

Mg-W 体系密度梯度飞片复杂加载实验的计算分析¹⁾

柏劲松^{*,2)} 罗国强[†] 王翔^{*} 唐蜜^{*} 戴诚达^{*} 谭华^{*}

^{*}(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, 绵阳 621900)

[†](武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

摘要 采用弹塑性流体动力学计算方法对 Mg-W 体系密度梯度飞片复杂加载实验进行计算设计, 考虑到飞片材料制备中单层厚度值和 Mg-W 最大阻抗混合质量百分数的致密条件限制, 提供 12 层 Mg-W 体系飞片的制备参数. 采用研制的梯度飞片在气炮上进行冲击加载-准等熵加载实验, 给出了飞片和 LiF 窗口界面处速度剖面的 VISAR 或 DISAR 实验测试结果, 并通过数值计算对实验数据进行对比, 对出现的异常现象进行了分析和实验验证, 提出以 Mg-Cu 为飞片材料体系的建议, 为后续深入开展可控加载卸载路径和可控加载卸载速率的实验研究奠定了基础.

关键词 复杂加载, 气炮实验, 密度梯度飞片, 计算设计, Mg-W 和 Mg-Cu 体系

中图分类号: O39 **文献标识码:** A **文章编号:** 0459-1879(2010)06-1068-06

引 言

复杂加载是 Off Hugoniot 数据实验测量研究手段之一, 不仅可以通过平面气炮实验研究内爆动力学复杂加 / 卸载过程, 同时也可以用于材料的高压熔化特性研究等方面. 近二十多年来, 美国 LLNL 实验室一直着力于密度梯度飞片轻气炮加载技术研究, 他们的研究表明所用梯度飞片的密度(或波阻抗)剖面形式以及发射速度对样品在准等熵压缩过程的应变率会产生显著的影响^[1]. 在复杂加载实验方面, 可以采用准连续型密度梯度飞片通过二级轻气炮开展实验研究, 这项技术利用轻气炮驱动一种新型的密度呈指定分布形式的组合飞片高速碰撞样品, 在样品中产生不同于传统的压缩波形, 实验获得的热力学途径不再局限于单一的热力学途径^[1-2]. 对于准连续型密度梯度飞片材料体系的选择, LLNL 报道的主要有 Al(Mg)-W 金属体系、含 Al(Mg)-W 颗粒的树脂体系、含空心微球的泡沫树脂体系等^[3-5].

在国内有关复杂加载技术研究主要集中在工程物理研究院和武汉理工大学, 前者承担理论设计和实验工作, 后者承担材料加工和飞片制备工作, 已经取得了一些研究成果^[6-8]. 复杂加载技术主要涉及准连续型密度梯度飞片制备技术和轻气炮实验

加载技术, 为了在气炮上开展对标准样品材料的复杂加载试验研究, 首先需要针对不同材料组合的密度梯度飞片(graded density impactor, GDI)的组成要素(如密度、几何尺寸等)进行理论设计, 给出满足加载要求的 GDI 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, 为 GDI 材料制备提供模型数据, 而后进行梯度飞片制备、复杂加载实验和相关测试研究. 本文针对中国工程物理研究院冲击波物理与爆轰物理国家重点实验室选取的 Mg-W 体系材料, 在目前已经具备的材料加工条件下, 开展对准连续型密度梯度飞片的理论设计, 提供飞片制备所需要的各层材料厚度、密度以及组分的质量百分比, 对研制的梯度飞片在气炮上进行复杂加载实验研究, 通过 VISAR 或 DISAR 测量的飞片与 LiF 窗口界面速度剖面, 分析理论计算与实验测试结果存在较大差异的原因, 并获得实验验证, 从材料制备角度对材料体系的选择提出合理建议, 为后续研究奠定了基础.

1 Mg-W 体系 GDI 冲击加载和准等熵加载模型的计算设计

对复杂加载 GDI 进行计算设计需要遵循一个原

2009-06-08 收到第 1 稿, 2010-05-16 收到修改稿.

