



·粒子束及加速器技术·

冷链食品包装箱表面消毒灭菌小型 电子帘加速器的研制*

李中平^{1,2,3}, 杨 敏¹, 宗 阳^{1,2}, 曹树春^{1,2,3}, 申晓康^{1,2,3}, 韩芳兵³, 张科武³

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 兰州科近易安辐射科技有限公司, 兰州 730000)

摘 要: 研制了冷链食品包装箱表面辐照消毒灭菌成套装置, 重点针对装置的核心部件小型电子帘加速器进行设计和调试, 应用 E-gun 电子束轨迹跟踪程序对加速器的束流光学进行了计算, 合理设计了栅极和聚焦极形状, 获得了对束流包络的理想控制, 应用多物理场仿真软件 CST 进行高压结构优化, 使电子帘阴极表面高压区电场分布均匀, 降低了打火几率。对电子帘加速器进行了整机调试, 针对调试中出现的高压打火现象进行了分析, 并给出了结构优化设计方案, 使得最终调试主要技术参数达到了 140 keV/20 mA, 束流不均匀度小于 10%。通过了连续 8 h 稳定性运行测试, 达到了工业加速器辐照应用标准。

关键词: 辐照消毒; 电子帘加速器; 阴极; 束流不均匀度

中图分类号: TL503.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220303

Development of small electron curtain accelerator for sterilization of the surface of packing case in food cold chain

Li Zhongping^{1,2,3}, Yang Min¹, Zong Yang^{1,2}, Cao Shuchun^{1,2,3},
Shen Xiaokang^{1,2,3}, Han Fangbing³, Zhang Kewu³

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Lanzhou Kejin ESAFE Radiation Technology Co Ltd, Lanzhou 730000, China)

Abstract: An electron beam radiation device for sterilization of the packing box surface was developed successfully at Institute of Modern Physics (IMP), and the reliability test of 8 h was achieved for industrial application. Six electron curtain accelerators were installed in the sterilization transport line for processing the six whole surfaces of the box. This paper introduces the design of the electron curtain accelerator. The E-gun code was used to compute the trajectories of the electron beam, and it is proved valid with experimental results. The high voltage insulating structure is optimized based on CST software to improve the uniformity of the electric field and decrease the numbers of the high voltage breakdown. Finally, the radiation dose distribution was tested and the inhomogeneity is less than 10%, which meets the requirement for the industrial application.

Key words: sterilization, electron curtain accelerator, cathode, nonuniformity of beam

随着科学技术的不断进步和生活水平的提高, 人们对于食品安全和环保问题越来越重视, 虽然用于消毒灭菌的手段多种多样, 但电子束辐射法作为一种高效、环保的处理方法已经得到了越来越广泛的应用, 尤其是在发达国家。用于消毒灭菌并具备安全、高效特点的电子加速器, 从低能到高能区域已经全部覆盖。低能电子加速器(能量小于 300 keV)束流能量低, 穿透能力差, 通常用于表面消杀。而高能电子加速器(能量 10 MeV)电子能量高, 穿透能力强, 适合用于整箱食品的穿透式消杀作业。新冠疫情爆发后, 对辐照消杀的需求更为紧迫, 特别是进口冷链食品外包装表面新冠病毒污染问题的出现。通常进口冷链食品在离岸前已经过内外整体消杀, 而入关后的冷链

* 收稿日期: 2023-01-13; 修订日期: 2023-04-26

基金项目: 国防科工局核能开发科研项目(HNKF2021001)

