

X射线装置豁免管理的技术认定方法研究

翟江龙, 杨磊磊, 王建平, 王孝辉, 朱国英

复旦大学放射医学研究所, 上海 200032

摘要:

[目的] 根据豁免基本准则要求, 通过对辐射剂量测量仪器性能的实验研究和屏蔽材料衰减特性曲线蒙特卡罗模拟, 建立对X射线装置豁免管理的技术认定方法。

[方法] 利用防护水平X辐射空气比释动能率标准装置, 对市售且具有一定使用频次的8类典型辐射剂量测量仪器在10~60 kV加载管电压范围、不同管电流档的仪器能响和读数稳定性等性能指标进行实验验证, 计算校准因子; 同时, 通过蒙特卡罗模拟计算, 建立铅、铁、铝、铜、钨和有机玻璃6种常用屏蔽材料对X射线的衰减特性曲线。

[结果] 8类辐射剂量测量仪器对10 kV及以下X射线均无响应; 对20 kV能量X射线, 6类仪器有响应, 但获得的校准因子差异明显, 范围为0.7~11.1; 对于30 kV能量X射线, 8类仪器均有响应, 但校准因子差异较大; 对40 kV能量X射线, 8类仪器均有响应, 其中6类仪器校准因子已接近1, 且不受管电流值改变的明显影响; 只有60 kV能量X射线, 市售8类辐射剂量测量仪的校准因子均接近1。即使同类型测量仪器, 60 kV以下时校准因子随管电压也变化较大, 且不与管电压呈线性关系。使用蒙特卡罗程序模拟计算并建立的10~100 kV的X射线衰减特性曲线, 可用于对不同能量尤其是40 kV以下能量X射线经特定厚度材料屏蔽后泄漏剂量率估算。

[结论] 本研究建立了X射线装置豁免管理的技术认定方法: 对于加载管电压40 kV及以上X射线装置, 可使用满足技术性能要求且经相应能量档校准的测量仪进行检测和豁免认定; 对于加载管电压40 kV以下X射线装置, 可采用衰减特性曲线估算X射线装置表面0.1 m处周围剂量当量率 $H^*(10)$ 进行豁免认定。

关键词: X射线装置; 豁免; 能量响应; 蒙特卡罗程序; 衰减特性曲线

Study on technical validation method of X-ray equipment exemption ZHAI Jiang-long, YANG Lei-lei, WANG Jian-ping, WANG Xiao-hui, ZHU Guo-ying (Institute of Radiation Medicine, Fudan University, Shanghai 200032, China)

Abstract:

[Objective] The aim of this study is to establish a method for technical validation of X-ray equipment exemption in accordance with the principles of the exemption guideline, through experimental study on key specifications of radiation dose measuring apparatus and Monte Carlo simulation of shielding material attenuation characteristic curves.

[Methods] Using a standard device of protective-level X-ray air kerma rate, the performance indices such as energy response and reading stability were tested for eight commercially available typical radiation dose measuring apparatus with pre-set usage frequency, in the range of 10~60 kV loading tube voltage and under different tube current conditions, and calibration factor was also calculated. Simultaneously, the attenuation characteristic curves of six frequently-used shielding materials (lead, iron, aluminium, copper, tungsten, and polymethyl methacrylate) on X-ray were established by Monte Carlo simulation.

[Results] The eight radiation dose measuring apparatus did not respond to X-rays below 10 kV loading tube voltage. For 20 kV X-rays, six types of measuring apparatus responded, but the calibration factors of different apparatus were significantly different, ranging from 0.7 to 11.1. For 30 kV X-rays, all apparatus responded, but the calibration factors varied greatly. For 40 kV X-rays, all apparatus responded, and the calibration factors of six types of measuring apparatus were closed to 1 without being affected by tube current. For 60 kV X-rays, the calibration factors of all selected measuring apparatus were close to 1. Even the calibration factor of the same type of apparatus varied greatly depending on the loading tube voltage, and not in a linear manner. Attenuation characteristic

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2019.19037

基金项目

上海市环境保护局科研项目 [沪环科 (13-28002)]

作者简介

翟江龙 (1988—), 男, 硕士生;
E-mail: jlzhai1917@126.com

通信作者

朱国英, E-mail: Zhugy@shmu.edu.cn

利益冲突 无申报

收稿日期 2019-01-18

录用日期 2019-02-11

文章编号 2095-9982(2019)04-0400-07

中图分类号 R148

文献标志码 A

引用

翟江龙, 杨磊磊, 王建平, 等. X射线装置豁免管理的技术认定方法研究 [J]. 环境与职业医学, 2019, 36 (4): 400-406.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2019.19037

Funding

This study was funded.

