

粒子加速器及其应用

科学技术文献出版社重庆分社

1980

粒子加速器及其应用

中国科学技术情报研究所重庆分所 编辑
科学技术文献出版社重庆分社 出版
重庆市市中区胜利路91号
四川省新华书店重庆发行所 发行
重 庆 印 制 第 一 厂 印 刷

开本：787×1092毫米1/16 印张：15 $\frac{1}{4}$ 字数：40万
1980年8月第一版 1980年8月第一次印刷

印数：

科技新书目：173—133

书号：13176·72 定价：1.60元

(限国内发行)

1 ~
2

目 录

——综 述——

国外低能加速器及其应用	(1)
慕尼黑 MP 串列加速器的改进和结果	(15)
国外离子注入机现状	(21)
多电荷离子源述评	(29)

——加速器设计和技术——

BF—5 型辐照电子直线加速器的物理设计	(35)
高梯度驻波电子直线加速器的设计	(41)
关于精确计算盘荷波导所用变分公式的严格证明	(44)
用变分法计算电子直线加速器的盘荷波导尺寸及物理量	(48)
De—Qing 电路参数的理论计算	(56)
医用电子直线加速器偏转磁铁的设计	(60)
YG—25 型医用电子感应加速器	(63)
国产工业探伤用电子感应加速器	(69)
电子感应加速器密封真空盒的研制	(73)
600 KV 高压倍加器	(79)
400 keV 重离子注入机	(84)
工业辐照用强流电子加速器的研制及应用	(89)
0.3MeV 辐照加速器 三相绝缘芯变压器的设计	(95)
大功率电子辐照加速器的电子光学设计	(100)
剂量标准用电子回旋加速器的设计	(105)
剂量标准用电子回旋加速器粒子动力学计算	(109)
螺旋波导高频损耗	(115)
螺旋波导加速腔的静态试验	(119)
常温螺旋线谐振腔增能器	(125)
光阑系统性能的分析 and 参数的选定	(129)
用三靶测定发散度椭圆的方法的分析	(133)
扇形回旋加速器中非线性共振和越隙共振	(134)
电子回旋加速器电子源—硼化镧阴极简介	(139)
BJ—10 医用电子直线加速器的电子枪	(143)
辐照加速器电子枪的设计和实验结果	(148)
强流重离子源	(155)

离子源束流品质的改善	(163)
高频离子源的改进	(172)
均匀盘荷波导谐振频率的测量	(175)
BF—5 辐照电子直线加速器非均匀加速管相速的测量及调整	(180)
S 波段10兆瓦大功率测试系统	(187)
束流输运小型专用模拟计算机	(192)
500 KV 毫微秒脉冲电源	(197)
高精度直流测量装置的试制	(205)
6 千瓦稳流电源的研制	(208)
160KV直流高压分压器	(211)
静电加速器加速管的修理	(213)

——加 速 器 的 应 用——

电子感应加速器韧致辐射照相探伤方法	(215)
25MeV 电子感应加速器应用工作报告	(224)
电子直线加速器在辐射加工中的应用	(225)
125千电子伏 离子注入机及其初步应用	(229)
电子直线加速器治疗特点和临床的初步观察	(233)
鼻咽癌的高能X射线放疗	(237)
国产BJ-10型 电子直线加速器临床应用概况	(240)

国外低能加速器及其应用

杨成林 方承炜

张延令

(一机部机械工业自动化所)

(中国科技情报所重庆分所)

摘要: 本文简述了各种低能加速器的性能及主要指标; 低能加速器在工业、农业和医疗卫生等方面的应用, 展望了低能加速器今后的发展。

一、概 述

低能加速器是指被加速的带电粒子最终能量低于100兆电子伏的加速器。自从1932年利用高压倍加加速器实现了第一次人工核反应以后, 加速器就成了研究原子核的有力工具。在第二次世界大战爆发之前, 美国和欧洲正在建造数十台高压加速器、回旋加速器、高频加速器和电子感应加速器, 进行各种研究工作。战争进行期间, 为了对重武器的材料进行检查, 共振变压器型加速器和电子感应加速器开始作为商品在市场上出售。战争结束后, 由于射线在石油化工及医学、生物学等方面的应用, 电子直线加速器、高频高压倍加器、高压倍加器、低压加速器也相继出现在市场上。据E. Alired Burril统计, 从二十世纪三十年代初期以来, 到1970年, 全世界使用的各种低能加速器约2400台, 其中约有一半在美国(美国有离子加速器530台, 电子加速器661台, 共计1191台)。

到1972年, 美国拥有能量为0.03—33兆电子伏的低能加速器2599台(离子加速器858台, 电子加速器1741台, 值得注意的是, 能量范围在0.03—0.3兆电子伏的为1586台, 其中离子加速器566台, 电子加速器1020台, 约占总数的五分之三), 占全世界总数的三分之二。

目前世界上约有50家公司从事加速器生产, 所生产的加速器种类有十多种, 一部分有了系列产品, 以供应各方面的需要。

二、低能加速器的种类及其性能

目前世界上所生产的低能加速器种类很多, 按加速原理及用途大致有以下几种。

1. 高压加速器

这类加速器目前的能量范围一般为0.1—4兆电子伏, 电子束流为1—250毫安, 可获得较大的输出功率, 在辐射化学方面用得最广。这类加速器根据获得高压电场的方式大致可分为如下类型。

① 充油变压器或充气变压器系统

这是采用普通的高压变压器输出整流, 或者二倍压的办法来获得高压。变压器是装在用油或者压缩气体(如SF₆或N₂+CO₂等等)绝缘的钢筒内。利用这种系统, 可以用电缆供给多至三个分开的加速管提供0.1—1兆伏, 总束流达250毫安的功率。因此被广泛用来进行辐射处理。

② 绝缘磁芯变压器

它是一个工作在50—60赫频率的三相变压器, 这个变压器的次级线圈和铁芯被分成许多层, 层间用聚合物薄膜绝缘。在顶部和底部用铁轭连接起来, 这样形成的磁路具有高的电介质强度和低磁阻。这种变压器的每层被分成为三相, 各相由倍压产生约18—20千伏电压, 将这些相和层中的整流电压串联后, 可产生高达3兆伏电压。这种结构可将电源交流功率的65—75%转变成束流功率。

绝缘磁芯变压器也可以是单相的, 如美国高压工程公司曾用这种结构生产了1兆电子伏、25毫安的加速器, 采用10千周电机供电。这类结构要求采用频率变换器, 结构也较复杂。

变压器是放在充高压绝缘气体的钢筒内, 可以给多至三个分开的加速管供电, 已有200—750千伏, 总输出电流200毫安的产品出售, 也有将变压器和加速管封闭在一个高气压钢筒内的, 能量在1兆电子伏以上的加速器。这类加速器也主要用于辐照处理。美国与荷兰的高压工程公司主要生产这类加速器, 已有系

列产品(参见附表1)。

苏联最近设计的一种类似的加速器,它利用了绝缘磁芯技术,但每层不用整流,这样其最终电压就有起伏,当电压起伏接近其电压最大负值时,电子枪被接通,以获得峰值电压为2.5兆伏的脉冲束流,其平均束流功率可达40千瓦。

