

电感分布对双层丝阵 Z 箍缩内爆动力学模式的影响*

丁 宁[†] 张 扬 刘 全 肖德龙 束小建 宁 成

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2008 年 4 月 3 日收到, 2008 年 6 月 23 日收到修改稿)

采用等效电路和零维分析方法,建立了双层丝阵 Z 箍缩内爆动力学的物理模型. 研究了内、外层丝阵电感分布及其变化对双层丝阵内爆动力学模式的决定性影响. 结果表明丝阵的初始电感决定了初始电流分配, 动态电感变化影响丝阵内爆的动力学过程. 提出由于电感的变化可能存在四种不同的双层丝阵内爆动力学模式. 针对“强光一号”装置 Z 箍缩双层丝阵负载参数进行计算分析, 可以得到外层等离子体穿透内层先运动到芯的动力学模式, 与其他低电流装置在实验上观察到的物理图像一致.

关键词: Z 箍缩内爆等离子体, 双层丝阵负载, 电感, 动力学模式

PACC: 5230, 5225P, 5255E

1. 引 言

驱动核聚变点火是 Z 箍缩技术的重要应用之一. 目前由双层丝阵和泡沫柱内镶嵌氘氚靶构成的动力学黑腔是 Z 箍缩研究的主要方向. Z 装置实验已经证明, 动力学黑腔所采用的双层丝阵构形明显抑制了磁瑞利-泰勒(MRT)不稳定性, 大大提高了 X 光产额, 双层钨丝阵内爆的 X 射线功率达到 (280 ± 40) TW, 比单层丝阵增加了 40%^[1]. 虽然在 Z 装置上双层丝阵实验取得了巨大成功, 但对双层丝阵负载的优化仍然是经验性的, 物理机制的解释和理论上的分析仍然不够. 所以, 确定双层丝阵的动力学模式, 解释双层丝阵内爆为什么能获得比单层丝阵更高的 X 光产额等问题, 对优化双层丝阵负载是非常有意义的.

自 1997 年 Davis 等^[2]最早提出双层丝阵(double wire array/nested concentric wire arrays)的概念, 同年 Douglas 等^[3]采用二维磁流体学(MHD)数值模拟证明优化的双层丝阵 Z 箍缩可以获得比单层更高的 X 光产额, 第二年 Z 装置双层钨丝阵实验^[1]获得巨大成功以来, 不仅 Z 装置上开展了大量的双层丝阵

内爆实验研究^[4-6], 而且在中小型(1—7 MA)装置上, 如 Saturn, MAGPIE, Angara-5-1 和 Zebra 等, 也都相继开展了双层丝阵内爆实验^[7-10]. 2000 年 MAGPIE (1 MA, 240 ns) 装置首次在实验上观察到两种双层丝阵内爆动力学模式^[8], 实验巧妙地通过改变内层丝阵的高度, 观察到了双层丝阵内爆动力学模式变化. Chittenden 等^[11]根据当时的 Z 装置和 MAGPIE 装置的双层丝阵 Z 箍缩实验结果, 基于 MRT 不稳定性分析, 在理论上提出了三种可能的双层丝阵内爆动力学模式: 流体学(壳-壳)碰撞模式、内层可穿透(电流转移)模式和通量压缩(磁缓冲)模式, 三种不同模式的内爆轨迹有明显差异, 如图 1 所示. 然而, 他们对双层丝阵内爆物理过程的描述和物理机制的理论分析带有一定的猜测和推断, 他们的 2D ($r-\theta$) MHD 数值模拟也仅能给出其中第二种动力学模式的计算结果. 而 Douglas 等^[3]的 2D ($r-z$) MHD 模拟, 采用的是壳-壳碰撞假设, 解释了第一种双层丝阵内爆动力学模式. 后来 Velikovich 等^[12]和 Esaulov 等^[10]用丝动力学理论模型(WDM)也分析了双层丝阵内爆流体碰撞模式和电流转移模式动力学过程存在的可能性, 但他们没有考虑双层丝阵负载与脉冲功率驱动器的耦合. 另外, 上述这些理论和数值模

* 国家自然科学基金(批准号: 10575014, 10635050, 10775021)和国防基础科研项目(批准号: A1520070074)资助的课题.

[†] E-mail: ding_ning@iapcm.ac.cn

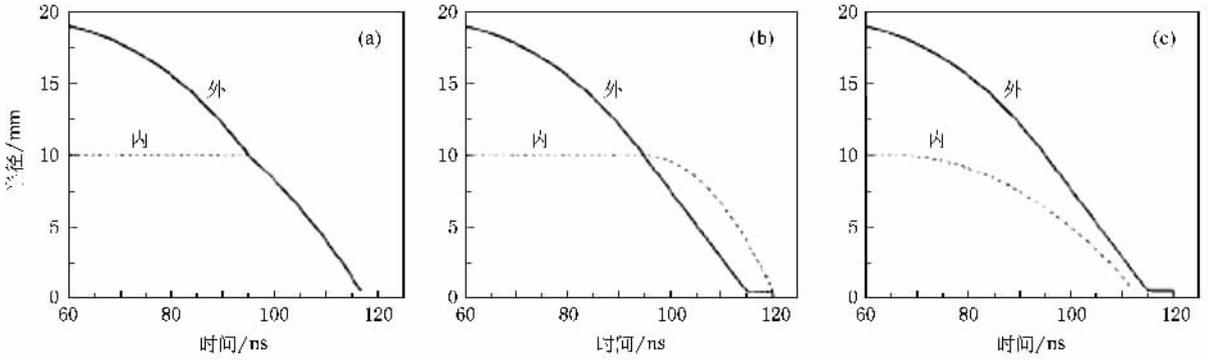


图 1 双层丝阵内爆三种动力学模式内爆轨迹示意图 (a)流体力学碰撞模式 (b)内层可穿透模式 (c)通量压缩模式

拟工作都没有研究内外层丝阵高度不同的情况。

国内 Z 箍缩技术研究在上世纪末才起步,但是, Z 箍缩实验和理论研究均已取得明显进展. 2007 年我们在“强光一号”装置进行了双层丝阵实验初步研究. 近年来国内关于双层丝阵内爆的理论和数值模拟研究^[13-15]还都局限于壳-壳碰撞模式的 0D 和 1D MHD 模拟,所掌握的物理模型和理论分析工具远远不能满足双层丝阵实验结果分析和负载设计优化的需要,尤其我们从“强光一号”和 Angara-5-1 的双层丝阵实验结果^[9]得知,壳-壳碰撞假设不适合低电流装置双层丝阵实验的物理分析,所以,更进一步理解双层丝阵内爆过程的物理机制,了解不同条件下的不同动力学模式,研制有效的分析模拟工具都十分有必要.

Z 箍缩的物理机制核心是丝阵等离子体动能转换为内能和 X 射线辐射,而脉冲功率驱动器提供的电磁能量转换为丝阵等离子体的动能时,负载电感变化直接影响内爆等离子体的动力学状态. 由于双层丝阵的几何结构与单层明显不同,内外层丝阵上丝的熔解、汽化、形成等离子体过程也与单层不同,更重要的是内外层之间存在相互作用,所以,它的动力学过程比单层更为复杂,在我们不清楚双层丝阵内爆动力学模式的情况下,直接采用辐射磁流体力学数值模拟困难非常大,甚至不可能. 为了获得对双层丝阵内爆过程物理图像的理解和认识,我们采用一种简化的零维分析方法,研究丝阵电感变化对双层丝阵内爆动力学模式的影响,通过改变内外层丝阵的电感,可以得到不同模式的双层丝阵内爆动力学过程. 我们利用低电流装置(如“强光一号”装置和 Angara-5-1 装置)Z 箍缩实验双层丝阵负载参数进行了计算分析,得到了外层穿透内层先运动到芯动力学模式, MAGPIE, Angara-5-1 和 Zebra 装置上的

双层丝阵内爆实验都观察到了这种模式^[8-10].

2. 双层丝阵‘电感型’物理模型

在脉冲功率驱动技术中, Z 箍缩内爆丝阵是一个电感性负载,尤其是在脉冲功率加载初期,丝阵负载的电阻可以忽略不计. 另外,这里我们仅考虑丝阵内爆的动力学过程,即,磁压力驱动的丝阵等离子体的动量、动能变化,而且,为了方便,不考虑丝阵质量分布,故称之为“零维(0D)”. 对 Z 箍缩双层丝阵内爆我们建立了一个零维“电感型”理论模型,即将脉冲功率发生器描述为一个与时间有关的电压源 $V(t)$,它驱动一个具有等效电阻 Z_0 与等效电感 L_0 的传输线和一个电感为 $L(t)$ 的与时间有关的动力学内爆 Z 箍缩负载——双层丝阵,其等效电路如图 2 所示,等效电路方程为

$$(L_0 + L(t)) \frac{dI}{dt} + Z_0 I + I \frac{dL(t)}{dt} = V(t), \quad (1)$$

式中, $L(t)$ 是双层丝阵负载的总电感,

$$L(t) = L_1(t) + L_2(t) + M, \quad (2)$$

其中 $L_1(t)$ 和 $L_2(t)$ 分别为内外层丝阵的自感^[9], 有

$$L_1(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} h_1 \ln\left(\frac{R_r}{r_1(t)}\right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{N_1} h_1 \ln\left(\frac{r_1(t)}{N_1 r_{1c}}\right), \quad (3)$$

$$L_2(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} h_2 \ln\left(\frac{R_r}{r_2(t)}\right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{N_2} h_2 \ln\left(\frac{r_2(t)}{N_2 r_{2c}}\right). \quad (4)$$

显然,丝阵的自感 $L_{1,2}$ (下标 1 和 2 分别表示内层和外层)变化依赖丝阵等离子体内爆轨迹 $r_{1,2}(t)$ 的变化,并与回流柱/罩半径 R_r , 丝阵的高度 $h_{1,2}$, 丝根数 $N_{1,2}$ 以及初始等离子体晕的厚度 $r_{1c,2c}$ 有关. 丝材料不同,由丝的膨胀率和丝阵的丝根数以及驱动电流的大小所决定的等离子体晕厚度就不同. 该双层丝

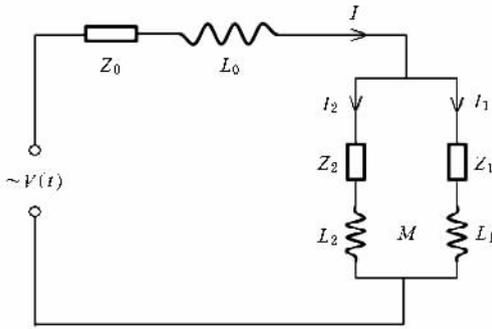


图2 双层丝阵 Z 箍缩等效电路示意图

阵和丝表面的电晕层所构成的物理图像是这样的：两个同轴的丝阵，内层丝阵由 N_1 根丝组成，每根丝距中心轴的距离为 r_1 ；外层丝阵有 N_2 根丝组成，每根丝距中心轴的距离为 r_2 ；每根丝的表面都有一定厚度的电晕层，该电晕层厚度 r_{1c} (r_{2c}) 与丝的材料性质和通过丝的电流大小有关，它可以通过实验参数简单计算得到。流过内、外丝阵的所有电子流，经阳极板和距中心轴距离为 R_r 的若干根回流柱（或回流罩）形成回路。 M 是两层丝阵之间的互感，反映内层（或外层）丝阵回路中电流随时间变化，在外层（或内层）回路中产生的感应电动势，它依赖两层丝阵的几何尺寸和相对内爆轨迹的位置，即

$$M(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \min(h_1, h_2) \ln \left(\frac{R_r}{\max(r_1(t), r_2(t))} \right). \quad (5)$$

双层丝阵的总电流 $I = I_1 + I_2$ ，根据两层丝阵上端电压相等，得到内外层丝阵电流分流关系式

$$\frac{I_1}{I} = \frac{L_2 - M}{L_1 + L_2 - 2M}. \quad (6)$$

(3)–(5) 式中磁压驱动内外层丝阵的内爆轨迹 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 分别由如下动力学模型描述：

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = - \frac{N_1 - 1}{N_1} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1^2(t)}{r_1(t)}, \quad (7a)$$

$$\frac{dr_1}{dt} = v_1, \quad (7b)$$

$$m_2 \frac{dv_2}{dt} = - \frac{N_2 - 1}{N_2} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2^2(t)}{r_2(t)}, \quad (8a)$$

$$\frac{dr_2}{dt} = v_2, \quad (8b)$$

其中 m_1 和 m_2 分别是内外层丝阵的线质量。联立方程 (1) (7) 和 (8) 式，给定初始条件： $r_1(0) = r_{10}$ ， $r_2(0) = r_{20}$ ， $v_1(0) = v_2(0) = 0$ ， $I_1(0) = I_2(0) = 0$ ，

在已知驱动器输出端电压波形 $V(t)$ ，等效电阻 Z_0 和等效电感 L_0 以及双层丝阵负载参数条件下，可以得到内外层丝阵的内爆轨迹、速度、动能和内爆时间（这里定义为收缩比 $r_{10,20}/r_{1,2}(t)$ 达到一定值的时刻），同时可以得到负载的总电流以及分别通过内外层的电流。

3. 双层丝阵内爆动力学模式分析

我们利用上述“电感型”理论模型，编制了 ZPI-OD 程序，对双层丝阵内爆进行了动力学模拟。通过改变双层丝阵的高度、初始半径、丝阵的丝根数、丝直径、丝阵线质量以及回流柱/罩半径等可以得到四种动力学模式。图 3 是改变其中一个参数模拟一组双层丝阵内爆动力学过程的结果。取内层质量和半径均为外层的 1/2，外层丝阵高度固定为 15 mm，仅仅改变了内层丝阵的高度。我们发现随着内层丝阵高度从 10 mm 变化到 20 mm，由于初始电感不同，初始的电流分配也不同，所以导致内外层内爆轨迹差异较大，出现不同的动力学模式。在图 3 中的模式 1 是内外层各自运动同时到芯；模式 2 是外层碰到内层后一起运动到芯；模式 3 是低电感模式，初始内层电流分流比较大，导致内层运动较快先到芯；模式 4 是高电感模式，与模式 3 的情况相反，由于内层电感大电流小，外层电流大，当其运动到内层时，内层几乎还没有开始运动，于是外层可以穿透内层先运动到芯。图 3 仅仅是一个内层丝阵电感变化导致双层丝阵内爆动力学模式变化的例子。通过上一节的讨论，可以清楚看到，内外层电感的变化不仅依赖丝阵的高度，还与丝阵的半径、丝根数，以及丝阵等离子体的运动轨迹有关。因此，调整这些参数，也可以得到上述四种内爆动力学模式。

分析 (6) 式，我们看到当 $L_1 \gg L_2$ 时， $I_1 \approx 0$ ，即如果内层电感远远大于外层电感，内层上的电流分流几乎为零，由运动方程可知，此时内层丝阵等离子体几乎不运动。MAGPIE 双层丝阵实验^[8]的高电感模式正是在内外层丝阵质量相同条件下，通过增加内层丝阵的高度，使得内层丝阵的电感明显大于外层，于是从实验上观察到在外层丝阵等离子体没有到达内层之前，内层几乎没有运动，这完全是由于内层电流份额太小，根本无法驱动与外层质量相同的等离子体。如果 $M \approx 0$ ， $L_1 = L_2$ ，则 $I_1 = I/2$ ，此时内层与外层丝阵一样会较早开始运动。另外，如果

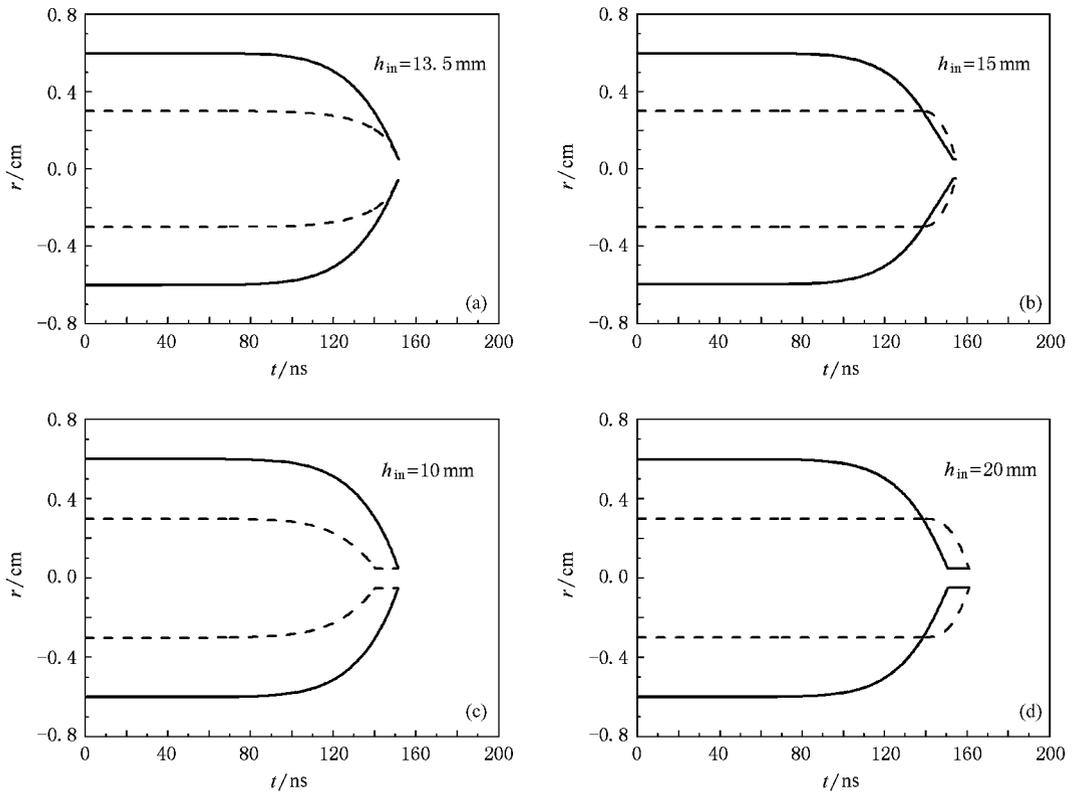


图 3 采用“电感型”模型计算得到的四种双层丝阵内爆动力学模式内爆轨迹 (a)模式 1,内外层同时到芯 (b)模式 2,外层碰到内层后一起运动到芯 (c)模式 3,内层先到芯 (d)模式 4,外层穿过内层先到芯

内层丝阵电感非常小, $L_1 \approx 0$ 时, $I_1 \approx I$, 内层先于外层运动, 甚至可能早于外层丝阵内爆, 这正是 Chittenden 等没有考虑到的一种情况。

由“电感型”模型双层丝阵的自感和互感表达式清楚表明, 两层丝阵的几何尺寸(高度 $h_{1,2}$ 和初始半径 $r_{1,20}$)、丝材料(与等离子体晕厚度 $r_{1e,2e}$ 有关)以及内爆动力学状态 $r_{1,2}(t)$ 等决定了电感 $L_{1,2}$ 和 M 的大小, 电感的变化影响了通过内外层丝阵的电流大小, 反过来电流的大小和随时间的变化又决定了丝阵等离子体的运动状态, 这种耦合关系使我们了解到哪些因素决定了丝阵上的电流分配, 而不同的电流分配将导致不同的双层丝阵内爆动力学模式。

我们模拟了 2007 年“强光一号”装置双层丝阵负载 Z 箍缩实验, 实验中内外层丝阵的丝根数均为 12。07014 炮的外层采用 $3 \mu\text{m}$ 钨丝、内层 $20 \mu\text{m}$ 铝丝, 07009 炮的内外层都用 $20 \mu\text{m}$ 的铝丝, 负载其他参数参见表 1。输入 07014 和 07009 炮实验测量得到的负载区电压波形如图 4 所示, ZPI-0D 程序得到的负载总电流与实验测量的负载电流也在图 4 中给出, 主要计算结果列入表 1, 图 5 和图 6 分别给出了

07014 炮和 07009 炮的内爆轨迹、内外层电流以及负载总电流模拟结果。

表 1 “强光一号”Z 箍缩实验双层丝阵的主要参数和 0D 模拟结果

炮号	07014 炮	07009 炮
外层丝阵质量/ $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-1}$	16.34	103.00
内层丝阵质量/ $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-1}$	103.00	103.00
内、外层丝阵高度/mm	20.0	20.0
回流套筒半径/mm	23.5	23.5
外层丝阵半径/mm	9.0	9.0
内层丝阵半径/mm	6.0	6.0
外层丝阵最大电流/MA	0.75	1.05
内层丝阵最大电流/MA	1.27	1.12
最大总电流/MA(实验值)	1.37(1.35)	1.55(1.53)
固有电感/nH	32	25
固有电阻/ Ω	0.0	0.0
电压幅值/MV	1.27	1.10
电压脉冲/ns	32	34
外层电流上升时间/ns	45.90	38.90
内层电流上升时间/ns	48.60	79.80
内爆时间/ns	149.07	173.40
内外层到芯时间差/ns	34.615	11.930
外层丝阵内爆速度/ $10^7 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	-2.4502	-1.4114
内层丝阵内爆速度/ $10^7 \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	-2.3496	-2.2360

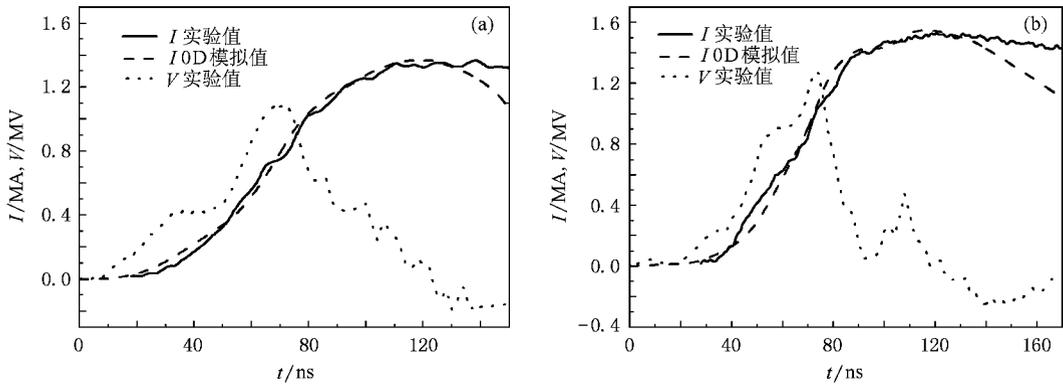


图 4 “强光一号”双层丝阵 Z 箍缩实验 07014 炮 (a) 和 07009 炮 (b) 测量的电压波形和负载电流, 以及 OD 模拟的电流波形

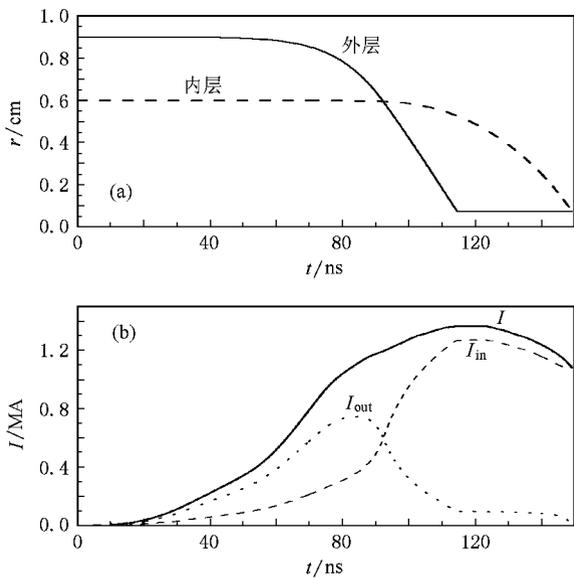


图 5 模拟“强光一号”实验 07014 炮的内外层丝阵的内爆轨迹 (a) 和内外层丝阵上的电流以及负载总电流 (b)

利用本文的理论模型和我们研制的零维程序计算表明, 在已知并输入负载区电压波形条件下, 选取适当的等效电感和等效电阻, 计算得到的负载电流与实验结果基本相符(见图 4)。然而, 计算的电流波形和实验测到的在电流达到峰值以后存在差异, 这是由于本文进行了冷等离子体假设, 采用零维近似, 在 Z 箍缩的压缩阶段, 能大致描述等离子体的运动, 但在内爆到芯(出现在电流峰值以后)及随后的膨胀飞散阶段, 这种壳层模型已不太适合描述等离子体的运动。另外, 在 Z 箍缩膨胀飞散阶段(见图 4 中约 130 ns 后), 实际电流通道变得非常复杂, 于是负载电流测量的准确性和可靠性变差(而恰恰膨胀飞散阶段的物理过程对人们关心的 Z 箍缩 X 光辐射脉

冲已不重要)。尽管如此, 在我们关心的双层丝阵内爆主要动力学过程, 计算模拟的负载电流和实验电流波形基本一致。此外, 我们的模拟计算还同时给出了内外层等离子体内爆轨迹(如图 5(a))和图 6(a))和内外层上的电流分配情况(如图 5(b))和图 6(b))。07014 炮外层丝阵用 12 根 $3 \mu\text{m}$ 钨丝, 而 07009 炮用 12 根 $20 \mu\text{m}$ 铝丝, 实验证明铝丝的膨胀速度比钨丝大约快 3 倍, 铝等离子体晕的厚度比钨大, 在相同条件下铝丝阵的自感比钨丝阵小。然而, 等离子体晕在初始自感中的贡献相对于(3)和(4)式右端第一项小, 又由于 07014 炮和 07009 炮的丝阵几何尺寸相同, 所以 07014 和 07009 炮外层丝阵材料不同仅引起初始电感比较小的差异。于是, 在 45 ns 以前, 07014 炮和 07009 炮的内外层电流比值基本一样。但在 50 ns 以后由于外层丝阵质量的不同, 计算 07014 和 07009 得到的内爆轨迹和电流分配的差异非常大。07014 炮外层丝阵质量轻($16 \mu\text{g}/\text{cm}$), 55.2 ns 时开始运动(定义收缩比为 1.01 时为“开始运动”), 随后 92.1 ns 时, 5.94 mm 处穿过内层, 内层是在 93.1 ns 时开始运动的, 而 07009 炮外层丝阵质量重($103 \mu\text{g}/\text{cm}$), 到 73.1 ns 才开始运动, 直到 125.5 ns 时, 5.63 mm 处与内层相遇, 内层早在 94.9 ns 时就开始运动。显然, 07014 炮相对 07009 炮由于外层丝阵质量小, 内爆速度大, 电感快速增加, 所以到后期内层丝阵分流较大。另外, 我们发现这两发实验的丝阵内层参数完全一样, 仅由于外层丝阵质量不同, 内爆轨迹和电感变化不同, 导致它们开始运动的时刻相差约 2 ns。总之, 双层丝阵 Z 箍缩过程中内外层丝阵的初始电感大小直接决定了初始电流分配, 而随着丝阵等离子体的运动, 内外层丝阵的电感以及它们之间的互感变化, 进一步影响电流的大小和

在两层之间的分配, 电流的变化使得所感应的磁场随之变化, 所以磁压驱动的丝阵等离子体运动轨迹就会有所不同. 由此分析, 我们如果能够调整丝阵参数, 并控制两层丝阵之间的相互作用, 使得内外层丝阵等离子体同时内爆到芯, 有可能获得比较好的箍缩状态.

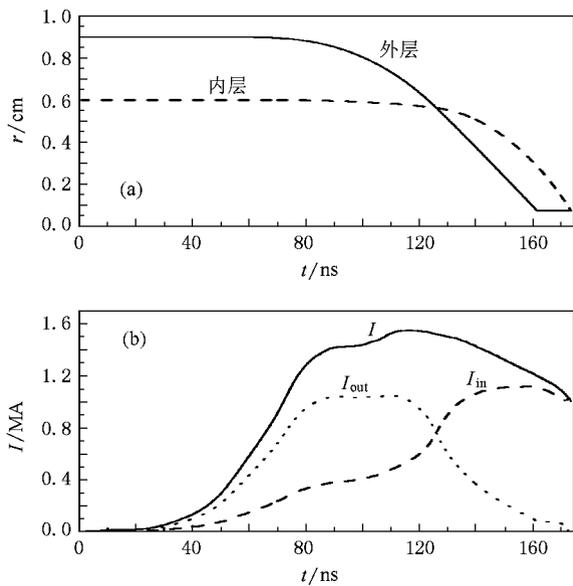


图 6 模拟“强光一号”实验 07009 炮的内外层丝阵的内爆轨迹 (a) 和内外层丝阵上的电流以及负载总电流 (b)

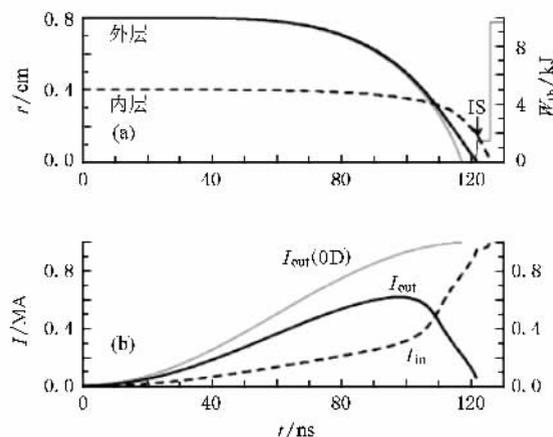


图 7 Esaulov 等^[10]用 WDM 模型计算得到的双层丝阵内爆轨迹 (a) 和负载电流 (b)

Esaulov 等^[10]曾用 WDM 模拟了 Zebra 装置 (1 MA) 的双层丝阵实验, 图 7 是他们的模拟结果

(文献 10 的图 2), 显然我们的结果与之基本一致. 我们的分析再次证明低电流装置、内层丝阵低丝数的双层丝阵内爆动力学模式一般呈现“穿透内层”模式的动力学过程.

4. 结 论

采用等效电路和零维分析方法, 建立了模拟双层丝阵 Z 箍缩内爆动力学过程的物理模型. 研究了内、外层丝阵电感分布及其变化对双层丝阵内爆动力学模式的决定性影响, 结果表明丝阵的初始电感决定了初始电流分配, 直接影响丝阵内爆的动力学模式. 由于电感的变化可能存在四种不同的动力学模式: ①内层、外层各自运动但同时到芯, ②外层碰到内层后一起运动到芯, ③内层丝阵与外层各自运动, 内层先到芯, ④外层快速运动穿过内层先到芯. 在这四种动力学模式中第一种是我们所希望的优化模式, 零维分析表明通过调整双层丝阵的参数改变其电感有可能达到优化负载的目的. Z 箍缩的物理机制核心是丝阵等离子体动能转换为内能和 X 射线辐射, 而脉冲功率驱动器提供的电磁能量转换为丝阵等离子体的动能时, 负载电感变化直接决定了内爆等离子体的力学状态. 所以, 内外层丝阵上的电感大小以及变化对双层丝阵内爆停滞产生 X 光辐射产额是至关重要的, 初始电感和电流分配依赖于丝阵的高度、半径, 以及丝的根数和丝阵线质量等. 我们根据“强光一号”装置 Z 箍缩实验双层丝阵负载参数计算, 得到了外层穿透内层先运动到芯的第四种动力学模式. 由于低电流装置驱动能力有限, 内外层丝阵的丝根数增加非常有限, 所以与大电流装置不同, 在低电流装置上, 如果没有特殊处理, 双层丝阵内爆一般呈现“穿透内层”的动力学模式. MAGPIE Zebra 和 Angara-5-1 装置上的双层丝阵内爆实验都已观察到了这种模式. 本文采用的物理分析方法有助于理解和认识双层丝阵内爆动力学过程, 零维模型可以作为优化双层丝阵负载参数的有用工具, 分析结果能为实验诊断提供参考.

感谢西北核技术研究所提供的“强光一号”装置 Z 箍缩实验的电参数. 感谢中国工程物理研究院核物理与化学研究所、激光聚变中心实验人员的合作.



- [1] Deeney C , Douglas M R , Speilman R B , Nash T J , Peterson D L , L'Epplattenier P , Chandler G A , Seaman J F , Struve K W 1998 *Phys. Rev. Lett.* **8** 4883
- [2] Davis J , Gondarenko N A , Velikovich A L 1997 *Appl. Phys. Lett.* **70** 170
- [3] Douglas M , Deeney C 1997 *Bull. Am. Phy. Soc.* **42** 1878
- [4] Terry R E , Davis J , Deeney C , Velikovich A L 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4305
- [5] Cuneo M E , Sinars D B , Bliss D E , Waisman E M , Porter J L , Stygar W A , Lebedev S V , Chittenden J P , Sarkisov G S , Afeyan B B 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 225003
- [6] Cuneo M E , Vesey R A , Sinars D B , Chittenden J P , Waisman E M , Lemke R W , Lebedev S V , Bliss D E , Stygar W A , Porter J L , Schroen D G , Mazarakis M G , Chandler G A , Mehlhorn T A 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 185001
- [7] Deeney C , Apruzese J P , Coverdale C A , Whitney K G , Thornhill J W , Davis J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 155001
- [8] Lebedev S V , Aliaga-Rossel R , Bland S N , Chittenden J P , Dangor A E , Haines M G , Zakaullah M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1708
- [9] Grabovskii E V , Zukakishvili G G , Mitrofanov K N , Oleinik G M , Frolov I N , Sasorov P V 2006 *Plasma Phys. Rep.* **32** 32
- [10] Esaulov A A , Velikovich A L , Kantsyrev V L , Mehlhorn T A , Cuneo M E 2006 *Phys. Plasmas* **13** 120701
- [11] Chittenden J P , Lebedev S V , Bland S N 2001 *Phys. Plasmas* **8** 675
- [12] Velikovich A L , Sokolov I V , Esaulov A A 2002 *Phys. Plasmas* **9** 1366
- [13] Yang Z H , Liu Q , Ding N , Ning C 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1533 (in Chinese)[杨震华、刘全、丁宁、宁成 2005 强激光与粒子束 **17** 1533]
- [14] Wang G H , Hu X J , Sun C W 2004 *Chin. J. High Press Phys.* **18** 364 (in Chinese)[王刚华、胡熙静、孙承纬 2004 高压物理学报 **18** 364]
- [15] Ning C , Ding N , Liu Q , Yang Z H 2006 *Acta Phys. Sci.* **55** 3488 (in Chinese)[宁成、丁宁、刘全、杨震华 2006 物理学报 **55** 3488]

Effects of various inductances on the dynamic models of the Z-pinch implosion of nested wire arrays^{*}

Ding Ning[†] Zhang Yang Liu Quan Xiao De-Long Shu Xiao-Jian Ning Cheng

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

(Received 3 April 2008 ; revised manuscript received 23 June 2008)

Abstract

Z-pinch experiments have demonstrated that the soft X-ray power increases 40% with a nested-wire array compared with that with a single-layered wire array. However, the development of the technique of obtaining higher X-ray power using nested wire array configurations has been largely empirical. This has, in part, been due to the absence of adequate theoretical models to describe the mechanism of interaction of the two arrays. As is well known, 2D MHD modeling of nested wire array implosions is difficult, and is very inconvenient to optimize the design of nested-wire arrays. In this paper, the Z-pinch implosion dynamics of nested wire array has been described by its equivalent electric circuit and by solving the corresponding circuit equation. The currents flowing through the outer and inner arrays in the initial stage of implosion depend on the array dimensions, especially on the array inductances. The analysis indicates that the arrays inductance variation can result in four dynamic models of the Z-pinch implosion of nested wire arrays, which is the same as that predicted by previous works. Fast and inexpensive 0D modeling can predict the implosion time and the rate of thermalization of the kinetic energy of the nested-wire array at Qingguang-1 facility, and estimate the implosion model that the inner array wires remain discrete until the outer array material has passed through their gaps. The full current is then transferred rapidly to what was initially the inner, imploding it rapidly onto the outer array material on the axis. Some suggestions are put forward which may be helpful in the nested-wire array design for Z-pinch experiments.

Keywords : Z-pinch implosion plasma, nested-wire-array load, inductance, dynamic model

PACC : 5230, 5225P, 5255E

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10575014, 10635050, 10775021) and the National Defense Basic Scientific Research Project, China (Grant No. A1520070074).

[†] E-mail : ding_ning@iapcm.ac.cn