Correspondence to

ZHU Guo-ying, E-mail: Zhugy@shmu.edu.cn

Competing interests None declared

Received 2019-01-18

Accepted 2019-02-11

To cite

ZHAI Jiang-long, YANG Lei-lei, WANG Jian-ping, et al. Study on technical validation method of X-ray equipment exemption [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2019, 36(4): 400-406.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2019.19037

curves for 10-100 kV X-rays were established by Monte Carlo simulation, and the curves were suitable for estimating the ambient leaking dose equivalent rate of the X-ray equipment below 40kV shielded by materials with specific thickness.

[Conclusion] A technical validation method is established for X-ray equipment exemption. For X-ray equipment with a loading tube voltage of 40 kV and above, exemption is granted according to the dose measurement results tested using apparatus meeting technical performance requirements and with corresponding energy category calibrated. For X-ray equipment with a loading tube voltage below 40 kV, exemption is granted according to the ambient dose equivalent rate at a distance of 0.1 m from any accessible surface of the X-ray equipment estimated by the proposed attenuation characteristic curves.

Keywords: X-ray equipment; exemption; energy response; Monte-Carlo program; attenuation characteristic curve

X射线成像与荧光分析技术已经成为物质化学元素分析、材料质量无损检测和微电路光刻检验的重要手段^[1]。国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)将管电压10~100 kV的X射线定义为低能X射线^[2],这一能量范围的X射线已广泛应用在科学研究、材料分析、无损检测、医学诊断与浅表治疗等相关领域。X射线装置和放射源的使用或管理不当,会造成从业人员和周围公众受到电离辐射照射,从而影响甚至危及生命健康与安全;但如监管过度,将不可避免地增加使用单位的经济和管理负担。尤其是进行小型材料(如线路板)无损检测或材料分析的X射线装置,多属于III类射线装置^[3]。这类装置使用射线能量较低(管电压通常在100 kV以下,属低能X射线),且自身固有屏蔽防护安全可靠,具有功率低、自身屏蔽防护优良、安全连锁可靠等特点。即使进一步采取监管措施也不能显著减少个人剂量或降低健康风险。因此,在符合正当性原则并经监管部门核准后,此类X射线装置可申请豁免,以有效节约管理成本。

“豁免”是指由监管机构决定的包含辐射的源或实践活动部分或完全不需要受到监管控制^[4-6]。就本质而言,豁免是监管机构准予的一种认可,即允许包含辐射的源或实践活动可豁免于监管控制^[7]。国际放射防护委员会(The International Commission on Radiological Protection, ICRP)早在1990年建议书中就提出豁免是监管职能的一个重要组成部分^[8]。1993年ICRP第64号出版物概述了豁免的基本要求为“实践是正当的、引起的个人剂量小于10 μSv/年、防护已经是最优的”^[9]。此后,IAEA的基本安全标准(1996年版)建立了可被豁免的监管要求,提出了豁免的二项基本原则:危险足够小,防护已是最优化^[10]。2014年版的基本安全标准仍保留了豁免的基本准则和自动豁免的要求内容^[6]。目前,IAEA基本安全标准和我国基本标准GB 18871已制订了放射性豁免的基本准则,对X射线装置豁免要求为:①正常运行操作条件下,

在距设备的任何可达表面0.1 m处所引起的周围剂量当量率或定向剂量当量率不超过1 μSv/h;或②所产生辐射的最大能量不大于5 keV^[6, 11]。由此可见,对于能量大于5 keV的X射线装置豁免判定,需根据设备表面0.1 m处的辐射剂量率检测结果判定。由于申请豁免的X射线装置多为低管电压,常常没有合适的辐射剂量测量仪对设备表面0.1 m处的周围剂量当量率进行直接测量。此外,即使可直接测量,豁免检测仪器的技术性能和质控也是影响检测数据可靠性的一个重要因素。本研究依据X射线装置的发生器电压及有效能量、装置屏蔽防护材料等技术参数,探讨对装置表面0.1 m处周围剂量当量率 $H^*(10)$ 进行实际检测或理论估算的方法,从而为豁免管理的具体实施提供技术规范和依据,同时对进一步加强辐射安全和防护的有效管理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 辐射剂量测量仪器性能验证与校准

