

双层钨丝阵的 Z 箍缩动力学过程研究*

宁 成 丁 宁 刘 全 杨 震 华

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2005 年 10 月 8 日收到, 2005 年 11 月 16 日收到修改稿)

基于 Z 箍缩零维模型、丝阵碰撞假设和箍缩动能最大化的优化原则, 对美国 Sandia 实验室 Z 装置的典型双层钨丝阵负载进行了优化分析, 结果表明它基本上是优化的. 在丝阵碰撞假设下, 利用一维三温辐射磁流体学程序对其箍缩过程进行了数值模拟. 模拟结果再现了 Z 箍缩过程的一维时空演化过程, 得到了内外层丝阵的运动轨迹和驱动电流在它们之间的转移规律, 并将计算得到的宏观结果与实验结果进行了比较, 表明丝阵相互作用的碰撞假设有合理性.

关键词: Z 箍缩, 双层钨丝阵, 零维模型, 一维辐射磁流体

PACC: 5225P, 5230, 5265

1. 引 言

提高 Z 箍缩辐射功率的主要障碍是在箍缩过程中产生的 RT (Rayleigh-Taylor) 不稳定性和不对称性. 目前, 克服这一障碍的实用技术就是在层内引进一个附加的质量层 (如内层喷气、内层丝阵)^[1-3]. 在实验上该技术就喷气^[4]和丝阵^[5]负载均进行了试验, 并取得了预期的效果, 特别是在双层钨丝阵负载实验上获得了 X 射线辐射功率增加 40% 的里程碑性结果. 引进附加的内层质量, 改变了该区域的质量分布, 产生了向内的质量梯度. 从纯流体力学上, 这样的质量分布能抑制 RT 不稳定性的进一步发展^[2,3,6]. 但关于两层丝阵在箍缩过程中是如何相互作用以及其电流是如何分配和转移等问题, 虽然进行了许多研究, 但至今仍然不十分清楚. 目前, 关于双层丝阵的相互作用存在两种不同的观点: 1) 壳层碰撞模型, 它认为内外层丝阵在箍缩的初始阶段均已形成等离子体壳, 随着箍缩的进行, 外壳层与内壳层发生非弹性碰撞^[7,8]; 2) 穿透模型 (亦称电流转换模型), 它认为内层丝阵在箍缩的初始阶段没有形成等离子体壳, 而是以丝阵的形式存在, 外层丝阵等离子体 (壳层或单丝等离子体) 随着箍缩的进行而逐渐穿过内层丝阵, 当穿透结束后外层丝阵的电流转移到内层丝阵上, 接着内层丝阵同单层丝阵箍缩行为

一样进行箍缩^[9-11]. 实际上两丝阵细致的相互作用过程是复杂的, 它与负载和电极的结构、负载材料、驱动电流水平等因素有关, 不宜一概而论, 需要就不同情况和不同箍缩阶段进行区别对待. 由于即使内层丝阵的电流很小, 甚至没有电流, 但在外层丝阵等离子体穿透内层丝阵的过程中也会对它产生溅射和消融作用, 从而可能在外层丝阵仅部分通过时, 内层丝阵能形成“芯-晕”结构的近壳层结构, 因此, 我们认为在 Z 箍缩的初始阶段有等离子体的穿透, 而在主要的箍缩物理过程中以碰撞为主.

但本文为了考察壳层碰撞模型的有效性, 从壳层纯碰撞模型出发, 对美国 Sandia 实验室 Z 装置的典型双层钨丝阵实验^[5]的负载进行优化分析, 并对其 Z 箍缩过程进行一维辐射磁流体学数值模拟, 以揭示在碰撞模型假设下的双层负载设计及其 Z 箍缩过程的主要规律和总体特征.

2. 负载的优化分析

基于零维模型和内爆动能最大化的优化原则, 文献 [12] 对单层丝阵 (喷气) 负载进行了优化计算. 这里认为双层丝阵相互作用为非弹性碰撞, 用相同的方法对 Z 装置上的典型双层丝阵负载 (内外丝阵半径: 1cm/2 cm; 内外层丝数: 120/240; 内外层丝阵线质量 (1027 $\mu\text{g}/\text{cm}$) (1846 $\mu\text{g}/\text{cm}$)). 它产生了脉宽为

* 国家自然科学基金 (批准号: 10375010 和 10575014) 资助的课题.

