

学部委员钱临照先生主持

受控核聚变

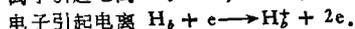
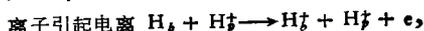
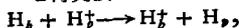
现代物理学的一个重要前沿领域(之五)

朱士尧

转,从而进入离子吞噬器。由这种方法产生的高能中性粒子束经过传输管道注入到等离子体中去。

核聚变研究对离子源的一个要求是希望从中引出的离子束中质子比例尽可能的高,如果氦为工作气体,则要求 D^+ 的比例尽可能高。因为在离子源的放电室中,如果用氢做为工作气体,一般总是会同时产生三种离子: H^+ , H_2^+ 和 H_3^+ 。如果用氦为工作气体,则会产生 D^+ , D_2^+ 和 D_3^+ 。其中仅需要单原子离子,即 H^+ 或 D^+ ,而不需要分子离子 H_2^+ , H_3^+ 或 D_2^+ , D_3^+ 。因为这些分子离子和原子离子一起从离子源中出来通过加速电极,获得相同的能量。离子质量越大速度越小,这些速度较小的分子离子进入中性化气体室后便会离解成原子和原子离子。如果中性化室中的气体足够稠密的话,从中性化室出来的全部是中性原子。但是由 H_2^+ (或 D_2^+)形成的原子能量只是分子能量的一半,由 H_3^+ (或 D_3^+)形成的原子能量只是原来的三分之一。这部分能量很低的中性原子注入到等离子体中去之后难以向中心区域渗透,只能加热边界等离子体,这是我们不希望的。

中性粒子束在等离子体中的吸收主要是通过三种原子过程来实现的,即电荷交换、离子引起的电离和电子引起的电离。如果采用氢等离子体,注入中性氢原子束,并用脚标 b 表示注入的粒子,那么上述这三种原子过程可以表示为



如果能量小于40keV,电荷交换过程占优势。如果能量大于这个值,则由离子引起的电离过程便占优势。由于这些原子过程的存在,注入的中性束强度随着向中心区域的传播而按指数规律衰减。这些高能中性原子进入等离子体之后通过上述原子过程变成了高能离子从而被磁场捕获。这些高能离子再通过碰撞过程将能量交给等离子体,从而达到加热等离子体的目的。

1978年,在美国普林斯顿的PLT托卡马克装置上注入了能量为39keV,功率2.5MW,脉冲长度150ms的高能中性粒子束,第一次将离子温度提高到7.1keV。这在当时是个相当令人鼓舞的实验结果。1986年,在美国TFTR大托卡马克装置上采用功率为15MW,能量为120keV的强流中性粒子束作辅助加热,实现了具有良好约束性能的supershot

五、如何达到点火温度

核聚变研究的重要目标之一是设法把等离子体的温度提高到10keV以上。这是实现聚变点火必不可少的基本条件之一。主要的加热手段包括欧姆加热,高能中性粒子束注入加热,大功率射频波加热,绝热压缩加热和 α 粒子加热等。

1. 欧姆加热的原理及其局限性

众所周知,等离子体是良导体,但具有一定的电阻,一旦有电流通过,因电阻效应而得到了加热。按照欧姆定律,其加热功率密度表示为: $P = \eta j^2$,式中 η 是等离子体电阻率,可表示为 $\eta = 2.8 \times 10^{-8} / T_e^{3/2}$ (欧姆米),其中电子温度 T_e 以keV为单位。这个简单表达式是假定采用氢等离子体、其密度为 $10^{20} m^{-3}$ 情况下代人著名的斯必泽公式得到的。从上式中可知,随着等离子体电子温度的不断升高,其电阻率急剧下降,由此引起欧姆加热的功率密度急剧下降。这说明欧姆加热这种方式有局限性。我们知道,所有托卡马克的等离子体最初都由环向的等离子体电流提供欧姆加热。但经过计算表明,仅依靠欧姆加热,其电子温度至多加热到1.5keV左右。为使等离子体达到10keV以上的聚变点火温度,必须在欧姆加热的基础上采用等离子体辅助加热。目前获得成功并受到广泛重视的辅助加热手段有高能中性粒子束注入法和射频波共振吸收法。

2. 中性粒子束注入加热方法

等离子体加热所用的“中性粒子束”,一般指高能中性氦原子束。在中小型实验装置上大多数采用中性氢原子束。高能中性粒子不受聚变装置中磁场的影响,可直接注入到等离子体中去。进入等离子体后,通过电荷交换和碰撞过程电离成离子。这些高能离子被磁场捕获,再经过跟原有等离子体发生库仑碰撞,把能量交给等离子体从而达到加热的目的。这种方法在托卡马克、磁镜等装置中得到了广泛应用。

