

# $\gamma$ 辐射剂量计的响应函数及特征参量

罗达玲

杨健明

(中山大学物理学系)

(香港城市理工学院)

## 摘 要

本文导出一次击中和二次击中相叠加的响应函数,作为描述各种 $\gamma$ 辐射剂量计响应的基本方程,引入特征剂量 $D_0$ 和一次击中因子 $R$ ,并阐明了辐射剂量响应的线性、超线性和亚线性与这两个参量的关系。模型计算与实验结果相符合。

**关键词** 剂量响应函数, 特征参量,  $\gamma$ 剂量计

## 1 引 言

在放射医学、辐射防护和环境辐射监测等实际应用中,对 $\gamma$ 辐射剂量计的最基本要求是辐射剂量响应关系应为线性,还应具有好的生物组织等效性、稳定性、能量响应及足够的灵敏度等。然而,任何一种 $\gamma$ 辐射剂量计的响应线性范围都是有限的,当吸收剂量超过某一定值会出现非线性。有些剂量计响应呈超线性,而另一些呈亚线性,会引起低估或高估辐射剂量,如LiF(Mg,Ti)的 $\gamma$ 辐射剂量响应呈明显的超线性<sup>[1,2]</sup>,而近年来发展起来的LiF(Mg,Cu,P)具有亚线性的 $\gamma$ 辐射剂量响应<sup>[3,4]</sup>。为了解释LiF(Mg,Ti)的超线性响应,许多学者提出各种模型<sup>[5~9]</sup>,而这些理论模型难以解释LiF(Mg,Cu,P)的亚线性响应。作者等人<sup>[1]</sup>在获得足够实验数据的基础上,根据辐射热释光机制、统计学模型及微剂量学中的击中概念导出一个剂量响应函数,既能描述LiF(Mg,Ti)的超线性响应,又能很好解释LiF(Mg,Cu,P)的亚线性响应。本文在上述工作的基础上,考虑到 $\gamma$ 辐射与物质相互作用微观机制的特点,将统计学模型导出的这一响应函数推广作为描述各种 $\gamma$ 辐射剂量计响应的基本方程,并用几种 $\gamma$ 辐射剂量计的实验数据进行检验,同时求得各组 $\gamma$ 辐射剂量响应的两个特征参量,特征剂量 $D_0$ 和一次击中因子 $R$ 。

## 2 基本原理

$\gamma$ 辐射进入介质通过它产生的次级电子( $\delta$ 射线)沉积能量,并进一步引起原子、分子的电离和激发,化学键断裂,生成自由基等量子化事件,最后形成物理、化学及生物等可被观测到的宏观效应。 $\gamma$ 辐射在介质中产生的 $\delta$ 射线空间分布是均匀的,所产生的量

本文1991年2月25日收到

1) 罗达玲、黄乃明、张纯祥。LiF热释光剂量计的剂量响应研究。核技术,将于1992年第1期发表

子化事件是随机的。我们假设一个探测器由许多灵敏单元组成,这些灵敏单元可能是原子、分子或原子基团等,设 $\delta$ 射线对单个灵敏单元的作用次数为 $n$ ,平均作用次数为 $A$ 的机率

$$P(n) = A^n e^{-A} / n! \quad (1)$$

即泊松分布。作用机率 $P(n)$ 与沉积在介质中的 $\gamma$ 辐射能量的大小有关,换言之, $P(n)$ 应是 $\gamma$ 射线吸收剂量的函数。从理论上,总存在着一个特征剂量 $D_0$ ,在这一剂量下,每个灵敏单元被平均作用一次,则在任意剂量下,每个灵敏单元所受的平均作用次数 $A = D/D_0$ ,因此,(1)式改写为

$$P(n) = (D/D_0)^n e^{-D/D_0} / n! \quad (2)$$

另一方面, $\gamma$ 射线在介质中引起的宏观效应取决于作用机率 $P(n)$ ,因此,可以从(2)式导出 $\gamma$ 辐射剂量响应关系。设 $\gamma$ 射线进入介质,每个灵敏单元平均只需要被 $\delta$ 射线作用一次便能产生一个事件,对宏观效应有贡献,则对响应无贡献的只是 $n=0$ 的作用机率,因此,正比于辐射响应的作用机率应为总作用机率1中减去 $n=0$ 的机率,即

