

“强光一号”装置上部分 Z 箍缩实验 结果的物理分析*

宁 成 丁 宁 杨震华

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2005 年 12 月 9 日收到, 2006 年 5 月 15 日收到修改稿)

从原子的电离能和维持等离子体所需能量出发, 给出了估算任一元素材料, 要产生任一壳层的 X 射线辐射, 每个离子(原子)所需要的基本能量和要达到的内爆箍缩速度的方法. 对“强光一号”加速器上典型的氦喷气和部分钨丝阵 Z 箍缩实验的电流和电压波形所蕴涵的丰富物理信息进行了分析, 得到了电感和洛伦兹(Lorentz)力做功等物理量的变化规律以及负载参数变化对它们的影响. 该电感与基于壳层模型计算出的电感有较大的差异. 前者随箍缩开始而缓慢增大, 甚至在箍缩到心和飞散后还在增大, 最后大致稳定在 100 nH 附近. 差异可能是由于壳层模型过于简化和电流电压的测点同负载有一定的距离而造成的. 当丝阵直径为 8 mm 时, 洛伦兹力做功最大; 当丝阵直径相同时, 丝数较大时, 洛伦兹力做功也较大. 同时还对该加速器的喷气和丝阵负载的线质量进行了优化, 表明也是直径为 8 mm 的钨丝阵为最佳负载, 这同实验的优化结果也一致.

关键词: Z 箍缩, X 射线辐射, 电感, 负载分析

PACC: 5225P, 5230

1. 引 言

Z 箍缩过程和等离子体乍看起来是简单的, 但它却是难以想象的复杂. 它连接着物质的常温常密度状态和高温高密度辐射等离子体状态, 它将常规的市电能量转化为高功率的辐射能量, 功率得到极大的放大. 它是研究高温高密度等离子体物理和辐射物理的重要手段, 并有着广泛的应用前景. 从脉冲功率发生器到辐射应用, Z 箍缩研究包括以下五大方面的研究内容: 加速器技术物理、负载制造工艺和负载物理、内爆箍缩动力学、辐射产生及其输运、辐射应用及相关物理问题. 此外, 从研究手段上还应包括物理诊断技术和数值计算技术的研究等. 这些物理研究内容是一个有机的统一整体. 对于给定的加速器和负载, 一旦加速器开始对负载放电, 将无法对 Z 箍缩过程进行干预和调整, 它是一个高度的自组织过程. Z 箍缩过程时间短而复杂, 要想对它进行全过程、全物理的诊断、理论研究和数值模拟都是十分困难的. 但是, 尽管如此, 经过了人们几十年的研究,

特别是近十年来研究的突破性进展, 在加速器技术和输出电流水平、负载设计理念和制造工艺、理解和诊断内爆箍缩过程、辐射应用, 特别是在 ICF (inertial confinement fusion) 中应用等方面的研究都取得了很大的进步^[1-7]. 并且, 人们从大量的宏观实验结果中, 归纳总结出了许多有用的定标律, 如 X 射线辐射能量与驱动电流峰值的平方成正比^[8]; 在氦喷气实验中, K 壳层辐射产额与电流峰值的 4 次方成正比 $(I_{\max} = 3.1-3.8 \text{ MA})$ ^[9]; 对于原子序数 $Z \leq 36$ 的负载, 要想获得明显的 K 壳层 X 射线辐射, 需要单离子的内爆动能 $E_{\text{ion}} \geq E_{\text{min}}$, E_{min} 为原子电离能和离子和电子能量之和, 它遵循的定标律为 $E_{\text{min}} = 1.012Z^{3.662} \text{ eV/ion}$ ^[10]. Z 箍缩的实验和理论研究表明, 尽管没有考虑欧姆加热(包括反常欧姆加热)和压缩对等离子体的加热, 但薄鞘模型仍能较好地给出 Z 箍缩过程的宏观特性^[11], 并且由它可以导出一个有用的无量纲 pinch 常数^[12], 还可得出对负载设计有用的结论: 在电流上升时间和负载初始半径相同的情况下, 负载最优线质量正比于电流峰值的平

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

方^[13]；以及对预测实验结果有用的结论：内爆动能也正比于驱动电流峰值的平方^[14]。尽管它们的理论基础不十分严密，但是它们在实验条件已经到达的范围（或给定的条件范围）内是正确的或者是基本正确的，从而对设计和指导实验、对预测、分析和判断实验结果有重要的作用。

在 Z 箍缩过程中，负载的电流和电压以及其辐射功率和辐射总能量等宏观物理量包含着丰富的内爆箍缩物理信息。通过对它们进行分析和计算，可以知道内爆等离子体电感、加速器给负载馈送的总电功率和电能、内爆等离子体的电感储能、洛伦兹力对负载做的有用功、电流上升率和等离子体的箍缩品质等。特别是内爆等离子体电感，它反映了负载（等离子体）在箍缩和反弹、飞散过程中的宏观形状特征及其驱动电流的分布情况，并且由它还可以得出负载运动阻抗在箍缩过程中的变化规律。中国工程物理研究院和西北核技术研究所于 2003 年在西北核技术研究所的“强光一号”加速器上开展了一轮氦喷气和钨丝阵的 Z 箍缩实验^[15]。本文将对该次实验中的部分实验的宏观电物理量和辐射物理量进行较系统的分析，并对该加速器的喷气负载和丝阵负载进行优化，还对常用的 Z 箍缩材料，从 X 射线产生过程、电离能和等离子体能量的基本概念出发，估算出它们产生 K 壳层辐射所需要的基本能量和所要达到的基本内爆箍缩速度，并与 E_{\min} 的定标率结果进行比较。