1) 国防基础科研项目(A1520070078, Z112009B004)和国家自然科学基金项目(11072228)资助.

2) E-mail: bjsong@mail@21cn.com

则,即在允许条件下,样品中获得连续性、光滑性较好的准等熵加载波形.这里的“允许条件”是指飞片材料实际制备中的加工因素,如单层材料厚度的最小值, Mg-W 混合致密条件等.在遵循设计原则的基础上,设计方法是根据自由面速度剖面或界面速度剖面,通过调整不同材料体系各层厚度和组分,给出满足设计原则的 GDI 厚度和组分.

1.1 计算方法

针对不同类型的流体动力学问题,可以采用 Euler, Lagrange 或者耦合的计算方法^[9-10].本文采用自行研制的一维 Lagrange 弹塑性流体动力学程序对复杂加载 GDI 模型进行计算设计和实验结果分析,其运动方程、连续性方程和能量方程表示如下

$$\left. \begin{aligned} \dot{u} &= -R^{\alpha-1} \frac{\partial \sigma_R}{\partial m} - (\alpha-1) \frac{v}{R} (\sigma_R - \sigma_\theta) \\ v &= R^{\alpha-1} \frac{\partial R}{\partial m} \\ \dot{E} &= -(p+q)\dot{v} + v[S_1\dot{\epsilon}_1 + (\alpha-1)S_2\dot{\epsilon}_2] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, $\dot{R} = u$; \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 为人为黏性; S_1, S_2 为应力偏量; $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2$ 为应变率; p 为压力; E 为比内能.

在方程 (1) 中, 描述材料本构关系的径向 (法向) 应力 σ_R , 环向 (切向) 应力 σ_θ , 应力偏量 S_i 以及应变率 $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2$ 定义为

$$\sigma_R = p + q + S_1 \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = p + q + S_2 \quad (3)$$

$$S_i = 2\mu \left(\dot{\epsilon}_i + \frac{1}{3} \dot{v} \right), \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

式中, μ 为剪切模量. 对于 S_i , 采用 Von Mises 屈服准则^[11]

$$S_i^Y = \frac{S_i(2/3)^{1/2} Y_0}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}$$

其中 Y_0 为材料的屈服强度.

$$\dot{\epsilon}_1 = \frac{\partial u}{\partial R}, \quad \dot{\epsilon}_2 = -\frac{u}{R}$$

材料的状态方程采用 Grüneison 形式^[12]

$$p - p_x = \frac{\gamma}{v} (E - E_x)$$

其中, $p_x(v)$ 为冷压; $E_x(v)$ 为冷能, 是比容的函数; γ 为 Grüneison 系数. 对于材料的初始状态位

于冲击 Hugoniot 线上的情况, 在压缩状态下有

$$p - p_H = \frac{\gamma}{v} (E - E_H)$$

$$E_H = \frac{1}{2} p_H (v_0 - v_H)$$

其中冲击波速度与粒子速度关系取 $u_s = c_0 + \lambda u_p + \lambda' u_p^2$, λ, λ' 为材料参数, u_p 为粒子速度. 在膨胀状态下有

$$p = \frac{\gamma}{v} E + \frac{c_0^2}{v_0} \rho_0 c_0^2 \left(\frac{v_0}{v} - 1 \right)$$

1.2 计算设计结果

以 2 mm 铜样品为靶材料开展对 Mg-W 体系 GDI 冲击加载和准等熵加载实验模型的计算设计, GDI 碰撞面为低密度材料 Mg, 样品中冲击加载由 Mg 撞击而产生, 冲击加载后的准等熵加载过程, 需要通过数值计算给出 GDI 从碰撞面到后界面材料密度或阻抗逐渐增加的 Mg-W 体系组成成分, 考虑到飞片材料实际制备中单层厚度最小值为 0.2 mm 和 Mg-W 最大阻抗混合质量百分数为 15% Mg 和 85% W 的致密条件限制, 设计出满足要求的 Mg-W 体系 GDI 组成材料 12 层, 总厚度 3.6 mm. 通过理想混合法则^[13] 计算出 12 种不同含量组成 Mg-W 体系 GDI 材料参数如表 1 所示, 其中第 1 列表示层数和该层厚度, 第 2, 3 列表示材料质量百分数, 第 4 列 ρ 表示密度, 第 5 列 C_b 表示体声速, 第 6 列 Z 表示阻抗. 各层材料密度、厚度随 Mg-W 混合质量分数的分布如图 1.

