

文章编号: 1001-1455(2009)01-0101-04

带窗口准等熵压缩实验的流场反演技术*

王刚华¹, 孙承纬¹, 王桂吉¹, 赵剑衡¹, 谭福利², 胡熙静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轰物理国防科技重点实验室, 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: 在一维拉格朗日平面准等熵压缩流体力学的基础上, 建立了带窗口准等熵压缩实验流场反演方法, 给出了界面处压力历史的求法, 编制了实现流场反演技术的程序, 并与一般流体力学计算进行了比较; 对 Z575 号实验给出的界面速度历史进行了反演计算, 给出了的 Al 6061-T6 等熵压缩线。

关键词: 流体力学; 流场反演方法(反积分方法); Lagrange 分析; 准等熵压缩实验; 窗口

中图分类号: O351.2 **国标学科代码:** 130 · 2564 **文献标志码:** A

反积分方法是为了分析 Z 机器的磁驱动准等熵压缩实验结果而产生的^[1]。这些实验用 VISAR 测量两个或多个不同厚度的平行样品的自由面速度历史, 通过假定粒子速度特征线在时空坐标中是直线来进行数据分析。粒子速度近似为自由面速度的一半, 再将粒子速度作为波速的函数来推出波速, 通过黎曼不变量来确定样品材料的应力应变关系。这种办法引入了特征线是直线的假设, 但事实上, 当加载面处的斜波的前端到达自由面后, 在自由面反射并与斜波的后续部分相互作用, 这种相互作用使特征线发生弯曲, 假设不再成立。

由于斜波在传播过程中变得越来越陡, 对于不同厚度的样品, 自由面反射稀疏波的扰动也不一样, 不能当作系统误差而消除。否则, 会带来一个时间上的残余误差, 一般为几纳秒, 这对于磁驱动准等熵压缩实验来说是不能接受的, 必须进行自由面修正。

为了在数据处理中消除自由面扰动的影响, 寻求简单而有效的处理办法, 在关于 Lagrange 分析的基础上, D. Hayes 等^[1-2]从 VISAR 测量得到的自由面速度历史数据入手, 提出了对流场进行空间反演计算的方法, 即反积分方法, 成功地解决了这一问题, 计算给出了样品加载历史和样品的等熵压缩线。本文中在 D. Hayes 等的工作基础上, 详细讨论带窗口准等熵压缩实验的流场反演数据处理技术。

1 基本原理

反积分计算首先将流体力学方程组进行时间离散, 如果在 h 位置处的速度历史 u 以时间间隔 dt 离散为一个数组, 则可以把动量方程离散为一个类似于二阶精度的方程, 具体差分格式为

$$\sigma(h - dh, t) = \sigma(h, t) + \rho_0 [u(h, t + dt) - u(h, t - dt)] \frac{dh}{2dt} \quad (1)$$

$$\epsilon(h - dh, t) = F[\sigma(h - dh, t)] \quad (2)$$

$$u(h - dh, t) = u(h, t) + [\epsilon(h, t + dt) - \epsilon(h, t - dt)] \frac{dh}{2dt} \quad (3)$$

式中: 取压应力方向为正, 函数 $F(\sigma)$ 的形式可以是任意合理的形式, 如压力较低时, 等熵压缩线与冲击 Hugoniot 线相差不大, 其形式可以取 Hugoniot 线表达式。

对于自由面的情形, 在自由面处应力为零, 速度历史由实验给出, 由动量方程(1)可求解出其相邻点

* 收稿日期: 2007-06-20; 修回日期: 2007-11-02

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科学技术发展基金项目(2007B01004); 四川省青年基金项目

作者简介: 王刚华(1976—), 男, 博士研究生。

处的应力历史,由应力应变关系(2)可求解该点处的应变历史,由式(3)可求解该点处的速度历史。然后再依次按空间向内推进,直至求解完整个流场,给出加载面处的压力加载历史。

