



·脉冲功率技术·

回流罩结构 Z-箍缩实验的数值模拟*

阚明先, 贾月松, 张南川, 傅 贞, 章征伟

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 采用二维磁驱动数值模拟程序(MDSC2)对大电流脉冲功率装置FP-2上的回流罩结构Z-箍缩实验exp90和exp60进行了数值模拟。数值模拟表明,回流罩结构Z-箍缩实验测量电流/回路电流不是负载套筒电流,回流罩结构Z-箍缩实验中回路电流不完全从负载套筒通过,回路电流和负载套筒电流之间存在一个结构系数,提出了边界磁场强度与回路电流关系的新公式。采用具有结构系数的边界磁场强度公式和磁流体力学程序能正确模拟exp90和exp60两个回流罩结构Z-箍缩实验,模拟的套筒内径运动速度和实验测量速度相一致。回流罩结构Z-箍缩实验的结构系数为一常数,仅由回流罩的初始结构确定。90 mm和60 mm内直径套筒的结构系数分别为0.87和0.90。在套筒初始厚度、绝缘材料等其它条件相同的情况下,套筒内径越大,回流罩结构Z-箍缩实验的结构系数越小。

关键词: 二维磁驱动数值模拟程序;回流罩结构Z-箍缩实验;磁流体力学;结构系数;数值模拟

中图分类号: O361.3

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220271

Simulation of Z-pinch experiments with a reflux hood structure

Kan Mingxian, Jia Yuesong, Zhang Nanchuan, Fu Zhen, Zhang Zhengwei

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

Abstract: The Z-pinch experiments with a reflux hood structure, exp90 or exp60, were carried out in an intense pulsed power device FP-2 and simulated and analyzed by the two-dimensional magnetically driven simulation code (MDSC2). The numerical simulations show that the measured current/loop current is not a load current of liner in the Z-pinch experiment with the reflux hood structure. There is a structure coefficient between the measured current/loop current and the load current. A new formula for the relation between the boundary magnetic field and the loop current is presented. The new boundary magnetic field formula with the structure coefficient and the MDSC2 code can correctly simulate the Z-pinch experiments with a reflux hood structure. The simulated inner diameter velocity is consistent with the measured one by Velocity Interferometry System for Any Reflector (VISAR). The structure coefficients is a constant, which is determined only by the initial structure of Z-pinch with reflux hood structure. In the Z-pinch experiments with the reflux hood structure, the structure coefficients for the 90 mm inner diameter liner and the 60 mm one are 0.87 and 0.90 respectively. When the initial thickness of liner, insulation material and other conditions are the same, the larger the inner diameter of liner, the smaller the structure coefficient of Z-pinch with reflux hood structure.

Key words: two-dimensional magnetically driven simulation code, Z-pinch experiments with a reflux hood structure, magneto-hydrodynamics, structure coefficient, numerical simulation

近年来,随着Z装置^[1]、CQ^[2]、FP-2^[3]等大电流脉冲功率装置的建立,Z-箍缩、磁驱动平面飞片发射、磁驱动冲击压缩、磁驱动准等熵压缩、磁驱动样品材料等磁驱动实验取得了很大进展,对高能量密度物理、高压状态方程等领域的研究产生了重要的推动作用^[4-9]。磁驱动实验的物理过程非常复杂,在电流焦耳加热作用下,物体在极短的时间内发生弹塑性形变、溶化、汽化、等离子体化等,并且物质界面也会伴随大变形的产生。为了更好地开展磁驱动实验、理解磁驱动实验的物理过程、解释实验现象、设计预测实验,需要开展磁驱动实验的数值模拟。

大电流脉冲功率装置上的磁驱动实验通常采用磁流体力学理论来模拟。在国外,美、英等发达国家研制了许

* 收稿日期:2022-08-30; 修订日期:2022-10-13
联系方式:阚明先, kanmx@caep.cn.