$$P = 1 - P(n=0) = 1 - e^{-D/D_0} \quad (3)$$

称为一次击中响应。

若灵敏单元需要有两两次以上的 $\delta$ 射线作用才能引起事件发生,并对宏观效应有贡献,则正比于响应机率应等于总作用机率1中减去作用一次及完全没有作用过的机率,即

$$P = 1 - P(n=0) - P(n=1) = 1 - (1 + D/D_0)e^{-D/D_0} \quad (4)$$

称为二次击中响应。当然还可能存在多次击中响应,如像微剂量学中的单靶多次击中模型。这里我们暂且忽略三次以上击中响应的贡献,将相对剂量响应函数 $F(D)$ 表示为

$$F(D) = R(1 - e^{-D/D_0}) + (1 - R)[1 - (1 + D/D_0)e^{-D/D_0}] \quad (5)$$

称为一次击中和二次击中相叠加的响应函数。(5)式中的 $R$ 为一次击中响应所占的份额,称之为一次击中因子。它是一个小于1的正数。为讨论 $\gamma$ 辐射剂量响应与参量 $D_0$ 和 $R$ 的依赖关系,将(5)式中的 $e^{-D/D_0}$ 展开,略去高次项,写成

$$F(D) = R(D/D_0) + (\frac{1}{2} - R)(D/D_0)^2 \quad (6)$$

从(6)式可以看出:①当 $R \neq 0$ ,且 $D$ 足够小时,响应可看成线性,当 $R=0$ 时,响应中不可能有线性段;②当 $\frac{1}{2} < R \leq 1$ ,且 $D \ll D_0$ 时,响应为线性,随着剂量 $D$ 增大,线性项加上一个负值,呈现亚线性响应;③当 $0 < R < \frac{1}{2}$ ,且 $D \ll D_0$ 时,响应为线性,随着剂量 $D$ 增大,线性项加上一个正值,呈现超线性响应;④对给定 $D_0$ 值,当 $R = \frac{1}{2}$ 时,即一次击中和二次击中所占份额相等时,响应具有最长的线性范围;⑤对给定 $R$ 值,且 $0 < R \leq 1$ , $D_0$ 值愈小,线性段愈短,即愈早出现超线性( $R < \frac{1}{2}$ )或亚线性( $R > \frac{1}{2}$ )。

综上所述,用因子 $R$ 可判别 $\gamma$ 辐射剂量响应中有没有线性范围,响应的非线性是亚线性还是超线性,以及决定非线性的程度。图1给出了对给定特征剂量 $D_0$ ,一次击中因子 $R$ 取不同值的 $\gamma$ 辐射剂量响应。而用特征剂量 $D_0$ 可比较剂量响应线性范围的宽窄。若以 $R=0.1$ 超线性响应为例,如图2所示,响应曲线形状不变,为线性段,即在 $G(D)=1$ 的范围,随 $D_0$ 增加而增宽。其中 $G(D)$ 称为非线性因子,定义

$$G(D) = (F(D)/D) / [F(D_L)/D_L] \quad (7)$$

式中 $F(D_L)$ 是响应中线性段内剂量 $D_L$ 下的响应函数。

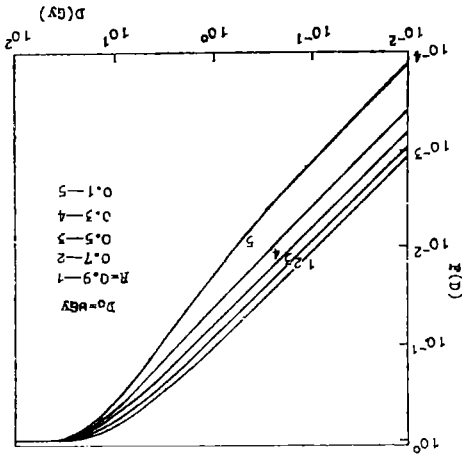


图 1  $\gamma$  辐射剂量计在给定特征剂量下, 一次击中因子为不同值时的剂量响应曲线

Fig. 1 The dose-response curves with various values of one-hit factor R for given the value of characteristic dose  $D_0$  in gamma radiation doseimeters

