

乙烯-聚乙烯快中子剂量正比计数器

冷瑞平 宋书绶 刘玉莲 姚婉元

李保瑞 姜希文 姜德熙 陈常茂

(中国科学院原子能研究所)

本文报告的聚乙烯壁、内充乙烯气体的正比计数器,可用于测量快中子剂量和生物组织的快中子吸收剂量,是放射生物学和辐射防护工作中的一种校准仪器。文中给出了:钋-铍(Po-Be)、镭-铍(Ra-Be)和镅-铍(Am-Be)源的快中子剂量转换系数;中子能量在300千电子伏—10兆电子伏范围内的剂量对能量的响应值。

引言

快中子(能量在0.1—20兆电子伏之间)与生物组织的相互作用,主要是与组成人体组织的主要成分氢(H)、碳(C)、氧(O)、氮(N)原子的弹性碰撞,同时将能量传递给生物组织(其中与氢原子碰撞时传递的能量占大部分)。

如果所研究的小介质(如小生物体)的线度,大于由快中子的弹性碰撞而产生的最大能量的反冲质子的最大射程,而小于快中子的衰减长度时,就可将中子在介质中的多于一次的碰撞的能量吸收忽略掉,而只计算首次碰撞剂量。其表示式如下^[1]:

$$D(E) = E \sum_i \sigma_i f_i g_i \quad (\text{兆电子伏/克}) \quad (1)$$

式中, $D(E)$ 为1克介质吸收的能量(兆电子伏); E 为中子能量(兆电子伏); σ_i 是能量为 E 的快中子与第 i 种原子的弹性碰撞截面(厘米²); f_i 为中子与第 i 种原子碰撞时损失的能量的平均百分数; g_i 为1克介质中第 i 种原子的数目。

利用式(1),我们根据休斯(Hughes)等人给出的截面数据^[2],对聚乙烯(C_2H_4)_n、聚苯乙烯(C_8H_8)_n和生物组织($\text{C}_{35}\text{H}_{353}\text{O}_{161}\text{N}_{10}$)_n进行了计算,其结果的平均值如图1所示。

从图1可看出,聚乙烯首次碰撞剂量与生物组织首次碰撞剂量之比近似为一个常数,即 $D_Z/D_{\text{组}} = 1.42 \pm 0.14^*$ 。故聚乙烯是一种很好的类似生物组织的材料。因此,如能测得单位质量乙烯中吸收的能量,就可以推知单位质量人体组织的吸收剂量。这是保健物理和放射生物学工作中一个很重要的量。

应该指出的是,在“首次碰撞剂量”这一术语中存在着许多混乱。针对这一问题,国际辐射单位和测量

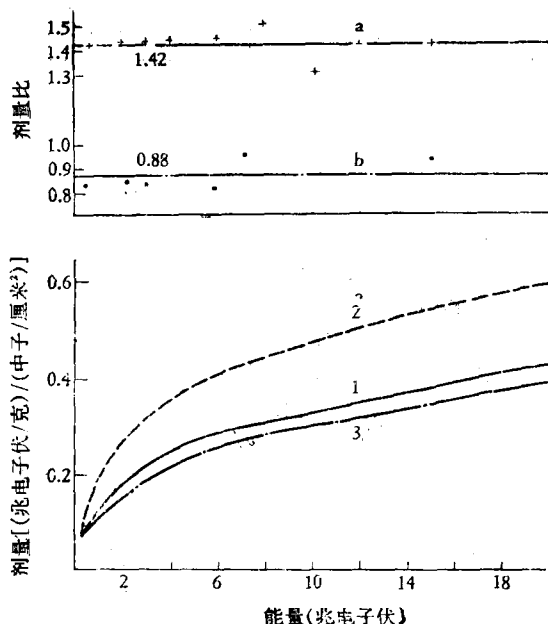


图1 快中子首次碰撞剂量曲线

1——生物组织($\text{C}_{35}\text{H}_{353}\text{O}_{161}\text{N}_{10}$)_n 首次碰撞剂量($D_{\text{组}}$)曲线; 2——聚乙烯(C_2H_4)_n 首次碰撞剂量(D_Z)曲线; 3——聚苯乙烯(C_8H_8)_n 首次碰撞剂量($D_{\text{聚}}$)曲线; a—— $D_Z/D_{\text{组}}$ 的比值; b—— $D_{\text{聚}}/D_{\text{组}}$ 的比值

