



加速器的应用

朱爱民

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

粒子加速器是用人工方法产生快速带电粒子束的装置. 它利用电磁场将带电粒子束(如电子、正电子、质子等)加速到很高的能量, 所以称为加速器.

在加速器家族中, 各成员的个头和能量千差万别. 苗条的小妹妹有一张桌面就能蹲下了, 而那些巨人则远比我们在图画或动画片中看到的巨人要大. 举例来说, 目前在法国、瑞士边界处运行的一台加速器(LEP), 它的粒子运行轨道就有 27 公里长. 前几年, 美国曾打算建造一台超导超级对撞机, 这台加速器的粒子运行轨道就有 87 公里长. 可惜它的身价太高, 有百亿美元之巨, 就连超级大国的美国也不堪重负, 最后由国会议员们将它扼杀在摇篮中.

最早的加速器产生于 30 年代初, 是物理学家们为研究原子核和物质深层结构而制造的. 但正如我们所看到的, 20 世纪科学发展中到处可见由纯研究引起的应用. 粒子加速器问世不久就为医学等领域所利用, 近年来则有了越来越广泛的使用. 于是, 加速器装置就不再是只与高能粒子物理研究、基本粒子寻找和大爆炸物理研究有关的巨型、昂贵的机器了. 为了各种各样的特殊目的, 人们建造了大量的小型加速器. 可以毫不夸张地说, 加速器在服务于粒子物理研究的同时, 已经开辟了极为广阔的应用市场, 直接为社会创造财富, 为大众谋取福利.

1932 年, 欧内斯特·劳伦斯(Ernest Lawrence)在美国的伯克利大学建造了第一台回旋加速器, 这是加速器历史上的一个重大发展. 利用回旋加速器, 人们可以获得中子束

流, 同时还发现了人工制造的放射性同位素. 到了 1936 年, 劳伦斯在 37 英寸的回旋加速器上将氘束加速到 8 兆电子伏, 从而成为世界上中子和人工放射性同位素的主要供应者.

欧内斯特·劳伦斯和他的兄弟约翰·劳伦斯很快就认识到回旋加速器在医学方面的重要应用前景. 回旋加速器生产的同位素可用于生物学研究和医学研究, 同位素和中子束也可用于治疗癌症.

1938 年, 劳伦斯的母亲成为第一个成功地利用回旋加速器生产的中子治疗癌症的患者. 劳伦斯在推动和改进加速器性能和工程质量方面的决定性工作为当今加速器的广泛应用奠定了基础.

从这些最初时代以来, 加速器技术的重大进步带动了阿尔瓦雷斯型直线加速器、范德格喇夫加速器、速调管功率源、超导材料、同步加速以及负离子提取等方面的发展. 所有这些技术都和各种类型的加速器有关, 如静电加速器、回旋加速器、微波加速器、直线加速器和同步加速器等.

一、加速器在医学方面的应用

加速器在医学方面的用途分为两种: 成像和治疗.

在用于成像时, 加速器所产生的辐射或直接穿过病人的身体, 或生产出一种放射性物质注入病人体内. 对病人身体所产生的放射图像进行分析, 就可对病情作出诊断, 并定出适当的治疗方案.

在治疗过程中, 加速器所产生的放射性本身就是一种治疗, 那就是将辐射剂量进行很好的控制后直接作用到病人身上.

1. 成像

在核医学中, 将放射性药物直接让病人服

下,再用专门的 γ 相机对病人体内的 γ 射线分布情况进行照相.然后利用计算机技术给出病人体内某一部位的断层图像.这些图像提供了病人身体功能和代谢情况的诊断信息,可对由解剖或由X射线、计算机断层照相(CT)和核磁共振(MRI)成像等方法得到的“结构图像”进行补充.目前每年约有二千万病人的诊断采用放射性药物.

(1) 同位素生产

使用放射性药物的病人中约有20%接受药品注射,这些药品是由回旋加速器生产的.全世界有200多台回旋加速器,其中的35台是由商业部门运行的,专门生产放射性药物,另有25台则生产医用同位素.

这些缺中子同位素通常是用质子轰击生产的.普通的医用同位素都可用能量不超过40兆电子伏、束流强度50至400微安的回旋加速器来生产.专门设计的靶含有小粒高富集稳定同位素作为起始物.这种靶可以适应高功率密度的质子束流,人们可对它实施远距离自动操作.

同位素的整个生产过程包括大尺度的靶生产、回旋加速器束流轰击产生同位素、放射化学萃取、药物配制、原材料回收等步骤,同时要在发运前对这些短寿命药物进行标记和打包.所有这些生产步骤均要遵守药品工业标准.

与研究用加速器不同,商用回旋加速器是用户化的小型机器,通常是由专门的公司提供的,如比利时的IBA公司,加拿大的EBCO公司或瑞典的Scanditronix公司.这些商用回旋加速器的设计标准是磁铁尺寸小、磁铁运行功率-效益小、高频系统小,高强度引出质子束流,严格限定束流尺寸和自动化计算机控制.性能指标包括快速开动和关机,日常短寿命同位素生产所需的高度可靠性,机器的维修率低以保证操作人员所受的辐射剂量最小等.

1987年,加速器制造朝这些精确的工业要求迈出了一大步,当时IBA公司和比利时的Louvain-La-Neuve大学一起,研制了旋风-30回旋加速器,这是第一台模型机,能生

产可靠的、高强度的高于300微安的引出束流.第一台装置安装在美国阿默舍姆医学物理中心.

回旋加速器生产的同位素作为无菌注射药物运送到核医学中心,它含有少量的放射性同位素成分,其活性最高可达200兆贝克勒尔(或5个毫居).这些同位素产品应具有足够强的放射性,以保证在成像的15—30分钟期间内产生出适当的诊断信息.但是可注射用的同位素的活性还是很低的,对病人产生的有效剂量应小于5mSv(或0.5拉德).所用的 γ 射线的能量要高,应既能够穿出病体组织,同时又能避免由康普顿散射引起的成像效应;但 γ 射线的能量又要低,要能使 γ 相机探测器高效准直.通常使用的 γ 射线能量在50至300千电子伏之间.

加速器生产的医用同位素的寿命既要足够长,允许有较长的生产过程和快速向医院运送的时间,但同时又要较短,以避免引起病人的生物剂量问题.

通常使用的同位素的半衰期为三天左右,常用的医用回旋加速器生产的同位素大约有30多种.铊-201已成为最常用的回旋加速器放射性药物,用作心肌注射剂对心脏成像,它是用25—28兆电子伏的质子轰击铊-203来生产的.

全世界对核医学成像的需求逐年增长7—8%.对回旋加速器生产的同位素的需求也在持续上升,这就要求专门的回旋加速器公司制造足够数量的质子流强在500到1000微安的回旋加速器. γ 相机的生产技术正在改进,而药材公司正在注册回旋加速器生产的同位素的新产品和新方法.

