

核聚变研究的新兴途径——紧凑环

任兆杏 阎继红

(中国科学院等离子体物理研究所)

目前看来,核聚变研究最有希望的途径仍然是托卡马克(Tokamak)。这是因为托卡马克具有环形约束的磁场形态,做成聚变反应堆,能量倍增系数高。但是,托卡马克也存在着一些严重的缺点,例如 β 值低,还不能实现稳态运行以及结构复杂庞大,不易接近等。目前从事托卡马克研究的人们,正在努力克服这些缺点,并以极大的兴趣从事其它途径的研究。

开端系统例如磁镜等,具有 β 值高,容易实现稳态运行,结构简单等优点。但是也存在一个重要的缺点,即等离子体从终端损失,做成反应堆的能量倍增系数仅在1左右。怎样使得一个聚变装置,既有托卡马克环形约束的优点,又有开端约束的优点呢?这就是大力发展紧凑环的历史背景。虽然人们重视紧凑环的时间不很长,但是近几年来在等离子体位形的产生和稳定性的研究方面,都取得了显著的成就。因而越来越多的人对紧凑环发生兴趣。由于受到人们的重视,紧凑环研究的发展速度相当迅速。

所谓紧凑环,就是在开端系统中闭合端部磁力线,形成中空的等离子体团。按磁场形态可以自然地分成两大类:(1)场反向(field reversed)位形,例如离子(电子)环(astron),场反向角向收缩(field reversed θ -pinch)和场反向磁镜(field reversed mirror)等;(2)球马克(spheromak)位形,例如同轴枪(coaxial gun),轴向和角向收缩(z-and θ -pinch)和准稳法(quasistatic formation)等。下面分别评述它们的实验进展状况,及其发展前景。

一、场反向位形

利用开端装置靠轴磁场的反向获得端部磁力线的闭合,从而形成中空的环形等离子体柱,这一思想并不是近年来的新思想。早在1953年,Christofilos就提出了具有这一位形的电子环的概念。60年代在角向收缩的形成过程中,也具有这种位形。70年代开始认真实验场反向角向收缩,结果证明这种位形是能够稳定的。磁镜的研究者们在这种形势的鼓舞下,提出了场反向磁镜的方案,并开展了大规模的实验研究。

1. 离子(电子)环

1956年在美国Livemore的加州大学开始了电子环的实验研究。电子环(如图1所示)是在一个长的圆形容器内,利用外界线圈产生磁力线几乎平行于容器轴的磁场,但二端处的磁场强度稍比中间大。从电子枪射出的高能电子流不仅能绕磁轴旋转,而且又有一个轴向速度

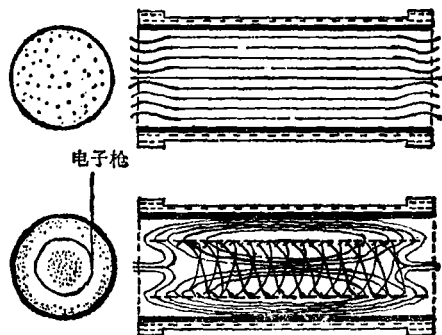


图1 天体器场反向位形的形成

分量向前行进。但电子在前进时受到另一端处较强磁场的反射。当不断地注入电子流时，将在容器内形成电子层。电子层上每单位长度的电荷数足够大时，就可以使得端部区域磁场反向。

在早期实验中，因为没有足够强的电子源，实验上未能证实这种概念行之有效。因而几乎停止了十多年。直到最近几年，由于强流电子束和离子束技术的发展，实验上才证实了这种场反向位形是能够获得的。美国 Cornell 大学用相对论电子束获得了场反向^[1]；海军研究所用非常强的高能离子束也获得了场反向^[2]。

海军研究室的实验使用能量为 1 兆电子伏，脉宽 50 毫微秒的质子束产生的反向磁场与原磁场之比为 1.2—1.3。该实验说明，通用的脉冲功率技术能够用来产生脉冲离子束，并有可能获得场反向。进一步的实验将致力于改善来自注入器的束的平行度，最佳化磁场的几何形状以及研究束在磁压缩区的传播。

