

X、 γ 射线和电子束辐照 不同材料吸收剂量的换算方法

1 主题内容与适用范围

1.1 本标准规定了在 X、 γ 射线和电子束辐照下根据辐射场的特性、辐照条件、材料的组成和相关的测量,从已知的一种材料吸收剂量计算另外一种材料吸收剂量的方法。

1.2 本标准适用范围:

X、 γ 射线光子能量范围为:0.01~20 MeV;

电子束能量范围为:0.1~20 MeV。

本标准不适用于有效原子序数差别较大的两种材料界面附近吸收剂量的换算。

2 引用标准

GB 139—89 使用硫酸亚铁剂量计测量水中吸收剂量的标准方法

GB/T 15053—94 使用辐射显色薄膜和聚甲基丙烯酸甲酯剂量测量系统测量吸收剂量的标准方法

JJG 1017—90 使用硫酸铈—亚铈剂量计测量 γ 射线水中吸收剂量的标准方法

JJG 1018—90 使用重铬酸钾(银)剂量计测量 γ 射线水中吸收剂量的标准方法

JJG 1028—91 使用重铬酸银剂量计测量 γ 射线水中吸收剂量的标准方法

JJG 1001—91 通用计量名词及定义

JJG 1035—92 电离辐射计量名词及定义

3 意义与用途

3.1 辐射研究与辐射应用中剂量测量的具体方法通常是把剂量计插入介质或模拟物中的适当位置进行辐照,只有在剂量计与介质的组成、密度与辐照条件相同情况下剂量计测得的吸收剂量值才能代表介质的吸收剂量。当介质与剂量计的辐射能量吸收特性差异较大时,即使在同样条件下辐照,两者的吸收剂量也不相同,必须进行适当的换算。

3.2 依据辐射传输理论及有关的参数或拟合的经验公式,利用程序设计来计算某种材料在一定条件下的吸收剂量,或进行吸收剂量的换算。虽然这种方法能达到较好的准确度,但通常比较复杂。

3.3 本标准提供比较简单、实用的在一定的不确定度范围内进行吸收剂量换算的方法。

4 术语

4.1 吸收剂量 D

$d\bar{e}$ 除以 dm 所得的商。其中 $d\bar{e}$ 是电离辐射授与质量为 dm 的物质的平均能量,即: $D=d\bar{e}/dm$ 。

吸收剂量的单位是 $J \cdot kg^{-1}$,专门名称是戈(瑞),符号为 Gy。

$$1\text{Gy} = 1\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

4.2 质量能量吸收系数 μ_{en}/ρ

某物质对不带电电离粒子的质量能量吸收系数, μ_{en}/ρ 是 μ_{tr}/ρ 和 $(1-g)$ 的乘积, 即

$$\mu_{en}/\rho = (1-g)\mu_{tr}/\rho$$

式中: μ_{tr}/ρ ——质能转移系数;

g ——次级电子的能量在该物质中由于韧致辐射而损失的分数。

单位: $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

4.3 质量碰撞阻止本领

某物质对带电粒子的质量碰撞阻止本领 S/ρ 是 dE 除以 ρdl 而得的商, 即:

$$S/\rho = (1-\rho)(dE/dl)$$

单位: $\text{J} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$

这里 dE 是带电粒子在密度为 ρ 的物质中穿行距离 dl 时由于碰撞所损失的能量。

4.4 带电粒子平衡

受照射介质中某点处的如下状态: 在该点周围的体积元内, 带电粒子的能量、数目和运动方向均保持不变, 即带电粒子辐射率的谱分布在该体积元内不变, 亦即进入和离开该体积元的带电粒子的能量(不包括静止能量)彼此相等。

4.5 实际射程

深度吸收剂量曲线下降最陡段(斜率最大处)切线的外推线与该曲线尾部韧致辐射剂量的外推线相交点处材料的深度。

4.6 连续慢化近似射程

电子在无限均匀介质中能量从初始能量 E_0 降低到 0 所穿行的平均路程长度, 可表示为:

$$r_0 = \int_0^{E_0} dE / (S/\rho)_{tot}$$

单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

式中 $(S/\rho)_{tot}$ 为总质量阻止本领。必须注意它不是在介质中沿着入射方向所穿透的深度, 而是在连续慢化近似计算中的一个理论值。

4.7 最可几能量 E_p

电子束能谱中峰值所对应的能量。

4.8 积累效应

在射线通过介质的途径中, 向前的散射辐射使能量沉积随深度而增加, 并达到一极大值的现象。

5 X、 γ 射线能注量谱积分算法

5.1 吸收剂量计算公式为:

$$D = I \int_0^{\infty} \Psi(E) [\mu_{en}(E)/\rho] dE \dots\dots\dots (1)$$

式中 $\Psi(E)$ 为待测点每单位能量及辐射源参数(如强度、时间或某种 X 射线机特性)的能注量谱, 积分限为 $\Psi(E)$ 的能量限值; $\mu_{en}(E)/\rho$ 是质量能量吸收系数; I 是联系辐射源参数与其输出能谱的归一化常数。

5.2 $\mu_{en}(E)/\rho$ 的值见附录 B; 如果待计算吸收剂量的材料是附录 B 中没有列和的化合物或混合物, 则可用公式(2)确定:

$$\mu_{en}(E)/\rho = \sum f_i [\mu_{en}(E)/\rho]_i \dots\dots\dots (2)$$

式中 $[\mu_{en}(E)/\rho]_i$ 为 i 组分的质量能量吸收系数, f_i 为 i 组分在化合物或混合物中所占的质量分数。 μ_{en}

$(E)/\rho$ 的具体值必须针对能谱 $\Psi(E)$ 中不同光子的能量 E 来确定。

5.3 在同样辐照条件下,为了能把一种材料的吸收剂量与另一种材料的吸收剂量联系起来,测量点与周围介质必须满足电子平衡。如果辐射被较厚的吸收材料减弱,辐射的能谱与注量率将发生变化,计算时应对此进行修正。

