

# 电子束辐照装置屏蔽体预埋管道处的 辐射场计算

商 静 李为民

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

**摘要** 电子束辐照装置的屏蔽体内总有预埋管道, 这些管道将降低屏蔽体的局部屏蔽能力。为定量评估管道对屏蔽效果的影响, 本文用蒙特卡罗程序 MCNP 模拟计算管道中心线上与屏蔽体外受管道影响区域的辐射剂量。结果表明, 随着管道与墙体夹角的增加, 屏蔽体外光子能谱逐渐变软且辐射剂量不断降低。夹角大于  $50^\circ$ , 角度对剂量的影响不再明显; 而墙外辐射剂量受管道直径影响显著。根据计算结果, 针对管道贯穿墙体的情况提出了一些屏蔽设计中值得参考的建议。

**关键词** 电缆辐照加工, 屏蔽设计, 管道, MCNP 程序

**中图分类号** TL508

近几十年来, 辐射加工技术产业化以年均 20% 的速度增长。辐射加工以其独特的优势, 广泛应用于工业、农业、医疗、化工、环保等领域, 为社会创造巨大经济利益的同时也促进了电子束辐照装置的迅猛发展。据统计, 到 2007 年 10 月, 我国已建及在建电子辐照装置 133 台(部分外资企业未包括在内), 其中投入运行者 100 台, 在建者 33 台。近两年中, 安徽省新增 7 台地纳米加速器和 1 台电子直线加速器, 可见加速器已逐渐成为辐射加工业的主流辐照装置。因此, 研究辐照加速器周围辐射屏蔽问题有其现实意义。

图 1<sup>[1]</sup>所示为典型电缆辐照车间的电线、电缆穿过辐照室屏蔽墙情况。

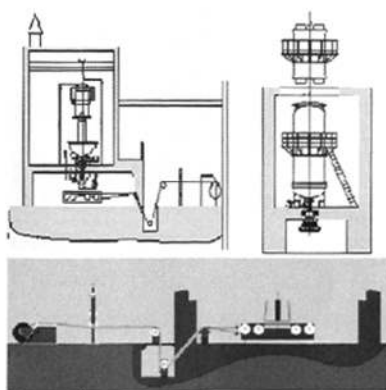


图 1 典型的电缆辐照车间图  
Fig.1 Typical workshop for cable irradiation.

低能加速器屏蔽设计的基本方法已有详细论述, 但针对某些类型的加速器屏蔽设计还存在一些尚未很好解决的问题。例如, 电线、电缆辐照装置屏蔽体内有较大口径的预埋管道, 这就有管道对于屏蔽效果的影响、管道与墙体夹角的合理范围等问题。本文针对以上问题, 用 MCNP 程序进行模拟计算与讨论, 为相关的屏蔽设计提供参考。

## 1 模拟计算

MCNP 是广为应用的成熟软件。本文选用该程序的 MCNP5 版本进行辐射场计算。

### 1.1 计算条件

用于电缆辐照的电子加速器都属中低能加速器, 束流能量在 1.5–3.0 MeV, 功率在 20–90 kW。3 MeV 电子垂直于地面打靶时, 侧向  $90^\circ$  出射的韧致辐射能谱峰值在 1 MeV 以下。因此用一束 1 MeV 平行光垂直入射 70 cm 厚的混凝土墙, 墙体中斜穿一根圆柱形管道, 其对墙面的倾角为  $\theta$ , 记录墙外受管道影响的区域内(图 2 标注\*以及圆球处)的光子通量。之所以选择记录光子通量而非能量沉积, 是因为墙体对光子的屏蔽能力较强, 到达墙外的样本数量过低, 使模拟计算结果精度不够。为使计算过程兼顾精确性和时效性, 就直接记录墙外光子通量, 再通过后续数据处理将通量转换成剂量。减少耗时的另一途径, 是合理选择跟踪粒子的数目, 原则是

第一作者: 商静, 女, 1985 年生, 中国科学技术大学在读研究生, 核技术及应用专业

通讯作者: 李为民, lw@ustc.edu.cn

收稿日期: 2010-12-31, 修回日期: 2011-03-11

要确保点探测器的输出结果误差小于 5%。计算中发现, 随着倾角  $\theta$  的增大, 所需跟踪粒子总数也得增大, 才能使输出结果有较高的可信度。此次计算的跟踪粒子总数均在  $10^6$  以上。输入文件中的基本几何结构如图 2 所示, 其中原点 O 是管道中心线与入射平面的交点, A 点是管道入口处与屏蔽墙相交的上边界, B 点是管道出口处与墙体相交的下边界。

## 1.2 剂量当量计算方法

MCNP 程序记录的是光子通量, 在屏蔽设计中关注的是剂量当量。在 MCNP 软件的输入文件中按表 1 中的能量区间分段记录光子能谱, 再除以相应的转换系数得到剂量当量率。由于空气和水对 1 MeV 以下光子的吸收本领相差不多, 空气中光子通

量和剂量当量率的转换系数可按水对光子的吸收系数计算。



图 2 输入文件中计算模型示意图  
Fig.2 Schematic for calculation in the input file.

