

# 国产工业用电子加速器及离子束表面处理装置的 研发与应用案例

王非 李学先 贾恩明 邱维维 范林霞  
(北京机械工业自动化研究所有限公司 北京 100120)

**摘要** S波段无损检测用电子直线加速器主要用于压力容器、石化等行业部件的无损检测。由于现场检测需求,开发了X波段电子直线加速器,其特点是灵活、轻便。北京机械工业自动化研究所(北自所)提供辐照电子加速器系统整体解决方案,包括加速器、传送线、生产管理系统、立体库以及厂房。电子帘加速器是北自所新研发的设备,目前包括两种型号,加速电压分别为200 kV、150 kV。离子束表面加工包括离子注入表面改性技术、磁过滤多弧离子镀膜技术与离子束辅助沉积镀膜技术,可在零部件的表层形成耐腐蚀、耐摩擦、防结冰、减少摩擦膜层,主要应用于轴承、空速管等航空领域。

**关键词** 电子直线加速器,无损检测,辐射加工,电子帘加速器,离子束表面处理

**中图分类号** TL50

**DOI:** 10.11889/j.1000-3436.2022-0079

## Development and application introduction of industrial electron accelerator and surface treatment implementation with an ion beam made in China

WANG Fei LI Xuexian JIA Enming QIU Weiwei FAN Linxia  
(Beijing Research Institute of Automation for Machinery Industry, Beijing 100120, China)

**ABSTRACT** The S-band electron linear accelerator developed for nondestructive testing is primarily used to inspect pressure vessels, petrochemical parts, and other industrial components. The X-band electron linear accelerator has been developed in RIAMB, owing to its advantageous flexibility and light weight and can be used for on-site testing. The integral solution of the irradiation electron linear accelerator system provided by RIAMB includes an accelerator, transmission line, production management system, automatic storage and retrieval system, and workshop. The electrocurtain accelerator is currently being developed in RIAMB. At present, it includes two models, with maximum accelerating voltages of 200 kV and 150 kV, respectively. The ion beam surface processing technology includes ion implantation surface modifications, magnetic filtration multi-arc ion coatings, and ion beam assisted deposition coatings. It forms a corrosion-resistant, friction-resistant, anti-icing, and friction-reducing film on the surface of parts such as bearings and pitot tubes, which are primarily used in the aerospace field.

**KEYWORDS** Electron linear accelerator, Nondestructive testing (NDT), Radiation processing, Electrocurtain accelerator, Surface treatment with ion beam

**CLC** TL50

粒子加速器最初是作为探索原子核的重要手段发展起来的。1919年,卢瑟福利用天然放射源实

第一作者:王非,男,1976年5月出生,1999年6月于北京机械工业学院获学士学位,高级工程师

通信作者:范林霞,高级工程师, E-mail: zxbflx@163.com

收稿日期:初稿 2022-08-03; 修回 2022-09-08

First author: WANG Fei (male) was born in May 1976, and obtained his bachelor's degree from Beijing Institute of Machinery Industry in June 1999, senior engineer

Corresponding author: FAN Linxia, senior engineer, E-mail: zxbflx@163.com;

Received 03 August 2022; accepted 08 September 2022

现了人类历史上第一次人工核反应,激起了人们利用设备加速粒子的愿望。20世纪30年代,人们建造了包括高压倍压加速器、静电加速器在内的各种加速器。1945年提出的稳相原理与二战期间发展起来的大功率微波源技术促进了电子直线加速器的发展。从20世纪50年代开始,加速器研究与应用开发开始超出基础研究领域,一批低能量大功率的加速器在工业、农业、医疗领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>,在工业领域主要分为金属加工(焊接、熔化、钻孔、硬化、薄膜沉积、表面改性等)、聚合物改性(交联、接枝、降解、刻蚀)、污染物降解(污水、污泥、废气)固化(单体/低聚物体系、复合材料)、无损检测、灭菌、食品保鲜等<sup>[2]</sup>。北京机械工业自动化研究所(简称北自所)是中国低能电子加速器的开拓者之一,一直在进行低能电子直线加速器的研发及应用。本文就北自所目前制造和研发的电子加速器和离子表面处理装置及其应用做一介绍。

