

核能应用的物理学基础

仇 九 子

(中国人民武装警察部队学院基础部 廊坊 065000)

能源是维持人类生存和发展的重要物质条件。随着世界人口的不断增加、人类生产和生活条件的不断改善,人类对能源的需求量也在不断地上升。然而,目前世界上的常规能源,如水力、风力、煤炭、石油和天然气等资源都是有限的,煤炭、石油和天然气的世界储量最多还可开采 100 到 200 年,到 21 世纪中叶,世界将面临能源匮乏的严重局面。因此寻找和开发新能源一直是人类的一项重要任务。在 20 世纪 30 年代,随着人们对原子核研究的深入,人们认识到在原子核内蕴藏着巨大的可开发的能量,并开始了和平利用原子核能的研究。现在世界上已建成的裂变核电站有 300 多座,其发电量约占世界总发电量的 $\frac{1}{4}$ 。聚变核电站的研究正在进行之中,相信在不远的将来可控热核聚变电站就会成为现实。到那时,能源危机就会彻底得到解决,因为地球上有着丰富的、可开发利用的聚变能,它足以让人类永世享用。与火电相比,核能还是廉价、洁净和安全的能源。核能的发现和利用,为人类的持续生存和发展提供了保障,它是未来人类赖以生存和发展的

终之谜之前必须首先解答的问题。

γ 暴能量巨大,而且是宇宙中已知的最为极端相对论性的天体,也是自然界中惟一能再现宇宙极早期环境的事例。它与恒星的死亡、超新星爆发、黑洞、中子星、白矮星、恒星形成、引力波、引力透镜、宇宙学等天体物理中最基本的课题密切相关,是天文学上最神秘的问题之一。1997 年以来,关于 γ 暴的新发现层出不穷,使得这一领域的研究异常活跃。仅 1997 年和 1998 年在重要的国际学术刊物中发表的 γ 暴论文总数就接近 1000 篇,而近 3 年中在《Nature》和《Science》上发表的相关论文也超过了 20 篇。2000 年 6 月 CGRO 卫星的销毁对 γ 暴的研究是一大损失,但同年 10 月顺利发射升空的美国 HETE - II 卫星,有着比 CGRO/BATSE 和 BeppoSAX 更强的对 γ 暴的观测和定位能力,人们期待

着它能带来一系列的新发现。

一、核能应用的物理学基础

1 原子核的质量亏损和结合能

原子核是由质子和中子组成的。质子和中子都叫做核子。原子核的质量总是小于组成它的核子的质量和。把组成某一原子核的核子的质量和与该原子核质量的差值叫做原子核的质量亏损,用 Δm 表示。

由相对论的质能关系式 $E = mc^2$ 可知,质量和能量是相互联系的。当一个系统的质量减小时,系统向外界释放能量;反之,系统吸收能量。

原子核的质量亏损说明,在核子组成原子核的过程中有能量放出。放出的能量 ΔE 由质能关系式可得,为:

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

把这种自由核子结合成原子核时放出的能量叫做原子核的结合能,用 B 表示。相反,若要让原子核分解为单个核子,原子核要从外界吸收相应的能量。如果一个原子核是由 Z 个质子和 N 个中子组成,其质量为 m ,则这一原子核的结合能为:

着它能带来一系列的新发现。

近年来,国内在 γ 暴领域的研究也很活跃,主要有 5 个单位:高能物理所、北京天文台、紫金山天文台、香港大学物理系和南京大学天文系。南京大学和香港大学主要从事理论研究,提出了从极端相对论到非相对论的普遍性火球动力学演化模型和从中子星到奇异星的相变能源机制,在喷流效应等方面他们也作出了比较详细的研究。北京天文台参加了 γ 暴光学余辉的国际联测。高能物理所在高能观测数据的分析方面作出了很有意义的工作,并与紫金山天文台合作研制了空间探测器,正在进行 γ 暴宽波段的卫星观测。我们期待着更多的学者和青年人能以不同的方式加入我们的行列,共同为祖国的科技进步作出贡献。

$$B = (Zm_p + Nm_n - m)c^2 = \Delta mc^2$$

式中, m_p 和 m_n 分别为质子质量和中子质量。

2 原子核的比结合能

不同核素的结合能差别很大。一般说来, 核子数 A 大的原子核其结合能 B 也大。把原子核的结合能 B 与核子数 A 的比值叫做比结合能, 用 ϵ 表示:

$$\epsilon = \frac{B}{A}$$

ϵ 常用的单位是兆电子伏特/核子 (MeV/Nu)。

比结合能表明了自由核子结合成原子核时, 平均每个核子释放出的能量。图 1 绘出了比结合能 ϵ 与核子数 A 的关系曲线, 叫做比结合能曲线。由图 1 可以看出, 比结合能曲线是两端低, 中间高。即中等质量核的比结合能大, 很轻的核和很重的核的比结合能小。这表明, 当一个很重的原子核分裂为两个中等质量的原子核或当两个很轻的原子核核聚合成一个较重的原子核时, 由于 ϵ 由小变大, 都会有能量释放出来, 这种能量叫做核能, 俗称原子能。例如, 当一个 ^{235}U 吸收一个中子而成为 ^{236}U , 随之裂变为两个中等质量的原子核时, 比结合能约由 7.6 增大到 8.5 MeV/Nu, 约释放出 210 MeV 的核能来。1 千克 ^{235}U 全部裂变时所释放出的能量约为 8×10^{13} 焦耳, 相当于 2500 吨优质煤燃烧时放出的热量。而当一个氘核 (^2H) 和一个氚核 (^3H) 聚合成一个氦核 (^4He), 同时放出一个中子时, 约有 17.6 MeV 的能量放出。由此可见, 在原子核内蕴藏着大量可利用的能量, 重核裂变和轻核聚变是获取核能的两条主要途径。

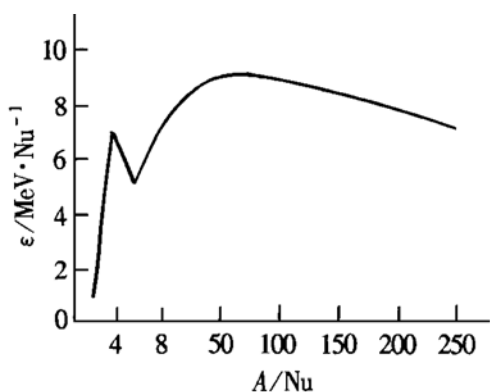


图 1

二、核能利用的条件

虽然在原子核中蕴藏着巨大的能量, 但是要大规模利用核能, 尤其是要大规模和平利用核能, 需要

具备一定的条件。

1. 裂变能利用的条件

要大规模和平利用重核裂变所释放出的能量, 必须满足以下 3 个条件: 1) 重核能够分裂为两个中等质量的原子核; 2) 裂变反应能够自持地进行下去; 3) 裂变的速度能够人为地加以控制。

重核发生裂变的方式有两种: 一种是原子核自发地发生裂变, 叫作自发裂变; 另一种是在外来粒子的轰击下, 原子核发生裂变, 叫做诱发裂变。地球上现存的可自发裂变的核, 其裂变速度都很慢。所以, 利用自发裂变无法实现大规模的核能利用, 要大规模利用核能只能采用诱发裂变。

由于中子不带电, 与核之间没有库仑斥力, 极易进入原子核使原子核发生裂变, 所以诱发裂变中常用中子轰击原子核。另外, 由于轻核的质子数和中子数一般相等, 中等大小的核往往中子数略微大于质子数, 而重核的中子数比质子数大得多。所以, 在重核裂变为两个中等核的过程中伴随有多个中子的发射。例如, ^{235}U 在热中子轰击下发生裂变时, 每次有 2—3 个中子产生。裂变产生的中子又可能引发其他铀核发生裂变。只要一个核吸收一个中子发生裂变, 而裂变释放的中子中至少平均有一个能又一次引起裂变, 就能够使裂变持续地进行下去, 这叫做链式反应。中子引发的链式反应使核能的大规模利用最先变成了现实。如果平均不到一个中子能引起裂变, 则链式反应将逐渐停止, 若超过一个中子引起裂变, 则链式反应就会不断增强, 这时, 若链式反应得不到控制, 就会使链式反应急剧增强, 形成核爆炸, 这就是原子弹的基本原理。

要控制裂变速度, 就必须控制引起裂变的中子数目。在核电站中, 通常是在发生裂变的反应堆中插入一些可移动的镉棒来控制引起裂变的中子数目。因为金属镉吸收引起裂变的热中子的几率很大, 所以可以用来控制裂变反应的速度。当要加剧反应速度时, 就将镉棒向外移动, 减少对中子的吸收量, 以增大引起裂变的核数目; 当要减弱裂变速度时, 就将镉棒向里插入, 增大对中子的吸收量, 减少引起裂变的核数目。这样就可实现裂变的人工控制。

目前的研究表明, 自然界中天然存在的可诱发链式反应的核素只有 ^{235}U 一种。所以, 把 ^{235}U 叫做核燃料。然而, ^{235}U 在天然金属铀中的含量 (即丰度) 很小, 只有 0.7%, 而 ^{238}U 却占 99.3%。但是, 一

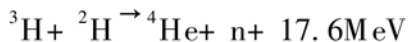
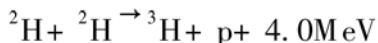
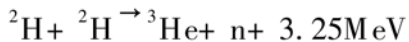
般情况下,很难使 ^{238}U 发生链式反应,因此 ^{238}U 也就不能用作核燃料。另外, ^{239}Pu 和 ^{233}U 也可诱发链式反应,但是这两种核素都非天然存在,是只能由人工生产的核燃料。

