

同心圆筒法测量  
粉体比电阻的研究

# 目 录

## 摘 要

## 一、前 言

## 二、实验装置和方法

### 1. 实验装置

### 2. 实验方法

## 三、主要实验结果和讨论

### 1. 测量时间

### 2. 测量电压

### 3. 粉料的堆积密度

### 4. 电极系数

### 5. 测量方法

### 6. 温湿度

## 四、结 论

## 参考文献

## 摘 要

本文以研究实验室的测量方法为目的,对于目前常用的粉体比电阻测量方法之一——同心圆筒法,进行初步的实验与探讨。

作者综合分析三种具有代表性的测量方法,认为,同心圆筒法作为实验室的一种测量方法,可以使气体从粉体层中通过,对于模拟粉体存在下的气相条件,有其独特的优点。

鉴于上述,作者以同心圆筒法为研究对象,以除尘器实验研究中常用的飞灰、滑石粉、碳黑三种粉体为试样,探讨电极系数、粉体堆积密度、测量延续时间(停止升压后经过的时间)、测量电压等因素,对于粉体比电阻值的影响;同时,用同心圆筒法与平行圆盘法,以及同“武安所”“鞍钢劳研所”“西安热工所”的测量方法进行了比较。

关于电压、温度、湿度等,对影响测量的实验结果,则与历来的文献记载是一致的。但也发现滑石粉的比电阻值,随着测量电压的上升而逐渐增加。

笔者制作了各种不同几何尺寸的电极,使电极系数变化在 $6 \cdot 12 \sim 94 \cdot 67$ 的范围内,对粉体比电阻值几乎没有影响。但粉体层厚度取 $2 \cdot 5 \sim 5 \text{ mm}$ 为宜。

控制振动器振动的时间改变粉体堆积密度,观察其对比电阻值的影响。实验表明粉体堆积密度的影响很小,可忽略不计。

测量时间和电压的选择,影响粉体比电阻值。随着测量时间的延

续。电流将自然逐渐减少，电压则将自然增加，引起比电阻值的增加，笔者通过90分钟的观察，发现比电阻值最大可有1.5倍的波动。

作者在上述实验研究的基础上，特别考虑到测量时间与测量电压的影响，认为有必要制订测量电压和测量时间的国家标准，以及研制粉体比电阻自动测量仪，以提高测量精度。

## 一、前 言

粉体的比电阻,对于干式静电除尘器的正常运行和除尘效率有极大的影响,所以,对静电除尘器无论是研究、设计或在使用过程中,都必须测量粉尘比电阻这一重要参数。

早在本世纪初,国外即开始了这方面的研究。迄今,比电阻的测定方法已多种多样<sup>[1]</sup>,其中,具有代表性的方法是平行圆盘法(以下简称圆盘法)、探针法、同心圆筒法(以下简称圆筒法)<sup>[1~5]</sup>。

为了使实验室测量更接近于实际状态,常需模拟电除尘器的气相条件,模拟一般有三种方式:一是美国的容器恒温恒湿法,即把填有粉料的圆盘电极,置于可以调节空气温、湿度的容器内进行测定<sup>[2, 6]</sup>。由于气体与粉料的接触面受到电极的限制,故需较长的平衡时间;二是日本推荐的环形风道(face track)法<sup>[2]</sup>,此法设置环形保温风道,使用针—板电极,风机耐温耐蚀,设备结构庞杂,而针—板电极尚需较长的捕集粉尘时间;三是利用圆筒电极结构上的特点,使具有一定温度和湿度的气体强制通过极间粉尘层,以测量其比电阻值的同心圆筒法。Končar -Djurđjević, Petković 于1977年发表过有关的研究报告<sup>[8]</sup>。截止目前,此法尚未普遍应用,但具有固气二相缩短吸附平衡时间的特点,并且结构简单,因此我们采用圆筒法作为研究对象。