## 1 电子直线加速器

### 1.1 无损检测用驻波电子直线加速器

射线无损检测(俗称“探伤”)从20世纪40年代就已经开始了,最初用静电加速器和共振变压器型加速器进行工业探伤,1956年行波电子直线加速器正式用于射线探伤,1968年开始,Varian公司首次将驻波电子直线加速器用于工业探伤<sup>[3]</sup>。

#### 1.1.1 S波段驻波电子直线加速器

北自所研发的DZ系列工业无损检测用驻波电子直线加速器广泛应用于压力容器制造、石油化工、重型机械、核电、铸造和军工等行业。具有1 MeV、2 MeV、4 MeV、6 MeV、9 MeV、12 MeV、15 MeV全系列加速器,可满足检测不同厚度范围工件的检测需要,用作射线照相、射线透视检查、计算机断层成像的高能射线源。无损检测用驻波电子直线加速器实际应用有其独特的特点。(1)工业现场与医疗、集装箱检测现场相比,温湿度大、电磁干扰强、设备启动频繁。(2)被检测工件厚度范围跨度大、形状不规则。(3)根据检测工艺的要求,需经常调整机头照射角度、调整出束剂量等。针对这些工业现场应用的实际特点,北自所开发了适应工业现场具有独特专项技术的加速器及其核心部件调制器。这些技术包括脉宽调制技术、高压匹配技术、防电磁干扰技术、防潮技术、关键器件保护技术等。应用这些技术能够保证电子直线加速器在现场稳定

可靠的运行,并且能有效提升关键器件的使用寿命,使用户减少在设备生命周期内的维护费用。图1为自行研制的调制器,图2为加速器无损探伤的应用现场。



图1 工业无损检测用驻波电子直线加速器调制器  
Fig.1 Modulator of standing-wave electron linac for nondestructive testing



图2 无损检测用驻波电子直线加速器应用现场  
Fig.2 Application scene of standing-wave electron linac for nondestructive testing

#### 1.1.2 X波段驻波电子直线加速器

传统工业现场广泛应用的电子直线加速器,其微波频率是2 998 MHz,属于S波段,该波段加速器具有稳定可靠、供应链成熟等优点,但同时也有尺寸大、重量大等特点,在日常使用时需专门辅助吊装设备,不适用于现代超大型石化容器、加氢反应器、核电安全壳、在线在役设备、战略武器装备、核潜艇、大型舰艇等新兴起的、需要进行现场检测的应用场景。

随着我国经济社会的发展,此类定制化、高端化的检测需求越来越多,北自所开发了基于X波段的小型轻量化加速器,是在传统S波段加速器基础上研发的新型高能射线源,采用X波段(9.3 GHz)器件、全固态脉冲功率源及全新的控制方式。与传统S

波段加速器相比：体积小、重量轻、适合现场应用，无需特定曝光室，图像分辨率高。与X射线机相比：能量高、穿透能力强，透照范围远大于射线机。与同位素放射源相比：检测灵敏度高、安全性高、穿透能力强。图3为研制的能量为6 MeV、X波段电子直线加速器的X射线头及微波单元，其技术参数见表1。



图3 6 MeV X波段驻波直线加速器的X射线头及微波单元  
Fig.3 X-ray head and RF unit of 6 MeV X-band standing wave linac

表1 6 MeV X波段驻波电子直线加速器参数  
Table 1 Technical parameters of 6 MeV X-band standing wave electron linac

电子束能量 / MeV	Electron beam energy	6
X射线束剂量率 / ((cGy·m) <sup>-1</sup> )	X-ray beam dose rate	≥ 600
焦点直径 / mm	Diameters of focus	<1.5
±7.5°处X射线束平面度 / %	X-ray beam flatness at ±7.5°	> 62
±7.5°处X射线束对称度 / %	X-ray beam symmetry at ±7.5°	<±5
照相检测灵敏度 / %	Radiographic inspection sensitivity	<1
检测钢铁厚度 / mm	Thickness of tested steel	50~280
单体最大重量 / kg	Maximum weight of unit	<80