由于用相对论电子束形成电子层具有过大的回旋辐射损失，不能放大到堆参数，因此人们把希望寄托于离子束。虽然如此，目前电子环的实验为这种途径的发展提供了许多有用的实验数据。

2. 场反向角向收缩

角向收缩在聚变研究史上占据过很重要的地位，因为它用比较简单的快脉冲实验装备可以获得稳定位形的等离子体(如图 2 所示)。真空室中的气体在预置偏磁场的情况下[图 2(a)]经过预电离，当低感电容器通过开关经单匝线圈放电时，在管壁处产生温度足够高的等离子体鞘[图 2(b)]。随着放电产生的磁场迅速上升，使等离子体鞘快速向轴运动。在运动过程中产生的击波和绝热压缩加热等离子体。当预先捕获的偏场与压缩磁场相反时，在压缩过程中出现中空在场反向位形的等离子体柱[图 2(c)]。进一步压缩使得等离子体捕获的反向磁场消失，形成高温高密度的等离子体团[图 2(d)]。密度可达 10^{16} — 10^{17} 厘米⁻³，温度可达几千电子伏。可是由于两端磁场开路，等离子

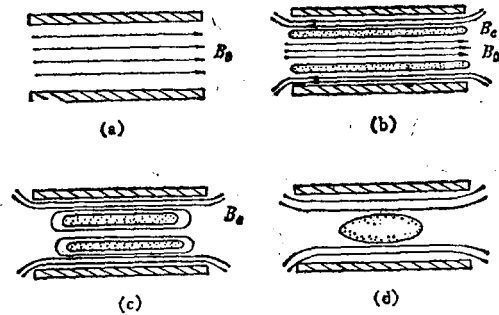


图 2 角向收缩等离子体形成过程示意图

体仅仅存在不到 10 微秒。

为了有效地延长约束时间，其中一条途径是采用环形装置。这些方案，例如 Belt-Pinch, Screw-Pinch 等仍带有托卡马克的缺点。值得重视的是另一条途径，即利用一些特殊技术，将上述放电过程中形成的仅微秒量级的场反向位形长时间保存下来。根据磁流体动力学理论，这种位形的等离子体是不稳定的。但是，Eberhagen 和 Grossmann^[3] 首先观察到了等离子体稳定存在的时间，比理论预言的撕裂不稳定性的增长时间长一个量级。Es'kov 等人^[4]进一步证明，采用横向多极场在轴向场反向开始的瞬时，阻止等离子体扩散，可以克服因不清洁的等离子体而过早出现的旋转不稳定性，从而获得了 100 微秒的约束时间，并使场反向角向收缩好的稳定性得到了重视。他们认为，等离子体存在时间被短路开关限制了，而能量约束时间为 300 微秒。因而应当研究用磁镜场来约束场反向角向收缩产生的等离子体。

最近几年，美国 Los Alamos 实验室的两个场反向角向收缩装置 RFX-A 和 RFX-B^[5] 也获得了 50 微秒的等离子体约束时间。50 微秒后出现了旋转不稳定性，他们认为这种不稳定性，是因为等离子体分界面上过高的粒子扩散损失引起的；横向多极场对克服这种不稳定性没有明显的好处。他们试图增加场反比来进一步研究这个问题。这两个装置的实验还得到了如下的定标律：等离子体约束时间 $\tau_i = 6.0 \times 10^{-7} R^2 / \rho_i$ ，这里 R 为等离子体环的大半径； ρ_i 为离子的拉摩半径。该定标律与等离子体温度无关。他们计划的 RFX-C^[6] 实验预计达到几

千电子伏的温度和更长的等离子体约束时间。

3. 场反向磁镜

70年代中期,以2XIIB^[7]为代表的开端磁镜装置,取得了克服损失锥引起的不稳定性的巨大进展。进一步发展所面临的问题是克服终端的能量损失。由2XIIB开拓的新型途径之一是场反向磁镜。