关于同心圆筒电极的几何尺寸和电极系数,目前尚无统一标准,

日本工业标准 (JIS) 采用电极系数为  $24^{[2]}$ , Končar — Djurdjević 和 Petković 采用电极系数为  $22.8^{[8]}$ 。再者, 即使电极系数相同, 其几何尺寸也可千差万别。据此, 我们变换不同几何尺寸和不同系数的电极, 进行实验, 选定了最佳几何尺寸和电极系数。

实验指出, 应该用机械震动填料代替以往的手工作业, 以克服堆积密度对比电阻的影响。

粉料层两端施加电压后, 随着时间的变化, 粉料层的电流以及粉料层两端的电压究竟如何。我们尚未看到有关的研究报告, 升压时间的变化对比电阻的影响需要观察。

比电阻的测量电压, 日本采用  $100V^{[3]}$ , 澳大利亚采用  $1.5-4KV^{[7]}$ , 美国采用接近粉料层击穿时的电压<sup>〔6〕</sup>。因此我们测量了不同电压下试样的比电阻。

温、湿度对比电阻的影响, 我们作了观察性实验。

另外, 用园筒法与其他测量方法进行了对比。我们参照美国机械工程师学会 (ASME) 的标准, 制作园盘法测量装置, 并与园筒法电极进行了对照实验。同时与武汉冶金安全研究所、鞍钢劳动卫生研究所、西安热工研究所的测量结果进行了比较。

## 二、实验装置和方法

### 1. 实验装置

图1是实验装置示意图。外电源为交流220V。外电经过稳压器(1)

稳压后,

供电给电

压控制柜

(2), 电压

控制柜的

调压范围

从0~

220V。

高压直流

电源(3)将

控制柜输

入的交流

电升压、整流。其负极输向比电阻测量器(4), 正极接地。用Q<sub>4</sub>-V型高压静电电压表(量程0~100KV)或DS-13型积分式数字电压表(量程0~1000V), 测量粉料层两端的电压。用微安表或检流计测量通过粉尘层的电流。恒温箱(5)的温度控制范围从室温到300℃。

图2是比电阻测量器示意图。中心电极和园筒电极分别接电源负

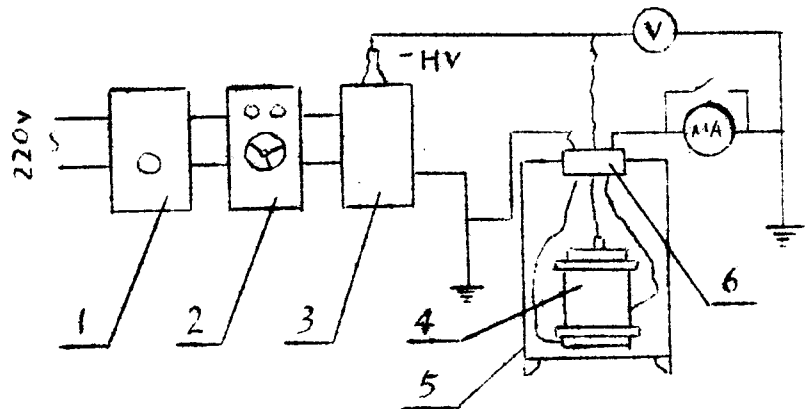


图1 实验装置示意图

极和地。屏蔽电极亦接地。筛板系一多孔板。强制气流可经筛孔通过粉料层。

图3是用以装填粉料的电磁震动机，震动方向为上下往复震动，频率为50次/S，震幅0.11mm。

用阿斯曼湿度计测定空气湿度。

## 2. 实验方法

试样选用四种粉料。第一种是滑石粉，来源于北京市石粉厂；第二种为发电场飞灰1#（飞灰1#A是经过250℃烘干二小时后缓冷至常温的制备；飞灰1#B是经过600℃灼烧半小时

