

文章编号: 1001-1455(2008)03-0261-04

磁驱动平面飞片的一维磁流体力学计算*

王刚华¹, 孙承纬¹, 赵剑衡¹, 胡熙静², 蒋吉昊²

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆炸物理实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 建立了电磁驱动平面飞片的一维磁流体力学模型, 考虑了焦耳加热的影响, 并对 Sandia 实验室 Z 装置上开展的一个实验进行了模拟计算, 与实验结果比较表明, 计算给出的样品自由面速度历史曲线与实验 VISAR 测量的结果基本一致。还分析了焦耳加热对飞片的烧蚀情况, 并分析了磁场穿透深度, 给出了不同厚度飞片自由面的速度历史曲线。

关键词: 流体力学; 自由面速度; 一维数值计算; 高速飞片; 压缩波

中图分类号: O361.3; TN249

国标学科代码: 130 · 2547

文献标志码: A

1 引言

为了开展超高压(吉帕到太帕)加载下材料动态力学性质和超高速(大于 10 km/s)碰撞等问题研究, 发展了多种动高压加载技术来获得超高速飞片, 如气体炮、高功率激光和地下核爆炸等。使用二级轻气炮驱动的中、高速金属飞片撞击阻抗匹配的多层飞片组合, 或者密度梯度变化的功能材料飞片, 得到了速度高达十几公里每秒的完整末级飞片。近年来, 随着脉冲高功率脉冲大电流技术的发展, 利用大电流脉冲产生的强磁场作为压力驱动源来获得超高速飞片的研究, 引起了广大科学家的兴趣。如, 短路电流峰值达到 20 MA、上升沿为 110~300 ns 的 Z 装置, 已能把直径 2 cm、厚 0.2 mm 的铝飞片加速到 21~30 km/s 的超高速^[1-2]。本文中在一维磁流体力学的基础上, 建立电磁驱动飞片的物理模型, 编制相应的拉氏一维非定常可压缩磁流体力学程序, 试图给出飞片的自由面速度历史、速度等物理量剖面图的演化等情况。

2 基本原理

电脉冲功率装置短路放电, 产生的强电流流经两个相近的平行导电平面所构成的回路, 如图 1 所示。强电流产生的磁场与电流本身相互作用产生洛伦茨力, 由于异向电流相互排斥, 磁压力在两个电极板之间起排斥作用, 相当于在电极板相互靠近的平面上施加了一对压力脉冲, 在电极板较薄的位置, 压力脉冲将把电极板切割下来, 形成飞片。

回路放电电流的波形通常随时间接近于正弦上升, 而磁压力正比于电流密度的平方。因此, 飞片上作用的是在一定时间内接近于随时间线性平滑上升

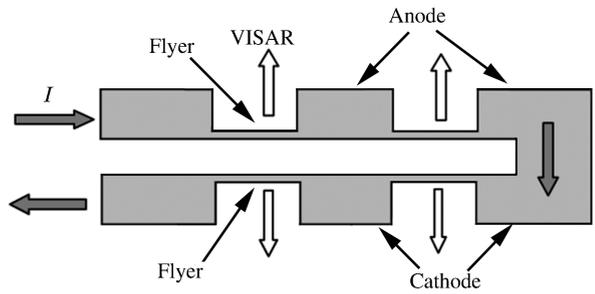


图 1 磁驱动平面飞片原理示意图

Fig. 1 Scheme for magnetically driven isentropic plane flyer

* 收稿日期: 2006-11-17; 修回日期: 2007-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(10472108); 中国工程物理研究院重大项目(2004Z0101);

中国工程物理研究院预研基金项目; 四川省青年基金项目

作者简介: 王刚华(1976—), 男, 博士研究生。

的压力波,材料在这样的加载作用下经历的压缩过程很接近于等熵过程。当压力波到达飞片的另一表面时,反射稀疏波,使该自由表面朝外加速运动。随着磁压力的逐步加强,可以获得高速飞片。