5.4 式(1)中的积分可以用简单的算术方法估算,对特定能量的 $(\mu_{en}(E)/\rho)$ 值查附录 B₀。如果附录中无对应的能量可采用内插法确定,具体能量可以在整个射线能谱中把能量分成若干间隔,间隔尽可能小。为了选择适当的 $(\mu_{en}(E)/\rho)$,可以取间隔的起始能量或中点能量。

5.5 通常能谱 $\Psi(E)$ 可以取任意单位,并归一到某个辐射源参数。如果采用一种标准的或校准过的剂量计,式(1)中的积分必须针对构成剂量计的材料。I 值即为剂量计的吸收剂量值除以积分值

5.6 从材料 A 中测得的剂量值计算材料 B 中的剂量值可采用如下步骤:

5.6.1 由于测量吸收剂量的位置为材料的某一深度处,计算的第一步是把测得的剂量与表面剂量联系起来,求得表面剂量 D_s 。这可以将一定条件下经实验测定的 A 材料中的深度剂量曲线外推来实现,见附录 A 图 A1。

5.6.2 对材料 A 计算式(1)中的积分,然后确定 I 值,即计算外推得到的表面吸收剂量与该积分值之比。

5.6.3 计算在材料 B 待测深度处的能谱:

$$\Psi_t(E) = \Psi_0(E) \exp[-(\mu_{en}(E)/\rho) \cdot t] \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中 t 是入射表面到待测位置间的厚度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-1}$) $\Psi_0(E)$ 为入射能注量谱。

注:此式没有考虑积累效应。

5.6.4 对 $\Psi_t(E)$ 与材料 B 进行式(1)的算术积分,按 5.6.2 把得到的积分值乘以材料 A 中确定的 I 值,此乘积即为材料 B 中待测位置的吸收剂量。

6 x、γ 射线质量能量吸收系数比值法

在射线能谱递降不显著时,材料中的吸收剂量 D_m 与剂量计测得的吸收剂量 D_d 之间或两种材料吸收剂量之间的换算,有下列情况:

6.1 剂量计灵敏区的厚度比入射光子产生的最高能量的次级电子的射程小得多,剂量计沉积的能量绝大多数来自周围材料中产生的次级电子,故材料中的吸收剂量可用公式(4)表示:

$$D_m = [(S/\rho)_m / (S/\rho)_d] D_d \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中 $(S/\rho)_m$ 与 $(S/\rho)_d$ 分别为周围材料与剂量计材料的质量碰撞阻止本领。质量碰撞阻止本领值见附录 D。

6.2 剂量计灵敏体积的厚度远大于最高能量次级电子的射程时,沉积在剂量计中的能量绝大部分来自剂量计本身的次级电子,材料中的吸收剂量由公式(5)给出:

$$D_m = [(\mu_{en}/\rho)_m / (\mu_{en}/\rho)_d] D_d \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中 $(\mu_{en}/\rho)_m$ 与 $(\mu_{en}/\rho)_d$ 分别为材料与剂量计的质量能量吸收系数。

6.3 剂量计灵敏体积的厚度介于上述 6.1 与 6.2 两种情况之间,可以用公式(4)、(5)根据相对贡献大小乘上权重因子按公式(6)计算:

$$D_m \{ d \times [(S/\rho)_d / (S/\rho)_m] + (1-d) \times [(\mu_{en}/\rho)_d / (\mu_{en}/\rho)_m] \}^{-1} \cdot D_d \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中 d 为周围材料中释放的次级电子在剂量计内沉积能量占总沉积能量中的份额,它可由公式(7)求得:

$$d = (1 - e^{-\beta g}) / \beta g \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中 g 为平均路径长度,当剂量计体积为 V ,表面积为 S 时, $g=4V/S$ 。 β 为有效质量减弱系数, $\beta=4.6 R_p^{-1}$, R_p 为次级电子的实际射程。

6.4 如果在电子平衡条件下材料 A 中的吸收剂量 D_1 已由上述公式确定,那么在基本相同的条件辐照的另一种材料 B 中的吸收剂量 D_2 可由公式(8)得到:

$$D_2 [(\mu_{en}/\rho)_2 / (\mu_{en}/\rho)_1] \cdot D_1 \dots\dots\dots (8)$$

式中 $(\mu_{en}/\rho)_1$ 与 $(\mu_{en}/\rho)_2$ 分别为材料 A 与材料 B 的质量能量吸收系数。

6.5 对于与水相比光子吸收特性差异较大的材料如骨骼、硅晶体等要对辐射能量响应进行修正。

6.6 如果光子能谱在研究点具有大量低于 0.2 MeV 的成分,而且知道能谱的话,可以在整个能谱内对公式(4)、(5)或(6)进行积分得到更准确的吸收剂量值。

7 电子束辐照下材料间的吸收剂量换算

7.1 与入射电子的射程相比厚度足够薄的剂量计测定研究材料中的深度剂量分布曲线。在任何深度处,吸收剂量可用公式(4)计算。然而需要满足下列条件:

- a. 材料中测量点的深度小于入射电子射程;
- b. 材料与剂量计的质量碰撞阻止本领的比值基本上为一常数;
- c. 给定深度处能量降低了的电子仍具有足够的能量穿过剂量计。公式(4)对本标准讨论的材料及低至 0.01 MeV 的电子能量仍是有效的。

多数情况下,此吸收剂量转换的方法要求束能量不低于 0.5 MeV。对低于 0.5 MeV 入射能量的电子束,材料中吸收剂量的测量必须考虑束窗与空气层的减弱与能谱递降以及衬垫材料反散射的影响。

