文章编号：1000-5773(2011)05-0390-05

Pillow 飞片气炮加载实验的数值模拟研究*

柏劲松[1]，罗国强[2]，黄娇凤[1]，李　平[1]

(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.武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室，湖北武汉　430070)

摘要：采用多介质弹塑性流体动力学计算方法，研制了适用于复杂加载的 Lagrange 计算程序 MLEP，对劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory，LLNL)19 层和冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室(Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics，LSD)设计的 29 层 Mg-Cu 体系 Pillow 密度梯度飞片气炮加载实验过程进行了数值模拟和比较，获得的速度剖面计算结果与实验测试结果吻合一致，验证了流体动力学计算方法、不同材料体系混合模型以及计算程序的有效性和实用性，为进一步开展可控路径的复杂加载实验研究奠定了基础。

关键词：Pillow 飞片；复杂加载；气炮实验；数值计算
中图分类号：O347.1；O35　　**文献标识码**：A

1　引　言

多层碰撞器技术能够通过气炮实验产生上升前沿超过 1 μs 的准等熵压缩，对应的应变率范围为 $10^4 \sim 10^6$ s^{-1}[1-2]，这项技术与冲击压缩产生的典型的亚纳秒时间尺度的加载形成了鲜明对照。将冲击压缩、准等熵压缩、可控制的卸载和恒定压力进行多种组合的叠层型飞片技术，使得加载压力剖面的设计具有更大的选择余地，通过在飞片厚度方向的密度剖面或者冲击阻抗剖面进行适当设计，能够实现对靶材料中的压力演化路径的任意“剪裁”[3]。该项复杂加载技术最早起源于 20 世纪 80 年代美国利用波阻抗梯度飞片的准等熵压缩技术，美国圣地亚国家实验室(SNL)的 Barker 在一份题为“产生高压准等熵平面压缩波的可行性研究”的报告中，较为详细地论述了阻抗渐变飞片技术(即 Pillow 飞片技术)产生准等熵压缩波的理论基础和实验技术，利用气炮发射技术驱动一种具有波阻抗连续分布特征的 Pillow飞片高速碰撞靶板，在靶板中产生一个适度的冲击波跳跃，随后紧接一个压力逐渐上升的波阵面，即准等熵压缩波[4]。

为了在气炮上实现 Pillow 飞片复杂加载过程的实验研究，首先需要开展对 Pillow 飞片的物理设计，即对不同材料体系组合成的飞片组成要素进行计算设计[5-6]，给出满足要求的各要素分布曲线、击靶条件以及靶板自由面速度或界面粒子速度之间的对应关系；其次是飞片研制、实验装置和测试技术等工作。因此发展适用于 Pillow 飞片复杂加载过程的流体动力学计算方法和程序尤为重要。本研究根据该类气炮实验的平面应变特点，采用多介质弹塑性流体动力学计算方法，研制了适用于不同材料体系的飞片物理设计和击靶过程模拟计算程序 MLEP(Multi-material Lagrangian Elastic-Plastic)。为了验证

* **收稿日期**：2010-07-20；**修回日期**：2010-10-08
基金项目：国家自然科学基金(11072228，61007065)；中国工程物理研究院发展基金(2011B0202005)
作者简介：柏劲松(1968—)，男，博士，研究员，主要从事计算流体力学、计算爆炸力学等理论和数值模拟工作. E-mail：bjsong_mail@21cn.com

计算方法和计算程序的有效性,有针对性地对 Mg-Cu 材料体系开展了两个气炮实验的数值模拟,第一个是来自美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory,LLNL)的 19 层材料组成的 Pillow 飞片,对 2 mm 厚铝样品的冲击加载和准等熵加载实验模型[7]的数值计算,从获得铝样品自由面粒子速度历史的计算结果看,与 LLNL 实验结果吻合一致;第二个是对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(LSD)研制的密度随厚度呈三次幂变化的 29 层 Pillow 飞片,对 12 mm 厚的 LiF 窗口材料进行复杂加载过程实验的数值模拟,计算获得的窗口界面速度剖面与实验测试结果也基本相同。上述两个复杂加载实验及其与数值模拟结果的比较,初步验证了我们所采用的流体动力学计算方法的正确性,不同材料体系混合模型以及计算程序的有效性,对计算程序进行了 V&V(Verification and Validation),为进一步的可控路径复杂加载实验研究奠定基础。

