一男²

(1.华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

2.国电建设内蒙古能源有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017209)

[摘要] 微波衰减法是近年来在线测量粉煤灰含碳量的常见方法之一。然而, 由于飞灰的取样位置及取样装置的差异, 飞灰的粒径大小存在较大的不确定性, 从而造成飞灰含碳量测量的误差较大。现有的含碳量拟合模型均以飞灰对特征频率信号的衰减与飞灰含碳量的关系为基础, 存在着误差大、适应性差等问题。为了解决含碳量拟合模型误差大和适应性差等问题, 提出使用信号的时域主峰衰减来代替信号在特征频率处的衰减作为飞灰含碳量在线拟合的优化方法。为了修正飞灰粒径不确定性引起的误差, 在研究灰位和含碳量测量的基础上, 比较了不同粒径范围的飞灰对灰位和飞灰含碳量测量的影响。结果表明: 采用信号的时域峰值衰减来计算含碳量, 其结果与实际值吻合良好; 对于波导中相同质量的灰样, 飞灰的粒径大小对灰位的测量精度没有显著的影响; 当使用微波法测量波导内飞灰含碳量时, 对于相同质量的灰样, 随着飞灰粒径的减小, 波导内飞灰对微波信号的衰减逐渐减小, 从而使含碳量的测量值随着飞灰粒径的减小而增加。

[关键词] 粒径; 飞灰; 金属波导; 含碳量; 灰位

[引用本文格式] 姚启航, 牛玉广, 杜鸣, 等. 飞灰粒径对金属波导内飞灰含碳量测量影响[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 114-121. YAO Qihang, NIU Yuguang, DU Ming, et al. Effect of fly ash particle size on fly ash carbon content measurement in metal waveguides[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 114-121.

Effect of fly ash particle size on fly ash carbon content measurement in metal waveguides

YAO Qihang¹, NIU Yuguang¹, DU Ming¹, CUI Zhaofei¹, WANG Yinan²

(1.School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2.Guodian Construction Inner Mongolia Energy Co., Ordos 017209, China)

Abstract: The microwave attenuation method is one of the common methods for online measurement of carbon content in fly ash in recent years. However, due to the differences in sampling locations and sampling devices of the fly ash, there is a large uncertainty in particle size of the fly ash, which results in a large error in the measurement of carbon content in fly ash. The existing carbon content fitting models are all based on the relationship between the attenuation of the characteristic frequency signal by fly ash and the carbon content of fly ash, which has problems such as large error and poor adaptability. In order to solve these problems, this paper proposes to use the time-domain main peak attenuation of the signal instead of the attenuation of the signal at the eigenfrequency as a method for online fitting of the carbon content in fly ash. To correct the error caused by the uncertainty of fly ash particle size, the effects of fly ash with different particle size ranges on the measurement of ash level and fly ash carbon content are compared on the basis of the study on ash level and carbon content measurement. The results show that, the peak attenuation of the signal in the time domain is used to calculate the carbon content, and the results are in good agreement with the actual values. For the same mass of ash samples in the waveguide, the particle size of the fly ash does not have any significant effect on the measurement accuracy of the ash level. When the microwave method is applied to measure the carbon content in the fly ash in the

收稿日期: 2024-03-01

第一作者简介: 姚启航 (2001), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为发电过程状态检测与优化控制, yqhbeijing@163.com.

通信作者简介: 牛玉广 (1964), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为发电过程状态检测与优化控制, 18345818840@163.com.

waveguide, for the same mass of ash samples, the attenuation of the fly ash on the microwave signal inside the waveguide decreases gradually with the particle size of the fly ash. Thus, the measured value of carbon content increases as the particle size of the fly ash decreases.

Key words: particle size; fly ash; metal waveguide; carbon content; ash level

飞灰中含碳量对监控锅炉的燃烧稳定性具有重要意义。含碳量越高, 固态不完全燃烧的热量损耗也会越大^[1-6], 锅炉也易发生结焦、爆管, 对环保也越不利^[7-10]。

国内外学者对飞灰的特性进行了研究。Zhang 等人^[11]研究了灰位截面对波导内灰位和含碳量测量的影响。苏新凯等^[12]通过能谱和 X 射线衍射等分析手段, 对飞灰的烧失特性进行了研究。景博^[13]发现, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 和 MgO 对微波衰减有很大影响。鲁许鳌等^[14]研究了掺烧稻壳对飞灰特性的影响。李惠茹等^[15]研究了粒径对飞灰的比电阻和介电损耗的影响。龚彬等^[16]通过扫描电镜和气相色谱质谱联用等分析手段, 对飞灰的成分进行了研究。付玉存^[17]指出微波的幅值衰减和相移与飞灰含碳量存在着确定的对应关系。郭沂权等^[18]讨论了烟道内飞灰的粒径范围。蒋啸等^[19]讨论了锅炉飞灰含碳量的非线性特性。

波导内测量飞灰含碳量的原理^[20-23]是通过测量标准灰样对微波信号的幅值衰减, 并对幅值衰减和标准灰样含碳量进行拟合, 通过矢量网络分析仪测量待测灰样的幅值衰减, 根据幅值衰减和拟合曲线来计算含碳量。刘含笑等^[23]分析了飞灰粒径的几何分布。然而, 以往并未考虑到不同粒径条件对波导中飞灰含碳量测量和灰位测量的影响。