2. 产生 K 壳层 X 射线辐射所需的基本能量和箍缩速度

尽管不是所有的 Z 箍缩实验都是追求 K 壳层的 X 射线辐射最强，也不是所有的材料都能达到 K 壳层辐射，但是 K 壳层的 X 射线辐射及其产额却标志着负载的箍缩状况和品质。因此，这里对常用的 Z 箍缩材料（氦气，氖气，铝丝，氙气，钛丝，氟气，钼丝

和钨丝），从 X 射线的产生、原子的电离能和等离子体能量的基本概念出发，来估算它们各自要达到 K 壳层 X 射线辐射每个离子要具有的基本能量和要达到的基本内爆速度，同时和 E_{\min} 及其对应的内爆速度进行比较。

Z 箍缩 X 射线辐射的主要过程是：当等离子体被箍缩到最紧的时候，等离子体的温度达到最高，离子的外层电子被高度剥离，同时由于等离子体电感的增大和加速器固有的驱动能力，而使得箍缩驱动电流下降，从而使得等离子体向外反弹飞散，等离子体温度下降，接着大量被电离（激发）的电子向低能级跃迁，并辐射出强的 X 射线脉冲。因此，要产生某一壳层的辐射，则该壳层至少要有有一个束缚电子被电离，从而要产生 K 壳层的 X 射线辐射，则等离子体要具有相当于 K 壳层束缚电子电离能的温度，以能把它电离。对于一个“平均离子”（它假定每个离子都具有相同的能量——平均能量，并且它们都处于最可几的电离态，而具有相同的电离度——最可几电离度）而言，若 K 壳层以外的所有电子的电离能为 E_L^i ^[16]，K 壳层的第一个束缚电子的电离能为 $E_{K_1}^i$ ^[16]，且设 $T_i = \eta T_e$ （ T_i 为离子温度； T_e 为电子温度； η 为离子温度和电子温度的分离程度系数，它与等离子体状态和材料有关，对于高温高密度的箍缩等离子体，它的值一般在 1—2 之间^[17]，并且它随着材料原子序数 Z 的增加而变小，这里为了估算的方便统一取为 1.5），则要产生 K 壳层的 X 射线辐射，该“平均离子”要具有的基本能量为 $E_{\min}^{\text{估}} = E_L^i + E_{K_1}^i + T_i + (Z - 1)T_e = E_L^i + 2E_{K_1}^i + (Z - 1)E_{K_1}^i / \eta$ 。如果不考虑欧姆加热和压缩对等离子体内能的贡献，“平均离子”所获得的基本能量全部来自内爆动能的热化，则由 $E_{\min}^{\text{估}}$ 就可以相应地计算出所需要的基本内爆速度 $v_{\min}^{\text{估}}$ 。表 1 就是估算的结果以及它和定标律结果的比较。从表 1 中可以看到，随着 Z 的增加，估算的结果，特别是内爆速度愈来愈接近于由定标率

表 1 产生 K 壳层 X 射线辐射，每个离子需要的基本能量和内爆速度

材料元素符号(Z)	Hf(2)	Nd(10)	Al(13)	Ar(18)	Ti(22)	Kr(36)	Md(42)	W(74) ^{a)}
E_{\min} (keV/ion)	0.0128	4.6471	12.1462	39.9934	83.3935	506.2444	缺	缺
v_{\min} (10^5 m/s)	0.248	2.11	2.94	4.38	5.80	10.75	缺	缺
$E_{\min}^{\text{估}}$ (keV/ion)	0.145	10.521	23.08	60.80	110.34	479.29	761.05	4038.73
$v_{\min}^{\text{估}}$ (10^5 m/s)	0.834	3.175	4.047	5.40	6.64	10.46	12.3	20.51

a) 对 W 的 L 壳层辐射，估算值分别为 910.53 keV/ion 和 9.74×10^5 m/s；对 W 的 M 壳层辐射，它们分别为 175.53 keV/ion 和 4.28×10^5 m/s。

计算出的结果.对于 $Z < 36$ 的材料, η 值偏小了,而对于氦气 η 偏大了.若能从理论或实验上得到较准确的 η 值,则能较准确地估算出 $E_{\min}^{\text{估}}$ 和 $v_{\min}^{\text{估}}$.用类似的方法,可以估算出任一元素材料,要产生任一壳层的 X 射线辐射,每个离子(原子)所需要的基本能量和要达到的内爆速度.由于 Z 箍缩的速度一般在 10^5 m/s 量级,因此在钨丝阵 Z 箍缩中,很难产生 K 壳层的 X 射线辐射,大部分是 M, N, O, P, Q 等壳层的辐射,此外,还可能有少量的 L 壳层的辐射.

