

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007075

# 波导内飞灰灰位与折射率的微波测量方法\*

徐兴明<sup>1,2</sup>, 牛玉广<sup>1,2</sup>, 胡博<sup>3</sup>, 王磊<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学新能源国家重点实验室 北京 102206; 2. 华北电力大学控制与计算机工程学院 北京 102206;  
3. 国网辽宁省电力有限公司 沈阳 110006)

**摘要:**为了进一步提高微波波导法对飞灰含碳量检测的准确性,提出了一种利用微波在波导内不同介质分界面的反射作用,通过时域变换找到微波到达不同介质分界面的时间,再结合微波在波导内不同介质中的传输速度,计算得到波导内飞灰的灰位及相对群折射率的方法。本文使用规格为7.9 mm×15.8 mm×100 mm的矩形波导,在12.4~18 GHz频段下利用上述方法对质量为0~12 g,含碳量为1%~10%的一系列灰样的灰位与相对群折射率进行测试。结果表明在测量过程中,存在一个临界点,即当波导内实际灰位大于47.3 mm时,测得的灰位与实际灰位误差基本在±2 mm以内,且波导内灰样的相对群折射率与飞灰含碳量呈正相关,而不随飞灰质量的变化而变化。

**关键词:**微波;波导;时域;灰位;相对群折射率

**中图分类号:**TK314 TH89 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**470.20

## A microwave measuring method of the level and refractive index of fly ash in the waveguide

Xu Xingming<sup>1,2</sup>, Niu Yuguang<sup>1,2</sup>, Hu Bo<sup>3</sup>, Wang Lei<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China)

**Abstract:**To further improve the accuracy of the microwave waveguide method for detecting the unburned carbon content of fly ash, a method is proposed to calculate the ash level and relative group refractive index of fly ash in the waveguide. Through time domain transformation, the time of microwave reaching the interface of different media is achieved. Then, by combining with the transmission speed of microwave in different media in the waveguide, the reflection of microwave on the interface of different media in the waveguide is obtained. This paper uses a rectangular waveguide with a specification of 8 mm×15 mm×100 mm. Under the 12.4-18 GHz frequency band, the above method tests the level and relative group refractive index of a series of ash samples with a mass of 0-12 g and a carbon content of 1%-10%. Results show that there is a critical point in the measurement process. When the actual ash level in the waveguide is larger than 47.3 mm, the error between the measured level and the actual gray level is basically within ±2 mm. And the relative group refractive index of the ash sample in the waveguide is positively correlated with the carbon content of the fly ash. It does not vary with the mass of fly ash.

**Keywords:**microwave; waveguide; time domain; ash level; relative group refractive index

## 0 引言

在燃煤电厂的运行中,飞灰含碳量通常被认为是反

映燃煤电厂锅炉燃烧效率的重要参数,也是锅炉运行的主要经济指标和技术指标,因此飞灰含碳量的准确、实时检测对调整锅炉燃烧工况、提高燃烧效率具有重要意义<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2020-11-04 Received Date: 2020-11-04

\* 基金项目:国家重点研发计划(2017YFB0902100)项目资助

飞灰含碳量检测方法主要分为软测量法和物理测量法<sup>[2]</sup>。软测量法主要采用支持向量回归机、粒子群算法与神经网络算法等智能算法建立飞灰含碳量软测量模型<sup>[3-8]</sup>。软测量法不受现场安装限制,泛化能力强、适用范围广,但所需辅助变量较多,而且这些变量不可避免地存在噪声,难以得到全工况下的飞灰含碳量测量模型。物理测量法主要有燃烧失重法、质谱定量分析法、激光诱导击穿光谱法、微波法。燃烧失重法<sup>[9-10]</sup>首先进行飞灰取样,将取出的一定量的样品置于马弗炉内充分燃烧至完全燃尽状态,然后将样品前后的质量差计算出来,并以此计算含碳量的多少。这种方法精度高,但是飞灰检测时间很长,无法对飞灰含碳量进行实时监测。质谱定量分析法<sup>[11-12]</sup>采用热重质谱联用并配合等效特征图谱法解析反应过程中燃烧产物的真实流量,计算出外部参与反应的氧气质量,通过氧气消耗量计算可燃碳的真实含量。激光诱导击穿光谱法<sup>[13-14]</sup>是以原子发射光谱学为基础的测量方法,将脉冲激光聚焦于待测样品,使样品产生高温高能量密度的等离子体,等离子体在冷却的过程中发射元素谱线,从而实现物质成分及其浓度精确分析。微波法<sup>[15-16]</sup>利用微波穿过飞灰后,碳粒子吸收微波致使微波发生功率衰减与相位移动的原理测量飞灰含碳量,微波法具有灵敏度高、实时性强、测试流程简单的特点,当前国内主要采用微波法测量飞灰含碳量。

微波检测法主要包括自由空间检测法、微波谐振腔法、波导法。自由空间法测量时微波向周围逸散,难以使微波全部作用于飞灰样品;微波谐振腔法现场安装困难;波导法既可以保证微波不向周围逸散,测量精度高,而且现场安装方便。所以本文针对微波波导法仍存在的问题,提出解决方案。

微波波导法测量飞灰含碳量时,微波的功率衰减与相位移动不仅与飞灰含碳量有关,还与飞灰的总质量、煤种有关。对于消除灰样质量的影响,目前的方法是建立浓度不相关函数<sup>[17-18]</sup>,但是这种方法在测试时波导内飞灰质量变化范围很小,当变化范围大时可能不适用;对于消除煤种的影响,目前的方法只有在煤种变化后对灰样进行重新标定。针对这两个问题,本文给出了一种微波测量波导内灰样灰位与折射率的方法。利用微波对波导内灰样的高度进行检测,以便对波导内的灰位进行控制来达到控制波导内飞灰质量的目的,使每次对含碳量进行测量时波导内的飞灰质量基本一致。另外,可以通过测量不同煤种燃烧后灰样的折射率对煤种进行表征。

