

Z 箍缩等离子体内爆实验金属丝阵负载 优化设计分析*

丁 宁 杨震华 宁 成

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

(2003 年 3 月 7 日收到 2003 年 4 月 9 日收到修改稿)

金属丝阵 Z 箍缩(Z-pinch)内爆是产生强 x 射线辐射的重要方法之一. 在一定脉冲功率加速器条件下, 金属丝阵质量和丝阵半径的选择决定了 Z-pinch 内爆等离子体辐射产额的大小. 采用薄壳模型计算了不同丝阵质量、不同丝阵半径、不同粗细和不同材料金属丝构成的丝阵的内爆时间、内爆轨迹、内爆速度, 以及最大动能和动能转换率. 综合分析了丝间隙、内爆时间、动能转换率与丝阵质量和丝阵半径的关系, 给出了在一定负载驱动电流条件下, 金属丝阵的最佳参数. 分析表明计算结果与实验上观察得到的内爆规律一致.

关键词: Z-pinch 内爆等离子体, 金属丝阵负载, 薄壳模型

PACC: 5255E, 5255D, 5250L, 6110F

1. 引 言

金属丝阵负载是 Z 箍缩(Z-pinch)内爆产生有广泛应用前景的^[1-6]强 x 射线辐射的重要方法之一. 我国开展喷气 Z-pinch 实验^[7]的同时, 也将开展金属丝阵 Z-pinch 内爆实验. 在一定脉冲功率加速器条件下, 金属丝阵质量、丝阵半径的选取决定了 Z-pinch 内爆等离子体 x 射线辐射产额的大小, 因此, 对丝阵负载的优化设计非常必要, 在实验上有重要参考价值.

为 Z-pinch 内爆实验提供可靠的参数, 严格而论应该从脉冲功率加速器提供到负载上的电流开始到负载箍缩内爆产生 x 射线辐射, 对整个过程进行数值模拟. 这不仅要有一维描述, 而且还要有二维, 甚至三维包括动力学、热运输、磁场输运、辐射输运等复杂物理过程的描述, 这样的数值模拟研究难度大、周期长. 鉴于目前我国 Z-pinch 实验的需要, 完全有必要开展简化模型下的 Z-pinch 内爆动力学规律性的研究, 以便及时为实验提供参考数据.

目前国际上已经得到的 Z-pinch 实验结果和理论分析^[8-10]表明, 当丝阵的丝间隙大于某一个阈值时, 单丝行为严重影响丝阵内爆特性, 丝的膨胀和丝

芯周围形成的等离子体晕并没有融合成一个等离子体壳, 而有明显的“芯-晕”结构, 并且这种结构能够维持到内爆后期, 而当丝间隙小于这个阈值时, 丝的熔解汽化能够融合形成非理想等离子体壳. Sanford 等人^[8]给出的 Saturn 装置上 Al 丝阵内爆实验结果表明, 间隙小于 1.4 mm 的 Al 丝阵能够形成等离子体壳, 而且测量得到的 x 射线总功率随间隙的减小迅速增大. Lebedev 等人最新的研究^[11]表明丝材料不同, 芯的大小也不同, 丝芯大小只对每根丝上通过的电流敏感, 而且丝芯大小不同导致不同的临界丝间隙. 这些结果为研究金属丝阵内爆等离子体不稳定性提供了重要依据, 也是不稳定性波长的主要参照. 另外, Lebedev 等人的研究还指出实验上测得的大丝数丝阵内爆轨迹与薄壳模型计算结果符合得很好. 他们给出的结果(如图 1 所示, 丝阵半径为 8mm, Al 丝根数分别取 8, 16, 32, 64 根)表明, 丝根数取 64 时实验测量得到的内爆轨迹与零维模拟计算结果几乎完全一致. 64 根丝的丝阵, 其丝间隙为 0.78 mm, 间隙小于 1.4 mm, 丝阵形成了较好的等离子体壳, 而 32 根丝的丝阵, 其丝间隙为 1.57 mm, 间隙大于 1.4 mm, 单丝行为影响较大, 从而内爆轨迹与零维模拟计算结果在丝间隙大时偏差大.

* 国家自然科学基金(批准号: 10035030)资助的课题.

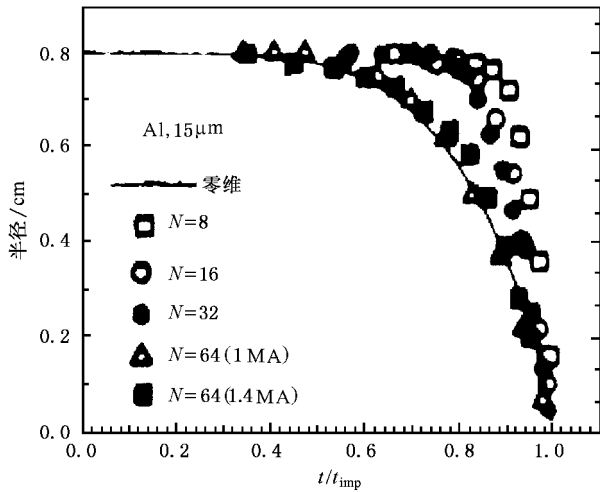


图 1 Al 丝阵(8,16,32,64 根)内爆轨迹图

本文采用简化的物理模型——薄壳模型,在脉冲功率加速器条件一定时,分析内爆时间、丝阵线质量、丝阵半径、内爆最大动能,以及动能与内爆产生 K 壳层发射所需最小能量之比与负载电流参数的关系,寻找最佳金属丝阵负载参数,提出了一套设计思路,为 Z-pinch 实验参数的选取提供参考.同时指出薄壳模型的计算结果可以为二维和三维辐射磁流体学数值模拟提供初始条件,所以此工作也是一维和二维数值模拟研究的基础之一.

2. 薄壳模型与粗估方法

实验^[8,11]已经证明,金属丝阵 Z-pinch 内爆在丝根数多的情况下,测量得到的内爆轨迹与零维模型模拟结果基本一致.所以薄壳模型在一定条件下可以用于讨论分析金属丝阵 Z-pinch 内爆运动的规律性.

