

文章编号: 1671-6612 (2025) 03-328-07

基于 CFD 的医用直线加速器机房通风效率研究

郭文成 闫睿一 康 宁

(中国建筑西南设计研究院有限公司 成都 610041)

【摘 要】 为研究气流组织方式对医用直线加速器机房通风效率的影响, 基于计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法, 采用臭氧作为示踪气体, 对风口位置、换气次数、风口形状等参数进行了模拟分析。结果表明, 风口位置是影响室内臭氧分布和通风效率的主要因素, 在上送下排、对角设置的原则下, 排风口应优先布置于靠近直线加速器治疗头 (臭氧释放源) 的下部, 并与送风口之间形成良好的单向气流。提高换气次数能显著降低室内臭氧浓度, 但换气次数并不等于换气效果, 通风效率相等的情况下, 有利的风口布置条件所需的换气次数更低。风口形状对通风效率也存在一定影响, 本次模拟结果中以长宽比为 4:1 的矩形送风口通风效率最高。

【关键词】 医用直线加速器; 气流组织; 通风效率; 数值模拟

中图分类号 TU834 文献标志码 A

CFD Study on Ventilation Efficiency in Medical Linear Accelerator Rooms

Guo Wencheng Yan Ruiyi Kang Ning

(China Southwest Architecture Design and Research Institute Co., Ltd, Chengdu, 610041)

【Abstract】 A Computational Fluid Dynamics (CFD) approach is employed to investigate the effect of airflow organization on the ventilation efficiency of medical linear accelerator rooms. The vent location, ventilation rate, and vent shape are analyzed numerically using ozone as tracer gas. It is found that the vent location is the primary factor influencing the distribution of ozone and ventilation efficiency within the room. According to the principle of "supply from above and exhaust from below", exhaust outlet is located preferentially near the lower part of the linear accelerator treatment head (the ozone source) and establish a well-defined unidirectional airflow with the air inlet. Increasing the ventilation rate significantly reduces the indoor ozone concentration, but the ventilation rate does not directly correspond to the ventilation efficiency. To achieve equivalent ventilation efficiency, more favorable vent location conditions require fewer ventilation rate. The shapes of the vents also have varying effects on ventilation efficiency, with rectangular air inlets having a length-to-width ratio of 4:1 demonstrating the highest efficiency in this simulation.

【Keywords】 Medical linear accelerator; Airflow organization; Ventilation efficiency; Numerical simulation

0 引言

医用直线加速器是现代放射肿瘤治疗的关键设备之一, 依靠精准的治疗计划和定位系统, 直线加速器产生的高能 X 射线或电子束可准确照射癌细胞, 破坏其 DNA 结构并抑制生长, 最大限度地

保护周围健康组织, 减少治疗过程中的副作用^[1]。然而, 高能射线和电子束会使空气产生电离作用, 产生臭氧 (O_3)、氮氧化物 (NO_x) 等有害气体以及 ^{13}N 、 ^{15}O 等感生放射性气体^[2-4]。其中, 感生放射性气体衰变期较短, 治疗结束后可通过控制人员

作者简介: 郭文成 (1990.09-), 男, 硕士, 工程师, E-mail: 220160017@aa.seu.edu.cn

通讯作者: 康 宁 (1974.01-), 女, 硕士, 正高级工程师, E-mail: 735093691@qq.com

收稿日期: 2024-11-07

进入时间避免伤害。臭氧的产额大概是氮氧化物的三倍以上, 很容易达到人类可以检测到的浓度^[5], 且臭氧具有一定的毒性, 对人体健康威胁较大。设置机械通风系统是降低直线加速器治疗室臭氧浓度的必要手段, 相关计算方法也取得了一些研究成果^[6,7]。但上述研究在考虑机械通风作用时都只是简单代入换气次数, 没有考虑气流组织等因素的影响。

