

飞灰含碳量微波频率响应特性研究*

牛玉广^{1,2}, 彭 范¹

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院 北京 102206; 2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室 北京 102206)

摘要:为了提高微波法检测飞灰含碳量的精度,填补宽频范围飞灰电磁参数测量空白,采用了同轴传输线法和同轴探头法,分别研究了3~18 GHz,不同含碳量飞灰对应的S参数和复介电常数的频率响应特性。实验结果表明,在3~18 GHz,含碳量大于7%的范围内, S_{21} 和飞灰含碳量之间有良好的线性关系,拟合度大于0.96,测量灵敏度和频率呈正相关。在10~18 GHz,飞灰含碳量和介电常数 ϵ' 具有很好的线性关系,拟合度大于0.98,相对不确定度在4%以下。另外,从测试不确定度和测量方式分析了 S_{11} 和损耗因子的结果规律性和重复性不好的原因。

关键词:飞灰含碳量;频率响应;S参数;复介电常数

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

Microwave frequency response characteristic of fly ash with different carbon content

Niu Yuguang^{1,2}, Peng Fan¹

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

Abstract: In order to improve the detection precision of fly ash carbon content using microwave method and fill the blank of fly ash electromagnetic parameter measurement in broadband, the coaxial transmission line method and coaxial probe method are used to study the frequency response characteristics of the S parameter and complex dielectric constant of fly ash with different carbon contents in the frequency range of 3~18 GHz in experiment, respectively in this paper. The experiment results show that in the frequency range of 3~18 GHz and carbon content of greater than 7%, there is a good linear relationship between S_{21} and carbon content, the fitness degree is greater than 0.96, and the measurement sensitivity is positively correlated with frequency. In the frequency range of 10~18 GHz, the carbon content and dielectric constant ϵ' show a good linear relationship, the fitting degree is greater than 0.98. The relative uncertainty is below 4%. In addition, the reason for the poor regularity and repeatability of the S_{11} and loss factor measurement results are analyzed from the test uncertainty and measurement methods.

Keywords: carbon content in fly ash; frequency response; S-parameter; complex dielectric constant

0 引 言

电站锅炉主要的发电形式为燃煤发电,燃煤发电过程中,煤粉在锅炉中燃烧,将化学能转化为电能,燃烧会产生大量的烟气,其中含有大量的固体颗粒,称为飞灰,占燃烧总灰量的75%~90%^[1]。而飞灰中含有一些未燃尽的碳粒子,飞灰含碳量是电站锅炉燃烧优化的重要

检测参数。目前国内电厂大多使用离线化验测量飞灰含碳量,部分电厂也采用了一些微波式在线检测装置。此类装置多采用自由空间法进行测量,其发射和接收装置均为喇叭天线,其检测精度受到许多方面的因素影响,如煤种变化、测量方式、样品浓度等^[2]。除了上述的影响因素外,工作频率的选择也十分重要,天线的频率范围大多只能覆盖一个微波频段或者更小,飞灰含碳量的微波频率响应在其他频段情况不得而知。目前对微波工作频率

的研究很少,多数文献都是基于经验选择工作频率。如陈雪平等^[3]将 9.375 GHz 作为微波发射频率,原因是目前国内微波飞灰测试系统大多工作在 X 波段;董卉慎^[4]选择的工作频率为 10 GHz,理由是目前国内 10 GHz (波长 3 cm) 的微波振荡器应用非常普遍,性价比高;而李强等人^[5]选择的频率是 35 GHz (波长 8 mm),原因则是更高的频率可以提高测量精度和 8 mm 振荡器件比较成熟;谭厚章等人^[6]研究了 1.0~4.0 GHz 范围内的微波功率衰减和飞灰含碳量关系特性,提出了随频率的变化,有正比线性、线性不明显和反比线性 3 种现象;而刘海玉人^[7]重点关注了金属氧化物的影响。

在微波材料电磁参数测量中除自由空间法、谐振腔法^[8,9],还有基于传输/反射的同轴空线法^[10-11],基于反射的同轴探头法。此两种方式都具有宽频带的优点,可以覆盖 3~18 GHz 的频率范围,而且它们的校准技术和算法成熟,结果可靠性高^[12-14]。为了填补目前飞灰含碳量在宽频带的测试空白,本文结合两种同轴测量方法,对飞灰含碳量的频率响应进行了大量的实验研究,给微波测量飞灰含碳量的频率选择提供依据。

1 测试方法与样品制备

1.1 微波测碳的原理及实验参数选择

煤中的碳在高温(约为 900℃)、缺氧环境下将变成具有高电导率的石墨形态碳粒子,这些碳粒子的导电性很好,而飞灰中其他颗粒的电导率基本为 0^[15]。当存在微波场时,石墨碳粒子在微波照射下产生极化效应,形成偶极子,使飞灰的介电性能发生明显变化。

飞灰是一种混合物质,可以看成将介电常数为 ϵ_2 的石墨碳粒子嵌入介电常数为 ϵ_1 的零灰(完全灼烧,含碳量为 0% 的飞灰)中得到。飞灰中石墨碳粒子的半径在 20~90 μm ,远小于微波波长,忽略散射影响,且石墨碳粒子所占的体积比例 f 很小,稀松的分布于零灰中,可以忽略它们之间的相互作用。复介电常数 ϵ 采用克劳斯修-莫索提方程描述:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_1} = \frac{1 + 2N\alpha/3\epsilon_1}{1 - N\alpha/3\epsilon_1} \quad (1)$$

