

# 气体探测器雪崩过程的研究

许长补 许形 许咨宗

(中国科技大学近代物理系 合肥 230026)

1994-01-24 收稿

## 摘 要

基于汤逊气体放大电子雪崩模型和一定的物理假设, 导出描绘气体探测器中正比模式和有限正比模式的一个统一公式. 该公式很好地符合实验事实, 由此还得到了描述空间电荷作用强弱的参数——等效电容以及表征探测器工作状态的参量——线性度. 同时, 在假定 SQS 雪崩中空间电荷起重要作用的情况下, 该公式很好地描述了其输出电量随高压的线性关系.

**关键词** 气体探测器, 正比室, 正比模式, 有限正比模式, SQS 模式, 空间电荷效应.

## 1 引 言

在核物理和粒子物理实验中, 正比室是一种常用的能量和径迹探测器. 正比室输出电荷量对能量沉积的响应具有正比性, 利用这种正比关系可以测量粒子能量. 但是, 当入射粒子电离密度高或(且)正比室工作电压高时能量响应出现饱和. 因此, 只有对正比室的工作状态(能量响应)有较全面的了解, 才能精确测量粒子能量.

由于气体放电的复杂性, 以往都用单纯指数形式 ( $Q = qe^{K(V-V_p)}$ ) 来描述正比模式, 而用正比模式指数形式加上某一修正项来描述有限正比模式, 前者是不考虑空间电荷影响的汤逊雪崩过程, 后者是引入空间电荷效应的汤逊雪崩过程. 实际上, 空间电荷的影响一直存在于两区中, 只是由于正比模式电荷量少, 效应不明显. 而且对于不同数量的原初电离电子, 出现饱和所需的外加电压不同, 简单地以某一电压为正比和有限正比的区分点是不够的. 因此分段描述不能令人满意地体现气体探测器放大信号随外加电压或原初电子变化的连续性, 因而也不能很好地反映气体放电的物理过程. 本文所得的方程具有非线性, 能同时描述两个区. 该公式在一定的近似条件下能推出文献[2]所给公式. 本文采用一个简单的矩阵对实验结果进行整段拟合(从正比到有限正比模式). 所得参数——等效电容, 能形象、简洁地体现空间电荷作用的强弱, 而参数——线性度, 能在一定程度上表征探测器偏离正比工作状态的程度. 上述结果具有理论和实用价值.

## 2 公式推导与拟合

如文献[1],[2]所述, 正比模式下气体放大公式可表为:

$$Q = q \exp[K(V - V_p)],$$

其中,  $V$  为外加电压,  $V_p$  为气体放大的起始电压,  $q$  为原初电离量,  $K$  是比例系数 (与汤逊系数有关)。但由于空间正离子的作用使得空间电荷与阳极丝之间的有效场由  $E$  减弱为  $E - E'$  ( $E$  为外加电压产生的场,  $E'$  为空间电荷造成的反向电场)<sup>[1]</sup>。这样, 雪崩前端感受到的阳极丝的有效电压由  $V$  变成  $V - V'$  ( $V'$  是空间电荷效应造成的抑制电压), 输出电荷量公式写成:

$$Q = q \exp[K(V - V' - V_p)].$$

若总收集电荷为  $Q$ , 则在阳极丝附近滞留的正离子电荷 (正比于收集电荷  $Q$ ) 的效应可以看成是一个带电荷量为  $Q$  的“极板”和阳极丝组成等效电容  $C$ , 它产生的抑制电压可表示成:

$$V' = Q/C,$$

于是,

$$Q(V) = q \exp[K(V - Q/C - V_p)]. \quad (1)$$

由此, 从正比模式到有限正比模式, 空间电荷对气体放大的影响都可以形象地描述为由于空间电荷对等效电容充电而产生抑制场。由(1)式的空间电荷效应项  $Q/C$  可见, 在同样的雪崩电荷量情况下, 雪崩的线度越小, 或者说等效的极板线度越小, 等效电容  $C$  越小, 空间电荷效应越显著。当雪崩的空间发展相似时, 等效电容  $C$  确定, 随电荷量的增加空间电荷效应变得明显。因此, 空间电荷效应不仅与空间电荷的绝对值  $Q$  有关, 而且与空间电荷在空间上的分布 (雪崩在空间的扩展) 密切相关, 等效电容  $C$  的引入, 正好可以用来表征雪崩围绕阳极丝的扩展程度。