后，缓冷至常温的制备）；第三种为发电厂飞灰2#；这两种飞灰均来源于水利电力部电力建设科学研究所，第四种为碳黑粉，来源于吉林碳素厂。图4是用巴柯（Bach）法作的试样粒度R-R分布曲线（其中飞灰1#不成直线）。操作程序如下：

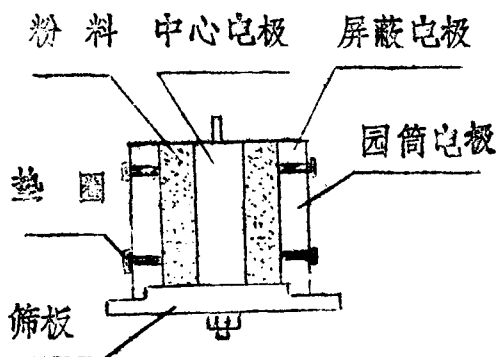


图2 比电阻测量器示意图

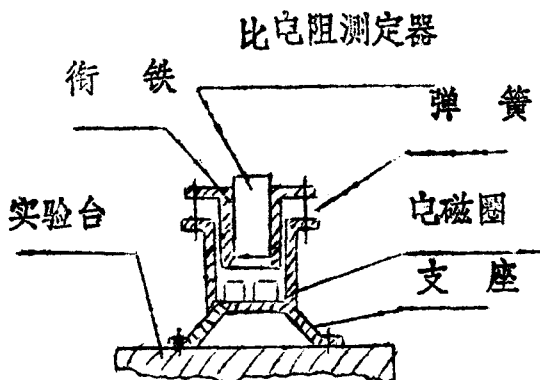


图3 震动机示意图

(1)用角勺

把拌合均匀的

试样置入磨口瓶

内封存待用,

如粉料潮湿有

结块, 则需

50℃下烘3

小时, 缓冷至

常温的处理。

(2)用角勺

把粉料填入比

电阻测量器的

电极夹缝中,

使粉尘呈自然

堆积状态, 然

后把测量器放

入震动器, 震

动两次, 经第

一次震动粉料向下塌陷, 加满粉料再震动第二次。震动时间因试样而异, 炭黑、飞灰, 每次震动4秒, 滑石粉每次震动8秒。

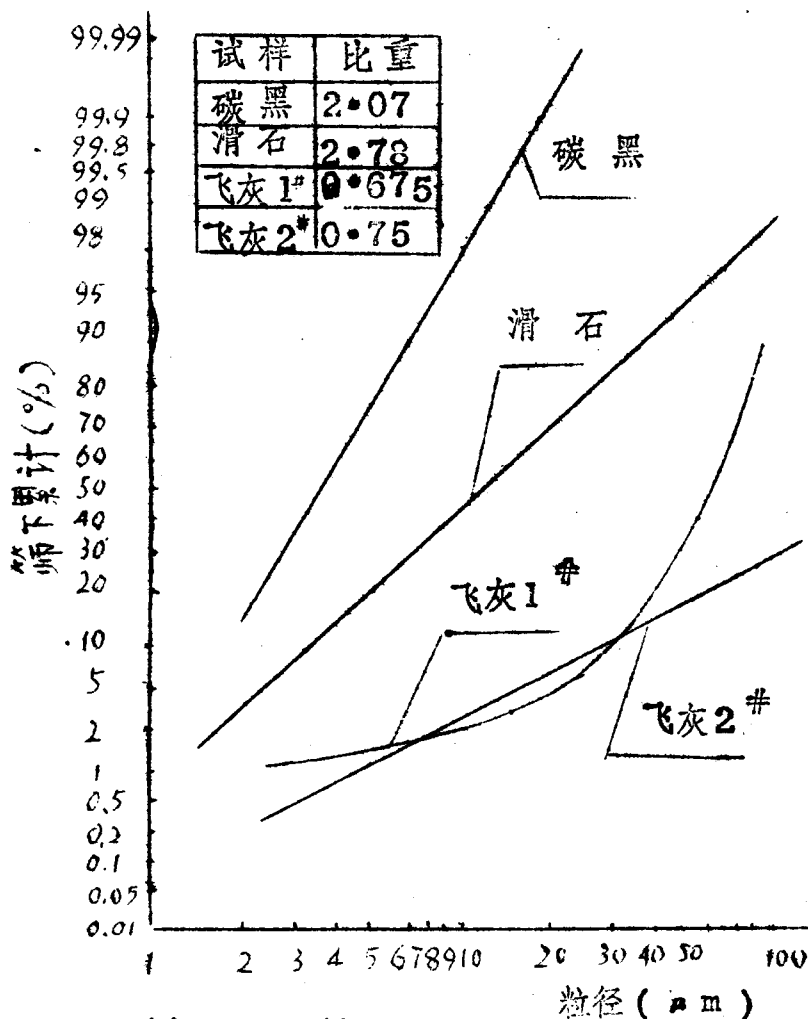


图4 试样粒度分布

(3)把测量器放入恒温箱，按照图1，分别连接各电极上的导线，启动恒温器电源，调节至所需要的温度。

(4)开启电源，调节电压控制器的手柄，以200V/S速率升压，直到粉料击穿为止，每击穿一次，更换一次试样，取三次击穿的算术平均值作为粉料的击穿电压。

(5)重新装入粉料试样，依照(2)、(3)、(4)的顺序，使电压上升到粉料击穿电压的80~90%，记录仪表上的电压和电流。

(6)按下式进行计算 (2)

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{2\pi h}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (1)$$