③ 共振变压器

这种变压器系统是利用端部的电容和变压器次级线圈的电感,与180赫电机供电频率发生共振,在次级线圈的一系列没有铁芯的抽头上,产生一个大约为8.5千伏的峰值电压,当电压超过峰值负值的80%时,电子枪发射电子。利用这种系统可获得1—2兆伏电压,其最大平均束流约6毫安。这种加速器可用于电缆的辐射处理和医疗用,约生产了200台,从1968年起已停止出售这种加速器,它们已被功能较高的加速器所替代。

现代共振变压器是把初、次级线圈的固有频率调到几千到几十千赫频率范围,重复频率约50—100脉冲/秒或更高的短脉冲(Tesla变压器)下工作的。这一系统的优点是,高压持续时间很短暂,这样就可以放宽对绝缘的要求,同时可减小加速器的体积,减少对防护屏蔽的要求。这种加速器的瞬时剂量率比平均剂量率高很多,在某种场合是不利的。这种加速器可获得3兆伏的高压,平均束流功率达30千瓦。

④ 倍加型系统

串联倍加电路和并激倍加电路都是利用整流元件和电容器,把低压交流电变成高压直流电。五十年代后,由于采用了固体整流元件、高频供电、对称倍加电路及高压气体绝缘等措施,使高压倍加器结构紧凑,缩小了体积,大幅度减小了电压降落及纹波,并可获得更高电压,性能也有了很大地提高。

六十年代初,美国的Cleland等利用结构零件本身的分布电容,采用高频供电,解决了电容器耐压及能量耦合问题,制成了1兆伏以上的大功率并激倍加器“地那米”(Dynamitron)。这种倍加器的电路在原理上比串激倍加器的电路更优越。由于高压发生器所需的电容元件全部是由金属电极之间的电容和其间的绝缘气体所形成的,所以总电容量很小,在系统中储存的能量也很微小,又由于对各整流级的供电是并联的,可以同时充电,因此电压降落和纹波很小,这样其性能就优越多了。由于其内部阻抗小,倍加的级数可以增加。

瑞士汉弗莱公司生产的对称倍加器,电路共20级,每级200千伏,利用高压气SF₆气体绝缘,用10千周电机供电,电压达4兆伏时,可产生的正离子束流为5毫安,电子束流为20毫安。其他还有电压较

低,如600千伏、100毫安的电子辐照加速器。

日本制造的辐照加速器是以高压倍加器为主的,电压为300—750千伏,束流为10—100毫安的电子加速器。但日本日立公司还制造了3兆伏,5毫安,15千瓦逆对称倍加器,用10千周电机供电,电路共20级,用硒整流器整流,分四段用电感补偿,补偿后电压效率由原来的0.78提高到0.98。该加速器在日本原子能研究所用来辐照聚甲醛,年产可达8千吨。

美国加州大学劳伦斯辐射实验室制成的一台600千伏、10毫安倍加器,9级倍加,用硅二极管整流,100千周高频振荡供电,用高压气体SF₆绝缘。

苏联也制成了一台2兆电子伏对称倍加器,用8千周电机供电,硒整流器整流,电路共12级。

法国顿齐尼—萨姆斯公司设计的是由一台高压变压器串联供电,在300千伏时,可产生25毫安束流。

并激倍加器主要由美国辐射动力公司制造,已有系列产品出售,它们具有很高的流强。供电频率要求100千周以上。

此外,日本还利用直流电源供电,采用旋转开关和电容器组成的高压发生器,制成了NS型倍加器,其性能指标为1.5兆伏,3毫安、10毫安和20毫安;2兆伏,3毫安、10毫安。

⑤ 静电发生器

现代的静电加速器发展到了采用多条输电绝缘带,以提高束流强度,但目前千兆伏高压的束流只能到3毫安,而且结构复杂,因此在辐照处理中用得很少。

除了用传统的输电带外,还发明了新的输电技术,一种是美国国家静电公司用金属球输电链(Pelletron)代替输电带的佩勒型加速器,这些链球是由尼龙绝缘杆隔开的软钢圆筒组成的。它可减少电火花损伤和降低同气体的摩擦损失,提供适当的输入功率因而可取消冷却要求,在寿命、可靠性和端电压稳定性等方面都显示出了其优点。另一种是用一个在20—30个大气压的纯氢绝缘介质中,以3600转/分旋转的空心圆柱形绝缘子代替输电带的圆筒式静电加速器(Sames型),电荷用金属感应电极和电离器系统作用到圆柱体表面,然后送给高压端,电压可达1兆伏左右。目前法国顿齐尼—萨姆斯公司和静电加速器股份公司都有产品出售。

⑥ 长灯丝型加速器

最近,还发展了一种不需要扫描器就可以得到带状束的长灯丝型加速器(Liner Filament Accelerator)。它采用了一个具有圆锥形电子光学的直线电极,一般在电压低于300千伏时,就不需要中间电极,束流宽度几乎与灯丝长度相等。

英国 Tube Investment 公司生产的 TIGER 型长灯丝型加速器为 130 千伏, 6 毫安, 灯丝长 6 英寸和 300 千伏, 100 毫安, 灯丝长 60 英寸。辐射动力公司和高压工程公司还制成了可移动式并自带屏蔽的装置用来辐照电线和薄膜。

这种加速器的缺点是束流的均匀性差和寿命低。

2. 微波电子直线加速器

电子直线加速器有行波型和驻波型两种(质子直线加速器则用驻波进行加速, 主要用作高能加速器的注入器和供研究用), 现已广泛地应用在工业探伤和肿瘤的放射治疗, 少数用于辐射处理上。

电子直线加速器是以脉冲方式工作的, 脉冲长度为几微秒, 脉冲重复率为每秒几百个脉冲, 峰值电流一般为几百毫安, 平均束流功率在 10 兆电子伏时, 可达 25 千瓦。

电子直线加速器是随着微波技术的发展而发展起来的, 如果能获得很高的束流占空系数和增大速调管的功率, 这种加速器作为辐射处理装置是很有发展前途的。

3. 电子感应加速器

这是一种利用随时间变化的交变磁场产生的涡旋电场来加速电子的加速器。其结构简单, 所产生的电子束和 γ 射线的能量范围广, 但由于打靶的电子束流仅 0.05—5 微安数量级(脉冲方式工作), 而一般应用的电子感应加速器的能量在 15—50 兆电子伏, γ 射线的输出与电子的加速能量为 3—4 次方关系转换, 所以能量低于 10 兆电子伏时, 已无实用价值。虽然目前采用三倍频来提高束流强度和 γ 输出, 但比起直线加速器来, 要小 2—3 个数量级, 因此电子直线加速器在工业射线照相和医疗中大有后来居上之势, 但目前电子感应加速器在工业探伤和医疗中仍被广泛应用。

4. 电子回旋加速器

这是一种利用在谐振腔内产生的超高频电场来加速电子, 并由直流控制磁场来使电子作回旋运动的加速器, 简言之, 它结合了电子直线加速器和回旋加速器两者的原理。一般应用的能量在几十兆电子伏的范围内, 由于它的重复频率高, 因此可以得到与电子直线加速器相近的束流。