多磁流体力学数值模拟程序,例如美国 Sandia 国家实验室采用 ALE 方法开发的 ALEGRA 程序^[10]、美国海军实验室采用 ALE 方法开发的 MACH 系列程序^[11]、英国帝国理工采用欧拉方法开发的 GORGON 程序^[12]等。在国内,北京应用物理与计算数学研究所开发了 MARED 程序^[13]、中国工程物理研究院流体物理研究所开发了二维磁驱动数值模拟程序 MDSC2^[14-15]等。这些程序都可用于大电流脉冲功率装置上的磁驱动实验的模拟和研究。本文采用 MDSC2 程序,对回流罩结构 Z-箍缩实验进行了模拟和分析,指出回流罩结构 Z-箍缩实验中,实验测量电流/回路电流不是负载套筒电流,并给出了套筒负载电流和回路电流之间的定量关系。采用新的回流罩结构边界磁场强度公式,模拟的套筒运动速度和实验相一致。回流罩结构边界磁场强度公式解决了回流罩结构 Z-箍缩实验的模拟问题。

1 实验配置

FP-2 装置是中国工程物理研究院流体物理研究所研制的大电流脉冲功率装置^[3],FP-2 装置的脉冲电流上升时间约为 5500 ns,最大输出电流约为 10.7 MA,主要用于开展 Z-箍缩、磁驱动汇聚准等熵压缩、磁驱动汇聚冲击压缩等磁驱动实验,有助于材料物性、金属不稳定性等的研究。

FP-2 装置上的 Z-箍缩实验采用回流罩结构,图 1 为回流罩结构 Z-箍缩实验 rz 剖面示意图。图中虚线为回流罩结构 Z-箍缩实验的对称轴线,回流罩结构 Z-箍缩从外到内依次为回流罩、绝缘材料和金属套筒,金属套筒两端为阴、阳电极。电流由回流罩流入,绕过回流罩和金属套筒之间的绝缘材料,到达阳极,经过套筒从阴极流出。套筒在洛仑兹力的作用下沿着阴阳电极向内箍缩。图中 d 为套筒的内直径, δ 为套筒的厚度, h 为套筒的高度。采用激光速度干涉仪 (VISAR) 测量套筒内径的速度变化。exp90 和 exp60 回流罩结构 Z-箍缩实验中,绝缘材料为同一种材料,套筒为金属铝材料。exp90 实验中,套筒的内直径为 90 mm,套筒的厚度为 0.6 mm;exp60 实验中,套筒的内直径为 60 mm,套筒的厚度为 0.6 mm。

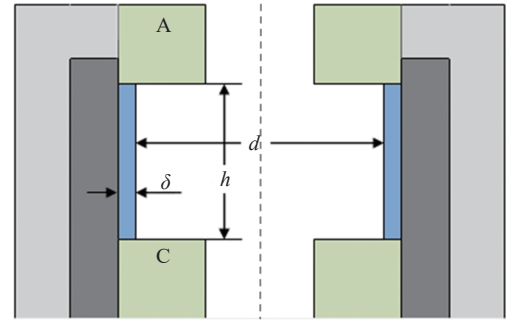


Fig. 1 Cross section schematic of reflux hood on FP-2 facility

图 1 回流罩结构 Z-箍缩实验示意图

2 程序介绍

二维磁驱动数值模拟程序 (MDSC2) 是中国工程物理研究院流体物理研究所研制的磁流体力学程序。MDSC2 程序求解的磁流体力学方程组包括质量方程、动量方程、能量方程、磁感应强度方程,适用于 Z-箍缩、磁驱动高速飞片发射、磁驱动准等熵压缩、磁驱动冲击压缩等磁驱动实验的数值模拟。MDSC2 程序的控制方程为

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{v} \quad (1)$$

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla p + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (2)$$

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + \left(\frac{\eta}{\mu_0^2} \nabla \times \mathbf{B} \right) \cdot \nabla \times \mathbf{B} + (\boldsymbol{\sigma} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{v} - \nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{diff}} \quad (3)$$

$$\frac{d\mathbf{B}}{dt} = -\nabla \times \left(\frac{\eta}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} \right) - (\mathbf{B} \nabla \cdot \mathbf{v} - \mathbf{B} \cdot \nabla \mathbf{v}) \quad (4)$$

式中: ρ, T, \mathbf{v} 分别是物质的密度、温度和速度; \mathbf{B} 是磁感应强度; p 是压强; μ_0 真空磁导率; η 是电阻率^[16]; c_v 是比热容; \mathbf{F}_{diff} 是热流; $\boldsymbol{\sigma}$ 是人工粘性张量。