2　计算方法

对于复杂加载过程的数值计算,可以采用多介质弹塑性 Lagrange 流体动力学方程组进行描述,其运动方程、连续性方程和能量方程表示如下

$$\begin{cases} \dot{u} = -R^{\alpha-1}\dfrac{\partial \sigma_R}{\partial m} - (\alpha-1)(\sigma_R - \sigma_\theta)\dfrac{v}{R} \\ v = R^{\alpha-1}\dfrac{\partial R}{\partial m} \\ \dot{e} = -(p+q)\dot{v} + v[S_1\dot{\varepsilon}_1 + (\alpha-1)S_2\dot{\varepsilon}_2] \end{cases}$$

式中:$\dot{R}=u$;$\dot{u}$ 为随体微商,粒子质点速度;$\alpha=1,2,3$,分别对应平面问题、柱面问题和球面问题;σ_R 为径向应力;σ_θ 为环向应力;R 为欧拉坐标,径向坐标;m 为具有质量量纲的拉氏变量($\alpha=1$ 时为质量);v 为比容;q 为人为粘性;S_1、S_2 为应力偏量;$\dot{\varepsilon}_1$、$\dot{\varepsilon}_2$ 为应变率;p 为压力;e 为比内能。另外,材料本构关系、状态方程和离散格式见文献[5]。根据上述计算方法研制了多介质弹塑性流体动力学计算程序 MLEP。

3　复合体系材料的性能

实现复杂加载过程的 Pillow 飞片组成体系,通常采用不同阻抗的材料混合加工而成,在设计和研制飞片的过程中,需要确定各层材料的力学量、Hugoniot 参数、Grüneisen 系数等复合体系的材料参数,以便进行数值计算和分析。通常有两种方法获得这些参数:第一种是通过实验测出不同组分混合物的材料参数,这样获得的材料参数准确可靠,但是工作量非常巨大;另外一种是采用混合法则[8],通过两种单一材料参数计算出不同组分混合物的材料参数,这是一种理论方法,简便实用。本研究选用后者确定混合物的材料参数,建立起组成 Pillow 飞片的主要组成体系的性能参数与飞片组成分布之间的相互关系,以对其加载性能进行数值模拟。通过与实验测试结果的比较来看,选用混合法则进行数值计算是合理的。

4　Mg-Cu 体系 Pillow 飞片复杂加载实验的数值计算

4.1　LLNL 气炮实验的数值模拟

LLNL 在二级轻气炮上发射 Mg-Cu 体系 Pillow 飞片撞击静止样品的实验中,其梯度飞片由 19 种不同组分的带材制成,飞片速度为 1.93 km/s,靶样品为 2.0 mm 厚的铝材料,通过实验测量飞片的碰撞速度和飞片自由面粒子速度剖面。本研究采用 MLEP 程序对 LLNL 的 Mg-Cu 体系 GDI 加载铝样品实验进行数值计算,力学参数和材料参数采用混合法确定。以梯度飞片与 2.0 mm 厚的铝样品碰撞时刻为零时刻点,图 1 给出的是 LLNL 实验测量和本研究数值计算得到的铝样品自由面粒子速度随时间的变化曲线。