回旋加速器生产的常用放射性药品

同位素名称	半衰期(小时)	γ 射线能量 (千电子伏)	成像器官
铊-201	73.0	80	心脏
铟-111	67.2	240	传染病
镓-67	78.3	100—300	腹部
碘-123	13.2	160	甲状腺

(2) 正电子发射断层扫描

正电子发射断层扫描(PET)是大型医学研究中心使用的一项先进的核医学技术.从组织和器官的生化 and 生理断层测定中获得独特的诊断信息.从理论上讲,疾病是与生化变化有关的,而这些变化能用 PET 观察到,大大早于结构变化的探测.

PET 采用一种正电子发射同位素或‘示踪剂’.正电子与人体中的电子发生湮灭能产生两条成 180 度分开的 γ 射线;对这些 γ 射线进行符合测量可以测定放射性同位素示踪剂的空间分布情况.因为在成像中通常需要生理测量,所以要用很短寿命的同位素对示踪剂的分子进行标记.使用最多的放射性核素是碳-11(半衰期 20 分钟)、氮-13(10 分钟)、氧-15(2 分钟)和氟-18(110 分钟).

一台 PET 机有三个主要部件:

· 一台带靶的粒子加速器,用来生产正电子发射同位素;

· 化学物块,用来合成和标记所需的同位素;

· 一台正电子照相机,用来对示踪剂在人体内的分布情况作体内测量.

回旋加速器已成为生产 PET 同位素的标准加速器,实际应用的质子能量为 10—18 兆电子伏,或 5—9 兆电子伏的氘,流强为 75 微安.当今的 PET 回旋加速器是非常紧凑的、高度自动化的机器,很适合医院的环境,与早期设计的研究用加速器已经没有什么相似之处了.

所有新型的 PET 回旋加速器都用负离子技术来方便束流引出,并使感应放射性累积最小.用闭合回路计算机控制方式处理开机、调谐和辐照,用户只需选择标记化合物和几个基本的辐照参数就可以了.除了氧-15 之外,实际上一次扫描所需的放射量为 200 兆贝克勒尔.生产一次的量足够两三个病人扫描用的.

PET 自 70 年代中期开始发展,目前全球约有 140 家 PET 中心,其中的一半在北美. PET 的工作方式与普通的同位素成像相似,但灵敏度和空间分辨率都有改善. PET 能够对许多新的生化参数进行成像和测量,如血流、脂肪

酸和葡萄糖利用、氧代谢、氨基酸运输、受体密度和大脑及其他器官中的占位情况等.通常使用的示踪剂是氟-18(FDG),这是一种糖类物质,用于研究大脑和其他器官中的葡萄糖代谢情况.研究人员已能对 500 多种不同的 PET 化合物进行标记,但只有 15 种建立了化学动力学模型.

PET 生产的放射性核素及其核反应原理

放射性核素	所用的核反应
碳 11	$^{14}\text{N}(p,\alpha)^{11}\text{C}$
氮 13	$^{16}\text{O}(p,\alpha)^{13}\text{N}$
氧 15	$^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$
氟 18	$^{18}\text{O}(p,n)^{18}\text{F}$

PET 还可用于肿瘤学、神经病学和心病学研究.在肿瘤学研究中,PET 用于探测原发肿瘤的类型、期段及转移情况、在外科手术前测定肿瘤范围、分辨肿瘤的辐照坏死、确定恶性肿瘤的损坏程度及其对手术治疗和药物治疗的反应等.

在神经病学研究中,PET 主要用作对癫痫病人的发病灶进行定位、早期发现早发性痴呆(阿耳茨海默氏病)、对帕金森氏等运动错乱病进行鉴别诊断.在心病学研究中,PET 用于确定心肌组织的活力,这通常是旁路手术的必要条件.用其他方法诊断往往鉴别不出组织的活性,因而可能导致不必要的外科手术. PET 在心病学研究中的另一项重要用途是诊断冠状动脉疾病.

全世界对新 PET 机的需求估计为每年 15—20 台.虽然它还是一种日常的诊断方法,但如果保险公司开始补偿 PET 研究费用,PET 的门诊使用将迅速增多.最近,美国联邦药物管理局批准在癫痫病研究中使用氟-18 作诊断药.

西门子公司和通用电器公司都供应整套 PET 机,包括回旋加速器和照相机,他们占有 90% 的市场.还有几家小公司在生产回旋加速器或 PET 照相机.最近有人提出 PET 低能直线加速器的方案,但是这种 4 兆电子伏低能直线加速器必须有很高的束流强度,才能达到所

需的同位素产量。

很明显,商业生产 PET 面临一种挑战,要扩大 PET 市场,就必须降低设备的造价,同时还要使设备的设计能允许接纳更多的病人。

值得一提的是,1992 年,中国科学院高能物理所成功地制造了我国第一台 PET 装置,经北京中日友好医院使用证明其性能良好。目前,第二台 PET 机也已建成,其性能指标较第一台有较大改观,是为安徽肿瘤医院生产的。

2. 治疗

当人类的平均寿命稳定提高时,癌症的发病率也随人口的年龄而上升。癌症病人中有 50% 的人接受放射治疗,这是一种长期的生物外科疗法,它能有选择地消灭恶性细胞。

(1) X 射线放射疗法

最常用的放射治疗是 X 射线疗法,是用一条光子束流或它们的母电子束流击毁人体细胞中的氢键,消除细胞增殖所必不可少的 DNA (脱氧核糖核酸)信息。这一方法可以消灭恶性细胞,从而使病人获得完全康复,或减轻某些癌症的症状,至少也能在一定程度上减轻疼痛。

放射疗法所采用的仪器是一台电子直线加速器,所产生的电子可直接用于电子疗法(约占病员总数的 10%),也可用它来轰击一个转换靶,从而产生一条高能光子束或 X 射线束。

最简单的电子直线加速器只有几个加速节,大约为 3 京赫,能将电子加速到 6 兆电子伏,使用一个经冷却的钨靶能产生出每分钟 4Gray 的 X 射线场,该场可在病变部位准直成一个长方形。这种小型加速器安装在病员上方的一个旋转等角吊架内,病人则需保持静止不动来接受照射。当然还可以利用几条聚光束来增大辐射剂量。

更为复杂的加速器产生的束流能量可达 18 兆电子伏,它可加大穿透深度,同时减少对皮肤的照射。另一方面,电子放射治疗也采用不同的能量以适应不同深度的病例,大约为每个兆电子伏改变 0.5 厘米的深度。这样,表面组织的治疗才不会伤及较深层的组织区域。

这种类型的直线加速器长度约 1 至 2 米。

与病人呈平行方向放置,用一块弯转磁铁将射束导入放射治疗装置。

全球目前共有 2000 多台 X 射线治疗用加速器。在西方国家,平均每百万人口有两台这样的装置,而在像孟加拉国这样的发展中国家中,一亿人口才摊上一台。

世界上几家大型医疗器械公司生产 X 射线治疗仪,如通用电子公司、三菱公司、菲力普公司、西门子公司等。在这个拥挤的市场上,这类治疗仪的平均使用寿命为十多年,每台售价不到 100 万美元。

X 射线治疗仪目前仍是最常用、最廉价的加速器治疗仪。技术发展的目标是能对肿瘤的辐照剂量作更好的调节;多层准直仪能将 X 射线场成形到生物医学靶上,同时从病人身后得到的往返成像可以控制定位和辐照。

