

# 低能X线的剂量测量

中国医学科学院放射医学研究所 贾德林综述  
军事医学科学院 史元明 审

## 一、前言

由于低能X线的广泛应用,以及许多有高速电子束发生的仪器和设备都伴随产生低能X线,因此,对低能X线的剂量测量和防护监测必须予以重视。但是,由于低能光子和物质相互作用的特点<sup>[1~3]</sup>,有必要对低能X线的剂量测量进行专门的研究。

本文将主要涉及低于100 kVp,特别是低于50 kVp的X线剂量测量问题。

低能光子主要通过光电效应与物质相互作用,其原子相互作用系数随光子能量 $h\nu$ 和物质的原子序数 $Z$ 〔近似随 $(h\nu)^{-3}$ 和 $Z^4$ 〕而迅速变化。因此,许多探头的能响随光子能量的变化较大。另外,由于低能光子与物质的相互作用系数大,低能X线被物质迅速减弱,因此,构成探头的材料能明显地降低到达探头灵敏体积的辐射。由于物质对低能X线的强烈吸收,难于用一定尺寸的探头准确的测量物质中一定点的吸收剂量,然而,可以利用物质对低能光子强烈吸收的特点,采用全吸收测量方法,对其进行能流密度的测量。

## 二、能流密度的测量

在Greening等的一系列报告中,采用全吸收技术测量能流密度。他们采用全吸收量热计作为能流密度的绝对测量装置,与根据化学效应、气体电离和固体电离做成的全吸收装置所测结果进行比对。

### 1. 全吸收量热计

量热计可用来进行辐射的绝对测量,但大都用于高能辐射,而用于低能X线能流密度测

量的量热计为数尚少。这是由于很薄的吸收体就可以全部吸收低能X线,所以低能X线全吸收量热计的热容量显然小于高能X线全吸收量热计。因此,低能X线量热计的灵敏度就要求比高能X线的灵敏度高。因而用于低能X线量热计的探测元件也要更灵敏。

Greening<sup>[4]</sup>做成的低能X线量热计,用金箔做吸收体,以热敏电阻做测温元件,增加了温度测量的灵敏度,可测低到1微瓦/厘米<sup>2</sup>,甚至更小的能流密度率。他的量热计由于使用十分薄的金箔(0.075毫米厚)做吸收体,可测10到30kV的X线束。

如果探测元件在低温条件下工作,可以降低辐射热的损失。所以,有人设计量热计在液氮温度下工作。

### 2. 全吸收电离室

一定横截面积 $A$ 的X线束,在电离室中被气体全部吸收,这个束的能流密度率 $\psi$ 可依据下述公式给出

$$\psi = I\bar{w}/Ae$$

其中, $I$ 是被测量的电离电流, $e$ 为电子电荷, $\bar{w}$ 是在气体中产生一对离子所需要的平均能量。对全吸收电离室仅仅当 $\bar{w}$ 已知时,才能用来测量能流密度率。各种气体的 $\bar{w}$ 值在IC-RU31号报告<sup>[5]</sup>中给出。Greening等<sup>[6]</sup>研制了一种充以3个大气压氩气的全吸收电离室,适于测量5kV到30kV电压下产生的X线的能流密度。

目前,全吸收电离室是适于测量低能X线能流密度的最灵敏的装置,可测 $10^{-13}$ 安培的电流,即可测 $10^{-12}$ 瓦的功率。因此,它比全吸收量热计的灵敏度高 $10^6$ 倍。今后应进一步

研究充以更高原子序数气体（例如氪和氙）的全吸收电离室，以扩大所测X线的能量范围。

### 3, 化学方法

化学方法是根据一定物质的氧化或还原反应与它所吸收的辐射能量成正比的原理，来测量能流密度或剂量的方法。目前广泛采用的是在0.05到0.4摩尔（0.1到0.8N）硫酸中的硫酸亚铁的氧化。由于较高浓度的硫酸影响硫酸亚铁溶液与水或组织的等效性，所以，对低能X线推荐使用0.05摩尔硫酸的硫酸亚铁溶液。

