

BPS 型组织等效球形空腔电离室

张仲纶 李风章

(中国科学院生物物理研究所)

摘要 本实验室研制了BPS型组织等效球形空腔电离室,并对其基本性能进行了测定。该室采用三电极结构并设有TE气体进出口。当工作电压选在250V和500V时,饱和修正因子分别为1.003和1.0007。射线入射角度在120°以内时,响应变化不大于0.5%。对柄效应和光子能量响应进行了研究。测量结果表明,TE气体成分的变化会引起较明显的测量误差。

关键词 球形电离室;饱和特性;柄效应;组织等效气体;能量响应曲线。

引 言

在生物医学研究中,对于 γ 射线或混合中子- γ 辐射场中组织吸收剂量的测定,目前仍普遍认为使用TE-TE(组织等效壁-组织等效气体)电离室是最实用和准确的方法。因为根据布喇格-格雷理论,参考组织中的吸收剂量 D_t 可以由下式计算:

$$D_t = D_m \frac{(\mu_{en}/\rho)_t}{(\mu_{en}/\rho)_m} = \frac{Q}{m} \cdot \frac{\bar{W}}{e} \cdot S_{m_0} \cdot \frac{(\mu_{en}/\rho)_t}{(\mu_{en}/\rho)_m}$$

其中 D_m 是空腔电离室壁材料中的吸收剂量; Q 是空腔中产生的总电荷; m 是空腔中气体质量; \bar{W} 是在空腔气体中产生一离子对所需的平均能量; e 为电子电荷; S_{m_0} 是壁材料相对于空腔气体的质量阻止本领比率; $(\mu_{en}/\rho)_t$ 和 $(\mu_{en}/\rho)_m$ 分别为参考组织与室壁材料的质能吸收系数。然而,布喇格-格雷理论是以下面这一基本要求为基础的:空腔的尺寸应比穿过空腔的带电粒子的射程小很多。对于中子来说,反冲质子将传递组织吸收剂量的90%。此时要满足布喇格-格雷理论对空腔尺寸的要求就很困难了。因此,通常总是利用Fano定理,在实际测量中使用均匀电离室。这样,空腔可以具有与中子通量密度的空间变化相适应的任何尺寸和形状。此外,若忽略密度效应,质量阻止本领比率就等于或极接近于1。这正是均匀空腔电离室得到重视的原因之一。因为在生物医学应用中,须要测量的是小块组织内的比释动能或组织内的吸收剂量,所以在此情况下,均匀电离室最好采用组织等效或类组织的材料。

在改进的空腔理论中,必须对穿过空腔室的电子能谱假定一个任意的下限。对于硬币形或针形电离室,这一能量限值就不像球形或准球形(指形)那样能加以明确地确定。因而,对于吸收剂量的直接测量来说,显然球形更为合适。而只在测定变化大的辐射场分布等场合才选用特殊形状的空腔电离室。Rossi and Failla^[1]较早提出球形均匀电离室的设计,近年美国FWT公司发展了一种球型组织等效空腔电离室^[2],其中心极为细圆柱形。荷兰TNO放射生物研究所设计制造了一种球形组织等效空腔电离室^[3],其中心极顶端为一球体。而英国国家辐射防护部提出一种准球形的电离室结构^[4]。

实际上既达不到精确的组织等效,也做不成完全均匀的电离室。因而,对这种与理想情况的

偏离必须进行修正,室壁及空腔气体的组织等效性,均匀性,室壁及空腔的球对称性,中心电极对电离室球对称性的影响等等都是应该予以考虑的因素。李德平^[5]曾对球形电离室的反平方律改正与室壁衰减及散射改正作过详细的讨论。本实验室设计制造了BPS型组织等效均匀球形空腔电离室,并对其在 γ 射线场中的组织等效性及球对称性进行了实验检验。

