文章编号：1000-5773(2004)04-0364-04

双层钨衬套 Z 箍缩内爆数值模拟*

王刚华，胡熙静，孙承纬

（中国工程物理研究院流体物理所，四川绵阳 621900）

摘要：介绍了在强脉冲电流的作用下双层钨衬套 Z 箍缩动力学过程的数值模拟，计算了一个双层钨衬套模型，分析了双层衬套的碰撞过程，指出了双层衬套下电磁内爆的现象和特点，给出了碰撞后电流在内外衬筒上的分布，并对箍缩功率和箍缩产生的能量进行了预估。

关键词：Z 箍缩；磁流体力学；双层衬套

中图分类号：O361.3 **文献标识码**：A

1 引 言

近年来，脉冲功率技术的大大提高有力地推动了 Z 箍缩技术的发展，使之成为高能量密度物理研究中一个闪光的亮点。早期的研究使用一个薄筒负载，这种单筒负载在内爆过程中容易产生严重的不稳定性[1]，使得等离子体不能得到稳定、均匀的压缩。为了抑制箍缩过程中不稳定性的发展，引入了双层衬套的设计方案，在圣地亚实验室(SNL)[2,3]、海军实验室(NRL)[4]和布莱克特实验室(Blackett Laboratory)[5]进行的大量实验表明，双衬套或多衬套负载的使用能较大幅度地提高箍缩所得的 X 功率和能量。不过，这种箍缩效果提高的原因目前还无法确定。我们对双层钨衬套箍缩进行了数值模拟，分析并指出了这一箍缩过程及箍缩效果提高的可能原因。

2 原 理

图 1 是本研究的计算模型简图，虚线为轴线，1、2 区设为真空，未碰撞前，内筒不导通。我们采用如下的辐射磁流体力学方程组计算

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u})=0 \tag{1}$$

$$\rho\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t}+\nabla(p+q)-\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}=\boldsymbol{0} \tag{2}$$

$$e_T\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t}+(q+Tp_T)\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}-\dot{e}_{\mathrm{D}}+\frac{1}{\rho}\nabla\cdot\boldsymbol{F}=0 \tag{3}$$

$$\boldsymbol{F}=-k\nabla T-\frac{c\lambda_{\mathrm{R}}}{3}\nabla(aT^4) \tag{4}$$

$$\rho\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\boldsymbol{B}}{\rho}\right)-(\boldsymbol{B}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}=-\nabla\times\left[\frac{\eta}{\mu_0}(\nabla\times\boldsymbol{B})\right] \tag{5}$$

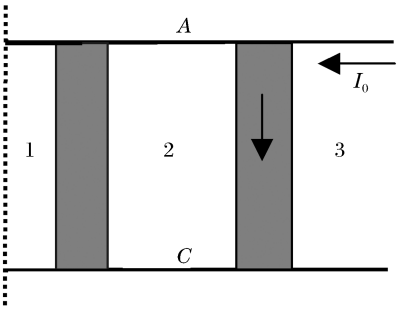


图 1 双套筒示意图

Fig. 1 Schematic of double liner system

式中：ρ 是密度，$\boldsymbol{u}$ 是速度，t 是时间，p 是标量压强，q 是人为粘性压强，$\boldsymbol{J}$ 是电流密度，$\boldsymbol{B}$ 是磁场。T 是温度，v 是比体积，$\dot{e}_{\mathrm{D}}$ 是欧姆加热率，$\boldsymbol{F}$ 是能流，$e_T=\partial e/\partial T|_v$，$p_T=\partial p/\partial T|_v$，$\lambda_{\mathrm{R}}$ 为罗斯兰德平均自由程，$a=4\sigma/c$，c 为光速，σ 为斯捷藩-波尔兹曼常数，k 为热传导系数，η 为电阻率。(5)式为磁扩散方程。该问题的定解条件参见文献[6]。

* **收稿日期**：2003-09-26；**修回日期**：2004-02-06

基金项目：中国工程物理研究院行业科学技术预先研究基金(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.

