

2×6 MV 串列加速器头部附近电场设计优化

张旭哲, 彭朝华, 胡跃明

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

摘要:为了给 2×6 MV 串列加速器提供高压电极与均压环尺寸,根据设计要求及已有参数,采用电磁场仿真软件计算了串列加速器的二维电场强度分布,针对高压电极结构、均压环截面形状及环间距等因素对串列加速器电场强度分布的影响提出了优化措施。仿真结果表明:直筒结构的高压电极与均压环接壤处电场强度分布不均匀,而圆弧过渡结构的高压电极具有屏蔽作用,比直筒时电场强度分布更均匀;优化均压环截面形状与减小环间距可降低环间电场畸变,但后者对减小均压环表面的电场贡献更大。最终优化后得到高压电极与均压环的尺寸可满足新研制的串列加速器要求。

关键词:串列加速器;高压电极;均压环

中图分类号:TL52

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2022)04-0718-07

doi:10.7538/yzk.2021.youxian.0513

Design and Optimization of Electric Field near Head of 2×6 MV Tandem Accelerator

ZHANG Xuzhe, PENG Zhaohua, HU Yueming

(*Institute of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract: China Institute of Atomic Energy (CIAE) is preparing to develop a 2×6 MV tandem accelerator. In the initial stage of development, the dimensions of the high voltage electrode and the potential distribution ring need to be designed and calculated according to the requirements, so as to facilitate the design of the grounded enclosure and the arrangement of the components in the later stage. In order to obtain the dimensions of the high voltage electrode and the potential distribution ring, the electromagnetic field simulation software was used to build the two-dimensional model of the tandem accelerator and calculate its electric field intensity distribution in this paper. In view of the influencing factors such as the structure of the high voltage electrode, the cross-sectional shape of the potential distribution ring and the ring spacing, measures to optimize the size were proposed by comparing the electric field intensity distribution of the tandem accelerator. The simulation results show that the high voltage electrode has a cylindrical structure, and there is the electric field distortion at the border with the potential distribution ring. The maximum electric field intensity on the surface of the component is 69.7% higher than that of the surface electric field intensity at the center of the high-voltage electrode, which is prone to breakdown and sparking. The high

voltage electrode has a circular arc transition structure which makes it have a shielding effect, and effectively reduces the electric field intensity on the surface of the high voltage electrode and the potential distribution ring near it. And after data analysis, it is found that the peak value of the electric field on the surface of the high voltage electrode decreases with the increase of k , and the peak value of the electric field on the surface of the potential distribution ring increases slowly with the increase of k . If only modifying the shape of the high voltage electrode can only reduce the surface electric field intensity of several potential distribution rings close to it, it cannot solve the electric field distortion caused by the gap between the potential distribution rings. Making the cross-sectional shape of the potential distribution ring an ellipse and reducing the ring spacing can improve the influence of electric field distortion on the surface electric field of the potential distribution ring. According to the electric field intensity distribution on the component surface, it can be seen that the method of reducing the ring spacing has a greater contribution to reducing the electric field intensity on the surface of the potential distribution ring. Finally, the maximum outer radius of the high voltage electrode is 686 mm, the minimum outer radius is 586 mm, the length is 1 314 mm, the long axis of the arc is 45 mm, and the short axis is 22.5 mm. The potential distribution ring uses an elliptical cross section, the long axis of the ellipse is 90 mm, the short axis is 45 mm, and the ring spacing is 16 mm. The dimensions of the optimized high voltage electrode and potential distribution ring can meet the requirements of the newly developed tandem accelerator.