为了明确这一现象对结果的影响, 设计了一种测试验证方法。首先, 在灰位测量研究的基础上^[24], 对不同粒度区间的飞灰灰位进行测量, 讨论粒径对波导中灰位测量的影响。相较于传统的特征频率拟合模型, 本文提出使用时域主峰衰减拟合代替特征频率拟合的方法。通过对不同标准灰样进行测量, 验证了方法的准确性; 然后, 分别对灰样 A 和灰样 B 进行含碳量拟合, 建立了相应的数学模型。在此基础上, 通过对不同粒度区间飞灰中碳含量的测定, 探讨了粒度大小对波导中碳含量测定的影响; 最后得出了不同粒度区间对波导内飞灰测量影响的结论。

1 测量原理

1.1 测量系统组成

测量系统主要由矢量网络分析仪、同轴线、金

属波导、上下隔离片、同轴转换器组成。测量系统如图 1 所示。

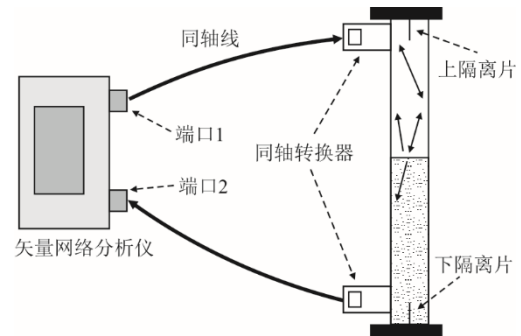


图 1 测量系统

Fig.1 Schematic diagram of the measurement system

1.2 微波在波导中的传输

波导可以看作是一个双端口网络, 具体如图 2 所示。端口 1 和端口 2 处的输入波分别表示为 a_1 和 a_2 , 而输出波分别表示为 b_1 和 b_2 。输入波 a 和输出波 b 之间的关系通常可以用散射参数 S 来描述:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$



图 2 双端口网络示意

Fig.2 Schematic diagram of a two-port network

对于散射参数 S_{ij} , 当 $a_i=0$ ($i \neq j$) 时, 可以由式(2)求得。式(2)表明当端口 j 连接到信号源并且端口 i 连接到匹配负载时, 端口 j 处的反射系数等于 S_{ij} 。

$$S_{ij} = \frac{b_i}{a_j} \quad (2)$$

微波在波导中遇到不同介质界面时的反射和透射规律, 可用式(3)和式(4)进行解释。

$$\Gamma_1 = \frac{Z_F - Z_A}{Z_F + Z_A} \quad (3)$$

$$\Gamma_2 = \frac{Z_p - Z_1}{Z_p + Z_1} \quad (4)$$

式中: Γ_1 为空气-飞灰界面反射系数; Z_A 为空气填充波导阻抗; Z_F 为飞灰填充波导阻抗; Γ_2 为飞灰-

隔离片界面反射系数; Z_P 为短路板阻抗。

由于短路板的阻抗 Z_P 为 0, 因此 $\Gamma_2 = -1$, 这意味着电磁波在遇到短路板时将被完全反射。

端口 1 的信号通过同轴转换器 1 进入波导管。信号在波导中传播时, 由于空气与飞灰交界处的阻抗不匹配, 部分信号通过同轴转换器 1 返回到端口 1, 而另一部分信号通过同轴转换器 2 返回到端口 2。上、下隔离片的作用是确保信号仅在上、下隔离片间传输。通过对端口 1 处的发射信号以及波导的反射信号进行测量, 从而实现参数 S_{11} 的测量; 通过对端口 1 处的发射信号以及端口 2 的透射信号进行测量, 从而实现参数 S_{21} 的测量。波导中的微波传播如图 3 所示。

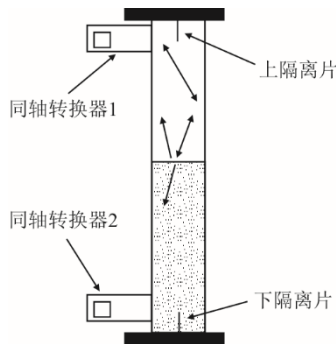


图 3 波导中微波传播

Fig.3 Schematic diagram of microwave propagation in a waveguide

1.3 灰位测量原理

参数 S 测量灰位是根据信号在阻抗失配的部位产生反射这一基本原理而实现的。将参数 S 的频率响应转化为时间域, 能够准确反映出系统中阻抗不匹配的位置。时域测量原理如图 4 所示。其中, 峰值 1 为同轴线和同轴转换器的阻抗失配引起的反射, 峰值 2 为上隔离片的反射位置, 峰值 3 为飞灰和空气界面的反射位置。