## 1 测试原理

微波时域法测量波导内飞灰灰位与折射率的原理图如图1所示。

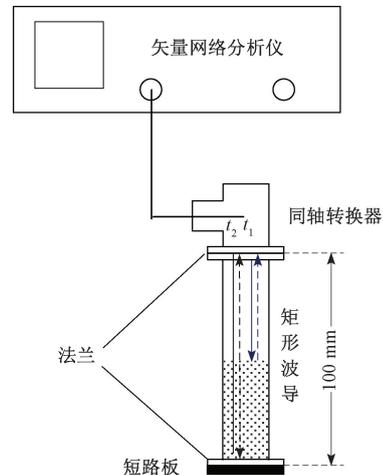


图1 时域法测量波导内飞灰灰位与折射率原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of measuring fly ash level and refractive index in waveguide by the time domain method

通过测量微波在波导空气层中传输与反射的时间以及微波在波导空气层中传输的速度可求得波导中空气层的厚度,然后利用波导总长与之做差即可求得波导内飞灰的灰位;另外可通过微波在空气层中传播速度与在飞灰层中传输速度之比求得灰样的折射率。

### 1.1 波导测量中微波的反射

在燃烧正常情况下产生的飞灰可以看成是一种复合型电介质。其主要可以分成两个部分,一个部分是除去未燃尽碳粒子后的零灰(不含碳的底灰)和未燃尽的高电导率的石墨形态碳粒子。前者主要是由大量的 $\text{SiO}_2$ 和少量的氧化物(包括 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ )构成<sup>[19]</sup>。测量时,微波经过的路径中,空气、飞灰、短路板的阻抗各不相同,所以会在空气-飞灰界面与飞灰-短路板界面发生反射。反射系数与阻抗之间的关系如下:

$$\Gamma_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (1)$$

$$\Gamma_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

其中, $\Gamma_1$ 为空气-飞灰界面反射系数; $Z_0$ 为空气的阻抗; $Z_1$ 为飞灰介质的阻抗; $\Gamma_2$ 为飞灰-短路板界面的反射系数; $Z_2$ 为短路板的阻抗。

当电磁波在放置有被测电介质的波导中传播时,电磁波会在空气与被测电介质的分界面处发生多次反射和多次透射现象;短路板的阻抗 $Z_2$ 为0,所以 $\Gamma_2 = -1$ ,所以电磁波遇到金属短路板时会发生全反射。

## 1.2 微波时域法

矢量网络分析仪在频域进行测量,微波网络的输入输出信号之间的关系用S参数表示,S参数包括微波传输或反射后的频域内的幅值衰减与相移,矢量网络分析仪可以对S参数进行傅里叶逆变换得到时域信号<sup>[20]</sup>。由于测量得到的网络频率响应由离散数据组成,因此为了得到相应的时域相应,需要使用离散傅里叶逆变换的手段,作用在离散频率数据集合上,且仅在离散时间点上定义,如式(3)所示。

$$f(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(\nu) e^{j2\pi(\nu/N)t} \quad (3)$$

其中, $t$ 为离散时间序列; $N$ 为采样点数; $F(\nu)$ 为离散频率数据集合。

时域变换后,横轴代表通过设备的传播延迟,即为一个脉冲穿过设备所需要的时间。在传输测量中,横轴显示的是脉冲单向传播的时间;在反射测量中,横轴显示的则是脉冲双向传播的时间。随后将传播时间乘以信号传输速度得到距离域数据,即沿线反射信号的大小<sup>[21]</sup>。本文利用微波的反射特性进行灰位检测,使用网络分析仪的端口1发射接收微波信号,所以对 $S_{11}$ 信号进行时域变换,得到不同时间点上的幅值衰减信息。

## 1.3 微波在波导内的传输速度

由于我们要分析的是一个频段内的微波,并且要测得微波的功率信号,所以应当以群速分析微波在波导内的传输<sup>[22]</sup>。微波在以空气为介质的波导内的群速 $v_g$ 可以表示为:

$$v_g = c \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} \quad (4)$$

其中, $c$ 为自由空间条件下空气中的光速,通常取 $3 \times 10^8$  m/s; $\lambda$ 为波群的平均波长; $\lambda_c$ 为波导的截止波长,与波导尺寸和波导内传输的微波模式有关。同样介质下,微波在波导内传播的群速小于在自由空间内传播的速度。在波导尺寸固定,微波频段不变的情况下,式(4)可简化为:

$$v_g = c \cdot k \quad (5)$$

其中, $k$ 为常数, $k \in (0,1)$ 。

微波在波导内传输时,波导内介质的不同也会改变微波在波导内的传输速度,关系如下:

$$N_g = \frac{v_g}{v_{g\text{介质}}} \quad (6)$$

其中, $N_g$ 为相对群折射率; $v_g$ 为微波在以空气为介质的波导内传输的群速; $v_{g\text{介质}}$ 为微波在其它介质波导中的传输群速。 $N_g$ 与材料本身的特性和微波频率有关,在本文中,研究的微波频率范围不变,所以 $N_g$ 只与材料本身的特性有关。

## 2 实验过程

微波时域法测量波导内飞灰灰位主要分为4步:波导基本参数测量、校准、无灰状态下测量、有灰状态下测量。

### 2.1 波导基本参数测量

首先测得所用的矩形波导的尺寸为 $7.9 \text{ mm} \times 15.8 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ,波导频段为 $12.4 \sim 18 \text{ GHz}$ 。然后用零灰装满波导,压实后再装满,如此重复几次,直到不能再装入飞灰为止,将波导内全部飞灰样品倒入精密电子秤进行称重,质量 $M$ 为 $12.68 \text{ g}$ 。

### 2.2 校准

将矢量网络分析仪与同轴转换器通过同轴连接线相连,同轴转换器再通过法兰与短路板相连,如图2所示。 $tr_0$ 表示在校准状态下微波从同轴连接线出来,经过同轴转换器,到达空气-短路板分界面上并且经过短路板反射,返回到同轴连接线所需时间。

