

# 中华人民共和国国家标准化指导性技术文件

GB/Z 41476.3—2022

## 无损检测仪器 1 MV 以下 X 射线设备的 辐射防护规则 第 3 部分:450 kV 以下 X 射线设备辐射防护的计算公式和图表

Non-destructive testing instruments—Radiation protection rules for the technical application of X-ray equipment up to 1 MV—Part 3: Formulas and diagrams for the calculation of radiation protection for X-ray equipment up to 450 kV

2022-04-15 发布

2022-11-01 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会



目 次

前言 ..... III

引言 ..... IV

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 主要参数的计算 ..... 1

5 固定式 X 射线设备保护层的计算 ..... 4

6 野外工作条件下 X 射线设备防护距离的计算 ..... 10

附录 A（资料性） 计算示例 ..... 12



## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/Z 41476《无损检测仪器 1 MV 以下 X 射线设备的辐射防护规则》的第 3 部分。GB/Z 41476 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：通用安全技术要求；
- 第 2 部分：防护技术要求；
- 第 3 部分：450 kV 以下 X 射线设备辐射防护的计算公式和图表；
- 第 4 部分：控制区域的计算。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国试验机标准化技术委员会(SAC/TC 122)归口。

本文件起草单位：苏州市华测检测技术有限公司、辽宁省先进装备制造业基地建设工程中心、深圳国技仪器有限公司、爱德森(厦门)电子有限公司、中国工程物理研究院应用电子学研究所、广东正业科技股份有限公司、上海英华检测科技有限公司、通用电气检测控制技术(上海)有限公司、丹东市无损检测设备有限公司、上海超群无损检测设备有限公司、渤海造船厂集团有限公司、辽宁仪表研究所有限责任公司。

本文件主要起草人：曾啸虎、徐海耕、朱平、林俊明、陈浩、盛周林、孔凡琴、李博、董殿刚、傅岩、刘春伟、王琳。

# 引 言

X 射线是一种波长极短,能量很大的电磁波,其波长比可见光的波长更短。作为五大常规检测手段之一,X 射线检测已在工业无损检测中得到广泛应用。因其穿透性强,对检测人员身体有一定伤害,因此 X 射线检测中安全防护问题得到广泛关注。GB/Z 41476 旨在确立 1MV 以下 X 射线设备防护要求及人员人身安全防护规则,拟由 4 个部分构成。

- 第 1 部分:通用安全技术要求。目的在于给出 1 MV 以下 X 射线设备操作中人员的剂量限值、设备使用要求等内容。
- 第 2 部分:防护技术要求。目的在于为 1 MV 以下 X 射线设备在制造、安装、使用中提供有效、可靠的射线防护措施。
- 第 3 部分:450 kV 以下 X 射线设备辐射防护的计算公式和图表。目的在于给出了 450 kV 以下 X 射线设备防护主要技术指标的计算公式及相关图表,便于射线防护过程中相关数据的计算。
- 第 4 部分:控制区域的计算。目的在于提供 1 MV 以下 X 射线设备控制区域计算方法,对第 3 部分的内容做进一步补充。

无损检测仪器 1 MV 以下 X 射线设备的  
辐射防护规则 第 3 部分:450 kV 以下  
X 射线设备辐射防护的计算公式和图表

1 范围

本文件描述了 450 kV 以下 X 射线无损检测设备生产、调试和运行过程中所涉及的辐射防护主要参数的计算公式和图表,以及固定工作设备保护层的计算方法。

本文件适用于 450 kV 以下 X 射线无损检测设备生产、调试和运行过程中的安全防护,也适用于基于阳极靶为钨的 X 射线设备的安全防护。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/Z 41476.1—2022 无损检测仪器 1 MV 以下 X 射线设备的辐射防护规则 第 1 部分:通用安全技术要求

GB/Z 41476.4—2022 无损检测仪器 1 MV 以下 X 射线设备的辐射防护规则 第 4 部分:控制区域的计算

3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

4 主要参数的计算

4.1 一般规则

本文件中的测量工作电压采用恒定直流电压;当采用没有恒定直流电压的整流电路时,则使用最高管电压。通过计算可得到辐射防护距离,其变化与材料厚度有关,计算所需参数如下:

- 对于固定式 X 射线设备,应给出相关必要参数(额定管电压、管电流、射线束角度、辐射泄漏剂量)、放射源防护距离、防护材料的厚度,且以上参数应不超过规定的辐射剂量限值;
- 对于移动式 X 射线设备,应给出相关必要参数(额定管电压、管电流、射线束角度、辐射泄漏剂量)和放射源防护距离,且满足控制区内最大辐射剂量率不超过 40  $\mu\text{Sv/h}$ 。

注:超过额定管电压的 X 射线设备的辐射防护距离需向生产商和供应商咨询。

辐射防护距离相对于直流电压而言,也可应用于交流电压。

计算固定式设备的辐射防护距离时,应使用 X 射线设备相关工作参数的最大值(最大管电压下的最大管电流)。对于移动式 X 射线设备辐射防护距离的计算,应使用设备实际工作参数(管电流和管电压)。计算防护距离时,还需考虑其他电离辐射源。

4.2 相关物理量的计算

4.2.1 基本概念

计算辐射防护距离时,宜考虑有效射束、散射辐射和泄漏辐射。本文件在计算时,假设它们有相同的角度范围和存在范围。

有效射束是指射束从射线窗口发射的辐射。经过窗口和准直系统处理后,辐射角度或能量产生变化。

散射辐射是经过材料散射后形成的辐射。其光谱带与有效射束不同,能量比有效射束低。散射辐射的剂量取决于散射材料的种类。

泄漏辐射是从设备防护屏蔽层中泄漏出的辐射。

干扰辐射是散射辐射和泄漏辐射的总和。

4.2.2 点剂量

X射线设备的点剂量可通过测量环境等效剂量  $H^*(10)$  获得,也可用光子等效剂量  $H_x$  表示。两者按照表 1 中的系数进行换算。

表 1 环境等效剂量  $H^*(10)$  和光子等效剂量  $H_x$  的换算系数

管电压(U)	$H^*(10)/H_x$ 的换算系数
$U \leq 50 \text{ kV}$	1.0
$50 \text{ kV} < U \leq 400 \text{ kV}$	1.3
$U > 400 \text{ kV}$	1.0

4.2.3 特殊剂量率

特殊剂量率由有效剂量限值与必要防护引起的射线衰减程度相除而得,与距射线源的距离、居留范围、管电流强度、居留时间等有关,按公式(1)计算:

$$\dot{H}_{\text{spez,X}} = \frac{Ha^2}{t_{\text{E}}I_{\text{X}}T}$$

.....( 1 )

式中:

- $\dot{H}_{\text{spez,X}}$ ——特殊剂量率,单位为微希平方米每毫安小时 $[\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})]$ ;
- $H$ ——有效剂量限值,其取值见表 3,单位为微希( $\mu\text{Sv}$ );
- $a$ ——居留地点距射线源的距离,单位为米(m);
- $t_{\text{E}}$ ——最长年居留时间,单位为小时(h);
- $I_{\text{X}}$ ——额定管电流强度,单位为毫安(mA);
- $T$ ——居留因子,其值按 4.3.2 确定。

额定管电流强度计算按照公式(2)、公式(3)、公式(4):

有效射束( $X = \text{N}$ ):  $I_{\text{N}} = I$

.....( 2 )

$$I_{\text{S}} = \frac{I\alpha\beta}{1\,600}$$

散射辐射( $X = \text{S}$ ):

.....( 3 )

泄漏辐射( $X = \text{tr}$ ):  $I_{\text{tr}} = 1.0$

.....( 4 )



式中：

- $I$  ——管电流强度,单位为毫安(mA)；
- $\alpha$  ——有效射束平行于射线管的角度,单位为度(°)；
- $\beta$  ——有效射束垂直于射线管的角度,单位为度(°)。

可通过调整辐射防护距离或使用辐射防护物质,使有效剂量低于给定限值。对于给定的管电压,吸收效果可使用特殊剂量率来衡量。铅对于有效射束、散射辐射、泄漏辐射的吸收曲线簇在图 1～图 3 中表示。

