

文章编号: 1000-582X(1999)05-0133-05

·研究简报·

## 一种充甲烷无烟煤导电特性的研究

徐龙君, 鲜学福, 刘成伦, 杜云贵, 张代钧

(重庆大学 矿山工程物理研究所, 重庆 400044)

TQ531.1

**摘 要:** 研究了四川白皎无烟煤电导率与甲烷压力和外加电压的关系。煤吸附甲烷后其交流和直流电导率都将增大。在直流电场中, 煤的电导率  $\sigma$  与外加电压  $U$  和甲烷压力  $p$  成正比, 其双变量方程为  $\sigma(p, U) = 1.464 + 0.705p + 2.355 \times 10^{-3}U + 2.930 \times 10^{-3}Up$  或  $\sigma(p, U) = 1.481 \exp(0.3697p) + 2.548 \times 10^{-3}U \exp(0.6858p)$ ; 在交变电场中, 电导率随甲烷压力的升高而增大, 但与外加电压值无关。

**关键词:** 煤; 吸附; 甲烷压力; 电导率; 外加电压

**中图分类号:** TQ 531.1

**文献标识码:** A

无烟煤

煤的导电性与煤的变质程度、水分、灰分、粒度和堆密度等有关, 同时也受温度、地电场(或外加电场)、频率及掺杂物(如吸附甲烷和电子给、受体物质等)的影响。煤的导电主要是由离子导电和电子导电所构成的, 所有的煤均存在电子导电性, 离子导电主要是由水分和矿物质引起的(低变质煤)。关于煤电性质的研究较多<sup>[1]</sup>, 但对煤吸附甲烷后电性质变化的研究还未见有文献报道。因此, 笔者拟研究煤在不同甲烷压力下和不同外加电压下的电导率, 以期探索地电场对煤的导电能力及其吸附解吸煤层气的影响提供基础资料。

### 1 实验

煤样采自芙蓉矿务局白皎煤矿, 属高灰低变质无烟煤。将原煤样磨制成 40~60 目的粉末。实验时, 称取 100 g 煤粉样入特制的吸附罐中, 并在上面加盖一层带有脱脂棉的铜网, 然后用螺栓紧固吸附罐顶盖, 使电极与煤样紧密接触, 同时使电极腔密封以便进行充甲烷煤电性质的测定。实验在自制的仪器上进行<sup>[2]</sup>, 电压为 50~225 V, 在某一甲烷压力下, 测定不同电压下的电流值, 改变甲烷压力后, 需平衡 2 小时再行测定。

· 收稿日期: 1998-07-07

基金项目: 国家教委博士点专项基金资助项目(9461107)

作者简介: 徐龙君(1963-), 男, 重庆垫江人, 重庆大学矿山工程物理研究所副教授, 工学博士, 主要从事矿山工程物理和环境保护的教学与研究工作。

## 2 结果和讨论

物质的导电能力通常用电导率或电阻率来表征:

$$\sigma = \frac{I}{U} l / s \quad (1)$$

式中  $\sigma$ ——电导率,  $\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;

$s, l$ ——分别为试样的横截面积( $\text{m}^2$ )和长度( $\text{m}$ );

$U$ ——外加电压,  $\text{V}$ ;

$I$ ——通过试样的电流,  $\text{A}$ .

计算直流电场作用下煤的电导率时, (1) 式中的电流应该用极化达到平衡时的值, 以消除极化对试验结果的影响; 用(1) 式计算交变电场作用下煤的电导率, 所得结果为“表观电导率”, 因为即使是理想电介质在交变电场中也将产生极化电流, 从而使测得的电流值偏高。

### 2.1 煤样的直流电导率

图 1 示出了煤样在不同电压、不同甲烷压力下的直流电导率。可见, 煤的电流 - 电压关系不符合欧姆定律, 即在不同电压下电流与电压的比值不是一个常数, 而是随着外加电压的升高而增大。

