

粒子源水吸收剂量绝对测量装置内部 电场模拟

杭仲斌¹ 刘蕴韬¹ 宋明哲¹ 魏可新¹ 王红玉¹ 刘川凤² 滕忠斌¹ 耿璇¹

1(中国原子能科学研究院 计量与校准技术重点实验室 北京 102413)

2(中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要 拟研制 ¹²⁵I 粒子源水吸收剂量绝对测量电离室,通过 Maxwell 软件建立电离室内部模型,模拟得出电离室无保护极、不同保护极环宽度,不同绝缘环宽度、不同栅极个数、不同栅极形状和不同栅极厚度下的电场强度分布,并进行了定性和定量的分析。结果表明:绝缘环宽度的增加会使收集极边缘处的边缘效应增强,应尽量使绝缘环宽度减小;在设计电离室时,应当使保护极宽度和收集极半径比值不低于 2。当栅极个数为 15 个时,电场强度的变化幅度可减少为 1% 左右,表明通过增加栅极个数能有效改善电场的均匀性。相较于栅极截面为圆形和三角形,当栅极截面为矩形时,电场强度的变化幅度较小。栅极厚度越大,栅极边缘处的边缘效应越严重,应尽量减少栅极厚度。本次研究结果将为后续粒子源水吸收剂量绝对测量标准装置的优化设计提供支撑。

关键词 电场模拟, 有限元法, 粒子源, 外推电离室

中图分类号 TL 84

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.010404

Simulation of internal electric field of particle source water absorbed dose absolute measurement device

HANG Zhongbin¹ LIU Yuntao¹ SONG Mingzhe¹ WEI Kexin¹ WANG Hongyu¹
LIU Chuanfeng² TENG Zhongbin¹ GENG Xuan¹

1(Key Laboratory of Measurement and Calibration Technology, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

2(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract [Background] The physical quantity concerned in the clinical application of ¹²⁵I particle source brachytherapy is the 1 cm water absorbed dose rate $\dot{D}_{w,1\text{cm}}$. However, there is no corresponding standard for this physical quantity in China. It is planned to develop an ionization chamber for the absolute measurement of the water absorbed dose rate of the ¹²⁵I particle source as a standard device, hence the internal electric field of the ionization chamber must first be analyzed to obtain the most reasonable design scheme to satisfy the condition that the electric field intensity is uniformly distributed in the ionization chamber. [Purpose] This study aims to simulate the internal electric field of the ionization chamber for the design of particle source water absorbed dose absolute measurement device. [Methods] Firstly, the internal model of the ionization chamber was established by Maxwell software to simulate the distribution of electric field intensity under the six variables of the ionization chamber: with or without a protective electrode, different protective electrode ring width, different insulation ring width, different grid number, different grid shape and different grid thickness. Then, qualitative and quantitative analysis were carried out using finite element method. Finally, the influence of different variables on the distribution of electric field intensity in the

第一作者: 杭仲斌, 男, 1993 年出生, 2021 年于东华理工大学获硕士学位, 现为博士研究生, 研究领域为电离辐射剂量学

通信作者: 宋明哲, E-mail: mzsong2009@sina.com

收稿日期: 2023-04-16, 修回日期: 2023-07-29

First author: HANG Zhongbin, male, born in 1993, graduated from East China University of Technology with a master's degree in 2021, doctoral student, focusing on ionizing radiation dosimetry

Corresponding author: SONG Mingzhe, E-mail: mzsong2009@sina.com

Received date: 2023-04-16, revised date: 2023-07-29

ionization chamber of the absolute measurement of water absorbed dose of ^{125}I particle source was obtained. **[Results]** Analysis results show the ratio of the width of the guard electrode to the radius of the collector electrode must be not less than 2 for design of the ionization chamber. The edge effect at the edge of the collector is increased with width increment of the insulator ring, hence the width of the insulator ring should be reduced as much as possible. When the number of grid electrodes is 15, the variation of the electric field intensity can be reduced to about 1%. When the grid section is rectangular, the variation in electric field intensity is small compared with the circular and triangular grid sections. The larger the thickness of the grid, the more severe the edge effect at the edge of the grid, and the thickness of the grid should be reduced as much as possible. **[Conclusions]** The uniformity of the electric field can be effectively improved by increasing the number of grid electrodes. Results of this study is helpful to optimal design of the standard device for measuring the absolute water absorbed dose of ^{125}I particle source.

Key words Electric field simulation, Finite element analysis, Particle source, Extrapolation ionization chamber

