

发光和化学发光时大幅度提高 TL 灵敏度对低剂量测量才是有用的。还需要做长期衰退的研究,检验新研制的 $\text{BaSO}_4:\text{Eu}$ 。

另一新的高灵敏的硫酸盐荧光体 $\text{K}_2\text{Ca}_2(\text{SO}_4)_3:\text{Eu}$ 是在 1000°C 通过固体状态扩散形成的,它在 150°C 的 TL 峰和灵敏度是 $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ 的 5 倍,贮存 10 天没有明显的衰退。然而照前在 $200\sim 600^\circ\text{C}$ 范围退火,其衰退增大到 100 倍,类似于 $\text{BaSO}_4:\text{Eu}$ 。

很明显,对高灵敏的稀钽激活的硫酸盐

材料最后还没有结论。尽管在 TL 过程中涉及一中间步骤(能量贮存效率),目前可得到的 TL 荧光体的绝对 TL 效率($<1\%$)与稀钽为基层的荧光影像增强屏的发光效率($>80\%$)比较算不上什么了,但是判断它们是否可替代目前已公认的 $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ 或 Tm 荧光体,仍需进一步研究。

[Radiat Prot Dosim 1992;40(4):219~220(英文)戴光复节译 孙福印校]

热释光剂量计的探测限和测定限

Hirning CP

摘 要:将探测限和测定限的统计学原理运用于热释光剂量计(TLD),可推导出计算这些限值的方程式。本文描述了三种不同级别的 TLD 检测系统,每一级别各有一种检测程序,并提供应用系统的实例,以及探测限和测定限对本底辐照的依赖性。结果表明,有必要对 TLD 系统低剂量监测的术语进行明确定义。

TLD 系统能够测量到的最小剂量是多少?这个问题看上去简单明了,其实答案远没有这么简单,实际上只有通过验证才能回答这个问题。本文试图阐明其中的统计学概念和技术性概念,并提出合适的试验方法。

本文仅限于光子区,并考虑了剂量计试验进程的统计学的可行性。假设在剂量计的运转中只出现正态波动和随机波动。系统误差也可能对探测限有很大影响,但可以找到此类误差并尽量减小它,因而系统误差并不是系统的绝对限制因素(系统误差包括剂量计的能量及角响应引起的误差)。

原 理

在下列推导中,辐射量采用空气比释动能而不用剂量或剂量当量。其原因有两点:

(1)许多 TLD 系统是根据空气比释动

能来校准的,因为它原先在标准实验室用来表示光子辐射量(空气比释动能,更精确地说是游离空气中的碰撞空气比释动能,早期已被 ICRP 指定为辐射量。而后者在许多机构中,包括安大略核电站,仍用作工作量)。

(2)使用空气比释动能可以避免因引入剂量模型而引起的混淆。由于剂量测定系统的低水平响应能力不能依赖于所用剂量模型,因而最好根据一种明确而通用的量来进行计算。空气比释动能剂量当量系数可用于将最后结果转化为剂量当量单位。

TLD 读数方差

辐照在 TLD 的总空气比释动能为 K_t 时,读数方差由以下公式得出:

$$\sigma_t^2 = \sigma_n^2 + \sigma_k^2 K_t^2 \quad (1)$$

其中, σ_n^2 是零读数方差(即未标量的剂量计上所得读数); σ_k^2 是在高空气比释动能下观察到

的相对方差($\sigma_a K_i$, σ_n)。公式(1)将方差的两个部分看作是互不相关的。这个假设已被大量实验证实,因而可在多数剂量测定系统应用中提供良好的经验说明。

如果总空气比释动能由本底辐射部分 K_b 和职业性辐射部分 K_w 组成,那么 $K_t = K_b + K_w$, $\sigma_t^2 = \sigma_n^2 + \sigma_w^2 (K_b + K_w)^2$ 。