联系方式: 李中平, lzp@impcas.ac.cn。

食品包装表面污染问题主要在转运过程中产生,因此仅需对包装表面进行消杀即可,所以选用低能电子束辐照是一种更经济的处理方法。常用工业低能电子加速器主要有扫描式和帘式两种,欧美国家的低能电子加速器应用以帘式为主,代表生产厂家有美国的PCT和ESI,这两家公司生产的大功率电子帘加速器幅宽可达到3 m以上,束流达1 A以上,主要用于表面固化^[1]。PCT开发的自密封式小型电子帘不使用真空泵系统,主体尺寸长776 mm,非常小巧,在桌面式实验电子束装置和表面消杀方面应用非常广泛。国内的电子帘加速器技术发展缓慢,目前低能加速器应用以扫描式为主,代表生产厂家有中广核达胜和无锡爱邦。扫描式加速器由于加速管和扫描窗组件结构特点使得整机体积较大,而电子帘加速器结构简单、体积小、安装灵活,非常适合嵌入生产线进行在线消杀工作。除此之外,它还可以被广泛用于表面固化、薄膜辐照等领域。我国电子帘加速器技术相对落后,国内工业应用型的电子帘加速器主要依靠进口。因此本文将介绍用于表面消杀的小型电子帘加速器的设计、调试、优化和运行情况,以便为该类型加速器的研制提供技术基础。

1 电子帘加速器介绍

1.1 电子帘加速器主要参数

食品辐照技术是20世纪发展起来的一种食品灭菌保鲜技术。FAO/WHO/IAEA在1980年发布联合公告指出,10 kGy以下的吸收剂量对于处理食品是安全无害的,不需要进行食品毒理学实验验证。目前常见食品的辐照灭菌剂量通常小于10 kGy,只有部分干燥或脱水香辛料的辐照保鲜剂量达到了30 kGy。根据辐照实验结果,新冠病毒在小于10 kGy的辐照剂量情况下就可以达到灭活要求。另外,根据海关常见冷链包装箱尺寸,并在保留一定辐照余量的情况下确定电子帘窗宽分别设计为460 mm和260 mm。140 keV的电子束穿过10 μm钛膜后在水中穿透深度超过100 μm,可以满足冷链食品包装箱表面灭菌穿透深度的要求。目前常用电子束辐照冷链食品束下传输速度最高可达30 m/min。根据以上参数可计算电子帘加速器束流强度

$$D = 6D(e)F(i)I/Wv \quad (1)$$

式中: D 为吸收剂量,单位为kGy; $D(e)$ 为电子的能量沉积,单位为 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$; $F(i)$ 为束流吸收因子,是被材料接收到的束流与总束流的比值; I 为电子束流,单位为mA; W 为窗宽,单位为m; v 为束下传输速度,单位为m/min。

使用式(1)计算,当束下速度为30 m/min、剂量为10 kGy时,260 mm窗宽电子帘束流 I 为2.33 mA,460 mm窗宽电子帘所需束流 I 为4.12 mA。根据目前食品灭菌最高剂量30 kGy计算,两种电子帘加速器束流分别应达到7 mA和12.4 mA。考虑实际应用余量和未来扩展更广的应用场景,确定加速器设计主要技术参数分别为140 keV/10 mA和140 keV/20 mA,而对于能量稳定度、束流稳定度和剂量均匀度可参照工业辐照加速器的标准要求,分别为能量稳定度 $\pm 2\%$,束流稳定度 $\pm 2\%$,剂量均匀度 $\pm 10\%$ 即可达到要求。

1.2 冷链消杀电子帘装置简介

本电子帘加速器针对冷链食品外包装表面灭菌装置研制,共使用六台电子帘加速器,对包装箱的六个面分别进行处理,装置实物如图1所示。六台加速器根据消杀物品尺寸分为两种规格,分别是引出窗有效长度为260 mm和460 mm的电子帘。260 mm电子帘实施包装箱侧面辐照,460 mm电子帘实施上下面辐照。电子帘加速器是消杀装置的核心部件,本文将着重介绍电子帘加速器的设计和调试情况,内容主要针对260 mm电子帘的设计,其设计与460 mm电子帘基本一致。电子帘加速器主要由电源系统、真空系统、冷却系统、控制系统和加速器主体构成,电子帘主体实物如图2所示。其中电源系统是与供应商联合研制的140 kV/100 mA负极性直流高压电源,每台高压电源输出端集成了三套栅极电源和灯丝电源,同时为三台电子帘加速器供电。高压、栅极和灯丝供电使用整体式设计,采用标准R24高压插头与陶瓷锥插接的方式供电^[2]。



