

文章编号: 1007-4627(2016)04-0433-04

低能宽幅电子束引出特性研究

柴万东¹, 肖家浩^{2,3}, 张子民²

(1. 赤峰学院, 内蒙古 赤峰 024000;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究了能量在 100 到 300 keV 区间的低能宽幅电子束从真空引出到空气中的特性。利用 EGS5 程序模拟了电子束穿过不同厚度钛箔后, 在空气中距离钛箔 5~10 cm 距离处的能量损失、束流损失和束流分布均匀性等。模拟结果显示, 对于低能电子, 钛箔厚度应该在 10 μm 左右为宜, 其透射率与能量直接相关, 在距离钛箔 5 cm 的位置, 电子束的分布不均匀度低于 $\pm 2\%$, 优于工业应用 $\pm 10\%$ 的标准(特殊情况下要求为 $\pm 5\%$), 完全满足工业辐照要求。

关键词: EGS5; 电子帘加速器; 能散; 透射率; 均匀度

中图分类号: TL52 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.33.04.433

1 引言

工业用大功率电子加速器作为辐射加工的关键装置, 在核技术工业应用中占有重要的位置。根据能量分类, 工业电子加速器可分为高能(能量为 5~10 MeV)、中能(0.3~5 MeV)、和低能(0.1~0.5 MeV)加速器, 高能加速器一般为射频型加速器, 如 LINAC^[1] 和 RHODOTRON^[2], 主要用于食品药品、医疗器械等消毒灭菌。中能加速器主要有直流高压器型加速器和高频高压型加速器(Dynamitron), 主要用于电线电缆和热缩管辐照交联、X 射线转化、轮胎橡胶预硫化、电子束脱硫脱销和污水污泥处理等。低能电子加速器一般以宽幅电子帘加速器为主, 常用于橡胶硫化、薄膜辐照、涂层和油墨固化等, 尤其是涂层和油墨固化, 对电子束性能要求较为严格。

中高能电子加速器无论生产还是应用, 在国内都已经比较成熟, 并且形成了相当的规模, 甚至占据部分国际市场, 而低能电子帘加速器(Electron Curtain Accelerator)尽管在发达国家已得到广泛应用, 但在国内的研究和应用尚处于起步阶段。电子帘加速器因能引出帘状电子束而命名, 其能量一般在 80~300 keV 之间, 由电子帘加速器出射的电子需要穿透钛箔和一定距离的空气(一般为几厘米)才能到达被辐照物体。由于电

子束能量较低, 在穿过钛箔和空气时, 能量损失和束流损失都比较高, 在辐照前电子束的能散、透射率及束流的均匀度直接决定了辐照效率及质量。本文借助 EGS5 蒙特卡罗模拟软件对不同入射能量、不同钛箔厚度进行了靶前电子束的能散、透射率及电子束均匀性的相关研究。

美国、日本等国家在高端的固化和印刷行业基本都采用电子帘加速器, 而且普及率较广, 电子帘加速器技术也相对比较成熟。尽管国内对电子帘加速器的研究起步较早, 但由于应用导向不够, 至今发展仍不成熟。近年来, 电子束辐照固化技术逐渐被国内的工业应用认可, 所以电子帘加速器成为研究的热门, 先后有数家研究单位启动研究项目, 包括清华大学、中国科学技术大学、北京机械工业自动化研究所等。上述单位提出的电子帘加速器束流功率一般都不超过 10 kW, 例如清华大学的电子帘加速器束流参数为 200 keV/20 mA, 最高束流功率只有 4 kW^[5]。最近, 中国科学院近代物理研究所(IMP)提出了研制高功率电子帘加速器的计划, 该加速器的设计指标参见表 1, 最高束流能量为 200 keV, 最大束流强度为 150 mA, 束流总功率将达到 30 kW, 加速器的引出窗设计将是一个严重的挑战, 所以要研究电子帘的束流引出效率和束流均匀度, 以便为加速器设计提供理论依据。

收稿日期: 2016-03-21; 修改日期: 2016-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11264001)

作者简介: 柴万东(1971-), 男, 内蒙古赤峰人, 副教授, 从事无线电物理研究, E-mail: 610918880@qq.com

通信作者: 张子民, E-mail: zzm@impcas.ac.cn。

表 1 IMP 电子帘加速器设计参数

参数	指标
电子束能量	75~200 keV
能量稳不稳定度	$\leq \pm 2\%$
束流强度	0~150 mA
束流不稳定度	$\leq \pm 5\%$
电子束宽度	1 100 mm
束流横向不均匀度	$\leq \pm 10\%$