表 1 计算设计的 12 层 Mg-W 体系 GDI 参数
($h = 3.5531$ mm)

Table 1 Parameters of the 12 layers for Mg-W system in computational design ($h = 3.5531$ mm)

| Tape (n/mm) | Mg/ (wt%) | W/ (wt%) | ρ / (g·cm ⁻³) | C_b / (cm· μ s ⁻¹) | Z / (g·cm ⁻² · μ s ⁻¹) |
|----------------|--------------|-------------|-----------------------------------|---|--|
| 1/0.5 | 15.0 | 85.0 | 7.664 | 0.256 | 1.966 |
| 2/0.4 | 17.0 | 83.0 | 7.096 | 0.261 | 1.854 |
| 3/0.2 | 20.0 | 80.0 | 6.385 | 0.269 | 1.716 |
| 4/0.2 | 30.0 | 70.0 | 4.788 | 0.295 | 1.413 |
| 5/0.2 | 45.0 | 55.0 | 3.481 | 0.333 | 1.160 |
| 6/0.2 | 60.0 | 40.0 | 2.735 | 0.368 | 1.007 |
| 7/0.2 | 70.0 | 30.0 | 2.393 | 0.390 | 0.934 |
| 8/0.2 | 77.0 | 23.0 | 2.200 | 0.405 | 0.891 |
| 9/0.2 | 85.0 | 15.0 | 2.015 | 0.421 | 0.849 |
| 10/0.2 | 90.0 | 10.0 | 1.914 | 0.431 | 0.825 |
| 11/0.3 | 95.0 | 5.0 | 1.823 | 0.441 | 0.803 |
| 12/0.8 | 100.0 | 0.0 | 1.740 | 0.450 | 0.783 |

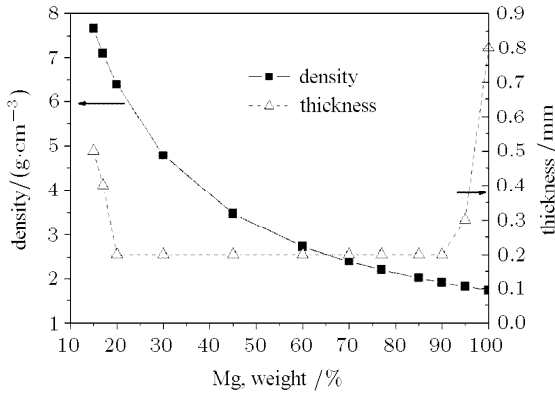


图 1 12 种不同组分梯度飞片各层材料密度和厚度随 Mg 质量分数的分布

Fig.1 Density and layer thickness distribution of twelve different constituents of GDI as a function of mass fraction of Mg

将上述设计的 12 种不同组分组成的梯度飞片以 2.0 km/s 速度撞击 2.0 mm 铜样品, 采用一维弹塑性流体动力学计算方法计算得到铜样品自由面速度随时间的变化曲线如图 2 所示. 从计算给出的铜样品自由面粒子速度历史曲线分析可以得出, 初始冲击波出现的小平台与前端面 Mg 层的厚度有关, 接着经过基本连续的压缩段, 速度剖面在飞层后背面的 15% Mg 和 85%W 层达到最大值. 初始冲击波作用下台阶处自由面粒子速度计算值为 863.2 m/s, 剖面峰值速度计算值为 1948.6 m/s.