如仅有本底辐射,则方差为 $\sigma_b^2 = \sigma_n^2 + \sigma_w^2 \cdot K_b^2$ 。因此零读数方差的公式如下:

$$\sigma_b^2 = \sigma_n^2 - \sigma_w^2 \cdot K_b^2 \quad (2)$$

探测限

对任何用解析过程测量的探测限 L_b 是指在一定置信度下能探测到的最小量。在可探测限下职业的照射所接受空气比释动能 $K_w = L_b$, 且总空气比释动能 $K_b + L_b$ 的方差为:

$$\sigma_b^2 = \sigma_n^2 + \sigma_w^2 (K_b + L_b)^2 \quad (3)$$

合并公式(2)和(3),得:

$$\sigma_b^2 = \sigma_n^2 + \sigma_w^2 (2K_b L_b + L_b^2) \quad (4)$$

据 Currie (1968) 所述,计算探测限的公式为:

$$L_b = \kappa_a \sigma_b + \kappa_\beta \sigma_w \quad (5)$$

其中 κ_a 和 κ_β 来自标准正态分布,并分别与单侧置信度 $1-\alpha$ 和 $1-\beta$ 相对应。参数 α 是把并不存在的空气比释动能判断为正的空气比释动能和概率,称作第一类错误,或假阳性。参数 β 是判断对实际存在的正空气比释动能没有探测到的概率,称作第二类错误,或假阴性。合并公式(4)和(5),并重新排列,得出探测限的公式为:

$$L_b = \kappa_a \sigma_b + [\kappa_\beta^2 \sigma_b^2 + \kappa_\beta^2 \sigma_w^2 (2K_b L_b + L_b^2)]^{1/2} \quad (6)$$

公式(6)的统计参数将全部剂量计看作一整体。这些参数一般通过测定 n 个本底剂量计和 m 个高比释动能剂量计的样本来进行估算。采用样本统计学,并使置信度 α 等于 β , 这样,公式(6)就变成:

$$L_b = t_n S_b + [t_n^2 S_b^2 + t_m^2 S_w^2 (2\bar{K}_b L_b + L_b^2)]^{1/2} \quad (7)$$

其中 t_n 和 t_m 是在所需置信度上的剂量计样

本量为 n 和 m 时学生氏分布的 t 因子; S_b 是 n 个本底剂量计的标准差, \bar{K}_b 是测得的平均空气本底比释动能。

根据公式(7)可求出 L_b :

$$L_b = \frac{2(t_n S_b + t_m^2 S_w^2 \bar{K}_b)}{1 - t_m^2 S_w^2} \quad (8)$$

这与 DOELAP 标准(美国能源部, 1986)中的公式(19)相似。其主要差别有:①公式(8)明确表示出本底剂量计和高比释动能剂量计的样本大小差别,而在 DOELAP 标准中却将两者视为大小相同。②公式(8)中的平均空气本底比释动能 \bar{K}_b 并不包括非辐照诱导的所有信号,而在 DOELAP 标准中,其相应量 H_b 可能包括这部分信号。

测定限

如上所定义,探测限是仅仅基于从本底中正确分辨出职业性照射量的可能性。如果我们确定在给定精度下能测得的最小空气比释动能,那么这个相应的量就是测定限。Currie (1968) 将测定限解释为:

$$L_q = \kappa_q \cdot \sigma_q \quad (9)$$

其中 κ_q 是所期望的最大相对标准差的倒数, σ_q 是测量极限辐照水平 L_q 时得到的标准差。对于测定限,表示式类似于公式(4),即:

$$\sigma_q^2 = \sigma_b^2 + \sigma_w^2 (2K_b L_q + L_q^2) \quad (10)$$

合并公式(9)和(10),得:

$$L_q = \kappa_q [\sigma_b^2 + \sigma_w^2 (2K_b L_q + L_q^2)]^{1/2} \quad (11)$$

应用样本统计学,公式变为:

$$L_q = \kappa_q [S_b^2 + S_w^2 (2\bar{K}_b L_q + L_q^2)]^{1/2} \quad (12)$$

其中 S_b , S_w 和 \bar{K}_b 的含义与公式(7)中相同。在公式(12)中,不存在对样本大小的明显依赖性,唯一的要求就是样本必须足够大,以满足对总体参数进行正确估算。

