DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0243-06

斜波压缩实验数据的正向 Lagrange 处理方法研究*

罗斌强,张红平,赵剑衡,孙承纬
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要:提出了一种联合使用 Lagrange 方法和转换函数方法来处理斜波压缩实验数据的新途径,和传统的数据处理方法相比,该方法更适合处理材料的复杂力学响应并具有较好的精度,同时该方法使用过程中对样品材料参数的初猜值精度要求更低。分析了转换函数方法的可靠性和健壮性,讨论了转换函数和 Lagrange 方法联合在斜波压缩强度实验数据处理中的应用,获得了可靠的结果。

关键词:Lagrange 方法;转换函数;数据处理;斜波压缩
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

随着脉冲功率技术和高功率激光技术的发展,采用脉冲大电流和高功率脉冲激光对物质进行无冲击斜波压缩的实验技术在过去的十余年中获得了长足的进步[1-5],并成功应用于极端条件下(高压、高应变率)的状态方程[6-10]、高压强度[11-15]、相变[16-18]等材料物性的研究。在斜波压缩实验中,可测量的物理量主要是台阶靶不同 Lagrange 位置的样品界面粒子速度,如何通过界面粒子速度获取实验材料的动力学响应,成了此类实验必须解决的问题。

针对斜波压缩实验数据为台阶靶样品自由面或样品/窗口界面速度历史的情形,多种方法(Lagrange 方法[19]、反积分方法[20-21]和特征线方法[22-23])被提出用于获取材料的压力-比容关系。反积分方法和特征线方法都是先假定材料参数,以实验测量的界面速度作为输入在时间轴逆向求解,其中反积分还要以不同厚度样品的加载面加载历史一致作为收敛的单一判据,因此对考虑诸如强度等力学特性的材料,需要预先设定的模型参数越多,该方法的使用难度就越大;此外,反积分方法和特征线方法要求材料模型参数的初设值与其真实值的偏差不能太大,否则会出现计算不收敛或收敛参数无意义的情况。采用 Lagrange 方法的优点是不需对材料参数做任何假定,可用于处理材料的复杂力学响应,但难点在于如何获得准确的原位粒子速度剖面。早期的工作采用自由面速度近似法[19]计算原位速度;后来 Volgler 等人发展了增量阻抗匹配法[24];2013 年,J. L. Brown 等提出了转换函数法(transfer function method,TFM)[25]。数值计算表明,采用转换函数方法可准确获得斜波压缩实验中的加载-卸载原位速度剖面,但前提是使用该方法过程中数值模拟的界面速度曲线和实验测量的速度曲线尽可能的一致。

为避免 J. L. Brown 等提出的使用转换函数方法中需进行高精度磁流体数值计算的需求,本文中提出一种联合使用正向 Lagrange 方法和转换函数来处理斜波压缩实验数据的新途径,分析转换函数方法的使用条件,并在此基础上讨论转换函数方法在斜波压缩下强度实验数据处理中的应用。

1 Lagrange 正向数据处理方法

在 Lagrange 坐标下,一维等熵运动中的质量、动量和能量守恒方程可表达为[19]:

$$\begin{cases} \partial\sigma/\partial h = -\rho_0 \partial u/\partial t \\ \partial u/\partial h = -\partial\varepsilon/\partial t \\ (\sigma/\rho_0)(\partial u/\partial h) = -\partial e/\partial t \end{cases} \tag{1}$$

* **收稿日期**:2015-07-21;**修回日期**:2015-11-05
基金项目:国家自然科学基金项目(11302203,11327803,11502252);中国工程物理研究院流体物理研究所发展基金项目(SFZ201401(04)03)
第一作者:罗斌强(1985—),男,博士,助理研究员,bqluoo@caep.cn。

式中:σ 为应力(压力为正号),ε 为应变,ρ_0 为初始密度,u 为粒子速度,e 为比内能,h、t 为 Lagrange 坐标和时间,Lagrange 声速的定义 $C_{\mathrm{L}}=\Delta h/\Delta t$,上式给出等熵线上扰动形成的状态增量形式为:

$$\begin{cases}\Delta\sigma=-\rho_0 C_{\mathrm{L}}(u)\Delta u\\ \Delta u=-C_{\mathrm{L}}(u)\Delta\varepsilon\\ \Delta e=\sigma\Delta\varepsilon/\rho_0\end{cases}\tag{2}$$