Fig. 1 Radiation device for sterilization of the packing box surface

图1 冷链食品表面辐照消毒装置



Fig. 2 Main part of electron curtain accelerator

图2 冷链消毒用电子帘加速器主体

真空系统使用分子泵和干泵组合,应用一台干泵为两台电子帘加速器提供前级粗真空获取,保证经济性。实际运行时静态真空最高达到 10^{-6} Pa,最大束流时动态真空达到 10^{-5} Pa。应用无油真空获得系统可以避免油泵产生的油蒸汽返流污染真空腔体和内部绝缘瓷锥,减小打火几率。

冷却系统包括水冷和风冷,水冷主要是为引出窗两侧、铜格栅和陶瓷锥安装法兰提供冷却。陶瓷锥受高温灯丝传导温度较高,冷却其安装法兰可以降低高压电缆接头和插接陶瓷孔温度,使高压插头工作在允许温度范围之内(允许工作温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$)。低能电子束在穿过钛膜过程中能损较高,因此使用水冷和风冷共同带走钛膜表面电子束沉积所产生的热量,提升钛膜使用寿命。加速器主体由真空腔体和阴极组件构成,阴极组件是电子帘加速器的关键部件,需进行详细计算和设计。

2 电子帘加速器关键部件设计

2.1 阴极电子枪计算

该电子帘电子枪为单灯丝结构的三极枪,由阴极、阳极和栅极组成。灯丝选择 0.3 mm 钨丝,其所受拉力设计要求是使耐高温弹簧保持 3.8 N 左右的拉力^[3],更大的拉力可能会使灯丝高温蠕变加剧^[4]。三极枪结构中设计阴极工作在空间电荷限制区,通过调节栅极电压实现对束流大小的精确控制。栅极电源输出电压设计值为 $-200\sim 30\text{ V}$,负电压用于引出电子束,而 30 V 的正偏置电压作用是抑制电子引出。聚焦极被设计成半圆形结构,其聚焦作用能够控制电子束包络形状^[5],不使边缘电子束轰击真空室边沿,保持良好的真空度。

该电子帘阴极发射结构为轴对称结构,可使用电子轨迹跟踪程序 E-gun 中的直角坐标系建模进行计算。电子枪设计工作在空间电荷限制区,由于引出束流强度较小,阴极温度并不太高,所以电子的初速度接近于零,空间电荷限制区的虚阴极位置非常接近阴极表面^[6]。为了简化模型,假定电子初速为零,阴极电位为零,对于理想同轴圆柱二极管空间电荷限制下的阳极电流可由 Langmuir-Blodgett 确定^[7],即

$$I = \frac{2\sqrt{2}}{9} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{V^{3/2}}{\beta^2 r} \quad (2)$$

式中: V 为阴阳极间任一点的电位; r 为对应点的半径; e/m 为电子的荷质比; $\beta=f(r/r_0)$, 其中 r_0 是阴极灯丝半径, β^2 的值由一个数值表给出^[7],在 E-gun 程序的计算中就是使用式(2),通过不断地迭代给出电子束的计算结果。

计算结果如图 3 所示,图中横纵坐标是软件中定义的栅格长度,每个栅格长度对应 0.1 mm 。计算中设定栅极电压在 $-200\sim 30\text{ V}$ 变化时,最大束流包络宽度为 56 mm ,而钛窗有效宽度为 60 mm 。在 E-gun 计算中未考虑灯丝冷端效应,是通过增加灯丝长度(实际长度 310 mm)避开冷端,同时灯丝工作在 2200 K 左右温度下,使用空间电荷限制流引出来消除冷端效应对束流不均匀度的影响。

