

反向碰撞法测量 Bi 的低压 Hugoniot 数据*

谭 叶 俞宇颖 戴诚达† 谭 华 王青松 王 翔

(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, 绵阳 621900)

(2010 年 12 月 8 日收到; 2011 年 1 月 5 日收到修改稿)

在火炮和二级轻气炮上利用反向碰撞技术, 通过测量飞片击靶速度以及飞片/窗口的界面粒子速度, 获得了金属铋 (Bi) 在 10—45 GPa 压力范围内的 Hugoniot 数据. 该方法克服了电探针法在测量低压 Hugoniot 数据时由于导通一致性差而不能准确得到冲击波速度的难题, 同时又避免了精确测量样品中冲击波走时的问题. 实验获得的冲击波速度 (D)-波后粒子速度 (u) Hugoniot 数据表明, Bi 在粒子速度 $u = 0.9$ km/s 附近 D - u 曲线发生了明显拐折, 产生这一拐折的原因推测与冲击导致的 Bi 的固—液相变有关.

关键词: Hugoniot 数据, 反向碰撞, 冲击相变, 铋

PACS: 64. 30. Ef, 62. 50. Ef, 64. 70. D- , 61. 82. Bg

1. 引言

雨贡纽 (Hugoniot) 数据是材料从同一初始状态出发、经过不同的冲击压缩达到的终态的集合, 描述了冲击波后任一压缩态下热力学状态量之间的内在联系^[1]. 一方面, 通过 Hugoniot 数据的测量, 能够研究材料在高压下的相变和物态方程^[2-6]; 另一方面, 已知 Hugoniot 数据也是进行冲击波实验设计的基本材料参数.

Bi 在冲击波加载下会出现较复杂的相变序列^[7], 是进行冲击相变研究的典型材料; 而其低压区复杂的多形相变和反常熔化, 使得该压力段内 Hugoniot 数据的测量对研究材料弹塑性响应和冲击相变具有重要意义. 早期 Duff 等^[8]就利用基于电探针技术的自由面速度法测量了 Bi 的低压 Hugoniot 数据, 并在 2.5 GPa 附近观测到了 Bi I (斜方六面体结构)→Bi II (底心单斜结构) 相变, 相变压力较静压的结果偏高. 之后 Romain^[9]利用电探针技术测量了 Bi 在 20 GPa 压力下的 Hugoniot 数据, 实验发现在 7 GPa 附近的冲击压缩下 Bi 发生了 Bi III (四方晶系结构)→Bi V (体心立方结构) 相变. 随后, 国外相继利用多种加载手段^[10-15]对 Bi 的冲击相变热力学、动力学以及多相物态方程进行了研究. 但作

为上述研究基础工作的 Bi 的低压区 Hugoniot 数据, 却存在较大的分散性, 由此导致获得的相边界的不确定度较大, 对 Bi 低压段多相物态方程的建立存在较大的影响. 因而有必要对 Bi 在低压段的 Hugoniot 数据进行精确测量.

目前人们还不能完全从理论的方法确定材料的 Hugoniot 数据, 必须借助于实验测量. 而现有的 Hugoniot 数据测量中, 冲击波速度 D 主要利用电探针技术测量冲击波在已知厚度样品中的走时 (又称“渡越时间”) 得到^[16,17]. 由于飞片在加速过程中不可避免地会产生倾斜和弯曲变形, 而样品内也存在复杂的波系作用, 因此必须要对由此引起的冲击波走时进行修正, 该修正量不确定度的引入, 导致了冲击波速度合成不确定度的加大; 同时, 电探针法作为一种接触式的测量方法, 要求了电探针的有效触发和快时间响应, 然而电探针的低压触发响应较慢, 这使得材料低压区 Hugoniot 数据的精密测量变得更加困难.

本研究采用反向碰撞^[18,19]的实验技术, 探索了通过样品/窗口界面粒子速度剖面的测量获得材料低压区 Hugoniot 数据的可行性. 利用该方法, 获得了 Bi 在 10—45 GPa 压力范围内的高精度 Hugoniot 数据, 并与已有的文献报道数据进行了比较.