为简便起见取

$$K/C = \beta, \quad KV_p - \ln(q) = \gamma,$$

则(1)式可写成

$$\ln[Q(V)] = KV - \beta Q - \gamma. \quad (2)$$

假设  $K, \beta, \gamma$  不随外加电压变化, 由(2)对  $V$  求导得:

$$\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dV} = K - \beta \frac{dQ}{dV},$$

即

$$\frac{dQ}{dV} = \frac{KQ}{1 + \beta Q}.$$

定义  $\zeta = 1/(1 + \beta Q)$  为线性度, 则

$$\frac{d}{dV} \ln Q = \zeta K. \quad (3)$$

由线性度的定义和上式的意义可知, 线性度能在一定程度上表征探测器偏离正比工作状

态的程度,只要知道了 $\beta$ 值,便能判断对于输出电量为 $Q$ 的事例,探测器工作在正比区或是饱和区。

我们关心的是公式(2)能否很好地拟合实验数据。传统的拟合方法对此非线性方程有一定困难。下面介绍本文所用的方法:

令 $Q_{ti}$ ,  $Q_{ei}$ 为一定外加电压 $V_i$ 下所得电荷量的实验值和理论值。 $\zeta_i = 1/(1 + \beta Q_{ti})$ 为前面所定义的线性度。与(3)式的推导类似:

$$\frac{\partial}{\partial K} Q_{ti} = \zeta_i V_i Q_{ti},$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} Q_{ti} = -\zeta_i Q_{ti}^2,$$

$$\frac{\partial}{\partial \gamma} Q_{ti} = -\zeta_i Q_{ti},$$

采用最小二乘法:

$$\frac{\partial}{\partial K} \sum [\ln(Q_{ti}) - \ln(Q_{ei})]^2 = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \sum [\ln(Q_{ti}) - \ln(Q_{ei})]^2 = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial \gamma} \sum [\ln(Q_{ti}) - \ln(Q_{ei})]^2 = 0,$$

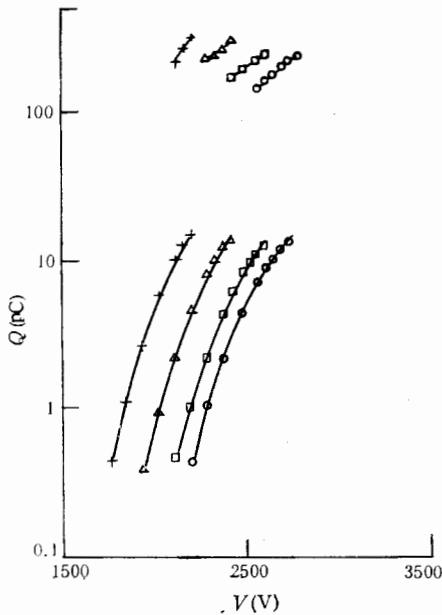


图1 不同比例 Ar 和  $\text{CH}_4$  混合气体,

$^{59}\text{Fe}$  X 射线入射时的输出电量

点为实验点,实线为拟合结果,○Ar(10) +  $\text{CH}_4$ (90)  
□Ar(20) +  $\text{CH}_4$ (80), △Ar(30) +  $\text{CH}_4$ (70),  
+Ar(60) +  $\text{CH}_4$ (40)