2.2 内部电场初步设计

在电子加速器的设计中,高压区电场分布的均匀性是非常重要的,决定了加速器整体的工作稳定性,均匀合理的电场分布会大幅降低高压放电几率,因此设计中应用多物理场有限元仿真软件 CST 对电子帘阴阳极间电场进行计算。建模过程对部分结构进行了合理、必要的简化,主要考虑高压绝缘的薄弱环节,如阴极筒端面、栅极安装面边沿、陶瓷金属真空三连接点等位置,考虑高压设计的冗余量,软件计算过程中设定高压值为 150 kV ,计算结果如图 4 所示。内部电场最高点出现在阴极筒右端面边沿位置,最高电场达到了 $6.15\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$,小于工程中出现场致发射的最小电场 $10\text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$,可以避免由于场致电子发射引发的放电现象。

3 电子帘加速器调试及优化

该电子帘加速器调试过程中加载额定电压为 140 kV ,是基于真空的变化和放电情况,通过逐步提高电压,实施较长

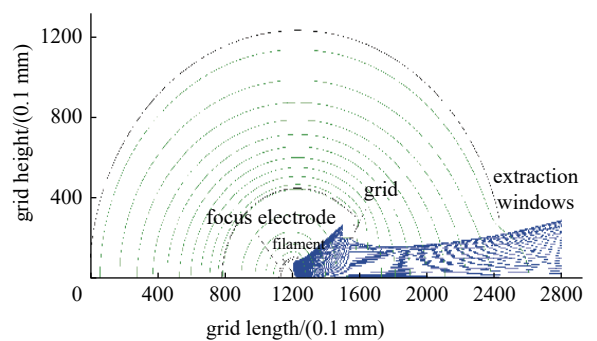


Fig. 3 Envelope of electron beam computed by E-gun code

图 3 E-gun 计算的电子帘横截面处的束流包络

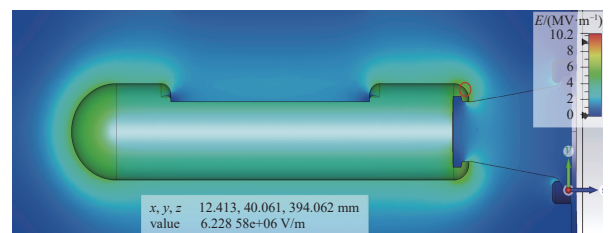


Fig. 4 Electric field distribution of the cathode surface

图 4 电子帘腔体内部电场分布仿真图

时间高压锻炼的过程。初次锻炼发生数十次的放电击穿,随着锻炼时间的增加,打火频率降低并不明显,无法达到长时间稳定运行的目的。

对经过锻炼的陶瓷锥进行检查,发现陶瓷锥压紧法兰边沿周围与陶瓷表面之间发生了击穿,如图5所示。该陶瓷与阴极筒连接是组装式结构,压紧法兰与瓷锥表面不可避免地存在装配间隙(最初设计为完全接触),在该间隙开口处由于电位线发生畸变,致使电场强度增大,通过计算可知该区域最大场强约为 $18 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$,如图6所示,因此在实际调试时导致放电现象频繁。

