

Bi 在固液混合相区的冲击参数测量及声速软化特性

李雪梅 俞宇颖 谭叶 胡昌明 张祖根 蓝强 傅秋卫 景海华

Softening of sound velocity and Hugoniot parameter measurement for shocked bismuth in the solid-liquid mixing pressure zone

Li Xue-Mei Yu Yu-Ying Tan Ye Hu Chang-Ming Zhang Zu-Gen Lan Qiang Fu Qiu-Wei Jing Hai-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 046401 (2018) DOI: 10.7498/aps.20172166

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20172166>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚乙烯醇水溶液二维定向凝固的微观组织演化

Microstructure evolution of polyvinyl alcohol aqueous solution solidated in two-dimensional direction

物理学报.2017, 66(19): 196402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.196402>

电磁悬浮条件下液态 $\text{Fe}_{50}\text{Cu}_{50}$ 合金的对流和凝固规律研究

Fluid convection and solidification mechanisms of liquid $\text{Fe}_{50}\text{Cu}_{50}$ alloy under electromagnetic levitation condition

物理学报.2017, 66(13): 136401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.136401>

液态三元 Fe-Sn-Si/Ge 偏晶合金相分离过程的实验和模拟研究

Experimental investigation and numerical simulation on liquid phase separation of ternary Fe-Sn-Si/Ge monotectic alloy

物理学报.2016, 65(10): 106402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.106402>

定向结晶条件下聚乙二醇 6000 的强动力学效应

Strong kinetic effect of polyethylene glycol 6000 under directional solidification condition

物理学报.2016, 65(9): 096401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.096401>

晶体相场法研究预变形对熔点附近六角相/正方相相变的影响

Effect of predeformation on the transition from hexagonal phase to square phase near the melting point using phase field crystal method

物理学报.2014, 63(16): 166401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.166401>

Bi在固液混合相区的冲击参数测量及声速软化特性*

李雪梅[†] 俞宇颖 谭叶 胡昌明 张祖根 蓝强 傅秋卫 景海华

(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重点实验室, 绵阳 621900)

(2017年10月2日收到; 2017年12月9日收到修改稿)

冲击相变与熔化作为材料特性的一项重要研究内容, 对于多相物态方程构建具有重要意义. 本文利用追赶稀疏原理和阻滞法, 基于火炮加载技术获得了17.3—28.3 GPa范围内纯铋(Bi)的高精度声速数据和Hugoniot参数, 分析了声速软化规律, 得到固-液混合相区Bi材料声速随压力的近似线性递减关系 $C = 3.682 - 0.015p$, 并进一步确定Bi的冲击熔化压力区间为18—27.4 GPa. 同时, Bi/LiF界面速度剖面的预期平台段在固液混合相区表现出渐进爬升的异常特征, 分析认为, 该现象与Bi材料的非均匀熔化动力学行为及冲击熔化完成时间尺度较长有关.

关键词: 声速, 冲击熔化, 界面速度剖面, Bi

PACS: 64.70.D-, 64.30.Ef, 62.50.Ef, 62.50.-p

DOI: 10.7498/aps.67.20172166

1 引言

冲击相变与熔化作为材料动力学特性研究的一项重要内容, 自20世纪50年代以来便引起了学术界的关注^[1]; 而金属铋(Bi)由于在高温高压下具有复杂的相结构, 常常被作为研究材料相变及构建多相物态方程的代表性材料^[2-6]. 现有文献对Bi材料相变的研究多集中在低压固相区. 例如, Larson^[2]和Romain^[3]曾分别采用自由面速度测量和冲击Hugoniot参数测量研究Bi在约2.5 GPa(Bi-I→Bi-II)和7 GPa(Bi-III→Bi-IV)压力下的低压固-固多形相变; Asay^[4]则通过预热冲击和速度剖面测量技术研究了Bi材料不同物相之间的相界特性. 此外, 也有少量研究针对Bi材料相变的动力学特性及微结构演化进行. Smith等^[5]利用超快激光产生的准等熵加载研究了预加热Bi在10 GPa以内固固相变的时间相关特性; Colvin等^[6]通过对受激光冲击加载和卸载后的预热Bi样品进行软回收和

显微分析, 研究了2 GPa以内压力区Bi的非均匀熔化及再结晶行为; Gorman等^[7]则通过飞秒X-射线衍射技术原位观察和分析了Bi的冲击熔化现象.