式中: N 为单位体积内球的个数。

球的极化率 α 为:

$$\alpha = \frac{3\epsilon_1(\epsilon_2 - \epsilon_1)V}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \quad (2)$$

因为:

$$f = NV \quad (3)$$

式中: V 为小球体积。得到有效的介电常数为:

$$\epsilon = \epsilon_1 \frac{1 + 2fy}{1 - fy} \quad (4)$$

$$\text{式中: } y = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1}。$$

当飞灰含碳量变化时,碳粒子所占的体积分数 f 改变,复介电常数随之改变,可以利用这个特征来测量飞灰含碳量。然而从测量的角度来说,复介电常数是材料的固有性质,无法直接测量,而必须首先测量材料的 S 参数,然后利用 S 参数求阻抗参数和波数,再反算出材料的复介电常数。 S 参数如图 1 所示。

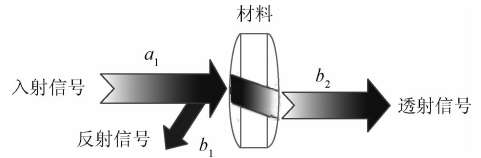


图 1 微波传播示意图

Fig. 1 Microwave transmission schematic diagram

入射微波 a_1 经过介质(即飞灰)的吸收,得到出射波 b_2 ,出射波和入射波之比 $b_2/a_1 = S_{21}$,称为正向复传播系数,其幅值称插入损耗(插损)。反射波与入射波之比 $b_1/a_1 = S_{11}$,即输入反射系数。在材料测试中, S_{21} 表征了物质对微波的吸收作用, S_{11} 表征了物质对于微波的反射情况。

综上所述,飞灰含碳量和复介电常数, S 参数之间的关系如图 2 所示。实验测量了以上参数和飞灰含碳量之间的关系,分析了其微波频率响应。

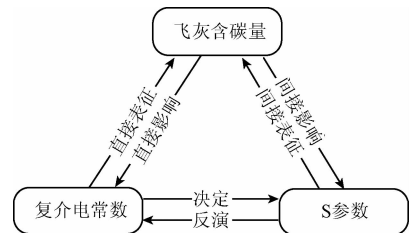


图 2 飞灰含碳量和复介电常数、 S 参数之间的关系

Fig. 2 Relationship diagram among complex dielectric constant, S parameters and fly ash carbon content

1.2 实验方法

为了得到不同测量参数的频率响应,本文构建了基于传输/反射原理的同轴空气线法和基于反射原理的同轴探头法,对飞灰含碳量的介电特性进行了测量。

同轴空气线法的典型测量结构如图 3 所示,待测样品置于一轴段在 X 轴方向的传输线中^[16]。通常用散射方法来分析样品分界面处的电场。假设传输线在 3 个方向上电场分别为 E_1 、 E_{II} 、 E_{III} 。对于一个归一化的入射波,有:

$$E_1 = \exp(-\gamma_0 x) + C_1 \exp(\gamma_0 x) \quad (5)$$

$$E_{II} = C_2 \exp(-\gamma x) + C_3 \exp(\gamma x) \quad (6)$$

$$E_{III} = C_4 \exp(-\gamma_0 x) \tag{7}$$

对于 TEM 模式的同轴传输线有 $\gamma = \frac{j\omega}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}, \gamma_0 =$

$\frac{j\omega}{c}$ 。

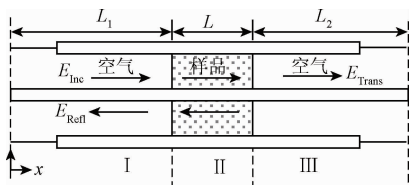


图3 置于传输线中的样品的电磁波传输和反射

Fig.3 Electromagnetic wave transmission and reflection of the sample placed in the transmission line

再结合边界条件求解上述方程,可以得到散射参数:

$$S_{11} = R_1^2 \cdot \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \tag{8}$$

$$S_{21} = R_1 R_2 \cdot \frac{\Gamma(1 - T^2)}{1 - \Gamma^2 T^2} \tag{9}$$

式中: $R_i = \exp(-\gamma_0 L_i), (i = 1, 2)$ 传输系数 $T = \exp(-$

$\gamma L)$, 反射系数 $\Gamma = \frac{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} + 1}$ 。

同轴线空气法的测量需要将灰样加工成圆柱形小环如图4所示,测量系统如图5所示。

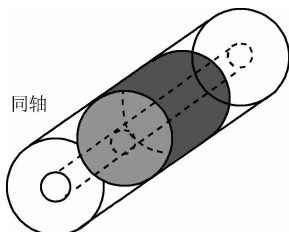


图4 样品环示意图

Fig.4 Schematic diagram of sample ring

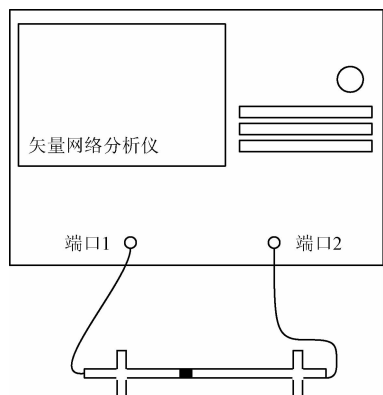


图5 同轴传输线法测量系统

Fig.5 Measurement system for coaxial transmission line method

同轴探头反射测量法有开路 and 短路两种,本文采用开路反射模型。待测样品直接连接到同轴线开路端口^[17]。由于界面两边的阻抗不同,所以电磁波通过接口时,发生反射,测量原理如图6所示。根据界面的反射情况,可以得到同轴孔隙的阻抗 $Z(\epsilon_r)$,介质的复介电常数可以由阻抗推出。测量系统如图7所示。