1.1.1 防护水平X辐射空气比释动能率标准装置 上海市计量测试技术研究院防护水平X辐射空气比释动能率标准装置是参照IAEA的X辐射剂量学实验室标准建设,量值溯源可至国家基准。该标准装置使用德国YXLON公司的高分辨率、高稳定度X射线发生器作为X射线源,管电压调节范围为8.0~320 kV、步长为0.2 kV;管电流调节范围为0.01~15.00 mA、步长为0.01 mA。该标准装置设置有4个校准位置,分别位于距球管焦点1、3、5、9.6 m处,依据本实验所需辐射剂量率量程范围,校准位置设置于距X射线源9.6 m处。根据空气比释动能与周围剂量当量转换系数^[12],可计算得到不同照射条件下校准位置(9.6 m)处周围剂量当量率 $H^*(10)$ 约定值。周围剂量当量率 $H^*(10)$ 约定值=空气比释动能率/转换系数。实验设定管电压和管电流时的 $H^*(10)$ 约定值如表1所示。

表1 不同照射条件下校准位置处周围剂量当量率约定值

管电压 (kV)	管电流 (mA)	空气比释动能率 ($\mu\text{Gy/h}$)	转换系数 (Gy/Sv)	周围剂量当量率约定值 $H^*(10)$ ($\mu\text{Sv/h}$)
20	0.1	4.90	1.261	3.89
	0.2	9.81		7.77
	0.5	24.51		19.43
	1.0	49.03		38.87
30	0.1	4.70	0.802	5.86
	0.2	9.40		11.72
	0.5	23.50		29.31
	1.0	47.00		58.62
40	0.1	5.02	0.766	6.54
	0.2	10.03		13.09
	0.5	25.08		32.73
	1.0	50.16		65.46
60	0.1	5.31	0.725	7.32
	0.2	10.62		14.64
	0.5	26.55		36.62
	1.0	53.09		73.24

1.1.2 仪器性能验证和校准实验 通过文献调研, 以及对上海市计量测试技术研究院近年内承接检定或校准的辐射剂量测量仪器的档案查阅, 筛选出目前市场上可购置的、有一定使用频度的辐射剂量测量仪器共 8 类 (每类 3~5 台) 进行性能验证和校准实验。其中, 3 类仪器的探测器类型为塑料闪烁体 (FH40G 主机 + FHZ672E-10 探头; 6150AD5/H 主机 + 6150AD-b/H 探头; AT1123), 5 类仪器的探测器类型为电离室 (451B-DE-SI、ICS-321、440RF/D-SI、TA TBM-IC-AJI 和 451P-DE-SI-RYR)。利用上海市计量测试技术研究院的防护水平 X 辐射空气比释动能率标准装置, 对 8 类常见剂量测量仪器的能量响应进行性能验证和校准。利用激光定位系统将仪器的有效测量点精确放置在距离标准装置球管焦点 9.6 m 处。管电压选用 10、20、30、40、60 kV 共五档, 管电流选用 0.1、0.2、0.5、1.0 mA 共四档。照射时待仪器读数稳定后记录仪器读数, 每个读数实验重复 5 次。将读数平均值与相应的周围剂量当量率约定值进行比较, 计算得到校准因子 $C_f = \text{周围剂量当量率约定值} / \text{辐射剂量测量仪读数平均值}$ 。理想的校准因子应在 0.7~1.3 范围内 (相应的能量响应为 -23%~43%)^[13]。

1.2 蒙卡模拟计算泄漏剂量率理论值

对于能量较低、辐射剂量测量仪器无法准确测量装置表面 0.1 m 处辐射剂量率的 X 射线装置, 通过蒙卡程序模拟计算, 建立铅、铁、铜、铝、钨、有机玻璃/聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 等常用屏蔽材料对不同能量 X 射线的衰减比和泄漏剂量率理论值, 可用于计算距装置表面 0.1 m 处周围剂

量当量率, 作为基于固有屏蔽材料特性的 X 射线装置豁免管控技术依据。

1.2.1 辐射源项的确定 阳极角影响着 X 射线管焦点的形状和大小, 导致产生的 X 射线强度在不同方向上是不同的。阳极角在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内的 X 射线机用途各不相同, 0° 主要用于全景式或环向照射的 X 射线机, 而 20° 则多用于定向 X 射线机^[14]。申请豁免的 X 射线装置工作方式多为定向照射, 故本研究采用阳极角为 20° 建立 X 射线谱计算的简化模型, 并假设 10~100 keV 电子以水平方向射入钨靶面, 计算记录方向产生的 X 射线光谱。

