

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.03.024

• 辐射安全/论著 •

三种电子加速器产生的臭氧危害分析

张震, 李玉文, 陈飞, 王雪涛, 佟林全

国家卫生健康委职业安全卫生研究中心, 北京 102308

摘要: 目的 获得高能电子直线加速器、同步加速器和医用电子直线加速器产生的臭氧浓度, 评估其臭氧危害。方法 利用半经验公式分别计算三种常见电子加速器工作场所中臭氧浓度。结果 三种不同类型电子加速器产生的臭氧浓度范围为 $2.21 \times 10^{-5} \sim 2.76 \times 10^{-1} \text{ mg/m}^3$ 。结论 三种类型电子加速器产生的臭氧浓度均低于标准限值, 正常工作条件下臭氧的职业病危害是能够有效控制的。

关键词: 臭氧浓度; 高能电子直线加速器; 同步加速器; 医用电子直线加速器

中图分类号: TL5 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2020)03-0295-02

Hazard analysis of ozone produced by three kinds of electron accelerators

ZHANG Zhen, LI Yuwen, CHEN Fei, WANG Xuetao, TONG Linquan

National Center for Occupational Safety and Health, NHC, Beijing 102308 China

Abstract: **Objective** To obtain the ozone concentration produced by high energy electron linac, synchrotron and medical electron linac, and to evaluate its ozone hazards. **Method** The semi-empirical formula was used to calculate the ozone concentration in the workplace of three common different types of electron accelerators. **Result** The concentration range of ozone produced by three different types of electron accelerators was $2.21 \times 10^{-5} \sim 2.76 \times 10^{-1} \text{ mg/m}^3$. **Conclusions** The concentration of ozone produced by three different types of electron accelerators was below the standard limit, and the occupational hazards of ozone could be effectively controlled under normal working conditions.

Key words: Ozone Concentration; High Energy Electron Linac; Synchrotron; Medical Electron Linac

Corresponding author: TONG Linquan, E-mail: tlqzyzx@163.com

电子加速器的应用越来越广泛, 能量也越来越高, 一方面医用电子直线加速在医疗行业放射治疗中应用非常广泛, 另一方面电子加速器也广泛应用在科学研究、工业探伤、工业辐照等领域^[1-3]。

电子加速器运行过程会产生高能电子束、韧致辐射(X射线)等, 这些射线穿过空气会使空气电离而产生臭氧和氮氧化物, 其中, 臭氧的产量一般是氮氧化物的两倍, 可能会对人体的呼吸系统、神经系统造成损伤, 国家职业卫生标准中规定了其限值。故本文将分析并评估高能电子直线加速器、同步加速器和医用电子直线加速器工作过程中产生的臭氧浓度, 对保护工作人员职业健康、加速器辐射防护设计、职业病危害评价等有重要参考价值。

1 对象与方法

1.1 研究对象 研究高能电子直线加速器, 高能同步加速器, 医用电子直线加速器三种类型机房或隧道

内的臭氧浓度。本文中采用的 500 MeV 电子直线加速器的隧道长宽高尺寸为 $50 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$; 15 MeV 医用电子直线加速器机房的长宽高尺寸为 $13.5 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 3 \text{ m}$; 6 GeV 同步加速器环形隧道周长为 450 m, 隧道截面宽高尺寸为 $3.33 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。

1.2 计算方法 采用 NCRP144 号报告中的臭氧浓度计算公式并参考 IAEA 188 号报告中有关参数, 分别计算高能电子直线加速器、高能同步加速器、医用电子直线加速器等工作场所的臭氧浓度^[4-5], 在不考虑射线对已产生臭氧分子的破坏而降低时, 臭氧浓度计算公式如下,

$$C(t) = \frac{gI}{\alpha + Q/V} \times [1 - e^{-(\alpha + Q/V)t}] \times \frac{48000}{6.02 \times 10^{23}} \quad (1)$$