人们正在研制具有治疗和实时剂量控制的小型复合 X 射线源,它将 CT 的扫描功能并入一台单机中。研究发展的方向是将诊断和治疗结合起来,这样对医院的空间要求减小,运行成本也会降低,还可避免多余的数据处理,使得门诊工作更简便,成本效益更高。

(2) 中子放射治疗

标准的放射治疗使用 X 射线或电子,它们都只有很低的能量直线传输(LET);与之相反,中子等粒子具有很高的 LET,它们的放射生物效应也就不同。在 60 年代末期,伦敦哈默史密斯医院的卡特罗尔在临床试验中发现,快中子辐照对于某些恶性肿瘤的治疗具有优势。

在这些早期的临床试验之后,人们在 80 年代建造了几台回旋加速器,用于快中子治疗。如美国华盛顿大学、西雅图和加州大学洛杉矶分校等地。这些新建造的加速器大多利用引出的回旋质子束流,其能量在 42—66 兆电子伏之间,流强为 15—60 微安。这些质子束流被输运到专用治疗室中,在那儿与铍靶作用产生中子。

第二代临床试验表明,将中子束流精确地输送到肿瘤部位,这比光子治疗的情形更为重要。为了使束流的几何尺寸精确,引出的中子束流必须经过一个吊架输运,这台吊架可绕病

人旋转,从任意角度提供束流;同时,还必须用一台灵活的准直系统将中子束流剖面(场形状)调节到非常不规则的形状。

放射治疗过程必须组织得当,要有内科医生、放射治疗专家、护士、医学物理学家和其他一些人员参加;还要配备一些专门设备,如CT扫描仪或核磁共振扫描仪,以及辐射模拟器等。中子放射治疗通常只在大型医疗中心的放射肿瘤科进行。

中子放射治疗的费用比常用的光子和电子放射治疗要高得多。治疗所用的回旋加速器常常是和其他用户共用的,因为每次中子治疗的时间只有几秒钟,而各次运行之间的仪器准备却需要一个很长的过程。放射性同位素生产或PET生产可与中子放射治疗同时进行。目前,全球共有十几台中子治疗装置,但由于受到固定束流、低能和低强度的限制,只有少数几台能够提供治疗所需的精确束流。

中子放射治疗对一些特定部位的肿瘤的临床疗效令人鼓舞。对唾液腺肿瘤而言,中子放射疗法是一种可选用的治疗方法。临床认定的另一些有前途的治疗范围为腺癌、某些头部和颈部的肿瘤、某些肺癌、成骨肉瘤或软组织肉瘤等。

我国也于1991年11月开始了快中子治癌的临床研究。研究工作由高能物理所的放射物理专家与北京多家大医院的放射治疗专家合作进行。他们利用高能物理所的35MeV质子直线加速器产生的质子束打击铍靶产生快中子,将快中子经专门研制的治疗装置导入病灶区实施放射治疗。几年来,这台装置成功地治疗了几百个病人。实践证明,快中子治疗对前列腺癌、腮腺癌、骨肿瘤、软组织肉瘤、黑色素瘤等肿瘤具有良好的疗效。著名文学家、翻译家叶君健先生曾在垂危之际在这台装置上接受治疗,经六次照射就取得了奇效。

未来的中子放射治疗装置的基本设计有两种。一种是带有内靶的小型回旋加速器,直接安装在一个非常紧凑的中子治疗专用机的放射治疗吊架上。美国底特律的哈珀医院就研制了

这样一台装置,它使用超导重氢回旋加速器,能量为48.5兆电子伏;另一种是将回旋加速器置于一间地下室中,它所提供的束流通过一个旋转的等角吊架送入一个或多个治疗室中。这种类型的装置已由商业部门生产出来,如Scanditronix公司就提供60兆电子伏的装置。

就像X射线治疗仪一样,中子放射治疗今后的发展有赖于降低治疗装置的成本,同时还要生产一些整套装置,以适应技术工程力量薄弱的医院环境。

像其他放射治疗方法一样,加速器只是整个治疗装置中的一个部件,重要的是,生产者应提供综合的医疗服务装置。

(3) 质子放射治疗

理想的放射治疗是在肿瘤部位沉积大量的能量,而在周围健康组织中则毫不留存。质子放射治疗最接近于这一理想目标,因为质子的会聚剂量更大,质子的能量释放的范围非常准确,也就是有名的“布喇格峰(Bragg peak)”。

过去,质子的临床治疗一直受到其复杂性、规模和造价的限制。要想取得临床疗效,质子的能量需达几百兆电子伏。以前,这些条件是医院的设备所达不到的,所以开始时一些医院只得使用那些复杂的、不太合适的装置,因为它们原本是为核物理研究而建造的。

近来,许多专门机构和商业公司一直在研制专门的质子治疗装置。比利时的IBA公司就提供能在医院内运行的设备,它是一个完整的放射医疗中心,可整套交货,装有一台小型可自动操纵的高能回旋加速器,外带一个等角吊架。他们生产的设备将安装在波士顿的马萨诸塞总医院中。

质子放射治疗装置的部件有:

一台235兆电子伏的同步回旋加速器,能提供流强1.5微安的束流;

对能量宽度和能散度进行校正,束流能量在235兆电子伏到70兆电子伏之间可变;

一个束流输运和开关系统,它将能量选择系统的出口与许多吊架和固定束流的入口连接起来。在输运系统中,使用自动调谐不拦截多

丝电离室对束流特性进行监测;

吊架中有喷嘴和束流部件,以便实施束流控制;在束流成形中可用束流散射技术和束流振动技术;

一个控制系统,包括“加速器控制单元”,它带有一个独立的、联网的“放射治疗控制站”.通过这一网络,每一个放射治疗控制系统都能代替计算机控制单元对回旋加速器、束流和吊架光学进行控制;

一个安全管理系统,它与控制系统相互独立,使用的是硬连线联锁和独立编程逻辑控制器;

一台病人自动定位装置,有监视设备将病人团团围住.

有几家公司设计了另外一些装置,在吊架、喷嘴、病人定位器或安全、控制系统的设计方面各有不同之处.美国加州罗马林达大学的医疗中心的质子放射治疗系统使用的是一台质子同步加速器,它是由费米实验室、罗马林达大学、劳伦斯伯克利实验室和圣地亚哥国际科学应用公司(SAIC)联合建造的.

在癌症治疗中,加速器除了能提供质子束流外,还能提供直线能量传递更高的粒子.加拿大温哥华的介子工厂、瑞士的保罗·谢勒研究所和美国的洛斯阿拉莫斯实验室都开了 π 介子治癌的先河.离子放射治疗的前景看好,伯克利实验室率先进行了这方面的试验,德国重离子实验室也已开始一项积极的计划,他们使用的是每核子 300 兆电子伏能量的离子.