实验上测量到的通过负载(金属丝阵)的电流,可以用等效电路模型驱动薄壳内爆来近似.等效电路方程可以写成

$$V_{oc}(t) = IZ_L + \frac{d}{dt}[(L_0 + L)I], \quad (1)$$

式中 $V_{oc}(t)$ 是脉冲功率加速器的输出电压, Z_L 是脉冲功率输出系统线路阻抗,也称为特征阻抗,负载电阻与特征阻抗相比可以略去, L_0 是传输线特征电感,可以证明金属丝阵负载电感 $L(t)$ 为^[12]

$$L(t) = \frac{\mu_0(N-1)}{2\pi N} \ln\left(\frac{r_i}{r(t)}\right), \quad (2)$$

式中 l 是金属丝阵的高, N 是丝阵的丝根数, r_i 是

丝阵的初始半径, r 是 t 时刻金属丝阵形成的等离子体薄壳的外半径.

根据等效电路方程(1),可以得到加速器放电的能量方程为

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}L_0I^2 + \frac{1}{2}LI^2\right) + Z_L I^2 + \frac{1}{2}\frac{dL}{dt}I^2 = V_{oc}I, \quad (3)$$

式中等号左端包括了磁场能量、动能以及欧姆热,其中电阻项 dL/dt 对应负载动能的增加,

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}ml\left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right) = \frac{1}{2}\frac{dL}{dt}I^2, \quad (4)$$

式中 m 是丝阵线质量.对于这种简化情况,丝阵形成的等离子体薄壳在电流 $I(t)$ 通过负载所产生的磁场力作用下,向对称中心(z 轴)加速运动,即

$$m\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{1}{2}\frac{\partial L'}{\partial r}I^2(t), \quad (5)$$

式中 L' 是丝阵负载单位长度电感.由(2)式得到

$$\frac{\partial L'}{\partial r} = -\frac{N-1}{N}\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{1}{r}. \quad (6)$$

于是,方程(5)写成

$$m\frac{d^2r}{dt^2} = -\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{N-1}{N}\frac{I^2(t)}{r}. \quad (7)$$

(7)式就是描述金属丝阵负载 Z-pinch 内爆轨迹的薄壳模型.

若已知加在负载上的电压波形,将电路方程(1)与运动方程(7)联立,就可以得到内爆轨迹 $r(t)$ 、负载电流 $I(t)$ 、以及内爆速度 $v(t)$ 或内爆动能 E_k .

为了简单起见,假设负载上的驱动电流峰值 I_{max} 和电流上升时间 t_{up} (即 10%—90% I_{max} 对应的时间)已知,电流分布如图 2 所示.

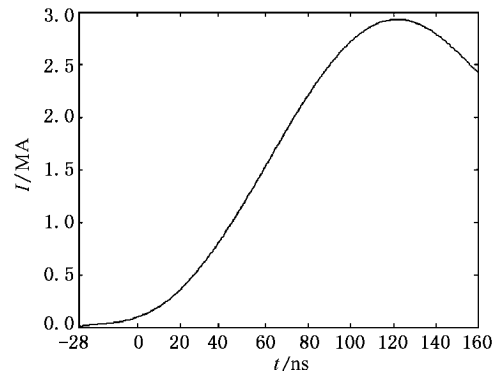


图 2 Z-pinch 负载电流波形

如果用 τ_0 表示电流达到峰值 I_{max} 的时间,引进归一化量 $T = t/\tau_0$, $\bar{I}(T) = \frac{I(t)}{I_{max}}$,在大丝数情况下方程(7)变成

$$x \frac{d^2 x}{dT^2} = - \Pi \bar{I}^2(t), \quad (8)$$

式中

$$\Pi = 10^{-2} \frac{I_{\max}^2 \tau_0^2}{m r_i^2}. \quad (9)$$

我们称 Π 为箍缩常数。(9)式中的丝阵线质量单位是 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 丝阵初始半径 r_i 以 cm 为单位, 负载电流以 MA 为单位, 时间单位用 ns , 内爆速度 v 以 cm/s 为单位. 显然在相同电流波形条件下, 两组内爆负载参数 (m, r_i) 不同时, 只要箍缩常数 Π 相同, 则它们的内爆轨迹和内爆时间就相同. 对一定的脉冲功率加速器, 箍缩常数 Π 具有一定取值范围, 所以对一个 Z-pinch 装置而言, 如果已知 Π 的数值范围, 就可以选择负载参数与驱动电流之间合理匹配.

另外, 如果将方程 (7) 等号右端的 $I^2(t)$ 用电流平方的平均值近似, 即

$$I^2(t) \approx \alpha I_{\max}^2, \quad (10)$$

则

$$\frac{dv}{dt} = - \frac{\alpha \mu_0 I_{\max}^2}{4\pi m r}. \quad (11)$$

由 (11) 式很容易得到内爆速度的粗估公式^[13]为

$$v = - I_{\max} \sqrt{\frac{\alpha \mu_0}{2\pi m} \ln\left(\frac{r_i}{r}\right)}, \quad (12)$$

以及内爆动能

$$E_k = \frac{\alpha \mu_0 l I_{\max}^2}{4\pi} \ln\left(\frac{r_i}{r_{\min}}\right), \quad (13)$$

参数 α 是小于 1 的无量纲电流形状因子, 定义为

$$\alpha = \frac{1}{I_{\max}^2 \tau_0} \int_0^{\tau_0} I^2(t) dt. \quad (14)$$

若取 $I(t) \approx I_{\max} \sin^2\left(\frac{\pi t}{2\tau_0}\right)$, 则 $\alpha \approx 0.375$. 实际上, 在 Z-pinch 实验中电流波形不同, α 值不同. 人们通常利用 (13) 式粗估内爆动能^[14] (13) 式中 r_i/r_{\min} 称之为箍缩等离子体半径收缩比, 这个比值越大表明等离子体被压缩越紧.