根据我国生态环境部发布的标准规定^[8], 放射治疗室内应采取全排全送的通风方式, 换气次数不少于 4h^{-1} 。因臭氧等有害气体的容重相对空气较大, 风口应按照上送下排、对角设置的原则布置。实际上, 设计换气次数并不能体现房间内的实际通风效果, 风口位置、风口形状及尺寸、风口数量等参数的变化均会对室内通风效率产生影响^[9,10]。因此, 有学者提出应将直线加速器治疗室的通风换气次数提高到 $10\sim 12\text{h}^{-1}$ ^[11-14], 以更有效地处理臭氧等气体的污染。但污染物浓度与换气次数之间没有明显的线性关系, 根据 Cao^[15]等人的研究结果, 当换气次数增大到一定程度时, 室内污染物浓度趋于稳定。同时, 换气次数过大也会导致设备选型过大, 通风管道占用较多建筑空间, 通风系统运行能耗增加等问题。

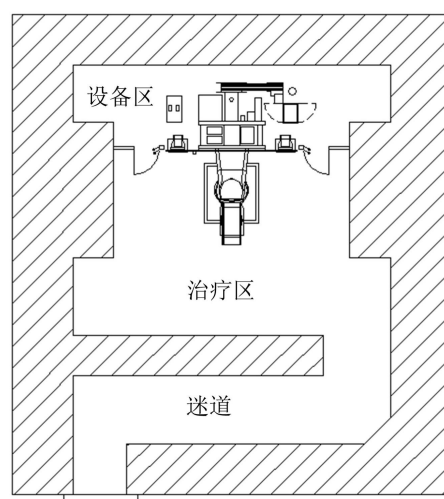
采用合理的气流组织设计, 尽可能降低设计换气次数, 提高通风效率显得尤为重要。徐丽^[16]等人采用数值模拟的手段对三种不同通风方案的室内空气品质进行了研究。Chen^[17]等人利用 CFD 数值模拟手段对送风口的长宽比对室内气流组织及污染物去除效率进行了研究, 结果表明送风口长宽比为 4 时, 形成的气流组织去除污染物的效率最高。李安桂^[18]等人基于 CFD 模拟的方法, 对隔离病房在不同送风模式下的气流组织的有效性进行了研究, 分析了几种通风模式下病房内污染物浓度分布和通风效果, 提出了隔离病房最佳的气流组织形式。

本文将基于以上研究方法和成果, 建立医用直线加速器房间的 CFD 仿真模型, 采用臭氧作为示踪气体, 对不同气流组织方式下的污染物浓度分布和通风效率进行对比分析。

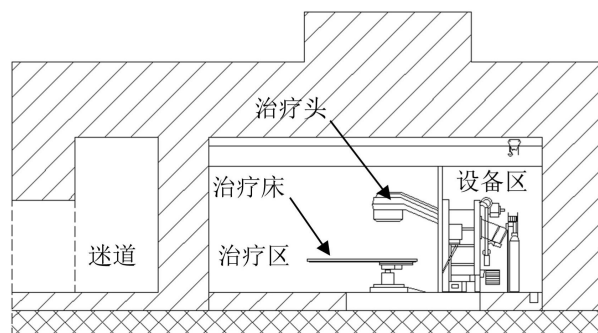
1 直线加速器机房简介

图 1 为某医用直线加速器机房的典型布局, 由

设备区、治疗区以及连接外部空间的 Z 型迷道组成。机房四周均为超厚混凝土墙体, 起到辐射屏蔽和防护的作用。设备区主要布置直线加速器的各类服务系统以及主机机架, 机架用于承载加速器各关键部件如射线发生装置、加速管、线圈组、偏转磁体等。治疗区主要布置治疗头和治疗床, 是医护人员和病人的主要停留区域。放射治疗过程中治疗头照射的高能射线和电子束是产生感生放射性气体和臭氧等污染气体的主要来源。



(a) 平面图



(b) 剖面图

图 1 医用直线加速器机房典型布局

Fig.1 Typical layout of medical linear accelerator room

2 数理模型

2.1 物理模型

图 2 所示为仿真软件中建立的直线加速器机房几何模型。Z 型迷道和治疗区相互连通, 设备区与治疗区之间存在固定隔断, 形成独立空间。本次

模拟将房间整体建模,但主要分析区域为治疗区和 Z 型迷道的连通空间,相关几何参数如表 1 所示。 L_1 为迷道进深, L_2 为治疗区进深, L_3 为设备区进深, W_1 为治疗区宽度, W_2 为房间整体宽度, H 为房间净高, V 表示治疗区的房间容积(含迷道)。此外,图中治疗床的高度为距地 0.75m,治疗头出束口距地高度为 1.75m。送风口设于房间顶部水平安装,排风口设于房间底部垂直安装,底边距地 0.3m。

