

谈一谈

质子直线加速器的应用



罗应雄

电子直线加速器在医疗、工业、科研中的广泛应用已为人们所熟知。作为其孪生兄弟的质子直线加速器有什么用途，知道的就比较少了。原因是，由于它结构庞大复杂，造价昂贵，至今建成和使用的台数不多。但由于直线加速器具有脉冲流强大、束流品质好和注入引出容易等三大优点，可以相信，随着技术的日益进步，某些障碍会不断克服，质子直线加速器将得到广泛应用。这里，着重介绍质子直线加速器的某些独特用途，包括用作高能质子同步加速器的注入器，用于放射治疗、裂变材料增殖和材料的中子辐照损伤研究等四方面。

一、高能质子同步加速器的注入器

现在世界上正在运行的质子直线加速器不到二十台，其中十一台是作为高能质子同步加速器的注入器。这是不足为奇的。因为前面谈到的直线加速器的三大优点，是其它类型加速器所不具备的。脉冲流强大，可使被注入的同步加速器的流强增高。流强是物理实验要求的一个重要指标，因为流强大，单位时间内所测到的实验事例多，有利于精确地对实验结果作统计分析。从这一点看，质子直线加速器是无与伦比的注入器。其次，由于它的束流品质好，同步加速器的真空盒和磁铁尺寸可以做得小些，从而大大降低造价和运行费用。此外，作为注入器，质子直线加速器目前所能提供的束流性能，它的稳定性和可靠性都比较令人满意。

二、放射医疗

用X射线或 γ 射线治疗肿瘤有个缺点，即它们在杀伤肿瘤细胞的同时也杀伤肌体正常细胞，因而所用剂量受到限制。而质子、中子、 π 介子等在低能时的电离损耗远比高能时大，所以，适当选择这些粒子的能量，使它们在较高能量时穿过正常组织，能量较低时穿过肿瘤细胞并停留在其中，就能更有效地杀伤肿瘤细胞而对正常组织损伤不大，这当然是比较理想的。

用质子束直接照射病灶固然有其独特优点，但困难在于，由于人体的组织密度各处不同，很难控制精确的剂量分布，因而目前还处在动物试验阶段。

高速质子束打靶后产生的中子或负 π 介子对某些肿瘤有特别疗效。几年来，美国费米实验室利用质子

直线加速器(主要用作同步加速器的注入器)多余的质子束流(能量为66兆电子伏)打靶得到快中子(能量为25兆电子伏)，对三百多个癌症患者进行了治疗，总的来说效果是好的。确实证明中子比X射线疗效好，中子辐射治疗能很有效地控制肿瘤。故美国卫生部又再次拨款，以扩大该研究室的中子辐射治疗业务。

能量为35兆电子伏、平均流强为100微安的质子束打到厚铍靶上，在距靶1.25米处，可得到100拉德/分的剂量率。这是中子辐射治疗的最佳状态。

用负 π 介子治疗某些深部位肿瘤的前景更是令人鼓舞。美国一名直肠癌患者，已到晚期生命垂危阶段，经过二十五天的负 π 介子照射治疗，竟然康复出院。为什么用负 π 介子来治疗，有这么好的疗效呢？我们知道，负 π 介子的电荷与电子的电荷一样，而质量是电子的273倍。介子象胶水一样把原子核中的质子和中子牢牢粘在一起。当中能质子炮弹击碎靶核的时候，具有各种动能的负 π 介子飞向各方。用磁铁系统、准直狭缝和吸收片对它们加以收集、导向、聚焦、整形、调整能量，最后得到符合要求的负 π 介子束。在软组织中，54兆电子伏的负 π 介子能穿透10厘米，82兆电子伏的负 π 介子能穿透20厘米。负 π 介子有一种奇特的性质：它在行进过程中，对活组织损伤很小；越是接近行程終了，它产生的X射线越强；終了时，它被核俘获，整个质量转换成能量，其大小为 $E=mc^2$ ，约140兆电子伏。俘获它的核，一个个发生爆炸，向各方抛出核碎片，即所谓‘星裂’。杀伤肿瘤细胞主要靠生成物中的质子、 α 粒子和重核碎片，因为它们带电，个儿又比较大，行程短，能产生致密电离辐射。在同样剂量下，这种致密电离辐射对细胞的杀伤力要比X射线和钴⁶⁰的 γ 射线的杀伤力大三倍左右。后者称为稀电离辐射。此外，肿瘤细胞一般都缺氧，从而使它具有天然的抗辐射本领。对杀伤缺氧细胞来说，致密电离辐射的效力比稀电离辐射大60%左右。

美国洛斯阿拉莫斯介子工厂已较成功地对上百个病人进行了治疗。目前最大的问题是，取得 π 介子的代价太高，难以推广。但由于 π 介子对治癌的特殊疗效，美国正在建造一台专用于治癌的 π 介子发生器，它的质子直线加速器的能量是650兆电子伏。高能电子固然也能用来产生 π 介子，但质子产生 π 介子的效率要比电子大30到40倍。

质子直线加速器在医疗方面的应用还在于它能生产一些特殊的同位素,如碘¹³¹,它比目前通用的作为各类器官扫描媒介的碘¹³¹,对人体的损害要小 100 倍,因为它的半衰期比较短(13 小时)。另外还能生产氙¹²⁷、钴⁵⁷和锌⁷²等等,在医疗中都有特殊用途。美国正在建造一台 45 兆电子伏的质子直线加速器,专门生产这些特殊同位素。