对于磁驱动实验,电流加载面上的边界磁压力

$$p(t) = B^2(t)/2\mu_0 \quad (5)$$

式中: $B(t)$ 为电流加载面上的边界磁感应强度。电流加载面上的边界磁感应强度可通过磁驱动实验回路的测量电流计算。不同类型的磁驱动实验,电流加载面上的边界磁感应强度公式是不同的。

方程(1)~(4)和物质状态方程 $p = p(\rho, T)$ 构成一个完备系统,可以进行求解。MDSC2 程序是四边形网格上的

交错拉格朗日程序,密度、温度、压强、磁感应强度等物理量离散在网格的中心位置,速度、位置离散在网格的顶点位置。MDSC2 采用算子分裂方法把磁流体力学方程组依次分成热扩散、磁扩散、理想磁流体力学等物理过程进行求解^[14-15]。采用向后欧拉差分方法进行时间导数的离散,采用对角型有限体积积分方法进行空间导数的离散。各物理过程的离散方程采用 Jacobi 方法迭代求解。MDSC2 程序中,金属铝的状态方程取自 Sesame 数据库。MDSC2 程序包括 xy 平面和 rz 平面程序,可用于 Z-箍缩^[14]、磁驱动平面飞片发射^[17-18]、磁驱动平面准等熵/冲击压缩^[19] 等磁驱动实验的模拟、研究。

3 磁场边界条件

Z-箍缩实验中,负载套筒电流加载面上的边界磁感应强度为^[20]

$$B(t) = \mu_0 I_{\text{load}}(t) / 2\pi r \quad (6)$$

式中: $I_{\text{load}}(t)$ 是负载套筒电流, r 是套筒的外半径。

将实验测量电流作为负载套筒电流,采用具有上述边界磁感应强度公式(6)的二维磁驱动数值模拟程序 MDSC2,对 exp90 和 exp60 两个 Z-箍缩实验进行数值模拟。图 2 为 exp90 实验的测量电流。exp90 实验的电流峰值为 10.8 MA,上升时间约为 5500 ns。图 3 为 exp90 实验中套筒内径的模拟速度。图中实线是实验测量的套筒内径速度,虚线是 MDSC2 程序模拟的套筒内径速度。显然,直接采用实验测量电流模拟的套筒内径速度和实验测量的套筒内径速度明显不同,模拟的套筒内径速度明显比实验测量的套筒内径速度偏大。

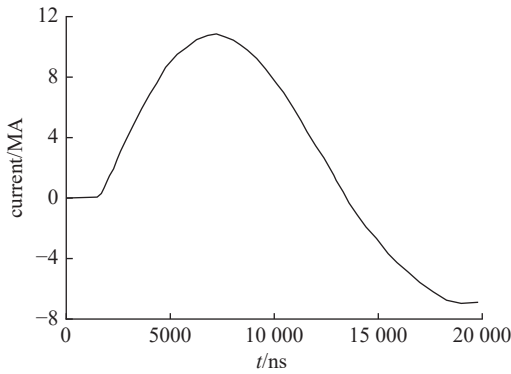


Fig. 2 Measured current in exp90 experiment

图 2 exp90 实验加载电流

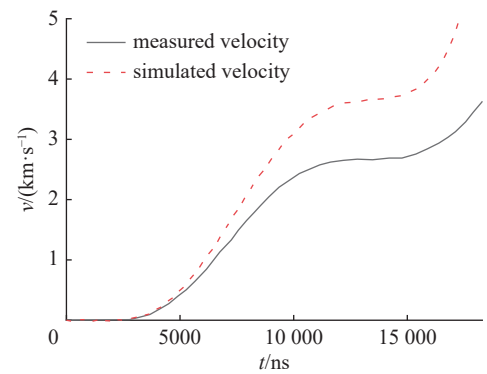


Fig. 3 Simulated inner radius's velocity in exp90 experiment

图 3 模拟的 exp90 实验的套筒内径速度

图 4 为 exp60 实验的测量电流。exp60 实验的电流峰值为 9.9 MA,上升时间约为 5600 ns。图 5 为 exp60 实验中套筒内径的模拟速度。从图 5 可知,exp60 实验的模拟结果与实验测量结果明显不一致。同 exp90 实验一样,直接采用实验测量电流模拟的套筒内径速度明显比实验测量的套筒内径速度偏大。