## 1.2 辐射加工用10 MeV行波电子直线加速器 (简称“辐照加速器”)

用于辐射加工的加速器能量一般在80 keV~10 MeV范围内，加速器分为高压型及微波型，高压型加速器有高频高压、静电加速器、绝缘芯等；微波型包括行波、驻波、Rhodotron等<sup>[4]</sup>。

10 MeV行波电子直线加速器是微波型加速器，利用微波源产生的电场加速电子。10 MeV电子加速器可以进行医疗器械消毒灭菌、食品保鲜、材料辐射改性以及材料辐射固化等。辐照加速器用于包装

医疗器械的灭菌以及食品保鲜是其最典型应用，辐照加速器还用于先进纤维增强复合材料制造，法国Aerospatiale公司是第一家将电子束固化纤维增强复合材料方式应用于生产的公司。Aerospatiale制造大型纤维缠绕火箭发动机壳体，并用EB固化树脂。他们将火箭发动机的固化时间从大约一周缩短到不到8 h，同时降低了零件的残余应力。他们安装了一台10 MeV、20 kW的电子加速器来固化他们的火箭发动机，加速器可以直线移动，复合材料可以旋转，可以固化直径达4 m、长10 m的零件<sup>[5]</sup>。

北自所提供辐射加工用10 MeV行波电子直线加速器系统的整体解决方案包括加速器、传输线、生产管理系统、立体库以及厂房。北自所制造的DZ-10系列辐射加工用电子加速器关键零部件实现国产替代，大功率调制器自行研制，有效地降低制造成本，缩短供货周期，方便售后维修。微波系统采用真空绝缘，无充气段，降低设备复杂程度，主体结构紧凑，安装方便。加速管采用 $2/3\pi$ 模等阻抗行波加速模式，该加速模式特征阻抗高，束流崩溃阈值电流高，管体加工制造方便。控制系统操作方便，设备可一键启动，连续24 h工作。10 MeV、20 kW加速器的技术参数如表2所示。

表2 10 MeV辐射加工用行波电子直线加速器参数  
Table 2 Technical parameters of 10 MeV traveling wave electron linac for radiation processing

电子束能量 / MeV	Electron beam energy	10±0.5
平均束流强度 / mA	Average electron beam intensity	20
平均功率 / kW	Average power	20
能量不稳定性 / %	Energy instability	≤5
束流不稳定性 / %	Intensity instability	≤5
扫描宽度 / mm	Scanning width	600~1 000
扫描不均匀度 / %	Scanning uniformity	≤10
扫描频率 / Hz	Scanning frequency	1~10

北自所提供整套辐照生产线自动控制及生产管理系统，实现电子加速器、输送线的自动控制。系统选择加工产品后，根据配方智能匹配加速器束流参数和束下系统传输速度等，自动控制加速器辐照生产线运行。生产过程中，持续监视辐照装置的运行参数并记录，辐照加工记录可追溯。辐照生产管理系统对辐照过程、工艺、设备、库存等信息，进行数据记录、处理、存储、汇总和查询，实现辐照生产管理的数字化、自动化和信息化。图4为辐照加速器应用现场。



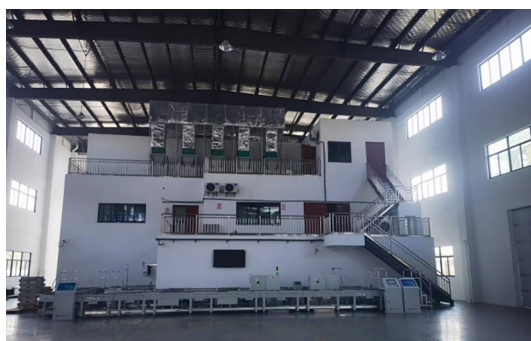


图4 10 MeV 行波辐照加速器现场应用  
Fig.4 Application scene of 10 MeV travelling wave linac for radiation processing