4.2.4 半值层厚度

半值层厚度是能够使 X 射线束中某一点的辐射剂量率减少一半时所需要的标准吸收片的厚度。铅的典型半值层厚度如表 2 所示,该值适用于阳极靶为钨的强度衰减(衰减系数大于  $10^5$ ),衰减后的点剂量率为  $0.5\ \mu\text{Sv/h}\sim 50\ \mu\text{Sv/h}$ 。

表 2 铅的半值层厚度

管电压(U) kV	100	120	160	225	250	300	320	350	420	450
半值层厚度(HVL) mm	0.3	0.3	0.3	0.7	0.8	1.3	1.5	1.8	2.4	2.8

受保护的居留范围内,按照表 2 屏蔽后测量辐射剂量,个人接受的有效剂量限值  $H$  应不超过表 3 中的规定。

表 3 受保护的居留范围内个人接受的有效剂量限值

居留地类型	一年中有效剂量限值 $\mu\text{Sv}$
人群中居留	1 000
职业辐射暴露人员在监控区域内居留	6 000

4.3 固定式 X 射线设备居留范围

4.3.1 居留区域

居留区域的有效剂量限值应符合表 3 的要求。

4.3.2 工作时间和居留时间

计算射线保护措施时宜考虑该设备一年中最长使用时间,最长可达 2 000 h。在居住区附近时需考虑是否会大于 2 000 h。一年中最短使用时间按 100 h 计算。

居留因子  $T$  与预计在射线区域的居留时间有关,其取值如下：

- $T=1.0$ :职业性辐射工作人员活动场所(例如办公室、车间、实验室、电源控制室等)；
- $T=0.3$ :非控制区的非职业性辐射人员活动场所；
- $T=0.1$ :非控制区,公众经过的场所。

4.4 移动地点射线设备的监控区域

4.4.1 通则

按照 GB/Z 41476.1—2022 的要求,应划定监控区域,且区域外的有效剂量率应不大于 40  $\mu\text{Sv/h}$ 。按照一周设备开启 3 h 计算,此区域外的有效剂量应不超过 120  $\mu\text{Sv}$ 。如果工作时间大于 3 h,则控制区外的有效剂量也应小于 120  $\mu\text{Sv}$ 。

4.4.2 通道中的辐射剂量

正常情况下控制区内的辐射剂量率应控制在 40  $\mu\text{Sv/h}$  以下,但有些情况可大于该值,例如人行天桥或其他通道。如果一个人驾车快速穿过一辐射区域,该区域辐射剂量率大于 40  $\mu\text{Sv/h}$ ,但该人接受的辐射剂量  $H_0$  很小,这种情况可使用未衰减有效射束通过公式(5)进行计算,计算示例见附录 A 的 A.1。

$$H_0 = \frac{\dot{H}_{\text{spez,max,N}} I \pi \theta}{a_0 v 180^\circ} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- $H_0$  ——辐射剂量,单位为微希( $\mu\text{Sv}$ );
- $\dot{H}_{\text{spez,max,N}}$  ——最大特殊剂量率,单位为微希平方米每毫安小时 [ $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$ ];
- $I$  ——管电流强度,单位为毫安( $\text{mA}$ );
- $\theta$  ——有效射束的角度,单位为度( $^\circ$ );
- $a_0$  ——车辆距离辐射中心点的最短距离,单位为米( $\text{m}$ );
- $v$  ——穿过射线束的速度,单位为米每小时( $\text{m/h}$ )。

控制区的有效剂量率超过 40  $\mu\text{Sv/h}$  时,应得到当地监管部门的许可。

5 固定式 X 射线设备保护层的计算

5.1 一般规则

针对有效射束、散射辐射和泄漏辐射的保护层厚度可从图 1、图 2 和图 3 中查找,计算示例见 A.2。

5.2 铅屏蔽层有效射束保护层

有效射束保护层的铅厚度通过图 1 中特殊剂量率  $\dot{H}_{\text{spez,N}}$  查找得到。特殊剂量率  $\dot{H}_{\text{spez,N}}$  按照公式(6) 计算:

$$\dot{H}_{\text{spez,N}} = \frac{H a_N^2}{t_E I_N T} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- $\dot{H}_{\text{spez,N}}$  ——有效射束特殊剂量率,单位为微希平方米每毫安小时 [ $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$ ];
- $H$  ——有效剂量限值,单位为微希( $\mu\text{Sv}$ ),其取值见表 3;
- $a_N$  ——有效射束防护距离,单位为米( $\text{m}$ );
- $t_E$  ——最大年居留时间,单位为小时( $\text{h}$ );
- $I_N$  ——有效射束管电流强度,单位为毫安( $\text{mA}$ );
- $T$  ——按 4.3.2 确定的居留因子。

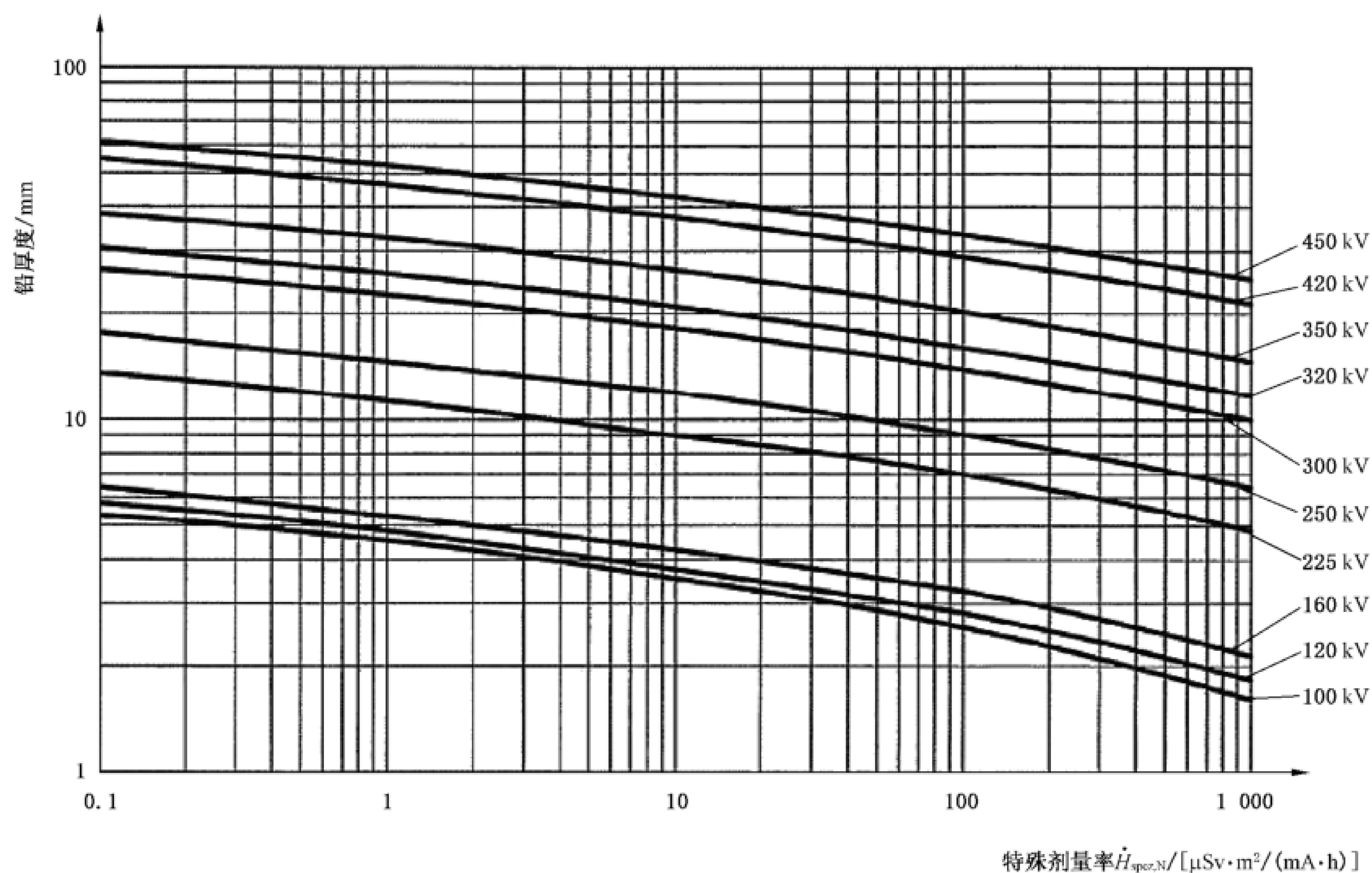


图 1 铅屏蔽有效射束时,铅厚度与特殊剂量率的关系

5.3 铅屏蔽层散射辐射保护层

散射辐射保护层的铅厚度通过图 2 中特殊剂量率  $\dot{H}_{\text{spez},S}$  查找得到。曲线中电压在 250 kV 及以下时采用铝为散射材料,250 kV 以上时采用铁为散射材料。这两种材料代表了最强的散射效果。