委员会(ICRU)建议用“比释动能”(Kerma)来代替“首次碰撞剂量”^[3];这虽然有其正确的一面,但也还有许多有待讨论和解决的问题^[4-7]。故本文仍用“首次碰撞剂量”这一术语。

* 此值在其它资料^[8-10]中推荐为 1.43 ± 0.15

正比计数器

原则上讲,吸收剂量可以通过在生物组织中产生的热效应进行度量。可是,由于介质产生的温升太低,测量是相当困难的。因此根据电离量的度量来测定能量损耗,就成为一种常用的方法。当空腔气体完全被同样原子成分的物质包围时,布雷格-格雷(Bragg-Gray)原理可以用来确定在此空腔中产生的每克气体的离子对数目。

本文介绍的聚乙烯壁、乙烯气体正比计数器的结

构如图2所示。它用厚3毫米的聚乙烯做内腔四周的室壁;中心丝极是0.05毫米直径的钨丝;室内充有(或流通)乙烯气体。为了保证一定的机械性能和真空密封性,其外部还有一个金属壳(铜或不锈钢)。金属外壳的顶端有一个电磁线圈和两个绝缘子。金属外壳的尾部和侧面各有一内径为5毫米的金属管,以备流气用。聚乙烯内腔侧壁正中有一 $\alpha(^{239}\text{Pu})$ 源,两端有场管。因正比计数器的壁是聚乙烯,内有乙烯气体,故满足应用布雷格-格雷原理的条件。而这样一个小探测器也满足首次碰撞原理的应用条件。更详细的论述见

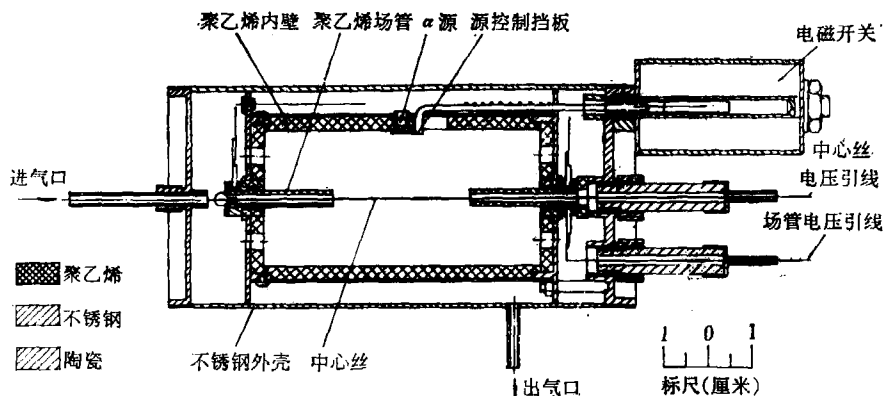


图2 聚乙烯壁-乙烯正比计数器

资料[8—11]。

正比计数器内腔的两端装有场管,主要作用是保证灵敏体积中电场的均匀性,因而也就使灵敏体积确定。场管的材料也是聚乙烯,其表面镀有0.1毫克/厘米²左右的导电层。场管电压由下式决定:

$$V_c = V_0 \frac{\lg(b/c)}{\lg(b/a)} \quad (2)$$

式中, V_c 为场管电压, V_0 为中心丝所加电压, a , b 和 c 分别为中心丝、阴极和场管的半径。

在灵敏体积的正中装有一个 $\alpha(^{239}\text{Pu})$ 源。它作为一个能量标准,用来对快中子在管内的能量吸收进行校准,从而省去了用外部标准中子源对正比计数器和连用仪器校准的复杂手续。用 $\alpha(^{239}\text{Pu})$ 源校准几乎可以随时进行,因而可以保证计数器、仪器的稳定性,从而也保证了测量结果的可靠性。