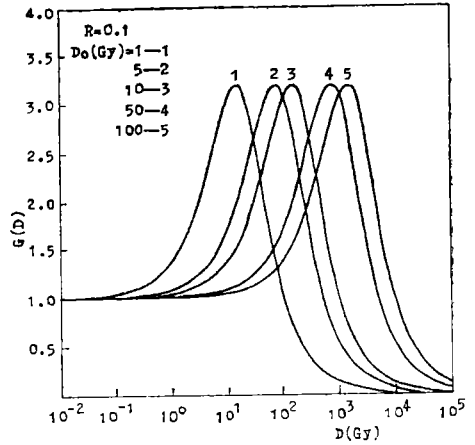


图 2 超线性  $\gamma$  辐射剂量计在给定一次击中因子下, 特征剂量为不同值时的剂量响应曲线

Fig. 2 The dose-reponse curves with various values of characteristic dose  $D_0$  for given the value of one-hit factor in the supralinear gamma radiation doseimeters

### 3 几种 $\gamma$ 辐射剂量计的响应

#### 3.1 丙氨酸 ESR 剂量计

电离辐射作用使丙氨酸分子化学键断裂, 生成长寿命自由基 ( $\text{CH}_3\text{-CH-COOH}$ )。自由基的产额正比于电离辐射吸收剂量。作者等人采用 L- $\alpha$ -丙氨酸多晶粉末制成剂量计<sup>[10]</sup>, 采用电子自旋共振 (ESR) 谱仪测定辐射产生的自由基浓度, 由于丙氨酸的电子自旋共振谱的谱形与辐射的种类和吸收剂量大小无关, 可采用 ESR 一阶微分谱主峰的峰一峰值变化量度自由基产额, 以每克样品的 ESR 信号幅度变化 ( $\Delta\text{ESR/g}$ ), 表征自由基浓度。本文用式 (5) 给出的响应函数拟合实验测得的  $\gamma$  辐射剂量响应数据<sup>[10]</sup>, 相对辐射响应  $F(D)$  应为

$$F(D) = (\Delta\text{ESR/g}) / (\Delta\text{ESR/g})_{\text{max}} \quad (8)$$

式中  $(\Delta\text{ESR/g})_{\text{max}}$  为每克样品的 ESR 信号幅度变化的最大值。拟合结果如图 3 所示。求得特征剂量  $D_0 = 6.39 \times 10^4 \text{Gy}$ 。一次击中因子  $R = 0.92$ , 且  $(\Delta\text{ESR/g})_{\text{max}} = 5.29 \times 10^3$ 。上述结果表明丙氨酸的  $\gamma$  辐射剂量响应呈亚线性, 响应中包含有少量的二次击中成分,

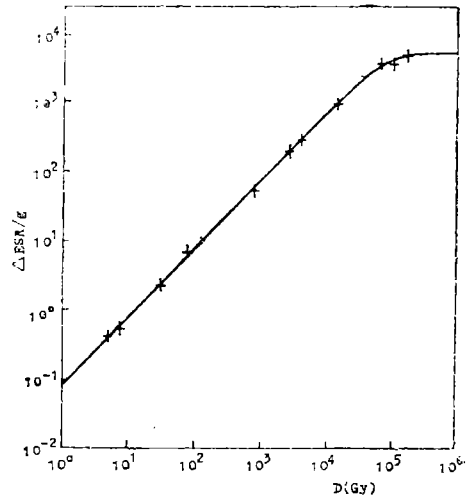


图 3 丙氨酸 ESR 剂量计对  $\gamma$  辐射线的剂量响应。理论计算 (曲线) 拟合实验数据 (点)

Fig. 3 The dose-response of alanine ESR doseimeters to gamma-rays. The calculated curve fits with experimental data (points)

并非完全的一次击中探测器。

### 3.2 薄膜剂量计

有机薄膜剂量计通常用于高剂量的 $\gamma$ 辐射剂量测量。DPA/CB<sub>r4</sub>薄膜是一种感光材料,实验结果表明它对 $\gamma$ 射线和高能电子束也相当敏感<sup>[11]</sup>。辐射作用下敏感层中生成自由基,在自由基作用下生成染料分子,使无色的自由基片显色,其光密度大小决定于辐射吸收剂量。用分光光度计测定不同 $\gamma$ 辐射吸收剂量下的光吸收谱,选取 $\lambda=460\text{nm}$ 为特征波长,求得单位敏感层厚度上光密度的变化, ( $\Delta OD/\text{mm}$ )和 $\gamma$ 辐射吸收剂量的关系曲线,即 $\gamma$ 剂量响应。用式(5)给出的响应函数拟合实验数据<sup>[11]</sup>,相对辐射响应 $F(D)$ 为

$$F(D) = (\Delta OD/\text{mm}) / (\Delta OD/\text{mm})_{\max} \quad (9)$$

式中 $(\Delta OD/\text{mm})_{\max}$ 为单位敏感层厚度上光密度变化的最大值。拟合结果如图4所示,求得一次击中因子 $R=0.456$ 和特征剂量 $D_0=6.0 \times 10^5 \text{Gy}$ ,并有最大光密度变化值 $(\Delta OD/\text{mm})_{\max}=157$ 。上述结果表明,DPA/CB<sub>r4</sub>薄膜剂量计的响应为超线性。