TG 43-U1 报告是由美国医学物理学家协会 (American Association of Physicists in Medicine, AAPM) 于 2004 年发布, 主要针对近距离治疗放射源相关剂量计算和评估, 用于肿瘤治疗过程根据患者情况制定治疗计划系统 (Treatment Planning System, TPS), 以保障放射治疗的最优化^[1]。ICRU72 报告则是国际辐射单位和测量委员会 (International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU) 于 2004 年发布, 主要针对不同种类近距离放射源产生的 β 射线和低能光子的剂量测定^[2]。以上两个标准是医学物理学研究中非常重要的参考资料, 对于近距离放射治疗剂量计算与评估都有非常重要的指导意义。根据 TG 43-U1 和 ICRU72 报告, 近距离治疗临床应用中关注的物理量为 1 cm 水吸收剂量率 $\dot{D}_{w,1\text{cm}}$ 。但迄今为止, 在低能低剂量率近距离放射源剂量测定中, 仅有三个国家研建了水吸收剂量标准装置^[3-5]。目前, 确定近距离放射源治疗过程中传递至患者的吸收剂量的计算方法是基于空气比释动能初级标准转换的间接法^[6-7], 而基于空气比释动能标准获得的水吸收剂量的剂量数值不确定度大于国际原子能机构 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 剂量测量协议 (TRS 398)^[8] 建议的限值 (根据该协议, 传递到目标体积的吸收剂量的不确定度应当小于 5% ($k=1$))。针对这个问题, 2008 年至 2011 年, 在欧盟委员会第七框架计划 (European Commission in the Seventh Framework Programme) 的支持下, 已有三家计量协会机构建立了粒子源水吸收剂量绝对测量标准, 且都是基于电离法, 实现了 1 cm 水吸收剂量率 $\dot{D}_{w,1\text{cm}}$ 绝对测量^[1,9-10]。

参考国外已开展的水吸收剂量绝对测量标准装置技术能力, 拟研建专用外推电离室实现 ^{125}I 粒子源水吸收剂量绝对测量, 测量原理如下: 在带电粒子平衡条件下, 通过测量在体积内产生的次级电离电荷,

电离电荷在电场作用下分别向收集极和高压极运动, 运动过程中产生的感应电荷经静电计进行收集。然而, 内部电场的扭曲会影响电离电荷的运动, 对测量信号产生影响, 因此有必要对电离室内部电场分布进行研究, 以保证其电场分布的均匀性。查阅文献可知, 国内外多选用有限元分析法来进行各类型的电离室的内部电场分析^[11-14]。根据这一思路, 本文也使用有限元分析法, 通过添加保护极、改变保护环宽度, 改变绝缘环宽度等方法研究电场均匀性。利用模拟结果优化电离室的结构设计, 为后续电离室的搭建提供帮助。

1 近距离治疗粒子源水吸收剂量绝对测量电离室

近距离治疗粒子源水吸收剂量绝对测量电离室结构如图 1 所示。电离室整体形状为圆柱体, 测量时, 粒子源位于光阑前端, 前端外壳起屏蔽作用, 用于排除外界射线的干扰; 高压极为 10 mm 厚水等效材料, 并涂有高纯度石墨, 背板由一块约 200 mm 厚度的水等效材料构成, 在背板前表面粘贴一块涂有石墨的聚乙烯箔, 用于构建收集极和保护极, 收集极和保护极通过蚀刻得出一定宽度的圆形绝缘环, 绝缘环将收集极和保护电极进行分离, 保护极的设置有助于提高测量体积内部电场的均匀性。高压极与收集极之间的区域为灵敏体积。栅极材料选择无氧铜, 结构为圆环结构, 内径设计大于保护极外边缘, 可保证保护极向着高压极前后移动, 以改变有效测量体积。栅极从高压极位置开始排列, 直到保护极, 栅极之间用绝缘的支架支撑, 同时保证栅极之间的间距相等。使用高压电源给电离室高压极和栅极供高压, 收集极接后续电离电流测量系统, 收集极与保护极等势。本次模拟只关注高压极和收集极之间区域的电场强度影响因素。

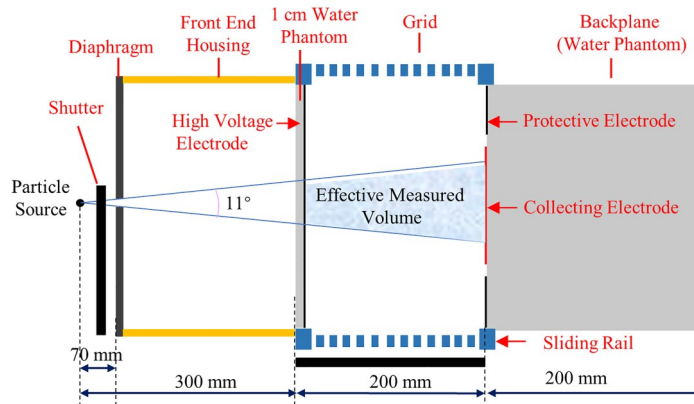


图1 近距离粒子源水吸收剂量绝对测量电离室结构图

Fig.1 Structure diagram of the short-range particle source water absorbed dose absolute measurement ionization chamber

2 静电场模型的建立

2.1 Ansoft Maxwell软件介绍

Ansoft Maxwell 软件是一款专门用于模拟静电场、静磁场和瞬态场的软件,利用有限元法^[15-16]将所要求解的边值问题转化为相应的变分问题,再利用对场域的网格剖分离散和在单元上对场函数的插值近似,将变分问题转化为普通多元函数的极值问题,最终归结为一个代数方程组,求解之后即可得到待求边值问题的数值解。模拟过程主要包括三维模型的建立,添加材料,设置边界条件和激励,设置网格参数,设置计算参数,设置求解参数,求解和数据后

处理等^[17]。

2.2 电离室内部静电场模拟计算

首先分别对电离室的内部结构尺寸、材料以及边界条件等进行设置,为了提高模拟效率,根据电离室内部结构呈轴对称的特征,将3D模型进行简化成2D模型,当收集极边缘位置处电场均匀,则表示整个收集极内部电场均匀,所以在收集极边缘位置添加一条辅助线,垂直于收集极和高压极平面,长度与极板间距相同,起点为收集极边缘,终点为高压极平面,用于计算不同条件下沿着辅助线的电场变化,如图2所示。