Key words: tandem accelerator; high voltage electrode; potential distribution ring

串列式静电加速器是核物理、核技术等基础前沿科学领域的重要研究工具,在天体物理、材料科学、表面科学、生命科学以及航空航天等学科亦有广泛应用^[1]。到目前为止,国内外运行的绝大多数串列加速器基本上引进于美国 NEC^[2-6]和荷兰 HVEE^[7-8],其中美国 NEC 为全球 50 多个国家共提供 240 多个加速器系统及其他系统、部件和服务。为了更好地进行核物理研究工作,目前北京串列加速器核物理国家实验室准备研制一台 2×6 MV 串列加速器。此串列加速器采用同心同轴结构,直筒结构的高压电极与均压环接壤处附近存在较大的电场畸变,容易引起击穿打火情况的发生。为避免发生击穿打火情况,通过理论计算得出此串列加速器的工程击穿场强值,用来作为高压电极与均压环优化设计的电场标准,低于此值一般不会发生击穿打火。由设计要求及相关参数,本文利用电磁场软件建立 2×6 MV 串列加速器二维模型,仿真计算二维电场强度的空间分布,优化高压电极与均压环尺寸使加速器整体

电场强度低于工程击穿场强。

1 初始模型分析计算

1.1 初始模型参数

串列加速器整体采用同心同轴结构,钢筒外壳接地,内部预充 6~8 个大气压的 SF₆ 绝缘气体,高压电极端电压为 6 MV,电极两端各设有 12 个耐压为 0.5 MV 的加速管,每个加速管外置 3 个均压环(不包括高压电极两端首个均压环),并要求法兰处放置有均压环,且每个均压环间距相等。主要参数如下:钢筒最大外半径,1 370 mm;高压电极外半径,585 mm;均压环与高压电极的外半径相同,其截面半径为 28 mm;环间距,50 mm;加速管管长,318 mm。本文中钢筒和高压电极厚度为 20 mm,其他参数根据一般情况设置。串列加速器的主要结构如图 1 所示。

1.2 初始电场强度计算

当钢筒内充有 7 个大气压的 SF₆ 气体时, SF₆ 在直流正电性下的耐电强度计算公式^[9-10]为:

$$E_{dt} = 70(10p)^{0.76} \quad (1)$$

式中： p 为气体压强，MPa； E_{dt} 为耐电强度。

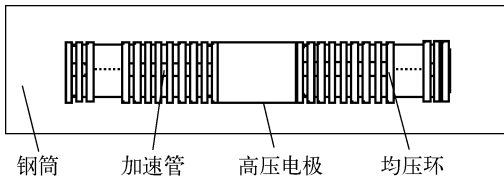


图1 串联加速器的主要结构

Fig. 1 Main structure of tandem accelerator

由式(1)计算出此串联加速器的耐电强度为 $3.095 0 \times 10^7$ V/m。工程上安全系数为 50% 时，工程击穿场强为 $1.547 5 \times 10^7$ V/m，当整体电场强度最大值低于此值一般不会发生击穿打火。由于此台串联加速器满足同心同轴结构，本文基于电磁场仿真软件建立串联加速器二维模型，并计算得到二维电场的空间分布，高压电极与均压环初始形状如图 2 所示，其中电极半长度为 657 mm，环截面间中心距离为 106 mm。为方便进行数据分析，在距高压电极一半及前 19 个均压环表面 0.01 mm 处设置一条路径，可近似认为路径上的电场强度与元件表面的电场强度一致。

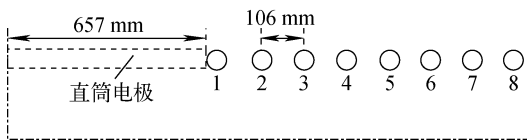


图2 高压电极与均压环初始形状

Fig. 2 High voltage electrode and initial shape of potential distribution ring

计算结果表明：高压电极中心处表面电场强度为 $1.234 7 \times 10^7$ V/m，最大电场强度为 $1.883 7 \times 10^7$ V/m (距电极中心 0.649 4 m 处)，均压环表面最大电场强度为 $2.095 1 \times 10^7$ V/m (位于第 1 个环，距电极中心 0.725 9 m 处)。高压电极与均压环表面 0.01 mm 处的电场强度分布如图 3 所示，可看出，直筒结构的高压电极与均压环接壤处表面电场强度分布不均匀，元件表面最大电场强度比高压电极中心处表面电场强度高 69.7%，在这种情况下容易发生击穿打火情况。为优化高压电极与均压环表面电