为了保证 α 粒子全部损耗在灵敏体积中,在源的前面置有一个多孔的准直器,另有一个由外部电磁控制系统控制的挡板挡在准直器前面。当需要校准正比计数器和连用仪器时,启动外部的电磁开关,将挡板移开,使 α 粒子进入计数器灵敏体积内,其全部能量消耗在乙烯气体中。灵敏体积中的乙烯质量数值由测量时的大气压力、温度求得。由乙烯气体的质量和 $\alpha(^{239}\text{Pu})$ 源的脉冲高度对能量的关系,即可进行校准。

这种正比计数器的另外一个优点是对 γ 射线很不

灵敏^[9,11]。这是因为在正比计数器内, γ 射线产生的次级电子的脉冲远比反冲质子脉冲要小,很容易由电子学线路甄别掉。除非 γ 场很强,造成次级电子的积累,使其产生的脉冲变大,可以与反冲质子脉冲相比较。因此,这种探测器广泛用于混合辐射场的中子剂量测量。

因为正比计数器的脉冲高度正比于电离量的大小,所以脉冲高度的积分值就正比于灵敏体积内产生的总电离,因此就可以测定每克气体介质的吸收能量。要保证脉冲高度与电离量的正比关系,必须满足下列两个条件:(1)正比计数器内无氧气、水蒸汽、卤素气体等负电性气体;(2)与正比计数器连用的放大器有一定的频宽。

计数器的三项主要特性是:

- (1) 计数特性——能量分辨率,气体放大倍数;
- (2) 剂量特性—— A_n/A_a [含义见式(3)的注];
- (3) 稳定性——能量分辨率、气体放大倍数、 A_n/A_a 和幅度迁移的变化。

对整个计数器而言,这些特性之间有很密切的内在关系。当计数器装配好以后,我们一般只根据它的气体放大倍数和能量分辨率来确定工作电压,其原则是在能量分辨率不是特别坏(如15%左右)的情况下,工作电压尽量高。

用仔细校准过的放大器、单道脉冲幅度甄别器,测出正比计数器的电离室区与正比区的脉冲幅度之比,

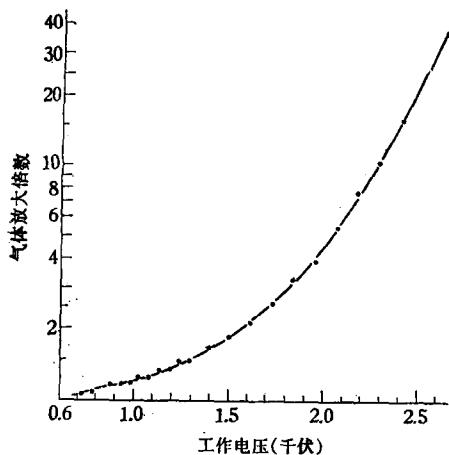


图3 气体放大倍数曲线
(压力 ≈ 760 毫米汞柱)

即为气体放大倍数;其典型曲线如图3所示。

在整个工作中,我们经常注意了 A_n/A_α 的测量,以保证其无明显的变化。

当计数器的工作电压为2,000伏、场管电压约为其0.3倍,计数器内乙烯气体的压力约为一大气压(760毫米汞柱)、流量约为300毫升/分时,Po-Be源中子和内部 ^{239}Pu 源 α 粒子的典型积分曲线如图4所示。