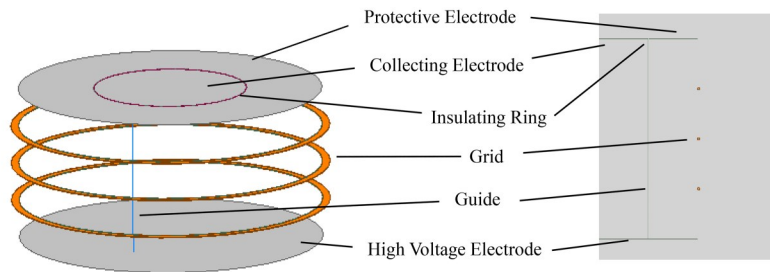


图2 Maxwell软件下的电离室内部结构

Fig.2 Internal structure of the ionization chamber under Maxwell software

电离室在实际使用中,极板间距和高压大小需同步调整,以保持内部电场强度稳定。模拟时不考虑极板间距变化的情况,保持极板间距为200 mm,高压极施加2 kV电压、收集极电压为0 V时,在不考虑边缘效应的影响时,平行极板内部电场强度理论值应为 $E=U/d=10 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 。模拟过程中保持不变的参数如表1所示。

表1 部分模拟参数
Table 1 Partial simulation parameters

不变量项目 Invariant	参数 Parameter
收集极厚度 Collector thickness	0.01 mm
高压极厚度 Thickness of high-voltage electrode	0.01 mm
两极板间距 Distance between two plates	200 mm
收集极半径 Radius of collecting electrode	50 mm
高压极半径 Radius of high-voltage electrode	100 mm
保护极外径 Outer diameter of protective electrode	100 mm
高压极电压 High voltage electrode voltage	2 kV
收集极电压 Collector voltage	0 V

3 结果与讨论

3.1 有无保护极

电离室内部电场简单来看只需高压极和收集极就能构建,然而由于边缘效应,会使电离室内部电场

弯曲,此时电离室保护极的设置是非常有必要的。设置收集极半径为 50 mm,绝缘环宽度为 1 mm,收集极宽度为 49 mm,模拟结果如图 3 所示。为了更清晰看出电场强度变化与距离的关系,对沿着辅助线的场强数据做对数处理,得到电场强度对数与极板间距的关系(收集极位置为 0 mm),如图 4 所示。

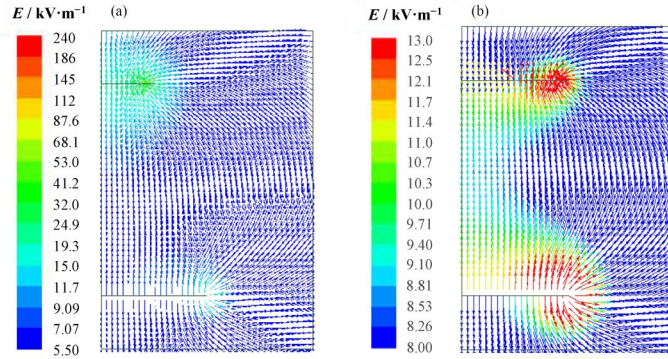


图3 有无保护环的电场图 (a) 未加保护极, (b) 加保护极
Fig.3 Electric field diagram with and without guard ring
(a) Without protective electrode, (b) With protective electrode

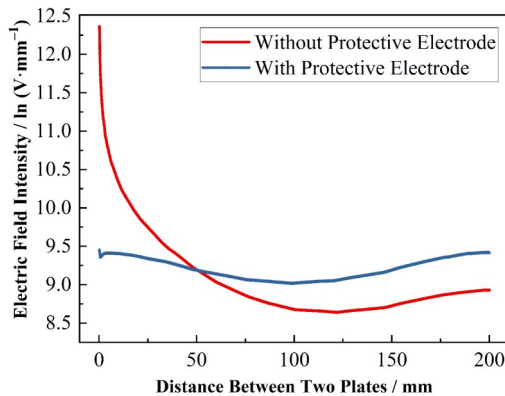


图4 有无保护极时电场变化
Fig.4 Variation of electric field change with or without protective electrode

根据图 3 和图 4 所知,仅有高压极和收集极结构下的电场分布是非均匀的,加保护环之后电场均匀

性更好,并且收集极边缘效应减少。当无保护极的情况下,由边缘效应引起的电场强度可达理论场强的近 25 倍,在加保护极的情况下,电场强度变化保持在 8.2~12.7 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$,相较于未加保护极时 5~240 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 的情况,电场分布的均匀性得到明显改善。

3.2 保护极宽度

研究保护极环宽对电场均匀性的影响,将收集极的半径设为 50 mm、绝缘环宽度 1 mm、高压极半径为 100 mm 不变,保护极的环宽依次设置为 9 mm, 29 mm、49 mm、69 mm、89 mm 和 109 mm,与收集极半径对应的比例为 0.18、0.58、0.98、1.38、1.78、2.18,模拟结果如图 5 所示,图 6 为沿着辅助线的场强变化(收集极位置为 0 mm)。