Z-pinch 内爆的最终目标是产生强 x 射线辐射. 内爆等离子体被箍缩到中心轴附近停滞 (stagnation), 高温高密度等离子体就是在停滞时辐射出很强的 x 射线, 即内爆坍塌伴随强辐射, 所以整个箍缩过程由电磁能转换成动能、内能, 进而转换成辐射能. 人们始终希望能够获得高产额的 x 射线辐射源. 早在 20 世纪 90 年代初, Deeney 和 Thornhill 等人^[15, 16] 就提出一个基本判据, 到目前为止人们仍在沿用^[9], 即为了从 Z-pinch 内爆中获得 K 壳层 x 射

线辐射, 电磁能转换给每个离子的最大动能必须大于每个离子的一个最小能量 E_{\min} , 这个最小能量可以确保加热和电离负载, 使得 Z-pinch 等离子体一旦在中心轴附近停滞, 并且动能被完全热化时, 等离子体进入 K 壳层激发状态, 所以可以认为 Z-pinch 内爆达到激发 (辐射) 时, 每个内爆离子所具有的最小能量是电离能和等离子体热能量之和^[15], 即

$$E_{\min} = 1.012 Z^{3.662}. \quad (15)$$

这个经验定标律只适用原子序数 $Z \leq 36$ 的材料, 另外, 它没有计及电离到 K 壳层过程中碰撞引起的辐射损失. 尽管如此, 作为一个粗估公式进行定性分析已足够. 由此得到内爆产生 K 壳层辐射的必要条件为

$$\eta \equiv \frac{K_{\text{ion}}}{E_{\min}} > 1 \quad (16)$$

或

$$\eta = \frac{K_k}{\epsilon_{\min}} > 1, \quad (17)$$

K_{ion} 是每个离子的动能, 而 ϵ_{\min} 是负载等离子体的最小能量,

$$\epsilon_{\min} = 9.7642 \times 10^{-5} \frac{ml}{A} Z^{3.662} \quad (\text{kJ}), \quad (18)$$

式中 A 和 Z 分别是负载材料的原子量和原子序数, 线质量 m 的单位是 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 负载高 l 以 cm 为单位, 将 (13) 和 (18) 式代入 (17) 式, 便可以对 Z-pinch 内爆品质进行初步判断.

根据箍缩常数 Π 的特性, 以及内爆速度和内爆动能的粗估方程 (12) (13) 和 (17), 我们对 S-300 装置^[17] Z-pinch 实验的金属丝阵负载进行了定性分析, 提供了满足一定条件的设计方案, 供实验参考.

下一节将对金属丝阵负载进行基本物理分析, 用薄壳模型计算结果给出内爆动力学规律性描述, 介绍金属丝阵负载设计的优化考虑.

3. 计算结果与分析

本文采用薄壳模型即方程 (8) 确定金属丝阵 Z-pinch 内爆轨迹、内爆时间和内爆速度等参数. 大量实验证明, 用薄壳模型确定的内爆轨迹, 只在等离子体坍塌到它初始半径的 10% 时有效, 所以把方程 (8) 的边界条件定为 $x = 0.1$, 于是对应 $x_{\min} = 0.1$ 的时间定义为内爆时间 t_{imp} .

假设负载电流峰值 $I_{\max} = 2.9255 \text{ MA}$, 电流上升时间 $t_{\text{up}} = 80 \text{ ns}$, 电流波形如图 2 所示. 若取丝阵线

质量 $m = 400 \mu\text{g}/\text{cm}$, 丝阵半径 $r_i = 0.6 \text{ cm}$, 则得到内爆轨迹 $x(t)$ (如图 3 所示) , 内爆时间 $t_{\text{imp}} = 144.6 \text{ ns}$ 、最大内爆速度 $v_{\text{max}} = 2.97 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 及速度随时间的变化 (如图 4 所示) . 计算结果表明在内爆初期薄壳外边界几乎不动, 在达到内爆时间的 80% 时, 负载只向内箍缩了初始半径的 20% , 而紧接着出现一个迅速变化, 速度快速增加的阶段. 通常称内爆前期 (80% t_{imp}) 为 Z-pinch 等离子体的“潜伏期”, 在潜伏期内丝阵要经历丝溶解、汽化、电离、加热等物理过程, 是能量积累过程, 也是不稳定性发展和被抑制的竞争过程, 用本文的薄壳模型完全无法描述. 一维磁流体动力学数值模拟可以给出此过程的能量交换^[18, 19] , 二维数值模拟可以描述潜伏期内内爆等离子体不稳定性发展的情况.

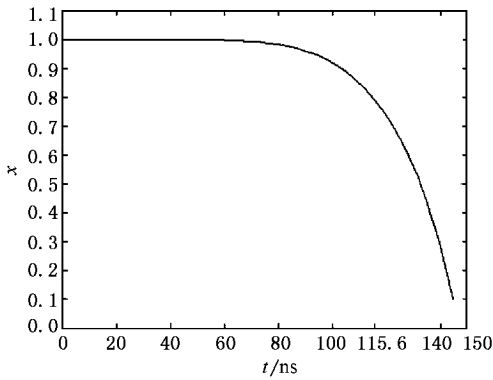


图 3 丝阵 (线质量 $m = 400 \mu\text{g}/\text{cm}$, 丝阵半径 $r_i = 0.6 \text{ cm}$) 内爆轨迹图

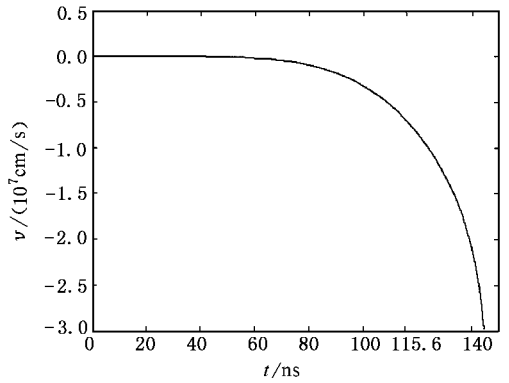


图 4 对应图 3 的内爆速度曲线图

显然, 在给定电流波形 I_{max} 、 t_{up} 和 τ_0 已知条件下, 内爆轨迹 $x(t)$ 、内爆时间 t_{imp} 和内爆速度 $v(t)$ 由丝阵线质量 m 和丝阵半径 r_i 确定. 下面考察两种不同丝阵半径 ($r_i = 0.6 \text{ cm}$ 或 $r_i = 0.4 \text{ cm}$) 的情况. 另外, Z-pinch 内爆特性敏感地依赖负载材料, 所以我们考虑两种不同材料的金属丝阵, 一种是 Al 丝阵, 另一种是 W 丝阵. 再者, 丝阵线质量大小, 不仅取决于所选用的材料, 而且与丝根数和丝的粗细也有关, 于是还要考虑不同丝根数、不同单丝半径的情况. 图 5 是不同材料 (Al, W) 在不同丝半径 R_0 条件下, 丝阵线质量 m 随丝根数 N 的变化. 丝阵的丝间隙 G_i 仅与丝阵半径 r_i 和丝根数 N 有关, 所以不管用什么丝阵材料, 也不管丝半径 R_0 是多少, 只要 r_i 一定, 丝根数 N 越大, 间隙 G_i 就越小, 如图 6 所示.

