

电子束吸收剂量的计算机模拟 与测量值的比较

王传珊 罗文芸 许梦杰 周树鑫 冯永祥

(上海科技大学射线应用研究所, 上海 201800)

张利民 顾继青

(上海市计量技术研究所, 上海 200233)

摘要 介绍了电子束在多层吸收体中能量沉积半经验算法的计算机程序 ED 510, 将热介石墨量热计对电子束深度剂量分布的实验测量值和 ED 510 程序的计算值比较, 在 3% 以内相符合, 程序可以计算一到五层。

关键词 计算机程序 ED 510, 热介石墨量热计, 辐射加工, 深度剂量分布

利用加速器产生的电子束对各种材料进行辐照处理具有许多优点, 例如生产效率高、无污染等等, 因此, 电子束辐射加工在国内外发展迅速, 并有了相当的工业化程度, 同时, 辐照过程中的剂量测量也成了相当重要的研究课题^[1,2]。目前, 一般有两种方法测量剂量, 一是用各种剂量计实测剂量, 例如薄膜剂量计和丙氨酸/ESR 剂量计等。准绝热型热介石墨吸收剂量计, 则是选择各向异性的热介石墨为吸收体材料, 采用量热法绝对测量电子束剂量, 作为电子束辐射加工水平剂量标准^[3]。另一种方法是半经验算法, 用计算机模拟电子束在被辐照材料中的深度剂量分布^[4], ED 510 程序就属于这类计算机程序。半经验算法不同于 Monte-Carlo 方法和输运方程数值解的方法。Monte-Carlo 方法能模拟每一个物理过程, 但必须化费很长的计算时间, 才能得到统计误差较小的结果。解输运方程比应用 Monte-Carlo 方法方便些, 但前者不能包括能量损失歧离的效应, 再加上离散性误差和存在重复计算收敛性的问题, 要使它发展成为实用性算法是很困难的^[5]。半经验算法的基础是实验结果和 Monte-Carlo 模拟数据, 它有很高的精确度和很好的实用性, 其优点在于能利用小型计算机和个人微机, 在解决复杂问题时, 能节省计算机内存和计算时间。

1 ED 510 程序

ED 510 程序是 T. Tabata 设计的 EDMULT(Energy Deposition in Multilayer Absorbers)^[6]即计算电子在多层介质中能量沉积的计算机程序的一种发展。该程序是作者与 T. Tabata 合作编写的。在电子束能量为 100 keV—20 MeV 的较宽能区, 被辐照材料的有效原子序数为 5.6—82 的范围内, 用它可以计算平面平行电子束正入射到多层(一层到五层)平板介质时的深度剂量分布。在 ED