为了根据产生的三价铁离子数测得能流密度或吸收剂量，需要知道G值。G值是给予溶液100eV的能量，产生的三价铁离子的平均数目。对5到100keV的光子能量，G值在文献<sup>(2)</sup>中给出。最近 Себекин 等测得的G值为  $13.4 \pm 0.7$  离子<sup>(7)</sup>。

### 4, 固体器件

如果X线照射由固体材料构成的全吸收器件能够产生一个可测量的响应，该材料便可用来测量能流密度。一般来讲，它们需要相对一个标准进行刻度。然而，对硅的表面势垒层探头则例外。这种探头的作用好象一个固体电离室，如果已知在硅中产生一个电子-空穴对所需要的平均能量，则能流密度可通过电荷的测量得到。

Pehl等<sup>(8)</sup>和Greening等<sup>(9)</sup>分别测得在硅中产生一个电子-空穴对所需要的能量，而且十分一致，平均为  $3.69 \pm 0.02$  eV（在20℃时）。

由于硅的密度比电离室中使用的气体密度大三个数量级，而产生一个电子电荷所需要的能量比气体又小一个数量级，所以对同样的辐射场，硅探头每单位体积释放出的电荷将比气体每单位体积所释放出的电荷大 $10^4$ 倍。这种探头的另一个优点是，只需加1到10伏的偏压，则辐射产生的电流（1到60μA）便接近于饱和，而无需像气体电离室那样，需要加上较高的偏压。但是，这种探头的一个缺点是漏电流比气体电离室大几个数量级。另外，其漏电流对光线和温度都很灵敏，因而限制了它所

能测量的能流密度的下限。改进制作方法，可能降低漏电流。

Greening使用一个3mm厚的表面势垒层探头，测量了钨靶铍窗管产生的10到30kV X线的能流密度。

## 三、照射量的测量

有关照射量测量的一般自由空气电离室和空腔电离室的报道很多，不再赘述。下面仅就用于照射量测量的几种较为特殊的电离室概述如下：

### 1, 空腔电离室

Kemp和Read<sup>(13, 14)</sup>研制了用于低能X线小照射量率测量的特种空腔电离室，并已做为NPL防护水平的次级标准（在10kV到2MV能量范围）。它的特点在于，采用一个薄壁的导电橡胶气球做为室壁（气球直径约190毫米，厚约0.3毫米），室壁含有88%橡胶和12%碳黑。为了把气球充气到一定的稳定形状，仅仅需要球内压力超过外部压力约0.4%。把一个<sup>241</sup>Am检验源〔4mCi（ $1.5 \times 10^8$  Bq）〕装在电离室收集电极的凹柄的底部，用一个磁铁控制，在倒置电离室时，检验源便进入电离室的中心。可随时检验仪器的稳定性。

另外，Ланчук<sup>(12)</sup>设计了能量范围为10到1250keV，体积仅为 $0.2\text{cm}^3$ ，用于体腔内和体模内测量的指形电离室。

在诊断X线测量时，很容易出现离子复合问题。因为这时照射量率一般很大，照射量很小，曝光时间短。这在测量时值得注意。

### 2, 外推电离室

它是一种极间距离可调的平行板电离室，射线束垂直于平行板方向入射。很明显，当调解极间距离大于从电极发射的电子在空气中的最大射程时，随着极间距离的继续增加，电离的增加完全是由X线在空气中产生的电子所引起。这样，增加的电离被极间增加的空气质量除，则可得到照射量，而不必相对另外的照射量标准校准。如果电极是空气等效的，那么可以认为从电极产生的电子与空气中产生的电子

不存在差别,从而保证了电离随极间距离增加的恒定性。而外推电离室,一般都是在较小的极间距离下工作。

Loevinger等设计了一种外推室,<sup>[13]</sup>用于测量 $\alpha$ 、 $\beta$ 和跨界(Grenz)射线,该电离室的高压电极和收集电极都易进行更换。收集电极分别用丙烯塑料或聚四氟乙烯做成,直径分别为1、3、10、30mm。收集极和保护环在同一块柱形材料的一个平面上,表面涂导电石墨,二者被刻蚀的园形小沟槽分开。高压电极采用镀铝的聚脂片(厚 $3.2\text{mg}/\text{cm}^2$ )。

