文章编号:1000-5773(2008)02-0137-05

磁驱动金属飞片速度理论近似解析*

王桂吉,孙承纬,蒋吉昊,莫建军,谭福利,张 宁

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳 621900)

摘要:从能量守恒关系出发,在一定假设的基础上,提出了一个近似估计磁驱动金属飞片速度的一维物理模型。该模型考虑了磁驱动过程中工作区电感的动态变化以及烧蚀能、磁场能的影响;用 3 个实验例子验证了该模型的有效性。结果表明,在无冲击形成以及飞片内能累积不大的情况下,用该模型可准确估计飞片的速度。

关键词:磁驱动;金属飞片;能量守恒;飞片速度

中图分类号:O521 **文献标识码**:A

1 引 言

磁驱动高速飞片实验技术是近些年发展起来的一种新型实验技术,已应用于材料的冲击压缩特性研究[1-3]。该实验技术的一个优点是能获得高速度的宏观金属飞片,且中心直径数毫米的范围内具有非常好的平面性(几纳秒)。目前美国 Sandia 国家实验室的研究人员利用 Z 装置将尺寸 15 mm×17 mm×0.85 mm 的铝飞片射到 34 km/s 的高速度,在靶中可产生数太帕的冲击波压力[4-5]。飞片速度可用激光干涉仪 VISAR 测量得到,但是,在实验前选择飞片的厚度时,需要用到一个理论的飞片速度值,这个值通常通过估计得到。文献[6]从动量守恒的角度给出了一种估算磁驱动飞片速度的方法,但没有考虑磁驱动飞片过程所伴随的烧蚀现象,即没有考虑烧蚀产生气体的膨胀作功的贡献,也没有考虑磁场能的影响,因此所估算的结果小于实验测量值 10%~15%。

本研究从能量守恒的关系出发,考虑磁场扩散所耗散的烧蚀能、过程中伴随的磁场能以及磁场扩散、飞片运动所引起的工作区电感的动态变化,研究磁驱动飞片速度的预估问题。

2 磁驱动飞片原理

如图 1 所示,当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时,一个平面上电流产生的磁场与另一个平面的电流相互作用产生洛伦茨力即磁压力,磁压力作用于电极内表面,向飞片自由面方向传播一压缩波,当压缩波达到自由面时,反射稀疏波,使该自由表面朝外加速运动。反射的稀疏波以 Lagrange 声速向加载面传播,到达加载面时,稀疏波与加载压缩波相互作用产生一个新的应力波,该应力波的幅值由加载的磁压力决定。如果放电电流波形的上升时间与初

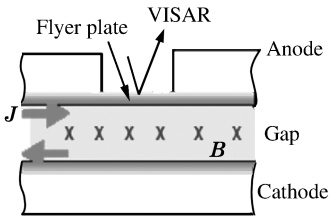


图 1 磁驱动飞片原理示意图

Fig. 1 Principle of magnetically driven flyer plate

* **收稿日期**:2007-03-28;**修回日期**:2007-08-21

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

作者简介:王桂吉(1977—),男,博士,助理研究员,主要从事电磁驱动技术及材料动力学行为研究. E-mail:wangguiji@126.com

通讯作者:孙承纬(1939—),男,教授,院士,主要从事爆炸力学、激光效应方面的研究. E-mail:sunchengwei@hotmail.com

始压缩波和稀疏波在飞片中的渡越时间之和的量级相同，则将会在飞片中产生一个再次压缩的过程，飞片将再次加速。该过程中，磁场扩散会引起加载面焦耳加热，导致加载面升温、熔化、汽化，气体反向运动至阴极，阴极材料通常为不锈钢或钨，厚度较大，因此可看作刚壁，气体膨胀至刚壁，进而朝飞片方向膨胀，推动飞片进一步加速。

图 1 所示的间隙通常为真空间隙，下面物理模型的建立即从真空间隙的角度出发。在不抽真空的情况下，通常间隙处为一定厚度的固体绝缘薄膜，用以装置正、负电极之间的绝缘，文献[7]即是该情况。验证算例 3 也用所建立的模型计算了这种情况下的飞片速度，并与实验结果进行了比较。

3 一维物理模型

假设：(1) 为一维问题；(2) 阴极为理想导体，阴极质量 M 远远大于阳极(飞片)质量 m，即 $M\gg m$；(3) 阴极速度 $u\to 0$；(4) 磁场扩散引起的焦尔热全部转化为烧蚀能，不考虑烧蚀的中间过程；(5) 不考虑温升引起的内能变化。