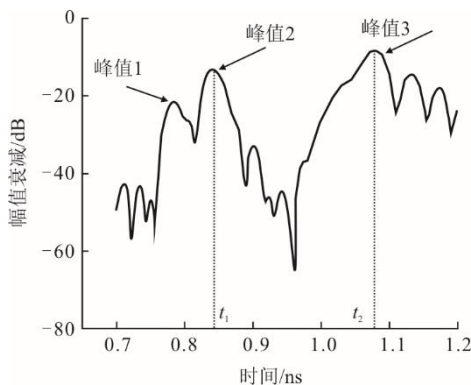


图 4 时域测量原理

Fig.4 Schematic diagram of time-domain measurements

为计算微波在波导中的传播速度, 使用矢量网络分析仪测量空波导的 S_{11} 参数。根据波导的上、下隔离片反射时间计算微波传播速度。微波传播速度计算公式为:

$$v = \frac{2 \cdot L}{(t_3 - t_1)} \quad (5)$$

式中: v 为微波在波导中的传播速度; L 为波导内上下隔离片的距离; t_3 为微波从端口 1 到达下隔离片并返回端口 1 所花费的时间; t_1 为微波从端口 1 到达上隔离片并返回端口 1 所花费的时间。

为计算波导中的飞灰高度, 仅需要测量微波在空气和飞灰介质在波导中的传播时间。然后, 根据式(5)得到灰位值。灰位计算公式为:

$$h = L - \frac{v \cdot (t_2 - t_1)}{2} \quad (6)$$

式中: h 为待测灰位; t_2 为微波从端口 1 到达空气-飞灰界面并返回端口 1 所花费的时间。

1.4 飞灰含碳量测量原理

飞灰的主要成分为二氧化硅、未燃尽的碳颗粒及金属氧化物。当微波在飞灰介质中传输时, 飞灰的存在会使信号的能量发生衰减。

本文提出使用 S_{21} 参数的时域主峰衰减来代替特征频率衰减。具体做法是将矢量网络分析仪的测量结果进行时域变换, 读取时域最大值。使用矢量网络分析仪测量相同质量、不同含碳量的灰样对微波信号的时域主峰衰减, 并根据灰样含碳量计算含碳量数学模型。根据待测灰样对微波信号的时域主峰衰减和含碳量数学模型来计算含碳量。

2 灰样的制备与实验方法

2.1 灰样的制备

本实验将 2 个电厂的灰样分别标记为灰样 A 和灰样 B。对灰样 A、B 进行脱碳, 将灰样 A 与灰样 B 放入坩锅内, 用 800 °C 马弗炉灼烧 8 h 以上。使用筛孔尺寸为 150、100、75、63 μm 的实验筛从上而下对脱碳后的灰样进行筛分, 将灰样 A 和灰样 B 分别筛分为 $\geq 150 \mu\text{m}$ 、100~150 μm、75~100 μm、63~75 μm、 $\leq 63 \mu\text{m}$ 5 个粒径范围, 并分别标记为 A1、A2、A3、A4、A5 和 B1、B2、B3、B4、B5。

将石墨粉末添加到未经筛分的零灰 A 及零灰 B 中, 并将其配置为碳含量(质量分数, 下同) 0%、

0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0% 的标准灰样品。将石墨粉末添加到具有不同粒度范围的零灰中，并将其配置为碳含量为 1.5% 的待测灰样。

2.2 实验方法

为满足飞灰测量实时性，通过取样装置将烟道内飞灰取到波导中，通过对同质量不同含碳量的多组灰样进行拟合，计算飞灰含碳量与特征频率下微波幅值衰减关系的数学模型，根据数学模型计算飞灰含碳量。飞灰含碳量的数学模型是建立在飞灰整个粒径范围上的。然而，不同粒径条件对波导中飞灰含碳量测量和灰位测量的影响以前没有考虑。

实验分 3 个部分进行，其一是测量不同粒径范围下的灰位；其次是验证主峰衰减拟合模型的准确性；最后测量不同粒径范围下的飞灰含碳量。

1) 对不同粒径范围的飞灰进行测量，将具有不同粒度范围的灰样 A 和灰样 B 分别添加到波导中，比较系统测量值与灰位实际值之间的偏差。

2) 验证主峰衰减拟合模型的准确性，采用矢量网络分析仪，对含碳量为 0%、1.0%、2.0%、3.0% 的标准灰 A 及标准灰 B 进行了标定，对含碳量为 0.5%、1.5%、2.5% 的标准灰样 A 和标准灰样 B 进行测量，并将实测结果与实际值进行对比。

3) 测量在不同粒度范围内的灰样 A 与灰样 B 的碳含量，对不同粒度、含碳量为 1.5% 的灰样 A、灰样 B 进行微波时域主峰衰减的测量，并根据拟合曲线计算含碳量，并将实测结果与实际值进行对比。

3 数据分析

3.1 灰位测量数据分析

将质量为 30 g 的不同粒度范围的灰样 A 与灰样 B 放入波导中，测量结果如图 5、图 6 所示。结果表明，在同一质量条件下，空气-飞灰界面的反射时间随飞灰粒度的降低而增大。这主要是因为飞灰粒径越小，颗粒间的间隙越小，导致飞灰的灰位越低。

为了测定在不同粒度范围内的灰样 A 及灰样 B 的实际灰位，将质量为 30 g 具有不同粒度范围的灰样 A 及灰样 B 添加到与波导内直径尺寸相同的容器中，分别对其灰位进行测量。系统测量结果和灰位实际值如表 1 所示。由表 1 可以看出，