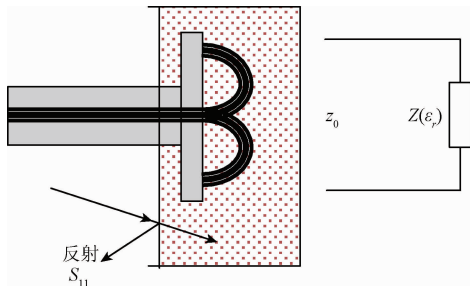


图6 同轴探头法的测量原理

Fig.6 Measurement principle of coaxial probe method

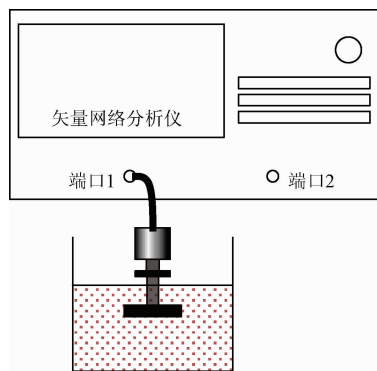


图7 同轴探头法测量系统

Fig.7 Measurement system for coaxial probe method

1.3 样本制备

实验中灰样采集来自一实际电厂,取原始灰样在温度为900℃马弗炉中完全燃烧,得到不含碳的零灰。再将零灰与99.99%的石墨粉混合制备了不同含碳量的灰样,为保证碳分布的均匀性,需要对配置的灰样进行充分搅拌。空气线法需要制作样品环,飞灰粉末难以制成圆环,向其中加入5%的石蜡作为粘接剂。为了保证两者的混合均匀性,采用来“和面”方式,将称量好的固体石蜡和飞灰粉(总质量为0.15 g)放置在研钵中置于70℃温箱熔化石蜡^[18]。再用研棒充分研磨均匀,最后将混合物放入模具,施加相同压力(压力表指针位置在0.5)压成内径3.04 mm圆环,压成的圆环厚度在1.5 ± 0.1 mm。

2 S 参数的结果与分析

测试环境的平均温度和湿度为 23 ± 5℃, 60% ±

3%。在此环境下网络分析仪的温度稳定度为 0.005 dB/°C。温度和湿度的影响可以忽略。

2.1 测量系统的准确性和稳定性分析

同轴空气线法测量 S 参数的误差主要通过校准来消除。网络分析仪校准后, S_{21} 和 S_{11} 测试的不确定度如图 8 所示。

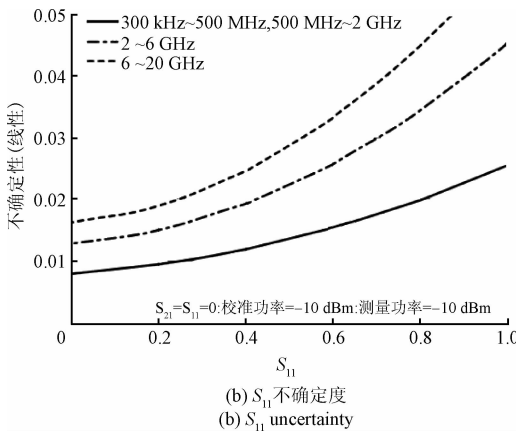
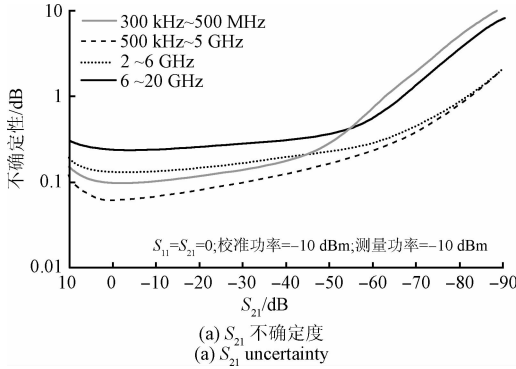


图 8 校准后 S 参数测量不确定度
Fig. 8 S-parameter measurement uncertainty after calibration

对应于本实验的测试范围(见 3.2 节、3.3 节), 在 3~6 GHz, S_{21} 测量不确定度在 ± 0.2 dB 以内, S_{11} 测量不确定度在 0.03~0.045; 6~18 GHz, S_{21} 测量不确定度在 ± 0.3 dB 以内, S_{11} 测量不确定度在 0.03~0.05。

另一误差来源是圆环和空气线之间的间隙, 为了减少这种误差, 本文每个样品都不反复装卸, 防止对环的周围磨损产生空气间隙。

2.2 S_{21} 测量结果与讨论

图 9 所示为不同含碳量样本的频率响应。从图 9 中可以发现, 相同含碳量的飞灰样本, 其测试频率越高, 插入损耗就越大。在本文测试的 3~18 GHz, 没有出现插入损耗 (S_{21}) 更为明显的特征频段, 而是在全频段上插损基本是均匀增大。纵向来看, 随着含碳量的升高, 对应的插入损耗就越大, 这表明 3~18 GHz 的微波都可以用于测量飞灰含碳量。

