



·脉冲功率技术·

## 带窗口磁驱动准等熵压缩实验模拟\*

阚明先, 王刚华, 刘利新, 南小龙, 计策, 何勇, 段书超

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 在二维磁驱动数值模拟程序 MDSC2 中增加了 LiF 材料的材料参数和功能模块, 使 MDSC2 程序具有了解带窗口磁驱动准等熵压缩实验的能力。采用 MDSC2 程序, 对大电流脉冲功率装置上的 exp-3-window、exp-6-window 带窗口磁驱动准等熵压缩实验进行了模拟。数值模拟结果表明, 二维磁驱动数值模拟程序 MDSC2 能正确模拟带窗口磁驱动准等熵压缩实验 exp-3-window 和 exp-6-window 的全过程, 模拟的飞片/窗口界面速度在飞片/窗口界面速度的上升阶段、峰值附近和卸载阶段与实验测量基本一致, 验证了新程序的计算有效性。MDSC2 程序对带窗口磁驱动准等熵压缩实验的正确模拟有助于磁驱动样品物性实验的研究。

**关键词:** 磁驱动准等熵压缩实验; 二维磁驱动数值模拟程序; 飞片/窗口界面速度; 磁流体力学; 数值模拟

中图分类号: O361.3

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200329

## Simulation of magnetically driven quasi-isentropic compression experiments with windows

Kan Mingxian, Wang Ganghua, Liu Lixin, Nan Xiaolong, Ji Ce, He Yong, Duan Shuchao

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-111, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The material parameters and functional modules of LiF are added to the two-dimensional magnetically driven simulation code (MDSC2), which makes MDSC2 code have the ability to simulate the magnetically driven quasi-isentropic compression experiments with windows. Magnetically driven experiments with windows, shots of exp-3-window and exp-6-window, which were carried out in a large pulsed power device, are simulated and analyzed by the MDSC2 code. The simulated flyer plate/window interface velocities agree well with the experimental records by Velocity Interferometry System for Any Reflector (VISAR). The magneto-hydrodynamic code can correctly simulate the magnetically driven experiments with windows, which is helpful to understand the physical mechanism of sample material behaviors in magnetically driven experiments with windows.

**Key words:** magnetically driven quasi-isentropic compression experiment; two-dimensional magnetically driven simulation code; flyer plate/window interface velocity; magneto-hydrodynamics; numerical simulation

自 1999 年美国圣地亚国家实验室使用 Z 装置开展平面准等熵压缩和飞片发射实验以来, 磁驱动平面实验取得了巨大进展。磁驱动平面实验主要用于高压状态方程、高能量密度物理和武器物理等的研究<sup>[1-6]</sup>。

磁驱动平面实验可以采用磁流体力学理论进行描述。2001 年, Reisman<sup>[7]</sup>首次采用磁流体力学理论对磁驱动平面实验进行了模拟; 2003 年, Lemke 等<sup>[8]</sup>考虑了电极初始宽度  $W$  对磁场的影响, 提出了磁驱动平面实验电流加载端的边界磁场公式  $B_0 = \mu_0 I(t)/W$  ( $B_0$  是磁场强度,  $\mu_0$  是真空磁导率,  $I(t)$  是电流); 2011 年, Lemke 等<sup>[9]</sup>认为磁驱动平面实验电流加载端的边界磁场不仅与电极宽度  $W$  有关, 而且与阴阳电极之间的间隙  $g(t)$  有关, 把磁驱动平面飞片电流加载端的边界磁场公式发展为  $B_0 = f\mu_0 I(t)/(g(t) + W)$  ( $f$  为负载结构系数)。采用上述两个边界磁场公式, 磁流体力学程序并不能正确模拟磁驱动平面实验, 在磁驱动平面实验后期, 模拟的飞片自由面速度总是比实验测量速度偏大<sup>[10]</sup>。2018 年, 阚明先等<sup>[11]</sup>根据磁驱动平面实验中金属电阻率的强间断性, 提出磁驱动平面实验的电流不