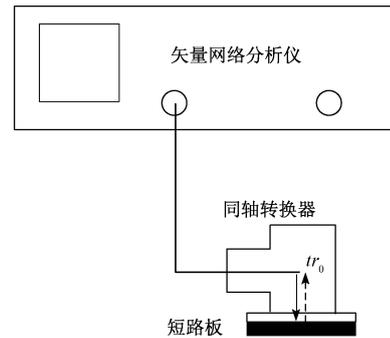


图2 校准过程接线示意图

Fig. 2 Diagram of calibration process wiring

校准过程具体步骤如下:

1) 打开网络分析功能,测试 $S_{11}$ 参数,选取频率范围为 $12.4 \sim 18 \text{ GHz}$ ,清晰度选择10001,中频带宽选择 $10 \text{ kHz}$ 。

2) 实验中把同轴连接线连接在了矢量网络分析仪的1端口,所以选择短路响应1口校准。

3) 打开时域,选择起始终止时间为 $-5 \sim 5 \text{ ns}$ 。

校准后的时域图像如图3所示。

由图3可以看出,校准后反射极大值点对应的时刻为0,即校准后把微波从同轴连接线出来,经过同轴转换器,到达空气-短路板分界面上并且经过短路板反射,返回到同轴连接线所需时间置为0。

### 2.3 无灰状态下测量

将不装灰的波导一端连接同轴转换器再与矢量网络分析仪通过同轴连接线连接,另一端连接短路板,如图4所示。 $tr_1$ 表示在无灰测量状态下微波从同轴连接

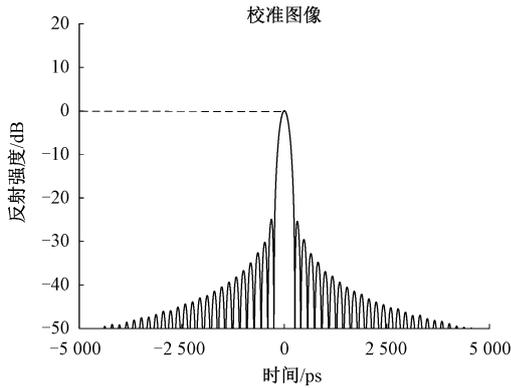


图3 端口1短路响应校准后时域图像  
Fig.3 Time domain image of short-circuit response calibration of port 1

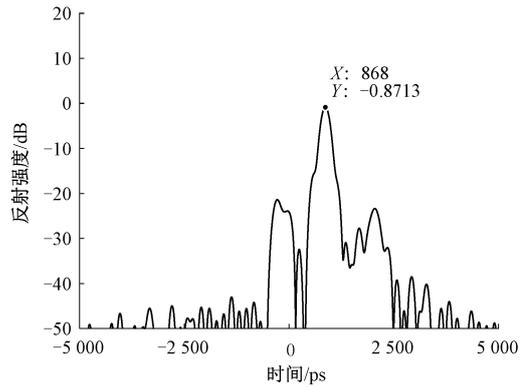


图5 无灰状态下测量得到的时域曲线  
Fig.5 Time-domain curve measured in the ash-free state

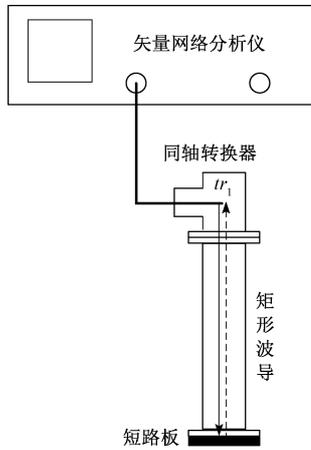


图4 无灰状态测量接线示意图  
Fig.4 Diagram of measurement connection without ash

线出来,经过同轴转换器、整个波导管,到达空气-短路板分界面上并且经过短路板反射,返回到同轴连接线所需时间。

接线完成后,在校准完成的基础上,网络分析仪中可以直接看到  $S_{11}$  时域图像,如图5所示。

对比图3与5可以发现时域的幅值极大值对应的的时间点向后移动了  $t_0 = 868$  ps,表示微波在波导内传输和反射的时间总和,并且有:

$$t_0 = tr_1 - tr_0 \quad (7)$$

再对比图1与3可以发现短路板移动的距离正好是整个波导的长度  $L = 100$  mm,由波导的长度等于微波在波导内传输的时间与微波在波导内传输的速度的乘积,可得:

$$L = v_g \cdot \frac{t_0}{2} \quad (8)$$

式(5)与(8)联立,可解得微波在以空气为介质的波导内的传输速度  $v_g = 2.304 \times 10^8$  m/s,比例系数  $k = 0.768$ 。

### 2.4 有灰状态下测量

将装灰的波导一端连接同轴转换器再与矢量网络分析仪通过同轴连接线连接,另一端连接短路板,如图6所示。 $tr_2$ 表示在有灰状态下微波从同轴连接线出来,经过同轴转换器和空气-飞灰分界面,到达飞灰-短路板分界面上并且由短路板反射,返回到同轴连接线所需时间; $tr_3$ 表示在有灰状态下微波从同轴连接线出来,经过同轴转换器,到达空气-飞灰分界面上并且经过空气-飞灰界面反射返回到同轴连接线所需时间。

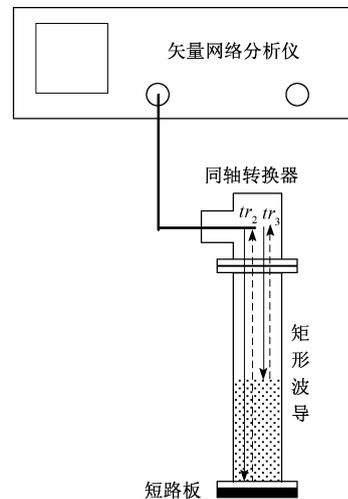


图6 有灰状态下测量接线示意图  
Fig.6 Diagram of measurement wiring with fly ash

同样在校准的基础上,从矢量网络分析仪中得到有灰状态下  $S_{11}$  时域图像,如图7所示。

由图7可以发现0时间点右侧出现两个极大值点,由于左侧的极大值点对应的的时间  $t_1$  更靠近0时刻,所以表示空气-飞灰分界面;右侧极大值点对应的的时间  $t_1$  与0时刻距离较远,表示飞灰-短路板分界面。 $t_1, t_2$  与  $tr_0$ ,