重排公式(12)即得二次方程式:

$$(1 - k_q^2 S_w^2) L_q^2 - 2k_q^2 S_w \bar{K}_b L_q - k_q^2 S_b^2 = 0 \quad (13)$$

它的正根是:

$$L_q = \frac{k_q^2 S_w^2 \bar{K}_b + [\kappa_q^2 S_w^2 \bar{K}_b^2 + k_q^2 S_b^2 (1 - \kappa_q^2 S_w^2)]^{1/2}}{1 - k_q^2 S_w^2} \quad (14)$$

在公式(14)中,现实的 TLD 系统中起主导作用的项是根号下第二项。 L_0 值对于空气本底比释动能值 \bar{K}_0 并无强烈依赖性。如果所期望的相对标准差 k_0^{-1} 未远大于 S_p , 那么公式(14)中的分母项就会很小,而 L_0 会很大。在物理学中,这就表示系统在测量低剂量时不可能达到所期望的在高剂量测量时所能达到的同样的相对精密度。

实验

以上推导出的定义和方程式看起来准确无误,但在确定如何精确测定其中的标准差时却包含了大量的判断。一个 TLD 系统在整体上是由许多部分组成的,每个部分对最后结果的不精确性都有贡献。因此,确定系统哪些部分对标准偏差贡献较大是至关重要的,作出这一判断又取决于最终测试目的。

用于监测远离剂量计实验室地区的人员辐照剂量的典型 TLD 系统,因其日益复杂的实验目的和装置规格而分成三个级别。

I 级:读数装置和剂量计

作者希望能确定一特定 TLD 读数装置和剂量计组成的系统的低剂量测量能力,它不依赖于特定操作环境。这一点很有用,比如说,可以评估各种可供选择的技术,以确定哪一种可用于常规剂量测定。

与本级相适应的试验可按下列步骤进行:

按厂商规定的程序,准备好两组(每组至少20只)剂量计。用已知空气比释动能(至少为3mGy)的射线辐照其中的一组,然后读出两组剂量计的数值。必须在准备好以后立即读数,以使空气本底比释功能小到可以忽略不计,即 $K_b \approx 0$ 。

应用元素的校正系数校正灵敏度的变化——如果常规使用——及读数装置校正系数,得到以空气比释动能为单位的结果。从未辐照的那组剂量计计算出样本标准差 S_b ,从辐照过的那组剂量计计算出相对样本标准差 S_p ,然后根据所给的置信度(一般是95%)求出 t 因子,再用公式(8)计算

出探测限。同样,对给定的精度要求(一般用10%,使 $k_0 = 1/0.10 = 10$),用公式(14)计算出测定限。

II 级:解析过程

在整个解析过程中确定探测限和测定限是本级的关键所在。实验包括每天在相同水平辐照下观察剂量计读数的变化,但必须使剂量计处在对照实验环境中。

有很多因素可影响 TLD 读数的标准差。不仅有剂量计及其对照组的读数的不精确,还包括标准剂量计及其对照组读数的不精确和校准剂量计运输过程中所致的不精确度。在确定读数的整体标准差时有两种选择方式,一种是试图测出各自的标准差,然后从理论上将它们加起来(如 Earand 和 Polgar, 1983)。另一种是设计一个实验,对所有基础统计分布均能取样,以使实验标准差能够真正代表解析过程。第二种方法看来更便于实现,又能获得正确的结果。因此,这里选用第二种方法。

本级实验过程如下:

象 I 级实验那样,准备、辐照、读出两组(每组至少10只)剂量计的读数。重复这一过程至少9次以上,每次用不同的测试和测试对照剂量计及校准和校准对照剂量计,并使校准剂量计的辐照次数不同。这样就基本上保证了不确定性的各种来源被充分取样。

