文章编号:1000-5773(2009)03-0173-08

冲击加载-准等熵加载过程的密度梯度飞片计算设计*

柏劲松[1],罗国强[1,2],唐 蜜[1],胡建波[1],
戴诚达[1],马 云[1],谭 华[1],吴 强[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:采用一维弹塑性流体动力学计算方法,通过对LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)Mg-Cu 体系密度梯度飞片冲击加载-准等熵加载实验过程数值计算和比较,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正确性和实用性。考虑到在飞片材料制备中,单层厚度最小值为 0.2 mm 和 Mg-W 最大阻抗混合质量分数的致密条件限制,开展了对新的 Mg-W 体系密度梯度飞片实现冲击加载-准等熵加载过程计算设计,给出了满足加载要求的飞片结构特征;从计算给出的粒子速度波剖面可见,密度梯度飞片波阻抗分布对加载过程和加载强度非常敏感,通过精心设计准连续型变阻抗的梯度飞片,可以进行不同复杂加/卸载过程的物理模型设计和实验研究。

关键词:密度梯度飞片;复杂加载;气炮;数值计算;Mg-W 体系
中图分类号:O351.2 **文献标识码**:A

1 引 言

气炮可以对各种材料进行冲击压缩实验研究,近年来一些技术使用多层碰撞器,已经证明该技术能够产生上升前沿超过 1 μs 的准等熵压缩,对应的应变率为 $10^4 \sim 10^6\ s^{-1}$[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[3],或者与其它准等熵压缩技术产生的 10～100 ns 时间尺度(应变率 $10^6 \sim 10^8\ s^{-1}$)的加载[4-6]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,消除了传统加载技术对热力学路径的限制[1-2]。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,即可以实现对靶材料中的压力演化路径进行“剪裁”。

为了在气炮上实现对标准样品材料的冲击加载和准等熵加载两个连续物理过程的试验研究,需要对不同材料组合的密度梯度飞片(Graded Density Impactor,GDI)的组成要素(主要包括波阻抗或密度分布曲线、几何尺寸等)进行计算设计,给出满足要求的 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。本研究采用一维弹塑性流体动力学计算方法对 GDI 进行计算设计,为验证计算方法和计算程序的正确性,首先对 LLNL 报道的 Mg-Cu 体系 19 层材料组成的 GDI

* **收稿日期**:2008-04-10;**修回日期**:2008-08-30
基金项目:冲击波物理和爆轰物理国防科技重点实验室基金(9140C6704010704);国家自然科学基金(10574102)
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研究.
E-mail:bjsong_mail@21cn.com

对 2 mm 铝样品实现冲击加载和准等熵加载的实验模型[7]进行数值计算，获得铝样品自由面粒子速度历史的计算结果，将计算结果与 LLNL 实验结果进行比较，以此验证流体动力学计算方法、不同材料体系的混合模型以及计算程序的正确性和实用性。在此基础上，对中国工程物理研究院冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室选取的 Mg-W 体系 GDI，实现对 2 mm 铜样品材料的冲击加载和准等熵加载物理过程实验进行数值计算，对 GDI 的组成要素进行计算设计，为 Mg-W 体系 GDI 材料制备提供模型数据。

2 计算方法

2.1 基本方程

对于复杂加/卸载过程的数值计算，可以采用一维弹塑性 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

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

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。

2.2 本构关系

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 $\dot{\varepsilon}_1$、$\dot{\varepsilon}_2$ 定义如下

$$\sigma_R=p+q+S_1\tag{2}$$

$$\sigma_\theta=p+q+S_2\tag{3}$$

$$S_i=2\mu\left(\dot{\varepsilon}_i+\frac{1}{3}\frac{\dot{v}}{v}\right)\tag{4}$$

(4)式中：$i=1,2$，μ 为剪切模量。对于 S_i，采用 von Mises 屈服准则

$$S_i^{\mathrm{Y}}=\frac{(2/3)^{1/2}S_iY_0}{\sqrt{S_1^2+S_2^2}}\tag{5}$$

式中：Y_0 为材料的屈服强度。

$$\dot{\varepsilon}_1=\frac{\partial u}{\partial R},\quad \dot{\varepsilon}_2=-\frac{u}{R}\tag{6}$$