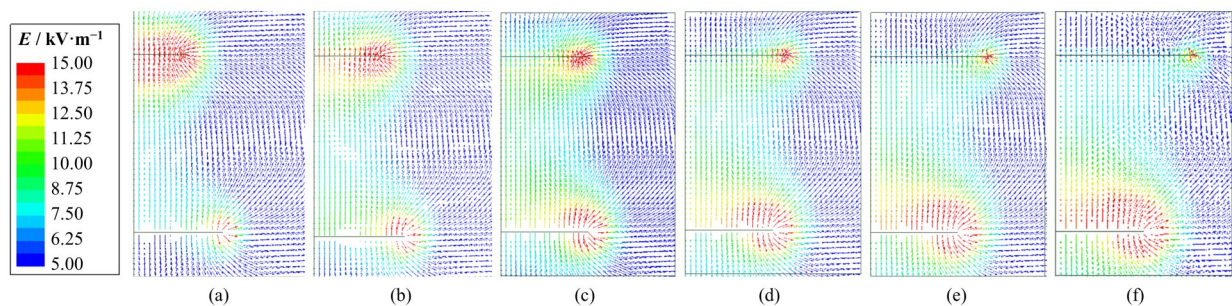


图5 不同保护极宽度的电场图(高压极不变)
(a) 9 mm, (b) 29 mm, (c) 49 mm, (d) 69 mm, (e) 89 mm, (f) 109 mm
Fig.5 Electric field diagrams of different guard electrode widths (high voltage electrode remains unchanged)
(a) 9 mm, (b) 29 mm, (c) 49 mm, (d) 69 mm, (e) 89 mm, (f) 109 mm

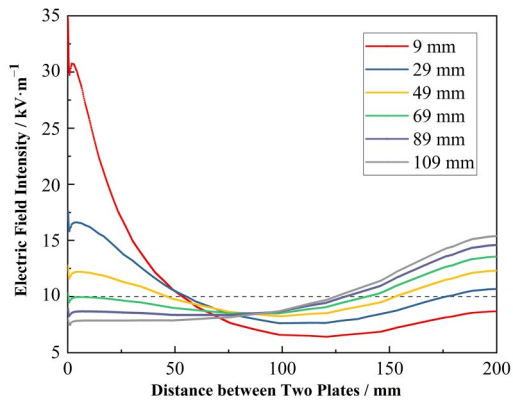


图6 高压极不变时不同保护极宽度的电场变化 (彩图见网页版)

Fig.6 Electric field changes with different guard electrode widths under invariant high voltage electrodes (color online)

根据图5和图6所知,随着保护极外径的增加,保护极两侧的边缘效应越来越小,但是高压极边缘的边缘效应越来越大,沿着辅助线的电场变化,保护极外径越大,在收集极端的电场强度逐渐减少,高压极端的电场强度逐渐增大,显然这种结构的电场强度达不到一种很好的平衡。在靠近极板间距0 mm位置处,电场强度出现骤降的现象,这是由于收集极的边缘效应所引起的,在后续的模拟中,由于辅助线位置不变,所以均会出现类似的现象。

故设计高压极半径保持和保护极外径保持相同尺寸,环宽变化和上述相同,模拟结果如图7所示,图8为沿着辅助线的场强变化(收集极位置为0 mm)。

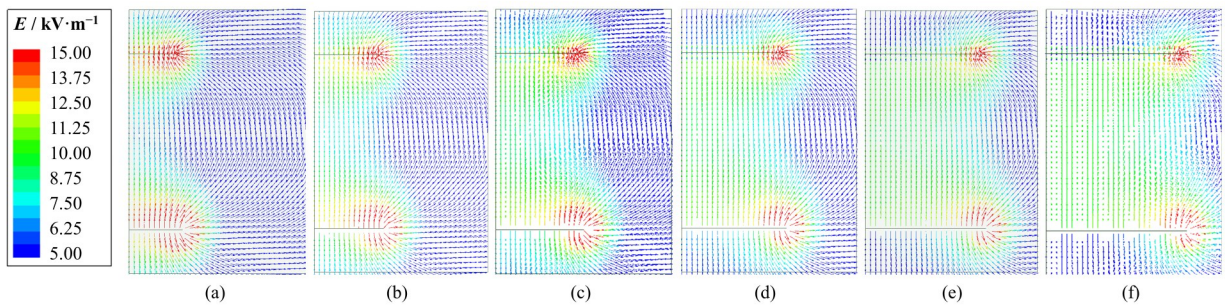


图7 不同保护极宽度的电场图(高压极保持和保护极外径相同)
(a) 9 mm, (b) 29 mm, (c) 49 mm, (d) 69 mm, (e) 89 mm, (f) 109 mm

Fig.7 Electric field diagrams of different guard electrode widths (high voltage electrode keeps the same outer diameter as guard electrode) (a) 9 mm, (b) 29 mm, (c) 49 mm, (d) 69 mm, (e) 89 mm, (f) 109 mm

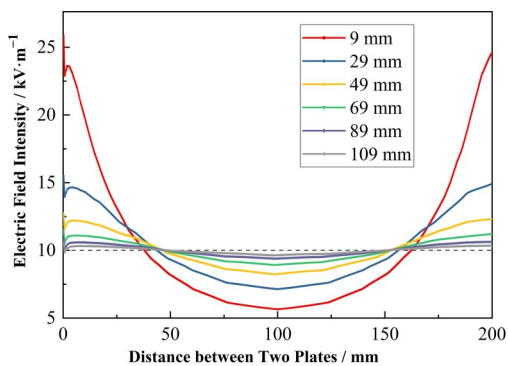


图8 高压极保持和保护极外径相同时不同保护极宽度的电场变化(彩图见网页版)