式中

$\rho$  —— 比电阻 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ),

$V$  —— 粉尘层两端的电压 (V),

$I$  —— 通过粉尘层的电流 (A),

$h$  —— 圆筒电极的高度 (cm),

$R_1$ 、 $R_2$  —— 分别为中心电极的半径和圆筒电极的半径 (cm)。

(7)对于低比电阻粉体，如炭黑，因为没有电击穿，其测量电压选用0~5V。

(8)观察测量时间对比电阻的影响时，实验中逐渐提高滑石粉两端的电压，为便于观察，将电压升到5KV，将七点作为时间座标的0

点。随时间记录电压和电流的变化情况。

### 三、主要实验结果和讨论

#### 1. 测量时间

对粉料层施加电压的过程中，由于手动调压不均匀，在调压间断的瞬间，发现电流表的指针向后偏转，电流值略有下降。倘若停止升压，随着时间的延续，电流下降，电压上升。

延续9.4分钟的实验结果如图5所示。图中横座标为时间，左侧纵座标为电流，右侧纵座标为电压。从图中可以看出，随着时间的变化，通过粉料层的电流从 $5.40 \mu A$ 逐渐减少，而粉料两端的电压则，从5KV逐渐升高，两者皆逐渐趋于一个常数。至8.7分钟，电流和电压几乎不再发生变化，实验一直观察到9.4分钟，电压为 $6.4KV$ ，电流为 $4.0 \mu A$ 。

造成电流减小的原因是复杂的。其主要原因，一是粉料层可为电阻和电容并联的阻容回路，电流减小和电压的升高，类似于电容的充电效应<sup>〔9〕</sup>；二是粉料层在高压电场下，有电子和离子的移动，使粉料粒子带有电荷，在有电位差存在下，电荷便沿着电阻小的路线中和，中和速度与粉料的导电率有关<sup>〔10〕</sup>。