在波导管中，微波法测量灰位的误差与飞灰粒径大小没有相关性，故粒径大小对灰位的测量精度没有显著的影响。

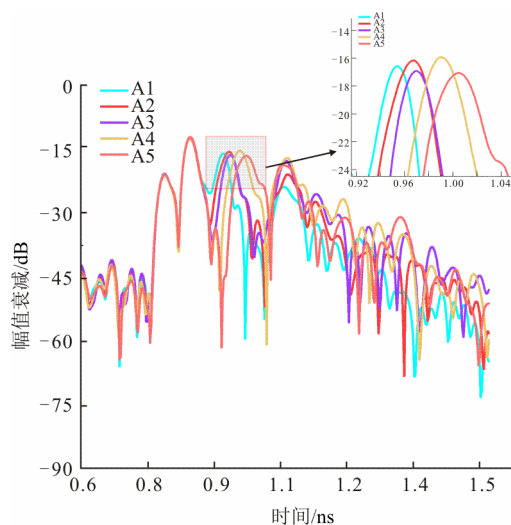


图 5 30 g 不同粒度灰样 A 时域测量结果
Fig.5 Time domain measurement results for 30 g ash sample A with different particle sizes

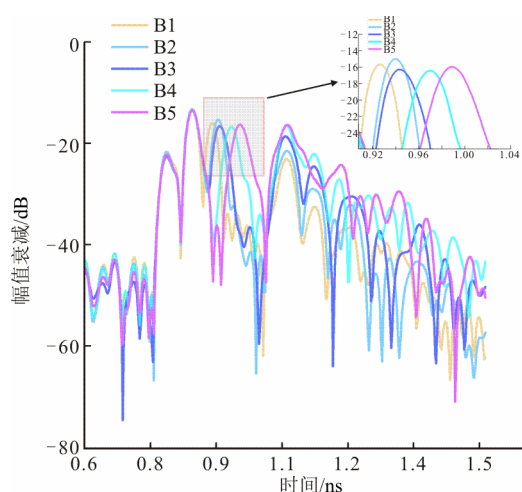


图 6 30 g 不同粒度灰样 B 时域测量结果
Fig.6 Time domain measurement results for 30 g ash sample B with different particle sizes

表 1 灰位测量结果
Tab.1 Measurement results of ash level

粒径/ μm	灰样 A 灰位/cm			灰样 B 灰位/cm		
	实际值	测量值	误差	实际值	测量值	误差
≥150	15.00	14.74	0.26	15.50	15.75	0.25
100~150	14.30	13.85	0.45	14.30	14.13	0.17
75~100	13.60	13.15	0.45	14.00	14.45	0.45
63~75	11.80	12.14	0.34	12.10	11.80	0.30
≤63	10.70	11.10	0.40	10.60	10.92	0.32

3.2 飞灰粒径分布

用实验筛对灰样 A 和灰样 B 进行了筛选，并将

其划分为 5 个粒度区间。将各种粒度的灰分别称量，并对其所占比例进行对比，结果如图 7 所示。灰样 A 主要是由粒径范围在 75~150 μm 的飞灰颗粒组成，灰样 B 主要是由粒径范围在 63~100 μm 的飞灰颗粒组成。

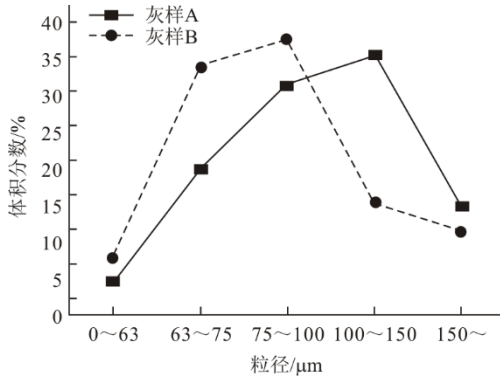


图 7 灰样粒径分布
Fig.7 Particle size distribution of the ash sample

3.3 含碳量拟合模型

3.3.1 特征频率拟合模型

传统含碳量拟合模型是以不同含碳量灰样品为基础，以灰样含碳量和特征频率的幅值衰减来拟合灰样。这种模型有 2 点不足，其一是需要根据灰样来选择拟合较好的特征频率，其次是碳含量的计算存在较大的误差。

将矢量网络分析仪的扫描点数设为 801 点，扫描频段设为 9.6~14 GHz。本文选取 10.205、10.403、10.601 GHz 的频点作为特征频点（表 2）。在不同频点下，对含碳量为 0%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0% 的标准灰样进行拟合。使用可决系数 R^2 评价灰样的拟合程度，不同频点下的灰样拟合结果如图 8、图 9 所示。由表 2 可知，灰样在不同频点下的拟合优度差异较大。对于不同灰样，相同频点下的拟合优度也有较大差异。为了更好地计算含碳量，需要选择拟合优度较好的特征频点。

可决系数是用来说明因变量变化可靠程度的一个统计指标，可以用式(7)进行解释。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^5 (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^5 (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

式中： R^2 为可决系数； y_i 为待拟合的样本点； \bar{y} 为样本点的平均值； \hat{y}_i 为样本点的拟合值。

表 2 不同特征频点的灰样拟合结果
Tab.2 Fitting results of ash sample with different feature frequencies

频率/GHz	灰样 A 拟合优度	灰样 B 拟合优度
10.205	0.822 1	0.606 7
10.403	0.612 8	0.809 4
10.601	0.042 0	0.203 4