散射剂量与散射面积和射线源的放射角度有关。特殊剂量率  $\dot{H}_{\text{spez},S}$  按照公式(7)计算:

$$\dot{H}_{\text{spez},S} = \frac{H a_s^2}{t_E I_S T}$$

.....( 7 )

式中:

- $\dot{H}_{\text{spez},S}$ ——散射辐射特殊剂量率,单位为微希平方米每毫安小时[ $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$ ];
- $H$ ——有效剂量限值,单位为微希( $\mu\text{Sv}$ ),其取值见表 3;
- $a_s$ ——散射辐射防护距离,单位为米(m);
- $t_E$ ——最大年居留时间,单位为小时(h);
- $I_S$ ——散射辐射管电流强度,单位为毫安(mA);
- $T$ ——按 4.3.2 确定的居留因子。

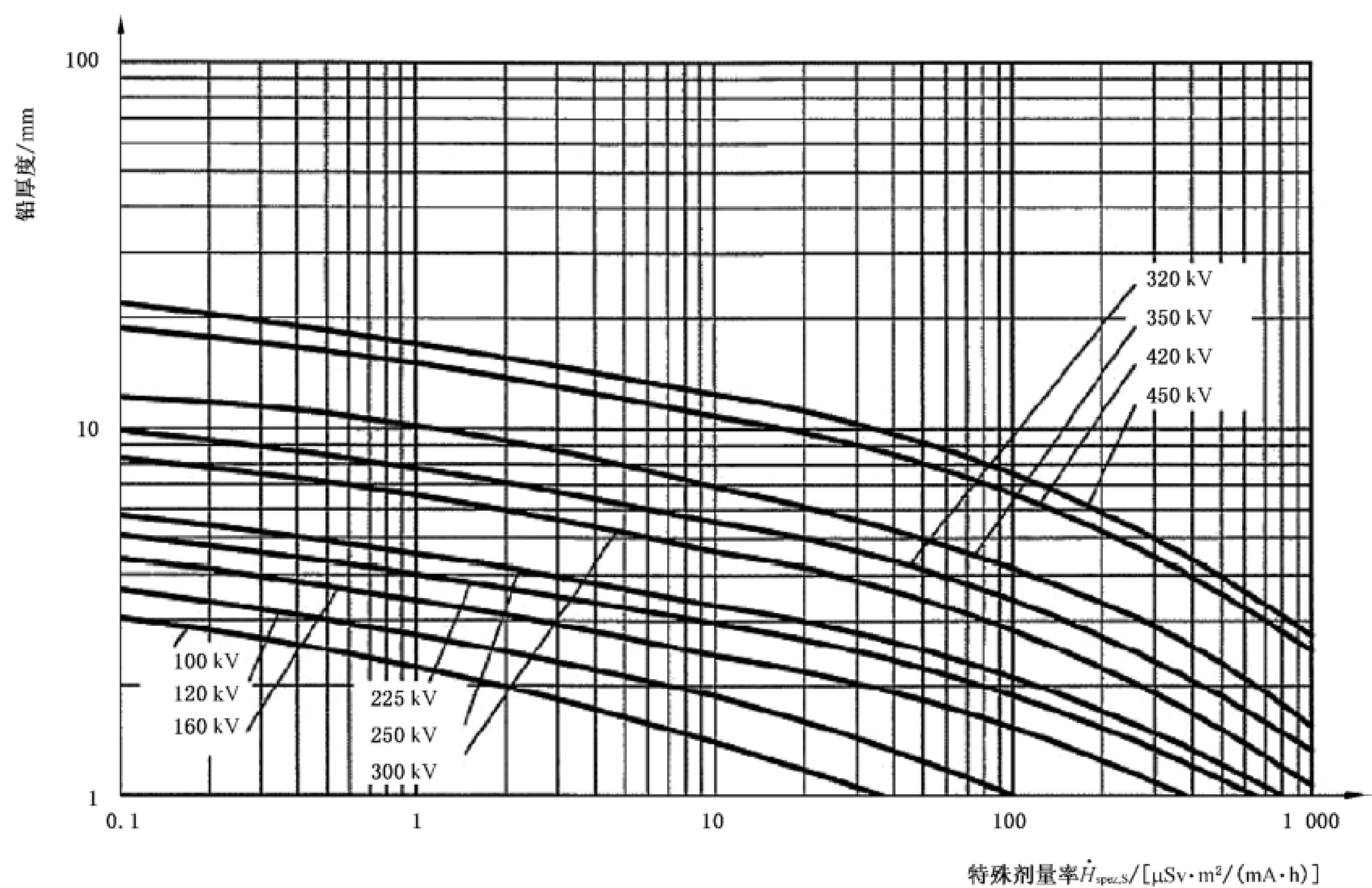


图 2 铅屏蔽散射辐射时,铅厚度与特殊剂量率的关系

5.4 铅屏蔽层泄漏辐射保护层

泄漏辐射保护层的铅厚度通过图 3 中特殊剂量率  $\dot{H}_{\text{spez, tr}}$  查找得到。泄漏辐射应不超过限值要求。  
特殊剂量率  $\dot{H}_{\text{spez, tr}}$  按照公式(8)计算：

$$\dot{H}_{\text{spez, tr}} = \frac{H a_{\text{tr}}^2}{t_{\text{E}} I_{\text{tr}} T}$$

.....( 8 )

式中：

- $\dot{H}_{\text{spez, tr}}$ ——泄漏辐射特殊剂量率,单位为微希平方米每毫安小时[ $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$ ];
- $H$ ——有效剂量限值,其取值见表 3,单位为微希( $\mu\text{Sv}$ );
- $a_{\text{tr}}$ ——泄漏辐射防护距离,单位为米(m);
- $t_{\text{E}}$ ——最大年居留时间,单位为小时(h);
- $I_{\text{tr}}$ ——泄漏辐射管电流强度,单位为毫安(mA);
- $T$ ——按 4.3.2 确定的居留因子。