2.3 状态方程

材料的状态方程采用 Grüneison 形式

$$p-p_x=\frac{\gamma}{v}(e-e_x)\tag{7}$$

式中：$p_x(v)$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 Hugoniots 线上的情况，在压缩状态下有

$$p-p_{\mathrm{H}}=\frac{\gamma}{v}(e-e_{\mathrm{H}})\tag{8}$$

$$e_{\mathrm{H}}=\frac{1}{2}p_{\mathrm{H}}(v_0-v_{\mathrm{H}})\tag{9}$$

冲击波速度与粒子速度关系取 $u_{\mathrm{s}}=c_0+\lambda u_{\mathrm{p}}+\lambda' u_{\mathrm{p}}^2$，$\lambda$、$\lambda'$为材料参数，$u_{\mathrm{p}}$ 为粒子速度。在膨胀状态下有

$$p=\frac{\gamma}{v}e+\frac{c_0^2}{v_0}\rho_0 c_0^2\left(\frac{v_0}{v}-1\right) \tag{10}$$

2.4　离散格式

将微分方程离散在空间有限个点上求解，对于速度计算采用如下 Taylor 展开

$$\begin{cases}u_i^{n+1/2}=u_i^n+\left(\dfrac{\Delta t}{2}\right)\left.\dfrac{\partial u}{\partial t}\right|_i^n+\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\Delta t}{2}\right)^2\left.\dfrac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right|_i^n+\dfrac{1}{6}\left(\dfrac{\Delta t}{2}\right)^3\left.\dfrac{\partial^3 u}{\partial t^3}\right|_i^n+\cdots\\ u_i^{n-1/2}=u_i^n-\left(\dfrac{\Delta t}{2}\right)\left.\dfrac{\partial u}{\partial t}\right|_i^n+\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{\Delta t}{2}\right)^2\left.\dfrac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right|_i^n-\dfrac{1}{6}\left(\dfrac{\Delta t}{2}\right)^3\left.\dfrac{\partial^3 u}{\partial t^3}\right|_i^n+\cdots\end{cases} \tag{11}$$

速度梯度采用

$$\left.\frac{\partial u}{\partial t}\right|_i^n=\frac{u_i^{n+1/2}-u_i^{n-1/2}}{\Delta t}$$

求解，而应力

$$\sigma_R^n=\sigma_{R,i}^n+\left(\frac{\partial\sigma}{\partial m}\right)_i^n(m-m_i)+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2\sigma}{\partial m^2}\right)_i^n(m-m_i)^2$$

应力梯度$\partial\sigma/\partial m|_i^n$采用相邻 3 点的 m、σ 计算；对于欧拉半径 R，$R_i^{n+1}=R_i^n+\Delta t u_i^{n+1/2}$；对于应力偏量

$$\begin{cases}\left(S_1\right)_{i+1/2}^{n+1}=\left(S_1\right)_{i+1/2}^{n}+2\mu\left[\left(\dot{\varepsilon}_1\right)_{i+1/2}^{n+1/2}+\dfrac{2}{3}\dfrac{v_{i+1/2}^{n+1}-v_{i+1/2}^{n}}{v_{i+1/2}^{n+1}+v_{i+1/2}^{n}}\right]\\ \left(S_2\right)_{i+1/2}^{n+1}=\left(S_2\right)_{i+1/2}^{n}+2\mu\left[\left(\dot{\varepsilon}_2\right)_{i+1/2}^{n+1/2}+\dfrac{2}{3}\dfrac{v_{i+1/2}^{n+1}-v_{i+1/2}^{n}}{v_{i+1/2}^{n+1}+v_{i+1/2}^{n}}\right]\end{cases} \tag{12}$$

其中

$$\left(\dot{\varepsilon}_1\right)_{i+1/2}^{n+1/2}=-\frac{u_{i+1}^{n+1/2}-u_i^{n+1/2}}{R_{i+1}^{n+1/2}-R_i^{n+1/2}},\quad \left(\dot{\varepsilon}_2\right)_{i+1/2}^{n+1/2}=-\frac{u_{i+1}^{n+1/2}+u_i^{n+1/2}}{R_{i+1}^{n+1/2}+R_i^{n+1/2}} \tag{13}$$