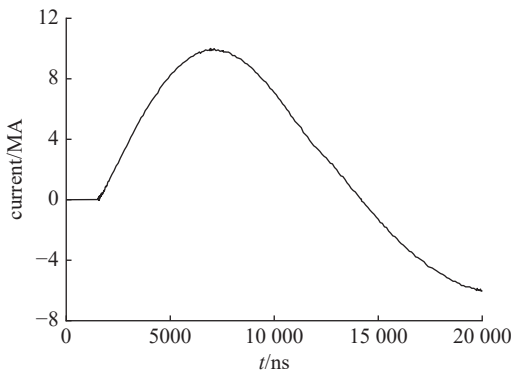


Fig. 4 Measured current in exp60 experiment

图 4 exp60 实验加载电流

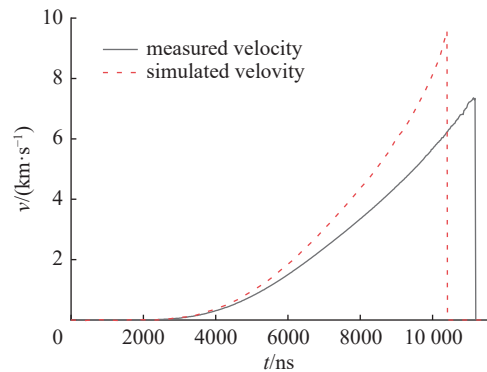


Fig. 5 Simulated inner radius's velocity in exp60 experiment

图 5 模拟的 exp60 实验的套筒内径速度

4 回流罩结构磁场边界条件

由以上的模拟结果可知,将实验测量电流作为负载套筒电流,采用边界磁感应强度公式(6),磁流体力学程序模拟的 exp90、exp60 套筒内径速度与实验测量结果不一致,模拟结果总是比实验测量结果偏大。采用实验测量电

流作为负载套筒电流,模拟速度总是比实验测量速度偏大,这一结果表明,回流罩结构 Z-箍缩中,实验电流并非完全或几乎完全从阴阳电极之间的套筒流过,实验测量电流比负载套筒电流大。事实上,回流罩结构 Z-箍缩实验中,实验测量电流测量的是流入回流罩之前的电流(即回路电流),而不是直接从套筒流过的电流。从套筒流过的电流是难以直接测量的。回流罩结构中,阴阳电极之间不仅有金属套筒连接阴阳电极,还有绝缘材料连接阴阳电极(如图 1),结构比较复杂。在回流罩结构中,阴阳电极之间电流分流的机制包括漏磁、电流真空击穿、阴阳电极之间的并联电路分流等。由于实验测量电流比负载套筒电流大,实验测量电流 $I_{\text{exp}}(t)$ 和负载套筒电流 $I_{\text{load}}(t)$ 的关系总是可表示为

$$I_{\text{load}}(t) = f(t)I_{\text{exp}}(t) \quad (7)$$

式中: $f(t)$ 为回流罩 Z-箍缩实验的结构系数,其值小于 1。结构系数 $f(t)$ 为套筒电流与实验电流的比值,表明多少实验测量电流/回路电流从负载套筒实际流过。

把公式(7)代入 Z-箍缩边界磁感应强度公式(6),则回流罩结构 Z-箍缩实验的边界磁感应强度公式为

$$B_{\text{im}}(t) = \mu_0 f(t) I_{\text{exp}}(t) / 2\pi r \quad (8)$$

5 数值模拟

采用改进的边界磁感应强度公式(8)和二维磁驱动数值模拟程序 MDSC2 对 exp90、exp60 两个 Z-箍缩实验进行了重新模拟。图 6 为改进公式模拟的 exp90 实验套筒内径速度,图 7 为改进公式模拟的 exp60 实验套筒内径速度。从图 6、图 7 可知,模拟的套筒内径速度和实验测量的套筒内径速度相一致。改进的数值模拟结果表明,边界磁场强度公式(8)、边界磁压力公式(5)和磁流体力学方程组正确描述了回流罩结构 Z-箍缩实验。

