文章编号:1000-5773(2008)02-0149-04

准等熵压缩流场反演技术研究*

王刚华, 柏劲松, 孙承纬, 莫建军, 王桂吉, 赵剑衡, 谭福利, 胡熙静

(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实验室, 四川绵阳 621900)

摘要:与一般流体力学计算中将流体力学方程组进行空间离散、再进行时间推进计算不同,采用 Hayes 提出的流场反演方法,将流体力学方程组进行时间离散,然后将 VISAR 测量得到的样品后自由面速度历史作为输入数据,再进行空间的反演计算。与一般流体力学计算进行了比较,并与柏劲松设计的 Pillow 飞片撞击铜样品实验的计算结果作了比较,该方法反演出的样品加载面处的压力历史与其计算结果基本一致,通过参数优化方法多次进行反积分计算调试出的等熵压缩线具有较高的可信度。

关键词:准等熵压缩;流场反演方法(反积分方法);Lagrange 分析

中图分类号:TN249 **文献标识码**: A

1 引 言

材料准等熵压缩实验是一个加载压力缓慢变化的过程,加载速率较低,靶中温升较小,材料的物理力学参量的变化主要由压力因素决定[1]。对材料进行等熵压缩,基本上可以分解出温度及压力因素对有关物理力学参量的影响,是深入细致地研究材料在动载荷下的响应特性、高压物态方程、高压本构方程和高压物性的重要技术手段。近几十年来,发展了很多加载方法来获得较高等熵程度和较高压力的准等熵加载线,如炸药驱动加载[2]、气炮加载、激光驱动加载[3]和磁压驱动加载技术[4]等,加载压力也达到了数兆巴。

对准等熵压缩进行数值模拟研究,可以更好地帮助我们认识该过程的物理图像,从而更准确地建立物理模型,为实验的设计和分析提供参考。在一般的一维流体力学数值计算中,需要利用材料的等熵压缩状态方程,然而,材料的等熵压缩状态方程正是实验所需要研究确定的,这是这种计算方法的一个矛盾。为此,2001 年,D. Hayes、J. Vorthman[5-6] 等人将 VISAR 测量得到的两个平行样品后自由面的速度历史作为输入数据,通过流场反演技术,成功地计算出了样品加载历史和样品的等熵压缩线。

本研究在 Hayes 等人提出的反积分方法基础上,编制了流场反演分析程序(BAC),详细地分析了反演流场与正向流体力学计算的吻合程度,并利用该程序对柏劲松设计的准等熵压缩实验进行了比较处理。

2 基本原理

在一般的一维流体力学数值计算中,介质平面一维等熵运动的质量、动量和能量守恒方程(或等熵压缩状态方程)首先要进行空间离散,然后根据求解问题的初边值条件再进行时间上的推进计算。如图 1所示,计算前,各空间点上初始时刻的流场分布是已知的,其求解方向如图 1 中的浅色箭头所示。

与之不同,反积分计算首先将流体力学方程组进行时间离散,然后将 VISAR 测量得到的样品后自

* **收稿日期**: 2007-04-16;**修回日期**: 2007-06-22

基金项目: 中国工程物理研究院发展基金;国家自然科学基金(10472108);中国工程物理研究院重大基金(2004Z0101);四川省青年基金资助项目

作者简介: 王刚华(1976—),男,博士,助理研究员,主要从事电磁加载数值模拟研究. E-mail: wanggh@caep.ac.cn

由面速度历史作为输入数据，再进行空间的反演计算。如果在 h 位置处的速度 u 以时间间隔 $\mathrm{d}t$ 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，由该方程可求出 $h-\mathrm{d}h$ 处的压力加载历史，进而利用本构关系和质量守恒方程求解出该处的体应变和速度。具体差分格式如下

$$\sigma(h-\mathrm{d}h,t)=\sigma(h,t)+\rho_0[u(h,t+\mathrm{d}t)-u(h,t-\mathrm{d}t)]\mathrm{d}h/(2\mathrm{d}t)$$

$$\varepsilon(h-\mathrm{d}h,t)=F[\sigma(h-\mathrm{d}h,t)]$$

$$u(h-\mathrm{d}h,t)=u(h,t)+[\varepsilon(h,t+\mathrm{d}t)-\varepsilon(h,t-\mathrm{d}t)]\mathrm{d}h/(2\mathrm{d}t)$$

上述方程中将能量方程用应力应变关系式 $\varepsilon=F(\sigma)$ 代替，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。