由此可计算材料的应力-应变关系为:

$$\Delta\sigma=\rho_0 C_{\mathrm{L}}^2\Delta\varepsilon\tag{3}$$

采用 Lagrange 方法处理斜波压缩实验数据时,基本处理流程见图 1。在同一发实验中,测量不同厚度样品的自由面或样品/窗口界面粒子速度,将实验测量的界面速度转换为原位速度(*in-situ* velocity)后,再对不同厚度样品的速度-时间曲线做差,进而得出 Lagrange 波速与粒子速度关系。通过式(2),可计算给出整个加载-卸载过程的 C_{L}-u、σ-u、σ-ε 曲线。显而易见,Lagrange 正向数据处理的难点在于如何准确还原不同厚度样品的原位粒子速度。

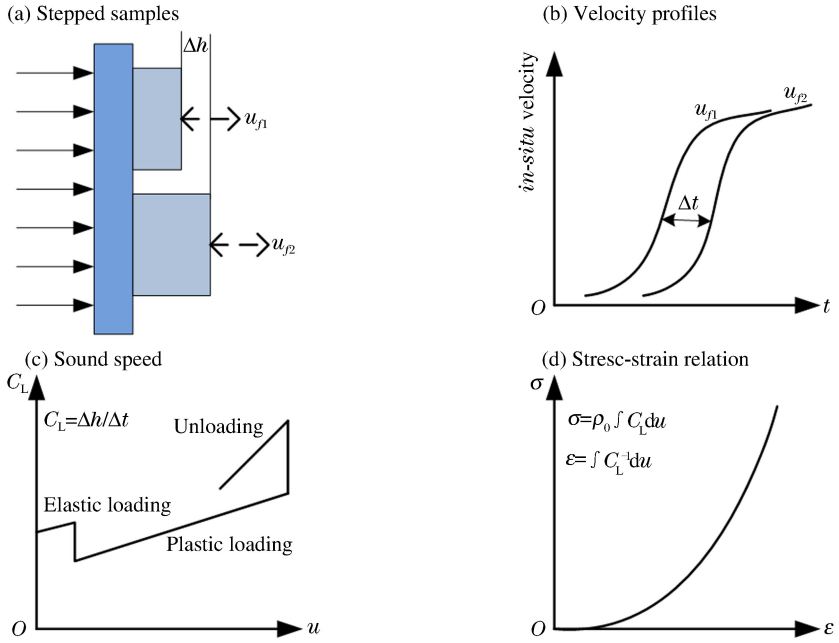

图 1 Lagrange 正向数据处理流程图

Fig. 1 Flow chart of Lagrangian forward data processing

2 转换函数方法

转换函数方法(TFM)的物理思想为:假定数值计算可以准确的表征样品后界面反射波与前界面后续加载波的相互作用,采用数值计算给出后界面速度和原位速度之间的映射关系,将该映射关系对实验测量的速度剖面进行反演,即可获得实验对应的原位速度。该方法自 2013 年提出以来,在 Sandia 实验室迅速获得广泛应用[8,14,25-26]。和自由面近似以及增量阻抗匹配方法相比,转换函数方法中可以考虑界面反射波与后续加载波的相互作用,准确的将非简单波情形还原为简单波情形。

转换函数方法的使用步骤可归纳如下。

(1) 采用数值计算,获得样品/窗口界面的粒子速度剖面 $u_{\mathrm{wc}}(t)$和相同位置的原位速度剖面 $u_{\mathrm{ic}}(t)$,要求计算的 $u_{\mathrm{wc}}(t)$尽可能的和实验测量的样品/窗口界面速度剖面 $u_{\mathrm{we}}(t)$接近。

(2) 寻找 $u_{\mathrm{wc}}(t)$和 $u_{\mathrm{ic}}(t)$之间的转换函数 $f(t)$。先将 $u_{\mathrm{wc}}(t)$和 $u_{\mathrm{ic}}(t)$变换到频率域,给出 $U_{\mathrm{wc}}(\omega)$和 $U_{\mathrm{ic}}(\omega)$,计算 $U_{\mathrm{wc}}(\omega)$和 $U_{\mathrm{ic}}(\omega)$之间的关联函数 $F(\omega)=U_{\mathrm{ic}}(\omega)/U_{\mathrm{wc}}(\omega)$,再将 $F(\omega)$转换到时间域,即为 $u_{\mathrm{wc}}(t)$和 $u_{\mathrm{ic}}(t)$之间的转换函数 $f(t)$。