7.2 在能谱递降较显著时,进行吸收剂量转换计算应采用递降能谱的平均能量或对整个能谱进行积分得到阻止本领,估算平均能量的经验公式如公式(9)所示:

$$E_a = E_0 (1 - d/R_p) \dots\dots\dots (9)$$

$$d < 0.9R_p, 1\text{MeV} \leq E_0 \leq 10\text{MeV}$$

式中 E_0 为入射电子的能量, R_p 为入射电子的实际射程, d 为材料中的深度, R_p 、 d 取同样的单位($g \cdot \text{cm}^{-2}$), E_a 为该深度处电子递降能谱的平均能量(MeV)。

7.3 电子束能谱可以用能量分析系统(如磁谱仪)进行测定。不具备谱分析条件时,电子束能谱也可以通过两个参数即平均电子能量 E_a 与最可几能量 E_p ,来表征。在水或其他等效材料入射表面处电子束的最可几能量 E_p 与其实际射程 R_p 的关系如下:

$$R_p (\text{MeV}) = 0.22 + 1.98R_p + 0.0025R_p^2 \dots\dots\dots (10)$$

此式的适用能量范围为 $1 \text{ MeV} < E_p < 50 \text{ MeV}$,实际射程 R_p 的单位为 cm。对于低 Z 材料,即有效原子序数与原子量和水相近,两者的实际射程 R_{pw} 与 R_{pm} 之间具有如下关系:

$$R_{pw} = R_{pm} [(\rho_m \times \gamma_{ow}) / (\rho_w \times \gamma_{om})] \dots\dots\dots (11)$$

式中 ρ 为密度, γ_o 为连续慢化近似射程,脚注 w 与 m 分别为表示水与材料中的值。某些物质中的实际射程与连续慢化近似射程值可从附录 C、附录 D 中查得。

7.4 对于聚苯乙烯入射电子能量 E_0 与实际射程 R_p 之间的关系为:

$$E_0 (\text{MeV}) = 1.76R_p \cdot \rho + 0.33 \dots\dots\dots (12)$$

此式不适用于 $E_0 < 1\text{MeV}$ 的电子, R_p 的单位为 cm, ρ 为聚苯乙烯的密度($g \cdot \text{cm}^{-3}$)。

7.5 在铝中,入射电子能量 E_0 与实际射程 R_p 之间关系为:

对电子能量在 0.1 MeV 与 1.0 MeV 之间:

$$E_0 (\text{MeV}) = 0.069 + 7.44R_p - 8.56R_p^2 \dots\dots\dots (13)$$

对电子能址在 1.0 MeV 与 10.0 MeV 之间:

$$E_0(\text{MeV}) = 0.256 + 4.91R_p - 0.0248R_p^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中代 R_p 的单位为 cm。

8 准确度

8.1 本标准第 5 章叙述的能注量谱积分法计算值的准确度主要取决于已知能谱的准确度,即使能谱估算不太准确仍比假设某一平均光子能量估算准确。此法只有在材料测量深度处满足电子平衡时才适用。在深度大于平衡厚度时,结果的准确度不仅取决于能谱,而且与减弱修正有关。

8.2 第 6 章介绍的比值法简便实用,对于材料的原子序数差别不大、能谱递降不显著的情况下能得到满意的结果。

8.3 第 7 章推荐的电子束辐照下材料间的吸收剂量换算法方便实用,其准确度主要取决于平均电子能量的选择,和质量阻止本领(S/e)本身的不确定度。

8.4 在指定的能量范围与条件下,本标准所介绍的剂量换算法的计算剂量值对总不确定度的贡献不大于 5%。

附 录 A

带电粒子平衡厚度

(补充件)

A1 用 X 或 γ 射线照射材料时,开始能量吸收随着辐射穿透深度增加而增加,但在某一厚度下,辐射能量吸收达到一最大值,然后下降。达到最大值后相当于最大能量次级电子射程所需要的厚度称为带电粒子平衡厚度,它是辐射能量与被照射材料的质量能量吸收系数的函数。

A2 图 A1 给出了一个典型的沉积能量与材料深度关系图。0.85 吸收剂量只用于举例说明。每个源和吸收材料的组合将有它自己的特定曲线。当样品受到多方面辐照时,为了保证整个样品处于带电粒子平衡需要用吸收材料包围样品。然而,当样品受到单方向照射时,把吸收材料放在样品的正面及反面即可达到近似带电粒子平衡。

A3 在某些例子中,平衡厚度可取等于最大能量次级电子的实际射程 R_p ,对铝材料中,在 $2.5 \text{ MeV} \leq E \leq 20 \text{ MeV}$ 范围内以 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 表示的 R_p 可用下式计算:

$$R_p = 0.530E_0 - 0.106$$

式中 E_0 是入射光子产生的最大能量次级电子的能量(MeV)。

A4 对于 ^{60}Co γ 射线源,3~5mm 的聚苯乙烯(或其他等效聚合物)即可达到电子平衡。水中达到电子平衡的厚度线见图 A2。

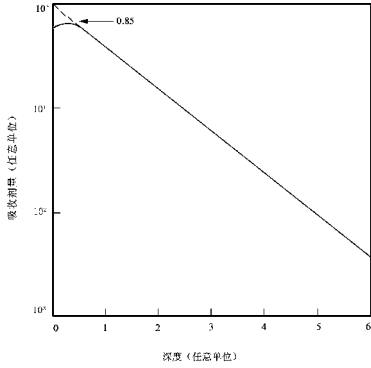


图 A1 材料中典型的浓度剂量曲线

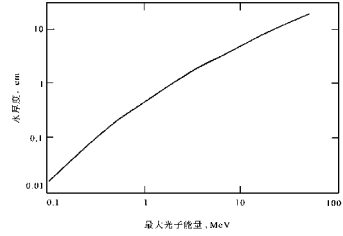


图 A2 水中电子平衡厚度

附录 B

10 keV~20 MeV X、 γ 射线在某些元素与化合物中的质量能量吸收系数 μ_{en}/ρ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
(补充件)