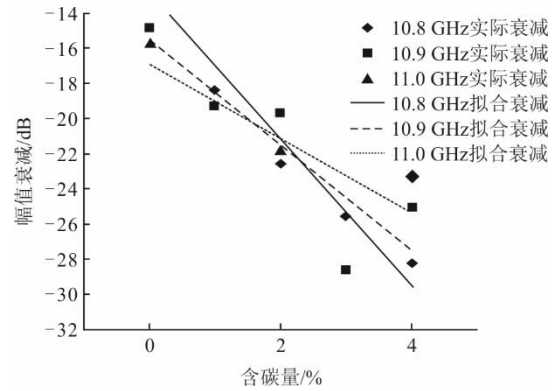


图 8 特征频率法下的灰样 A 拟合结果
Fig.8 Fitting results of ash sample A by eigenfrequency method

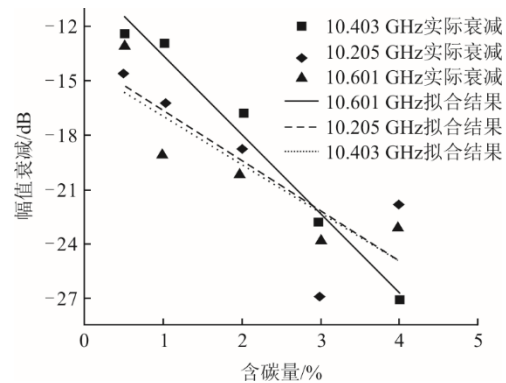


图 9 特征频率法下的灰样 B 拟合结果
Fig.9 Fitting results of ash sample B by eigenfrequency method

由于灰样 A 的含碳量拟合结果在 10.205 GHz 较好，选取 10.205 GHz 作为灰样 A 的特征频率。由于灰样 B 的含碳量拟合结果在 10.403 GHz 较好，选取 10.403 GHz 作为灰样 B 的特征频率。在特征频率下，使用矢量网络分析仪测量含碳量为 0.5%、1.5%、2.5% 的灰样 A 和灰样 B 对微波信号的幅值衰减，并根据数学模型分别对含碳量为 0.5%、1.5%、2.5% 的灰样 A 和灰样 B 进行含碳量计算。含碳量计算结果见表 3。由表 3 可知，使用特征频率法计算飞灰含碳量误差较大。式(8)和式(9)分别是灰样 A 和灰样 B 在特征频率下的计算模型。

$$u_c = -0.202 3 \cdot DB_{10.205} - 1.700 7 \quad (8)$$

$$u_c = -0.207 5 \cdot DB_{10.403} - 1.974 4 \quad (9)$$

式中： u_c 为飞灰拟合含碳量； $DB_{10.205}$ 为 10.205 GHz 频率下，灰样品 A 对微波信号的幅值衰减； $DB_{10.403}$

为 10.403 GHz 频率下，灰样品 B 对微波信号的幅值衰减。

表 3 特征频率法含碳量测量结果
Tab.3 Measurement results of carbon content by eigenfrequency method

标准灰含碳量/%	灰样 A 含碳量/%		灰样 B 含碳量/%	
	测量值	误差	测量值	误差
0.5	1.270 6	0.770 6	0.962 8	0.496 3
1.5	1.245 2	0.254 8	1.960 3	0.460 3
2.5	2.813 4	0.313 4	3.045 4	0.545 4

3.3.2 时域峰值拟合模型

本文提出使用时域主峰衰减和灰样含碳量来拟合灰样。对不同含碳量的灰样 A 和灰样 B 进行 S_{21} 参数测量，将 S_{21} 频域响应转换为时域响应，记录不同含碳量灰样的主峰衰减。 S_{21} 参数的时域变换结果如图 10 所示。图 10 中幅值衰减最大点即为时域主峰衰减。