3　双层钨衬套箍缩计算结果

我们编制了一维双区 MHD 程序,对双层钨衬套模型进行了计算,使用美国洛斯阿拉莫斯实验室 Pegasus1[7] 装置参数。即电压 $V=88.0$ kV,电容 $C=216$ μF,电阻 $R=0.30$ mΩ,总电感 $L=36$ nH,电容器总储能为 1 MJ。

现在的箍缩实验一般采用丝阵作为负载靶,在一维计算中,我们将其等效为薄衬套来计算。图 1 为双层衬套靶的示意图,衬套高度为 2 cm,外层衬套的半径为 5 cm,厚度为 0.04024 μm,内层衬套的直径为 2.5 cm,厚度为 0.0848 μm,均为钨材料,总质量约 9.8 mg。计算初始时刻回路电流 $I=0$,靶的运动速度 $u=0$,衬套及其丝的初始温度 $T=T_0=300.0$ K,密度 $\rho=\rho_0=1.924\times10^4$ kg/m^3。在电容器放电的前一段时间,由于内衬套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,为了便于计算假定在等离子体碰撞到内衬套之前内衬套上没有电流,这样碰撞之前计算区域就只有外衬套,大大减少了计算时间。

如图 2 所示给出了衬套位置随时间的变化曲线,我们看到在箍缩早期,从大约 $t=0.1$ μs 开始,由于电流的焦耳加热作用,使得外衬套温度升高,而此时的磁压远小于物质压,故而外衬套开始同时向内向外膨胀。但是随着电流的进一步增加,磁场强度不断增大,当磁场强度增加到与物质压及其惯性相平衡时,外衬套外边界加速度不再为正,随着箍缩的进行,外边界速度方向将发生改变,衬套又被重新压缩。如图 3 所示,大约在 $t_c=1.6$ μs 的时刻外衬套内界面与内衬套碰撞,电流迅速转入内层衬套(如图 4),使内套筒受热膨胀,并压缩内衬套向轴线运动(如图 3)。大约在 $t=2.0$ μs 时刻箍缩形成的等离子体在轴线相碰,开始坍缩过程,等离子体被压缩在轴附近很小的体积内。

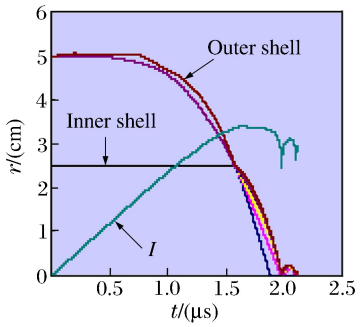


图 2　衬套位置随时间的变化(总质量 9.8 mg)

Fig. 2　Liner position versus time

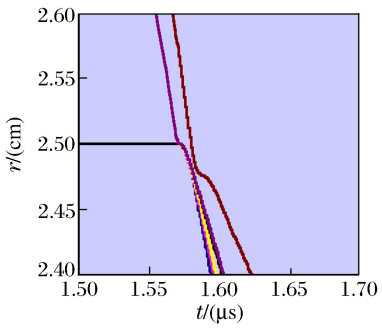


图 3　碰撞时刻附近放大图(总质量 9.8 mg)

Fig. 3　Liner position at collision moment

在强电流产生的磁场的束缚作用下,衬套在运动到轴线之前,其速度将达到 80 km/s 以上(如图 5 所示)。高速运动的衬套在轴线相碰时,动能迅速转化为辐射能,将产生很高的能量辐射。由图 6 可见,最后得到的功率峰值约为 120 GW。由于碰撞过程的存在,使得在碰撞时刻功率曲线也产生了一个小峰值(如图 6),此处的功率峰值约为 3.0 GW。

在计算中我们用黑体辐射来简化其辐射模式,以求得数值模拟的简化,图 7 给出了辐射能量曲线,由图可知,在碰撞时,亦产生了较高的能量辐射,能量曲线的斜率增大较快,使得整个过程出现了两次辐射能量的快速增长,最后碰轴时得到的辐射能量约为 1.0 kJ。