目前, 电子回旋加速器已在苏联、瑞典、加拿大、意大利、美国等用于微量杂质的活化分析、物理学研究、反应堆注入器、电子同步加速器注入器、工业探伤、放射治疗等方面。

电子回旋加速器结构简单, 轻巧, 紧凑, 可以把

磁铁、真空系统和微波系统装成一个整体。如瑞典已成功的制成可以用机械手抓起, 能作水平、垂直方向转动, 并可用汽车运送的电子回旋加速器。

在加拿大已成功地建成了小型跑道式电子回旋加速器, 由于采用多腔加速结构和导向磁场跑道式结构, 改变了单加速腔的有限能量增益和磁场低的弱点, 使电子回旋加速器比现有的电子感应加速器和直线加速器的尺寸小, 价格便宜, 操作方便, 以及能量范围更广。因此它在工业探伤和射线治疗上是很有前途的一种加速器。

5. 回旋加速器

这是一种利用射频电场, 在直流控制磁场中加速质子、氘核、氦核或其他重粒子的加速器。据 1972 年第六届国际回旋加速器会议统计, 全世界有较新型的磁场强度随方位角变化(AVF)的回旋加速器 70 台(其中有 18 台正在建造), 有较老式的调频(FM)的回旋加速器 17 台。

目前工业生产的是磁场强度随方位角变化的等时性回旋加速器, 它具有尺寸较小, 能量可变, 流强较大等特点。除了供核物理研究外, 主要用来生产放射性同位素, 但其产额较低, 成本比反应堆高得多, 仅作为反应堆的补充手段, 如有的放射性同位素用反应堆生产出来不适用; 有的放射性同位素半衰期很短(几小时以内); 所需量很少等等情况, 采用加速器生产是方便的, 而成本也不高。

目前这类小型回旋加速器主要在一些医院或医疗中心使用, 以生产某些医疗(供分析、诊断和治疗)用的短寿命放射性同位素和快中子。如美国、荷兰、法国、瑞典、西德、日本、苏联等国都有这类产品。

6. 离子注入机

离子注入机的高压电源一般采用高压倍加型、中频或高频高压倍加型系统, 用其产生的几十至几百千伏或更高的加速电压来加速各种元素或化合物的离子, 根据需要注入到各种材料表面, 使其改性。

离子注入机的离子源, 以前多采用高频源、潘宁源, 这只能获得微安级离子流, 现许多国家的厂家正在采用强流输出的弗里曼(Freeman)源, 以获得毫安级强流。如瑞士 Balzers 公司的 200 千电子伏注入机的 B^+ 束流为 2 毫安; 美国的 IBM 公司 60 千电子伏注入机束流达 6 毫安; 英国 Lintott 公司 Series I 型注入机 B^+ 束流为 1 毫安, P^+ 、 As^+ 束流为 4 毫安。

7. 中子发生器

一般常用的中子发生器是利用能量为 1 兆电子伏

以下的小型加速器（通常用变压器型或高压倍加型高压电源）来加速氦核粒子束，用(d,n)反应获得中子。中子发生器加速离子的能量不高，多数在400千电子伏以下，离子流强可达数十毫安，可利用(d,n)反应获得2.7和14兆电子伏左右两种能量的中子。中子发生器结构比较简单，易于操作维护，轻便，价格便宜。

利用加速器产生中子，靶是很重要的，它关系到中子的产额。通常用的薄氦、氦靶有气体靶和吸附靶。气体靶比吸附靶的中子产额高，但容易发生缓慢漏气，以致造成氦污染。吸附靶的中子产额虽然较低（目前，加速器束流在数十毫安时，利用 $T(d,n)^4He$ 反应可达 10^{12} — 10^{13} 中子/秒的中子强度），但由于生产和使用很方便，容易冷却等，所以得到广泛应用，其最大缺点是寿命短，如氦—钛靶，平均寿命约为2.7毫安小时/厘米²，最高为4毫安小时/厘米²。

采用密封中子管可以把靶的寿命提高很多，但其子产额却因此将减少一半，目前一般中子管的寿命为200—500小时。美国回旋加速器公司和瑞士汉弗莱公司的密封式中子管有效寿命可达500—1000小时。目前中子强度可达 10^{12} 中子/秒。

除上述中子发生器外，还可利用静电加速器、回旋加速器、电子直线加速器、电子回旋加速器来获得中子。但其结构复杂、造价也高得多。如静电加速器，由于其能量可达5—6兆电子伏，最高可达14兆电子伏，串联式可达30兆电子伏左右，所以它可以用多种核反应(p,n)、(d,n)等来获得各种能量的单色中子。用回旋加速器可得到能量为20兆电子伏的质子或氦核，利用它们打靶，也可以获得各种能量的单色中子，但其性能不如静电加速器。如用电子直线加速器，可利用脉冲电子束打靶，以产生韧致辐射，通过(γ ,n)反应获得强脉冲中子源。但要求加速器能量不低于30兆电子伏，脉冲束流大，重复频率高（每秒数百次），要求靶具有良好的冷却设备。因此，利用这几种加速器来获得中子，在应用上是受到限制的。

8. 重离子加速器

串联式静电加速器目前已达到20—30兆伏的端电压，由于使用负离子源，使串联式静电加速器进入了重离子核物理领域，可作为直线加速器和回旋加速器的补充。由于它提供的束流有极好的相空间特性，其中包括小到 10^{-4} 的能量分辨率，单色性能好，可精细调节等，是精密核物理实验的理想工具。

现代的重离子加速器通常是利用变压器型加速器、高压倍加型加速器及静电加速器、串联式加速器

来加速原子质量数大于4的任一元素的核（不包含氢和氦），并将其注入到直线加速器或回旋加速器，以获得更高的能量。

目前欧美各国的低能加速器中心纷纷投入发展重离子加速技术与核物理的研究，采用了许多新加速原理和技术。重离子加速器当前正处于迅速发展的阶段，其造价相当高，规模也庞大得多。

三、低能加速器的应用

目前世界上约有五分之一的低能加速器用于核科学和核工程，其余的则广泛用于从化学、物理及生物的基础研究，一直到辐射化学、射线照相、活化分析、离子注入、射线治疗、同位素生产、消毒杀菌、焊接与熔炼、种子及食品的射线处理以及国防等国民经济的各个领域。

1. 辐射化学

辐射化学的特点是：

① 可以大大地改变一般化学反应中对温度、压力以及触媒的要求，并可提高生产率，改进产品质量；

② 能引起一些用通常方法所不能产生的化学反应，以生成新型材料；

③ 能显著改变被辐射材料的物理、化学性能；

④ 易于控制，安全可靠，节约能源。

加速器作辐射源与常用的钴60辐射源比较有如下优点：

① 加速器可以在大范围内平滑调节射线的能量和强度；

② 加速器产生的粒子流强大，性能好。目前工业辐照用的低能加速器输出功率可达200千瓦，相当于13兆居里的钴60辐射源。因此可实现高速处理；

③ 加速器随时可停机，停机后没有辐射。钴60源却不可能，而且每5年就要更换一个；

④ 加速器束流聚焦性能较好，易于控制，因而射线利用率高，可达70%。

近年来，由于加速器不断改进提高，运行更加安全可靠（有的厂家声称可靠性达95%），操作更加简单，性能指标提高很快，生产率极大提高，成本降低很多。因此低能加速器被广泛应用于辐射化学方面。目前全世界有230台加速器（输出功率共计10兆瓦）和60台 γ 射线照射装置在工业上得到应用，年增长率15~20%，照射成品年出售额达2亿美元。日本在1977年有36台加速器用于工业生产，总功率共1200千瓦（钴60源1978年为17千瓦，合1100千居里）。主要用于电