（3）利用转换函数 $f(t)$对实验测量的样品/窗口界面的粒子速度剖面 $u_{we}(t)$做卷积，给出实验对应的原位粒子速度剖面 $u_{ie}(t)$：

$$u_{ie}(t)=u_{we}(t)*f(t)=\int_{-\infty}^{+\infty}u_{we}(t-\tau)f(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{4}$$

具体计算过程中，可先计算频率域的实验原位速度以避开卷积的计算：

$$U_{ie}(\omega)=U_{we}(\omega)\cdot F(\omega) \tag{5}$$

再将 $U_{ie}(\omega)$做傅里叶逆变换，还原为实验对应的原位粒子速度剖面 $u_{ie}(t)$。

图 2 是我们采用数值试验，对转换函数法在处理复杂结构波形时的验证结果。先设定材料参数和加载波形，分别计算铜/LiF 窗口界面速度曲线和原位速度曲线，再以计算的界面速度曲线作为“实验”的速度曲线并对其进行转换函数还原，将还原结果和计算的原位结果进行比较，发现还原的结果和计算结果完全吻合，表明该方法对复杂结构的速度波形具有良好的适用性。

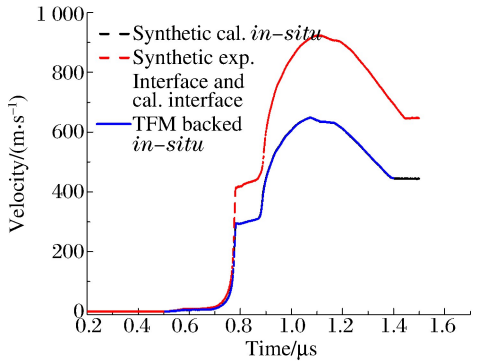

图 2 转换函数方法的验证

Fig. 2 Validation of transfer function method

在实际过程中，考虑到材料强度、粘性耗散等因素，很难做到计算的界面速度波形和实验结果完全吻合，因此需对转换函数方法的健壮性进行考核，即当计算的速度波形和实验速度波形存在一定的偏差时，采用转换函数计算的原位速度是否可靠。图 3 给出了采用未考虑强度效应的计算波形对考虑了强度效应的“实验”波形进行近似，转换函数方法计算的原位速度波形和真值的比较。由于强度效应只是导致计算和“实验”速度波形在峰值位置出现较明显的偏差，因此对还原的原位速度影响不大。图 4 分别为计算的速度幅值相对“实验”结果偏差 10% 和计算波形的脉宽相对“实验”结果偏差 5%时，采用转换函数方法计算的原位粒子速度与真值的比较。比较结果表明速度偏差 10%，脉宽偏差 5%时，转换函数方法仍具有较好的适用性。此外，我们还计算了不同窗口阻抗匹配以及自由面情形下的原位速度还原，均获得了满意的结果。

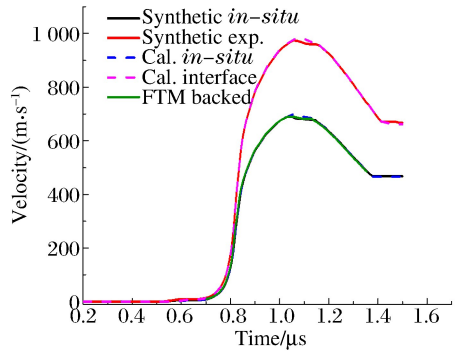

图 3 不考虑强度效应时的转换函数方法健壮性验证

Fig. 3 Robustness validation of transfer function method by ignoring the strength effect