\* 收稿日期: 2020-12-09; 修订日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12075226)

作者简介: 阚明先 (1971—), 男, 副研究员, 主要从事磁流体力学数值模拟方面的研究。

是从飞片电流加载端的端面通过,而是从飞片电流加载端电阻率的间断面通过,把磁驱动飞片电流加载端的边界磁场公式发展为 $B_0 = f\mu_0 I(t)/(g(t) + g_m(t) + W)$ ( $g_m(t)$ 为飞片电流加载端厚度方向上的熔化宽度)。阐明先的边界磁场公式实现了结构系数 $f$ 与时间的分离。磁驱动平面实验的结构系数仅与负载的初始结构有关,而不随实验的发展而变化,从而使磁驱动实验的模拟变得更加简单。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二维多介质磁流体力学程序,MDSC2程序适用于Z-箍缩、磁驱动飞片发射、磁驱动准等熵压缩等磁驱动实验<sup>[11-12]</sup>。采用阐明先的边界磁场公式,MDSC2程序不仅能正确模拟磁驱动双侧飞片实验<sup>[11]</sup>,而且能解释磁驱动单侧飞片实验可采用单侧模型模拟的原因<sup>[12]</sup>。尽管MDSC2程序能正确模拟和解读磁驱动单、双侧铝飞片发射实验,但MDSC2程序还不能模拟带窗口材料的磁驱动实验。本文在MDSC2程序中,增加了LiF窗口材料模块,使MDSC2程序能求解带窗口材料的磁驱动实验。采用新的MDSC2程序对大电流脉冲装置上带窗口材料的磁驱动准等熵压缩实验进行了模拟分析,模拟的飞片/窗口界面速度和实验测量结果基本一致,能正确模拟带窗口磁驱动准等熵压缩实验的全过程,与文献[6]中磁流体力学程序ALEGRA不能正确模拟飞片/窗口速度峰值和卸载阶段速度的情况相比,MDSC2程序有明显进步。

### 1 实验配置

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<sup>[13]</sup>主要用于Z箍缩<sup>[14]</sup>、磁驱动高速飞片发射<sup>[15]</sup>、带窗口材料的磁驱动准等熵压缩<sup>[16]</sup>等磁驱动实验研究。

大电流脉冲功率装置上带窗口磁驱动准等熵压缩实验的负载结构示意图如图1所示。图中A、C分别为带窗口磁驱动准等熵压缩实验的阳极和阴极。阴、阳电极都为长方体铝材料, $\delta$ 、 $W$ 分别为阴、阳电极极板的初始厚度和宽度, $g_0$ 为阴、阳电极之间的初始间隙。阴、阳电极上嵌入半径为 $R$ 的圆柱形飞片,飞片后界面上紧贴半径为 $r$ ( $r < R$ )的圆柱体LiF窗口材料。 $\delta_{fa}$ 、 $\delta_{wa}$ 分别为阳极上飞片、窗口的厚度; $\delta_{fc}$ 、 $\delta_{wc}$ 分别为阴极上飞片、窗口的厚度。采用激光速度干涉仪(VISAR)测量飞片的速度历史。大电流脉冲功率装置上带窗口磁驱动准等熵压缩实验的负载参数如表1。