线电缆的辐射交联。

聚合物经过一定剂量的辐射后,可使没有联系的分子链形成交联结构,使其性能得到改变。如聚乙烯经过10—25兆拉德剂量辐射交联后,大大提高了抗热性、机械强度和电气性能,同时还具有特殊的热收缩“记忆效应”。经辐射改性后的聚乙烯绝缘电线电缆,由于绝缘性能和耐热性得到提高,在相同直径条件下,它容许承受更大的电流负荷,能在200—250℃的温度下连续使用几小时,在110℃的温度下连续使用几百小时。因此,它被广泛的应用于飞机、宇宙飞船、计算机、电视以及家用电器上。还有利用辐射交联聚乙烯薄膜的耐热性和记忆效应等特点做成电机绕组绝缘,已有可能将传统的云母带、黄腊绸、黄腊布、漆布和一部份绝缘纸淘汰掉的趋势,此外,这种薄膜还可做电缆接头,以替代传统的灌铅的办法;做地下输油、输水、输气管道的外防腐材料以取代沥青等等。用这种薄膜做商品包装材料的更加普遍,不仅改善包装质量,而且外观很好。辐射交联聚乙烯管由于其独特的收缩效应,也被应用于配线接头部分或接线末端的包覆等许多方面。再如橡胶用5—20兆拉德剂量辐射交联代替硫化后,不仅可减少污染,实现无毒,而且可以提高橡胶的耐热性和耐磨性,在高温下不易老化和变形。尤其是产物中不含硫,可用来做深受医务人员欢迎的医用橡胶制品如手术用手套等。这种方法还适用于各种合成橡胶,不仅很容易调节其交联度,而且交联分布均匀。还可用辐射交联生产发泡聚乙烯、发泡聚丙烯等,发泡率高而且均匀,质量好。上述各种应用美国、日本等已实现工业生产,一般,辐射处理聚乙烯薄膜、电线所需能量范围为300~750千电子伏;辐射处理如电缆绝缘层和某些热收缩膜制零件等较大较厚的物件则需要1.5—6兆电子伏的能量。

辐射还能使聚合物与其它单体接枝,形成新材料。如丁二烯气体注入聚氯乙烯粉末中,经10万拉德剂量辐射后,可发生辐射接枝作用。接枝后的聚氯乙烯即使在-30℃的低温下,仍有很高的机械强度。一般的聚氯乙烯在低温时相当脆硬易裂损。又如用聚合物单体(苯乙烯)浸泡木材,经10万拉德剂量辐射后可得到木材—塑料复合材料。这种新的材料具有硬度高、抗压强度大、耐磨和良好的体积稳定性,并依然保持天然木材的纹理和色泽。加工后表面极光滑平整,开辟了以劣质木材甚至木屑做成优质木材的广阔前景。已用来做枪托、高级家俱和高级建筑材料等。用类似的方法还可制成混凝土—塑料复合材料。它的抗压强度、抗张强度和耐冻融次数均比一般的混凝土高四倍;抗腐蚀性高三倍,渗水性亦有显著改善,是

海水淡化场、公路、桥梁、桩材等的理想建筑材料。

纺织工业应用辐射处理的可能性很早就进行了探讨。较为出名的是美国Deering Milliken公司。该公司采用辐射方法对聚酯纤维(65%)与棉纤维素(35%)的混纺织物进行树脂整理,即在电子束对织物表面进行辐射下,织物表面产生了活性基因,并与羟甲基丙烯酸酯发生接枝反应,然后羟甲基和纤维素的羟基再通过加热处理,脱去水分子,完成交联反应。经过这样整理后的织物具有不易沾污、抗皱挺括、不易产生静电和吸附尘埃,容易洗涤等特点。除利用辐射进行树脂整理外,还有非纺织物的粘结(即无纺布)、织物表面涂层的固化、织物的转移印花以及难燃性等方面的整理,使织物具有防火、防油、防水性,用这种织物做成的衣服可用在特殊要求的场合。

金属等表面油漆涂料的辐射固化也得到广泛应用。该法只需在常温下照射几秒钟就可使漆层固化。漆层附着力强,质量好。其耐热性、机械强度和化学稳定性都比传统的加热烘烤固化的涂层好,尤其对那些在加热烘烤时会软化甚至烧损的材料如塑料、木材、纸张等特别合适,而且生产过程中没有有机物质挥发产生的污染,可以放在自动化的流水线上。其失火和爆炸的危险性小。所以已广泛地用于电视机和收音机的机壳、家俱、包装材料、小轿车、镶木地板等的制造中。

辐射处理还可使低分子单体聚合成高分子聚合物,也能使石油裂化。

目前,用于辐射化学的加速器主要是高电压直接加速式加速器和电子直线加速器。其中应用最广的是属于前者的变压器型和高压倍加型加速器。

2. 射线照相

目前主要应用 γ 射线对重工业和军事工业部门的大厚度工件(100—600毫米)作无损探伤。射线探伤可以对缺陷形象直观地了解,能明确缺陷的大小、位置和性质,对被检查工件的形状、表面无特殊要求。探伤灵敏度一般为1%。若配合图象增强技术和图象数据处理,灵敏度还可提高5—10倍。

被广泛应用于工业探伤的加速器有电子感应加速器(15—40兆电子伏)和电子直线加速器(20兆电子伏以内)。其中电子直线加速器由于有更大的输出,因而可以缩短照相时间。若配合合适的探测技术,效率更可大大提高,这是其很大的优点。

近年来发展很快的电子回旋加速器,由于其体积、重量都比现有的电子感应加速器小而轻,造价又较电子直线加速器便宜,其束流输出近于电子直线加速器,能量范围广泛,是一种很有发展前途的工业探

伤装置。

除用 γ 射线进行射线照相外,近年又发展了质子照相和中子照相。

质子照相利用不同能量的质子以进行质子吸收照相(低于200—300兆电子伏)、库仑散射照相(50—25000兆电子伏)和核力散射照相(540—1000兆电子伏)。这三种照相是不相同的,但可互为补充,以得出完满的结果。如质子吸收照相可探出 0.01克/厘米^2 的厚度或密度的变化,在医学上可诊断出极微小的肿瘤(如直径大于1毫米的乳瘤,直径大于3毫米的脑瘤)。库仑散射照相能显示出动物的骨骼、皮肤、软组织的结构等物体的边缘。这些都是 γ 射线照相所不能达到的,但它们都要求用中能加速器甚至高能加速器,因此尚不能普遍采用。

中子照相目前可应用的是热中子(0.01—0.3电子伏),中子产额 10^5 中子/厘米 2 ·秒。热中子的获得是利用反应堆或中子发生器产生的中子,经慢化后即可进行照相。目前中子照相还不成熟,无论从设备、操作、应用方面等都赶不上 γ 射线照相。

