

普林斯顿托卡马克如何创造了等离子体离子温度的世界纪录

在美国普林斯顿实验室，建有一个大的托卡马克，名字为 TFTR 装置。1986 年 6 月在这个装置上的等离子体得到了很好的约束，称之为“提高型约束”。引人注目的是在这种约束状态下，等离子体的离子温度达到了 20 KeV（略大于 2 亿 K）。这是托卡马克等离子体离子温度的最新世界纪录。

TFTR 装置的主要参数如下：大半径 2.5m，小半径 0.45—0.9m，最大环形磁场 5.2T。这台装置是在 1982 年开始运行的。原计划是首先达到点火的水平，然后在八十年代末以氘-氘运行，在能量自持的情况下，希望有小量的正功率输出。对于氘-氘反应，能量自持要求下面两个条件：(1) 很高的离子温度，要大于 10keV；(2) 满足劳逊条件，即 $n\tau > 2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ ^[1]，其中 n 为等离子体的密度， τ 为等离子体的能量约束时间。在 TFTR 上，达到 20keV 离子温度的放电称之为“超级放电”。这种放电是在低密度条件下得到的， $n\tau$ 值是 $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ 。尽管 $n\tau$ 值较低，但却使聚变等离子体的研究进入到一个新的里程，即在低密度下，可以用强流中性束注入来得到一个高温等离子体。在托卡马克实验中，加热功率及能量约束时间都有一个极限。在这种情况下，提高离子温度的直接想法就是采用低密度等离子体，即用较少数目的离子去分配全部热能，自然，每一个离子分到的能量就多，温度就会提高。1986 年初在 TFTR 上曾作过高密度等离子体实验，并且没有辅助加热，得到的 $n\tau$ 值为 $1.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$ 。尽管这个值高于劳逊条件，但是离子温度却只有 1.2keV，这离点火温度还相差很远。

为了描述能量自持的条件，采用 Q 表示等离子体聚变输出能量与加热等离子体输入能量之比。有人曾做过严格的计算：对于氘-氘等离子体，目前的超级放电， Q 值已大于 0.2，这仅

达到能量自持要求的 1/4 左右。

总的来说，用等离子体电流本身所进行的欧姆加热，是不可能使等离子体达到点火温度的。欧姆加热是托卡马克的初期思想，而现在一般都采用了辅助加热的方法，如高频加热、中性束注入等。这些辅助加热将为托卡马克型反应堆的等离子体提供大部分加热能量。

一、对能量自持的探讨

TFTR 托卡马克严重地依赖于中性束加热。但早期的托卡马克实验发现，随着注入功率的增加，等离子体的约束逐渐变坏，我们把这种现象称为“低模约束特性”。根据这个不太恰当的特性，就很难得到一个好的托卡马克。而超级放电却恰恰摆脱了这种低模约束特性，从而进入了一个新的提高型约束状态。

TFTR 托卡马克运行负责人 R. Hawryluk 说：“在未发现提高型约束之前，如果不做出巨大的努力，从我们的参数出发，不可能推出 $Q=1$ ，而现在我们却看到了通向能量自持的道路。”如果没有提高型约束，要想得到一个高的离子温度，至多也不超过 10keV 左右。普林斯顿等离子体物理实验室的负责人 H. Furth 却认为：“有了 20keV 的离子温度，就可以去做超越能量自持的研究，这样的工作是很有意义的。在这种条件下，使用氘-氘的放电可以提供 10MW 的 α 粒子功率 [主要聚变反应为 $D^2 + T^3 \rightarrow n_0(14 \text{ MeV}) + \text{He}^4(3.5 \text{ MeV})$]。这的确值得去努力，这样就会对 α 粒子加热等离子体的物理机制有一个初步了解。”

能够得到提高型约束的关键是：平衡的强流中性束加热，仔细地清除真空室内壁吸附的氘气。如果这样做，就很容易在另外两个大托卡马克 JET 和 JT-60 上重复这个结果。JET

和 JT-60 是与 TFTR 同代的两个大托卡马克, JET 是欧州原子能委员会建在英国的装置, JT-60 是日本的托卡马克。权威人士认为, 在 1987 年的某个时候, 这三个托卡马克可以在用氘运行的情况下, 达到 $Q = 1$ 。

