文章编号：1000-5773(2009)04-0266-05

40 GPa 压力范围内铜和铝的准等熵压缩线*

王桂吉，谭福利，孙承纬，赵剑衡，王刚华，莫建军，
张 宁，汪小松，吴 刚，韩 梅

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：基于自行研制的磁驱动准等熵压缩加载实验装置 CQ-1.5，利用全光纤位移干涉仪（Doppler Pins System，DPS）、激光速度干涉计（Velocity Interferometer System for Any Reflectors，VISAR）两种测试手段，以及反积分数据处理方法，实验测量了 40 GPa 压力范围内 T1 铜、LY12 硬铝和 L1 纯铝 3 种材料的准等熵压缩线，将实验准等熵压缩线与基于 Grüneisen 状态方程的理论等熵压缩线和冲击 Hugoniot 线进行了比较。结果表明，在该压力范围内，实验准等熵压缩线与理论等熵压缩线相一致，两者偏差小于 3%；实验准等熵压缩线靠近冲击 Hugoniot 线，位于其下方，与国外文献发表的结果相同，进一步表明，实验测量结果正确可靠。

关键词：磁驱动加载；准等熵压缩；等熵压缩线
中图分类号：O347.1；O242.1 **文献标识码**：A

1 引 言

磁驱动准等熵压缩和高速飞片实验技术是近十年来国际上发展起来的一种新型动态加载技术，主要用于材料的（准）等熵压缩实验和高压力范围内的冲击波物理实验研究[1-3]。材料的准等熵压缩特性，即偏离 Hugoniot（Off-Hugoniot）状态特性，是诸多武器物理设计所必须获取的数据，例如核武器的初级内爆压缩状态、惯性约束聚变的压缩状态等都接近等熵压缩状态[4]。因此开展此类研究具有重要的物理意义和应用前景。

目前国际上主要有美国 Sandia 国家实验室[5]、Los Alamos 国家实验室[6]、华盛顿州立大学[7]、法国的 Gramat 原子研究中心[8]、英国的 AWE[9] 等单位开展了该研究。Sandia 国家实验室利用 Z 装置已经能将铝等熵压缩至 260 GPa[5]；法国能将铜等熵压缩至 100 GPa 左右[6]；英国主要和美国联合，在 Z 机器上开展相关研究。

近几年，国内中国工程物理研究院流体物理研究所孙承纬院士带领的课题组开展了相关研究工作，本工作即是研究内容之一。

2 磁驱动准等熵压缩原理

如图 1 所示，流经由绝缘薄膜隔开的正负平行电极（样品）的电流（密度）$\boldsymbol{J}$ 与其产生的磁场 $\boldsymbol{B}$ 相互作用，产生洛仑兹力 $\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}$，作用于电极样品的内表面，向样品由内至外传播一压缩波，理想情况下该压缩波的幅值大小为

* **收稿日期**：2008-04-25；**修回日期**：2008-11-27
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（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

$$p(t) \propto B(t)^2, \quad p(t) = 2\pi J(t)^2 \tag{1}$$

式中:$p(t)$为压缩波的压力幅值,$J(t)$为流经电极样品的线电流密度,$B(t)$为 $J(t)$相应产生的磁场。

利用激光干涉技术 VISAR(速度)或多普勒探针 DPS(位移)测量同一发实验中不同厚度样品(至少 2 种厚度样品)的自由面速度或样品与窗口界面的粒子速度,然后利用反积分数据处理方法[10]得到样品的准等熵压缩线。

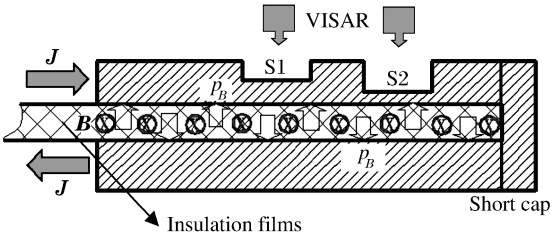

图 1　磁驱动准等熵压缩原理示意图

Fig. 1　Schematic of mganetically driven quasi-isentropic compression

3　实验加载装置

实验采用自行研制的磁驱动准等熵压缩加载装置 CQ-1.5[4],如图 2 所示。该装置由 4 台低电感脉冲电容器并联,经平行板传输线,通过一种新型的低电感多点导通爆炸逻辑网络开关[11]向短路负载(样品)放电,装置的性能指标见表 1。