场强度分布，进行以下设计优化。

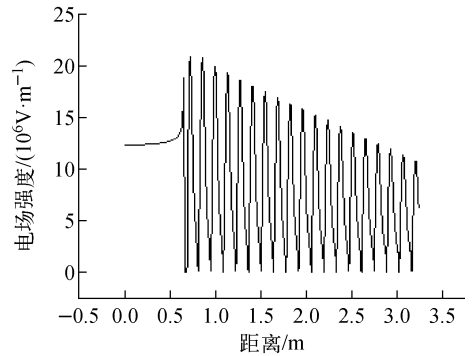


图3 元件表面初始电场强度分布曲线

Fig. 3 Initial electric field intensity distribution curve on component surface

2 设计优化与结果分析

2.1 高压电极设计

由于同心同轴结构中直筒高压电极与均压环接壤处附近存在电场畸变。为降低高压电极附近电场强度，本文参考 Mp 串联加速器改造后的高压电极结构^[11]，将此串联加速器的高压电极设计为圆弧过渡结构，结果如图 4 所示，其中 a 为圆弧的长半轴长， b 为圆弧的短半轴长，且环截面间中心距离保持不变。为了方便高压电极维修工作，令其最小外半径增大 1 mm。

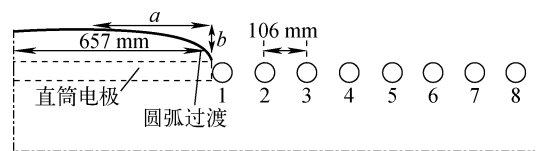


图4 设计的高压电极形状

Fig. 4 Designed high voltage electrode shape

当其他参数不变，将高压电极圆弧过渡结构中长半轴长 a 设置为 100、150、200、250 mm 时，分别计算长半轴长 a 与短半轴长 b 的比值 k 为 1、1.5、2、2.5 时的串联加速器二维电场强度分布，可得到如下结果。

1) $a = 250$ mm、 $k = 2.5$ 时，高压电极的表面最大电场强度为 $1.613 2 \times 10^7$ V/m (距电极中心 0.529 9 m 处)，其他情况均高于此时表面最大电场强度，其中心处表面电场强度为 $1.317 1 \times 10^7$ V/m，均压环表面最大电场强度

为 1.8518×10^7 V/m(位于第 4 个环,距电极中心 1.171 5 m 处),此时元件表面电场强度分布与初始表面电场强度分布对比如图 5a 所示,可看出,高压电极与均压环接壤处附近的电场强度得到改善,但从第 2 个环开始电场强度分布依旧不均匀,说明均压环间存在电场畸变。

2) $a=250$ mm、 $k=1$ 时,均压环表面最大电场强度为 1.6910×10^7 V/m(位于第 6 个环,距电极中心 1.552 9 m 处),其他情况均高于此时表面最大电场强度,高压电极中心处表面电场强度为 1.5237×10^7 V/m,最大电场强度为 2.0522×10^7 V/m(距电极中心 0.486 8 m 处),此时元件表面电场强度分布与初始表面电场强度分布对比如图 5b 所示,发现靠近高压电极的前 3 个均压环表面电场强度大幅下降,但高压电极表面电场强度分布不理想,说明不能过渡增大高压电极最大外半径。

通过数据分析可得到不同 a 时,高压电极与均压环表面最大电场强度随 k 的变化(图 6),可看出,高压电极表面最大电场强度随 k 增大而降低,均压环表面最大电场强度随 k 增大而缓慢增长。因此当其他参数不变时,高压电极为圆弧过渡结构优于直筒结构,有效降低了高压电极及其附近均压环表面电场强度,但由于各均压环表面电场强度分布不理想,需对均压环进行设计优化。