#### 2.1.1 电导率与外加电压的关系

中低变质程度煤的结构为多元非晶态<sup>[3]</sup>, 其微晶子内的 C、H、O、N 和 S 等原子规则排列, 形成的能带在各微晶子的局域存在; 而微晶子间原子不规则排列, 电子从一个微晶区的导带迁移到相邻微晶区的导带需克服一定的能垒 ( $U_0$ ), 若施加外电场, 则参与导电的载流子所必须克服的能垒将变化为  $U_1$ :

$$U_1 = U_0 - \frac{1}{2} a q E \quad (2)$$

式中  $a$ ——微晶区平均间距;

$q$ ——电子电荷;

$E$ ——外加电场强度。

此时载流子跃迁所引起的电导率为<sup>[4]</sup>:

$$\sigma = n q^2 a^2 \nu \exp\left(-\frac{2U_0 - a q E}{2KT}\right) / (6KT) \quad (3)$$

式中  $n, \nu$ ——载流子的浓度和热振动频率;

$K$ ——Boltzmann 常数;

$T$ ——热力学温度。

在本实验条件下, 通过煤的电流较小, 时间在 1 分钟左右, 焦耳热效应可忽略, 即可认为试验过程中  $T$  和  $\nu$  不发生变化; 对同一特定的电介质  $U_0, n, q$  和  $a$  为常数。

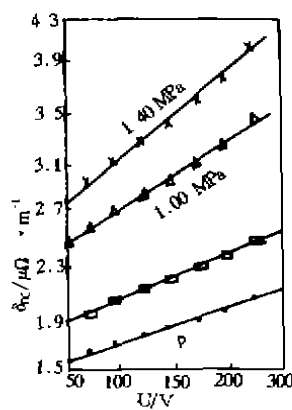


图 1 煤的电导率与电压和甲烷压力的关系

因此,令常数  $A_1 = nq^2 \alpha^2 \exp(-U_0/KT)/(6KT)$ ,  $B_1 = \alpha q/(2KT)$ , 则有

$$\sigma = A_1 \exp(B_1 E) \quad (3')$$

上式中的  $\exp(B_1 E)$  可展开为  $B_1 E$  的幂函数:

$$\sigma = A_1 \left[ 1 + B_1 E + \frac{(B_1 E)^2}{2!} + \dots + \frac{(B_1 E)^n}{n!} + \dots \right] \quad (3'')$$

当  $B_1 E$  较小时, (3'') 式可改写为:

$$\sigma = A_1 + A_1 B_1 E = A + BU \quad (4)$$

分别用方程(3')和(4)对图1中  $p = 1.40$  MPa 之曲线进行拟合时发现, 相关系数分别为0.9979和0.9980, 可见两个方程均适用于本研究。为了简化计算, 选用式(4)处理图1所示数据, 结果列于表1。可见, A和B均随甲烷压力的增加而增大, 对此将在2.1.3中讨论。

表1 煤样的 A、B 值及相关系数 r

甲烷压力, $p/\text{MPa}$	0.00	0.37	1.00	1.40
$A/\mu\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	1.4450	1.7135	2.2287	2.4114
$B \times 10^3 / \mu\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$	2.5311	3.3408	4.9548	6.7251
r	0.9958	0.9981	0.9958	0.9980

### 2.1.2 电导率与甲烷压力的关系

由图1还可看出, 在同一电压下, 随着甲烷压力的增大电导率增大。充甲烷后煤的电导率增大可能是以下三个方面的原因造成的: ① 充入甲烷后, 部分甲烷被煤的微孔吸附, 由于煤吸附甲烷是一个放热过程, 从而使孔隙表面能下降, 对表面杂质离子和电子的束缚作用减弱而致其在孔隙表面上的迁移变得容易; ② 甲烷分子渗透到煤的大分子间隙, 使骨架发生一定的膨胀, 煤体中甲烷压力越高, 膨胀效应越大, 分子间的相互作用越弱, 从而使导电能力下降; ③ 由于尚有相当量的甲烷处于游离态, 其压力对煤粒有挤压作用, 甲烷压力(即游离甲烷之压力)越大挤压作用越强, 煤粒间接触就越紧密, 从而使导电能力增强。

若将某一电压下的电导率对其甲烷压力作图(从略), 则发现  $\sigma$  与  $p$  之间存在较好的线性关系, 为此采用下式进行拟合:

$$\sigma = A' + B'p \quad (5)$$

式中  $A'$  和  $B'$  为拟合常数, 结果列于表2。由此可见, 用方程(5)来定量描述  $\sigma$  与  $p$  之间的关系是合理的; 同时  $A'$ 、 $B'$  之值均随外加电压的升高而增大, 将在下面中做详细讨论。