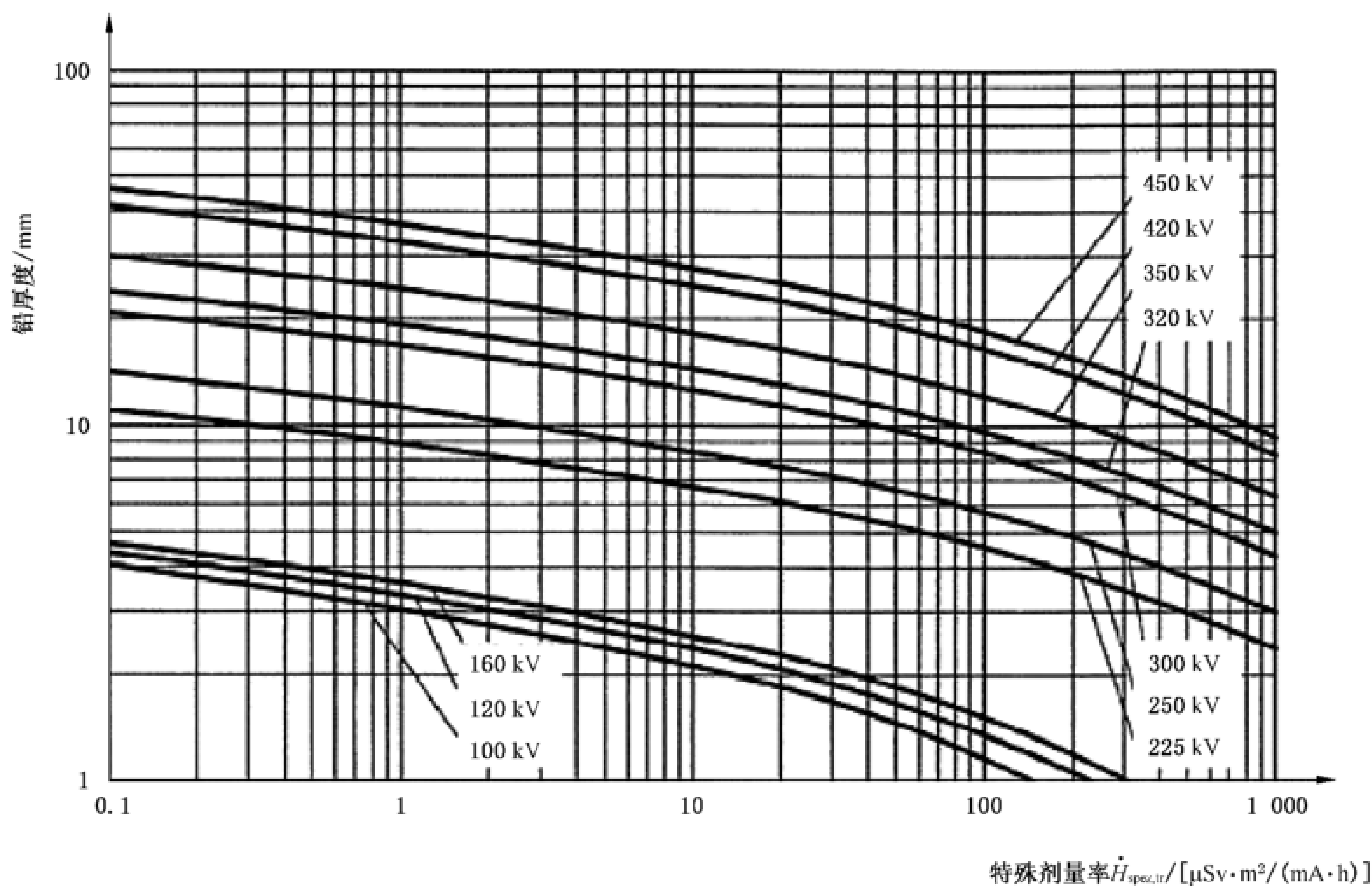


图 3 铅屏蔽泄漏辐射时,铅厚度与特殊剂量率的关系

5.5 铅屏蔽层干扰辐射保护层

- 5.5.1 干扰辐射屏蔽层铅厚度应按 5.3 和 5.4 分别计算散射辐射和泄漏辐射的屏蔽层厚度,然后按照 5.5.2 和 5.5.3 确定。
- 5.5.2 如果计算出的两种辐射屏蔽所需屏蔽层厚度不同,且不大于表 2 中的半值层厚度,则保护层厚度为两者中的较大值再加上半值层厚度。
- 5.5.3 如果计算出的两种辐射屏蔽所需屏蔽层厚度不同,且大于表 2 中的半值层厚度,则保护层厚度为两者中的较大值。

5.6 使用其他材料屏蔽有效射束和干扰辐射

450 kV 以下,不同铅厚度对应的不同屏蔽材料等效厚度见表 4,其他厚度值可通过线性关系推算。铅厚度大于表 4 中的铅厚度时,可使用表 5 中的换算因子进行计算。

表 4 不同屏蔽材料的厚度

材料	铅厚度 mm	不同最大管电压下所需的辐射屏蔽材料厚度							
		mm							
		50 kV	100 kV	150 kV	200 kV	250 kV	300 kV	400 kV	450 kV
钢(7.9 g/cm³)	0.2	1.1	1.2	2.4	3.2	3.4	3.8	4.4	4.6
	0.4	2.4	2.4	5.2	6.0	6.4	7.2	8.0	8.2
	0.6	3.8	4.0	8.0	9.2	9.4	10	11	11
	0.8	5.2	5.2	11	12	12	13	14	15
	1.0	6.5	6.4	14	16	16	16	16	16
	1.2	—	8.0	17	19	18	18	18	18
	1.4	—	9.2	20	23	21	20	18	18
	1.6	—	10	23	26	23	22	20	19
	1.8	—	12	26	29	26	24	21	20
	2.0	—	13	28	32	29	26	21	20
重混凝土(3.2 g/cm³)	0.5	15	4.0	7.3	9.0	10	11	12	12
	1	31	8.6	15	19	19	21	21	21
	2	—	17	33	38	37	37	35	34
	3	—	24	51	57	53	50	44	41
	4	—	30	67	74	68	64	57	51
	6	—	44	100	105	96	88	78	73
	8	—	57	130	135	120	115	105	96
	10	—	70	165	170	145	135	116	105
	12	—	82	195	195	170	155	133	122
	14	—	—	—	230	190	180	160	150
	16	—	—	—	260	220	200	172	162
	18	—	—	—	—	240	220	189	178
	20	—	—	—	—	—	240	206	188
	22	—	—	—	—	—	260	224	210
混凝土(2.3 g/cm³)	0.5	62	44	60	56	52	50	47	47
	1	130	80	105	96	85	80	60	54
	2	—	140	180	165	135	125	110	100
	3	—	190	250	220	180	155	130	115
	4	—	240	300	270	220	185	150	140
	6	—	340	410	360	280	240	190	170
	8	—	440	530	440	350	290	240	220
	10	—	540	630	530	400	330	260	235
	12	—	—	—	610	460	370	290	260
	14	—	—	—	—	520	420	325	290
	16	—	—	—	—	580	460	350	310
	18	—	—	—	—	640	500	375	335
	20	—	—	—	—	—	550	400	350
	22	—	—	—	—	—	590	425	375

表 4 不同屏蔽材料的厚度（续）

材料	铅厚度 mm	不同最大管电压下所需的辐射屏蔽材料厚度							
		mm							
		50 kV	100 kV	150 kV	200 kV	250 kV	300 kV	400 kV	450 kV
砖结构(1.8 g/cm³)	0.5	100	70	84	76	68	62	54	54
	1	200	120	150	130	120	105	91	85
	2	—	195	260	230	190	165	143	139
	3	—	260	340	310	250	210	171	153
	4	—	330	420	370	300	250	203	190
	6	—	450	570	490	390	330	268	250
	8	—	—	—	600	470	390	317	290
	10	—	—	—	—	540	450	338	305
	12	—	—	—	—	610	510	383	342
	14	—	—	—	—	—	570	428	385
	16	—	—	—	—	—	620	466	420
石膏(0.84 g/cm³)	0.2	50	48	63	62	60	56	51	49
	0.4	110	89	120	110	105	95	86	80
	0.6	170	130	175	155	145	130	117	111
	0.8	230	165	220	200	180	165	149	140
	1.0	290	200	270	240	220	190	171	165

表 5 其他材料换算因子(表 4 中未包含的铅厚度)

管电压(U) kV	钢(7.9 g/cm³)		重混凝土(3.2 g/cm³)		混凝土(2.3 g/cm³)		砖结构(1.8 g/cm³)		石膏(0.84 g/cm³)	
	铅厚度 mm	因子	铅厚度 mm	因子	铅厚度 mm	因子	铅厚度 mm	因子	铅厚度 mm	因子
50	>1.0	6.5	>1.0	31	>1.0	130	>1.0	200	>1.0	290
100	>2.0	6.5	>12	6.8	>10	54	>6.0	75	>1.0	200
150	>2.0	14	>12	16.3	>10	63	>6.0	95	>1.0	270
200	>2.0	16	>16	16.3	>12	51	>8.0	75	>1.0	240
250	>2.0	14.5	>18	13.3	>18	36	>12	51	>1.0	220
300	>2.0	13	>22	11.8	>22	27	>16	39	>1.0	190
400	>2.0	10.5	>22	10.2	>22	19	>16	29	>1.0	171
450	>2.0	10	>22	9.5	>22	17	>16	26	>1.0	165
注：不同屏蔽材料的厚度为特定管电压对应的铅厚度(mm)乘以相应的因子。										