另外还有能量方程、人为粘性和基本稳定性条件的离散等，由于篇幅限制，不再一一列出。

2.5　材料性能

实现复杂加/卸载过程的 GDI 组成体系通常采用不同阻抗的材料混合加工而成，较低阻抗材料还可以采用环氧树脂或含膨胀的空心微球泡沫材料等。在进行 GDI 材料复杂加/卸载数值模拟时，如何确定各层材料的力学量、雨贡纽参数、格林爱森系数等是数值计算首先需要解决的问题，最直接的方法是通过实验测出不同组分混合物的材料参数，另外一种方法是采用混合法则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。本研究选用混合法则来确定混合物的材料参数，建立起组成 GDI 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 GDI 各组成体系的相关性能参数进行理论预测。

在冲击动力学中，一般认为混合物的物态方程服从叠加原理[8]，构成 GDI 的相关参数的理论预测公式如表 1。

表 1　复合体系相关性能的理论预测表达式

Table 1　Calculating formula of related properties for functionally graded density impactor

Property	Calculating formula	Property	Calculating formula
Density, ρ/(g/cm^3)	$\dfrac{1}{\rho}=\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{\alpha_i}{\rho_i}$	Specific heat, c_V/[J/(g·K)]	$c_V=\sum\limits_{i=1}^{n}\alpha_i c_{Vi}$
Sound velocity, c/(km/s)	$\dfrac{1}{\rho^2c^2}=\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{\alpha_i}{\rho_i^2c_i^2}$	Grüneisen constant, γ	$\dfrac{1}{\rho\gamma}=\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{\alpha_i}{\rho_i\gamma_i}$
Wave impedance, Z/[10^7 kg/(m^2·s)]	$\dfrac{1}{Z^2}=\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{\alpha_i}{\rho_i^2c_i^2}$	Hugoniot coefficient, λ	$\lambda=\dfrac{1}{2}(\gamma+1)$

α_i 为第 i 组元的质量分数。同时由横波声速、纵波声速和体积声速可以进一步计算得到材料的弹性力学参量

$$K=\rho(c_l^2-4c_t^2/3)=\rho c_b^2 \tag{14}$$

$$G=\rho c_{\mathrm{t}}^{2} \tag{15}$$

$$E=\rho c_{\mathrm{t}}^{2}(3c_{\mathrm{l}}^{2}-4c_{\mathrm{t}}^{2})/(c_{\mathrm{l}}^{2}-c_{\mathrm{t}}^{2}) \tag{16}$$

$$\nu=(c_{\mathrm{l}}^{2}-2c_{\mathrm{t}}^{2})/[2(c_{\mathrm{l}}^{2}-c_{\mathrm{t}}^{2})] \tag{17}$$

式中：c_{t} 为横波声速，c_{l} 为纵波声速，c_{b} 为体积声速，K 为体积弹性模量，G 为剪切模量，E 为杨氏模量，ν 为泊松比。

3 LLNL 的 Mg-Cu 体系 GDI 实现冲击加载和准等熵加载实验模型数值计算

3.1 气炮实验

LLNL 为了验证薄带浇注技术(流延法)制造的梯度飞片产生均匀光滑的压缩波的能力，在二级轻气炮上进行飞片发射和撞击静止样品实验。光滑均匀的压缩波在样品中能够产生恒定应变率的压缩，这样的实验结果便于进行状态方程解读和分析。实验的梯度飞片由 19 种不同组分的带材(圆片)制成，飞片速度 1.93 km/s，使用光子 Doppler 速度计(PDV)作为主测量设备，测量飞片碰撞速度和飞片自由面粒子速度。靶样品为 2.0 mm 厚的铝材料。

3.2 数值计算结果与实验结果的比较

采用一维弹塑性流体动力学计算方法对上述 LLNL 的 Mg-Cu 体系 GDI 加载铝样品模型进行数值计算，采用混合法则来确定各层材料的力学量、雨贡纽参数、格林爱森系数等混合物的材料参数，如表 2(其中 D-u 关系中的二次项系数 $\lambda'=0$)。以梯度飞片与 2.0 mm 的铝样品碰撞时刻为零时刻点，图 1 将 LLNL 实验测得的由 19 种不同组分制造的梯度飞片以 1.93 km/s 速度撞击 2.0 mm 的铝样品后，得到的自由面粒子速度随时间的变化曲线以及本数值计算获得的(计算)结果一并列出。

