

# 快 Z-箍缩——有前景的聚变能源新途径

彭先觉, 华欣生

(中国工程物理研究院, 四川绵阳 621900)

[摘要] 简要介绍了快Z-箍缩的基本概念; 综述了快Z-箍缩等离子体研究及其作为高能密度物理与惯性约束聚变(ICF), 尤其作为低成本聚变能源研究的最新进展; 探讨了快Z-箍缩驱动ICF作为聚变能源可能遇到的技术问题及应用前景。

[关键词] 快Z-箍缩内爆; 高能密度物理; 惯性约束聚变; 聚变能源

[中图分类号] O532 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)01-0047-07

## 1 Z-箍缩概念

由脉冲功率系统提供强电流, 当预脉冲或主脉冲电流的前沿部分通过阴阳极间的薄膜圆柱壳负载或丝阵负载时, 使介质处于部分电离或完全电离的等离子体状态。所谓 Z-箍缩(Z-Pinch)就是等离子体在轴向(Z方向)强大电流产生的洛仑兹力作用下, 在径向(r方向)形成的自箍缩效应。

### 1.1 洛仑兹力和磁场压力

当电流通过导体(或导线)时, 在导体的周围要产生磁场, 如图1所示。

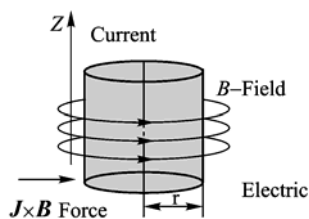


图1 洛仑兹力和自箍缩效应

Fig.1 Lorentz force and self-pinching effect

根据麦克斯威尔电磁方程, 其磁场强度  $H$  为

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

其中  $J$  为电流密度。

沿离导线中心  $r$  处的圆环积分, 可得

$$H = I/2\pi r \quad (2)$$

磁感应强度  $B = \mu H$ , 在真空中,  $\mu = \mu_0$ ,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ , 称为真空磁导率。

若导线是金属导体, 电流将从导体表面很薄一层内流过, 则导体内部无磁场, 磁场只分布在表面一层和导体外的空间, 而运动的电荷将受洛仑兹力的作用, 即

$$F = e v \times B \quad (3)$$

其中  $e$  为电荷所带电量,  $v$  为电荷运动速度,  $B$  为磁感应强度。

由图1可见, 电荷将产生沿导线径向向心的加速度。其结果是引起电荷束流的自箍缩效应。当电流足够强时, 这种箍缩效应将产生巨大的等离子体聚心效应(电子裹胁着离子), 并可能在导体的轴线附近形成高温高密度区。20世纪中叶, 早期的可控热核研究就试图用这种方法来实现热核反应<sup>[1]</sup>。经过一番变换之后, 在磁流体力学中把洛仑兹力变成了磁压形式, 即

$$P_m = HB/2 = B^2/2\mu = \mu H^2/2 \quad (4)$$

数十兆安电流可以产生数百万大气压的向心推力, 使负载迅速获得  $10^7 \text{ cm/s}$  以上高速度, 电磁

[收稿日期] 2007-05-29

[基金项目] 国家自然科学基金重点资助项目 (10375010)

[作者简介] 彭先觉(1941-), 男, 湖南湘潭县人, 中国工程院院士, 中国工程物理研究院研究员, 主要从事核物理及应用研究; 华欣生(1936-), 男, 江苏无锡市人, 中国工程物理研究院研究员, 主要研究方向为等离子体物理及其诊断技术

场能转化为物质动能。高速运动的负载在对称中心 Z 轴上止滞 (stagnation), 物质动能转化为物质内能和辐射能, 形成高温高密度等离子体并辐射出大量 X 光。此过程又称 Z 箍缩等离子体电磁内爆 (implosion plasma)。Z 箍缩大体分为两类, 即重负载的慢过程和轻负载的快过程。慢过程的电流脉宽一般为 3~5 μs 量级, 其每厘米长度上的负载质量可重达几克至数十克 (liner 套筒), 主要应用于冲击波物理、界面不稳定性、高压状态方程等研究; 快过程电流上升时间 ≤ 100 ns, 每厘米长度的介质质量只能为毫克量级或更低。主要目的产生兆焦尔和几十兆焦尔量级强 X 辐射源, 进行惯性约束聚变、辐射输运物理及效应、聚变点火和能源等研究。

### 1.2 一种典型的 Z-Pinch 实验

在阳极和阴极之间放置一负载靶 (金属套筒或金属丝阵围成的套筒), 套筒的外半径为  $r$ , 长度为  $L$ , 流经套筒的电流为  $I$  (是时间函数)。实验结构如图 2 所示。