3. 箍缩过程的电物理量分析

实验中测量的电压是从磁绝缘传输线的前端至负载阳极的电压 $V(t)$, 电流是流过负载的电流 $I(t)$. 放电开始后, 与在负载电感 $L(t)$ 上的压降相比, 在负载电阻上的压降可以忽略不计. 从而有 $d(I(t)K(t))/dt = V(t)$, 对两边做定积分, 并整理得到电感为

$$L(t) = \frac{\int_{t_0}^t V(t)dt + L(t_0)I(t_0)}{I(t)}, \quad (1)$$

它包含了此段电路中的固有电感. 若 $t = t_0$ 时, 电流很小, 或甚至为零, 则由(1)式就可以直接计算出负载的电感值. 从加速器馈送到负载区域的总电功率和电能分别为

$$P_L(t) = V(t)I(t), E_L(t) = \int_{t_0}^t P_L(t)dt. \quad (2)$$

负载区域的电感储能为

$$E_L(t) = \frac{1}{2}L(t)I(t)^2. \quad (3)$$

Lorentz 力对负载做的有用功为

$$W(t) = E_L(t) - E_L(t) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^t I(t)^2 dL. \quad (4)$$

图 1 和图 2 的横坐标是 Z 箍缩过程的时间, 其纵坐标同时表示 Z 箍缩中 X 射线辐射功率 P_x 、负载电压 V 、负载电流 I 、负载电感 L 、负载区域电感储能 E_L 、加速器馈送到负载区域的电能 E_L 、Lorentz 力对负载做的有用功 W 和加速器馈送到负载区域的总电功率 P_L , 但它们在纵坐标中的单位分别为 TW, MV, MA, 100 nH, 100 kJ, 100 kJ, 100 kJ, TW. 图 1 是喷氦气负载(气柱外半径为 0.9 cm, 内半径 0.4 cm, 高为 4 cm, 线质量 $\sim 32 \mu\text{g/cm}$, 实验发次为 shot188)的结果, 图 2 是钨丝阵负载(由 32 根直径为 $5 \mu\text{m}$ 的钨丝组成, 丝阵直径为 1 cm, 高为 2 cm, 实

验发次为 shot201)的结果. 无论是在喷气, 还是在丝阵的 Z 箍缩实验中, 加速器的初级储能电容器的充电电压均为 40 kV. 从这两个图中可以看出, 两者的电流波形相似, 但从更多的实验结果来看, 在电流峰值以后, 喷气 Z 箍缩的电流要下降得更低一些; 在负载的箍缩阶段, 电流和电压都是正的, 电功率也是正的, 说明加速器在该阶段向负载馈送能量, E_L 和 E_L 都在增大, 但当等离子体箍缩到心, 向外飞散(对应于 P_x 峰值之后)后, 电压反号, 出现负电压, 电功率也就由正变负, 说明此时等离子体负载向加速器反馈能量, E_L 和 E_L 都在减少. X 射线的峰值功率都在 0.5 TW 左右, 它们均小于相应的电功率峰值, 说明它们的箍缩状况均不够好, 功率没有得到放大. 喷气和丝阵的 X 射线脉冲的脉宽分别为 26 ns 和 23 ns. 加速器馈送到负载区域的净总电能分别达到 82 kJ 和 70 kJ, 而 Lorentz 力对负载做的有用功分别为 60 kJ 和 50 kJ, 它们辐射出的 X 射线总能量分别为 20 kJ 和 18 kJ. 负载区域的电感随着箍缩的进行而增大, 并且在等离子体反弹、飞散后仍然在增大, 之后趋于一个相对稳定的值, 分别为 90 nH 和 80 nH. 这里计算出的负载电感值及其变化规律与常用的基于壳层模型的电感计算公式($L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{r_0}{r}$, μ_0 为真空磁导率, l 为负载高度, r_0, r 分别为负载的初始半径和任一时刻的半径)^[18]所得到的结果和规律都有较大的差异. 对高为 2 cm 的负载, 箍缩比在 10—20 范围内, 理论计算出的负载最大电感为 9—12 nH; 虽然理论计算出的电感也是随着箍缩的进行而增大, 但它随着箍缩等离子体的反弹和飞散而下降, 并且电感值比较小, 增大稍后而快(呈峰值), 导致差异可能有两方面的原因. 一方面, 壳层模型认为 Z 箍缩等离子体为一个薄的壳层, 壳层以外没有等离子体, 电流仅在壳层中流过, 而实验表明, 在主等离子体的内外区域均充满着稀薄的等离子体, 并且稀薄等离子体对电流有分流作用, 从而壳层模型过于简化了. 因此, 用该公式计算出的电感值会与实际情况有差异. 另一方面, 由于 Z 箍缩等离子体的温度很高, 辐射很强, 电流和电压的测点一般都布置在离负载几个厘米甚至更远的地方, 实验上给出的结果是测点范围以内的电流和电压值, 而很难给出负载(Z 箍缩等离子体)的真实电流和电压值. 从而计算出的电感应是该区域的总电感. 可见差异的存在是必然的.

