

文章编号: 1001-4322(2003)10-1015-04

等离子体喷射轴心铝丝的磁流体动力学模拟*

王刚华, 胡熙静, 阚明轩

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用一维拉格朗日磁流体力学(MHD)程序研究了等离子体喷射轴心单丝的物理现象, 给出了碰撞后铝丝受热膨胀和最后箍缩到轴心的整个过程图像, 指出这一设计方法能在轴心丝上获得较高的电流上升率和较高的轴心压缩密度, 并还给出了箍缩所得的功率和能量曲线。

关键词: 脉冲高功率; Z箍缩; 磁流体力学; Pinch on wire

中图分类号: O361

文献标识码: A

通过脉冲高功率放电到一根亚 mm μ m 级单丝来获得高密度箍缩, 用于 X 射线辐射源和达到热核聚变的方正引起科研人员的广泛兴趣。国外已有的二维计算模拟^[1]和爆炸丝实验显示: 从丝的表面消融释放出等离子体, 然后等离子体随电流上升将快速膨胀到很大的半径, 最终被重新压缩, 在重新压缩时出现了不稳定性, 从而抑制了均匀的高温高密等离子体的产生。中心未完全电离的冷丝虽然能减缓整个瓦解过程, 但是却无法抑制不稳定性的增长^[2]。

轴线上保持均匀性是产生辐射塌缩的首要条件, 这需要在能量传输和加热等离子体(电流增长率: $dI/dt = 10^{15} \text{A s}^{-1}$, 假定初始等离子体温度 T 小于 1eV) 时维持准 Bennett 平衡。初期的实验指出: 能量进入丝的时间 t_E 对不同的爆炸丝箍缩起着关键性的作用^[3]。为了得到高的上升电流脉冲, 减少能量进入丝的时间, 可以用一个大直径固体套筒或丝阵预先形成等离子体箍缩并喷射到小直径靶上来实现。适当适时的电流动力能提供持续的能量传输和很大的 dI/dt 值, 前期的研究(包括空心环壳对各种靶箍缩^[4]) 已经证实这样的箍缩迟滞过程是相当稳定的。在 GAEL 装置上进行的等离子体喷射轴心丝的实验也证实了, 较大直径圆柱预先形成的等离子体壳对轴心丝的喷射能有效地缩短辐射的上升前沿, 得到更强的辐射能量^[5]。本文对一维磁流体力学程序进行了改造, 使之能应用于这种 pinch on wire(POW) 结构箍缩的计算。

1 计算结果与分析

我们使用自己编制的一维双区 MHD 程序^[6]计算了 POW 构型从铝衬套气化形成等离子体, 然后在电流的箍缩作用下箍缩到轴心铝丝(或铝等离子体) 上并对其进行压缩的整个箍缩过程。装置参数使用美国洛斯·阿拉莫斯实验室 Pegasus^[7] 装置参数。即电压 $V = 88.0 \text{kV}$, 电容 $C = 216 \mu\text{F}$, 电阻 $R = 0.30 \text{m}\Omega$, 总电感 $L = 36 \text{nH}$, 电容器总储能为 1MJ。

POW 结构靶如图 1 所示, 外层衬套的半径为 5cm, 厚度为 288.5nm, 轴心丝的直径为 0.1mm, 高度为 2cm, 均为铝材料。计算初始时刻回路电流 $I = 0$, 靶的运动速度 $v = 0$, 衬套及其丝的初始温度 $T = T_0 = 300.0 \text{K}$, 密度 $\rho_0 = 2.683 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。在电容器放电的前一段时间, 由于轴心丝的半径远远小于外衬套半径, 这样其电阻将远大于外衬套电阻, 电流将主要集中分布于外衬套, 为了便于计算我们假定在等离子体碰撞到轴心铝丝之前轴心丝上没有电流, 这样碰撞之前计算区域就只有外部衬套, 大大减少了计算时间。

箍缩过程中界面位置随时间的变化如图 2 所示, 可以看到外筒在电流上升的前期, 外边界上的磁压还不足以抵抗由于欧姆加热作用产生的热膨胀压力, 所以外边界在前期向外膨胀, 随着磁压的作用加强, 欧姆加热产生的铝等离子体内部压力无法与磁压抗衡, 外衬套迅速向轴心

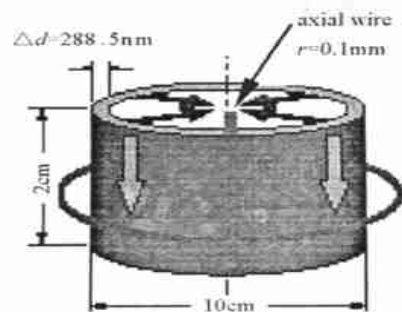


Fig. 1 Schematic of POW target

图 1 等离子体喷射轴心铝丝模型示意图

* 收稿日期: 2003-03-14; 修订日期: 2003-05-09

基金项目: 中国工程物理研究院行业科学技术研究基金资助课题(20020207)

