文章编号：1000-5773(2006)01-0097-05

磁场准等熵驱动飞片技术原理性实验研究*

张朝辉，刘仓理，杨礼兵，顾元朝，邹 杰，黄显宾，
欧阳凯，李 军，刘 乔，邓向阳

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：探索了磁场准等熵驱动飞片发射的实验技术，在 FP-1 装置上成功实现了多种尺寸飞片的驱动实验，并利用 VISAR 系统获得了飞片的速度历史曲线。在回路放电峰值为 3 MA 的情况下，获得飞片最高速度为 797.3 m/s。初步获得了准等熵加载的原理性技术及其基本原理，促进了磁驱动准等熵加载、发射飞片实验技术，以及后续的物态方程研究的开展。

关键词：磁场驱动；等熵驱动；驱动飞片

中图分类号：O521.3；O347.1 **文献标识码**：A

1 引 言

在以前的状态方程研究中，通常采用平面冲击压缩的方法进行相关研究，它是研究材料在压力接近 100 GPa 时的高压状态方程(EOS)的主要工具。利用这种方法，将时间历程约为几纳秒的一维冲击波作用在平面样品上，测量平面加载产生的定常冲击波的性质，比如冲击波速和波后粒子速度等，然后利用定常冲击波的守恒方程组确定状态方程的 p-v-e 数据。每个实验能够产生唯一一个压力、比容和内能状态[1]。在常温条件下，通过定常冲击波在材料中的传播而产生的多个终态来确定状态方程曲线，作为主雨贡纽曲线。虽然冲击波方法对于获得状态方程信息是一种非常有用的工具，但雨贡纽曲线不能满足许多应用中所要求的完全物态方程的需求，因为确定一个类似的 p-v 关系，需要多个冲击压缩实验；而通过等熵加载技术，却可以确定等熵响应的大段曲线。同时，在状态方程的实际使用中，在许多环境下，材料的状态并不处于这些曲线上，而必须由在实验条件下获得的状态数据外推获得。但是，由于状态方程理论还未完善，仅基于某一种条件下获得的数据外推的结果的可靠性并未得到证实。因此开展不同条件下状态方程的研究，对于建立可信的较宽区域的状态方程是非常适合的。目前，等温和绝热状态方程的研究已有较成熟的技术，等温线可利用冲击高压技术，绝热线可利用气炮、化爆和激光加载技术，而准等熵技术目前公认可行的方法是利用脉冲功率技术驱动飞片。

本文报道利用中国工程物理研究院流体物理研究所 FP-1 装置进行的磁场等熵驱动飞片原理性实验研究的结果以及简单的分析，探讨了在现有实验条件下进行相关研究的可行性，为以后进行进一步的实验研究奠定了基础。

2 磁场等熵驱动技术国内外研究现状

磁场等熵驱动技术作为一种新型的实验研究物态方程的技术手段，具有研究材料高密度等熵压缩特性和完全物态方程的重要前景，对于核武器相关材料动力学性质和数据库的深入研究具有重要的意义，成为国外核武器物理实验室研究的前沿和热点。

* **收稿日期**：2004-07-05；**修回日期**：2004-12-08

基金项目：武器装备预先研究项目(4210509-030800)

作者简介：张朝辉(1979—)，男，硕士，主要从事准等熵加载技术研究.
E-mail：johoney@sina.com

在国外核武器物理实验室中，磁压驱动的铝套筒或薄飞片的速度已达 12～21 km/s(完整－熔化飞片)，冲击压力已达 TPa 范围[2]。Sandia 实验室在 Z 装置短脉冲(0.3 μs)等熵压缩实验(Isentropic Compression Experiments，ICE)中，被加载材料中的最高压力约 200 GPa，铜、钽样品实验压力大于 100 GPa，钨样品的压力约 30 GPa。在 Los Alamos/Livermore 联合实验中，利用小型平板型爆磁压缩发生器供电，供电电流峰值为 3.3 MA，上升沿 0.5 μs，使钨样品的压力达到 47 GPa。Los Alamos 实验室准备用单个 Ranchero 发生器(1.4 m)产生电流 50～90 MA，可实现钨样品的 2 TPa 等熵压缩。

国内目前尚未开展相关的实验研究。

3 磁场等熵驱动技术基本原理

磁场等熵驱动技术的基本原理就是利用强脉冲电流产生磁场，以洛仑兹力作为飞片驱动源。利用装置能产生大电流脉冲的能力，当电流从阳极流向阴极时，产生 $\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}$ 力来加速飞片。

图 1 为磁场驱动飞片原理图。如图所示，阴阳两极间的电流方向相反，由洛仑兹力的判定方法可以得出，飞片的受力方向向上。电流回路存在于阴阳两极间，并分别在两极相对的内表面产生电流，电流密度和由于电流流动在绝缘空腔间产生的磁场相互作用，从而产生一个时间相关的磁压[3]，最终作用在飞片的内表面。产生的加载压力为

