

# 某辐照装置屏蔽的剂量计算

陈超, 陈亮平, 韩春彩

中国原子能科学研究院辐射安全研究所, 北京 102413

**摘要:** 目的 评估一个典型辐照装置的  $\gamma$  辐射屏蔽效果。方法 根据国家标准, 计算了  $\gamma$  辐射在迷道内的透射、散射和天空反散射的剂量, 并与实际测得的辐射剂量进行了比较。结果 透射、散射和天空反散射导致的剂量均低于国家标准限值, 散射剂量率的实测值比计算值低。结论 屏蔽能够满足辐射防护的要求。

**关键词:** 辐照装置;  $\gamma$  射线; 散射; 迷道

中图分类号: R144 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2015)04-03-0351

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2015.04.013

近年来, 我国的辐照加工事业取得较大的发展。截止 2014 年 10 月, 我国共有辐照装置 100 余座, 总装源量  $5.2\text{E}+18\text{ Bq}$  ( $1.4\text{E}+08\text{ Ci}$ )。随着一批高活度源的辐照装置投入使用, 为了保证工作人员和公众的健康, 进行剂量计算, 评估辐射安全非常必要。辐照装置一般采用主防护墙透射和迷道散射来降低射线剂量。计算主防护墙后面和迷道出口处人员所受的剂量可以验证防护墙和迷道设置的有效性。本文计算了某典型辐照装置防护墙外的透射剂量率和入口处的散射剂量率, 并把散射剂量率的计算值和实测值进行了比较。

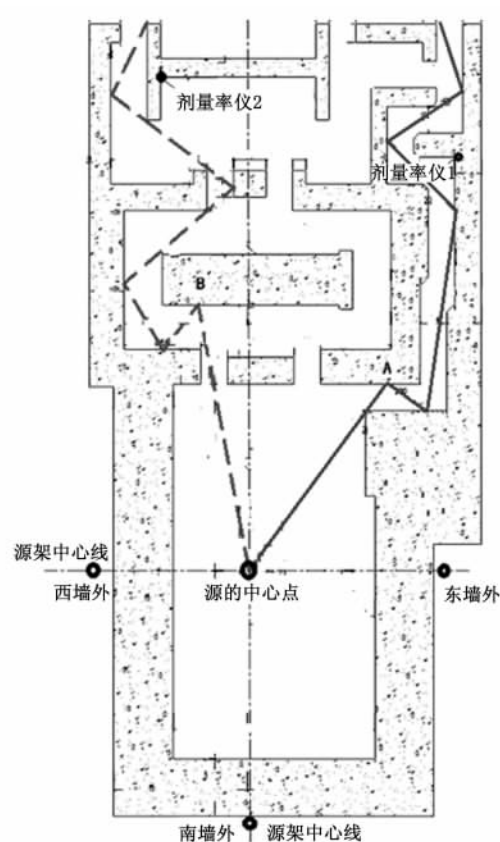
## 1 材料与方法

**1.1 评价依据** 《 $\gamma$  辐照装置的辐射防护与安全规范》(GB 10252-2009) 规定, 在辐照装置工程设计、运行和退役时辐射防护的剂量约束值规定为: a) 辐射工作人员个人年有效剂量值为  $5\text{ mSv}$ ; b) 公众成员个人年有效剂量值为  $0.1\text{ mSv}$ , 下面将以此标准对屏蔽效果进行评价。

**1.2 装置情况** 某公司的辐照加工装置设计源活度为  $1.48\text{E}+17\text{ Bq}$  (400 万 Ci), 辐照源为  $\text{Co}-60$ , 所发射的  $\gamma$  射线平均能量为  $1.25\text{ MeV}$ 。具体辐照流程为: 将需要辐照的产品运至操作大厅装料段, 由人工装至输送道上的辐照箱内, 经由迷道入口自动输入辐照室进行辐照, 在辐照室内自动换层接受辐照, 完成辐照后经由迷道出口输出辐照室, 在操作大厅卸料段由人工卸出。

**1.3 通道情况** 辐照室的进出口采用迷宫式通道。

防护主体为混凝土(密度为  $2.30\text{ g/cm}^3$ ) 结构, 包括主防护墙和迷道防护墙, 主防护墙厚度为  $2.15\text{ m} \sim 2.25\text{ m}$ , 辐照室顶部防护层厚度  $1.95\text{ m}$ 。通道的结构见图 1。