4_{sn}、峰值功率为 280TW、总能量为 1.75MJ 的 X 射线脉冲^[5]的优化情况进行分析. 负载电流波形见文献[5]的图 2(亦可见本文图 7). 计算中收缩比均取为 20, 外层丝阵碰到内层丝阵后, 与内层丝阵一起向内运动, 此时的共同速度由动量守恒确定.

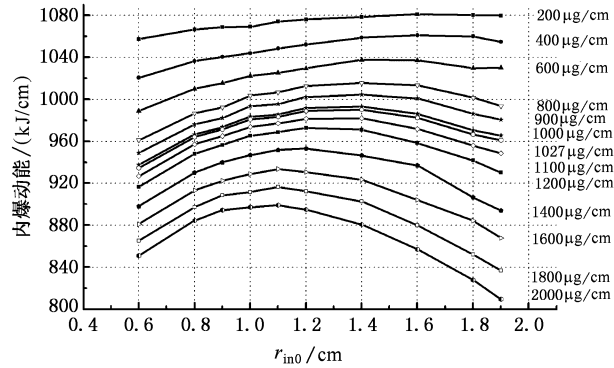


图 1 内爆动能随内层丝阵线质量和半径的变化

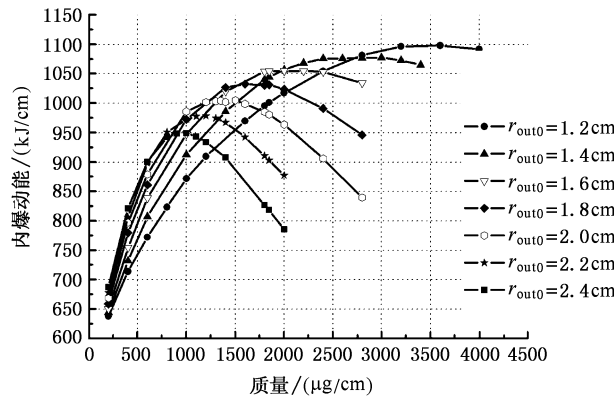


图 2 内爆动能随外层丝阵半径和线质量的变化

首先, 固定外层丝阵的半径(2cm)和线质量(1846 $\mu\text{g}/\text{cm}$). 对于某一定的内层线质量, 然后改变其半径, 而得到内爆动能随半径的变化. 结果如图 1 所示. 从图 1 中可见, 对于任一固定的内层丝阵半径, 最后的内爆动能随内层丝阵线质量的减小而增大, 这表明引进内层丝阵要降低内爆动能或内爆速度. 这是引进内层丝阵能抑制不稳定性、提高 X 射线功率所付出的代价. 对于一定的内层丝阵线质量, 有一个最优的内层丝阵半径. 内层线质量 $m_{in} = 1027\mu\text{g}/\text{cm}$, 当内层丝阵初始半径 $r_{in0} = 1.4\text{cm}$ 时, 内爆动能达到最大值 980kJ/cm, 但当 r_{in0} 在 1.0cm—1.6cm 变化时, 内爆动能的降低均不超过 1%. 因此, 在负载设计时这些半径都是可以选用的, 但 $r_{in0} = 1.0\text{cm}$ 设计出的负载具有很好的对称性, 而且钨丝

(丝直径 7.5 μm)间隙合适(~ 0.5mm).