样品的自由面速度采用多普勒探针系统 DPS 测试技术进行测量,样品安装采取对称结构,如图 3 所示。

表 1　CQ-1.5 装置性能指标

Table 1　Parameters of CQ-1.5

Capacitance /(μF)	Period in short circuit /(μs)	Rising time /(ns)	Inductance /(nH)	Resistance /(mΩ)	Maximum peak current /(MA)
15.88	3.40	500～575	≈18	≈10	>1.5

图 2　CQ-1.5 实验加载装置

Fig. 2　Experimental set-up of CQ-1.5

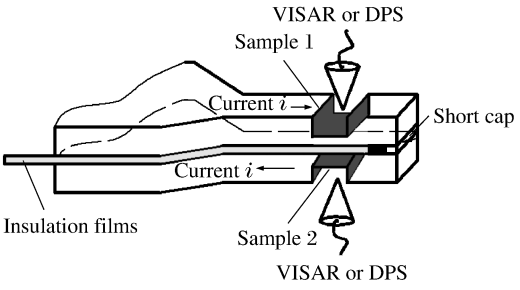

图 3　实验样品构形

Fig. 3　Experimental samples configuration

4　理论与实验等熵压缩线

4.1　理论等熵压缩线[12]

本研究主要考虑以冲击 Hugoniot 线作参考线的 Grüneisen 物态方程型等熵压缩线。由热力学第二定律可知 $(\partial e/\partial v)_s = -p(v,e)$,式中 e 为比内能,v 为比容,p 为压力。此式可看作关于等熵线 $e_s(v)$ 的一阶常微分方程式,积分可得(v, e)平面上的等熵线,则(p,v)平面上的等熵线即为 $p_s = p[v, e_s(v)]$。如果 $p(v,e)$的具体形式是 Grüneisen 方程 $p = p_H + (\Gamma/v)(e - e_H)$,这里下标 H 表示以冲击绝热线(Hugoniot)为参考线,$\Gamma = v(\partial p/\partial e)_v$ 是 Grüneisen 系数。当冲击绝热线以冲击波速度和粒子速度的线性形式 $D = C_0 + \lambda u$ 表示时,在 $\Gamma v = \Gamma_0 v_0 = C$($C$ 为常数)的近似下,等熵压缩线可以写成

$$p_s(v) = p_0 + \rho_0 C_0^2 e^{\Gamma_0 \eta} \int_0^{\eta} \frac{1 - (\Gamma_0 - \lambda)z}{(1 - \lambda z)^3} e^{-\Gamma_0 z} dz \tag{2}$$

式中:$\eta = 1 - (v/v_0)$。

4.2 实验(准)等熵压缩线

实验样品基本参数见表 2,每发实验样品为 2 种厚度。

实验测得的典型的自由面速度历史如图 4 所示,图 5 是典型的加载压力历史,加载压力光滑上升。实验数据利用反积分处理方法[10]处理得到,结果如图 6～图 8 所示。

表 2 实验工况

Table 2 Experimental sample specifications

Sample material	Experiment No.	Sample thickness/(mm)		d/(mm)
		h_1	h_2	
T1 Cu	20070605	1.58	2.00	7
	20070608-01	1.78	2.08	5
	20070608-02	1.58	2.02	7
LY12 Al	20070702	2.00	2.34	5
L1 Al(1)	20070705	2.02	2.60	5

Note:(1) L1 is pure aluminum,and the content of Al more than 99.7%.