Fig.8 Electric field changes with different guard electrode widths while high voltage electrode keeps the same outer diameter as the guard electrode (color online)

根据图7和图8所知,随着保护极外径的增加,当保护极环宽度大于收集极半径时,场强变化越小;保持高压极半径随保护环外径保持一致的情况下,保护极环宽与收集极半径对应比例为0.18、0.58、0.98、1.38、1.78、2.18,其分别对应的电场变化范围分别是5.7~25.9 kV·m⁻¹、7.1~15.5 kV·m⁻¹、8.2~

12.8 kV·m⁻¹、8.9~11.5 kV·m⁻¹、9.4~10.9 kV·m⁻¹、9.6~10.6 kV·m⁻¹。

在高压极保持和保护极外径相同尺寸的情况下,保护极的环宽与收集极半径比值越大,电场强度越接近理论值且电场强度变化幅度越小,因此,外推电离室设计时,建议设计保护极的环宽至少为收集极的半径的两倍,可使电场强度变化维持为5%左右。

3.3 绝缘环宽度

研究绝缘环宽度对电场均匀性的影响,保持收集极半径为50 mm、保护极外径为100 mm、高压极半径为100 mm不变,绝缘环宽度分别设置为1 mm、3 mm、5 mm、7 mm、9 mm。模拟结果如图9所示,图10为沿着辅助线的场强变化(收集极位置为0 mm)。

根据图9和图10所知,随着绝缘环宽度的增加,在收集极端产生的边缘效应随着绝缘环宽度的变化逐渐变大,当绝缘宽度为9 mm时,收集极边缘处的电场强度为35.2 kV·m⁻¹,当绝缘环宽度为1 mm时,收集极边缘处的电场强度为12.8 kV·m⁻¹。其余位置处的电场强

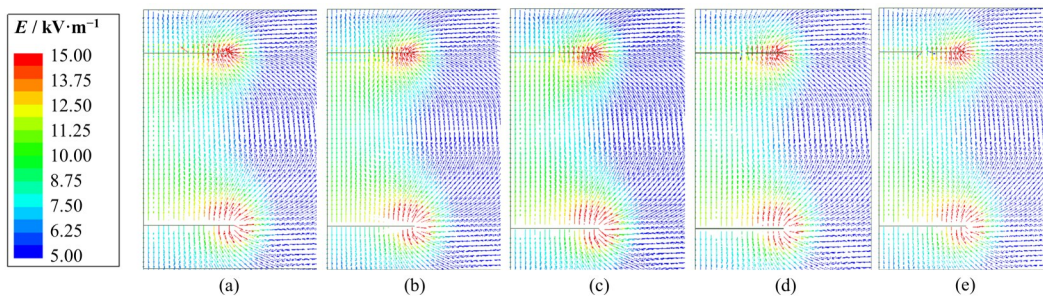


图9 不同绝缘环宽度的电场图 (a) 1 mm, (b) 3 mm, (c) 5 mm, (d) 7 mm, (e) 9 mm

Fig.9 Electric field diagrams of different insulating ring widths (a) 1 mm, (b) 3 mm, (c) 5 mm, (d) 7 mm, (e) 9 mm

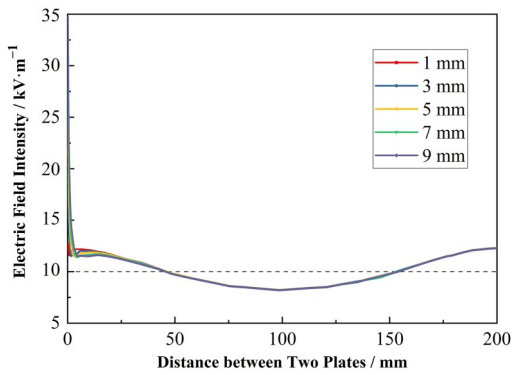


图10 不同绝缘环宽度的电场变化(彩图见网页版)

Fig.10 Electric field variation with different insulating ring widths (color online)

度的影响基本可以忽略。在设计电离室时,在保持收集极和保护极不导通的前提下,应使绝缘环宽度最小,令收集极边缘处的边缘效应影响最小。

3.4 栅极个数

为了使电场均匀性达到更好的效果,在电离室的外部设置栅极,对栅极施加一定的高压,同时观察测量体积内电场分布。将栅极的厚度固定为2 mm,研究栅极的个数对电场均匀性的影响,为增加模拟效率,将栅极个数依次设置为0个、1个、3个、7个和15个,每个栅极所加电压与栅极距收集极下表面距离呈线性关系,其他参数保持不变。模拟结果如图11所示,图12为沿着辅助线的场强变化(收集极位置为0 mm)。