表1列入了停止升压瞬间，即测量时间为0时的比电阻值和停止升压1分钟的比电阻值。从表1可以看出，延续1分钟的测量值均比瞬时测量值大。

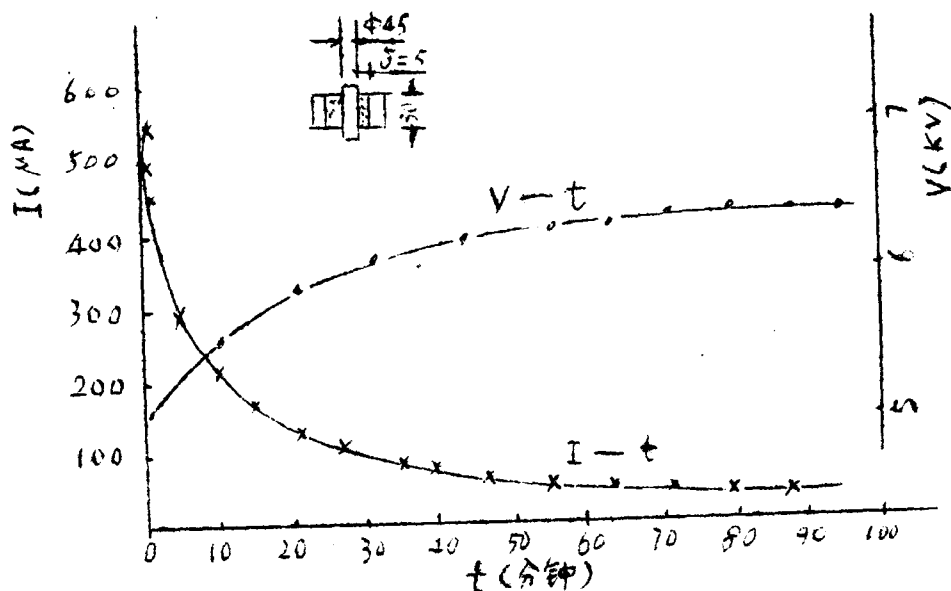


图5 电流、电压和测量时间

## 2. 测量电压

图6是在不同电压下，对于飞灰1#、飞灰2#和滑石粉的测量结果。纵座标为比电阻值。横座标为测量电压。从图中可以看到飞灰1#和滑石粉的比电阻，随着测量电压的增加而增加。飞灰2#则随着测量电压

表1 比电阻随测定时间的变化

| 序号 | 测量时间(分) | 比电阻( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) |
|----|---------|---------------------------------|
| 1  | 0       | $2.33 \times 10^8$              |
|    | 1       | $5.60 \times 10^8$              |
| 2  | 0       | $3.00 \times 10^8$              |
|    | 1       | $5.46 \times 10^8$              |
| 3  | 0       | $3.95 \times 10^8$              |
|    | 1       | $6.24 \times 10^8$              |
| 4  | 0       | $4.39 \times 10^8$              |
|    | 1       | $7.14 \times 10^8$              |
| 5  | 0       | $4.21 \times 10^8$              |
|    | 1       | $7.16 \times 10^8$              |

