DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0792-07

# 实现应变率为 $10^5 \sim 10^6\ s^{-1}$ 的阻抗梯度飞片复杂加载波形计算分析*

柏劲松[1,2],李　蕾[1],俞宇颖[1,2],王　宇[1],张红平[1],罗国强[3],沈　强[3],
戴诚达[1,2],谭　华[1,2],吴　强[1,2],张联盟[3]

(1.中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999;
2.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重点实验室,四川 绵阳 621999;
3.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**:为了在气炮上实现应变率为 $10^5 \sim 10^6\ s^{-1}$ 的复杂加载技术研究,采用自行研制的拉格朗日程序 MLEP(multi-material Lagrangian elastic-plastic)对 Al-Cu-W 材料体系的阻抗梯度飞片复杂加载不锈钢靶板进行数值模拟,计算设计并分析了阻抗梯度飞片的厚度和密度分布指数对靶板压力、速度和应变率峰值等波形的影响。结果表明:密度指数分布越大,加载时间越短,加载后期的压力、速度和应变率峰值曲线更陡峭;同时,为了避免靶板/LiF 窗口界面反射的稀疏波早于阻抗梯度飞片后界面反射的稀疏波达到碰撞面位置,计算设计中还考虑了飞片厚度的影响。此外,对基于理论设计的阻抗梯度飞片进行了动态考核实验,实验结果基本反映了预期的设计,为材料强度的测量奠定了基础。

**关键词**:固体力学;复杂加载;计算设计;阻抗梯度飞片;Al-Cu-W 体系

**中图分类号**:O347.3　　**国标学科代码**:13015　　**文献标志码**:A

在近似等熵状态的静态加载和近似冲击绝热状态的冲击波动高压加载之间存在着广阔的复杂加载区域,然而在实际应用中,不能将准静态加载、霍普金森杆等单轴应力、中-低应变率加载实验得到的数据和认识简单地外推到高压-高应变率的动态加载状态,必须有针性地开展以准等熵为主要特征的高压-高应变率复杂加载特点的理论、实验加载技术和测试技术以及数值模拟技术研究。当前为了拓展冲击波物理与爆轰物理研究领域,提高相关领域的研究水平,迫切需要发展连接动高压冲击波加载和静高压加载之间的可控路径复杂加载技术,在物理设计、材料制备、实验诊断和数据解读等方面对冲击波物理与爆轰物理的研究提出了新的科学与技术挑战。

实验、理论和数值模拟研究阻抗梯度飞片的目的,是利用轻气炮驱动一种由新型的密度(或阻抗)呈指定分布形式的组合飞片实现多路径复杂加载[1-5]。中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰波物理重点实验室与飞片研制单位武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室密切合作,率先在国内开展了阻抗梯度飞片的复杂加载研究工作。在数值模拟程序研制方面,研制了适用于不同材料体系的阻抗梯度飞片物理设计和加载过程模拟计算程序 MLEP[6-7],实现了对冲击加载-准等熵加载等多种阻抗梯度飞片的理论设计;在密度梯度飞片材料体系选择和研制方面,根据理论设计结果,针对 Mg-W 或 Mg-Cu 材料体系,探索并初步掌握了利用流延法制造准连续型阻抗梯度飞片技术[8-10];在实验研究方面,在气炮上实现密度梯度飞片复杂加载过程的实验研究,并通过 DISAR/DPS 测试技术获得具有较高置信度的复杂加载波剖面数据。

---

* **收稿日期**:2014-05-21;**修回日期**:2014-10-22

**基金项目**:国家自然科学基金项目(11372294,11532012);
冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金项目(9140C670301150C67290);
中物院国防科技重点实验室专项基金项目(2012-专-10)

**第一作者**:柏劲松(1968—　),男,博士,研究员,bjsong@foxmail.com。

本文中在已经开展的研究工作基础上，考虑飞片实际加工研制条件和实验具体需求，在不锈钢靶板中为实现应变率为 $10^5 \sim 10^6\ s^{-1}$ 的复杂加载而开展的阻抗梯度飞片物理设计和加载过程波形计算分析，对于进一步开展实验装置布局和参数测试具有指导意义。文中所采用的计算方法和复合材料参数获取可参见文献[11]，本文中不再列出。