2 电子帘加速器简介

电子帘加速器是一种高压型加速器，其主体是一个用铅层屏蔽的不锈钢圆筒型真空室，阴极组件与真空室同心放置，加速器工作时阴极灯丝处于负高压端，电子由负高压加速，形成帘状电子束，穿过钛箔进入空气对被辐照物进行辐照加工。其工作原理如图 1 所示，用来加速电子的高压一般为 70~300 kV，阴极组件的主要部件是多灯丝，由长度为 200 mm 的钨丝横向排列组成，间隔为 50~75 mm，灯丝的数量取决于束流横向宽度，该宽度一般为 500~3000 mm，反射电极相对于阴极加载 0~-100 V 电压。在阴极组件的下方有两组栅网，相对于阴极加载 0~200 V 电压，用来引出电子束，并使得电子束在加速前均匀化，以提高电子束沿横向的均匀度。束流引出窗是由铜栅格和 10 μm 厚的钛箔组合而成，铜栅格的间隙比一般为 5~6，即栅格空隙距离是栅格宽度的 5~6 倍，电子束从铜栅格间隙处传出钛箔射入空气中，达到被辐照的样品表面。

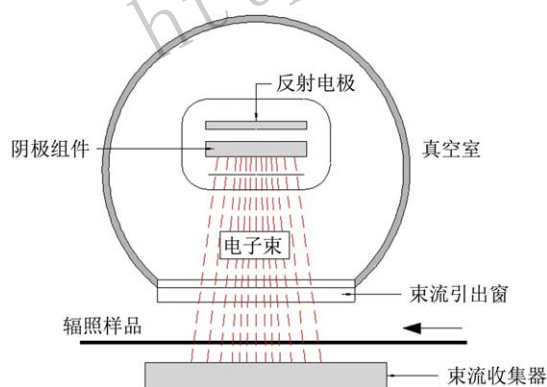


图 1 (在线彩图) 电子帘加速器工作原理示意图

3 理论模型

对于低能强流电子帘加速器，为了降低电子在引出窗上的能量沉积，实现更高效的冷却，需要使用厚度尽量薄的钛箔。目前，在保证一定机械强度和使用性能的前提下，工艺上能够实现的最小厚度为 8~10 μm ，所以本次模拟选用的钛箔最小厚度为 10 μm 。由于该电子

帘加速器还具有宽幅的特点，导致电子束的辐照面积非常大，若要对整个引出窗进行模拟，需要的事件次数非常多，而 EGS5 (Electron-gamma Shower 5)^[6] 能够模拟的事件次数是有限的，所以需要采取简化方法处理。鉴于多灯丝阴极系统和引出窗的设计是周期性的，所以可以在引出窗上截取几个周期进行模拟。理论建模如图 2 所示，由一束 3×10^5 个电子形成的平行均匀电子束垂直入射在引出窗的两个周期内 (每个周期包括一个栅格以及两个栅格间的钛箔)，并在检测面对出射电子的能散、透射率及均匀度进行了统计分析。但是，在两个周期内，在检测面上电子位置分布是一个高斯分布，无法直接得出其均匀度，因此本文采用由多个高斯分布叠加成坪区的方法来对束流均匀度进行研究。

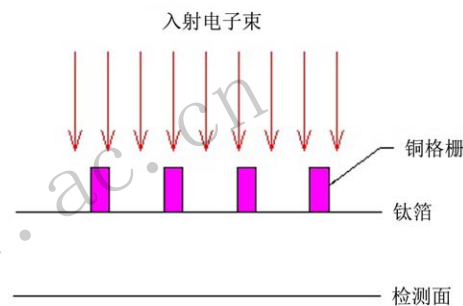


图 2 (在线彩图) 模拟建模示意图

4 软件介绍

EGS 是由美国斯坦福大学直线加速中心提供的一款蒙特卡罗程序包，它能模拟能量从低至几 keV 到高达几 TeV 的电子-光子在任意几何形状的电子簇射过程。本文选用的是由其最新提供的 EGS5 程序包，该程序包提供了 1~100 号元素及一些化合物与电子相互作用的截面数据，因此可以用来模拟电子束与钛箔及空气的相互作用，并能得到可信的结果。对于能量区间在几百 keV 的电子，EGS5 主要考虑的电子与物质的相互作用为电离和激发过程及与原子核的多重散射 (采用 Molière 模型^[7-8]) 过程。而散射过程中韧致辐射在低能区并不明显。由于 EGS5 对能量的设定，用户不能对能量低于 1 keV 的电子进行模拟和记录^[6]。

5 结果分析

EGS5 能模拟带电离子动能范围从几个 keV 至几个 TeV，对于低能区的电子与物质的相互作用能量损失，EGS5 主要考虑弹性库仑散射和原子与电子的非弹性散射 (电离和激发过程)。本次研究的模拟条件为 3×10^5 个平行入射电子垂直于引出窗入射，并分别