其中, $C(t)$ 为 t 时刻臭氧浓度, mg/m^3 ; $\frac{48000}{6.02 \times 10^{23}}$ 为单位体积内臭氧分子数转换为浓度时的转换系

数。 I 为单位时间单位体积内空气中能量的沉积, $\text{eV m}^{-3} \text{s}^{-1}$; g 为单位能量沉积产生的臭氧分子数, eV^{-1} , 低剂量率下取 0.074; α 为臭氧分子分解速率 s^{-1} , 其值为 2.03×10^{-4} ; Q 为机房空气排出率, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; V 为机房体积, m^3 。

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 由公式(1)可以推导出饱和臭氧浓度计算公式如下,

$$C_s = \frac{gI}{(\alpha + Q/V)} \times \frac{48000}{6.02 \times 10^{23}} \quad (2)$$

其中, C_s 为饱和臭氧浓度, mg/m^3 , 其他参数同公式(1)。

在公式(2)中, I 的数值是臭氧浓度计算的关键, 在已知工作场所吸收剂量率时, 比如医用电子直线加速器治疗时常见吸收剂量率为 600 cGy/min , 再根据空气中的吸收剂量率与 I 的转换系数, 可以计算 I 值。标准大气压下空气密度为 1.29 kg/m^3 , 因此, $1 \text{ Gys}^{-1} = 1 \text{ Js}^{-1} = 6.25 \times 10^{18} \text{ eV kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 则 1 Gys^{-1} 对应单位体积空气中的能量沉积为 $6.25 \times 10^{18} \times 1.29 \text{ eV m}^{-3} \text{ s}^{-1} = 8.1 \times 10^{18} \text{ eV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

对于高能电子直线加速器和同步加速器, X/γ 射线剂量率根据 Jenkins 公式进行计算^[6-7], 计算公式如下:

$$H_{X\gamma} = 10^{-13} E_0 \left(\frac{\sin \theta}{a+d} \right)^2 \times \left[\frac{\frac{\mu}{133e} \frac{\rho d}{\rho \sin \theta}}{(1-0.98 \cos \theta)^2} + 0.267e \frac{\rho d}{\lambda_1 \sin \theta} \right] (\text{Gy/e}) \quad (3)$$

其中, $H_{X\gamma}$ 为每个电子产生的剂量, Gy/e ; E_0 为入射电子能量, GeV ; θ 为靶与屏蔽体外剂量计算点连线与束流的夹角, $^\circ$ (度), 本文计算时取 90° 方向; a 为靶到屏蔽体内表面的距离, cm , d 为屏蔽体厚度, cm ; Z 为靶原子序数; ρ 为屏蔽材料的密度, g/cm^3 ; μ 为屏蔽材料对光子的衰减系数, cm^{-1} , $\mu = 0.056 \text{ cm}^{-1}$ (混凝土); λ_1 为屏蔽材料对高能中子的吸收长度, g/cm^2 , $\lambda_1 = 120 \text{ g/cm}^2$ (混凝土)。

2 结果

2.1 剂量率和 I 值结果 三种加速器参考点位计算得到的 X/γ 射线剂量率和 I 值见表 1。对于高能电子直线加速器, 本文按照正常运行时均匀损失和调试模式下的集中损失两种情况分别计算。表 1 中给出的是电子直线加速器和同步加速器束流管 30 cm 处的 X/γ 射线剂量率, 其值分别为 5.92×10^{-5} 、 1.85×10^{-6} 和 $2.17 \times 10^{-7} \text{ Gy s}^{-1}$, 对应的 I 值为 4.8×10^{14} 、 1.5×10^{13} 和 $1.8 \times 10^{12} \text{ eV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。对于医用电子直线加速器按照治疗剂量率 600 cGy/min 计算, 表 1 中同时给出了治疗床上方照射野内和治疗床旁 1 m 处的剂量率(考虑散射辐射和泄漏辐射)^[8], 分别为 0.100 和 $2.52 \times 10^{-4} \text{ Gy s}^{-1}$, 对应的 I 值为 8.1×10^{17} 和 $2.1 \times 10^{15} \text{ eV m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