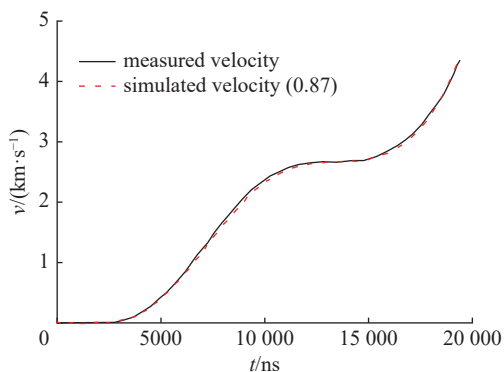


Fig. 6 Simulated velocity in exp90 by the improved formula

图 6 改进公式后 exp90 实验的模拟速度

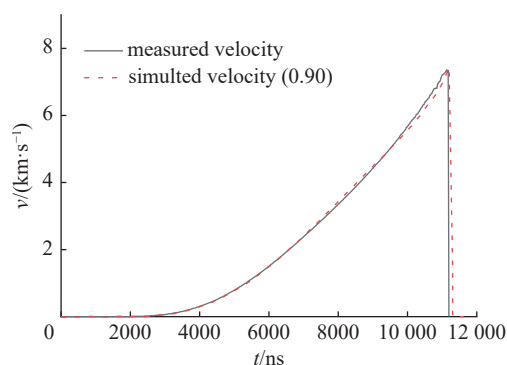


Fig. 7 Simulated velocity in exp60 by the improved formula

图 7 改进公式后 exp60 实验的模拟速度

对于 exp90 实验,90 mm 内径套筒的结构系数为 0.87;对于 exp60 实验,60 mm 内径套筒的结构系数为 0.90。显然,对于同一实验,回流罩结构 Z-箍缩实验的结构系数 $f(t)$ 是一常数 f ,不随实验过程的发展而变化,从而回流罩结构 Z-箍缩实验的边界磁感应强度公式(8)最终可表示为

$$B_{\text{im}}(t) = \mu_0 f I_{\text{exp}}(t) / 2\pi r \quad (9)$$

式中: f 为回流罩 Z-箍缩实验的结构系数,其为小于 1 的常数。

由于负载套筒电流与实验电流的比值 f 不随套筒的运动过程而变化,仅由回流罩 Z-箍缩实验的初始结构——绝缘材料、套筒材料、套筒直径、套筒厚度等确定,因此,负载套筒电流与实验电流的比值 f 称为结构系数。其次,在 exp90 和 exp60 回流罩 Z-箍缩实验的初始结构中,绝缘材料相同,套筒材料都为铝材料,套筒厚度都为 0.6 mm,仅套筒的直径不同,因此,在绝缘材料、套筒材料、套筒厚度等其它条件相同的情况下,套筒直径越大,回流罩结构 Z-箍缩实验的结构系数越小。

6 结论

通过对 FP-2 装置上回流罩结构 Z-箍缩实验的数值模拟,改进了回流罩结构 Z-箍缩实验边界磁场强度公式,建立了边界磁场强度和实验测量电流/回路电流的直接计算关系。采用新的边界磁场强度公式和磁流体力学程序,模拟的回流罩结构套筒内径速度和实验测量结果相一致。新的边界磁场强度公式正确描述了回流罩结构套筒的

磁场边界条件。回流罩结构 Z-箍缩实验中, 结构系数仅由回流罩 Z-箍缩实验的初始结构——绝缘材料、套筒直径和套筒厚度等因素确定, 不随回流罩 Z-箍缩实验中套筒的箍缩运动过程而发生改变, 即在回流罩 Z-箍缩实验的整个实验过程中, 结构系数为常数。回流罩结构 Z-箍缩实验中, 在绝缘材料、套筒厚度等其它条件相同的情况下, 套筒直径越大, 结构系数越小。具有实验测量电流/回路电流的边界磁场公式的建立, 为回流罩结构 Z-箍缩实验的数值重现、实验设计、预测、数据解读等提供了有力的理论支撑。

参考文献:

- [1] Reisman D B, Toor A, Cauble R C. Magnetically driven isentropic compression experiments on the Z accelerator[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(3): 1625-1633.
- [2] 王桂吉, 赵剑衡, 孙承伟, 等. 磁驱动准等熵加载装置CQ-4的加载能力及主要应用[J]. *实验力学*, 2015, 30(2): 252-262. (Wang Guiji, Zhao Jianheng, Sun Chengwei, et al. On the loading capability and main application of magnetically driven quasi-isentropic compression device CQ-4[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, 30(2): 252-262)
- [3] Sun Qizhi, Jia Yuesong, Zhang Zhengwei, et al. Cylindrical metal liner implosion at extremes of pressure and material velocity on an intense pulsed power facility-FP-2[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93: 013904.
- [4] Knudson M D, Lemke R W, Hayes D B, et al. Near-absolute Hugoniot measurements in aluminum to 500 GPa using a magnetically accelerated flyer plate technique[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(7): 4420-4431.
- [5] Lemke R W, Knudson M D, Bliss D E, et al. Magnetically accelerated, ultrahigh velocity flyer plates for shock wave experiments[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98: 073530.
- [6] Knudson M D, Hanson D L, Bailey J E, et al. Equation of state measurements in liquid deuterium to 70 GPa[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87: 225501.
- [7] Knudson M D, Hanson D L, Bailey J E, et al. Use of a wave reverberation technique to infer the density compression of shocked liquid deuterium to 75 GPa[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90: 035505.
- [8] Knudson M D, Hanson D L, Bailey J E, et al. Principal Hugoniot, reverberating wave, and mechanical reshock measurements of liquid deuterium to 400 GPa using plate impact techniques[J]. *Physical Review B*, 2004, 69: 144209.
- [9] Vogler T J, Ao T, Asay J R. High-pressure strength of aluminum under quasi-isentropic loading[J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25(4): 671-694.
- [10] Robinson A C, Strack O E, Drake R R, et al. ALEGRA: an arbitrary Lagrangian-Eulerian multimaterial, multiphysics code[C]//Proposed for presentation at the AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2008.
- [11] Frese M H. MACH2: a two-dimensional magnetohydrodynamic simulation code for complex experimental configurations[R]. AMRC-R-874, 1987.
- [12] Chittenden J P, Lebedev S V, Jennings C A, et al. X-ray generation mechanisms in three-dimensional simulations of wire array Z-pinch[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2004, 46(12B): B457-B476.
- [13] 丁宁, 郭吉明, 杨震华, 等. Z箍缩内爆的MARED程序1维模拟分析[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(2): 212-218. (Ding Ning, Wu Jiming, Yang Zhenhua, et al. Simulation of Z-pinch implosion using MARED code[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 212-218)
- [14] 阐明先, 蒋吉昊, 王刚华, 等. 衬套内爆ALE方法二维MHD数值模拟[J]. *四川大学学报(自然科学学报)*, 2007, 44(1): 91-96. (Kan Mingxian, Jiang Jihao, Wang Ganghua, et al. ALE simulation 2D MHD for liner[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2007, 44(1): 91-96)
- [15] 阐明先, 王刚华, 赵海龙, 等. 磁驱动飞片二维磁流体动力学数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(8): 2137-2141. (Kan Mingxian, Wang Ganghua, Zhao Hailong, et al. Two-dimensional magneto-hydrodynamic simulations of magnetically accelerated flyer plates[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(8): 2137-2141)
- [16] 阐明先, 王刚华, 赵海龙, 等. 金属电阻率模型[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(3): 282-286. (Kan Mingxian, Wang Ganghua, Zhao Hailong, et al. Electrical resistivity model for metals[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(3): 282-286)
- [17] Kan Mingxian, Zhang Zhaohui, Xiao Bo, et al. Simulation of magnetically driven flyer plate experiments with an improved magnetic field boundary formula[J]. *High Energy Density Physics*, 2018, 26: 38-43.
- [18] 阐明先, 段书超, 王刚华, 等. 磁驱动飞片发射实验结构系数初步研究[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 085002. (Kan Mingxian, Duan Shuchao, Wang Ganghua, et al. Structure coefficient in magnetically driven flyer plate experiment[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 085002)
- [19] 阐明先, 王刚华, 刘利新, 等. 带窗口磁驱动准等熵压缩实验模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 055001. (Kan Mingxian, Wang Ganghua, Liu Lixin, et al. Simulation of magnetically driven quasi-isentropic compression experiments with windows[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 055001)
- [20] Zhou Quan, Zou Xiaobing, Wang Xinxin. An indirect iterative method to couple the generator to the MHD load for future Z-pinch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(10): 3418-3423.