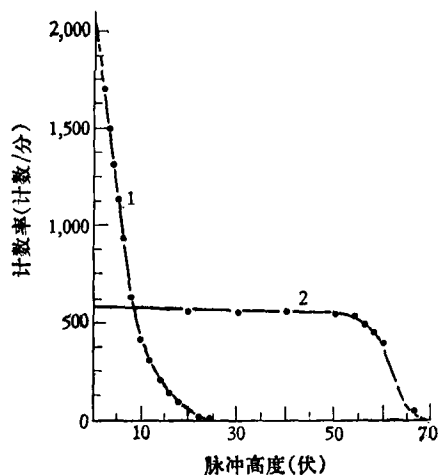


图4 Po-Be源中子、 ^{239}Pu 源 α 粒子积分谱线

1——Po-Be源中子(通量为 7.8×10^3 中子/分·厘米 2); 2—— ^{239}Pu 源 α 粒子

计算方法

中子在灵敏体积内引起的吸收能量,正比于积分偏压曲线下的面积,它可以由已知能量的 α 粒子校准曲线下的面积确定。

基于上述基本原理,根据资料[8]可知,计数器灵敏体积中乙烯气体的吸收剂量可由下式表示:

$$D = \frac{\text{反冲质子在乙烯气体中消耗的能量(兆电子伏)}}{M} \times 1.602 \times 10^{-8} \quad (\text{拉得})$$

$$= \frac{\text{内部校准用}\alpha\text{粒子在乙烯气体中消耗的能量(兆电子伏)}}{M} \times \frac{A_n}{A_\alpha} \times 1.602 \times 10^{-8} \quad (\text{拉得})$$

当 α 粒子的能量全部消耗在乙烯气体中时,即有:

$$D = \frac{A_n \cdot E_\alpha}{A_\alpha \cdot M} \times 1.602 \times 10^{-8} \quad (\text{拉得}) \quad (3)$$

式(3)中, D 为乙烯吸收剂量(拉得); A_n 为快中子积分偏压曲线下的面积[(计数/分)×伏]; A_α 为 ^{239}Pu 源 α 粒子积分偏压曲线下的面积[(计数/分)×伏]; E_α 为 ^{239}Pu 源 α 粒子的能量(兆电子伏); M 是灵敏体积内乙烯气体的质量; 1.602×10^{-8} 为兆电子伏/克—拉得的转换系数。

将式(3)作如下改写,即可将测量的结果表示为每平方米上一个中子对吸收剂量的贡献:

$$d = \frac{S_n \cdot E_\alpha}{S_\alpha \cdot M} \times 1.602 \times 10^{-8} \quad [\text{拉得}/(\text{中子}/\text{厘米}^2)] \quad (4)$$

式(4)中, d 称为剂量转换系数;

$$S_n = \frac{A_n}{\phi_n} \text{ 为 1 个中子/厘米}^2 \cdot \text{分 所贡献的面积};$$

$$\phi_n = \frac{60 N_n}{4 \pi r_0^2} \text{ 为中子通量(中子/厘米}^2 \cdot \text{分)};$$

$$S_\alpha = \frac{A_\alpha}{N_\alpha} \text{ 为单位}\alpha\text{粒子计数率所贡献的面积};$$

上式中, N_n 为中子源强度(中子/秒), r_0 为中子源与计数器有效中心的距离(厘米), N_α 为 ^{239}Pu 源 α 粒子积分偏压曲线的外推计数率(计数/分)。

根据误差理论和式(4)可以看出,剂量转换系数 d 的标准误差 $\sigma(d)$,可由下式表示:

$$\sigma(d) = \left[\left(\frac{\partial d}{\partial S_n} \right)^2 \sigma^2(S_n) + \left(\frac{\partial d}{\partial E_\alpha} \right)^2 \sigma^2(E_\alpha) + \left(\frac{\partial d}{\partial S_\alpha} \right)^2 \sigma^2(S_\alpha) + \left(\frac{\partial d}{\partial M} \right)^2 \sigma^2(M) \right]^{1/2} \quad (5)$$