BPS型球形室的结构

BPS型球形TE—TE电离室有两种型号,其差别在于壁厚,I型为2mm,II型为4mm,结构图示于图1,空腔直径12.5mm,有效空腔体积接近于 1cm^3 。收集极为直径2mm的细圆柱体。电离室为三电极结构,保护极直伸到收集极根部,收集极与同轴电缆相联,保护极与电离室支撑杆相联,并接地电位。电离室外壳为高压电位,高压绝缘体用的是有机玻璃,高压电源通过导线和一高压环引向电离室外壳。室壁和收集极均由组织等效导电塑料制成,组织等效气体进气口设在电离室支撑杆另一端的连接块上,气体经支撑杆内部通向空腔,再经高压绝缘体上的孔洞泄出。收集极和高压极所连接的接头均为BNC标准接头,收集极电压最高可加到1000V,通常工作电压可选在250V至500V之间。

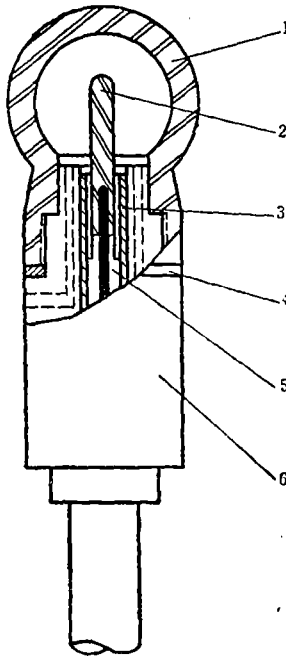


图1 BPS电离室结构示意图

1. 电离室壁(TE塑料)
2. 中心电极(TE塑料)
3. 保护电极(Al)
4. 高压环(铜)
5. 内绝缘体(聚乙烯)
6. 高压绝缘体(有机玻璃)

为了检验BPS室在 γ 射线场中的离子复合情况,必须对其饱和特性进行精密的测定。为了提高测量精度,我们使用了高稳定度的高压电源与静电计,并将静电计输出的电压信号经过高精度的VFC电路变换成速率与电压值成比例的脉冲串,用计数器进行一定时间间隔内的取样记数。从而保证了收集效率的精密测量。 I_{500V} 与不同收集电位下测出的收集电流之比对电位平方倒数作

BPS型电离室内的一般复合与电场的球对称性

由于离子复合的减少,当电离室收集极电位增高时,收集电流随之增长,最后趋于饱和。对于一般复合,可以有关系:

$$I_s/I_v = 1 + u/v^2$$

其中 I_s 为饱和电流, I_v 为任一收集极电压下的电流, V 为收集电压, u 为常数。对于 γ 射线场,空腔电离室中主要为一般复合。根据一般复合理论可知^[6],电荷收集效率为:

$$f = 1 - \frac{1}{6} m^2 \frac{q}{V^2} [(a-b)K]^4$$

其中 f 为收集效率,等于 I_v/I_s , m 是一个参数,它涉及离子电荷、复合系数和迁移率。 a 和 b 分别是空腔半径和中心电极半径。 q 是电离密度速率,即单位时间单位体积中释放出的一种符号的电荷。 V 是收集电位, $(a-b)K$ 是有效间隙长度。此式可同时适用于球形和圆柱形空腔,只是 K 不相同。

图可得一直线,其直线方程的截距即为电位无限大时的 I_{500}/I_s 比值,应接近于 1。其斜率即为与空腔形状和尺寸,气体性质有关的常数,而直线的相关系数将表明实验值与理论直线方程符合的程度。图 2 与图 3 分别列出 BPS I 和 II 型的饱和特性曲线,并且为了比较,将在同样实验条件下测量的 FWT 的 IC-17A 和 IC-17 型饱和特性一并画出。各直线方程参数及其导出参数均列于表 1。

从图 2,图 3 以及表 1 所得参数可知,BPS 型电离室和 IC-17 型电离室,在同样实验条件下有相近的饱和特性,在 $I_s/I_v \sim 1/v^2$ 图上皆呈现出很好的直线,相关系数 γ 都接近于 1。与一般复合的理论分析相符。而文献^[2]所给 IC-17 型电离室的饱和特性测量结果却与理论分析不符,这可能主要是由于测量精度受到限制所造成的。

