

非对称冲击-卸载实验中纵波声速的特征线分析方法

潘昊 吴子辉 胡晓棉

Characteristic method to infer the high-pressure sound speed in a nonsymmetric impact and release experiment

Pan Hao Wu Zi-Hui Hu Xiao-Mian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 116201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.116201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.116201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冲击加载下液态水的结构相变

[Structural transformation of liquid water under shock compression condition](#)

物理学报.2014, 63(12): 126201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.126201>

钒的高压声速测量

[Sound velocities of vanadium under shock compression](#)

物理学报.2014, 63(2): 026202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.026202>

纳米多晶铜中冲击波阵面的分子动力学研究

[Molecular dynamics investigation of shock front in nanocrystalline copper](#)

物理学报.2013, 62(3): 036201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.036201>

熔化前后 Pb 样品表面微喷射现象研究

[Ejecta on Pb surface below and above melting pressure](#)

物理学报.2012, 61(20): 206202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.206202>

在石英界面处液态水的冲击结构相变

[The structural transition of water at quartz/water interfaces under shock compression in phase region of liquid](#)

物理学报.2012, 61(19): 196201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.196201>

# 非对称冲击-卸载实验中纵波声速的特征线分析方法

潘昊<sup>1)2)</sup> 吴子辉<sup>1)</sup> 胡晓棉<sup>1)†</sup>

1)(北京应用物理与计算数学研究所, 计算物理重点实验室, 北京 100088)

2)(中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088)

(2016年1月19日收到; 2016年3月16日收到修改稿)

材料高压声速是获取材料在冲击下的剪切模量、强度和相变信息的重要物理量, 对于研究材料在高速冲击下的行为非常重要. 由于飞片、样品和窗口材料阻抗失配等因素, 传统的声速分析方法无法对非对称冲击-卸载实验中单样品的窗口界面速度进行准确的分析. 本文在反向特征线方法的基础上, 考虑了飞片与样品、样品和窗口界面的相互作用, 建立了适合于仅含单一厚度样品的非对称冲击-卸载实验的特征线声速分析方法, 通过对数值实验给出的速度剖面的分析表明, 该方法能够较为准确地获得待测材料高压下的声速及卸载路径.

**关键词:** 声速, 特征线方法, 冲击加载

**PACS:** 62.50.Ef, 62.65.+k, 04.30.Nk

**DOI:** 10.7498/aps.65.116201

## 1 引言

平面冲击实验是研究凝聚介质在高压、高温加载下物理力学性质的重要实验方法<sup>[1]</sup>. 随着激光干涉技术的发展, 能够测量得到具有较高时空分辨率的样品自由面/窗口界面速度, 通过对这些速度剖面的分析, 可以获取材料在冲击-卸载下的声速<sup>[2]</sup>、剪切模量<sup>[3]</sup>、强度<sup>[4,5]</sup>和相变等<sup>[6,7]</sup>重要物理力学量, 而这其中尤以准确的声速结果最为重要, 它是提取其他物理量的基础. 目前由速度剖面分析得到材料的声速-粒子速度关系的方法主要包括增量阻抗匹配方法<sup>[8]</sup>、反向积分方法<sup>[9]</sup>、反向特征线方法<sup>[10]</sup>和传递函数方法等<sup>[11,12]</sup>. 反向特征线方法通过特征线方法计算样品中波的传播和波与界面的相互作用, 可以对由待测样品和窗口的阻抗失配造成的入射特征线弯曲情况进行分析, 其特点是无需已知待测材料的状态方程和本构关系形式, 通过不断地改进, 已经能够对准等熵加载实验、对称冲击-

卸载实验和密度梯度飞片冲击实验进行分析, 获得了Cu<sup>[13]</sup>和钢<sup>[14]</sup>高压加载下的强度、Sn的冲击-卸载相变信息<sup>[14]</sup>、Pb和Pb-Sb合金的准等熵加载路径等<sup>[15,16]</sup>.