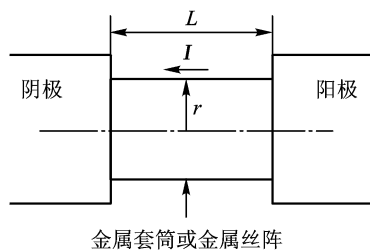


图 2 Z 箍缩实验举例

Fig.2 Z-Pinch experiment structure

1.2.1 金属套筒或丝阵外表面的磁场压力 金属套筒的外边界  $r$  处的磁压  $P_m$  由式 (4) 和式 (1) 给出, 并可表示为

$$P_m = \mu_0 H^2 / 2 = \mu_0 (I / 2\pi r)^2 / 2 = 10^{-7} I^2 / 2\pi r^2 \quad (5)$$

当电流  $I$  不变时, 套筒表面的压力随其半径  $r$  变小而增大, 如  $r$  由 1 cm → 0.5 cm, 压力要增大 4 倍, 同样, 当  $I$  增加 1 倍时, 压力也要增大 4 倍。

若取  $I = 20$  MA,  $r = 1$  cm, 代入式 (5) 得  $P_m \approx 63.7$  GPa, 可见其压力非常巨大。

1.2.2 丝阵套筒在 Z-Pinch 过程中从磁场获得的能量 用半定性半定量方法看磁压对套筒所作的功。假设磁场在整个套筒的表面是均匀的, 套筒整体向内运动, 在运动过程中  $I$  不随时间变化, 因此当套筒表面由初始半径  $r_0$  运动至  $r_1$  时, 单位长度套筒获得的功  $W(r_0, r_1)$  为

$$W(r_0, r_1) = \int_{r_0}^{r_1} P_m dV = \frac{1}{4\pi} \mu_0 I^2 \ln(r_0/r_1) \quad (6)$$

若取  $I = 20$  MA,  $r_0 = 1$  cm,  $r_1 = 0.1$  cm, 那么  $L = 2$  cm 长的套筒从磁场做功而获得的能量约为 1.82 MJ。

1.2.3 丝阵套筒从电路中获得的焦耳热 套筒从电路中获得能量主要是以焦耳热的方式。而这些能量又主要消耗在套筒早期等离子体的建立和随后的温度升高上。

令  $E_e$  表示套筒从电路中获得的焦耳热, 则

$$E_e = \int_{t_0}^{t_1} VI dt \approx \bar{V} \times \bar{I} (t_1 - t_0) \quad (7)$$

$$\bar{I} = 20 \text{ MA}, \quad \bar{V} = 0.1 \text{ MV}$$

其中  $V$  为加在套筒两端的电压,  $I$  为套筒上的电流,  $t_1$  为套筒表面到达  $r_1$  处的时刻,  $t_0$  为套筒开始运动的时刻。从式 (7) 看出,  $E_e \propto I$ , 加在套筒两端的电压与整个电路的情况有关, 且随套筒本身的电阻、电感的变化而变化。若取  $\bar{I} = 20$  MA,  $\bar{V} = 0.1$  MV,  $t_1 - t_0 = 100$  ns, 则  $E_e \approx 0.2$  MJ。

综上所述, 对 2 cm 长、半径 1 cm 的套筒而言, 当流经的平均电流为 20 MA 时, 套筒获得的能量约 2 MJ, 这与圣地亚实验室在 Z 装置上的实验结果基本一致。同时,  $W \propto I^2$ ,  $E_e \propto I$ , 故  $(W/E_e) \propto I$ , 只有当电流足够大时, 磁场做功项才起重要作用, 这与常识基本一致。

### 1.3 关于负载靶

Z-Pinch 的主要应用: 一是高强度 X 射线源; 二是高能密度物理研究; 三是研究聚变点火并有可能成为聚变能源。这些都要求负载靶有很高的把电磁能转化成 X 射线的效率。因此, 除要求靶有很好的内爆压缩对称性外, 更重要的是要求靶的质量较小, 使内爆物质有较高的平均温度。金属套筒很难做到既薄 (微米量级) 又均匀, 所以俄罗斯科学家在 20 世纪 80 年代中期<sup>[2]</sup>提出了以金属丝阵代替金属套筒的方法。实验证明, 这样做是可行的, 对提高压缩均匀性, 降低内爆质量, 克服 Z-箍缩过程瑞利-泰勒 (RT) 不稳定性等具有决定性意义。特别是钨丝阵, 可以获得很高的 X 射线发射功率和产额。丝阵负载靶为 Z-Pinch 技术发展作出了重要贡献。