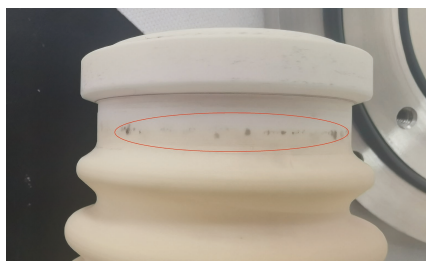


Fig. 5 Arcing point on the ceramic surface
图5 瓷锥放电点实物图

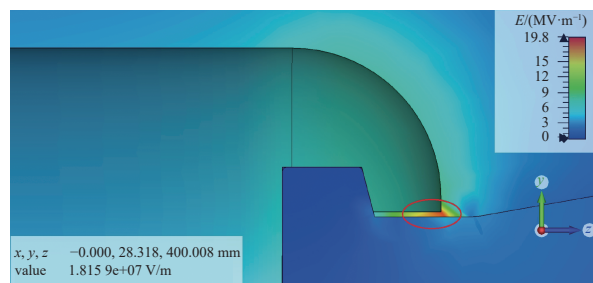


Fig. 6 Electric field distribution in gap between flange and ceramic body

图6 压紧法兰与陶瓷锥间隙之间的场强分布图

为此对三连接点处结构进行了优化,增加间隙距离、降低间隙处局部场强,计算结果如图7所示。优化后的压环为半圆形,由于半径减小,该区域平均场强有所增加,其最高场强达到 $7.5 \text{ MV}\cdot\text{m}^{-1}$,但对真空绝缘而言依然属于安全范围^[8-10]。

结构优化后在 140 kV 情况下对电子帘加速器进行了高压测试(在测试前对阴极筒进行过约 8 h 的高压锻炼),达到了 8 h 稳定运行无放电的良好效果。结构优化前后高压锻炼过程中放电次数和时间的关系曲线如图8所示,两条曲线在前 1 h 内为高压从 0 上升至 140 kV 的过程,后 8 h 高压保持在 140 kV 。结构优化前曲线显示,放电次数达到 54 次,且放电总次数持续增加,未达到稳定状态。结构优化后曲线显示,高压锻炼过程放电共 12 次,发生在高压加载过程中(与高压端表面灰尘和微小尖端有关),后 8 h 内持续稳定运行,高压放电次数未增加,表明结构优化效果明显。

4 调试结果

电子帘加速器在经过优化后,进行了束流宽度和长时间稳定性测试。束流宽度测试是使用聚丙烯塑料薄片材料紧贴在钛膜两端表面,以小束流短时间进行辐照,使薄膜着色,再测量薄膜变色区域宽度,确定束流包络尺寸。实验结果如图9所示,图中变色范围宽度约 52 mm (边缘位置束流密度低,着色较浅),与 E-gun 计算结果 56 mm 基本一致,保证了束流包络在引出窗宽度范围之内。

长时间稳定性测试在 $140 \text{ kV}/10 \text{ mA}$ (260 mm 引出窗)和 $140 \text{ kV}/20 \text{ mA}$ (460 mm 引出窗)参数下进行,测试达到 8 h 稳定运行,未出现放电停机。其能量和束流稳定性测试曲线如图10和图11所示,图10为其中一台电子帘加速器能量稳定曲线,图11为其中任选 260 mm 和 460 mm 两台电子帘的束流稳定曲线,由于整套装置使用的六台电子帘加速器数据稳定性基本一致,故无需对所有数据进行处理。图中能量和束流的不稳定度均达到 $\pm 2\%$,完全满足技术参数要求,并达到了工业现场使用要求。