* 国防基础科研项目 (批准号: A1520070078) 和国家自然科学基金 (批准号: 10972206) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: cddai@caep.ac.cn

2. 实验方法

对于静止靶初始状态为常压的情形,由平面冲击波阵面前后状态满足质量、动量与能量守恒关系得到 Rankine-Hugoniot^[20,21] 公式

$$\rho = \rho_0 D / (D - u), \quad (1)$$

$$p = \rho_0 D u, \quad (2)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2} p \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right), \quad (3)$$

式中 ρ, D, u, p 和 E 分别表示冲击波阵面后的密度、冲击波速度、粒子速度、压力和比内能,下标 0 表示初始状态.

目前还没有直接测量比内能 E 的方法,而压力 p 及密度 ρ 测量的精度较低,因此, Hugoniot 数据测量实验通常是对冲击波速度 D 和粒子速度 u 进行测量. 对于大多数凝聚介质, $D-u$ 曲线在一定范围内满足下列线性关系:

$$D = C_0 + \lambda u, \quad (4)$$

式中 C_0 和 λ 为常数,即 Hugoniot 参数. 当前发展的实验方法主要有绝对测量法和对比测量法^[1]. 在上述两种方法中,冲击波速度 D 都是通过测量冲击波在一定厚度样品中的走时得到,其精度主要取决于冲击波走时的精度. 为提高冲击波走时的测量精度,需要控制入射冲击波的变形程度(弯曲和倾斜等),并在样品前后界面设计合理的探针布局^[22],通过一定的统计分析模型对冲击波走时进行修正. 在绝对测量法中,由于飞片和样品为同种材料,而且初始状态也完全相同,冲击波后粒子速度 u 通过测量飞片速度 W 得到($u = W/2$);在对比测量法中,冲击波后粒子速度 u 无法直接测量得到,必须通过相关量的间接测量,利用阻抗匹配法获得. 由于飞片和样品材料阻抗不匹配,粒子速度的不确定度还需考虑飞片材料 Hugoniot 镜像线近似二次冲击绝热线或卸载线而引入的不确定度^[23].

本研究采用反向碰撞法测量 Hugoniot 数据,其原理如图 1. 如图 1(a) 的 $X-t$ 图所示,在拉格朗日坐标系中,当作为飞片的样品以速度 W 撞击静止的透明窗口时,将分别在样品和窗口中产生左、右行冲击波,并相应地使样品和窗口中的压力、粒子速度等状态由初始的 $p_{0s}, u_{0s}, p_{0w}, u_{0w}$ 突变为 p_s, u_s, p_w, u_w .