2.2 均压环设计

根据文献[12]可知,通过优化截面形状与修改环间距的形式可改善各均压环间的电场畸变。当均压环截面为椭圆形时,截面比 b_1/a_1 可取 0.4、0.5、0.6^[13-14],由设计要求可得到均压环的长半轴长 a_1 与均压环环间距 d 的关系式为:

$$a_1 = (318 - 3d)/2n \quad (2)$$

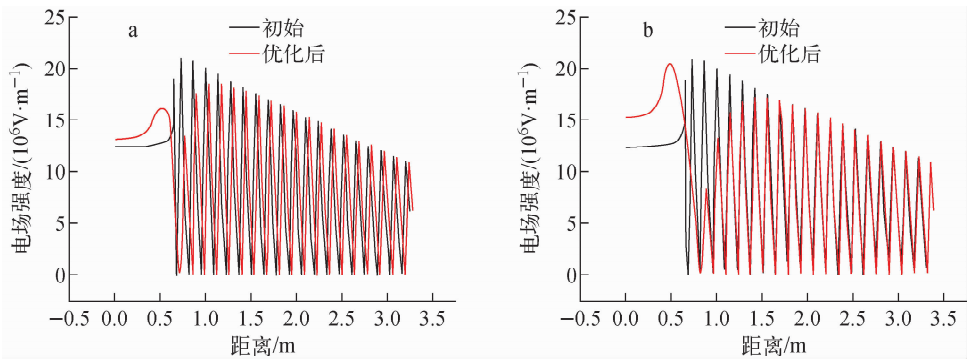


图 5 $a=250$ mm、 $k=1$ (a)及 $a=250$ mm、 $k=2.5$ (b)时优化后与初始电场强度分布对比

Fig. 5 Comparison of improved electric field intensity distribution

with initial electric field intensity distribution under $a=250$ mm, $k=1$ (a) and $a=250$ mm, $k=2.5$ (b)

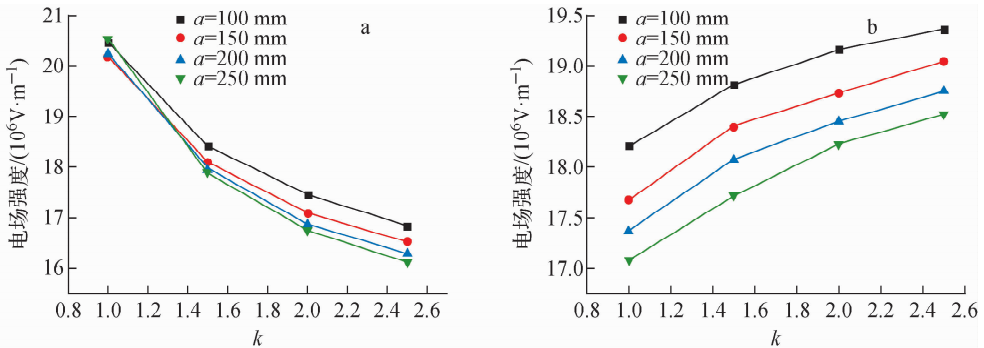


图 6 不同 a 时高压电极(a)及均压环(b)表面最大电场强度随 k 的变化

Fig. 6 Surface maximum electric field intensity of high voltage electrode (a) and potential distribution ring (b) vs k under different a

式中, n 为每个加速管上相应的均压环数量(不包括高压电极两端首个均压环)。

当截面为圆形时, 截面比为 1, 其直径比环间距大可减小均压环间的径向电场畸变^[12], 结合电场理论计算得到 d 可在 12.3~53 mm 范围内取值。图 7 为均压环形状, 在高压电极圆弧过渡结构 $a=250$ mm、 $k=2.5$ 的基础上, 分别对优化截面形状和修改环间距两种情况进行电场仿真模拟。