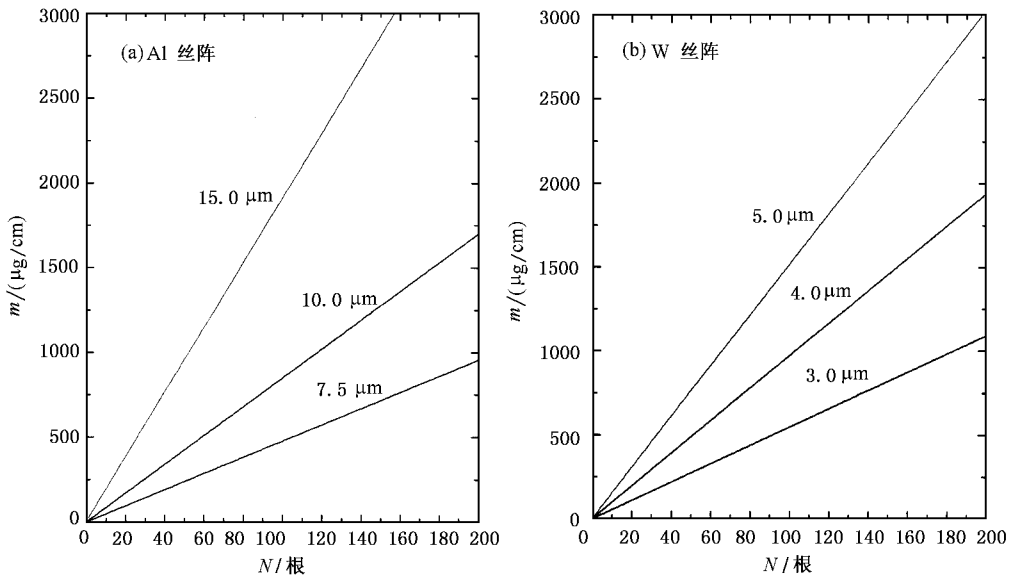


图 5 不同丝半径 R_0 条件下丝阵线质量 m 与丝根数 N 的关系

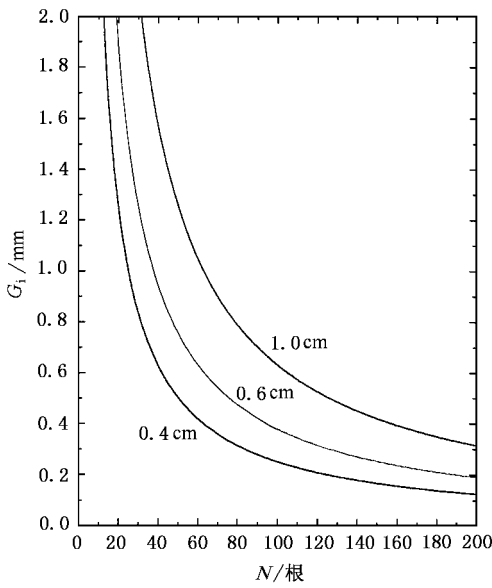


图 6 不同丝阵半径 r_i 条件下丝间隙 G_i 与丝根数 N 的关系

对下列 4 种情况的 Al 丝阵内爆进行了计算：

- (1) 丝阵半径 $r_i = 0.6 \text{ cm}$, Al 丝半径 $R_0 = 10 \text{ }\mu\text{m}$ ；
- (2) $r_i = 0.6 \text{ cm}$, $R_0 = 15 \text{ }\mu\text{m}$ ；
- (3) $r_i = 0.4 \text{ cm}$, $R_0 = 10 \text{ }\mu\text{m}$ ；
- (4) $r_i = 0.4 \text{ cm}$, $R_0 = 15 \text{ }\mu\text{m}$ 。

计算结果如图 7 至图 9 所示。图 7 是不同丝阵半径和不同丝阵半径条件下，达到最小压缩半径的内爆速度 v_{max} 随丝阵线质量 m 的变化，丝阵线质量 m 越大，速度 v_{max} 越低， m 越小， v_{max} 就越大；如果丝阵质量相同，在 m 小的情况下，丝阵半径 r_i 越大，内爆速度 v_{max} 也越大，而丝阵半径减小， v_{max} 也减小。但在 m 较大 ($m > 900 \text{ }\mu\text{g/cm}$) 情况下，丝阵半径的改变，没有引起内爆速度的明显差别。