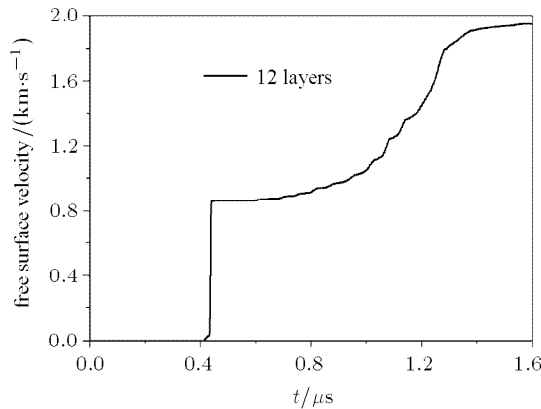


图 2 Mg-W 体系梯度飞片以 2.0 km/s 速度撞击下 Cu 自由面速度计算结果

Fig.2 Calculated free surface velocity profile of the flyer driven by a Mg-W GDI with an impact velocity of 2.0 km/s

2 实际加工的 Mg-W 体系 GDI 以及冲击加载和准等熵加载实验的计算分析

根据上述计算设计提供的数据, 由武汉理工大学实际加工研制 GDI 飞片, 制备出实验用的 12 层

Mg-W 体系飞片总厚度 3.5531 mm, 与前面理论设计值 3.6 mm 基本一致, 飞片各层厚度以及通过理想混合法则计算出的密度和其他参数如表 2 所示, 各层材料密度、厚度随 Mg-W 混合质量分数的分布如图 3.

表 2 实际研制的 12 层 Mg-W 体系参数 ($h = 3.5531 \text{ mm}$)
Table 2 Parameters of the 12 layers for Mg-W system in the experiment ($h = 3.5531 \text{ mm}$)

| Tape (n/mm) | Mg/ (wt%) | W/ (wt%) | $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | $C_b/$ ($\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$) | $Z/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\mu\text{s}^{-1}$) |
|-------------|-----------|----------|---|---|---|
| 1/0.4249 | 15.00 | 85.00 | 7.664 | 0.2565 | 1.9657 |
| 2/0.3986 | 17.00 | 83.00 | 7.096 | 0.2612 | 1.8535 |
| 3/0.1982 | 20.00 | 80.00 | 6.385 | 0.2688 | 1.7162 |
| 4/0.1976 | 30.00 | 70.00 | 4.788 | 0.2951 | 1.4129 |
| 5/0.1987 | 45.00 | 55.00 | 3.481 | 0.3332 | 1.1600 |
| 6/0.1996 | 60.00 | 40.00 | 2.735 | 0.3684 | 1.0074 |
| 7/0.1983 | 70.00 | 30.00 | 2.393 | 0.3903 | 0.9338 |
| 8/0.1996 | 77.00 | 23.00 | 2.200 | 0.4049 | 0.8910 |
| 9/0.2000 | 85.00 | 15.00 | 2.015 | 0.4211 | 0.8485 |
| 10/0.1993 | 90.00 | 10.00 | 1.914 | 0.4310 | 0.8249 |
| 11/0.2992 | 95.00 | 5.00 | 1.823 | 0.4406 | 0.8031 |
| 12/0.8391 | 100.00 | 0.00 | 1.740 | 0.4500 | 0.7830 |

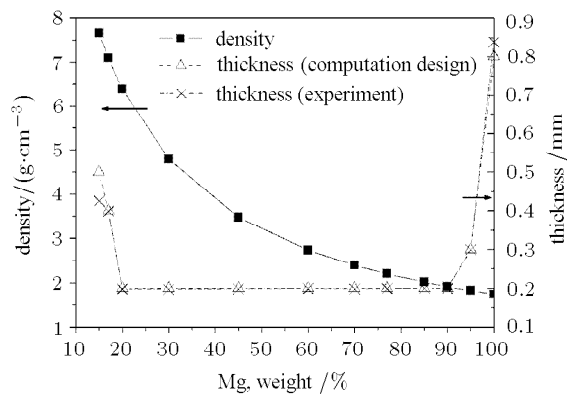


图 3 实验研制 12 种不同组分梯度飞片各层材料密度和厚度随 Mg 质量分数的分布

Fig.3 Density and layer thickness distribution of twelve different constituents of experimental GDI as a function of mass fraction of Mg