## 1 复杂加载实验模型和物理需求

采用的复杂加载实验模型如图 1 所示，阻抗梯度飞片以 3.0 km/s 的速度正向（低波阻抗面）撞击2 mm厚的不锈钢靶板，靶板叠在 10 mm 厚的 LiF 窗口上。根据加载实验的物理需求，计算设计需满足下列基本要求：(1) 加载总时间不超过 500 ns，平台时间不超过 100 ns，加载的速度和压力分布呈下凹式上升；(2) 阻抗梯度飞片后界面反射的稀疏波进入靶板后，靶板/LiF 窗口界面反射的稀疏波才与之作用；(3) 碰撞面或靶板/LiF 窗口界面（原位）压力峰值达到 100 GPa；(4) 靶板中应变率范围为 $10^5 \sim 10^6\ s^{-1}$。

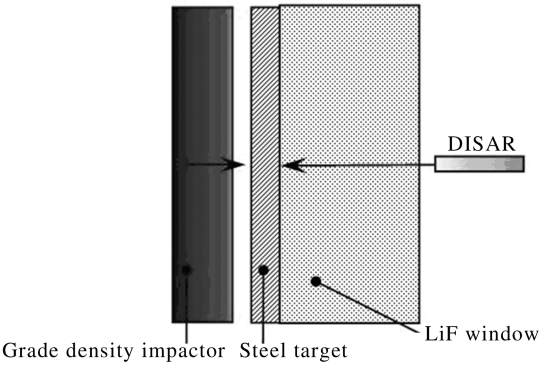


图 1 复杂加载实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of complexity loading experiment

根据上述条件，综合物理需求和加工因素，确定了 Al-Cu-W 体系作为阻抗梯度飞片的材料体系，密度分布采用 $\rho(x)=\rho_0+Ax^P$ 形式：当密度小于 Cu 的密度时，选取 Al-Cu 体系；当密度大于 Cu 的密度时，选取 Cu-W 体系。数值模拟研究了不同厚度、不同密度分布指数（$P$）的阻抗梯度飞片对碰撞面、靶板中心以及界面位置的速度、压力、应变率的影响。定义碰撞面位置为阻抗梯度飞片和靶板撞击的界面，靶板中心位置为靶板材料的中心位置，界面位置为 LiF 窗口和靶板的交界面位置。如果将 LiF 窗口材料改为靶板材料，则计算的是相同厚度靶板在界面位置的原位物理量。

采用一维拉格朗日程序 MLEP 对 Al-Cu-W 体系阻抗梯度飞片复杂加载不锈钢靶板进行数值模拟。数值模拟还应考虑到实际加工和实验的限制及需求，如阻抗梯度飞片每层厚度不能低于0.1 mm、准等熵加载应变率不超过 $10^6\ s^{-1}$ 等，因此需要对阻抗梯度飞片进行精心设计，方能满足上述条件。

## 2 计算设计的 3 种阻抗梯度飞片及其加载波形计算分析

在 Al-Cu-W 体系阻抗梯度飞片中，第 1 层为低密度（低阻抗）材料，采用密度为 2.712 g/cm³ 的纯 Al；最后一层为高密度（高阻抗）材料，采用 Cu 和 W 的组合，密度为 16.0 g/cm³。密度分布指数 $P$ 选为 2 或 3，据此设计了 3 种不同的飞片，参数如表 1 所示，表中 $h$ 表示飞片总厚度，飞片的密度分布如图 2 所示。case 1 和 case 2 的主要区别是密度分布指数 $P$ 不同；case 3 在 case 2 的基础上减少 2 层，以减小阻抗梯度飞片的厚度。以下各图中“With LiF”表示带 LiF 窗口计算情况，“No LiF”表示相同条件下原位物理量的计算情况。