3. 中子活化分析

主要是利用中子源所提供的中子束来照射样品,使样品活化,然后根据它的放射特性,可以精确快速地测定样品的成份,适用于冶金工业以及地质、石油勘探的分析及测量中。如在冶金工业中用以测定高纯物质中的微量和超微量元素、痕量元素、快速测定元素的含量;对石油化工原料和产品中所含的元素进行快速、准确的分析;在食品工业中快速、准确地检查出食品中的污染程度和有毒元素的含量;利用中子发生器还可测井、测水分。据报道,利用该技术一次即能测出油层的分布和储藏量。

中子源包括同位素、反应堆和加速器中子源。加速器中子源比起同位素中子源有如下特点:强度高;在广阔的能量范围内可获得各种单色中子;经调制还可获得脉冲中子;不运行时没有很强的放射性等等。如一台200千电子伏、1毫安的小型加速器每秒可产生约 10^{11} 个14兆电子伏的快中子(经过减速后可以得到约 10^8 中子/厘米 2 ·秒的热中子流)。这样的中子发生器由于价格便宜,可用在一般工厂企业和学校,而且计数设备可以放在样品旁边,离子束一切断就可立即测量寿命非常短促的放射性衰变。分析的范围非常广泛,例如月球岩石、海底泥沙样品、古代铜器、矿石成分等等。

4. 离子注入

离子注入是将加速的各种元素或化合物的离子注

入到各种材料后,材料能获得许多用其他方法所不能得到的性能。例如在半导体器件的生产上,采用离子注入技术可使集成电路的集成度提高1千倍,而成本却下降到千分之一。已成为制造大规模和超大规模集成电路必不可少的工艺装备之一。其它如半导体二极管、太阳能电池、场效应晶体管开关、金属氧化物半导体装置的生产中也得到广泛应用。进入70年代,离子注入技术在冶金学等方面又重新得到发展和重视。采用离子注入技术在改变一些金属表面的物理、化学、机械性能等方面已取得了很大进展,还可避免一般高温操作导致工件变形。如注入氮离子可增加金属的硬度和耐磨损性能;注入铬离子可改善金属的耐腐蚀性能;注入锡离子可使金属的摩擦系数减小;在碳钢表面注铬可起到含铬不锈钢同样的效果。一九七五年,美国宣布这一代替不锈钢的新工艺已经可以投入商用。一九七六年英国也宣布用离子注入技术制造了耐磨损、冲击韧性好的齿轮。在超导材料的研究生产中也利用离子注入技术来制造超导转变温度高的材料如超导转变温度为 18°K 的 Nb_3Sn 等。在磁性方面,通过离子注入在磁性石榴石结晶中引入应变应力使磁化轴变化而形成磁泡。离子束还可以在核滤器的生产中作为“微针”,用离子束辐照各种材料的薄膜,可以得到孔隙大小相同、范围在几十埃至几十微米的核滤器。

5. 医疗方面的应用

①射线治疗:主要用来治疗癌症。目前在临床上使用和试验的射线有 γ 、 β 、质子、中子、重离子和 π^- 介子等。但目前用得最多的还是前两种。一般认为医用电子感应加速器能量范围在20—45兆电子伏比较适合,主要用它的 β 射线来治疗表皮和浅层的肿瘤;电子直线加速器为4—10兆电子伏比较适合,主要用它的 γ 射线来治疗深部或浅深部的肿瘤。电子回旋加速器目前主要有加拿大制造的6、12和20兆电子伏以及瑞典的10和22兆电子伏几种。它产生的 β 和 γ 都能用来治疗。

利用 γ 射线和电子射线治疗癌症的优点是设备简单、操作容易。虽然由于 γ 射线和电子射线的LET(线性能量转移值)和RBE(相对生物效应)都比质子、中子、 π^- 介子低,不能有效地杀死癌细胞里的缺氧细胞,其疗效不如质子、中子和 π^- 介子等,但仍为目前普遍所采用的主要治疗手段。

中子治疗要求中子能量为14兆电子伏,产额不低于 10^{13} 中子/秒。目前已有一些国家成功地制成快中子治疗机,其中子产额约 10^{12} 中子/秒,已为临床所使用。它具有不需太大的剂量就有较强的杀伤癌缺氧

细胞的能力，但准直比较困难，深度剂量分布曲线不够理想。另外还有利用回旋加速器产生的快中子来治癌的。

进一步的研究发现， π^- 介子不仅有快中子治疗的优点，而且其深度剂量分布很好，即在癌区集中最大剂量而人体正常组织剂量很小，因而对患者的损伤也很小。这是 γ 、 β 和中子射线所不具备的。故 π^- 介子更有利于治疗癌症。但 π^- 介子需要中、高能加速器才能产生。与 π^- 介子一样，重离子治癌和质子治癌也有较好疗效，但要中能加速器，设备较庞大，因此这些射线束的临床使用受到很大限制。

②利用加速器生产供诊断、分析和治疗用的低剂量、短寿命单一射线的同位素。主要用等时性回旋加速器生产，如 C^{11} （半衰期20分钟）、 O^{15} （半衰期2分钟）、 N^{13} （半衰期10分钟）、 F^{18} （半衰期2小时）、 I^{123} （半衰期13小时）等。

③利用质子照相诊断肿瘤（见质子照相一节）。该方法分辨率高，病人接受剂量小，但要用200兆电子伏以上质子加速器。

④利用加速器产生的射线对医疗用品进行消毒杀菌处理。据75年5月召开的第一届国际辐射处理会议统计，全世界医疗用品的消毒处理装置共68台，其中 Co^{60} 为61台，加速器7台。射线消毒杀菌法的优点是：没有化学杀菌法存在的残余毒性问题；杀菌消毒充分，尤其是当化学药品不能渗入内部进行杀菌时更为突出；可以在完全密封包装状态下进行，不存在再污染问题；能耗低。目前，各国所使用的剂量范围在2.5—4.5兆拉德之间。在这个剂量范围，所有微生物都将受到致死剂量，而被照射材料的性质却没有发生变化。这也是加热消毒法所不能具备的优点。主要用在外科手术刀、注射器、缝合线、测量器、输血装置、外科仪器、人工心肺、透析型人工肾脏等等。通常用聚乙烯材料将医疗用品密封包装后进行辐照消毒。这样消毒的医疗用品保存方便，保存时间长，启封即可使用，很方便，特别适合战备的需要。

6. 焊接、熔炼与热处理

电子束焊接是利用30—300千伏的直流高电压将电子加速，以获得电流密度极大的高能电子流。功率一般在几千瓦至几十千瓦。因此被焊工件的深宽比可达20:1。它在汽车工业、航空工业中用得最多。其优点是：热影响区小，工件变形小，效率高，焊缝质量好。目前仅美国就有电子束焊接机1000台以上。电子束熔炼与焊接主要用在难熔或难焊的金属，如金属钛、锆、锆合金、钼、钨等的熔炼与焊接，以及一些特殊的零件和材料的熔焊。

最近，又有用几十千伏电压的电子束对半导体器件、金属材料或机械零件进行热处理（如退火）的新工艺。这种方法的优点是加热均匀、热影响区小、变形小、时间短、效率高而且不会氧化，适合特殊形状、特殊要求的零件。