表 2 19 种不同含量组成的 Mg-Cu 系材料计算参数

Table 2 Parameters of the nineteen constituents for a tape cast Mg-Cu powder mixture

Tape n	w_{Mg}/(%)	w_{Cu}/(%)	ρ/(g/cm^3)	c_{b}/(km/s)	λ	γ	G/(GPa)	Z/[10^7 kg/(m^2 · s)]
1	0.00	100.00	8.924	3.91	1.510	1.990	48.4	3.489
2	1.29	98.71	8.504	3.71	1.474	1.949	43.8	3.152
3	3.22	96.78	7.895	3.50	1.446	1.892	38.5	2.763
4	5.27	94.73	7.335	3.37	1.421	1.842	34.6	2.474
5	7.42	92.58	6.811	3.30	1.399	1.798	31.6	2.244
6	9.79	90.21	6.343	3.25	1.380	1.760	29.4	2.064
7	12.25	87.75	5.917	3.24	1.364	1.727	27.6	1.915
8	14.92	85.08	5.509	3.24	1.349	1.697	26.1	1.783
9	18.01	81.99	5.076	3.25	1.333	1.666	24.6	1.652
10	21.87	78.13	4.638	3.29	1.318	1.636	23.3	1.527
11	26.50	73.50	4.224	3.35	1.304	1.608	22.2	1.415
12	31.82	68.18	3.804	3.43	1.290	1.581	21.2	1.305
13	37.95	62.05	3.420	3.53	1.278	1.557	20.3	1.208
14	46.14	53.86	3.019	3.67	1.266	1.533	19.5	1.107
15	56.80	43.20	2.586	3.86	1.254	1.507	18.7	0.999
16	70.28	29.72	2.203	4.10	1.243	1.485	18.0	0.903
17	80.04	19.96	1.984	4.27	1.237	1.473	17.7	0.847
18	89.15	10.85	1.819	4.42	1.232	1.464	17.4	0.804
19	100.00	0.00	1.740	4.50	1.260	1.460	17.3	0.783

从图 1 中实验和计算结果的比较可见，第一个台阶处 LLNL 实验测到的冲击波的自由面粒子速度为 1 450 m/s[7]，是由飞片前端的 Mg 产生的，第二个台阶处 LLNL 实验测到的自由面粒子速度峰值为 2 690 m/s [7]，是由飞片后端的 Cu 产生的，两台阶处的理论计算值为 1 474 m/s[7] 和 2 670 m/s[7]，本计算给出的初始冲击波的自由面速度为 1 456.9 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、不同材料体系的混合模型的正确性和计算程序的实用性。

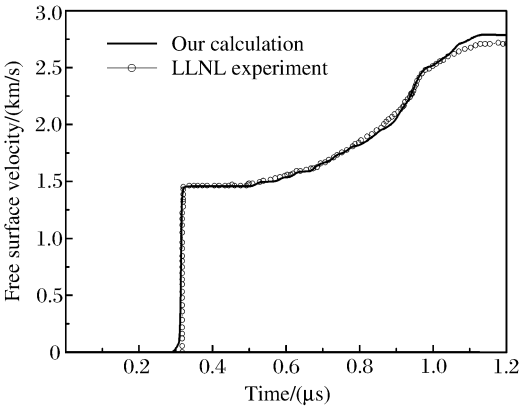


图 1　本研究数值计算结果和 LLNL 实验结果的比较

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

4　Mg-W 体系 GDI 实现冲击加载和准等熵加载实验模型计算设计

以 2 mm 铜样品为靶材料，对 Mg-W 体系 GDI 实现冲击加载和准等熵加载实验模型进行计算设计。GDI 的碰撞面为低密度材料 Mg，样品中的冲击加载由 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。

4.1　Mg-W 体系 GDI 混合物材料参数

采用如表 1 所示的理想混合物叠加原理，取文献[9]中的 Mg 和 W 材料参数，通过计算给出 12 种不同含量组成的 Mg-W 体系 GDI 材料参数如表 3 所示(这里 $\lambda'=0$)，各层材料密度、厚度随 Mg-W 混合质量分数的分布如图 2 所示。