注: 实线为人员通道散射路径, 虚线为货物通道散射路径。

图1 散射路径和透射位置示意图

## 2 剂量计算

**2.1 穿透辐射** 装置正常运行时, 放射源发出的  $\gamma$  射线穿透屏蔽墙壁, 会对公众产生一定辐射剂量。我们取屏蔽外与放射源最近的三个位置, 分别标记为东墙

外、南墙外和西墙外(见图1)。根据文献[1],穿透辐射的计算可以按照以下公式:

$$H = \frac{A\Gamma B e^{-\mu X}}{d^2} \quad (1)$$

其中, $H$ 是测量点的剂量率,Sv/h; $A$ 是放射源的活度,这里取最大装源量, $1.48\text{E}+17\text{ Bq}$ ; $\Gamma$ 是空气比释动能率常数, $\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{Bq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ; $\mu$ 是线性衰减系数, $\text{cm}^{-1}$ ; $X$ 是屏蔽层的厚度,cm; $d$ 是放射源到测量点的距离,m; $B$ 是累积因子,其计算可以根据 Taylor 公式,如下:

$$B = \sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\alpha_n \mu d} \quad (2)$$

其中  $A_n$  是与能量有关的系数。对混凝土, $A_1 = 23.65$ , $A_2 = -22.65$ , $a_1 = -0.065$ , $a_2 = -0.012$ [2],据此结合屏蔽的厚度,可计算得到西、东和南墙外的累积因子和剂量率,结果列于表1。

表1 透射计算参数及结果

计算点	离源距离 (m)	屏蔽厚度 (cm)	线性衰减 系数( $\text{cm}^{-1}$ )	累积 因子	剂量率 (Sv/h)
1 西墙外	5.04	225	0.13	126	$4.54\text{E}-08$
2 东墙外	6.64	220	0.13	119	$4.72\text{E}-08$
3 南墙外	9.20	215	0.13	112	$4.50\text{E}-08$

表1显示,透射剂量率的最大值在东墙外,为 $4.72\text{E}-08\text{ Sv/h}$ 。对公众来说,取居留因子为1/16,时间取2000h/a,这样一年所受的辐射剂量就是 $5.9\text{E}-03$

mSv,远小于GB 10252-2009规定的公众剂量约束值0.1 mSv。

## 2.2 天空反散射的剂量

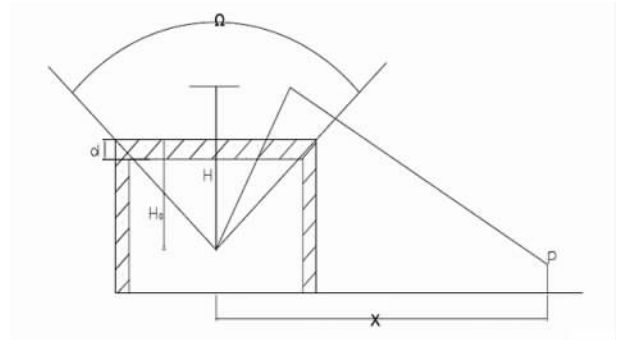


图2 天空反散射示意图

天空反散射是指射线经过天空到达地面的散射(见图2),所导致的剂量对厂房外部的公众有重要意义。根据参考文献[1],天空反散射剂量的计算按照公式(3)进行,结果列于表3。

$$D_P = \frac{8.775 \times 10^{-3} A \Omega^{1.3}}{k H^2 X^2} \quad (3)$$

其中, $P$ 是厂房外公众所在的点, $D_P$ 是 $P$ 点的剂量率, $\mu\text{Sv/h}$ ; $A$ 是辐射源的放射性活度,这里取最大装源量 $1.48\text{E}+11\text{ MBq}$ ; $\Omega$ 是放射源对辐照室屋顶所张的立体角,Sr(球面度); $k$ 是屏蔽层对射线的有效减弱倍数,其值为 $e^{\mu d}$ ; $H$ 是放射源到屋顶上方2 m处的距离,m; $X$ 是放射源到 $P$ 点的距离,m。