## 2 辐射加工用电子帘加速器

电子帘加速器起源于1970年, Sam Nablo 创建了能量科学公司(ESI), 并基于一名 ESI 工程师 Bertram Quintal 提出的想法开发了电子帘辐照装置。1975年, RPC 工业公司的 Sherman Farrell 开发了多阴极并联技术, 并发展成 PCT 电子束及集成有限责任公司(PCT Ebeam and Integration, LLC)的电子束处理集成系统<sup>[6]</sup>。电子帘加速器作为一种低能加速器装置, 广泛应用于各种食品和工业包装市场, 如卷筒纸胶印、柔版印刷和凹版印刷机上的油墨和/或涂层, 如上光油的固化, 可对印刷表面的油墨进行保护, 并有利于产品的美观。EB 固化还用于木饰面, 如门、家具的前面板等, 另外用于压敏胶、固化层压黏合剂和交联薄膜等。

北自所从20世纪80年代开始电子帘加速器的研制, 电子枪阴极从最早期的长单阴极发展到长多阴极, 到目前采用多阴极并联, 图5为现有的电子帘加速器。目前研制的电子帘加速器可分为两种, 加速电压分别为200 kV 和 150 kV, 技术参数如表3所示, 辐照有效宽度可根据需要进行定制。



图5 电子帘加速器  
Fig.5 Electrocurtain accelerator

表3 电子帘加速器参数  
Table 3 Technical parameters of electrocurtain accelerator

最高加速电压 / kV Maximum accelerating voltage	200	150
最大表面剂量率 / ((kGy·m) <sup>-1</sup> ) Maximum surface dose rate	6 000	12 000
有效辐照宽度 / mm Maximum uniform beam width	500 或(定制) 500 or custom-made	1 250 或(定制) 1 250 or custom-made
不均匀度 / % Cross-web uniformity	≤9	≤9
束流不稳定性 / % Instability of electron beam intensity	≤2	≤2
能量不稳定性 / % Instability of electron beam energy	≤2	≤2

## 3 离子束表面处理设备及应用技术

离子束表面处理技术是指在真空中利用离子束技术改变材料表面的形态、化学成分、组织结构和应力状况, 赋予材料或工件表面以特定的性能, 使其表面和芯部材质有最优组合的系统工程, 能最经济有效地提高产品质量和延长使用寿命。根据处理表面的功能性可分为3类: 离子注入表面改性技术、磁过滤多弧离子镀膜技术与离子束辅助沉积镀膜技术。

### 3.1 离子注入技术

离子注入技术是将离子化后的固体或气体离子进行高压加速、引出, 注入到材料表面, 引起材料表面成分、结构、化学组态的变化, 进而改变材料表面的物理、化学及机械性能的表面强化技术。可以对所有金属基材、非金属基材进行离子注入。离子注入元素的种类原则上不受冶金学的限制, 引进的浓度也不受平衡相图的限制, 元素周期表中的所有稳定元素几乎都可以注入<sup>[7]</sup>。北自所离子注入设备的真空腔室直径950 mm, 高1 000 mm, 引出离子能量可达100 keV, 引出束流为20 mA。离子注入设备及原理图见图6。该技术能够在保持原产品的尺寸精度前提下, 显著提高材料寿命, 以及耐磨、防腐等性能; 主要应用于航空航天发动机用各类型轴承及其他精密零部件上, 典型应用案例: (1)对XX轴承离子注入后, 耐腐蚀性能提高10倍以上; (2)对XX轴套离子注入后, 耐磨损性能提高2倍以上。