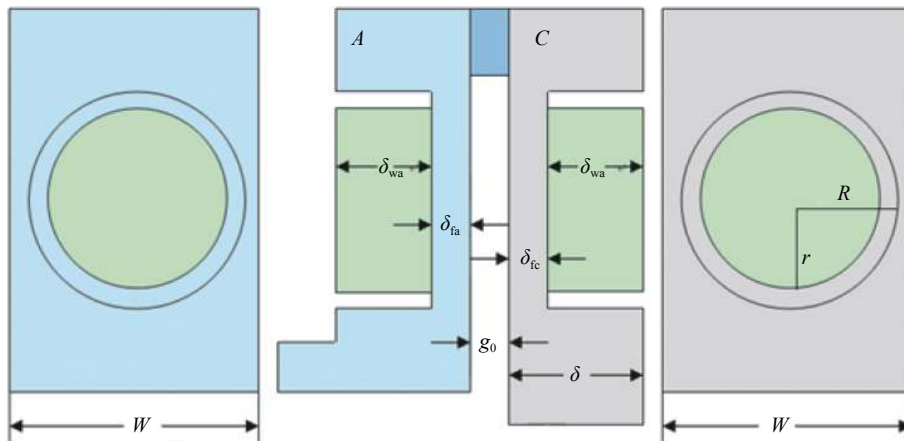


Fig. 1 Cross section of 3D load configuration in the magnetically driven quasi-isentropic compression experiment

图 1 大电流脉冲功率装置上带窗口磁驱动准等熵压缩实验负载结构示意图

表 1 带窗口磁驱动实验负载参数

Table 1 Load parameters for magnetically driven experiments with windows

No.	$\delta_{fa}/\text{mm}$	$\delta_{wa}/\text{mm}$	$\delta_{fc}/\text{mm}$	$\delta_{wc}/\text{mm}$	$g_0/\text{mm}$	$W/\text{mm}$
exp-3-window	1.008	9.532	1.002	9.533	1.20	13
exp-6-window	0.980	8	1.089	8	1.24	11

### 2 理论模型

大电流脉冲功率装置上磁驱动实验通常可采用磁流体力学程序进行模拟。二维磁驱动数值模拟程序(MDSC2)是由中国工程物理研究院流体物理研究所研制的四边形网格上的拉格朗日多介质磁流体力学程序<sup>[17-18]</sup>。MDSC2程序求解的磁流体力学模型包括热扩散、磁扩散、理想磁流体力学、固体弹塑性行为等物理过程<sup>[17, 19-20]</sup>。

MDSC2 程序求解的流体力学模型为

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

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

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

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

式中： $\rho$ 为密度； $\mathbf{v}$ 为速度； $p$ 是压强； $\mathbf{B}$ 是磁感应强度； $\boldsymbol{\sigma}$ 是人工粘性张量； $\mathbf{S}$ 是应力偏量<sup>[19]</sup>； $e$ 为比内能； $\mu_0$ 是真空磁导率； $\eta$ 是电阻率<sup>[21]</sup>； $\mathbf{F}_{\text{diff}}$ 是热流； $d/dt$ 为 Lagrangian 导数。

对于磁驱动平面实验，电极上电流加载端的磁压力为

$$p(t) = B_0^2 / 2\mu_0 \quad (5)$$

式中：电极上电流加载端的磁感应强度<sup>[9]</sup>

$$B_0 = f\mu_0 I(t) / (g(t) + g_m(t) + W) \quad (6)$$

式中： $f$ 为负载结构系数，其为一常数； $I(t)$ 为实验测量电流； $g(t)$ 为阴、阳电极之间的间隙； $g_m(t)$ 为阴、阳电极电流加载端厚度方向上融化宽度之和<sup>[11-12]</sup>。

MDSC2 程序是四边形网格上的交错网格程序，密度、比内能、磁感应强度等物理量离散在四边形网格的中心位置，速度和位移离散在四边形网格的顶点位置。MDSC2 程序采用算子分裂法把磁流体力学方程组(1)~(4)依次分成热扩散、磁扩散、理想磁流体力学等三个物理过程进行求解<sup>[17]</sup>。MDSC2 程序中，时间导数采用向后欧拉方法进行离散；空间导数采用有限体积分方法进行离散。各物理过程离散格式采用 Jacobi 迭代方法迭代求解。采用局部结构整体非结构的程序处理方法，MDSC2 程序已发展成多介质磁流体力学程序<sup>[18]</sup>。MDSC2 程序已用于 Z 箍缩、磁驱动单侧飞片发射、磁驱动双侧飞片发射等磁驱动实验的研究、设计中<sup>[11, 12, 22-24]</sup>。