1.2.2 常用材料屏蔽性能模型建立与衰减比计算 利用不同电子能量下产生的 X 射线光谱和 ICRP 74 号报告^[15] 给出的光子注量至周围剂量当量率 $H^*(10)$ 转换系数, 模拟得到 X 射线管产生的初始辐射剂量率大小; 再根据美国国家标准与技术研究所 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 报告^[16] 给出的铅、铁、铜、铝、钨和 PMMA 六种材料对 10~100 keV 光子的线衰减系数, 模拟计算得到上述阳极角为 20° 建立 X 射线谱计算的简化模型中, X 光管产生的 X 射线经不同厚度材料屏蔽后距球管焦点 0.1 m 处的周围剂量当量率 $H^*(10)$ 。

2 结果

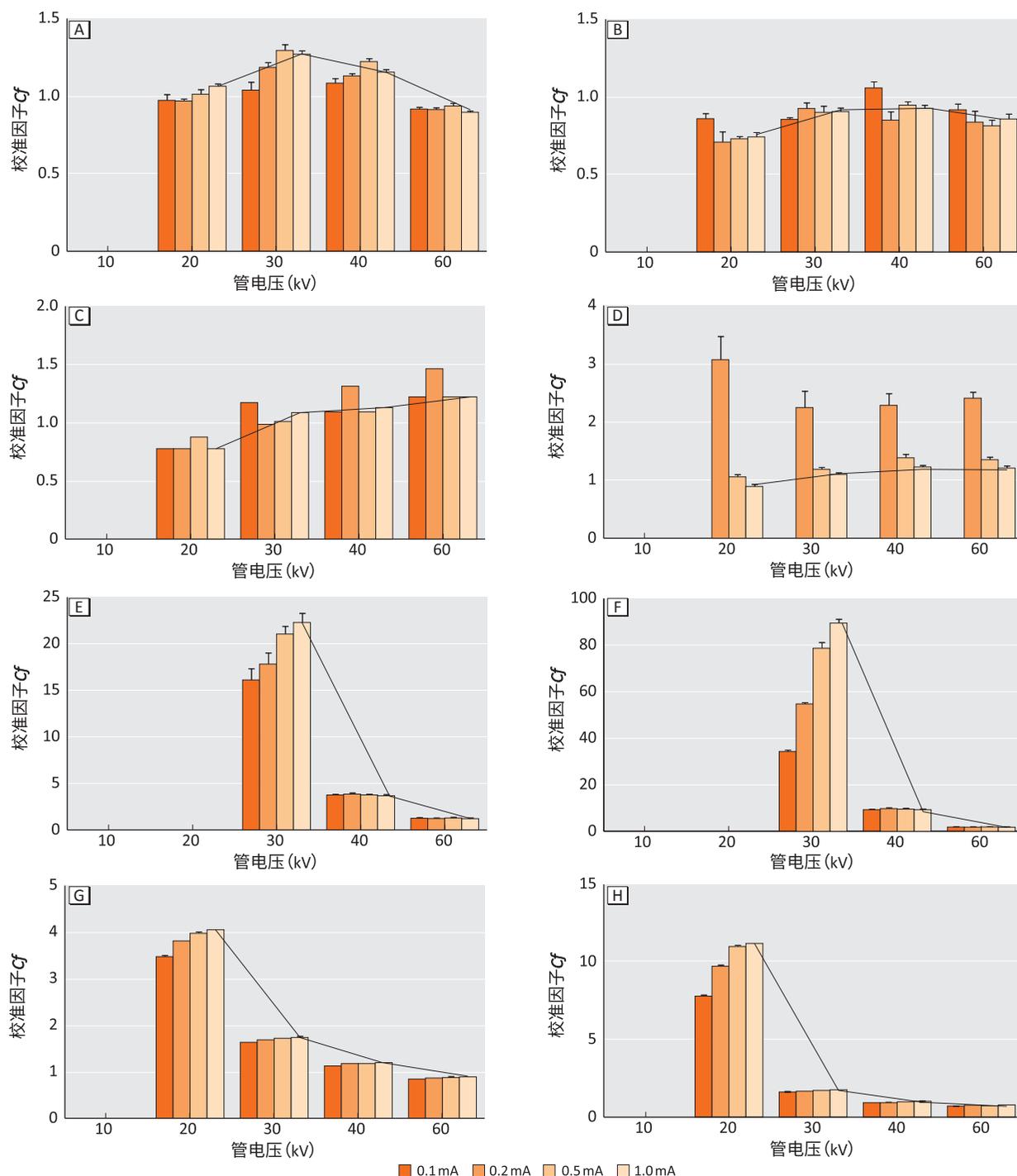
2.1 辐射剂量测量仪器的性能验证与校准

根据实测结果计算得到各类仪器对不同能量、不同管电流条件时的校准因子 C_f 见图 1。由图 1 可知, 8 类常用辐射剂量测量仪器对 10 kV X 射线均无响应; 有两类测量仪器 (451P-DE-SI-RYR 和 FH40G/FHZ672E-10) 对 20 kV X 射线也无响应或校准因子与理想值 (0.7~1.3) 偏离较大; 对于 30 kV 能量 X 射线, 8 类辐射剂量测量仪均有响应, 但校准因子数值差异较大、响应程度各不相同, 有多台测量仪器无法获得理想的校准因子; 对于 40 kV 能量 X 射线, 有 6 类剂量测量仪器能获得理想的校准因子, 但仍有 2 类剂量测量仪器的校准因子远大于 1, 豁免检测时应选择合适仪器以保证检测结果的准确性。