磁驱动飞片简化后的物理模型如图 2 所示。加载放电电流为 $i(t)$，发射飞片区的初始电感为 L_0，阴极和阳极初始间隙 x_0，飞片载流层电阻 R_0，飞片初始厚度 h_1，密度 ρ_1，面积 s，阴极厚度 h_2，密度 ρ_2，飞片运动速度 $v(t)$。

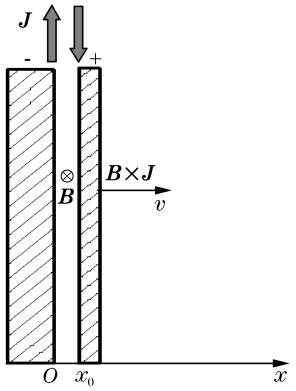


图 2 磁驱动飞片物理模型

Fig. 2 Physical model of magnetically driven flyer plate

放电电流流过所产生的焦尔热 $E_{\rm joul}$ 为

$$E_{\rm joul}=\int_0^t i^2(t)R_0\,{\rm d}t \tag{1}$$

结合假设(4)可计算出磁驱动飞片过程中飞片被烧蚀的质量 Δm 为

$$\Delta m(E_{\rm v}+E_{\rm m})=E_{\rm joul}=\int_0^t i^2(t)R_0\,{\rm d}t \tag{2}$$

式中：$E_{\rm v}$ 为飞片材料的汽化潜热，$E_{\rm m}$ 为飞片材料的熔化潜热。即

$$\Delta m=\frac{R_0}{E_{\rm v}+E_{\rm m}}\int_0^t i^2(t)\,{\rm d}t \tag{2a}$$

根据(2)式可求出飞片的烧蚀厚度 $x(t)$。由 $\Delta m=\rho_1 s x(t)$，得到

$$x(t)=\frac{R_0}{\rho_1 s(E_{\rm v}+E_{\rm m})}\int_0^t i^2(t)\,{\rm d}t \tag{3}$$

则烧蚀速度 $v_{\rm a}(t)$ 为

$$v_{\rm a}=\frac{{\rm d}x(t)}{{\rm d}t}=\frac{R_0}{\rho_1 s(E_{\rm v}+E_{\rm m})}i^2(t) \tag{4}$$

飞片的运动及其磁驱动过程负载区电感 $L(t)$ 为

$$L(t)=L_0+\int_0^t \mu_0 K_{\rm sh}\frac{l}{h}[v_{\rm a}(t)+v(t)]\,{\rm d}t \tag{5}$$

式中：μ_0 为真空磁导率，为 $4\pi\times10^{-7}$ H/m，l 为飞片长度，h 为飞片宽度，$K_{\rm sh}$ 为调节系数，此处取 1。将(4)式代入(5)式得到

$$L(t)=L_0+\frac{\mu_0 K_{\rm sh} l R_0}{\rho_1 s h(E_{\rm v}+E_{\rm m})}\int_0^t i^2(t)\,{\rm d}t+\frac{\mu_0 K_{\rm sh} l}{h}\int_0^t v(t)\,{\rm d}t \tag{6}$$

进一步得到

$$\frac{{\rm d}L(t)}{{\rm d}t}=\frac{\mu_0 K_{\rm sh} l R_0}{\rho_1 s h(E_{\rm v}+E_{\rm m})}i^2(t)+\frac{\mu_0 K_{\rm sh} l}{h}v(t) \tag{7}$$

由能量守恒得

$$\int_0^t UI\,{\rm d}t=E_{\rm k}+E_{\rm a}+E_{\rm B} \tag{8}$$

式中:E_k 为飞片动能,E_a 为烧蚀能,E_B 为磁场能。

$$\int_0^t UI\,\mathrm{d}t=\int_0^t\left[\frac{\mathrm{d}(Li)}{\mathrm{d}t}+iR_0\right]i\,\mathrm{d}t \tag{8a}$$

$$E_k=\frac{1}{2}(m-\Delta m)v^2 \tag{8b}$$

$$E_a=E_{joul} \tag{8c}$$

$$E_B=\int_V\frac{B^2}{2\mu_0}\mathrm{d}V=\int_V\frac{\mu_0}{2h^2}i^2(t)\mathrm{d}V=\frac{\mu_0 s}{2h^2}i^2(t)\left[x_0+x(t)+\int_0^t v(t)\,\mathrm{d}t\right] \tag{8d}$$