7. 农业上的应用

近年来，作为原子能农业利用的一个方面，低能加速器在农业上的应用亦逐渐开展起来。大致有以下几个方面：

①辐射育种：利用加速器产生的 γ 射线、电子束、中子射线照射农作物种子，使其发生突变，从而培育出新品种。如早熟大豆，产量较高的硬秆水稻，果实较大的早熟桃子，高蛋白小麦，高产马铃薯等。

②利用电离辐射低剂量刺激作用，可促进种子的萌芽和出苗，刺激生长，提高产量，加速发育，提前成熟，改善品质及增强抗病能力等。

③辐射保藏食品

1) 防止发芽：利用6—15千拉德剂量照射马铃薯可抑制其发芽。日本每年处理的马铃薯达3万吨。还可用类似方法抑制洋葱、大蒜等的发芽（2—10千拉德）。

2) 杀虫：一般谷物中的害虫和寄生虫用10—15千拉德剂量可使其不育。杀死的剂量为300—600千拉德。

③杀菌 由于食品中广泛存在着病原菌和腐败菌，一般用0.1—1兆拉德剂量进行杀菌和储藏。家畜用饲料亦用此法杀菌。

4) 调整成熟和改质 一般未成熟的水果用0.05—0.5兆拉德 γ 射线照射后，可调整水果（如香蕉等）的成熟程度，以延长保存期。还可用辐射办法使涩柿子变成不涩。用加速器辐照过的酒具有多年储藏的陈酒一样的芳香，这就可以缩短酿酒的储藏期，从而大大提高优质酒的产量。

8. 环境保护上的应用

环境保护是当前各国一项很重要的工作。利用加速器可以辐照处理城市下水道的污水、工业废水；自来水的消毒杀菌；工厂和汽车排出的废气；废塑料等等。其处理原理是：①在电离辐射的作用下使废水、废物分解氧化而变质或排除；②用加速器射线代替化学催化剂来进行处理后就不存在催化剂本身分解所产生的污染物；③利用射线来制造污水的净化剂（如臭氧、高分子凝聚剂逆渗透膜等），然后再用净化剂来处理。

环境污染主要是大气和水的污染。大气污染又主

要由工厂或汽车等排出的废气所造成。在这些废气中所含的SO_x和NO_x用射线照射即可脱硫和脱硝。这主要是因为照射后形成了烟雾状的气溶胶。此法的优点是处理温度低，压力几乎不受损失，对粉尘多、排烟量大的废气处理特别有利。

废水处理也是环境保护方面一项很重要的任务。在电离辐射作用下，污水中的污物产生分解、氧化，然后将其排出而达到净化。辐照处理可以分解用生物法处理难以分解的物质，并加速其中沉淀的析出和凝聚。当辐照与化学或物理试剂或生物净化结合使用时，可以降低处理的成本。此外，亦可用辐射产生的臭氧的氧化作用来净化。

9. 其他方面的应用

低能加速器除上述各方面的应用外，在国防和许多基础科学和应用科学的研究上，也占有一定的比重。例如利用加速器测量中子和带电粒子的反应截面来设计核武器；制造核燃料如钚²³⁹；制造超铀元素，提供新型核燃料如镅²⁵²。这种元素临界体积很小，能制成体积小、原子炮弹，使核武器实现战术化；模拟核爆炸场的辐射环境和宇宙空间的环境；进行核爆炸的瞬时照相；进行导弹和其他重型常规武器弹药的无损探伤以及国防上所需材料的辐照处理等等。其他如利用加速器进行低能核物理的研究；重离子核物理的研究；中子物理及反应堆物理的研究；辐射物理化学、辐射医学及生物学等方面的基础研究和应用技术研究等等。为适应这些方面的要求，已研制出各种特殊性能的低能加速器。

四、辐射处理装置简介

由于辐照用加速器的经济效益，世界上竞争比较激烈，因而其处理的工艺细节和装置（包括加速器）部件的设计都是保密的。在科技文献中详细介绍的也不多，由于篇幅所限，在此只简单介绍几种典型装置。

1. 辐射交联聚乙烯绝缘电缆装置

苏联第一台电子加速器辐照聚乙烯绝缘电缆装置如图1所示。所加速的电子最大能量为1.5兆电子伏，束流功率为25千瓦。辐照电缆传输系统的两个滚筒使八股电缆在辐照窗下交叉通过，使两面受辐照，传送速度为25—100米/分。辐照成本约为0.5卢布/公斤，不超过产品总成本的百分之十。装置自1968年投入使用以来，已经运行了十年，平均每年运行3500小时。

图2为一台用电子加速器辐照处理电线电缆的示意图。

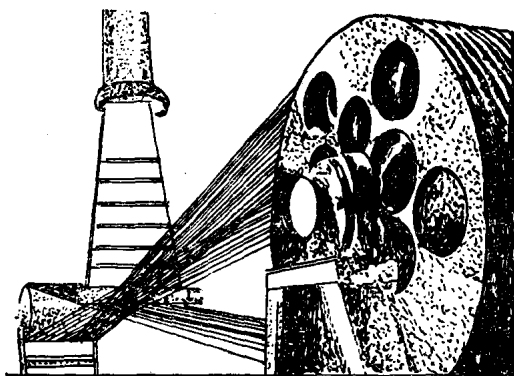


图1 聚乙烯绝缘电缆辐照装置示意图

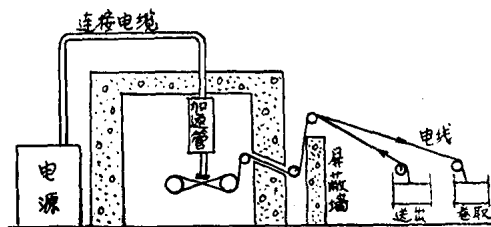


图2 辐照电线的电子加速器装置

意图。

2. 纤维制品、薄膜、纸等涂层的辐射固化处理装置

美国的一台辐射固化粘胶表面装置各个处理工序如图3所示。电子能量不超过200千电子伏，扫描宽度1.25米，传输速度为每分钟数十米，装置占地面积只有9平方米。固化后的产品用在制鞋工业上。

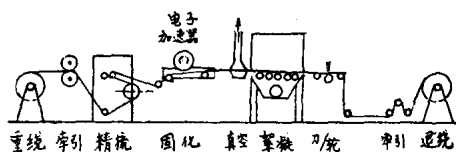


图3 固化粘胶表面装置示意图

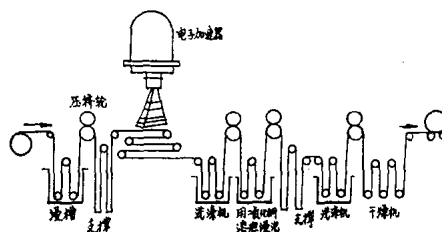


图4 纤维制品辐射化学处理装置示意图

图4是苏联1976年以来一直在使用的纺织品辐射

化学处理的装置示意图。电子加速器和传输系统放在厚150—250毫米的钢和铸铁作成的局部屏蔽罩内。被辐照的纺织品宽1米，传输速度10—1000米/分。将布浸泡单体溶液后进行辐照。经辐照处理的纺织物在经常洗涤后也不会变形，不会起皱和吸尘。该装置的总产量约500万米/年。