人们对离子放射治疗的可行性坚信不移.日本人在东京附近的千叶花费 3.26 亿美元建造了专用重离子医疗加速器,该装置能将氦到氙的离子加速到每核子 800 兆电子伏的能量,用来治疗各种癌症,如头部和颈部的癌肿.碳离子治疗的初步结果显示,癌肿明显缩小了.但高投资、高运行成本必然会限制这一治疗方法的使用.

质子放射疗法对眼部黑瘤尤其重要,因为此病无其他替代治疗方法,据报告此病的质子疗法成功率高达 90%.

二、加速器在工业中的应用

在制造业中,粒子加速器可有多种用途:如用于改善产品的质量或对产品进行精加工(对医疗器械进行消毒灭菌);用于改变材料的组成(如离子移植);用于元件生产(如硅片的生产);用于取得生产过程的信息(如材料的磨损研究)等.

工业方面的这些应用通常需要小型加速器,但所用加速器的工程质量要好,性能也必须可靠.

1. 工业辐照

橡皮手套生产线与粒子实验室之间似乎没有多少共同之处,但它们却都要用到加速器.在工业生产中,经常使用电子束流辐照来改善制成品的质量和降低生产成本.这里所说的产品包括从计算机磁盘、塑膜热塑包装、轮胎、电缆、塑料到热水管.还有一些产品用辐照方法来灭菌,如医疗用品、化妆品和一些食品等.

在进行电子束流辐照时,电子在穿透材料后能产生低能电子簇射,再经多次碰撞,这些电子就具有了产生化学活性空穴的适当能量.所产生的空穴既可能破坏分子键,也可能激活一个空穴,从而产生出一个新的化学键.

工业辐照的利用途径有三:破坏一个生物分子,通常使它变得无用及杀死其有机组织;打破一个有机分子,从而可能改变它的毒性或功能;对聚合物进行交联,从而使之强化.

除了传统的利用同位素进行 γ 辐照外,工业辐照使用的加速器有三种规格,每一种都有一个规定的能量范围,也就对应于一定的电子透射深度.在能量为 750 千电子伏以下时,加速器将一个直流电压加在简单的丝板上,而电子则通过一个同轴安装的圆筒形阴极的狭缝引出.在 1—5 兆电子伏能量范围,通常使用的是考克饶夫-瓦尔顿加速器或高频高压加速器.为了能在这些直流加速器上得到高电压,人们用 SF_6 气体和大体积容器将阴极和阳极分隔开来.在能量高于 5 兆电子伏时,直流加速器就不太适用了,使用更多的是小型高频驱动直

线加速器。

辐照电子束流被一个磁偏转系统喷射到产品上。能量低于 750 千电子伏的低能束流能够穿透薄膜,已经研究出固化喷涂的方法,主要是对金属和纸的喷涂。这方面的例子有啤酒罐头、礼品包装、高级光滑纸包装等。在这些情况下,都要高速印刷彩色标签,但又不可能有等待油墨干燥的时间,电子束流则能使油墨立即“固化”。

另一种广泛采用电子处理的产品是包装用收缩薄膜,它是将一张聚乙烯薄膜在拉伸时横向连接在一起,经加热后再恢复到原初的形状。这一“记忆”效应在可收缩连接中具有广泛的用途,譬如电钎焊焊管。收缩管也用来连接气体管道。收缩管现在已经能做得非常精密,外科医生可以用它来重接病人的血管。

1—5 兆电子伏的电子束流广泛用于加强和提高电缆的耐火性和耐磨性。类似的处理也可以提高聚乙烯热水管和水罐的供水温度。

能量在 10 兆电子伏以下的电子束流可以给注射器、手套、化妆品和药品灭菌消毒。最近人们又研制出能用电子硬化的环氧树脂,它可用于航天航空器材的生产。用电子束流处理方法来硬化这些器材比用加热方法要快得多,而且所产生的应力也小。

在法国,第一家使用加速器辐照的食品工厂能保证经机械脱骨加工的鸡是无沙门氏菌的。电子加速器在食品加工方面的应用尚未大力开展,主要原因是经费方面的争论尚未得到令人信服的结果。

加速器在环境方面的应用也未得到大力发展。已经展示的用途有加速器清除下水道的污泥,使下水道的水的病毒含量达到可以接受的低水平,从而能直接引入农田、花园和公园。使用电子束流来消除电厂燃气中氧化亚氮和氧化硫的试验也正在进行中。

辐射加工的经济环境和政治环境也在不断地变化着。加速器的发展虽然开发了一项新技术,但成本也在提高。5 兆电子伏以下能量的加速器技术开发已经成熟;10 兆电子伏电子加速

器已经发展到工业用功率水平,系统的改进已经达到工业运行所需的可靠性和经济性。

2. 薄层活化

磨损和腐蚀对工业设备的可靠性有很大的影响,这方面的监测可以防止事故的发生,避免停机。采用加速器进行薄层活化分析(thin layer activation, TLA)是一种有力的手段。这方面的信息可用于改善机械设计和材料处理。许多大公司已采用了这一技术,特别是在汽车制造业中(如奔驰公司)。

在机器零件的关键部位增加的放射性薄层通常是由回旋加速器所产生的荷电粒子辐照而生成的。选择适当的粒子、束流能量和入射角度可使薄层的放射性分布均匀。薄层的厚度可从 20 微米到 1 毫米不等,深度分布亦可千变万化;磨损区的位置和尺寸可在 0.1 毫米内设定,接着就是机器的组装和运行,以便测量磨损的情况。

以内燃机为例。内燃机里有活塞环、气缸壁、冷水套和外壳壁。气缸壁上活塞环死点周围的关键区域就需要进行磨损情况测量。质子束流轰击可产生一个放射层,其厚度精确可知,这一放射区域所产生的特征 γ 辐射能穿透内燃机的引擎,并可在外部被探测到。磨损测量可精达 10^{-9} 米量级。

薄层活化通常使用的是质子、氘或 α 粒子,能量约为 6—10 兆电子伏,在固体中的穿透深度为亚毫米。一种常用的反应是用钴-56,它由 11—14 兆电子伏的质子轰击铁-56 而产生,该反应的速率随能量急剧变化,造成感应放射强度随穿透深度的变化。束流强度应调节到 10 微安,以便使辐射剂量低于能引发辐射损伤的临界剂量的 0.1%。

对于大型机器零件,人们通过一个薄窗从加速器中引出一条质子束流,导引到 150 毫米之外的装置上。一个精密的三维测量系统使得该机器零件能绕任意轴旋转,产生出所需的深度剖面。

γ 辐射常用具有快电子学特性的碘化钠探测器来测量;可能产生好几种放射性核素,但辐

射衰变的能量判别和分析可以分清各种不同的核素。

薄层活化工艺已在许多铁、钢、合金、烧结材料和硬材料中发展起来。最近与工业部门合作又发展了在陶瓷和其他硬材料中的薄层活化工艺。

3. X 射线印刷

X 射线印刷是用阴影印刷复制图形的一种技术,所需的图形在掩模上产生,而掩模在涂镀灵敏材料(感光性树脂)的晶片前精确定位。X 射线照射掩模在晶片上投下一个阴影,从而将图形由掩模传送到晶片上。X 射线波长较短,因而可以达到较高的分辨率。这一方法现正发展为一门新技术,用于生产下一代微芯片和组件。