场反向磁镜的基本思想是,使用中性能束的瞄准方向从轴上移至轴外。切向注入中性束增加了离子反磁电流的绕轴成份。当这个电流足够大时,有可能使轴上磁场反向,从而形成闭合磁力线形态(见图3)。在2XIIB上开展了实现这一物理思想的实验研究^[8]。但没有得到完全的磁场反向。该实验获得的一些重要结果是:(1)等离子体的线密度及峰值 β 都随注入束强度近似线性增加,直至注入束流的最高值都没有观察到 β 极限。实验已达到的峰值 $\beta = 2.2$,这高于预料值;(2)当定义 ΔB 为真空场 B 与产生等离子体时中心磁场之差时,最好的实验结果为 $\Delta B/B = 0.9$,没有得到场反向。电子流的相消作用被认为不是实验不能达到场反向的理由。理由是不充分的束流或离子约束;(3)等离子体的半径及实现的场反向程度,能够由中性束注入器的精确瞄准来控制,变更磁场强度四极成份大小的实验,并不显示出离子损失部分正比于四极场强,改善对离子回旋振荡的稳定作用能够增加场反向参数。

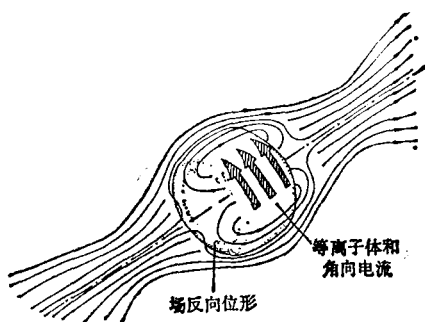


图3 由中性束注入离子的角向(环向)电流产生的场反向的最小B型磁镜装置

为了获得 $\Delta B/B > 1$,估计需要得到约三倍于现有的束流或好于三倍的离子约束。但当场反向位形建立后,等离子体半径增加到现在

物理

实验的二倍。在这样的半径下,维持场反向的具有闭合场线的等离子体,所要求的捕获束流将低于维持磁镜约束等离子体的束流。尔后,场反向体积将按阻抗扩散的时间尺度增大。鉴于这种物理思想,目前提出了用其它方法产生场反向位形的初始等离子体,然后用现有的中性束来维持。2XIIB以Beta II名义继续开展的场反向实验工作,是用同轴枪技术(见下节),而短脉冲强中性束建立方案作为备用。

Beta II的目的是,证明场反向磁镜的技术可行性和位形的稳定性;估计等离子体的扩散和损失过程;确定能量平衡和系统的 Q 值。一旦Beta II的实验获得成功,将在更大的磁镜装置MFTF或串联磁镜MFTF-B的一端,继续更大规模的场反向磁镜实验。

二、球马克

与场反向位形一样,球马克也具有终端闭合的角向磁场。不同的是中空的等离子体团还具有环向磁场。因而这种磁场形态与托卡马克类似。但球马克等离子体环不被磁场线圈缠绕,磁轴附近 q 值为最大,这又与托卡马克不同。由于紧凑环研究的需要,很早就用来产生等离子体的同轴枪,近几年来又被发展为产生球马克位形的方法。其它能够产生球马克位形的如轴向角向收缩和准稳法,也开展了球马克位形的初步实验。

1. 同轴枪

图4是用同轴枪产生球马克等离子体的示意图。同轴枪内外电极通以电流形成放电等离子体,同时等离子体中有了环向磁场。然后等离子体由放电电流和环向磁场产生的作用力而加速并离开枪。在带有环向磁场的等离子体经过枪口时,位于枪口的径向磁场将环绕等离子体环,并重连为角向磁场。随后等离子体可以通过一个外部的轴向磁场被引导到所希望的平衡位置。