从图1中的实验和计算结果的比较可见，第一个台阶处 LLNL 实验测得的冲击波的自由面粒子速度为 1 450 m/s，是由飞片前端的 Mg 产生的，第二个台阶处 LLNL 实验测得的自由面粒子速度的峰值为 2 690 m/s，是由飞片后端的 Cu 产生的。本研究计算给出的初始冲击波的自由面速度为 1456.9 m/s，剖面峰值速度为 2 788.5 m/s ，第一个台阶处的速度值以及冲击加载后的准等熵加载历程与实验测试结果吻合较好，计算值仅在第二个台阶处与实验值稍有偏差。这种偏差可能来自于两个方面，一是由计算参数引起，本研究计算所用的材料参数来自文献[9]，可能与 LLNL 实验所用材料有所差异；另一方面来自于 Mg-Cu 的质量分数，本研究计算所用的质量分数从文献[7]的图中读取，可能与实际值有所偏差。总之，通过对该实验模型的计算，能够说明本研究流体动力学计算方法的正确性、不同材料体系混合模型的正确性和计算程序的实用性。

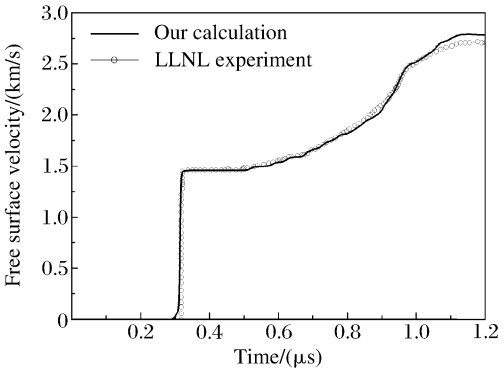


图 1 自由面速度剖面的 LLNL 实验和本研究数值计算结果的比较

Fig. 1 Comparison of the flyer free surface velocity between our calculational result and experimental result of LLNL

4.2 LSD 气炮实验的数值模拟

图 2 是 LSD 气炮实验 29 层 Mg-Cu 体系梯度飞片材料的微观结构，呈对称分布，从左向右，铜的含量先呈梯度逐渐减小至纯镁层，再变化为纯铜层。层间结合良好，无明显裂缝，结合紧密，无脱焊等明显缺陷。设计的中间各层厚度为 0.15 mm，实测总厚度为 4.194 mm，与设计厚度 4.35 mm 相比，误差为 3.58%，基本满足设计要求，图 3 显示的密度变化特征表现出先降低再升高的对称分布复杂变化特征，即为纯铜的 8.924 g/cm^3 以三次幂形式降至纯镁 1.74 g/cm^3，再对称地升高至纯 Cu 层 8.924 g/cm^3。

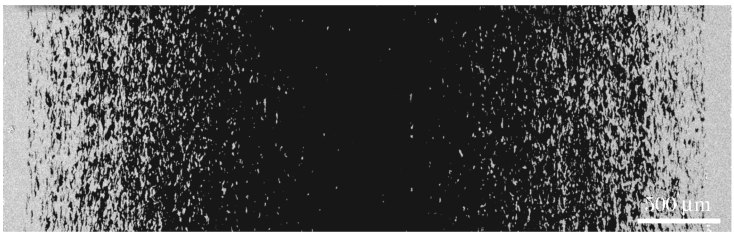


图 2 29 层 Mg-Cu 体系梯度飞片材料的微观结构(两侧为纯 Cu，中间为纯 Mg)

Fig. 2 The microstructure of the 29-layer pillow impactor (Two sides is pure Cu, and the middle is pure Mg)