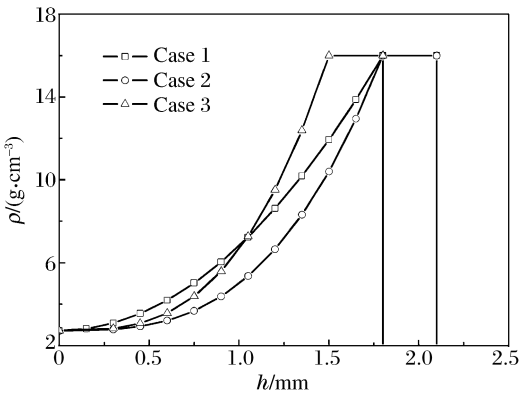


图 2 计算设计的 Al-Cu-W 体系飞片密度分布

Fig. 2 Density distribution of Al-Cu-W impactor in computational design

表 1 3 种阻抗梯度飞片主要参数

Table 1 The primary parameters of the three GDIs

| 实验号 | 飞片层数 | $h$/mm | $P$ | 密度分布 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 13 | 2.1 | 2 | $\rho=2.712+4.101x^2$ |
| 2 | 12 | 2.1 | 3 | $\rho=2.712+2.278x^3$ |
| 3 | 10 | 1.8 | 3 | $\rho=2.712+3.937x^3$ |

## 2.1 碰撞面位置波形分析

3 个算例的碰撞面位置压力和速度历史如图 3 所示。三者的初始台阶压力、峰值压力、初始台阶速度和峰值速度各自相差较小：初始台阶压力为 46 GPa，峰值压力接近 100 GPa；初始台阶速度为 0.978 km/s，峰值速度约 1.75 km/s。碰撞面的速度和压力呈台阶式上升，在加载完成后形成一个平台，平台时间间隔与飞片最后一层材料的厚度相关；之后由飞片后界面反射的稀疏波对靶板进行卸载，速度和压力开始降低。在带 LiF 窗口的算例中，当压缩波到达靶板/LiF 窗口界面时会反射一个稀疏波，当此稀疏波到达碰撞面位置时，会使碰撞面速度上升，压力下降。从速度和压力分布曲线来看，此靶板/LiF 窗口界面反射的稀疏波晚于飞片后界面反射的稀疏波到达碰撞面，对加载和平台没有产生影响，而对卸载影响较大。在 case 1 中，界面位置反射的稀疏波几乎与阻抗梯度飞片后界面反射的稀疏波同时到达碰撞面，不利于反积分计算和实验测量；而 case 2 和 case 3 中，界面位置反射的稀疏波在卸载开始一段时间后才到达碰撞面，满足实验需求。