图 3 和图 4 分别是喷氦气和钨丝阵 Z 箍缩中电

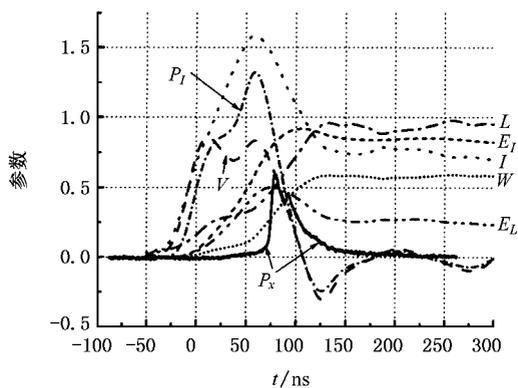


图 1 氩喷气负载 Z 箍缩(shot188)过程中 $P_x, V, I, L, E_L, E_I, W, P_I$ 随时间的变化

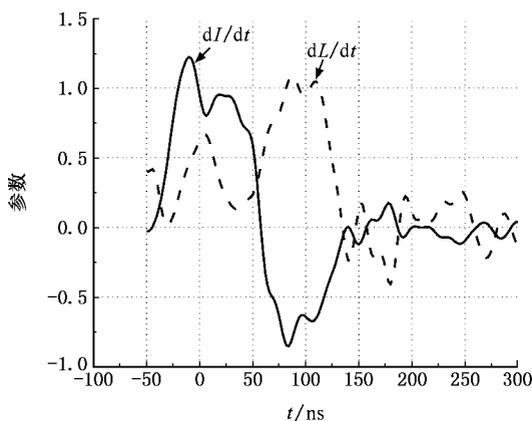


图 3 氩喷气负载 Z 箍缩(shot188)过程中 dI/dt 和 dL/dt 随时间的变化

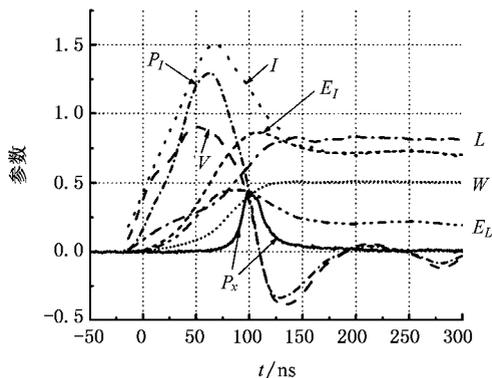


图 2 钨丝阵负载 Z 箍缩(shot201)过程中 $P_x, V, I, L, E_L, E_I, W, P_I$ 随时间的变化

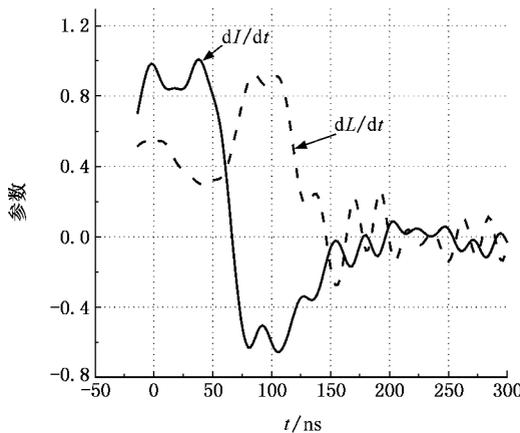


图 4 钨丝阵负载 Z 箍缩(shot201)过程中 dI/dt 和 dL/dt 随时间的变化

流上升率(dI/dt)和运动阻抗(dL/dt)随箍缩时间的变化关系。 dI/dt 和 dL/dt 在图中纵坐标的单位分别为 20.0 TA/s 和 Ω 。从(4)式可见,运动阻抗愈大,则等离子体获得的有用能量愈大,因此它能反映出等离子体辐射源的能量转换能力。从图 3 和图 4 可以看到,运动阻抗的值在 1Ω 左右,但喷气负载的运动阻抗要比钨丝阵的大一些,也就是说前者的 X 射线辐射能力更强一些;它们都是在电流下降以后(即电流峰值之后)才达到最大值,箍缩等离子体的运动阻抗和电路的系统阻抗大致相当,均为 1Ω 的量级^[19];喷气负载的电流上升率比钨丝阵的大,它们分别达到了 25 TA/s 和 20 TA/s 。

在不同的丝阵直径下,电感 L 随箍缩过程的变化如图 5 所示,加速器馈送到负载区域的总电能 E_I 、负载区域电感储能 E_L 、Lorentz 力对负载做的有用功 W 随时间的变化情况如图 6 所示。实验 shot194, shot197 和 shot198 的丝阵均是由 32 根直径