为了有效地加热等离子体,注入的中性束流必须要有足够大的功率,才能够穿透到等离子体中心区域,尽量避免只加热其边缘区域。但中性束的能量也不宜过大,防止部分中性束粒子穿透时不被磁场捕获而撞击到器壁上,引起溅射,产生杂质。当然,对于中性束的脉冲宽度和中性束的流强(等效于电流强度)也有要求。中性束的脉冲宽度应该稍大于等离子体的能量约束时间。中性束的束流强度由注入束流的功率和能量来确定。对于大型聚变装置,中性束流的强度需要几十至几百安培。

图10是中性束注入加热系统的示意图。它是这样运行的:首先是在离子源中采用大电流气体放电的方法产生初始等离子体,温度大约是几个电子伏特,密度为 $10^{18} m^{-3}$ 。经过精心设计的多电极结构从初始等离子体中把离子“拽”出来而将电子排斥掉。这些被“拽”出来的离子通过加速机构而得到加速(20—200keV)。加速后的高能离子经过中性化气体室后,捕获气体中的电子而成为高能中性粒子。从中性化气体室中出来的粒子流中除了高能中性粒子之外还有部分尚未捕获到电子的高能离子。这部分离子经过偏转磁体时发生偏

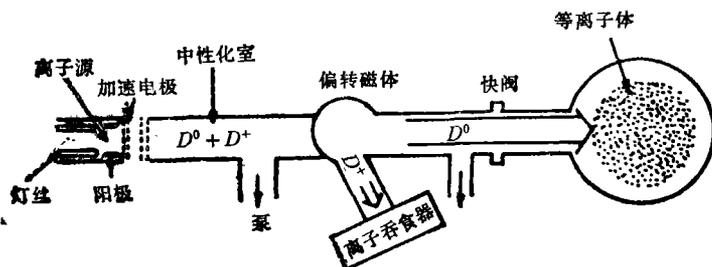


图10 中性束注入加热系统示意图

放电,等离子体中心区域的离子温度达到了 20keV,1989 年,将中性束注入功率提高到 30MW,离子温度进一步提高了 32keV,远远超过了聚变点火对温度的苛刻要求。

然而,中性束注入辅助加热方法也存在尚待进一步研究解决的问题。如从离子源中出来的高能离子束在中性化气体室中捕获电子变成中性粒子束的效率随着粒子能量的增加而急剧下降,如图 11 所示。据估计,在聚变堆条件下对注入中性粒子束的能量要求大于 300keV。但此时的中性化效率非常低。如果能够从离子源中引出负离子束,那么由负离子转换成中性粒子的效率随能量的增加并没有明显的下降。这是因为从负的氦离子中分离出多余的电子必然要容易得多。因此,在发展适合于聚变堆条件下的中性束注入加热技术的关键是研制大功率的负离子源。目前,负离子源所能达到的技术指标跟核聚变研究的要求还相差甚远。

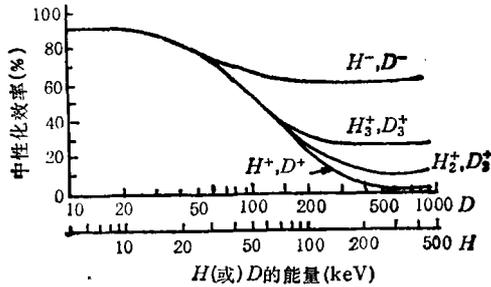


图 11 中性化效率与粒子能量的关系

3. 射频波加热原理 (RF Heating)

尽管中性粒子束注入方法在加热等离子体方面获得了巨大成功,但中性注入系统设备庞大,结构复杂,造价昂贵,因此人们正在探索其它的辅助加热手段,其中最重视的便是射频波 (radio-frequency wave) 共振吸收加热方法,简称波加热。

我们知道,在等离子体中存在着种类繁多的各种波动现象。如果从外部将某种频率的射频波“注入”到等离子体中,当这种波在等离子体中传播到某个区域,在该区域内等离子体的固有振荡频率与外部注入波的频率相等时便会产生共振现象。在共振区域内,外部入射的波能量被大量吸收(称为共振吸收),成为等离子体波的能量。然后再通过碰撞吸收和无碰撞吸收过程,将能量转移给电子和离子。