三维 MHD 计算和 Z 装置上进行的实验均表明磁驱动飞片的平面性相当好^[3-4],将磁压力加载作为平面波处理时,不会带来较大的误差。因此,采用一维 MHD 模型来进行描述,控制方程为

$$\begin{cases} \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \\ \rho \frac{du}{dt} + \frac{\partial}{\partial r} \left(p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) = 0 \\ e_T \frac{dT}{dt} + T p_T \frac{dv}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} \left(K \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \dot{e}_D = 0 \\ \rho \frac{d}{dt} \left(\frac{B}{\rho} \right) = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial r} \left(\eta \frac{\partial B}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} (uB) \end{cases}$$

式中: ρ 、 u 分别是密度和速度, t 是时间, r 是位置, p 是物质压力, $p_T = (\partial p / \partial T)_v$, $v = 1/\rho$ 是比体积, B 是磁场强度, K 是热传导系数, \dot{e}_D 是焦耳加热项。加载面处的磁压力

$$p(t) |_{r=0} = \frac{B_0^2}{2\mu} \quad B_0 = \frac{\mu_0 I(t)}{S}$$

式中: S 为自由参数^[5],取 $S = 4.5 \text{ cm}$ 。

3 计算结果与讨论

为了验证程序的正确性,对美国 Sandia 实验室 Z 装置上开展的一个磁驱动等熵加载发射铜飞片的试验 Z-452^[6]进行了计算。Z 装置是 20 世纪末由粒子束加速器 PBF AII 改造的低电感强电流的快脉冲功率发生器,其总储能为 11.4 MJ,可在 100~350 ns 内输出 20~22 MA 的大电流。Z-452 实验是在 Z 装置上早期开展的准等熵压缩试验,其所用铜飞片厚度分别为 0.491、0.808 mm,峰值加载压力为 20 GPa。

图 2 为飞片左边界上的等效磁压力加载曲线,图 3 为飞片自由面上的粒子速度随时间的变化曲线,其中虚线为实验中 VISAR 测量给出的曲线,实线是本文中程序计算给出的曲线。从图中可以看出,两者基本吻合,时间相差最大为 10 ns,速度相差最大为 35 m/s,在误差允许范围之内。

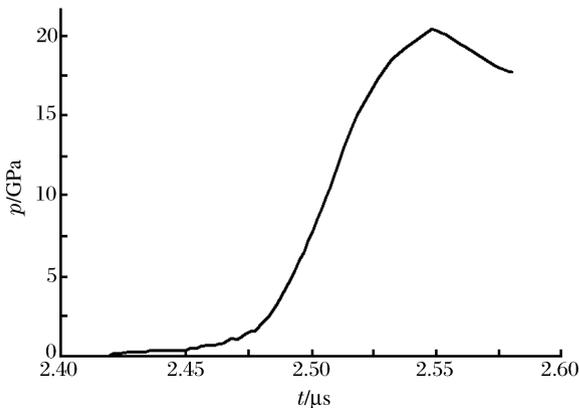


图 2 飞片左边界上的等效磁压力加载曲线

Fig. 2 Pressure load history

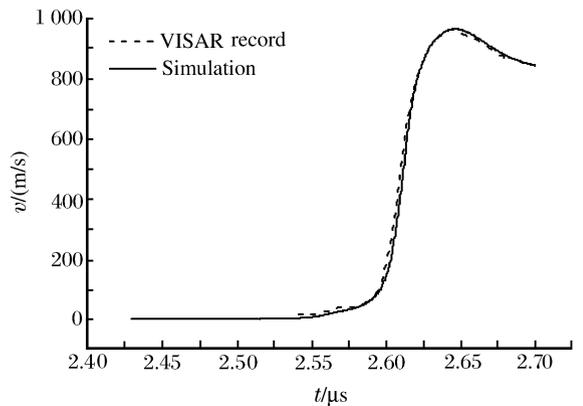


图 3 计算与实验测量的自由面速度历史比较

Fig. 3 Comparison of free surface velocity history

图 4 给出了 2.670 μs 时飞片不同厚度处的温度分布情况。由图可知,大部分飞片的温度上升很小,低于铜的熔点,依然处于固体状态,说明磁驱动飞片的等熵程度很高。在磁场加载面附近,由于电流的焦耳加热作用,飞片被烧蚀了约 17%。

图 5 给出了厚度分别为 0.300、0.491、0.808 mm 的平行飞片样品自由面的速度曲线。可以看到,随着飞片厚度的增加,得到的自由面处的速度历史曲线斜率增大,这是由于压缩波的后部分在增密了