表 1 相当于  $10^{-5}$  Sv/h 光子通量密度的相对剂量当量转换系数<sup>[2]</sup>  
Table 1 Conversion factor between photon flux density and dose equivalent<sup>[2]</sup>

| 光子能量<br>Photon energy /MeV | 通量密度<br>Photon flux density /cm <sup>2</sup> ·s | 光子能量<br>Photon energy /MeV | 通量密度<br>Photon flux density /cm <sup>2</sup> ·s |
|----------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|
| 0.01                       | 362                                             | 0.15                       | 4 173                                           |
| 0.015                      | 903                                             | 0.20                       | 2 919                                           |
| 0.02                       | 1 693                                           | 0.30                       | 1 812                                           |
| 0.03                       | 3 879                                           | 0.40                       | 1 322                                           |
| 0.04                       | 6 215                                           | 0.50                       | 1 051                                           |
| 0.05                       | 8 296                                           | 0.60                       | 878                                             |
| 0.06                       | 9 031                                           | 0.80                       | 675                                             |
| 0.08                       | 8 272                                           | 1.00                       | 561                                             |
| 0.10                       | 6 773                                           | —                          | —                                               |

## 2 计算结果及讨论

### 2.1 屏蔽墙后光子通量

为观察管道对屏蔽体后光子能谱随倾角  $\theta$  的变化, 记录不同直径管道出口处中心线上在三个出射方向上的能谱。图 3 列出了夹角为  $10^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $70^\circ$  时出口处的光子能谱。由图 3, (1) 出口位置光子总通量随倾角增大而降低, 在上述三倾角下, 能谱中的峰值依次下降一个量级左右。(2) 随着倾角变大, 出射光子的能谱峰位由高能端向低能方向移动。倾角为  $10^\circ$ , 峰位在 0.8 MeV 左右, 倾角为  $70^\circ$ , 峰值峰位在 0.4 MeV 处。可见, 到达墙外的光子能谱随倾角增大而变软, 其原因可能是由于倾角增大使管道长度增大, 光子需经历更多次散射后到达墙外, 从而导致能谱变软。(3) 对于相同的倾角, 光子总通量与管道直径成正比相关。

### 2.2 屏蔽墙后光子剂量当量率

在辐射防护中, 除了辐射场的能谱, 周围剂量当量率也是重要参数。按表 1 给出的光子通量与剂量当量率的转换系数, 将模拟计算给出的光子通量进行转换, 得到不同管径的墙外剂量当量率随倾角变化的趋势(图 4)。

为观察管道倾角对于墙后辐射水平的影响, 从  $10^\circ$ ~ $80^\circ$  每间隔  $10^\circ$  模拟计算一次墙外辐射剂量当量率。考虑到墙后剂量当量率的最大值不一定在管道出口的中心线位置上, 而应在其附近, 因此在管道出口附近每隔 10 cm 选取一点进行记录(图 2 标注 \* 的位置), 取其最大值作为对应倾角下墙后辐射剂量当量率的数值。图 4 为剂量当量率最大值随不同直径管道和倾角的变化情况, 对于不同直径的管道, 倾角大于  $50^\circ$ , 剂量当量率的变化均趋平缓, 即倾角对剂量当量率的影响不再明显。