然而,并不是任意频率的波都可以从外部“注入”到等离子体中去的。我们知道,等离子体存在某个截止频率,叫等离子体频率,用 ω_{pe} 来表示。只有频率大于 ω_{pe} 的电磁波才能在等离子体中传播。因为这时等离子体中的电子来不及运动到足够快时,就把快速变化高频波的电场 E 和波的磁场 B 屏蔽掉。但是,对于频率小于 ω_{pe} 的电磁波在等离子体中的穿透距离(称趋肤深度)决定于电导率,而电导率又决定于等离子体的介电张量。例如,密度为 $10^{20} m^{-3}$ 的等离子体, $\omega_{pe} = 3.6 \times 10^{12}$ /秒,小于这个频率的电磁波在该等离子体中传播的距离不到 0.1 毫米,基本上受到截止而被反射回来。

尽管对于 $\omega < \omega_{pe}$ 的波,一般说来不能在等离子体中传播,但在这个频率范围内存在某些频率“窗口”,一定频率的波就可以通过这些“窗口”进入等离子体,为我们研究等离子体的波加热方法提供了方便。就像地球周围的大气层屏蔽(吸收)了绝大部分来自太阳的包括紫外线在内的辐射,使得地球上的生命免受其害,然而这个屏障又巧妙地留下了一个“窗口”,使可见光顺利地通过到达地面,这样才使我们生活的世界阳光普照,万物生机盎然。

电子回旋共振加热 (ECRH) 由于等离子体的电子回旋

共振频率很高, $\omega > \omega_{pe}$, 从天线发出的高频电磁波可以很容易地在等离子体中传播,因此,可以说电子回旋共振加热是等离子体射频加热中最简单的一种。但是 ECRH 要求射频源的频率非常高,大约为 100GHz 左右,相应的真空波长为 1—2mm。只有在大功率微波源的研制方面取得不断进展的情况下才日益受到了重视。从 70 年代末开始许多作者阐明了应用于托卡马克的电子回旋共振加热的线性理论。我们知道,射频波能量的吸收发生在共振区,为了使波进入等离子体后能够达到共振区,必须要求等离子体密度不能太高,即存在一个密度上限,以满足 $\omega_{pe} < \omega$ 。

等离子体中的电子回旋波有两种模式:波的电场平行于等离子体中的约束磁场的线偏振波,叫作寻常波 (Ordinary Mode),记作 O 模。波的电场垂直于等离子体中的约束磁场的椭圆偏振波叫非寻常波 (Extraordinary Mode),记作 X 模。寻常波在等离子体中的传播比较简单,只要 $\omega > \omega_{pe}$, 在共振区域内发生能量吸收。而非寻常波在等离子体中的传播比较复杂。这时,等离子体中的电子受到入射波电场分量的作用,因此它既受到等离子体集体行为 (ω_{pe}) 的影响,又受到单粒子行为 (ω_{ce}) 的影响。换句话说,这些电子在受到电场扰动时对静电力和洛仑兹力都要作出响应。对色散关系的分析表明, X 模的波向等离子体中心区域传播的途中存在截止区。结合对托卡马克等离子体中磁场分布和密度分布的特点,只有从强磁场区域发射的 X 模电子回旋波才能达到共振区,发生能量吸收。从弱磁场区域发射的这种波在传播途中将会受到截止区的阻挡,无法到达共振区。由此可见,电子回旋共振加热中,对于 X 模只能从托卡马克环的内侧发射。但是托卡马克装置内侧空间小,要安装大功率微波发射系统是困难的。当然,应用于磁镜装置电子回旋加热并没有这方面的限制。关于 ECRH 加热方法已经进行了大量的理论研究和实验研究,取得了不少重要的进展。这种加热方法的前景很大程度上取决于大功率高频技术的发展。目前许多国家十分重视发展能够符合核聚变研究需要的大功率毫米波回旋管。

低混杂波共振加热 (LHRH) 这是能够在等离子体中传播的第一个频率“窗口”。等离子体中的低混杂频率 ω_{LH} 跟离子回旋频率 ω_{ci} 和电子回旋频率 ω_{ce} 之间的关系可以表示为 $\omega_{LH}^2 \approx \omega_{ci} \omega_{ce}$, 大约为 (0.5—5)GHz。在此频率范围内输出功率达到兆安级的微波源在技术上业已成熟。低混杂波加热方法可加热离子、电子。通过波的色散关系分析得到如下关系式: $k_{\perp} \approx k_{\parallel} \frac{\omega_{LH}}{\sqrt{\omega^2 - \omega_{LH}^2}} \sqrt{\frac{m_i}{m_e}}$ 。式中 k_{\perp} 和 k_{\parallel}