• 10 •

试样：滑石粉

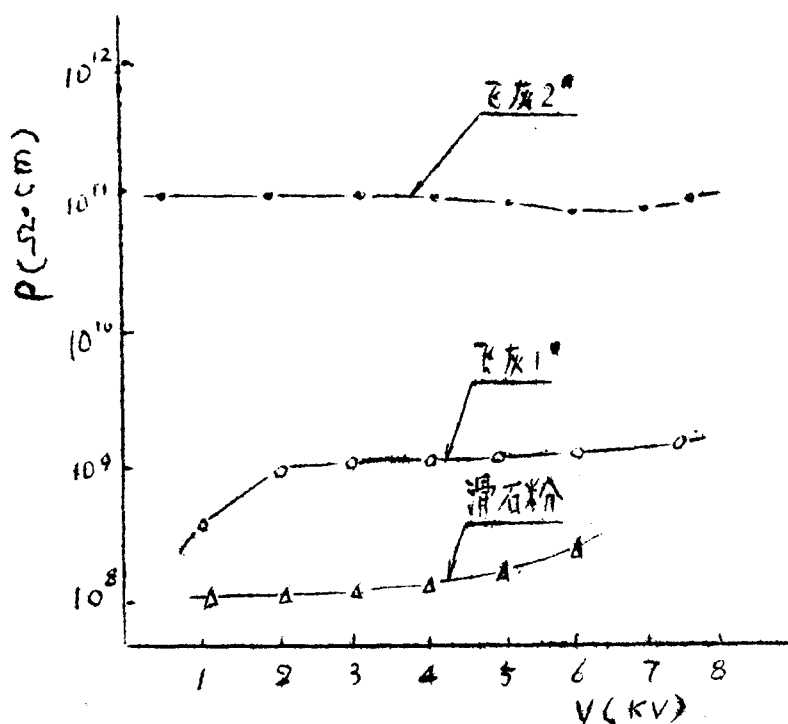


图 6 测量电压和粉料的比电阻

的增加而略有减少，在接近击穿电压附近又略有增加。通常〔5〕〔6〕提出的是比电阻随测量电压增加而下降这一事实，而本实验则揭示了，亦存在比电阻随测量电压而上升的情况。

这是由于粉料导电的特性所造成的〔4, 9〕。因而从宏观来看，多数粉料的导电不符合欧姆定律。

图 7 (a) (b) 是飞灰 1 #、飞灰 2 # 及滑石粉的导电特性曲线。其横座标为加在粉料层两端的电压，纵座标为通过粉料层的电流。三条曲线均不符合欧姆定律。