4.3 结果分析

图 4 结果表明,在同一加载压力作用下,不同厚度样品的自由面速度历史上升率不同,样品越厚,自由面速度上升率越陡。在本实验样品厚度下,压缩波在样品中没有形成冲击压缩波。图 5 是该实验条件下的加载压力历史,它是一种光滑上升的压缩波。

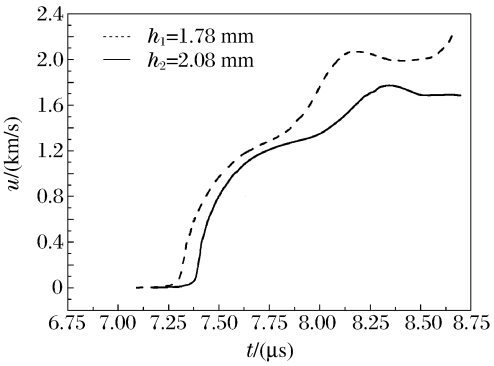

图 4 利用 DPS 测量得到的铜样品自由面速度历史

Fig. 4 Velocity histories of copper with different thickness measured by DPS

图 6～图 8 是利用反积分数据处理方法得到的铜、铝两种材料的实验等熵压缩线。结果表明,等熵压缩线是一条过程线,装置预先设定所需的充电电压,一发实验就可获得一定压力下的等熵压缩线,这是与冲击压缩的一个明显区别。3 种材料的实验等熵压缩线与理论等熵压缩线相一致,最大偏差小于 3%。实验压力下,等熵压缩线与冲击 Hugoniot 线相接近,15 GPa 以下,两者几乎重合,随着压力的增加,等熵压缩线有逐渐偏离冲击 Hugoniot 线的趋势,与国外实验结果相一致[15]。

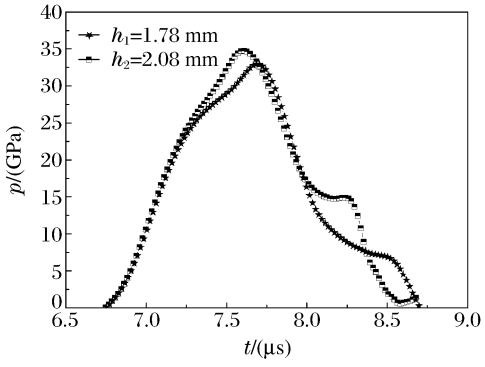

图 5 CQ-1.5 装置作用于铜样品表面(加载面)的压力历史

Fig. 5 Pressure loading histories on the copper samples driven by CQ-1.5 device

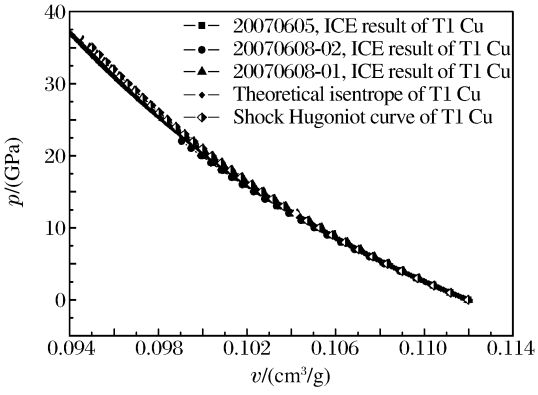

图 6 T1 铜的实验和理论等熵压缩线与冲击 Hugoniot 线

Fig. 6 Experimental, theoretical isentropes and shock Hugoniot curve of T1 copper

这里对实验测量和数据计算的不确定度作简要分析。影响实验不确定度的主要因素有加载压力的均匀性、样品厚度、自由面速度测量、记录系统的时间响应以及计算方法的精度。本实验中,由于要求两个样品的加载压力要相同,尽管电流的速度接近光速,设计样品时仍要考虑将两个样品布置在对称位置上,以避免带来加载压力的差异。样品厚度采用光学的办法加以测量,误差控制在微米级,例如,2 mm 厚的样品其相对误差可控制在 0.05%。采用中国工程物理研究院流体物理研究所的 DPS 装置[16]测量样品的自由面速度,测量精度在 1%左右,记录系统为 40 GHz 响应带宽的高频示波器,响应时间达到 1 ns以内。文献[17]对计算方法的精度问题进行了分析,结果表明,数据计算的精度优于 1%。考虑上述因素,结合拉格朗日守恒方程,计算得到应力的不确定度约为 2%,在本工作的极差范围之内。