实际进行的复杂加载实验未按上述计算设计测量铜样品自由面速度剖面, 而是以梯度飞片加载 $10 \mu\text{m}$ AL 膜加上 14 mm LiF 窗口靶材料, 采用 DISAR 直接测量梯度飞片与 LiF 窗口界面的粒子速度剖面, 观察梯度飞片加载输出波形, 该实验模型与前面的设计模型原理完全一致, 不采用铜样品是为了尽可能减小实验测试的不确定因素. 该实验

测得梯度飞片的初始速度为 2.65 km/s, DISAR 测到梯度飞片与 LiF 窗口界面的粒子速度剖面如图 4 中的实线所示. 图 4 中的 calculation_1 为实验加工的梯度飞片计算结果, 虽然在加载时间段上两者基本吻合, 但明显可见界面粒子速度的理论计算与实验测试曲线存在较大差异, 从两者差异比较分析可以看出, 在界面速度较高部分实验曲线明显偏低, 导致这种现象的原因可能是梯度飞片中高密度部分材料的实际密度偏低, 即该部分材料加工时致密程度较低造成. 为了证明这个分析的合理性, 进行了 calculation_2 的数值实验, 即适当调低梯度飞片中高密度部分前 3 层材料的实际密度, 对应表 2 中的第 1, 2, 3 层, 同时其他参数根据混合法则作相应调整计算, 数值实验给出的样品界面速度历史如图 4 的点线 calculation_2, 该速度剖面与 calculation_1 有较大差别, 但与实验曲线却基本相符. 后来经过对梯度飞片材料分析, 证实飞片的第 1 层到第 3 层存在问题, 即混合的不均匀性导致高密度段致密程度不高, 飞片的高密度段存在明显空穴, 如图 5.

为了进一步验证 Mg-W 体系材料在高密度段致密程度不高, 飞片的高密度段存在明显空穴导致加载剖面出现异常情况, 在上述数值实验分析基础上进行气炮实验, 去掉梯度飞片前 3 层的高密度部分, 将飞片设计成 9 层, 利用粉末铺层模压成型和热压烧结工艺制备而成, 飞片总厚度为 2.5586 mm, 各层材料的 Mg/W 质量百分比以及按混合法则计算的力学参数和波阻抗如表 3 所示. 图 6 给出 9 层不同组

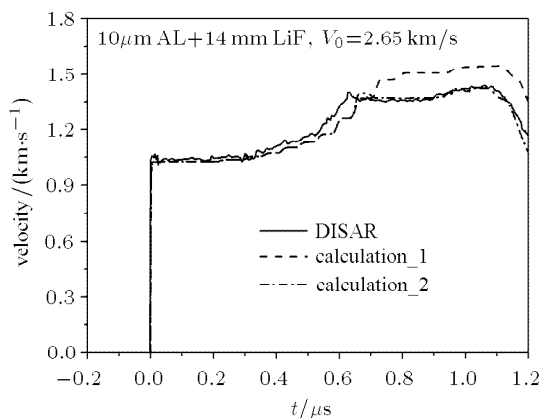


图 4 12 层梯度飞片撞击 10 μm AL+14 mm LiF 样品界面速度的 DISAR 实验结果和数值计算结果

Fig.4 Velocity profiles of the DISAR measurement and calculation with interface between of the 12 layers GDI and 10 μm AL+14 mm LiF window