二、有希望的苗头

事实上, 提高型约束的苗头在八十年代初期就在三个很小的托卡马克上被发现。这就是德国加兴的 Asdex、美国通用原子公司设在圣地亚哥的 Doublet III 以及普林斯顿的 PDX^[2]。这三个早期装置都有一个偏滤器, 特殊形态的线圈所产生的磁力线使得氘离子在被真空室内壁吸收之前就被偏转出来。如果真空室内壁吸附了氘气, 那确是很坏的事, 当这些氘气重新返回等离子体时, 便冷却了等离子体的边界, 因此很难达到提高型约束。TFTR 和 JET 是在偏滤器流行之前设计的, 它们不具有偏滤器, 所以不知怎么办才能使这两个装置具有偏滤器的功能。

1981 年, Asdex 小组发现: 等离子体明显而突然地转变到一个新的高约束状态(命名为“高模”), 而同时, 等离子体边界也马上达到一个临界温度。这种情况是在采用 50—300ms 宽度的中性束辅助加热时出现的(在所有发现提高型约束的实验中, 都使用了中性束辅助加热)。在这个转变中, 等离子体内储存的热能引人注目地开始上升, 能量约束变得越来越好。这个现象与低模定标相矛盾。根据上述的发现, 就可以进一步去增加中性束的加热功率。

三、密度剖面

把高能氘原子注入到等离子体柱中心, 并在那里电离后被约束, 加之从边界偏转进的氘离子, 从而形成了一个很陡的中心尖的离子密度剖面。这种密度剖面分布对进入提高型约束状态来说是必不可少的。如果想进一步提高这个密度剖面的中心值, 可以采用 Doublet III 的方法把氘冰球注入到等离子体中心。

关于等离子体离子密度剖面变陡的重要作

用是根据电子温度剖面的不变性从逻辑上推导出来的, 1985 年曾在 TFTR 上发现了一个现象, 即测出的电子温度剖面是相当平坦的, 当改变加热等离子体的部位时, 这个剖面并不变化, 该现象也在其他的托卡马克上得到证明。这明显地意味着: 如果要改善能量约束, 就要使密度剖面在中心变得很高, 在边沿变得很低。

电子温度剖面与加热部位无关的特性, 说明了总的温度分布完全由离开等离子体边界的热流来决定。Furth 解释说: “如果你能确定边界上的温度梯度, 则可以了解整个温度分布。热能的流出是由边界上的粒子数决定的, 边界上密度低, 热能流出的就少, 中心的密度高, 包含在等离子体中的能量就多。”

因为能量约束时间是等离子体含有的能量与流出的热流之比, 所以陡峭的密度剖面将会改进能量约束。

Furth 又说: “我们得出一个结论, 在没有偏滤器的情况下, 如果我们能减少氘气从器壁到等离子体边沿的再循环, 我们就可以得到一个提高型约束。这段历史中最令人鼓舞的部分就是我们把着眼点放在改进离子密度剖面的方向上, 并希望有所进展, 但实际上, 我们已达到了这个要求。”

至于从器壁上再循环的冷氘气, 对整个等离子体起着一个很关键作用的机理, 至今还不清楚。对用于再循环的全部功率进行计算之后, 表明这种循环仅仅在等离子体边沿的地方才十分重要。TFTR 研究计划的负责人 R. Goldston 作了如下解释: 可以认为, 边界是一个连续的等离子体热流阻抗, 在边界上这么小的冷却不会带来很大的影响。但事实相反, 在边界上的这点冷却对等离子体的热导率有很大的作用。电子温度剖面的平坦性似乎表明了存在某种稳定性条件, 如果撤掉了这个基础(改变了边界温度), 整个结构就会马上瓦解。

在通用原子公司和 MIT 的托卡马克上^[3], 燃烧氘冰球的实验进一步证明了中心高、边沿陡峭的等离子体密度剖面对达到提高型约束的重要性。但另外的理论工作者, 如 MIT 的 B.