作者简介: 王刚华(1976-), 男, 硕士, 从事 Z-pinch 的理论和数值模拟研究; 绵阳 919 信箱 105 分箱。

箍缩,在 $t_c = 1.655\mu\text{s}$ 时刻与轴心丝碰撞。图 3 是碰撞后轴线附近的放大图,可以看到,外衬套形成的等离子体高速喷射到轴心铝丝上以后,铝丝内部产生强烈的冲击波使得丝产生一向内部轴心的运动。然而这一运动方向很快被改变,因为碰撞后电流快速进入丝内部,轴心丝受到冲击波和焦耳加热作用,将向外膨胀,并在大约 90ns 的时间内半径膨胀为 t_c 时刻的 3 倍左右。与此同时,等离子体内部的热压力由于过分膨胀而减小,并且电流穿透等离子体内部而产生的磁压迅速增强,此外外衬套对轴心等离子体保持持续压缩,在 $1.75\mu\text{s}$ 的时刻,等离子体再一次被改变运动方向,并在 30ns 内压缩到轴线附近 0.046mm 处。

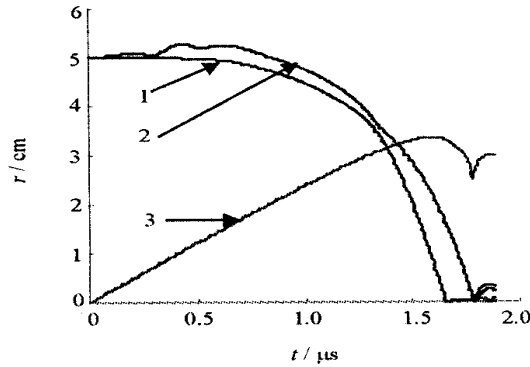


Fig. 2 Position of plasma vs time.

(1: inner boundary, 2: outer boundary, 3: current in the circuit)

图 2 等离子体界面的位置随时间的变化

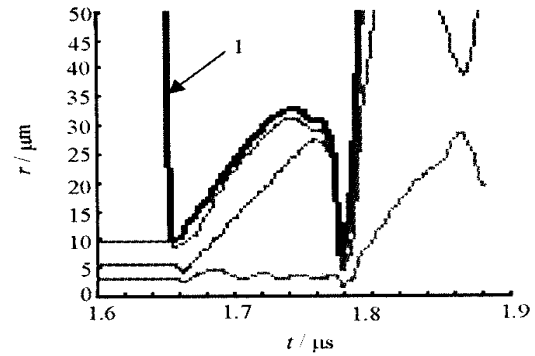


Fig. 3 Liner radius vs time.

(1: inner boundary of outer liner)

图 3 碰撞后轴线附近的示意图(线 1 为外筒内边界,其它曲线为轴心丝上的点)

碰撞以后丝上的电流变化曲线如图 4 所示,在 $1.8\mu\text{s}$ 以前,即铝丝等离子体被箍缩到轴心之前,丝上面分配的电流量绝对值较小,只有 34kA,与外衬套相比丝上面分配的电流量没有达到 MA 量级,远小于外衬套上分配的电流。这是因为丝的半径很小 ($r = 0.1\text{mm}$),而外衬套的半径相对较大 (cm 量级),又由于柱状导体其电阻的大小与半径的平方成反比,所以丝的电阻相对很大,故在丝上看不到很大的电流。

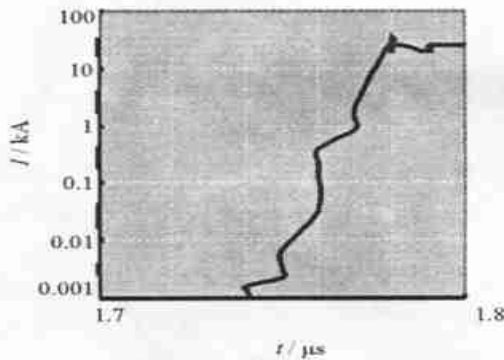


Fig. 4 Current on axial wire vs time

图 4 丝上的电流随时间的变化

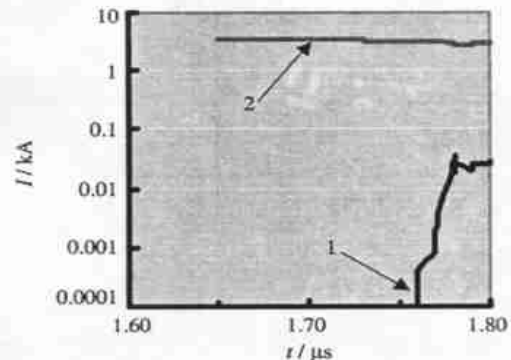


Fig. 5 Current distribution between outer liner and axial wire

(1: axial wire, 2: outer liner)