在欧拉坐标系中,根据界面连续性条件可以

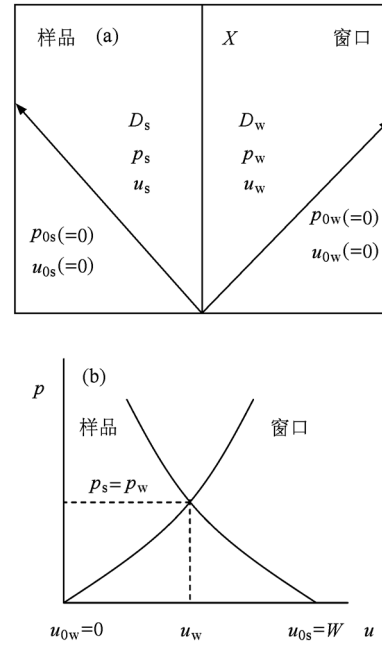


图 1 反向碰撞法测量 Hugoniot 数据的原理图 (a) $X-t$ 图; (b) $p-u$ 图

得到

$$u_s = W - u_w, \quad (5)$$

$$p_s = p_w, \quad (6)$$

根据(2), (5) 式,窗口和样品中的冲击压力可表示为

$$p_w = \rho_{0w} D_w u_w, \quad (7)$$

$$p_s = \rho_{0s} D_s (W - u_s), \quad (8)$$

式中 D_s 和 D_w 分别为样品和窗口内的冲击波速度. 根据图 1(b) 的 $p-u$ 关系,由(6)–(8) 式得到样品内的冲击波速度 D_s 为

$$D_s = \frac{\rho_{0w} D_w u_w}{\rho_{0s} (W - u_w)}, \quad (9)$$

式中 ρ_{0s} 和 ρ_{0w} 分别为样品和窗口的初始密度. 如果窗口材料的 $D-u$ 曲线满足线性关系

$$D_w = C_{0w} + \lambda_w u_w, \quad (10)$$

式中 C_{0w} 和 λ_w 为窗口材料的 Hugoniot 参数,则(9) 式可表示为

$$D_s = \frac{\rho_{0w} (C_{0w} + \lambda_w u_w) u_w}{\rho_{0s} (W - u_w)}. \quad (11)$$

由(5), (11) 式可见,在反向碰撞法测量 Hugoniot 数据的实验中,只需要测得飞片(样品)击靶速度 W 和窗口的波后粒子速度 u_w ,就可获得样品的粒子速度 $u_s (= W - u_w)$ 和对应的冲击波速度 D_s .

实验在中国工程物理研究院流体物理研究所的火炮和二级轻气炮上进行,实验中使用的 Bi 样品纯度为 99.84%,密度为 9.808 g/cm^3 ,样品加工成 $\varnothing 35 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ (用于火炮发射实验)和 $\varnothing 27 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$ (用于二级轻气炮发射实验)的圆片,两端面作光学抛光. 装置示意图如图 2 所示,将圆片状 Bi 样品作为飞片安装在弹丸上,利用 $\varnothing 37 \text{ mm}$ 口径火炮(获得较低的弹速和冲击加载压力)和 $\varnothing 28 \text{ mm}$ 口径二级轻气炮(获得较高的弹速和冲击加载压力)将弹丸发射至稳定的终点弹道速度 W ,并撞击 LiF 单晶窗口. 飞片击靶速度 W 采用全光纤激光干涉测试技术^[24,25](DISAR)或磁测速系统测量,界面粒子速度剖面采用单点 DISAR 测量,该技术不存在干涉条纹丢失^[26,27]的问题. 为了提高测试界面对 DISAR 系统入射光的反射效率,窗口击靶面镀有 $1 \text{ }\mu\text{m}$ 的铝膜;此外,为了避免真空靶室残留气体对测试的干扰,窗口击靶面贴有 $8 \text{ }\mu\text{m}$ 厚铝箔挡光层.

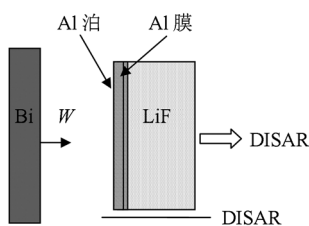


图2 用于 Hugoniot 数据测量的反向碰撞实验示意图

3. 实验结果及讨论

本研究共进行了 5 发实验,测量了 Bi 在 10—45 GPa 压力范围内的飞片速度和样品/窗口界面粒子速度. 图 3 给出了在窗口中轴线上的单点 DISAR 系统所获得的界面粒子速度(注:图中没有给出速度剖面的卸载部分),从图中可以看出,在反向碰撞法中,Bi 样品直接与 LiF 窗口撞击,界面速度信号的上升前沿陡峭,紧接着是一个很平坦的平台,信噪比高,该平台速度即为窗口的冲击波后粒子速度 u_w .

根据实验测量的飞片速度 W 和窗口处的粒子速度 u_w ,应用(11)式计算得到 Bi 的冲击波速度,实验结果见表 1,表中 P_s 为样品/窗口界面处的压力. 数据处理中涉及的 LiF 单晶($\rho_0 = 2.638 \text{ g/cm}^3$) Hugoniot 参数^[28]为 $C_0 = 5.148 \text{ km/s}$, $\lambda = 1.353$.