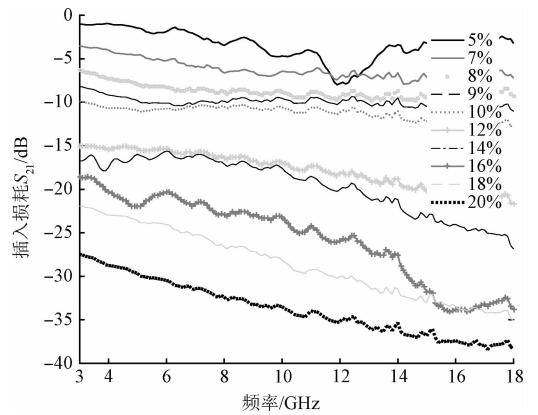


图 9 不同含碳量下 S_{21} 的频率响应
Fig. 9 Frequency responses of insertion loss S_{21} under different carbon contents

3、9、18 GHz 频点下的关系如图 10 所示。图 10 中, 飞灰样本含碳量和插入损耗之间基本成线性关系。

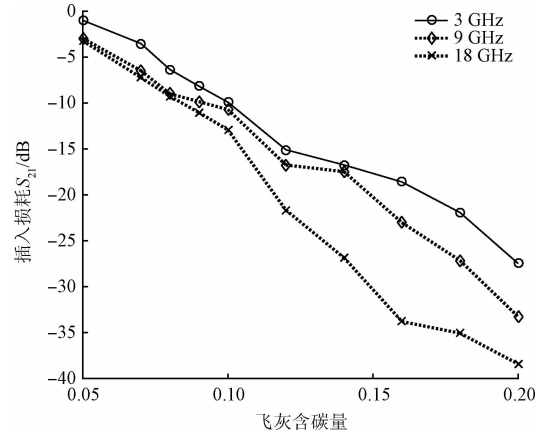


图 10 不同频点下飞灰插入损耗与含碳量之间的关系
Fig. 10 Relationship of fly ash carbon content vs. insertion loss at different frequency points

按照图 10 的数据进行线性拟合, 结果如表 1 所示。从拟合度看, 所有频点的拟合度都维持在 0.98 以上; 从拟合斜率看, 越高的频率对应的斜率越大。斜率的绝对值代表飞灰含碳量每上升一个百分比, 插入损耗增加的 dB 值。所以频率越高, 测量的灵敏度更高。

表 1 不同频率下飞灰插入损耗与含碳量拟合效果

Table 1 Fitting result of insertion loss and fly ash carbon content under different frequencies

| 频率/GHz | 拟合斜率 | 拟合线性度 |
|--------|--------|---------|
| 3 | -169.5 | 0.985 5 |
| 9 | -193.7 | 0.984 8 |
| 18 | -256.5 | 0.980 4 |

本文选择的测试频段和谭厚章等人^[6]选择的频段有部分重合频段。在3~4 GHz,本文测得插入损耗和飞灰含碳量成正比关系,两者的拟合线性度在3~4 GHz内大于0.985,如图11所示。这一趋势和其实验结论存在差异,其文章指出在2.5~4.0 GHz飞灰中碳含量和微波功率衰减没有明显线性关系。该文献采用的是自由空间法进行测试的,由于天线的辐射面积较大,测试空间周围存在反射和绕射,可能会淹没 S_{21} 的变化。同时其样本密度未知,无法推知其含碳量的范围,如果含碳量小于5%,则和本文研究的范围不一致,则也可能出现不同结果。

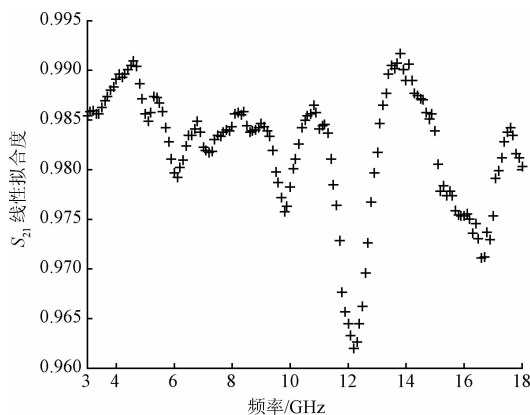


图11 插入损耗 S_{21} 线性拟合度

Fig. 11 Linear fitting degree of insert loss S_{21} in 3 ~ 18 GHz

可以看到前面的研究中飞灰含碳量都高于5%,主要因为在低含碳量的情况下,飞灰粘性差难以制环,并装入同轴线中;且在含碳量很低的范围,对称量的要求很高,称量不准容易造成样品环含碳量的错误,所以本方法只研究了5%以上的含碳量。

2.3 S_{11} 结果分析

不同含碳量下 S_{11} 的频率响应如图12所示。从图12可以看出,除了5%的含碳量对应的 S_{11} 明显分开外,其余的 S_{11} 曲线都相互重合,没有规律。进一步观察,在7%以上的含碳量时,基本上 S_{11} 都维持在0.7以上,最高可达到0.93左右。而且每条曲线之间的距离基本都在0.05之内,3.1节已经指出 S_{11} 的测量不确定度在0.03~0.05。因此,在7%以上反射比较大,不同含碳量之间 S_{11} 的差值和测量不确定度数值相当,难以分辨不同含碳量之间的 S_{11} 值的区别,此时不适合用 S_{11} 来表征飞灰含碳量。