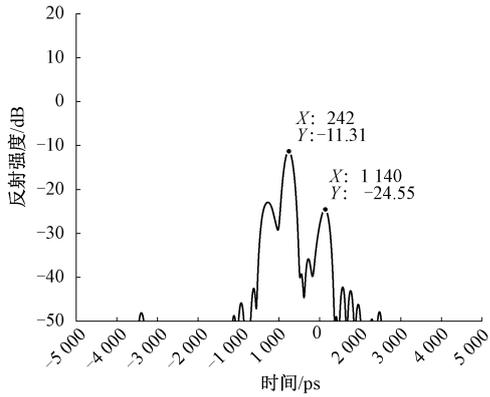


图7 有灰状态下测量得到的时域曲线

Fig. 7 Time-domain curve measured with fly ash

$tr_2$ 、 $tr_3$  之间的关系为:

$$t_1 = tr_3 - tr_0 \quad (9)$$

$$t_2 = tr_2 - tr_0 \quad (10)$$

波导内空气部分的高度  $H'$  等于微波在波导内空气介质下的传输速度与微波在波导内空气部分的传输时间的乘积,即:

$$H' = v_g \cdot \frac{t_1}{2} \quad (11)$$

波导内空气部分的高度  $H$  就等于波导的总长减去波导内空气层的厚度,即:

$$H = L - v_g \cdot \frac{t_1}{2} \quad (12)$$

另外,由图6中微波的传输、反射路径可得如下方程:

$$L = v_g \cdot \frac{t_1}{2} + v_{g\text{介质}} \cdot \frac{t_2 - t_1}{2} \quad (13)$$

联立式(6)、(8)、(13)可得波导内飞灰的相对群折射率:

$$N_g = \frac{t_2 - t_1}{t_0 - t_1} \quad (14)$$

### 3 数据分析

为了分别研究飞灰含碳量与飞灰质量对灰位测量的影响,汇总了相同含碳量不同质量的飞灰灰位测试数据与相同质量不同含碳量的飞灰灰位测试数据。

#### 3.1 同含碳量不同质量

在含碳量分别为1%、3%、5%、10%的情况下,利用矢量网络分析仪对不同质量的飞灰样品进行测试,测得的时域结果如图8~11所示。

观察图8~11,可以得出以下结论:

1) 总体来说,相同含碳量的灰样,质量越大,左侧反

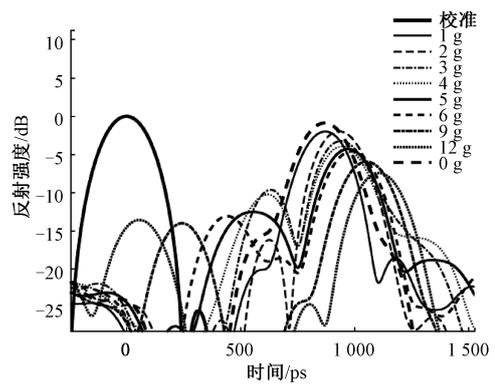


图8 含碳量为1%的不同质量的灰样(局部放大)

Fig. 8 Fly ash samples of different quality with 1% carbon content (partial zoom)

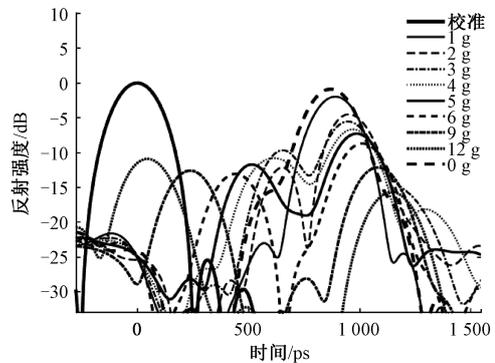


图9 含碳量为3%的不同质量的灰样(局部放大)

Fig. 9 Fly ash samples of different quality with 3% carbon content (partial zoom)

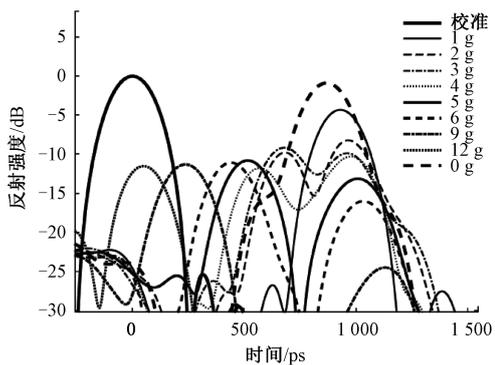


图10 含碳量为5%的不同质量的灰样(局部放大)

Fig. 10 Fly ash samples of different quality with 5% carbon content (partial zoom)

射点越靠左,右侧反射点越靠右。因为随着质量的增大,灰位升高,微波在空气层中传播的时间越来越短,而在介电常数较大的飞灰介质中传播的时间越来越长。

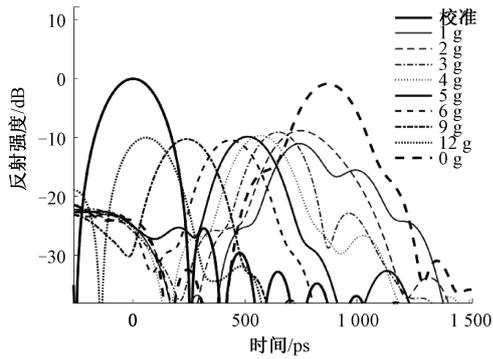


图 11 含碳量为 10% 的不同质量的灰样(局部放大)