表 1

光子能量 MeV	氢 H	碳 C	氮 N	氧 O	铝 Al
	$[\rho=8.375 \times 10^5$ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$ μ_{en}/ρ	$[\rho=1.700 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$ μ_{en}/ρ	$[\rho=1.165 \times 10^{-3}$ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$ μ_{en}/ρ	$[\rho=1.33 \times 10^{-3}$ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$ μ_{en}/ρ	$[\rho=2.699 \text{g}$ $\cdot \text{cm}^{-3}]$ μ_{en}/ρ
0.01	0.00985	2.00	3.45	5.45	25.0
0.015	0.0110	0.543	0.942	1.51	7.38
0.02	0.0136	0.216	0.357	0.603	3.60
0.03	0.0186	0.0641	0.107	0.169	0.865
0.04	0.0232	0.0327	0.0493	0.0737	0.356
0.05	0.0271	0.0236	0.0316	0.0434	0.182
0.06	0.0305	0.0208	0.0252	0.0371	0.109
0.08	0.0362	0.0203	0.0220	0.0245	0.0546
0.10	0.0406	0.0214	0.0223	0.0235	0.0377
0.15	0.0481	0.0245	0.0247	0.0250	0.0282
0.20	0.0526	0.0266	0.0266	0.0268	0.0275
0.30	0.0570	0.0287	0.0287	0.0288	0.0282
0.04	0.0586	0.0295	0.0295	0.0295	0.0286

0.50	0.0590	0.0297	0.0297	0.0297	0.0287
0.60	0.574	0.0296	0.0296	0.0296	0.0285
0.80	0.0574	0.0289	0.0289	0.0289	0.0278
1.00	0.0556	0.0279	0.0279	0.0279	0.0268
1.50	0.0507	0.0255	0.0255	0.0255	0.0245
2.00	0.0465	0.0234	0.0235	0.0235	0.0226
3.00	0.0399	0.0205	0.0205	0.0206	0.0202
4.00	0.0352	0.0185	0.0186	0.0188	0.0188
5.00	0.0317	0.0171	0.0173	0.0175	0.0179
6.00	0.0290	0.0161	0.0164	0.0167	0.0174
8.00	0.0252	0.0147	0.0151	0.0155	0.0167
10.00	0.0225	0.0138	0.0143	0.0148	0.0165
15.00	0.0184	0.0126	0.0133	0.0139	0.0163
20.00	0.0161	0.0120	0.0128	0.0136	0.0164

铁 Fe [$\rho=7.874\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	A-150 组织等效塑料 [$\rho=1.127\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	丙氨酸 $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$ [$\rho=1.432\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	C-552 空气等效塑料 [$\rho=1.760\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	硫酸铯剂量计溶液 [$\rho=1.030\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]
μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ
137	3.68	3.31	4.70	5.86
49.0	1.08	0.910	1.31	1.67
22.6	0.450	0.364	0.528	0.681
7.24	0.135	0.0105	0.150	0.196
3.15	0.0631	0.0493	0.0664	0.0869
1.63	0.0397	0.0322	0.0399	0.0602
0.954	0.0307	0.0262	0.0298	0.0443
0.409	0.0255	0.0233	0.0238	0.0324
0.218	0.0252	0.0238	0.0231	0.0291
0.0797	0.0274	0.0266	0.0250	0.0288
0.0484	0.0294	0.0287	0.0267	0.0302
0.0337	0.0316	0.0310	0.0288	0.0320
0.0305	0.0324	0.0318	0.0295	0.0328
0.0292	0.0326	0.0320	0.0297	0.0329
0.0284	0.0325	0.0319	0.0296	0.0327
0.0272	0.0317	0.0311	0.0289	0.0319
0.0260	0.0307	0.0301	0.0279	0.0309
0.0236	0.0280	0.0275	0.0255	0.0282
0.0220	0.0258	0.0253	0.0234	0.0259
0.0204	0.0224	0.0221	0.0205	0.0227

0.0198	0.0202	0.0199	0.0187	0.0206
0.0198	0.0186	0.0184	0.0173	0.0191
0.0199	0.0175	0.0173	0.0164	0.0180
0.0204	0.0159	0.0159	0.0151	0.0166
0.0210	0.0149	0.0149	0.0143	0.0157
0.0220	0.0134	0.0136	0.0133	0.0145
0.0229	0.0128	0.0130	0.0129	0.0140