只有 60 kV 能量 X 射线, 市售 8 类辐射剂量测量仪的校准因子均接近 1, 且不受管电流值改变的明显影响, 均可用于豁免检测。

进一步分析可知, 同一类剂量测量仪对于不同管电压的校准因子数值差异很大。在图 1 中, 对于 X 射线装置常用的管电流 1 mA、根据不同管电压条件的

校准因子数据进行了线性模拟(见黑色实线),可见校准因子并不随管电压呈线性分布,即在进行豁免判

定测量时,无法采用简单外推法得到能量范围外的校准因子。



[注] A : 451B-DE-SI ; B : ICS-321 ; C : 440RF/D-SI ; D : TBM-IC-AJI ; E : 451P-DE-SI-RYR ; F : FH40G (FH2672E-10) ; G : 6150AD5/H (6150AD-b/H) ; H : AT1123.

图1 8类辐射剂量测量仪在不同照射条件下的校准因子 (n=5)

2.2 利用蒙卡模拟衰减比计算装置表面0.1 m处辐射剂量率

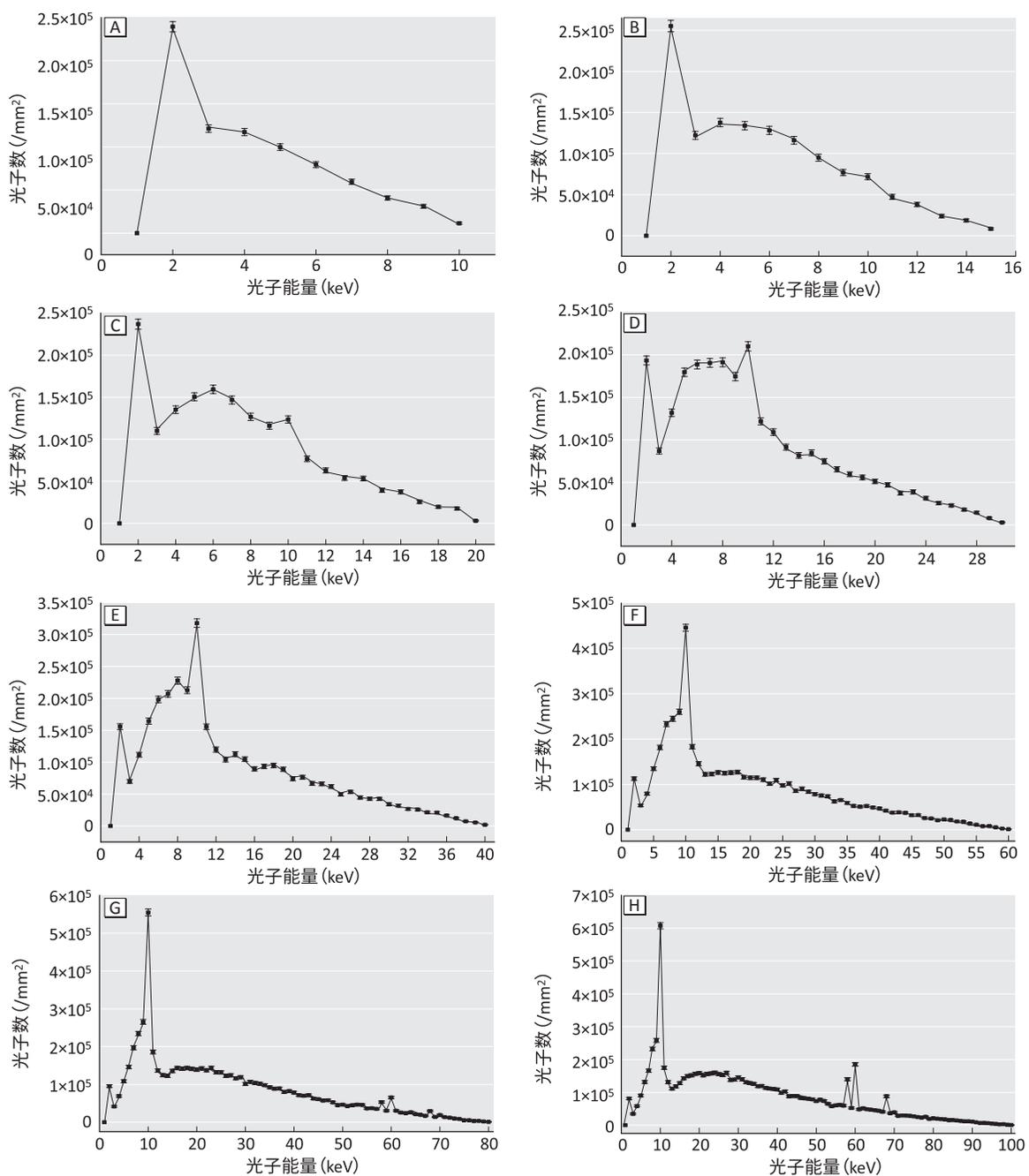
选取球管电流为1 mA,在距离X射线谱计算简化模型球管焦点1 m处记录韧致辐射产生的各个能量的光子数,以光子能量为横坐标、球管焦点1 m处光子数 (/mm²) 为纵坐标,绘制出能量范围在10~100 keV的