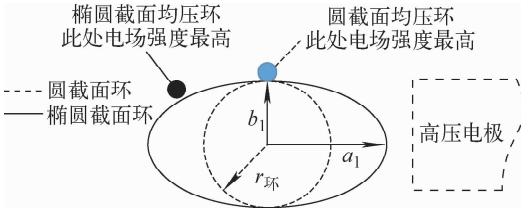


图 7 设计的均压环形状

Fig. 7 Designed potential distribution ring shape

1) 优化截面形状

若均压环的截面为椭圆形, 且长轴方向与分压柱方向一致时, 可达到牺牲轴向来降低径向电场强度的目的^[12]。当只改变均压环截面比时, 可得到: 高压电极表面电场强度基本保持不变, 均压环表面最大电场强度从截面中心向电场线方向移动, 比值在 0.5 与 0.6 时均压环表面最大电场强度相对较小, 如图 8 所示。当环截面比为 0.4 时, 环表面轴向最大电场强度分量过高, 说明选择稍小的环截面比对环表面电场不利, 因此均压环截面形状不宜过扁^[15]。

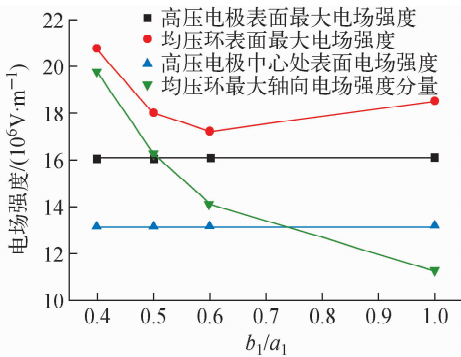


图 8 元件表面最大电场强度随 b_1/a_1 的变化

Fig. 8 Maximum electric field intensity on component surface peak value vs b_1/a_1

对比截面比为 0.5 与 1.0 的情况(图 9), 第 1 个均压环表面电场强度相对升高, 其余均压环的表面电场强度有所下降, 说明优化截面形状可降低均压环表面电场强度, 但效果不明显。

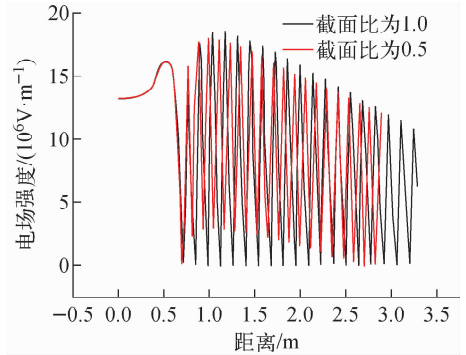


图 9 均压环截面比为 1.0 和 0.5 的表面电场强度分布对比

Fig. 9 Comparison of surface electric field intensity distribution of potential distribution ring with cross-section ratio of 1.0 and 0.5

2) 修改环间距

若不改变均压环截面形状, 只改变环间距, 模拟电场强度随环间距变化的情况可得到: 将均压环环间距降低至 16 mm 时, 均压环表面最大电场强度低于高压电极表面最大电场强度。图 10 为环间距修改前后表面电场强度对比, 可看出, 均压环表面电场强度随环间距减小明显降低, 说明减小环间距可改善均压环间电场畸变, 且修改环间距比优化截面形状更有效。

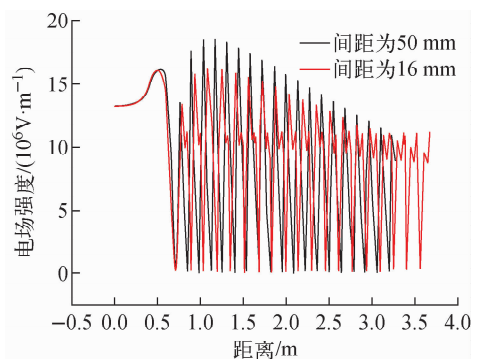


图 10 环间距修改前后表面电场强度对比

Fig. 10 Comparison of surface electric field intensity before and after ring spacing modification