收稿日期: 初稿 1994-04-01, 修改稿 1994-06-02

510 程序中,最基本的子程序是 **EDEPOS**,用于计算单层均匀介质半无限厚吸收体中电子束深度剂量分布,其主要半经验公式有

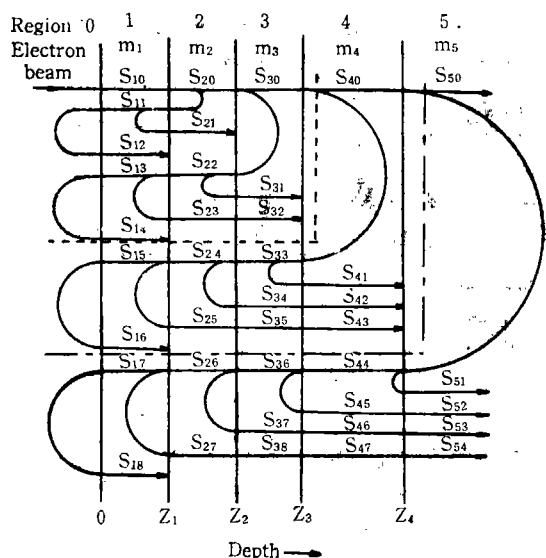


Fig 1. Schematic paths of electrons assumed in the five-layer algorithm

序。后来又将 **EDMULT** 推广到四层介质^[10]。本文将其扩展到可以计算从一层到五层的 **ED 510** 程序。在图 1 中,虚线内的是 **EDMULT** 的路径图,点划线内的是 **ED 410** 的路径图,全图表示电子在五层介质中的路径,每段路径用 S_{KL} ($k=1, 2\cdots 5$, 表示介质的层数, L 表示 k 层中路径的段数, $L=1, 2, \cdots$) 表示,例如, S_{44} 表示穿透第一,二,三,四层介质后被第五层介质(包括四、五层界面)反散射到第四层的电子对能量沉积的贡献,其余类推。有关详情请参阅文献[5,8-10]。改进后的程序适用于电子能穿透的介质层数比较多的情况,例如,电子加速器辐照多层材料的层数至少为四层,下面讨论的量热计层数为五至六层等。

2 热介石墨量热计

这里讨论的准绝热型石墨量热计是上海市计量研究所研制的“电子束辐射加工剂量标准测量系统”中的测量标准,其测量的基本原理是:如果沉积在吸收体中的电子束能量全部转化为热,而且没有状态变化,并在测量过程中没有显著的热损失,那末量热测量可以给出吸收剂量的真实量度

$$D = \Delta E / M = C(T) \Delta T$$

式中 ΔE 是电离辐射给予质量为 M 的物质的平均授与能量, $C(T)$ 是吸收体材料的有效比热,它是温度 T 的函数, ΔT 是温度的变化,量热计吸收体中的平均吸收剂量可表达为

$$D = \int_{T_a}^{T_b} C_{eff}(T) dT$$

其中 $C_{eff} = \sum M_i C_i(T) / \sum M_i$, M_i 是吸收体中第 i 个组分的比热。吸收体包括石墨、温度传感器、引线 and 粘合剂等, T_a 、 T_b 是用准绝热方法外推算出的温度。当有效比热 C_{eff} 以 $J/g \cdot ^\circ C$ 为单位时,吸收剂量的单位是 kGy 。

$$D(x)dx = -f \frac{d}{dx} [T(x) \eta_{TN}(x)] dx$$

$$T(x) = T_0 \exp(-a_1 s - a_2 s^2 - a_3 s^{4.4})$$

$$f = 1 - \eta_{BE} - Y$$

$$\eta_{TN}(x) = \exp(-\alpha s^{1.5})$$

$$S = Z/r_{ex}$$

$$\alpha = (1 - 1/a_5)^{1-4.5}$$

其中 $D(X)$ 表示厚度为 X 时的能量沉积, f 是归一化因子, $T(X)$ 表示深度为 X 时电子的剩余能量, η_{TN} 为电子穿透系数, η_{BE} 为背散射系数, Y 为辐照产额, T_0 为电子入射能量, Z 为吸收体原子序数, r_{ex} 是电子的外推射程, a_i ($i=1, \cdots 5$) 是调节参数。

在 **EDEPOS** 的基础上,考虑到电子背散射效应,利用等效性原理^[6],将计算单层的 **EDEPOS** 推广到可以计算一层到三层的 **EDMULT** 程

在石墨量热计设计中，关键是吸收体厚度的选择，它依赖于电子束能量，在 0.5—3.0 MeV 范围内，通常在最大射程的 1/3 处是峰值剂量，在 2/3 处为有效剂量。因此，在此能量范围内，选用大于 1/3 和小于 2/3 最大射程的厚度为吸收体最佳厚度，表 1 中石墨射程是吸收体厚度设计的依据。

Tab 1. The absorber thickness design of the graphite calorimeter

Calorimeter	Electron beam energy/MeV	(1/3)r /mm	(2/3)r /mm	Absorber thickness/mm	Equivalent thickness/g·cm ⁻²
1 [#]	3.00	2.794	5.587	3.0	0.648
	2.50	2.301	4.630		
2 [#]	2.00	1.804	3.608	2.0	0.432
	1.75	1.554	3.108		
3 [#]	1.50	1.303	2.607	1.5	0.324
	1.00	0.802	1.603		