X射线谱(见图2A~H)。由图2可得到X射线管在某一管电压下产生的连续谱X射线中不同能量光子的注量。如图2A,10 kV管电压条件下、距离球管焦点1 m处、能量为2 keV的X射线光子数为2.39×10⁵/mm²。进一步用蒙卡程序将相应能量的光子注量转化为周围剂量当量率 H* (10),即可得到X射线管初始辐射剂量率,可用于仪

器无法测量时(如40kV以下装置)理论计算的依据。

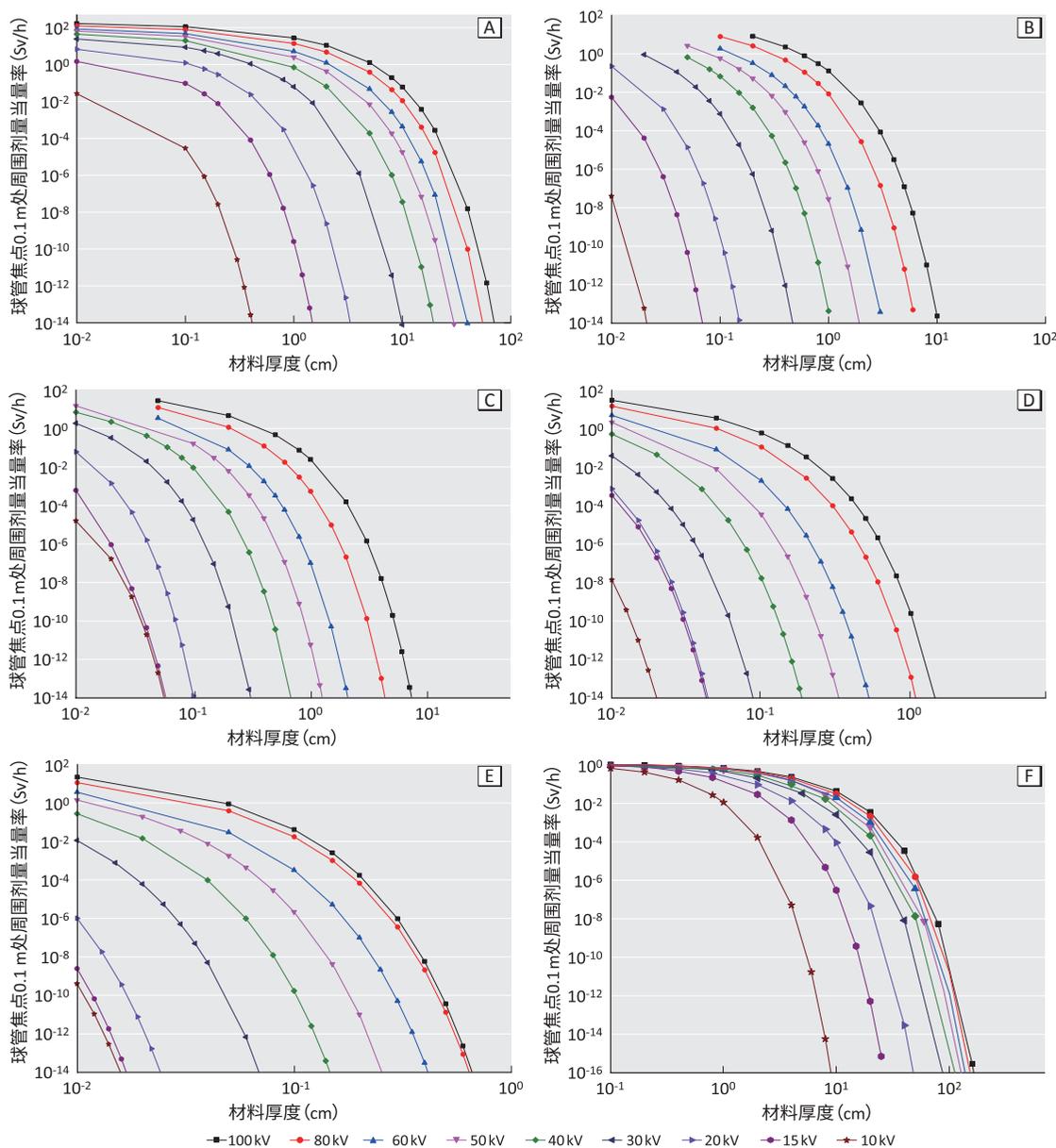
进一步地,根据NIST报告^[16]给出的铝、铁、铜、铅、钨、PMMA六种材料对10~100 keV光子的线衰减系数,利用蒙特卡罗中子-光子输运程序(Monte Carlo Neutron and Photon Transport Code, MCNP)模拟计算得到了经不同厚度材料对X射线屏蔽后距X射线球管焦点0.1 m处的周围剂量当量率 $H^*(10)$ 。为了方便应用,以屏蔽材料厚度为横坐标、距X射线管焦点0.1 m处周围剂量当量率 $H^*(10)$ 为纵坐标绘制衰减曲线(见图3)。该图可用于计算某一管电压X射线