根据这些测量结果可以计算出 500V 和 250V 收集电位时的收集效率。在剂量率为 100rad/min 左右时,250V 的收集电位一般复合引起的收集效率修正在 0.1~0.2% 范围,500V 时在 0.05% 左右,因而使电离室工作电压处于 250~500V 之间就可保证收集效率接近于 1。一般复合修正值小于 0.1%。由于离子在 TE 气体中的迁移率和复合系数与在空气中的不同,所以用同一电离室而充以 TE 气体和空气所得到的两条饱和特性曲线将不同。 $I_s/I_v \sim 1/v^2$ 之间线性关系的斜率将不同。从图 2 可以明显地看出这一点。电离室的几何尺寸决定了等效间距,空腔体积和辐射场强度决定了离子密度速率,于是从直线的斜率即可计算出两种气体对应的 m 值。计算结果表明,空气的 m 值比 TE 气体的低,这与 1980 年 Boag^[7] 所给结果是一致的。

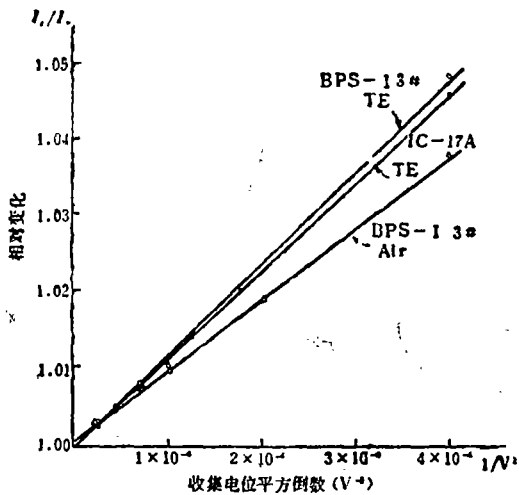


图 2 BPS-I 型 TE 电离室的饱和特性
 ^{60}Co γ 射线, 剂量率为 120 rad/min

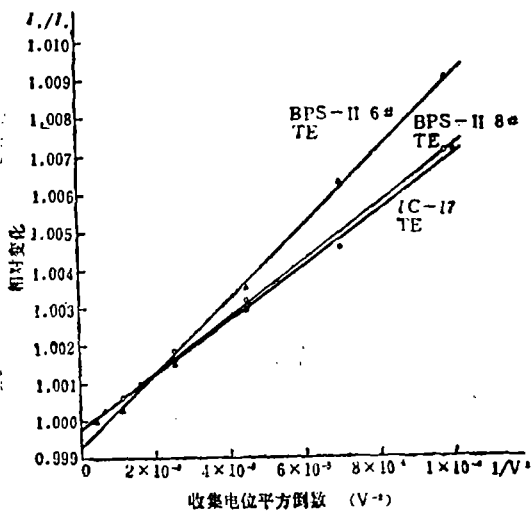


图 3 BPS-II 型电离室的饱和特性
 ^{60}Co γ 射线, 剂量率为 120 rad/min

早期的文献^[8]给出了空气中 m 的具体数值,并且,实验值与根据迁移率和复合系数计算出的数值符合的很好^[8],其 m 值为 $2.01 \times 10^6 \text{V} \cdot \text{S}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-1/2} \cdot \text{C}^{-1/2}$ ^[8]。Zoetelief·J 使用 17.1cm^3 体积的球形电离室,导出 TE 气体的 m 值为 $(2.39 \pm 0.14) \times 10^6 \text{V} \cdot \text{S}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-1/2} \cdot \text{C}^{-1/2}$ 。然而对于空腔直径较小的 BPS 型和 IC-17 型电离室,则由于收集场形状既不接近理想的球对称形状,也不是理想的园柱状,所以根据实验数据和收集效率公式导出 m 值的计算说明,它们的收集场形状在园柱与球形中间,按球形计算导出的 m 值偏低,按园柱形计算则偏高。同样,对于 TE 气体也可得出类似的结果,若对 TE 气体按两种形状计算导出 m_{TE} 值并取其平均,则其值高于 2。若按文献^[9]所列数据 $m_{\text{TE}} = 2.39$,则可推断 BPS 和 IC-17 型电离室内的