由于材料发生固-固相变、熔化时往往伴随着声速的变化, 开展Hugoniot态声速测量是研究材料冲击相变和熔化的重要手段^[8-11]. 早期Romain^[3]和Asay^[4]曾获得Bi的少量纵波声速数据, 但压力范围过低(< 5 GPa), 无法覆盖大部分常温强冲击加载实验的压力区间. 为了认识Bi的冲击熔化规律, 谭叶等^[12,13]基于一维平面冲击加载技术对11—70 GPa内不同压力下Bi材料的Hugoniot参数和冲击态声速进行了测量, 实验确定了Bi材料的冲击熔化区间, 但熔化区的冲击数据过少, 对固液混合相区的声速软化和相变动力学特性研究也有待深入.

本文在文献^[13]的基础上, 进一步在17—28 GPa压力范围内开展Bi的冲击Hugoniot参数、声速和速度剖面的联合测量, 以研究Bi材料在熔化区间内的声速软化规律, 分析Bi冲击熔化相变

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号: 2015B0101006)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: lixuem@caep.cn

的非均匀动力学特性, 补充该压力区 Bi 材料的高精度冲击 Hugoniot 参数, 以期为构建和校核 Bi 材料物态方程提供高精度数据.

2 实验方法简述

实验采用火炮加载技术进行一维平面冲击加载, 采用非对称碰靶方式、多台阶样品布局及加窗

DISAR 技术 (displacement interferometer system of any reflector)^[14] 实现界面速度剖面测量, 进而获得 Bi 的高压声速. 图 1 (a) 是实验装置示意图, 其中, 飞片为无氧铜, 它以预定速度直接撞击由 5—6 块具有不同台阶厚度的待测 Bi 材料组成的物理靶, 各样品背面紧贴 [100] 单晶 LiF 窗口; 飞片背面采用聚碳酸酯衬垫实现对样品冲击加载后的卸载.

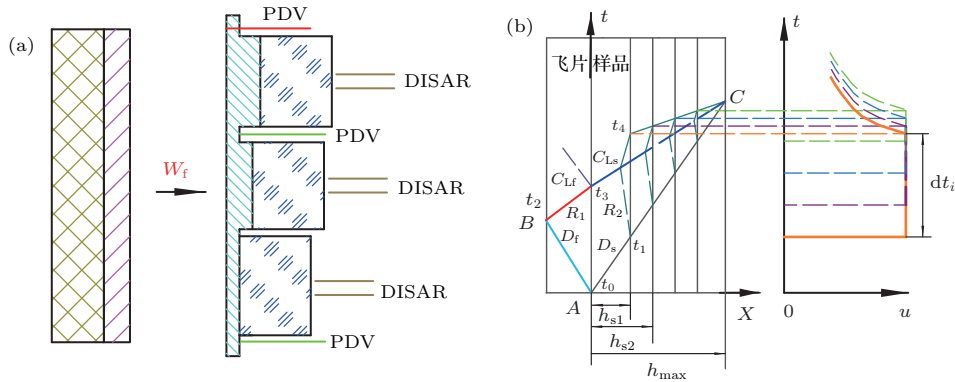


图 1 台阶法声速测量实验装置及原理 (a) 实验装置; (b) 台阶法声速测量原理图

Fig. 1. Schematic of the sound speed measurement experiment using stepped samples: (a) experimental configuration; (b) illustrative diagram where the rarefaction wave from the flyer will catch up the leading shock wave when the sample has a thickness of h_{\max} , which is then used to calculate the sample's sound speed at the Hugoniot pressure.

图 1 (b) 为实验原理示意图. 碰靶瞬时, 分别在飞片和各台阶样品内产生冲击波, 此后, 由飞片背面引入的追赶稀疏波将对样品进行卸载, 使样品/窗口界面速度逐渐下降. 由于样品内的右行追赶稀疏波对前方冲击波的追赶作用, 导致界面速度平台宽度 $dt (dt = t_4 - t_1)$ 随样品厚度 h_s 的增加而不断变短. 同时, 阻抗失配导致冲击波在样品/窗口界面反射而产生左行稀疏波, 它与右行追赶稀疏波相互作用使得界面速度剖面的平台宽度 dt 被展宽. 当样品厚度增加到 h_{\max} , 使得 dt 恰好为零时, 样品/窗口界面反射稀疏波对样品内追赶稀疏波波头的影响完全消失. 这时, 由 $X - t$ 平面上给出的简单几何关系以及材料的冲击压缩关系, 便可计算实验压力下样品的欧拉纵波声速:

$$C_s = \frac{1}{\frac{1}{D_s} - \frac{1}{R} \left(\frac{1}{D_f} + \frac{1}{C_f} \cdot \frac{\rho_{0f}}{\rho_f} \right)} \cdot \frac{\rho_{0s}}{\rho_s}, \quad (1)$$

式中, C_f , C_s 分别为飞片和样品的欧拉纵波声速; D_f , D_s 分别为飞片和样品的冲击波速度; ρ_{0f} , ρ_f 分别为飞片的初始和冲击态密度; ρ_{0s} , ρ_s 分别为样品

的初始和冲击态密度; R 为追赶比, $R = h_{\max}/h_f$, h_f 为飞片厚度. 最大样品厚度 h_{\max} 通过测量多块台阶样品的厚度 h_{si} 和对应的速度平台宽度 dt_i , 再对 (h_{si}, dt_i) 数据组进行线性拟合、外推至 $dt = 0$ 求得.