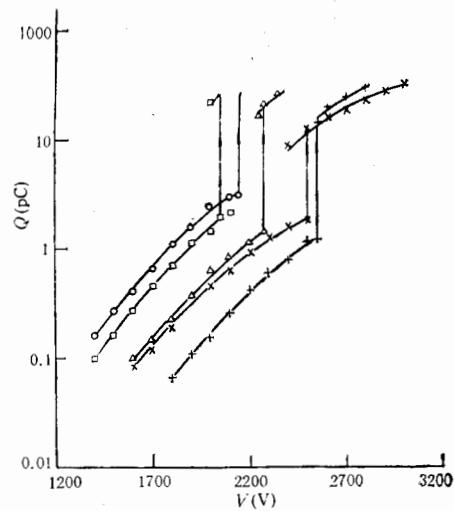


图2 纯粹灭气体,  $\alpha$  射线入射时的拟合结果

点为实验点,实线为拟合结果,○ $\text{CH}_4$ , □ $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  
△ $\text{C}_2\text{H}_2$ , +iso $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , × $\text{CO}_2$

得矩阵

$$\begin{pmatrix} \sum \zeta_i V_i^2 & -\sum \zeta_i V_i Q_{i,i} & -\sum \zeta_i V_i \\ -\sum \zeta_i V_i Q_{i,i} & \sum \zeta_i Q_{i,i}^2 & \sum \zeta_i Q_{i,i} \\ -\sum \zeta_i V_i & \sum \zeta_i Q_{i,i} & \sum \zeta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum \zeta_i V_i \ln(Q_{e,i}) \\ -\sum \zeta_i Q_{i,i} \ln(Q_{e,i}) \\ -\sum \zeta_i \ln(Q_{e,i}) \end{pmatrix}$$

利用此方程组, 方程 (2) 就可通过迭代法对实验数据进行拟合。本文所用数据引自文献 [3]。拟合结果分别列在表 1 (图 1) 和表 2 (图 2)。该公式与实验符合得很好。K,  $\gamma$  的误差分别小于 5%, 2%。由于  $\beta$  的值依赖于饱和区的很少几个点, 当有 SQS 跳变时,  $\beta$  误差较大, 若没有 SQS 跳变, 拟合数据点增多,  $\beta$  的误差减小 (图 3)。

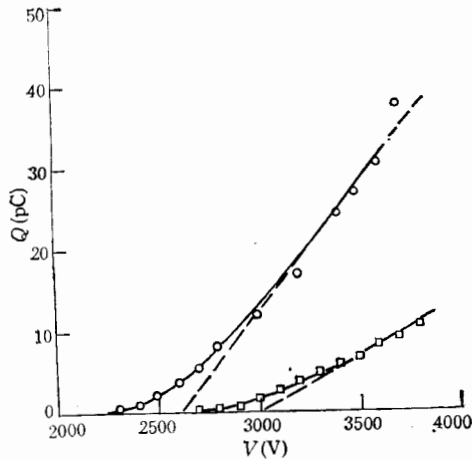


图 3 直角坐标系下, 纯猝灭气体和  $^{55}\text{Fe}$  X 射线入射时的拟合结果

没有 SQS 跳变, 所用正比室尺寸与其它图表相同, 点为实验点, 实线为拟合结果,  $\circ \text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\square \text{isoC}_4\text{H}_{10}$ 。

表 1 数据的工作条件为: 充 Ar 和  $\text{CH}_4$  的混合气体的正比室, 该室阴极筒半径  $b = 6\text{mm}$ , 阳极丝半径  $a = 25\mu\text{m}$ , 用  $^{55}\text{Fe}$  5.9keV X 射线入射。从表 1 参数可以看出, 当猝灭气体成分增加时, 等效电容减小, 空间电荷效应较明显。表 2 数据的工作条件是: 与上述同一正比室, 只是充入不同的纯猝灭气体且改用  $\alpha$  射线垂直入射。表中参数表明, 重离子入射时, 纯猝灭气体情况下的等效电容 C (表 2) 比非纯猝灭气体情况 (表 1) 小得多, 这是因为此时雪崩产生的空间电荷聚集在阳极丝附近的一个小的空间范围内, 因而空间电荷作用强, 饱和效应明显。

有了拟合结果, 就能对探测器的能量响应和工作状态作定量描述。取一个典型例子 ( $^{55}\text{Fe}$  5.9keV X 射线入射到  $\text{C}_2\text{H}_6$  纯猝灭气