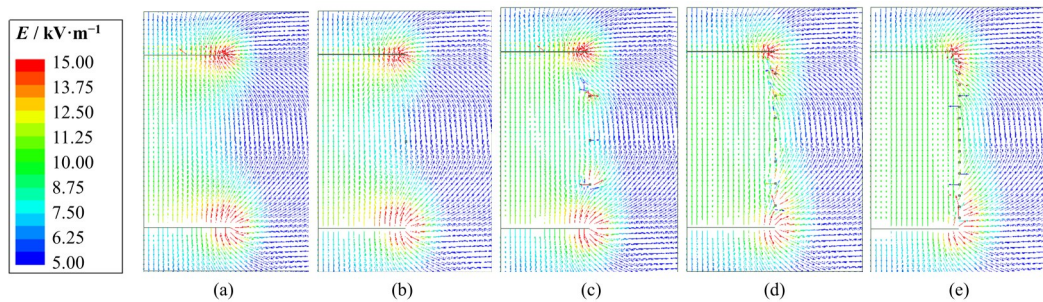


图11 不同栅极个数的电场图 (a) 0, (b) 1, (c) 3, (d) 7, (e) 15

Fig.11 Electric field diagrams with different numbers of grid electrode (a) 0, (b) 1, (c) 3, (d) 7, (e) 15

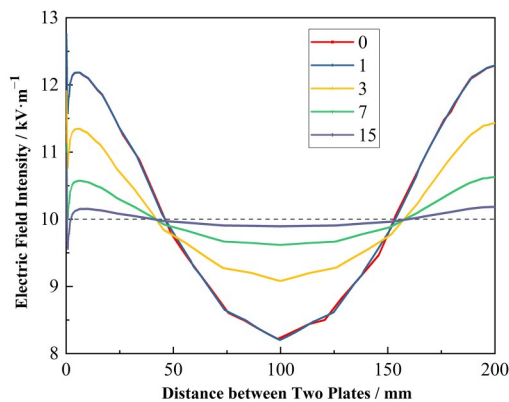


图12 不同栅极个数的电场变化(彩图见网页版)

Fig.12 Electric field variation with different grid electrode numbers (color online)

根据图11和图12所知,当栅极个数为0个和1个时,沿着辅助线的电场强度变化基本相似,表明只加一个栅极时对电场强度变化影响不大,当加多个栅极时电场强度变化幅度逐渐减小,不考虑边缘效应的影响,当栅极分别为3个、7个、15个时对应的电场强度变化范围为:9.1~11.9 kV·m⁻¹、9.6~11.1 kV·m⁻¹、9.9~10.2 kV·m⁻¹。随着栅极个数的增加,电场强度的变化幅度越来越小。在设计电离室的时候,应当尽可能地增加栅极的个数,以使内部电场分布极可能均匀。

3.5 栅极形状

研究栅极形状对电场均匀性的影响。设置三个栅极,收集极半径为50 mm,绝缘环宽度为1 mm,保

护极宽度为49 mm,高压极半径为100 mm,分别设置三种不同形状的栅极,整体结构均为环形,截面形状分别为矩形、圆形和三角形(顶点朝内),如图13所示。模拟结果如图14所示,图15为沿着辅助线的场强变化(收集极位置为0 mm)。

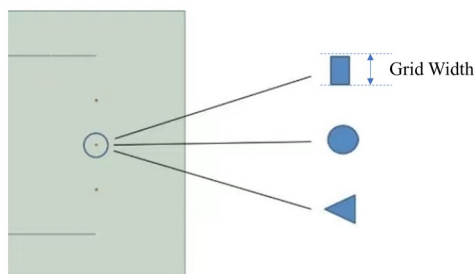


图13 不同栅极形状示意图
Fig.13 Schematic diagram of different grid shapes

根据图14和图15所知,三种形状对电场强度的影响不大,沿着辅助线方向,可以看出截面为矩形栅极时,电场强度变化幅度稍小一些,在设计电离室时,考虑使用截面为矩形的栅极。

3.6 栅极宽度

栅极宽度示意如图13所示,研究栅极宽度对电场的影响,选择三个栅极,栅极宽度分别设为2 mm、5 mm、10 mm和20 mm。模拟结果如图16所示,图17为沿着辅助线的场强变化(收集极位置为0 mm)。

根据图16和图17所知,栅极宽度越大,电场强度变化幅度越大,不过当栅极宽度为2 mm和10 mm的时候,电场强度变化幅度并不明显,其原因是栅极内径距离辅助线距离较远,由于栅极宽度为10 mm以下时引起的电场变化并不会对辅助线位置的电场强度造成影响。设计电离室时,应使栅极宽度尽可能小,且使保护极稍大,以保障栅极附近的电场分布不会影响到收集极区域的电场强度。

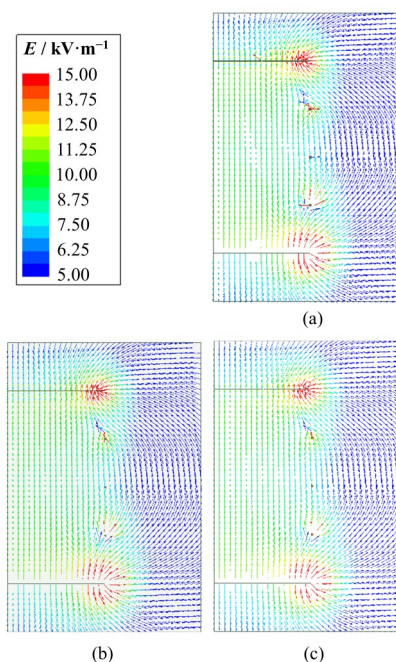


图14 不同栅极形状的电场图
(a) 矩形, (b) 圆形, (c) 三角形
Fig.14 Electric field diagrams for different grid shapes
(a) Rectangle, (b) Round, (c) Triangle