### 3. 粉料的堆积密度

在选用四种试验粉料中，以粘附性最强（安息角约  $50^\circ$ ）的滑

石粉为试样。借震动机调节滑石粉的震动时间，改变其堆积密度。

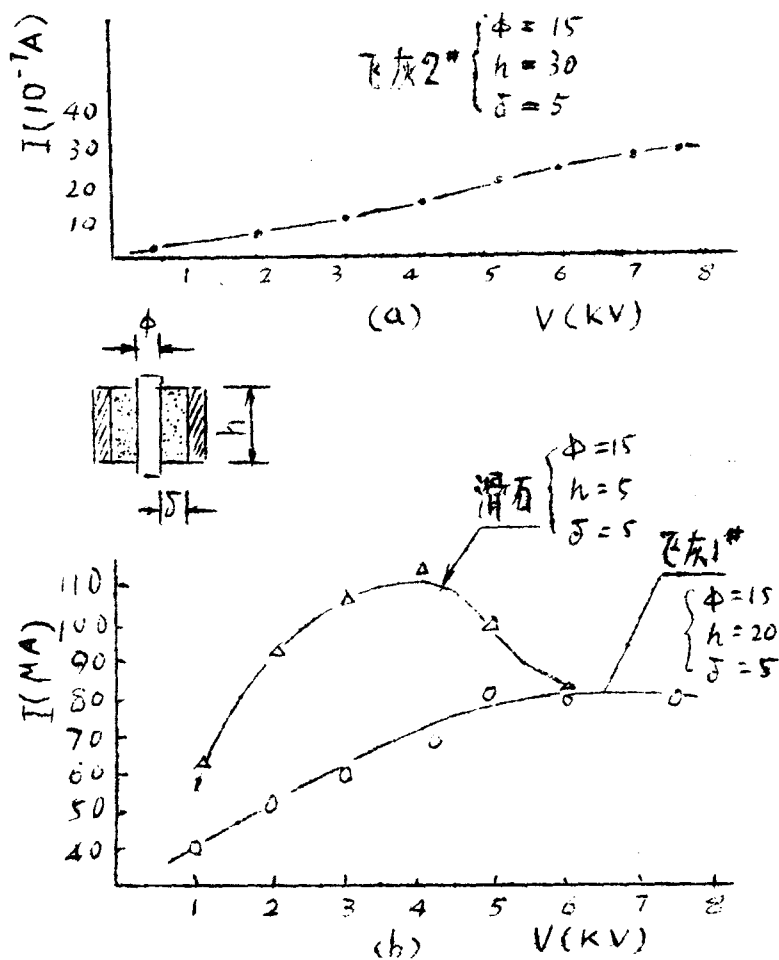


图 7 粉料的导电特性

图 8 是震动时间在 0~14 秒的范围内，比电阻随其变化的实验结果。从图 8 中可看到，粉料的比电阻几乎不受震动时间的影响，即不受堆积密度的影响（大量的实验证实，滑石粉经过 6~8 秒的震动就不再继续下陷，即震动时间 > 3 秒其堆积密度不再增加）。

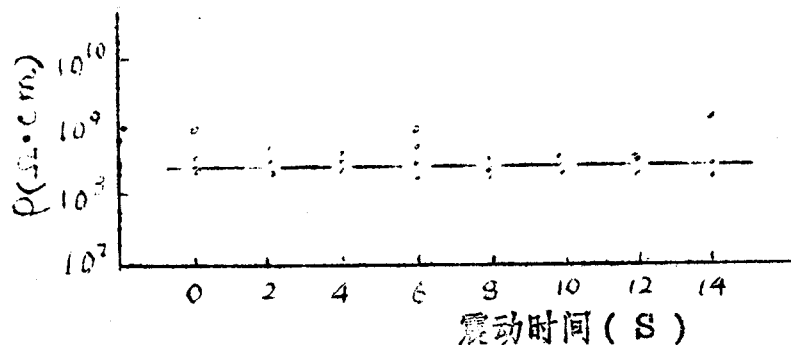


图8 震动时间和比电阻

从理论上分析，粉料的填充层中，如忽略媒介导电，其导电回路如图9所示<sup>(10)</sup>。

其中  $R_s$  为粉料内部电阻， $R_L$  为粉料表面电阻， $R_c$  为粉料颗粒间的接触电阻。

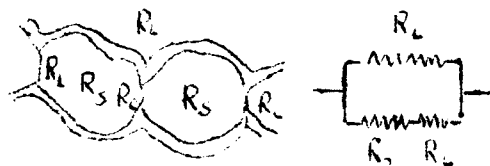


图9 粉料颗粒的导电<sup>(10)</sup>

则粉料层的电阻  $R$ ，可用下式表达：

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_s + R_c} \quad (2)$$

根据(2)式可知，随着堆积密度增加，粉料的电阻将减小。佐藤建等三人<sup>(11)</sup>把氧化镉粉末施以数十~数百  $\text{kg}/\text{cm}^2$  的压力，其比电阻约从  $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$  降到  $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 。Januriusz Gorecki 等三人<sup>(12)</sup>在圆盘电极上，使粉料受压从0增加到  $50 \times 10^4$

帕,比电阻值才从  $5 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  降到  $1 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ , 能祖茂幸<sup>(3)</sup> 用园盘法实验, 认为电极对粉料的压力在  $0 \sim 0.25 \text{ kg/cm}^2$  时, 比电阻没有显著变化。可见在本实验范围内, 粉料堆积密度的变化, 对比电阻的影响是较小的, 而它往往被测量误差所淹没, 因此粉料堆积密度对比电阻的影响可略去不计。

#### 4. 电极系数

图 10 是通过改变园筒电极  $h$  值, 使电极系数  $K$  波动在  $6.12 \sim 48.98$  时, 对比电阻的实验结果。图中横座标为同心园筒电极

