

王晴东,王光华,陈彪,等.东胜褐煤与 Yallourn 褐煤热解过程中微波吸收特性[J].煤炭学报,2016,41(6):1540–1545. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1674

Wang Qingdong, Wang Guanghua, Chen Biao, et al. Microwave absorption characteristics of Dongsheng lignite and Yallourn lignite during pyrolysis process [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1540–1545. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2015.1674

东胜褐煤与 Yallourn 褐煤热解过程中微波吸收特性

王晴东,王光华,陈彪,王国成,王世杰

(武汉科技大学 化学工程与技术学院 湖北 武汉 430081)

摘要:利用微波网络分析仪测量 S_{11} 和 $\psi_{S_{11}}$ 参数,结合人工神经网络模型的计算方法,获取了 2 450 MHz 微波频率下,内蒙东胜褐煤与澳大利亚 Yallourn 褐煤在室温至 800 °C 热解过程中的相对介电系数,并用其来表征 2 种褐煤热解过程中的微波吸收特性。结合热失重实验数据分析发现:热解开始温度之前,DS 与 YL 褐煤的吸波特性参数 ε' 、 ε'' 及 $\tan \delta$ 数值接近,均处于较低水平,且随温度的上升仅有极小幅度增长。热解开始温度至热解结束温度阶段,2 种褐煤的吸波特性参数 ε' 、 ε'' 及 $\tan \delta$ 数值随温度的升高均迅速上升,并在热解结束温度附近时达到峰值;DS 褐煤的相关数值增长速率和幅度均比 YL 褐煤大。热解结束温度之后,各项吸波特性参数出现小幅度下降。实验表明,2 450 MHz 微波频率下东胜褐煤比 Yallourn 褐煤具有更好的吸波能力,高温热解后,褐煤的微波吸收能力得到有效增强。

关键词:褐煤;热解;微波;介电系数

中图分类号: TQ530.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2016)06-1540-06

Microwave absorption characteristics of Dongsheng lignite and Yallourn lignite during pyrolysis process

WANG Qing-dong, WANG Guang-hua, CHEN Biao, WANG Guo-cheng, WANG Shi-jie

(School of Chemical Engineering and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Parameters S_{11} and $\psi_{S_{11}}$ were obtained by measurement using a microwave network analyzer. Dongsheng lignite (DS) from Inner Mongolia and Yallourn lignite (YL) from Australia were examined by means of ANN computation techniques, and their relative dielectric coefficients from room temperature to 800 °C pyrolysis process at 2 450 MHz microwave frequency were acquired. The coefficients are used to characterize the microwave absorption properties of the two lignite in the pyrolysis process. The analysis of the weight loss test data suggest that: Before the initial pyrolysis temperature, DS lignite and YL lignite behave very similarly in terms of ε' , ε'' , and $\tan \delta$ values, all at a low level and showing a very slight growth as the temperature increases. At the stage from the initial pyrolysis temperature to the pyrolysis end temperature, their characteristic parameters ε' , ε'' , and $\tan \delta$ increase dramatically with the temperature and reach a peak value in the neighborhood of the pyrolysis end temperature; however, the parameters of DS lignite grow both quicker and more appreciably than for YL lignite. All the wave absorption parameters decline slightly after the pyrolysis end temperature. The experiments show that Dongsheng lignite has a better microwave absorption capability than Yallourn lignite, and that capability can be obviously intensified by high temperature pyrolysis.

收稿日期: 2015-11-06 修回日期: 2016-01-26 责任编辑: 张晓宁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174149)

作者简介: 王晴东(1982—),男,湖北宜昌人,博士研究生。Tel: 027-68862870, E-mail: cnwqd@163.com。通讯作者: 王光华(1953—),男,山东淄博人,教授,博士生导师。Tel: 027-68862870, E-mail: wghuah@163.com

Key words: lignite; pyrolysis; microwave; permittivity

据最新统计,截至2013年底,全球褐煤可开采储量约2 011亿t,约占全球煤炭全部可开采储量的22.5%^[1]。但作为一种煤化程度较低的煤种,褐煤由于高水分、高灰分、低热值、易自燃的特点,使得其综合利用面临许多困难。