表 3　12 种不同含量组成的 Mg-W 系材料计算参数

Table 3　Parameters of the twelve constituents for a tape cast Mg-W powder mixture

Tape n	w_{Mg}/(%)	w_{Cu}/(%)	ρ/(g/cm^3)	c_b/(km/s)	λ	γ	G/(GPa)	Z/[10^7 kg/(m^2 · s)]
1/0.5 mm	15.0	85.0	7.664	2.56	1.180	1.360	24.8	1.966
2/0.4 mm	17.0	83.0	7.096	2.61	1.185	1.369	23.8	1.854
3/0.2 mm	20.0	80.0	6.385	2.69	1.190	1.380	22.6	1.716
4/0.2 mm	30.0	70.0	4.788	2.95	1.203	1.407	20.5	1.413
5/0.2 mm	45.0	55.0	3.481	3.33	1.215	1.429	19.0	1.160
6/0.2 mm	60.0	40.0	2.735	3.68	1.221	1.442	18.2	1.007
7/0.2 mm	70.0	30.0	2.393	3.90	1.224	1.448	17.9	0.934
8/0.2 mm	77.0	23.0	2.200	4.05	1.226	1.452	17.7	0.891
9/0.2 mm	85.0	15.0	2.015	4.21	1.228	1.455	17.5	0.849
10/0.2 mm	90.0	10.0	1.914	4.31	1.228	1.457	17.4	0.825
11/0.3 mm	95.0	5.0	1.823	4.41	1.229	1.458	17.3	0.803
12/0.8 mm	100.0	0.0	1.740	4.50	1.260	1.460	17.3	0.783

4.2 Mg-W 体系 GDI 加载计算结果

将上述设计的由 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 3 所示。

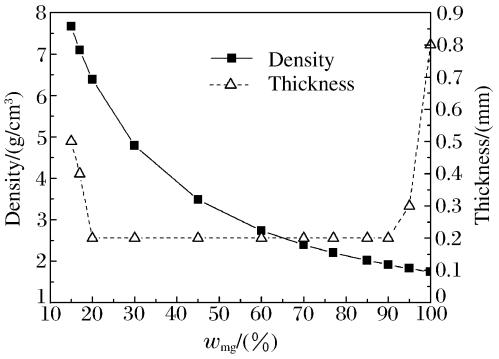


图 2 12 种不同组分梯度飞片各层材料密度、厚度随 Mg 质量分数的分布

Fig. 2 Density and layer thickness distribution of twelve different constituents of graded density impactor as a function of mass fraction of Mg

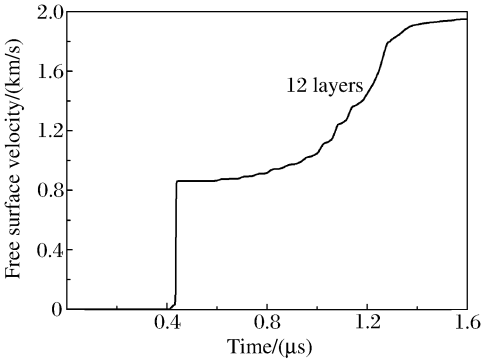


图 3 Mg-W 体系密度梯度飞片以 2.0 km/s 速度撞击下自由面速度计算结果

Fig. 3 Calculated free surface velocity profile of the flyer driven by a Mg-W GDI with an impact velocity of 2.0 km/s

从计算给出的铜样品自由面粒子速度历史曲线可见，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 1 948.6 m/s。

从图 3 自由面粒子速度曲线的光滑性来看，在 1.0～1.2 μs 之间的速度曲线还存在几个较明显的凸起，这主要是由于受到飞片材料制备中单层厚度最小值 0.2 mm 限制引起的，如果将单层厚度最小值减小为 0.1 mm，则自由面粒子速度曲线的光滑性将带来明显改善，将表 3 中第 3、第 4、第 5 层材料的厚度由 0.2 mm 变为 0.1 mm，即将 12 层材料增加为 15 层材料，但整个梯度飞片的厚度仍然保持为 3.6 mm，通过减小曲线中间凸起附近的飞片层厚度、改变 Mg-W 体系质量分数的组成，以达到改善自由面粒子速度曲线光滑性的目的。15 种不同组分组成的密度梯度飞片各层材料密度、厚度随 Mg-W 混合质量分数的分布如图 4 所示，以 2.0 km/s 速度撞击 2.0 mm 铜样品自由面速度的计算曲线如图 5 所示。