表1 球形电离室饱和特性有关的参数

电离室	BPS-I		IC-17A	BPS-II	BPS-II	IC-17
气体	TE	Air	TE	TE	TE	TE
r	0.9993	0.9988	0.9999	0.9992	0.9980	0.9981
I_s/I_∞	0.9995	1.0004	0.9992	0.9998	0.9994	0.9998
u	121.5	94.07	116.8	74.57	97.77	72.03
$K_{球}$	1.572	1.572	1.433	1.572	1.572	1.433
$K_{圆柱}$	1.125	1.125	1.098	1.125	1.125	1.098
$m_{球}$	1.47	1.39	2.15	1.17	1.28	1.63
$m_{圆柱}$	2.89	2.72	3.66	2.31	2.50	2.77
$m_{平均}$	2.18	2.05	2.9	1.74	1.89	2.2
f_{500V}	0.0005	0.0004	0.0005	0.0002	0.0004	0.0003
f_{250V}	0.0019	0.0015	0.0019	0.0012	0.0016	0.0012

注： f_{500V} 和 f_{250V} 分别为500V和250V时收集效率修正值。

收集场形状更接近于圆柱形。这一方面是由于收集极为细圆柱体而非球体，再一方面也是由于空腔内径变小时， a/b 变小，等效间隙长度因数 $K_{球}$ 愈来愈接近 $K_{圆柱}$ 所造成的。

BPS型电离室对 γ 射线方向响应的球对称性

如果辐射对于电离室的入射方向不是单向的，那么了解电离室响应对 γ 射线方向的依赖性就很重要。当存在散射线以及在模型体内测量时就迁到射线从不同方向射入电离室的情况。由于室壁和中心极的结构必须满足电学和实用上的要求，而辐射与电离室交互作用很重要的部分是在室壁和中心电极上，因而它们形状上的非球对称性必然导致电离室响应的非球对称性。另外电离室柄和连接端块对辐射的吸收也将较大地影响该方向的响应值。

为了较为精密地测定电离室方向响应，除了前述提高电流测量精度的措施之外，还必须设计一种装置。以便使近似平行束的 γ 射线以不同入射方向射入电离室，同时使室中心与源距离保持不变。为此保持源位不动，仅遥控固定电离室的转盘。图4示出在此装置上测出的BPS-I型和IC-17A型两种电离室响应的方向依赖性。以射线入射角在 90° 时响应为1，可求出射线从各个角度入射时的相对响应值变化情况。从所列结果来看，对于BPS-I型电离室，当入射角小于 120° 时，响应的相对变化不大于0.5%。而在同样条件下IC-17A相对变化可达 $\pm 0.8\%$ 。当入射角大于 150° 时，BPS-I型电离室响应下降得要较IC-17A为快。这是由于柄的吸收前者(柄直径15mm)大于后者(柄直径13mm)所致。当射线入射方向是 180° 时则由于连接杆和端块的屏蔽作用，响应只能达到 90° 时的40%左右。

BPS型电离室柄的 γ 射线辐照效应

电离室柄除了有对 $150^\circ \sim 180^\circ$ 范围内入射射线的屏蔽效应之外，由于受到同样的照射也还会

表 2 球形电离室的柄散射效应

电离室型号	柄散射因子	注
BPS-I	1.0025 ± 0.0002	聚四氟乙烯附加柄
BPS-I	1.0018 ± 0.0002	有机玻璃附加柄
IC-17A	1.023 ± 0.007	引自文献[9]
TNO	1.002 ± 0.007	引自文献[9]