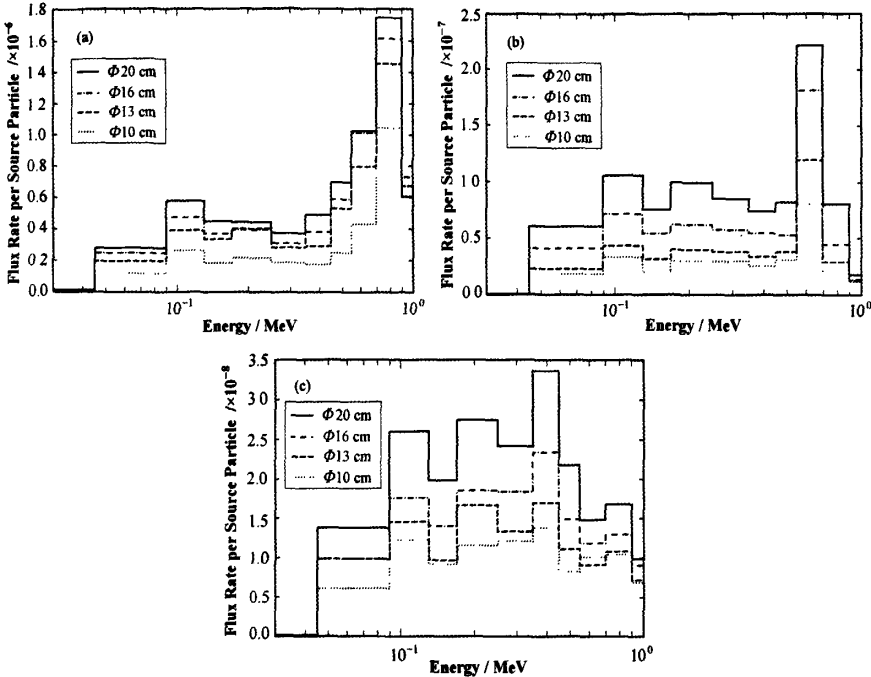


图 3 预埋管道( $\Phi 100\text{--}\Phi 200$ )以(a) $10^\circ$ 、(b) $45^\circ$ 、(c) $70^\circ$ 倾角穿越墙体时,屏蔽体外的光子通量  
Fig.3 Photon flux outside the bio-shield with  $\Phi 100\text{--}200$  ducts in the wall at (a) $10^\circ$ , (b) $45^\circ$  and (c) $70^\circ$  angles.

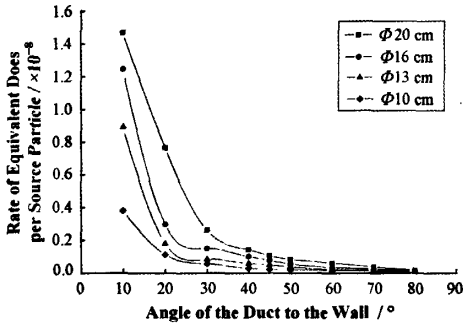


图 4 管道出口处当量剂量率随管道倾角的变化  
Fig.4 Changes in equivalent dose rate with the duct angle, outside the wall embedded with the duct.

### 2.3 屏蔽墙外受管道影响区域内的辐射水平

光子会经屏蔽墙内的管道壁多次散射后到达墙外,管道的存在也降低了屏蔽墙的有效厚度,这些均使到达墙外的光子增多。由图 4,管道倾角为  $50^\circ\text{--}60^\circ$  时,可有较好屏蔽效果。对  $50^\circ\text{--}60^\circ$  倾角管道的墙外辐射场的计算结果如图 5 所示。

图 5 曲线的变化趋势基本相同,从内无管道的完整屏蔽墙开始,辐射水平缓慢上升,然后出现一个平台,接着出现一个峰值,最后缓慢下降至原有水平。这种变化趋势很好地反映了屏蔽效果的变化情况。在图 2 的 a 区,图 5 曲线虽开始上升,但此

处剂量接近于完整屏蔽墙外的辐射水平,屏蔽效果尚好;在 b 区,屏蔽墙有效厚度随高度降低,图 5 曲线上升趋快;进入 c 区后,屏蔽墙有效厚度为定值,图 5 曲线出现平台;管道出口区,图 5 曲线出现峰值,显然为管道内散射光子的影响,这一区域当是辐射防护的重点区域;e 区的剂量当量率降至完整屏蔽墙外水平。

由图 5,倾角为  $60^\circ$  时,墙外的当量剂量率水平略低于  $50^\circ$  倾角,说明剂量随倾角增大而减小。而管径越大,曲线平台区越短,因为管径增大图 2 的 c 区减短, b 区与 d 区则增大。

### 2.4 管道轴心线上的当量剂量率

我们还模拟了管道内部不同位置的当量剂量率。取  $\theta=55^\circ$ ,以图 2 中 O 点为原点,在水平方向间隔 10 cm 的管道中心线上取点作计算,结果如图 6 所示。在水平距离  $\leq 20$  cm 范围内,管径越小的管道中心线上的当量剂量率越大。这是因为,入射光子可直接到达该范围内的计算点,对这些计算点的当量剂量率贡献占很大比重;且管径越小,计算点位置受入口附近管道内壁(主要是被直接照射的管道内壁)散射光子越多。当水平距离  $\geq 30$  cm,计算点的当量剂量率以管道内散射光子的贡献为主。管径越大,进入管道的入射光子总量越多,且相邻两次