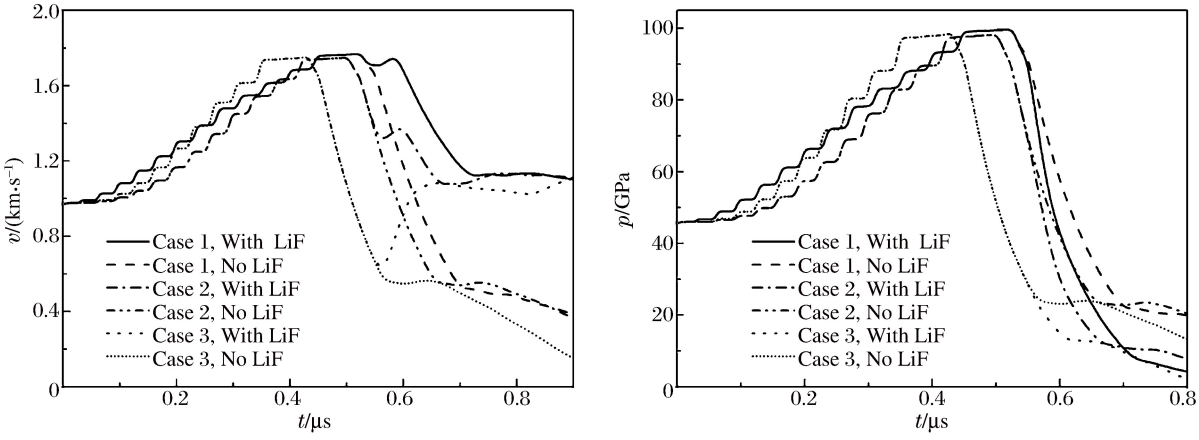


图 3 3 种 Al-Cu-W 体系飞片算例的碰撞面位置压力和速度历史

Fig. 3 Profiles of pressure and velocity at impact position

3 个算例的加载时间分别为 456、429、357 ns，平台时间约 70 ns。平台时间主要受飞片最后一层材料厚度和靶板/LiF 窗口界面反射稀疏波的影响，在碰撞面位置三者基本相等；而加载时间与飞片的厚度和密度分布指数相关：在密度分布指数 $P$ 相同时(case 2 和 case 3)，阻抗梯度飞片越厚，加载时间越长；而在相同的厚度下(case 1 和 case 2)，密度分布指数 $P$ 越小，加载时间越长。

压力和速度历史曲线与飞片的密度分布相关：当密度分布指数较大时，飞片前几层密度变化相对较小，其压力和速度曲线较为平缓；而飞片后几层密度变化较大，压力和速度曲线较为陡峭。当密度分布指数为 3 时，压力和速度分布更符合实验提出的下凹式上升的要求。

## 2.2 靶板中心位置波形分析

中心位置的压力和速度历史如图 4 所示。从带 LiF 窗口算例和原位算例的比较可知，靶板/LiF 窗口界面位置反射的稀疏波比飞片后界面反射的稀疏波更早到达中心位置，故在加载过程中存在一个速度的突升和压力的突降，之后由于阻抗梯度飞片继续对靶板进行准等熵加载，速度和压力再次上升，最终导致带 LiF 窗口算例中心位置处的峰值压力低于原位算例相应的峰值压力，而峰值速度高于原位的

峰值速度，相应的平台时间变为 0。当加载完成后，飞片后界面反射的稀疏波开始对靶板中心位置进行卸载，速度和压力降低。3 个带 LiF 窗口的算例加载时间分别为 476、448、369 ns。

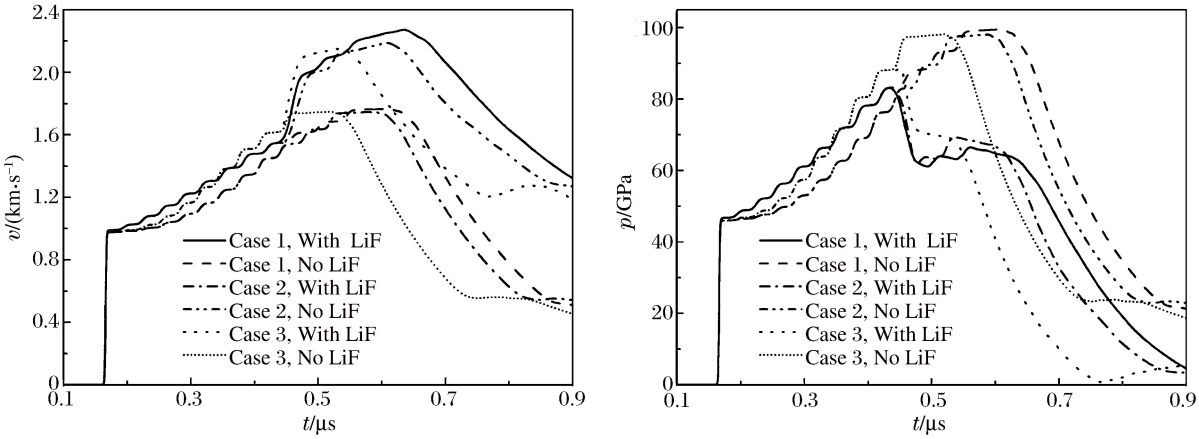


图 4 3 种 Al-Cu-W 体系飞片算例的中心位置压力和速度历史比较

Fig. 4 Profiles of pressure and velocity at center

## 2.3 界面位置波形分析

在阻抗梯度飞片对靶板材料进行准等熵压缩时，压缩波到达靶板/LiF 窗口界面位置后立即反射一个稀疏波，使界面位置的速度升高，压力降低，故带 LiF 窗口算例的初始台阶压力远低于原位算例的初始台阶压力，而初始台阶速度高于原位算例的初始台阶速度，计算结果如图 5 所示。飞片厚度和密度分布指数对速度和压力曲线的影响与碰撞面处的定性相同。