近年来,煤的微波热解作为一种新型的煤炭清洁利用技术,以其传热规律独特、热解过程易于调控、目标产物收率高、热解尾气中氢气、甲烷和一氧化碳组分含量高等优势^[2],吸引了学者对其越来越多的关注。尽管褐煤热解过程的各种影响因素,如热解温度^[3]、升温速率^[4-5]、煤颗粒大小^[6]、催化剂的添加^[7-10]、不同热解方法以及产物组成的影响^[11]都得到了广泛的研究,但是,褐煤热解过程中微波吸收能力的研究结果却鲜有报道。

物质的微波吸收能力取决于其介电特性^[11],而介电特性通常由介电系数 ε 来表现^[13]。

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r = \varepsilon_0 (\varepsilon_r' - i\varepsilon_r'') \quad (1)$$

其中 ε_0 为真空介电常数,取 8.854×10^{-12} F/m; ε_r 为复相对介电系数; i 为虚数单位, $i^2 = -1$; ε_r' 为实部; ε_r'' 为虚部。由于绝大多数物质介电系数 ε 的值均非常小,因此,实际应用中多采用复相对介电系数 ε_r 来表现物质的介电特性。 ε_r 由实部 ε_r' 及虚部 ε_r'' 两部分组成,实部 ε_r' 通常称为介电常数,用来反应电介质对电场能量的储存能力;虚部 ε_r'' 通常称为 ε_r' 介电损耗因子,用来反应电场能量在电介质中的损耗^[14]。对一般的非磁性介质而言, ε_r'' 的大小决定了其在微波场中的升温速率^[15]。

传统微扰法测量介电系数,要求试样体积足够小,才能获得较为准确的结果。而褐煤在高温条件下发生热解,产生热解气,煤样孔隙结构和体积均产生较大变化,导致难以在高温条件下准确测量其介电系数。因此,大多数实验结果为室温至200℃范围内的介电系数数据。S. Marland^[16]采用圆形谐振腔法,测

量了40~180℃范围内8种不同煤化度的英国煤样的介电系数。并分析了煤样水分、灰分含量的影响。Haiyu Liu等^[17]采用同轴线的测试方法,测量了经石蜡固定的煤样及在850,1 300和1 600℃下获取的焦样在室温下的介电系数。Qiuying Wang等^[18]采用平板电容法在常温下测量了煤样微波干燥过程中不同水分含量下的介电系数,并建立了相应的数学模型。然而,煤的热解温度通常均高达600~1 300℃,在此温度区间,不仅煤的分子结构发生了巨大变化^[19],而且所处温度也对介电系数有巨大影响。继续沿用低温状态下的介电系数数据进行相关分析,必然会产生较大偏差。

利用微波网络分析仪测量装满褐煤样品的特定金属容器的 S_{11} 和 $\psi_{S_{11}}$ 参数,然后通过人工神经网络计算模型来获得物质介电系数的方法,具有测量快速、准确度高、温度适应范围宽等优点,近年来在有机溶液、陶瓷材料等介质介电系数的测量上取得了很好的效果^[20-21]。本文通过对褐煤样的预先处理,将优化驯化后的人工神经网络模型用于内蒙东胜褐煤与澳大利亚Yallourn褐煤热解过程的介电系数测量,并用其来表征2种褐煤热解过程中的微波吸收特性。所用微波频率为加热最常用的2 450 MHz。

1 实 验

1.1 煤 样

Yallourn褐煤(YL)产自澳大利亚Latrobe峡谷,是世界上储量最丰富的优质褐煤矿区之一;东胜褐煤(DS)产自中国内蒙古,是中国储量最丰富的褐煤矿区之一,因此,选取这2种具有代表性的褐煤作为研究对象。2种褐煤的工业分析及元素分析及灰分分析见表1。实验前,所有褐煤样均被破碎至3 mm以下,并于真空干燥箱中在105℃下干燥15 h后,密封备用。

表1 褐煤样的工业分析、元素分析与灰分分析

Table 1 Proximate, ultimate analyses and ash analysis of samples

%

煤样	工业分析			元素分析					灰分分析							
	M_{ad}	A_d	V_{daf}	C_{daf}	H_{daf}	O_{daf}	N_{daf}	S_{daf}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
DS	18.48	11.43	41.37	69.59	5.22	22.08	1.51	0.72	38.78	17.65	9.56	21.05	1.58	0.32	2.4	8.66
YL	60.42	1.56	51.37	67.14	4.78	25.57	1.02	0.2	26.37	8.82	20.54	6.04	13.95	6.41	0.27	17.6