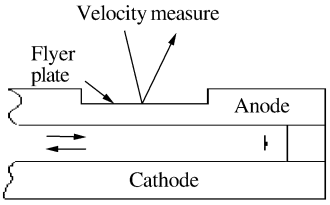

图 1 磁场驱动飞片实验原理示意图

Fig. 1 Schematic of the theory of magnectically-driven flyer plates

$$p(t)=B^2/2\mu_0=\mu_0 J^2(t)/2 \tag{1}$$

式中：$p(t)$是样品中产生的时间相关的磁压大小。$J(t)$是在样品处时间相关的电流密度。B 是磁场强度，μ_0 是自由面的磁导率。由(1)式可见，压力的产生时间是由电流的上升沿决定的，而大小则由电流密度决定。

4 实验研究

4.1 实验系统

本工作主要利用中国工程物理研究院流体物理研究所的 FP-1 装置作为能源系统，结合光测系统，进行飞片平均速度和速度时间历程等测量。初步掌握磁场驱动飞片技术。

能源系统主体部分为 FP-1 装置。FP-1 装置组建于 1996 年，以电容器为脉冲功率源。额定电压为 100 kV，总容量 216 μF，最大贮能 1.08 MJ，加载电流可达 4 MA，电流上升沿 3～5 μs。

光测系统包括光纤探针系统和 VISAR(Velocity Interferometer System for Any Reflector)系统。

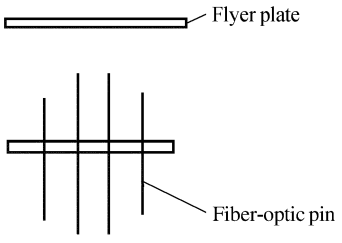

图 2 光纤探针测试系统示意图

Fig. 2 Schematic of the fiber-optic pin system

在实验中，每个飞片用 4 根光纤进行测量，其中两根在一个平面上，另两根在另一个平面上，两个平面距离为 3 mm，通过测量飞片到达两个平面上的时间差，可以得到飞片的平均速度，测量原理如图 2 所示。

VISAR 系统意为可测量任意反射表面的速度干涉仪，主要优点是既可以用于测量镜反射表面样品，也可测量漫反射表面样品，因而可用于研究高压力范围内材料的动态性能。在本研究中，利用 VISAR 系统对样品进行非接触测量，可以做到不干扰目标的运动，测定值是一个点的真实运动，可以记录下飞片的速度时间历程曲线。

4.2 实验负载结构

FP-1 装置的 4 组电容器呈对称四边形分布，通过 4 个汇流板同时向装置中心部位供电，针对装置的结构特点，负载结构设计为对称结构。阳极汇流板和阴极汇流板分别同电容器组相连，两者之间由尼龙材料绝缘，阳极是 4 块互相啮合的直角弯板，底部与阳极汇流板相连；阴极汇流板与阴极柱为一体；阳极板与阴极柱通过阴阳极短路板相连形成电流回路。为保证在阴阳极间空腔内有足够的磁压，两者距离选择为 3 mm。飞片发射结构位于阳极板上，为了在飞片处有较大的电流密度即较大磁压作用，发射结构在飞片处形成电流突变，飞片大小相对阳极板非常小。每套负载结构有两个面进行飞片驱动实验，并对飞片的平均速度和速度时间历程进行测量，为了便于光测系统的安装测量，两个飞片位于相对的两个面，两套光测系统可以方便地分别对两个飞片进行测量。负载结构如图 3 所示。

4.3　实验

磁场等熵驱动飞片实验共进行了 3 次,对飞片的速度时间历程进行系统测量,实验采用的电流波形如图 4 所示。表 1 为各次实验的电流参数和飞片参数。

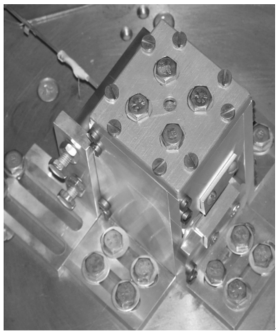

图 3　磁场等熵驱动飞片技术实验负载结构

Fig. 3　Load structure of isentropic magnectically-driven flyer plates experiments