外推电离室无需相对标准电离室进行校准。而且,可在较大的立体角范围内接收辐射。对射线在薄的高压电极中的减弱,可以依据若干不同厚度电极测量的结果,外推到零厚度来测定。对于外推电离室,需要进一步研究如何避免从电极发射的电子对测量所造成的影响。

### 3, 网状极电离室

Clifton等<sup>[14]</sup>设计了一种网状极自由空气电离室,测量10到50kV的X线。根据工作需要,我们也设计制作了此种网状极电离室。其结构特点是:它有三个平行的电极,与入射束的方向垂直,电极均由涂石墨的尼龙网做成。上下两电极为高压电极,中间为收集电极,在高压电极和收集电极之间加有保护环。

近来,Chartier等<sup>[15]</sup>又设计了测量12keV到100keV能量光子照射量的网状极电离室。他们在两个高压电极之外又各加一个网状极,以保证灵敏体积不受高压极性的影响。该电离室灵敏体积较大(最大为 $330\text{cm}^3$ ),可测低到每小时几毫伦的照射量率,可用于校准照射量(率)监测仪表。

## 四、吸收剂量的测量

为了准确测量物质中任意一点的吸收剂量应采用尽可能小的探头。这对低能X线尤为重要。因为只有这样,探头对射线的吸收减弱才能忽略不计。

### 1, 量热计

采用量热计测量低能X线的吸收剂量,存

在一些技术困难,主要是:

(1)由于吸收剂量随深度迅速变化,因而要求探测元件必须很薄。从而,也更加严格的限制了测温元件(热敏电阻或热电偶)和嵌入量热元件的电校准环的尺寸。

(2)由于光电效应随有效原子序数的大小不同而迅速变化,因而,要求量热元件必须具有接近于被测剂量材料的原子组成。

尽管如此,仍然可以根据量热元件测得的吸收剂量的平均值来校准其它吸收剂量测量仪器。

### 2, 电离方法

电离方法仍然是低能X线吸收剂量测量广泛采用的方法。可利用下述公式由照射量求得吸收剂量D。

$$D = f \cdot X$$

其中, X是对空气的照射量,单位:伦琴; f是伦琴转换成拉德的系数。

人们特别重视采用具有空气等效壁,并充以空气的电离室来测量照射量。这时

$$D_a = 0.873 X$$

不但可以采用这种电离室测量空气中的吸收剂量 $D_a$ ,而且,可以制作其它均匀室,例如组织等效室或骨等效室等。

采用组织等效电离室测量组织中的吸收剂量比根据照射量计算吸收剂量的优点是:可直接测量吸收剂量,而不需要有关能量吸收系数之比方面的资料。但是,必须已知在该组织等效气体中,产生一个离子对所需要的平均能量值 $\bar{w}$ ,而且做出较满意的符合低能射线要求的组织等效材料也是困难的。

### 3, 外推电离室

前面已经指出,一个外推电离室当极间距离超过从电极发射的电子的射程时,能用于测量照射量。在类似条件下,一个外推电离室充以任何其它气体时,也能测得这种气体的吸收剂量。因为这时外推电离室变成了一个均匀的腔,随着电极空间的增加,增加的电离完全是由气体中释放出的电子产生。

这项技术已被Clark等<sup>[16]</sup>用于测量在2

到6kV电压下产生的很低能量的X线。

#### 4. 液体电离室

近年来开始应用液体电离室测量电离辐射,利用液体电离室能直接测量在组织等效介质中的吸收剂量。

Линчевская等<sup>(17)</sup>利用液体电离室测量伦琴和 $\gamma$ 辐射的吸收剂量。由于有机液体和它们的混合物具有低的自身导电性( $10^{-10} \sim 10^{-18}$ 欧姆 $^{-1}$ 厘米 $^{-1}$ 数量级),而它们的密度和有效原子序数接近于生物组织。他们利用 $C_nH_{2n+2}$ 型碳氢化合物——己烷、庚烷做为探测介质,为了使其组织等效,又加上4%的四氯化碳。在辐射的作用下,在这种组织等效介质中产生的电离电流正比于其所吸收的能量。这种电离室比空气室有较高的灵敏度。