表2 煤样的  $A'$ 、 $B'$  值及相关系数

U/V	50	75	100	125	150	175	200	225
$A'/\mu\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	1.5880	1.6326	1.7174	1.7498	1.8056	1.8722	1.9333	2.0053
$B'/\mu\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$	0.8507	0.9466	0.9901	1.0671	1.1376	1.1985	1.2809	1.3915
r	0.9967	0.9991	0.9988	0.9961	0.9997	0.9997	0.9996	0.9994

### 2.1.3 煤电导率的双变量数学模型

由(4)、(5)可知, 电导率应该是甲烷压力  $p$  和外加电压  $U$  的双变量函数  $\sigma(p, U)$ 。下面分别从 A、B 常数与  $p$  的关系及  $A'$ 、 $B'$  常数与  $U$  的关系来讨论  $\sigma(p, U)$  与  $p$  和  $U$  之间的数学关系。

将表1中的 A 或 B 常数对  $p$  作图(从略), 可得到 A 或 B 与  $p$  的定量关系, 它们是:

$$\begin{cases} A = 1.48106 \exp(0.36973 p), & r = 0.9914 \\ B = 2.54803 \times 10^{-3} \exp(0.68585 p), & r = 0.9902 \end{cases} \quad (6)$$

同理, 将表 2 中的  $A'$  或  $B'$  常数对  $U$  作图(从略), 发现  $A'$  或  $B'$  与  $U$  的定量关系为:

$$\begin{cases} A' = 1.46426 + 2.35478 \times 10^{-3} U, & r = 0.9973 \\ B' = 0.70504 + 2.92980 \times 10^{-3} U, & r = 0.9960 \end{cases} \quad (7)$$

把(6)式代入(4)式可得:

$$\sigma(p, U) = 1.481 \exp(0.3697 p) + 2.548 \times 10^{-3} U \exp(0.6858 p) \quad (8)$$

把(7)式代入(5)式即得:

$$\sigma(p, U) = 1.464 + 0.7050 p + 2.355 \times 10^{-3} U + 2.930 \times 10^{-3} U p \quad (9)$$

式(8)或(9)便是在本实验条件下(室温, 电压  $50 \sim 225$  V, 甲烷压力  $0 \sim 1.40$  MPa), 煤电导率的双变量数学模型。

式(8)和(9)中,  $U=0$  和  $p=0$  时的电导率为煤的本征电导率, 两个方程的结果略有差别, 不过(9)式相对于(8)式的误差仅为 1.1%, 表明两个方程都是适用的。事实上, 用(8)式和(9)式分别计算出不同电压和不同甲烷压力下的电导率, 发现它们与实测值的相对误差绝大多数在 2% 以内(仅有一个实验点为 4%)。

## 2.2 煤样的交流电导率

煤样在不同甲烷压力和不同电压下的交流表观电导率示于图 2。对照图 1 和图 2 可得出, 煤的交流电导率大于同电压下的直流电导率, 这是容易理解的; 另一方面, 煤的  $\sigma_{AC}$  和外加电压的关系不同于  $\sigma_{DC}$ ,  $\sigma_{AC}$  除  $p=0.00$  MPa 随外加电压略有增大外, 在其它甲烷压力下电导率与电压的关系曲线几乎为平行电压轴的直线, 这表明交变电场中煤的电导率基本与外加电压大小无关。