光子能量 MeV	乙醇氯苯剂量计溶液	硫酸亚铁剂量溶液	硼硅酸盐玻璃 (Pyrex)	硫酸钙 CaSO ₄	氟化锂
	$[\rho=0.880\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$ μ_{en}/ρ	$[\rho=1.024\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$ μ_{en}/ρ	$[\rho=2.230\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$ μ_{en}/ρ	$[\rho=2.960\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$ μ_{en}/ρ	$[\rho=2.635\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}]$ μ_{en}/ρ
0.01	7.01	5.41	162	39.2	5.61
0.015	2.10	1.52	4.75	12.3	1.58
0.02	0.881	0.611	1.96	5.29	0.635
0.03	0.259	0.174	0.560	1.57	0.179
0.04	0.114	0.0769	0.233	0.0657	0.0774
0.05	0.0644	0.0459	0.122	0.0337	0.0447
0.06	0.0442	0.0340	0.0755	0.0198	0.0318
0.08	0.0305	0.0268	0.0420	0.0921	0.0237
0.10	0.0272	0.0258	0.0319	0.0570	0.0222
0.15	0.0273	0.0277	0.0272	0.0344	0.0233
0.20	0.0288	0.0296	0.0276	0.0306	0.0248
0.30	0.0307	0.0318	0.0289	0.0298	0.0266
0.40	0.0315	0.0327	0.0295	0.0300	0.0273
0.50	0.0316	0.0329	0.0296	0.0299	0.0275
0.60	0.0315	0.0327	0.0294	0.0297	0.0274
0.80	0.0307	0.0320	0.0287	0.0288	0.0267
1.00	0.0297	0.0309	0.0277	0.0278	0.0258
1.50	0.0271	0.0282	0.0253	0.0254	0.0236
2.00	0.0249	0.0260	0.0233	0.0234	0.0217
3.00	0.0218	0.0227	0.0207	0.0210	0.0190
4.00	0.0197	0.0206	0.0190	0.0195	0.0173
5.00	0.0183	0.0191	0.0179	0.0187	0.0161
6.00	0.0172	0.0180	0.0172	0.0181	0.0153
8.00	0.0158	0.0166	0.0163	0.0175	0.0141
10.00	0.0149	0.0157	0.0158	0.0172	0.0135
15.00	0.0136	0.0145	0.0152	0.0170	0.0125
20.00	0.0130	0.0139	0.0151	0.0171	0.0122

尼龙 $C_{12}H_{22}O_3N_2$ [$\rho=1.080g \cdot cm^{-3}$]	石蜡 $C_{25}H_{52}$ [$\rho=0.930g \cdot cm^{-3}$]	聚乙烯 $(C_2H_4)_n$ [$\rho=0.940g \cdot cm^{-3}$]	聚甲基丙烯酸甲酯 $(C_5H_8O_2)_n$ [$\rho=1.190g \cdot cm^{-3}$]	聚苯乙烯 $(C_8H_8)_n$ [$\rho=1.060g \cdot cm^{-3}$]
μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ
2.67	1.71	1.72	2.94	1.85
0.731	0.464	0.466	0.808	0.501
0.292	0.186	0.187	0.323	0.200
0.0856	0.0574	0.0576	0.0934	0.0606
0.0418	0.0312	0.0313	0.0450	0.0319
0.0288	0.0241	0.0241	0.0302	0.0239
0.0243	0.0222	0.0222	0.0250	0.0215
0.0228	0.0227	0.0226	0.0229	0.0215
0.0237	0.0243	0.0242	0.0236	0.0229
0.0268	0.0280	0.0279	0.0266	0.0263
0.0290	0.0304	0.0303	0.0287	0.0286
0.0313	0.0329	0.0328	0.0310	0.0309
0.0322	0.0338	0.0337	0.0319	0.0317
0.0324	0.0340	0.0339	0.0320	0.0319
0.0322	0.0339	0.0338	0.0319	0.0318
0.0315	0.0331	0.0330	0.0312	0.0311
0.0304	0.0320	0.0319	0.0301	0.0301
0.0278	0.0292	0.0291	0.0275	0.0274
0.0256	0.0269	0.0267	0.0253	0.0252
0.0223	0.0233	0.0233	0.0221	0.0220
0.0201	0.0210	0.0209	0.0199	0.0198
0.0185	0.0193	0.0192	0.0184	0.0182
0.0174	0.0180	0.0179	0.0173	0.0171
0.0158	0.0162	0.0162	0.0158	0.0155
0.0148	0.0151	0.0150	0.0148	0.0145
0.0135	0.0135	0.0134	0.0135	0.0130
0.0128	0.0126	0.0126	0.0129	0.0123

光子能量 MeV	聚四氟乙烯 $(C_2F_4)_n$ [$\rho=2.200g \cdot cm^{-3}$]	重铬酸钾(银) 剂量计溶液 [$\rho=1.005g \cdot cm^{-3}$]	二氧化硅 SiO_2 [$\rho=2.320g \cdot cm^{-3}$]	水 (H_2O) [$\rho=1.000g \cdot cm^{-3}$]
	μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ	μ_{en}/ρ
0.01	6.26	5.08	18.1	4.84
0.015	1.76	1.42	5.32	1.34
0.02	0.706	0.570	2.20	0.537
0.03	0.198	0.163	0.627	0.152
0.04	0.0850	0.0729	0.260	0.0680

0.05	0.0486	0.0441	0.136	0.0416
0.06	0.0343	0.0331	0.0831	0.0315
0.08	0.0251	0.0265	0.0450	0.0258
0.10	0.0233	0.0257	0.0335	0.0254
0.15	0.0242	0.0279	0.0277	0.0276
0.20	0.0258	0.0297	0.0278	0.0297
0.30	0.0276	0.0320	0.0290	0.0319
0.40	0.0284	0.0328	0.0296	0.0328
0.50	0.0285	0.0330	0.0297	0.0330
0.60	0.0284	0.0329	0.0296	0.0328
0.80	0.0277	0.0321	0.0288	0.0321
1.00	0.0268	0.0309	0.0278	0.0310
1.50	0.0245	0.0283	0.0254	0.0283
2.00	0.0225	0.0261	0.0234	0.0260
3.00	0.0198	0.0227	0.0208	0.0228
4.00	0.0181	0.0207	0.0192	0.0206
5.00	0.0169	0.0192	0.0181	0.0191
6.00	0.0160	0.0181	0.0174	0.0180
8.00	0.0150	0.0166	0.0165	0.0166
10.00	0.0143	0.0157	0.0161	0.0157
15.00	0.0135	0.0145	0.0156	0.0144
20.00	0.0132	0.0139	0.0155	0.0139