实验采用激光干涉测速技术精密测量飞片碰靶速度 w_f 和样品冲击波速度 D_s , 利用阻滞法^[15] 获取样品和飞片的高精度冲击 Hugoniot 参数; 通过对已有的无氧铜飞片声速数据做非线性拟合和内插获得实验压力下的飞片声速 C_f ; 通过优化台阶样品分布、提高界面速度剖面质量来提高追赶比 R (或最大样品厚度 h_{\max}) 的精度. 在此基础上, 便可以获得样品的高精度冲击 Hugoniot 参数和高压声速.

3 实验结果与分析

3.1 实验基本参数

实验采用的 Bi 样品原材料来自东方铝业, 由粉末冶金工艺加工而成, 纯度为 99.99%, 实测密度为 9.78 g/cm^3 . 各台阶样品的名义直径为 $\Phi 16$ —

20 mm, 名义厚度为2.3—4.5 mm, 样品表面粗糙度小于0.2 μm, 平行度小于0.01 mm. 每块样品的后界面均紧贴一块[100]单晶LiF窗口, 其名义厚度为10 mm. 无氧铜飞片名义厚度为1.8—2.1 mm, 名义直径为56 mm, 表面粗糙度小于0.2 μm, 平行度小于0.01 mm. 经估算, 在上述尺寸下, 各台阶样品的界面速度剖面平台区可确保不受边侧稀疏影响.

共进行10发动态实验, 主要参数见表1.

飞片碰靶速度由PDV探针(photon Doppler velocimetry)^[16]透过样品外侧的通光孔直接测量, 其相对扩展不确定度小于0.5%. 样品冲击波速度由 $D_s = dh_s/(t_1 - t_0)$ 计算获得, 其中 dh_s 为台阶样品厚度差, t_0 和 t_1 分别为冲击波到达样品前、后

界面的时刻; t_0 由第一台阶样品上多路PDV探针测得的基准时刻 t_{0i} 进行平面拟合得到, t_1 由布置在厚度最大的台阶样品/窗口界面中心处的DISAR探针直接测量. 对实验碰靶波形评估表明, 火炮加载下飞片碰靶姿态优良, 飞片变形极小且以倾斜为主(倾角 $<0.2^\circ$), 平面拟合得到的 t_0 值的不确定度约3 ns; 由此得到样品冲击波速度 D_s 的相对扩展不确定度 $\sim 1\%$. 由实测的飞片碰靶速度 w_f 和样品冲击波速度 D_s , 再结合无氧铜飞片已知的高精度Hugoniot关系^[17], 由阻滞法可求取样品粒子速度、冲击压力等其余冲击参数, 其中粒子速度和冲击压力的相对扩展不确定度约分别为0.6%和1%.

表1 Bi冲击实验参数汇总
Table 1. Summary of experimental parameters.

编号	飞片厚度 h_f/mm	样品厚度差 dh_s/mm	碰靶速度 $w_f/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	粒子速度 $u_p/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	冲击波速 $D_s/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	Hugoniot 态 声速 $C_s/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	冲击压力 P/GPa
A0521	2.016(±0.05)	2.206(±0.06)	1.281(±0.06)	0.778(±0.005)	2.767 (±0.028)	3.388(±0.128)	21.1 (±0.2)
A0527	2.081(±0.004)	2.027(±0.008)	1.321(±0.007)	0.801(±0.005)	2.784(±0.028)	3.339(±0.112)	21.8 (±0.2)
A0923	1.806(±0.05)	2.216(±0.08)	1.369(±0.07)	0.824(±0.006)	2.866 (±0.032)	3.313(±0.118)	23.1 (±0.2)
A0924	1.812(±0.006)	2.208(±0.009)	1.579(±0.008)	0.932(±0.007)	3.109 (±0.034)	3.346(±0.117)	28.3 (±0.3)
A1230	2.003(±0.005)	2.204(±0.006)	1.110(±0.006)	0.686(±0.005)	2.578 (±0.022)	3.310(±0.103)	17.3 (±0.2)
B0318	1.998(±0.006)	2.162(±0.005)	1.132(±0.006)	0.698(±0.005)	2.606 (±0.023)	3.396(±0.115)	17.8 (±0.2)
B0912	2.100(±0.005)	1.985(±0.005)	1.211(±0.006)	0.739(±0.006)	2.704 (±0.026)	3.370(±0.117)	19.6 (±0.2)
B0920	2.091(±0.006)	1.989(±0.006)	1.165(±0.006)	0.714(±0.005)	2.658 (±0.024)	3.454(±0.114)	18.6 (±0.2)
B0923	1.802(±0.006)	2.197(±0.006)	1.541(±0.008)	0.912(±0.007)	3.072 (±0.030)	3.291(±0.112)	27.4 (±0.3)
B1219	1.801(±0.007)	2.199(±0.006)	1.504(±0.008)	0.893(±0.006)	3.19 (±0.033)	3.308(±0.116)	26.5 (±0.3)