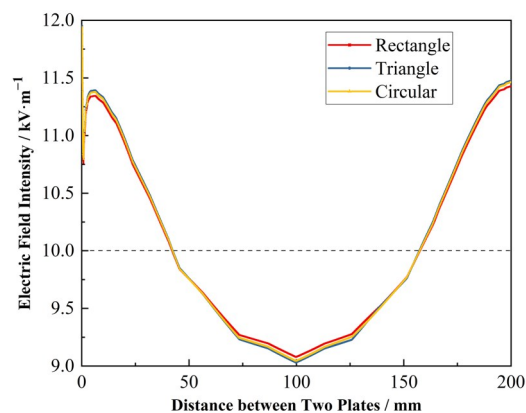


图15 不同栅极形状的电场变化(彩图见网页版)
Fig.15 Electric field variation for different grid shapes (color online)

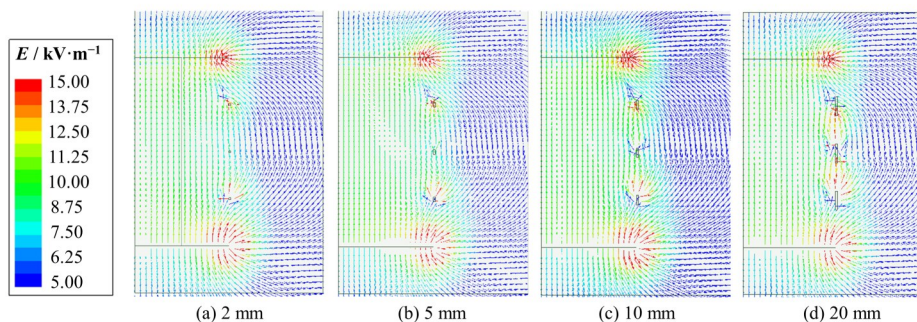


图16 不同栅极宽度的电场图 (a) 2 mm, (b) 5 mm, (c) 10 mm, (d) 20 mm
Fig.16 Electric field diagrams for different gate widths (a) 2 mm, (b) 5 mm, (c) 10 mm, (d) 20 mm

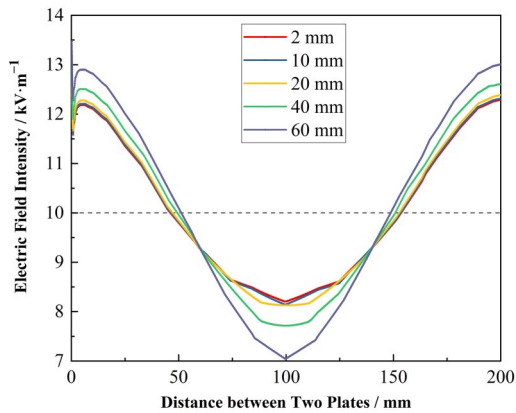


图 17 不同栅极宽度的电场变化(彩图见网页版)

Fig.17 Electric field variation for different gate widths (color online)

4 结语

通过模拟电离室有无保护极、保护极环宽度,绝缘环宽度、栅极个数、栅极形状和栅极宽度下的电场强度分布定性的分析其对电场均匀性的影响,通过在收集极边缘处增加辅助线定量的分析各个情况下的电场强度的变化,结论如下:

1)为了改善边缘效应,必须增加保护极,且保护极宽度为收集极半径两倍左右,电场强度的变化幅度在5%左右;

2)绝缘环宽度的增加会使收集极边缘处的边缘效应增强,在保证收集极和保护极不导通的情况下,应尽量使绝缘环宽度减小,鉴于目前的蚀刻工艺的限值,绝缘环宽度可设计为0.01 mm;

3)当极板间距为200 mm,栅极宽度为2 mm时,栅极个数为15个时,电场强度的变化幅度可减少为1%左右,表明通过增加栅极个数能有效改善电场的均匀性;

4)相较于栅极截面为圆形和三角形,当栅极截面为矩形时,电场强度的变化幅度较小,故后期电离室设计选用截面为矩形的栅极;

5)栅极宽度越大,栅极边缘处的边缘效应越严重,当栅极内径距离收集极圆柱面的直线距离较远时,栅极宽度对收集极处的电场强度变化可以忽略,电离室设计时,栅极宽度选择范围可为2~10 mm。

作者贡献声明 杭仲斌负责研究的提出及设计、数据的收集和整理、文章的起草和最终版本的修订;刘蕴韬负责项目监督和文章整体思路的指导;宋明哲负责项目的监督管理和最终版的修订指导;魏可新负责电离室设计的指导;王红玉负责电离室结构的