### 3 实验模拟

从二维磁驱动数值模拟程序 MDSC2 的相关文章<sup>[11-12, 17-24]</sup>可知，尽管二维磁驱动数值模拟程序 MDSC2 能正确模拟 Z 箍缩、磁驱动单侧飞片发射、磁驱动双侧飞片发射等磁驱动实验，解释这些磁驱动实验的相关实验现象，甚至预测磁驱动铝飞片实验，但是，MDSC2 程序求解的实验都是磁驱动铝材料实验。MDSC2 程序使用的材料数据库是 Sesame 数据库，其不包含 LiF 材料参数，因此，MDSC2 程序不能求解带窗口材料的磁驱动实验。为了利用程序研究分析材料物性属性，需要建立带窗口材料的磁驱动实验模拟计算能力。本文在 MDSC2 程序的基础上，增加了窗口材料 LiF 的热扩散系数、比热容、Gruneisen 压强、能量转化到温度、电阻率等物性参数计算模块，并修改了物性参数相关程序调用接口，使 MDSC2 程序不仅能求解磁驱动单、双侧飞片实验，而且具有了求解带窗口材料的磁驱动实验的能力。

采用新的能求解带窗口材料的二维磁驱动数值模拟程序 MDSC2，对大电流脉冲功率装置上 exp-3-window 和 exp-6-window 实验进行了模拟分析。图 2 为 exp-6-window 带窗口磁驱动准等熵压缩实验的实验测量电流。图 3 为 exp-6-window 带窗口磁驱动准等熵压缩实验 0.98 mm 厚铝飞片/窗口界面速度历史，图中实线是实验测量的 0.98 mm 厚铝飞片/窗口界面速度历史，虚线是模拟的 0.98 mm 厚铝飞片/窗口界面速度历史，点线是模拟的 0.98 mm 厚铝飞片/窗口界面速度误差历史。从图 3 可知，exp-6-Window 实验模拟的飞片/窗口界面速度误差很小；无论在 exp-6-Window 实验的飞片/窗口界面速度的上升阶段、速度峰值，还是飞片/窗口界面速度的卸载阶段，MDSC2 程序模拟结果与实验测量结果都相一致。MDSC2 程序能正确模拟 exp-6-Window 实验的飞片/窗口界面速度。图 4 为 exp-3-window 带窗口磁驱动准等熵压缩实验的实验测量电流。图 5 为 exp-3-window 带窗口磁驱动准等熵压缩实验 1.008 mm 厚铝飞片/窗口界面速度历史。图中实线是实验测量的 1.008 mm 厚铝飞片/窗口界面速度历史，虚线是模拟的 1.008 mm 厚铝飞片/窗口界面速度历史，点线是模拟的 1.008 mm 厚铝飞片/窗口界面速度误差历史。从图 5 可知，exp-3-Window 实验模拟的飞片/窗口界面速度误差很小；MDSC2 程序模拟的飞片/窗口界面速度与实验测量的飞片/