结合上述两种情况,分别模拟截面比为 0.5 与 0.6 时电场强度随环间距的变化情况,图 11 为均压环表面最大电场强度随环间距的变化,可看出,当 d 小于 35 mm 时,截面比为 0.5 时更优。最终模拟 $d=16$ mm、截面比为 0.5 时的电场强度,结果为:高压电极中心处表面电场强度为 1.3188×10^7 V/m,最大电场强度为 1.6009×10^7 V/m(距电极中心 0.492 4 m),均压环表面最大电场强度为 1.4771×10^7 V/m(位于第 3 个环,距电极中心 1.041 9 m 处)。图 12 为均压环优化前后元件表面电场强度分布对比,可看出,优化后均压环表面电场强度分布趋于平稳,高压电极表面电场强度基本不变。说明同时修改环间距和优化截面形状能够改善均压环间电场畸变,且不会影响高压电极表面电场强度。

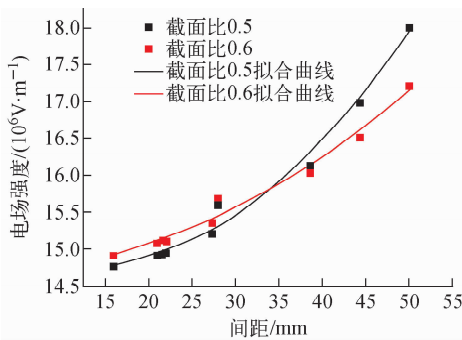


图 11 均压环表面最大电场强度随环间距的变化
Fig. 11 Variation of maximum electric field intensity on surface of potential distribution ring with ring spacing

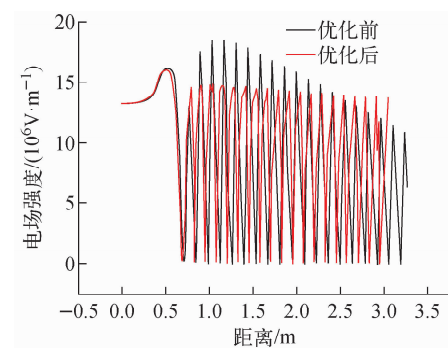


图 12 均压环优化前后表面电场强度分布对比
Fig. 12 Comparison of surface electric field intensity distribution before and after modification of potential distribution ring

2.3 最终优化

为了使整体最大电场强度低于工程击穿场强,需进一步降低高压电极表面最大电场强度。由上述结论可知,相对提升高压电极比值 k 可降低其表面最大电场强度。因此增大 k 至 3.5 时,通过仿真计算得到:高压电极中心处表面电场强度为 1.2917×10^7 V/m,最大电场强度为 1.5309×10^7 V/m(距电极中心 0.528 6 m 处),畸变率降低至 16.082 8%,均压环表面最大电场强度为 1.5019×10^7 V/m(距电极中心 0.874 7 m 处),此时整体最大电场强度在工程击穿场强值内。图 13 为优化前后表面电场强度分布对比,可看出,优化后高压电极表面最大电场强度相比较优化前有所下降,均压环表面电场强度均匀分布,说明高压电极与均压环的尺寸已满足要求。

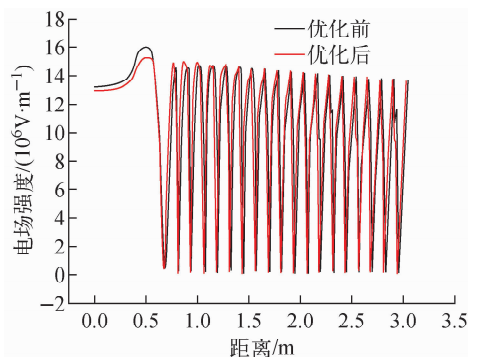


图 13 优化前后表面电场强度分布对比
Fig. 13 Comparison of surface electric field intensity distribution before and after optimization