为 $5 \mu\text{m}$ 的钨丝组成,但它们的丝阵直径不同,分别为 6 mm 、 8 mm 和 10 mm 。在各发实验中,负载电流的峰值分别为 1.552 MA 、 1.625 MA 和 1.441 MA 。从图 5 和图 6 中可以发现, $\Phi 10 \text{ mm}$ 的丝阵的电感最大, $\Phi 8 \text{ mm}$ 的次之, $\Phi 6 \text{ mm}$ 的最小,与之相对应的是电感储能 $E_{L\text{shot}198}$ 最大, $E_{L\text{shot}197}$ 次之, $E_{L\text{shot}194}$ 最小。加速器馈送到负载区域的总电能也是 $E_{I\text{shot}198}$ 最大, $E_{I\text{shot}197}$ 次之, $E_{I\text{shot}194}$ 最小,但 Lorentz 力对负载做的有用功是 $W_{\text{shot}197}$ 最大, $W_{\text{shot}198}$ 次之, $W_{\text{shot}194}$ 最小。说明不是电感最大的负载,也不是电感最小的负载为最好,而是有一个最佳值。在这三种负载中, $\Phi 8 \text{ mm}$ 的负载是最优化的。这同它们辐射出的 X 射线能量的相对大小也是一致的,其依次为 25 kJ 、 32 kJ 和 26 kJ 。

图 7 和图 8 也分别是不同丝阵参数下的电感 L 和加速器馈送到负载区域的总电能 E_I 、负载区域电

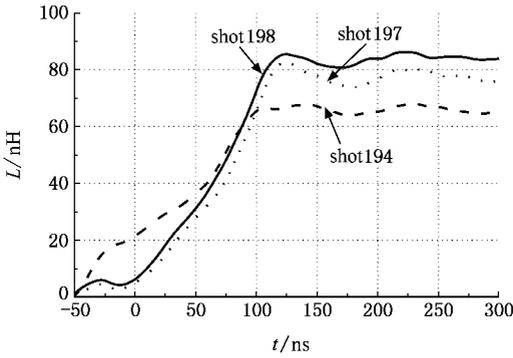


图5 丝阵直径变化对电感变化的影响

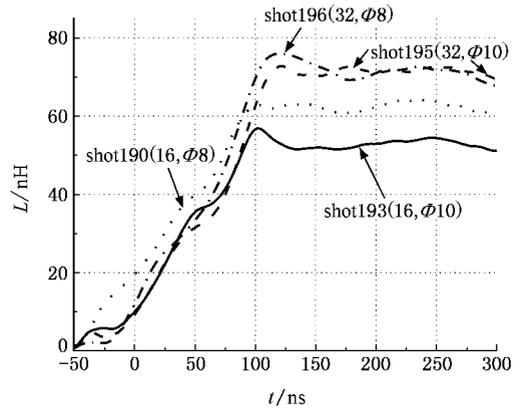
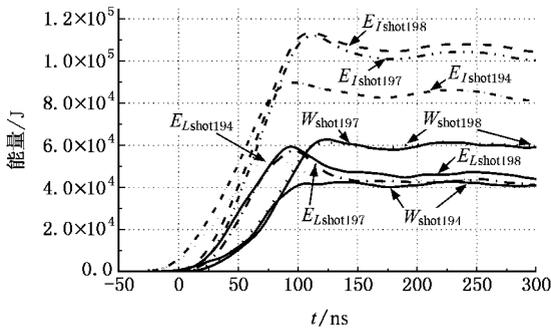
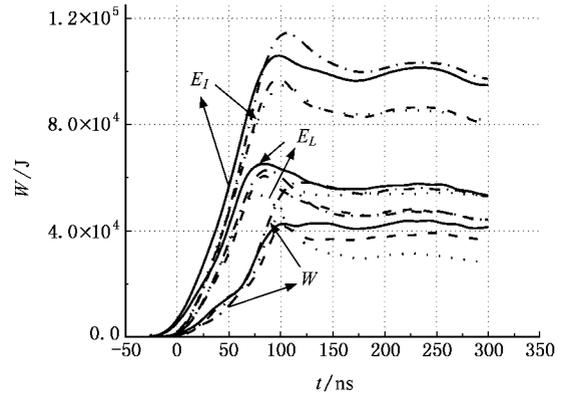


图7 丝阵参数变化对电感变化的影响(括号中的第一个数字为丝根数,第二个数字为丝阵直径,单位为mm)

图6 丝阵直径变化对总电能 E_I 、电感储能 E_L 和洛伦兹力做功 W 的影响图8 丝阵参数变化对总电能 E_I 、电感储能 E_L 和洛伦兹力做功 W 的影响(实线为 shot190,虚线为 shot193,点线为 shot195,虚点线为 shot196)

感储能 E_L , Lorentz 力对负载做的有用功 W 随时间的变化情况. 但这里主要是比较具有相同丝阵直径, 但丝根数不同的丝阵内爆的宏观物理量变化情况. 从图 7 可见, 在丝阵直径均为 8 mm 的两发实验 shot190(16 根丝)和 shot196(32 根丝)以及丝阵直径均为 10 mm 的两发实验 shot193(16 根丝)和 shot195(32 根丝)中, 均为由 32 根丝组成的丝阵的电感最大. 从图 8 可见, 在丝阵直径为 8 mm 的两发实验中, E_I 是 32 根丝的较大, E_L 是 16 根丝的较大, W 是 32 根丝的较大; 在丝阵直径为 10 mm 的两发实验中, E_I 是 16 根丝的较大, E_L 也是 16 根丝的较大, 但 W 是 32 根丝的较大. 说明 E_I 和 E_L 则不一定是 32 根丝的为最大, 但 W 则均为 32 根丝的最大, 也就是说无论直径是 8 mm 还是 10 mm 的丝阵, 均为由 32 根丝组成的丝阵比较好(因为它的丝间隙比较小, 能形成较好的等离子体壳层).