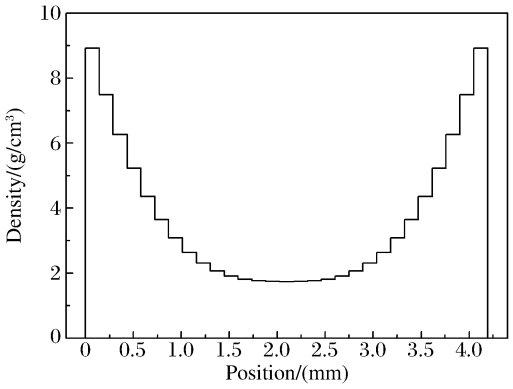


图 3 29 层 Mg-Cu 梯度飞片的厚度和密度的实验测量值

Fig. 3 The measured of the density versus thickness of the 29-layer impactor

图 4 为 29 层 Mg-Cu 体系梯度飞片以 1.0 km/s 速度撞击 Al/LiF 靶板的粒子速度波形的设计值和实测值，从图中可以看出，粒子速度波剖面表现为“冲击加载－准等熵卸载－准等熵加载”的复杂加、卸载过程。纯铜造成的初始跳跃的速度为 710.6 m/s，随后开始下降，在 0.967 μs 达到速度极小值 399.5 m/s，随着梯度飞片的密度增加而增加至极大值 513.6 m/s，可以注意到随后没有卸载波，主要是由实验中光学窗口 LiF 的厚度不够，后面有部分粒子速度的加载剖面没有测得所造成的。初始跳跃速度值、速度极小值的模拟计算值分别为

710.1 m/s 和 394.7 m/s,与实验测量值的相对误差为 0.07%和 1.2%,到达速度极小值的时间为 0.985 μs,与实验测量结果的相对误差为 1.86%。从图 4 中还可以看到,29 层梯度飞片的开始几层呈阶梯状,随后的下降波形光滑,这主要是由于梯度飞片密度下降趋势为三次幂,开始的层间密度差值较大造成的,密度进一步降低,层间的密度差值较为平缓,从而粒子速度曲线表现为连续,表明粒子速度波形的连续性与梯度飞片材料的各层密度差和厚度密切相关。虽然加载过程后阶段的实验波形未获得,但从实验结果与模拟结果的比较可以看出,两者的变化趋势是一致的,实现了"冲击加载－准等熵卸载－准等熵加载"的物理过程。综上所述,数值计算和实验测量值之间的误差很小,29 层 Mg-Cu 体系梯度飞片击靶的复杂加载波形与数值模拟结果的吻合度较好,表明 29 层 Mg-Cu 体系梯度材料具备获得复杂加载波形的能力。

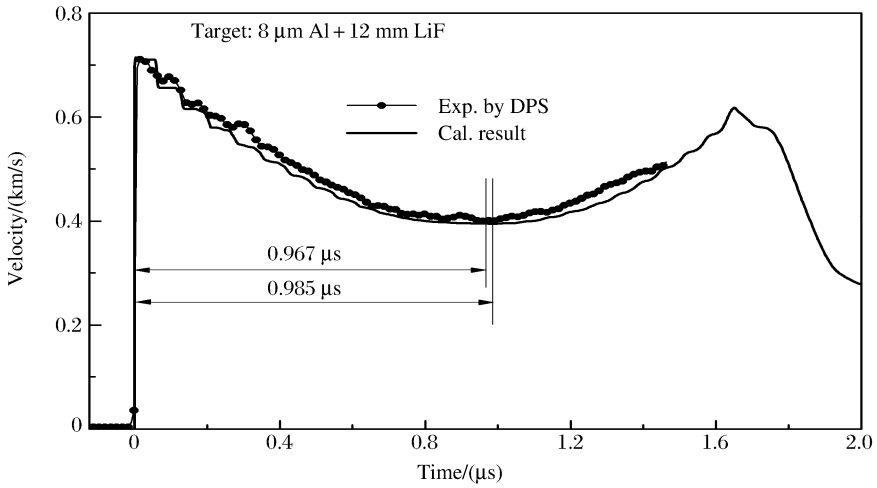


图 4　29 层 Mg-Cu 体系梯度飞片以 1.0 km/s 速度撞击 Al/LiF 靶板的速度历史的实验结果和数值模拟结果比较

Fig. 4　Comparison between the measurement and simulation of the velocity history in the experiment of 29-layer impactor impact to the Al/LiF target with 1.0 km/s