其次, 固定内层丝阵的半径(1cm)和线质量(1027 $\mu\text{g}/\text{cm}$). 对于某一定的外层丝阵半径, 然后改变其线质量, 从而得到内爆动能随线质量的变化情况. 结果如图 2 所示. 从图 2 中可见, 对于一定的外层丝阵半径, 有一个最优的外层丝阵线质量, 并且该最优线质量随半径的增大而变小, 在最大动能附近内爆动能随线质量变化亦随半径的增大而愈剧烈. 当外层丝阵半径 $r_{out0} = 2.0\text{cm}$ 时, 内爆动能最大值所对应的线质量为 1500 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 此时内爆动能达到了 1005kJ/cm; 当外层丝阵线质量 m_{out} 分别取为 1200 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 1800 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 2000 $\mu\text{g}/\text{cm}$ 时, 内爆动能分别变为 1000kJ/cm, 982kJ/cm, 966kJ/cm, 与最大值相比, 降低不超过 4%. 在负载设计时该范围的线质量都是可以考虑的. 但因非弹性碰撞所损失的动能随 m_{out} 的增大而减少, 因此 m_{out} 宜适当往大取. 当外层丝阵线质量 $m_{out} = 1846\mu\text{g}/\text{cm}$ 时, 其初始半径为 1.6cm 时内爆动能达到最大 1050kJ/cm, 而当其初始半径分别为 1.2cm, 1.4cm, 1.8cm, 2.0cm 时, 内爆动能分别为 1100kJ/cm, 1045kJ/cm, 1030kJ/cm, 980kJ/cm. 内爆动能随外层丝阵半径的变化小于 7%, 变化仍然不是很大. 但 $r_{out0} = 2.0\text{cm}$ 设计出的负载具有很好的对称性, 而且钨丝(直径 7.5 μm)间隙合适(~ 0.5mm). 此外, 当外丝阵的初始半径分别取为 2.2cm, 2.4cm 时, 它们所对应的内爆动能分别下降到了 900kJ/cm 和 820kJ/cm, 表明初始半径偏大了.

3. 箍缩过程的一维辐射磁流体力学模拟

双层丝阵相互作用的碰撞模型认为, 在电流预脉冲阶段它们都已形成了等离子体壳层. 在 $t = 0$ 时 Z 箍缩负载区域及其初始密度分布如图 3 所示. 区域 I 表示内层丝阵内界面所包围的空间, 它的初始密度由内层和外层丝阵的先驱等离子体所组成; 区域 II 表示内层丝阵所形成的等离子体壳层(厚 1mm); 区域 III 表示由内层丝阵的外界面和外层丝阵的内界面所包围的空间, 它的初始密度由外层丝阵的先驱等离子体组成; 区域 IV 表示外层丝阵所形成的等离子体壳层(厚 1mm). 利用我们的一维辐射磁流体力学程序^[13], 对该初始密度分布的负载在文献[5]的图 2 中驱动电流的作用下的 Z 箍缩过程进行了数值模拟. 在计算中, 假定内外层丝阵分别有 4.5% 和 7% 质量的材料已形成了先驱等离子体. 图

4 5 和 6 反映了双层丝阵的 Z 箍缩动力学过程. 图 4 是内外层丝阵的内外界面在箍缩过程中的运动轨迹和收缩比 ($r_{out0}/r_{out}(t)$) 随时间的变化, 图 5 是双层丝阵各界面的运动速度随箍缩过程的变化情况; 图 6 是内外层丝阵和负载总动能随箍缩过程的变化情况. 各图中的数字(表示拉氏网格点序号)143, 60, 55, 5 分别表示外层丝阵的外、内界面和内层丝阵的外、内界面, E_k , E_{kII} 和 E_{kIV} 分别表示负载总动能和内、外丝阵的动能. 外层丝阵的外界面从 $t = 40\text{ns}$ 后开始明显地向内箍缩, 但它的内界面要到 $t = 55\text{ns}$ 后才明显地向内箍缩, 并且在此后的 40ns 内以比外界面更快的速度向内运动; $t = 100\text{ns}$ 后, 内层丝阵开始迅速地向内运动, 而此前它基本上处于原地不动; $t = 105\text{ns}$ 后外丝阵的内界面开始减速, 同时内层丝阵的箍缩速度迅速增大, 表明内外层丝阵的非弹性碰撞开始, 但外层丝阵的动能还没有下降, 而到 $t = 115\text{ns}$ 后, 外层丝阵的外界面速度也开始下降, 此时外层丝阵的动能也开始下降, 内层丝阵的动能开始迅速增大; $t = 120\text{ns}$ 后, 内外两层丝阵已被压得非常紧了, 外层丝阵的内界面和内层丝阵的外界面合二为一, 并开始以相同的速度向内运动; $t = 127\text{ns}$ 后, 整个负载由内而外逐渐开始减速, 随后动能也逐渐开始下降, 到 $t = 144\text{ns}$ 时, 负载的总动能下降到零, 并辐射出超强的 X 射线脉冲(见图 7); 此后负载开始向外飞散, 但由于此时的电流又在增加, 使得磁压又大于热压力, 从而又开始箍缩. 计算结果表明外丝阵的最大收缩比为 27, 最大内爆速度和动能分别达到了 $6 \times 10^7 \text{cm/s}$ 和 430kJ .

