

# 加速器辐射技术的进展

## Progress in Radiation Technology of Accelerator

朱惜安

(机械工业部北京机械工业自动化研究所,高级工程师 北京 100011)

近几年来,尤其是“八五”期间,我国的辐射技术在工农医各方面的应用取得了较快的发展。如生产线上辐照加工用的加速器,1990年为10台,束功率400多千瓦,到1995年底已超过40台,束功率1500千瓦,年平均增长率约30%,辐射加工年产值已超过9亿元(含同位素辐照),而且也出现了一些盈利大户。在市场经济条件下,企业和地方的投资相对增长,改变了过去科研院所、大学等事业型为

主的投资方向,直接面对国民经济的主战场,产业化规模明显扩大。

加速器辐射技术在我国目前应用较为成熟的领域见表1。

在农业辐射育种、食品辐照、医疗用品消毒、灭菌等领域主要还是放射性同位素,有待加速器去竞争。另外也出现了一些可能扩展的应用领域和对加速器的一些新的需求。

表1 加速器辐射技术在我国较为成熟的应用领域

| 应用领域                | 加速器类型     | 粒子束 | 能量 MeV   | 单台束功率 kW       | 说明               |
|---------------------|-----------|-----|----------|----------------|------------------|
| 辐照加工电线、<br>电缆、热收缩管膜 | 以高压直流型为主  | e   | 0.2~3    | 10~120         | 束功率居各类加速器的首位,45台 |
| 肿瘤放疗                | 微波直线加速器   | e、X | 4~20     |                | 总台数居首位,300台      |
| 无损检测                | 微波直线加速器为主 | X   | 2~15(25) | <1(1~60Gy/min) | 28台              |

### 一、在环保方面的应用

主要用于污水和有害烟气的处理。利用电子束对燃煤产生的有害烟气进行处理,最早是1970年由日本提出。20多年来从实验室研制到工业示范型试验,日、美、德、俄、波兰等国已先后建成20多套处理装置。处理量从几十 $\text{m}^3\text{N/h}$ ,到几万 $\text{m}^3\text{N/h}$ 。国际原子能机构曾在1986年和1991年两次召开部分国家的国际会议讨论此项技术,并列为建议推广项目。我国能源以火电为主,燃煤烟气中 $\text{SO}_2$ 及 $\text{NO}_x$ 造成的大气污染,使一些地区酸雨频繁,造成以百亿计的严重经济损失。为此电子束处理烟气已列入我国21世纪议程的优先发展项目。

电子束对烟气进行辐照并加入 $\text{NH}_3$ 可以脱除 $\text{SO}_2$ 及 $\text{NO}_x$ ,分别达到90%和80%以上。同时可生成硫酸铵混合化肥,不产生二次废料。与可以同时脱硫脱硝的化学方法比较具有一定的技术经济优势。目前经国家计委立项,我国电力部与日本荏原公司合作,正在成都热电厂建造处理相当于10万千瓦燃煤烟气的工业示范工程,该系统所需加速

器的束总功率达到1200千瓦以上(相当于我国目前拥有电子束辐照加速器总功率的80%),加速器的主要性能指标见表2。可以看出其中不少是创记录的要求,至今世界上还没有现成的产品,虽然技术上可行,其难度相当大。我国到1995年火电总装机为1.49亿千瓦,年新增约1000万千瓦。如果该工程示范获得成功并推广,可以想象所需加速器的规模!

表2 处理烟气用辐照加速器的主要性能要求

|          |                         |
|----------|-------------------------|
| 电子能量 MeV | 0.8                     |
| 束流强度 mA  | 1~400 可调,能在5~100%范围连续运行 |
| 单台束功率 kW | >300                    |
| 直流高压电源形式 | 油浸变压器式绝缘芯变压器            |
| 输出功率     | 800kV×(400mA×2),供两台加速器用 |
| 效率       | >92%                    |
| 扫描宽度 mm  | 2400(宽度变化<5%)           |
| 引出窗      | 双重钛窗,强迫风冷,寿命>8000小时     |
| 屏蔽       | 自屏蔽                     |
| 年运行时间    | >6500小时                 |

