



·物理前沿

·学部委员钱临照教授主持

受控核聚变

—现代物理学的一个重要前沿领域(之三)

·朱士湘



三、劳逊判据和热核点火

核聚变与核裂变可以说是核能的一对孪生兄弟。氘的聚变反应是在1934年世界上第一台加速器投入运行后不久就实现的,而铀的裂变反应直到1938年底才发现。然而,裂变能源的发展一帆风顺而聚变能源的探索却道路曲折。早在1942年就建成了具有功率输出的实验性裂变反应堆,50年代就建成了商用核电站。而核聚变直到最近才基本证明了它的科学可行性,90年代可建成具有功率输出的实验反应堆,要到21世纪初才能发展商用聚变核电站。这是因为实现受控核聚变的条件实在太苛刻了!首先要使等离子体达到1亿度的极高温度,并且维持足够长的时间,以便产生足够多的聚变反应,释放大量的能量。

1957年,英国科学家劳逊计算了高温聚变等离子体中的能量平衡问题,导出了著名的劳逊判据,即在聚变反应堆中实现能量得失相当的必要条件。设等离子体密度为 n (其中氘和氦各占一半),加热到温度 T ,聚变反应堆是脉冲式运行的,高温等离子体维持时间为 τ 。 τ 的物理意义是一团高温等离子体当它不再从外部获得能量时,通过能量的损失从高温降到室温所花费的时间。图2是劳逊分析能量平衡时的等离子体

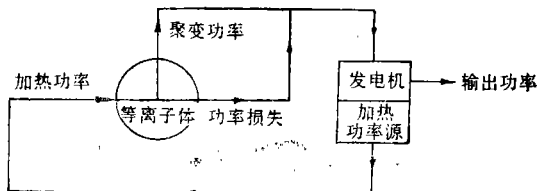


图2 推导劳逊判据的功率流程图

功率流程图。从聚变堆中的等离子体输出的功率包括聚变反应功率 $P_{\text{聚变}}$ 和损失功率 $P_{\text{损}}$ 。将这些功率经过效率为 η 的热功转换系统变成电能,再将这些能量回授给等离子体区域,用来维持聚变反应所要求的等离子体,并补偿韧致辐射造成的能量损失。

单位体积等离子体(氘氦混合)的聚变功率为

$$P_{\text{聚变}} = \frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle E,$$

其中 $\langle \sigma v \rangle$ 是反应截面 σ 与粒子速度 v 的乘积的平均

值, E 是每次氘氦聚变反应放出的能量。等离子体损失的功率为

$$P_{\text{损}} = \alpha n^2 T^{1/2} + \frac{3nT}{\tau},$$

式中第一项是韧致辐射引起的损失功率, α 是系数;第二项表示除此以外其它途径引起的损失功率。因此,等离子体释放的总功率 P 为

$$P = n^2 \left(\frac{\langle \sigma v \rangle E}{4} + \alpha T^{1/2} \right) + \frac{3nT}{\tau}$$

其中 $3nT$ 是单位体积的等离子体能量。因此,为了在等离子体中实现能量平衡,必须通过外部加热来补偿能量损失, $P_{\text{加热}} = P_{\text{损}}$ 。如果按图2所示,将等离子体中释放的能量变成电能用来加热等离子体,那么就满足 $\eta P > P_{\text{损}}$ 。经过简单运算便可得到如下的重要式子

$$n\tau > \frac{3T}{\left(\frac{\eta}{1-\eta} \right) \frac{1}{4} \langle \sigma v \rangle E - \alpha T^{1/2}}$$

这说明,实现聚变反应能量得失相当要满足两个条件。第一个条件是等离子体温度必须足够高,使得离子能克服库仑斥力发生聚变反应。第二个条件是等离子体密度 n 和约束时间 τ 的乘积必须足够大,这样就会有足够多的离子发生聚变反应放出足够的能量用以补偿等离子体中通过各种途径损失的能量。当然, n 和 τ 的值不是唯一的。当 n 很大时意味着单位时间内有相当多的核参与聚变反应,放出的能量足够大,因此维持时间相对来说可以小一些。如果 n 小,则要求 τ 足够大。劳逊在计算时采用的参数是:

$\eta = 1/3$, $\alpha = 3.8 \times 10^{-22} \text{J}^{1/2} \text{m}^3 \text{s}^{-1}$, $E = 17.6 \text{MeV}$,

计算结果如图3所示。从图中可以看出, $n\tau$ 对于 T 的关系曲线有个极小值。在温度 $T < 20 \text{keV}$ 时,聚变功率随温度升高而增加;因而对 $n\tau$ 值的要求降低。可是,

当 $T > 30 \text{keV}$ 时,聚变等离子体中的能量损失随温度的升高而急剧增加,超过了聚变功率随温度升高而引起的增加,所以此时对 $n\tau$ 值的要求变为苛刻了,曲线再次呈上升趋势。平常所说的劳逊判据是指 $T = 10 \text{keV}$,相应的

$$n\tau = 6 \times 10^{19} \text{m}^{-3} \text{s}.$$

如果采用纯氘等离子体,由于氘-氘反应截面小,相应

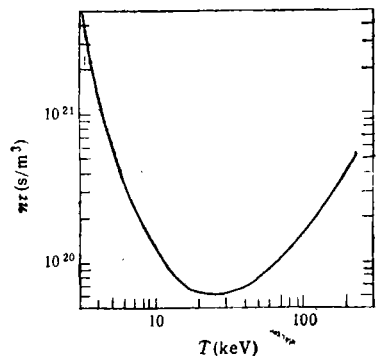


图3 $n\tau$ 与 T 的关系曲线(劳逊判据)

的劳逊判据值要大些。

如果将聚变反应中产生的带电粒子 (^4He) 通过强磁场约束在等离子体内部, 用来加热等离子体, 维持聚变反应所需的极高温, 这样毋需再从外界输入能量, 聚变反应也能自持地进行下去。此时, 这只“烧”聚变燃料的特殊“炉子”已经点着了。表征这个概念的科学术语叫“聚变点火”, 亦称“热核点火”。聚变产物 α 粒子 (即 ^4He) 的加热功率密度为:

$$P_{\alpha} = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle E_{\alpha},$$

式中 E_{α} 是 α 粒子的能量, 3.5MeV 。总的等离子体损失功率 $P_L = \frac{3nT}{\tau}$ 。因此, 聚变点火条件应该是 $P_{\alpha} >$

P_L , 即 $n\tau > \frac{12}{E_{\alpha}} \frac{T}{\langle \sigma v \rangle}$ 。图 4 是点火条件的曲线。在 $T = 30\text{keV}$ 时有极小值, 对应的 $n\tau > 1.5 \times 10^{20}\text{m}^{-3}\text{s}$,

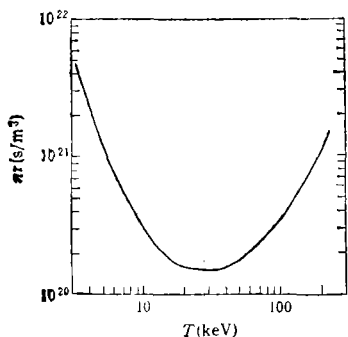


图 4 聚变点火条件

大约是劳逊判据的 2 倍。应该指出, 实现点火仅是受控核聚变研究的第一个目标。炉子点着了还必须烧得很旺才能使用。受控核聚变研究的第二个目标是使输出的能量超过输入的能量, 获得

净聚变能, 建立核聚变发电站。科学家们把第一个目标即实现热核点火称为验证核聚变能源的科学可行性, 第二个目标称为验证核聚变能源的工程技术可行性。

四、磁约束原理和磁约束装置

根据劳逊判据我们知道, 核聚变研究必须解决两个最基本的问题, 其一是首先要获得温度高达一亿度的等离子体, 其二是要使如此高温的等离子体约束足够长的时间。为了约束高温等离子体, 首先得想法把它用容器“装”起来。可是根本就没有哪一种材料做成的容器能够经得住一亿度的高温。因此科学家们就想到利用某种“场”来约束等离子体, 因为自然界中存在着用来传递各种相互作用力的场, 例如引力场、电场、磁场等。