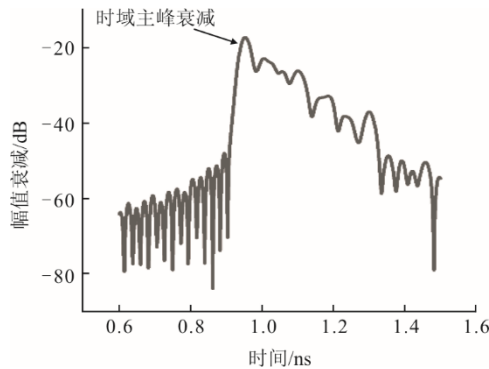


图 10 S_{21} 参数时域变换结果

Fig.10 The time-domain transform results of S_{21}

根据主峰衰减和灰样含碳量拟合灰样 A 和灰样 B。时域主峰衰减法拟合结果如图 11 所示。由图 11 可以看出，灰样 A 与灰样 B 拟合结果较好。

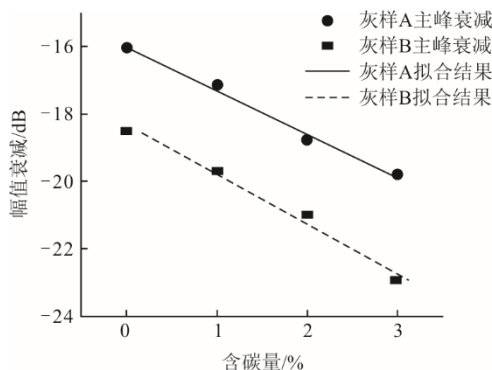


图 11 时域主峰衰减法拟合结果

Fig.11 Fitting results of the main peak attenuation method in time domain

使用可决系数 R^2 评价灰样的拟合程度，灰样 A 和灰样 B 的拟合优度分别为 0.99 和 0.98。式(10)是

灰样 A 的计算模型，式(11)是灰样 B 的计算模型。

$$u_c = -0.774 62 \cdot DB_A - 12.394 75 \quad (10)$$

$$u_c = -0.677 2 \cdot DB_B - 12.392 82 \quad (11)$$

式中： u_c 为飞灰拟合含碳量； DB_A 为灰样 A 时域主峰衰减； DB_B 为灰样 B 时域主峰衰减。

测量含碳量为 0.5%、1.5%、2.5% 的灰样 A 和灰样 B 的时域主峰衰减，并根据数学模型分别对含碳量为 0.5%、1.5%、2.5% 的灰样 A 和灰样 B 进行含碳量计算。计算结果见表 4。

由表 4 可知，采用时间域峰值法进行碳含量的拟合，其结果与实际值吻合良好。由于灰样 A 和灰样 B 是由不同煤种燃烧后得到的灰样，其金属氧化物的组成及含量也各不相同。已有的研究结果发现^[25]，飞灰中不同类型的金属氧化物对其介电损耗的影响存在差异，有些材料的介电损耗随掺杂量的增大而增大，而有些则随掺杂量的增大而减小。介电损耗是导致微波信号衰减的主要因素。虽然灰样 A 与灰样 B 含碳量一样，但其在微波辐射信号中的衰减仍有差别，从而造成碳含量测定结果的差别。

表 4 时域峰值法含碳量测量结果
Tab.4 Measurement results of carbon content by time-domain peak method

标准灰含碳量/%	灰样 A 含碳量/%		灰样 B 含碳量/%	
	测量值	误差	测量值	误差
0.5	0.432 4	6.76	0.398 2	10.18
1.5	1.369 1	13.09	1.454 6	4.54
2.5	2.643 1	14.31	2.425 0	0.75

以往的研究方法和本文的时域峰值法都是通过对不同煤种的灰样进行标定，不同煤种对应不同的拟合曲线。测量待测灰样对微波信号的幅值衰减，根据拟合曲线来计算含碳量。特征频率拟合法误差较大并且需要根据灰样选择拟合程度较好的频点。时域峰值法有着灵活性好、误差小等优点。

3.4 含碳量测量数据分析

测量含碳量为 1.5%、不同粒径的灰样 A 和灰样 B 的时域主峰衰减，并根据数学模型计算拟合含碳量。含碳量测量结果见表 5。从表 5 可以看出，在含碳量相同的情况下，随飞灰颗粒尺寸的减小，飞灰对微波信号的衰减也随之降低，从而使含碳量的测量值随飞灰粒径的减小而增加。

将灰样 A 筛分后，得出灰样 A 主要是由 100~150 μm 和 75~100 μm 2 个粒径范围的飞灰颗粒组成。灰样 A 的含碳量拟合模型是基于未筛分的灰样 A，因此灰样 A2 和 A3 的拟合含碳量更接近灰样

A 的实际含碳量。将灰样 B 筛分后, 得出灰样 B 主要是由 75~100 μm 和 63~75 μm 2 个粒径范围的飞灰颗粒组成。灰样 B 的含碳量拟合模型是基于未筛分的灰样 B, 因此灰样 B3 和 B4 的拟合含碳量更接近灰样 B 的实际含碳量。

当微波信号通过介质时, 一部分能量会转化为热能, 导致信号强度降低。这种现象称为介电损耗。材料的介电常数越高, 其介电损耗就越大, 信号衰减也就越严重。对于由 2 种介质组成的材料, 复合介电常数的计算公式如式(12)所示。空气-飞灰混合介质的介电常数与空气介电常数、飞灰介电常数、空气的体积比和飞灰的体积比有关。由于飞灰的介电常数大于空气的介电常数, 空气-飞灰混合介质的介电常数随着空气体积分数增加而减小。在相同质量、不同粒度范围内的飞灰中, 随着颗粒尺寸的增大, 气体的体积分数增大, 从而降低了介质的介电常数。

$$\text{eff}_{\text{Composites}} = \text{eff}_{\text{air}} \cdot v_1 + \text{eff}_{\text{ash}} \cdot v_2 \quad (12)$$

式中: $\text{eff}_{\text{Composites}}$ 为由空气和飞灰混合后的介电常数; eff_{air} 为空气的介电常数; eff_{ash} 为飞灰的介电常数; v_1 为混合介质中空气的体积分数; v_2 ($v_1+v_2=1$) 为混合介质中飞灰的体积分数。

表 5 1.5% 含碳量测量结果
Tab.5 Measurement results of 1.5% carbon content

粒径/ μm	灰样 A		灰样 B	
	衰减/dB	含碳量/%	衰减/dB	含碳量/%
≥ 150	-17.13	0.874 2	-18.94	0.431 7
100~150	-17.69	1.313 2	-19.65	0.915 4
75~100	-18.07	1.601 3	-20.31	1.365 4
63~75	-18.51	1.941 5	-20.87	1.746 3
≤ 63	-18.64	2.045 6	-21.18	1.956 1