非对称冲击-卸载实验一般由飞片、待测样品和窗口三部分构成, 非对称是指飞片与待测样品的材料不同, 因此三个部分材料的阻抗通常是不同的, 由此会造成冲击波、追赶稀疏波等在飞片/样品、样品/窗口的界面进行反射, 对追赶稀疏波的传播速度造成了干扰<sup>[17]</sup>. 反向特征线方法、传递函数方法和增量阻抗匹配方法虽然能对界面处波的相互作用进行一定的处理, 但往往存在分析结果不够准确的问题. 例如, 反向特征线方法通常忽略追赶稀疏波在飞片/样品界面处的反射, 当飞片与样品的阻抗差异较大时, 这种处理并不合理, 因此分析得到的声速与真实情况存在一定差异. 虽然可以通过对实验方式的改进, 如进行反向碰撞(即待测样品直接撞击窗口)<sup>[18]</sup>、采用高强度的材料(如蓝宝石

† 通信作者. E-mail: hu\_xiaomian@iapcm.ac.cn

石)<sup>[19]</sup> 作为飞片或者使用台阶样品等, 减小或消除这些干扰的影响. 但实验方式的改变也带来了一定的不足, 比如加载压力范围受限或需要更大口径的轻气炮发射装置等, 因此需要对声速分析方法进行进一步的研究, 以便在非对称冲击-卸载实验中, 通过分析单一厚度样品的窗口速度剖面, 即可准确获取材料在高压下的声速-粒子速度结果.

本文主要针对反向特征线方法在处理非对称冲击实验中的不足进行了改进, 采用正向特征线计算, 重点修正实验过程中追赶稀疏波在飞片/样品界面的反射对其自身传播的影响, 并结合反向特征线方法对样品/窗口阻抗失配效应的处理, 确定了样品中的声速-粒子速度关系, 数值实验的分析结果表明, 只需事先给定飞片及窗口材料的卸载路径, 通过分析单一厚度样品的窗口界面速度剖面, 就能够较为准确地获得非对称冲击-卸载实验中待测材料的声速-粒子速度.

## 2 特征线声速分析方法

在拉氏坐标系下, 一维平面纵波传播的特征方程可以表示为:

向右传播<sup>[10]</sup>,

$$\frac{dX}{dt} = C_L, \quad R^+ = u_p + F, \quad (1)$$

向左传播,

$$\frac{dX}{dt} = -C_L, \quad R^- = u_p - F, \quad (2)$$

$$F = \int \frac{d\sigma}{\rho_0 C_L} = u^*, \quad (3)$$

其中,  $R$ ,  $X$ ,  $t$ ,  $C_L$ ,  $\sigma$ ,  $\rho_0$ ,  $u_p$ ,  $u^*$  分别为黎曼不变量、位置、时间、纵波声速、应力、初始密度、粒子速度和原位速度, 上标+和-分别表示右行和左行波. 由弱间断波阵面的守恒条件可知<sup>[20]</sup>,

$$d\sigma = \rho_0 C_L du^*, \quad (4)$$

$$d\varepsilon = du^*/C_L(u^*), \quad (5)$$

其中  $\varepsilon$  为应变. 当一簇右行波到达界面时, 会发生反射与透射, 反射波继而会影响入射波的传播, 见图 1.

如图 1 所示, 假设经过  $(i-1, j)$  的正特征线与经过  $(i, j-1)$  的负特征线交汇于  $(i, j)$  点, 括号中前一个数字表示负特征线序号, 后一个数表示正特征

线序号, 下同. 由 (1) 和 (2) 式可知,  $(i, j)$  点的粒子速度及原位速度可以表示为

$$u_{p(i,j)} = \frac{R_{(i-1,j)}^+ + R_{(i,j-1)}^-}{2},$$

$$F = u_{(i,j)}^* = \frac{R_{(i-1,j)}^+ - R_{(i,j-1)}^-}{2}. \quad (6)$$

交汇点的时间和位置可由方程 (7) 和 (8) 联立求解得到

$$X_{(i,j)} - X_{(i-1,j)} = \frac{1}{2}(C_{L(i,j)} + C_{L(i-1,j)})(t_{(i,j)} - t_{(i-1,j)}), \quad (7)$$

$$X_{(i,j)} - X_{(i,j-1)} = \frac{1}{2}(C_{L(i,j)} + C_{L(i,j-1)})(t_{(i,j)} - t_{(i,j-1)}). \quad (8)$$