穿过 5, 6, 8, 10 cm 常温常压下的空气。电子在横方向上呈 1 cm 展宽的均匀分布。图 3 分别给出了 150, 200 和 300 keV 电子穿过 10 μm 的钛箔及不同距离的空气后

的能量分布曲线, 可以看出, 相同能量的入射电子穿过不同厚度的空气, 空气厚度越小, 电子束能散越低, 而且电子束能量越高。

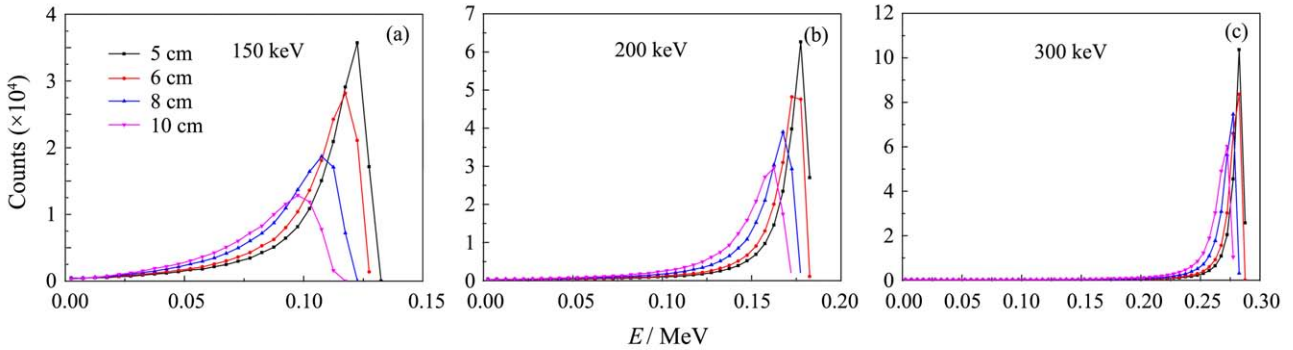


图 3 (在线彩图) 150, 200, 300 keV 电子束透过钛窗及不同厚度空气后的能量分布

对电子透射率的研究选取了在能谱曲线可积能区总电子数与入射电子数的比值:

$$\text{Ratio} = \sum_{i=n}^{\max} \frac{C}{N} \times 100\% , \quad (1)$$

式(1)中 n 为能量可积范围最低区间编号; \max 为最大区间编号; C 为各个区间计数; N 为入射电子数。通过模拟并方程(1)计算得到的不同能量电子束的透射率分布如图 4 中所示。

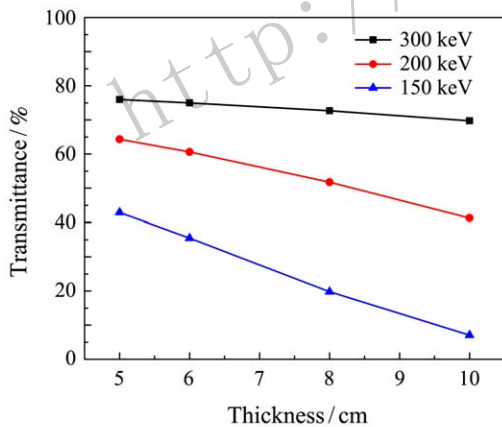


图 4 (在线彩图) 电子透射率分布图

由图 4 可以得出, 当钛箔厚度为 10 μm 时, 在 5 ~ 10 cm 空气厚度范围内, 对于能量较高的入射电子束, 空气厚度对电子透射率的影响相对较小, 而对于能量比较低的电子束, 电子的透射率随空气厚度的变化是非常明显的。对于入射能量在 200 keV 以上的电子, 其透射率可达到 50% 甚至更高。而对于能量低于 150 keV 的电子, 在空气厚度大于 8 cm 的情况下, 其电子透射率甚至不足 20%。

靶前电子束的均匀度也是影响辐照质量的关键条件, 束流不均匀度 δ 由 EJ/T971—1995《辐射加工用电子加速器通用规范》^[9] 定义为

$$\delta = \pm \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\% ,$$

式中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别为检测面各点的电子数密度。

本文对不同能量的电子透过不同厚度的钛窗后靶前电子束的均匀度, 结果如表 2 所列, 可以看出, 对于该能区的电子束, 由引出窗及空气所造成的电子束不均匀度均低于 $\pm 2\%$ 。

表 2 不同入射能量透过不同厚度钛窗的靶前电子均匀度

入射能量/keV	5 cm	6 cm	8 cm	10 cm
150	$\pm 1.4\%$	$\pm 1.4\%$	~	~
200	$\pm 1.2\%$	$\pm 0.9\%$	$\pm 1.2\%$	$\pm 1.3\%$
300	$\pm 0.9\%$	$\pm 1.1\%$	$\pm 1.1\%$	$\pm 0.7\%$