图 5 外套筒与丝上的电流随时间的变化

然而,从图 5 可以看到,碰撞以后,丝上的电流上升速度仍然是很快的,达到了 $3.0 \times 10^{12}\text{A s}^{-1}$ 以上,这是由于碰撞时外筒的半径已经很小,轴心丝与外筒的截面积具有可比性,碰撞后外筒携带的大电流直接在轴心丝与外筒上进行了分配。对于单丝箍缩的情况,要达到这样高的上升速度,在技术上是很难实现的,因为对于 0.1mm 的丝而言,其电阻很大,因此,很难将大电流在很短的时间里加到丝上去,显然,计算中的特殊的 POW 结构为解决这一问题提供了可供参考的途径。

图 6 和图 7 分别是等离子体质量密度、运动速度在轴心丝等离子体箍缩到轴心这一过程中的空间分布情况。与文献[8]中的密度空间分布图像不同,图 6 所示的密度的最高区域出现在离轴一定距离处,而轴心有一个相对较低的密度区,这可能是由于在压缩到轴心之前外衬套与轴心丝已有一个碰撞过程,撞击所产生的冲击波在等离子体内传播造成的。图 6 还存在一个很窄的高密度区,其密度值达到了 $2 \times 10^4\text{kg/m}^3$,远高于常温下铝的密度,这种高密度的产生可能与计算时假定碰撞前铝丝的初始状态为常温常密度这一条件有关。在实际

条件下,碰撞之前,轴心铝丝已经气化成较低密度的等离子体,最后压缩时也就得不到如此高密度的箍缩结果。在内爆过程中,等离子体壳层的运动方向也并不总是一致的,内爆等离子体碰轴以后,由于轴心为固壁条件,最接近轴心的内层等离子体开始改变运动方向,向外飞溅,并与邻近的运动方向相反的等离子体壳层碰撞,因此各壳层运动方向改变的時刻不相同。

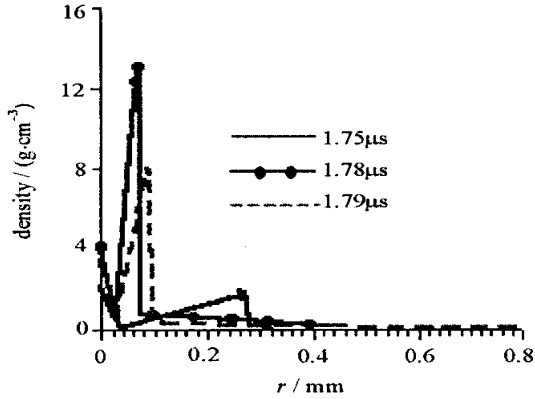


Fig. 6 Spatial distribution of mass density at different time

图 6 不同时刻质量密度的空间分布

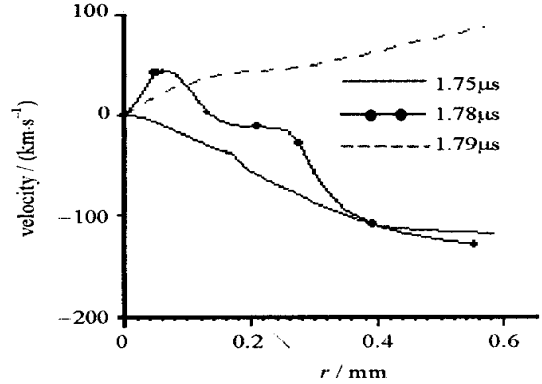


Fig. 7 Spatial distribution of plasma velocity at different time

图 7 不同时刻等离子体速度的空间分布

图 8 和图 9 分别为箍缩的功率和辐射能量曲线,在碰轴以前,等离子体的温度不高,X射线的辐射也就很弱;当等离子体箍缩到轴心时,X射线的辐射功率达到了大约 600 GW;等离子体运动方向改变向外飞溅时,辐射功率很快下降。等离子体停滞阶段(约 1ns),辐射出的 X 射线能量约为 6.5kJ。尽管我们的一维程序无法描述箍缩过程中的不稳定性的影响,但是计算的结果表明,这种特殊的结构,与没有轴心铝丝的单衬套箍缩^[9]时相比,确实能产生更高的脉冲功率,得到更强的辐射能量。