指导;刘川凤负责模拟软件的指导;滕忠斌负责部分数据的处理;耿璇负责部分数据的处理。

参考文献

- Rivard M J, Coursey B M, DeWerd L A, *et al.* Update of AAPM task group No. 43 report: a revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations[J]. *Medical Physics*, 2004, **31**(3): 633 - 674. DOI: [10.1118/1.1646040](https://doi.org/10.1118/1.1646040).
- International Commission on Radiation Units and Measurements. Dosimetry of Beta rays and low-energy photons for brachytherapy with sealed sources[J]. *Journal of the ICRU*, 2004, **4**(2): 2. DOI: [10.1093/jicru/ndh018](https://doi.org/10.1093/jicru/ndh018).
- Toni M P, Pimpinella M, Pinto M, *et al.* Direct determination of the absorbed dose to water from 125 low dose-rate brachytherapy seeds using the new absorbed dose primary standard developed at ENEA-INMRI[J]. *Metrologia*, 2012, **49**(5): S193 - S197. DOI: [10.1088/0026-1394/49/5/s193](https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/5/s193).
- Aubineau-Lanièce I, Chauvenet B, Cutarella D, *et al.* LNE-LNHB air-kerma and absorbed dose to water primary standards for low dose-rate ¹²⁵I brachytherapy sources[J]. *Metrologia*, 2012, **49**(5): S189 - S192. DOI: [10.1088/0026-1394/49/5/s189](https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/5/s189).
- Schneider T, Selbach H J. Realisation of the absorbed dose to water for I-125 interstitial brachytherapy sources [J]. *Radiotherapy and Oncology*, 2011, **100**(3): 442 - 445. DOI: [10.1016/j.radonc.2011.08.025](https://doi.org/10.1016/j.radonc.2011.08.025).
- Schneider T. A method to determine the water kerma in a phantom for x-rays with energies up to 40 keV[J]. *Metrologia*, 2009, **46**(1): 95 - 100. DOI: [10.1088/0026-1394/46/1/012](https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/1/012).
- Soares C G, Douysset G, Mitch M G. Primary standards and dosimetry protocols for brachytherapy sources[J]. *Metrologia*, 2009, **46**(2): S80 - S98. DOI: [10.1088/0026-1394/46/2/s06](https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/2/s06).
- Andreo P, Burns D T, Hohlfield K, *et al.* Absorbed dose determination external beam radiotherapy an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water[R]. IAEA TRE 398, 2000.
- Schneider T. The PTB primary standard for the absorbed-dose to water for I-125 interstitial brachytherapy sources [J]. *Metrologia*, 2012, **49**(5): S198 - S202. DOI: [10.1088/0026-1394/49/5/s198](https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/5/s198).
- Aubineau-Lanièce I, Chauvenet B, Cutarella D, *et al.* LNE-LNHB air-kerma and absorbed dose to water primary standards for low dose-rate ¹²⁵I brachytherapy

- sources[J]. *Metrologia*, 2012, **49**(5): S189 - S192. DOI: [10.1088/0026-1394/49/5/s189](https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/5/s189).
- 11 王瑞祺, 王和义, 陈志林, 等. 基于有限元方法计算多丝电离室的电场构型[J]. *原子能科学技术*, 2018, **52**(10): 1836 - 1841. DOI: [10.7538/yzk.2018.youxian.0214](https://doi.org/10.7538/yzk.2018.youxian.0214).
WANG Ruizhen, WANG Heyi, CHEN Zhilin, *et al.* Calculation of electric field for multi-wire ionization chamber using finite element method[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, **52**(10): 1836 - 1841. DOI: [10.7538/yzk.2018.youxian.0214](https://doi.org/10.7538/yzk.2018.youxian.0214).
- 12 张曦, 宋明哲, 滕忠斌, 等. 自由空气电离室电场分布的研究[J]. *原子能科学技术*, 2020, **54**(3): 542 - 548. DOI: [10.7538/yzk.2019.youxian.0055](https://doi.org/10.7538/yzk.2019.youxian.0055).
ZHANG Xi, SONG Mingzhe, TENG Zhongbin, *et al.* Research on electric field distribution of free air ionization chamber[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, **54**(3): 542 - 548. DOI: [10.7538/yzk.2019.youxian.0055](https://doi.org/10.7538/yzk.2019.youxian.0055).
- 13 刘川凤, 宋明哲, 高飞, 等. 外推电离室内部电场模拟研究[J]. *中国测试*, 2020, **46**(1): 147 - 153. DOI: [10.11857/j.issn.1674-5124.2019040080](https://doi.org/10.11857/j.issn.1674-5124.2019040080).
LIU Chuanfeng, SONG Mingzhe, GAO Fei, *et al.* Simulation of the electric field in extrapolation ionization chamber[J]. *China Measurement & Test*, 2020, **46**(1): 147 - 153. DOI: [10.11857/j.issn.1674-5124.2019040080](https://doi.org/10.11857/j.issn.1674-5124.2019040080).
- 14 邱天力, 李蒙, 魏向伦, 等. 在线环境氡浓度测量的离子脉冲电离室研制[J]. *核技术*, 2021, **44**(4): 040403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040403).
QIU Tianli, LI Meng, WEI Xianglun, *et al.* Ion pulse ionization chamber for online measurements of the radon activity concentration[J]. *Nuclear Techniques*, 2021, **44**(4): 040403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.040403).
- 15 刘国强, 赵凌云, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
LIU Guoqiang, ZHAO Lingyun, JIANG Jiya. Finite element analysis of Ansoft engineering electromagnetic field[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- 16 倪光正, 钱秀英. 电磁场数值计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
NI Guangzheng, QIAN Xiuying. Numerical calculation of electromagnetic field[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996.
- 17 赵博, 张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
ZHAO Bo, ZHANG Hongliang. Application of Ansoft 12 in engineering electromagnetic field[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010.