4 结 论

微波法以其准确度高、实时性好、测量系统简单方便等优点成为粉煤灰含碳量测量的主流方法。然而, 在微波法飞灰含碳量在线测量系统中, 飞灰粒径和飞灰含碳量拟合模型对测量精度影响很大, 尚未有研究开展关于误差较小的含碳量拟合模型和飞灰粒径对金属波导内飞灰测量的影响。飞灰含碳量在线测量依托取样装置从尾部烟道进行取样。然而, 由于取样装置的原理和取样位置不同, 所得飞灰粒径会有差异。在使用微波法进行在线测量时, 需要提前对灰样进行标定。当用于标定的灰样粒径与取样得到的灰样粒径差

异较大时, 含碳量测量会出现较大误差。为了更准确地测量飞灰含碳量, 需要使用取样装置中的灰样进行标定。本文提出使用时域主峰衰减拟合含碳量, 并通过微波法测量波导内灰位及含碳量的研究, 分析了波导内不同粒径范围的飞灰对测量灰位和飞灰含碳量的影响, 在一定程度上解决了上述问题, 为微波法测量飞灰含碳量的修正提供了参考。结果表明:

1) 当使用微波法测量波导内灰位时, 对于相同质量的灰样, 随着飞灰粒径的减小, 飞灰的灰位逐渐降低。对于波导管中相同质量的灰样, 飞灰的粒径对灰位的测量精度没有显著的影响。

2) 当采用 S_{21} 时域的主峰衰减对标准灰样进行拟合时, 拟合曲线的优度较好。采用时间域峰值法计算含碳量, 其结果与实际值吻合良好。使用时间域峰值法计算含碳量, 误差控制在 0.2% 以内。

3) 当使用微波法测量波导内飞灰含碳量时, 对于相同质量的灰样, 随着飞灰粒径的减小, 波导内飞灰对微波信号的衰减逐渐减小, 从而使碳含量的测量值随着飞灰粒径的减小而增加。由于飞灰的介电常数大于空气的介电常数, 空气-飞灰混合介质的介电常数随着空气体积分数增加而减小。在相同质量、不同粒度范围内的飞灰中, 随着颗粒尺寸的增大, 气体的体积分数增大, 从而降低了介质的介电常数、进而导致碳含量的测量值随着飞灰粒径的减小而增加。

[参 考 文 献]

- [1] 刘宏伟. 锅炉飞灰含碳量高的原因分析及降低措施[J]. 电工技术, 2021(14): 161-162.
LIU Hongwei. Cause analysis and reducing measures of high carbon content in boiler fly ash[J]. Electric Engineering, 2021(14): 161-162.
- [2] 周新刚, 刘志超, 路春美, 等. 燃煤电厂锅炉飞灰含碳量影响因素分析及对策[J]. 节能, 2005(9): 45-47.
ZHOU Xingang, LIU Zhichao, LU Chunmei, et al. Analysis of factors affecting carbon content in boiler fly ash of coal-fired power plants and countermeasures[J]. Energy Conservation, 2005(9): 45-47.
- [3] 刘文. 锅炉飞灰含碳量偏高的原因分析和对策[J]. 科技风, 2010(11): 249.
LIU Wen. Analysis of the causes and countermeasures of high carbon content in boiler fly ash[J]. Technology Trend, 2010(11): 249.
- [4] 索疆舜, 崔志刚, 马素霞, 等. CFB 锅炉飞灰含碳量影响因素分析[J]. 热力发电, 2016, 45(7): 84-87.
SUO Jiangshun, CUI Zhigang, MA Suxia, et al. Influence factors of carbon content in fly ash in circulating fluidized bed boiler[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(7): 84-87.