4. 负载优化

前面从实验测得到的电物理量分析了负载参数

对能量转化的影响, 从而知道那些负载参数为较优. 也可以在实验前就用零维模型^[14]对 Z 箍缩的负载进行优化. 零维模型认为负载的全部质量或单位长度质量全部集中在离负载对称轴为 r 处的一个质点上, 其所受的力是磁压 p_B 对圆壳等离子体表面所产生的向心力. 在不考虑流体力学不稳定性, 箍缩完全对称的情况下, 该质点的运动反映了整个负载的箍缩运动. 显然它是一个理想的模型, 但研究经验表明^[14, 19]它是很实用的, 特别是在负载的优化设计中. “强光一号”加速器是我国目前驱动电流最大、能稳定运行的 Z 箍缩加速器. 我们今后将在该装置上开展更多的喷气和丝阵 Z 箍缩实验研究. 因此, 很有必要对它的喷气负载和丝阵负载进行系统的优化, 以给今后的实验和负载设计提供参考. 关于负载优化的方法在文献^[14]中已有很好的阐述. 这里不再累述, 仅给出具体的优化计算结果. 图 9 是利用雪耙模

型(内爆质量变化的零维模型)^[19]和图 1 中的电流波形对三种喷嘴的气体线质量进行优化的计算结果.横坐标是气柱的线质量,纵坐标同时表示箍缩动能和速度,单位如图中所示.这三种喷嘴喷出的中空气体柱的出口端内外半径分别为 5 mm 和 10 mm, 4.5 mm 和 9 mm, 4 mm 和 8 mm.图 10 是利用零维模型和图 2 中的电流波形对直径为 6 mm, 8 mm, 10 mm 和 12 mm 的四种丝阵的线质量进行优化的结果(直径为 4 mm 的丝阵的优化结果没有画在此图中).类似地,图 10 中的横坐标是丝阵的线质量,纵坐标同时表示箍缩动能和速度,它们单位也已标在

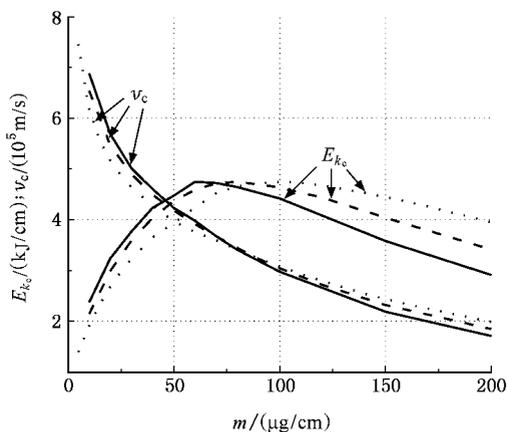


图 9 喷气负载 Z 箍缩动能 E_k 、速度 v_c 随负载线质量的变化(实线,虚线和点线所对应的气柱外直径分别为 20 mm, 18 mm 和 16 mm)

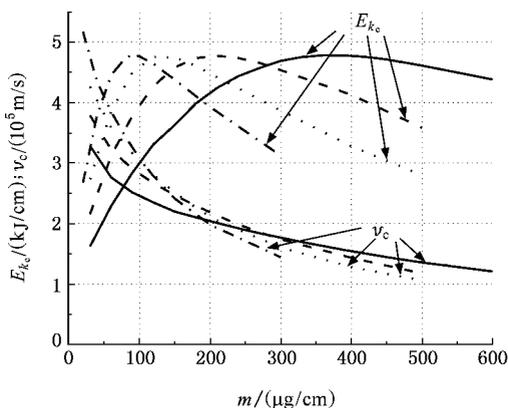


图 10 丝阵负载 Z 箍缩动能 E_k 、速度 v_c 随负载线质量的变化(实线,虚线,点线和虚点线所对应的丝阵直径分别为 6 mm, 8 mm, 10 mm 和 12 mm)