图 8 是对应图 7 参数的最大动能 E_k - m 曲线，

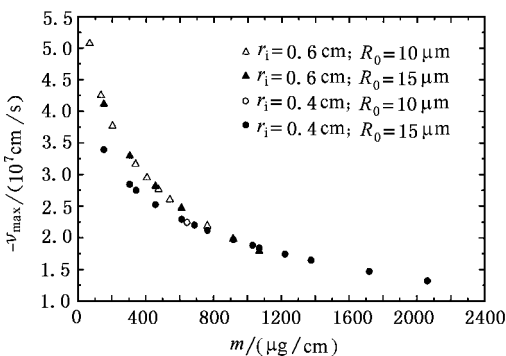


图 7 最大内爆速度 v_{max} 随丝阵线质量 m 的变化曲线

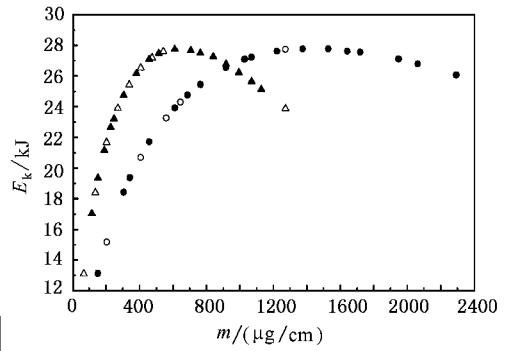


图 8 最大动能 E_k 随丝阵线质量 m 的变化曲线 图注同图 7

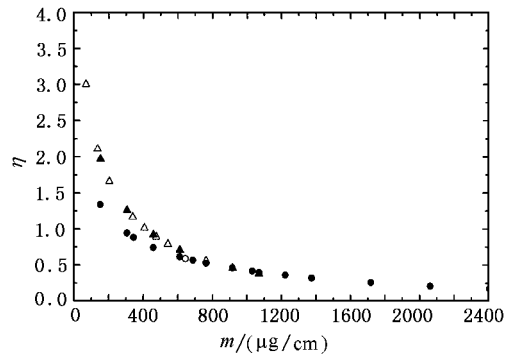


图 9 动能 E_k 与最小能量 ϵ_{min} 的比值 η 随丝阵线质量 m 的变化曲线 图注同图 7

可见丝阵半径 r_i 不同，但丝阵质量相同时，获得内爆动能有明显差别。在丝阵线质量 m 较小时，丝阵半径 r_i 大的内爆动能比 r_i 小的要大，而丝阵线质量 m 较大时，情况正好相反。那么内爆负载的参数 (m, r_i) 是不是取对应动能最大值就最好呢？现在来讨论动能与最小能量 ϵ_{min} 的比值 η 随 m 的变化曲线（见图 9），并对照图 8 发现动能 E_k 峰值对应的 η 不是最佳值，前面已经讨论过， $\eta > 1$ 是 K 壳层发射的必要条件， η 越大也许会越好。在本文的电流波形条件下，当丝阵半径 $r_i = 0.6 \text{ cm}$ 时，满足 $\eta > 1$ 的丝阵线质量要求其 $m \leq 400 \text{ }\mu\text{g/cm}$ ；而 $r_i = 0.4 \text{ cm}$ 时， $m \leq 300 \text{ }\mu\text{g/cm}$ ，才有可能满足 $\eta > 1$ 。另外，由 (16) 式可知，在金属丝阵材料确定 (A, Z 都已知) 时， η 的性质与丝阵质量没有直接关系，而它对内爆速度 v_{max} 很敏感，对 η 的要求，实质上是对内爆速度 v_{max} 的要求。计算表明，Al 丝阵内爆若要达到 K 壳层发射，辐射坍塌开始时等离子体的速度必须大于 $3 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 。虽然对 W 丝阵我们无法用 (16) 或 (17) 式来判断是否满足 K 壳层发射的必要条件，但实验上已经证

明, W 丝阵内爆达到 K 壳层发射速度 v_{\max} 必须大于 5×10^7 cm/s.

Saturn 装置上固定丝阵半径 r_i , 改变 Al 丝根数的实验^[9]证明, 随丝根数 N 的增加, 丝阵质量增加, 但内爆速度 v_{\max} 下降, η 值也随之明显减小, 参见文献 9 中表 I. 另外, Saturn 装置的 Al 丝阵实验^[20]还证明, 当丝阵半径 r_i 固定, 丝根数及丝间隙不变时, Al 丝越粗, 丝阵质量就越大, 这时随丝阵质量增加, 不仅 v_{\max} 减小, η 下降, 而且内爆时间增加, 参见文献 20 中图 21, 这些结果与本文从薄壳模型得到的结论一致.

为了有效地将脉冲功率加速器储能转换成内爆等离子体动能, 应该选择箍缩材料(负载)的最佳质量. 所谓最佳质量的含义是应该使内爆坍塌(collapse)发生在电流达到峰值后稍晚一点时刻. 如果负载质量太大, 在内爆坍塌发生之前电流脉冲就已经结束, 但如果质量太小, 内爆坍塌已经发生而电流还没有达到峰值. 这两种情况电磁能都没有得到充分利用, 因而转换效率都较低. 另外, 最佳质量的含义还应该包括在同等条件下, 能使脉冲功率加速器提供的电磁能最大限度地转换成 x 射线辐射能.

在薄壳模型中 mr_i^2 这个量很重要. 如果电流波形不变, mr_i^2 增加, 内爆时间 t_{imp} 也增加, 如图 10 所示. 但随 mr_i^2 增加, 箍缩常数 Π 减小, 而且变化趋于平缓, 如图 11 所示. 有意思的是虽然 4 组参数不同, 但是只要 mr_i^2 相同, 它们就有相同的内爆时间, 相同的箍缩常数 Π , 而且 4 组 t_{imp} 随 mr_i^2 的变化也完全一样, 这是由于确定的电流波形所致. 实验上证明要使 Z-pinch 内爆达到高效率, 必须选择负载的最佳质量, 这个质量的选择原则之一就是使内爆时间 t_{imp} 最好近似等于或略大于电流达到峰值的时间 τ_0 . 所以从图 10 很容易确定出对应 $t_{\text{imp}}/\tau_0 = 1.0-1.25$ 的 $mr_i^2 = 0.05-0.2$ mg·cm, 再由图 11 的结果给出箍缩常数 Π 的变化范围是 10—25, Π 的范围确定后, 利用方程(8)就可以对脉冲功率加速器参数和负载参数进行匹配选择.

例如, 可以从图 12 给出的 mr_i^2 随丝根数 N 的变化曲线上, 找到对应 $mr_i^2 = 0.05-0.2$ 的丝根数 N 的选取范围(1)和(4): $N = 18-64$ 根(2): $N = 8-30$ 根(3): $N = 36-150$ 根, 有了丝根数变化范围, 对一定的丝阵半径 r_i , 我们希望丝间隙范围是 $0.4 \text{ mm} \leq G_i \leq 1.4 \text{ mm}$. 于是 $r_i = 0.6 \text{ cm}$ 时, 满足丝间隙