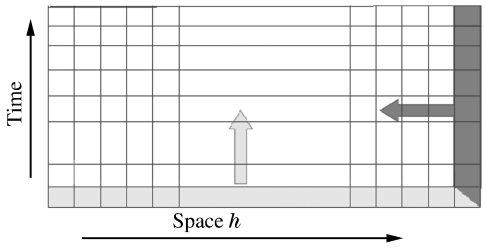


图 1 反积分计算与一般流体力学正向计算的比较示意图

Fig. 1 Comparison of backward and forward fluid calculations

上述方程求解时应注意不同位置处对时间积分的区间不应相同，这是双曲型偏微分方程组的特性所决定的。(h,t) 平面上某点的事件存在着它所能影响的时空范围，以及可能影响它的时空范围。这样就决定了反积分问题的时间“边界条件”。假定 VISAR 实际有效记录的自由面/界面运动开始时间为 t_0，则离该面距离 H 处位置运动开始时间应是 $t_H=t_0-H/C_0$，C_0 是材料初始状态下的声速，因此计算中 VISAR 记录的开始时间至少应补充到 t_H 或更早时刻。如果 VISAR 实际记录的最后时刻为 t_1，则离该面 H 处位置的反积分解的有效时间应受到自由面/界面在 t_1 时发出的反向特征线(世界线)在 H 处给定的时间后退量的限制。显然，反积分过程中所有空间点在时间积分开始时的“边界条件”是材料处于未受扰动的初始状态。

在具体计算过程中，第 1 步对自由面边界进行全时间过程计算，求出其相邻点处的应力历史；第 2 步求解该点处的应变历史，第 3 步求解该点处的速度历史。然后再依次沿空间向内推进，直至求解完整个流场，给出加载面处的压力加载历史，其求解方向如图 1 中深色箭头所示。

3 计算与分析

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计算了厚度为 0.491 mm 的铜样品的等熵加载过程，其状态方程使用冲击 Hugoniot 线表达式

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

式中：$\eta=1-(\rho_0/\rho)$ 为体应变，$c_0=3\,940$ m/s，$\rho_0=8\,930$ kg/m^3。在飞片的左端施加了平滑上升的加载压力波，其波形如图2中“曲线1”所示。飞片材料在这样的压力加载波作用下，不会出现冲击波，其历

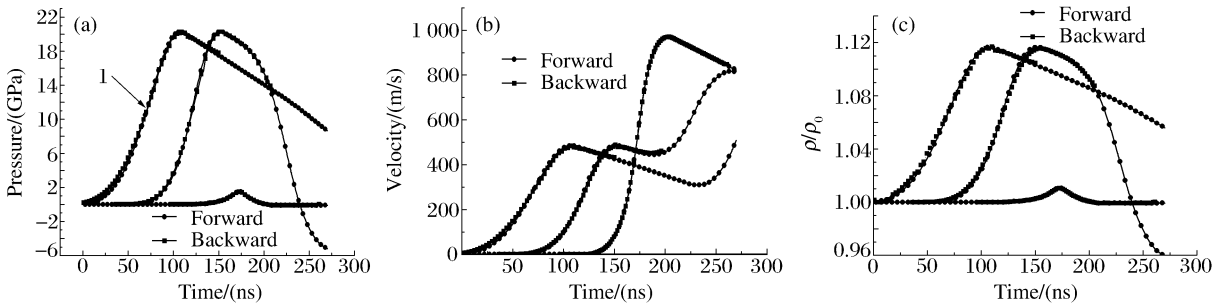


图 2 正向计算与反积分反演出的 3 个位置点(0、$h/2$、h)处压力(a)、速度(b)、压缩比(c)的历史曲线的比较

Fig. 2 Comparison of pressure, velocity and compression ratio at 0, $h/2$ and h calculated by backward integeration method with that of forward method

经的过程为准等熵压缩过程。如图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)中的"—•—"线所示,分别给出了 3 个位置点(0、$h/2$、h)处压力、速度、压缩比的历史曲线。

将上述正向计算给出的后自由面(h 处)的速度历史作为反积分计算的初始条件,使用相同的本构关系式,进行流场空间反向积分计算,直至反演出加载面上的压力加载历史,从而可给出流场中各个点上各物理量的演化历史。如图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)中的"—■—"线所示,为反积分计算给出的 3 个位置点(0、$h/2$、h)处压力、速度、压缩比的历史曲线。从图中可以看出,在各个点上各物理量的历史曲线重合度都很高,误差小于 1%,这就说明,从数值理论上分析来看,反积分方法与一般的流体力学正向计算方法具有同样的精度,用该方法反演出的流场中各物理量的演化过程应具有较高的可信度。

柏劲松利用多介质流体力学程序设计了一个 Pillow 飞片撞击厚度为 1.5 mm 和 1.0 mm 的铜样品的试验,计算给出了铜样品后自由面的速度历史曲线,如图 3 所示,在 2.5 μs 的时间内,样品自由面速度平滑上升到 1.0 km/s,该实验设计获得了准熵程度很高的准等熵压缩实验。为了进一步验证流场反演计算的可靠性,利用图 3 给出的自由面速度历史进行反演计算,给出的铜样品撞击面处的压力历史与柏劲松计算结果的比较,如图 4 所示,两者吻合得很好。

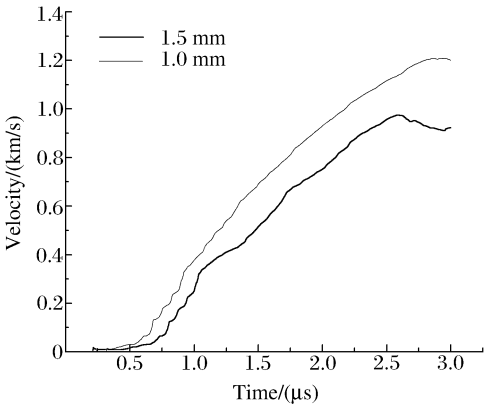


图 3　不同厚度的铜飞片后自由面速度历史
(正向计算结果,柏劲松)