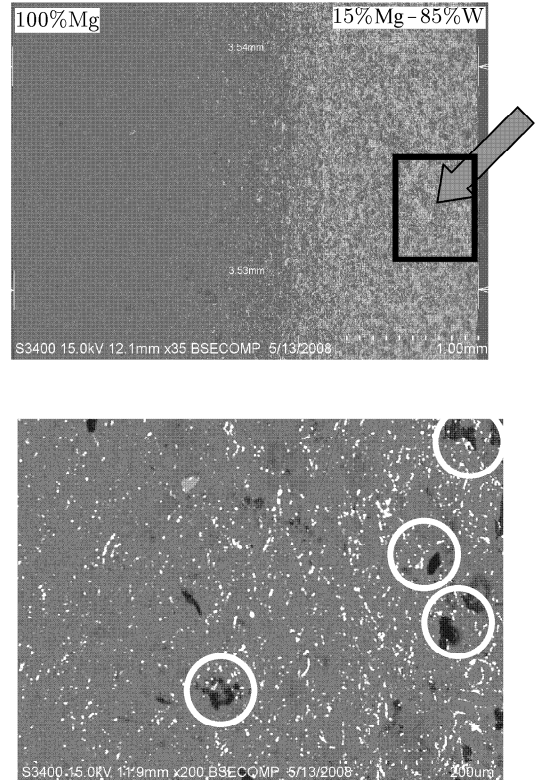


图 5 梯度飞片在高密度段存在空穴图片

Fig.5 Photographs of cavities in the high density part of GDI

分梯度飞片各层材料密度、厚度随 Mg 质量分数的分布曲线.

2008 年 9 月在中国工程物理研究院流体物理研究所气炮上进行复杂加载实验, 采用 VISAR 测量样品界面速度历史剖面, 样品碰撞面上设置 10 μm AL 膜, LiF 窗口厚度 10 mm, 实验中梯度飞片初始速度 2.07 km/s. 图 6 给出 9 层不同组分梯度飞片

表 3 实际研制的 9 层 Mg-W 体系材料参数 (h = 2.5586 mm)

Table 3 Parameters of the 9 layers for Mg-W system in the experiment (h = 2.5586 mm)

| Tape | Mg/ | W/ | ρ/ | C _b / | Z/ |
|---------|--------|-------|-----------------------|------------------------|---|
| (n/mm) | (wt%) | (wt%) | (g·cm ⁻³) | (cm·μs ⁻¹) | (g·cm ⁻² ·μs ⁻¹) |
| 1/0.397 | 29.98 | 70.02 | 4.7900 | 0.2951 | 1.4133 |
| 2/0.201 | 45.00 | 55.00 | 3.4811 | 0.3332 | 1.1600 |
| 3/0.200 | 59.83 | 40.17 | 2.7414 | 0.3680 | 1.0088 |
| 4/0.198 | 69.89 | 30.11 | 2.3961 | 0.3900 | 0.9346 |
| 5/0.199 | 76.54 | 23.46 | 2.2119 | 0.4040 | 0.8936 |
| 6/0.196 | 84.46 | 15.54 | 2.0264 | 0.4201 | 0.8512 |
| 7/0.200 | 89.68 | 10.32 | 1.9202 | 0.4303 | 0.8263 |
| 8/0.301 | 95.02 | 4.98 | 1.8225 | 0.4406 | 0.8030 |
| 9/0.667 | 100.00 | 0.00 | 1.7400 | 0.4500 | 0.7830 |

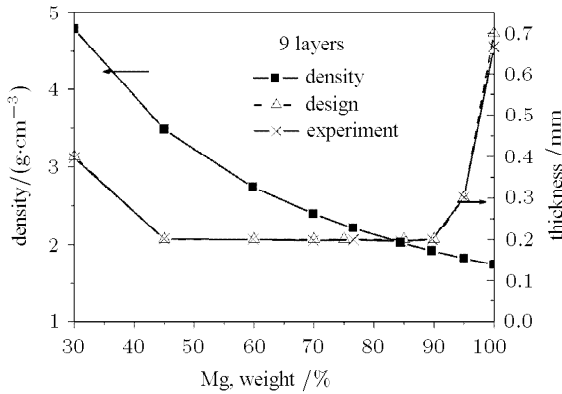


图 6 9 种不同组分梯度飞片各层材料密度和厚度随 Mg 质量分数的分布

Fig.6 Density and layer thickness distribution of nine different constituents of experimental GDI as a function of mass fraction of Mg