Fig. 11 Fly ash samples of different quality with 10% carbon content (partial zoom)

2) 1%, 3%, 5% 含碳量的灰样, 质量为 1 g 时均没有出现左侧反射极大值点。原因是: 1 g 的灰样放入波导内高度很小, 空气-飞灰分界面反射点被飞灰-短路板分界面的反射点淹没。对比之下, 图 11 中 10% 含碳量的 1 g 灰样测量结果出现左侧反射极大值点, 说明 10% 含碳量的空气-飞灰界面的反射系数较大。

3) 1%, 3%, 5% 含碳量的灰样, 质量为 2 g 与 3 g 时左侧反射点很接近。原因是: 2 g 与 3 g 的灰样放入波导内高度仍然较小, 而且反射系数较小, 虽然能够测出空气-飞灰分界面反射极大值点, 但是可能会被飞灰-短路板分界面的反射所干扰, 所以 2 g 与 3 g 灰样的时候左侧反射极大值点测得的结果误差较大。对比之下, 10% 含碳量的灰样反射系数较大, 2 g 与 3 g 灰样的时候反射极大值点很好地分开了。

### 3.2 同质量不同含碳量

在质量分别为 1、2、3、4、5、6、9、12 g 的情况下, 利用矢量网络分析仪对不同含碳量的飞灰样品进行测试, 测得的时域结果如图 12~19 所示。

由图 12~19 综合分析, 可得如下结论:

1) 观察不同质量的左侧极大值反射点, 可以按质量增加的过程分为 3 个阶段。第 1 阶段: 1~4 g 质量, 这时不同的含碳量的飞灰左侧反射极大值点时间分布差异很大; 第 2 阶段: 5 g 质量, 这时 3%、5%、10% 含碳量的飞灰左侧反射极大值点时间基本一致, 但含碳量最小的 1% 含碳量的灰样与 3%、5%、10% 含碳量的飞灰左侧反射极大值点时间有较大差异; 第 3 阶段: 6 g 及之后, 1%、3%、5%、10% 含碳量的灰样左侧反射极大值点时间都基本一致了。

2) 相同质量, 含碳量为 1%、3%、5% 的灰样右侧反射极大值点时间逐步右移。说明随着含碳量的增加, 微波在飞灰样品内传输的时间越长, 即微波在飞灰样品内传输的速度越慢, 飞灰样品的相对群折射率越大。

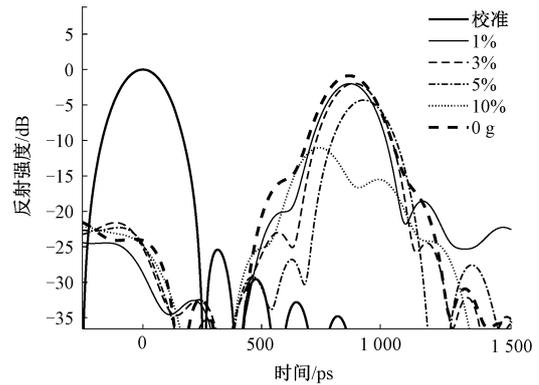


图 12 质量为 1 g 不同含碳量的灰样(局部放大)

Fig. 12 Fly ash samples with a mass of 1 g but different carbon content (partial zoom)

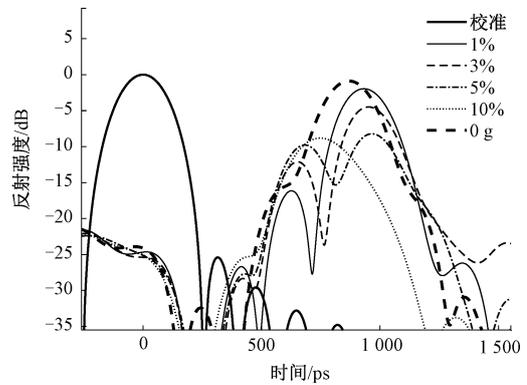


图 13 质量为 2 g 不同含碳量的灰样(局部放大)

Fig. 13 Fly ash samples with a mass of 2 g but different carbon content (partial zoom)

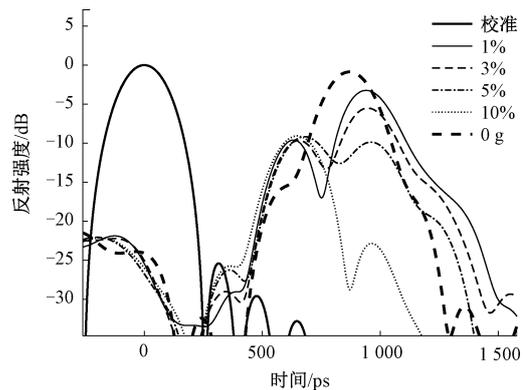


图 14 质量为 3 g 不同含碳量的灰样(局部放大)

Fig. 14 Fly ash samples with a mass of 3 g but different carbon content (partial zoom)

3) 10% 含碳量的飞灰, 只有质量为 1 g 时出现了右侧反射极大值点。原因是 10% 含碳量的飞灰反射系数大,

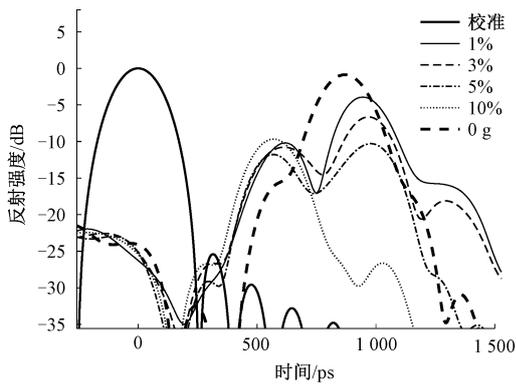


图 15 质量为 4 g 不同含碳量的灰样(局部放大)  
Fig. 15 Fly ash samples with a mass of 4 g but different carbon content (partial zoom)