将(3)式代入(8d)式得到

$$E_B=\frac{\mu_0 s}{2h^2}i^2(t)\left[x_0+\frac{R_0}{\rho_1 s(E_v+E_m)}\int_0^t i^2(t)\,\mathrm{d}t+\int_0^t v(t)\,\mathrm{d}t\right] \tag{8e}$$

将(8a)式～(8e)式代入(8)式得到

$$\int_0^t\left[\frac{\mathrm{d}(Li)}{\mathrm{d}t}\cdot i\mathrm{d}t\right]=\frac{1}{2}[\rho_1 sh_1-\rho_1 sx(t)]v^2(t)+\frac{\mu_0 s}{2h^2}i^2(t)\left[x_0+\frac{R_0}{\rho_1 s(E_v+E_m)}\int_0^t i^2(t)\mathrm{d}t+\int_0^t v(t)\mathrm{d}t\right]$$

即

$$\int_0^t i(t)\cdot\mathrm{d}[L(t)i(t)]=\frac{1}{2}\rho_1 s\left[h_1-\frac{R_0}{\rho_1 s(E_v+E_m)}\int_0^t i^2(t)\,\mathrm{d}t\right]v^2(t)+\frac{\mu_0 s}{2h^2}i^2(t)\left[x_0+\frac{R_0}{\rho_1 s(E_v+E_m)}\int_0^t i^2(t)\mathrm{d}t+\int_0^t v(t)\,\mathrm{d}t\right] \tag{9}$$

上述模型的精确性如何,下面引用文献[5]和文献[6]以及我们的实验数据进行考核。

4　模型有效性验证

算例 1[6]:飞片材料为铝,其熔化潜热 $E_m=397$ kJ/kg,汽化潜热 $E_v=8\,400$ kJ/kg。$\rho_1=2.7$ Mg/m^3,飞片厚度为 0.925 mm,$s=l\times h=1.5$ cm×4.5 cm,$x_0=1$ mm,$K_{sh}\approx1$,$R_0=5$ μΩ,$L_0=0.419$ nH。加载电流曲线 $i(t)$见图 3 所示,(9)式的计算结果和实验测量结果的比较情况如图 4 所示,(9)式采用数值求解。

图 4 的结果表明,在飞片飞行的后期阶段,本研究的计算结果与实验测量结果相一致,误差小于 1%,由于电流波形的影响,本发实验在飞片中形成了初始冲击,而本研究的物理模型难以考虑该情形,因而初始阶段两者相差较大,随着加速的进一步进行,两者趋于一致。下面的例子是加载电流波形经过调节,因而避免了飞片中冲击的形成。

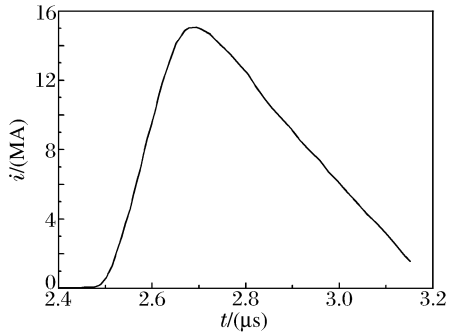
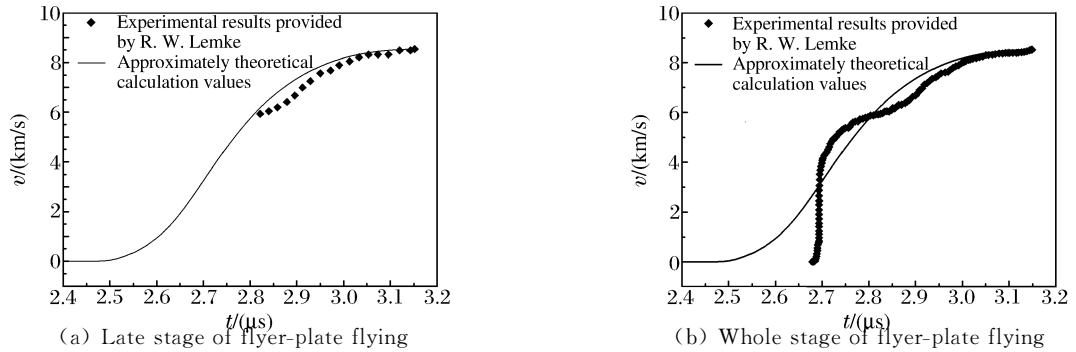