Z-Pinch 产生的 X 辐射能量  $E_x$  与驱动电流有以

下定标关系:

$$E_x \approx \frac{\alpha\mu_0 \ln(r_0/r_1)}{4\pi} I^2 \approx I^2 \quad (8)$$

黑腔辐射温度  $T_r$  与 X 射线辐射功率  $P$  有以下定标关系:

$$T_r \approx P^{1/4} \quad (9)$$

上述定标关系当  $I = 1\sim 20$  MA 段已被实验验证, 定标关系基本可信。

#### 1.4 关于驱动器

用于上述目的的 Z-Pinch 驱动器, 应是快上升前沿的大电流加速器, 事实上通过简单计算就可看出。一般说来, 要求加速器电流上升前沿最好小于 100 ns, 故人们称此类 Z-Pinch 为快 Z-Pinch。初步理论估计, 作为聚变点火研究, 加速器的输出电流应大于 30 MA, 而要用作能源, 电流可能要大于 50 MA。

按目前技术, 单台加速器的输出电流估计约为 1 MA, 并把多台加速器并联组合。因此, 发展经济型快上升前沿 ( $\leq 100$  ns) 适度重复频率大电流加速器是 Z-Pinch 聚变点火研究和能源应用的重要前提。

## 2 快 Z-Pinch 驱动惯性约束聚变研究发展现状<sup>[3-13]</sup>

快 Z-箍缩用于等离子体与惯性约束聚变研究, 由于高的能量转换效率 (从电能转换成 X 光效率  $\eta$  达 15 % 或更高), 可以实现低成本、高产额、高效费比。美国圣地亚实验室对 Z-箍缩装置研制投资已经做到了约 30 USD/J X 光能量 (2004 财年)。

由于 Z-箍缩等离子体研究具有军民两用性质, 加之未来能源应用前景, 目前主要有美、俄、中、法和英等 5 个有核国家从事研究。还有欧洲、南美、远东 (日、韩) 及少数发展中国家, 也开展了不同规模的研究工作。

### 2.1 快 Z-箍缩等离子体物理实验研究重要进展

1997 年以来, 美国圣地亚国家实验室在 PBFA-Z 装置上, 用 18~20 MA 的电流, 采用 200~400 根微米级钨丝阵、双丝阵嵌套式负载, 获得输出 X 射线辐射功率达 290 TW, 总能量  $\geq 1.9$  MJ, 脉宽 4 ns, 黑体温度 230 eV, 是目前国际上实验室内创造的最高功率的脉冲低能 X 射线源。X 射线功率  $P_x$  达 250~300 TW, 电能转换为 X 射线的能量转换效率  $\eta_x \approx 15\%$ <sup>[3]</sup>。

Z-箍缩驱动内爆出聚变中子实验, 是一个很重要的里程碑。2003 年 2 月, 美国圣地亚实验室在 Z 装

置上的物理实验取得了重大突破, 采用动态黑腔实验证实产生了热核中子, 获得黑腔芯部电子温度约为 1 000 eV, 测量的 DD 中子产额  $(2.6 \pm 1.3) \times 10^{10}$ , 与一维模拟结果约为  $2 \times 10^{11}$  符合较好。2005 年 1 月 Z 装置上的喷 D<sub>2</sub> 气实验, 在负载电流 17.6 MA 条件下, 测量获得  $N_{DD} \approx 6.34 \times 10^{13}$  DD 中子。理论计算预言<sup>[11]</sup>, 在 ZR 装置上若达  $I \approx 29.5$  MA, DD 质量 4.5 mg,  $N_{DD}$  可达  $2 \times 10^{15}$  DD 中子; 若加 DT 混合气体 (D:T=1:1), 则  $N_{DT}$  将达  $6 \times 10^{16}$ /脉冲<sup>[4]</sup>。

1999 年 1 月圣地亚进行了 Z-pinch 驱动产生的 X 光由初级黑腔向次级黑腔运输的实验, 测得有近 60 % 以上 X 光注入次级黑腔; 同年 8 月, 完成了验证左右两端进入次级腔 X 辐射的同时性和重复性实验, 发现左右同步内爆时间差小于 1 ns; 2002—2004 年间<sup>[4-8]</sup>用钨丝阵作了大量的实验, 获得了许多物理结果。其中用双层箍缩靶获小囊压缩比 14~21; 为增加辐射压缩均匀性对称性, 采用两边“填片”技术, 获压缩均匀性达 1%~2%。同时用 Beamlet 作为背光 X 光源进行 X 光照相, 获得了小囊对称压缩的清晰图像。