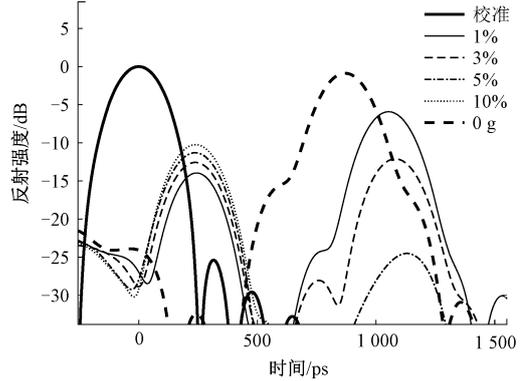


图 18 质量为 9 g 不同含碳量的灰样(局部放大)  
Fig. 18 Fly ash samples with a mass of 9 g but different carbon content (partial zoom)

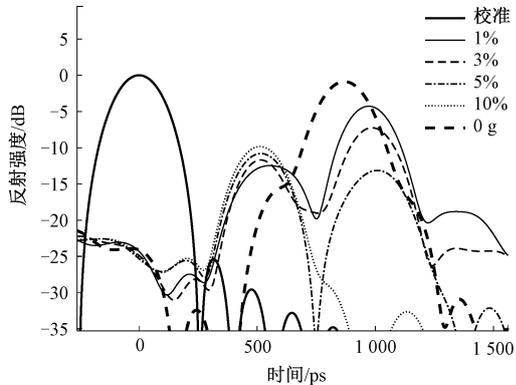


图 16 质量为 5 g 不同含碳量的灰样(局部放大)  
Fig. 16 Fly ash samples with a mass of 5 g but different carbon content (partial zoom)

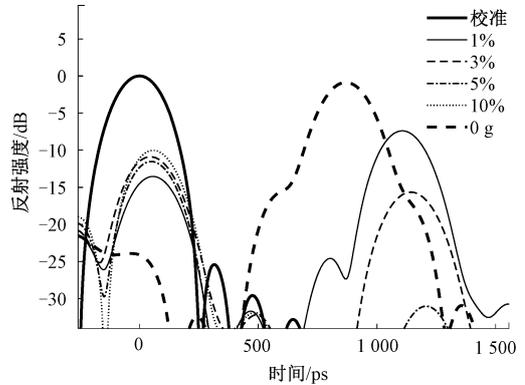


图 19 质量为 12 g 不同含碳量的灰样(局部放大)  
Fig. 19 Fly ash samples with a mass of 12 g but different carbon content (partial zoom)

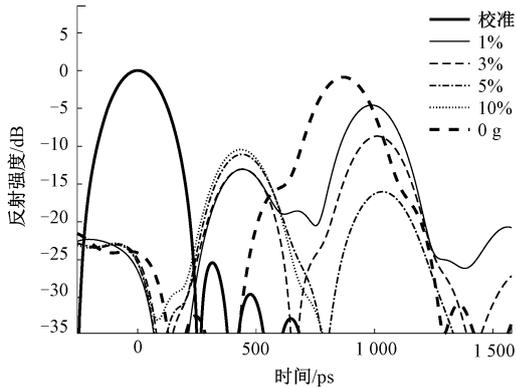


图 17 质量为 6 g 不同含碳量的灰样(局部放大)  
Fig. 17 Fly ash samples with a mass of 6 g but different carbon content (partial zoom)

微波有一部分在空气-飞灰界面反射。又因为 10% 含碳量的飞灰介电常数大,微波在飞灰介质中能量衰减大,灰位较高时,微波能量被完全吸收,矢量网络分析仪接收不到飞灰-短路线界面的微波反射信号,也就不存在飞灰-短路线分界面的反射点了。

## 4 灰位、相对群折射率计算

### 4.1 灰位计算

对空气-飞灰界面的反射点时间在不同含碳量与质量的情况下进行整合,如表 1 所示。

表 1 不同灰样的空气-飞灰界面反射点时间  $t_1$   
Table 1 Time of reflection point  $t_1$  at the air-fly ash interface of different ash samples ps

含碳量 /%	质量/g							
	1	2	3	4	5	6	9	12
1	N/A	626	632	618	554	442	243	56
3	N/A	652	655	613	515	442	238	49
5	N/A	683	680	569	516	440	237	46
10	N/A	747	648	570	512	436	239	57

利用式(12)可以计算出波导内的灰位  $H$ , 由于测试过程中使用的灰样是用同一电厂的原灰完全灼烧后再与

高纯石墨粉调制而成的,所以不同含碳量的飞灰密度差距很小。然后利用波导内实际灰位与波导内飞灰质量成正比计算出波导内的实际灰位  $H_0$ , 即:

$$H_0 = L \cdot \frac{m}{M} \quad (15)$$

其中,  $M$  为飞灰装满波导时的零灰质量;  $m$  为测量灰位时波导内飞灰的质量。

由此,可以得到每个含碳量和质量的灰样计算出的厚度和实际厚度,如表 2 所示。

表 2 不同灰样测量出的高度与实际高度  
Table 2 The measured height and actual height of different fly ash samples mm

含碳量 /%	质量/g							
	1	2	3	4	5	6	9	12
1	N/A	28.0	27.2	28.8	36.2	49.0	72.0	93.6
3	N/A	25.0	24.5	29.4	40.7	49.0	72.6	94.3
5	N/A	21.3	21.7	34.5	40.6	49.3	72.7	94.7
10	N/A	14.0	25.4	34.3	41.0	49.8	72.5	93.4
$H_0$	7.88	15.8	23.7	31.5	39.4	47.3	71.0	94.6

由表 2 可得:

1) 矢量网络分析仪没能测出 1 g 质量的灰样的厚度, 另外 2 g 质量的灰样测出来的厚度与实际厚度偏差较大; 其余灰样测出来的厚度都与实际厚度比较接近, 误差在  $\pm 4$  mm 之内, 另外还有大部分数据误差在  $\pm 2$  mm 之内。