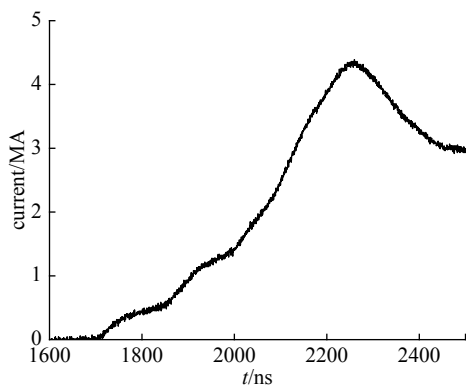


Fig. 2 Measured current in experiment exp-6-window  
图2 exp-6-window 实验的实验电流

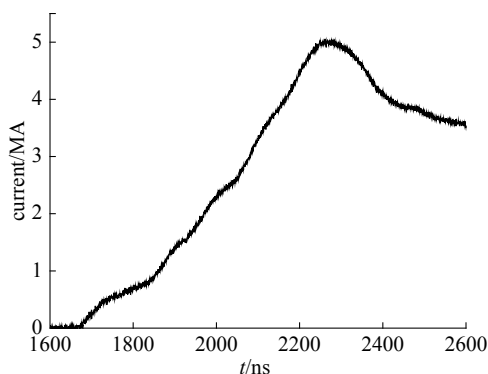


Fig. 4 Measured current in experiment exp-3-window  
图4 exp-3-window 实验的实验电流

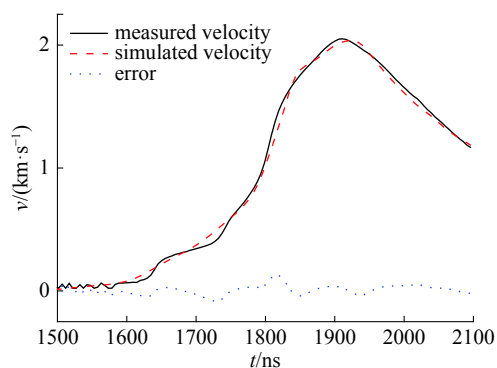


Fig. 3 Interface velocity for 0.98/8 mm Al/LiF of exp-6-window  
图3 模拟的 exp-6-window 实验飞片/窗口界面速度

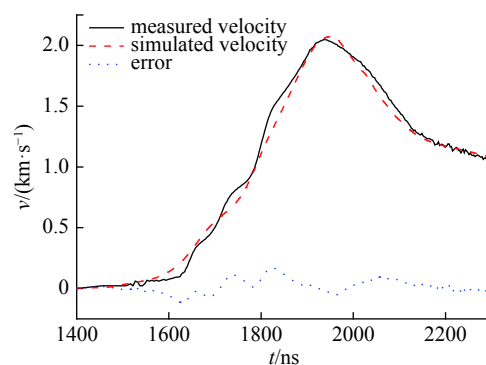


Fig. 5 Interface velocity for 1.008/9.532 mm Al/LiF of exp-3-window  
图5 模拟的 exp-3-window 实验飞片/窗口界面速度

窗口界面速度相一致。MDSC2 程序能正确模拟 exp-3-Window 带窗口准等熵压缩实验。

## 4 结论

为了磁驱动物性实验研究, 需要开展带窗口磁驱动实验的数值模拟。在二维磁驱动数值模拟程序 MDSC2 的基础上, 增加了窗口材料 LiF 的相关程序模块, 使 MDSC2 程序具有了解带窗口磁驱动实验的能力。采用新编的 MDSC2 程序, 对大电流脉冲装置上的带窗口磁驱动实验进行了模拟。新编的 MDSC2 程序能正确模拟带窗口材料的磁驱动实验, 模拟的飞片/窗口界面速度和实验测量的飞片/窗口界面速度相一致。MDSC2 程序对带窗口材料磁驱动实验的正确模拟, 为磁驱动材料物性实验的模拟奠定了基础。下一步我们将在 MDSC2 程序的基础上, 增加样品材料的物性参数和功能模块, 使 MDSC2 程序成为磁驱动材料物性研究的重要工具。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Vogler T J, Ao T, Asay J R. High-pressure strength of aluminum under quasi-isentropic loading[J]. *International Journal of Plasticity*, 2009, 25: 671-694.
- [7] 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.
- [8] Lemke R W, Knudson M D, Hall C A, et al. Characterization of magnetically accelerated flyer plates[J]. *Physics of Plasmas*, 2003, 10(4): 1092-1099.
- [9] Lemke R W, Knudson M D, Davis J P. Magnetically driven hyper-velocity launch capability at the Sandia Z accelerator[J]. *International Journal of Impact*