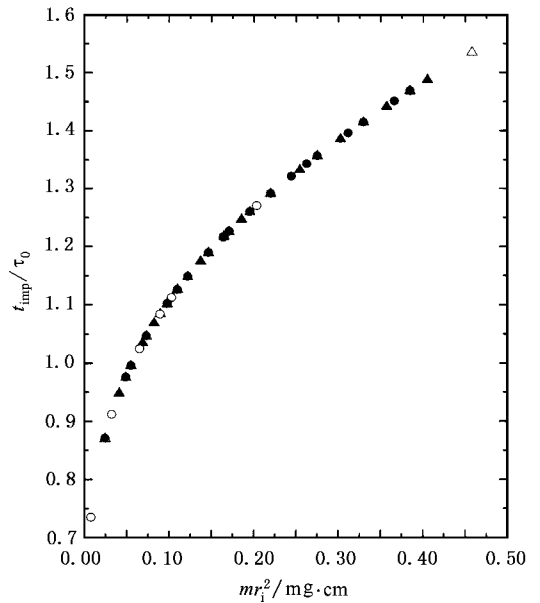


图 10 归一化内爆时间 t_{imp} 与 mr_i^2 关系曲线 图注同图 7

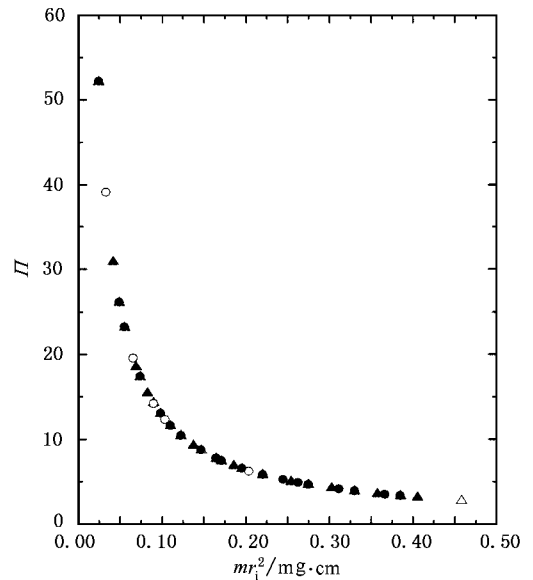


图 11 箍缩常数 Π 与 mr_i^2 关系曲线 图注同图 7

范围的 N 要大于 27 根. $r_i = 0.4 \text{ cm}$ 时, 要求 N 大于 18 根. 所以考虑了丝间隙的因素后(1): $N = 28-64$ 根(2): $N = 28-30$ 根(3): $N = 36-62$ 根(4): $N = 18-62$ 根. 确定了每组(r_i 和 R_0)的丝根数后, 很容易找到 Al 丝阵线质量范围(1): $m = 237.5-542.87 \mu\text{g/cm}$ (2): $m = 534.4-572 \mu\text{g/cm}$ (3): $m = 305-526 \mu\text{g/cm}$ (4): $m = 343.5-1183.3 \mu\text{g/cm}$. 但是, 丝阵线质量越大, 内爆速度越低, 而所需要的最

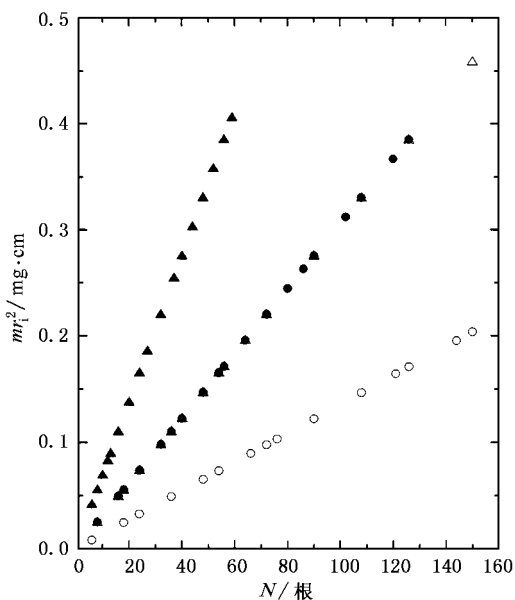


图 12 丝阵因子 m_i^2 随丝根数 N 的变化曲线 图注同图 7

小能量 ϵ_{\min} 越大. 由图 9 可以看到, 对 $r_i = 0.6$ cm 的 Al 丝阵, 要满足内爆条件 $\eta > 1$, 则线质量 $m < 400$ $\mu\text{g}/\text{cm}$, 于是又进一步限制了 m 的范围 (1): $m = 237.5\text{—}400$ $\mu\text{g}/\text{cm}$ (2): m 的范围超出了 $\eta > 1$ 所要求的范围, 所以可能不会有 K 壳层发射, 对 $r_i = 0.4$ cm 的 Al 丝阵, 满足 $\eta > 1$ 的线质量 $m < 300$ $\mu\text{g}/\text{cm}$, 显然只有在 (3) 中 $N = 36$ 根的丝阵内爆才有可能满足 K 壳层发射的条件, 而 (3) 中 $N > 36\text{—}62$ 根和 (4) 中 $N > 18\text{—}62$ 根, 即使是在能够形成等离子体壳的丝间隙范围内, 质量也还是太大, 无法保证箍缩产生足够大的速度, 以确保除有足够的电离能、热化能外还能产生 K 壳层辐射. 总之, 考虑最小能量 ϵ_{\min} 和 $\eta > 1$, 或足够大的内爆速度 v_{\max} , 可以确定丝阵线质量 m 的上限, 而考虑丝间隙的影响后, 又可以确定丝阵线质量的下限. 从薄壳模型计算结果得到, $m r_i^2$ 相同 (虽然两组的 m, r_i 不同) 时, 内爆时间 t_{imp} 不变, 内爆动能 E_k 也不变, 所以 m 小, 对应 v_{\max} 大, 而且所需最小能量低, ϵ_{\min} 小, 于是 η 大, 只要能够确保足够的丝间隙, m 小的情况要比 m 大的情况好. Double-EAGLE 装置上的 Al 丝阵实验证实了这一结论, 参见文献 [9] 中表 I 和表 III 所给出的结果.

利用实验上已经得到的结论作为丝阵负载优化设计的判据, 上述讨论以 Al 丝阵为例, 选取了 4 组不同的丝阵半径 r_i 和丝半径 R_0 , 详细分析了丝阵线质量 m 、丝间隙 G_i 、内爆时间 t_{imp} 、内爆速度 v_{\max} 以及动

能与最小能量之比 η 等之间的关系, 给出了在一定电流波形条件下, 适合 $t_{\text{imp}} \geq \tau_0$, $0.4\text{mm} \leq G_i \leq 1.4$ mm, 同时 $v_{\max} \geq 3 \times 10^7$ cm/s, $\eta \geq 1$ 的最佳负载参数, 即丝阵半径 $r_i = 0.6$ cm, 丝半径 $R_0 = 10$ μm 的 28—48 根 Al 丝组成的丝阵负载, 能同时满足上述条件.