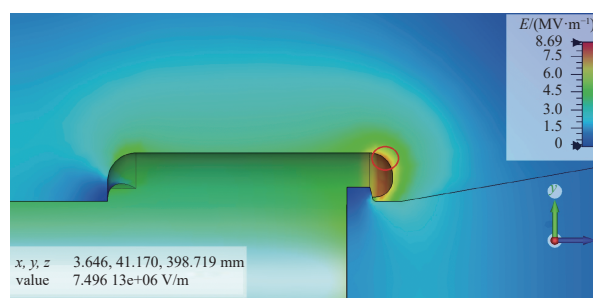


Fig. 7 Electric field distribution after the structure optimization

图7 结构优化后的电场分布图

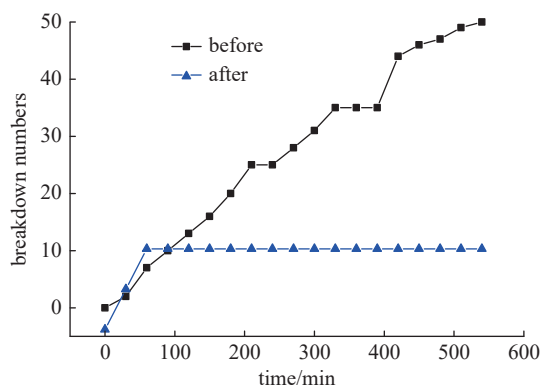


Fig. 8 Curve graph of discharge trend before and after structure optimization

图8 结构优化前后放电趋势比较图

电子束在钛窗下的辐射剂量均匀度是使用 8 个 B3 剂量标定片对 460 mm 的电子帘加速器进行测试, 剂量片位于距离钛窗 6 cm 的位置, 呈横向排在 460 mm 范围内, 测试条件是: 能量 140 keV, 束流 3.5 mA, 束下传输速度 10 m/min, 测试结果如表 1 所示。使用辐射加工剂量分布不均匀度公式 (3) 计算得到, 剂量不均匀度为±6%, 小于辐射加工标准±10% 的规定, 满足辐射加工使用要求^[11]。

$$U_x = \pm \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: U_x 为剂量不均匀度; D_{\max} 是测得的最大剂量; D_{\min} 是测得的最小剂量。

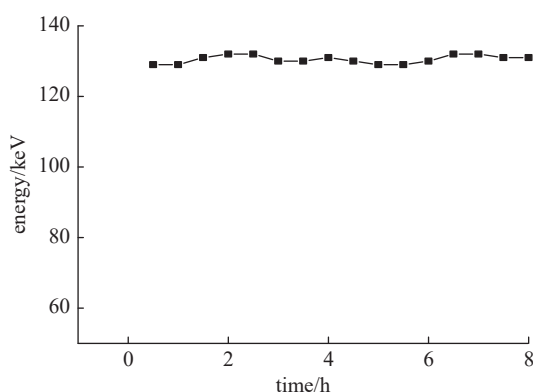


Fig. 10 Curve graph of energy stabilization
图 10 能量稳定曲线

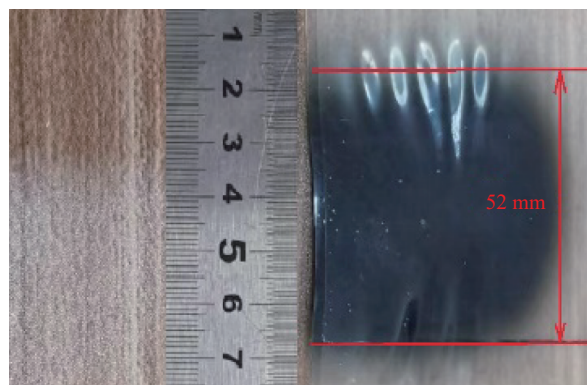


Fig. 9 Picture of irradiation film discoloration
图 9 薄膜辐照变色宽度图

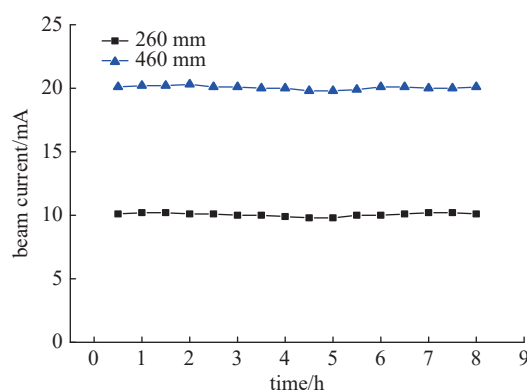


Fig. 11 Curve graph of beam current stabilization
图 11 束流稳定曲线

5 结论

通过表面消毒用小型电子帘加速器的设计和调试, 表明应用 E-gun 程序计算所得电子束包络与实际调试结果基本一致。CST 仿真软件作为电子帘加速器静电场设计可以得到比较准确的结果。对真空、金属、陶瓷三连接点局部电场增强导致的放电, 可以通过优化金属陶瓷连接结构, 对界面处电场进行均匀化, 大幅降低电场强度, 避免击穿或者由于场致发射引起的表面放电, 提高电子帘加速器工作稳定性。本文所使用的设计方法和优化方案可以为今后该类型电子帘加速器的设计提供参考, 两种规格的电子帘加速器主要技术参数分别达到 140 kV/10 mA 和 140 kV/20 mA, 并已完成了工业化 8 h 稳定性测试, 目前正在现场开展产业化示范运行。