6 野外工作条件下 X 射线设备防护距离的计算

6.1 一般规则

野外工作设备应通过屏蔽来衰减辐射。通过距离减少有效射束、散射辐射和泄漏辐射。

X 射线设备在不同管电压下对应不同特殊剂量率  $\dot{H}_{\text{spez,max}}$ ，应采取防护措施，且防护后的剂量率应小于特殊剂量率。计算特殊剂量率时应确定射线的管电流强度和曝光时间。防护距离计算示例见 A.3。X 射线设备野外工作条件下防护距离的快速计算应符合 GB/Z 41476.4—2022 的规定。

6.2 有效射束防护距离

计算有效射束防护距离时，应按照表 6 确定无铅屏蔽层时的最大特殊剂量率，再按照公式(9)计算防护距离。

$$a_N = \sqrt{\frac{\dot{H}_{\text{spez,max,N}} I_N}{\dot{H}_{\text{max}}}}$$

.....( 9 )

式中：

- $a_N$ ——有效射束防护距离，单位为米(m)；
- $\dot{H}_{\text{spez,max,N}}$ ——有效射束最大特殊剂量率，单位为微希平方米每毫安小时[ $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})$ ]，其取值见表 6；
- $I_N$ ——有效射束管电流强度，单位为毫安(mA)；
- $\dot{H}_{\text{max}}$ ——最大有效剂量率，单位为微希每小时( $\mu\text{Sv/h}$ )。

6.3 散射辐射防护距离

计算散射辐射防护距离时，应按照表 6 确定无铅屏蔽层时的最大特殊剂量率，再按照公式(10)计算防护距离。

$$a_S = \sqrt{\frac{\dot{H}_{\text{spez,max,S}} I_S}{\dot{H}_{\text{max}}}}$$

.....( 10 )

式中：

- $a_S$ ——散射辐射防护距离，单位为米(m)；
- $\dot{H}_{\text{spez,max,S}}$ ——散射辐射最大特殊剂量率，单位为微希平方米每毫安小时[ $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})$ ]，其取值见表 6；
- $I_S$ ——散射辐射管电流强度，单位为毫安(mA)；
- $\dot{H}_{\text{max}}$ ——最大有效剂量率，单位为微希每小时( $\mu\text{Sv/h}$ )。

6.4 泄漏辐射防护距离

计算泄漏辐射防护距离时，应按照表 6 确定无铅屏蔽层时的最大特殊剂量率，再按照公式(11)计算防护距离。

$$a_{\text{tr}} = \sqrt{\frac{\dot{H}_{\text{spez,max,tr}} I_{\text{tr}}}{\dot{H}_{\text{max}}}}$$

.....( 11 )



式中：

$a_{tr}$  —— 泄漏辐射防护距离，单位为米(m)；

$\dot{H}_{spez,max,tr}$  —— 泄漏辐射最大特殊剂量率，单位为微希平方米每毫安小时 $[\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})]$ ，其取值见表 6；

$I_{tr}$  —— 泄漏辐射管电流强度，单位为毫安(mA)；

$\dot{H}_{max}$  —— 最大有效剂量率，单位为微每小时( $\mu\text{Sv/h}$ )。

表 6 无铅屏蔽层时，有效射束、散射辐射和泄漏辐射的最大特殊剂量率

管电压(U) kV	100	120	160	225	250	300	320	350	420	450
$\dot{H}_{spez,max,N}$ $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})$	$4 \times 10^4$	$5 \times 10^4$	$8 \times 10^4$	$16 \times 10^4$	$19 \times 10^4$	$25 \times 10^4$	$29 \times 10^4$	$34 \times 10^4$	$42 \times 10^4$	$49 \times 10^4$
$\dot{H}_{spez,max,S}$ $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})$	$6 \times 10^2$	$1.0 \times 10^3$	$25 \times 10^2$	$65 \times 10^2$	$9 \times 10^3$	$15 \times 10^3$	$17 \times 10^3$	$21 \times 10^3$	$34 \times 10^3$	$42 \times 10^3$
$\dot{H}_{spez,max,tr}$ $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})$	$25 \times 10^2$	$25 \times 10^2$	$25 \times 10^2$	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^4$
其他辐射情况的 X 射线辐射屏蔽的最大特殊剂量率值由生产商提供，代替表 6 中的值。										

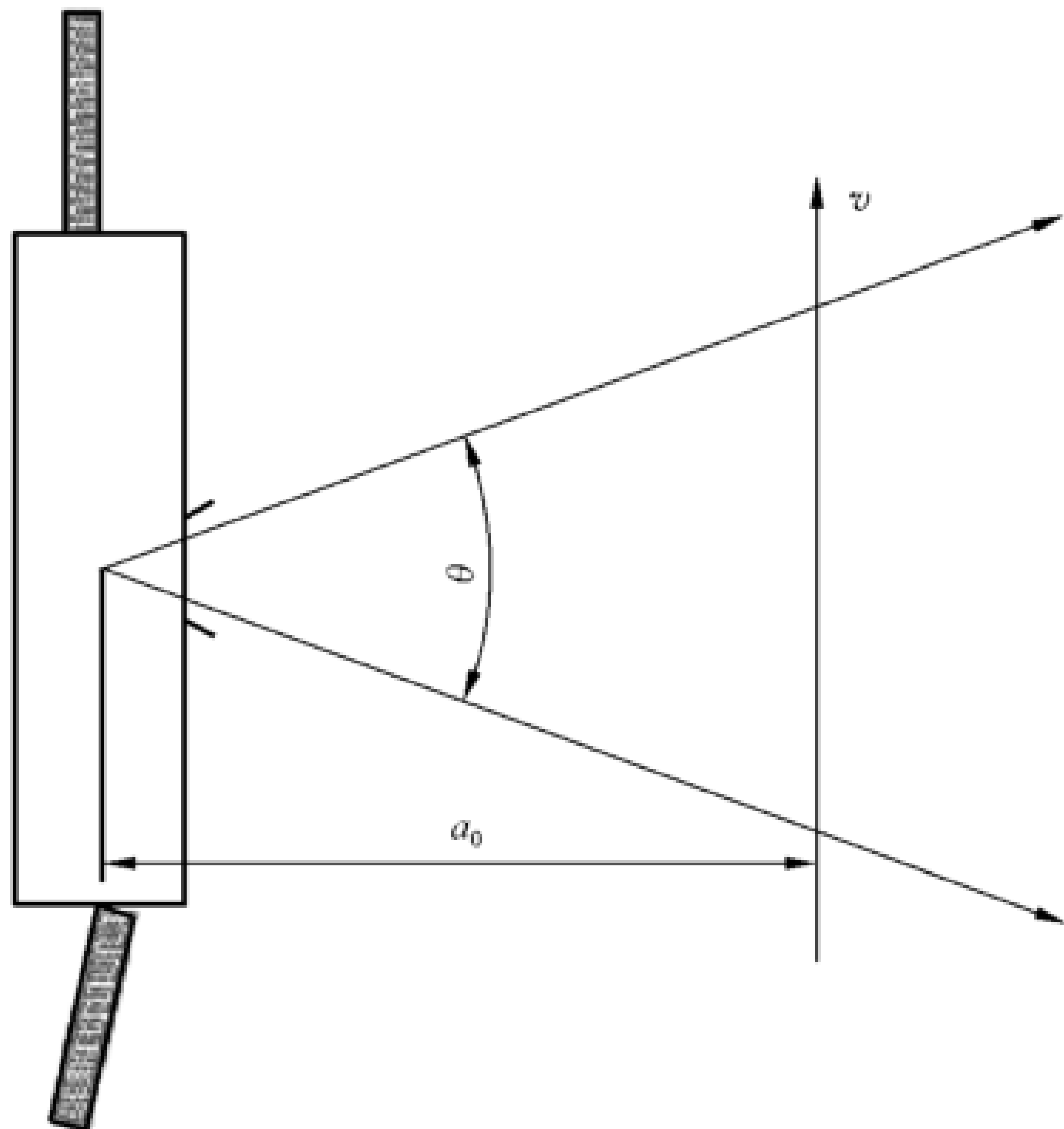
6.5 干扰辐射防护距离

- 6.5.1 干扰辐射防护距离应按 6.3 和 6.4 分别计算散射辐射和泄漏辐射的防护距离，然后按照 6.5.2 和 6.5.3 确定。
- 6.5.2 如果计算出的两种辐射屏蔽距离的差不大于 1.4 m，则防护距离为两者中的较大值的 1.4 倍。
- 6.5.3 如果计算出的两种辐射屏蔽距离的差大于 1.4 m，则防护距离为两者中的较大值。