表 1 三种类型加速器运行参数、剂量率和 I 值

加速器类型	工作状态	参考点位	能量/MeV	束流损失/(e/s^{-1})	靶材料	剂量率/(Gy s^{-1})	$I/(\text{eV m}^{-3} \text{s}^{-1})$
直线加速器	集中损失	束流管旁	500	8.00×10^9	铜靶	5.92×10^{-5}	4.8×10^{14}
直线加速器	均匀损失	束流管旁	500	2.50×10^8	铜靶	1.85×10^{-6}	1.5×10^{13}
同步加速器	均匀损失	束流管旁	6000	2.44×10^6	铜靶	2.17×10^{-7}	1.8×10^{12}
医用直线加速器	X射线治疗	照射野内	15	/	/	0.100	8.1×10^{17}
医用直线加速器	X射线治疗	治疗床旁	15	/	/	2.52×10^{-4}	2.1×10^{15}

2.2 臭氧浓度结果 利用表 1 中计算的 I 值、公式(1)和公式(2), 表 2 中给出了三种电子加速器产生的臭氧浓度, 其中高能电子直线加速器和同步加速器运行期间按照 1 次/h 的通风换气次数计算, 医用电子直线加速器机房通风换气次数要求为不小于 4 次/h^[9], 本文按 4 次/h 进行计算。高能电子直线加速器和同步加速器饱和臭氧浓度计算结果为 $2.21 \times 10^{-5} \sim 5.89 \times 10^{-3} \text{ mg/m}^3$; 医用电子直线加速器照射野内和治疗床 1 m 处的臭氧浓度为 0.276 和 $1.05 \times 10^{-4} \text{ mg/m}^3$ 。同时, 表 2 中给出了臭氧的标准限值 $\text{MAC} = 0.3 \text{ mg/m}^3$ ^[10]。

表 2 三种类型加速器产生的臭氧浓度

加速器种类	参考点位	$I/(\text{eV m}^{-3} \text{s}^{-1})$	$g/(\text{eV}^{-1})$	α/s^{-1}	$Q/(\text{m}^3 \text{s}^{-1})$	V/m^3	t/s	$C/(\text{mg/m}^3)$	$\text{MAC}/(\text{mg/m}^3)$
直线加速器	束流管旁	4.8×10^{14}	0.074	2.03×10^{-4}	0.125	450	∞	1.84×10^{-4}	0.3
直线加速器	束流管旁	1.5×10^{13}	0.074	2.03×10^{-4}	0.125	450	∞	5.89×10^{-3}	0.3
同步加速器	束流管旁	1.8×10^{12}	0.074	2.03×10^{-4}	1.31	4700	∞	2.21×10^{-5}	0.3
医用直线加速器	照射野内	8.1×10^{17}	0.074	2.03×10^{-4}	0.444	400	60	2.76×10^{-1}	0.3
医用直线加速器	治疗床旁	2.1×10^{15}	0.074	2.03×10^{-4}	0.444	400	60	7.15×10^{-4}	0.3

- [5] 魏琴, 谢贤宇, 郑森兴, 等. 医院新型放射防护管理实践与体会[J]. 中国辐射卫生, 2019, 28 (2): 179-181, 185.
- [6] 曾运良, 江石丰, 程晋鹏, 等. 惠州市乡镇卫生院放射防护现状调查[J]. 中国辐射卫生, 2015, 24 (4): 333-335.
- [7] 汪莹, 张闻闻, 燕晶, 等. 天津市2014—2016年放射卫生监督行政处罚情况分析[J]. 中国卫生监督杂志, 2017, 24 (5): 458-463.
- [8] 乔淑英, 谢洪彬, 朱素蓉, 等. 卫生计生监督“双随机”原则合理运用的探讨[J]. 中国卫生监督杂志, 2017, 24 (2): 132-135.
- [9] 刘印国, 陶跃华, 沈爱国, 等. 浅议医疗服务机构放射诊疗现状

与思考[J]. 中国辐射卫生, 2016, 25 (1): 35-37.