附 录 C

0.1MeV~10.0MeV 电子束在某些材料中的实际射程($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

(补充件)

电子能量 MeV	碳	铝	铁	水
0.1	0.013 9	0.013 0	0.011 7	0.012 3
0.15	0.028 0	0.025 4	0.022 3	0.024 5
0.2	0.045 1	0.040 3	0.035 0	0.039 3
0.3	0.086 0	0.075 3	0.064 5	0.074 5
0.5	0.183	0.158	0.134	0.158
0.7	0.291	0.249	0.211	0.251
1.0	0.463	0.396	0.336	0.398
2.0	1.07	0.912	0.780	0.918
3.0	1.68	1.44	1.24	1.45
5.0	2.92	2.52	2.17	2.52
10.0	6.01	5.18	4.45	5.18

电子能量 MeV	尼龙	聚乙烯	聚乙撑对苯二酸酯	聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)
0.1	0.012 6	0.011 7	0.012 3	0.012 8
0.15	0.025 4	0.023 6	0.026 5	0.0257
0.2	0.041 0	0.038 3	0.042 8	0.041 5
0.3	0.078 1	0.073 2	0.082 3	0.0789
0.5	0.166	0.156	0.173	0.168
0.7	0.265	0.249	0.275	0.267
1.0	0.421	0.396	0.437	0.425
2.0	0.969	0.912	1.01	0.978
3.0	1.53	1.44	1.59	1.54
5.0	2.66	2.50	2.76	2.68
10.0	5.47	5.14	5.63	5.52

附 录 D

10KeV~20MeV 电子束在某些元素与化合物中的
质量碰撞阻止本领与连续慢化近似(csdA)射程

(补充件)

表 D

电子能量 MeV	氢 H [$\rho=8.375 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]		碳 C [$\rho=1.700 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]		氮 N [$\rho=1.165 \times 10^{-3} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]	
	a	b	a	b	a	b
0.01	51.3	0.000 108	20.1	0.000 282	20.0	0.000 285
0.015	36.8	0.000 225	14.7	0.000 577	14.6	0.000 583
0.02	29.2	0.000 378	11.8	0.000 960	11.7	0.000 968
0.03	21.1	0.000 788	8.63	0.001 97	8.56	0.001 98
0.04	16.9	0.001 32	6.95	0.003 27	6.90	0.003 29
0.05	14.2	0.001 97	5.90	0.004 84	5.87	0.004 87
0.06	12.5	0.002 72	5.18	0.006 65	5.15	0.006 69
0.08	10.1	0.004 52	4.25	0.010 9	4.23	0.011 0
0.10	8.74	0.006 65	3.67	0.016 0	3.66	0.016 1
0.15	6.82	0.013 2	2.89	0.031 6	2.88	0.031 7
0.20	5.85	0.021 2	2.49	0.050 3	2.49	0.050 5
0.30	4.90	0.040 1	2.09	0.094 6	2.10	0.094 6
0.40	4.45	0.061 6	1.90	0.145	1.91	0.145
0.50	4.19	0.084 8	1.79	0.199	1.81	0.198
0.60	4.04	0.109	1.72	0.256	1.75	0.254
0.80	3.88	0.160	1.65	0.375	1.69	0.370

电子能量 MeV	氢 H		碳 C		氮 N	
	$[\rho=8.375 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$		$[\rho=1.700 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$		$[\rho=1.165 \times 10^{-3} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	
1.00	3.82	0.212	1.62	0.496	1.67	0.488
1.50	3.79	0.343	1.59	0.806	1.67	0.786
2.00	3.82	0.474	1.60	1.12	1.69	1.08
3.00	3.92	0.732	1.63	1.73	1.75	1.65
4.00	4.02	0.982	1.65	2.32	1.80	2.20
5.00	4.10	1.23	1.67	2.91	1.84	2.73
6.00	4.18	1.47	1.69	3.48	1.88	3.24
8.00	4.30	1.93	1.72	4.59	1.94	4.23
10.00	4.39	2.38	1.75	5.66	1.99	5.18
15.00	4.57	3.47	1.79	8.20	2.08	7.39
20.00	4.70	4.51	1.82	10.6	2.14	9.43

注:a 碰撞阻止本领(S/ρ)_{coll}($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$);b—连续慢化近似(csdA)射程($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

氧 O		铝 Al		铁 Fe		A-150 组织等效塑料	
$[\rho=1.33 \times 10^{-3} \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$		$[\rho=2.699 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$		$[\rho=7.874 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$		$[\rho=1.127 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	
a	b	a	b	a	b	a	b
19.4	0.000 295	16.5	0.000 354	13.9	0.000 433	22.9	0.000 246
14.2	0.000 601	12.2	0.000 711	10.4	0.000 854	16.7	0.000 505
11.4	0.000 997	9.84	0.000 17	8.46	0.001 39	13.4	0.000 843
8.36	0.002 04	7.29	0.002 37	6.32	0.002 77	9.77	0.001 73
6.75	0.003 38	5.91	0.003 90	5.15	0.004 54	7.86	0.002 88
5.74	0.004 99	5.04	0.005 74	4.41	0.006 64	6.67	0.004 27
5.04	0.006 86	4.44	0.007 86	3.89	0.009 05	5.85	0.005 87
4.14	0.011 3	3.66	0.012 8	3.22	0.014 7	4.80	0.009 67
3.59	0.016 5	3.18	0.018 7	2.80	0.021 4	4.15	0.014 2
2.83	0.032 4	2.51	0.036 6	2.23	0.041 5	3.26	0.027 9
2.44	0.051 5	2.17	0.058 0	1.93	0.065 6	2.81	0.044 5
2.06	0.096 4	1.84	0.108	1.64	0.122	2.37	0.083 6
1.88	0.147	1.68	0.165	1.50	0.185	2.16	0.128
1.78	0.202	1.59	0.226	1.42	0.253	2.03	0.176
1.73	0.259	1.54	0.289	1.37	0.323	1.96	0.226
1.67	0.376	1.49	0.421	1.33	0.468	1.87	0.330
1.65	0.496	1.47	0.555	1.31	0.616	1.83	0.438
1.65	0.797	1.46	0.891	1.30	0.985	1.80	0.711
1.67	1.09	1.48	1.22	1.32	1.35	1.80	0.986
1.73	1.67	1.51	1.87	1.35	2.04	1.83	1.53