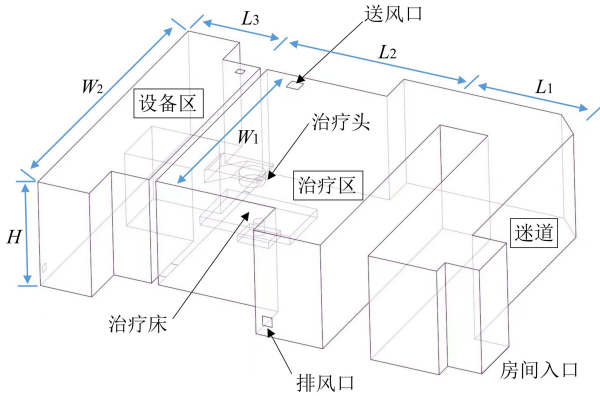


图 2 直线加速器机房几何模型

Fig.2 Geometric model of linear accelerator room

表 1 直线加速器机房的几何参数

Table 1 Geometric parameters of linear accelerator room

L_1/m	L_2/m	L_3/m	W_1/m	W_2/m	H/m	V/m^3
4.4	5.55	2.7	6.55	8.85	3.1	193.5

2.2 数学模型

基于有限体积法进行数值计算,湍流模型采用 RNG (re-normalization group) $k-\varepsilon$ 模型,空气密度基于 Boussinesq 假设来保证计算模型的稳定性。视空气为不可压缩流体,可得其连续性方程和动量方程^[19]。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i u_j) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \cdot (u_i)) + S_i \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; μ_i, μ_j ($i, j=1, 2, 3$) 为 x, y, z 三个方向的流速, m/s ; t 为时间; p 为空气压力, Pa ; μ 为动力黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; S_i 为动量源项,如重力、浮力等。

采用组分运输方程计算臭氧污染物的扩散,表达式如式(3)所示:

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_i Y_i) = \nabla \cdot (D \nabla \cdot (\rho Y_i)) + S_i \quad (3)$$

式中: Y_i 为污染物所占的质量分数; D 为有效扩散系数。

2.3 边界条件

根据直线加速器机房的环境要求,设置参考压力和环境温度分别为 1atm 和 25℃。送风口按照速度入口设置,风速保持在 2m/s,以确保人员舒适区的风速在 0.2m/s 左右;排风口则按照压力出口设定,风口相对位置根据不同的研究工况确定。

将直线加速器的治疗头出束口作为臭氧释放源,其发生量按照式(4)计算^[6]:

$$P = 45dIG \quad (4)$$

式中: P 为单位时间电子束产生臭氧的质量, mg/h ; d 为电子束在空气中的行程, cm ,医用电子束行程一般取 40cm; I 为电子束流强度, mA ,本文参考医科达公司某型直线加速器取 2mA; G 为空气吸收 100eV 辐射能量产生的臭氧分子数,保守值取 10。计算得到臭氧发生量为 36000mg/h。由于各医疗设备供应商的工艺不同,治疗过程中的设备运行时间也存在不确定性。因此,本文中臭氧仅作为示踪气体用于模拟各类气流组织的通风效果,不作浓度是否超限的依据和讨论。