图 3　加载电流曲线 $i(t)$

Fig. 3　Loading current $i(t)$



(a) Late stage of flyer-plate flying　　(b) Whole stage of flyer-plate flying

图 4　算例 1 理论近似求解值与实验值比较结果

Fig. 4　Experimental and calculated results of Example 1

算例 2[5]：飞片材料为铝，其熔化潜热 $E_m=397$ kJ/kg，汽化潜热 $E_v=8\,400$ kJ/kg。$\rho_1=2.7$ Mg/m^3，飞片厚度为 0.85 mm，$s=l\times h=2.5$ cm$\times 1.5$ cm，$x_0=1$ mm，$K_{sh}\approx 1$，$R_0=0.025$ μΩ，$L_0=2.09$ nH。加载电流曲线 $i(t)$ 见图 5 所示，结果见图 6 所示。

图 6 的结果表明，在飞片中不形成冲击的情况下，在 0～30 km/s 的速度范围内，计算值与实验测量结果相一致，之后，计算值偏大，到 34 km/s 时，两者相差 15%～20%。究其原因可能是，随着时间的推移，飞片中内能的累积效应越来越明显，内能的忽略导致后期模型的结果偏大；另外，模型中没有考虑空气阻力因素的影响，随着飞片速度的越来越大，这种阻碍效应越明显。

图 5 和图 6 的结果还表明，理论上，加载电流的上升速率越大，所获得的飞片速度越高。但实际上，加载电流的上升速率越高，在飞片中形成冲击的可能性越大，一旦形成冲击，飞片的温度迅速上升很高，因而内能增加明显，导致飞片速度下降，且难以保证好的飞片状态。

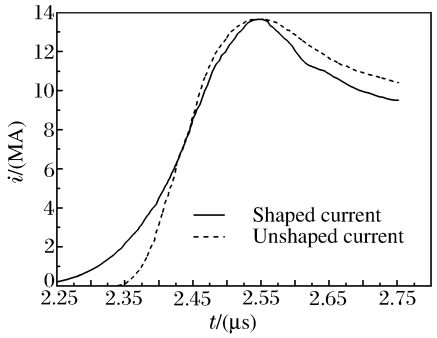


图 5 调节前后加载电流波形

Fig. 5 Loading current waves before and after shaping

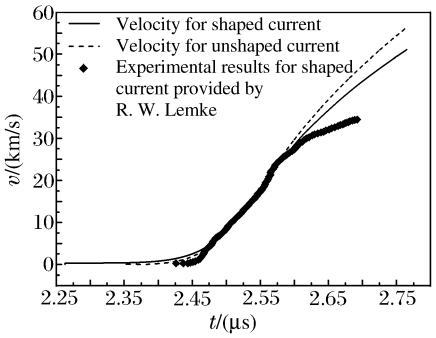


图 6 算例 2 理论近似求解值与实验值比较结果

Fig. 6 Experimental and calculated results of Example 2

算例 3 是间隙为固体薄膜的情况。飞片材料为铝，其熔化潜热 $E_m=397$ kJ/kg，汽化潜热 $E_v=8\,400$ kJ/kg。$\rho_1=2.7$ Mg/m^3，飞片厚度为 0.7 mm，$s=l\times h=5$ mm$\times 5$ mm，$x_0=0.271$ mm，$K_{sh}\approx 1$，$R_0=35.714$ μΩ，$L_0=0.339\,3$ nH。加载电流曲线 $i(t)$ 见图 7 所示，结果见图 8 所示。

图 8 的结果表明，在 9.57 μs 时，实验测得的飞片速度为 6.267 km/s，模型计算的结果为 7.013 km/s，模型计算结果高于实验结果约 12%。在加速的初始阶段，实验结果高于计算结果。可能的原因是，模型建立的条件与实验有差异，模型是基于真空磁绝缘的情况提出的，且假设为一维问题。而本实验采用固体绝缘介质进行绝缘，飞片尺寸相对较小，这种情况下，焦耳加热产生的气体反膨胀作功比真空磁绝缘的情况要小，因为由 15 张绝缘薄膜组成的绝缘介质不能假设为刚体，这与真空磁绝缘情况假设阴极为刚体的条件有出入。另外，由于本研究飞片的尺寸相对较小，可能与模型的一维假设有悖。尽管如此，从预估的角度看，本研究提出的计算模型还是能有效预估飞片的速度。