对于带窗口材料的准等熵压缩实验(如图 1 所示),VISAR 测量给出的是样品与窗口界面的运动速度历史,此时该界面处的应力历史未知,用反积分进行反演计算前,必须先给出该处的应力历史。为此,对窗口材料单独进行一般一维流体力学正向计算,差分格式为

$$u(h, t) = u(h, t - dt) - \frac{1}{\rho_0} [\sigma(h, t) - \sigma(h - dh, t)] \frac{dt}{dh} \quad (4)$$

$$V(h, t) = V(h, t - dt) + \frac{1}{\rho_0} [u(h + dh, t) - u(h, t)] \frac{dt}{dh} \quad (5)$$

$$\sigma(h, t) = F[V(h, t)] \quad (6)$$

加载边界条件设为速度加载,如图 2。其等效的压力加载曲线为

$$p_0(t) = \rho_0 [u(0, t) - u(0, t - dt)] \frac{dh}{dt} + p_0(t - dt) \quad (7)$$

联立求解式(4)~(7)可以给出材料与窗口界面处的压力历史。这样可以采用与自由面情形同样的方法对样品材料进行流场反演计算。

对于两个平行样品同时加载的等熵压缩实验,在加载压缩波到达界面并反射回加载面之前,两个样品加载面处的压力历史应该是一致的。利用实验纪录的两个平行样品的材料/窗口界面的速度历史和计算给出的界面处的压力历史,假定样品材料的等熵压缩状态方程的函数形式,通过优化计算调试出合适的未知参数,反演加载历史,使得到的两个样品加载面处的压力加载历史基本一致,从而可确定样品的等熵压缩状态方程。这里,定义两条压力加载历史曲线的重合度

$$\alpha = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|p_{01}(t_i) - p_{02}(t_i)|}{\max[p_{01}(t_i), p_{02}(t_i)]} \quad (8)$$

式中: N 为比较点数,一般在两条曲线上按时间均匀分布取 N 个点上的压力值进行比较, α 越大(接近于 1)表明曲线重合的越好。

2 计算结果与分析

为了分析反积分方法的计算精度,首先用一般正向流体力学程序 SSS^[3] 计算了厚度为 0.4 mm 的铜样品在图 3 带圆点线所示的压力历史加载下的等熵加载过程,样品后表面贴有厚度为 0.5 mm 的 LiF 窗口。由于加载压力低于 20 GPa,等熵压缩方程可使用冲击 Hugoniot 线表达式

$$p = p_0 + \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - \lambda \eta)^2} \quad (9)$$

式中: $\eta = 1 - \rho_0 / \rho$ 为体应变。对于铜样品材料, $c_0 = 3.940$ km/s, $\rho_0 = 8\,930$ kg/m³;对于窗口材料, $c_0 = 5.148$ km/s, $\rho_0 = 2\,638$ kg/m³。

将程序 SSS 计算给出的样品/窗口界面的速度历史作为速度加载条件对窗口材料进行计算,给出界面处的压力历史,见图 4。可以看出,这种计算方法给出的结果与程序 SSS 计算结果几乎完全重合,重合度大于 99.8%。

将样品/窗口界面的速度和压力历史作为流场反演计算的初始条件,可反演出样品材料中各物理量的演化历史,给出各时刻物理量的分布。图 5~6 分别给出了反演计算得出的 140 ns 时的速度分布和压缩比的分布图,与程序 SSS 计算结果的比较可以看出,两者基本重合,重合度大于 99%。这说明从数值理论上分析来看,该流场反演计算方法能真实准确的反演出流场的演化过程,具有较高的可信度。

为了验证程序的正确性,对 C. A. Hall 等^[4] 在自 Z 装置上开展的 Z575 号实验结果进行了处理。Z

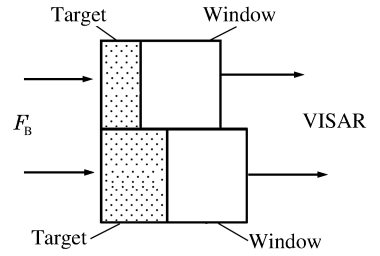


图 1 带窗口准等熵压缩实验示意图
Fig. 1 Scheme of magnetically-driven isentropic compression experiments

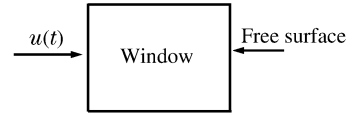


图 2 窗口材料正向计算的边界条件
Fig. 2 Boundary conditions on windows for a forward calculation