以上详细介绍了 Al 丝阵内爆参数的计算结果和分析. 对 W 丝阵不能用 (16) 或 (17) 式估算最小能量, 原因是 (18) 式是由实验结果和理论分析得到的定标公式, 只对 $Z \leq 36$ 是正确的, 对高 Z 介质 W 不能直接外推. 但是对 W 可以用最大内爆速度 v_{\max} 来选择优化参数, 从表 1 中可看出在本文所给驱动条件下, 内爆速度 v_{\max} 不会超过 5×10^7 cm/s, 所以表 1 中所列 W 丝阵负载内爆也许根本观察不到明显的 K 壳层发射.

综上所述, 用薄壳模型可以定性分析金属丝阵内爆参数与脉冲功率加速器参数的关系. 在选择负载参数时不仅要考虑装置参数水平 (Π)、丝间隙 (G_i)、内爆时间 (t_{imp})、内爆速度 (v_{\max}) 以及最小能量 (E_{\min}) 或 η 等因素, 而且还要考虑它们之间的相互制约, 只有综合考虑各方面因素后, 才能确定最佳丝阵参数 r_i 和 m , 使其能够形成较好的内爆等离子体壳, 使内爆坍塌发生在电流达到峰值稍后的一个恰当的时刻, 并且有足够大的内爆速度 v_{\max} , 使得内爆动能超过丝阵内爆产生等离子体过程的电离能和维持一定温度的内能之和, 以具备发生 K 壳层辐射的条件. 考虑到这些因素所选择的所谓最佳参数才有可能获得较高的 x 射线辐射产额.

4. 结 论

本文采用简化的物理模型——薄壳模型, 分析了金属丝阵内爆运动规律, 计算了内爆轨迹、内爆时间以及内爆速度, 定性分析了内爆动力学规律, 分析了脉冲功率加速器提供到负载上的电流与丝阵负载参数之间的关系, 得到了与实验结果一致的结论. 丝阵半径 r_i 和丝半径 R_0 固定时, 改变丝根数 N , 随 N 增加, 丝阵质量增加, 内爆速度减小, η 值也随之明显减小; 仍然不改变丝阵半径 r_i , 丝根数 N 也不变, 但丝半径 R_0 变化, R_0 越大, 丝阵质量就越大, 不仅 v_{\max} 减小, η 下降, 而且内爆时间 t_{imp} 也增加; $m r_i^2$ 相同时, 内爆时间 t_{imp} 相同, 内爆动能也相同, 所以 m 小, r_i 大的负载内爆速度 v_{\max} 大, 所需最



表 1 用薄壳模型计算 W 丝阵内爆的结果

设计参数 \ 计算值	$m(\mu\text{g}/\text{cm})$	$mr_i^2/\text{mg}\cdot\text{cm}$	N	G_i/mm	x_{\min}	t_{imp}/ns	$v/(10^7\text{ cm/s})$	E_k/kJ	t_{imp}/τ_0	Π
负载电流和丝阵参数 :	100	0.0360	18	2.0543	0.0998	113.11	4.6165	15.9841	0.9272	35.3849
$I_{\max} = 2.9255\text{ MA}$	120	0.0432	22	1.7120	0.1003	116.57	4.3924	17.3639	0.9555	29.4874
$t_{\text{up}} = 80\text{ ns}$	140	0.0504	26	1.4674	0.1001	119.63	4.2106	18.6156	0.9806	25.2749
$\tau_0 = 122\text{ ns}$	160	0.0576	29	1.2840	0.1003	122.38	4.0501	19.6840	1.0031	22.1155
$\alpha = 0.3203$	180	0.0648	33	1.1413	0.0999	124.90	3.9147	20.6886	1.0238	19.6583
$r_i = 0.6\text{ cm}$	200	0.0720	37	1.0272	0.1000	127.22	3.7890	21.5348	1.0428	17.6924
$l = 1.5\text{ cm}$	220	0.0792	40	0.9338	0.1002	129.38	3.6745	22.2782	1.0605	16.0840
$R_0 = 3\ \mu\text{m}$	240	0.0864	44	0.8560	0.1002	131.41	3.5718	22.9640	1.0771	14.7437
	260	0.0936	48	0.7901	0.1000	133.33	3.4790	23.6017	1.0929	13.6096
W 丝参数 :	280	0.1008	51	0.7337	0.0999	135.15	3.3921	24.1633	1.1078	12.6374
$Z = 74$	300	0.1080	55	0.6848	0.1001	136.88	3.3090	24.6363	1.1220	11.7950
$A_0 = 183.85$	320	0.1152	59	0.6420	0.1000	138.54	3.2335	25.0933	1.1356	11.0578
$\rho = 19.273\text{ g/cm}$	340	0.1224	62	0.6042	0.1000	140.13	3.1613	25.4842	1.1486	10.4073
	360	0.1296	66	0.5707	0.1001	141.66	3.0930	25.8300	1.1611	9.8291
	380	0.1368	70	0.5406	0.1000	143.14	3.0298	26.1621	1.1733	9.3118
	400	0.1440	73	0.5136	0.0999	144.57	2.9693	26.4502	1.1850	8.8462
	450	0.1620	83	0.4565	0.0998	147.96	2.8300	27.0300	1.2128	7.8633
	500	0.1800	92	0.4109	0.1000	151.12	2.7031	27.4003	1.2387	7.0770
	550	0.1980	101	0.3735	0.1001	154.10	2.5889	27.6474	1.2631	6.4336
	600	0.2160	110	0.3424	0.1000	156.93	2.4826	27.7349	1.2863	5.8975
	650	0.2340	119	0.3161	0.1001	159.63	2.3859	27.7510	1.3084	5.4438
	700	0.2520	128	0.2935	0.1001	162.22	2.2963	27.6832	1.3297	5.0550
	750	0.2700	138	0.2739	0.1000	164.72	2.2138	27.5676	1.3502	4.7180
	800	0.2880	147	0.2568	0.0999	167.14	2.1408	27.4981	1.3700	4.4231
	850	0.3060	156	0.2417	0.0999	169.48	2.0666	27.2266	1.3892	4.1629
	900	0.3240	165	0.2283	0.1001	171.75	1.9960	26.8921	1.4078	3.9317
	950	0.3420	174	0.2162	0.1000	173.97	1.9305	26.5537	1.4260	3.7247
	1000	0.3600	184	0.2054	0.1000	176.14	1.8687	26.1903	1.4438	3.5385
	1100	0.3960	202	0.1868	0.1000	180.34	1.7539	25.3784	1.4782	3.2168

小能量 E_{\min} 低, 于是 η 大, 只要有较小的丝间隙, m 小 r_i 大的负载内爆就会比 m 大 r_i 小的好.