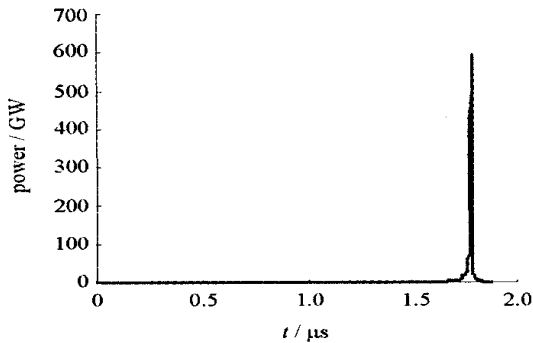


Fig. 8 Output power of X-ray

图 8 功率随时间的变化

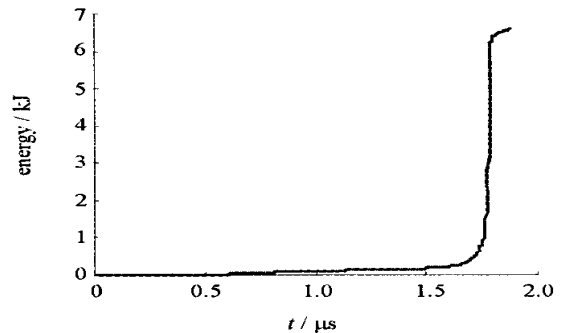


Fig. 9 Output energy vs time

图 9 辐射总能量随时间的变化

2 结 论

描述了预先形成的大直径圆筒等离子体喷射轴心铝丝的物理过程;给出了等离子体密度、速度等参量的一维空间分布,并对曲线进行了分析与解释;给出了箍缩的功率和辐射能量曲线,指出这一构型的箍缩能够获得较高的 X 射线辐射功率和能量。

参考文献:

- [1] Peterson D L, Bowers R L, Matuska W, et al. Insights and applications of two-dimensional simulations to Z-pinch experiments[J]. *Physics of Plasmas*, 1999, **6**(5): 2178—2184.
- [2] Lindemuth I R, McCall G H, Nebel R A, et al. Fiber ablation in the solid deuterium Z-pinch[J]. *Physics Review Letters*, 1989, **62**(3): 264—267.
- [3] Chuvatin A, Choi P, Etlicher B, et al. Composite pinch on GIT-4[A]. Digest of Technical Papers, Tenth IEEE International Pulse Power Conference (Cat. No. 95CH35833) [C]. 1995, **1**:106—111.
- [4] Wessel F J, Etlicher B, Choi P, et al. Implosion of an aluminum plasma jet onto a coaxial wire: a Z-pinch with enhanced stabilities and energy transfer[J]. *Physics Review Letters*, 1992, **68**(22): 3181—3184.

- [5] Chuvatin A, Choi P, Dumitrescu C. Spatial and temporal evolution of high-energy density plasma in the composite pinch on GIT-4 generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1997, **25**(2): 196—204.
- [6] 王刚华, 胡熙静. 双层衬套电磁内爆中的冲击现象, 计算爆炸力学理论、方法及工程应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002. 343—349. (Wang G H, Hu X J. A research into the strong pulse impact tracking place with the internal electromagnetic explosion in a double-layered mesh. Theory, methods and application of computational explosive dynamics. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. 343—349)
- [7] Peterson D L, Bowers R L, Lebeda C F, et al. Comparison and analysis of 2-D simulation results with two implosion radiation experiments on the Los Alamos PEGSUS and PEGASUS Capacitor Banks[A]. Digest of technical papers, Tenth IEEE International Pulse Power Conference (Cat. No. 95CH35833) [C]. 1995. **1**: 118—123.
- [8] 宁成, 杨震华, 丁宁. 铝丝阵列 Z 箍缩的辐射磁流体动力学过程[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(6): 877—881. (Ning C, Yang Z H, Ding N. Process of radiation magnetohydrodynamics in Al wire-array Z-pinch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(6): 877—881)
- [9] 王刚华, 胡熙静. Z 箍缩一维双区数值模拟计算[A]. 中国第八届高功率粒子束暨高压学术交流会议论文集[C]. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 2001. 173. (Wang G H, Hu X J. One dimensional simulation for double shell pinch. Proceedings of the 8th national symposium on high pulse power technology. Mianyang: Institute of Fluid Physics, 2001. 173)

Simulation of magnetohydrodynamics for plasma jetting on wire pinch

WANG Gang-hua, HU Xi-jing, KAN Ming-xuan

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-105, Mianyang 621900, China*)

Abstract: For a deeper understanding of the physical process of plasma jetting on wire the one dimension magnetohydrodynamics simulation code under Lagrangian coordinates is used. It is detailed that the axial Al wire heated by shock wave expands after collision and finally pinches on the axis. A large value of current rate of rise is got on the axial wire according to our calculations. The resultant pinch according to our calculation outputs more X-ray energy and higher power.

Key words: High pulse power; Z-pinch; Magnetohydrodynamics; Pinch on wire