3 石墨量热计测量与 ED 510 计算结果的比较

石墨量热计结构可以近似看成为多层平板介质结构，包括热绝缘的聚苯乙烯泡沫塑料、热介石墨吸收体和与吸收体材料相同的外套。加速器产生的电子束从钛窗出来后，首先经过空气层，然后达到石墨量热计，因为吸收体面积较小(φ 30 mm)，所以加速器产生的电子束可以近似为平行电子束正入射于平面平板介质，可用 ED 510 程序对此过程进行计算机模拟。

3.1 参照3[#]量热计参数和实验条件，用 ED 510 程序对此实验进行模拟，第一层为空气(厚度为从钛窗到石墨剂量计的距离)，第二层为泡沫塑料，第三层为绝热薄片，第四层为吸收体石墨，第五层为石墨衬底。电子入射能量为 1.5 MeV，计算结果如下。图 2 是深度剂量分布的计算曲线，计算可得吸收剂量因子

$$K = 10^2 / X_s \int_{x_a}^{x_a + x_s} D(x) dx = 253 (kGy \cdot m^2 / C)$$

其中 X_s 是空气、泡沫塑料和绝热薄片三者的厚度之和， X_a 是石墨吸收体厚度， $D(X)$ 是微分能量沉积。

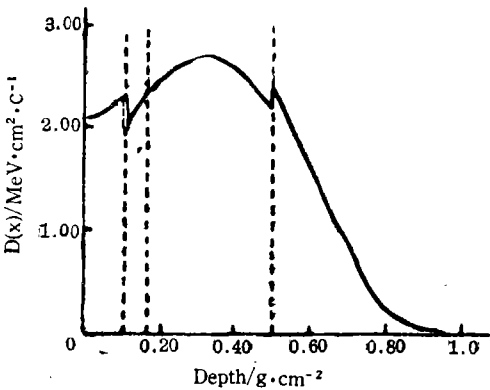


Fig 2. The depth-dose curve of electron beam in the graphite calorimeter

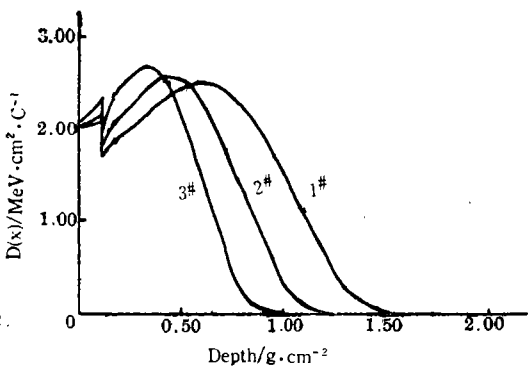


Fig 3. The absorber thickness design simulated by ED 510 code

3.2 在实验测量中,用3^{*}量热计,在1.5 MeV, 30 μ A, 扫描电流0.8 A, 距离钛窗15 mc 的条件下,辐照6次,每次10s,测量平均吸收剂量为 $D=2.090$ kGy(6次平均值),标准相对偏差为 $\pm 0.48\%$,换算为吸收剂量因子 $K=261$ kGy $\cdot$ m²/C,与上述ED 510程序计算结果比较,相对误差为3%。

3.3 ED 510程序对吸收体厚度设计的模拟结果表明(见图3),3种量热计不同能量对应于所选择的等效厚度(图3中电子束入口与出口剂量相等时对应的厚度),分别为:1^{*},0.72; 2^{*},0.42; 3^{*},0.33 g/cm²。这与表1所列的数据甚为一致,能量沉积峰都落在吸收体厚度范围内,这说明表1中对吸收体厚度的设计是合理的。

4 讨 论

4.1 由上述比较可见,ED 510程序计算结果与石墨量热计实验测量结果两者符合很好,这充分说明,在电子束辐照加工剂量学中,准绝热型石墨量热计用作剂量测量标准是准确的、合理的。它不仅能实测剂量值,还可以用来校准无源剂量计。ED 510程序使用方便,计算速度快,精度高,可用作电子束辐照加工的剂量设计和模拟辐照条件。两者结合,对促进电子束辐射加工产业化具有积极意义。

4.2 从ED 510计算所得到的石墨量热计深度剂量分布曲线的形状来观察,电子微分能量沉积呈较尖锐的分布,而且是介质深度和电子束能量的敏感函数。如若改变吸收体的厚度或电子束的能量,沉积在石墨吸收体中的电子能量会发生变化,深度分布也将变化。因此,对于不同的电子束能量,吸收体厚度的选择是相当重要的,若选择不当,将影响量热计的准确度。

