

电子加速器探伤机的轫致辐射屏蔽及环境评价

邵和松, 王慧芳, 张 骏

中图分类号: R147 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2005)04-0250-02

【摘要】 目的 分析电子加速器探伤机产生的轫致辐射的屏蔽及对环境的影响。方法 以一台 20MV 电子加速器探伤机为例, 从电子加速器轫致辐射源的特征出发, 论述了加速器的辐射防护方法, 然后运用剂量估算和实测两种方法进行辐射环境评价。结果 通过估算和实测, 各个关心点的年剂量当量均小于剂量约束目标值。结论 建设此类设施, 只要加强辐射防护, 加速器产生的轫致辐射对周围环境的影响是可接受的。

【关键词】 电子加速器; 辐射防护; 环境评价

Shielding And Environmental Assessment for Electron Accelerator. SHAO He-song, WANG Hui-fang, ZHANG Jun. *Graduate school, China Academic of Engineering Physics, Mianyang, 621900, China.*

【Abstract】 Objective To analyze the shielding of the radiation generated by electron accelerators and its impact on environment. **Methods** An example of 20MV electron accelerator is given. Based on the characteristics of electron accelerator radiation source, the method for radiation protection is discussed. then dose estimate method and dose measurement method are applied for environmental assessment. **Results** By estimation and measurement, annual dose of each concerned point is proved to be smaller than the defined dose. **Conclusion** If radiation protection is enforced when people build this equipments, the radiant impact on environment can be accepted.

【Key words】 Electron Accelerator; Radiation Protection; Environmental Assessment

辐照探伤是工业上无损探伤中的一种有效方法, 它是利用轫致辐射穿过不同厚度的工件时, 其损失的能量不同这一基本特征, 分析辐照在工件内部的正常结构和缺陷间出现的辐射强度衰减变化, 来探测工件内部缺陷的方法。由于 X 射线探伤机和⁶⁰Co 探伤机能量低, 对于一些较大工件远不能满足无损探伤要求。电子加速器作为高能量的轫致辐射源以它的靶点小、灵敏度高、能量大、穿透工件厚的特点, 用于大厚度工件, 特别是对某些特殊产品的质量检验, 有着广泛的应用。但电子加速器产生的轫致辐射一直是人们关注的问题, 笔者以一台 20MV 电子加速器探伤机为例, 对此进行分析。

1 电子加速器轫致辐射源

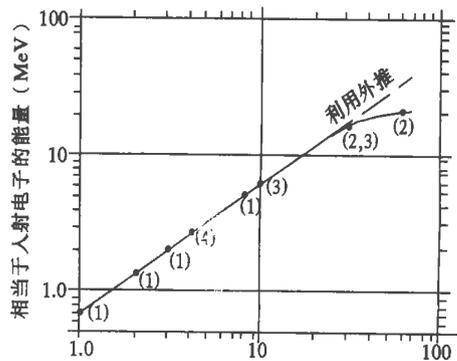
轫致辐射穿过工件时能量被吸收, 其能谱将发生变化, 工件后面的辐射由两部分组成: 一部分是直接穿过工件的轫致辐射; 另一部分是由各种次级辐射组成的散射。

20 MV 加速器工作方式是单脉冲形式, 脉冲宽度为 90 ns, 年工作 2 000 次, 产生的电子束最大能量可达 20 MeV。由于电子束能量高、束流强, 轰击高原子序数物质(如钨、钨等)时, 产生的轫致辐射的产额是很高的。在给定的工作条件下, 在靶前 1 m 处一次脉冲的照射量可达 $1.55 \times 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$, 照射率可达 $10^7 \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。因此, 被加速的电子束流受到钨或钨靶的阻挡时, 所产生侧向(90°方向)的 X 射线及主射束(0°方向)的 X 射线是屏蔽防护的主要对象。

1.1 主束方向(0°方向)X 射线的照射量和能量 加速电子轰

击重金属靶产生的 X 射线量是其出射角的函数, 出射角各向异性分布是十分明显的。轫致辐射的角分布与加速器的能量有关, 它的半张角 φ 可由经验公式 $\varphi = 110^\circ / E_{\text{max}}$ 确定^[1]。当电子束能量为 20 MeV 时, 0°方向出射的 X 射线占主要成份时, 其射线束的张角约为 11°。这种射线是连续的能谱分布, 其光子的有效能量约为其电子束最大能量的 1/3, 即 7.0 MeV^[2]。

1.2 侧方向(90°方向)X 射线的照射量和能量 侧向射线束(90°方向)的 X 射线辐射强度约为主射束(0°方向)的 2%, 能量比主射束(0°方向)的 X 射线的能量低。图 1 表示出射角 90°方向 X 射线的有效电子能量与入射电子能量之间的关系^[3]。由图 1 可知, 20 MeV 电子束在侧向(90°方向)所致的能量最大约为 10 MeV, 其相应的轫致辐射光子有效能量为 3.3 MeV^[2]。