本文所叙述的分析方法可以用于 Z-pinch 实验方案设计. 基于这种思想我们进行了 S-300 装置金属丝阵负载方案设计. 这里需要进一步指出两点: 第一, 每个装置都有其各自优化的箍缩常数 Π , 装置不同, 因为驱动能力不同, 电流上升时间不同, 所以

Π 的参数范围不同, 但对同一个装置而言, 箍缩常数 Π 的范围已知, 它所能驱动的金属丝阵负载与负载上最大电流和电流峰值时间或内爆时间的关系就是一定的, 于是通过负载的电流峰值减小时, 要达到内爆时间 $t_{\text{imp}} \geq \tau_0$, 并且要有较小的丝间隙, 同时内爆速度还要足够大, 或 $\eta > 1$, 设计时负载质量就要相应减小, 或减小丝阵半径. 第二, 薄壳模型虽然是

一个非常简化的物理模型,但在一定条件下,也能与实验符合很好,正如文献 [11] 所指出,就 Al 丝阵而言,丝间隙 $G_i < 0.78 \text{ mm}$ 的丝阵内爆轨迹用薄壳模型就能很好地模拟. 另外,它所反映的物理规律,如内爆轨迹、内爆速度及内爆时间,与一维、二维数值模拟结果基本一致,反映了基本的力学特征.

薄壳模型除了在设计金属丝阵负载时作为一种粗估的方法外,它的另一个重要用途就是可以将其计算结果作为 Z-pinch 内爆等离子体二维辐射磁流体力学数值模拟的初始条件. 先在实验上测得电压波形,联立薄壳运动方程 (5) 和等效电路方程 (1),得

到负载电流波形 $I(t)$ 然后计算出丝阵运动到初始半径的 2% 时所对应的等离子体速度,于是 Z-pinch 内爆等离子体的二维数值模拟就以此时作为起点,令丝阵等离子体在 $0.02r_i$ 处有一个厚度 Δr ,初始速度就是用薄壳模型计算得到的 $r = 0.02r_i$ 处的速度 $v_0 \neq 0$; 为了符合薄壳位移到 $0.02r_i$ 时流过的电流,二维模拟的磁场初始条件应取相应的值;初始温度则由平衡方程给出,在模拟中这样的初始条件能很快与实际的温度、密度、速度以及磁场分布达到平衡.

- [1] Deeney C *et al* 1997 *Phys. Rev. E* **56** 5945
- [2] Porter J L *et al* 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 796
- [3] Pereira N R and Davis J 1988 *J. Appl. Phys.* **64** R1
- [4] Liu G, Lu K and Liang Z D 2000 *Acta Phys. Sci.* **49** 1520 (in Chinese) [刘 刚、卢 柯、梁志德 2000 物理学报 **49** 1520]
- [5] Chu G 1998 *Acta Phys. Sci.* **47** 1143 (in Chinese) [储 刚 1998 物理学报 **47** 1143]
- [6] Qin J Y, Bian X F and Wang W M 1998 *Acta Phys. Sci.* **47** 438 (in Chinese) [秦敬玉、边秀房、王伟民 1998 物理学报 **47** 438]
- [7] Qiu A C 2000 *Eng. Sci.* **2** 24 (in Chinese) [邱爱慈 2000 中国工程科学 **2** 24]
- [8] Sanford T W L *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 5063
- [9] Whitney K G *et al* 2001 *Phys. Plasmas* **8** 3708
- [10] Coverdale C A *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 65001
- [11] Lebedev S V *et al* 2001 *Phys. Plasmas* **8** 3734
- [12] Katzenstein J 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 676
- [13] Yang Z H 2001 *High Power Laser Particle Beams* **13** 209 (in Chinese) [杨震华 2001 强激光与粒子束 **13** 209]
- [14] Rudakov L I *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 3326
- [15] Deeney C *et al* 1991 *Phys. Rev. A* **44** 6762
- [16] Thornhill J W *et al* 1994 *Phys. Plasmas* **1** 321
- [17] Bakshaev Y L *et al* 1998 *Proceedings of the 12th International Conference on High Power Particle Beams* (Haifa) p244
- [18] Ning C, Yang Z H and Ding N 2003 *Acta Phys. Sci.* **52** 415 (in Chinese) [宁 成、杨震华、丁 宁 2003 物理学报 **52** 415]
- [19] Ning C, Yang Z H and Ding N 2003 *Acta Phys. Sci.* **52** 1650 (in Chinese) [宁 成、杨震华、丁 宁 2003 物理学报 **52** 1650]
- [20] Sanford T W L *et al* 1998 *Phys. Plasmas* **5** 3737

Optimization design of a wire array load for Z-pinch plasma implosion experiments^{*}

Ding Ning Yang Zhen-Hua Ning Cheng

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

(Received 7 March 2003 ; revised manuscript received 9 April 2003)

Abstract

The Z-pinch implosion from a wire array load is one of the ways to generate strong x-ray radiation . Under the conditions of a pulsed power accelerator , the x-ray radiation yield is determined by the initial diameter chosen and mass per length of a wire array load . In this paper , the effects of the mass , the array diameter and wire diameter , as well as the array material on the implosion time , the implosion trajectory , the implosion velocity and the kinetic energy are estimated by using an infinitely thin annular shell model . The relationship among the implosion time , the implosion kinetic energy and the initial array load parameters is analyzed . The optimized parameters of a wire array load are obtained under the given conditions of a driven current . Our conclusions by using the thin shell model are in agreement with the experimental results . Hence , the thin shell model can be used to design a wire array load of Z-pinch implosion experiment .

Keywords : Z-pinch implosion plasma , wire array load , thin shell model

PACC : 5255E , 5255D , 5250L , 6110F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10035030).