在 Z 装置上也进行了材料在极高压力下状态方程的实验研究: 高 Z 材料中, 创造了冲击波速度约为 33 km/s, 压力  $> 2$  TPa 的实验条件; 在液态氙的状态方程测量实验中, 获压力  $\geq 0.14$  TPa 的较精确的状态方程实测数据。

综观近十年来, 美、俄等科学家在辐射流体内爆动力学、辐射运输、小囊压缩对称性和均匀性、出中子及快点火实验等方面, 取得了引人注目的物理进展<sup>[5-9]</sup>。

对未来聚变堆 (IFE) 的研究也在加紧进行, 如总体构想、再生区的防中子辐射材料选择、壁的防护、耐强辐射和屏蔽材料的理论实验和研究等。

### 2.2 Z-箍缩负载靶研究

Z-箍缩负载靶早期采用过单丝、多丝、箔套筒、喷气等结构。为了获得高 X 光产额以及根据高能密度物理实验要求, 当前重点研究的是丝阵负载与聚变小囊组合的靶型。靶物理和结构的创新思维, 极大地克服了内爆过程中出现的流体动力学 RT 不稳定性。目前较突出研究三类靶型: 动态黑腔靶、真空黑腔靶、快点火靶等<sup>[8]</sup>, 如图 3 所示。

图 3 列出的动态黑腔靶将是 Z 箍缩聚变能源 IFE 首选, 按程序计算和定标率预示有可能获高产额 3 GJ 聚变能, 增益达  $G \approx 100$  (释放的聚变能与

电磁内爆产生的 X 光能量之比)。这种靶中心为 DT 小囊 ( $d \approx 2 \text{ mm}$ , CH 球壳厚  $50 \mu\text{m}$ , 内充 D, T), 小囊外加一层低密度泡沫, 最外层是钨丝阵。

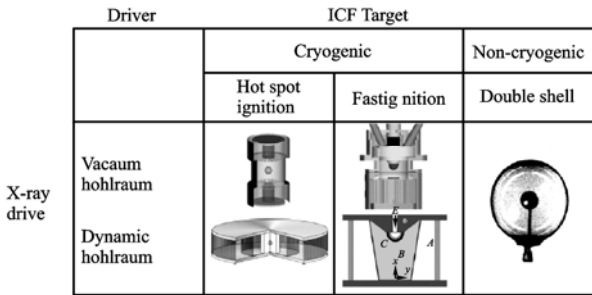


图 3 三种类型靶结构示意图<sup>[8]</sup>

Fig.3 Sketch map of three types target<sup>[8]</sup>

### 2.3 脉冲功率技术进展

美国圣地亚实验室近年来在脉冲功率技术方面取得了长足进步, 这得益于国内学术界的密切合作, 以及与俄罗斯、法国、英国等国际同行交流合作。圣地亚科学家说: “若没有这些合作交流, 发展到 ICF 高聚变产额, 比现在一定会慢得多”。2007 年初, 圣地亚实验室成功建成 ZR 装置(见图 4)<sup>[10]</sup>。相比 PBFA-Z, ZR 装置有了 3 点提高: **a.** 提高了负载电流,  $I$  从 18~20 MA 提高至 26~30 MA; **b.** 增加了打靶发次能力, 从以往每年 Z 装置约 200 发, 发展至在 ZR 装置每年能运行打靶 400 多发; **c.** 提高了测试精确度, 例如, 控制所有实验设备, 触发同步, 时间晃动小于  $\pm 1 \text{ ns}$ 。

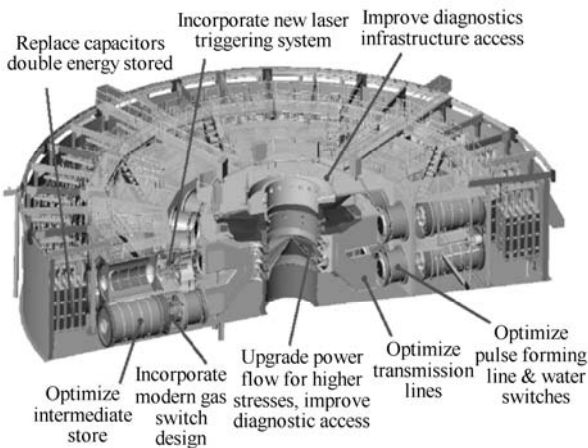


图 4 ZR 装置示意图<sup>[10]</sup>

Fig.4 Sketch map of ZR facility<sup>[10]</sup>

正在寻求更简单、更稳定、高重复频率加速器

的新技术途径, 例如, 线性变压器驱动器 (LTD, linear transformer driver)。目前 1 MA/1 MV, 电流脉冲上升前沿 100 ns, 重复频率 0.1 Hz 的 LTD 原型已经诞生。可循环利用的换靶传输线 (RTL) 也在研究设计中。RTL 直接连接靶和驱动器, 穿过靶室顶端单孔 (半径  $R \approx 1 \text{ m}$ ) 进入靶室, 在靶室内延伸长度估计 2 m 以上 (见图 5), 并且要弯曲。RTL 尚要证明技术可行性和经济性。