图5是苏联一台用电子加速器来生产玻璃纤维塑料的装置示意图。辐照电子束扫描宽度1米，最大产量为50万平方米/年。所用的原料是不饱和聚酯和乙烯树脂单体混合液。

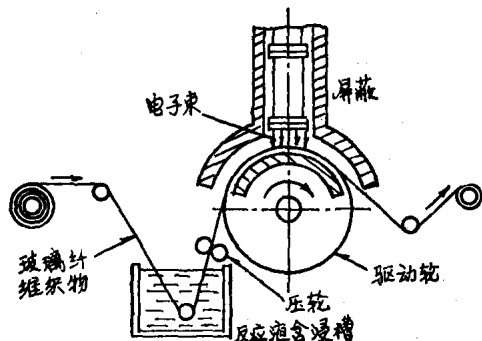


图5 生产玻璃纤维塑料的装置示意图

3. 金属、木材等表面涂层辐照固化装置

图6所示为苏联的一台固化装置，用于油漆和清漆的表面固化。

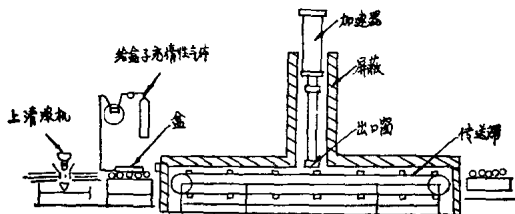


图6 油漆和清漆表面固化装置示意图

4. 复合材料辐照固化装置

图7是一台能量为3兆电子伏电子加速器辐照充填塑料玻璃纤维装置，所用原料为不饱和聚酯。辐照部分宽60厘米，长2米。辐照4.5毫米厚的制品可完全固化，其辐照速度为3米/秒，辐照剂量2兆拉德，电子束能量2.5兆电子伏，束流4毫安。

5. 橡胶辐射硫化装置

橡胶辐射硫化代替了橡胶的硫化，消除了硫化造成的污染。图8是美国利用电子射线对生橡胶进行交联处理的装置示意图。辐射交联剂量为5—20兆拉

德，由于交联度很容易调节，而且交联分布均匀，机械性能得到明显提高。

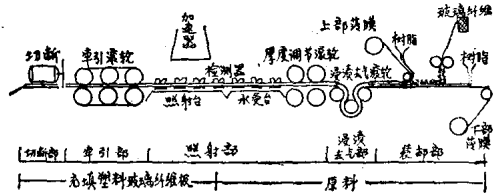


图7 充填塑料玻璃纤维平板连续固化装置

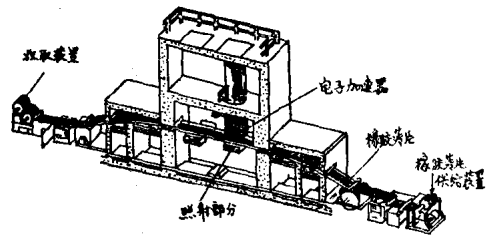


图8 轮胎用橡胶的电子射线交联装置

苏联辐射硫化的一台装置所用的加速器能量为1.5兆电子伏，功率为30千瓦，辐射硫化3毫米厚的生橡胶块所需剂量为5兆拉德，产量约为1吨/小时。

6. 医疗用品辐射消毒装置

苏联对医疗用品进行辐射消毒杀菌处理所采用的电子直线加速器的主要数据为：能量8兆电子伏，束流0.6—0.65微安，在距出口窗200毫米处的辐照场范围为50×3平方厘米。传输装置宽0.5米，加速电子流脉冲宽度为2.8微秒，脉冲重复频率500赫。辐照室所占面积120平方米，高9.5米，最大传输速度是3厘米/秒，剂量为2.5兆拉德的正常速度为0.8厘米/秒。

也有用电子静电加速器进行医疗用品辐射消毒处理的。

7. 环境保护辐射处理装置

日本利用电子射线辐射处理旧报纸、木屑、谷糠、干草等纤维废料，在酸和酶的作用下，分解得到葡萄糖的办法，使葡萄糖的获得率得到明显的提高。图9是其反应流程。

纤维素和水先混合成粘液状，用5—10兆拉德剂量照射处理，通过高温高压挤出机挤出，最后加硫酸、盐酸以及加水分解得到葡萄糖。葡萄糖获得率可达50—65%。装置容量1吨/日。

图10是净化城市污水的试验装置，正在美国波士顿试验。装置每天可处理400立方米废水，辐射剂量

为400千拉德。

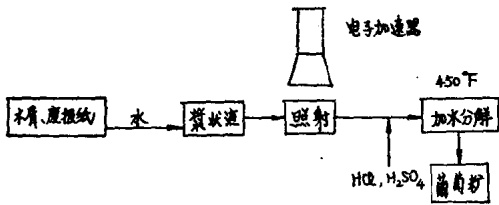


图9 废纤维制取葡萄糖反应流程

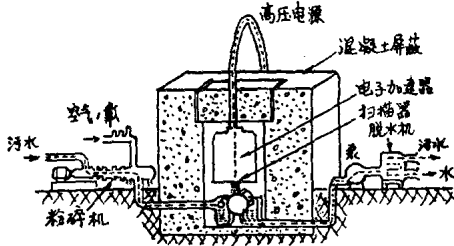


图10 废水净化装置示意图

图11是日本辐射处理烧结炉排出废气的流通式辐照试验装置流程图。

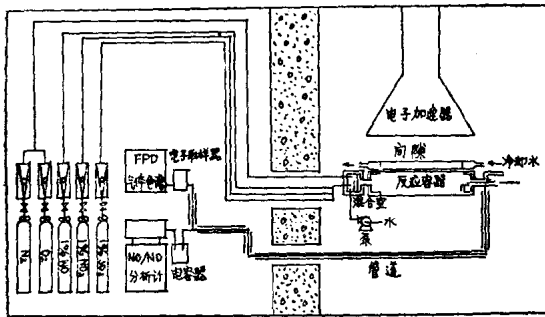


图11 烧结炉废气辐照处理流通式装置流程图

五、展 望

近五十年来，加速器技术取得了很大发展，造价下降了很多，性能却有了很大的提高。

目前，低能加速器作为射线源已被广泛应用于理、工、农、医和军事工业部门。随着科学技术的不断发展，需求量将会不断增加，同时也会提出更多的新要求。

在工业辐照用加速器中，无疑将要求有更大的功率输出，目前国外已有200千瓦以上的大功率加速器供辐照处理用。其中直流高压型加速器仍不失为最有发展前途的，尤以绝缘芯变压器型和倍加型加速器最优。例如美国高压工程公司生产的绝缘芯变压器的输

出束流已达250毫安；辐射动力公司生产的高频高压加速器在4兆电子伏时输出电流已达50毫安。据报道，苏联正在研制1000千瓦输出功率的辐照加速器。国外已出现自带屏蔽装置的、结构简单，成本低，运行安全可靠的低压大功率辐照加速器，为各种辐照处理提供优越的射线源。由于篇幅所限，表1只列举了部分厂家生产的适用于辐照的加速器型号及主要性能指标。

利用 γ 射线和电子束治癌仍然是今后一段时期内的主要手段，医用电子直线加速器和电子回旋加速器将会获得进展。近年来，有些国家想利用中能加速器得到质子和 π^- 介子束流来治疗肿瘤，虽然疗效很好，但由于获得这些粒子流的设备庞大，投资费用高，普及应用是受到限制的。