同时, 在界面处, 满足压力平衡和粒子速度相等关系

$$\sigma_1(u_1^*) = \sigma_2(u_2^*), \quad u_{p1} = u_{p2}, \quad (9)$$

(9) 式中下标 1, 2 表示介质 1, 2. 由于介质 2 中透射波属于简单波, 亦满足

$$u_{p2} - u_2^* = \text{const}. \quad (10)$$

当已知介质 1 和 2 的应力-速度关系、初始状态和来流速度, 需要求解界面速度时, 即进行正向计算时, 首先可得负特征线 1 上的各点结果  $(1,1), (1,2), (1,3), \dots, (1,n)$ , 再通过界面相互作用及正负特征线的交点确定  $(2,2), (2,3), \dots, (2,n)$ , 依次可获得介质 1 内各点的压力、粒子速度和应变情况, 并获得界面处运动速度.

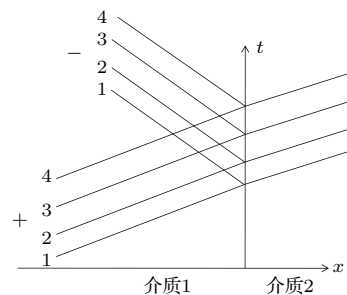


图 1 两种介质间波的相互作用

Fig. 1. Schematic  $x-t$  diagram of characteristics interactions between two materials.

当已知介质 1 和 2 的应力-速度关系、初始状态和界面的运动速度, 需要求解来流速度时, 即进行反向计算时, 情况略有不同. 首先根据界面处压力速度相等, (9) 式, 给出  $(1,1), (2,2), (3,3), \dots$

(n,n) 各点, 再通过特征线的传播与交汇, 给出 (1,2), (2,3), ... (n-1,n) 各点, 依次可得整个介质区域 1 内的压力、粒子速度情况. 另负特征线 1 起射于初始区域, 则沿着该特征线的原位速度可以表示为 [10]

$$(t_{\text{ipos}})_R = (t_{1,\text{ipos}}) + \frac{X_R - X_{1,\text{ipos}}}{C_{L1,\text{ipos}}}, \quad (11)$$

$$(u_{\text{ipos}}^*)_R = u_{(1,\text{ipos})}^*. \quad (12)$$

对于非对称冲击-卸载实验(见图 2), 当飞片以一定速度碰撞于样品时, 首先可以根据飞片、样品和窗口的冲击 Hugoniot 关系, 求出各冲击波的速度、波后粒子速度、压力和密度, 并以此为初始状态. 由图 2 可见, 界面 DE 段中心稀疏波的反射波、A 点处冲击波的反射波和 B 点处的追赶波的反射波均会对样品前后界面的原位速度造成干扰, 因此研究的重点是要对这些界面处波的相互作用情况进行描述.

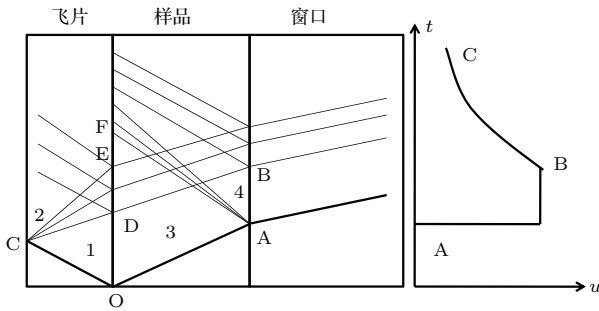


图 2 非对称冲击-卸载实验示意图

Fig. 2. Sketch map of the nonsymmetric impact and release experiment.