氧 O 〔 $\rho=1.33\times 10^{-3}\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 〕		铝 Al 〔 $\rho=2.699\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 〕		铁 Fe 〔 $\rho=7.874\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 〕		A-150 组织等效塑料 〔 $\rho=1.127\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 〕	
1.78	2.22	1.54	2.49	1.38	2.70	1.85	2.06
1.82	2.76	1.56	3.09	1.40	3.33	1.87	2.58
1.86	3.28	1.58	3.68	1.42	3.94	1.89	3.09
1.92	4.27	1.61	4.80	1.46	5.04	1.93	4.08
1.97	5.21	1.64	5.86	1.48	6.08	1.95	5.05
2.06	7.42	1.68	8.33	1.53	8.37	2.00	7.35
2.12	9.45	1.70	10.6	1.56	10.4	2.02	9.25

电子能量 MeV	丙氨酸 $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$ 〔 $\rho=1.432\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 〕		C-552 空气等效塑料 〔 $\rho=1.760\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 〕		硫酸铯—亚铊剂量计溶液 〔 $\rho=1.030\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 〕	
	a	b	a	b	a	b
0.01	22.1	0.000 257	19.7	0.000 289	22.4	0.000 254
0.15	16.1	0.000 526	14.4	0.000 590	16.3	0.000 519
0.02	12.9	0.000 875	11.6	0.000 980	13.0	0.000 864
0.03	9.43	0.001 80	8.48	0.002 00	9.58	0.001 77
0.04	7.60	0.002 99	6.84	0.003 33	7.72	0.002 94
0.05	6.45	0.004 42	5.81	0.004 92	6.55	0.004 35
0.06	5.66	0.006 08	5.11	0.006 76	5.75	0.005 99
0.08	4.65	0.010 0	4.19	0.01 11	4.72	0.009 85
0.10	4.02	0.014 7	3.63	0.016 3	4.09	0.014 4
0.15	3.16	0.028 9	2.86	0.032 0	3.22	0.028 4
0.20	2.73	0.046 0	2.47	0.050 9	2.77	0.045 2
0.30	2.30	0.086 3	2.08	0.095 4	2.34	0.084 8
0.40	2.09	0.132	1.90	0.014 6	2.13	0.130
0.50	1.97	0.181	1.79	0.200	2.02	0.178
0.60	1.90	0.233	1.73	0.256	1.95	0.228
0.80	1.82	0.340	1.66	0.374	1.87	0.332
1.00	1.78	0.451	1.63	0.495	1.84	0.440
1.50	1.75	0.733	1.60	0.803	1.81	0.712
2.00	1.75	1.02	1.61	1.11	1.81	0.985
3.00	1.77	1.57	1.63	1.72	1.83	1.52
4.00	1.80	2.12	1.65	2.31	1.86	2.05
5.00	1.82	2.65	1.67	2.89	1.88	2.56
6.00	1.84	3.18	1.69	3.45	1.90	3.07
8.00	1.87	4.20	1.72	4.55	1.93	4.05
10.00	1.89	5.18	1.74	5.61	1.96	5.00

15.00	1.94	7.53	1.78	8.13	2.00	7.25
20.00	1.97	9.73	1.81	10.5	2.04	9.35

氯苯乙醇剂量计溶液 [$\rho=0.880\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]		硫酸亚铁剂量计溶液 [$\rho=1.024\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]		聚甲基丙烯酸甲酯 ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$) _n [$\rho=1.190\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]		聚苯乙烯(C_3H_8) _n [$\rho=1.060\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	
a	b	a	b	a	b	a	b
21.9	0.000 259	22.4	0.000 253	22.0	0.000 258	22.2	0.000 255
16.0	0.000 531	16.4	0.000 518	16.0	0.000 528	16.2	0.000 522
12.8	0.000 884	13.1	0.000 862	12.8	0.000 879	13.0	0.000 869
9.34	0.001 81	9.59	0.001 77	9.40	0.001 80	9.49	0.001 79
7.52	0.003 02	7.72	0.002 94	7.57	0.003 00	7.64	0.001 97
6.38	0.004 47	6.56	0.004 35	6.43	0.004 44	6.48	0.004 40
5.60	0.006 14	5.76	0.005 98	5.64	0.006 10	5.69	0.006 05
4.60	0.010 1	4.73	0.009 83	4.63	0.010 0	4.67	0.009 96
3.97	0.014 8	4.09	0.014 4	4.01	0.014 7	4.03	0.014 6
3.13	0.029 2	3.22	0.028 3	3.15	0.028 9	3.17	0.028 7
2.70	0.046 5	2.78	0.045 1	2.72	0.046 1	2.74	0.045 8
2.27	0.087 2	2.34	0.084 7	2.29	0.086 5	2.31	0.086 0
2.07	0.133	2.14	0.130	2.09	0.132	2.10	0.132
1.96	0.183	2.02	0.178	1.98	0.182	1.98	0.181
1.89	0.235	1.95	0.228	1.90	0.233	1.91	0.232
1.81	0.343	1.88	0.332	1.83	0.340	1.83	0.339
1.78	0.454	1.84	0.439	1.79	0.450	1.78	0.448
1.75	0.736	1.81	0.711	1.76	0.731	1.77	0.728
1.75	1.02	1.81	0.984	1.76	1.01	1.77	1.01
1.78	1.58	1.84	1.52	1.78	1.57	1.79	1.56
1.80	2.12	1.86	2.05	1.81	2.11	1.82	2.10
1.83	2.65	1.88	2.56	1.83	2.64	1.84	2.64
1.85	3.17	1.90	3.07	1.85	3.16	1.86	3.16
1.88	4.19	1.93	4.05	1.88	4.18	1.89	4.17
1.90	5.17	1.96	5.00	1.91	5.16	1.92	5.16
1.95	8.75	2.01	7.24	1.95	7.50	1.96	7.50
1.98	9.68	2.04	9.35	1.98	9.69	1.99	9.72