以 2.07 km/s 速度撞击 10 μm AL+10 mm LiF 样品界面速度历史的计算和实验结果比较, 初始冲击波作用下台阶处界面粒子速度计算值为 795.8 m/s, 剖面峰值速度计算值为 1067.1 m/s. 从图 7 可见, 实验测试结果与计算设计和实验模型的数值计算给出的界面粒子速度剖面吻合一致, 结合前面 12 层模型的结果, 证明 Mg-W 体系材料高密度段致密程度不高, 飞片在高密度段存在明显空穴导致加载剖面出现异常现象. 由于 W 材料强度较高, 实际研制过程中在单层厚度约 0.2 mm 内需要经过粉末铺填、热压烧结等工艺后才能得到梯度飞片, 随着 W 含量的增加其致密难度也随之增加, 尽管在实际研制飞片

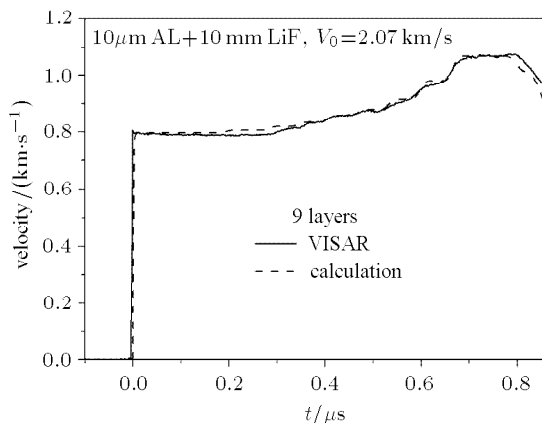


图 7 9 层梯度飞片撞击 10 μm AL+10 mm LiF 样品界面速度的 VISAR 实验和数值计算结果

Fig.7 Velocity profiles of the VISAR measurement and calculation with interface between of the 9 layers GDI and 10 μm AL+10 mm LiF window

过程中致密条件限制 Mg-W 最大阻抗混合质量百分数为 15% Mg 和 85% W, 但仍然在高密度段出现致密程度较低的问题. 另外从 Mg-W 体系材料组成的梯度飞片阻抗来看, 表 1 给出的变化范围为 0.783~1.9657 g/(cm²· μs), 如果选择 Mg-Cu 体系, 则其变化范围为 0.783~3.489 g/(cm²· μs), 可见 Mg-Cu 体系梯度飞片阻抗变化范围更大, 更便于进行复杂加载路径调节, 同时在材料加工方面 Mg-Cu 体系几乎不存在致密问题, 可以从 100% 的 Mg 连续变化为 100% 的 Cu, 因此建议开展以 Mg-Cu 体系为基础的复杂加载梯度飞片研制.

3 结 论

基于复杂加载过程密度梯度飞片理论设计原则, 采用弹塑性流体动力学计算方法, 研制出一套适用于密度梯度飞片计算设计的程序, 利用该程序实现了对实验数据的分析和解读; 提供了 12 层 Mg-W 体系冲击加载-准等熵加载实验密度梯度飞片制备参数, 根据实验获得的速度剖面 and 数值模拟结果比较, 对实验中出现的异常现象进行分析并获得实验验证, 从而对飞片材料体系的选择和制备提出了建议.

复杂加载将冲击压缩、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, 消除了传统加载技术对热力学路径的限制, 本项研究的深入开展, 可以通过对飞片厚度方向密度剖面或者冲击阻抗剖面递增和递减的组合设计, 实现对靶材料的加卸载物理过程和压力演化路径的任意“剪裁”.