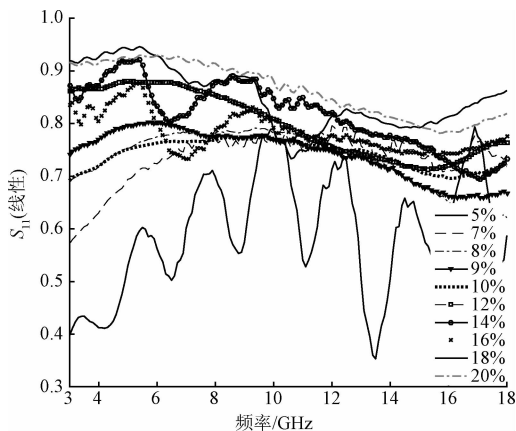


图12 不同含碳量下 S_{11} 的频率响应

Fig. 12 Frequency responses of S_{11} under different carbon contents

3 复介电常数结果分析

同轴传输线法主要分析了 S 参数频率响应情况。本节将分析由探头法得到的不同灰样的复介电常数的频率响应。

3.1 测量系统的准确性和稳定性分析

在连接同轴探头后,反射面延伸至法兰盘和被测物质接触面,测量的反射系数 Γ_m 和探头终端的实际反射系数 Γ_a 有一定的差异^[19]。两者关系为:

$$\Gamma_m = e_d + \frac{e_r \Gamma_a}{1 - e_s \Gamma_a} \quad (10)$$

式中: e_d 为有限方向性误差, e_r 为频率跟踪误差, e_s 为等效源失配误差。为了消除这3项误差,采用3种标准件校准,分别为空气开路件,短路件和蒸馏水。经过校准后,经过一段时间再次测量纯水,介电常数的测量偏差均在 $\pm 5\%$ 以内。

在校准后,同轴探头法的主要误差来源在于电缆的稳定性,探头和样品之间的间隙,以及样品厚度。

为了保证电缆的准确性,本文采用铁架台夹持同轴电缆,在更换灰样时采用下方的升降台,保证电缆在测试过程中完全固定,不产生移动。测试的实物如图13所示。

此外,实验中每份灰样都保证质量一致,压实到烧杯的相同刻度线处,保证其堆积密度相同。再通过升降台每次升到同一位置,保证到达没过探头表面5 mm位置。这样就有效地消除了样品探头之间的空气间隙,保证了测试条件的一致性。

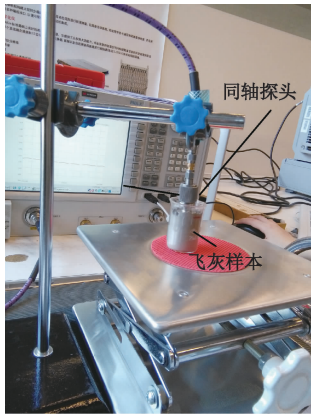


图 13 测试实物
Fig. 13 Testing photo

最后因为采用开路反射测量方式, 需要保证探头发射出微波信号只和样品作用, 不会穿透样品底部被样品容器反射。所以理论上要求样品半无限大, 实际测量时样品厚度最小值 t_{\min} 为:

$$t_{\min} = \frac{20}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (11)$$

因为 $\epsilon_r > 1$, 所以 $t_{\min} < 20$ mm, 典型的厚度为 1 cm, 实际采用的样品厚度为 4 cm。

3.2 复介电常数测量结果与讨论

不同含量下介电常数和损耗因子如图 14 和 15 所示。在测试频段上, 介电常数和损耗因子都随含碳量增大而增大。

从图 14 和 15 中可以看到, 介电常数 ϵ' 无论在哪种含碳量时都是随频率增大单调下降的。损耗因子 ϵ'' 在含碳量在 12%、15% 时也是如此。但含碳量在 10% 以内则先增大后减小, 拐点频率都在 8.5 GHz 附近。

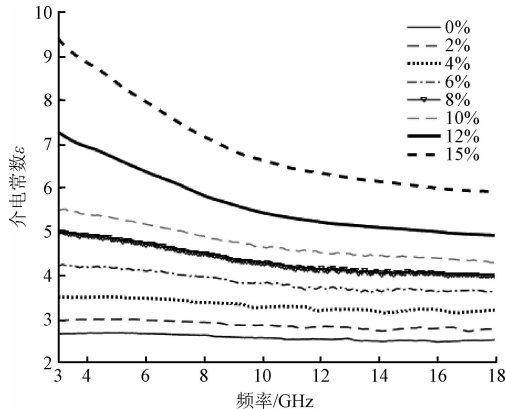


图 14 不同含碳量下介电常数的频率响应
Fig. 14 Frequency responses of dielectric constant under different carbon contents

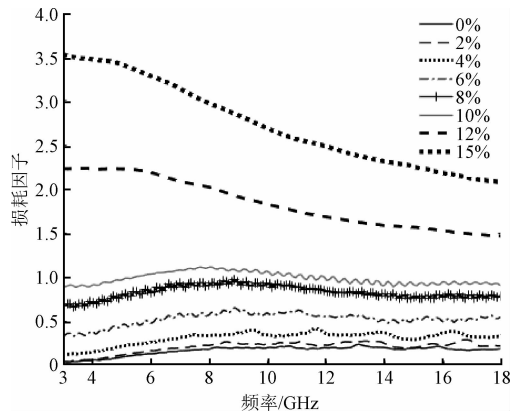


图 15 不同含碳量下损耗因子的频率响应
Fig. 15 Frequency responses of loss factor under different carbon contents