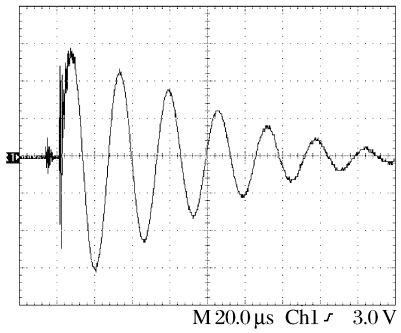

图 4　系列实验典型电流波形

Fig. 4　The representative current history in the series experiments

表 1　各次实验相关参数

Table 1　Parameters of experiments

Experiment Number	Current parameters			Flyer plates size		
	Charge voltage /(kV)	Peak current /(MA)	Rise-time /(μs)	Height /(cm)	Width /(cm)	Thickness /(mm)
20040414	±25	2.6	5	4.2	2.5	2
20040419	±25	3.0	5	4.0	1.2	1
20040421	±30	3.4	5	4.0	1.2	1

4.4　实验结果及理论分析

为了对实验结果进行初步的理论分析,将一维弹塑性流体动力学程序 SSS 的压力脉冲加载条件替换为公式(1)中与时间相关的磁压条件,并依据负载结构设计,建立了简化的一维平面磁压作用模型,建立了对磁压驱动飞片问题的理论计算方法。利用这套计算方法,对 3 次实验中飞片的速度时间历程进行了计算,并与实验结果进行了逐一的比较。

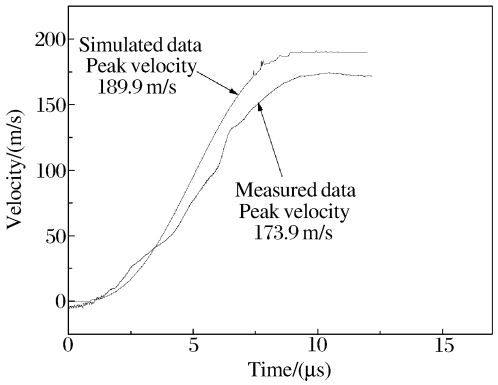

图 5　20040414 号实验数值模拟与实验曲线比较

Fig. 5　Comparison of the simulated data and the measured data in 20040414

对于 20040414 号实验,理论计算的速度最高点为 189.9 m/s,实验测得飞片最高速度为 173.9 m/s,两者峰值速度吻合很好。计算曲线与实验曲线见图 5。由图 5 可见,在实验曲线中,上升段有几个比较微小的波动,是因为实验中,负载结构有爬电现象,导致流过阳极的电流不均匀,从而在 VISAR 信号上反应为小的震荡。在速度达到最高点后,在理论曲线上速度变为匀速,这是因为在理论计算中,假定飞片在真空中飞行,未受到阻力作用;而在实验中,飞片由于受到空气阻力,速度在达到最高点后会下降,然后由于电流烧蚀作用,飞片在飞行过程中质量减少,使飞片的速度又出现一个小幅度的再度提高。

在 20040419 号实验中,理论计算的最高速度为 378.5 m/s,实验测得的最高速度为 325.2 m/s。理论曲线与实验曲线吻合得很好,两者波形接近(见图 6)。由图可见,实验曲线在刚开始的 2 μs 内有比较明显的干扰,这是由光电倍增管引起的噪声信号,在两台示波器中,各有一个通道存在这样的干扰信号。在经过最高点后,飞片速度迅速下降,与 20040414 号实验速度稍有不同,这是因为在 20040419 号实验

中，飞片未产生太多烧蚀现象，质量没有明显损失，在失去推力后，受空气阻力作用，速度迅速降低。

在 20040421 号实验中，理论计算的飞片最高速度为 759.8 m/s，而实验得到的飞片最高速度为 797.3 m/s，实验值略高于理论值，计算曲线与实验曲线如图 7 所示。由图可见，在速度历史的前期，两条曲线吻合比较好，但在实验曲线中，本应该受到空气阻力下降的速度还是一直增长，超过理论计算值。特别是在图中所示的跳跃点处，曲线有一个明显的跃升。分析其原因，在该次实验后，发现阴阳极汇流板间起绝缘作用的尼龙绝缘层遭到严重破坏，导致电流密度在那个时刻附近有非常大的升高，从而对飞片产生了比理论计算更大的磁压力的作用，而获得了比理论值略高的速度。