图中.两图中均是负载收缩比为 10 时的箍缩速度和单位长度的箍缩动能,其中随线质量增大而单调下降的是箍缩速度.从图 9 可以看出,三种喷气负载的

箍缩动能都能达到相同的最大值 4.7 kJ/cm,但它们所对应的线质量不同,分别为 60 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 80 $\mu\text{g}/\text{cm}$ 和 100 $\mu\text{g}/\text{cm}$;如果既希望箍缩动能尽可能地大,以获得尽可能大的辐射能量,同时也希望得到尽可能硬的 X 射线,即希望箍缩速度也尽可能地高,则仅有曲线 $E_k(m)$ 和曲线 $v_c(m)$ 的交点能同时满足这两个条件;对于这三个喷嘴(三种负载),它们的交点依次为(45, 4.3)(48, 4.2)(50, 3.9) [$\mu\text{g}/\text{cm}$, kJ/cm];若气柱的线质量小于 70 $\mu\text{g}/\text{cm}$,则在相同的线质量下, $\phi 20$ mm 喷嘴的 $E_k(m)$ 和 $v_c(m)$ 均为最大,该喷嘴为最优;若气柱的线质量大于 80 $\mu\text{g}/\text{cm}$,则在相同的线质量下, $\phi 16$ mm 喷嘴的 $E_k(m)$ 和 $v_c(m)$ 均为最大,此时该喷嘴为最优;一般而言,曲线 $E_k(m)$ 和曲线 $v_c(m)$ 的交点到动能最大之间的线质量都是可选用的.从图 10 可见,丝阵负载的最大箍缩动能也是 4.7 kJ/cm 左右,但它们所对应的线质量依次为 360 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 210 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 120 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 90 $\mu\text{g}/\text{cm}$ (丝阵直径为 4 mm 的为 800 $\mu\text{g}/\text{cm}$);曲线 $E_k(m)$ 和曲线 $v_c(m)$ 的交点依次为(78, 2.6)(64, 3.18)(55, 3.7)(50, 4.1) [$\mu\text{g}/\text{cm}$, kJ/cm];对于丝直径为 5 μm 的钨丝而言,从交点所对应的线质量到动能最大值所对应的线质量,其丝阵的丝间隙范围分别为 0.90—0.198 mm, 1.478—0.457 mm, 2.09—0.98 mm 和 2.90—1.57 mm(丝阵直径为 4 mm 的为 0.48—0.06 mm);对于丝阵负载的优化除了要考虑内爆动能(主要考虑)和速度外,还同时要考虑到丝间隙的大小以及丝阵制造的难易程度,实验结果表明丝阵的丝间隙在 0.5 mm 左右为宜,丝间隙过大和过小都会使箍缩品质下降^[20, 21].因此,对于“强光一号”加速器目前的电流水平(1.6 MA),首先推荐使用直径为 8 mm 的钨丝阵,其次为直径 6 mm 和 10 mm 的钨丝阵,直径为 4 mm 以下和直径为 12 mm 以上的钨丝阵均不宜选用.这里的优化结果和第 3 节对丝阵 Z 箍缩实验中的电物理量的分析结果是相符合的,也同实验的优化结果^[13]相一致.

5. 结 论

尽管 Z 箍缩过程很复杂,但可以从 X 射线产生的基本过程和电离能及等离子体能量的基本概念出发,来估计产生任一壳层 X 射线辐射所需要的基本能量和要达到的内爆箍缩速度;还可以从实验中得

到的负载(区域)的箍缩电压、电流和辐射功率、能量等宏观物理量,来对 Z 箍缩过程及其能量转化规律,以及负载参数变化对能量转化的影响等进行分析和研究;此外,也可以从行之有效的零维模型来对负载进行优化、对箍缩过程和辐射产额进行预测;最后,还可以从实验中总结、归纳出来的定标律来对实验结果进行预测,或设计实验,从而使得人们对 Z 箍缩过程的认识和预测更加直接、明了。

利用本文中 $E_{\text{min}}^{\text{th}}$ 的计算方法,可以估算出任一元素材料,要产生任一壳层的 X 射线辐射,每个离子(原子)所需要的基本能量和要达到的内爆箍缩速度,但它的准确性依赖于电子和离子温度分离程度系数的确定。通过对“强光一号”Z 箍缩的负载电压和电流的分析,得到了喷气 Z 箍缩和丝阵 Z 箍缩过程中的电感和 Lorentz 力对负载做的可以转化为内能和动能的有用功等重要物理量的变化规律。结果发现,电感值及其变化规律与基于壳层模型的电感计算公式的结果有较大的差异,分析计算出的电感值一开始就缓慢增加,甚至在箍缩到心和飞散后还在增加,最后大致稳定在 100 nH 左右,而理论计算出的电感值偏小,增大延后、过快,并且箍缩到心飞

散后迅速下降。差异的原因可能来源于过于简化的壳层模型和电流、电压的测点位置离负载较远所致。文中计算表明, Lorentz 力做功不是在电感最大,也不是在电感最小时为最大,而有一个最佳值,这一最佳值所对应的是直径为 8 mm 的钨丝阵,它与零维模型对丝阵的优化结果是一致的;在相同的丝阵直径下,丝数大的丝阵,则 Lorentz 力做功较大,这与丝间隙对箍缩品质的影响结论也是一致的。喷气 Z 箍缩,随着喷嘴直径的增大,其最佳气柱线质量下降,对于本文中分析的三种喷嘴和 1.6 MA 的驱动电流水平,它们的最佳线质量在 45—100 $\mu\text{g}/\text{cm}$ 范围内。负载的优化需要理论和实验的共同努力,并最后由系列实验结果来决定。实验上确定的优化负载又可以检验负载的优化方法,并确定优化负载的选取原则。