分别是垂直与平行磁场方向的波数。从上式中可知,当 $\omega = \omega_{LH}$ 时, $k_{\perp} \rightarrow \infty$, 出现共振。此时波的垂直方向的相速度接近于离子热速度,因此产生强烈的离子朗道阻尼,从而使离子得到加热。如果波的平行方向相速度接近电子热速度,那么低混杂波也能跟电子发生强烈的朗道阻尼而加热电子。在 Alcator-C 托卡马克上进行了输入功率为 1MW 的大功率低混杂波加热实验,观察到了明显的电子加热和离子加热。

离子回旋频率范围的共振加热 (ECRF) 当等离子体中的磁场为 5 特斯拉 (5 万高斯) 时离子回旋频率为 38MHz, 相应的真空波长为 8 米。离子回旋加热主要是通过快磁声波将能量从天线运输到等离子体中的共振吸收区域。然而,通过对离子回旋频率范围内波的色散关系分析表明,当 $\omega = \omega_{ci}$ 时并不出现奇点,即当离子回旋的基频波在等离子体中传播时,波与粒子之间并不发生相互作用。其原因跟波的偏振性质有关。回旋共振时,波的电场是右旋偏振的,而等离子体中离子的回旋方向是左旋的,因此在基频共振时波与粒子间并不发生相互作用。为了实现基频共振加热,可以向等离子体中掺入百分之几其它种类的离子。这些离子占的比例少,因

此称为少数类离子。例如，在氦等离子体中加入百分之几的氢，就会产生 H^+ 的基频共振，这时 $\omega = \omega_{ci}(H) = 2\omega_{ci}(D)$ 。这样可以提供一个十分有效的能量吸收机制，它是先由少数类离子 H^+ 而不是背景离子 D^+ 来吸收射频波能量的。获得能量的这些少数类离子再跟背景离子碰撞达到整体加热的目的。利用少数类离子的基频共振加热这种方法，可以根据这些离子浓度的大小分为两种类型。如果少数类离子浓度小于 5%，可以将发射天线安装在磁场弱的一侧，快波将能量直接耦合到这些少数类离子。这种耦合主要发生在共振区的强磁场一侧。如果少数类离子浓度超过 5%，那么就会产生离子-离子混合共振现象，并在等离子体中心附近出现模式转换区，由快磁声波转换成慢波（离子回旋波）。离子回旋共振加热的优点之一是几乎所有的共振离子都得到加热，只有一部分在托卡马克外侧弱磁场区被磁镜捕获的那些粒子不被加热，因为它们的轨道并不经过共振区。在几种射频波加热方法中，离子回旋共振加热的进展比较快，取得了比较好的实验结果。例如在 PLT 托卡马克装置上用 1MW 的射频功率进行这方面的实验，结果中心离子温度从 0.5keV 上升到了 3.2keV，说明加热效果相当好。在目前世界上最大的托卡马克装置 JET 上也进行了离子回旋共振加热实验。

阿尔芬波加热 (AWH) 这种等离子体波加热频率最低，其频率范围大致从 1MHz 到 10MHz 之间。这是中波和短波广播频率，技术上已经相当成熟，成本相对来说比较低。它的基本物理原理是：在非均匀等离子体中，若满足条件 $\omega = \left(\frac{1}{k_{\parallel}^2 V_A^2} + \frac{1}{\omega_{ci}^2} \right)^{-1/2}$ ，就可以激发阿尔芬波，显然

ω 是低于离子回旋频率 ω_{ci} 的。对于周期性圆柱等离子体，共振频率 ω 是等离子体半径 r (变量) 的函数。因为阿尔芬速度 V_A 也是 r 的函数 $V_A(r) = B/[\mu_0 \rho(r)]^{1/2}$ ，其中 $\rho(r)$ 是等离子体密度分布，平行波数也是 r 的函数即 $k_{\parallel} = [n + m/q(r)]/R$ ，式中的 n 和 m 分别为环向和极向模数， $q(r)$ 是安全因子， R 是等离子体大半径。由磁流体理论 (MHD)，上式给出了从阈值(最小频率) ω_{min} 到等离子体边缘的最大值 ω_{max} 的剪切阿尔芬波连续谱。最小频率位于磁轴附近。在连续谱的最小频率之下，还存在一个或若干个弱阻尼的本征模，称为离散阿尔芬波 (或称为全域本征模)。但根据磁流体理论，由外部天线发射系统激发的剪切阿尔芬波是沿磁场方向传播的，不能到达等离子体中心区域。在共振面上吸收能量之后将会发生模式转换，剪切阿尔芬波变成动力阿尔芬波后，可以向等离子体中心的高密度区域传播，发生波与粒子相互作用，达到加热等离子体的目的。当然，在共振层发生模式转换是有个温度阈值的，若共振层内电子温度低于这个阈值，模式转换后并不变成动力阿尔芬波而变成具有驻波性质的表面静电波，在共振层与等离子体边缘之间来回反射。在 TCA 托卡马克上的实验中已观测到由阿尔芬波加热电子和离子的实验结果。但阿尔芬波加热研究仍处于早期的探索阶段。