当高能电子在磁场中偏转时,会产生同步辐射。同步辐射是广谱、高强度电磁辐射。由几个 GeV 的电子同步加速器和储存环产生的同步辐射是最好的印刷用 X 射线源。印刷时要有高强度(束流强度)才能达到高产量。同步辐射光源尺寸小、准直高,对于比较粗糙的光学图形的分辨率较好。在这些波长上,由于缺少透镜和棱镜,常会造成光学图象的粗糙。

同步辐射光谱和黑体辐射没有什么不同,在靠近所谓的临界波长处也有一个峰,在某一更短的波长处有一很陡的截断和一个较长的波长尾巴。选用了适当的临界波长的加速环,它所产生的同步辐射光谱就适合于一种特定的用途。对于一个给定的临界波长,加速器环的总尺寸为 $B^{-3/2}$,这里的 B 是弯转磁场。但目前人们的兴趣是利用超导磁铁产生更高的磁场,因而也能使加速器变得更小。

在半导体生产装置中,小型化是很重要的,因为那里空间非常宝贵,只能用一个小型加速器环作为运行和测试装置。

在过去 30 年中,单一芯片上的电路的功能和复杂度持续提高,这主要归功于电路元件的尺寸大大减小了,60 年代约为 50 微米,到目前就只有 0.5 微米了。持续的发展取决于复制更为精细的图形的能力。在大规模生产中,电子

束流“书写”已经能够形成非常精细的图形,但需要花更长的时间,因此更适合于制造一个掩模。印刷是一种大规模生产方式,能从一个原件生产出许许多多的复制件。

传统的印刷方法使用可见光和近紫外光,波长为 0.44—0.25 微米。在接近这些波长时,衍射问题变得非常讨厌。人们提出许多好的设想来扩大印刷的可用范围,但最大的极限又总是高于最小的需求,即大约在 0.25 微米左右。在 X 射线光刻中,波长约为 1 纳米,即使使用最简单的阴影印刷,分辨率也能好于 0.1 微米。从更为长远的观点来看,使用反射光的 X 射线印刷将能获得更好的分辨率。

由于 X 射线印刷的潜在效益,目前许多公司正在积极地推行这方面的发展计划。IBM 公司在纽约的 Rest Fishkill 有一台先进的印刷装置,它用牛津仪器公司的环(Helios)提供几条印刷用光束线。摩托罗拉公司在威斯康星的阿拉丁环上有几条光束线,并正打算参与 Fishkill 的合作计划。在日本,NTT 公司有两个印刷用储存环,一个叫 NAR,它是一个普通磁铁环,还有一个叫 ALIS,它是一台超导机器。SORTEC 是一个政府和半导体公司的合作组织,它有一台普通的储存环,能提供好几条印刷束线。三菱公司、Sumitomo 电子公司、Sumitomo 重工业公司已经建成了小型超导环,专用于 X 射线印刷。总的说来,人们将会使用加速器生成的 X 射线来制造未来的多种多样的逻辑半导体和存储半导体。

4. 微切削加工

X 射线印刷除了用于制造微电路元件外,也可用于制造很小的机械零件,可直接使用曝光过或显影过的光刻胶,也可用作一个模子来生产另一种材料(陶瓷或金属)的元件。

在这一革新技术中,金属元件是通过光刻(LIGA)技术制造的,曝光和显影过的光刻胶上涂镀了一层导电材料,并被电镀过,这以后被剥去保护膜。

X 射线除具备尺寸小、分辨精确的特点外,还具有穿透深和在保护膜中散射小的优点,

因此图形可深达 1 毫米,在与束流平行的方向上有非常精确的直线度(平直度)。

用光刻方法进行微切削加工的技术是从德国卡尔斯鲁厄核研究中心发展起来的.德国美国兹微技术研究所和卡尔斯鲁厄微器件公司正在大力推进这项技术的商业化发展进程.美国威斯康星州的麦迪逊同步辐射中心已在这方面取得了重大进展.与此同时,在台湾、美国的路易斯安那和法国巴黎等地也已启动了一些新的研究计划.欧洲还出现了一个专门的光刻组织.

商业生产的微型机器已经开始用于传感器和连接器中.将微装置与微电子学结合起来会引发未来许多新的可能的应用,特别是在医学和智能传感器中的应用.但是不管怎么说,光刻技术的广泛使用取决于大规模廉价生产的能力,需要搞大批量生产.同步辐射光的高强度将有助于实现高产量的要求.

5. 离子植入的表面工艺

离子植入是粒子加速器在工业上的一项广泛应用.加速器生产的束流被用作离子植入金属中,在表面薄层中掺杂外来原子,它所达到的浓度是热处理方法所不能实现的,这使我们在提高硬度和耐磨、耐腐蚀方面取得了重大的进展.

传统的硬化方法需要用高温来造成形变,而离子植入却是一个“冷过程”,对成品进行处理.离子植入层加在衬底上,从而避免了普通涂镀方法所产生的裂纹和层离问题.大块材料的表面特性可以独立设计,该方法不使用铬等对环境有害的材料进行表面涂镀.

达到金属最佳表面特性所需的实际植入剂量约为每平方厘米 2×10^{17} 个离子,约为半导体处理所需实际植入剂量的 100 倍.在处理一个面积为几个平方厘米的表面时,植入装置必须能产生高束流强度(5—10 毫安),以便使处理时间不至于太长.所使用的离子种类包括氮、硼、碳、钛、铬和钽,束流能量从 50 千电子伏到 200 千电子伏不等.由于大部分组件都是三维的,所以必须使之能在束流中旋转和倾斜,并能在大范围内控制束流位置.

工业上这方面的应用实例有:

假体(髌关节和膝关节)的表面处理,以减少运动部分的磨损,这里使用的是生物相容材料;高速滚珠轴承的离子植入,以保护轴承,防止喷气发动机的水腐蚀,这对在石油钻井平台上服务的直升机是很重要的;金属成形加工和切削加工的刀具的硬化;降低塑料模具的腐蚀损坏(这类模具的造价很高).

工业上的离子植入操作大多是由专门的公司来做的,这方面的需求正日益增多.离子植入装置的制造商所面临的难题是要设法满足用户在效率和可靠性方面的更高要求和降低成本的要求.

6. 半导体离子植入

过去 20 年间,成千上万台加速器用于向硅片中植入硼、磷、砷等掺杂离子,以便能在生产半导体器件时形成特殊的嵌入层.

原子种类、植入深度和掺杂量是植入工艺的主要参数,它随所造器件的不同而变化,参数的选择和控制则完全是自动化的.

植入深度通常小于 1 微米,这是由离子的能量决定的.离子的能量范围为 2—600 千电子伏.离子束由一台 Freeman 或 Bernas 型离子源引出,在作质量分析前被加速到 60 千电子伏.为了得到更高能量的束流,还要进行后加速,加速到 200 千电子伏,用质量选择多重电荷离子的方法可达到更高的能量,但束流产额相应减少.