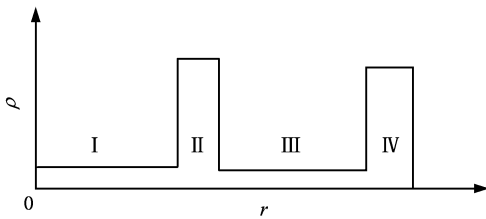


图 3 初始密度的分布

图 7 给出了实验的负载电流和 X 射线辐射脉冲(实线)以及我们计算出的 X 射线辐射脉冲波形(虚线). 从图中可见, 计算出的辐射功率(120TW)比实验值小, 并且最大值时刻(144ns)比实验值推迟了 4ns, 脉宽(3.9ns)同实验值相当. 对计算出的 X 射线脉冲功率曲线积分得 X 射线能量为 0.8MJ, 也比实验值小. 说明程序计算在定量符合上还要进一步提

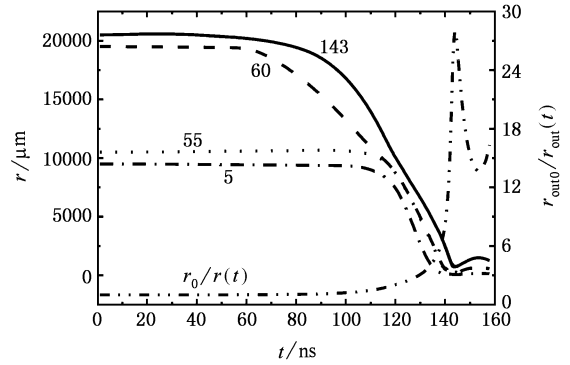


图 4 双层丝阵的内爆轨迹

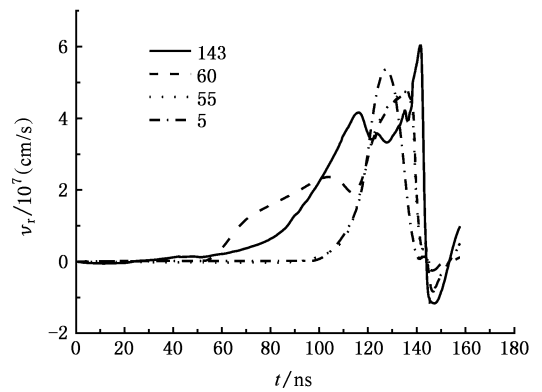


图 5 丝阵各界面箍缩速度随时间的变化

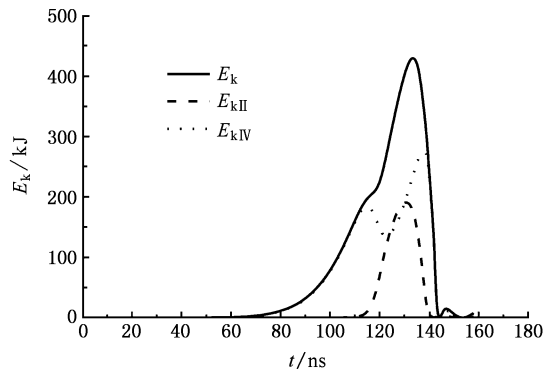


图 6 内外层丝阵及负载箍缩动能随时间的变化

高, 需要更全面地考虑 X 射线辐射的产生及其输运过程. 图 8 是内外层丝阵等离子体的平均电离度随箍缩过程的变化情况. 图中标志不同曲线的数字表示计算网格中不同的拉氏点, 142, 100, 70 拉氏点在外层丝阵内, 50, 25, 10 拉氏点属内层丝阵. 由于外层丝阵的欧姆加热和磁压做功都比内层的大, 因此它的离子(原子)被电离得早一些, 同一时刻的电离

度也大一些. 在箍缩到心时最大电离度达到了 65, 说明电离到了 W 离子的第 L 层的电子(平均地仅一个 L 层的电子被电离). 因此, 其所产生的 X 射线主要是 M, N, O, P, Q 等层的 X 射线辐射.