1.2 介电特性参数测量

煤样预热装置及介电系数测量装置如图1、2所

示。将内径100 mm、外径106 mm、高100 mm的金属罐(图2(b))置于直径150 mm、高200 mm的石英烧

杯中,然后将石英烧杯用需要测量的褐煤样装至 170 mm,褐煤样堆密度控制在 0.6 g/cm^3 左右(工业化应用中通常值)。将石英烧杯盖好密封,置于加热炉中以 $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$ 的升温速率加热至设定的测量温度,并保持 1.5 h,使褐煤样在该温度下充分热解。加热过程中,始终保持 1.0 L/min 的 N_2 通过,将褐煤热解气带出。加热完毕后,迅速从石英烧杯中取出金属罐,放入事先准备好的保温套,并盖上金属盖,插入与网络分析仪相连的同轴探针(图 2),测量该温度下的 S_{11} 和 $\psi_{S_{11}}$ 参数。由于测量过程仅需 5~10 s 即可完成,且金属罐有保温套包覆,因此测量过程中散热而导致温度降低造成的误差较小。

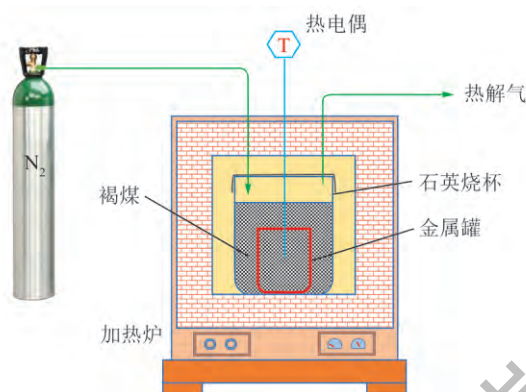
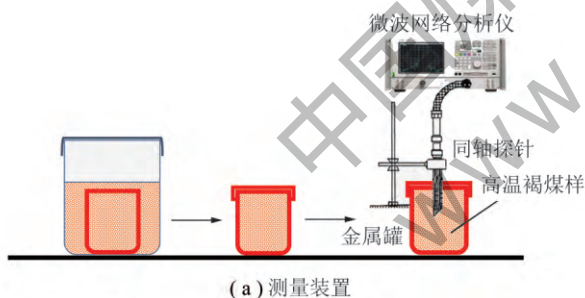


图 1 褐煤样预热解装置示意

Fig. 1 Pre-pyrolyzation device of lignite



(a) 测量装置



(b) 测量用金属罐与同轴探针

图 2 反射系数 S_{11} 和 $\psi_{S_{11}}$ 测量系统

Fig. 2 S_{11} & $\psi_{S_{11}}$ measurement system

DS 与 YL 两种褐煤样在 100、200、300、400、500、600、700 和 800 $^\circ\text{C}$ 下的介电系数均采用干燥好的新褐煤样,按上述方法重新加热后,进行测量。褐煤样在室温下的数据无需加热,在金属罐中直接测量。

将测量得到的 S_{11} 和 $\psi_{S_{11}}$ 参数,利用预先经过大量介质材料驯化好的人工神经网络计算模型进行处理^[20](图 3),得到所需的介电系数。计算模型的驯化精度为测量误差 $\pm 3\%$ 以内。

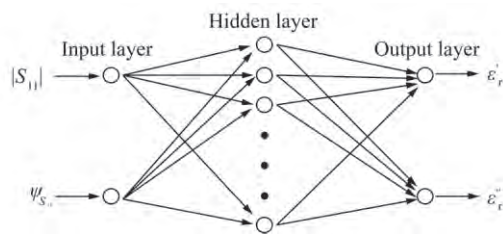


图 3 人工神经网络计算模型处理介电系数过程示意

Fig. 3 Inversion of effective permittivity by trained network

1.3 损耗角正切与透射深度的计算

损耗角正切 $\tan \delta$ 是相对介电损耗因子与相对介电常数的比值(式(1)),用来表征单位体积的介质在单位时间内将电场能转化为热的比率。

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (1)$$

透射深度 D_p 定义为微波功率衰减到物料表面值的 e^{-1} 时,与物料表面之间的距离,是反应物质吸波能力的另外一个重要参量。通过相对介电常数和相对介电损耗因子,透射深度 D_p 可由式(2)^[22-23] 计算得到。

$$D_p = \frac{\lambda_0}{2\pi(2\varepsilon_r')^{1/2}} \left\{ \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\}^{-1/2} \quad (2)$$