由于生产的器件不同,掺杂量也就不同,约为每平方厘米 10^{10} — 10^{15} 个原子,由植入机的束流强度来控制,束流强度最高可达 30 毫安.对植入过程实施连续监视能保证晶片上的均匀度好于 1%.

随着半导体器件越做越小,植入机的设计势必更加复杂.在植入过程中,硅晶片将带电,必须不停地清除这类电荷,以降低器件的电应力,避免发生破坏性电击穿.电子读数电子枪能产生低能电子(低于 10eV)来中和所累积的正电荷,植入机的设计应保证其他同位素的混杂最小,而且要保证内部溅射率很低.

半导体工业技术发展的步伐是很快的,目前正在为 256 兆位电路生产所建造的植入机,五年后已经不会是广泛使用的机器了。目前有几家专业公司在生产植入机装置,每台造价约为 500 万美元,造价取决于机器的规格和远程操纵方式。目前生产的植入机的能力为每小时处理 60 块晶片,每块晶片的直径在 150 毫米左右,实际的植入量为每平方米 3×10^{15} 。

7. 违禁品的探测

哪怕只对很少一部分的货物进行人工检查,那么查检毒品、爆炸物和其他违禁品的工作也会把各国的检查机构压垮。现在一种新的检查装置出现了,它的主要部件是一台加速器,检查使用的是脉冲快中子分析法。这种装置能对满载货物的集装箱和卡车进行自动化检查。当货车通过时,用一条平行脉冲快中子束流对它的一侧进行扫描就行了。快中子能激活货物中普通元素的原子核。违禁品检查最感兴趣的基​​本信号是 γ 发射,这些 γ 射线是随碳和氧中出来的快中子非弹性散射出现的。

用飞行时间分析法可得到有关物质含量的直接成像,从而能鉴别出发生相互作用的位置,而 γ 射线谱学又能鉴别出元素的 γ 射线。人们利用该元素的比例或有这种元素特征的其他化合物的比例来鉴别违禁品,例如毒品的特征就是碳氧比例高。

该装置利用了 γ 射线探测器,并用模拟和数字处理器鉴别位置脉冲和元素信息脉冲,探测算法产生出可能隐藏的违禁品的三维图像,根据这些图像,检查者就能检查出货物中的可疑物品。

日本的一台脉冲快中子分析装置用 8 兆电子伏中子光栅扫描运货车或集装箱的表面,其中子束流是由国立电气公司(NEC)的珠链式串列范德格喇夫加速器的 6.0 兆电子伏氙核所产生的,氙核束流的流强为 80 微安。

脉冲快中子分析方法已经历了多次实验,显示了它在毒品和爆炸物检查方面的功效。设在圣克拉拉的国际科学应用公司已经建造了一套装置,正在接受各种货物的综合性试验。

世界贸易的增长有利于脉冲快中子分析在进港货物检查方面的应用。脉冲快中子在元素成像方面的能力可借助先进的数据库得到拓宽,如检查货单和监督装卸。经过改进,脉冲快中子分析也可用于检查封装的危险废料桶中的含量,而不必采用人工取样的方法。

三、加速器在科学研究中的应用

大多数加速器起初都是为粒子物理或核物理研究的目的而设计的。当今,许多大型、复杂的加速器却是专为其他一些研究发展工作而制造的。粒子加速器为物质特性研究提供了一种珍贵的手段。

1. 同步辐射研究

在加速器的许多应用中,同步辐射可算是一种最有价值、应用最广的工具。同步辐射产生于几个 GeV 的电子同步加速器和储存环中。同步辐射大量应用在基础研究中,最近这些年,则大量应用于化学、生物工程和医药工业等应用研究中。

当初,同步辐射只是高能物理实验室的副产品,但这方面的大量需求很快就导致专用电子储存环的建造。加速器技术目前已得到很好的发展,而且已经建造了许许多多的光源,能量从 1.5GeV 到 8GeV 不等,其中包括建在法国格勒诺布尔的 6GeV 欧洲同步辐射装置。

现代的第三代同步辐射光源包括一台电子储存环,它有很复杂的磁铁布局,能产生发散度非常低的束流;储存环中有很长的直线段,可安装插入装置;还有“波荡器”或“扭摆磁铁”,能产生特殊性质的辐射。只有高束流强度才能产生高辐射通量,长寿命束流还需配备超高真空系统。

工业领域的同步辐射研究使用 X 射线衍射或 X 射线光谱学来测定各种物质的结构;生物学和医药学方面应用于研究各种蛋白质的功能。了解了这些情况,人们就可以设计药品的分子来改变蛋白质的特性,或生成更具活性的蛋白质。

目前分子生物学的发展引起了蛋白质检晶器研究的大力发展。研究者使用的是晶体,虽然这种晶体很小,衍射率也低,但得益于同步辐

射光的高亮度. 商用意义重大的例证包括 HIV (人体免疫缺陷病毒) 蛋白质和抑制剂的研究、SV40 病毒(可引发肿瘤)的研究、昏睡病寄生虫蛋白代谢研究, 以及木糖酶的研究(工业上用于将糖转变为糖浆).

工业中广泛运用衍射技术进行薄膜类材料的相鉴别和应力分析. 同步辐射技术扩大了可研究材料的范围和复杂性(如聚合物和热塑塑料), 并改善了性能. 例如, 波音公司用填充了玻璃的多酶酶铜(PEEK)取代铝材, 使波音 757 飞机的机身重量减少了 30%, 并且大大降低了造价.

在同步辐射应用中, 也可用粉末衍射来测定结构, 帮助了解急速变化中的材料的特性. 对氧化锆复合物的能量色散快速衍射研究就是这方面的一个例子. 用这一矿石制成的复合陶瓷用于高温机械, 分散在铝土或镁土那样的矿石中的半稳定四方晶氧化铝粉末可以通过阻止裂纹发展的方法来增加硬度. 同步辐射动力学的“现场”研究已经表明, 晶化温度和相变温度与材料的热随时间的变化情况有关, 也与开始时的氢氧化锆的化学态有关. 结晶温度和相变温度变化很大, 这方面的信息将帮助化学工程师们获得在每一种应用时所需要的氧化锆粉末的稳定度.

非常有序的结晶材料可以利用 X 射线结晶学, 其他材料通常不是长程结构有序的, 因而难以成功地利用这一技术. 在这些情况下, X 射线光谱学就可以发挥作用了. X 射线在物质中的吸收谱揭示, 在一定的能量上, 随着原子中一个束缚电子的发射, 步长有明显增大. 在凝聚态物质中, 在这些边的顶端通常叠加着很小的振荡. 这些扩展 X 射线精细结构(EXAFS)是由发出的电子与周围的原子发生相互作用而产生的, 对其进行分析, 就可得到有关最近的周围介质的信息. EXAFS 装置的工业用户通常来自化学界, 主要用于研究晶体的特性.

在玻璃工业中, 用漫射衍射技术不能测定内禀无序系统的原子结构, 这时 EXAFS 又一次成为有力的工具, 可以获得对结构和特性的新的了解. 把 EXAFS 与反射率的测量结合起

来, 对于研究表面层是非常重要的.