图 6 的结果还表明,不同压力下的实验重复性好,这说明装置的性能高,系统偏差小,能复现相同条件下的实验,适合用于研究材料的动力学性能及状态方程。

关于基于冲击 Hugoniot 线作参考线的 Grüneisen 物态方程型理论等熵压缩线的正确性分析,文献[4,14]对此做了研究,将它与其它形式的物态方程,例如 Vinet、Appy、Tillotson 和状态方程数据库的理论等熵压缩线进行了比较,结果表明,在较低压力下(<50 GPa),几种情况的一致性好,这说明,在本研究的压力范围内,用 Grüneisen 物态方程型理论等熵压缩线作为参考线是合适的。

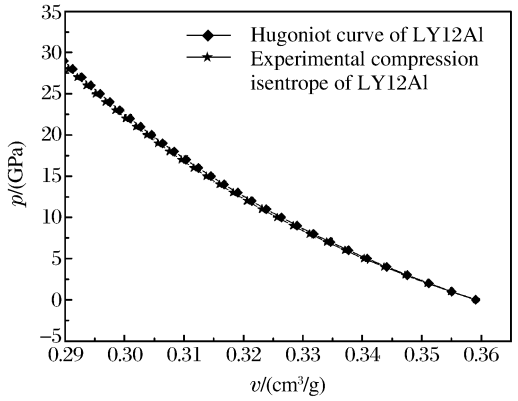

图 7　LY12 铝的实验等熵压缩线与冲击 Hugoniot 线

Fig. 7　Experimental isentrope and shock Hugoniot curve of LY12Al

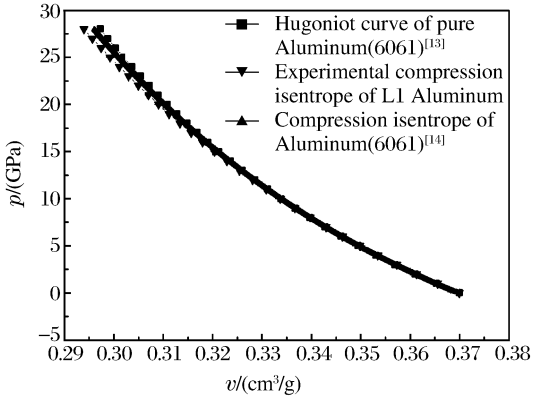

图 8　L1 和 6061 纯铝的实验、理论等熵压缩线和冲击 Hugoniot 线

Fig. 8　Experimental, theoretical isentropes and shock Hugoniot of L1Al and 6061Al

5　结　论

磁驱动准等熵压缩加载是研究材料偏离 Hugoniot 状态特性的一条新途径。实验结果表明,本工作的实验装置 CQ-1.5 具备数十吉帕压力范围内的准等熵压缩加载能力;在 40 GPa 压力范围内,T1 铜、LY12 硬铝和 L1 纯铝的实验准等熵压缩线与理论等熵压缩线相一致,靠近其冲击 Hugoniot 线,与文献报道的结果相同。

References:

[1]　Hall C A. Isentropic Compression Experiments on the Sandia Z Accelerator [J]. Phys Plasmas, 2000, 7(8): 2069-2075.

[2]　Hall C A, Asay J R, Knudson M D, et al. Recent Advances in Quasi-Isentropic Compression Experiments(ICE) on the Sandia Z Accelerator [A]//Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York: American Institute of Physics, 2002: 1163-1167.

[3]　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]. J Appl Phys, 2003, 94(7): 4420-4431.

[4]　Wang G J. Research on Magnetically Driven Isentropic Compression and Flyer Plates [D]. Beijing: Beijing Post-graduate Department, 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]. 北京:中物院北京研究生部,2007.

[5] Davis J P, Deeney C, Knudson M D, et al. Magnetically Driven Isentropic Compression to Multimegabar Pressures Using Shaped Current Pulses on the Z Accelerator [J]. Physics of Plasma, 2005, 12: 056310(1)-056310(7).