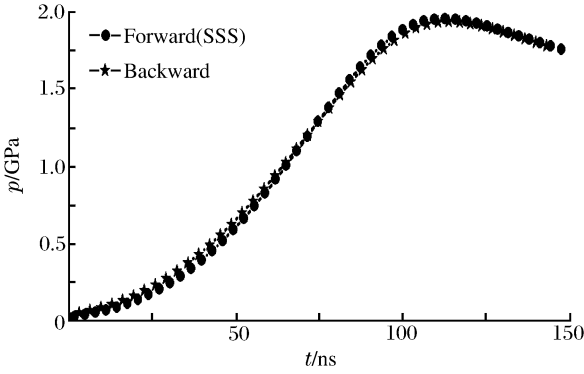


图 3 程序 SSS 正向计算与反演计算给出的加载面处的压力历史的比较

Fig. 3 Comparison of load pressure histories at a loading surface by different calculation methods

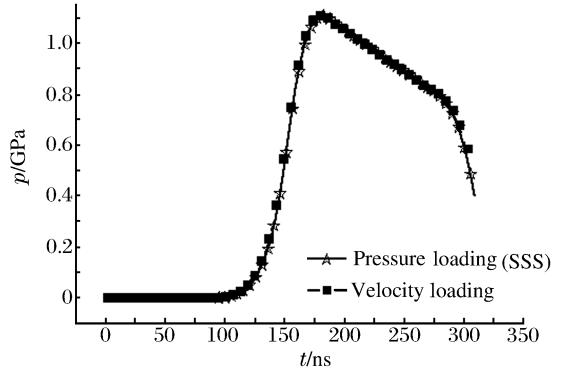


图 4 程序 SSS 计算与使用速度加载边界条件计算给出的样品/窗口界面处的压力历史比较

Fig. 4 Comparison of pressure histories at the specimen-window interface by different calculation methods

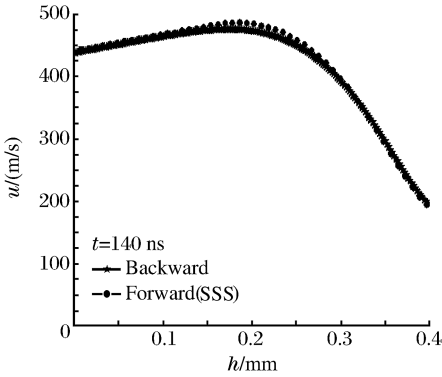


图 5 SSS 计算与流场反演计算给出的样品的速度分布

Fig. 5 Comparison of velocity distributions

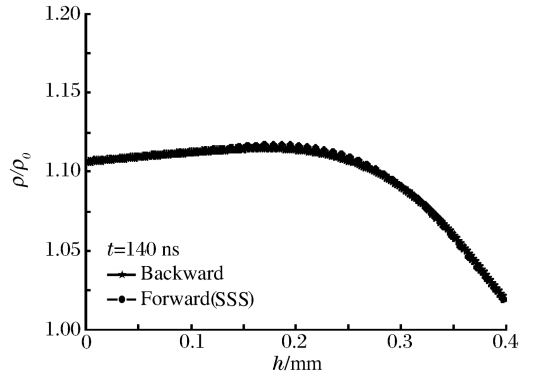


图 6 程序 SSS 计算与流场反演计算给出的样品的压缩比分布

Fig. 6 Comparison of compression ratio distributions

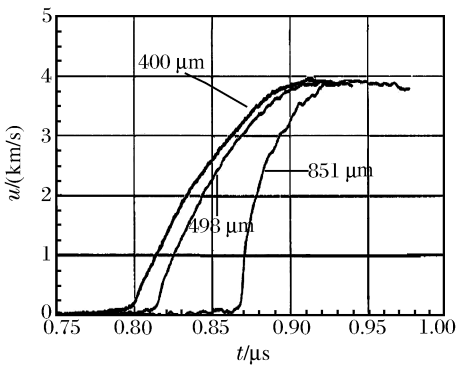


图 7 Z575 号实验给出的样品/窗口界面处的速度历史
Fig. 7 Velocity-time curves at the specimen-window interface for experiment Z575