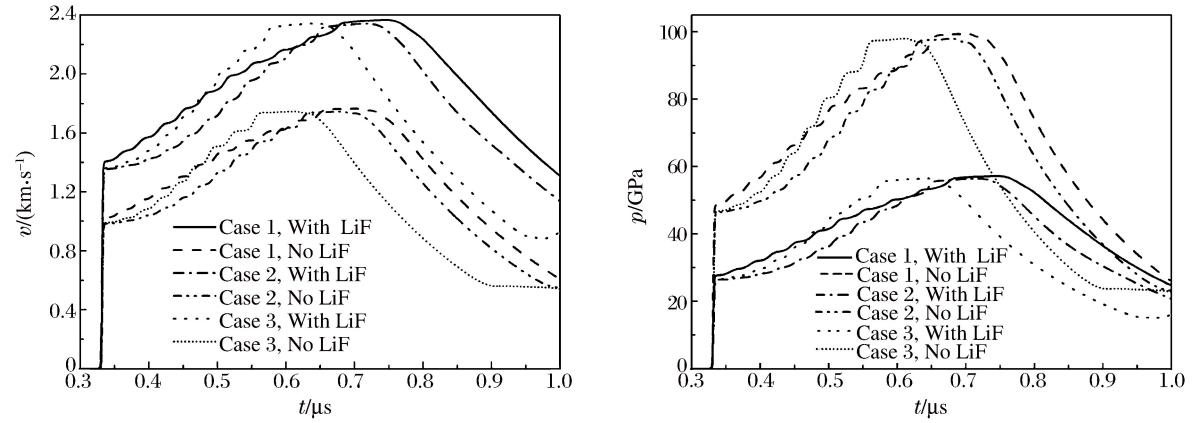


图 5 3 种 Al-Cu-W 体系飞片算例的界面位置压力和速度历史比较

Fig. 5 Profiles of pressure and velocity at interface

## 2.4 靶板中应变率峰值分析

图 6 给出了 3 个算例的靶板中心位置和界面位置的应变率峰值分布，应变率处于 $10^5 \sim 10^6\ s^{-1}$ 之间。在 Al-Cu 组合层中，应变率峰值随着时间的增加而不断增加，且密度分布指数越大，或靶板厚度越薄，应变率峰值上升越陡峭。而 Cu-W 组合层对应的应变率峰值相对较小。在中心位置处，带 LiF 窗口算例中由于靶板/LiF 窗口界面反射的稀疏波作用，使应变率急剧下降，甚至在 case 1 中变为负值。界面位置稀疏波的作用使带 LiF 窗口算例的应变率峰值低于相同时刻原位算例的应变率峰值。在 case 3 中，靶板内部应变率最大值约为 $1.2\times10^6\ s^{-1}$，达到项目上限指标。

## 2.5 计算域中压力随时间和空间的分布

图 7 给出了 3 个算例压力随时间和空间的分布。在 case 1 中，靶板/LiF 窗口界面反射的稀疏波和阻抗梯度飞片后界面反射的稀疏波在碰撞面位置附近相遇，不满足实验要求，可以通过加厚靶板来延后

靶板/LiF 窗口界面位置反射的稀疏波的到达时间。而在 case 2、3 中，界面位置反射的稀疏波在阻抗梯度飞片后界面反射的稀疏波达到之后才达到碰撞面，基本满足实验要求；但飞片第 1 层厚度仅为 0.3 mm，在第 1 个压缩波达到靶板/LiF 窗口界面之前，后续的压缩波会追赶上第 1 个压缩波，使得界面位置的初始台阶速度高于碰撞面位置的初始台阶速度，在以后的计算设计中可适当增加第 1 层飞片的厚度，以避免压缩波的追赶效应。