表2 天空反散射参数及结果

计算点	距离 X(m)	放射源活度(MBq)	有效减弱倍数 k	立体角 Sr	距离 H(m)	剂量率( $\mu\text{Sv/h}$ )
北面,厂区路	56	$1.48\text{E}+11$	$1.02\text{E}+11$	2.1	7.425	$5.37\text{E}-07$
西面,厂区路	65	$1.48\text{E}+11$	$1.02\text{E}+11$	2.1	7.425	$3.98\text{E}-07$
东面,厂区路	80	$1.48\text{E}+11$	$1.02\text{E}+11$	2.1	7.425	$2.63\text{E}-07$
南面,厂区路	14	$1.48\text{E}+11$	$1.02\text{E}+11$	2.1	7.425	$8.59\text{E}-06$

天空反散射的最大值出现在南面厂区路,其剂量率为 $8.59\text{E}-06\text{ }\mu\text{Sv/h}$ ,以每年2000h,公众的居留因子为1/16计算,可以得到公众的剂量为 $1.1\text{E}-06\text{ mSv}$ ,远小于GB 10252-2009规定的公众剂量约束值0.1 mSv。

2.3 墙壁散射的剂量  $\gamma$ 射线在迷道中经辐照室屏蔽墙的多次散射,到达辐照室出入口,路径如图2所示,其中实线表示人员通道的散射路径,虚线表示货物通道的散射路径。尽量选取散射次数最少的路径估算人员通道和货物通道入口处的最大剂量率。

散射剂量的计算如公式(4)所示,入射角和散射角如图4所示,散射计算结果列于表3。

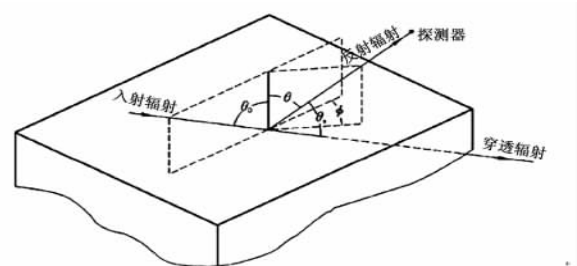


图3 入射角和散射角示意图

$$D_i = \frac{D_{i-1} \times \alpha_d \times \cos \theta_0 \times S}{r_i^2} \quad (4)$$

其中, $D_i$ 是经过 $i$ 次散射后某测点位置处的反散射剂量率,mSv/h; $S$ 是散射面积, $\text{m}^2$ ; $r_i$ 是第 $i$ 次散射、从散射点到计算点的距离,m; $D_{i-1}$ 是入射到面积元 $S$ 处的剂量率,mSv/h; $\alpha_d$ 是微分反照率。

表 3 散射计算参数及结果

散射线路	散射次数	入射角 (度)	反射角 (度)	入射方向与散射 方向夹角(度)	散射面积 (m <sup>2</sup> )	距离 (m)	散射后能量 (MeV)	剂量率 (mSv/h)
人员通道	第一次	52	42	86	7	5	0.38	4.13E+03
	第二次	33	30	117	6	10	0.18	7.93E+00
	第三次	83	33	64	8	3	0.15	8.10E-02
	第四次	33	48	99	10	5	0.11	1.07E-03
	第五次	47	72	61	5	5	0.10	5.03E-06
货物通道	第一次	5	50	125	8	3	0.26	1.00E+04
	第二次	50	23	107	7	3	0.16	2.39E+02
	第三次	56	41	83	2	6	0.12	3.93E-01
	第四次	41	31	108	5	6	0.09	1.99E-03
	第五次	31	81	68	2	3	0.08	6.12E-06

注: 根据参考文献[3], 1 MBq 的<sup>60</sup>Co 在 0.3 m 处的剂量率为 3.86E-03 mSv/h。图 2 人员通道和货物通道的第一次散射处距离辐射源分别为 9 m 和 10 m, 因此, 在最大装源量 1.48E+11 MBq 时, 相应的 D<sub>0</sub> 值分别为 1.48E+11 × 3.86E-03 × (0.3/9)<sup>2</sup> = 6.35E+05 mSv/h 和 1.48E+11 × 3.86E-03 × (0.3/10)<sup>2</sup> = 5.14E+05 mSv/h, 在此基础上计算出各次散射后的剂量率。