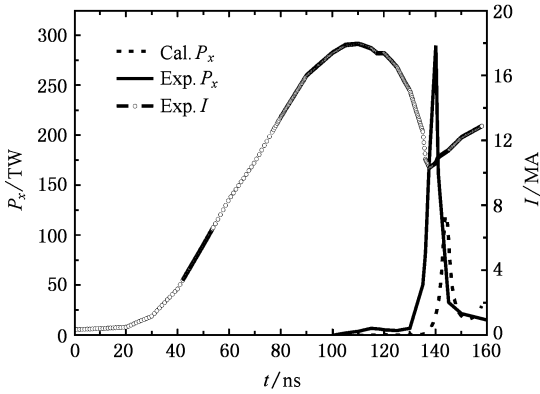


图 7 负载电流和 X 射线辐射脉冲波形

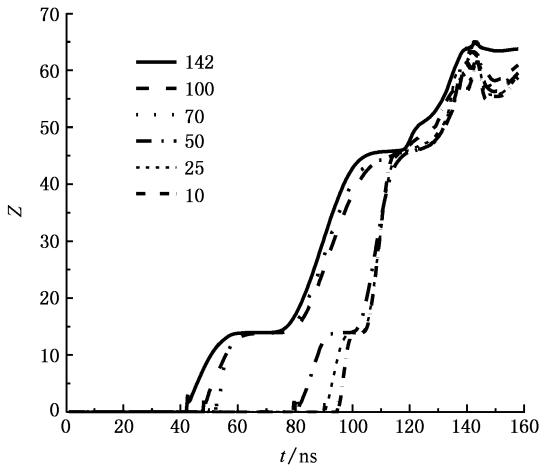


图 8 平均电离随箍缩过程的变化

图 9 展示了各计算区域中质量密度的一维时空演化情况. 从图 9 中可以看到 $t = 96.4\text{ns}$ 以前, 尽管外层丝阵在不断地向内层丝阵运动, 但内层丝阵的位置和密度分布几乎没有变化, 同初始的位置和密度分布一样; $t = 113\text{ns}$ 时, 由于外层丝阵的碰撞和挤压, 使得内层丝阵向内运动, 密度增加; $t = 120\text{ns}$ 后, 两个丝阵已被紧紧地压在一起, 像一个丝阵一样向内箍缩. 最大压缩密度为 0.8g/cm^3 左右, 曲线 f 表示负载已向外飞散. 图 10 反映了两丝阵在箍缩过程中的接近程度以及驱动电流在各等离子体区域的分配情况. 电流密度可以通过磁场的空间变化计算出来^[14] 积分各区域的电流密度, 就可以得到各区域所携带的电流. 开始时, 由于区域 IV 的电流 (I_{IV}) 横

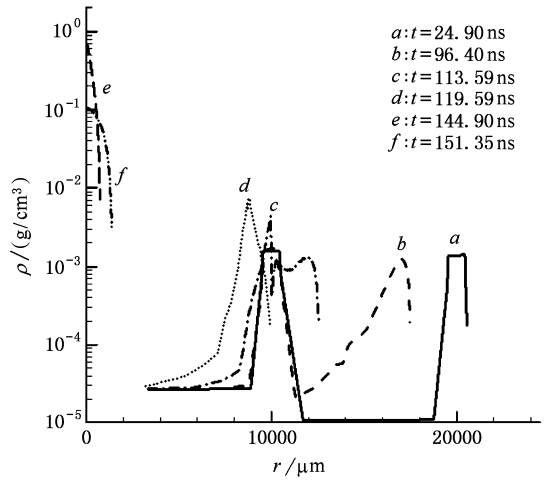


图 9 密度在箍缩过程中的时空演化过程

截面积最大(比区域 II 大几倍), 并且内外层丝阵几乎都在原地不动, 没有磁场对流, 再加上脉冲电流的趋肤效应, 使得开始时大部分电流都从外层丝阵所形成的等离子体中流过, 但 $t = 55\text{ns}$ 后, 因外层丝阵的内界面向内运动, 从而磁场(进而电流)通过流体对流到区域 III 中; 到 $t = 105\text{ns}$ 后, 因整个内层丝阵开始向内运动, 从而磁场(进而电流)通过流体对流到区域 II 和 I 中, 并使得区域 IV 中的电流开始下降; $t = 120\text{ns}$ 后, 因外层丝阵的内界面和内层丝阵的外界面以相同的速度运动(见图 5), 从而磁场的对流开始减小, 进而区域 III, II, I 中的电流都开始下降, 区域 IV 中的电流开始增加, 并因趋肤而进一步增加, 以致最后驱动电流主要从区域 IV 中流过.