Фролова等<sup>(18)</sup>探讨应用液体电离室测量低能X线的可能性,他们的液体电离室有些类似于标准空气电离室,可测10到30keV光子的吸收剂量。

#### 5. 从能流密度确定吸收剂量

前面已经指出:采用全吸收技术测量低能X线能流密度较高能X线容易。在散射辐射较小的情况下(例如,当X线能量很低,或者被照射的材料很薄时),吸收剂量可从能流密度和能流密度的谱分布,以及被照射材料的质量能量吸收系数求得。

另外,如果用一个全吸收探头,首先在无吸收体时,测量X线束的能流密度 $\Psi_1$ ,然后用薄的吸收材料(厚度 $t$ ,密度 $\rho$ )覆盖在全吸收探头上,测得同一X线束的能流密度 $\Psi_2$ 。从而,由下式求得吸收体的平均吸收剂量 $\bar{D}$ 。

$$\bar{D} = (\Psi_1 - \Psi_2) / \rho t$$

这种方法的优点在于:不需要已知更多辐射谱分布的资料。如果X线束的面积约等于探头面积的两倍,由于从外面散射进探头的辐射约等于被散射离开探头的辐射,所以散射的影响基本上可以相互抵消。但是,当需要进行散射修正或探头有明显的能量依赖时,还需要提供有关辐射谱以及X线与物质相互作用系数方面的资料。

Глеэин等<sup>(19)</sup>采用CsI-Tl晶体做全吸收探头,测定低能X线的吸收剂量。

#### 6. 固体方法

虽然,固体剂量计已日益广泛地应用到高、中能X线的剂量测量中,但由于大多数固体剂量计含有较高原子序数的元素,组织等效性较差,限制了它们在低能X线剂量测量方面的应用。

然而,应用热释光剂量计(TLD)测量低能X线剂量,已日益被人们所重视。镁、钛掺杂的LiF是目前使用最广泛的热释光剂量计。近来,Nakajim<sup>(20)</sup>等和我所又先后制成高灵敏LiF(Mg、Cu、P)。LiF具有组织等效性,以及光敏和衰退较小等优点。其它组织等效材料,如BeO和 $Li_2B_4O_7$ 则存在光敏较大,并分别具有热电性和吸水性等缺点<sup>(21)</sup>。

随着聚合材料的发展,以及对其介电性质的深入了解,有人提议利用驻极体(electret)作为剂量计,最近的工作已证实了极化的聚合物的这种用途<sup>(24,25)</sup>。

许多聚合物具有保存部分先前所施予的极化的特性。可以应用许多原理构成驻极体。Ricard采用栅极控制的点电荷放电的方法,使带电粒子提供到聚合物的表面。选择适当的电晕点电压和栅极电压,可以把聚合物的表面充电到一定的浓度。当X线作用在聚合物上时,导电性增加,这样,该聚合物的表面电压将作为辐射的函数而变化,从而可把照射前后表面电压的差与吸收剂量相互联系起来。

总之,由于物质对低能X线的强烈吸收,而且吸收随物质的有效原子序数和光子能量迅速变化,给低能X线的准确测量带来了困难。今后应进一步选择组织或空气等效探头,改进探头结构和能响,提高测量的灵敏度和准确度。另外,还应研制更好的低能X线小剂量标准测量装置,以便更可靠的校准防护剂量仪表。