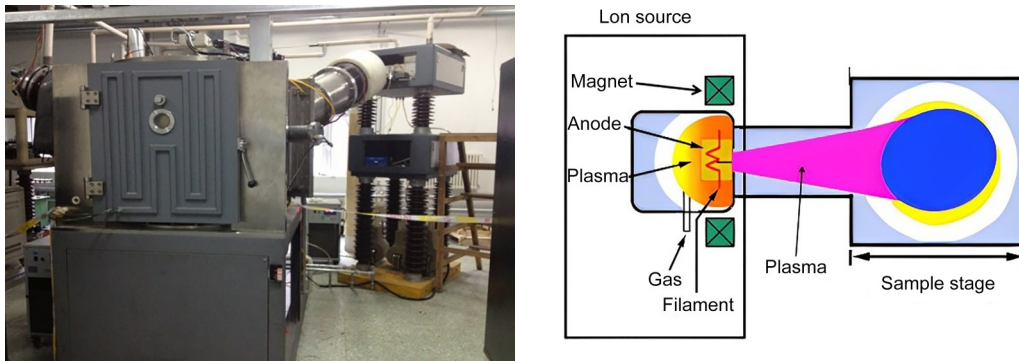


图6 离子注入设备(a)及离子注入设备原理图(b)  
Fig.6 Ion implanter (a) and schematic diagram of ion implantation equipment (b)

### 3.2 磁过滤多弧离子镀膜技术

磁过滤多弧离子镀膜技术是采用在真空中电弧放电方法,使金属材料蒸发并电离,形成等离子体,通过添加磁场束缚对等离子体运动,使离子均匀地沉积在施加负电位的工件表面上,形成沉积层。北自所磁过滤多弧离子镀膜设备真空腔室直径600 mm,高600 mm,包含两个磁过滤系统:直管过滤系统和90°弯管过滤系统,弧压20~100 V,弧流80~120 A,偏压可加至1 500 V。磁过滤多弧离子镀膜设备及原理图见图7。

该技术可沉积材料种类多,效率高,膜层均匀、致密,可以用来制备抗疲劳、耐蚀、耐磨、抗冲击、疏水等功能性膜层。主要应用于提升叶片、齿轮、钻头特种机械复杂结构零部件表面强化涂层的制备。典型应用案例包括:(1)在烟气轮机叶片表面制备金属-氮化物陶瓷涂层,提高烟气轮机叶片的耐腐蚀、抗气蚀的能力,减少烟气轮机叶片更换的频率;(2)在空速管表面制备疏水膜层,该膜层耐温600 °C以上,提高了空速管的防结冰性能,除冰能量损耗降低了10%以上。

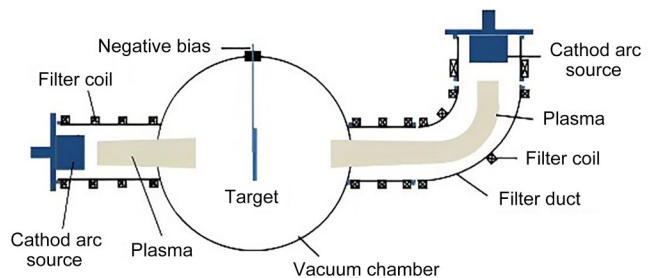


图7 磁过滤多弧离子镀膜设备(a)及磁过滤多弧离子镀膜设备原理图(b)  
Fig.7 Multi-arc ion plating equipment (a) and schematic diagram of magnetic filtration multi arc ion plating equipment (b)

### 3.3 离子束辅助沉积镀膜技术

离子束辅助沉积镀膜技术是通过磁控溅射在工件表面沉积形成膜层,然后利用具有不同能量的离子束,对工件上的膜层进行原位轰击、反冲注入、溅射等复合改性处理。北自所离子束辅助沉积镀膜设备真空腔室直径1 200 mm、高1 250 mm,离子源引出离子能量100 keV,束流20 mA,磁控溅射源电

压1 500 V、电流5 A,可溅射各类金属靶材、陶瓷靶材,制备金属膜层和各种陶瓷膜层。离子束辅助沉积镀膜设备及原理图见图8。该技术可以形成较强的混合界面,制备的膜层结合强度好,均匀致密;目前主要应用于制备发动机传动齿轮、低温高速轴承等零部件的减摩、自润滑膜层。已开发软金属银、铜、铅和WS<sub>2</sub>复合固体润滑膜,制备膜层厚度0.2~2 μm,干摩擦系数最低为0.045。