## 二、大厚度的辐照件需要高功率 X 线

包括食品及医疗用品的辐射照消毒、灭菌和杀虫。由于辐照不产生高温、无添加物、易于保持产品原有性状等特点,尤其作为产品的最后一道工序,具有其它方法难以实现的优点,因此应用范围和规模正迅速扩大。鉴于经过最后包装的产品一般体积较大,电子线(食品辐照能量不能高于 10MeV)已不能适应,必须用 X 线,目前多数采用  $\text{Co}^{60}$  源的  $\gamma$  线辐照,因此迫切需要发展经济实用的高功率 X 线源。由于电子打靶转换成 X 线的效率低(5MeV 时转换成有效的 X 线约为 8%,10MeV 时约为 15%),这已成了目前从电子加速器获得高功率 X 线的一大难题,有待于科技界寻找出路。选用高 Z 靶和最佳靶厚的潜力有限,能量又有限制,现实的途径是增加电子加速器的电子束功率,各国先后发展了如下一些新的产品和模型。

表 3 Rhodotron 系列加速器主要参数

| 型号              | 能量 MeV | 电子束平均功率 kW | 高频频率 MHz(cw) | 束流相对于高频功率的效率 % |
|-----------------|--------|------------|--------------|----------------|
| Rhodotron TT100 | 5,10   | 35         | 215          | 32             |
| Rhodotron TT200 | 5,10   | 80         | 215          | 37             |
| Rhodotron TT300 | 5,10   | 150        | 215          | 49             |

(2)加拿大 AECL 开发的 IMPELA10/50,L 波段电子直线加速器,主要参数见表 4,这是一种利用增加调制脉冲宽度和重复频率来加大负载因子,从而提高平均输出束功率的装置。

表 4 IMPELA 10/50 的主要参数

|               |                  |
|---------------|------------------|
| 能量:10MeV      | 脉冲宽度:200 $\mu$ s |
| 电子束功率:50kW    | 负载因子:5%          |
| 微波频率:1300MHz  | 效率:束功率对微波功率 35%  |
| 脉冲重复频率:250pps |                  |

(3)感应直线加速器。这是一种利用高的脉冲束流来获得大的平均束流功率的装置,例如能量为 10MeV、负载因子小到  $10^{-6}$  时,脉冲束流数万安培下,就可达到数百千瓦的平均束流输出功率。

## 三、轻便、紧密结构型加速器 主要供便携、车载和在线使用

1. 便携式加速器多数是为了射线无损检测发展起来的。80 年代,前苏联曾推出了用于探伤的便携式感应加速器,照射头重 90 多公斤,能量为 4、6MeV,剂量率分别为 1 伦/分·米和 3 伦/分·米,虽然剂量率太小,实用性不大,可至今仍在推销。美

### 1. 直流束

目前最高水平是利用 Dynamitron,可得到的最高能量为 5MeV,电子束功率为 200kW,转换成 X 线的有效功率为 16kW,相当于 1 兆居  $\text{Co}^{60}$  放出的  $\gamma$  射线功率(1kW 相当于 6.7 万居  $\text{Co}^{60}$  放出的  $\gamma$  射线功率),二者相比,加速器还有一定的竞争力。对直流束而言,欲再提高电子能量向 10MeV 靠近;但同时保持高功率和高的经济性目前有很大的困难。

### 2. 脉冲 X 线束

(1)比利时 IBA 公司 1995 年 6 月推出了 Rhodotron 系列的加速器新产品,主要参数见表 3。它是利用同轴谐振腔形成的连续波径向电场,电子由设置在腔外腰部对称平面内的电子枪注入,并用多个偏转磁铁使电子多次返回,沿径向通过谐振腔而多次加速,其轨迹如图 1。最后获得的是对应于连续波频率的高频脉冲束,它的不足是能量不能调变。

国 Schonberg 和 Varian 公司先后推出了 4、6MeV 便携式无损检测用加速器(参数见表 5),主要用于大型工件现场焊装后的检查、大型设备在用户现场的定期检查、大型固体火箭发动机发射现场的检查

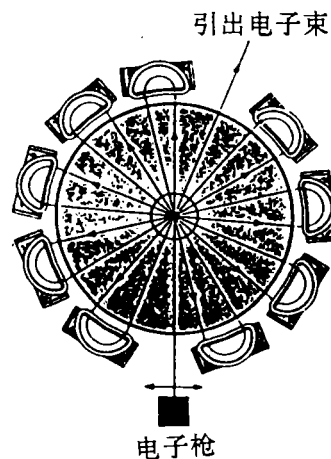


图 1 Rhodotron 中的电子轨迹

等。还有的要求将加速器能量提高到 9、15MeV,无疑照射头将会加大加重,便携困难,因此 Varian 又提供了 9MeV 车载模式,可长距离运输后在现场投入使用,其特点是在防震和环境适应能力方面作了特殊处理。

表 5 便携式无损检测用加速器

| 厂商        | 能量 MeV | 剂量率 Gy/m.m | 焦点尺寸 mm      | 辐射头重 kg |
|-----------|--------|------------|--------------|---------|
| Schonberg | 4,6    | 100,300    | $<\varphi 2$ | 25,41   |
| Varian    | 4,6    | 400,800    | $\varphi 2$  | 45      |