2.4 网格划分与无关性验证

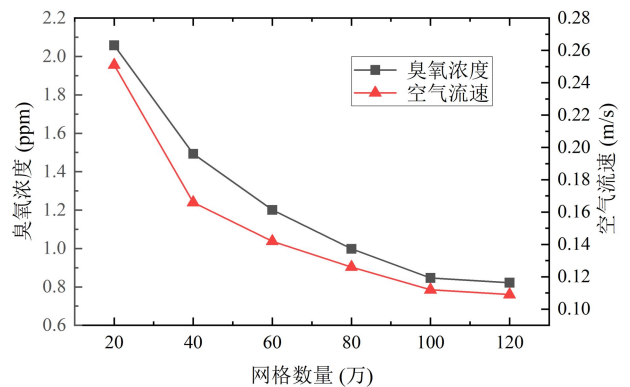


图 3 网格无关性验证

Fig.3 Grid independence verification

模拟过程中使用非结构化网格对直线加速器机房区域进行网格划分,同时对壁面、风口等处进行了网格局部加密。选取网格数量分别为 20 万、40 万、60 万、80 万、100 万和 120 万进行网格无关性验证,采集直线加速器治疗头下部距地 0.8m

处的臭氧浓度和空气流速数据进行对比。结果如图 3 所示, 随着网格数量的增加, 臭氧浓度和送风速度模拟数值逐渐趋于收敛, 当网格数量为 100 万和 120 万时, 两类数据模拟结果之间的差值均在 2% 左右, 计算结果较为准确。为同时兼顾计算效率, 本文研究采用 100 万的网格进行计算。

2.5 通风效率评价指标

采用通风效率指标来评价各种模拟工况下的对污染物的排除效果, 如式 (5) 所示^[9]:

$$\eta = \frac{c_e - c_s}{c - c_s} \quad (5)$$

式中: η 为通风效率; c_e 为排风口处的污染物浓度; c_s 为送风口处的污染物浓度; c 为房间内污染物的平均浓度。通风效率越大表示排除污染物的能力越强, 它不仅和气流组织本身的特性, 如风量、风口位置、送风速度、房间的几何形状等有关, 还与污染源的发散强度、位置等因素有关, 是目前广

泛使用的评价指标之一。

3 结果分析与讨论

3.1 风口位置

直线加速器治疗区风口位置设计的基本原则是上送下排, 对角布置, 这也在很多项目设计中得以应用。图 4 所示为三种不同的风口布置方式以及对应的臭氧浓度分布云图, 高度距地 0.8m, 约等于病人躺于治疗床上的呼吸高度。风口布置 (a) 排风口位于迷道入口底部, 送风口位于对侧天花顶部; 布置 (b) 排风口位于治疗区内侧靠下底部, 送风口位于对侧天花顶部; 布置 (c) 排风口位于靠近直线加速器治疗头的底部, 送风口位于对侧天花顶部 (迷道入口)。送风口的高度均为 3.1m, 排风口均为底边距地 0.3m。房间设计换气次数 n 取 4h^{-1} , 送风量为 $850\text{m}^3/\text{h}$, 送风口尺寸为 $344\text{mm} \times 344\text{mm}$, 排风口尺寸为 $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ 。

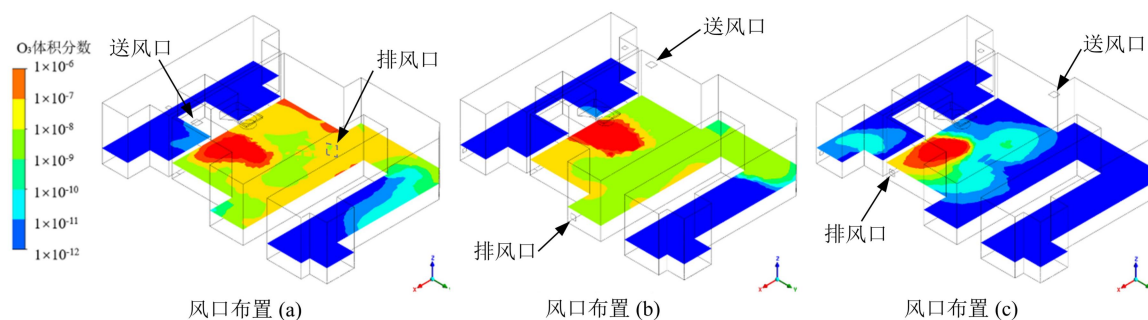


图 4 风口布置示意图及臭氧浓度分布云图

Fig.4 Schematic diagram of vent layout and cloud diagram of ozone concentration distribution