分析 90° 方向发射的 X 射线的透射比, 相当的电子能量与入射电子能量的关系

图 1 90 度方向电子能量关系

作者单位: 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900
作者简介: 邵和松(1981~), 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 环境评价。

[10] 刘长安, 王文学, 贾廷珍. 对放射工作人员健康检查的几点看法[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2001, 21(5): 378-379.
[11] 刘长安, 王文学, 贾廷珍, 等. 浅议放射工作人员健康检查项目的规范化[J]. 中国工业医学杂志, 2001, 14(4): 244-245.
[12] 刘长安. 放射工作人员职业健康监护[M]. 北京: 原子能出版社, 2004, 94-135.
[13] 刘长安, 邵玉霞, 贾廷珍. 受过量照射工作人员的医学管理[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2003, 23(5): 387-389.

[14] 刘长安, 乌丽娅, 杨光, 等. X 射线荧光透视用于常规体检是否合理[J]. 中国辐射卫生, 2002, 11(2): 111.
[15] UNSCEAR. 电离辐射源与效应, 联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)2000 年向联合国大会提交的报告及科学附件[R]. 中国核学会辐射防护学会译, 太原: 山西科学技术出版社, 2002.
[16] GBZ128-2002. 职业性外照射个人监测规范[S].
[17] 白光. 关于放射工作人员医学监督工作的回顾与思考[J]. 中国辐射卫生, 2002, 11(1): 48-51.

(收稿日期: 2005-03-15)

2 辐射防护

20 MV 电子加速器安装在混凝土建筑物大厅内, 并设置防护门, 使电子束轰击重金属靶产生的 X 射线在大厅外的泄漏辐射减弱到可接受的水平。

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 中规定限值要求, 结合《粒子加速器辐射的防护规定》(GB5172-85) 中的 2.8 和 2.10 条款确定工作人员年人均有效剂量 ≤ 5 mSv, 公众个人年有效剂量 ≤ 0.1 mSv。同时考虑到高能电子产生的韧致辐射的前向性, 在屏蔽体厚度设计中考虑到辐射角分布规律。

2.1 屏蔽厚度估算

2.1.1 屏蔽厚度估算依据 X 射线在屏蔽体中的衰减倍数与屏蔽材料的种类、厚度及射线的能量、出射角有关。屏蔽体的厚度根据十分之一减弱层的数目来确定屏蔽层的大致厚度, 本装置确定的屏蔽体材料为混凝土(密度 = 2.3 g/cm^3) 构筑物, 其十分之一屏蔽层厚度是射线能量的函数。在屏蔽估算中采用文献 [3] 给出的混凝土的 $T_{1/10}$ 曲线, 曲线上所示的 $T_{1/10}$ 值都是对应于宽束 X 射线的情况。

2.1.2 X 射线贯穿辐射的屏蔽厚度估算模式 按照 GB5172-85 《粒子加速器辐射防护规定》的有关设计要求, 根据设定的剂量目标值和无屏蔽体时的年照射量, 对于主射线束向(0°方向)和侧向(90°方向)的相关点估算出所需最小混凝土屏蔽厚度。

2.1.2.1 主射线和漏出束剂量估算模式

$$X_i = \eta \cdot X_{i,e} \quad (1)$$

式中: X_i ——屏蔽外参考点的照射量(C/kg); η ——透射系数; $X_{i,e}$ ——无屏蔽体时, 距离 $r(\text{m})$ 的年照射量(C/kg)。

2.1.2.2 屏蔽厚度估算模式

$$d = T_{1/10} + (n - 1) T_e \quad (2)$$

式中: d ——屏蔽层厚度(cm); $T_{1/10}$ ——第一个十分之一屏蔽层厚度值(cm); T_e ——平衡十分之一屏蔽层厚度值(cm)。

$$n = \lg \left(\frac{1}{\eta} \right) \quad (\eta \text{ 同上}) \quad (3)$$

2.2 估算结果及建成后实际值 运用以上模式估算主射线束向(0°方向)及侧向(90°方向)相关点的最小混凝土屏蔽厚度及根据估算结果建成的实际厚度见表 1。

表 1 相关点混凝土最小屏蔽厚度估算值及建成后的厚度

射线束及方向	相关点与源中心的距离(m)	居留因子	最小屏蔽厚度估算值(cm)	建成后的屏蔽墙厚度(cm)
主射线束 0°方向	18.4	1	166	180
侧射线束 90°方向	9.1	1	82	140