表 3 显示, 人员通道和货物通道出口处的散射剂量率分别是 5.03E-06 mSv/h 和 6.12E-06 mSv/h, 时间取 2000 h, 可以得到人员出口和货物出口处的散射年剂量分别是 0.010 mSv 和 0.012 mSv, 均远低于 GB 10252-2009 规定的工作人员剂量约束值 5 mSv。

3 讨论

在迷道的人员通道和货物通道处各安装了一台剂量率仪, 其具体位置见图 1。其中剂量率仪 1 位于人员通道, 其位置经过 2 次辐射散射; 剂量率仪 2 位于货物通道, 其位置经过 4 次辐射散射。在实际装源量为 3.33E+16 Bq(90 万 Ci) 时, 剂量率仪 1、2 的读数分别为 156.71 μSv/h 和 0.18 μSv/h。在几何条件不变的情况下, 可以认为剂量率与装源量是成正比的。根据公式(4) 可以方便的计算出装源量为 3.33E+16Bq(90 万 Ci) 时的剂量率, 见表 4。

表 4 人员通道和货物通道的计算值和实测值  
(装源量为 3.33E+16 Bq)

剂量率仪	点源计算 (mSv/h)	面源计算值 (mSv/h)	实测值 (mSv/h)
1(人员通道)	1.39E+00	1.97E-01	1.57E-01
2(货物通道)	3.53E-04	2.32E-04	1.80E-04

从中可见, 剂量率仪 1 和剂量率仪 2 处的实测值均明显低于计算值, 原因主要是: ①模型本身的偏差, 本计算公式所依据的模型建立在源项是点源的基础上, 与实际有差别; ②计算参数的选取偏保守, 如散射距离、散射面积等。第一个原因是主要的, 下面进行具体分析。

实际的放射源, 分为一根根小源, 其尺寸为直径

11.1 mm 长 451.5 mm, 并排装在 1.86 m(宽) × 1.99 m(高) 的源架中。源架垂直地面、沿南北方向进行辐照, 其中心距地面高度为 2.225 m。源架在辐照室内的几何条件如图所示。由于源棒的直径远小于源架的尺寸, 所以整个源架可以作为面源对待。

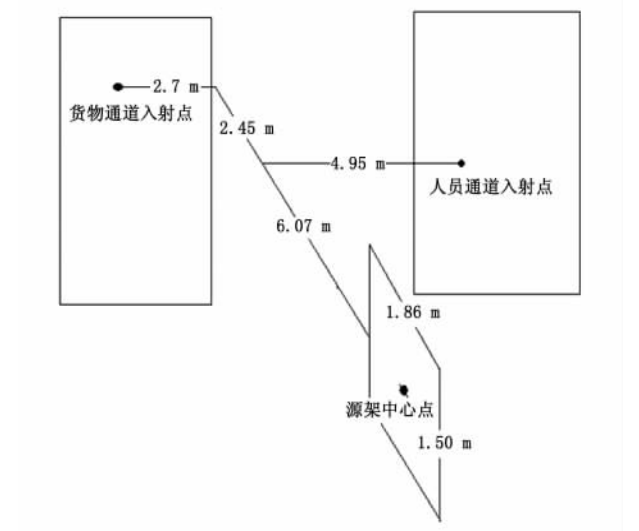


图 4 源架与入射点的几何位置示意图

根据参考文献[4], 可以计算出面源对人员通道入射点(图 1 的 A 点) 和货物通道入射点(图 1 的 B 点) 的剂量率为 1.97E-01 mSv/h 和 2.32E-04 mSv/h, 与实测值相差不大(见表 4), 但小于应用点源模型的计算结果, 说明点源模型的计算是偏保守的。

总之, 穿透辐射、天空反散射和墙壁散射的剂量率最大值分别为 4.72E-08 Sv/h、8.59E-12 Sv/h 和 6.12E-09 Sv/h, 产生的年剂量分别为 5.9E-03 mSv(公众)、1.1E-06 mSv(公众) 和 1.2E-03 mSv(工作人员), 均远小于《γ 辐照装置的辐射防护与安全规范》(GB 10252-2009) 的规定。