首先假设样品卸载过程的声速-粒子速度满足  $C_L(u^*)$ , 由于图 2 中初始状态 1, 3 已知, 对 (4) 式积分,

$$\sigma = \int_{u_0}^{u^*} C_L(u^*) du + \sigma_0, \quad (13)$$

可得样品和飞片的卸载路径, 根据之前的讨论, 可采用特征线方法, 进行正向计算, 进一步求出

出飞片/样品的界面速度  $u_{p2}(t)$ , 由 (10) 式得到样品的原位速度  $u_2^*(t)$ . 根据实验给出的样品/窗口的速度剖面, 在已知样品和窗口的卸载路径时, 采用反向特征线方法, 由 (11) 和 (12) 式得到样品/窗口界面处的原位速度  $u_1^*(t)$ , 则新的样品声速可以表示为

$$C_L(u^*) = \frac{h_0}{t_1(u^*) - t_2(u^*)}, \quad (14)$$

其中  $h_0$  表示样品厚度,  $t_1(u^*)$  和  $t_2(u^*)$  分别是  $u_1^*(t)$  和  $u_2^*(t)$  的反函数, 有了新的样品声速后, 可对以上计算过程进行迭代, 当每个迭代步前后的  $C_L(u^*)$  一致时, 则认为迭代收敛, 结合样品冲击波后的压力和密度, 对 (4) 和 (5) 式进行积分, 可以获得样品的卸载路径.

### 3 结果与讨论

采用数值实验对该特征线声速分析方法进行检验. 数值实验的模型为 2 mm Al 飞片以 1 km/s 的速度撞击 4 mm Cu 样品, 窗口材料为 20 mm LiF. 为简单起见, 这里忽略 Al 和 LiF 的强度, 均采用流体计算, Cu 的本构关系采用 Steinberg-Cochran-Gunian(SCG) 模型 [21], 参数同文献 [21], 计算网格为 20/mm, 采用一维拉氏有限差分程序进行计算. 各材料状态方程 EOS 采用 Mie-Grüneisen 形式,

$$p = \frac{\rho_0 C_0^2 (\eta - 1) \left[ \eta - \frac{\Gamma_0 (\eta - 1)}{2} \right]}{[\eta - s(\eta - 1)]^2} + \Gamma_0 E$$

$$\eta = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad (15)$$

其中  $E$  为单位体积内能, 状态方程参数  $C_0$ ,  $s$  和  $\Gamma_0$  及冲击波速度  $D$ 、波后压力、密度及粒子速度见表 1, 计算得到的飞片/样品、样品/窗口速度剖面见图 3.

表 1 材料状态方程的参数和冲击波的速度及波后压力、密度及粒子速度

Table 1. Parameters of EOS and pressure, density and particle velocity behind the shock wave front.

材料	$\rho_0/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$C_0/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$s$	$\Gamma_0$	$D/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	波后压力/GPa	波后密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	波后粒子速度/ $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
Al [21]	2.7	5.35	1.340	1.97	6.24	11.87	3.038	0.301
Cu [21]	8.93	3.94	1.489	2.02	4.39	11.87	9.588	0.301
LiF [22]	2.638	5.15	1.352	1.69	5.73	6.45	2.850	0.427

除了采用第二部分的特征线声速分析方法对图3所示数值实验获取的AB段窗口界面速度进行分析外,另采用了原始反向特征线方法和增量阻抗匹配方法进行比较,并忽略图2所示的由C点产生的中心稀疏波在飞片/样品处的反射,此时,样品中的声速可以表示为

$$C_L(u^*) = \frac{h_0}{t(u^*) - t_A + \frac{h_0}{D_s} - \frac{h_f}{D_f} - \frac{h_f}{C_f}}, \quad (16)$$

其中  $t_A$  是冲击波到达样品/窗口界面的时间;  $D_s$  是样品中的冲击波速度;  $h_f$ ,  $D_f$ ,  $C_f$  分别为飞片的厚度、冲击波速度和声速. 增量阻抗匹配方法给出的样品原位速度的增量  $\Delta u^*$  为 [8]

$$\Delta u^* = \frac{\rho_0 C_L + \rho_{0w} C_w}{2\rho_0 C_L} \Delta u_w, \quad (17)$$

其中,  $\Delta u_w$  表示样品/窗口界面速度的增量,  $\rho_{0w}$  和  $C_w$  分别窗口材料的密度及声速. 三种方法分析得到的纵波声速-原位速度见图4, 卸载应力-比容的关系见图5.