2) 6 g 之前同质量不同含碳量的灰样测出的厚度之间差异较大, 6 g 及 6 g 之后同质量不同含碳量的灰样测出的厚度之间差异较小。

#### 4.2 相对群折射率计算

由式(14)可知, 相对群折射率的计算只需要无灰状态下空气-短路板反射点时间  $t_0$ 、有灰状态下空气-飞灰界面反射点时间  $t_1$ 、有灰状态下飞灰-短路板界面反射点时间  $t_2$  即可。其中  $t_0 = 868.086$  ps, 为定值;  $t_1$  已经在表 1 中给出。所以只需要找到不同质量、含碳量飞灰样品测量结果中右侧极大值反射点时间, 如表 3 所示。

表 3 不同灰样的飞灰-短路板界面反射点时间  $t_2$   
Table 3 Time of reflection point  $t_2$  of the fly ash-short circuit board interface of different ash samples ps

含碳量 /%	质量/g							
	1	2	3	4	5	6	9	12
1	872	932	940	945	972	988	1 053	1 107
3	890	951	947	969	986	1 012	1 081	1 143
5	930	966	960	979	1 008	1 033	1 130	1 207
10	不考虑							

由于 10% 含碳量的灰样只有在质量为 1 g 的时候出现右侧极大值反射点, 所以不考虑 10% 含碳量灰样的右侧极大值反射点时间。

根据式(14)计算得到的相对群折射率以图像的形式呈现出来, 如图 20 所示。

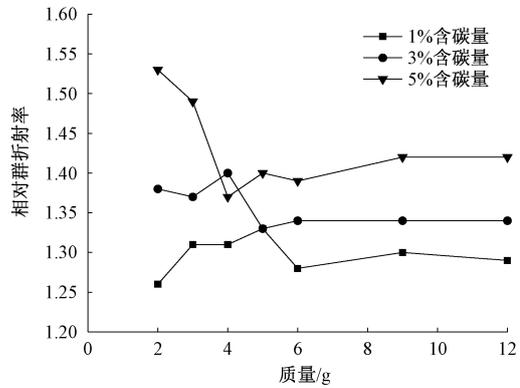


图 20 不同灰样相对群折射率

Fig. 20 Relative group refractive index of different ash samples

理论上, 飞灰相对群折射率只与含碳量有关, 与飞灰质量无关。由图 20 可以看出 6 g 之前飞灰折射率随质量变化波动很大, 6 g 之后相对群折射率基本保持平稳, 不随质量变化。而且相对群折射率平稳之后, 相对群折射率与含碳量呈正相关。

## 5 结 论

目前国内主要采用微波法测量飞灰含碳量, 其中波导法以其安装方便、测量精度高具有较大优势。针对此方法受煤种与波导内灰样质量影响的问题, 本文提出了一种利用微波时域测量波导内飞灰灰位和折射率的方法。该方法利用微波在波导内不同介质分界面的反射作用, 通过时域变换找到微波到达不同介质分界面的时间, 再结合微波在波导内不同介质中的传输速度, 来计算得到波导内飞灰的灰位及相对群折射率。基于此方法, 本文测试了一系列不同含碳量与质量的灰样的灰位与相对群折射率。

结果表明, 在微波时域法测量灰位与折射率的过程中, 存在一个灰位临界点。对实验结果进行分析, 在本文测试所选的波导及频率范围条件下(波导尺寸为  $7.9 \text{ mm} \times 15.8 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 频率范围为  $12.4 \sim 18 \text{ GHz}$ ), 临界灰位约为  $47.3 \text{ mm}$ (质量约为  $6 \text{ g}$ )。当波导内实际灰位低于临界灰位时, 灰位与折射率测量结果误差较大; 当波导内实际灰位高于临界灰位时, 灰位测量结果误差基本在  $\pm 2 \text{ mm}$  之内, 相对群折射率与灰样含碳量呈正相关, 且不随飞灰质量的变化而变化。