式中 λ_0 为微波波长。

1.4 热失重实验

通过 Netzsch STA 449F3 型热重分析仪对 2 种褐煤的热解特性进行研究。实验褐煤样 8 mg,热解气氛为氮气(40 mL/min),升温速率为 $10 \text{ }^\circ\text{C/min}$,记录由室温升至 1 000 $^\circ\text{C}$ 的失重数据。热重分析仪温度精度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,质量灵敏度为 $0.1 \text{ }\mu\text{g}$ 。

2 结果与讨论

2 450 MHz 微波频率下,实验得到的 2 种褐煤相对介电常数及相对介电损耗因子随热解温度的变化曲线如图 4 所示。根据实验结果计算得到的介电损耗角正切随热解温度的变化曲线如图 5 所示。通过对比发现,在这些吸波特性参数上 DS 与 YL 褐煤表现出了相似地变化趋势。大致可以分为 3 个阶段:

(1) 热解温度在室温至 400 $^\circ\text{C}$ 阶段,2 种褐煤的 ε_r' 、 ε_r'' 和 $\tan \delta$ 数值接近,均处于较低水平,且随温度的上升仅有极小幅度增长。

(2) 热解温度在 400~700 $^\circ\text{C}$ 阶段,2 种褐煤的吸波特性参数 ε_r' 、 ε_r'' 和 $\tan \delta$ 数值随温度的升高,均迅速

上升,并在 700 °C 时达到峰值,但 DS 褐煤的相关数值增长速率和幅度均比 YL 褐煤大。

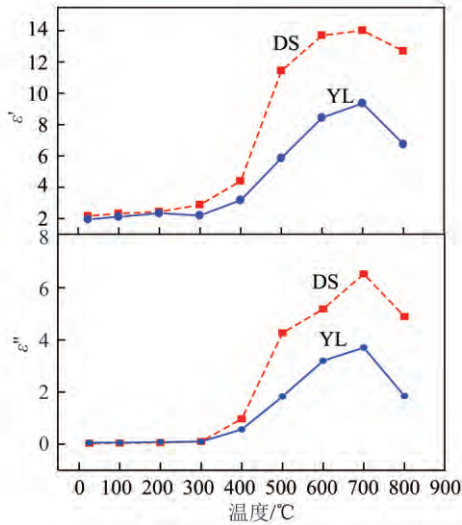


图4 DS与YL褐煤介电特性随温度的变化(2 450 MHz)

Fig. 4 Temperature dependence of dielectric properties of DS & YL lignite (2 450 MHz)

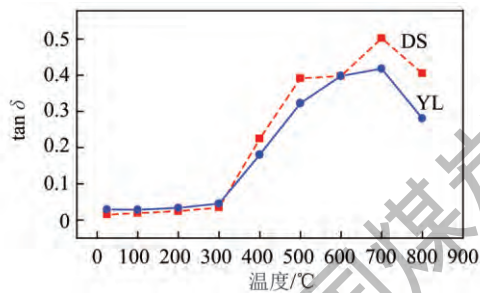


图5 DS与YL褐煤 $\tan \delta$ 随温度的变化(2 450 MHz)

Fig. 5 Temperature dependence of dielectric loss tangent of DS & YL lignite (2 450 MHz)

(3) 热解温度 700 °C 后,各项数值出现小幅度的下降。从相对介电系数的变化规律可以推断,褐煤在 400 ~ 700 °C 的热解阶段,发生了剧烈的结构和特性变化^[24]。

图 6 为通过热失重实验得到的 DS 褐煤与 YL 褐煤热重曲线。可以看出,DS 和 YL 褐煤样 DTG 曲线上均存在 2 个明显的峰。第 1 个峰均位于 100 °C 左右,这是由于煤样中以物理吸附状态存在的水和小分子气体析出引起的^[25-26]。第 2 个失重峰,DS 褐煤峰温位于 450 °C 左右,YL 褐煤峰温位于 420 °C 左右,说明在此温度下褐煤的热解反应达到最剧烈的程度,此时,煤的大分子体系结构被破坏,各种键能较弱的链和官能团脱落,生成大量以二氧化碳、水、短链脂肪烃和甲烷等为主的气态产物^[27]。