经过一定厚度的某种屏蔽材料衰减后,距离球管焦点0.1 m处周围剂量当量率。例如,图3D是10~100 kV X射线经不同厚度(0~10 mm)铅屏蔽后的衰减曲线图,当某台X射线装置最高管电压为60 kV、管电流为0.1 mA、固有屏蔽为2 mm厚铅材料,距X射线球管焦点0.1 m处周围剂量当量率 $H^*(10)$ 为 $2.8 \mu\text{Sv/h}$;假设装置表面0.1 m处与X射线球管焦点距离为30 cm,根据辐射剂量率与管电流成正比、与距离平方成反比,可计算出装置表面0.1 m处周围剂量当量率 $H^*(10)$ 为 $0.03 \mu\text{Sv/h}$,即符合豁免剂量率要求。



[注] A : 10 keV ; B : 15 keV ; C : 20 keV ; D : 30 keV ; E : 40 keV ; F : 60 keV ; G : 80 keV ; H : 100 keV。

图2 电子动能为10~100 keV的X射线谱



[注] A: 铝; B: 铁; C: 铜; D: 铅; E: 钨; F: 有机玻璃。

图3 不同管电压X射线在屏蔽材料中的衰减特性曲线

3 讨论

x射线装置任何可达表面0.1m处辐射剂量率的获取可分为以下两种情况：其一，装置最大管电压位于辐射剂量测量仪能响范围内，可直接使用剂量测量仪测量装置表面0.1m处周围剂量当量率 $H^*(10)$ 进行豁免判定；其二，装置最大管电压低于剂量测量仪能响范围，无法进行直接测量，对于此类x射线装置的豁免，则需通过理论模拟和计算证明在正常运行和操作条件下，距该设备的任何可达表面0.1m处所引起的周围剂量当量率不超过 $1\mu\text{Sv/h}$ ，同样可以判定x射线装置的豁免准入。但是，目前对于豁免检测用仪器的质量控制、装置表面0.1m处周围剂量当量率 $H^*(10)$ 的理论模拟计算均缺少技术认定方法。