图 16 所示为电介质的频率响应模型^[20]。在微波段, 偶极子是引起复介电常数变化的主要原因。

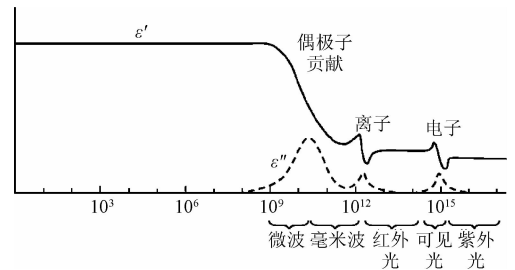


图 16 电介质的频率响应

Fig. 16 Frequency response of dielectric medium

飞灰的介电常数 ϵ' 和上面的模型吻合地很好, 说明偶极子弛豫是引起 ϵ' 变化的主要因素。

而损耗因子却和上述模型不完全吻合, 飞灰的损耗因子主要由两部分构成:

$$\epsilon'' = \epsilon''_d + \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (12)$$

式中: ω 为工作频率。

第 1 项 ϵ''_d 为电介质损耗, 主要由偶极子弛豫引起。而第 2 项为电导率损耗, 在含碳较低时, ϵ''_d 占主要作用, 所以损耗因子先增大后减小。而当含碳量超过 10% 后, 石墨的导电特性导致电导率增大, 此时 $\sigma/\omega \epsilon_0$ 占主要作用, 导致 ϵ'' 和频率成反比。

不同频率下复介电常数和飞灰含碳量的关系如图 17 所示, 不同频率下损耗因子和飞灰含碳量关系如图 18 所示。

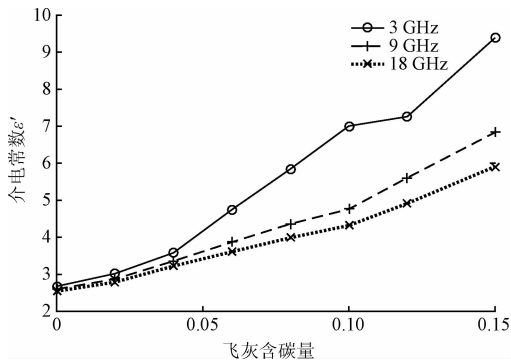


图 17 不同频率下介电常数和飞灰含碳量的关系
Fig. 17 Relationship of dielectric constant vs. fly ash carbon content under different frequencies

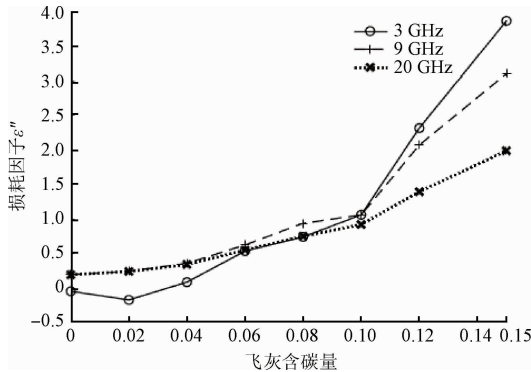


图 18 不同频率下损耗因子和飞灰含碳量的关系
Fig. 18 Relationship of loss factor vs. fly ash carbon content under different frequencies

根据图 17、18 中数据拟合效果如表 2 所示。可以看出在 3、9、18 GHz, 介电常数 ε' 和飞灰含碳量呈很好的线性关系。从斜率看, 频率越高, 单位含碳量变化带来的介电常数的变化越小, 灵敏度越低。损耗因子 ε'' 的整体拟合效果不如介电常数 ε' 。

表 2 不同频率下介电常数和飞灰含碳量的拟合效果

Table 2 Fitting result of dielectric constant vs. fly ash carbon content under different frequencies

| 频率/GHz | ε' | | ε'' | |
|--------|----------------|-------|-----------------|-------|
| | 线性拟合度 | 拟合斜率 | 线性拟合度 | 拟合斜率 |
| 3 | 0.979 1 | 45.65 | 0.847 4 | 24.97 |
| 9 | 0.974 7 | 27.64 | 0.862 4 | 18.51 |
| 18 | 0.979 6 | 21.79 | 0.920 6 | 11.70 |

在 3~18 GHz 介电常数 ε' , 损耗因子 ε'' 和飞灰含碳量的拟合直线的线性度如图 19 所示。可以看到介电常数 ε' 的线性拟合度在 0.98 附近。在 5~8 GHz 持续增长, 8 GHz 以后维持在 0.98 以上。而损耗因子的线性拟合度趋势和 ε' 一样, 但是拟合度不如 ε' 好。

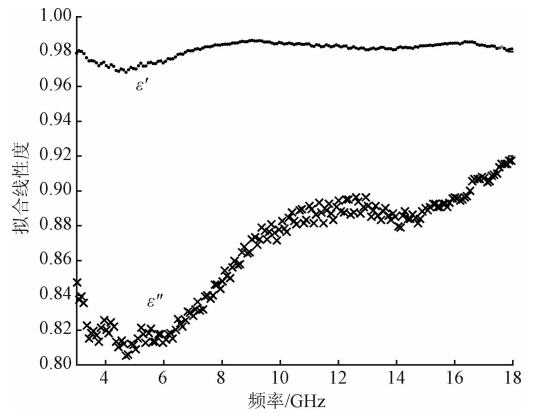


图 19 复介电常数线性拟合度
Fig. 19 Linear fitting degree of complex dielectric constant

3.3 重复性实验及误差分析

为了检验实验数据的可靠性, 分别选择了 0%、2%、6%、10%、15% 的 5 个样本进行了重复性实验。对这些样本进行了 4 次测量。不考虑测试的 B 类不确定度, 对介电常数的测量符合独立等精度的要求。则 ε' 的实验标准差即为 A 类不确定度^[21-23], 分别计算出测量数据的均值和标准差, 得到 ε' 的相对不确定度如图 20 所示。