2. 与 PET(正电子 CT)配套用小型等时性加速回旋加速器。PET(或 PECT)用于医学诊断,不仅能作脏器成像,并且能进行动态和代谢过程测定,受到各国的重视,作为配套使用的小型等时性回旋加速器,主要用来生产 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ 等超短寿命正电子发射同位素,一般直接装在医院,要求加速器紧凑、方便、安全、可靠、自屏蔽,而且自动化程度要高。国外已有不少厂家生产,如比利时 IBA 的 Cyclone18/9,瑞典 Scanditronix 的 MC17F,美国 Positron 的 Clinitron,德国 Siemens/CTI 的 RDS112,日本住友、日本制钢、俄罗斯等均有生产,加速质子的能量一般在 12MeV 左右,负质子注入后经过加速、剥离后引出打靶,个别采用超导磁体。国内多家医院正在酝酿引进,亦有单位准备研制开发,目前尚属空缺。

3. 食品辐照的逐渐放开,包括粮食、肉类、鲜果、蔬菜等的贮存、保鲜处理,使用量大、面广,且有些带有季节性,不可能都集中到少数辐照中心。国内有用户提出希望能提供车载可移动式加速器辐照装置的要求,同样这种轻型装置还可用于医院及企业生产线上。能量在 3~5MeV,能提供电子及 X 线,

电子束功率在 10~20kW。车载直流高压型是很难做到的,利用射频的多次加速装置,效率低一些,但技术上较有可能。经济上要做到有竞争力也是很大的难题,目前仅是设想。

#### 四、加速器无损检测技术的发展

基于计算机数字图像处理技术及射线探测技术的发展,利用高能 X 线进行透照获取对象内部信息的工业无损检测技术取得了革命性的飞跃。高能 X 线实时图像处理系统和工业 CT 相继出现,并在此基础上可以获取三维的立体透视图象,而且已从工件的检查扩展到港口、机场的大型货柜的检查,检测的灵敏度、速度和范围都明显地提高和扩大了,这就相应导致了对加速器辐射源需求的增加。表 6 显示了设置在我国文锦渡和皇岗的两套大型货柜检测系统及清华大学“八五”攻关完成的国产集装箱检测系统(见封底彩图)用的加速器参数。表 7 显示了“八五”完成的无损检测用加速器及其图像处理系统(见封二彩图)参数,在主要性能上与国际同类产品水平相当。

表 6 我国大型货柜检测系统用加速器主要数据

| 地点   | 加速器      | 型号       | 能量 (MeV) | X 线剂量率 (Gy/min.m) | 焦点 (mm)     |
|------|----------|----------|----------|-------------------|-------------|
| 文锦渡  | 电子直线     | Vanguard | 8        | 20                | $\varphi 2$ |
| 皇岗   | 电子直线(驻波) | L-3000A  | 6,9,11   | 30                | $\varphi 2$ |
| 清华大学 | 电子直线(行波) |          | 6,9      | 40                | $\varphi 2$ |

表 7 我国“八五”攻关项目无损检测用加速器及图像处理系统参数

|                                                                                                 |                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 电能量:9MeV<br>X 线剂量率:30Gy/min.m<br>焦点: $\varphi 2\text{mm}$<br>检测厚度:70~350mm(钢)拍片,70~250mm(钢)实时图像 | 检测灵敏度:<br>拍片:0.9%~0.4%<br>实时图像:ASTM E142 1--1T(200mm 钢) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|

前面粗略地介绍了加速器辐射技术扩大中的一些应用及对加速器的要求,很多方面还未涉及,但我们也不难看到低能实用型加速器还是大有可为,当然目前从管理机制、队伍、资金等方面还存在不少问题和困难。我们不能亦步亦趋地在技术上跟别人走,必须结合国情创造性地走自己的路。

#### 参考文献

[1]Norman W. Frank, Radiat. Phys. Chem., Vol 40, No. 4, 267~272, 1992

[2]Y. Jongen, et al. N.I.M., B89, 60~64, 1994

[3]赵文彦、侯福珍,第四届全国工业辐照加速器及辐照应用技术交流会论文集, p1~7, 1995. 9

[4]朱惜安、黄正新,第四届全国工业辐照加速器及辐照应用技术交流会论文集, p8~15, 1995. 9

[5]朱惜安、过骥千,中国电工技术学会迈向 21 世纪的电工科技学术会议论文集, p408~414, 1996. 6

(责任编辑 王宏章)