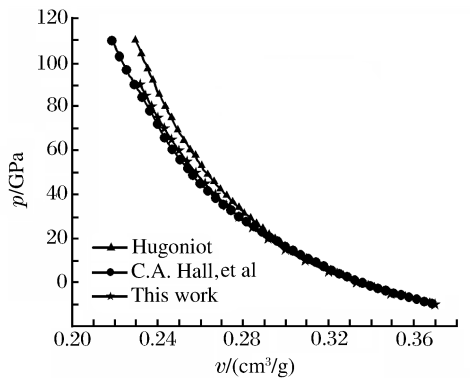


图 8 处理 Z575 号实验数据的等熵压缩线
Fig. 8 Comparison of isentropic compression curves in Al 6061-T6 by deducing the experiment data of experiment Z575 with C. A. Hall's

装置是一台电容器出能的低电感脉冲高功率实验装置,其总储能达到 11.6 MJ,能在 100~350 ns 的时间内向负载输出 20~22 MA 的大电流。Z575 号实验样品材料为 Al 6061-T6,由直径为 10 mm、厚度分别为 400、498、851 μm 的三个平行样品组成,每个样品背后贴有直径为 6 mm、厚度为 1 mm 的 LiF 窗口,在窗口材料的粘合面上预先涂有 1 μm 厚的铝材料,以便于 VISAR 测量时能更好地反射激光。实验得到的三个样品/窗口界面的速度历史如图 7 所示,尽管 851 μm 厚的样品的速度曲线较陡,但在样

品中均没有形成激波。在计算处理时使用了 $498\ \mu\text{m}$ 和 $851\ \mu\text{m}$ 的两个样品的界面速度历史,通过反演计算给出的 Al 6061-T6 的等熵压缩线如图 8 中所示,与 C. A. Hall 等的处理结果基本一致。在 100 GPa 附近的高压区相差小于 5%,这种细微的差别可能是由于计算所使用的界面速度历史不是 VISAR 测量给出的,而是通过对图 7 处理得出的。与原始测量数据相比,这会带来较大的差别。

3 结 论

分析了带窗口准等熵压缩实验流场反演方法的基本原理和求解过程,编制了实现流场反演技术的程序,与一般流体力学计算的比较表明该方法在数值理论上具有同样的高精度;对 Z575 号实验给出的界面速度历史进行了反演计算,得出的 Al 6061-T6 等熵压缩线与文献给出的结果基本一致。

参考文献:

- [1] Hayes D. Backward integration of the equations of motion to correct for free surface perturbation[R]. Sandia National Laboratories, SAND2001-1440,2001.
- [2] Hayes D, Vorthman J, Fritz J. Backward integration of a spall VISAR record to the spall plane[R]. Los Alamos National Laboratory, LA-13830-MS,2001.
- [3] 孙承伟. 一维冲击波和爆轰波计算程序 SSS[J]. 计算物理,1986,3(2):142-154.
SUN Cheng-wei. SSS: A code for computing one dimensional shock and detonation wave propagation[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 1986,3(2):142-154.
- [4] Hall C A, Asay J R, Knudson M D, et al. Recent advances in quasi-isentropic compression experiments (ICE) on the Sandia Z accelerator[C]//Furnish M D. Shock Compression of Condensed Matter-2001,2002;1163-1168.

Backward analysis for isentropic compression experiments with windows backed on samples

WANG Gang-hua^{1*}, SUN Cheng-wei¹, WANG Gui-ji¹,
ZHAO Jian-heng¹, TAN Fu-li², HU Xi-jing²

(1. National Key Laboratory of 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 Lagrangian backward integration method was used to analyze VISAR records of isentropic compression experiments. The pressure history at the window-sample interface calculated by the interface velocity history was proved to be successful. A contrast calculation shows that the backward method is as accurate as the forward method. Analysis of the Z575 experiments shows that the isentropic compression curves of Al 6061-T6 are in good agreement with that by Hall C A.

Key words: fluid mechanics; backward integration method; Lagrange analysis; isentropic compression experiment; window

* Corresponding author: WANG Gang-hua

E-mail address: wanggh@caep.ac.cn

Telephone: 86-816-2494541