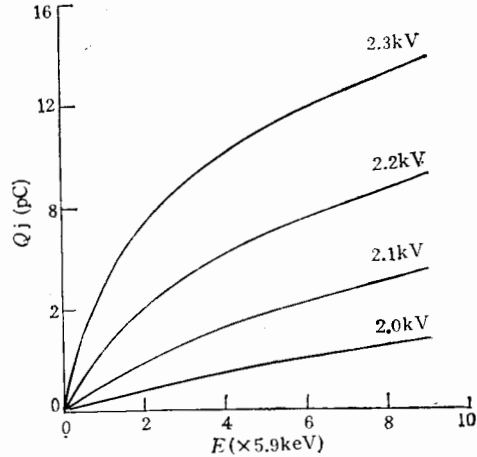


图 4 不同工作电压下的能量响应曲线  
 $\text{Ar}(30) + \text{CH}_4(70)$

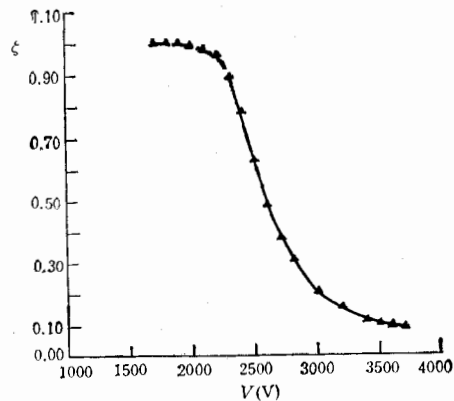


图 5 纯猝灭气体  $\text{C}_2\text{H}_6$  和  $^{55}\text{Fe}$  X 射线入射时线性度关于工作电压的关系曲线 (由拟合参数计算)

体正比室)作线性度和外加电压的关系曲线(图5)。图5表明,当外加电压增大使输出电荷量增多时,线性度减小。从这里,进一步了解到线性度能作为表征探测器工作状态的参量。取表1中充Ar(30%)和CH<sub>4</sub>(70%)混合气体条件下拟合所得参数,用公式(2)计算不同电压下的能量响应曲线,如图4。从图4可以看出,当外加电压增大或单位长度的能量沉积增大时(以5.9keV为单位),输出电荷量对能量沉积的响应开始出现饱和。对于不同的能量沉积,出现饱和输出的工作电压不同,而同一电压下,探测器可能工作于正比模式,也可能工作在有限正比模式。

表1 分析文献[3]数据所得参数值(F%为CH<sub>4</sub>百分比含量)

F(%)	K(kV <sup>-1</sup> )	C(pF)	V <sub>p</sub> (kV)	C <sub>s</sub> (pF)	V <sub>s</sub> (kV)
90	10.1	0.054	1.36	0.38	2.3
80	9.40	0.067	1.19	0.36	2.1
70	10.2	0.077	1.08	0.46	1.9
40	10.4	0.097	0.88	0.96	2.0

表2 分析文献[3]数据所得参数值

气 体	K(kV <sup>-1</sup> )	C(pF)	C <sub>s</sub> (pF)	V <sub>s</sub> (kV)
CH <sub>4</sub>	5.52	0.016	0.083	1.8
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	5.32	0.019	0.14	1.9
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	5.07	0.0093	0.079	2.0
isoC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	5.08	0.0071	0.057	2.3
CO <sub>2</sub>	5.32	0.0058	0.039	2.2

### 3 几种特殊情况的讨论

当  $\beta Q \ll 1$  时,  $\zeta \rightarrow 1$ , 可得:  $\frac{d}{dV} \ln Q = K$ ,

所以:

$$Q = q \exp[K(V - V_p)],$$

即放大倍数  $M = \exp[K(V - V_p)]$ , 这就是通常所说的正比模式。

当  $\beta Q \gg 1$  时,  $\zeta \rightarrow 1/(\beta Q)$ , 可得:  $\frac{dQ}{dV} = \frac{KQ}{\beta Q} = C$ , (4)