综上所述，用于等离子体射频波加热的主要有四个频率范围。尽管其最高频率与最低频率之间相差 10^4 倍，但存在很多共性，因此习惯上都叫射频加热。它们重要的共性问题是在共振区域内外部输入的能量变成了等离子体中波的能量之后，这些能量又是如何转交给等离子体中的电子和离子的？这里包括碰撞吸收和无碰撞吸收两种不同的物理机制。碰撞吸收过程比较简单，通过跟那些空间运动速度与波的运动速度差不多的粒子相碰撞，把波的能量直接变成粒子的能量。对于无碰撞能量吸收过程情况比较复杂。

朗道阻尼是苏联物理学家朗道于 1946 年发现的。当时曾令人吃惊：在无碰撞等离子体中传播的波虽不发生碰撞，但波竟然也会受阻尼而损耗！到了 1965 年在实验中观察到了波的朗道阻尼现象。当然并不是所有的波都有这个现象，

只有相速度跟等离子体中带电粒子的热运动速度比较接近的波才会发生朗道阻尼现象。

下面我们用工图 12 中的海浪比作等离子体波。小帆船比作等离子体中的带电粒子。小船的前进速度跟海浪的传播速度比较接近。显然，图中右边的小船从波谷爬向波峰，船速减慢而小于波浪速度时，就象海浪拖着小船前进，从而小船从海

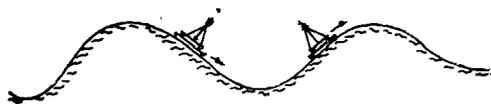


图 12 朗道阻尼物理机制示意图

浪中获得能量。这时的情形相应于等离子体中带电粒子的热运动速度小于波的速度，好象是波在拖着粒子前进。这样，粒子便从波中获得能量。由于波把部分能量交给粒子而波本身就出现了衰减。图左情况恰好相反。此时船从波峰到波谷获得加速，速度大于海浪速度，海浪从小船中获得能量。此时对应于等离子体中粒子速度大于波速度，波从粒子中获得能量。某一种波在等离子体中究竟会不会发生朗道阻尼现象，取决于带电粒子中热运动速度大于波相速度的粒子多，还是热运动速度小于波相速度的粒子多。等离子体中粒子的热运动速度不可能相等，也不是杂乱无章。达到热平衡时便服从麦克斯韦分布，如图 13 所示。等离子体中的电子和离子一般容易分别达到热平衡。图中表示的是电子速度分布，显然，慢的电子比快的电子数量要多。从波中获得能量的电子数多于给波能量的电子数，因而波受到阻尼，等离子体得到了加热。

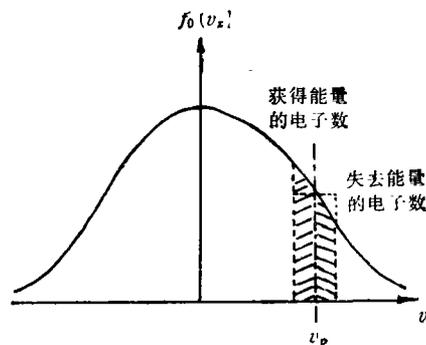


图 13 在 $v = v_p$ 区域，朗道阻尼引起麦克斯韦分布的变形

随着 $v = v_p$ (波相速度) 的粒子在波中俘获，在接近相速度 v_p 处速度分布函数变得比较平坦，如图中虚线所示。虽然扰动了分布函数包含了相同的粒子数，但总能量已经增加，这是以朗道阻尼过程中消耗波的能量为代价的。

回旋阻尼和朗道阻尼不同。只有当存在与粒子沿磁力线的漂移方向相垂直的电场分量，因而在垂直于漂移方向有加速时才产生回旋阻尼现象。与朗道阻尼相类似，当回旋速度的绝对值小于波的相速度的绝对值时，粒子从波吸收能量，波被衰减了。这种机制就称为回旋阻尼，粒子增加了垂直于磁场方向的能量。

通过朗道阻尼和回旋阻尼从波中获得能量的那些粒子通常叫共振粒子。再通过跟其它粒子的随机碰撞，共振粒子把部分能量转移给其它粒子。这样，最终就把从外部发射进来的波的能量变成等离子体热能，达到了加热目的。