# 辐射致癌危险预测模型中终生危险的估算

王薇, 吴建华, 段妮桢

中国原子能科学研究院 辐射安全研究所, 北京 102413

**摘要:** **目的** 针对辐射致癌危险的时间外推问题, 对我国人群辐射致癌的终生危险进行估算。**方法** 根据 ICRP 103 号建议书推荐成果对危险预测模型中终生危险的寿命表估算法进行解析, 并利用该方法结合近年来我国人口寿命表及癌症基线率对不同器官辐射致癌超额终生危险值进行估算。**结果** 估算得到了 0~90 岁中国人群食道、胃、结肠、肝、肺、乳腺、卵巢、膀胱、甲状腺及其他等 10 种器官的性别平均和受照年龄平均的辐射致癌超额终生癌症危险及危害值。**结论** 结果显示我国人口各器官辐射致癌超额终生危险值和危害值在 ICRP 103 号建议书推荐值约  $\pm 50\%$  范围内, 合计超额终生危险值和危害值比 ICRP 103 号建议书推荐值略偏高。

**关键词:** 辐射致癌; 危险预测模型; 终生危险

中图分类号: Q691 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2015)04-04-0354

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2015.04.014

辐射致癌是人类接受低剂量照射引起的唯一得到确认的致命性健康危害, 对辐射致癌危险进行评价是辐射危害评价的核心内容。人类辐射致癌危险评价特别关心低剂量照射引起的终生癌症危险, 但低剂量照射的流行病学研究受到的干扰因素多, 要求样本数量大, 难于直接估计, 因此需要利用剂量范围宽的包括中高剂量在内的人群照射资料间接进行估算。目前国际公认的是利用日本原子弹爆炸幸存者寿命研究(LSS) 依照原爆 2002 年剂量体系(DS02) 和 1958-1998 年对受照人口的随访结果, 借助三种辐射致癌危险的外推模型, 分别是高剂量/率照射引起的危险外推到低剂量/率照射危险的剂量响应模型; 有限随访时间内的危险外推到终生危险的危险预测模型和原爆人群资料的危险外推到其他国家人群的人群转移模型, 最终得到终生的、低剂量/率照射的、适用于特定人群的辐射致癌危险。对此国际放射防护委员会(ICRP) 在 103 号建议书中推荐了现阶段认为较为适宜的剂量响应模型, 危险预测模型和人群转移处理方法。

由于对一个受照人群样本进行观察的时间很少

能延续到一生, 采用合适的危险预测模型和危险估计方法根据有限时间内没有观察到终点的随访结果对今后和终生可能发生的危险进行预测是辐射致癌危险评价的重要内容之一<sup>[1]</sup>。本工作主要针对辐射致癌危险的时间外推问题, 根据 ICRP 103 号建议书推荐成果对危险预测模型中终生危险的寿命表估算法进行解析, 并利用该方法结合近年来我国人口寿命表及癌症基线率对不同器官辐射致癌超额终生危险值进行估算。本工作的开展旨在为辐射致癌危害评价中终生危险的估算提供有用的参考, 从而为辐射健康危害的定量评价奠定基础。

## 1 辐射致癌终生危险

**1.1 辐射致癌危险及危害** 辐射致癌危险(Cancer Risk) 是指因辐射照射所致人群或个人发生癌症效应的概率。在辐射危险评价中常用的危险量度是超额相对危险(Excess Relative Risk, ERR) 和超额绝对危险(Excess Absolute Risk, EAR), 用以表示照射组相对于非照射组在相对尺度和绝对尺度上的癌症增加率。单位剂量照射造成的危险称为辐射致癌危险系数( $ERR_D$  和  $EAR_D$ ), 它是计算辐射致癌终生危险的生物学基础, 一般来自日本原爆资料。

**作者简介:** 王薇(1981-) 女, 甘肃兰州人, 副研究员, 主要从事辐射防护与环境保护研究工作。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 10252-2009  $\gamma$  辐照装置的辐射防护与安全规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

- [2] 李星洪. 辐射防护基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 128.  
[3] 潘自强. 辐射安全手册精编[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 346.  
[4] 李德平, 潘自强. 辐射防护手册第一分册 辐射源与屏蔽[M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 249.

收稿日期: 2015-01-28 修回日期: 2015-05-25