本研究利用上海市计量测试技术研究院的防护水平x辐射空气比释动能率标准装置，对8类常见辐射剂量测量仪的能量响应进行了实验验证。验证结果表明，8类辐射剂量测量仪器对10kV及以下x射线均无响应，部分测量仪器对20kV及以下x射线也无响应。即使在相同照射条件下，不同类型辐射剂量测量仪器的校准因子差异明显；而同类型剂量测量仪器对于不同管电压的校准因子差异也很大，且从管电压与校准因子的线性模拟来看，校准因子并不随管电压呈线性分布，即不宜采用外推法得到能量范围外的校准因子。因此，在进行x射线装置表面0.1m处周围剂量当量率 $H^*(10)$ 检测时，需对辐射剂量测量仪器按照相应管电压和x射线能量进行验证和校准，优先选

择校准因子接近1 (0.7~1.3) 的辐射剂量测量仪器,用于对X射线装置表面泄漏辐射剂量率的准确检测,为X射线装置的豁免判定提供技术依据。

为了方便应用,避免蒙卡理论计算的烦琐,可参考本研究建立的衰减曲线(图3),依据射线装置管电压、管电流和屏蔽箱体尺寸(用于估算X射线球管焦点至箱体表面距离)、箱体屏蔽材料和厚度等技术参数,采用查图法,可简便估算某一管电压X射线经过一定厚度的某种屏蔽材料衰减后,距球管焦点0.1m处周围剂量当量率 $H^*(10)$;再根据辐射剂量率与距离平方成反比定律,可计算得到X射线装置表面0.1m处周围剂量当量率,作为仪器无法测量时装置表面0.1m处豁免剂量要求符合性判断的技术参考。

通过上述研究,建立了用于豁免检测辐射剂量测量仪器的能量响应质控要求。但实际选择辐射剂量测量仪器时,还应综合考虑仪器的量程范围、相对固有误差、最小分度值、响应时间、重复性和最低可探测下限等。而对于加载管电压低于剂量测量仪器能量响应范围的X射线装置,可采用本研究蒙卡程序模拟建立的六种常用屏蔽材料对不同能量X射线的衰减曲线,再依据装置管电流、装置表面0.1m处与X射线管焦点距离(可由屏蔽箱体尺寸和形状估算),计算得到装置表面0.1m处的周围剂量当量率 $H^*(10)$,从而用于对豁免水平进行技术认定的补充。

参考文献

- [1] 杨明太. X射线荧光光谱仪的现状[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(6): 2015-1029.
- [2] International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in photon and electron beams: an international code of practice. Technical reports series No.277 [R]. Vienna: IAEA, 1987.
- [3] 环境保护部, 国家卫生和计划生育委员会. 关于发布《射线装置分类》的公告[EB/OL]. (2017-12-06) [2018-11-01]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/t20171214_427933.htm.
- [4] The International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the international commission on radiological protection: ICRP publication 103 [R]. Ottawa: ICRP, 2007.
- [5] The International Commission on Radiological Protection. Scope of radiological protection control measures: ICRP publication 104 [R]. Ottawa: ICRP, 2007.
- [6] International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards: IAEA Safety Standards Series GSR Part 3 [R]. Vienna: IAEA, 2014.
- [7] IAEA. Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance: IAEA Safety Guide No.RS-G-1.7 [R]. Vienna: IAEA, 2004.
- [8] The International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the international commission on radiological protection: ICRP publication 60 [R]. Ottawa: ICRP, 1991.
- [9] The International Commission on Radiological Protection. Protection from potential exposure-a conceptual framework: ICRP publication 64 [R]. Ottawa: ICRP, 1993.
- [10] International Atomic Energy Agency. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. IAEA Safety Series No.115 [R]. Vienna: IAEA, 1996.
- [11] 电离辐射防护与辐射源安全基本标准:GB 18871-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [12] International Commission on Radiation Units & Measurements. Measurement of dose equivalents from external photon and electron radiations: ICRU Report 47-1992 [R]. U.S.A., Maryland, Bethesda: ICRU, 1992.
- [13] 辐射防护仪器 β 、 α 和 γ 辐射周围和/或定向剂量当量(率)仪和/或监测仪 第1部分: 便携式工作场所和环境测量仪与监测仪: GB/T 4835.1-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [14] 熊瑛. X射线辐射角及辐射场的测定[C] //第十届全国无损检测新技术学术会议. 成都: 中国机械工程学会, 2007: 97-100.
- [15] The International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation: ICRP publication 74 [R]. Ottawa: ICRP, 1996.
- [16] NIST. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1KEV to 20 MEV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest [EB/OL]. [2018-11-01]. <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>.

(英文编辑: 汪源; 编辑: 王晓宇; 校对: 童玲)