

Z 箍缩内爆等离子体研究新进展*

杨 震 华

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

摘 要 目前,快过程 Z 箍缩内爆等离子体可以把储存在脉冲功率加速器内 15% 的电能为大能量、高功率的 X 射线源.美国 Sandia 实验室的 Z 装置已经产生了总能量为 1.8 MJ,功率为 290 TW 和黑腔温度超过 200eV 的 X 射线源,这些进展正在用于惯性约束聚变(ICF)实验研究,并对它的后续装置 X-1 正在进行概念性设计.文章概要地叙述了 Sandia 实验室近五年来在 Z 装置上进行 Z 箍缩实验所取得的进展.

关键词 Z 箍缩,内爆等离子体,惯性约束聚变

NEW PROGRESS OF Z-PINCH IMPLoding PLASMA RESEARCH

YANG Zhen Hua

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract Fast Z-Pinch imploding plasma can now convert more than 15% of the stored electrical energy in a pulsed power accelerator into the most energetic and powerful source of X-rays. The facility at Sandia National Laboratory has produced 1.8 MJ of X-ray energy, 290 TW of power, and 200eV of hohlraum temperature. These advances are being applied to inertial confinement fusion experiments. Progress in Z-Pinch research on this Z facility during the last five years is briefly reviewed.

Key words Z-Pinch, imploding plasma, inertial confinement fusion

1 引言

能源是人类文明得以维持和发展的基础.随着社会生产力的不断发展,对能源的需求量也相应提高.据科学家们估算,大约到 2050 年,地球上的煤、石油、天然气、水电和裂变等资源提供的能源,将不能满足社会发展的需要,必须由其他新的能源来补充.聚变能量是由氢的同位素氘、氚在高温状态下通过聚变核反应释放的能量.实验证实,1g 氘、氚热核反应释放的能量为 0.34×10^{10} J,相当于 10^4 L 汽油释放的能量.1kg 海水中含有 0.034g 氘,因此地球上海水中的氘的总数大约有 23.4 万亿吨,释放的热核能足够人类使用几十亿年.因此开发热核能将为人类提供一项无穷无尽的持久能源.

近 50 年来,人类在实验室内不断地探索和平利用热核聚变能的问题.主要的技术途径大致可以分为磁约束聚变和惯性约束聚变两大类.本文所讨论的内容就是近年来惯性约束聚变技术途径研究中所取得的最新进展,它极有可能为人类和平利用聚变

能提供一条新的技术途径.

Z 箍缩(Z-Pinch)内爆等离子体产生强 X 光源起源于 20 世纪中叶.由脉冲功率技术提供强电流,在通过阴阳极之间的薄膜圆柱体负载时,由预脉冲电流或主脉冲电流的前沿部分使负载形成部分电离的等离子体状态,如图 1(a)所示.当主脉冲电流通过负载等离子体时,强电流在圆柱等离子体的外侧产生强磁场,电磁场的洛伦兹力 $j \times B$ 使负载产生向心加速运动,数十 MA 的电流可以产生数百万大气压的向心推力,使负载迅速获得 $\sim 10^7$ cm/s 以上的高速度,电磁能转化为物质的动能,如图 1(b)所示.高速运动的负载在对称中心 Z 轴上止滞(stagnation),也称坍塌(collapse),物质的动能转化成为物质的内能和辐射能,形成高温高密度等离子体和大能量高功率 X 辐射源,如图 1(c)所示.通常把这一过程称为 Z 箍缩过程,也称电磁内爆等离子体(imploding plasma)过程.

* 国家自然科学基金(批准号:10035030)重点资助项目
2000-04-19 收到初稿,2000-07-17 修回

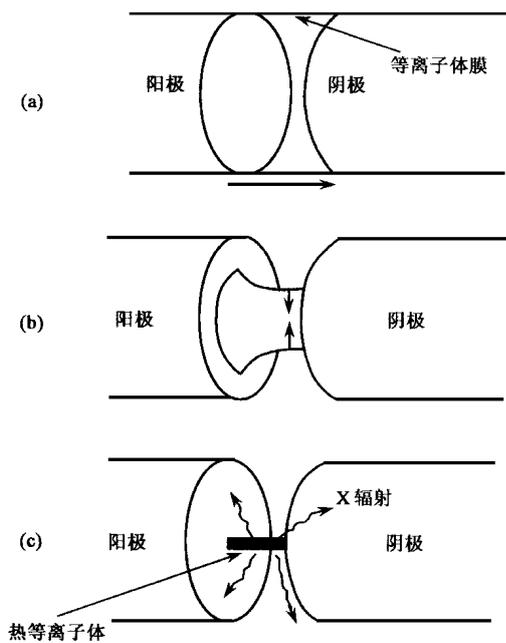


图1 Z 箍缩过程的三个阶段：
(a) 形成薄膜等离子体柱壳；(b) 内爆；(c) 热化

Z 箍缩大致可以分为两类：即重负载的慢过程和轻负载的快过程。慢过程的电功率脉冲宽度一般为 $3-5\mu\text{s}$ ，其每厘米长度上的负载质量可以重达数十克，根据研究内容的需要可以由多种材料加工成复杂的柱对称结构，主要从事数百万至数千万大气压状态下冲击波物理、内爆动力学、界面不稳定性、高压物态方程等物理问题的研究。快过程 Z 箍缩主要目的是在实验室内产生超强 X 辐射源以及利用 X 辐射源来从事有关物理问题的研究。要使电磁能有效地转换成 X 辐射能，要求负载内爆到心的速度接近 10^8cm/s 。就目前脉冲功率技术达到的水平而言，每厘米长度负载的质量一般只能在几 mg 左右。这就要求脉冲功率的时间宽度大约为 100ns ，这就是“快过程”一词的由来。近几年来 Z 箍缩取得突破性进展，主要是指快过程 Z 箍缩研究中取得的进展。

自 70 年代以来，美国和前苏联都十分重视 Z 箍缩的研究工作，其主要目标是希望在实验室内创造一个强 X 辐射源，利用它来从事原子参数、辐射对材料的损伤、辐射输运、高温高压物态方程和不透明度、内爆动力学和界面不稳定性等物理问题的研究。从长远的角度讲，希望能产生十几 MJ 的 X 辐射源。在实验室内实现惯性约束聚变 (ICF) 的突破，为人类新能源的研究寻找一条新的技术途径。从 80 年代初期到 1995 年以前 20 余年的时间内，Z 箍缩内爆

等离子体产生的 X 辐射源，其功率始终在 20TW 上下徘徊^[1]。出现这种情况的原因是内爆过程中的瑞利-泰勒 (Rayleigh-Taylor) 等不稳定性，严重地影响了 X 辐射功率的提高。

2 负载设计上的技术性突破

Z 箍缩内爆过程中各种不稳定性的产生、发展直到最后出现严重的不均匀性，都是由于初始负载表面的不光滑性和不均匀性引起的。计算机数值模拟研究表明，Z 箍缩内爆不稳定性的发展与初始负载等离子体有着密切的关系，越是均匀的初始等离子体，箍缩在轴上止滞产生的 X 辐射越均匀，功率也越高。因此如何做到初始负载均匀性和光滑性就成为抑制不稳定性的关键因素。科学家尝试过许多方法来使负载等离子体更均匀，例如采用薄膜金属圆筒（厚度要求几个 μm ）和空心的圆柱气筒等，但是没有一种方法是成功的，这就导致了 Z 箍缩多年来未能取得实质性的进展，X 辐射的功率也就始终在 20TW 上下徘徊。

1995 年，Sandia 实验室的一些科学家们提出^[2]，用 120 根直径 $7\mu\text{m}$ 的铝丝在阴极之间均匀排列成半径为 2cm 圆柱丝阵列 (wire array)，如图 2 所示。利用长达数十 ns 的电流脉冲前沿，电流的焦耳热使每一个铝丝的外层熔化膨胀，当主脉冲到达时，已使整个圆柱丝阵列融合成一个近乎均匀的等离子体柱壳，而且当丝的根数越多时均匀性越好，如图 3 所示。这一思想随即在 Saturn 装置上进行了实验，测得的 X 辐射脉冲功率从 20TW 增加到 40TW ，改用钨丝阵列，X 辐射的功率又猛增到 85TW 。Saturn 装置上的实验结果表明，金属钨丝阵列负载可以有效地抑制不稳定性，于是 Sandia 实验室于 1995 年 7 月立即决定把已做了近十年轻离子 ICF 的 PBFA-II 装置，改装成从事轻负载快过程 Z 箍缩实验的 Z



图2 Z 箍缩丝筒负载结构图

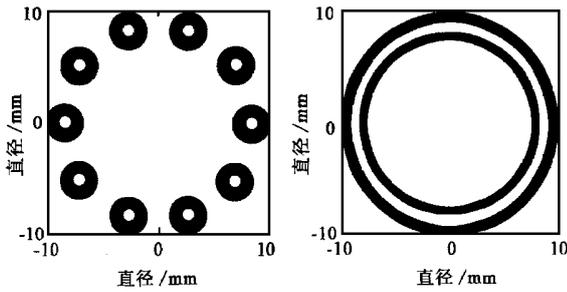


图3 预脉冲电流通过半径10 mm的铝丝阵列的计算机模拟结果
(左侧为10根铝丝,右侧为40根铝丝)

装置,把Z箍缩置于黑腔(Hohlraum)内进行并进一步优化钨丝的结构.于1997年底,取得了X辐射能量1.7 MJ、功率195 TW、脉宽(FWHM)5.8 ns、黑腔辐射温度130 eV的最新水平,电能转化为X辐射的效率接近15%.这些数据表明,Z箍缩技术途径在ICF和核武器物理研究中具有重要的应用前景.

3 Z装置上的实验和进展

Z装置上由36台脉冲功率加速器组成,每一台由Marx发生器(由60个1.3 μF、90 kV的电容器提供能源)、水介质传输线、真空磁绝缘组件系统组成,36路并联向中心靶室提供功率源.阴阳极间电压2.5 MV,电流20 MA,电容器总储能11.4 MJ,它是目前世界上技术最先进、功率最大(50 TW)的脉冲功率加速器.Z装置的实验目的就是要全面证实Z箍缩技术上的突破,能在适当大小的体积内创造一个高温、大能量、高功率的辐射源,并由此确立它在ICF研究中的地位,同时为未来在实验室内设计高增益热核聚变装置提供技术基础和设计指标.

Z装置的黑腔实验从1997年4月开始,至1999年底已进行了大约500余次实验.大部分属于黑腔结构参数优化,技术性能改进和物理问题的研究,其中包括为其后续装置X-1的设计所开展的技术问题的研究和为候选黑腔靶设计所进行的物理问题研究;另有一部分是Los Alamos实验室和Livermore实验室专门为核武器物理问题研究进行的实验;再有一部分是为核武器效应和器件改进等进行的实验.在以上这些实验中,择其感兴趣的作一介绍.

3.1 黑腔结构和参数优化的实验

Z装置的黑腔如图4所示,黑腔由外腔体和内

部靶体组成.电子流由阴极经丝阵列流到阳极,再由外腔壁回流到接近阴极处流出靶室.产生高达数百万高斯的箍缩磁场就在丝阵列和回流壁之间小体积内形成的,数十MA的强电流可以产生数百万大气压的压力向轴对称中心爆聚,负载爆聚到中心时速度接近 10^8 cm/s,在轴对称中心止滞形成温度高达几千万度的高温、高密度等离子体.由于Z箍缩是在黑腔内进行的,因此就形成了一个体积大、高温、高功率的X辐射源,辐射温度可以达到数百eV.

早期丝阵列钨丝直径约为 $10\mu\text{m}$,总数120根,实验测得的X辐射总能量为1.5 MJ,峰值功率110 TW;当钨丝的直径缩小到 $7.5\mu\text{m}$,总数增加到240根(保持单位长度负载质量基本不变)时,X辐射总能量增加到1.85 MJ,峰值功率增加到160 TW.实验表明,增加钨丝的根数明显地降低了瑞利-泰勒不稳定性,并提高了X辐射的总能量和峰值功率,同时实验结果也进一步证明了数值模拟的可靠性.

为了进一步降低瑞利-泰勒不稳定性,于是设计了双层嵌套钨丝阵列负载结构^[3].外层采用直径为 $7\mu\text{m}$ 的240根钨丝构成直径为2 cm的丝阵列,内层用120根相同的钨丝构成直径为1 cm的内层丝阵列.实验测得X辐射总能量~2 MJ,峰值功率290 TW,脉宽4 ns,黑腔辐射温度155 eV,止滞时等离子体直径只有1 mm,保持良好的均匀性和准直性,电容器储能转化为X辐射的效率超过了15%.这是目前实验室内所能达到的功率最强的X辐射源,这一结果在世界上引起了广泛的重视.Z装置Z箍缩的突破性进展,有可能为ICF研究提供另一种高效、低价的驱动源.除此之外,还有一类结构是在对称中心轴上置一泡沫塑料圆柱体,外表镀铜或镀金,对这类结构也进行了研究,以达到改变输入次级黑腔X辐射脉冲构形的目的.

3.2 动力学黑腔实验

Z装置以及它的后续装置是瞄准ICF进行的,动力学黑腔的实验就是探索实现这一目标的一种途径,如图4所示.在双层钨丝阵列内置一密度为 14 mg/cm^3 的泡沫塑料圆柱体,在圆柱体的对称中心置一DT小囊.在Z箍缩向对称轴爆聚过程中,双层钨丝阵列聚合为一个高Z等离子体外墙,这种结构类似于激光ICF中的直接驱动靶.墙外称初级,墙内称次级.泡沫塑料圆柱体的作用是,当丝阵列冲击泡沫塑料时,因冲击产生一个辐射波,向内传播的辐射波使DT小囊预热,为后来的主冲击波创造一个等熵压缩的条件,可以使DT小囊获得更高的压

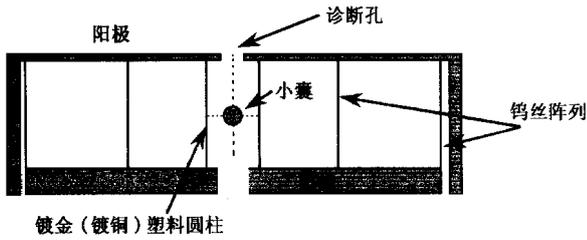


图4 动力学黑腔结构示意图

缩比.1998年8月,初级黑腔的温度已达到180eV,次级黑腔的温度已达到230eV,爆聚到心时的最高温度已超过300eV.动力学黑腔的缺点是,由于结构上的先天缺陷造成DT小囊内爆时的非球形不对称性,为了克服这种不对称性,可以在中心CH泡沫塑料层的构形上作些变化,以达到缓解这种不对称性的目的,这类实验正在进行之中.Livermore实验室用二维Lasnex程序设计了一个高产动力学黑腔靶,采用单层钨丝阵列,直径为3.6cm,内层是一个直径约2.8cm的低密度(5mg/cm³)CH泡沫塑料层,中心置一直径为6mm的DT小囊,小囊用Be作烧蚀层,外侧镀铜,内侧是冷冻DT层,最内层是DT气体.用54MA电流,可以产生12MJ的X辐射源.用一维程序计算的聚变能是600MJ,二维Lasnex程序计算的聚变产额是550MJ.

3.3 ZPD(Z-Pinch Driven)黑腔实验

动力学黑腔有很多优点,但致命的弱点是小囊内爆的不对称性.为了克服这一弱点,在Z装置上开展了ZPD黑腔的实验研究,其结构如图5所示^[4].中间是次级黑腔,中心置DT小囊,左右两端是两路Z箍缩初级黑腔,产生的X辐射由通道输入次级,通道由一个钨质轮辐形圆盘构成,除了把初级和次级隔开外,也是Z箍缩内爆的电流通道,对内爆到心时产生的高温X辐射,钨质轮辐形圆盘又是透明的,可以让左右两侧产生的X辐射通畅地进入次级黑腔.1999年1月,完成了单个Z箍缩驱动的黑腔向次级的辐射输运实验,同时用二维Lasnex程序进行了计算,两者进行了校准.结果表明,初级腔中近60%的X辐射输运进入了次级黑腔.1999年8

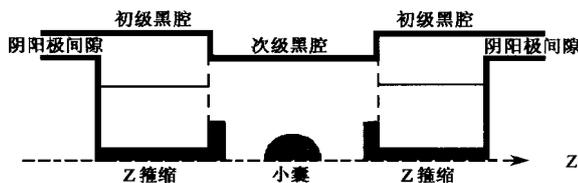


图5 ZPD黑腔概念的结构示意图

月,又完成了左右两侧Z箍缩的实验,主要目的是检验左右两侧进入次级辐射的同时性和重复性.两侧进入次级黑腔辐射的同时性和重复性是直接影响到次级黑腔中DT小囊聚变的成败和产额大小的重要因素,因此实验结果显得尤为重要.实验结果表明,设计是成功的,和数值模拟结果也符合得相当好.下一步实验的主要内容是通过减小两个初级腔的负载电感和黑腔体积,提高初级腔的辐射温度和增加输入次级黑腔辐射的功率、能量和温度.

除此之外,Z装置上还做了一系列其他物理实验,例如物质的高压状态方程和高温辐射不透明度(opacity)实验,强X光源辐照下材料的损伤、老化实验等,详细内容可以参阅有关文献.

4 “得失相当”实验

在实验室内实现热核聚变能量“得失相当(Breakeven)”实验是人类ICF和平利用核能漫长技术道路上的关键性一步.在过去数十年的研究中,科学家们用大功率激光器进行了大量的实验工作,同时也发展了功能齐全并得到实验检验的计算机程序.关于实现热核聚变点火所需要的条件已经基本上清楚了:在一个适当大小的体积内,需要创造500TW功率、300eV温度的辐射环境,在4ns的时间内,使2MJ的辐射能传送到DT燃料的靶丸上.Livermore实验室的科学家们用30kJ的Nova激光器进行了14年的研究后,正在建造一台称之为国家点火装置(NIF)的总能量为1.8MJ的世界上最大的激光器.根据计算,NIF聚变产生的热核能大约为几十MJ,但由于产生激光的效率不超过0.5%,因此仍然谈不上真正意义上的“得失相当”,而且相距甚远.如果要达到能量“得失相当”就势必要求大幅度提高产生激光的效率,而这一点正是激光ICF难以达到的.

Z装置上Z箍缩实验的突破性进展,为实验室ICF“得失相当”实验提供了一条新的可能的技术途径.

Sandia实验室一系列实验装置的结果表明,Z箍缩产生的X辐射能量与驱动电流 I^2 成正比^[5].在Z装置上,ZPD次级黑腔的辐射温度已经达到130eV,如果把驱动电流从20MA升级到60MA时,数值计算表明,次级黑腔的辐射温度可望达到250eV左右.在一个半径为1cm、长度为1.6cm的次级黑腔中心,置一半径为2.59mm的DT小囊,用

Be 作烧蚀层,冷冻 DT 层的质量为 3.6 mg.一维计算表明,小囊吸收 1 MJ 的能量,热核聚变的产额是 400 MJ;如果把小囊半径增大 1.26 倍,吸收 2 MJ 的能量,则热核聚变的产额可望达到 1200 MJ.这些计算尽管是初步的,基础物理实验做得也还不够深入,但是给 Z 箍缩驱动的 ICF“得失相当”实验提供了一条新的值得探索的途径.于是,Sandia 实验室在 1998 年 3 月正式向能源部提出申请,要求对 Z 装置的后继者 X-1 装置进行概念设计,其主要目标分两个阶段来实现.第一阶段建立 ZX 过渡装置,驱动电流 40 MA,采用一些新技术,进一步提高能量转化效率,Z 箍缩产生的 X 辐射能量达到 7 MJ;第二阶段采用新技术建立 X-1 装置,驱动电流 60 MA,Z 箍缩产生的 X 辐射能量达到 16 MJ、功率为 1000 TW 的水平,次级黑腔的温度 $> 300\text{eV}$,热核聚变的产额希望能达到 1000 MJ,在实验室内达到真正意义上的“得失相当”目标.

5 希望与风险

从 Z 箍缩目前取得的进展来看,它具有一系列的优点,例如从电能转化为 X 光的效率比较高,目前已达到 15%左右.这比激光 ICF 过程中的效率要高出数十倍.其次从造价上讲也具有明显的优势,据 Sandia 实验室负责科学和技术的副主任 Yonas 估计,建造一台指标略高于 NIF 的 X-1 装置,其总投资不会超过 4 亿美元^[6],而 NIF 则要大于 12 亿美元,这一优势为更多国家开展 ICF 研究提供了条

件,显然会对人类广泛研究和利用热核能量起到促进的作用.除此之外,Z 箍缩还具有黑腔靶室的体积较大(有利于提高诊断精度,更适合于从事精密物理实验)、黑腔辐射场没有高能电子等引起的“污染”(有利于提高小囊内爆的效率)等优点.

实施 X-1 计划,同样也存在很大的技术风险.首先是 150 TW 的电功率能否在 100—200 ns 的时间内送入到只有几个 cm^3 的金属丝阵列和金属黑腔腔壁之间的空间中,金属壁上的功率密度大约达到 $75\text{TW}/\text{cm}^2$,黑腔表面的物质压达到 150—300 万大气压,腔壁能否承受得住;其次是 15% 的转化效率能否继续保持,不稳定性是否会继续受到控制,输入到次级黑腔中的 X 辐射能否达到数值模拟的指标和对称性等等.所有这些问题都会对 X-1 计划能否成功构成挑战.但是正如 Yonas 所指出的,“很难作出预测,特别是对未来.但是如果我们能够立即开始着手下一步重大步骤的设计与建造工作,我们的确认为我们能够在 10 年内完成这一任务.”

参 考 文 献

- [1] Brownell J H, Bowers R L. LA-UR-97-4840, 1997
- [2] Sanford T W L, Mock R C, Spielman R B. Phys. Plasmas, 1999, 6(5): 2030
- [3] Deeney C, Douglas M R, Spielman R B. Phys. Rev. Lett., 1998, 81(22): 4883
- [4] Sanford T W L, Olson R E, Boners R L. Phys. Rev. Lett., 1999, 83(26): 5511
- [5] Quintenc J P, Adams R G, Allshouse G O. SAND-98-0161c, 1998
- [6] Yonas G. Scientific American, 1998, 8: 40
-
- [29] Deligiannis K, de Groot P A J, Oussena M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1997, 79: 2121
- [30] Terukazu Nishizaki *et al.* Phys. Rev. B, 2000, 61: 3649
- [31] Cha Mir-Chul, Fertig H A. Phys. Rev. Lett., 1998, 80: 3851
- [32] van Otterlo Anne *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81: 1497; van Otterlo Anne *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84: 2493
- [33] Giller D *et al.* Phys. Rev. B, 1999, 60: 106
- [34] Zhukov A A *et al.* Phys. Rev. B, 2000, 61: R886
- [35] Sun Y P *et al.* Phys. Rev. B, 2000, 61: 11301
- [36] Dae men L L *et al.* Phys. Rev. Lett., 1993, 70: 1167
- [37] Giller D *et al.* Phys. Rev. Lett., 1997, 79: 2542
- [38] Paltiel Y *et al.* Nature, 2000, 403: 398
- [39] Sas B *et al.* Phys. Rev. B, 2000, 61: 9118
- [40] Rakumar G *et al.* Phys. Rev. B, 2000, 61: R6479
- [41] WEN H H, Li S L, Zhao Z X. Phys. Rev. B, 2000, 62: 716

(上接第 73 页)