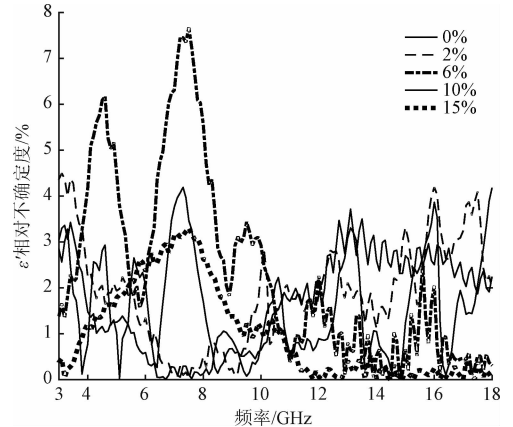


图 20 介电常数 ε' 的相对不确定度
Fig. 20 Relative uncertainty of dielectric constant ε'

在 8 GHz 以内, ε' 测量的相对不确定度波动较大, 最大达到 7.5% 的, 在大于 9 GHz 以后测量的相对不确定度在 4% 以内。

损耗因子 ε'' 的分析也类似, 发现在含碳量为 10% 和 15% 时, ε'' 的测量不确定度在 4% 以内; 而含碳量小于 10% 时测量重复性较差, 相对不确定度在 10% 以上。因为在低含碳量时, 飞灰的损耗因子很小, 基本都小于 0.8, 此时飞灰是一种低损耗的介质; 在含碳量大于 10% 以后, 其损耗因子迅速增大, 此时趋向于高损耗介质。而探头法是基于反射的测试方式, 更适合于测量高损耗的介

质,因此高含碳量飞灰的损耗因子测量重复性明显优于低含碳量的情况。

4 结 论

本文采用的同轴空气线法和同轴探头法两种校准技术成熟、测量精度高的方法,对飞灰含碳量频率响应特性进行了研究,补全了 3 ~ 18 GHz 的宽频段内飞灰含碳量电磁参数的测量空白。在 3 ~ 18 GHz,不同含碳量的飞灰插入损耗 S_{21} 随频率增大而减小,没有特征频段, S_{11} 维持在 0.5 以上,部分达到 0.8 ~ 1。介电常数 ϵ' 都随频率增大而减小后趋于稳定,主要是由偶极子弛豫引起。损耗因子 ϵ'' 则在含碳量小于 10% 时,偶极子弛豫主导, ϵ'' 先增大后减小;含碳量大于 10% 以后,电导率主导, ϵ'' 随频率增大单调减小。

综合测试结果可以得到:在 3 ~ 18 GHz,含碳量大于 7% 的范围内, S_{21} 和飞灰含碳量之间有良好的线性关系,拟合度大于 0.96,测量灵敏度和频率呈正相关。在 10 ~ 18 GHz,飞灰含碳量和介电常数 ϵ' 具有很好的线性关系,拟合度大于 0.98,相对不确定度在 4% 以下。在含碳量大于 7% 时, S_{11} 值较大,测量不确定度会带来很大影响,无法判断 S_{11} 和飞灰含碳量之间的关系。在含碳量低于 10% 时, ϵ'' 测量不确定度很大,分析认为低含碳量的飞灰为低损耗介质不合适探头法测量。

除此之外,还对比了文献[6]测量结果的不同,分析了不同结果可能是由于测量方式和含碳量范围不同造成的。

参考文献

- [1] 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.
FU Y C. The study of the unburned carbon microwave detection technology[D]. Beijing: North Electric Power University, 2016.
- [2] 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 X, ZHOU H, CEN K F. 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.
- [3] 陈雪平,贾宝富. 微波测碳仪的技术现状及展望[J]. 西北电力技术,2005,33(2):34-36.
CHEN X P, JIA F B. The Present situation and prospect of microwave carbon meter[J]. Northwest China Electric Power, 2005, 33(2):34-36.
- [4] 董卉慎. 微波在损耗媒质中的传播特性研究及应

用[D]. 长沙:湖南大学,2007.

DONG H SH. Research on propagation characteristics of microwave in dissipation media [D]. Changsha: Hunan University, 2007.