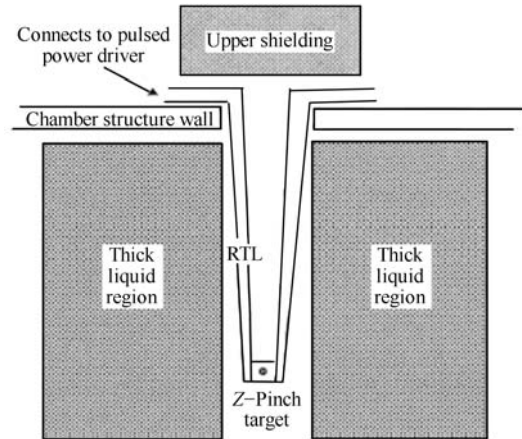


图 5 RTL 换靶结构

Fig.5 RTL target replacing structure

俄罗斯正在研制负载电流大于 50 MA 的“贝加尔湖”驱动装置。目前, 他们也在开展以新能源所为代表的传统技术 (即 Marx 发生器/水传输线, 如: Z, ZR, Angara-5 等的技术路线) 和以大电流所为代表的 LTD 新技术路线之间的竞争。美、俄、法等国正在通过一定合作机制开展快 Z-箍缩驱动聚变能源的国际合作研究。2007 年 4 月报导<sup>[12]</sup>圣地亚实验室与俄罗斯大电流所 (B. Kovalchuk) 合作研制 LTD, 近期取得重大突破 (见图 6)。为建造高功率聚变堆的新型驱动器奠定了技术基础<sup>[12]</sup>。



图 6 线性变压器驱动器 LTD 结构<sup>[12]</sup>

Fig.6 fast (<100 ns), repeated high current LTD<sup>[12]</sup>

## 2.4 我国快 Z 箍缩研究发展<sup>[13-15]</sup>

20 世纪六七十年代,中国工程物理研究院在王淦昌院士直接指导下,自建院早期就开始建立了高功率脉冲技术队伍,高功率脉冲装置为强辐射源和闪光 X 照相应用做出了突出贡献,探索了惯性约束聚变研究的不同途径。20 世纪 90 年代中后期,开始密切关注 Z-Pinch 国际动态,建立了一支初具规模五位一体(理论、实验、测试、制靶和驱动器)的科研群体。至今,在“阳”、“强光-1”、俄罗斯“Angara-5-1”、“S-300”等装置上,进行了近 500 发以上的丝阵和喷气实验,建立了初步理论分析计算程序,编制了一维和二维三温辐射磁流体学程序,在实验测试和制靶工艺研究方面也初具规模。在国家自然科学基金委支持下,近十年来中国工程物理研究院、西北核技术所、清华大学等单位加快了研究步伐。深入开展了理论和物理实验研究,在 0.5~4 MA 脉冲功率装置上,实验观察验证了电流与 X 辐射能量  $E_x$  的依赖关系。建立和发展了一套较完善的用于快 Z-箍缩等离子体研究的实验测试设备和技术,展开了喷气(Kr)、丝阵(30~100 根)、低密度泡沫、氘代聚合物、特征 X 谱线等系列物理实验。对摸清电磁内爆早期物理过程、能量耦合和 X 光转换机制、RT 不稳定性及出 DD 中子规律作了有益探索。在 Angara-5-1 装置上实验获得  $E_x \geq 100$  KJ,  $P = 1\sim 3$  TW 的实验结果。在强光-1 装置上 ( $I \approx 1.6$  MA),用聚氘乙烯  $CD_2$  中心丝芯靶,测得 DD 中子  $\geq 10^{9-10}$ /脉冲。

中国工程物理研究院在微球靶工艺、丝阵靶工艺研制方面,建立了较好技术基础。研制出系列微球充 DD, DT 气体球工艺;有能力制备直径小于  $4 \mu\text{m}$  的均匀钨丝、细于  $20 \mu\text{m}$  的钼丝;制备多达 100 根以上的单层或双层钨丝阵;制备直径为  $20\sim 100 \mu\text{m}$ 、表面镀银(Ag)的氘化聚苯乙烯丝;可制备密度  $10\sim 20$  mg/ml 的 PMP 泡沫材料等。快 Z-箍缩自制钨丝阵靶如图 7 所示。

围绕开展快 Z-箍缩驱动器工作,开展了为快 Z-箍缩驱动源的脉冲功率关键技术研究。如马克思发生器(4.2 MV);闭合环轨式多通道畸变开关(200 kV/100 kA,抖动小于 1 ns);高压绝缘及材料;多路同步控制(如激光多路触发开关,10 级 200 kV,抖动小于 1.5 ns);磁绝缘传输线(MITL)以及快线性变压器(fast LTD)研制等。初步具备全电路模拟及 MITL 设计能力,完成了 PTS 初级实验装置

的概念设计(电流为 8~10 MA/24 路并联)与原型单路样机的调试(见图 8)。

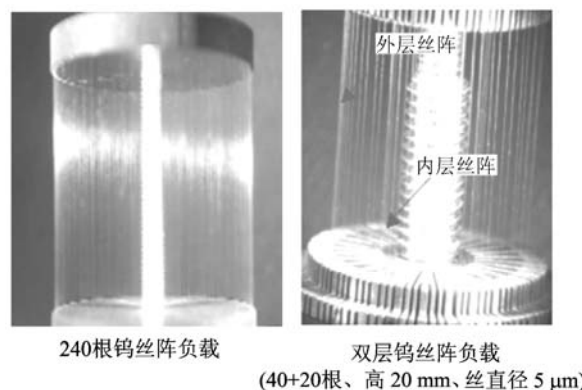


图 7 快 Z-箍缩自制钨丝阵靶(实验打靶时要去掉中心支杆)

Fig.7 Self-made fast Z-Pinch wire-array target



图 8 PTS 原型单路样机

Fig.8 Single channel prototype of PTS

## 3 快 Z-Pinch 聚变能源应用前景展望

快 Z-Pinch 要作为能源应用,必须解决三方面的问题:一是设计出高性能的适合 Z-Pinch 驱动的惯性约束聚变靶(不同于激光驱动);二是研制出经济型快上升前沿大电流重复频率的加速器;三是设计出有一定重复频率运行的爆室和换靶机构。

### 3.1 关于聚变靶

对聚变靶来说,其设计要求是以较小的加速器电流(也即以较小的能量输入)获得较大的能量释放(输出)。按目前美国科学家公布的理论研究结果看,用动态黑腔靶,54 MA 的电流可以获得约 500 MJ 的能量输出。黑腔内的 X 光能量是 12 MJ,即令加速器电能转换成 X 光的效率为 25%,则总的能量增益系数  $G$  仅有 10。而一般热能转化为电能的效率只有 1/3,整个系统的运行,各种材料的消耗和生产,特别聚变核燃料氘的生产 and 提取,还将要消耗相当的能量。故还必须设计出更好的聚变靶,至少要把能量增益系数提高 1 倍以上,即把聚变靶释放的能

量提高到 1 GJ 或更多, 或者大幅降低对加速器电流的要求, 如 40 MA 以下。对聚变靶曾作过初步理论探索, 获得了许多重要概念, 同时提出了一种新型的设计技术途径。该途径既可较大幅度降低对 X 光能量的要求也可降低靶制作上的难度。因此对于能源应用来说, 能源聚变靶的设计将不会成为致命障碍<sup>[11, 16]</sup>。

### 3.2 关于驱动器

正如第 2 节所述, 当前的传统技术 (Marx + 水介质脉冲形成线 + 磁绝缘传输汇流, 即 Sandia Z 及 ZR 装置的基本技术), 要制造 60 MA 级的快 Z-Pinch 驱动器是可能的, 不会有重大技术障碍。但这类驱动器运行频率很低, 不可能作为能源来应用。一个 1 GW 电站, 每秒输出的电能是 1 GJ, 需要的热能约 3 GJ, 若每个聚变靶丸释放 3 GJ 的能量, 则需要每秒爆炸一个靶丸。如果驱动器的运行

频率是 30 s 一次, 则需 30 台同时运行。若能做到 10 s 一次, 则驱动器可减至 10 台。因此, 驱动器的运行重复频率, 对能源应用至关重要。

俄罗斯托姆斯克大电流所提出的线性变压器驱动器方案有可能解决驱动器的重复频率运行问题。他们与 Sandia 合作, 已研制出单路原型, 重复频率可达 0.1 Hz。该驱动器方案由于省去了脉冲形成线及油箱等, 体积比传统技术路线缩小很多, 且运行便利, 造价可能更加便宜, 这些对能源应用极为有利。主要缺点是触发开关非常多, 对长期稳定运行可能会带来不利影响。