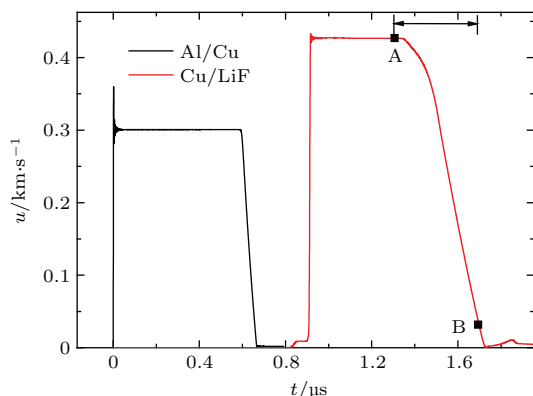


图3 (网刊彩色) 计算得到的 Al/Cu 和 Cu/LiF 速度剖面  
Fig. 3. (color online) Simulated Al/Cu and Cu/LiF interface velocity profiles of the nonsymmetric impact and release experiment.

由表1可知, Cu样品的声阻抗约为飞片材料 Al和窗口材料 LiF 的2倍, 差异明显. 即使这样, 由图4和图5可见, 本文采用的特征线方法计算得到的准弹性卸载波、体波声速及卸载应力-比容的关系仍与有限差分程序计算的结果符合较好, 表明该方法可以有效地处理冲击波、追赶稀疏波等在飞片/样品、样品/窗口的界面反射及与界面的相互作用. 而仅对样品/窗口界面进行反向特征线分析时, 计算得到的纵波声速-原位速度及卸载路径与有限差分程序计算结果, 在卸载后期特别是体波声速段有明显差异, 这表明中心稀疏波在飞片/样品处的

反射对于飞片中卸载波的传播还是有一定的影响. 值得注意的是, 在图4和图5中, 对于非对称碰撞实验, 阻抗匹配方法与有限差分程序计算的结果存在明显差异, 而在反向碰撞实验中, 两种方法的计算结果差异要小很多 [14], 这说明冲击波在图2所示A点反射的中心稀疏波会对后续的卸载波的传播产生明显影响, 仅采用阻抗匹配的方法并不足以获得准确的原位速度.

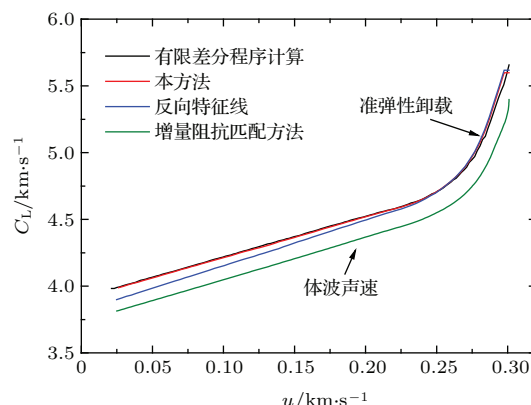


图4 (网刊彩色) 有限差分程序计算和经 Cu/LiF 速度剖面分析得到的的卸载纵波声速-原位速度

Fig. 4. (color online) Results of the releasing longitudinal sound speed vs. particle velocity analysis using the characteristic methods for the synthetic Cu/LiF velocity profile and calculation using the finite difference program.

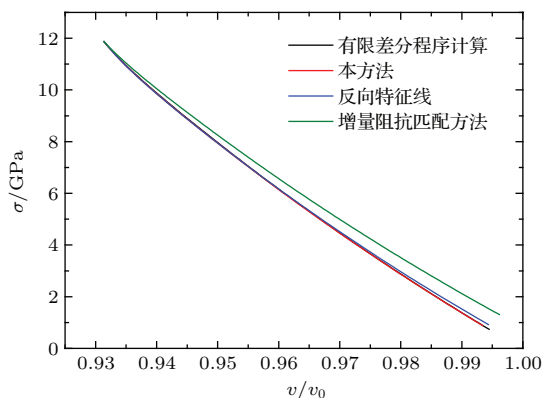


图5 (网刊彩色) 有限差分程序计算和经 Cu/LiF 速度剖面分析得到的卸载应力-比容

Fig. 5. (color online) Results of the releasing stress vs. specific volume analysis using the characteristic methods for the synthetic Cu/LiF velocity profile and calculation using the finite difference program.