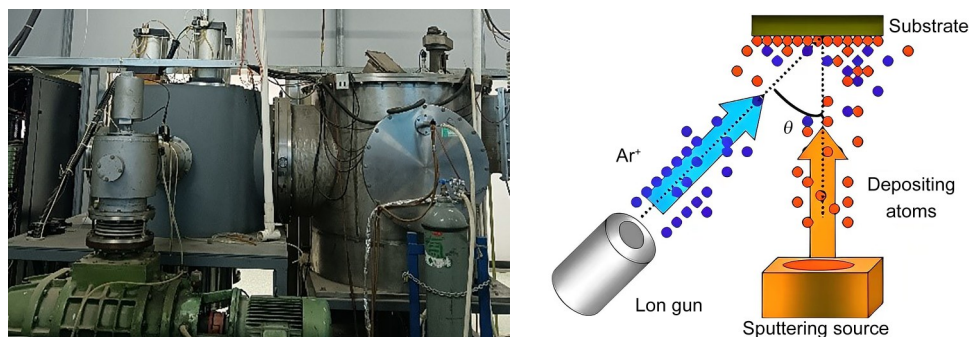


图8 离子束辅助沉积设备(a)及离子束辅助沉积原理图(b)  
Fig.8 Ion beam assisted deposition equipment (a) and principal of Ion beam assisted deposition (b)

#### 4 总结

北京机械工业自动化研究所有限公司是我国低能加速器事业的开拓者之一,在国内率先开展与离子束、电子束和加速器有关的重大电气物理设备的研制和工业应用研究,先后研制成功用于工业无损检测、辐射加工、医疗、科研、教学的7类13种百余台加速器和多种成套设备及测试仪器。目前北京机械工业自动化研究所有限公司制造以及正在研发的设备包括无损检测用驻波电子直线加速器、无损检测用小型轻量化的驻波电子直线加速器、辐照加工用行波电子直线加速器、电子帘辐照装置、离子注入机、磁控溅射镀膜机等多种粒子加速器设备。为我国工业发展提供了无损检测用电子直线加速器、10 MeV辐照加速器、电子帘加速器以及离子束表面改性技术。为我国压力容器、锅炉、核电、火电、铸造等行业、消毒灭菌行业、电子束固化以及军工、航天行业做出了贡献。北自所将继续研发和升级产品,为实现我国双碳目标贡献力量。

**作者贡献声明** 王非提出了本文的主体思路;贾思明完成了本工作中无损检测用驻波电子直线加速器部分的书写工作;李学先完成了辐照加工用10 MeV行波电子直线加速器部分的书写工作;范林霞完成了电子帘加速器部分的书写工作;邱维维完成了离子束表面处理部分的书写工作。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

#### 参考文献

1 陈佳洱. 加速器物理基础[M]. 北京: 原子能出版社,

1993: 2-3.

CHEN Jiaer. Physical foundation of accelerator[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1993: 2-3

2 Mehnert R. Review of industrial applications of electron accelerators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 1996, **113**(1/2/3/4): 81-87. DOI: 10.1016/0168-583X(95)01344-X.

3 林郁正. 低能电子直线加速器原理: 清华大学工物系培训材料[A]. 北京: 清华大学, 1990: 3-8.

LIN Yuzheng. Principle of low energy electron linear accelerator: training material prepared by department of engineering physics[A]. Beijing: Tsinghua University, 1990: 3-8.

4 Drobný J G. Radiation technology for polymers[M/OL]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2021[2022-08-03]. <https://doi-org.proxy.library.carleton.ca/10.1201/9780429201196>.

5 Goodman D L, Palmese G R. Curing and bonding of composites using electron beam processing[EB/OL]. (2015-01-30)[2022-08-03]. <https://www.researchgate.net/publication/265399203>.

6 Berejka A J. Prospects and challenges for the industrial use of electron beam accelerators[EB/OL]. (2009-01-01)[2022-08-03]. <https://www.researchgate.net/publication/268253955>.

7 张通和, 吴瑜光. 离子注入表面优化技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 5.

ZHANG Tonghe, WU Yuguang. Ion implantation surface optimization technology[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1993: 5.