图 4 中可见臭氧分布基本以直线加速器治疗头为中心向外扩散, 风口布置 (a) 和 (b) 甚至有部分臭氧扩散至迷道, 而风口布置 (c) 则没有此现象, 大部分臭氧从治疗头产生后通过邻近的下排风口排出。从行动流线上看, 医护人员和病人停留的区域主要集中在治疗区靠近迷道的一侧, 因此风口布置 (c) 更有利于保护医护人员。

表 2 所示为三种风口布置的臭氧浓度值和通风效率, 新风入口处的臭氧浓度假定为 0。室内臭氧平均浓度由高至低分别为 (a)、(b)、(c)。其中布置 (a) 的平均浓度是布置 (c) 的 5 倍, 是布置 (b) 的 2.4 倍。同时, 布置 (a) 的通风效率也是最低的, 只有 1.156, 小于布置 (b) 的 1.529 和布置 (c) 的 3.496。三种布置方式以布置 (c)

的气流组织效果最佳, 在设计中应予以优先考虑。

表 2 不同风口布置下的通风效率对比

Table 2 Comparison of ventilation efficiency with different vent layouts

风口布置	臭氧平均浓度 c/ppm	排风口臭氧浓度 c_e/ppm	通风效率 η
(a)	0.411	0.475	1.156
(b)	0.170	0.276	1.624
(c)	0.0821	0.287	3.496

3.2 换气次数

提高换气次数是降低房间的臭氧浓度的有效措施, 在 3.1 节风口布置 (b) 和布置 (c) 的基础上, 分别提高换气次数 n 至 8h^{-1} 和 12h^{-1} 进行模拟。对应送风量分别为 $1700\text{m}^3/\text{h}$ 和 $2550\text{m}^3/\text{h}$, 送风口

尺寸分别为 $486\text{mm} \times 486\text{mm}$ 和 $595\text{mm} \times 595\text{mm}$, 送风速度仍保持 2m/s ; 排风口尺寸分别为 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ 和 $490\text{mm} \times 490\text{mm}$ 。

图 5 所示为不同换气次数时的臭氧分布云图。随着换气次数的增加, 臭氧扩散的范围均呈缩小的趋势, 室内臭氧的平均浓度也明显减小。图 6 为通风效率对比, 随着换气次数的增加, 两种风口布置的通风效率均明显提高。但布置 (c) 在换气次数 4h^{-1} 和 8h^{-1} 时的通风效率分别与布置 (b) 在换气次

数 8h^{-1} 和 12h^{-1} 时的通风效率相近。这个结果说明合理的风口布置是影响通风效率的主要因素。相同的通风效率下, 有利的风口布置所需的换气次数更低。在保证室内臭氧浓度不超标的前提下, 排风口应尽量布置于靠近污染物 (即直线加速器治疗头) 的底部, 并与送风口之间形成良好的单向气流。通过良好的气流组织设计降低设计换气次数, 以减少通风系统的设计容量和运行能耗。