以上的数值实验和特征线分析中由于冲击波的加载压力较低, 同时忽略了飞片和窗口材料的弹性效应, 因此认为材料的加、卸载路径基本相同,

卸载条件下的声速与粒子速度关系可以简化为

$$C_L = C_0 + 2su^* \quad (18)$$

当加载压力较高时, (18) 式就不再适用了, 可采用等熵假设对声速及卸载路径进行进一步的修正<sup>[20]</sup>. 分析过程中忽略了飞片和窗口材料的弹塑性效应, 当飞片的屈服强度远小于样品时, 这种假设是可以接受的, 而当飞片的弹塑性效应不可忽略时, 则可通过反向碰撞或对称碰撞实验事先标定飞片材料的高压卸载路径, 再利用该特征线方法进行分析, 这样可提高飞片/样品界面速度的计算精度, 减小由飞片的弹塑性效应带来的样品材料声速与真实值的偏差. 除此之外, 以上的特征线分析方法还要求由图 2 所示 A 点反射的中心稀疏波不能干扰由 C 点反射的中心稀疏波与飞片/样品界面的作用, 即 F 点需落于 E 点之后, 这需要在实验设计时予以保证.

## 4 结 论

本文针对非对称冲击-卸载实验的特点, 对反向特征线方法分析该实验声速的不足进行了改进, 联合正向及反向特征线计算, 对由飞片/样品、样品/窗口阻抗失配造成的反射波和冲击波对追赶稀疏波的影响进行了修正, 数值实验结果表明, 该方法能够对单一厚度样品的窗口速度剖面进行分析, 可获得较为准确的待测材料在高压下声速及卸载路径.

该分析方法所需的材料参数都有成熟的方法可以给出, 计算过程并不复杂, 计算量也较少(一般迭代步数小于 10), 这些都有利于在实验数据分析中的使用, 作者期待该方法可以应用于更多的实验.

## 参考文献

- [1] Asay J R, Kerley G I 1987 *Int. J. Impact Eng.* **5** 69
- [2] Yu Y Y, Tan Y, Dai C D, Li X M, Li Y H, Tan H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 026202 (in Chinese) [俞宇颖, 谭叶, 戴诚达, 李雪梅, 李英华, 谭华 2014 物理学报 **63** 026202]
- [3] Hu J B, Zhou X M, Tan H, Li J B, Dai C D 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 111905
- [4] Huang H, Asay J R 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 033524
- [5] Furnish M D, Alexander C S, Brown J L, Reinhart W D 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 033511
- [6] Tan Y, Yu Y Y, Dai C D, Yu J D, Wang Q S, Tan H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 036401 (in Chinese) [谭叶, 俞宇颖, 戴诚达, 于继东, 王青松, 谭华 2013 物理学报 **62** 036401]
- [7] Pan H, Hu X M, Wu Z H, Dai C D, Wu Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 206401 (in Chinese) [潘昊, 胡晓棉, 吴子辉, 戴诚达, 吴强 2012 物理学报 **61** 206401]
- [8] Asay J R, Lipkin J 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 4242
- [9] Hayes D B, Hall C A, Asay J R, Knudson M D 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5520
- [10] Rothman S D, Davis J P, Maw J, Robinson C M, Parker K, Palmer J 2005 *J. Phys. D* **38** 733
- [11] Brown J L, Alexander C S, Asay J R, Vogler T J, Ding J L 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 223518
- [12] Brown J L, Alexander C S, Asay J R, Vogler T J, Dolan D H, Belof J L 2014 *J. Appl. Phys.* **115** 043530
- [13] Rothman S, Edwards R, Vogle, T J, Furnish M D 2012 *Proceedings of the Conference of the American Physical Society Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter* Chicago, United States, June 26–July 1, 2011 p104
- [14] Pan H, Hu X M, Wu Z H 2015 *EPJ Web Conf.* **94** 01007
- [15] Lowe M R, Rothman S D, Chapman D, Robinson C 2014 *J. Phys. Conf. Series* **500** 112043
- [16] Rothman S D, Davis J P, Gooding S, Knudson M D, Ao T 2014 *J. Phys. Conf. Series* **500** 032016
- [17] Tan H 2006 *Introduction to Experimental Shock-Wave Physics* (Beijing: National Defense Industry Press) p160 (in Chinese) [谭华 2006 实验冲击波物理导引 (北京: 国防工业出版社) 第 160 页]
- [18] Duffy T S, Ahrens T J 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 529
- [19] Casem D T, Dandekar D P 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 063508
- [20] Li W X 2003 *One-Dimensional Nonsteady Flow and Shock Waves* (Beijing: National Defense Industry Press) p98, p215 (in Chinese) [李维新 2003 一维不定常流与冲击波 (北京: 国防工业出版社) 第 98, 215 页]
- [21] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 1498
- [22] Fratanduono D E, Boehly T R, Barrios M A, Meyerhofer D D, Eggert J H, Smith R F, Hicks D G, Celliers P M, Braun D G, Collins G W 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 123521