的介质中传播时声速较高的缘故。对于 0.808 mm 的实验样品,得到的自由面速度曲线很陡,加载的压缩波基本上在样品内形成了冲击波。

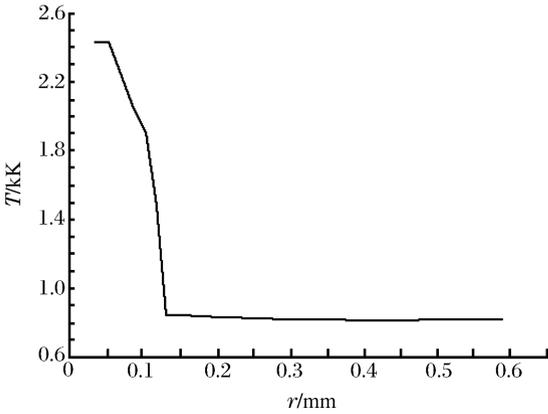


图4 计算给出的 Z-452 试验温度分布

Fig. 4 Final temperature distribution for Z-452

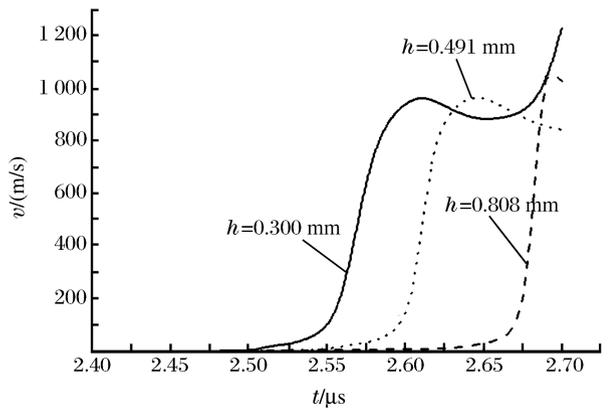


图5 不同厚度飞片自由面速度

Fig. 5 Free surface velocities of flyers

图6给出了 2.550、2.580、2.600、2.625 和 2.650 μs 时刻的速度分布情况。从图中可以看出, 2.550 μs 时,速度剖面的前沿相对平缓,但是,随着压缩波在样品中的传播,其前沿越来越陡。不过,从图中看来,压缩波在传到自由面后,没有转化成冲击波。之后,由于自由面的反射作用,样品自由面处的粒子速度很快加速。从图7的压力剖面图中可以看出,压缩波到达自由面之前,压力剖面的前沿随着压缩波的传播越来越陡,到达自由面之后,由于自由面反射的稀疏波的作用,接近自由面处的压力减小。