从 TG 曲线及 DTG 曲线可以计算得出反映褐煤热解过程的热解特征参数^[28-29],如热解开始温度

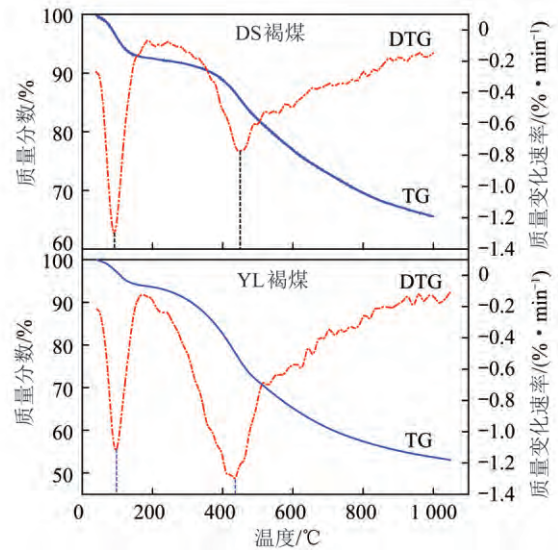


图6 DS与YL褐煤的热失重曲线

Fig. 6 TG & DTG curves of DS and YL lignite

T_{ini} 热解开始温度 T_e 和最大质量变化速率峰温度 $T_{\text{DTG,max}}$ (表 2)。

表 2 褐煤样的热解特征参数

Table 2 Pyrolysis characteristics parameter values of lignite

褐煤样	T_{ini}	$T_{\text{DTG,max}}$	T_e
DS	378	445	681
YL	357	421	652

结合热重分析的数据,对比 DS 和 YL 褐煤的吸波特性参数 ε' 、 ε'' 及 $\tan \delta$ 随温度的变化可以发现,两者具有较明显的相关性。

褐煤作为一种极性固体介质,主要由具有偶极矩的交联大分子组成^[30-31],在微波辐射时,主要以转向极化为主^[32-33]。在开始热解的温度之前(室温至 400 °C 阶段),由于热解反应尚未大量发生,各种分子间作用力和网状交联结构的存在,褐煤分子间的束缚能力较强,分子热运动能也较小,不足以产生整个分子和基团的自由转动,造成转向极化困难,因此 2 种褐煤均表现出较低的介电损耗特征。当褐煤开始发生热解反应后(400 ~ 700 °C 阶段),褐煤大分子结构发生分解,支链大量断裂,分子间束缚能力迅速下降。同时,由于温度的上升,分子热运动能力增强,整个分子和基团能够自由转动,转向极化迅速建立,从而使得其相对介电常数和相对介电损耗因子也迅速大幅上升。热解结束温度 T_e 之后(700 ~ 800 °C 阶段),褐煤的分解反应基本结束,热解失重趋于平缓,褐煤分子片段开始缩聚^[19],分子转动自由度下降,同时,由于温度的进一步升高,分子热运动更加剧烈,阻碍了

极性基团和分子链节在微波电场方向上的定向^[12], 因而 ε' 、 ε'' 在出现峰值后开始下降。

从煤质分析结果可以看出, YL 褐煤的煤化程度比 DS 褐煤稍低, 而根据 Haiyu Liu 等^[17] 的研究结果, 相对介电系数与煤化度具有一定的相关性, 煤化度增高, 相对介电常数和介电损耗因子都有一定程度的增高。因此, DS 褐煤的 ε' 、 ε'' 和 $\tan \delta$ 数值要高于 YL 褐煤。

根据式(2) 计算得到的 2 种褐煤在热解过程中 2 450 MHz 微波的透射深度如图 7 所示。可以发现, 在 400 °C 之前随着热解温度的上升, 微波在 2 种褐煤中的透射深度均急剧下降, 400 °C 后, 透射深度变化不再明显, 并维持在 1~2 cm 的较低水平。这说明通过中高温热解, 可以明显增强褐煤的微波吸收能力。若采用微波作为热源对褐煤进行热解时, 厚度较深的煤样将难以获得较强的微波辐照。