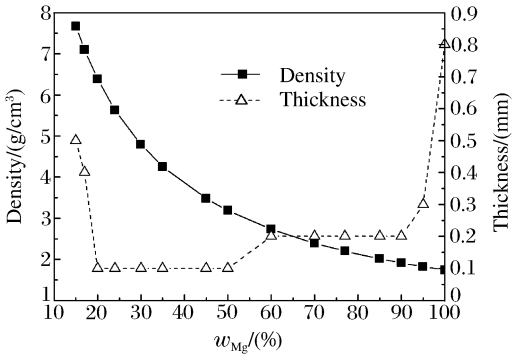


图 4 15 种不同组分梯度飞片各层材料密度、厚度随 Mg 质量分数的分布

Fig. 4 Density and layer thickness distribution of the fifteen different constituents of graded density impactor as a function of mass fraction of Mg

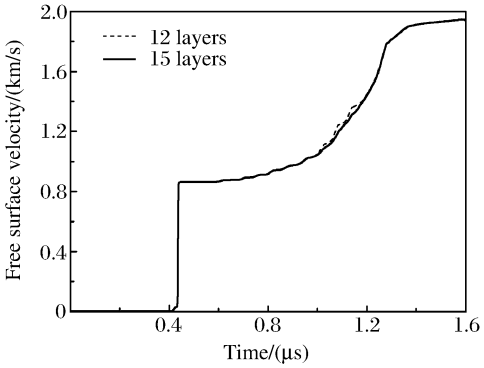


图 5 两种 Mg-W 体系密度梯度飞片以 2.0 km/s 速度撞击下自由面速度计算结果

Fig. 5 Calculated free surface velocity profile of flyer for the two kinds of Mg-W GDI with an impact velocity of 2.0 km/s

5 结　论

（1）通过对 LLNL 的 Mg-Cu 体系 GDI 冲击加载-准等熵加载实验过程的数值计算和比较，验证了本流体动力学计算方法、不同材料体系的混合模型和计算程序。

（2）对新的 Mg-W 体系阻抗梯度飞片实现冲击加载-准等熵加载过程进行计算设计，给出了满足加载要求的 GDI 厚度、密度、体积声速和组成成分等信息，为 GDI 的制备提供基础数据，同时给出了自由面粒子速度的计算结果，并期待实验的验证。

（3）GDI 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，可以通过不同的热力学路径对样品材料加、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，2006，100：023508.

[2] Nguyen J H，Orlikowski D，Streitz F H，et al. Specifically Prescribed Dynamic Thermodynamic Paths and Resolidification Experiments [A]//13th APS Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter [C]. Portland，AIP Conf Proc，2004，706：1225-1230.

[3] Hoover W G. Structure of a Shock-Wave Front in a Liquid [J]. Phys Rev Lett，1979，42：1531-1541.

[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] Hall C A，Knudson M D，Asay J R，et al. High Velocity Flyer Plate Launch Capability on the Sandia *Z* Accelerator [R]. SAND2000-0192C，2000.

[6] Edwards J，Lorenz K T，Remington B A，et al. Laser-Driven Plasma Loader for Shockless Compression and Acceleration of Samples in the Solid State [J]. Phys Rev Lett，2004，92：075002.

[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，2007，102：023507.

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

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

Computational Design of Graded Density Impactors for Shock Loading and Quasi-Isentropic Compression

BAI Jing-Song[1]，LUO Guo-Qiang[1,2]，TANG Mi[1]，HU Jian-Bo[1]，
DAI Cheng-Da[1]，MA Yun[1]，TAN Hua[1]，WU Qiang[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 method of 1D elastic-plastic hydrodynamic calculations，the mixing model of different material constituents，and the shock dynamics code of compressible fluids were verified through the

overall comparisons of the calculated results with the experimental data from Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). A Mg-W system prepared for graded density impactor (GDI) for quasi-isentropic compression was proposed by means of numerical simulations. By considering the actual material fabrication, the technical restrictions of minimum thickness of discrete layer, and the limitation of maximum mixing rate of the two individual constituents, a model GDI of a novel Mg-W system was designed to actualize the required loading traces and anchor the structural characteristics of GDI. Numerical calculations show that the loading path and intensity are highly sensitive to the distribution of wave impedance of GDI. The experimental designs and predictions for different complicated loading/unloading processes can be realized through model calculations.