- [5] 赵虹, 张翔宇, 李培, 等. 锅炉飞灰含碳量与煤燃烧特性的相关性研究[J]. 热力发电, 2011, 40(8): 41-44.
ZHAO Hong, ZHANG Xiangyu, LI Pei, et al. Study on correlativity between unburned carbon in fly ash of boilers and the combustion properties of coal[J]. Thermal Power Generation, 2011, 40(8): 41-44.
- [6] 黄林敏. 基于降低飞灰含碳量的火电厂锅炉燃烧过程运行优化研究[J]. 装备维修技术, 2023(4): 31-35.
HUANG Linmin. Optimization of boiler combustion process operation in thermal power plants based on reducing carbon content in fly ash research[J]. Equipment Maintenance Technology, 2023(4): 31-35.
- [7] 何晋, 杜瑞铭, 聂利辉. 锅炉飞灰含碳量偏高原因分析及处理对策[J]. 热力发电, 2003, 32(9): 32-33.
HE Jin, DU Ruiming, NIE Lihui. Analysis of the causes of high carbon content in boiler fly ash and treatment countermeasures[J]. Thermal Power Generation, 2003, 32(9): 32-33.
- [8] 王建峰, 鄯英杰, 乔源, 等. 基于特征选择的飞灰含碳量影响因素分析[J]. 仪器仪表用户, 2020, 27(1): 85-90.
WANG Jianfeng, XI Yingjie, QIAO Yuan, et al. Analysis of factors affecting carbon content of fly ash based on feature selection[J]. Instrumentation, 2020, 27(1): 85-90.
- [9] 方建, 钱芳树, 吴伟, 等. 中储式钢球磨锅炉飞灰含碳量偏高的原因分析及对策[J]. 能源工程, 2022, 42(1): 68-73.
FANG Jian, QIAN Fangshu, WU Wei, et al. Analysis and countermeasures of high carbon content in fly ash of medium storage steel ball mill boiler[J]. Energy Engineering, 2022, 42(1): 68-73.
- [10] 张超, 柳宁, 绳鹏鹏, 等. 飞灰含碳在线测量在 660 MW 机组锅炉燃烧中应用[J]. 冶金能源, 2024, 43(1): 54-56.
ZHANG Chao, LIU Ning, SHENG Pengpeng, et al. Application of measurement of carbon content in fly ash in combustion of boiler of 660 MW unit[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2024, 43(1): 54-56.
- [11] ZHANG D, NIU Y G, DU M. Influence analysis of the different ash plane in the waveguide on the measurement of the carbon content of the fly ash by the microwave method[J]. Measurement, 2022, 195: 111189.
- [12] 苏新凯, 黄兴强, 岳松, 等. 生物质循环流化床飞灰烧失特性研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 325-330.
SU Xinkai, HUANG Xingqiang, YUE Song, et al. Study about loss on ignition characteristic of fly ash in biomass circulating fluidized bed[J]. Acta Energetica Solaria Sinica, 2022, 43(11): 325-330.
- [13] 景博. 飞灰中金属氧化物对微波衰减影响的机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014: 1.
JING Bo. Study of influence of metal oxides in flying ash on its microwave attenuation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014: 1.
- [14] 鲁许鳌, 阎维平, 沈冶, 等. 掺烧稻壳对煤粉炉飞灰特性的影响[J]. 太阳能学报, 2011, 32(3): 358-363.
LU Xuao, YAN Weiping, SHEN Ye, et al. Effect of co-firing on the characteristic of fly ash in 300MWel PC boiler[J]. Acta Energetica Solaria Sinica, 2011, 32(3): 358-363.
- [15] 李惠茹, 刘海玉, 金燕, 等. 粒径对飞灰比电阻及介电特性的影响[J]. 热力发电, 2015, 44(7): 45-49.
LI Huiru, LIU Haiyu, JIN Yan, et al. Effect of particle size on resistivity and dielectric property of fly ash[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(7): 45-49.
- [16] 龚彬, 余春江, 王淮, 等. 生物质炉排锅炉飞灰特性及影响因素分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(7): 1670-1676.
GONG Bin, YU Chunjiang, WANG Zhun, et al. Study on abnormalities and influencing factors of fly ash from a biomass-fired grate boiler[J]. Acta Energetica Solaria Sinica, 2016, 37(7): 1670-1676.
- [17] 付玉存. 飞灰含碳量微波检测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016: 1.
FU Yucun. Research on microwave detection technology of carbon content of fly ash[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016: 1.
- [18] 郭沂权, 赵永椿, 李高磊, 等. 300 MW 燃煤电站化学团聚强化飞灰细颗粒物排放控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 754-763.
GUO Yiquan, ZHAO Yongchun, LI Gaolei, et al. Research on emission characteristics of chemical agglomeration of fly ash fine particles from a 300 MW coal-fired power plant boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 754-763.
- [19] 蒋啸, 周昊, 岑可法. 煤粉锅炉不同粒径飞灰含碳量的非线性变化特性[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 20-25.
JIANG Xiao, ZHOU Hao, CEN Kefa. Non-linear characteristics on carbon content of fly ash for different size particles in pulverized coal boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8): 20-25.
- [20] 牛玉广, 彭范. 飞灰含碳量微波频率响应特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(11): 2634-2642.
NIU Yuguang, PENG Fan. Microwave frequency response characteristic of fly ash with different carbon content[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2634-2642.
- [21] 张抖, 牛玉广, 陆瑶, 等. 基于微波法的飞灰含碳量在线测量装置设计方法[J]. 电站系统工程, 2022, 38(4): 31-34.
ZHANG Dou, NIU Yuguang, LU Yao, et al. Design method of on-line measuring device for carbon content of fly ash based on microwave[J]. Power System Engineering, 2022, 38(4): 31-34.
- [22] 徐兴明. 飞灰含碳量的微波在线检测方法及其系统开发[D]. 北京: 华北电力大学, 2022: 1.
XU Xingming. Microwave on-line detection method and system development for carbon content in fly ash[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022: 1.
- [23] 刘含笑, 刘美玲, 刘毅, 等. 燃煤飞灰几何粒径分布测试方法及其分布特征[J]. 冶金能源, 2020, 39(2): 52-54.
LIU Hanxiao, LIU Meiling, LIU Yi, et al. Measurement method of geometric particle size distribution of coal fly ash and its distribution characteristics[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2020, 39(2): 52-54.
- [24] 徐兴明, 牛玉广, 胡博, 等. 波导内飞灰灰位与折射率的微波测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4): 169-178.
XU Xingming, NIU Yuguang, HU Bo, et al. A microwave measuring method of the level and refractive index of fly ash in the waveguide[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 169-178.
- [25] 姚远. 燃煤飞灰介电特性的实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 1.
YAO Yuan. Experimental study on the dielectric properties of fly ash from coal combustion[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 1.

(责任编辑 邓玲惠)