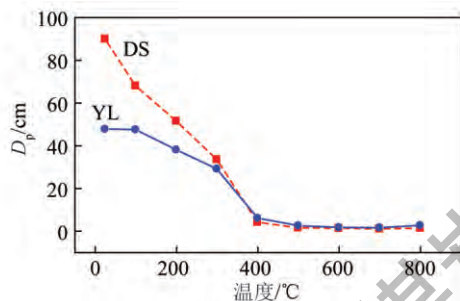


图 7 DS 与 YL 褐煤微波透射深度随温度的变化(2 450 MHz)

Fig. 7 Temperature dependence of microwave penetration depth of DS & YL lignite (2 450 MHz)

3 结 论

(1) 利用微波网络分析仪测量 S_{11} 和 $\psi_{S_{11}}$ 参数, 结合人工神经网络计算模型计算的方法能够较准确地获得高温条件下褐煤的相对介电系数。

(2) 2 450 MHz 微波频率下, 结合热失重实验数据分析发现: 热解开始温度之前, DS 与 YL 褐煤的吸波特性参数 ε' 、 ε'' 和 $\tan \delta$ 数值接近, 均处于较低水平, 且随温度的上升仅有极小幅度增长。热解开始温度至热解结束温度阶段, 2 种褐煤的吸波特性参数 ε' 、 ε'' 和 $\tan \delta$ 数值随温度的升高均迅速上升, 并在热解结束温度附近时达到峰值; DS 褐煤的相关数值增长速率和幅度均比 YL 褐煤更大。热解结束温度之后, 各项吸波特性参数数值出现小幅度的下降, 该变化规律与褐煤分子的热解反应及热运动相关。

(3) 通过高温热解, 可以有效增强褐煤的微波吸收能力。

参考文献:

- [1] BP. BP statistical review of world energy [EB/OL]. <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>.
- [2] 周军, 杨哲, 吴雷, 等. CO₂ 气氛中低变质煤微波热解研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(10): 2465-2471.
Zhou Jun, Yang Zhe, Wu Lei, et al. Study on microwave pyrolysis of low rank coal under CO₂ atmosphere[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2465-2471.
- [3] Li Y, Wang Z, Huang Z, et al. Effect of pyrolysis temperature on lignite char properties and slurrying ability[J]. Fuel Processing Technology, 2015, 134: 52-58.
- [4] Xu C, Xu G, Yang Y, et al. An improved configuration of low-temperature pre-drying using waste heat integrated in an air-cooled lignite fired power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 90: 312-321.
- [5] Zhao H, Yu J, Liu J, et al. Experimental study on the self-heating characteristics of Indonesian lignite during low temperature oxidation[J]. Fuel, 2015, 150: 55-63.
- [6] Patel V R, Upadhyay D S, Patel R N. Gasification of lignite in a fixed bed reactor: Influence of particle size on performance of down-draft gasifier[J]. Energy, 2014, 78: 323-332.
- [7] Kim Y, Park J, Jung D, et al. Low-temperature catalytic conversion of lignite: 1. Steam gasification using potassium carbonate supported on perovskite oxide[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(1): 216-221.
- [8] Kim Y, Park J, Jung D, et al. Low-temperature catalytic conversion of lignite: 2. Recovery and reuse of potassium carbonate supported on perovskite oxide in steam gasification[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(1): 194-201.
- [9] Kim Y, Park J, Jung D, et al. Low-temperature catalytic conversion of lignite: 3. Tar reforming using the supported potassium carbonate[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(1): 9-12.
- [10] Cao J, Huang X, Zhao X, et al. Low-temperature catalytic gasification of sewage sludge-derived volatiles to produce clean H₂-rich syngas over a nickel loaded on lignite char[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(17): 9193-9199.
- [11] He Q, Wan K, Hoadley A, et al. TG-GC-MS study of volatile products from Shengli lignite pyrolysis[J]. Fuel, 2015, 156: 121-128.
- [12] 钟力生. 工程电介质物理与介电现象[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2013.
Zhong Lisheng. Engineering dielectric physics and dielectric phenomena[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2013.
- [13] Giuntini J, Zanchetta J, Diaby S. Characterization of coals by the study of complex permittivity[J]. Fuel, 1987, 66(2): 179-184.
- [14] Lester E, Kingman S, Dodds C, et al. The potential for rapid coke making using microwave energy[J]. Fuel, 2006, 85(14-15): 2057-2063.
- [15] Peng Z, Hwang J, Kim B, et al. Microwave absorption capability of high volatile bituminous coal during pyrolysis[J]. Energy & Fu-