相对标准误差为:

$$\frac{\sigma(d)}{d} = \left[\left(\frac{\partial d}{\partial S_n} \right)^2 \frac{\sigma^2(S_n)}{d^2} + \left(\frac{\partial d}{\partial E_\alpha} \right)^2 \frac{\sigma^2(E_\alpha)}{d^2} + \left(\frac{\partial d}{\partial S_\alpha} \right)^2 \frac{\sigma^2(S_\alpha)}{d^2} + \left(\frac{\partial d}{\partial M} \right)^2 \frac{\sigma^2(M)}{d^2} \right]^{1/2}$$

$$= \left[\frac{\sigma^2(S_n)}{S_n^2} + \frac{\sigma^2(E_\alpha)}{E_\alpha^2} + \frac{\sigma^2(S_\alpha)}{S_\alpha^2} + \frac{\sigma^2(M)}{M^2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

根据同样的推算,式(6)中

$$\frac{\sigma^2(M)}{M^2} = \frac{\sigma^2(V)}{V^2} + \frac{\sigma^2(T)}{T^2} + \frac{\sigma^2(P)}{P^2} \quad (7)$$

其中 V 为正比计数器的灵敏体积(厘米³), T 和 P 为测量时灵敏体积中乙烯气体的温度(°K)和压力(毫米汞柱)。

实验安排及结果

测量仪器的方块图如图5所示。一个低噪声的电子管前级放大器直接与正比计数器连接,前级放大器的输出由一根长约50米的同轴电缆与主放大器、脉冲幅度分析器、定标器等仪器连接。

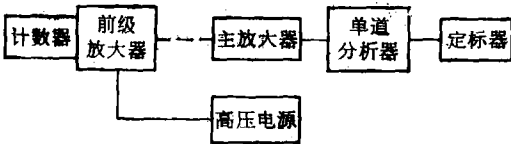


图5 测试仪器方块图

前面已经提到,为了解决计数器的脉冲高度与单个离子对形成的位置有关这一问题,我们采取了下述措施:在场管上加有一定电压;保证流经计数器的气体维持一定的纯度。但是,脉冲高度还可能和电离径迹与计数器中心丝所形成的角度有关,除非非线性放大器的时间常数选择的比较合适。为此,我们将所使用的主放大器的时间常数调节成:微分时间常数 $\approx$ 积分时间常数 ≈ 1.2 微秒,以保证其输出脉冲的高度与电离径迹的取向无关。

1. 剂量转换系数的测定

钋-铍中子源、镭-铍中子源和镭-铍中子源,在辐

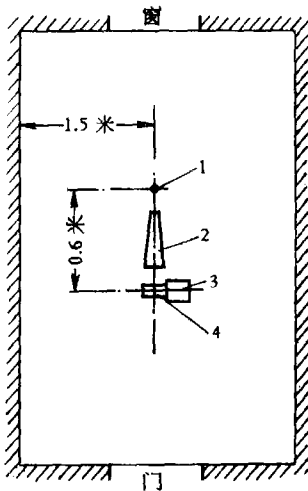


图6 实验安排示意图

- 1——中子源; 2——锥体;
3——前级放大器; 4——计数器

射防护、放射生物学和辐射医疗中的应用越来越广。为了便于估计剂量数值,有必要测定这些源的剂量转换系数。

测量的钋-铍中子源只进行过相对刻度(1973年12月6日),其强度为 $2.32 \times 10^7 (1 \pm 5\%)$ 中子/秒;镭-铍中子源曾用锰浴法进行过刻度,其强度为 $0.99 \times 10^6 (1 \pm 3\%)$ 中子/秒;镭-铍中子源强度为 1.1×10^7 中子/秒(无误差数据)。