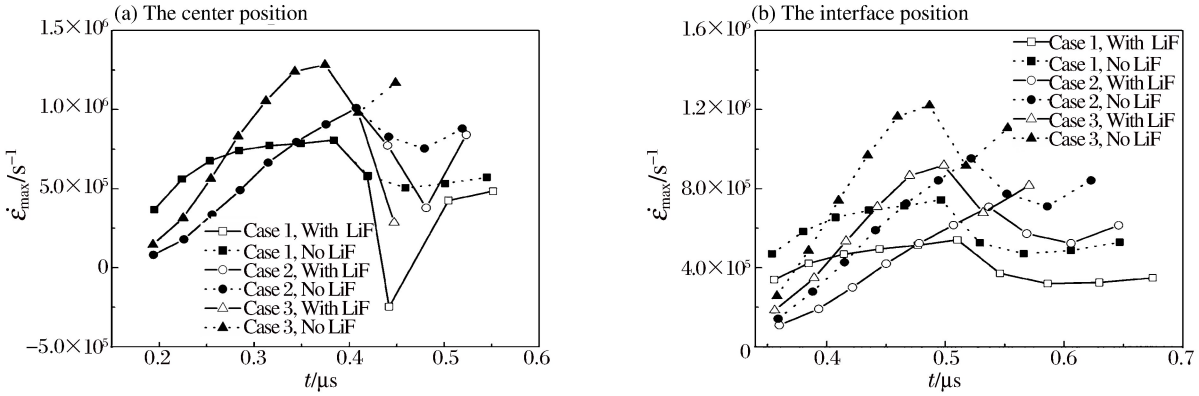


图 6 靶板中心位置和靶板/LiF 窗口界面位置的应变率峰值历史

Fig. 6 Comparison of maximum strain rates at center and interface

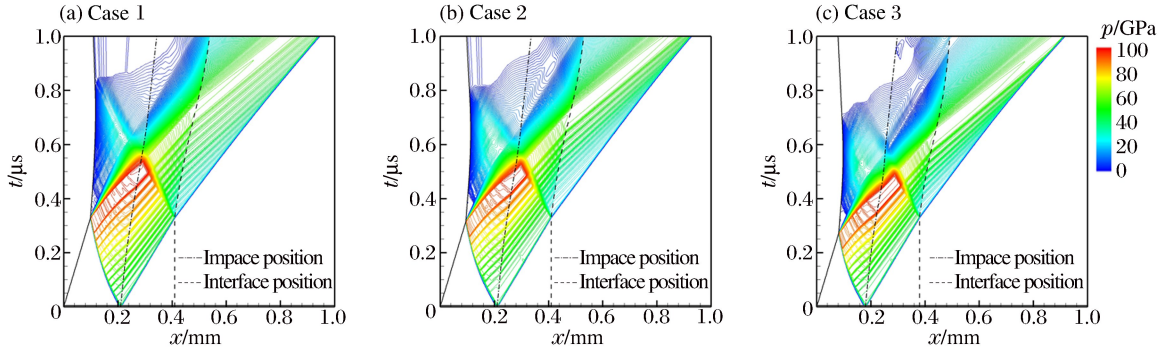


图 7 带 LiF 窗口算例中压力随时间和空间的分布

Fig. 7 Pressure contours drawn in $x$-$t$ space with LiF windows

## 3 动态考核实验

根据上述设计，由武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室对 case 1 和 case 3 中的飞片进行了试制，并由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进行动态考核实验以检验飞片的加工质量。为了避免其他因素的干扰，实验采用最简单的方式：即由阻抗梯度飞片直接冲击单晶 LiF 窗口，由多点 DISAR/DPS 对击靶波形和 LiF 界面粒子速度剖面进行测量。从粒子速度剖面判断阻抗梯度飞片设计是否达到预期，均匀性是否满足实验方案需求。