- els 2012 26(8): 5146–5151.
- [16] Marland S. Dielectric properties of coal [J]. Fuel and Energy Abstracts 2002 43(4): 232.
- [17] Liu H ,Xu L ,Jin Y ,et al. Effect of coal rank on structure and dielectric properties of chars [J]. Fuel 2015 ,153: 249–256.
- [18] Wang Q ,Zhang X ,Gu F. Investigation on interior moisture distribution inducing dielectric anisotropy of coals [J]. Fuel Processing Technology 2008 89(6): 633–641.
- [19] 谢克昌. 煤的结构与反应性 [M]. 北京: 科学出版社 2002: 587. Xie Kechang. Coal structure and its reactivity [M]. Beijing: Science Press 2002: 587.
- [20] Chen Q ,Huang K M ,Yang X ,et al. An artificial nerve network realization in the measurement of material permittivity [J]. Progress in Electromagnetics Research 2011 ,116: 347–361.
- [21] Huang K ,Zhu H ,Wu L. Temperature cycle measurement for effective permittivity of biodiesel reaction [J]. Bioresource Technology , 2013 ,131: 541–544.
- [22] Peng Z ,Hwang J Y ,Mouris J ,et al. Microwave penetration depth of materials with non-zero susceptibility [J]. ISIJ Int. 2010 ,50: 1590–1596.
- [23] Kwak M ,Robinson P ,Bismarck A ,et al. Microwave curing of carbon-epoxy composites: Penetration depth and material characterisation [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing , 2015 75: 18–27.
- [24] Peng Z ,Hwang J ,Mouris J ,et al. Microwave absorption characteristics of conventionally heated nonstoichiometric ferrous oxide [J]. Metallurgical and Materials Transactions A ,2011 ,42(8): 2259–2263.
- [25] 朱学栋 ,朱子彬 ,张成芳. 煤热失重动力学研究 [J]. 高校化学工程学报 ,1999 ,13(3): 223–228. Zhu Xuedong ,Zhu Zibin ,Zhang Chengfang. Study of the coal pyrolytic kinetics by thermogravimetry [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities ,1999 ,13(3): 223–228.
- [26] 周静 ,何品晶 ,于遵宏. 用热失重仪研究煤快速热解 [J]. 煤炭转化 2004 27(2): 30–36. Zhou Jing ,He Pinjing ,Yu Zunhong. TG behaviour of coal's fast pyrolysis [J]. Coal Conversion 2004 27(2): 30–36.
- [27] Niu Z Y ,Liu G J ,Yin H ,et al. Investigation of mechanism and kinetics of non-isothermal low temperature pyrolysis of perhydrous bituminous coal by in-situ FTIR [J]. Fuel 2016 ,172: 1–10.
- [28] 张斌 ,刘建忠 ,赵卫东 ,等. 褐煤自然特性热重实验及动力学分析 [J]. 热力发电 2014 43(6): 71–76. Zhang B ,Liu J Z ,Zhao W D ,et al. Thermogravimetric experiments and dynamic analysis on spontaneous combustion characteristics of lignite [J]. Thermal Power Generation 2014 43(6): 71–76.
- [29] Wang S J ,Wu F ,Zhang G ,et al. Research on the combustion characteristics of anthracite and blended coal with composite catalysts [J]. Journal of the Energy Institute 2014 87(2): 96–101.
- [30] Xiong G ,Li Y S ,Jin L J ,et al. In situ FT-IR spectroscopic studies on thermal decomposition of the weak covalent bonds of brown coal [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 2015 ,115: 262–267.
- [31] Huang X Y ,Cheng D G ,Chen F Q ,et al. A density functional theory study on the decomposition of aliphatic hydrocarbons and cycloalkanes during coal pyrolysis in hydrogen plasma [J]. Journal of Energy Chemistry 2015 24(1): 65–71.
- [32] Roland Coelho. Physics of dielectrics for the engineer [M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company ,1979.
- [33] Clarence Zener H H. A Theory of the electrical breakdown of solid dielectrics: Mathematical physics in one dimension [M]. Oxford: Academic Press ,1966: 292–298.