[6] Tasker D G, Goforth J H, King J C, et al. Isentropic Compression of Metals, at Multi-Megabar Pressures, Using High Explosive Pulsed Power [A]//Reinovskey R, Newton M. 13th IEEE Int Pulsed Power Conference [C]. Las Vegas Nevada, USA, 2001: 669-672.

[7] Asay J R. Isentropic Compression Experiments on the Z Accelelator [A]//Furnish M D, Chhabildas LC, Hixson-Shock R S. Compression of Condensed Matter-1999 [C]. Snowbird, Utah, USA, 2000: 261-266.

[8] Avrillaud G, Courtois L, Guerre J, et al. GEPI: A Compact Pulsed Power Driver for Isentropic Compression Experiments and for Non Shocked High Velocity Flyer Plates [A]//Giesselmann M, Neuber A. 14th IEEE Int Pulsed Power Conf [C]. Dallas, Texas USA, 2003: 913-916.

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

[10] Hayes D. Backward Integration of the Equations of Motion to Correct for Free Surface Perturbaritz [R]. SAND2001-1440, 2001.

[11] Wang G J, Sun C W, Tan F L, et al. Development of Explosive Logic Network Closing Switch with Several Discharging Channels [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(2): 137-141. (in Chinese)
王桂吉, 孙承纬, 谭福利, 等. 多点导通爆炸逻辑网络闭合开关研制 [J]. 实验力学, 2007, 22(2): 137-141.

[12] Sun C W, Zhao J H, Wang G J, et al. Magnetically Driven Quasi-Isentropic Compression and High-Speed Flyer Plate Experiments [A]//Academic Conference on Mechanics of China [C]. Beijing, 2007: 17. (in Chinese)
孙承纬, 赵剑衡, 王桂吉, 等. 磁驱动准等熵压缩和高速飞片的实验研究 [A]//中国力学学会学术大会 [C]. 北京, 2007: 17.

[13] Stanley P. LASA Shock Hugonoit Data [Z]. Marsh, University of California Press, 1980: 57, 166, 182.

[14] Mo J J. Calculation of Metallic Compression Isentropes and Study on Isentropic Compression Experiments by Detonation Driving [D]. Beijing: Beijing Postgraduate Department, CAEP, 2006. (in Chinese)
莫建军. 金属等熵压缩线计算及爆轰加载等熵压缩实验研究 [D]. 北京:中物院北京研究生部, 2006.

[15] Hayes D B, Hall C A, Asay J R, et al. Measurement of the Compression Isentrope for 6061-T6 Aluminum to 185 GPa and 46% Volumetric Strain Using Pulsed Magnetic Loading [J]. J Appl Phys, 2004, 96(10): 5520-5527.

[16] Weng J D, Tan H, Hu S L, et al. New All-Fiber Velocimeter [J]. Rev Sci Instrum, 2005, 76: 093301.

[17] Wang G H. Research on Magnetically Driven Isentropic Compression Experiments, Simulation and Backward Integration Method [D]. Beijing: Beijing Postgraduate Department, CAEP, 2008. (in Chinese)
王刚华. 磁驱动准等熵压缩和高速飞片实验、计算与反积分数据处理技术 [D]. 北京:中物院北京研究生部, 2008.

Compression Isentropes of Copper and Aluminum under 40 GPa

WANG Gui-Ji, TAN Fu-Li, SUN Cheng-Wei, ZHAO Jian-Heng, WANG Gang-Hua, MO Jian-Jun, ZHANG Ning, WANG Xiao-Song, WU Gang, HAN Mei

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

Abstract: Using the magnetically driven apparatus CQ-1.5 developed by us, compression isentropes of copper T1, LY12 aluminum, and pure aluminum L1 are measured up to 40 GPa by Doppler pins system (DPS) and Velocity Interferometer System for Any Reflectors (VISAR), respectively. The experimental compression isentropes are compared with the theoratical compression isentropes based on Grüneisen equation of state (EOS) and shock Hugoniot data. The results show that the experimental compression isentropes are consistent with the theoretical compression isentropes within a maximum deviation of 3%, and approach to and lie below the shock Hugoniot curves under 40 GPa. The results show that the experimentally measured results are correct and reliable.

Key words: magnetically driven; quasi-isentropic compression; compression isentrope