计算出每组未辐照剂量计的样本方差 S_b^2 ,然后算出10组剂量计的平均方差。计算出每组辐照过的剂量计的相对方差 S_p^2 ,然后算出平均相对方差。将这些平均值代入公式(8)和(14),计算出解析过程的探测限和测定限。

III 级:剂量测定系统

TLD 系统的个人剂量计并不局限于在对照环境中的解析过程,它还包括剂量计的分发和收集,及它们在工作场所的储存和使用。这些附加过程可能会增加剂量估算中的不精确性,而且肯定包含于总体剂量测定系统低剂量探测能力的任何评估之中。

试验过程与前一部分的描述类似,但

现在必须将两组试验剂量计(每组至少10只)分发到工作场所,并将它们和常规剂量计存放在一起。在剂量测定周期中某一时刻对其中一组用选择好的高剂量给以辐照,然后收集起来送回剂量测定实验室进行评估。平均样本方差的计算同上。

然而在此实验中空气本底比释动能不能忽略。作者根据每组未辐照过的剂量计上获取的结果计算出平均空气本底比释动能,然后将10组数据进行平均,得出 K_b 的总平均值(要从剂量计读数中计算出空气本底比释动能,必须将本底辐照的读数部分与非辐照源(如光电倍增管暗电流)的读数部分分开,后者所根据刚刚调零的剂量计读数来计算,亦可立即重读试验剂量计而得),最后再用公式(8)和(14)计算出探测限和测定限。

Ⅲ级实例:

安大略核电站的 TLD 系统用于监测其核电站的工作人员。这个 TLD 系统使用双元素 TLD-700剂量计,根据加拿大原子能有限公司的设计(Jones, 1971),用安大略核电站自制的读数装置进行读数。用空气比释动能为 88, 175, 263 和 2629 μGy (照射量分别为 10, 20, 30 和 300 mR) 四个水平的 ^{137}Cs γ 射线照射 10 个剂量计。完全按照常规剂量测定的规程操作,但操作人员不是固定不变的。

这个过程不象上述Ⅲ级试验通则那样所有试验剂量计都被辐照,但它给出的结果却几乎相同。从每个照射水平上总数为 100 个的剂量计读数所得的平均结果,将用

于计算探测限和测定限。各周期之间的结果有着显著差异,这表明有必要扩展周期获取资料,以表征系统的长期平均性能。

根据 88 μGy 的结果可计算出 22.6 μGy 的平均标准差。由于标准差在低剂量时并不随着剂量的改变而迅速变化[公式(1)],因此可将其看作为 S_b 值。根据 2629 μGy 的结果得出平均相对标准差为 0.068, 可作为 S_a 值。在这些试验中,空气本底比释动能并未精确测定,它将作为变量被保留。

讨论

解析系统的探测限有时仅用本底信号标准差的倍数来表示,这个量称作临界水平或制定限,以它作为探测限的优先选择的制定标准是不合适的(Currie, 1968)。它的使用会导致出现比上述探测限和测定限更低的值。

所有能级的空气本底比释动能与 10% 精密度相应的测定限,远大于 95% 置信的探测限。采用实例中的数据和空气比释动能为 60 μGy 时,计算出 L_Q 值所期望的相对精密度($k\sigma^{-1}$)的变化关系。作者注意到当相对精密度约为 0.31 时,测定限与探测限相等(78 μGy)。换言之,在探测限上的相对精密度为 31%。

这些比较表明,必须明确规定 TLD 系统的“最小可探测剂量”的含义。没有一个明确的定义,引用数值的意义就会被误解。

[Health Phys 1992; 62(3): 223~227(英文)]

林洁节译 孙福印校

终生剂量限值:是有益的实践还是有害的政策?

Peper CW

摘要:最近有报道认为,过去 NCRP 可能低估了由低水平辐射引起的危险度。为此,几个公用事业机构都采取措施来降低工作人员受到的终生照射量。通过工作场所的设