其实, 太阳以及其它的恒星就是利用引力场来约束等离子体的。这些星球都有巨大的质量, 因而巨大的引力能够把等离子体约束在一起, 不让它们飞散开去。例如太阳的质量比地球质量大 33 万倍, 其引力也要大 33 万倍, 因此能把太阳上的灼热等离子体约束

住。然而, 在地球上要依靠十分微弱的引力来约束住高温等离子体是根本办不到的。因此, 只能用磁场来约束等离子体。

磁场的约束性能来自它对等离子体的作用力。这些力包括三个方面: 磁场对等离子体中每个带电粒子的洛仑兹力; 由此产生的对等离子体的宏观效果即磁应力; 当等离子体中有电流通过时, 电流自身产生的磁场还会产生一种箍缩力 (即自收缩力)。这些力的一个共同点就是都和磁场本身垂直。在洛仑兹力作用下, 等离子体中的带电粒子绕着磁力线作回旋运动, 这种运动也叫拉摩运动。带电粒子的回旋半径跟磁场强度成反比。当磁场足够强时粒子的回旋半径很小。例如在热核点火条件下 $T = 10\text{keV}$, 磁场 2 忒斯拉 (中等磁场强度) 时, 电子的回旋半径大约 1.7×10^{-1} 厘米, 离子回旋半径大约是 0.7 厘米。根据目前估计, 聚变反应堆中的磁场强度以 5 忒斯拉为宜, 此时带电粒子回旋半径更小。这说明带电粒子好像是被粘在磁力线上, 它的活动范围不超过回旋半径。因此等离子体在磁场的垂直方向就被约束住了。当然, 带电粒子在沿磁力线的方向上也是具有速度分量的。再通过带电粒子间的相互作用, 使等离子体的整体感受到磁场提供的宏观作用力——磁张力。它包括两部分即沿磁力线方向的磁拉力和垂直于磁力线方向的磁压力。如果在磁场和等离子体之间有一个明显的界面, 那么在界面上便存在指向等离子体内部的磁张力, 造成相应的磁压强 P_m , 它跟从等离子体内部指向磁场的等离子体热压强 P_t 相平衡, 即 $P_m + P_t = 0$ 。这样, 磁压力抵消了等离子体的热膨胀力而约束了等离子体。这里磁压强的大小是 $P_m = B^2/2\mu_0$, 式中 B 是等离子体边界处的磁场, μ_0 是真空磁导率。关于等离子体中有电流流过时会产生箍缩效应这个现象可以这样来解释: 整个等离子体电流可以看成是许多很细的“电流管”, 其中的电流方向均相同。显然, 它们之间存在相互吸引力。在等离子体边界附近的电流管只受到朝向轴心的吸引力, 而得不到来自边界外的吸引力, 所以就向中心收缩; 所有中间各层的电流也同样有一个向中心收缩的趋势。这种现象的起因是电流自身产生的磁场对自己发生作用的洛仑兹力, 和外加磁场无关, 因此称为自收缩效应或箍缩效应。

磁场就是通过上述几种效应来约束等离子体的。磁约束聚变等离子体装置按其磁场位形大体上可以分为两大类: 开端装置和环形装置。开端装置的磁力线在装置两端是不闭合的, 如磁镜装置。在这类装置中部分水平速度很大的带电粒子将会沿磁力线从两个端部逃逸出去而造成粒子损失。环形装置的磁力线是在装置内部闭合的, 如托卡马克、仿星器、环形场反向箍缩装置等。在核聚变研究的 40 年历史发展过程中, 曾经提出过各种各样具有不同磁场位形的磁约束装置。