这描述了当电压增大到一定程度时,在有限正比区  $Q$  与  $V$  具有线性关系<sup>[2]</sup>, 与实验事实相符(图3)。

当  $\beta Q < 1$  时,作一级近似可得:

$$\begin{aligned} Q &= qe^{K(V-V_p)-\beta Q} \\ &\approx qe^{K(V-V_p)}(1 - \beta Q) \end{aligned}$$

$$\approx qe^{K(V-V_p)}(1 - \beta qe^{K(V-V_p)}),$$

为了证明文献[2]式(15)是公式(2)的一个特例, 将上式括号中第二项分子分母同乘  $q_c e$  ( $q_c$  是文献[2]中的临界电荷密度,  $e$  为自然数), 可得:

$$\begin{aligned} Q &\approx qe^{K(V-V_p)}(1 - \beta q_c e q / (q_c e) e^{K(V-V_p)}) \\ &= qe^{K(V-V_p)}(1 - \beta q_c e e^{K(V-V_p) - \ln(q_c e/q)/K}). \end{aligned}$$

当  $V - V_p - \ln(q_c e/q)/K$  是一个小量时, 可作如下的一级近似展开:

$$\begin{aligned} Q &\approx qe^{K(V-V_p)}[1 - \beta q_c e K(V - V_p - \ln(q_c e/q)/K)] \\ &= qe^{K(V-V_p)}[1 - B(V - V_1)], \end{aligned}$$

其中  $B = \beta q_c e K$ ,  $V_1 = V_p + \ln(q_c e/q)/K$ . 这便是文献[2]所得的公式. 从推导过程所作的近似可以看出只有当外加电压  $V$  处于  $V_1$  附近使得  $K(V - V_p - \ln(q_c e/q)/K)$  是一个较小量时文献[2]所给公式才成立.

## 4 SQS 模式

虽然 SQS 的起因还不清楚, 但其雪崩过程同样受空间电荷作用的影响. 我们认为

SQS 模式满足  $\beta Q \gg 1$ , 方程(4)为:  $\frac{dQ_s}{dV} = C_s$ ,

即 
$$Q_s = C_s(V - V_s), \quad (5)$$

产生 SQS 跳变时等效电容从有限正比的  $C$  变为 SQS 的  $C_s$ . 方程(5)也很好拟合前述所给的数据. 所得参数列于表 1, 表 2 中. 比较参数  $C$  与  $C_s$  可知, 产生 SQS 跳变后, 描述空间电荷分布线度的等效电容变大, 表示 SQS 雪崩在空间上扩展开来.

## 5 结 论

(1) 本文所给公式能很好地描述正比和有限正比模式的放大特性. 用最小二乘法对实验数据进行整段拟合, 给出公式的三个参数.

(2) 参数等效电容形象地反映了空间电荷在阳极丝附近的扩展情况, 参数线性度表征了探测器对正比状态的偏离程度.

(3) 在一般文献中描述正比和有限正比模式的气体放大公式可作为公式(2)的特例.

(4) 本文对 SQS 模式也作了一定的描述.

对唐孝威教授的有益讨论与指导表示感谢.

## 参 考 文 献

- [1] Hideaki Ohgaki, et al, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A295**(1990)411—416.
- [2] 唐孝威, 中国科学, **9** (1991)995.
- [3] N.Koori, et al, *IEEE Tran, on Nucl. Sci.*, **33**(1986)395.

## Study of Avalanche of Gas Detector

Xu Changbu    Xu Tong    Xu Zizong

*(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)*

Received 24 January 1994

### Abstract

Based on Townsend's avalanche mode and some basic physical ideas, a unified formula for gas amplification working under proportional mode and limited proportional mode is deduced. This formula explains the experimental data well. By fitting the data, some important parameters are displayed. The effective capacitor describes the effect of space charges, and the linearity shows the state of the gas detector (under PM or LPM). This formula also gives some explanations on SQS mode while space charges are one of the important factors effecting the avalanche.

**Key words** gas detector, proportional chamber, proportional mode, limited proportional mode, SQS mode, space charge effect.