附录 A  
(资料性)  
计算示例

A.1 通道中的辐射剂量

使用公式(5)计算。  
计算参考图示见图 A.1。



标引序号说明：  
 $a_0$ ——距离辐射中心点的最短距离；  
 $\theta$ ——有效射束的角度；  
 $v$ ——穿过射线束的速度。

图 A.1 通道防护示意图

计算参数：  
——设备工作参数： $U=450\text{ kV}$ ， $I=10\text{ mA}$ ；  
——通过参数：速度  $v=50\text{ km/h}=50\,000\text{ m/h}$ ；  
——有效射束角度： $\theta=40^\circ$ ；  
——距离辐射中心点的最短距离： $a_0=25\text{ m}$ 。

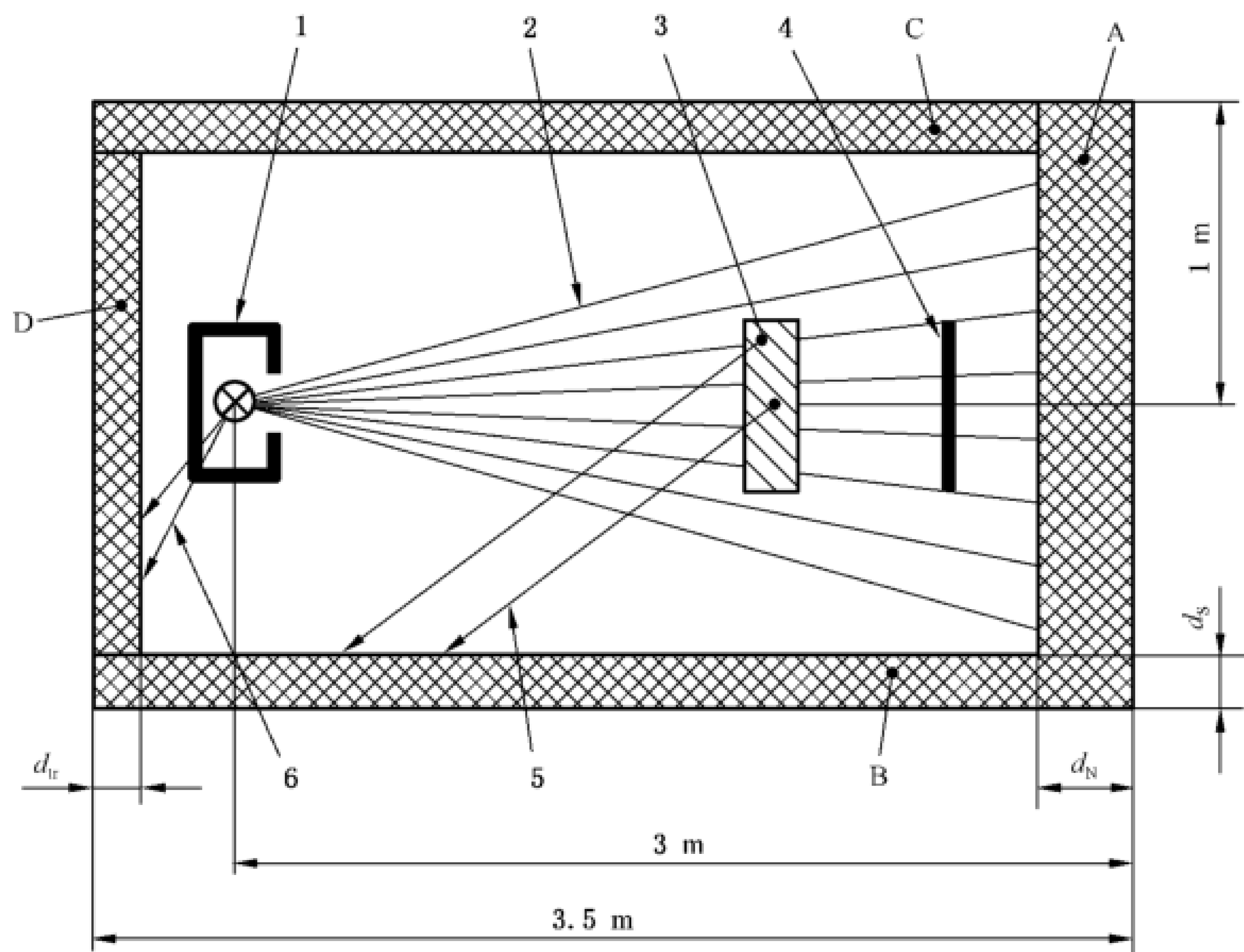
根据表 6 可知， $\dot{H}_{\text{spez,max,N}}=490\,000\text{ }\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{mA}\cdot\text{h})$ 。  
按照公式(5)可得：

$$H=\frac{490\,000\text{ }\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2/(\text{mA}\cdot\text{h})\times10\text{ mA}\times3.14\times40^\circ}{25\text{ m}\times50\,000\text{ m/h}\times180^\circ}=2.7\text{ }\mu\text{Sv}$$

A.2 320 kV,重混凝土(3.2 g/cm³)条件下 X 射线设备保护层

A.2.1 概述

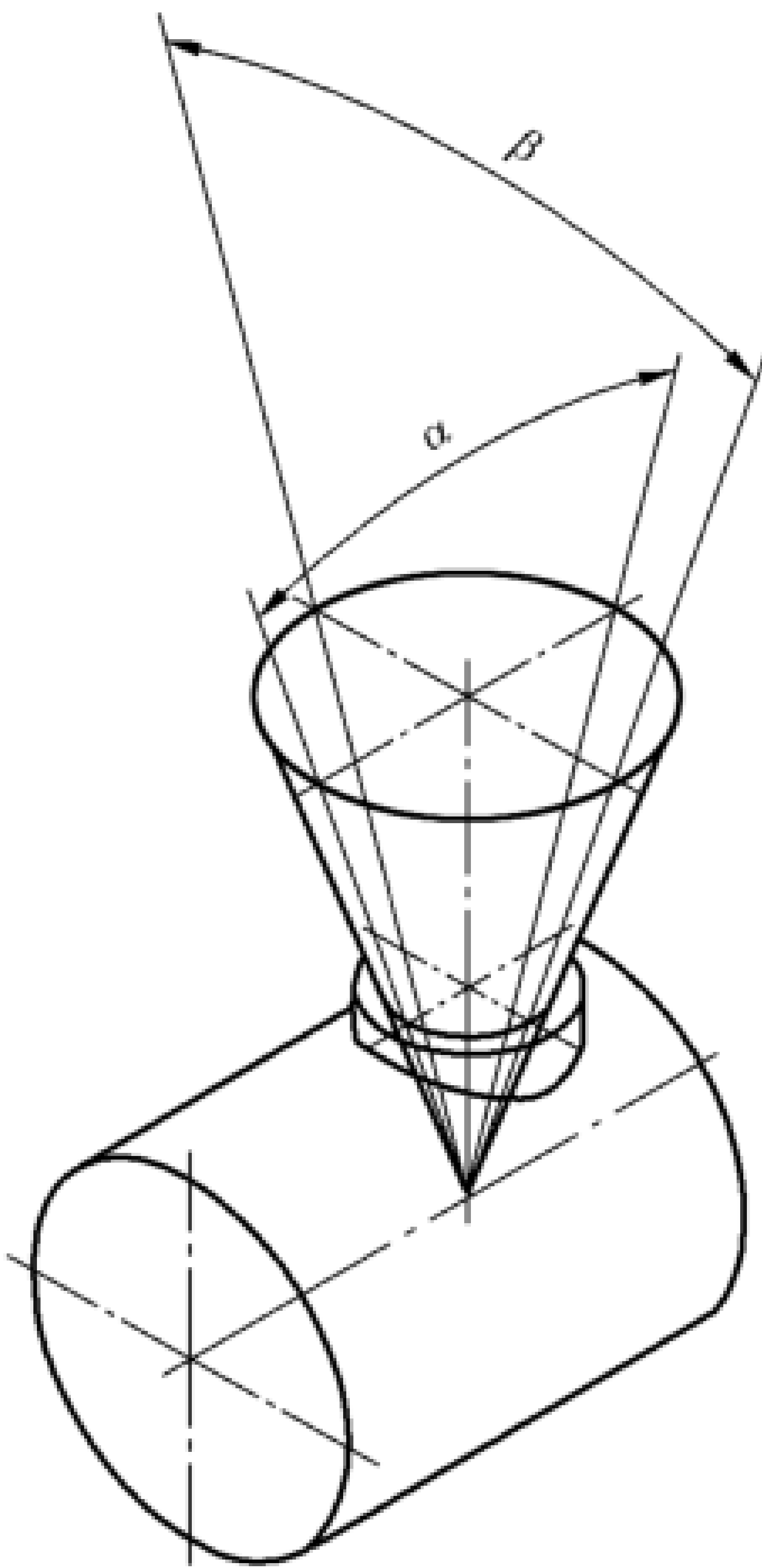
使用公式(6)至公式(8)计算。  
计算参考图示见图 A.2 和图 A.3。  
计算参数:射线设备  $U=320\text{ kV}$ ,  $I=10\text{ mA}$ , 角度  $\alpha\times\beta=40^\circ\times40^\circ$ 。