- [10] 孙鹤霞. 湖北省放射卫生监督员培训现状调查分析[J]. 中国卫生监督杂志, 2014, 21 (6): 522-526.
- [11] 张云, 孙利平, 张菁, 等. “双随机”在卫生计生监督领域的应用探索研究[J]. 中国卫生监督杂志, 2017, 24 (5): 455-458.
- [12] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于改革完善医疗卫生行业综合监管制度的指导意见[J]. 中国卫生监督杂志, 2018, 25 (5): 414-418.

收稿日期: 2019-10-19 责任编辑: 李贞

(上接第 296 页)

3 讨论

本文系统的研究了各种常见电子加速器(高能电子直线加速器、同步加速器和医用电子直线加速器)工作场所内的臭氧浓度。计算结果表明, 在本文给出的常见束流损失情况下高能电子直线加速器、同步加速器产生的饱和臭氧浓度远低于标准限值^[10]。医用电子直线加速器在正常工作条件下, 照射野内的臭氧浓度低于标准限值, 但接近限值, 该结果也说明医用电子直线加速器机房标准中规定的通风换气次数不低于 4 次/h 是合理的^[8]。治疗床旁的臭氧浓度远低于标准限值, 但考虑到有用线束内产生臭氧的扩散, 治疗床的实际测量值预计应高于计算值, 但应明显低于标准限值。由于计算结果是未考虑射线对已产生臭氧分子的破坏而使浓度降级的保守估算, 因此, 总体来讲, 电子加速器在正常工作条件下臭氧的职业病危害是能够实现有效控制。

臭氧浓度计算中 I 值的计算最为关键, 即单位时间单位体积内空气中能量的沉积, 实际工作中可以利用半经验公式计算、蒙特卡略模拟或直接从加速器出束参数中获得。本文使用的计算方法和计算结果对电子加速器中臭氧的职业病危害评价具有重要的参考价值 and 借鉴意义。

参考文献

- [1] 王贻芳. 从bepc到cepc[J]. 现代物理知识, 2018, 30 (5): 62-66.
- [2] 刘冉, 马桥, 廖向东, 等. 四川省调强放射治疗光子线束多叶光栅小野剂量的质量核查结果[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27 (3): 221-223.
- [3] 李东, 刘平, 季芳, 等. 基于蒙特卡洛GEANT4研究某放疗场所的辐射水平分布规律[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27 (4): 413-416.
- [4] National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report 144. Radiation protection for particle accelerator facilities[R]. Bethesda: NCRP. 2003.
- [5] International Atomic Energy Agency. IAEA TRS 188. Radiological safety aspects of the operation of electron linear accelerators[R]. Vienna: IAEA, 1979.
- [6] Jenkins T M. Neutron and photon measurements through concrete from a 15 GeV *Electron* beam on a target—Comparison with models and calculations[J]. Nucl Instruments Methods, 1979, 159 (2/3): 265-288.
- [7] 李夏, 金潇. 某同步辐射光源辐射场特性研究[J]. 中国辐射卫生, 2015, 24 (3): 234-237.
- [8] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 201.2—2011放射治疗机房的辐射屏蔽规范 第2部分: 电子直线加速器放射治疗机房[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [9] 中华人民共和国卫生部. GBZ 126—2011 电子加速器放射治疗防护要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [10] 中华人民共和国卫生部. GBZ 2.1—2019 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分: 化学有害因素[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

收稿日期: 2020-01-11 责任编辑: 李贞