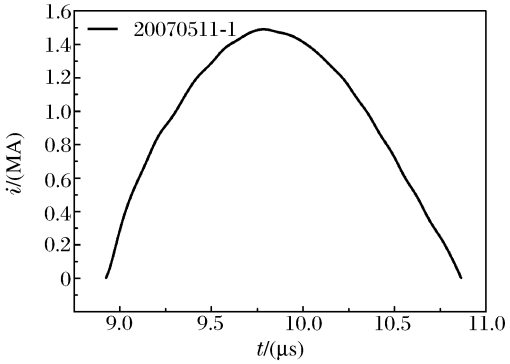


图 7 加载电流曲线 $i(t)$

Fig. 7 Loading current $i(t)$

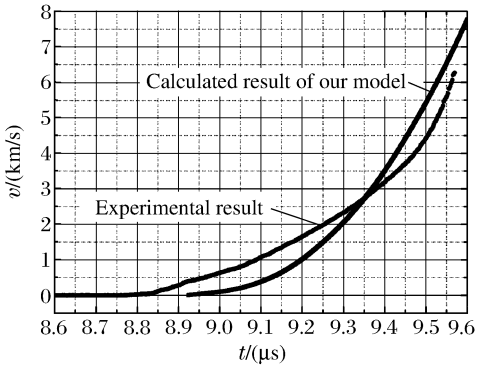


图 8 算例 3 理论近似求解值与实验值比较结果

Fig. 8 Experimental and calculated results of Example 3

3 个算例的结果表明,在 1.5～15 MA 的宽电流范围内,所提出的计算模型能有效预估飞片速度,计算结果与实验结果符合较好。

5 结　论

基于能量守恒关系,提出了一个估算磁驱动飞片速度的一维物理模型,实验结果证明该物理模型有效,在无冲击形成以及飞片内能累积不明显的情况下,实验结果与模型计算结果相一致,误差在 1%以内。

References:

[1] Knudson M D, Hanson D L. Principal Hugoniot, Reverberating Wave, and Mechanical Reshock Measurements of Liquid Deuterium to 400 GPa Using Plate Impact Techniques [J]. Phys Rev B, 2004, 69: 144209.

[2] Rothman S D, Parker K, Robinson C. Measurement of a Release Adiabat from ～8 Mbar in Lead Using Magnetically Driven Flyer Impact [J]. Phys Plasmas, 2004, 11(12): 5620-5625.

[3] Knudson M D, Hanson D L. Use of a Reverberation Technique to Infer the Density Compression of Shocked Liquid Deuterium to 75 GPa [J]. Phys Rev Lett, 2003, 90(3): 035505.

[4] Knudson M D, Lemke R W. Near-Absolute Hugoniot Measurements in Aluminum to 500 GPa Using a Magnetically Accelerated Flyer Plate Technique [J]. J Appl Phys, 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]. J Appl Phys, 2005, 98: 073530(-1)-073530(-9).

[6] Lemke R W, Knudson M D. Characterization of Magnetically Accelerated Flyer Plates [J]. Phys Plasmas, 2003, 10(4): 1092-1099.

[7] Wang G J. Research on Magnetically Driven Isentropic Compression and Flyer Plates [D]. Mianyang: CAEP, 2007. (in Chinese)
王桂吉. 磁驱动等熵压缩和飞片加载技术和实验研究 [D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2007.

Approximately Theoretical Resolution of the Velocity of the Metallic Flyer Plates Driven by Magnetic Field

WANG Gui-Ji, SUN Cheng-Wei, JIANG Ji-Hao,
MO Jian-Jun, TAN Fu-Li, ZHANG Ning

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

Abstract: Based on the energy conservation relation and some assumptions, an one-dimensional physical model is proposed to predict the velocity of the metallic flyer plates driven by magnetic field. In this model, the dynamic change of the inductance in work space, the ablation energy and the magnetic field energy produced during the process of magnetic driving are considered. Three experimental examples are used to verify the validity of the model. The results show that the model can accurately predict the velocity of the flyer plates under the conditions of no shock formation and no obvious internal energy accumulation in the plates.

Key words: magnetic field driving; metallic flyer plates; energy conservation; velocity of flyer plates