测量钋-铍源和镭-铍源的剂量转换系数时,是将乙烯-聚乙烯正比计数器和中子源置于一空旷房间之中,其安排如图6所示。计数器和中子源均用铝架支撑,距地面高度均为1.5米。

钋-铍源、镭-铍源和镭-铍源快中子剂量转换系数,见表1。

表1 钋-铍源、镭-铍源和镭-铍源的快中子剂量转换系数

源	资 料	$\frac{d}{[拉得/(中子/厘米^2)]}$	误差 (%)	备 注
钋-铍	本实验	5.64×10^{-9}	± 6.4	密封式正比计数器
		5.92×10^{-9}	± 6.7	流气式正比计数器
	资料[8]	5.45×10^{-9}		计 算
		6.45×10^{-9}	± 5	正比计数器
	资料[9]	5.92×10^{-9}	± 5	计 算
		5.80×10^{-9}	± 5	实 验
镭-铍	本 组	5.80×10^{-9}	± 6.0	1965 年测量
	实 验	5.95×10^{-9}	± 6.4	1973 年测量
	资料[10]	6.17×10^{-9}		
镭-铍	本组实验	5.64×10^{-9}		无源强误差数据
	资料[13]	5.57×10^{-9}		

实验用正比计数器的灵敏体积的相对标准误差为: $\sigma(V)/V = 1.3\%$; 气体温度的相对标准误差为: $\sigma(T)/T = 0.2\%$; 流经正比计数器的乙烯气体的压力的相对标准误差为: $\sigma(P)/P = 0.05\%$ 。根据式(7)则有:

$$\frac{\sigma(M)}{M} = 1.4\% \quad (8)$$

同理,由

$$S_n = \frac{A_n}{\phi_n} \text{ 和 } \phi_n = \frac{60 N_n}{4 \pi r_0^2}$$

可得:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma^2(S_n)}{S_n^2} &= \frac{\sigma^2(A_n)}{A_n^2} + \frac{\sigma^2(\phi_n)}{\phi_n^2} \\ &= \frac{\sigma^2(A_n)}{A_n^2} + \frac{\sigma^2(N_n)}{N_n^2} + 2^2 \frac{\sigma^2(r_0)}{r_0^2} \end{aligned} \quad (9)$$

以钋-铍源的实验为例。其中 A_n 是对同一个源、

在不同测量时间、不同的快中子通量 ϕ_n 的情况下,对测得的 100 个数据取平均值而求得,有 $\sigma(A_n)/A_n = 4.4\%$; 源强的误差已给出,为 $\sigma(N_n)/N_n = 5.0\%$; $\sigma(r_0)/r_0$ 很小,可以忽略,则式 (9) 为:

$$\frac{\sigma(S_n)}{S_n} = 6.53\% \quad (10)$$

^{239}Pu 源 α 粒子能量的误差约有:

$$\frac{\sigma(E_\alpha)}{E_\alpha} = 0.2\% \quad (11)$$

另外,

$$\frac{\sigma(S_a)}{S_a} = 0.6\% \quad (12)$$

将式 (8)、(10)、(11) 和 (12) 代入式 (6), 则有:

$$\frac{\sigma(d)}{d} = 6.7\%$$

测量中对下列各项影响误差的因素进行了修正:

(1) 有效中心的修正: 在很多情况下, 探测器的有效中心并不就是其几何中心, 因此必须加以修正。

我们测得了多组正比计数器与中子源在不同距离 r (几何中心距离) 下的 A_n 值, 根据剂量与距离关系原理, 可以写出下式:

$$A_n = \frac{K}{(r + \chi)^2}$$

或

$$\left(\frac{1}{A_n}\right)^{1/2} = K'(r + \chi)$$

上式中, χ 为有效中心与几何中心的偏差; K 和 K' 为比例常数。根据实验点的数据, 可以绘出图 7 的直线, 利用最小二乘法很容易得到 $\chi = 1.17$ 厘米。故实际