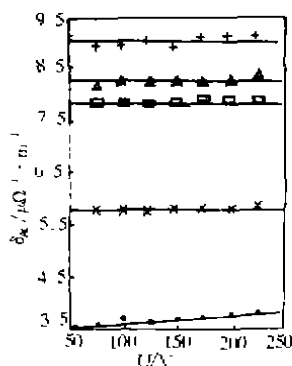


图 2  $p$  一定时  $\sigma_{AC}$  和  $U$  的关系

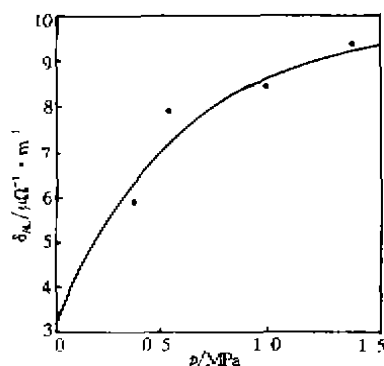


图 3  $\sigma_{AC}$  与  $p$  的关系

众所周知, 电介质在交变电场作用下将发生损耗, 此时可用电容和电阻并联的等效电路来描述电介质的特征<sup>[5]</sup>, 按(1)式计算的电导 $\left(L = \frac{I}{U}\right)$ 实际上为容抗  $Z$  的倒数, 而  $Z$  是角频率  $\omega$  的函数:

$$Z(\omega) = \frac{U(\omega)}{I(\omega)} = \frac{L_0}{L_0^2 + \omega^2 C_0^2} - i \frac{\omega C_0}{L_0^2 + \omega^2 C_0^2} \quad (10)$$

上式中,  $L_0$ 、 $C_0$  分别为等效电路中电容器的电容和电阻的电导。(10)式表明,  $|Z(\omega)|$  仅和

频率及选用的电容  $C_0$  和电导  $L_0$  有关, 而与外加电压无关, 这便解释了  $\sigma_{AC}$  与  $U$  无关的试验现象。

将煤样的交流表观电导率对其平衡甲烷压力作图, 示于图 3。可见, 随着平衡甲烷压力的增大, 交流表观电导率按对数曲线稳定地增大, 这和直流电场中的情况类似。充甲烷煤的电导率增大, 其原因与直流电场中的情况相同。

### 3 结论

对四川白皎无烟煤及其充甲烷后的电导率进行了研究, 得到如下主要结论:

1) 在直流电场中, 煤的电导率随甲烷压力和电压的升高而线性增大, 其数学方程为:

$$\sigma(p, U) = 1.481 \exp(0.3697 p) + 2.548 \times 10^{-3} U \exp(0.6858 p)$$

$$\text{或} \quad \sigma(p, U) = 1.464 + 0.705 p + 2.355 \times 10^{-3} U + 2.930 \times 10^{-3} Up$$

2) 在交流电场中, 煤的电导率与外加电压无关, 但随甲烷压力的升高增大; 并且在相同电压和甲烷压力下, 煤的交流表观电导率大于直流电导率。

### 参 考 文 献

- [1] 徐龙君, 张代钧, 鲜学福. 煤的电特性和热性质[J]. 煤炭转化, 1996, 19(3): 56.
- [2] 徐龙君. 突出区煤的超细结构、电性质、吸附特征及其应用的研究[D]. [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 1996.
- [3] 张代钧, 陈昌国, 徐龙君等. 南桐煤镜质组非晶结构的 x 射线衍射研究[J]. 燃料化学学报, 1997, 25(1): 72.
- [4] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 222 ~ 223.
- [5] 张良莹, 姚熹. 电介质物理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.

## Study on the Conductivity Characteristic of Methane-adsorbing Coal

XU Long-jun, XIAN Xue-fu, LIU Cheng-lun, DU Yun-gui, ZHANG Dai-jun  
(Institute of Mine Engineering Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** The effect of pressure of methane and voltage on conductivity of Baijiao anthracite has been studied. The direct current and alternating current conductivities of methane-adsorbing coal are greater than those of original coal. In direct current electric field, the conductivity of coal is directly proportional to the voltage and pressure of methane, respectively. The two variables equation of  $\sigma_{DC}$  is as follows:  $\sigma(p, U) = 1.464 + 0.705 p + 2.355 \times 10^{-3} U + 2.930 \times 10^{-3} Up$  or  $\sigma(p, U) = 1.481 \exp(0.3697 p) + 2.548 \times 10^{-3} U \exp(0.6858 p)$ . In alternating current electric field,  $\sigma_{AC}$  is independent of voltage, and it increases with the increase of pressure of methane. Under the same of voltage and pressure of methane, alternating current apparent conductivity is greater than the direct current conductivity.

**KEYWORDS:** coal; adsorption; pressure of methane; conductivity; voltage

(责任编辑 王尚坤)