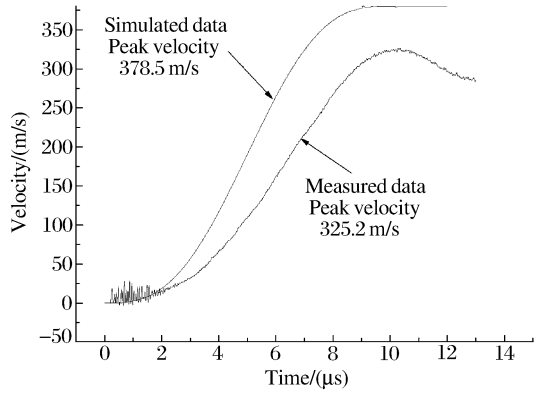

图 6 20040419 号实验数值模拟与实验曲线比较

Fig. 6 Comparison of the simulated data and the measured data in 20040419

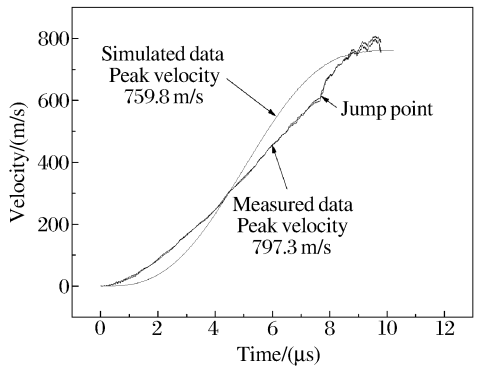

图 7 20040421 号实验数值模拟与实验曲线比较

Fig. 7 Comparison of the simulated data and the measured data in 20040421

5 总 结

通过在 FP-1 装置上的系列实验，实现了利用脉冲大电流产生的强磁场准等熵驱动飞片、使飞片获得较高速度的目标。通过相关数值模拟工作，对飞片速度时间历程进行模拟计算，与实验所得飞片速度时间历程曲线吻合较好。验证了磁场等熵驱动飞片的可行性，在磁场驱动飞片过程中，飞片速度平滑增长，而不是冲击压缩方法中飞片速度呈台阶状瞬间达到终态速度，从而使飞片的熵增减小，对完全物态方程、材料动力学等研究领域具有非常重要的应用意义。同时，由于本工作仅为探索性实验，重点在于研究磁场驱动飞片的可行性，且由于装置本身的限制，导致飞片二维效应比较严重，平面性很差。我们计划在下一步工作中，改进 FP-1 装置，压缩其上升沿时间，并通过各种手段增大电流密度，比如缩小负载结构尺寸等方法，以期获得更高的飞片峰值速度。

References:

[1] Hall C A, Asay J R. Experimental Configuration for Isentropic Compression of Solids Using Pulsed Magnetic Loading [J]. Rev Sci Instru, 2001, 72(9): 3587-3595

[2] Hall C A, Kundson M D. High Velocity Flyer Plate Launch Capability on the SANDIA Z Accelerator [J]. Int J Impact Eng, 2001, (265): 275-287.

[3] Reisman D B, Cauble R C. Magnetically Driven Isentropic Compression Experiments on the Z Accelerator [J]. J Appl Phys, 2001, 89(3): 1625-1633.

Principle Experiments Research of Technique for Quasi-Isentropic Magnetically Driven Flyer Plates

ZHANG Zhao-Hui, LIU Cang-Li, YANG Li-Bing, GU Yuan-Chao,
ZOU Jie, HUANG Xian-Bin, OUYANG Kai,
LI Jun, LIU Qiao, DENG Xiang-Yang

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

Abstract: Experiments were performed to investigate the quasi-isentropic magnetically driven flyer plates with several sizes on FP-1, and their velocity histories were recorded by VISAR. When the maximum current was 3 MA, the maximum velocity of flyer plate was 797.3 m/s. Through this work, we get the principle technique for quasi-isentropic load. This will be helpful to further development of the magnetically driven quasi-isentropic load technique, launching flyer plates technique and the study of equation of state.

Key words: magnetically driven; isentropic driven; driven flyer plates

《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，请提供第一作者、通讯作者简介（姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等），以及所有联系方式（通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等），以备联系。请注明论文（工作）的资助项目（资助项目名称和批准号），简要介绍工作背景和论文意义。来稿中所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。来稿一式三份。为缩短邮寄时间，编辑部建议作者使用电子邮件投稿（gaoya@caep.ac.cn 或 gywl@chinajournal.net.cn）。

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）。

《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。

重点注意事项

▲ 中英文摘要　中、英文摘要一定要仔细斟酌，英文摘要的质量直接决定文章能否被 EI Compendex 收录。摘要千万不要泛泛而谈，语言要简练，应有具体内容。要求：(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。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。摘要叙述要完整，清楚，简明。《高压物理学报》要求中文摘要在 200～400 个字之间，英文摘要不少于 120 个实词。为便于 EI Compendex 以及国外其它数据库收录，英文摘要中尽量避免特殊字符（各种数学符号、上下脚标及希腊字母）及由特殊字符组成的数学表达式；第一句不要与英文题名重复；尽量用短句子并避免句形单调；用过去时态叙述主要工作，用现在时态叙述结论，尽量用主动语态代替被动语态。

▲ 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，并尽量引用近期国内外文献，采用“顺序编码制”著录。中文参考文献必须附英译文，著录项目应齐全。

▲ 版权与稿酬　《高压物理学报》已加入《中国学术期刊（光盘版）》、万方数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、数字化科技期刊群、台湾中文电子期刊服务——思博网（CEPS）等。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