5　结　论

通过对 Mg-Cu 体系 Pillow 飞片复杂加载实验的数值计算以及速度剖面比较,验证了本研究的计算方法、研制的 MLEP 计算程序和不同材料体系混合模型的实用性和正确性。所制备的 29 层 Mg-Cu 体系梯度飞片材料其微观结构良好,与设计结果基本吻合,该飞片击靶后的粒子速度波剖面表现为"冲击加载－准等熵卸载－准等熵加载"的复杂加、卸载过程。实验结果与数值模拟结果吻合程度好,表明 29 层 Mg-Cu 体系梯度材料具备获得复杂加载波形的能力。Pillow 技术将冲击加载、准等熵加载、可控制的卸载等联系起来,拓展了传统加载技术对热力学路径的限制,通过不同的热力学路径对样品材料实现加/卸载作用。

References:

[1] Nguyen J H, Orlikowski D, Streitz F H, et al. High-Pressure Tailored Compression: Controlled Thermodynamic Paths [J]. J Appl Phys, 2006, 100(2): 023508.

[2] Nguyen J H, Orlikowski D, Streitz F H, et al. Specifically Prescribed Dynamic Thermodynamic Paths and Resolidification Experiments [J]. AIP Conf Proc, 2004, 706(1): 1225-1230.

[3] Martin L P, Orlikowski D, Nguyen J H. Fabrication and Characterization of Graded Impedance Impactors for Gas Gun Experiments from Tape Cast Metal Powders [J]. Mater Sci Eng A, 2006, 427(1-2): 83-91.

[4] Hall C A, Asay J R, Knudson M D, et al. Experimental Configuration for Isentropic Compression of Solids Using Pulsed Magnetic Loading [J]. Rev Sci Instrum, 2001, 72(9): 3587-3595.

[5] Bai J S, Luo G Q, Tang Mi, et al. Computational Design of the Graded Density Impactor with Shock Loading and Quasi-Isentropic Compression [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009, 23(3): 173-180. (in Chinese)
柏劲松, 罗国强, 唐 蜜, 等. 冲击加载-准等熵加载过程的密度梯度飞片计算设计 [J]. 高压物理学报, 2009, 23(3): 173-180.

[6] Bai J S, Luo G Q, Hu J B, et al. Numerical Simulation of the Graded Density Impactor Complex of Loading and Unloading [J]. High Energy Density Physics, 2008, (2): 62-67. (in Chinese)
柏劲松, 罗国强, 胡建波, 等. 密度梯度飞片实现复杂加/卸载过程的数值模拟 [J]. 高能量密度物理, 2008, (2): 62-67.

[7] Martin L P, Patterson J R, Orlikowski D, et al. Application of Tape-Cast Graded Impedance Impactors for Light-Gas Gun Experiments [J]. J Appl Phys, 2007, 102(2): 023507.

[8] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State [M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.

[9] Marsh S P. LASL Shock Hugoniot Data [Z]. Berkeley and Los Angeles, California: University of California Press, 1980.

Numerical Simulation of the Gas Gun Experiment with Pillow Impactor Loading

BAI Jing-Song[1], LUO Guo-Qiang[2], HUANG Jiao-Feng[1], LI Ping[1]

(1. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*;
2. *State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: The present study is for verification and validation (V&V) of the one-dimensional elastic-plastic hydrodynamic code MLEP(Multi-material Lagrangian Elastic-Plastic) and method of the mixing model of different material system. Two gas gun experiments with pillow impactor loading were calculated by MLEP, in which one is from the Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) of 19 layers model and the other is from the National Key Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research (LSD), Institute of Fluid Physics CAEP of 29 layers model. Our simulation results are excellently consistent with the experiments. The work that we have carried out in this paper will become a part of V&V and of the further research of controllable loading experiment.

Key words: pillow impactor; complex loading; gas gun experiment; simulations