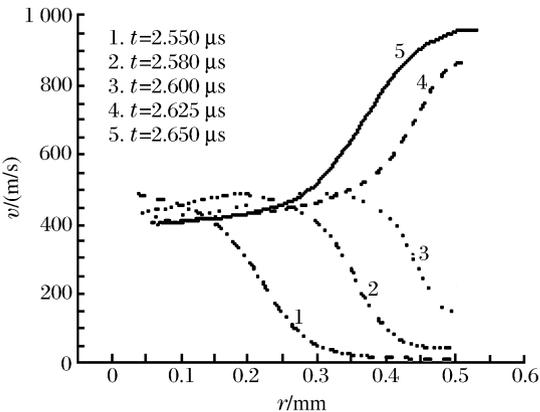


图6 不同时刻的速度分布

Fig. 6 Velocity cutaway view at different moment

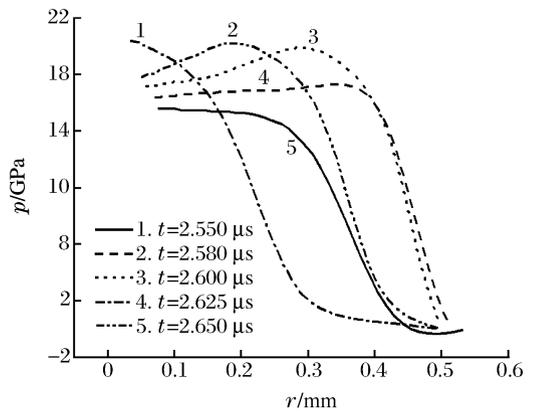


图7 不同时刻的压力分布

Fig. 7 Pressure cutaway view at different moment

电流在流经样品表面时,在样品加载面上产生磁场,同时对样品进行焦耳加热,由于磁扩散作用磁场将向样品内渗透。磁扩散速度主要取决于导体的电导率,导体的导电性能越好,磁扩散速度越慢。铜的电导率 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$,对于厚度 0.1 mm 的铜板,相应的磁扩散时间为 730 ns,磁扩散平均速度只有数百米每秒。如图8所示,在 270 ns 的时间内磁场扩散深度为约 0.17 mm,这一深度比前面的估计值大,这是由于焦耳加热和磁压力的压缩作用,导体的温度升高(如图4),导体的电导率下降,从而引起磁扩散速度加快。

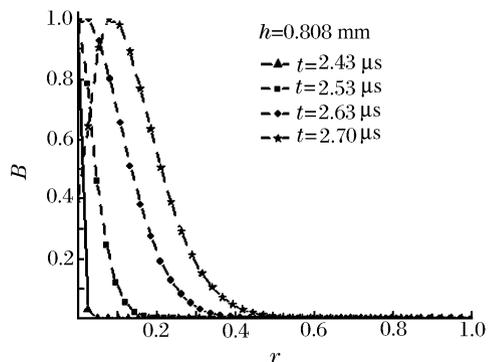


图8 不同时刻的磁场分布

Fig. 8 Penetration of magnetic field

4 结 论

在磁流体力学方程组的基础上建立了一个简单但适用于模拟磁驱动平面飞片的磁流体力学物理模型,对 Z-452 实验进行了计算。计算给出的自由面速度历史与实验中 VISAR 测量的结果基本一致,计算给出的各时刻速度、压力等物理量的剖面图基本上反映了磁驱动飞片的基本物理过程。对不同厚度的平行飞片样品的计算得出的自由面速度历史也符合磁驱动飞片的基本物理规律。由以上可以说明,模型比较成功的描述了磁驱动飞片的物理过程,计算结果反映了磁驱动飞片的物理机制。

参考文献:

- [1] Asay J R, Hall C A, Holland K G, et al. Isentropic compression of iron with the Z accelerator[C]//Furnish M D. Shock Compression of Condensed Matter—1999. New York: AIP Press, 2000;1151-1154.
- [2] Hall C A, Knudson M D, Asay J R, et al. High velocity flyer plate launch capability on the Sandia Z accelerator [J]. International Journal of Impact Engineering, 2001,26:275-287.
- [3] Lemke R W, Knudson M D. Considerations for generating up to 10 Mbar magnetic drive pressure with the refurbished Z-machine (ZR), Dense Z-pinch[C]//Davis J. 5th International Conference on Dense Z-Pinches. New York: AIP Press, 2002:299-304.
- [4] 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.
- [5] Lemke R W, Knudson M D, Robinson A C, et al. Self-consistent, two-dimensional, magnetohydrodynamic simulations of magnetically driven flyer plates[J]. Physics of Plasmas, 2003,10(5):1867-1874.
- [6] Hayes D. Backward integration of the equations of motion to correct for free surface perturbation[R]. Sandia National Laboratories, SAND 2001-1440,2001.

One-dimensional, magnetohydrodynamic simulations of magnetically driven flyer plates

WANG Gang-hua^{1*}, SUN Cheng-wei¹, ZHAO Jian-heng¹, HU Xi-jing², JIANG Ji-hao²

(1. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;

2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: A one-dimensional, magnetohydrodynamic model, in which the Ohmic heating is considered, was proposed to numerically calculate the experiment Z-452 carried out on the Z machine at Sandia National Laboratories. The computed free-surface velocities of the flyer plates agree well with the experimental records by VISAR. The paper also analyzes the ablation induced by the Ohmic heating in the flyer plates and the penetration of magnetic field. The obtained velocity, pressure history curves are helpful to understand the physical mechanism of magnetically accelerated plane flyers.

Key words: fluid mechanics; free-surface velocity; 1D numerical simulation; high speed flyer; compression wave

* Corresponding author: WANG Gang-hua
E-mail address: wanggh@caep.ac.cn
Telephone: 86-816-2494541