3 结论

本工作基于二维电磁场软件对 2×6 MV 串列加速器初步设计进行电场强度仿真计算和优化,给出了高压电极与均压环的尺寸,得到如下结论:高压电极采用圆弧过渡结构,最大外半径为 686 mm,最小外半径为 586 mm,长 1 314 mm;均压环选用椭圆截面,椭圆长轴长 90 mm,短轴长 45 mm,环间距为 16 mm,环外半径为 585 mm。该尺寸下高压电极附近最大电场强度由 2.0951×10^7 V/m 降至 1.5309×10^7 V/m,畸变率由 69.7% 降为 16.082 8%,整体电场强度低于工程击穿场强且分布均匀,此参数可供研制新的串列加速器做参考。

参考文献:

- [1] 陈熙萌,邱玺玉,陈林,等. 基于兰州大学串列加速器的若干实验研究进展[C]//全国高压型加速器技术及应用学术交流会议. [出版地不详]:[出版者不详],2014.
- [2] PASTUOVIC Z, BUTTON D, COHEN D, et al. SIRIUS; A new 6 MV accelerator system for IBA and AMS at ANSTO[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2016, 371: 142-147.
- [3] RATHMELL R D. Developments in small electrostatic accelerators (invited)[J]. Review of Scientific Instruments, 1986, 57(5): 727-730.
- [4] 于金祥,李认兴,巩玲华,等. EN-18 串列静电加速器的运行与改进[J]. 核技术,1992,15(6): 335-338.
YU Jinxiang, LI Renxing, GONG Linghua, et al. The operation and improvements of the EN-tandem at Peking University[J]. Nuclear Techniques, 1992, 15(6): 335-338(in Chinese).
- [5] 孙传琛,卢成荣,费志宇,等. 复旦大学的 3 MV 串列静电加速器[J]. 核技术,1989,12(7):391-399.
SUN Chuanchen, LU Chengrong, FEI Zhiyu, et al. A 3 MV pelletron at Fudan University[J]. Nuclear Techniques, 1989, 12(7): 391-399 (in Chinese).
- [6] RASTIGEEV S A, PARKHOMCHUK V V, KLYUEV V F. An electrostatic tandem accelerator for an accelerator mass spectrometer[J]. Instruments and Experimental Techniques, 2018, 61(1): 79-84.
- [7] GOTTDANG A, KLEIN M, MOUS D. Accelerator mass spectrometry at high voltage engineering Europa (HVEE)[J]. Radiocarbon, 2001, 43(2A): 149-156.
- [8] MOUS D, KOUDIJS R, DUBBELMAN P, et al. The HVEE tandemron line; new developments and design considerations[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1992, 62(3): 421-424.
- [9] 李涛,关遐令. HI-13 串列加速器头部电场改进计算[J]. 原子能科学技术,1993,27(5):396-400.
LI Tao, GUAN Xialing. The modification of the terminal electrostatic field of HI-13 tandem accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1993, 27(5): 396-400(in Chinese).
- [10] 黄大章. HI-13 串列加速器升级工程物理分析[D]. 北京:中国原子能科学研究院,2000.
- [11] PURSER K H, GOVE H E, LUND T S, et al. The University of Rochester MP tandem upgrading program[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1974, 122(1-2): 159-177.
- [12] 王克礼. 串列加速器[M]. 北京:[出版者不详], 1990.
- [13] EASTHAM D A. Numerical calculations of the electric fields around the hoop structure of Van de Graaff accelerators[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1973, 108(3): 593-597.
- [14] 闫芳. 串列加速器头部电极改进方案及 ISOL 靶—源中靶材料的研究[D]. 北京:中国原子能科学研究院,2006.
- [15] 许方官. 静电加速器电场计算[J]. 原子能科学技术,1981,15(5):525-535.
XU Fangguan. Electric field calculation of electrostatic accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1981, 15(5): 525-535(in Chinese).