把等离子体发射到扁长的圆柱壳里的初步实验^[9],观察到了所预言的倾斜模。没有外部

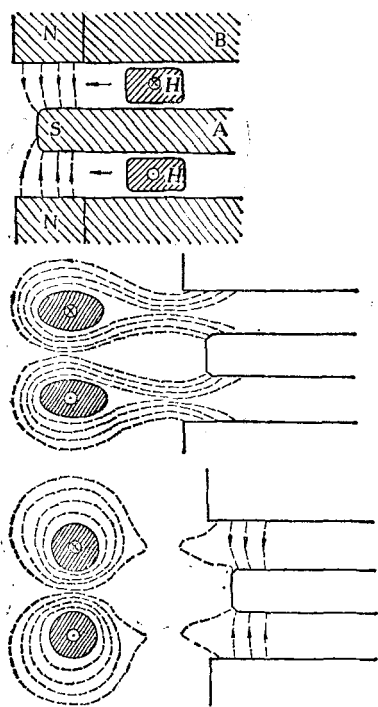


图4 用同轴枪技术产生球马克等离子体

产生的场时,球马克位形就转向倾斜,然后在大约 100 微秒的时间内稳定地衰减。若存在外场,衰减更迅速。当球马克等离子体被放到一个扁平圆柱形壳里时,将抑制倾斜并在超过 100 微秒的时间中光滑地衰减。如果再附加一个弱的外场,可使衰减时间延长到 150 微秒。更大的外场恢复了倾斜和迅速的等离子体衰弱过程。这种等离子体实验代表了球马克稳定特性,显示了与理论符合得很好的研究。这种方法获得的球马克参数:大直径为 50 厘米,等离子体密度为 10^{14} 厘米⁻³;电子温度为 50—100 电子伏;环电流几百千安培。

2. 轴向和角向收缩

美国马里兰大学研究了用这种方法产生球马克位形的等离子体^[10]。这种方法实际上是在场反向角向收缩的形成过程中,用两个端电极沿轴向放电产生环向磁场,形成球马克等离子体。他们的实验和理论研究的一个重要结论是等离子体的拉长度 $L/R \leq 2$ (L 为等离子体环的轴向长度, R 为大半径),这种等离子体位形才是稳定的。当环向磁场和角向磁场的最大值,

大约分别为 6 千高斯和 1 万 5 千高斯时,磁轴上的最大密度为 6×10^{15} 厘米⁻³;最高的离子温度为 200 电子伏;电子温度为 20 电子伏到 60 电子伏。这些等离子体参数与场反向角向收缩的实验参数水平差不多。

3. 准稳法

美国普林斯顿大学等离子体物理研究所正在致力于通过准稳方法形成球马克位形等离子体的研究^[11],产生角向场和环向场的初级电流环和螺线管,都放在一个被称为通量核的薄壁金属环导向管内(见图 5)。初始角向场由核内的电流环产生。由于上下放置了垂直场,因此在小半径里边该角向场被减弱。当环向螺线管通以电流时,螺线管内部产生一个环向场通量,在套筒型等离子体围绕的环上感应出一个角向电流。结合环向场膨胀角向场套筒,把等离子体朝角向场最弱的磁轴方向拉过去。当电流环里电流减少过零并短路处于负值时,在等离子体中感应出逐渐大的环电流,因此角向场的磁力线出现重新连接。在时间上与动力学时间 $T_{\text{Alfvén}}$ 相比是缓慢的,但是与电阻性扩散时间 T_{diff} 相比是迅速的。随后等离子体保持一个独特的球马克位形,由初始的外场维持平衡。

最近一个小尺寸的实验已经完成。环电流为 20 千安培,角向电流为 50 千安培。该实验

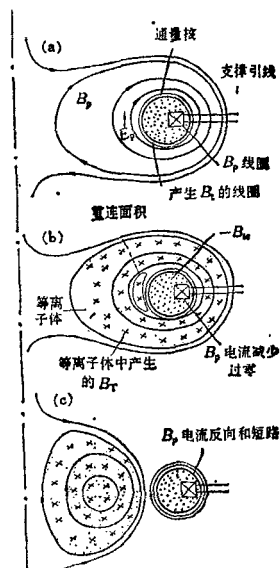


图5 用准稳技术产生球马克等离子体原理图

与理论预言符合得很好。此装置的通量核大半径为 15 厘米,小半径为 3 厘米。核由 0.076 毫米厚的不锈钢衬套包着。当角向和环向场电流调到适当时序时,等离子体放电就会产生。扫描照相表明,环向场电流放电几微秒后,一个等离子体套筒围绕着核建立。然后延伸套筒内侧,最后在指定的球马克位置上转变成为局域等离子体。移动磁探针测量了磁场位形随着时间的演变,证实了球马克位形的存在。测量到的中心密度是 $1.2 \pm 0.6 \times 10^{15}$ 厘米⁻³;温度为 25 ± 5 电子伏;合成的球马克位形维持 15—20 微秒,(大于 100 倍 Alfvén 时间)。这个时间已经相当长,因为它与预计的等离子体经典磁扩散时间 50 微秒同一量级。