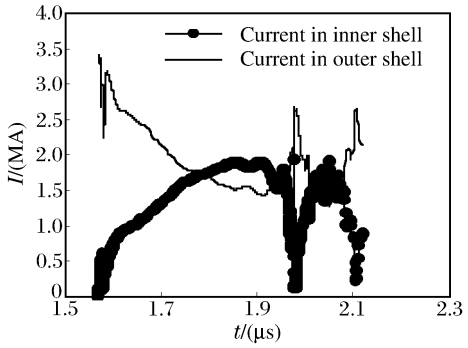


图 4 内外套筒上的电流随时间的变化

Fig. 4 Current distribution between both liners

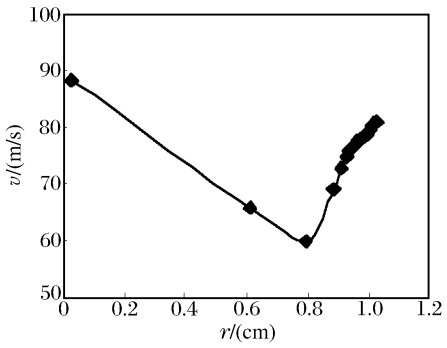


图 5 碰轴前的速度分布

Fig. 5 Velocity of liner before collision with axis

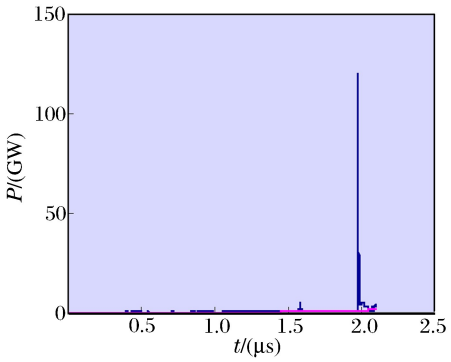


图 6 功率随时间的变化

Fig. 6 Output power of X-ray versus time

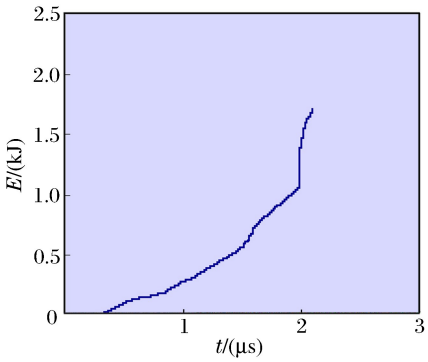


图 7 辐射总能量随时间的变化

Fig. 7 Output energy versus time

4 结 论

在磁流体力学方程组的基础上研制了用于研究 Z 箍缩动力学行为的一维磁流体力学程序。通过对一个 9.8 mg 的双层钨衬套模型的计算，对其箍缩的动力学过程进行了较为详细的分析，并对其箍缩功率和能量进行了预估。

References:

[1] Liberman M A, de Groot J S. Physics of High-Density Z-Pinch Plasmas [M]. New York: Springer, 1999. 109.

[2] Sanford T W, Mock R C, Nash T J, et al. Systematic Trends in X-Ray Emission Characteristics of Variable-Wire-Number, Fixed-Mass, Aluminum Array, Z-Pinch Implosions [J]. Physics of Plasma, 1999, 6(4): 1270－1292.

[3] Douglas M R, Deeney C, Roderick N F. Effect of Sheath Curvature on Rayleigh-Taylor Mitigation in High-Velocity Uniform-Fill, Z-Pinch Implosions [J]. Phys Rev Lett, 1997, 78(24): 4577－4580.

[4] Stephanakis S J, Apruzese J P, Burkhalter P G, et al. Effect of Pulse Sharpening on Imploding Neon Z-Pinch Plasma [J]. Appl Phys Lett, 1986, 48(13): 829－31.

[5] Bland S N, Lebedev S V, Chittenden J P, et al. Nested Wire Array Z-Pinch Experiments Operating in the Current Transfer Mode [J]. Physics of Plasmas, 2003, 4(10): 1100－1112.