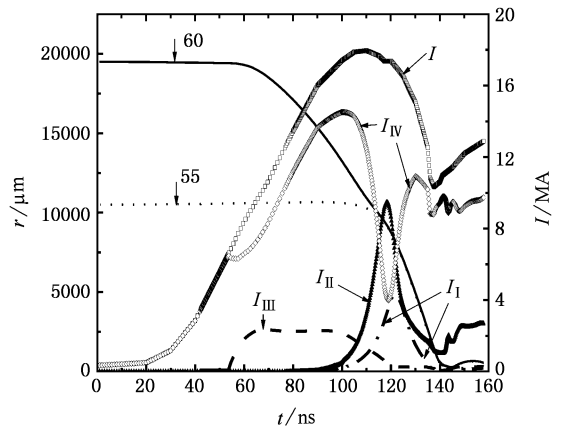


图 10 两丝阵的相对位置和各区电流随箍缩过程的变化 (I 为总电流, I_I, I_{II}, I_{III} 和 I_{IV} 为 I, II, III 和 IV 区的电流)

4. 讨 论

双层丝阵不像单层丝阵那样能直接地给出负载的优化结果,而需要进行综合分析和考虑.但是从前面的负载优化分析发现,在单层丝阵内引入一个内层丝阵后,将使内爆动能下降,因此基于内爆动能最大化的优化原则,应首先在相同的驱动电流下优化外层丝阵,然后再在此基础上确定内层丝阵的位置和线质量,丝阵的半径和线质量在一定的范围内变化时,内爆动能变化不大,从而给负载的设计、制造工艺和加工等提供了便利的空间.一般地,在外层丝阵已基本上优化的基础上,内层丝阵的半径和丝数可以直接取为外层丝阵相应参数的一半即可.这样设计出的双层丝阵具有很好的对称性,并且内外层的丝间隙相同,它基本上是优化的.

内外层丝阵的非弹性碰撞要损失外层丝阵已获得的动能,损失的动能一方面增加内层丝阵的动能,另一方面增加内外层丝阵等离子体的内能,并有一部分以 X 射线的形式辐射出去.对于本文研究的 Z 装置上的典型双层负载(参数如前面所述),零维计算结果表明,外层丝阵碰到内层丝阵的时刻和速度分别为 113ns 和 4.89×10^7 cm/s(一维计算结果分别为 105ns 和 4×10^7 cm/s,见图 5),损失的动能为 80kJ(从一维计算结果图 6 中估算出的动能损失大于 30kJ),收缩比为 20 时的箍缩时刻和速度分别为 131ns 和 8.26×10^7 cm/s.从实验测出的 X 射线脉冲功率曲线(图 7 中的实线)可以估算出在两丝阵碰撞过程中产生的 X 射线能量为 50kJ 左右.它比零维模型计算出的动能损失小,但比一维计算的估算结果要大,这是合理的.由于实验测出的 X 射线脉冲功率曲线的前平台正好处在两丝阵碰撞期间(105ns—120ns),因此,它是由丝阵碰撞而产生的,从而支持丝阵相互作用的碰撞模型.但这里的数值模拟计算未能模拟出该碰撞辐射平台,说明数值模拟中因采

用稀薄的先驱等离子体连接内外层丝阵等离子体而弱化了该碰撞过程.

在丝阵相互作用的穿透模型中,当外层丝阵穿透内层丝阵后外层电流直接转移到内层丝阵上.从图 10 中也可以看到类似的电流转移过程,但碰撞模型下的电流转移是由磁场的对流(可能还有扩散)而引起的.电流转移在双层丝阵的后期箍缩过程中是重要的,它使内层丝阵(等离子体)加速、升温等,使箍缩继续进行.