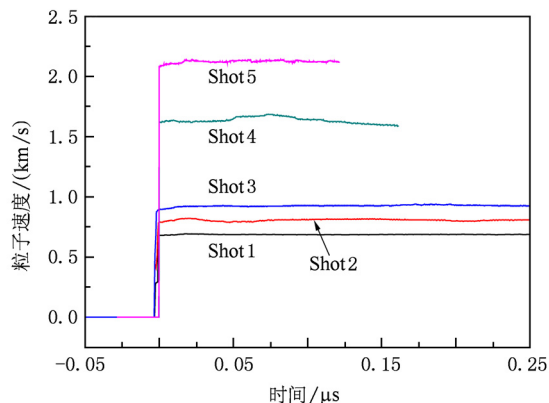


图3 不同碰撞速度下的样品/窗口界面粒子速度剖面

表1 实验测量结果^{a)}

编号	$W/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$u_w/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$u_s^{(b)}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$D_s/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	P_s/GPa
1	1.216	0.689	0.527	2.138	11.1
2	1.404	0.812	0.592	2.304	13.4
3	1.577	0.927	0.650	2.456	15.7
4	2.649	1.666	0.983	3.374	32.5
5	3.375	2.126	1.249	3.673	45.0

a) 1—3 为 $\varnothing 37 \text{ mm}$ 口径火炮实验,飞片击靶速度利用 DISAR 测量; 4 和 5 为 $\varnothing 28 \text{ mm}$ 口径二级轻气炮实验,飞片击靶速度利用磁测速系统测量;样品/窗口界面粒子速度利用 DISAR 测量;b) u_s 为欧拉坐标系下 Bi 的粒子速度.

利用反向碰撞法得到的 Bi 样品的 $D-u$ 关系如图 4 所示,同时示于图中的还包括 Romain^[9] 和 LASL^[29] 的数据. 从图 4 中可以看出,在较高压力段本实验获得的数据同国外发表的数据较符合,低压段得到的实验数据具有很好的线性相关性,与 LASL 数据基本符合,但与 Romain 的数据相比略低. Romain 的数据采用电探针技术获得,而在低压下电探针触发响应可能受到弹塑性和多波结构的影响,触发一致性差. 由图 4 可以看出, $D-u$ 曲线可以分成两段:在低压段, $D-u$ 曲线中冲击波速度 D 随着粒子速度 u 的增大而增大,呈线性相关,且斜率较大,在高压段, $D-u$ 曲线中冲击波速度 D 也随着粒子速度 u 的增大而增大,也呈线性相关,但是斜率较小. 此 $D-u$ 曲线转折出现在粒子速度 0.9 km/s 附近,对应的压力点约为 27 GPa ,由实验获得的 Hugoniot 数据,结合 LASL 的数据,拟合得到两压力段的 Hugoniot 参数分别为: $C_0 = 0.775 \text{ km/s}$, $\lambda = 2.585$, $u < 0.9 \text{ km/s}$; $C_0 = 1.966 \text{ km/s}$, $\lambda = 1.376$, $u > 0.9 \text{ km/s}$. 结合 Pélissier^[30,31] 和 Cox^[32] 经过实验和计算得到的 Bi 的熔化曲线,推断 Bi 在低压下大致

经历了从 20 GPa 的初始熔化到 30 GPa 的完全熔化的压力区间,具体的压力区间有待进一步的声速和温度测量进行确定.