- 标引序号说明:

  - 1 ——射线源;
  - 2 ——射线束;
  - 3 ——检测对象;
  - 4 ——检测器;
  - 5 ——散射射线;
  - 6 ——泄漏射线;
  - A ——主防护墙;
- B ——侧防护墙;
  - C ——侧防护墙;
  - D ——辅助防护墙;
  - $d_N$  ——有效射束屏蔽厚度;
  - $d_s$  ——散射辐射屏蔽厚度;
  - $d_{tr}$  ——泄漏辐射屏蔽厚度。

图 A.2 射线场防护示意图



标引序号说明：  
 $\alpha$  ——有效射束平行于射线管的角度；  
 $\beta$  ——有效射束垂直于射线管的角度。

图 A.3 有效射束发射角度图解

A.2.2 墙壁 A:有效射束保护层厚度  $d_N$

射线源和居留点最短防护距离 3 m;根据表 3,有效剂量限值为 6 000  $\mu\text{Sv}$ ;最大年居留时间  $t_E=200\text{ h}$ ;居留因子  $T=1.0$ 。

根据公式(2)和公式(6),特殊剂量率为:

$$\dot{H}_{\text{spez,N}} = \frac{6\,000\,\mu\text{Sv} \times (3\text{ m})^2}{200\text{ h} \times 10\text{ mA} \times 1.0} = 27\,\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$$

从图 1 中可得:320 kV 对应铅厚度  $d_N=18\text{ mm}$ ;

从表 4 中可得:300 kV 墙壁 A 对应重混凝土厚度  $d_N=220\text{ mm}$ 。

A.2.3 墙壁 B 和墙壁 C:散射辐射保护层厚度  $d_S$

散射面中间到居留点的最短防护距离为 1 m;根据表 3,有效剂量限值为 1 000  $\mu\text{Sv}$ ;最大年居留时间  $t_E=200\text{ h}$ ;居留因子  $T=1.0$ 。

根据公式(3):

$$I_S = 10\text{ mA} \times 40 \times \frac{40}{1\,600} = 10\text{ mA}$$

根据公式(7),特殊剂量率为:

$$\dot{H}_{\text{spez,S}} = \frac{1\,000\,\mu\text{Sv} \times (1\text{ m})^2}{200\text{ h} \times 10\text{ mA} \times 1.0} = 0.5\,\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$$

从图 2 中可得:320 kV 对应铅厚度  $d_S=8\text{ mm}$  ;

从表 4 中可得:300 kV 墙壁 B 和墙壁 C 对应重混凝土厚度  $d_s=115\text{ mm}$ 。

A.2.4 墙壁 B 和墙壁 C:泄漏辐射保护层厚度  $d_{tr}$

射线源到居留点的最短防护距离为 1 m;根据表 3,有效剂量限值为 1 000  $\mu\text{Sv}$ ;最大年居留时间  $t_E=200\text{ h}$ ;居留因子  $T=1.0$ 。

根据公式(4)和公式(8),特殊剂量率为:

$$\dot{H}_{\text{spez, tr}} = \frac{1\,000\,\mu\text{Sv} \times (1\text{ m})^2}{200\text{ h} \times 1\text{ mA} \times 1.0} = 5\,\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})$$

从图 3 中可得:320 kV 对应铅厚度  $d_{tr}=17\text{ mm}$ 。

从表 4 中可得:300 kV 墙壁 B 和墙壁 C 对应重混凝土厚度  $d_{tr}=210\text{ mm}$ 。

A.2.5 墙壁 B 和墙壁 C:干扰辐射保护层厚度  $d$

从 A.2.3 和 A.2.4 中取最大者,所以对于墙壁 B 和墙壁 C,其重混凝土厚度为 210 mm。

A.2.6 墙壁 D:散射辐射保护层厚度  $d_s$

散射面中间到居留点的最短防护距离为 2.5 m;根据表 3,有效剂量限值为 1 000  $\mu\text{Sv}$ ;最大年居留时间  $t_E=200\text{ h}$ ;居留因子  $T=0.3$ 。

根据公式(3)和公式(7),特殊剂量率为:

$$\dot{H}_{\text{spez, S}} = \frac{1\,000\,\mu\text{Sv} \times (2.5\text{ m})^2}{200\text{ h} \times 10\text{ mA} \times 0.3} = 10.4\,\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})$$

从图 2 中可得:320 kV 对应铅厚度  $d_s=5\text{ mm}$ 。

从表 4 中可得:300 kV 墙壁 D 对应重混凝土厚度  $d_s=76\text{ mm}$ 。

A.2.7 墙壁 D:泄漏辐射保护层厚度  $d_{tr}$

射线源到居留点的最短防护距离为 0.5 m;根据表 3,有效剂量限值为 1 000  $\mu\text{Sv}$ ;最大年居留时间  $t_E=200\text{ h}$ ;居留因子  $T=0.3$ 。

根据公式(4)和公式(8),特殊剂量率为:

$$\dot{H}_{\text{spez, tr}} = \frac{1\,000\,\mu\text{Sv} \times (0.5\text{ m})^2}{200\text{ h} \times 1\text{ mA} \times 0.3} = 4.2\,\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{h})$$