Key words: graded density impactor; complicated loading; light-gas gun; computation; Mg-W system

《高压物理学报》征稿简则

《高压物理学报》是我国高压物理领域唯一的专业性学术刊物，在国内外公开发行。力求及时报道高压物理学科基础理论和应用研究方面具有创新性、高水平、有重要意义的研究成果，读者对象为国内外科技工作者。征稿内容为动态及静态高压技术，人工合成新材料，高温高压下材料的力学、光、电、磁等特性以及物质微观结构的研究，动态及静态高压研究中的测试技术，高温高压下的相变，高温高压物态方程等。接受中、英文稿件。

(1) 来稿应具有科学性、先进性和实用性，论点明确、论据可靠、数据准确、逻辑严谨、文字简练、图表清晰。每篇论文的篇幅应在 6 000～8 000 字以内，请使用中华人民共和国法定计量单位。论文格式请参考近期出版的《高压物理学报》。请使用电子邮件投稿(gaoya@caep.ac.cn)，也可提供软盘。

(2) 所投稿件不得涉及国家及本单位机密，投稿时请附本单位保密审查意见，由审查者签名并加盖公章。

(3) 文章标题字数应在 20 字以内。文中图、表应有自明性，所有图题、图注、表题、表注均为中、英文对照，图、表中的文字一律用英文。

(4) 第一作者应确保全体作者同意文章署名，请提供第一作者、通讯作者简介(姓名、出生年、性别、职称、学位、研究方向等)，以及所有联系方式(通信地址、邮政编码、电话号码、传真、电子邮箱等)，以备联系。请注明论文(工作)的资助项目(资助项目名称和批准号)，简要介绍工作背景和论文意义。

(5) 来稿应保证文章版权的独立性，严禁抄袭，文责自负，请勿一稿多投。

重点注意事项

▲ 中英文摘要 摘要用第三人称书写，语言要简练，应有具体内容。要求：(1) 拥有与论文同等量的主要信息，重点包括 4 个要素：即研究目的、方法、结果和结论。(2) 以提供论文梗概为目的，不得评论、解释论文内容。中文摘要应在 200～400 个字之间，英文摘要不少于 120 个实词。为便于 Ei Compendex 以及国外其它数据库收录，英文摘要中尽量避免特殊字符(各种数学符号、上下脚标及希腊字母)及由特殊字符组成的数学表达式；第一句不要与英文题名重复；尽量用短句子并避免句形单调；用过去时态叙述主要工作，用现在时态叙述结论，尽量用主动语态代替被动语态。

▲ 参考文献 参考文献应是公开出版物。请充分著录参考文献，引用条数不宜太少，并尽量引用近期国内外文献，采用“顺序编码制”著录。中文参考文献必须附英译文，著录项目应齐全。

▲ 版权与稿酬 《高压物理学报》已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据——数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中文科技期刊数据库、中国期刊网、台湾中文电子期刊服务——思博网(CEPS)等，并被 Ei Compendex 光盘收录。凡经本刊录用的稿件，其著作权(包括光盘版和网络版出版权)便自动转让给《高压物理学报》编辑部，编辑部不再另行通知。来稿一经发表，即付稿酬(包括光盘版和网络版稿酬)。

《高压物理学报》一贯秉承服务科学、服务读者、服务作者的办刊理念，慎重对待每一篇来稿，尊重作者劳动。优秀稿件享有快速发表通道，重大创新性成果可在 3 个月内刊出。

通信地址：四川绵阳 919 信箱 110 分箱《高压物理学报》编辑部，邮政编码：621900

电子邮件：gaoya@caep.ac.cn (投稿、征订、咨询)

电　　话：0816-2490042；传真：0816-2282695

《高压物理学报》编辑部