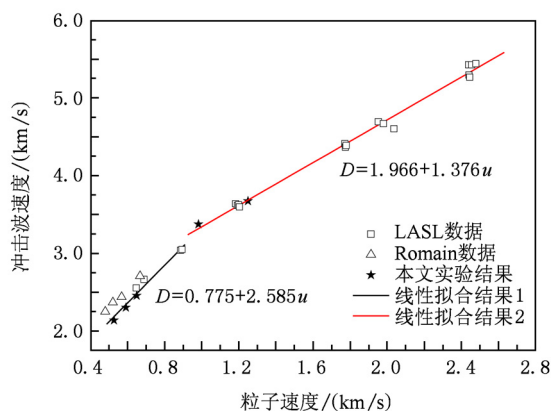


图4 冲击波速度-粒子速度关系

在测量 Bi 的 Hugoniot 数据实验中,不确定度主要来源于飞片速度 W 、窗口界面粒子速度 u_w 以及窗口材料 Hugoniot 参数 C_{0w} 和 λ . 对于飞片速度 W , DISAR 测速的标准不确定度为 0.1%, 磁测速的标准不确定度为 0.25%; 对于窗口界面速度 u_w , 其不确定度还包括窗口的折射率修正. 如果窗口材料 Hugoniot 参数的不确定度按 0.5% 计算, 则根据不确定度传递规律, 采用反向碰撞法获得的样品粒子速度标准合成不确定度不超过 1%, 冲击波速度的标准不确定度不超过 2%.

由以上所述可知,本研究采用的利用 DISAR 获得 Bi 样品 Hugoniot 数据的实验方法可行,在低压区

Hugoniot 数据测量不确定度优于电探针技术;同时,该方法不涉及冲击波波形修正和冲击波走时的精确测量问题.

4. 结 论

通过在火炮和二级炮上进行的反向碰撞实验,得到了 Bi 在 10—45 GPa 冲击作用下 Hugoniot 数据. 实验结果表明:

1. 采用反向碰撞技术,测量 Bi 样品/LiF 窗界面的粒子速度和飞片速度,由界面连续性条件和 Rankin-Rankine 关系获得样品中的冲击波速度,进而获得样品在低压段的 Hugoniot 数据,样品粒子速度 u_s 的标准不确定度不超过 1%, 冲击波速度 D 的标准不确定度不超过 2%, 该方法同样适用于其他材料的低压 Hugoniot 数据测量;

2. 在 10—45 GPa 压力范围内,实验结果清楚地表明了 Bi 的 $D-u$ 曲线存在明显的间断(分为两段),并分别呈线性关系,其低压段和高压段的 $D-u$ 关系可分别表述为 $D = 0.775 + 2.585 u$ 及 $D = 1.966 + 1.376 u$, 该转折可能对应于 Bi 的冲击熔化,由此推断 Bi 在 27 GPa 附近发生了冲击相变(固—液相变),具体的相变压力区间需要下一步进行的高压声速和温度的数据确定.

感谢王为、李加波、叶素华、向曜民、方茂林等人在实验测试和气炮运行中给予的帮助.

- [1] Tan H 2006 *Introduction to Experimental Shock-Wave Physics* (Beijing: National Defense Industry Press) p15, p37 (in Chinese) [谭 华 2006 实验冲击波物理导引(北京:国防工业出版社)第15,37页]
- [2] Barker L M 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 2544
- [3] Brown J M, Fritz J N, Hixson R S 2000 *J. Appl. Phys.* **88** 5496
- [4] Nagayama K, Mori Y, Shimada K, Nakahara M 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 476
- [5] Li J, Zhou X M, Li J B, Li S N, Zhu W J, Wang X, Jing F Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6557 (in Chinese) [李 俊、周显明、李加波、李赛男、祝文军、王 翔、经福谦 2007 物理学报 **56** 6557]
- [6] Liu X, Zhou X M, Li J, Li J B, Cao X X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5626 (in Chinese) [刘 勋、周显明、李 俊、李加波、操秀霞 2007 物理学报 **59** 5626]
- [7] Tonkov E Y, Ponyatovsky E G 2005 *Phase transformation of elements under high pressure* (Florida: CRC PRESS) p150
- [8] Duff R E, Minshall R S 1957 *Phys. Rev.* **108** 1207
- [9] Romain J P 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 135
- [10] Asay J R 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 4441
- [11] Asay J R 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 2832
- [12] Bastea M, Bastea S, Emig J A, Springer P T, Reisman D B 2005 *Phys. Rev. B* **71** 180101
- [13] Nguyen J H, Orlikowski D, Streitz F H, Holmes N C, Moriarty J A 2004 *Shock Compression of Condensed Matter*(2003) (Oregon: America Institute of Physics) p743
- [14] Kane J O, Smith R F 2006 *Shock Compression of Condensed Matter*(2005) (Maryland: America Institute of Physics) p244
- [15] Smith R F, Eggert J H, Saculla M D, Jankowski A F, Bastea M, Hicks D G, Collins G W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 065701