表 3 球形电离室柄受照效应

电离室柄受照因子	BPS-I 型	BPS-II 型	C-17 型
	1.0079 ± 0.0025	1.0073 ± 0.0027	1.0071 ± 0.0023

从表 2 可以见到, BPS-I 型柄散射效应与 TNO 型相近, 而文献^[9]对 IC-17A 的测量结果给出过大的数值。这反映出 IC-17A 的尼龙高压绝缘体有较大的影响。而实验上的测量误差较大, 也是造成其数据偏离较大的原因之一。

为了测定电离室柄被照射时产生的电流对测量电流的影响, 将射线束用铅屏予以遮蔽, 使电离室部分和连接柄部分(取 10 cm)先后受到照射, 两次测量得到的电流值之比可表示总长为 10 cm 的柄及连接杆受照射对测量电流读数的影响, 结果示于表 3。

从表 3 所列数据可以看到, BPS 型电离室与 IC-17 型电离室柄及连接杆部分受照时贡献出的电流为同一量级, 约为电离室电离电流的 0.7% 左右。这与文献[9]给出的 FWT IC-17 型电离室柄灵敏度与电离室灵敏度之比相近。它给出 IC-17A 电离室灵敏度为 $3 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot \text{G}_y^{-1}$, 而用 ^{137}Cs 照射时柄的灵敏度为 $2.2 \times 10^{-10} \text{ C} \cdot \text{G}_y^{-1}/10 \text{ cm}$ 。则比例为 1.0073。

BPS 型电离室对光子的组织等效性

BPS 型电离室的室壁和中心极都采用了均匀导电的肌肉组织等效塑料^[10]。这是一种类 A-150 塑料, 在其设计计算中, 不仅考虑了对快中子的组织等效性, 还考虑了对 X 射线, γ 射线的组织等效性。此塑料的元素组成比例列于表 4。它的导电性能良好。其电阻率为 $5.4 \pm 1.2 \Omega \cdot \text{cm}^2/\text{cm}$ 。密度也与肌肉相近, 为 $1.11 \pm 0.01 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。BPS 型电离室空腔中充以肌肉组织等效气体。以三种高

表 4 BPS 型电离室室壁材料元素组成

	ICRU 10 _b 肌肉 (1964)	ICRU 26 A-150 (1977)	Good man A-150 (1978)	平岡武 (1976)	生物物理所 (1979)
H	10.2	10.3 ± 0.1	10.33	10.01 ± 0.13	10.28 ± 0.10
N	3.5	3.5 ± 0.07	3.30	3.42 ± 0.21	3.21 ± 0.20
C	12.3	77.1 ± 0.3	76.90	77.70 ± 1.27	77.92 ± 0.47
O	72.9	6.4 ± 0.6	6.94	—	4.12 ± 0.02
Ca	0.007	—	1.37	1.63 ± 0.01	—

引起收集电流测量上的误差: 一是柄的散射作用, 即柄在初级辐射的作用下所产生的散射辐射进入空腔而对电离电流作出的贡献。另一效应则是柄, 连接杆等构件在辐射作用下诱发的电流也被测量系统所收集。

为了测量柄的散射效应, 附加一个同样材料与结构尺寸的柄, 放在待测电离室柄的正对面, 置于辐射场中某点, 并使射线束垂直于电离室连接杆照射, 首先测定两个柄都存在时的电离电流, 然后, 在射线源不动的情况下, 遥控地将附加柄移开, 再测出此时的电离电流, 柄的散射效应可用此二电流值之比来表示。BPS-I 型柄散射效应的测定结果列于表 2。

表5 组织等效气体成分与 RTE/Rair 值

瓶号	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	N ₂ (%)	RTE/Rair	RTE/Rair	(测量-算值)
				测量值	计算值	算值
411698	65.05	31.92	3.03	1.150	1.147	0.0026
411590	65.32	31.41	3.28	1.147	1.144	0.0026
411589	65.87	31.23	3.00	1.149	1.144	0.0044
411685	64.44	32.26	3.30	1.148	1.1495	-0.0013
411646	64.41	31.68	3.90	1.1455	1.146	-0.0004
622876	68.3	29.6	2.1	1.1355	1.133	0.0022
651743	69	29.4	1.6	1.126	1.132	-0.0053
CH ₄	100	0	0	0.952 ^[12]		
CO ₂	0	100	0	1.566 ^[12]		
N ₂	0	0	100	0.935 ^[12]		