Coppi 和 Texas 大学的 P. Diamond 等, 他们希望在离子温度剖面陡于密度剖面的情况下, 克服某些破坏性微观不稳定性, 然后达到提高型约束。这样的等离子体微观不稳定性, 在 1967 年就被 B. Coppi, M. Rosenbluth 和 R. Sagdeev 所预言(当时他们三人都在的里亚斯特国际物理理论中心)。尽管这种微观不稳定性很难直接观察, 但是 Rosenbluth 认为: “在各种情况下, 观察了一个好的约束与低边界密度的关系之后, 将会使我们得到很大的启发。”

四、真空室内壁的条件化

所谓条件化就是为高温放电做准备, 创造条件来达到提高型约束状态。TFTR 的真空室内壁有一层紧密排列的石墨瓦, 孔阑也是石墨做成的。为了达到高温放电, TFTR 组织了一个以 J. Strachan 为首的“高温特遣队”他们非常了解应如何对 TFTR 进行严格的条件化。

石墨瓦内壁在不放电期间, 吸足了氘气而达到了饱和, 当再循环时这些吸附的氘气又回到了等离子体。如果清除了石墨表面吸附的氘气, 它可以再一次吸收由等离子体偏转出来的氘气, 这如同晒干了的毛巾, 仍有再次吸水的功能。如果想把石墨瓦由真空室取出来进行处理, 这也是不现实的, 条件化必须在原地进行。

TFTR 的条件化是以氦气多次放电来进行的(没有氘气), 放电时, 氦离子轰击出石墨吸附的氘气, 氦是惰性气体, 不会被石墨表面所吸附。这个成功的条件化技术, 其机制还不清楚。可以认为, 由于溅射的作用, 沉淀生成了一个新鲜的石墨层。它覆盖了石墨瓦上的残余氘气。

五、平衡注入

对超级放电有贡献的第二个关键性改进是建立了平衡更好的中性束注入^[4]。1986 年期间, 又增加了两台中性束注入源, 加上原来的两台, 共计是四台, 这四台源对 TFTR 可提供的辅助加热总功率为 27MW。1986 年, 这四台源

的氘原子束以 95keV 的能量和 17 MW 的加热功率注入到 TFTR 中, 这对冲破托卡马克等离子体离子温度记录是十分有效的。

新增加的中性束向等离子体注入的方向是很重要的。这四个中性束都是以切线方向注入, 原来的两个中性束注入方向与等离子体电流方向平行。这样, 对注入离子轨道的约束是有利的。但是, 不平衡的角动量冲击着等离子体, 使得等离子体柱快速旋转。这种情况并不是一切都好; 如果一个高能原子的注入方向与等离子体的转动方向相同, 则在等离子体离子的静坐标架中, 它们的能量变小了。这会使中性束的加热效率变低, 从而减小了聚变反应截面, 因为这个截面随着碰撞能量的增加而急剧上升。因此 TFTR 小组决定将这两个新中性束的注入方向中的一个与等离子体旋转方向相同, 另一个则相反。这样就没有再生成新的角动量。Furth 说“这个三对一的平衡注入是很有效益的。”在这些效益中, 最主要的贡献就是密度剖面变陡了。在 1987 年, 将考虑再反转一个束的注入方向, 这样就提供了真正的二对二平衡形态。“高温特遣队”的直接目的是去达到一个尽量高的温度。但提高型约束状态的获得使他们有些惊讶, 产生的离子温度也超出了他们的预料。这就是超级放电这个名字的由来。

1986 年 6 月 13 日, 提高型约束状态首次出现在一次低等离子体电流的放电中, 这次放电的等离子体电流仅为 800kA, 而 TFTR 的放电可以达到 2500kA 的等离子体电流。采用较小电流的战略思想是以最低的等离子体密度去得到最高的离子温度。在高密度放电中要向真空室送进相当数量的氘气, 但是在这些低密度放电中, 氘等离子体几乎全部来源于中性束。

早期的 TFTR 放电也是在低密度、低电流下进行的。通常可以看到等离子体的能量积累和氘-氘反应产生的聚变中子是在中性注入后约 200ms 的时间内上升, 然后保持一个 300ms 的平顶(整个注入时间为 0.5s)。在超级放电中, 这两个量却一直上升到中性束注入结束。同时电子温度也由 5keV 上升到 7keV, 并

有很宽的剖面分布。电子能量的增加是约束改善的另一个直接标志，因为托卡马克等离子体的能量损失主要是通过电子带走的。

在取得超级放电后的下一个月，TFTR 的中性束以 17MW 的功率满负荷运行，得到的中子产额几乎达到 $10^{16}/s$ ，为以前托卡马克中子产额记录的三倍。 τ 值达到 170ms，是低模定标值的三倍。从 X 光和紫外光的多普勒宽度得出的等离子体离子温度为 20keV。