- [5] 李强,宣益民,冯长青,等. MCE-1 型烟道式飞灰含碳量在线测量系统的研制[J]. 工程热物理学报,2003,24(3):523-526.
LI Q, XUAN Y M, FENG CH Q, et al. Research on MCE-1 carbon content of fly ash on-line measurement system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(3):523-526.
- [6] 谭厚章,高骥,刘海玉,等. 飞灰含碳量与微波功率衰减关系特性的实验研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(3):533-536.
TAN H ZH, GAO Q, LIU H Y, et al. Characteristic relation between carbon content in fly ash and attenuation of microwave [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(3):533-536.
- [7] 刘海玉,景博,樊保国,等. 低频下飞灰中金属氧化物介电特性研究[J]. 工程热物理学报,2014,35(4):801-805.
LIU H Y, JIN B, FAN B G. Research on dielectric property of the metal oxides on fly ash at low frequency [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(4):801-805.
- [8] 魏勇,余厚全,戴家才,等. 基于 CPW 的油水两相流持水率检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(6):1506-1515.
WEI Y, YU H Q, DAI J C, et al. Water holdup measurement of oil-water two-phase flow based on CPW[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2017,38(6):1506-1515.
- [9] 王益,张翠翠,王建忠,等. 闭式谐振腔法微波介质陶瓷介电常数测量[J]. 仪器仪表学报,2017,38(10):2500-2507.
WANG Y, ZHANG C C, WANG J ZH, et al. Permittivity measurement of microwave dielectric ceramics using shielded-cavity method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2017,38(10):2500-2507.
- [10] 薛冰,纪奕才. 基于同轴谐振腔法的材料电参数测量[J]. 电子测量技术,2017,40(4):43-46.
XUE B, JI Y C. Measurement of electrical parameters of material based on coaxial resonant cavity method [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(4):43-46.
- [11] 任水生. 微波板材介电常数 ϵ 的测量方法[J]. 国外电子测量技术,2014,33(3):38-41.
REN SH SH. Method about how to measure ϵ of microwave printed board [J]. Foreign Electronic

- Measurement Technology, 2014, 33(3):38-41.
- [12] 吴俊军. 开口同轴法测试岩石电性参数的方法研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
WU J J. Open-ended coaxial line method for measuring electrical parameters of rock sample [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [13] 邹大军,李锡文,张嘉琪,等. 一种粉末相对介电常数测试方法与装置的研究[J]. 仪器仪表学报,2014, 35(2):368-373.
ZHOU D J, LI X W, ZHANG J Q, et al. Study on a testing method and device for powder relative dielectric constant [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(2):368-373.
- [14] 董政洁,刘桂礼,王艳林,等. 基于S参数传输法的石英晶体静电容测量[J]. 仪器仪表学报,2011, 32(4):892-897.
DONG ZH J, LIU G L, WANG Y L, et al. Quartz crystal static capacitance measurement based on s parameter transmission method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4):892-897.
- [15] 徐樑,刘海玉,金燕,等. 不同制焦条件下煤焦的介电特性研究[J]. 热力发电,2015(4):11-16.
XU L, LIU H Y, JIN Y et al. Study on the dielectric properties of coal coke under different focal conditions[J]. Thermal Power Generation, 2015(4):11-16.
- [16] 赵才军,蒋全兴,景莘慧. 改进的同轴传输/反射法测量复介电常数[J]. 仪器仪表学报,2011,32(3):695-700.
ZHAO C J, JIANG Q X, JING SH H. Determining complex permittivity with improved transmission / reflection method using coaxial line[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011,32(3):695-700.
- [17] 张康,武彤,滕俊恒. 开口同轴探头横电磁波模型法测量液体复介电常数[J]. 电子测量与仪器学报,2015, 29(7):945-952.
ZHANG K, WU D, TENG J H. Transverse electromagnetic model based open-ended coaxial probe technique for liquid complex dielectric constant measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7):945-952.
- [18] 陈维,姚熹,魏晓勇. 同轴传输反射法测量高损耗材料微波介电常数[J]. 功能材料,2005, 36(9):1356-1358.
CHEN W, YAO X, WEI X Y, et al. Measurement of microwave dielectric constant of high loss material by coaxial transmission reflectometry [J]. Functional Materials, 2005, 36(9):1356-1358.
- [19] 吴俊军,刘四新,董航,等. 基于开口同轴法的岩矿石样品介电常数测试[J]. 地球物理学报,2011,54(2):457-465.
WU J J, LIU S X, DONG H, et al. Permittivity measurement for rock and ore samples by open-ended coaxial method[J]. Journal of Geophysics, 2011, 54(2):457-465.
- [20] CHEN L F, ONG C K, VARADAN V V, et al. Microwave electronics measurement and material characterization[M]. Newyork: John Wiley & Sons Ltd, 2004:12-13.
- [21] 李慎安. 测量仪器示值误差不确定度与最大允许误差[J]. 中国计量,2003,8(8):66-67.
LI SH AN. Uncertainty and maximum allowable error of indication error of measuring instrument [J]. China Metals, 2003, 8(8): 66-67.
- [22] 崔学林,梁宝龙,黄斌,等. 湿度传感器测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报,2015, 29(10):1544-1549.
CUI X L, LIANG B L, HUANG B, et al. Measurement uncertainty estimation and analysis based on accuracy theory [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(10):1544-1549.
- [22] 崔明涛,田芳,李玉全,等. 差压补偿液位测量的不确定度评定方法研究[J]. 仪器仪表学报,2016,37(7):1524-1531.
CUI M T, TIAN F, LI Y Q, et al. Research on uncertainty evaluation of the compensated differential pressure level measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(7):1524-1531.

作者简介



牛玉广,1983年于武汉水利电力学院获得学士学位,分别在1988年和1997年于华北电力学院获得硕士学位和博士学位,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分析诊断。

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. and Ph. D. degrees both from North China Electric Power Institute in 1988 and 1997, respectively. Now he is a professor and doctoral supervisor in North China Electric Power University. His main research direction is power generation process condition monitoring and optimization control, control system fault detection and diagnosis.