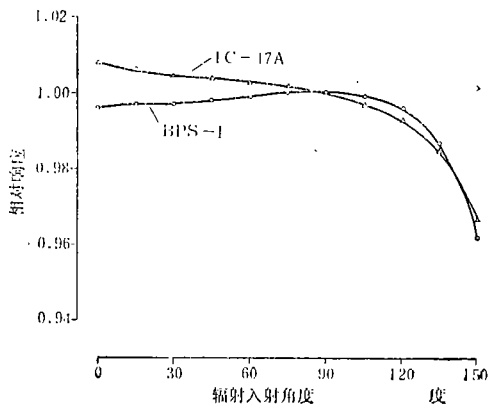
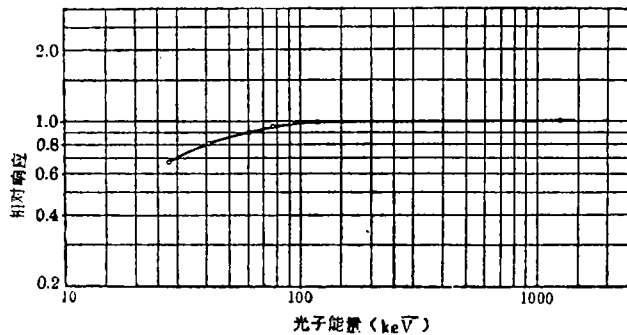
图4 BPS-I型电离室对 γ 射线响应的方向性

图5 BPS-I型电离室对光子的能量响应

纯气体配制而成，其成分分析结果列于表5。

从表4与表5所列数据可以看出，BPS型电离室室壁材料的元素组成与A-150塑料很相近。而空腔内所充气体的成分也与ICRU26号根告附录B中所给组织等效气体的成分极为接近。这类组织等效塑料与气体的阻止本领比率已由文献^[11]给出。对于 γ 射线和质子皆为0.992。因而可以说，BPS型电离室是“均匀的”，室壁材料与空腔气体是“匹配”的。

组织等效电离室对于低能光子的响应也是检验其组织等效性的一个方法。在光子辐射场中，测量出不同能量光子场的照射量，从而得知空间一点的组织比释动能，再与组织等效电离室测出的组织等效塑料中的吸收剂量做一比较，即得到该电离室的近似的低能光子能量响应曲线，由于实际电离室除了室壁与空腔气体之外，还必定包含一些非组织等效的绝缘体，电极引线等结构材料，必然会影响整个电离室的组织等效性。BPS-I电离室的低能光子响应曲线如图5所示。

在实际使用中，比如对电离室的刻度与测量时，由于空腔气体有一定的消耗，必须进行更换，但经过配制的混合气体各种成分的比例不能保持恒定，因而会给测量带来一定误差。气体成分的改变对气体的组织等效性带来多少误差，这也是必需重视的问题之一。并且通气系统的密封性能，管道的长短，都将有所影响。1980年Williams^[12]曾就此问题给予了讨论。我们测量了七瓶配比不同的TE气体(在同一照射率条件下)与空气作为空腔气体时的电离电流比值RTE/Rair。同时按照文献^[12]所给甲烷，二氧化碳和氮气的该比值对各瓶TE气体的比值进行换算，结果列于表5。测量值与计算值符合的很好。此比值与TE气体各成分比例之间的相关性检验说明，成分比例的变化对该比值的影响是显著的。因而必须注意，对于同一电离室，测量时要使用刻度时相同配比的气体，不同电离室在同一组测量中也要保持气体成分不变。实验表明，在 $3\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ 到 $50\text{cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ 范围内气流速率对测量值无影响。