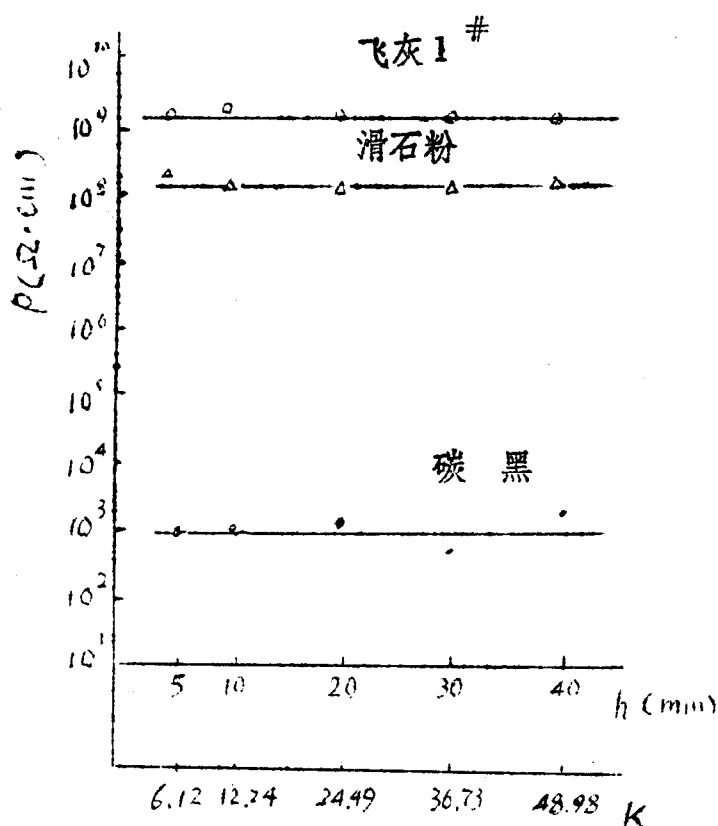


图 10 园筒电极高度和比电阻

的高度  $h$  (或因其变化的电极系数  $K$ )，纵座标为比电阻。从图中可以看到，当圆筒电极高度变化时，飞灰1#、滑石粉、碳黑三种试样的  $\rho = f(h)$  线是平行于横座标的直线。这就说明随着圆筒电极高度的改变而电极系数变化时，比电阻值几乎保持一个常数。

选择中心电极直径从 5 mm 到 45 mm ( $K$  从 17.14 到 94.67) 的测量器，分别测量飞灰1# (50℃烘3小时，冷至常温)，滑石粉、碳黑的比电阻，所得结果列入表2。

表2 中心电极直径和比电阻

| $\phi$<br>(Cm) | K     | $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{Cm}$ ) |                   |                    |
|----------------|-------|-------------------------------------|-------------------|--------------------|
|                |       | 飞灰1#                                | 滑石粉               | 碳黑                 |
| 5              | 17.17 | $1.13 \times 10^{10}$               | $3.2 \times 10^8$ | $6.94 \times 10^8$ |
| 10             | 27.21 | $1.52 \times 10^{10}$               | $5.4 \times 10^8$ | $1.27 \times 10^4$ |
| 15             | 36.73 | $1.13 \times 10^{10}$               | $4.9 \times 10^8$ | $3.19 \times 10^8$ |
| 25             | 55.91 | $1.89 \times 10^{10}$               | $5.2 \times 10^8$ | $3.19 \times 10^8$ |
| 35             | 74.76 | $1.34 \times 10^{10}$               | $4.7 \times 10^8$ | $4.84 \times 10^8$ |
| 45             | 94.67 | $1.43 \times 10^{10}$               | $7.1 \times 10^8$ | $5.64 \times 10^8$ |

从表中可以看出，由于中心电极直径的改变引起电极系数的变化，对试料比电阻几乎没有影响；飞灰1#波动在  $(1.13 \sim 1.89) \times 10^{10} \Omega \cdot \text{Cm}$ ，滑石粉波动在  $(3.2 \sim 7.1) \times 10^8 \Omega \cdot \text{Cm}$ ，碳黑则波动在  $3.19 \times 10^8 \sim 1.27 \times 10^4 \Omega \cdot \text{Cm}$  的范围内。