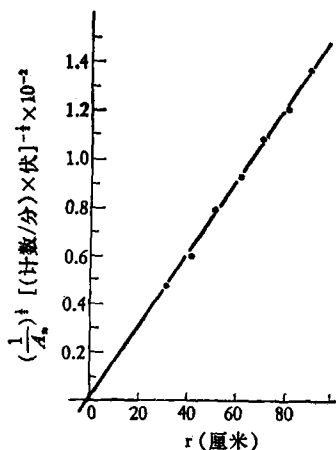


图 7 有效中心修正曲线

测得的 A_n 值要经过 $r_0^2/r^2 = (r + \chi)^2/r^2$ 的修正。

(2) 金属外壳的修正: 用在正比计数器外加不同厚度金属板的方法测得的数据表明, 此项修正可以忽略。

(3) 散射影响的修正: 周围介质(包括墙壁、天花板、地面等)对快中子的散射, 使计数器的计数增加, 必

须进行修正。

用一总长度为 50 厘米的铁-石蜡锥体来扣除散射快中子。如图 6 所示的实验安排中, 散射的贡献约为 10%。

(4) 对源强进行了时间修正。

除上述各项外, 还可能有一些因素是造成误差的主要因素, 如:

(1) 假计数: 包括漏电放电、机械振动和仪器噪声等引起的假计数。

(2) 中子能量损失: 如聚乙烯内壁的金属导电层对反冲质子的能量吸收等。

2. 单能中子剂量对能量的响应值的测定

正比计数器的能量响应值, 是利用高压倍加器和静电加速器提供的单能中子束测得的, 其结果如图 8 所示。本实验的数据与巴思(Bath)和卡斯伟尔(Caswell)的计数值^[14]平均偏差为 7.7%。

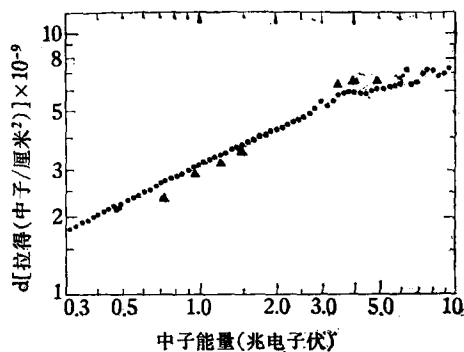


图 8 快中子剂量转换系数与能量的关系

●——实验数据; ▲——巴思和卡斯伟尔计算值

参 考 资 料

- [1] Hurst, G. S.: Fast Neutron Dosimetry, Fast Neutron Physics, part I, p. 823, New York, 1960.
- [2] Hughes, D. J. et al: Neutron Cross Section, New York, 1958.
- [3] ICRU: Nat. Bur. Stand. Handbook, 84, 1962.
- [4] Wagner, S.: Quantities and Units of Fast Neutron Dosimetry, EUR 4896-d-f-e, p. 863, 1972.
- [5] Rossi, H. H.: Health Phys., **11**, 779, 1965.
- [6] Attix, F. H.: Health Phys., **12**, 793, 1966.
- [7] Auxier, J. A.: Health Phys., **17**, 625, 1969.
- [8] Wagner, E. B. et al: Rev. Sci. Instr., **29**, 153, 1958.
- [9] Jones, T. D. et al: Health Phys., **11**, 519, 1965.
- [10] Von Frang et al: Nucleonik, **7**, 271, 1960.
- [11] CAPE-180: General Description of The RADSAN Fast Neutron Dosimeter.
- [12] Williamson, F. S.: The Dosimetry of Mixed Field of Neutron and Gamma Radiation, CONF-691106.
- [13] Nachtigall, D.: Neutron Monitoring, p. 633, 1966.
- [14] Bath, R. L. al al: Radiation Research, **35**, 1, 1968.

[本文于 1975 年 6 月 28 日收到]