结 果

对 BPS 型组织等效均匀球形空腔电离室在 γ 射线场中的基本性能测试表明, 该电离室可用于 γ 射线场的测量, 它的球对称性得到了检验。空腔中离子复合测试结果说明内部电场分布介于球形与圆柱形之间, 饱和修正值是小的, 响应的方向依赖性在 120° 范围以内是较为平坦的。对于射线从多方向入射情况, 须对方向性进行校正。柄效应是可以探测到的, 要求精度高时要予以校正。壁材料及腔内气体的组织等效性是好的。对于气体成分必须予以分析, 气体成分对测量值影响是显著的, 在刻度和测量时都要注意进行修正。该电离室在基本结构与性能上与 FWT 的 IC-17 型电离室有类似之处。由于采用了精度较好的测量方法和设计加工上的仔细考虑, 使得一些修正值得以减小并测量得更为精确, 由于该室还是快中子组织等效的, 因而进一步检验它对中子的组织等效性与球对称性将是今后的一个任务。

参 考 文 献

- [1] H. H. Rossi, and G. Failla, *Nucleonics* 14, 32(1956).
- [2] A. D. Kantz, In: *Ion Chambers for Neutron Dosimetry* (Ed. J. J. Broerse) EUR6782 pp. 61~68, Commission of the European Communities, Luxembourg, 1980.
- [3] J. Zoetelief, Engels, A. C. J. J. Broerse, In: *Ion Chambers for Neutron Dosimetry* (Ed. J. J. Broerse.) EUR6782 pp. 73~80, Commission of the European Communities, Luxembourg, 1980.
- [4] A. G. Sherwin, In: *Ion Chambers for Neutron Dosimetry* (Ed. J. J. Broerse) EUR 6782 pp. 69~71, Commission of the European Communities, Luxembourg, 1980.
- [5] 李德平, 计量学报, 2(1), 56 (1981).
- [6] J. W. Boag, In: *Radiation Dosimetry* (Ed. F. H. Attix, and W. C. Roesch) Vol 2, pp. 1~72 Academic Press, New York and London. (1966).
- [7] J. W. Boag, In: *Ion Chambers for Neutron Dosimetry* (Ed. J. J. Broerse) EUR-6782 pp. 151~166, Commission of the European Communities, Luxembourg. 1980.
- [8] J. R. Greeing, *Phys. Med. Biol.* 9, 143(1964).
- [9] J. Zoetelief, "Dosimetry and Biological Effects of Fast Neutron" Druk, Vadel, Den Haag. (1981).
- [10] 孟香琴, 李凤章, 郎淑玉, 薛良琰, 张仲纶, 核技术, 2, 48(1982).
- [11] F. H. Attix, R. B. Theus, P. Shapiro, R. E., Surratt, A. E. Nash, and S. G. Gorbics. *Phys. Med. Biol.*, 18, 497(1973).
- [12] J. R. Williams, *Phys. Med. Biol.*, 25, 501(1980).

(收到日期 83 年 5 月 25 日)

THE MODEL BPS TE SPHERICAL CAVITY IONIZATION CHAMBER

Zhang Zhonglun Li Fengzhang

(Institute of Biophysics, Academia Sinica, Beijing, china)

ABSTRACT The model BPS TE spherical chambers have been constructed. The basic performances of the chambers have been determined. The chambers are three terminal devices with gas inlet and outlet During operating the chamber at 250 V and 500 V. the saturation correction factors are 1.003 and 1.0007, respectively. The relative change of the response for the chamber is less than 0.5 per cent when the angles of the incident radiation are changed in the range of $0^\circ \sim 120^\circ$ for the ^{60}Co gamma rays. The stem effect and the energy response of the chamber have been studied. The results of measurement show that the variation of the composition of TE-gas will cause noticeable error

KEY WORDS Spherical ionization chamber; Saturation characteristics; Stem effect; Tissue equivalent gas; Energy response curve.