散射间的路径也越长，管道内光子所经历的散射次数越少，导致剂量偏大。因此在屏蔽设计时，要综

合考虑管道直径与倾角的因素，使光子在管道中经历尽可能多的散射次数而到达墙外。

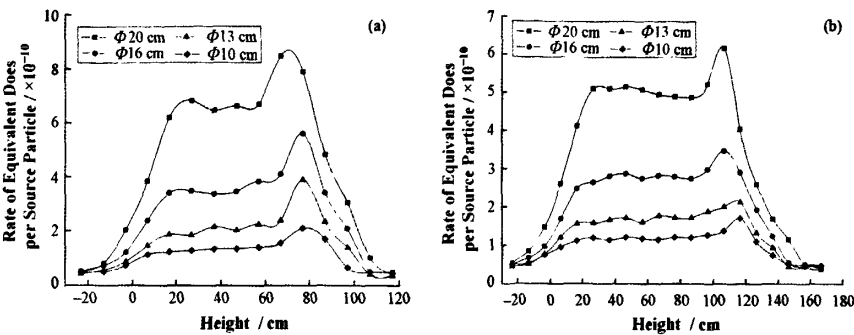


图 5 管道倾角为 50°(a)和 60°(b)时屏蔽墙外剂量当量分布  
Fig.5 Distribution of equivalent dose rate outside the wall embedded with 50° (a) or 60° (b) ducts.

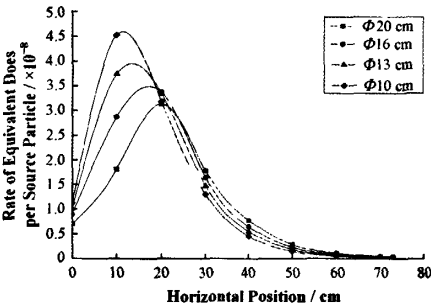


图 6 管道内部中心线上剂量当量率变化趋势  
Fig.6 Changes in equivalent dose rate on axis of a 55° duct embedded in the wall.

3 讨论

通过对墙外管道出口处辐射场的模拟计算，屏蔽设计中应注意如下问题：

- (1) 要合理选取管径及倾角，使光子在管道中经历尽可能多的散射次数而到达墙外；
- (2) 在条件许可的前提下采用尽可能小的管径，以减少进入管道的入射光子量，并使光子在管道中的散射次数增多，从而降低管道出口处的散射光子量，软化光子能谱，也可减轻其对屏蔽体有效厚度的影响；
- (3) 可选择用多个小口径管道代替一个较大口径管道；
- (4) 对于受管道影响而有效屏蔽厚度降低的部位(如图 2 中 c 区域内)，可考虑附设屏蔽结构，如附加一层铁板等；

(5) 管道倾角大于 50°，当量剂量率的变化趋于平缓，故管道倾角以 50°–60° 为宜；

4 结语

计算了预埋管道处屏蔽墙外的辐射水平，定量评估了管道对墙体屏蔽能力的影响，为类似屏蔽设计提供了理论依据。基于模拟计算结果，给出了屏蔽设计中值得注意的问题，并提出相关的建议。预埋管道与屏蔽体屏蔽效果的研究，有待更深入的计算，以及当量剂量分布测定，总结出相应的经验公式，为屏蔽设计提供更有力的帮助。

参考文献

1 核技术应用项目环境影响报告表. 安徽华菱电缆集团有限公司新建辐照加速器项目. 安徽省环境保护厅监制, 2010: 17–18  
Environmental Protection General Office of Anhui Province, Environmental Impact Report about Nuclear Technology Application Projects, New Irradiation Accelerator Project of Anhui Hualing Cable Group Co., LTD. 2010: 17–18

2 刁会昌, 王义民, 杜德林, 等. 加速器保健物理. 北京: 原子能出版社, 1983: 37  
DIAO Huichang, WANG Yimin, DU Delin, et al. Accelerator Health Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1983: 37

## **Radiation field calculation outside the duct-embedded shielding wall of an E-beam irradiator**

SHANG Jing LI Weimin

( *National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China* )

**Abstract** Duct-embedded shielding walls of an electron beam irradiator may weaken the shielding effect locally. In order to evaluate how this happens to the E-beam irradiator, the radiation dose distribution outside the duct-embedded walls and on the pipes axis were simulated by the Monte Carlo code of MCNP. The simulation results show that with increasing duct angles to the wall, the photon energy spectrum softens and the radiation dose reduces generally, but at the angles exceeding 50°, the radiation doses are not in apparent decreases. In addition, the duct diameter is an important factor for the radiation shielding. Based on the simulation, suggestions are given for reference of shielding designs of cable irradiation facilities.

**Key words** Cable irradiation, Shielding design, Duct, MCNP

CLC TL508