参 考 文 献

- 1 Nguyen JH, Orlikowski D, Streitz FH, et al. High-pressure tailored compression: Controlled thermodynamic paths. *J Appl Rhys*, 2006, 100: 023508
- 2 Nguyen JH, Orlikowski D, Streitz FH, et al. Specifically prescribed dynamic thermodynamic paths and resolidification experiments. In: 13th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter (Portland, OR, July 2003), AIP Conf Proc, 2004, 706. 1225-1230
- 3 Martin LP, Nguyen JH. Fabrication and characterization of graded impedance gas gun impactors from tape cast metal powders. Lawrence Livermore National Laboratory Final Report, UCRL-JRNL-217359, 2005
- 4 Martin LP, Orlikowski D, Nguyen JH. Fabrication and characterization of graded impedance impactors for gas gun

- experiments from tape cast metal powders. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 427: 83-91
- 5 Martin LP, Patterson JR, Orlikowski D, et al. Application of tape-cast graded impedance impactors for light-gas gun experiments. *J Appl Phys*, 2007, 102: 023507
- 6 华劲松, 经福谦, 龚自正等. 准等熵压缩的数值模拟, 高压物理学报, 2000, 14(3): 195-202 (Hua Jinsong, Jing Fuqian, Gong Zhizheng, et al. Study of numerical simulation for quasi-isentropic compression. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2002, 51(8): 1759-1762 (in Chinese))
- 7 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, 物理学报, 2002, 51(8): 1759-1762 (Shen Qiang, Wang Chuanbin, Zhang Lianmeng, et al. A study on generating quasi-isentropic compression via graded impedance flyer. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(8): 1759-1762 (in Chinese))
- 8 王刚华, 柏劲松, 孙承纬等. 准等熵压缩流场反演技术研究, 高压物理学报, 2008, 22(2): 149-152 (Wang Ganghua, Bai Jingsong, Sun Chengwei, et al. Backward integration method for tracing isentropic compression field. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2002, 51(8): 1759-1762 (in Chinese))
- 9 Ning JG, Wang C, Lu J. Influence of obstacles on flame propagation of multi-composition mixture gas. *Modern Physics Letters B*, 2005, 19: 1687-1690
- 10 Ning JG, Wang C, Lu J. Explosion characteristics of coal gas under various initial temperatures and pressures. *Shock Waves*, 2006, 15: 461-472
- 11 吴永礼. 计算固体力学方法. 北京: 科学出版社, 2003 (Wu Yongli. Computational Method of Solid Mechanis. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese))
- 12 Meyers MA. Dynamic Behavior of Materials. Beijing: National Defense Industry Press, 2006
- 13 经福谦. 实验物态方程导引. 北京: 科学出版社, 1986 (Jing Fuqian. Introduce to Experimental Equation of State. Beijing: Science Press, 1986 (in Chinese))

(责任编辑: 刘俊丽)

CALCULATION AND ANALYSIS OF THE Mg-W GDI COMPLEX LOADING EXPERIMENT¹⁾

Bai Jinsong^{*,2)} Luo Guoqiang[†] Wang Xiang* Tang Mi* Dai Chengda* Tan Hua*

^{*}(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

[†](State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract A Mg-W material system graded density impactor (GDI) for the complexity loading experiment was designed by means of numerical simulation with elastic-plastic fluid dynamics calculation method. By considering the technical restriction of minimum thickness of a discrete layer and the limitation of compact condition in maximum mixing rate between the two individual constituents in the actual material fabrication, a set of preparation parameters for twelve-different-constituent Mg-W system GDI are given. One experiment of shock loading and quasi-isentropic compression for the presented GDI on a gas gun was performed. And the velocity of interface between the flyer and LiF window was provided by VISAR or DISAR technology. Through the comparison between the computational results and the experimental data, analysis and verification are implemented for singular phenomena. As a result, a proposal using Mg-Cu material system to fabricate the flyer is put forward. The project is helpful for the further experimental study with loading/unloading controllable path and controllable rate.

Key words complex loading, light-gas gun experiment, graded density impactor, computational design, Mg-W and Mg-Cu systems

Received 8 June 2009, revised 16 May 2010.

1) The project supported by the Fundamental of National Defence Science and Technology Industry of China (A1520070078, Z112009B004) and the National Science Foundation of China (11072228).

2) E-mail: bjsong_mail@21cn.com