必须指出，超级放电的离子温度是引人注目的，但是电子温度却比离子温度低很多。就反应堆来说，应使电子温度和离子温度相等。对于超级放电的中子产额，不能全部归结于 20keV 的热化氘核，大部分产生中子的氘-氘聚变反应是由超热高能尾巴上的氘核引起的。这些氘核是从 90keV 的中性束进入到等离子体的。

六、能量自持的国际竞赛即将开始

随着聚变研究的进展，即将开始一个达到能量自持的国际竞赛。JET 的等离子体电流可以达到 TFTR 的两倍^[2]，而且是带铁心的托卡马克。毫无疑问，JET 在最近即可达到提高型约束状态。日本的 JT-60^[6]并没有计划用氘-氘产生等离子体，但它具有偏滤器和很好的辅助加热能力，所以在 1987 年它将在使用氘等离子体的条件下达到实际的 $Q = 1$ 。大型托卡马克俱乐部的第四个成员是苏联的 T-15^[7]，它一直没有建成，按计划应在 1988 年末开始运行。苏联人还想建立一个超导托卡马克，这是一个很艰巨的工作，但很必要。一般认为，一个实用托卡马克反应堆必将使用超导线圈。另外，在法国的卡达哈西，以 R. Aymar 为首，正在组装一个超导托卡马克，很可能成为世界上第一个运行的超导托卡马克。如果液氮温度下的超导得以推广使用，则超导型托卡马克将会在世界很快风行起来，如意大利的托卡马克 FT^[8]，本来就是在液氮温度下运行，如果有液氮温度下的超导线圈，FT 必然是后来居上。

美国托卡马克委员会下一步打算建立一个 CIT-压缩点火托卡马克，它不象目前任何一个

想达到点火的装置。目前的装置即使达到点火，也很难使氘-氘燃烧时间比能量约束时间长很多。要研究由 3.5MeV α 粒子所维持的点火，了解其中的一系列物理问题，这要求燃烧的时间足够长，从而使点火的等离子体进入平衡。CIT 的目标是使氘-氘等离子体的燃烧时间达到约束时间的十倍左右。

CIT 着重于一个等离子体物理实验条件，而不是一个工程实验堆，关于实验堆的工作将在晚些时候进行。CIT 的半径是 TFTR 的二分之一，而磁场却是 TFTR 的两倍。CIT 将接受强场压缩托卡马克—— Alcator 的经验及 Coppi 的点火观点。Coppi 认为，把现在 CIT 设计中的某些先进特点与简单经济的点火设计相结合，这是达到点火的最快途径。原来 CIT 的设计没有考虑使用超导线圈，因为在很强的中子辐射条件下，使用低温系统可能存在某些问题。现在，预想的 CIT 方案在美国聚变部的眼里得到了青睐，聚变部已向能源部推荐采用这个方案。可以相信，一两年后，我们即可以看到 CIT 的有意义的结果。

可以认为，TFTR 得到的 20keV 的离子温度对于聚变等离子体研究来说，是一个巨大的推动。在未来受控聚变实现时，我们将可以看到 TFTR 的高温结果在受控聚变研究过程中所起的重大历史作用。

(李文莱编译)

参 考 文 献

- [1] Bertram Schwarzschild, *Physic Today*, 39-11 (1986), 19.
- [2] C. M. Bishop, *Nuclear Fusion*, 26-8 (1986), 1063.
- [3] S. M. Wolfe et al., *Nuclear Fusion*, 26-3 (1986), 329.
- [4] R. Haita et al., *Nuclear Fusion*, 26-7 (1986), 863.
- [5] K. H. Behringer et al., *Nuclear Fusion*, 26-6 (1986), 751.
- [6] N. Hosogane et al., *Nuclear Fusion*, 26-5 (1986), 675.
- [7] D. V. Orlinski, *Course on Diagnostics for Fusion Reactor Conditions*, International School of Plasma Physics, 2(1982), 581.
- [8] F. Allardio et al., *Nuclear Fusion*, 26-1 (1986), 11.