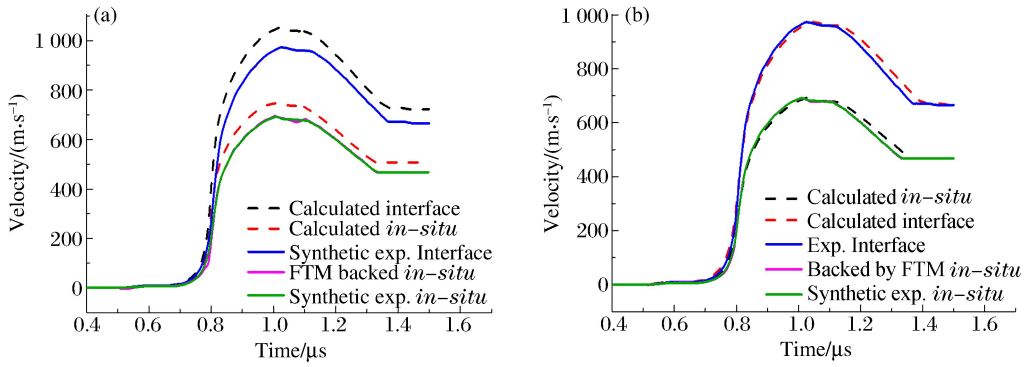

图 4 转换函数方法健壮性验证

Fig. 4 Robustness validation of transfer function method

3 斜波压缩实验数据处理

以磁驱动斜波压缩强度测量实验结果为例，联合使用正向 Lagrange 方法和转换函数方法对实验结果进行分析，分析结果如图 5 所示。图 5(a)给出了台阶靶的自由面速度曲线，对实验测量的自由面速度曲线做 1/2 近似，以此获得的原位速度曲线做正向数据处理，给出 C_L-u 曲线如图 5(b)所示。由图 5(b)可知，给出加载段体波声速的线性拟合为 $C_L = C_0 + 2\lambda u = 3.34 + 2.55u$，由此给出 Grüneisen 状态方程的 $C_0 = 3.34$ km/s，$\lambda = 1.27$，将其带入反积分程序[21]，计算加载界面的压力和速度历史，并给出 Grüneisen 状态方程的参数优化值。以反积分提供的加载界面压力(或速度)边界为基础，正向计算给出样品自由面的速度剖面，要求计算的界面速度曲线和实验结果尽量的接近；同时正向计算可给出样品厚度位置的原位速度剖面，计算结果如图 5(c)所示。再根据计算的界面速度和原位速度，采用转换函数方法，对实验测量的自由面速度进行还原，获得的原位速度如图 5(d)所示。利用实验结果的原位速度，正向计算给出加载-卸载过程中材料的 C_L-u 曲线如图 5(e)所示。