一个环电流为 500 千安培的球马克发生器 S-1 装置正在建造,S-1 将在 1982 年末开始运转,并有希望给出衰减时间具有毫秒量级的球马克等离子体中能量运输的物理估价。

三、发展前景

第一类紧凑环即离子环,场反向角向收缩和场反向磁镜的共同特点是环向磁场 $B_{\text{tor}}=0$,等离子体呈扁长形。初步理论研究已经表明,存在稳定的等离子体位形。然而还需要进一步实验研究等离子体的稳定特性。特别是横过磁力线扩散损失要降低到允许值以下,正是这一点,目前还不确定。在技术方面,离子环的发展将取决于强流离子束技术。到聚变堆参数时,将要求 2×10^9 电子伏,0.5 安培级的稳态质子加速器,或者 30×10^6 电子伏, 1.5×10^6 安培,2 微秒脉宽的脉冲质子加速器。场反向角向收缩的发展将取决于几十万伏的高压快脉冲放电技术。而场反向磁镜则取决于 200 千电子伏几十安培的负离子源技术的发展。从目前此类技术研究的进展来看,这些途径虽有光明的前景,但都需要克服许多困难。

第二类紧凑环,即几种产生球马克位形途径的共同特点是环向磁场 (B_{tor})~极向磁场 (B_{pol}),等离子体呈扁平形。因为它的位形类

似托卡马克,所以一般认为该位形稳定性是好的。同轴枪及轴向和角向收缩使用电极放电形成等离子体,不但需要高压快脉冲技术,而且会带来杂质污染。相比之下准稳法具有比较大的优点。但其位形形成的方法与托卡马克有着细微差别。因此在稳定性方面存在的一些潜在问题,还需进一步的实验研究才能判断准稳球马克的前景。

紧凑环的重要优点还在于容易实现稳态运行。若离子环和场反向磁镜使用的束流是直流的,堆就可以稳态运行。其它途径则可以采取运动环堆的方案^[12],这是紧凑环的独特优点。因为紧凑环等离子体不被约束线圈缠绕,因此产生的等离子体可以沿轴朝多个串接的燃烧室连续移动。虽然每个脉冲产生的等离子体环的寿命是有限的,但是整个堆的燃烧是接近稳态的。运动环堆的另一个好处是可以降低令人棘手的第一壁热疲劳。

参 考 文 献

- [1] M. Tuszewski et al., Proc. of the 7th Int. Conf. On Plasma Phys. and Controlled Fusion, II, IAEA, Vienna, (1979), 497.
- [2] S. Humphries et al., *Plasma Phys.*, 17 (1975), 973.
- [3] A. Eberhagen and W. Grossmann, *Zeitschrift Fur Physik*, 248 (1971), 130.
- [4] A. G. Es'kov et al., Proc. of the 7th Int. Conf. on Plasma Phys. and Controlled Fusion, II, IAEA, Vienna, (1979), 187.
- [5] J. Lipson et al., LA-UR-81-303.
- [6] W. T. Armstrong et al., LA-UR-81-304.
- [7] B. G. Logan et al., *Phys. Rev. Lett.*, 37 (1976), 1468.
- [8] W. C. Turner et al., *Nucl. Fusion*, 19 (1979), 1011.
- [9] T. R. Jarboe et al., Proc. of the US-Japan Joint Sym. on Compact Torus and Energetic Particle Injection, Princeton Plasma Phys. Laboratory, (1979), 216.
- [10] Z. G. An et al., Proc. of the 8th Int. Conf. on Plasma Phys. and Controlled Fusion, Brussels, (1980), IAEA-CN-38/R-3-2.
- [11] H. Yamada et al., *Phys. Rev. Lett.*, 46 (1981), 188.
- [12] A. C. Smith et al., Proc. of the Third Sym. on the Physics and Technology of Compact Toroids, Los Alamos, (1980), 12.