Fig. 3　Free rear surface velocity of Cu calculated by a multimaterial fluid code

对于厚度不同的两个平行样品准等熵加载试验,在后自由面反射的稀疏波到达加载面之前,两个样品加载面处的压力加载历史是一致的,如图 4 所示,在 0～700 ns 的时间内,不同厚度的样品加载面处的压力几乎完全一致,其后,由于厚度不同的样品稀疏波产生的时间和传播的时间不一样,随着稀疏波在加载面处的作用加强,厚度较薄的样品首先受到稀疏波的作用,在样品内产生的压力低于厚度较厚的样品。

利用试验记录的两个平行样品的自由面速度历史,假定样品材料的等熵压缩状态方程的函数形式,通过参数优化方法多次进行反积分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。如图 5 所示,使用参数优化方法和反积分计算给出的铜的等熵线,与柏劲松所用的等熵线比较表明,两者几乎完全重合,参数优化方法结合反积分计算给出的等熵压缩线具有较高的可信度。

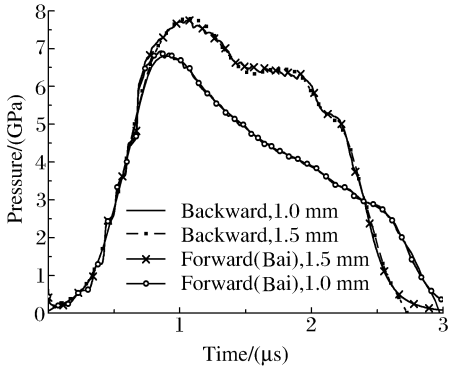


图 4　正向计算与反积分反演出的加载面处压力历史曲线的比较

Fig. 4　Comparison of pressure at load surface calculated by backward integeration method with that of forward method

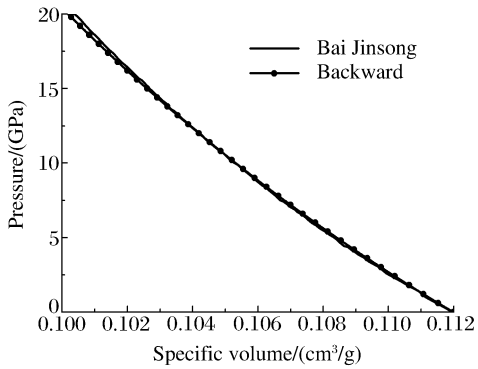


图 5　流场反演计算给出的铜的等熵线与柏劲松所用等熵线比较

Fig. 5　The deduced stress-strain trace of copper compared with the isentropic used in Bai's code

4 结 论

分析了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较高精度;与柏劲松设计的 Pillow 飞片撞击铜样品实验的计算作了比较,表明该方法反演出的样品加载面处的压力历史与其计算结果基本一致,通过参数优化方法多次进行反积分计算调试出的等熵压缩线具有较高的可信度。

References:

[1] Hua J S, Jing F Q, Gong Z Z, et al. Study of Numerical Simulation for Qasi-Isentropic Compression [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2000, 14(3): 195-202. (in Chinese)
华劲松,经福谦,龚自正,等. 准等熵压缩的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报, 2000, 14(3): 195-202.

[2] Barker L M. High-Pressure Quasi-Isentropic Impact Experiments [A]//Asay J R, Graham R A, Straub G K. Shock Waves in Condensed Matter-1983 [C]. Amsterdam: North-Holland, 1984: 217-224.

[3] Edwards J, Lorenz K T, Remington B A, et al. Laser-Driven Plasma Loader for Shockless Compression and Accelerationof Samples in the Solid State [J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(7): 075002-(1)-075002-(4).

[4] Hall C A. Isentropic Compression Experiments on the Sandia *Z* Accelerator [J]. Phys Plasmas, 2000, 7(5): 2069 - 2075.

[5] Hayes D. Backward Integration of the Equations of Motion to Correct for Free Surface Perturbaritz [R]. Sand2001-1440, Sandia National Laboratories, 2001.

[6] Hayes D, Vorthman J, FritJ Z. Backward Integration of a Spall VISAR Record to the Spall Plane [R]. LA-13830-MS, 2001.

Backward Integration Method for Tracing Isentropic Compression Field

WANG Gang-Hua, BAI Jin-Song, SUN Cheng-Wei, MO Jian-Jun,
WANG Gui-Ji, ZHAO Jian-Heng, TAN Fu-Li, HU Xi-Jing

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The govering equation of hydrodynamics are discreted over time. Using a VISAR trace as "initial conditions", they are numerically integrated backwards in space. A detail analysis shows good precision has gotten. The traced pressure load history at load surface is consistent with Bai's results. The deduced stress-strain behavior of copper agrees well with the isentropic used in Bai's code.

Key words: isentropic compression; backward integration method; Lagrange analysis