# Characteristic method to infer the high-pressure sound speed in a nonsymmetric impact and release experiment

Pan Hao<sup>1)2)</sup> Wu Zi-Hui<sup>2)</sup> Hu Xiao-Mian<sup>1)†</sup>

1) (*Key Laboratory of Computational Physics, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

2) (*Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China*)

( Received 19 January 2016; revised manuscript received 16 March 2016 )

## Abstract

Sound speed is of great importance for high velocity impact phenomena because it is a fundamental parameter to deduce the shear moduli, strengths and phase transitions of materials at high pressure. It has attracted much attention because of significant challenges to experiment and simulation. In practice, with the development of laser interferometer measurement system, one can obtain velocity-time histories of windowed-surfaces or free surfaces with high resolution in shock or ramp compression and unload experiments. This development provides a possible way to infer the sound speed from these velocity profiles. The key problem is to build valid analysis technique to extract the sound speed. Commonly used Lagrangian analysis methods include backward integration method, incremental impedance matching method, transfer function method and backward characteristic analysis method. However, all of these methods hardly infer the right results from the nonsymmetric impact and release experiment with only one depth of material due to the complex impedance mismatch among a flyer, sample and window. Some decreasing impedance mismatch techniques have been developed for the experiments including reverse impact or using a high strength flyer, but these techniques will limit the pressure range or need a newly designed gun with large caliber. In fact, the traditional backward characteristic analysis method only considers the sample/window interaction while bending of the incoming characteristics due to impedance difference between the flyer and sample is always ignored, which causes a distortion to the loading condition of samples. Thus in this work, we add forward characteristics to describe rarefaction wave reflection at the flyer/sample interface. Then a reasonable loading-releasing in-situ velocity profile of the interface can be derived from this improvement. We use the improved/tradition characteristics and incremental impedance matching method to analyze a synthetic nonsymmetric impact experiment in which the flyer, sample and window are of Al, Cu and LiF, respectively. Synthetic analyses suggest that the modified characteristic method can give more accurate results including sound speed-particle velocity and release path at high pressure. Compared with other methods, the new characteristic method just needs to know the release path of flyer and window that can be calibrated by well-developed technique, moreover, this method also does not need to know the form of equation of state and constitutive model of the sample. Calculation of this method is not complex and the iterative approach usually achieves convergence in less than 10 steps. All of these features will facilitate using this method to infer sound speed from the velocity profile of nonsymmetric impact experiments.

**Keywords:** sound speed, characteristic method, shock compression

**PACS:** 62.50.Ef, 62.65.+k, 04.30.Nk

**DOI:** 10.7498/aps.65.116201

† Corresponding author. E-mail: [hu\\_xiaomian@iapcm.ac.cn](mailto:hu_xiaomian@iapcm.ac.cn)