使用二级炮加载分别加载 case 1、3 中的阻抗梯度飞片，实测弹速分别为 3.058、3.13 km/s，阻抗梯度飞片实测厚度 2.112、1.831 mm。实验采用 4 路 DPS 测量的速度剖面和 MLEP 程序计算的速度剖面如图 8 所示，4 路 DPS 的测量结果差异较小，说明阻抗梯度飞片均匀性较好，测试技术稳定可靠。制备的阻抗梯度飞片基本反映了预期的理论设计：在加载前期，MLEP 计算结果与实验结果吻合较好，且峰值速度也与实验结果基本一致，仅在 Cu-W 组合层对应的速度剖面上存在一定的差异，MLEP 计算的结果略低于实验测量结果，特别是在 $P=2$ 的 case 1 中，这可能与制备使用的 W 粉实际材料参数与计算设计所采用的理想混合法则选取的材料参数差异所致，此外，制备梯度飞片时 W 粉质量分数和致密程度也会对波剖面产生影响。

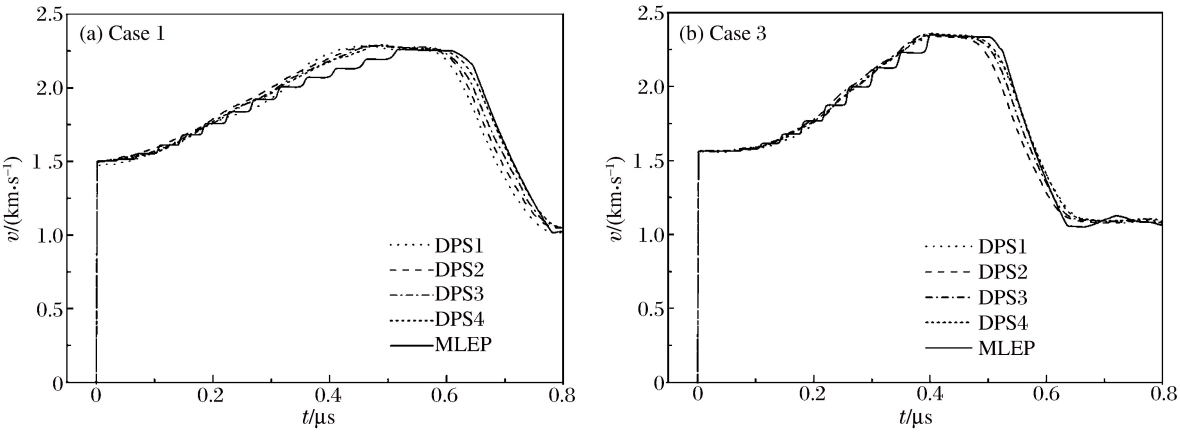


图 8 实验采用 4 路 DPS 测量的速度剖面和 MLEP 计算的速度剖面

Fig. 8 Velocity profiles as achieve from experiment by DPS and simulated by MLEP

## 4 结 论

采用一维拉格朗日程序 MLEP 对 Al-Cu-W 体系梯度飞片复杂加载不锈钢靶板进行了数值模拟，并通过动态考核实验对阻抗梯度飞片的品质进行了检验，主要结论如下：

(1)阻抗梯度飞片对不锈钢靶板进行准等熵加载，靶板的原位峰值压力达到 100 GPa，而应变率约为 $10^5 \sim 10^6$ $s^{-1}$，远低于冲击加载的应变率，符合项目指标。

(2)加载时间受阻抗梯度飞片的厚度和密度指数分布的影响：随着阻抗梯度飞片厚度的降低或密度分布指数 $P$ 的增加，加载时间缩短，阻抗梯度飞片后界面反射的稀疏波到达碰撞面位置的时间提前，使靶板/LiF 窗口界面反射的稀疏波影响降低。

(3)飞片动态考核实验结果表明：阻抗梯度飞片的制备基本反映了预期的设计，同时也验证了 MLEP 程序的适用性和可靠性。

## 参考文献：

[1] Barker L M, Scott D D. Development of a high-pressure quasi-isentropic plane wave generating capability[R]. SAND 84-0432, 1984.

[2] Chhabildas L C, Barker L M. Dynamic quasi-isentropic compression of tungsten[C]// Schmidt S C, Holmes N C. Shock Compression of Condensed Matter—1987. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., 1988:111-114.