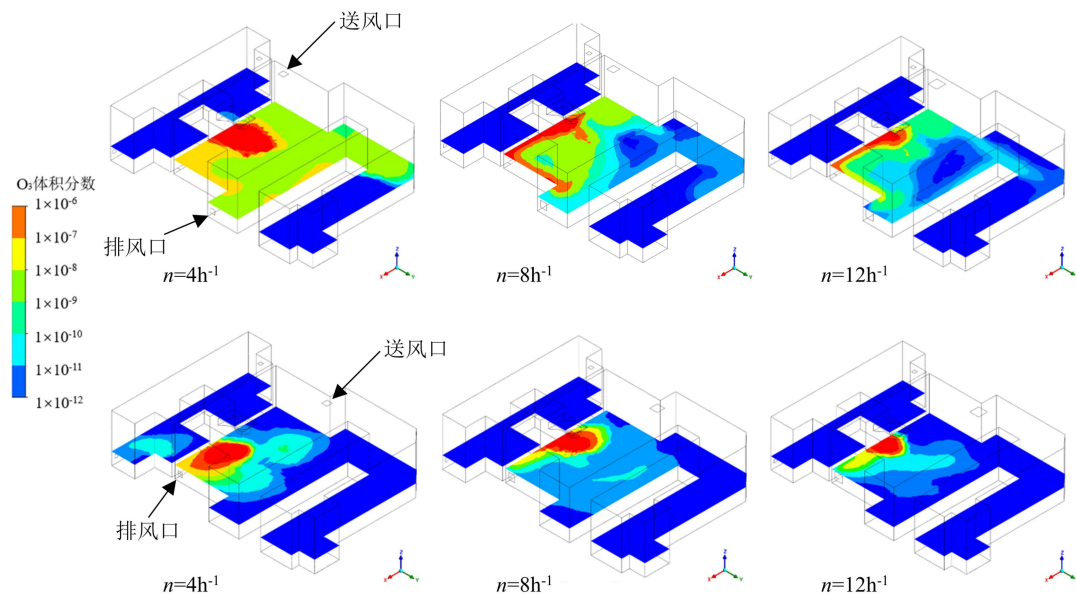


图 5 不同换气次数下的臭氧分布云图

Fig.5 Cloud diagram of ozone distribution with different ventilation rates

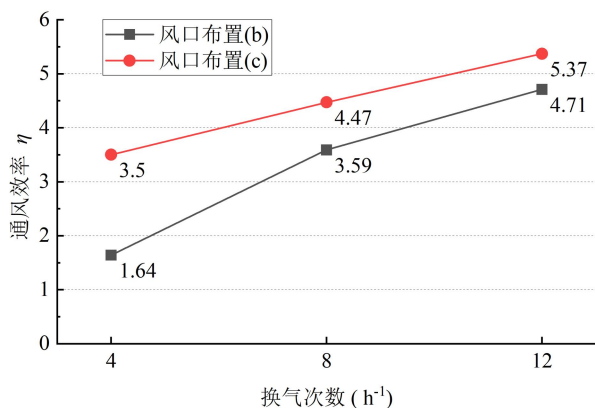


图 6 不同换气次数时的通风效率对比

Fig.6 Comparison of ventilation efficiency with different ventilation rates

3.3 风口形状

送风气流的流态与送风口的形状有关, 进而可能影响室内的通风效果^[17]。本节基于风口布置 (c),

对风口形状分别为圆形、正方形、长宽比分别为 2:1 矩形和 4:1 矩形等四种风口形状的通风效果进行模拟。风口风量、尺寸和当量直径如表 3 所示, 换气次数按 4h^{-1} , 风口风速均为 2m/s 。

表 3 不同形状风口的设计参数

Table 3 Design parameters of vents with different shapes

风口形状	风量/(m³/h)	风口尺/mm	当量直/mm
圆形	850	$d=388$	388
正方形	850	344×344	344
2:1 矩形	850	486×243	324
4:1 矩形	850	688×172	275

图 7 所示为不同风口形状的臭氧分布云图, 正方形风口云图见图 4 风口布置 (c)。对比可见四种工况下臭氧释放中心区域的浓度大致相等, 但圆形风口和正方形风口的臭氧扩散范围稍大于 2:1 矩

形和 4:1 矩形风口, 后两者之间的差距并不明显。四种风口的计算通风效率依次为 3.47、3.50、3.55 和 3.57, 随着风口当量直径的减小, 通风效率有不断增加的趋势。原因在于当量直径越小, 雷诺数越低, 送风出口处气流越接近于层流状态, 有利于室内形成稳定的送风气流, 提高了污染物的去除效率。本案例中送风口的尺寸相对房间整体容积较小, 于房间内产生的气流扰动影响范围较小, 故最

终的通风效率影响效果不明显。当风口尺寸或送风量较大时, 应重点关注风口形状的选择对室内污染物的排除效果。同时应注意送风口的方向与排风口的方向相结合, 使室内污染源处于送风和排风气流之间。此外, 本文模拟过程中的风口均为简单开口, 实际设计时还需考虑末端风口的形式, 例如选择可调角度的条形百叶风口或矢量风口等, 以创造更好的气流组织条件。