3 韧致辐射环境影响分析

3.1 剂量估算 根据与源距离和建成后的屏蔽体厚度, 可求出韧致辐射经屏蔽体后的各个关心点的剂量率。剂量率 H_i 的估算模式为:

$$H_i = H_w \cdot B \cdot e^{-\mu d} \quad (4)$$

式中: H_i ——屏蔽体外参考点的剂量率(Sv/a); H_w ——无屏蔽体时, 距离 $r(\text{m})$ 处的剂量率(Sv/a); B ——累积因子, 用泰勒公式计算; μ ——混凝土线性衰减系数 cm^{-1} ; d ——屏蔽墙厚度 cm 。

根据 μd 和 X 射线有效能量可查文献 [5] (P285) 的附表, 采用内插法求得累积因子 B 值。屏蔽体厚度与衰减倍数的关系查《辐射防护手册》有关的图表。

运用以上模式估算了运行时各个关心点位置的剂量当量见表 2。

3.2 实测结果 运行时对主射线束 0°方向屏蔽墙外工作人员处(大厅后墙面正对束口)的周围剂量进行了测量, 结果列于表 3 及布点示意图见图 2。表 3 中周围剂量当量为 40 次脉冲的平均值。

由表 3 可见, 装置建成运行时, X 射线经屏蔽墙屏蔽后, 墙

外的实测剂量比估算剂量低一些。说明现有屏蔽墙厚度可满足辐射防护要求。

表 2 运行时各个关心点位置的剂量当量估算结果

关心点位置	混凝土屏蔽厚度(cm)	与辐射源距离(m)	居留因子	单次脉冲墙外剂量率(mSv/次)	墙外剂量率(mSv/a)
主射线束 0°方向墙外工作人员	180	18.4	1	1.18×10^{-3}	2.36
主射线束 0°方向公众	180	100	1/2	2×10^{-5}	0.04
侧向射线束 90°方向墙外工作人员	140	9.1	1	1.97×10^{-3}	3.94
侧向射线束 90°方向公众	140	100	1/2	8×10^{-6}	0.016

表 3 主射线束 0°方向屏蔽墙外周围剂量当量监测结果

测量点编号	监测位置	周围剂量当量(mSv/次)
1	左侧	7.55×10^{-4}
2	上方	8×10^{-4}
3	中心	7.85×10^{-4}
4	右侧	7.6×10^{-4}
5	下方	7×10^{-4}

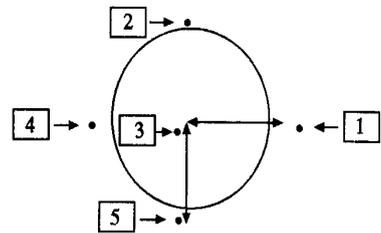


图 2 主射线束 0°方向屏蔽墙外面布点示意图

3.3 韧致辐射环境影响评价 通过对工作人员和公众关心点 X 射线直接贯穿辐射的计算, X 射线经相应的辐射屏蔽体减弱后, 各个关心点的年剂量当量均小于剂量约束目标值。其中工作人员年剂量当量小于 4 mSv/a , 公众个人年剂量当量最大为 0.04 mSv/a 。此外, 以上计算均未考虑辅助房间砖墙和围墙对 X 射线的衰减作用, 在正式运行时, 表 3 中的实测值小于计算值。

由计算结果和实测结果可见, X 辐射对工作人员和厂外公众所造成的剂量水平完全满足剂量约束目标值的要求, 对工作人员和公众造成辐射危害是可忽略的, 对周围环境的影响不大。

4 结语

利用电子加速器对大厚度工件进行无损探伤是一种先进的工艺技术, 它已应用于重型机械、化工等各个领域。笔者通过估算和实测, 一台 20MV 电子加速器探伤机产生的韧致辐射经屏蔽墙后对周围环境的辐射影响是可接受的。建设此类设施, 只要严格按照相应的标准和方法加强辐射防护, 工作人员和公众的剂量能满足相应的限值要求。

参考文献:

[1] 一机部自动化研究所电子感应加速器组. 电子感应加速器韧致辐射照相探伤方法[J]. 机电技术, 1975, (5): 215.
 [2] H. W. 帕特森 R. H. 托马斯. 加速器物理[M]. 北京: 原子能出版社, 1983, 16. 65. 296.
 [3] NCRP Report No. 51 Radiation Protection Design Guidelines for 0.1~100MeV Particle Accelerator Facilities[R]. 107
 [4] 李士俊. 电离辐射剂量学[M]. 北京: 原子能出版社, 1981, 288.
 [5] 李德平, 潘自强. 辐射防护手册(第三分册)[M]. 北京: 原子能出版社, 1987, 95.