[3] Chhabildas L C, Asay J R, Barker L M. Dynamic quasi-isentropic loading of tungsten[J]. High Pressure Research, 1990,5:842-844.

[4] Chhabildas L C, Asay J R, Barker L M. Shear strength of tungsten under shock- and quasi-isentropic loading to 250 GPa[R]. SAND 88-0306, UC-704, 1988.

[5] Chhabildas L C, Asay J R. Dynamic yield strength and spall strength measurements under quasi-isentropic loading [R]. SAND 90-0883C, 1990.

[6] 柏劲松，罗国强，黄娇凤，等. Pillow 飞片气炮加载实验的数值模拟研究[J]. 高压物理学报，2011，25(5)：390-394.
Bai Jing-song, Luo Guo-qiang, Huang Jiao-feng, et al. Numerical simulation of the gas gun experiment with pillow impactor loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011,25(5):390-394.

[7] 柏劲松，罗国强，王翔，等. Mg-W 体系密度梯度飞片复杂加载实验的计算分析[J]. 力学学报，2010，42(6)：1068-1073.
Bai Jing-song, Luo Guo-qiang, Wang Xiang, et al. Calculation and analysis of the Mg-W GDI complex loading experiment[J]. Acta Mechanica Sinica, 2010,42(6):1068-1073.

[8] 沈强，王传彬，张联盟，等. 为实现准等熵压缩的波阻抗梯度飞片的实验研究[J]. 物理学报，2002，51(8)：1759-1762.

Shen Qiang, Wang Chuan-bin, Zhang Lian-meng, et al. A study on generating quasi-isentropic compression via graded impedance flyer[J]. Acta Physica Sinica, 2002,51(8):1759-1762.

[9] Luo Guo-qiang, Zhang Jian, Li Mei-juan, et al. Interfacial microstructure and mechanical strength of 93W/Ta diffusion-bonded joints with Ni interlayer[J]. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2013,44(2):602-605.

[10] Zhang Jian, Luo Guo-qiang, Li Mei-juan, et al. Study on microstructure and property of diffusion-bonded Mo-Cu joints[J]. Key Engineering Materials, 2012,508:178-182.

[11] 柏劲松,罗国强,唐蜜,等.冲击加载一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.
Bai Jing-song, Luo Guo-qiang, Tang Mi, et al. Computational design of graded density impactors for shock loading and quasi-isentropic compression[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2009,23(3):173-180.

# Computational design for complex loading on grade density impactor with strain rates of $10^5 \sim 10^6$ $s^{-1}$

Bai Jing-song[1,2], Li Lei[1], Yu Yu-ying[1,2], Wang Yu[1], Zhang Hong-ping[1], Luo Guo-qiang[3], Shen Qiang[3], Dai Cheng-da[1,2], Tan Hua[1,2], Wu Qiang[1,2], Zhang Lian-meng[3]

(1. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*;
2. *National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*;
3. *State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *Hubei, China*)

**Abstract**: In order to carry out the complex loading research with the strain rates varying from $10^5$ $s^{-1}$ to $10^6$ $s^{-1}$ on the light gas gun, we numerically simulated the complex loading on the steel target by the graded ensity impactor (GDI) of Al-Cu-W system using our own developed Lagrangian code MLEP (multi-material Lagrangian elastic-plastic). In our simulation, the effects of the thickness of the GDI and the power exponent of denstiy distribution on the pressure, velocity, and peak strain rate of the target were investigated. The results indicate that the loading time decreases as the power exponent of density distribution increases, and the profiles of pressure, velocity and peak strain rate at the later stage of the loading are steeper than those with smaller power exponents. Moreover, the effect of the thickness of the GDI is considered in our computational design to prevent the confluence of the rarefaction waves emanating from the back of the GDI and the interface between the target and LiF window on the impact interface. Finally, a dynamic test was conducted for the GDI based on the design, and the results show the good agreement between the design and the experiment, which paves the way for the strength measurement of materials in the future.

**Key words**: solid mechanics; complex loading; computational design; grade density impactor; Al-Cu-W system

(责任编辑　曾月蓉)