参考文献:

- [1] Li Guohua, Tang Huaping, Liu Jinsheng, et al. Prototype of multi-filament electron curtain accelerator[J]. Nuclear Science and Techniques, 2013, 24(s1): 102011-102014.
- [2] 郭洪雷, 龚培荣, 刘平, 等. EBS加速器电源控制系统的研制[J]. 核技术, 2008, 31(1): 63-66. (Guo Honglei, Gong Peirong, Liu Ping, et al. The control system for power supply of EBS accelerator[J]. Nuclear Techniques, 2008, 31(1): 63-66)
- [3] 陈鹏飞, 张明超, 李新民, 等. 电子帘加速器电子枪的研制[J]. 高能物理与核物理, 1998, 22(6): 564-569. (Chen Pengfei, Zhang Mingchao, Li Xinmin, et al. Research and design of electron gun of electrocurtain[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 1998, 22(6): 564-569)
- [4] 范林霞. 电子帘加速器长阴极下垂对电子束分布影响的研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2007. (Fan Linxia. Study of the influence of the deflection of long cathode on the distribution of electron beam current in electrocurtain accelerator[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2007)

表 1 电子帘横向剂量测试数据

Table 1 Data of dose test of electron curtain accelerator in horizontal direction

No.	dose/kGy
1	14.0
2	14.1
3	14.5
4	14.6
5	15.8
6	15.2
7	15.0
8	14.6

- [5] 王水清. 200kV电子帘加速器的电子束轨迹的计算[J]. 高能物理与核物理, 2006, 24(6): 573-577. (Wang Shuiqing. Calculation of the electron trajectory for 200kV self-shielded electron accelerator[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2006, 24(6): 573-577)
- [6] 曹磊, 沈连娟, 洪义麟, 等. 电子帘加速器中阴栅组件结构的数字化设计[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(11): 1485-1488. (Cao Lei, Shen Lianguan, Hong Yilin, et al. Digital design for structure of cathode/grid assemblies in electron curtain accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(11): 1485-1488)
- [7] Langmuir I, Blodgett K B. Currents limited by space charge between coaxial cylinders[J]. [Physical Review](#), 1923, 22(4): 347-356.
- [8] 雷杨俊, 肖定全, 唐兵华. 氧化铝陶瓷表面二次电子发射特性及测量[J]. [硅酸盐学报](#), 2006, 34(6): 713-716. (Lei Yangjun, Xiao Dingquan, Tang Binghua. Character and measurements of secondary electron emission coefficients for alumina ceramics[J]. [Journal of the Chinese Ceramic Society](#), 2006, 34(6): 713-716)
- [9] 田志英, 尚阿曼, 张巨先. 氧化铝陶瓷表面状态对其真空耐压性能的影响[J]. [真空科学与技术学报](#), 2015, 35(10): 1169-1173. (Tian Zhiying, Shang Aman, Zhang Juxian. Enhancement of surface flashover performance of alumina in vacuum by surface modification[J]. [Chinese Journal of Vacuum Science and Technology](#), 2015, 35(10): 1169-1173)
- [10] 雷杨俊, 肖定全. 真空中氧化铝陶瓷表面耐压试验研究[J]. [绝缘材料](#), 2004, 37(3): 29-31,35. (Lei Yangjun, Xiao Dingquan. Study on surface hold-off voltage test of alumina ceramics in vacuum[J]. [Insulating Materials](#), 2004, 37(3): 29-31,35)
- [11] Ren Jie, Huang Jianming, Zhang Yutian, et al. Investigate the nonuniformity of low-energy electron beam with large cross-sections[J]. [Science China Technological Sciences](#), 2012, 55(4): 997-1000.