三、裂变材料增殖

在地球大陆表面 1.6 公里地壳内蕴藏的铀和钍所能提供的能量,按现在全世界年消耗量的 50 倍计算,足够用一亿年。但这两种元素的绝大部分都不是燃料,需要经过某种转换才能加以利用。要想使这些元素‘燃烧’起来,关键是要实现燃料增殖循环。这种循环系统所生产的燃料,多于它本身消耗的燃料。快中子增殖反应堆就是这样一种系统。近年来,由于能源危机的出现和快中子反应堆的安全问题太缺乏保障,一些科学家就很自然地把目光转向质子直线加速器。

我们知道,铀²³⁸和钍²³²吸收中子后可以变成裂变材料钚²³⁹和铀²³³。一个能量为 1000 兆电子伏的质子打到尺寸足够大的铀-钍靶上,能产生 50 个中子和 4000 兆电子伏的当量热,差不多每个中子都能生产一个可裂变原子核。按此计算,一台能量为 1000 兆电子伏、平均流强为 300 毫安的质子直线加速器,一年可生产一吨核燃料,相当于 5 个功率各为 100 万千瓦的反应堆的需要量。质子束在靶上产生的热量总共为 120 万千瓦,按 40% 变成电能计算,可发电 48 万千瓦,而加速器本身耗电约 60 万千瓦,几乎自给自足。重要的是,它可以把反应堆中已燃尽的废料经照射后又拿回去做燃料,不需经过分离。这种循环使用,在经济上的价值是显而易见的。

对用于生产裂变材料的加速器,目前的主要难题是要研制一种高功率、高效率、并能连续工作的大功率管。要求加速系统把电能转换成束流功率的效率要大于 50%。此外,要做到安全可靠,束流损失要降到最低水平。因为它的流强较大,又是连续束流,因此只要有万分之一的束流损失都会造成极严重的放射性沾污,给机器维护带来极大的困难。

近十年来,一些国家特别是加拿大的科学家们一直在研制这样一台直线加速器。如能实现,将提供一条可与快中子增殖反应堆竞争的路子,或者是后者的补充。两相配合,全世界的裂变材料几乎将取之不尽,这是十分诱人的前景。

四、中子辐照损伤的研究

解决能源问题的另一条路是利用可控热核反应。近年来各国都投入巨大的人力物力进行研究。可控热核反应的磁性约束方法和惯性约束方法都已接近突

破。前者是利用高温等离子体实现可控热核反应,后者是利用重离子加速器的束流或激光打到氘-氦小球丸上实现聚变反应。据估计聚变反应堆有可能在八十年代中期问世。它在达到实用阶段以前,有一个问题必须首先解决,即聚变反应过程所产生的 14 兆电子伏的高通量中子对聚变反应堆的结构材料损伤程度如何,什么合金适于做反应堆的内壁,这是对材料科学提出的新的课题。这个问题是根据我们从发展裂变反应堆过程中得到的经验教训而提出来的。在裂变反应堆中,不锈钢的断裂强度在中子积分通量达到 1×10^{22} /厘米²时急剧下降;氦的生成使钒合金在 700℃ 以上时延伸率大大降低;铝合金在高通量中子轰击下发生膨胀等等。这些知识启示我们,在聚变反应堆中,结构材料将遇到更恶劣的条件,受损伤的程度将比裂变反应堆更严重。可以肯定这种损伤主要是能量高于 10 兆电子伏的中子造成。故设法用 14 兆电子伏高通量中子源进行广泛预先试验研究势在必行,以便取得设计聚变反应堆所必需的数据和发展新型合金来满足需要。

利用直线加速器作为 14 兆电子伏高通量中子源,国外已提出几种设计方案。比较理想的方案是建造一台能量为 35 兆电子伏、流强为 200 毫安的氦核直线加速器。把高速氦核打到流动的液态靶上,可望得到大于 1×10^{14} 中子/厘米²·秒的有用通量,这正与聚变反应堆的中子通量同量级;中子的能谱也类似于聚变反应堆的中子能谱。因此,完全可以模拟反应堆用来进行材料的辐射损伤研究。美国正在建造两台这种特殊用途的氦核直线加速器。

整个试验装置的主要困难在于靶系统。加速器本身在技术上是成熟的。需要特别加以注意的是部件活化问题。为了减少粒子损失,必须采用完善的束流输运系统和聚束器,粒子通道的孔径要适当加大,准直度要提高。总之,设计参数要尽量保险为宜。

从上面的介绍可以看出,质子直线加速器的应用,有着重要的意义,但由于它的价格昂贵,结构庞大复杂,使它的应用受到严重的限制。各国科学家和技术人员正在努力克服这些障碍。

想办法使质子直线加速器的结构变得小巧玲珑,造价大大降低,可靠性和灵活性大大提高。举例说,美国七十年代初期建成的 800 兆电子伏质子直线加速器(介子工厂),长度为 780 米,而目前正在研制的用于治癌的 650 兆电子伏质子直线加速器,由于采用新技术,长度只有 150 米,加速腔的横向尺寸也缩小了一半。如果用 35 兆电子伏质子直线加速器作为中子发生器,其长度也许不到 20 米。

这些例子充分说明,随着加速器新技术、新工艺的不断发展,加速器建造和运行的费用不断降低,质子直线加速器在多方面的应用是大有希望的。