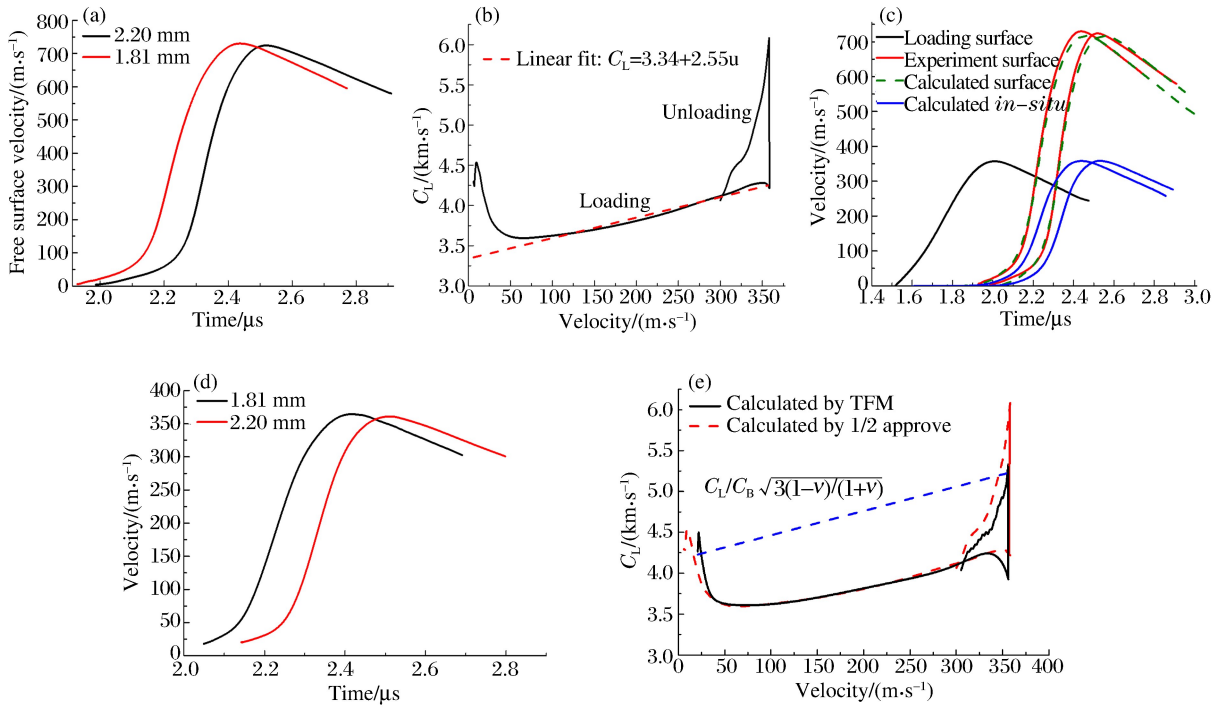

图 5 Lagrange 方法和转换函数方法在强度实验数据分析中的应用

Fig. 5 Application of Lagrangian method and transfer function methods in experimental strength data analysis

由图 5(e)可见，采用转换函数方法进行数据处理获得的声速在加载末期出现了下降，这体现了加载后期应变率的剧烈变化以及加载波形衰减对声速计算的影响。采用转换函数方法计算的卸载声速相对自由面 1/2 近似计算结果偏小约 8%，转换函数方法计算的卸载时弹性纵波声速的最大值和理论结果更为接近。根据实验测得的加载-卸载过程中拉氏声速的变化，即可参照文献[15]计算斜波压缩下的材料强度。

4 结 论

将 Lagrange 方法和转换函数方法在斜波压缩实验数据的正向处理中成功进行了应用，建立了斜波压缩实验数据处理的新流程，获得了可靠的实验结果。该数据处理方法的建立，将有效减小以往斜波压缩实验强度数据的计算误差，对强度实验数据的分析具有重要的作用。

参考文献：

[1] 孙承纬，赵剑衡，王桂吉，等. 磁驱动准等熵平面压缩和超高速飞片发射实验技术原理、装置及应用[J]. 力学进展，2012，42(3)：206-219.
Sun Chengwei，Zhao Jianheng，Wang Guiji，et al. Progress in magnetic loading techniques for isentropic compression experiments and ultra-high velocity flyer launching[J]. Advances in Mechanics，2012，42(3)：206-219.

[2] 李牧，孙承纬，赵剑衡. 固体材料高功率激光斜波压缩研究进展[J]. 爆炸与冲击，2015，35(2)：145-156.
Li Mu，Sun Chengwei，Zhao Jianheng. Progress in high-power laser ramp compression of solid[J]. Explosion and Shock Waves，2015，35(2)：145-156.

[3] Wang G，Zhao J，Zhang H，et al. Advances in quasi-isentropic compression experiments at institute of fluid physics of CAEP[J]. The European Physical Journal Special Topics，2012，206(1)：163-172.

[4] 王桂吉，赵剑衡，孙承纬，等. 磁驱动准等熵加载装置 CQ-4 的加载能力及主要应用[J]. 实验力学，2015，30(2)：252-263.
Wang Guiji，Zhao Jianheng，Sun Chengwei，et al. On the loading capability and main application of magnetically driven quasi-isentropic compression device CQ-4[J]. Journal of Experimental Mechanics，2015，30(2)：252-263.

[5] Wang G，Luo B，Zhang X，et al. A 4 MA，500 ns pulsed power generator CQ-4 for characterization of material behaviors under ramp wave loading[J]. Review of Scientific Instruments，2013，84(1)：015117.

[6] Davis J P，Deeney C，Knudson M D，et al. Magnetically driven isentropic compression to multimegabar pressures using shaped current pulses on the Z accelerator[J]. Physics of Plasmas，2005，12(5)：056310.

[7] Davis J P. Experimental measurement of the principal isentrope for aluminum 6061-T6 to 240 GPa[J]. Journal of Applied Physics，2006，99(10)：103512-103512-6.

[8] Davis J P，Brown J L，Knudson M D，et al. Analysis of shockless dynamic compression data on solids to multimegabar pressures：Application to tantalum[J]. Journal of Applied Physics，2014，116(20)：204903.

[9] Smith R F，Eggert J H，Jeanloz R，et al. Ramp compression of diamond to five terapascals[J]. Nature，2014，511(7509)：330-333.

[10] Luo Binqiang，Wang Guiji，Mo Jianjun，et al. Verification of conventional equations of state for tantalum under quasi-isentropic compression[J]. Jounal of Applied Physics，2014，116(19)：193506.