从图 3 中可得:320 kV 对应铅厚度  $d_{tr}=18\text{ mm}$ 。

从表 4 中可得:300 kV 墙壁 D 对应重混凝土厚度  $d_{tr}=220\text{ mm}$ 。

A.2.8 墙壁 D:干扰辐射保护层厚度  $d$

从 A.2.6 和 A.2.7 中取最大者,所以对于墙壁 D,其重混凝土厚度为 220 mm。

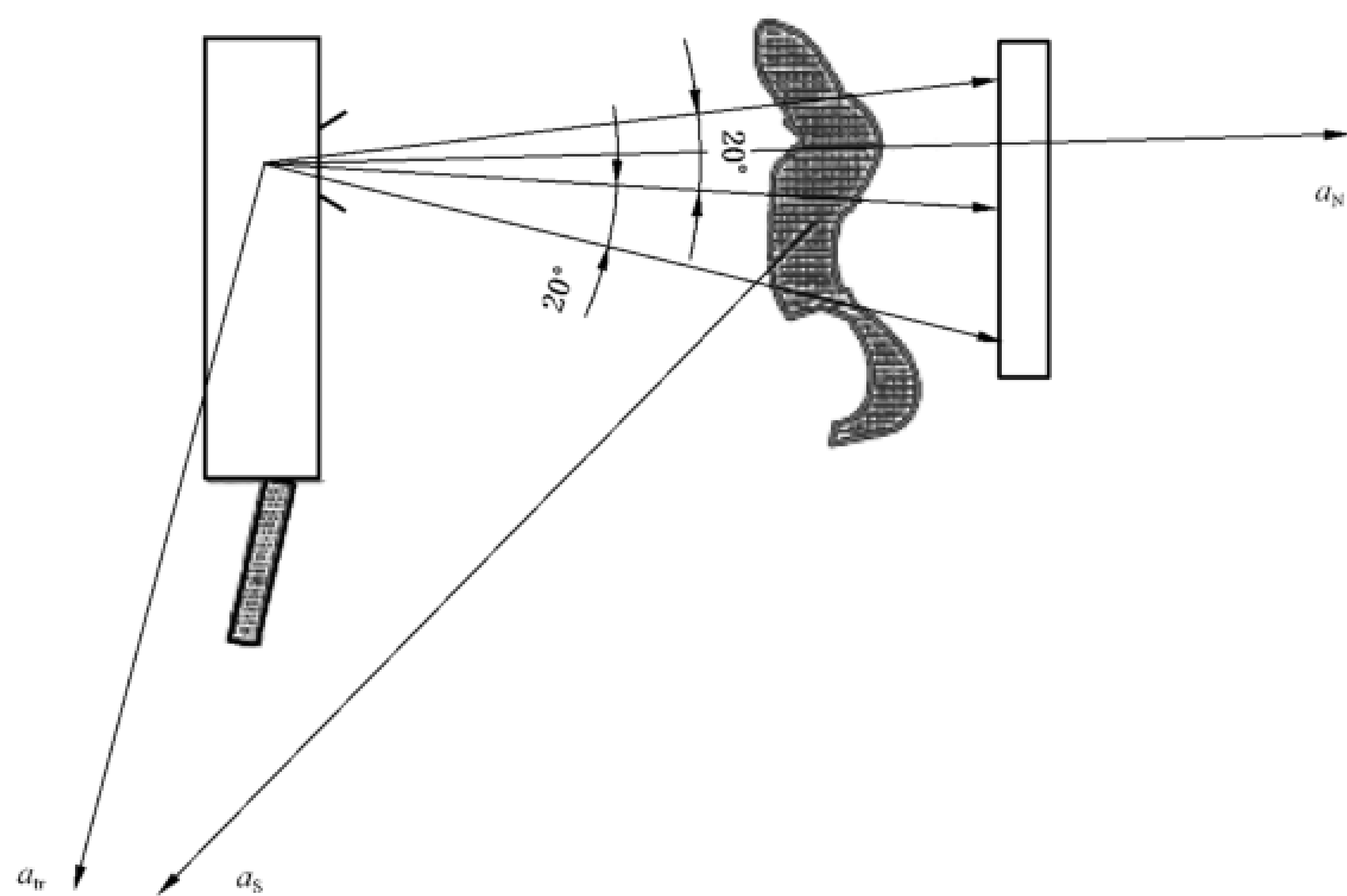
A.3 225 kV,野外工作条件下 X 射线设备防护距离

A.3.1 概述

使用公式(9)至公式(11)计算。

计算参考图示见图 A.4。

计算参数:射线设备  $U=225\text{ kV}$ ,  $I=10\text{ mA}$ ,角度  $\alpha \times \beta = 20^\circ \times 20^\circ$ ,最大有效剂量率  $H_{\text{max}} = 40\text{ mSv/h}$ 。



标引序号说明：

$a_N$  ——有效射束防护距离；

$a_S$  ——散射辐射防护距离；

$a_{tr}$  ——泄漏辐射防护距离。

图 A.4 野外工作防护示意图

A.3.2 有效射束防护距离

根据表 6 可知，有效射束最大特殊剂量率  $\dot{H}_{\text{spez,max,N}} = 160\,000\ \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$ 。

按照公式(2)和公式(9)可得：

$$a_N = \sqrt{\frac{160\,000\ \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h}) \times 10\ \text{mA}}{40\ \text{mSv/h}}} = 200\ \text{m}$$

A.3.3 散射辐射防护距离

根据表 6 可知，散射辐射最大特殊剂量率  $\dot{H}_{\text{spez,max,S}} = 6\,500\ \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$ 。

按照公式(3)和公式(10)可得：

$$a_S = \sqrt{\frac{6\,500\ \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h}) \times 10\ \text{mA} \times 20 \times 20}{40\ \text{mSv/h} \times 1\,600}} = 20\ \text{m}$$

A.3.4 泄漏辐射防护距离

根据表 6 可知，泄漏辐射最大特殊剂量率  $\dot{H}_{\text{spez,max,tr}} = 10\,000\ \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h})$ 。

按照公式(4)和公式(11)可得：

$$a_{tr} = \sqrt{\frac{10\,000\ \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 / (\text{mA} \cdot \text{h}) \times 1\ \text{mA}}{40\ \text{mSv/h}}} = 16\ \text{m}$$



中 华 人 民 共 和 国  
国家标准化指导性技术文件  
无损检测仪器 1 MV 以下 X 射线设备的  
辐射防护规则 第 3 部分:450 kV 以下  
X 射线设备辐射防护的计算公式和图表  
GB/Z 41476.3—2022

\*

中国标准出版社出版发行  
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)  
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www.spc.org.cn

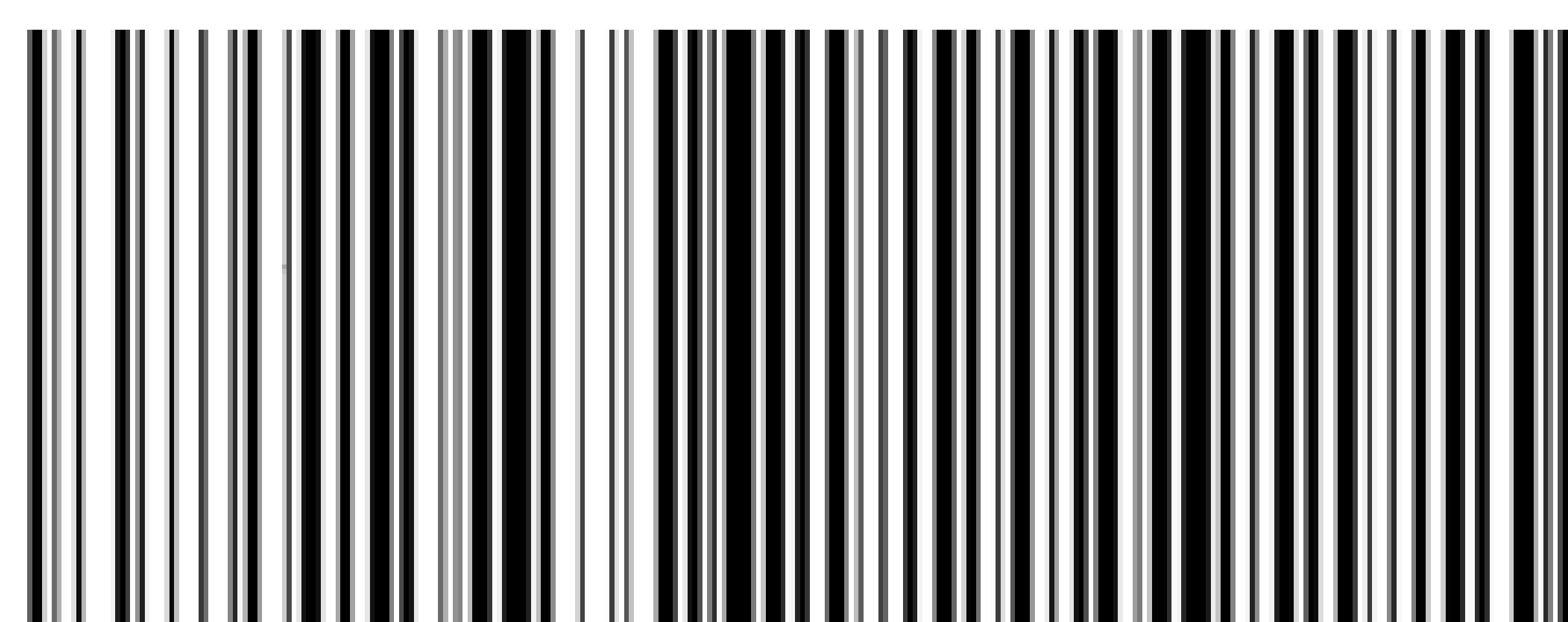
服务热线:400-168-0010

2022 年 4 月第一版

\*

书号:155066·1-70295

版权专有 侵权必究



GB/Z 41476.3-2022



码上扫一扫 正版服务到