5. 结 论

用 Z 箍缩的零维计算模型,根据动能最大化的优化原则和丝阵碰撞假设,对美国 Sandia 实验室 Z 装置上典型的双层钨丝阵负载进行了优化分析,给出了内爆动能随内外层丝阵线质量和初始半径的变化规律,表明该负载基本上是优化的.该优化分析方法不仅适用于双层丝阵负载的优化分析,而且适用于双层喷气负载,甚至更复杂的嵌套复合负载的优化分析,并通过综合考虑可以得到优化(或近似优化)的负载的设计方案.一维辐射磁流体力学程序对其 Z 箍缩过程的数值模拟,模拟结果给出了它的时空演化过程,展现了箍缩过程的总体动力学特征,发现内层丝阵等离子体在与外层丝阵碰撞以前基本上不动,在碰撞期间外层丝阵的电流通过对流大部分转移到内层丝阵等离子体上,碰撞结束后,因电流的趋肤效应,大部分电流又转移到外层等离子体上.由于基于丝阵碰撞假设基础上的一维数值模拟的宏观结果与实验的测量结果大致符合,丝阵运动的总体特征合理,并且零维模型的计算结果如丝阵碰撞时刻、运动速度、动能损失等也比较合理,特别是出现 X 射线辐射前平台的时间,以及它的 X 射线能量同丝阵碰撞动能损失相当,从而表明丝阵相互作用的碰撞模型(假设)是合理的.

- [1] Gol'berg S M, Velikovich A L 1993 *Phys. Fluids* B 5 1164
 [2] Velikovich A L, Cochran F L, Davis J 1996 *Phys. Rev. Lett.* 77 853
 [3] Velikovich A L, Cochran F L, Davis J, Chong Y K 1998 *Phys. Plasmas* 9 3377

- [4] Baksht R B, Datsko I M, Kim A A, Labetskii A Yu, Loginov S V, Oreshkin V I, Russkikh A G, Fedunin A V, Shishlov A V 1995 *Plasma Phys. Rep.* 21 907
 [5] Deeney C, Douglas M R, Spielman R B, Nash T J, Peterson D L, Eplattner P L, Chandler G A, Seaman J F, Struve K W 1998 *Phys. Rev. Lett.* 81 4883

- [6] Sze H , Janister J , Faylor B H , Levine J S , Qi N , Velikovich A L , Davis J , Lojewski D , Sincerny P 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 105001
- [7] 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
- [8] Peterson D L , Bowers R L , Matuska W , McLenithan K D , Chandler G A , Deeney C , Derzon M S , Douglas M , Matzen M K , Nash T J , Spielman R B , Struve K W , Stygar W A 1999 *Phys. Plasmas* **6** 2178
- [9] Terry R E , Davis J , Deeney C , Velikovich A L 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4305
- [10] Deeney C , Apruzese J P , Coverdale C A , Whitney K G , Thornhill J W , Davis J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 155001
- [11] 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
- [12] Ning C , Yang Z H , Ding N 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 1200 (in Chinese) [宁 成、杨震华、丁 宁 2003 强激光与粒子束 **15** 1200]
- [13] Ning C , Yang Z H , Ding N 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1650 (in Chinese) [宁 成、杨震华、丁 宁 2003 物理学报 **52** 1650]
- [14] Ning C , Yang Z H , Ding N 2002 *High Power Laser and Particle Beams* **14** 877 (in Chinese) [宁 成、杨震华、丁 宁 2002 强激光与粒子束 **14** 877]

Studies of implosion processes of nested tungsten wire-array Z-pinch *

Ning Cheng Ding Ning Liu Quan Yang Zhen-Hua

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

(Received 8 October 2005 ; revised manuscript received 16 November 2005)

Abstract

Nested wire-array is a kind of promising structured-load because it can improve the quality of Z-pinch plasma and enhance the radiation power of X-ray source. Based on the zero-dimensional model , the assumption of wire-array collision , and the criterion of optimized load (maximal load kinetic energy) , optimization of the typical nested wire-array as a load of Z machine at Sandia Laboratory was carried out. It was shown that the load has been basically optimized. The Z-pinch process of the typical load was numerically studied by means of one-dimensional three-temperature radiation magneto-hydrodynamics (RMHD) code. The obtained results reproduce the dynamic process of the Z-pinch and show the implosion trajectory of nested wire-array and the transfer process of drive current between the inner and outer array. The experimental and computational X-ray pulse was compared , and it was suggested that the assumption of wire-array collision was reasonable in nested wire-array Z-pinch at least for the current level of Z machine.

Keywords : Z-pinch , nested tungsten-wire-array , 0-D optimizing , 1-D RMHD

PACC : 5225P , 5230 , 5265

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10375010 and 10575014).