- [Engineering](#), 2011, 38(6): 480-485.
- [10] Davis J P, Brown J L, Knudson M D, et al. Analysis of shockless dynamic compression data on solids to multi-megabar pressures: Application to tantalum[J]. [J Appl Phys](#), 2014, 116: 204903.
- [11] 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.
- [12] 阚明先, 王刚华, 肖波, 等. 磁驱动单侧飞片实验的数值模拟研究[J]. [爆炸与冲击](#), 2020, 40: 033304. (Kan Mingxian, Wang Ganghua, Xiao Bo, et al. Simulation on magnetically-driven one-sided flyer plate experiment[J]. [Explosion and shock waves](#), 2020, 40: 033304)
- [13] Deng Jianjun, Xie Weiping, Feng Shuping, et al. Initial performance of the primary test stand[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2013, 41(10): 2580-2583.
- [14] Ding Ning, Zhang Yang, Xiao Delong, et al. Theoretical and numerical research of wire array Z-pinch and dynamic hohlraum at IAPCM[J]. [Matter and Radiation at Extremes](#), 2016, 1(3): 135-152.
- [15] 阚明先, 张朝辉, 段书超, 等. “聚龙一号”装置上磁驱动铝飞片实验的数值模拟[J]. [强激光与粒子束](#), 2015, 27: 125001. (Kan Mingxian, Zhang Zhaohui, Duan Shuchao, et al. Numerical simulation of magnetically driven aluminum flyer plate on PTS accelerator[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2015, 27: 125001)
- [16] 王贵林, 张朝辉, 郭帅, 等. 聚龙一号装置上铜的准等熵压缩线测量实验研究[J]. [强激光与粒子束](#), 2016, 28: 055010. (Wang Guilin, Zhang Zhaohui, Guo Shuai, et al. Experimental measurement of quasi-isentrope for copper on PTS[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2016, 28: 055010)
- [17] 阚明先, 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)
- [18] 阚明先, 王刚华, 张红平, 等. 磁驱动高速飞片模拟中滑移界面处理[J]. [强激光与粒子束](#), 2015, 27: 015002. (Kan Mingxian, Wang Ganghua, Zhang Hongping, et al. Sliding interface processing in simulation on magnetically driving high speed flyer[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2015, 27: 015002)
- [19] 阚明先, 王刚华, 肖波, 等. 二维弹塑性磁流体动力学数值模拟[J]. [强激光与粒子束](#), 2018, 30: 065002. (Kan Mingxian, Wang Ganghua, Xiao Bo, et al. Two dimensional elasto-plastic MHD numerical simulation[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2018, 30: 065002)
- [20] 阚明先, 段书超, 张朝辉, 等. 二维磁驱动数值模拟程序MDSC2的验证与确认[J]. [强激光与粒子束](#), 2019, 31: 065001. (Kan Mingxian, Duan Shuchao, Zhang Zhaohui, et al. Verification and validation of two dimensional magnetically driven simulation code MDSC2[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2019, 31: 065001)
- [21] 阚明先, 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)
- [22] 阚明先, 段书超, 王刚华, 等. 自由面被烧蚀磁驱动飞片的数值模拟[J]. [强激光与粒子束](#), 2017, 29: 045003. (Kan Mingxian, Duan Shuchao, Wang Ganghua, et al. Numerical simulation of magnetically driven flyer plate of ablated free surface[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2017, 29: 045003)
- [23] 阚明先, 杨龙, 段书超, 等. 聚龙一号上磁驱动铝飞片发射实验的数值分析与再设计[J]. [爆炸与冲击](#), 2017, 37(5): 793-798. (Kan Mingxian, Yang Long, Duan Shuchao, et al. Numerical analysis and redesign of magnetically driven aluminum flyer plate on PTS accelerator[J]. [Explosion and Shock waves](#), 2017, 37(5): 793-798)
- [24] 阚明先, 段书超, 杨龙, 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, Yanglong, et al. Structure coefficient in magnetically driven flyer plate experiment[J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2020, 32: 085002)