[6] 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 [A]. Theory, Methods and Application of Computational Explosive Dynamics [C]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002. 343－349. (in Chinese)
王刚华，胡熙静. 双层衬套电磁内爆中的冲击现象 [A]. 计算爆炸力学理论、方法及工程应用 [C]. 北京：北京理工大学出版社，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 Implo-

sion Radiation Experiments on the Los Alamos PEGSUS Ⅰ and PEGASUS Ⅱ Capacitor Banks, Digest of Technical Papers [A]. Tenth IEEE International Pulse Power Conference (Cat. No. 95CH35833) [C]. 1995, 1: 118－123.

Simulation of Magnetohydrodynamics for Plasma Jetting on Wire Pinch

WANG Gang-Hua, HU Xi-Jing, SUN Cheng-Wei

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: We have worked out one dimensional double region MHD programs for Z-pinch simulation. One of our calculated results of tungsten load has been discussed in the article. The dynamic phenomenon of double wire pinch is presented. The current distribution between the two liners after collision was given. According to our simulation results, 120 GW of X-ray power and 1.0 kJ of X-ray energy are produced in the pinch.

Key words: Z-pinch; MHD; double shall

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物,在国内外公开发行。《高压物理学报》力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果,读者对象为国内外科技工作者。《高压物理学报》征稿内容为动态及静态高压技术,人工合成新材料,高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究,动态及静态高压研究中的测试技术,高温高压下的相变,高温高压物态方程等。《高压物理学报》接受中、英文稿件。

来稿应论点明确、数据可靠、逻辑严密、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在 6 000～12 000 字以内,论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用中华人民共和国法定计量单位。第一作者应确保全体作者同意文章署名,并提供所有联系方式,简要介绍工作背景和论文意义。来稿应一式 3 份。稿件中所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照,图、表中的文字一律用英文。

自 1987 年创刊以来,《高压物理学报》取得了较大的成就。2001 年,《高压物理学报》被科技部和国家新闻出版总署评为"中国期刊方阵"双效期刊。国际主要检索系统"EI Compendex"和"CA"一直收录《高压物理学报》文章。由北京高校图书馆期刊工作研究会和北京大学图书馆编著的《中文核心期刊要目总览》连续四版把《高压物理学报》列为物理学类核心期刊(北京大学出版社,1992 年、1996 年、2000 年、2004 年)。据中国科学引文数据库公布的"2000 年影响因子最高的中国科技期刊 300 名排行榜"显示,《高压物理学报》影响因子为 0.362 7,全国排名第 94 名,列物理类期刊第 3 名。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念,慎重对待每一篇来稿,尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道,重大创新性成果可在 3 个月甚至更短时间内刊出。为缩短邮寄时间,编辑部建议作者使用电子邮件投稿。

重点注意事项

▲ 中英文摘要　作为文章精华部分,中、英文摘要一定要仔细斟酌,特别是英文摘要,其质量直接决定文章能否被 EI Compendex 收录。《高压物理学报》要求文章的中文摘要在 200～400 个字之间,英文摘要不少于 120 个单词;摘要内容千万不要泛泛而谈,应有具体内容。为促进论文的国际交流,英文摘要必须:(1) 拥有与论文同等量的主要信息,应重点包括 4 个要素:即研究目的、方法、结果、结论等,结果、结论是最重要的;应要素齐全,繁简得当。(2) 以提供论文梗概为目的,不得评论、解释论文内容。(3) 英文摘要中尽量避免特殊字符(希腊字符、上下标)及特殊字符组成的数学表达式,且第 1 句不要与英文题名重复。

▲ 参考文献　科技论文必须引用参考文献,《高压物理学报》要求作者应充分著录参考文献,并尽量引用近期期刊文章。中文参考文献必须附英译文,著录项目齐全。

▲ 版权与稿酬　《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》和万方数字化科技期刊群。凡经本刊录用的稿件,作者便自动将光盘版和网络版出版权转让给《高压物理学报》编辑部,编辑部不再另行通知。来稿一经发表,即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

来稿请寄:四川绵阳 919 信箱 110 分箱《高压物理学报》编辑部,邮政编码:621900

电子邮件:gaoya@caep.ac.cn; gywl@chinajournal.net.cn (投稿、征订、咨询)

电　　话:(0816)2490042; 传真:(0816)2282695

《高压物理学报》编辑部启