- [16] Mitchell A C, Nellis W J 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 3363
- [17] Mitchell A C, Nellis W J 1981 *Rev. Sci. Instrum.* **52** 347
- [18] Duffy T S, Ahrens T J 1995 *J. Geophys. Res.* **100** 529
- [19] Hu J B, Zhou X M, Tan H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2347 (in Chinese) [胡建波、周显明、谭 华 2008 物理学报 **57** 2347]
- [20] McQueen R G, March S P, Taylor J W, Fritz J N, Carter W J 1970 *High Velocity Impact Phenomena* (New York: Academic) p79
- [21] Jing F Q 1999 *Introduction to Experimental Equation of State* (Beijing: Science Press) p82 (in Chinese) [经福谦 1999 实验物态方程导引 (北京: 科学出版社) 第 82 页]
- [22] Wang X 2004 *MS Thesis* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) p32 (in Chinese) [王 翔 2004 硕士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院) 第 32 页]
- [23] Dai C D, Wang X, Tan H 2005 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **19** 0113 (in Chinese) [戴诚达、王 翔、谭 华 2005 高压物理学报 **19** 0113]
- [24] Weng J D, Tan H, Hu S L, Ma Y, Wang X 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 093301
- [25] Weng J D, Tan H, Wang X, Ma Y, Hu S L, Wang X S 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 111101
- [26] Yu Y Y, Tan H, Hu J B, Dai C D, Chen D N 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1742
- [27] Hu J B, Tan H, Yu Y Y, Dai C D, Ran X W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 0405 (in Chinese) [胡建波、谭 华、俞宇颖、戴诚达、冉宪文 2008 物理学报 **57** 0405]
- [28] Carter W J 1973 *High Temperature-High Pressure* **5** 316
- [29] Marsh S P 1980 *LASL Shock Hugoniot Data* (Berkeley: University of California Press) p23
- [30] Pélissier J L, Wetta N 2001 *Physica A* **289** 459
- [31] Wetta N, Pélissier J L 2001 *Physica A* **289** 479
- [32] Cox G A 2007 *Shock Compression of Condensed Matter* (2007) (Hawaii: America Institute of Physics) p151

Measurement of low-pressure Hugoniot data for bismuth with reverse-impact geometry^{*}

Tan Ye Yu Yu-Ying Dai Cheng-Da[†] Tan Hua Wang Qing-Song Wang Xiang

(Laboratory for Shockwave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 8 December 2010; revised manuscript received 5 January 2011)

Abstract

Hugoniot data for Bi are determined through measuring the impact velocity and the particle velocity at the sample/window interface on a powder gun or a two-stage light gas gun in a shock pressure range from 10 to 45 GPa, using reverse-impact geometry. The used experimental technique avoids the difficulty in accurately measuring the shock wave velocity resulting from the poor start synchronism of electric pins under low shock pressure. The obtained Hugoniot data (shock wave velocity D versus particle velocity u) indicates that the D - u curve does have a discontinuity at a particle velocity of ~ 0.9 km/s, which is likely to be caused by the shock-induced solid-liquid phase transformation.

Keywords: reverse-impact geometry, Hugoniot equation of state, shock-induced phase transition, bismuth

PACS: 62.50.Ef, 64.30.Ef, 64.70.D-, 61.82.Bg

^{*} Project supported by the National Defense Basic Scientific Research Program of China (Grant No. A1520070078) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10972206).

[†] Corresponding author. E-mail: cddai@caep.ac.cn