[11] Smith R F，Eggert J H，Jankowski A，et al. Stiff Response of aluminum under ultrafast shockless compression to 110 GPa[J]. Physical Review Letters，2007，98(6)：065701.

[12] Asay J R，Ao T，Davis J，et al. Effect of initial properties on the flow strength of aluminum during quasi-isentropic compression[J]. Journal of Applied Physics，2008，103(8)：083514.

[13] Ao T，Knudson M D，Asay J R，et al. Strength of lithium fluoride under shockless compression to 114 GPa[J]. Journal of Applied Physics，2009，106(10)：103507-103507-12.

[14] Brown J L，Alexander C S，Asay J R，et al.，Flow strength of tantalum under ramp compression to 250 GPa[J]. Journal of Applied Physics，2014. 115(4)：043530.

[15] 罗斌强，王桂吉，谭福利，等. 磁驱动准等熵压缩下 LY12 铝的强度测量[J]. 力学学报，2014. 46(2)：241-247.
Luo Binqiang，Wang Guiji，Tan Fuli，et al. Measurement of dynamic strength of LY12 aluminum under magnetically driven quasi-isentropic compression[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics，2014，46(2)：241-247.

[16] Smith R F，Eggert J H，Swift D C，et al. Time-dependence of the alpha to epsilon phase transformation in iron[J]. Journal of Applied Physics，2013，114(22)：223507.

[17] Rigg P A，Greeff C W，Knudson M D. Influence of impurities on the a to w phase transition in zirconium under dynamic loading conditions[J]. Journal of Applied Physics，2009，106(12)：123532-1-123532-9.

[18] 种涛，王桂吉，谭福利，等. 磁驱动准等熵压缩下铁的相变[J]. 中国科学：物理学 力学 天文学，2014，44(6)：630-636.
Zhong Tao，Wang Guiji，Tan Fuli，et al. Phase transition of iron under magnetically driven quasi-isentropic compression[J]. Scientia Sinica：Physica，Mechanica & Astronomica，2014，44(6)：630-636.

[19] 孙承纬.磁驱动等熵压缩和高速飞片技术,动高压原理与技术[M].经福谦,陈俊祥,主编.北京:国防工业出版社,2006:221

[20] Hayes D. Backward integration of the equation of motion to correct for free surface perturbations: SAND2001-1440[R]. Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia National Laboratorys, 2001.

[21] 张红平,孙承纬,李牧,等.准等熵实验数据处理的反积分方法研究[J].力学学报,2011,43(1):105-111.
Zhang Hongping, Sun Cheng wei, Li Mu, et al. Backward integration method in data processing of quasi-isentropic compression experiments[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2011,43(1):105-111.

[22] Xue Quanxi, Wang Zhebin, Jiang Shaoen, et al. Characteristic method for isentropic compression simulation[J]. AIP Advances, 2014,4(5):057127.

[23] Davis J P. CHARICE 1.0: An IDL application for characteristics-based inverse analysis of isentropic compression experiments: SAND2007-4984[R]. Albuquerque, New Mexico, USA: Sandia National Laboratorys, 2007.

[24] Vogler T J, Ao T, Asay J R. High-pressure strength of aluminum under quasi-isentropic loading[J]. International Journal of Plasticity, 2009,25(25):679-694.

[25] Brown J L, Alexander C S, Asay J R, et al. Extracting strength from high pressure ramp-release experiments[J]. Journal of Applied Physics, 2013,114(22):223518-223518-16.

[26] Brown J L, Knudson M D, Alexander C S, et al. Shockless compression and release behavior of beryllium to 110 GPa[J]. Journal of Applied Physics, 2014,116(3):033502.

Lagrangian forward analysis in data processing of ramp wave compression experiments

Luo Binqiang, Zhang Hongping, Zhao Jianheng, Sun Chengwei
(*Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: In the present work, we developed a novel method combining the forward Lagrange method and the transfer function method to process the data of ramp wave compression experiments. Compared with traditional methods, this method is more suitable to process the data containing materials' complex behaviors and produces more accurate results. Meanwhile, this method has lower precision requirement regarding the initial gauss of testing material parameters. The feasibility and robustness of the transfer function method was analyzed, and the application of the forward Lagrange method and the transfer function method were examined in forward data processing of strength measurement experiments under ramp wave compression.

Keywords: Lagrangian method; transfer function method; data processing; ramp wave compression

(责任编辑 王小飞)