6 结论与展望

针对不同能量的均匀平行电子束穿过厚度为 10 μm 的钛箔及不同厚度的空气的情况, 本文分别从靶前电子束的能散、透过率及均匀度三方面进行了模拟分析。在引出窗外不同距离的参考面上, 电子束的分布均匀性差别不明显, 从 5 到 10 cm 处, 均匀性都能满足工业应用的要求, 但电子束在空气中的透射率和能量损失比较严重, 能散也越高, 而且出射的电子束能量越低, 透射率降低就越明显, 所以在设计辐照加工区时, 尽量将被辐照的薄膜靠近引出窗, 以提高电子束的利用效率。

文中模拟的入射电子束沿束流宽度方向是完全均匀且平行的, 并没有考虑多灯丝发射不均匀性所带来的不利因素, 实际上电子加速器引出的束流分布均匀性要

比模拟结果差很多, 一般来说, 综合多灯丝阴极组件结构以及引出窗结构特点, 将引出前电子束分布均匀性控制在一定范围以内, 并综合由钛窗引出过程对均匀性产生的影响, 使靶前电子束均匀性低于工业辐照标准 $\pm 10\%$ 的要求, 以便可以投入工业应用。

本文的模拟工作只涉及电子束透射率和分布均匀性。如果要引出超过 100 mA 的低能电子束, 由于电子束在引出窗上的沉积功率较高, 所以引出窗的冷却就显得至关重要, 下一步工作将综合考虑电子束能量、功率、钛箔厚度、引出宽度、格栅窗的占空比等诸多因素, 来模拟引出窗所需的冷却方式, 电子帘加速器的通用设计是水冷格栅, 但本方案可能增加强制风冷, 具体实现的方式需要根据模拟结果确定, 最终能设计出合理的用于大功率低能电子束的引出窗系统。

参考文献:

- [1] TODD A M M. Emerging Industrial Applications of Linacs[C]//in Proc. Intl. LINAC Conf. Chicago, IL, August 23-28, 1998: 1036.
- [2] POTTIER J. Nucl Instrum Meth B, 1989, **40/41**: 943.
- [3] ABRAMYAN E A. Industrial Electron Accelerators and Applications[M]. Washington: Hemisphere, 1988.
- [4] CAO Shuchun, ZHANG Zimin, LI Zhongping, *et al.* Nucl Tech, 2009, **32**(3): 206. (in Chinese)
(曹树春, 张子民, 李中平, 等. 核技术, 2009, **32**(3): 206.)
- [5] LI Guohua, TANG Huaping, Liu Jinsheng, *et al.* Prototype of Multi-filament Electron Curtain Accelerator, NST. 24(2013). S010201.
- [6] HIDEO H, YOSHIHITO N. THE EGS5CODE SYSTEM. Stanford Linear Accelerator Center. 2013.
- [7] MOLIERE G Z. Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen. I. Einzelstreuung amabgeschirmten Coulomb-Feld. Z. Naturforsch, 1947, 2a: 133.
- [8] MOLIERE G Z. Theorie der Streuung Schneller Geladener Teilchen. II. Mehrfach- und Vielfachstreuung. Z. Naturforsch, 1948, 3a: 78.
- [9] China National Nuclear Corporation. EJ/T 971-1995 General Specification for Electron Accelerator for Radiation Processing of China National Nuclear Corporation[S]. Beijing: China National Nuclear Corporation, 1995. (in Chinese)
(中国核工业总公司. EJ/T 971-1995 中国核工业总公司辐射加工用电子加速器通用规范[S]. 北京: 中国核工业总公司, 1995.)

Study of the Characteristics of Extracting Low-energy Broad Electron Beam into Air

CHAI Wandong¹, XIAO Jiahao^{2,3}, ZHANG Zimin²

(1. Chifeng University, Chifeng 024000, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of extracting low-energy electron beam from vacuum into air, EGS5 is used to simulate the energy loss, beam loss and spatial distribution uniformity at the irradiation position, which is 5 ~ 10 cm to titanium foil with different thickness. The simulation results show that the transmittance is directly related to the incident energy of low-energy electron. When the titanium foil thickness is 10 μm , the inhomogeneity about the energy beam spatial distribution is below 5% on the treatment plane 5 cm away from the titanium foil. And totally meet the industrial needs.

Key words: EGS5; electron curtain accelerator; energy spread; transmittance; uniformity

Received date: 21 Mar. 2016; Revised date: 26 Apr. 2016

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11264001)

Corresponding author: ZHANG Zimin, E-mail: zzm@impcas.ac.cn.