附表2列出了一些厂家生产的电子直线加速器主要性能指标。

重离子在放射生物学、放射疗法和放射诊断学的应用已发展成为一门全新的重离子学科，它可用精确的辐射剂量来照射肿瘤，而使正常组织损伤最小，在放射治疗中具有一定的潜力。

随着快中子治疗机在临床上的使用及其性能指标的进一步提高，由于其疗效比 γ 射线和电子束高，其造价和运行的简单方便等又优于获得质子和 π^- 介子所需的中能加速器，预期快中子治疗机在放射治疗中将很快占据优势。

利用短寿命同位素诊断疾病，既方便又准确，深受医务工作者的欢迎，作为生产短寿命同位素的主要装备——等时性回旋加速器在今后一段时间内仍然占据着重要位置，这不仅是因为它能制备同位素，而且还可得到中子，进行中子治癌方面的工作，所以也是一种有发展前途的加速器。

离子注入机是一支突起的新军，具有很大的发展潜力。在半导体工业中，是生产大规模或超大规模集成电路不可缺少的装置。近年来，在金属表面改性和离子注入冶金学方面所取得的进展已引起人们极大的注视，其发展前景是很乐观的。目前，离子注入机正向更高的注入电压和强流方向发展，提高注入束流主要是采用强流离子源，并改进束流输运系统，现已有不少的注入机的注入束流已达毫安级。

由于串列式静电加速器能达到10—30兆电子伏或更高的能量，而获得的粒子流能量单色性很好，能量又能精确地连续可调，因此在核物理、固体物理、生物物理、应用物理、重离子物理、物质与离子交互作用、材料辐射、材料改性、荧光分析、固体分析、辐射损伤等方面得到广泛应用。串列式静电加速器的发展受到许多国家的重视。

附表 1

部分厂家生产的辐照加速器

厂 家	类 型	型 号	能量(兆电子伏)	流强(毫安)	束功率 (千瓦)
美国高压工程公司 (与荷兰)	绝缘磁芯变压器	ICT	0.25—0.5	250	
			0.3	30	
			0.5	20	
			0.5	200	
			0.6	20	
			0.75—1.5	100	
			1	25	
			1	100	
			1.5	10	15
			1.5	20	30
			1.5	50	
			2.5	20	
			2	25	
			3	10	30
			3	20	60
			美国辐射动力公司	高频高压倍加型 (Dynamitron)	EA
0.75	100				
1.5	100				
0.75、1.0、1.5、 2.0、3.0、4.0	10、20、25、50、				
0.3、0.5	25、50、100				
0.3—2					
美国能量科学公司	长灯丝型 忒斯拉变压器变形		0.2	100	
			0.3—2		
英国Tube Investment	长灯丝型	TIGER	2	10	
			0.13	6	
法国顿齐尼-萨姆斯公司	圆筒静电型	Sames	0.3	100	
			0.125—0.6		
			0.3时	4	
			0.6时	8	
瑞士埃米尔汉弗莱公司	高压倍加型		1.2	6—8	
			0.3—0.45		
			0.3时	25	
日本三菱电机公司	高压倍加型	DP-600 DP-1000 NX	0.3—4		
			0.3—0.6时	100	
			4时	20	
			0.6	30	
			1	50	
			0.1—1	5	
			3	20	

续表 1

厂 家	类 型	型 号	能量(兆电子伏)	流强(毫安)	束功率 (千瓦)
日本松下电器公司	高压倍加型	RFCA-10E	1	10	
		RFCA-15E	1.5	10	15
		RFCA-20E	2.0	10	
		RFCA-30	0.3	30	
日新一高压工程公司 (与美国)	高压倍加型	OF-301	0.3	100	
		OF-302	0.3	200	
		OF-501	0.5	100	
		OF-502	0.5	200	
日新电机公司	高压倍加型		1	60	
			1.5	50	
		N-S	1.5	3、10、20	
			2.0	3、10	
		NCW-75	0.75	10	
		NCW-100	1.0	10	
		NCW-150	1.5	10	
		NCW-200	2.0	10	
		EPS-300	0.3	100-200	
		EPS-500	0.5	100-200	
		EPS-750	0.75	100	
			1	60	
			1.5	40	
			2	30	
苏 联	变压器型	ЭЛЕКТРОН	0.7	10	7
	静电型	КТЭ-2.5	2.5		
		ТЭУС-1.5	1.2		
	绝缘磁芯变压器	ЭЛТ	0.3-2.5	16	
		ЭЛТ-1	1	16	
		ЭЛТ-1.5	1.5	16	25
		ЭЛТ-2.5	2.5	16	40
	忒斯拉变压器变形		0.3-3		
			1时	10	1
			3时	10	3

附表 2

部分厂家生产的电子直线加速器主要参数

厂 家	型 号	能 量 (兆电子伏)	峰值电流 (毫安)	平均电流 (毫安)	束平均功 率(千瓦)	束直径 (毫米)	γ 线剂量率 (伦/分·米)	用 途
苏 联	JLY Θ -5	2					200	治疗、研究
	JLY Θ -15	15					300	治疗
	JLY Θ -25	25					50—500	治疗
	JLY Θ -8-5	8			5—7		}	医学消毒 放射化学
	JLY Θ -8-5B	8			5			
	JLY Θ -15-10	13			10			
	JLY Θ -10/1	10				1.5	2000	探伤
	JLY Θ -15/1.5	15				2	10000	探伤
	Y-13	10	50					研究
	Y-18	2	250					治疗、研究
日本三菱原子能工业	ML-4 M	4					350	治疗
	ML-15R	6—15	160	0.074		< 3	2000	探伤
	ML-15M	8—15				2	500	治疗
	ML-5	2—15	500	0.8		3	3兆电子伏时 1000	探伤
日本电气公司	NELAC-1004	4					350	治疗
	NELAC-1006	6(γ) 4-7(β)					350 450	治疗
	NELAC-1018	18						治疗
日本东京芝 浦电气公司	LMR-13,15	6—13				< 3	500	治疗
	LMR-4	4					350 (80厘米处)	治疗
美国瓦里安协会	Clinac 4	4(γ)				< 2	350 (80厘米处)	治疗
	Clinac 6	6(r) 4-7(β)					350 450	治疗
	Clinac 12	8(γ)6,9, 12(β)					350 500	治疗
	Clinac 18	10(γ) 6-18(β)					500 500	治疗
	Clinac 35	8-25(γ) 7-28(β)						治疗
英国 MEL 设备公司	V7706	10	55		0.44	1	2500	
	V7705	6	50			2—4	200—500	
	SL-75/5	4,6(γ)				4	250, 350	治疗
	SL-69	6(γ)				< 2	1000	治疗
	SL-75/10	6—8(γ) 4-10(β)				< 5	600 600	治疗
	SL-75/20	8, 16(γ) 5-20(β)					350, 400 200, 500	治疗
	Dynaray	2—10			10兆电子 伏时2.5			
法 国	CIRCE 10	2—8			10	} 5—36	5兆电子伏 时10000	探伤
	CIRCE 20	4—16			9		10兆电子伏 时30000	探伤
	CIRCE 30	6—25			8			探伤
	Neptune10							