全球的正电子源数量迅速增多, 两台大型装置很快就将在美国和日本投入运行, 而小一些的正电子源则到处都在筹划着. 科学研究和材料工业对同步加速器的需求都在增长.

1989 年, 我国第一台同步辐射装置在北京建成. 它利用北京正负电子对撞机在专用或兼用运行模式下提供的同步辐射光开展了一系列的实验, 包括固体物理、表面物理、催化、材料、生物、地矿、微电子、软 X 光学等. 1992 年, 合肥建成了第一个同步辐射光源, 它的电子加速器的能量为 800MeV. 该装置上也完成了一系列实验. 1993 年, 我国的台湾新竹建成一台同步辐射加速器, 能量为 1.3GeV.

2. 正电子源

一般的正电子源是高能物理加速器的初始粒子, 但很低能量的正电子通常用于研究原子物理和凝聚态物理.

在这些实验中, 单一能量的低能正电子束流产生于高能正电子在特别的固体减速器中的热化过程. 由于放射源所提供的高能正电子的流强有限, 所以人们一直都使用电子直线加速器. 用高能电子束流轰击厚的、高原子量物质靶, 由韧致辐射和其后的对产生生成正负电子对. 这些高能正电子被注入到一台减速器中(通常是钨箔), 能量变为几个电子伏特. 这些低能正电子通过静电引出, 并用低场螺线管作磁导. 减速过程的效率约为 10^6 分之 1, 使用一台能量达 100 兆电子伏、流强达 200 微安的直线加速器, 最高达到每秒 10^9 个慢正电子.

这些高强度的慢正电子束流能用于研究原子物理和凝聚态物理, 尤其适合于需要了解正电子束流与被测信号或其他脉冲装置(如激光器)之间的时间关联的场合.

在凝聚态物理研究中, 已获得了重大成果, 一是使用速度光谱得到在表面的正电子湮灭 γ 射线的二维角关联测量, 二是对正电子偶素的飞行时间测量.

在原子物理研究中, 主要的实验包括正电子与气体原子的碰撞率测量, 电子偶素的激发

态测量. 这些实验的反应率都很低, 所以都要求有高强度的正电子. 与相似的电子测量的结果进行比较, 为量子电动力学提供了重要的检验. 在比利时、美国、日本及其他一些地方都用直线加速器提供正电子源. 在日本, 还提出了几项计划, 准备得到更高的正电子流强, 达到每秒 10^{10} 慢正电子. 为了得到更高的流强, 可以通过反复减速和提高亮度相结合的方法将束流半径减小到毫米或更小. 还可以安装慢正电子脉冲系统 (MHz 范围) 来测量正电子寿命, 进行固体的深度剖面分析. 俄歇电子光谱学 (PAES) 感生的正电子湮灭也可借助高流强正电子来开展正电子显微研究.

3. 加速器质谱测定法

加速器质谱测定法 (AMS) 发明于 1977 年, 这是在大量稳定同位素中直接探测痕量长寿命放射性同位素的方法. 该方法的灵敏度与被测的放射性同位素有关, 它不是测量同位素的放射性衰变, 而是测定同位素的原子序数和质量. 最初的动机是要测量有机物质中的碳 (碳 14, 寿命为 5730 年), 以便确定年代. 加速器质谱测定法所需的测试材料比用 Libby 衰变计数方法要少 1000 倍. 可以根据不同目的很方便地测量长寿命放射性同位素, 这些同位素包括铍-10, 铝-26, 钙-36 和碘-129 (半衰期长达 1590 万年). 加速器质谱测定法也能用来测量稳定同位素的痕量.

加速器质谱测定法常用串列静电加速器进行. 这种加速器大多是为核物理研究而设计的. 样本是作为铯溅射离子源样轮的实心部分而插入的. 用 20 千电子伏的铯离子轰击靶材料产生出带单一负电荷的离子. 大多数元素的中性原子将束缚一个多余的电子而形成负离子. 这些 20 千电子伏的负离子将在磁铁中进行动量分析, 再接着加速到 150 千电子伏, 并注入到一台串列静电加速器中去, 在加速器中通过 2 兆伏到 10 兆伏的电压加速到引出点. 一个箔片或差压泵气体室在引出处将离子剥掉几个电子, 对分子进行离解.

后者是串列加速器的最重要的功能之一.

如果一个中性分子被剥掉三个或更多的电子, 这个分子就被离解, 它的碎片将消失于加速器的后半部. 这样一来, 相同质量的分子在作为被测元素时 (分子干涉) 就被排除. 所需的带多个正电荷的离子是在串列加速器的后半部分加速的, 用磁偏转板和静电偏转板一起来选择具有特定性质的质荷比的离子.

加速器质谱测定法的局限性在于它的质量分辨率比较低, 只有几百分之一. 因此, 如果一种放射性同位素有一个稳定的同质异位素, 两者就不能实现质量分离. 有时, 稳定的同质异位素不能形成负离子 (如在碳 14 研究中的氮 14). 但是, 对于铍 10 和氯 36 来说, 它们的同质异位素硼 10 和硫 36 就能形成负离子, 所以对铍 10 来说, 用一个吸收体就可以阻止硼. 对氯 36 来说, 采用精细的化学方法也可以使硫的量达到最小. 如果离子的终态能量比较高 (100 兆电子伏左右), 那么, 在末端电离探测器中对能损率进行测量就可以将氯和硫分开.

加速器质谱测定法的灵敏程度可根据所测量的放射性同位素和稳定同位素的探测极限来评估, 对碳 14 和氯 36 而言, 灵敏度好于 10^{15} 分之一, 分别改进了 10^5 倍和 10^6 倍.

加速器质谱测定法应用于确定古代制品的年代 (测得都灵裹尸布的年代为公元 1325 ± 33 年) 和亚利桑那流星陨石坑的年代 (5500 多万年). 鉴别核燃料回收场有无放射性废物泄露, 测量用作固体器件的硅晶片中的氯的扩散情况, 以及测量广岛上空核爆炸所产生的中子杀伤情况, 等等. 广岛的测量证明, 人体辐射损伤的 70% 以上是由中子造成的, 而不是像以前人们认为的那样是由 γ 射线造成的. 另一项应用在未来将变得更为重要, 这就是生物医学研究中的应用. 如研究由碳 14 标记过的致癌物质是如何代谢的. 采用加速器质谱测定法时, 所用剂量低于允许限度, 组织的样本也很小.

目前全球约 40 家实验室的串列静电加速器全部或部分地用于加速器质谱测定法测量. 国际加速器质谱测定法会议每三年举行一次, 全面交流这方面的工作进展.

4. 离子束流分析

离子束流分析是加速器在材料研究和物质结构研究中的应用,在能量低于几个 GeV 时,常用的是范德格喇夫静电加速器或高频高压加速器.市场上出售两种类型的加速器,一种是有单一端点的加速器,它的束流强度比较高,束流操纵的可变性较大;另一种是串联加速器,只限于能产生负离子的原子.