4.3 在最新的EDMULT程序版本中,单层的EDEPOS结果已与各大实验室实测结果和Monte-Carlo结果符合得相当好。目前,EDMULT的各版本已被存入美国橡树岭国立实验室信息中心。ED 510是从EDMULT发展来的,在单层向多层扩展中,引进了一些新的假设,如界面上使用等效性原理等,此外,在应用ED 510计算石墨量热计的深度剂量分布时,将石墨量热计视为平面平板均匀介质,也将引进一定的误差。在以往的研究中,由于程序能计算的介质层数最多为三层,在处理多层介质问题时,必须作不同程度的简化,并且由于所采用的剂量计准确度的限制,计算与实测结果的误差平均为6%左右。现在,将程序推广到了可以计算一层到五层介质的ED 510,并且有量热计的标准值相比较,结果良好。

参 考 文 献

- 1 Humphreys J C, McLaughlin W L. Radiat. Phys. Chem., 1990, 35:774
- 2 Miller A, Kovacs A. Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res., B 1985, 10/11:994
- 3 Limin Zhang. Radiat. Phys. Chem., 1993, 42:765
- 4 Tabata T. Radiat. Phys. Chem., 1990, 35:821
- 5 Garth J C. Trans. Am. Nucl. Soc., 1986, 52:377
- 6 Tanaka R. In Preprints of the 32nd Autumn Meeting Jpn. Soc. Appl. Phys., Japan, 1971:231
- 7 Tabata T. Radiat. Phys. Chem., 1989, 33:411
- 8 Tabata T. Jpn. J. Appl. Phys., 1981, 20:249
- 9 Ito R, Tabata T. RCOP-TR8, Radiation Center of Osaka Prefecture, 1978
- 10 王传珊,许梦杰等.辐射研究与辐射工艺学报,1989,7,(4):50

A COMPARISON OF ABSORBED DOSE SIMULATED BY COMPUTER AND MEASURED EXPERIMENTALLY FOR ELECTRON BEAM

Wang Chuanshan Luo Wenyun Xu Mengjie Zhou Shuxin Feng Yongxiang

(Shanghai Applied Radiation Institute, Shanghai University of Science
and Technology, Shanghai 201800)

Zhang Limin Gu Jiqing

(Shanghai Institute of Metrology Technology, Shanghai 200233)

ABSTRACT A semiempirical code ED 510 which can simulate depth-dose distribution of the energy deposition of electron beam in multilayer absorbers is described in this paper. The absorbed dose of electron beam computed by ED 510 code is compared with the experimental result that measured by graphite absorbed-dose calorimeter, and their deviation is between 3%.

KEYWORDS ED 510 code, Graphite calorimeter, Radiation processing,
Depth-dose distribution

(上接第 238 页 Continued from P238)

THE CALCULATION OF MEAN ENERGY FOR ELECTRON BEAM IN THE ENERGY RANGE OF RADIO THERAPY IN LIGHT MEDIA

Jiang Bin Luo Zhengming

(Center for Radiation Physics, Institute of Nuclear Science and Technology,
Sichuan Union University, Chengdu 610064)

ABSTRACT In this paper, a Gaussian distribution for electron energy is deduced by Fokker-Planck approximation to the Boltzmann equation for high-energy electrons penetrating in multi-constituents media, then a recursion-iteration algorithm for the mean energy calculation of high-energy electron beam is obtained after introducing the modified CSDA mean energy and using Yang's multiple scattering theory. Some calculational results of this algorithm are also given in the article, and compared with corresponding data of Monte Carlo simulations and experimental measurements. The comparison shows that the algorithm can precisely predict the mean energy of high-energy electron beam penetrating in light media. Furthermore, two common formulae for electron beam mean energy calculation in radiotherapy dose algorithms, i. e., the Harder formula and Brahme formula, are discussed, and a more accurate semi-empirical formula is recommended in this paper as well.

KEYWORDS Mean energy of electron beam, Radiotherapy, Radiation doses,
Electron beam dosimetry