### 3.3 LiF热释光剂量计(TLD)

辐射热释光效应的产生包括介质吸收辐射能和介质受热发光两个阶段。通常采用固体能带理论的简化模型解释热释光现象。晶体被辐照时,价带中的电子获得足够能量激发至导带,在价带中留有相同数目的空穴;晶体中由于杂质或缺陷而形成陷阱能级会以一定的几率俘获导带中的自由电子。当晶体被加热时,被俘获的电子因热激发被释放,并以一定的机率跃迁至导带,然后和空穴陷阱复合而释放出光子。热释光强度取决于晶体吸收的辐射能,因此,用以相对测定辐射吸收剂量。LiF热释光剂量计常用于 $\gamma$ 辐射剂量测量。LiF(Mg,Ti)和LiF(Mg,Cu,P)两种TLD具有截然不同的 $\gamma$ 辐射剂量响应。我们将这两种粉末同时进行<sup>60</sup>Co $\gamma$ 辐照实验。 $\gamma$ 辐照后的粉末样,在热释光读出装置上,以线性升温方式加热,测定热释光发光曲线。用APPLE II计算机获取及储存发光光谱数据,对每条发光曲线用高斯函数进行曲线拟合,计算机解谱后得到各发光峰的峰面积。以每毫克样品的发光峰面积标征热释光强度,选取LiF(Mg,Ti)的第五发光峰和LiF(Mg,Cu,P)第三发光峰为剂量峰,获得两种材料的热释光响应,并用式(5)给出的响应函数拟合这两组实验数据。其结果如图(5)所示。相对辐射响应 $F(D) = (TL)/(TL)_{\max}$ 。拟合求得的特征参量列于表1。

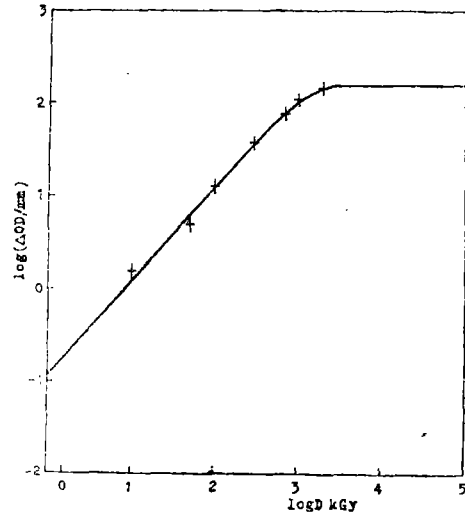


图4 DPA/CB<sub>r4</sub>薄膜剂量计对 $\gamma$ 射线的剂量响应。理论计算(曲线)拟合实验数据(点)

Fig.4 The dose-response of DPA/CB<sub>r4</sub> film doseimeters to gamma-rays. The calculated curves fits with the experimental data(points)

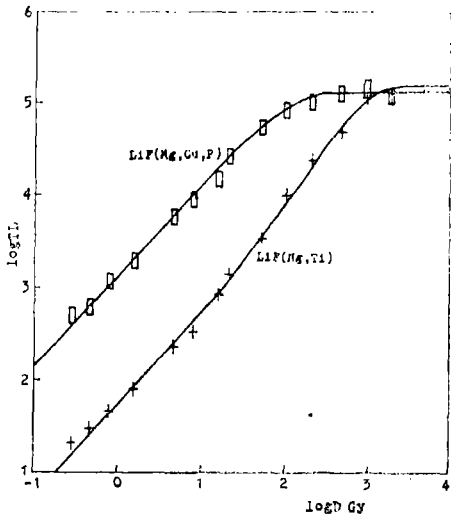


图5 LiF(Mg, Ti)和 LiF(Mg, Cu, P)两种 TLD 的 $\gamma$  辐射剂量响应。理论计算(曲线)拟合实验数据(点)

Fig. 5 The dose-responses of both LiF(Mg, Ti) and LiF(Mg, Cu, P) TLD to gamma-rays. The calculated curves fit with the experimental data (points)

表1 LiF-TLD  $\gamma$ 辐射剂量响应的特征参量  
Tab.1 The characteristic parameters of dose-response to gamma-ray for LiF-TLD

响应	R	$D_0$ (Gy)	(TL) $_{max}$
LiF(Mg, Ti)第五发光峰	0.137	$3.87 \times 10^2$	$1.51 \times 10^5$
LiF(Mg, Cu, P)第三发光峰	0.940	$8.90 \times 10^1$	$1.35 \times 10^5$

从表1看出, LiF(Mg, Ti)的 $\gamma$ 辐射响应为超线性。而LiF(Mg, Cu, P)的 $\gamma$ 辐射剂量响应为亚线性。实验结果还指出, 在线性范围内(0.1~10Gy), LiF(Mg, Cu, P)的热释光强度为LiF(Mg, Cu, P)的26.0倍, 它们的最大热释光强度值相接近。

### 4 讨论

根据前面的理论阐述及实验结果的验证, 式(5)给出的一次击中和二次击中相叠加的响应函数可以作为描述各种 $\gamma$ 辐射剂量计的剂量响应关系的基本方程, 它反映了 $\gamma$ 辐射在介质中产生的量子化事件的随机性。而剂量计本身的物理和化学性质, 测量和辐照实验条件等各种因素对剂量响应的影响则从特征剂量 $D_0$ 和一次击中因子R的不同反映出来。各种因素如何影响两个特征参量可作进一步的研究。

本文仅限 $\gamma$ 辐射剂量响应, 但是, 我们认为式(5)给出的响应函数也应当适用于X射线、高能电子束及中子等电离辐射的响应。当然还需用实验数据加以验证。由于重离子在介质中通过原电离及经迹周围的次级电子( $\delta$ 射线)沉积能量, 与介质产生相互作用,  $\delta$ 射线的空间分布是非均匀的, 式(5)给出的响应函数是否仍适用, 有待进一步研究。

感谢张纯祥教授对本文提出的宝贵意见及刘辉同志在LiF-TLD实验中的协助。

## 参 考 文 献

- 1 Montres-Bruggerolle M, Université de Clermont-Ferrand I, 63170, Aubiere, France, 1980
- 2 Zimmerman J, J Phys C: Sol St Phys, 1971, 4: 3277
- 3 吴大可, 孙福印, 戴洪臣, 中华放射医学与防护杂志, 1981, 5: 13
- 4 Cai Gangang, J Phys D: APPI Phys 1989, 22: 812
- 5 Larsson L, Katz R, Nucl Instr Meth, 1976; 138, 631
- 6 Kos H J, Nink R, Nucl Instr Meth, 1980, 175: 24
- 7 Lakshmanan A R, Chandraet B, Bhatt R C, J Phys D: APPI Phys, 1982; 15: 1501
- 8 Horowitz Y S, Radiat Prot Dosim, 1990, 33: 75
- 9 McKeever S W S, Radiat Prot Dosim, 1990, 33: 83
- 10 罗达玲, 李冕丰, 张纯祥等. 中山大学学报(自然科学版), 1988, 4: 50
- 11 罗达玲, 李冕丰, 张纯祥等. 中山大学学报(自然科学版), 1987, 3: 70

## Dose Response Function and Characteristic Parameters for Gamma Radiration Dosimeters

*Luo Daling\**     *Enoch C. M. Young*

### Abstract

On the basis of the stochastic property of quantized events, produced by gamma rays interacting with the medium, and the concept of hit in microdosimetry, a function derived from statistical poisson distribution is generalized to describe the dose reponses for various gamma radiation dosimeters as a fundamental equation. It is described that the linearity, sublinearity and supralinearity of gamma dose responses depend on the two characteristic parameters, characteristic dose  $D_0$  and one hit factor  $R$ . Our experimental results of gamma dose-responses of alanine ESR dosimeter, film dosimeter and LiF(Mg, Cu, P) and LiF(Mg, Ti) thermaoluminescence dosimeter, show a good agreement with theoretical calculations.

**Keywords** dose response function, characteristic parameter, Gamma dosimeter