#### 参 考 文 献

1. Greening J R et al: Phys Med Biol 13:159, 1968.
2. ICRU Rep No 17, 1969.

3. Attix FH: Topics in Radiation Dosimetry, Academic Press P292, 1972.
4. Greening JR et al: Phys Med Biol 13:359, 1968.
5. ICRU Rep No 31, 1979.
6. Greening JR et al: Phys Med Biol 13:653, 1968.
7. Себекин АЛ и др: Мед Радиол 9:57, 1981.
8. Pehl RH et al: Nucl Instr Meth 59:45, 1968.
9. Greening JR et al: Phys Med Biol 14:55, 1969.
10. Kemp LAW et al: Phys Med Biol 13:451, 1968.
11. Read LR et al: Health Phys 33:131, 1977.
12. Лаплук ТВ и др: Мед Радиол 7:77, 1974.
13. Lovvinger R et al: Phys Med Biol 10:213, 1965.
14. Clifton JS et al: Br J Radiol 39:693, 1966.
15. Chartier JL et al: Nucl Instr Meth 128:251, 1975.
16. Clark BC et al: Radiology 93:139, 1969.
17. Линчевская ГА и др: Мед Радиол 3:87, 1972.
18. Фролова АВ и др: Мед Радиол 4:72, 1972.
19. Глезин ФИ и др: Мед Радиол 2:71, 1971.
20. Nakajima T et al: Nucl Instr Meth 157:155, 1978.
21. Horowitz YS et al: Nucl Instr Meth 188:603, 1981.
22. Bauser H et al: Health Phys 34:97, 1978.
23. Ricard M et al: Nucl Instr Meth 175:129, 1980.

## 放射性核素内照射诱发染色体畸变的研究

军事医学科学院放射医学研究所 高沛永 程雅丽综述  
第二军医大学 麦智广 审

放射细胞遗传学对外照射诱发染色体畸变的研究,特别是由于用了离体血照射的方法,得到了不少规律性的认识,积累了大量的资料。但是对放射性核素进入体内诱发染色体畸变的研究,却不及外照射那样广泛和深入,国内有关的报道更为少见。为促进这方面的工作开展,现将国外研究的一般概况综述如下。

### 一、实验研究

#### (一) 整体研究

在反应堆事故的放射性核素危害中, $^{144}\text{Ce}$ 的剂量是很重要的。 $^{144}\text{Ce}$ 的半衰期为285天,子体 $^{144}\text{Pr}$ 为17.3分钟。 $^{144}\text{Ce}$ 衰变时放出一些 $\gamma$ 线和一组平均能量为1.25MeV的 $\beta$ 粒子,在软组织中的射程为0.5cm。 $^{144}\text{Ce}$ 进入血液后,很快转移到肝脏和骨骼,而后以一个很长的半衰期长期存在于这些组织中,形成慢性照射。因为 $^{144}\text{Ce}$ 在肝脏分布均匀,所以研究放射性核素诱发染色体畸变是很理想的。

Brooks等人用部分切除肝脏刺激细胞分裂的办法,研究了 $^{144}\text{Ce}$ 诱发中国地鼠肝细胞染色体畸变的剂量效应关系<sup>[1,2]</sup>。日龄为90~110天的中国地鼠,按每克体重腹腔注射0.45、0.15、0.05、0.017、0.006、0.002及0.0 $\mu\text{Ci}$ 的 $^{144}\text{Ce}-\text{Pr}$ ,而后于4、13、40、120、360和720天做肝脏的部分切除。术后50小时注射秋水仙素,4小时后用压片法制作染色体标本,分析计数染色体畸变。实验结果表明畸变在360天以内,依 $3.1 \times 10^{-4}$ /细胞/rad的系数线性增加。虽肝细胞的剂量可达14500rad,但剂量效应曲线没有出现饱和及“坪”的现象。720天后,剂量效应系数减少到 $1.8 \times 10^{-4}$ /细胞/rad。其后他们又研究了三种 $\alpha$ 辐射体 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Am}$ 和 $^{252}\text{Cf}$ 的剂量效应关系,并与急性和慢性 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 线外照射做了比较<sup>[3]</sup>,这些辐射类型的剂量效应回归方程如下:

$$^{60}\text{Co} \text{ 急性照射 } Y = 0.01 + 1.9 \times 10^{-4}D + 1.8 \times 10^{-6}D^2$$

$$^{60}\text{Co} \text{ 慢性照射 } Y = 0.02 + 3.3 \times 10^{-4}D$$