因此,在满足一定的灰位条件下,波导法测量飞灰含碳量时,可以同时测量出波导内飞灰的灰位以及相对群折射率,对提高飞灰含碳量检测的准确性具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 解海龙,张帅. 锅炉飞灰含碳量监测的必要性及其技术的发展[J]. 科学技术与工程,2016,16(7):115-121.  
XIE H L, ZHANG SH. The necessity of monitoring the carbon content in boiler fly ash and the development of its technology [J]. Science Technology and Engineering, 2016,16(7):115-121.
- [2] 程启明,胡晓青,王映斐,等. 锅炉飞灰含碳量测量方法综述[J]. 上海电力学院学报,2011,27(5):519-524.  
CHENG Q M, HU X Q, WANG Y F, et al. A summary of methods for measuring carbon content in boiler fly ash [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011,27(5):519-524.
- [3] 杨秀. 基于 AdaBoost 的 SVR 建模在飞灰含碳量检测中的应用[J]. 电子技术,2020,49(3):189-191,  
YANG X. Application of SVR modeling based on AdaBoost in fly ash carbon content detection [J]. Electronic Technology, 2020, 49(3):189-191.
- [4] 王子铭. 基于支持向量回归的飞灰含碳量测量方法[J]. 河南工程学院学报(自然科学版), 2020, 32(3):50-54.  
WANG Z M. Measurement method of fly ash carbon content based on support vector regression[J]. Journal of Henan Institute of Engineering ( Natural Science Edition), 2020,32(3): 50-54.
- [5] 彭道刚,李丹阳,顾立群,等. 基于 ADQPSO-SVR 的锅炉飞灰含碳量预测研究[J]. 计算机仿真, 2020, 37(3):72-77.  
PENG D G, LI D Y, GU L Q, et al. Research on prediction of carbon content in boiler fly ash based on ADQPSO-SVR[J]. Computer Simulation, 2020, 37(3): 72-77.
- [6] 乔源,王建峰,杨永存,等. 基于神经网络的飞灰含碳量软测量模型及实现[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(11):55-61.  
QIAO Y, WANG J F, YANG Y C, et al. A soft-sensing model of fly ash carbon content based on neural network and its realization [J]. Electric Power Science and Engineering, 2019,35(11):55-61.
- [7] 牛培峰,化克,张现平. 基于信息融合技术的锅炉飞灰含碳量测控系统[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(6): 1207-1210.  
NIU P F, HUA K, ZHANG X P. Measurement and control system for unburned carbon in fly ash based on information fusion technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009,30(6):1207-1210.
- [8] 冯旭刚,钱家俊,章家岩. 基于遗传神经网络敏感度分析的飞灰含碳量测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,30(7):1083-1089.  
FENG X G, QIAN J J, ZHANG J Y. Measurement method of fly ash carbon content based on genetic neural network sensitivity analysis[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016,30(7):1083-1089.
- [9] 熊东平. 烧失法在线飞灰测碳装置在 600 MW 机组中的应用[J]. 电力设备, 2007,8(12):82-83.  
XIONG D P. Application of burning loss on-line fly ash carbon measuring device in 600 MW unit [J]. Electrical Equipment, 2007,8(12):82-83.
- [10] 王涛,张春龙,吴楠,等. 失重法飞灰测碳仪及其存在问题与改进途径[J]. 节能, 2012,31(4):65-68+3.  
WANG T, ZHANG CH L, WU N, et al. Fly ash carbon measuring instrument with weightlessness method and its existing problems and improvement methods [J]. Energy Conservation, 2012,31(4):65-68+3.
- [11] 魏凯,夏红德,劳世奇,等. 基于质谱定量分析方法的锅炉飞灰含碳量可靠性研究[J]. 锅炉技术, 2020, 51(2):14-19.  
WEI K, XIA H D, LAO SH Q, et al. Reliability study on the carbon content of boiler fly ash based on mass spectrometry quantitative analysis method [J]. Boiler Technology, 2020,51(2):14-19.
- [12] LI R B, WEI K, HUANG Q, et al. A novel method for precise measurement of unburnt carbon in boiler fly ash by ECSA based on TG-MS [J]. Fuel, 2020, 264(3): 116849.
- [13] LIU R W, YOSHIHIRO D, NAN W G, et al. Unburned carbon measurement in fly ash using laser-induced breakdown spectroscopy with short nanosecond pulse width laser [J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(6):1210-1218.
- [14] 胡若木,王珍珍,刘人玮,等. 飞灰未燃碳的激光诱导击穿光谱定量分析[J]. 光子学报, 2018, 47(8): 39-46.  
HU R M, WANG ZH ZH, LIU R W, et al. Quantitative analysis of fly ash unburned carbon by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Acta Photonica Sinica, 2018,47(8):39-46.
- [15] 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 Y G, PENG F. Research on microwave frequency response characteristics of fly ash with different carbon content [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(11): 2634-2642.
- [16] 牛玉广, 任丹彤, 李建军. 自由空间反射法检测飞灰含碳量的实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 126-133.
- NIU Y G, REN D T, LI J J. Experimental study on the free space reflection method to detect the carbon content of fly ash [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 126-133.
- [17] TRABELSI S, PAZ A M, NELSON S O. Microwave dielectric method for the rapid, non-destructive determination of bulk density and moisture content of peanut hull pellets [J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(3): 332-338.
- [18] REN D T, NIU Y G, LUO H H, et al. Concentration-independent unburnt carbon content metering in fly ash using a waveguide [J]. Measurement, 2019, 146: 356-362.
- [19] PENG F, NIU Y G, GAO K, et al. Comparison of different microwave methods for unburned carbon content in fly ash determination [J]. Measurement, 2019: 346-354.
- [20] 何光勤, 鲁力. 基于虚拟仪器的矢量分析仪时域反射技术研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(22): 144-148.
- HE G Q, LU L. Research on time domain reflectometry technology of vector network analyzer based on virtual instrument [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(22): 144-148.
- [21] YASUMOTO S, NATSUKI O, YUHEL Y, et al. Development of a sensor for dielectric constant measurements utilizing time-domain measurement with a vector network analyzer [J]. Measurement, 2021, 169, DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108530.
- [22] 张道礼, 张建兵, 胡云香. 光电子器件导论[M]. 华中科技大学出版社, 2015: 12-14.
- ZHANG D L, ZHANG J B, HU Y X. Introduction to Optoelectronic Devices [M]. Huazhong University of Science and Technology Press, 2015: 12-14.

## 作者简介



**徐兴明** (通信作者), 2019年于华北电力大学(保定)获得学士学位, 现为华北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为发电过程状态检测与优化控制。

E-mail: 15231252219@163.com

**Xu Xingming** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from North China Electric Power University (Baoding) in 2019. He is currently a master student at North China Electric Power University. His main research interests include power generation process condition monitoring and optimization control.



**牛玉广**, 1983年于武汉水利电力学院获得学士学位, 1988年于华北电力学院获得硕士学位, 1997年于华北电力大学获得博士学位, 现为华北电力大学教授、博士生导师, 主要研究方向为发电过程状态监测与优化控制、控制系统故障检测与诊断。

E-mail: nyg@ncepu.edu.cn

**Niu Yuguang** received his B. Sc. degree from Wuhan Institute of Water Conservancy and Electric Power in 1983, received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from North China Electric Power University in 1988 and 1997, respectively. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at North China Electric Power University. His main research interests include power generation process condition monitoring and optimization control, control system fault detection and diagnosis.



**胡博**, 1995年于华北电力大学获得学士学位, 2006年于华北电力大学获得硕士学位, 2013年于华北电力大学获得博士学位, 现为国网辽宁省电力有限公司科技互联网部主任。

E-mail: dianlihubo@sina.com。

**Hu Bo** received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from North China Electric Power University in 1995, 2006, and 2013, respectively. He is currently the director of internet department at State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd.