

文章编号: 1001-4322(2003)01-0061-03

快 Z 箍缩物理过程的 PSPICE 电路模拟方法分析*

谢卫平^{1,2}, 王文斗¹, 邓建军¹, 应纯同², 丁伯南¹

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘 要: 简单介绍了快 Z 箍缩概念和物理过程, 以及 Z 箍缩物理过程不稳定性因素和简单分析。用 PSPICE 电路模拟方法解薄壳模型得到了箍缩时间、等离子体壳的速度、负载上的电流、电压变化规律等 Z 箍缩物理量。

关键词: Z 箍缩; 薄壳模型; 电路模拟; 磁流体力学不稳定性

中图分类号: O53 **文献标识码:** A

大电流沿轴向通过等离子体, 产生强的环向磁场, 在洛伦兹力的作用下, 等离子体被加速向轴心箍缩, 成为高温高密度等离子体, 这个过程被称为内爆 Z 箍缩。内爆 Z 箍缩是一种强的软 X 射线源, 它在武器物理、武器效应模拟和惯性聚变等领域有重要的应用前景。

Z 箍缩同激光驱动的 ICF 研究在五十年代几乎是同步启动的, 由于 Z 箍缩产生的 X 光能量只有数十到数百 J, 功率约 20 TW, 技术上的进展一直比较缓慢。主要原因是内爆过程中的 R-T 不稳定, 严重地影响了 X 光能量的转化效率。1995 年首先从数值模拟上, 接着在工艺上, 特别是在负载结构上取得了突破, 即采用直径为几 μm 的钨丝轴向排列构成圆柱形丝阵。土星装置^[3]上的实验结果表明该结构能有效地抑制不稳定性, X 射线功率从 20 TW 猛增到 85 TW, 总能量上升到 400 ~ 500 kJ, Z 箍缩研究取得了突破性进展, 圣地亚国家实验室于 1995 年将 PBFA-II 加速器, 改建成从事轻负载快过程 Z 箍缩实验研究的 Z 装置 (储能 11.6 MJ, 加载电流 20 MA, 脉冲上升时间 100 ns, Marx 最大电压 6 MV), 并进一步优化黑腔中钨丝套筒的结构, 使 Z 箍缩研究取得了一系列举世瞩目的重大进展: X 射线输出能量达到 2 MJ, 转换效率为 15%; X 射线输出功率达到 290 TW; 黑腔辐射温度达到 155 eV。为此, 人们对 Z 箍缩焕发了兴趣, 对其更加重视, 并给予极高的希望。

1 快 Z 箍缩概念

快 Z 箍缩是相对 Bennett 平衡而言的。对于小直径 Z 箍缩实验, 如聚变应用的冻气丝 Z 箍缩实验, 它的典型直径是 1 ~ 100 μm , 密度 $10^{21} \sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$, 建立径向平衡时间只需几 ns, 相对于电流上升时间 100 ns 而言, 这个时间很短, 足以达到 Bennett 平衡, 即等离子体压力同磁压近似平衡, 等离子体对于 $m = 0, 1$ 的磁流体力学不稳定性扰动在脉冲电流上升过程中的大部分时间内是稳定的。但是对于环型喷气^[5]、丝阵等 Z 箍缩, 初始直径几 cm, 驱动脉冲电流上升时间同等离子体壳加速到轴心的时间 (内爆时间) 长度相当, 在轴上停滞时间很短, 在没有达到 Bennett 平衡之前等离子体壳就开始返弹^[4], 快 Z 箍缩就是指的此类 Z 箍缩。

表 1 快 Z 箍缩的一些几何和物理特征参数

Table 1 Characteristic geometry and physical parameters of a fast Z pinch

height of a pinch load L/cm	2
initial radius of a pinch load r_0/cm	2
convergence $C = r_0/r_{\text{min}}$	10
mass per unit length of pinch load $m/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-1})$	1 ~ 2
maximum pinch current I_{max}/MA	20
maximum voltage V_{max}/MV	2
maximum magnetic field on the pinch surface B_{max}/T	10^3
implosion time t_{imp}/ns	100

2 Z 箍缩物理过程及产生不稳定性的因素和简单分析

Z 箍缩物理过程大致分为三个阶段^[2]: 等离子体向心压缩阶段、平衡停滞阶段和崩溃阶段。自箍缩过程主

* 收稿日期: 2001-11-28; 修订日期: 2002-09-03

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 谢卫平 (1964-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事脉冲功率技术及其应用研究; 绵阳 919-108 信箱。

要由以下初始参数决定:等离子体长度、初始半径、等离子体初始质量、电流的幅度和上升时间。等离子体加速到轴心附近停滞,相互碰撞,转变为热能,包括等离子体的欧姆加热和压缩加热,最后转变为辐射能。停滞所产生的辐射同等离子体的原子电离态、 Z 数、密度和温度有关。如果等离子体壳均匀压缩,在轴线上等离子体的密度、温度就越高,这个状态是实现高 X 射线功率所必需的。

但由于等离子体和真空界面上磁流体 R-T 不稳定性的存在,将极大地降低停滞时等离子体的密度和温度。为了优化 X 射线的辐射功率和能量,必须抑制不稳定性。抑制不稳定性的办法首先(也是非常重要的)是减小负载自身初始的轴向、径向不均匀性,然而这种均匀性是同驱动电流大小、上升时间长度、最佳内爆时间相匹配的低质量负载紧密联系的。抑制不稳定性的办法还有:外加磁场 B_z ;负载上外加旋转,也就是在鞘层上外加一个角向动量;速度剪切,应用双丝套筒的办法;制作成凸形负载消除电极引起的不稳定性;有意地破坏初始时丝阵方位上的不对称性。当然这些办法有的是很难实现的,有的可能反而是得不偿失的。

下面简单地分析电极效应对破坏圆柱对称性的影响。由于 Z 箍缩负载等离子体的长度有限,它同电极的接触,会产生轴向非均匀性,破坏圆柱对称性。影响的因素有:(1)等离子体套筒同电极表面磨擦,尤其对于高温、低密度等离子体,会产生 Kelvin-Helmholtz 不稳定性 and 剪流湍流 (shear-flow turbulence);(2)等离子体套筒同“冷”的大电极之间的热通量交换,在电极附近引起等离子体温度的轴向变化;(3)电极接触面的物质混入等离子体套筒,使电极附近的等离子体壳的质量比中间高,导致内爆滞后;(4)导电电极上产生一个法向磁场分量 $B_r = B_{z0} r / \dots$,在电极趋肤深度内,具有极高的电流密度,将产生热爆,影响等离子体内爆质量。

3 轴对称 Z 箍缩内爆运动物理过程的零维描述

Z 箍缩内爆的整体动力学性质,如内爆动能、时间等,可以用薄壳模型近似合理估算。薄壳模型是假设内爆 Z 箍缩等离子体是一个无限薄的圆形壳,在流经此壳的轴向电流产生的磁压的作用下,所有的物理量只是径向位置和时间的函数,单位长度的质量保持不变,其运动与 $J \times B$ 作用下的加速相符合。在薄壳模型计算中必须有一个截止时间,一般取为半径压缩到初始半径 r_i 的 $1/10$ 时计算结束。下面具体以土星装置的结构和参数为例列出同电路结合模型方程组

$$m dv/dt = 2 \pi r l (B^2/2\mu_0), \quad v = dr/dt, \quad B = \mu_0 I/2 R \tag{1}$$

$$v(t) = \int_{t_i}^t \frac{1}{m} \frac{\mu_0 I^2}{4 r(t)} dt, \quad r(t) = r(0) - \int_{t_i}^t v(t) dt, \quad L_4(t) = \frac{\mu_0 l}{2} \ln[r_i/r(t)] \tag{2}$$

$$V(t) = ZI + (L_1 + L_2 + L_3) dI/dt + d(L_4 I)/dt \tag{3}$$

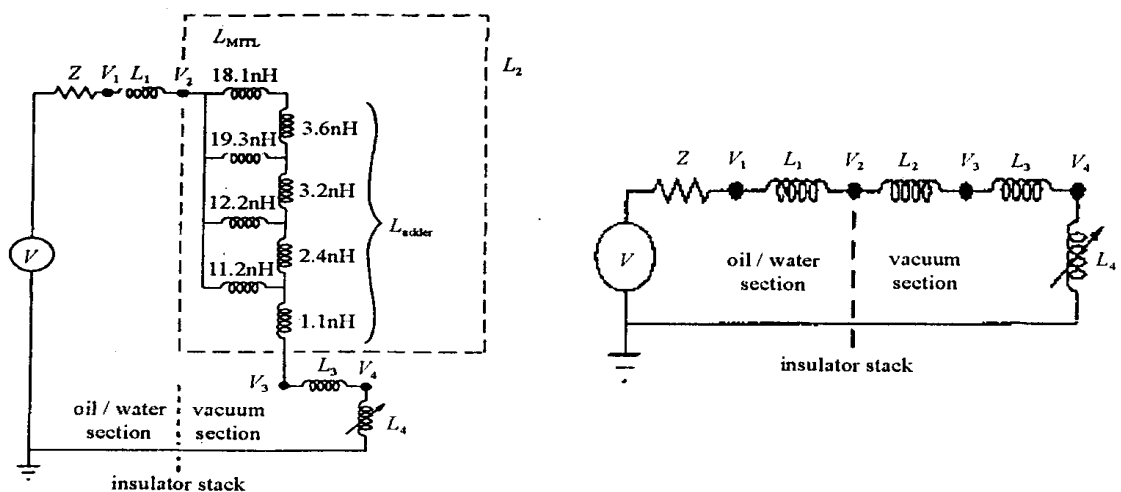


Fig. 1 Equivalent circuit of Saturn (the right figure is the simplification of the left)

图 1 土星装置等效电路原理图(右图为左图的进一步简化电路原理图)

土星装置的等效电路图^[1]见图 1,图中 V 是电压源。上述方程中 m 为负载质量, I 为通过薄壳等离子体的总电流, l 为等离子体的长度, Z 为驱动源的有效阻抗, L_1 为驱动源的有效电感, L_2 为磁绝缘传输线电感, L_3 为磁绝缘传输线中的双柱孔旋转转接面同负载连接段的电感,具体参数见表 2。由方程(1),(2)和(3),对于给定负载参数和脉冲功率源电压波形,可以确定箍缩时间、箍缩速度、内爆动能、负载上的电流、电压等内爆

物理量的变化规律。应用 PSPICE 电路模拟方法中的电路积分和微分方法, 计算上述方程组。在图 1 中电压源参数利用在土星装置上实验时水线上实验测量的电压波形输入, 计算结果见图 2(a)。图 2(b) 中给出了 Sandia 实验室的 ZORK 程序在相同的参数条件下的计算结果。从图 2 可见, 用 PSPICE 电路模拟方法得到的结果基本上同 Sandia 实验室用 ZORK 程序得到的结果符合, 由此可见用 PSPICE 电路模拟方法解(1)~(3)方程组得到的结果是正确的。应用此方法可以同时给出箍缩时间、箍缩速度、内爆动能、负载上的电流、电压等内爆物理量的变化规律。

表 2 计算中所取的参数

Table 2 Parameters in the calculation

m/mg	l/cm	r_i/cm	Z/l	L_1/nH	L_2/nH	L_3/nH
4.7	2	0.2	0.167	0.75	6.0	2

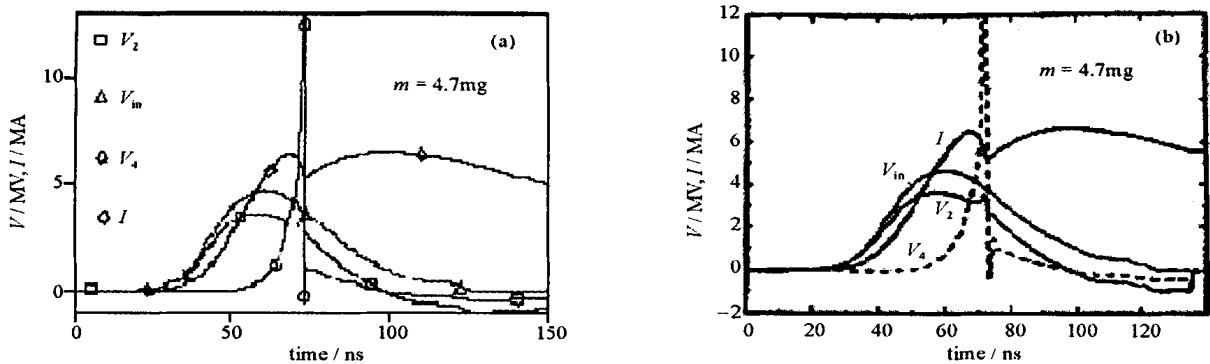


Fig. 2 Calculated voltage and current waveform of the model

图 2 薄壳模型计算得到的电压和电流波形, (a) 用 PSPICE 电路模拟方法计算结果, (b) Sandia 实验室用 ZORK 程序计算结果

4 结 论

以上对快 Z 箍缩物理过程做了简单分析。PSPICE 电路模拟方法是驱动源设计的一种常用方法, 而且应用 PSPICE 电路模拟方法可以容易得到同驱动源参数相关的 Z 箍缩零级近似物理参数, 所以应用 PSPICE 电路模拟方法在设计驱动源时, 可同时预估在该驱动源上 Z 箍缩物理实验结果, 如箍缩时间、箍缩速度、内爆动能、负载上的电流、电压等内爆物理量的变化规律。

参考文献:

- [1] Chaote L M. The Saturn X-ray simulation facility[R]. Sandia National Laboratories Report, SAND89-1315, 1989.
- [2] Hammer J H, Springer P. Modeling of high power Z pinch[R]. UCRL-LR-105821-97-2.
- [3] Deeney C, Nash T J. Power enhancement by increasing the initial array radius and wire number of tungsten Z pinches[J]. *Phys Rev E*, 1997, **56** (5):5945.
- [4] Liberman M A, De Groot J S, Toor A, et al. Physics of high density Z-pinch plasmas[M]. New York: Springer-Verlag, 1999.
- [5] 周晓兵, 王新新, 罗承沐, 等. 喷气 Z 箍缩负载的质量线密度确定[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(3):473—475. (Zou X B, Wang X X, Luo C M, et al. Determination of line density for the gas load of a gas puff Z-pinch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3):473—475)

Analysis of fast Z-pinch physics with PSPICE circuit analyses

XIE Weiping^{1,2}, WANG Weir-dou¹, DENG Jiar-jun¹, YING Chur-tong², DING Bo-nan¹

(1. Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The fast Z-pinch phenomenon and the physics of fast Z-pinch are introduced in this paper. And the factors which influence the instability of fast Z-pinch are simply analysed. The PSPICE circuit analyses are very useful for the design of the pulsed power. In the paper, the PSPICE circuit analyses is used for solving the thin annular shell of imploding wire array, and simultaneously with the pulsed power system. From the circuit analyses, some Z-pinch physics parameters (pinch time, velocity, radius, et al) are given simultaneously with the pulsed power (current and voltage).

Key words: Z-pinch; Thin shell model; Circuit analyses; Instability