图 9 为圣地亚实验室等新近提出的未来 Z-Pinch 驱动惯性约束聚变能源演示堆示意图 (ZP-3), 演示堆由 12 台驱动器组成 (每台以 3 GJ, 0.1 Hz 运行), 电输出功率 1 GW<sup>[11]</sup>。

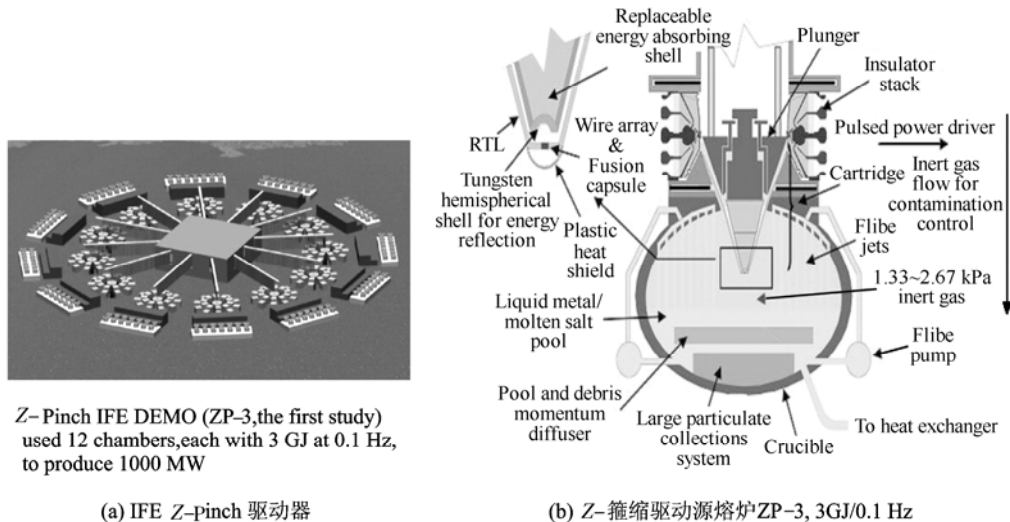


图 9 惯性约束聚变能源研究的 Z-箍缩驱动器 ZP-3  
Fig.9 Z-Pinch driver ZP-3 (a) (b) for ICF energy research

### 3.3 关于爆室和换靶机构

3.3.1 爆室 靶丸 3 GJ 的爆炸能, 相当于约 700 kg TNT 炸药爆炸时释放的能量, 其中约 80 % 由高能中子带走, 其他还有约 140 kg TNT 当量的能量由靶物质所携带, 这是爆炸能, 将产生强烈的冲击波效应。爆室必须具有下述功能: 一是要有合适的工作介质, 能够吸收并储存爆炸的能量, 然后参与第二回路的热交换; 二是要在爆室内实现核燃料氙的生产与增殖, 以便该能源系统能够持续运行; 三是要基本消除爆室的震动, 以保证驱动器能正常运行; 四是要实现很好的密封, 防止爆室内放射性气体 (如氙等)

外泄, 并要有利于负载靶的更换。上述 4 条中前面 3 条是不难实现的, 例如, 可以选液态锂作工作介质, 在靶丸爆炸前把液态锂喷下来, 并在靶的周围形成某种分布; 液态锂除吸收爆炸的能量以外, 还可以慢化并吸收高能中子造氙, 当然要实现氙的增殖也很不容易, 这可能需要在靶丸的周围放置一定量的金属铍; 爆室也可适当大一点, 工程技术上要配以减震装置。第四条可能会遇到一定困难, 这主要与高频率更换靶有关。当然, 由于靶丸爆炸时, 释放的能量较大, 会有许多靶及周围物质要混进液态锂中, 影响锂作为工作介质及产氙介质的性能,

因此工作介质需要及时净化。

3.3.2 换靶机构<sup>[11, 16]</sup> 目前, 换靶机构正在 Sandia Saturn 装置上研究(见图 5)。初步看来, 如果要做到 10 s 换一次靶, 可能会有工程技术上的困难。原因: **a.** 驱动器与负载靶紧密相连, 靶丸的爆炸威力较大, 为了保护驱动器, 只有加长图 9b 所示锥形靶的长度。因此, 靶的体积和质量都很大, 要把炸掉的靶及时取出, 并把新靶及时更换, 准确安装到位有难度。**b.** 靶丸爆炸后, 爆室中充满着高温高压气体并含有大量的放射性元素(主要是烧剩的氙和新造的氙), 而外边的靶输送通道一般处于低压状态(这有利于整个系统的密封), 其巨大的压力差也会给靶的取出和安装带来困难。要在限定的重复频率(10 s 内)或更长一点时间内, 将可循环利用的传输线“废料”清除出去。初步估计, 对于 1 GW 的电站方案设计, 每个 RTL 约有 50 kg 左右, 每天循环用量约 5 kt 左右, 与燃煤电站废料相当, 只不过这儿的“废料”依然可以回收再利用。