这些加速器通常不必安装在专门的加速器实验室中,非常容易保养,且操作简便.工业研究中最常用的技术是卢瑟福背散射光谱学.氦离子是最好的炮弹,因为当能量较高(3 兆电子伏以上)时可用核共振散射来探测与含碳、氮或氧等靶分子一起出现的光子.

由于在这一能量范围内有大量的核反应数据,加速器从多种原子产生荷电粒子(而不是通常的中子),可用来开展活化分析(通过照射样本的方法探测痕量元素).这些分析方法更适合于较轻的元素.人们用共振反应来探测铝、钛和钒等痕量金属.

氢原子对半导体、绝缘体和陶瓷等好几大类材料的性能起关键作用,谨慎地选择炮弹粒子有利于氢的成分分析;接下去就是测量发出的 γ 辐射.用这种方法可以分析太阳能电池材料和玻璃.

全球许多实验室以研究为目的开展了离子束流分析,大多数工作是由科研实验室与工业界合作进行的,只有几家实验室提供纯商业用途的服务.

四、加速器的未来应用

粒子加速器的发展应列为 20 世纪的一项重大科技成就.加速器的束流强度进一步提高之后,在工业和医学上将会有更广阔的应用.

1. 医学

在竞争激烈的放射药品生产中,发展的趋势是使用更高流强的加速器,更廉价地生产同位素,同时也要能在日益严格的放射管理下运行加速器.

几家加速器生产厂商正在研制更高流强的加速器,流强范围在 500 微安到 1000 微安之

间.要求有更好的生产靶,以便适合于热生产的条件.比利时 IBA 公司提供流强 2 毫安、能量 18 兆电子伏、带内靶的正离子回旋加速器,可以生产新的放射治疗同位素钷-103,可用于癌症近距离放射治疗.加拿大 EBCO 工业公司和介子工厂宣称他们已从现有的 30 兆电子伏回旋加速器上引出 1000 微安束流.

同位素生产工业是加速器技术发展的一个重大机遇.从历史上看,材料试验反应堆一直在向工业界和医疗界提供低价同位素,但许多反应堆都已到了使用期限,而且不会再更新了.核电生产和核燃料试验研究状况不佳,加上废料处理的困难,使得裂变反应堆越来越没有吸引力了.我们可以建造带有适当的靶的高强度加速器来生产必需的 $10^{14-15}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的中子通量(也就是能量 500—1000 兆电子伏、强度为几个毫安的散裂源).这类加速器没有临界的问题,也没有燃料管理的问题,可以取代核反应堆生产 neutron,但到目前为止还没有哪家实验室提出过这样的计划.

在当今由反应堆生产的同位素中,钼-99 仍是最通常的医用同位素,它是由富集的铀-235 在热中子反应堆中裂变产生的. IBA 公司最近提出一种质子驱动亚临界强中子源方案,用回旋加速器提供的 150 兆电子伏、1.5 毫安的质子束流轰击铅水靶(靶周围设水反射器和石墨反射器),用散裂法生产 neutron.这些最初的散裂 neutron 还将轰击含有亚临界铀-235 的次级靶,生产的热 neutron 通量达到 2×10^{14} ,裂变功率超过 500 千瓦.生产者可以将钼-99 放置在这台加速器中,无需用核反应堆就可继续生产出符合放射药品质量的产品.这种小型装置比新研制一台反应堆要便宜得多.

美国田纳西州范德比尔特大学建造了一台用加速器驱动的自由电子激光器,专门用于医学和生物学研究.初步的研究结果令人鼓舞.他们用自由电子激光辐射打到蛋白质的氨基 II 带上,引起组织的脱落,但没有造成实体的损伤.自由电子激光器可以提供一把精密的外科手术解剖刀.

2. 电力生产

用加速器驱动裂变装置发电的新理论已经出台. 方案中使用天然的钍作燃料. 这一技术的实现减少了铀的扩散, 同时减少了长期的铀后放射性废料.

在欧洲核子研究中心, 卡洛·鲁比亚等人提出用一台加速器生产的 10 亿电子伏、7 毫安的束流来轰击含核燃料和减速材料的靶系统, 他们将用钍来增殖可裂变的铀-233 以维持能量产生. 精细的设计将能保证热中子通量为 $10^{14}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的亚临界运行. 一台“能量放大器”样机能生产出 100 兆瓦以上的电力. 有趣的是, 这个装置的热中子值很接近于同位素生产所需的值.

最初由洛斯阿拉莫斯实验室提出的加速器驱动嬗变技术 (ADTT) 就包含一项能量生产计划, 它所使用的燃料就是钍, 而且整个装置一直要保持在亚临界状态.

燃料必须夹放在氟化锂-铍熔盐中, 以利于高温运行. 洛斯阿拉莫斯的研究表明, 这不仅需要有一台高强度的加速器, 同时所使用的材料也必须具有极端的性能. 日本、俄罗斯等地也正在开展类似的研究.

电力生产的另一种可能的的方法是惯性约束聚变. 有几个加速器实验室正在研究标准的氘-氘反应, 质子-硼 11 的反应也引起了人们的注意.

3. 环境

* * * * *

恐龙毁灭于癌症

一度称霸地球的恐龙很可能灭绝于一场大规模的癌症, 而引发癌症的罪魁祸首则是太阳系附近一颗坍塌的恒星, 这是美国南卡罗来纳大学的一位科学家提出的新观点.

胡安·科勒在近日出版的英国《新科学家》杂志上报告说, 6500 万年前, 距太阳系 20 光年以内的一颗恒星“寿终正寝”后坍塌, 释放出大量中微子. 中微子穿透力极强, 当它穿透生物体会破坏细胞中的基因, 导致癌变, 他估计平均使每公斤生物组织有 12 个细胞产生癌变.

加速器技术可以造福于地球的环境治理, 因为它能对核废料进行转化. 常用的核燃料含有长寿命锕类同位素等高放射性废料产物和碘 129 (半衰期为 1.6×10^7 年) 等长寿命裂变产物. 这些材料的储存一直是严重的公共问题和政治问题. 加速器带动废料转化 (ATW) 技术, 对这个问题提出了解决办法.

由洛斯阿拉莫斯实验室提出的 ATW 设计中, 一条 100—200 毫安、能量达 1.6 GeV 的质子或氦核束流与一个散裂靶发生作用, 每入射粒子能产生 50 个快中子, 包含在一个慢化再生区内. $10^{16}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 高的中子流强经过热化而产生的热中子流强, 足以将镆-237 (半衰期为 2.1×10^6 年) 等锕系产物转化为可裂变的镆-239, 裂变产物钨-99 (半衰期为 2.1×10^5 年) 可转化为稳定的钨-100.

虽然由加速器驱动的中子源确实能转化大多数长寿命放射性核素, 但加速器装置本身和运行管理费用都是很昂贵的.

小型加速器也能有助于环境控制, 虽然迄今为止它的应用有限, 但可能危害环境的化学方法也愈益失去吸引力, 成本效益也越来越小. 加速器技术可用于水和废料处理、污水消毒和大型工厂烟囱废气的处理. 用小型加速器消灭病菌和毒素也是一个颇为吸引人的开发项目.

(编译自《西欧中心快报》

1995 年第 5 期, 题图张树梓)