裂变能已在核电站、核动力和核武器等方面得到了广泛的应用。然而,由于地球上可大规模利用的裂变核燃料的储量是有限的,因此裂变能不能解决人类对能源的长远需求问题。要解决这一问题,就必须依靠聚变能。

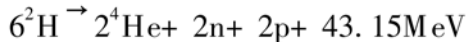
2 核聚变实现的条件

把两个或多个较轻的原子核结合成一个较重的原子核的现象叫做原子核的聚变。由图1可以看出,在轻核区比结合能随核子数上升最快,因此轻核聚变时平均每个核子释放的能量也最大。所以,目前的核聚变研究主要集中在轻核区。

常用的聚变反应有下列4个:



在实际的聚变反应堆中这4个反应都在进行。由反应式可以看出第一个反应的产物 ${}^3\text{He}$ 是第四个反应的原料,第二个反应的产物 ${}^3\text{H}$ 是第三个反应的原料。把上述4个反应式相加,可以得到以上4个反应的总效果是:



可见,6个 ${}^2\text{H}$ 核聚变成两个 ${}^4\text{He}$ 时,共释放出43.15MeV的能量,平均每个核子释放3.6MeV,是 ^{235}U 裂变时平均每个核子释放能量(0.85MeV)的4倍左右。

聚变反应中所需的原料氘(${}^2\text{H}$)在海水中有很丰富的储量。从1升海水中提取的氘,使它发生聚变反应,相当于燃烧300升汽油所放出的能量。全世界一年只须消耗560吨氘,地球海洋中的氘估计可用 10^{11} 年(1000亿年)。另外,聚变反应的产物 ${}^4\text{He}$ 无毒、无放射性,不污染环境。因此,可以说聚变能是人类“取之不尽、用之不竭”的洁净能源。

然而,要实现聚变反应并不是一件容易的事情。因为原子核带有正电荷,两个核之间具有库仑斥力,所以,两个原子核要结合,必须先克服库仑斥力作功。这表明原子核只有具有很高的能量,才能够相聚在一起。例如,两个氘核发生聚变时,克服库仑斥力作的功为144keV。这就是说平均每个氘核要具有72keV

的动能。如果把这个数值看成是氘核作热运动的平均平动动能,可算得氘核的温度为 $5.6 \times 10^8\text{K}$,即高达上亿度。在这时,所有的原子都已电离成原子核和电子,形成了物质的第四态——等离子体。

将上亿度的等离子体约束在一定区域内,维持一段时间,使其发生的聚变反应,叫做热核聚变。氢弹爆炸是一种人工实现的不可控制的热核聚变。

实现可控热核聚变,除了要把等离子体加热到很高的温度以外,还必须要满足两个条件:一是等离子体的密度必须足够大;二是所要求的温度和密度必须能维持足够长的时间。这就需要有一个“容器”来约束等离子体,它不仅能承受上亿度的高温,而且不能导热,不能因等离子体与容器的碰撞而降温。然而,普通的容器都无法满足上述要求。所以,科学家一直在研究、寻找一些特殊的“容器”,使其能够约束等离子体。

任何物体在上亿度的高温下都会离解为等离子体,所以要约束等离子体只有3条途径:引力约束、惯性约束和磁约束。

太阳和其他恒星之所以能发光,有热能辐射,就是因为它们在它们内部不停地进行着核聚变。在这些恒星中,高温等离子体是由恒星巨大的质量产生的引力来约束的。

氢弹,从本质上讲,是利用惯性力将高温等离子体进行动力学约束来实现热核聚变的,这种约束叫做惯性约束。但是由于氢弹一次爆炸放出的能量太大,无法有效地利用。为了使热核聚变能够有控制地进行,1964年我国物理学家王淦昌就独立地与国际上同时提出了惯性约束核聚变的概念。其基本思想是:在直径为毫米量级的小球内充以高压的氘-氚混合气体,制成燃料丸,再用多束强激光从四面八方同时轰击燃料丸,使燃料丸表面物质离解成高温等离子体向外飞溅,向外飞溅的等离子体会向内产生很强的惯性力,使氘-氚混合气体快速地压缩,形成密度极高的高温等离子体,发生聚变,放出聚变能。除了用激光外,还有用电子束和重离子束照射燃料丸进行点火的。但这些都还处于研究阶段,距离工程应用还有很大差距。

从目前的研究来看,实现可控热核聚变最有希望的途径是利用磁约束,即利用强磁场将高温等离子体约束在一定的空间内,使其发生聚变反应。

科学家们预计在21世纪中叶,聚变核电站将可能成为现实。