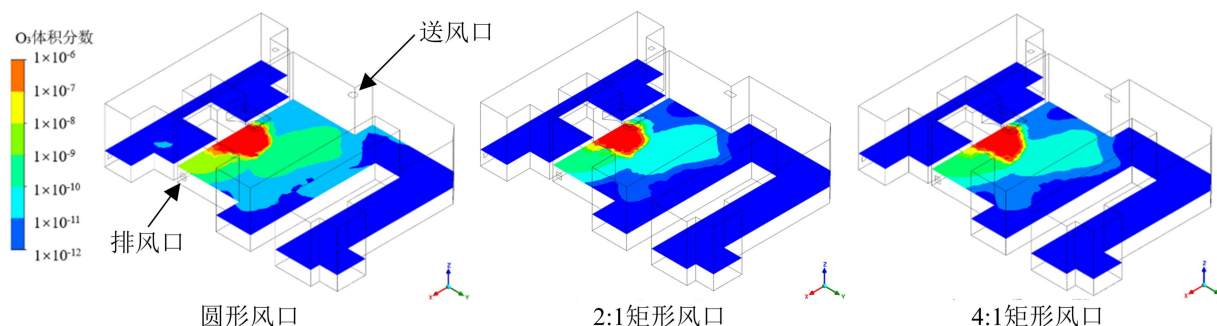


图 7 不同风口形状时的臭氧分布云图

Fig.7 Cloud diagram of ozone distribution with different vent shapes

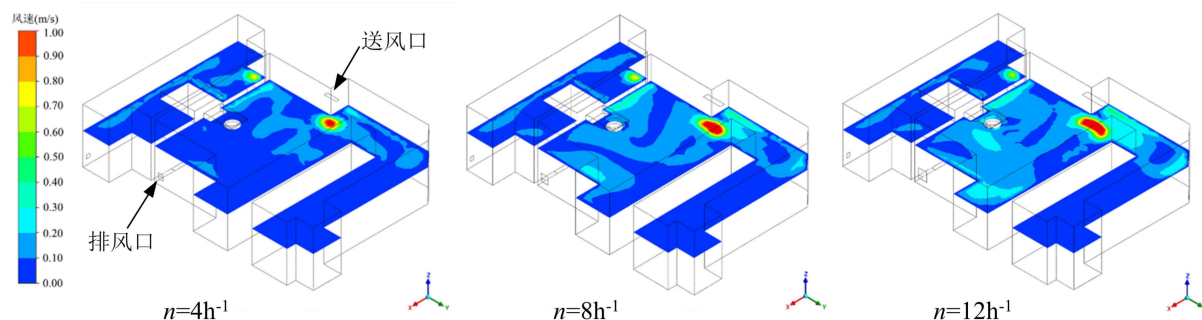


图 8 人员舒适区的送风速度分布云图

Fig.8 Cloud diagram of air velocity distribution in personnel comfort zone

3.4 人员舒适区送风速度分析

根据规范要求, 人员长期停留区域(人员舒适区)的送风速度宜在 0.2m/s 左右, 且不宜大于 0.3m/s^[20]。本节基于前述讨论的推荐气流组织方案, 即风口布置采用图 4 方案(c), 风口形状采用 4:1 矩形风口进行送风速度模拟。换气次数为 4h⁻¹、8h⁻¹、12h⁻¹ 时的风口尺寸依次扩大, 以保证送风速度均为 2m/s, 分布云图切面取距地 1.8m 高处, 结果如图 8 所示。三种换气次数下, 包括直线加速器治疗床所属区域内的送风速度基本在 0.1~0.2m/s 左右, 随着换气次数的增加, 0.2~0.3m/s 的分布范围逐渐显现, 但均未超过 0.3m/s。送风口

正下方存在送风速度的峰值, 约 0.6~0.9m/s, 但影响范围不大且该部位处于迷道, 不属于人员长期停留区域。因此, 采用本文推荐的气流组织方案, 直线加速器机房的通风效率和人员舒适性均可得到有效的保障。

4 结论

医用直线加速器机房的空气品质一直是医疗工作者、设计师等相关从业者关注的重点, 通风系统设计也是辐射环评和职业病危害评价的主要内容之一。本文基于 CFD 计算流体力学方法建立了典型医用直线加速器机房的仿真模型, 采用臭氧作