感谢参加该次 Z 箍缩实验的中国工程物理研究院核物理与化学研究所和激光聚变研究中心的全体实验组成员,以及西北核技术研究所的“强光一号”运行、维护的工程技术人员。感谢北京应用物理与计算数学研究所的罗平庆研究员,同他就等离子体温度分离方面进行了讨论。

- [1] Ryutov D D, Derzon M S, Matzen M K 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 167
- [2] Haines M G, Lebedev S V, Chittenden J P, Beg F N, Bland S N, Dangor A E 2000 *Physics of Plasmas* **7** 1672
- [3] Lebedev S V, Beg F N, Bland S N, Chittenden J P, Dangor A E, Haines M G, Pikuz S A, Shelkovenko T A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 98
- [4] Qiu X M, Huang L, Jian G D 2003 *Physics of Plasmas* **10** 2956
- [5] Cuneo M E *et al* 2001 *Physics of Plasmas* **8** 2257
- [6] Huang X B, Yang L B, Gu Y Z, Deng J J *et al* 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1901 (in Chinese) [黄显宾、杨礼兵、顾远朝、邓建军等 2006 物理学报 **55** 1901]
- [7] Zou X B, Wang X X, Zhang G X, Han M, Luo C M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1289 (in Chinese) [邹晓兵、王新新、张贵新、韩旻、罗承沐 2006 物理学报 **55** 1289]
- [8] Cuneo M E *et al* 2001 *Laser and Particle Beams* **19** 481
- [9] Deeney C, LePell P D, Faylor B H, Meachum J S, Wong S, Thornhill J W, Whitney K G, Coulter M C 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 2781
- [10] Deeney C, Nash T, Prasad R R, Warren L, Whitney K G, Thornhill J W, Coulter M C 1991 *Phys. Rev. A* **44** 6762
- [11] Yang Z H *et al* 1998 *Comput. Phys.* **15** 43 (in Chinese) [杨震华等 1998 计算物理 **15** 43]
- [12] Ding N, Yang Z H, Ning C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 808 (in Chinese) [丁宁、杨震华、宁成 2004 物理学报 **53** 808]
- [13] Yang J J 2000 *High Temperature Density Magnetized Plasmas* (Beijing: Science Press) Chapter 4 (in Chinese) [杨津基 2000 高温高密度磁化等离子体(北京:科学出版社)第四章]
- [14] 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]
- [15] Xu R K, Li Z H, Yang J L, Xu Z P *et al* 2005 *Chinese Physics* **14** 1613
- [16] Cowan R D 1981 *The Theory of Atomic Structure and Spectra* (USA: University of California Press) Chapter 1
- [17] 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]
- [18] Katzenstein J 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 676
- [19] Ning C 2001 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **21** 43 (in Chinese) [宁成 2001 核聚变与等离子体物理 **21** 43]
- [20] Sanford T W, Allshouse G O, Marder B M, Nash T J, Mock R C, Spielman R B, Seamen J F, McGurn J S, Jobe D, Gilliland T L, Vargas M, Struve K W, Stygar W A, Douglas M R, Matzen M K 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 5063
- [21] Sanford T W, Lemke R W, Mock R C, Peterson D L 2003 *Physics of Plasmas* **10** 3252

Physical analysis of the certain results in Z-pinch experiments on the “ Qiang Guang-I ” generator^{*}

Ning Cheng Ding Ning Yang Zhen-Hua

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

(Received 9 December 2005 ; revised manuscript received 15 May 2006)

Abstract

Starting from the energy necessary for atomic ionization and plasma maintaining , a method is developed to estimate the required energy and implosion velocity for a material to emit a certain shell X-ray radiation in a Z-pinch . The typical load current and voltage in Z-pinch process on “ Qiang Guang-I ” generator are analyzed to obtain the inductance and the work done by Lorentz force , as well as the effect of load parameters on them . The inductance is not in good agreements with that calculated from the theory based on the shell model of Z-pinch , possibly due to the over simplification of the model and the measurement limitations , such as the measuring points of the current and voltage are always several centimeters away from the load . It is found in the experiments that the inductance increases with the load current until the end of the X-ray radiation pulse , and is saturated at $\sim 100\text{nH}$. The work done by Lorentz force is maximal when the diameter of tungsten wire array is 8 mm in our experiments . The work done to the load with more wires is greater than that to the load with less wires if the diameters of the wire arrays are the same , say 8 or 10 mm . At the same time , the calculation for optimized masses per unit length of gas-puff and wire array load was carried out for the “ Qiang Guang-I ” generator on 1.6MA current level . The optimized results show that the tungsten wire array with 8 mm diameter should be the best load for this generator . This is consistent with the experimental result on the “ Qiang Guang-I ” .

Keywords : Z-pinch , X-ray radiation , inductance , load analysis

PACC : 5225P , 5230

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