实际上, 如果把 Z-Pinch 驱动聚变技术与次临界裂变堆技术结合起来, 利用 Z-Pinch 驱动聚变产生的中子和次临界堆对中子和能量的放大作用, 就可成为性能更为优良的能源系统, 同时也可更好地解决核燃料循环和系统经济运行问题。这样的聚变裂变混合堆技术途径有可能加快聚变能问题的解决和实验室演示。

### 3.4 展望<sup>[11,13-16]</sup>

基于上述分析和讨论, 快 Z-Pinch 驱动聚变途径成为能源的前景从科学上讲是可行的, 关键取决于高性能聚变靶的设计和驱动装置工程技术的进步(其中特别是 LTD 型驱动器, 如此众多的电器元件(仅触发开关就可能达数十万个), 在高压大电流下工作的可靠性和寿命如何至关重要)。对于能源前景, 国外有专家做过乐观预测<sup>[11, 16]</sup>。2004 年美、俄、法等国科学家论证组发表 Z-箍缩用于聚变能源的论证报告, 提出了 IFE 技术路线图: 原型验证→综合实验阶段→工程试验阶段→重复频率电站演示(预计 2025 年左右)。希望在未来 10~20 a 里, 我们能通过自己的科技进步, 创新物理思想, 同时加强与国外的交流合作, 走出一条效费比较高的聚变能源发展新途径。

### 参考资料

- [1] Леонтович М, А. Физика Плазмы Проблема Управляемых Термоядерных Реакций[M]. Издательство Академии Наук СССР-4Т II, 1958.170-184
- [2] Аивазов И К, Смирнов В П., итд. Физика Плазмы [J]. 1988, 14(2): 197
- [3] Spielman R B, Deeney G, Chandler G A, et al. Tungsten wire-array Z-pinch experiments at 200 TW and 3MJ [J]. Phys. plasmas, 05. 1998: 2105~2111
- [4] Velikovich A L, Deeney C (SNL), Rudakov L I, et al. Thermonuclear and beam fusion in D<sub>2</sub> Z-pinch implosions theory and modeling [A]. 6th conf. D Z-pinch [C]. Oxford UK. July 25, 2005
- [5] Bailey J E., et al. Phys. Rev. Lett. [C]. 89, 095004, 2002
- [6] M. Keith Matzen (APS). Pulsed-power driven HEDP and inertial confinement fusion research [A]. Sandia Savannah [C]. Supred DE-AC04-94AI85000, NoV 5, 2004
- [7] Knudson M D. EOS for liquid D<sub>2</sub> of the fast Z-pinch experiments [A]. Phys. Rev. Lett [C]. 87, 225501, 2001
- [8] Tom Mehlhorn. Recent experimental results on ICF target implosions by Z-pinch radiation sources (and their relevance to ICF ignition studies) [R]. 2003: 2397
- [9] David L, Hanson. Diagnostics development plan for ZR [R], 2003, SAND 2003~2917, 2003
- [10] Maenchen J, et al. (SNL), Pulsed power technology development for ZR [A]. 17th Beam's Reference Report [C]. Oxford, Great Britain, 2006
- [11] Olson C. L., Z-pinch IFE Team. Research progress of Z-Pinch inertial fusion energy IFE [A]. 15th Conf. High Power Particle Beams [C]. St. Petersburg, 07, 2004, 20th IAEA Fusion Energy Conf [C]. Vilamoura, 2004
- [12] SDI News of LTD. Rapid-fire pulse brings Sandia Z method closer to goal of high-yield fusion reactor [DB/OL]. 24 April 2007
- [13] 邱爱慈, 华欣生. 我国快 Z 箍缩研究进展 [R]. 全国加速器会议特邀报告, 安徽合肥, 2004, 09: 26~28
- [14] Peng Xianjue, Hua Xinsheng. Experimental studies of the multi-wire liners implosion dynamics on Fast Z-pinch facility [A]. 15th Conf. High Power Particle Beams [C]. St Petersburg, 2004
- [15] 华欣生, 彭先觉, 李正宏, 等. 快 Z 箍缩钨丝阵内爆物理研究 [J]. 强激光与粒子束. 2006, 18(09): 1475~1480
- [16] Шарков Б Ю, et al. Ядерный Синтез с Инерционным Удержанием (Современное состояние и перспективы для энергетики) [M]. Физматлит М, 2005

(下转第 60 页)