为示踪气体,对风口位置、换气次数、风口形状等参数对通风效率的影响进行了研究。结果表明,在满足上送下排,对角设置的基本原则下,送风口设于迷道入口顶部,排风口位于靠近直线加速器治疗头底部时的通风效率最高。通过提高设计换气次数可以显著降低室内臭氧的平均浓度,提高通风效率。但是同样的通风效率时,相对有利的风口布置需要的换气次数更低。如本文 3.2 节风口布置 (c) 在换气次数 4h^{-1} 和 8h^{-1} 时的通风效率和风口布置 (b) 在换气次数 8h^{-1} 和 12h^{-1} 时的通风效率相差无几。换气次数过大会导致系统选型过大,风管安装空间增加,系统运行能耗增加等问题。合理的风口形状也是影响通风效率的因素之一。本文模拟结果显示,狭长的矩形送风口和排风口之间更有利于形成稳定的单向气流,使污染物的去除效率更高。上述结论可为将来类似项目的通风气流组织设计提供参考。

参考文献:

- [1] Greene D, Williams P C. Linear Accelerators for Radiation Therapy [M]. 2nd Edition. Boca Raton. CRC Press, 2017.
- [2] Holloway A F, Cormack D V. Radioactive and Toxic Gas Production by a Medical Electron Linear Accelerator [J]. Health Physics, 1980,38(4):673-677.
- [3] 张震,李玉文,陈飞,等.三种电子加速器产生的臭氧危害分析[J].中国辐射卫生,2020,29(3):295-296.
- [4] 鲁旭尉,李忠伟,曾德高,等.医用电子直线加速器的有害气体的危害及防护[J].工业卫生与职业病,2015,41(4):317-319.
- [5] Cain WS, Schmidt R, Wolkoff P. Olfactory Detection of Ozone and D-limonene: Reactants in Indoor Spaces [J]. Indoor Air. 2007,17(5):337-347.
- [6] D'errico F. NCRP Report No.144—Radiation Protection for Particle Accelerator Facilities [M]. National Council on Radiation Protection and Measurements. Bethesda, Maryland. Oxford University Press, 2005.
- [7] HJ 979-2018,电子加速器辐照装置辐射安全和防护[S].北京:中国环境出版社,2018.
- [8] HJ 1198-2021,放射治疗辐射安全与防护要求[S].北京:中国环境出版社,2021.
- [9] Sandberg M. What is Ventilation Efficiency? [J]. Building and Environment, 1981,16(2):123-135.
- [10] 罗志文,赵加宁.改进的通风性能评价指标—实际新风换气次数[J].哈尔滨工业大学学报,2007,(6):912-915.
- [11] 刘可以.综合医院建筑医技类用房的暖通空调专业设计要点[J].暖通空调,2022,52(S1):430-435.
- [12] 牙侯专.重庆市江津区中心医院放射治疗中心空调通风设计探讨[J].制冷与空调,2020,34(4):485-488.
- [13] 赵忠梁.某医用直线加速器机房的空调及通风设计[J].建筑节能,2020,48(8):91-93.
- [14] 杨军,宋锐,乌日利嘎,等.MV 级医用电子直线加速器机房空调及通风设计的一些标准分析与研究[J].中国标准化,2017(18):12-13.
- [15] Cao S J, Zhu D H, Yang Y B. Associated Relationship between Ventilation Rates and Indoor Air Quality [J]. Rsc Advances, 2016,6(112):111427-111435.
- [16] 徐丽,翁培奋,孙为民.三种通风方式下的室内气流组织和室内空气品质的数值分析[J].空气动力学报,2003,21(3):311-319.
- [17] Chen T, Feng Z, Cao S J. The Effect of Vent Inlet Aspect Ratio and Its Location on Ventilation Efficiency[J].Indoor and Built Environment, 2020,29(2): 180-195.
- [18] 李安桂,张莹,韩欧,等.隔离病房的环境保障与气流组织有效性[J].暖通空调,2020,50(6):26-34.
- [19] ANSYS Fluent. ANSYS Fluent Theory Guide 2022R1 [M]. ANSYS Inc. Canonsburg, Pennsylvania, USA, 2022.
- [20] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.