电子能量 MeV	聚四氟乙烯(C_2F_4) _n [$\rho=2.200\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]		重铬酸钾(银)剂量计溶液 [$\rho=1.005\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]		二氧化硅 SiO_2 [$\rho=2.230\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]		水 H_2O [$\rho=1.000\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	
	a	b	a	b	a	b	a	b
0.01	18.4	0.000 311	22.5	0.000 252	17.8	0.000 326	22.6	0.000252
0.015	13.5	0.000 632	16.4	0.000 516	13.1	0.000 657	16.5	0.000515
0.02	10.8	0.001 05	13.2	0.000 858	10.6	0.001 08	13.2	0.000857

	硼硅酸盐玻璃 [$\rho=2.230\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	硫酸钙 CaSO_4 [$\rho=2.960\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	氟化锂 LiF [$\rho=2.635\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	尼龙 $(\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_5\text{N}_2)_n$ [$\rho=1.080\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	石蜡 $\text{C}_{25}\text{H}_{52}$ [$\rho=0.930\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	聚乙烯 $(\text{C}_2\text{H}_4)_n$ [$\rho=0.940\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]					
3.	0.0175	3.34	0.0178	3.32	0.0178	4.15	0.0142	4.42	0.0133	4.38	0.0134
39	0.0343	2.64	0.0348	2.62	0.0349	3.26	0.0279	3.47	0.0262	3.44	0.0264
68	0.0544	2.29	0.0552	2.26	0.0556	2.81	0.0445	2.99	0.0418	2.97	0.0422
32	0.102	1.94	0.103	1.91	0.104	2.37	0.0886	2.52	0.0786	2.50	0.0792
96											
1.	0.155	1.77	0.157	1.74	0.159	2.16	0.128	2.29	0.120	2.27	0.121
79	0.212	1.67	0.215	1.64	0.218	2.03	0.176	2.16	0.166	2.14	0.167
70	0.272	1.62	0.275	1.58	0.280	1.96	0.226	2.07	0.213	2.06	0.214
64	0.395	1.55	0.400	1.52	0.409	1.87	0.330	1.98	0.311	1.97	0.313
58											
1.	0.522	1.53	0.529	1.49	0.541	1.84	0.438	1.94	0.413	1.93	0.416
55	0.842	1.51	0.852	1.47	0.876	1.80	0.712	1.91	0.672	1.90	0.676
54	1.16	1.52	1.17	1.47	1.21	1.80	0.987	1.91	0.932	1.90	0.938
55	1.78	1.55	1.80	1.49	1.87	1.82	1.53	1.93	1.45	1.92	1.46
58											
1.	2.38	1.58	2.40	1.51	2.52	1.85	2.06	1.95	1.95	1.94	1.96
60	2.97	1.61	2.99	1.53	3.15	1.87	2.58	1.98	2.45	1.97	2.46
63	3.54	1.63	3.55	1.55	3.76	1.89	3.10	2.00	2.93	1.98	2.95
65	4.64	1.66	4.64	1.57	4.96	1.92	4.09	2.03	3.89	2.02	3.91
68											
1.	5.69	1.69	5.67	1.59	6.11	1.95	5.06	2.05	4.81	2.04	4.83
70	8.15	1.73	8.05	1.63	8.84	1.99	7.36	2.10	7.02	2.09	7.05
75	10.4	1.76	10.2	1.65	11.4	2.02	9.54	2.13	9.12	2.12	9.16
78											

附录 E

连续光子能谱下吸收剂量计算实例

(参考件)

E1 假定硅剂量计测量脉冲射线机输出的 X 射线在特定位置的剂量为 15 Gy。

E2 X 射线机输出的 X 射线能谱如图 E1 所示的变化,以 $1/E$ 表示,这里 E 为光子能量,从 100 keV~1 MeV。在图 E1 中 X 射线机的输出光子注量归一到测量点的光子能量(keV)与光机的输入能量(J)。所以,纵坐标的分度单位为:光子数 $\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{keV}^{-1}\cdot\text{J}^{-1}$ 。

E3 由于待测量的量是吸收剂量,归一化后需要输出能注量而不是光子注量,能量间隔的归一能注量可以用每能量间隔所对应的光子能量乘以图 E1 中的归一光子注量。图 E2 所示的结果表明,在全部能量范围内归一能注量为恒定值,等于:100 keV $\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{keV}^{-1}\cdot\text{J}^{-1}$ 。

E4 在此测量点,考虑到剂量计是用硅吸收剂量校准的,并放置在材料中深度剂量曲线的峰值处。对所述能谱曲线见图 E1。虽然此曲线具有一定代表性,但对每种辐照源与相关条件必须实验测定。

E5 图 A1 表明硅吸收剂量深度曲线的峰值为 E1 中所指出的入射能谱外推表面剂量的 85%,所以此例中外推表面剂量可用测得的吸收剂量(15 Gy)除以 0.85 得到,即 $15/0.85=17.6\text{ Gy}$ 。