3.2 Bi的冲击波速度粒子速度关系

图2给出了Bi材料在 $u_p = 0.5\text{—}2$ km/s范围内的低压冲击Hugoniot数据汇总, 包括了本文结果及已有文献数据, 横坐标和纵坐标分别为粒子速度 u_p 和冲击波速度 D_s . 其中, “▶”和“◇”分别为文献[13]和文献[18]给出的结果; “●”则为本文实验结果, 它弥补了17—28 GPa压力区内Bi冲击参数的欠缺, 有助于更准确地确定熔化前(含固液混合区)Bi的冲击Hugoniot关系. 可以看出, Bi在低压区的冲击波速度(D_s)-粒子速度(u_p)关系具有明显的非线性特征. 若采用文献[13]给出的两段式分段线性函数描述, 则拟合线相对于本文 $u_p = 0.69\text{—}0.93$ km/s范围的实验数据存在一定

偏离. 为此, 本文对Bi材料低压区的冲击 $D_s\text{--}u_p$ 关系采用(2)式给出的二次多项式拟合曲线进行了修正; 该曲线与实验数据整体符合更好(见图2实线), 能更好地描述固液混合相区的材料冲击响应.

$$D_s = 0.401 + 3.879u_p - 0.876u_p^2, \quad (2)$$

(2)式的适用范围为 $u_p = 0.5\text{—}1$ km/s. 更高压力区(液相)的冲击关系采用 $D_s = 1.731 + 1.599u_p - 0.056u_p^2$ 可较好地描述(图2虚线). $D_s\text{--}u_p$ 关系的这种非线性特征在Ce^[8]、Fe^[18]等部分材料中同样存在. 对Bi而言, 材料在(2)式所覆盖的压力区发生了冲击熔化(见3.3节的声速数据分析), 冲击 $D_s\text{--}u_p$ 关系的这种非线性特征可能与材料冲击熔化具有一定关系.

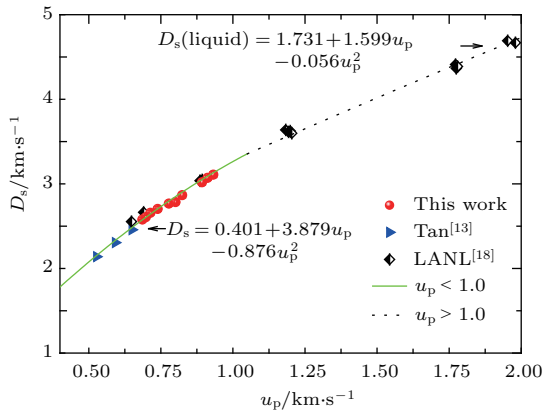


图2 Bi的冲击波速度(D_s)-粒子速度(u_p)关系
Fig. 2. The relation between shock wave speed (D_s) and particle velocity (u_p) for Bismuth.

3.3 Bi在固-液混合相区的声速软化规律及速度剖面特征

图3为不同加载压力下测得的典型的台阶样品/LiF窗口界面速度剖面,对应的加载压力分别为18.6 GPa(见图3(a))和27.4 GPa(见图3(b)).图中从左到右的6个速度剖面分别代表6个厚度依次增加的样品,其中1#,2#样品厚度差约0.9 mm,其余序号相邻样品的厚度差约0.3 mm.

由实验原理可知,台阶法测量声速的一个关键内容便是获得使追赶稀疏波波头恰好在样品/窗口界面赶上初始加载波时的追赶比 R .实验时,先由图3所示的界面速度剖面测量结果得到具有不同厚度 h_s 的台阶样品的速度平台宽度 dt ,即初始冲击加载波和追赶卸载波波头到达样品/窗口界面的时间差;然后基于自相似原理采用线性拟合外推得到 $dt = 0$ 时的最大样品厚度 h_{max} ,进而得到追赶比 R , $R = h_{max}/h_f$ (h_f 为飞片厚度).由于实验的精密控制,本文采用多台阶样品布局得到的 $dt-h_s$ 关系线性较好,线性相关性 $>99.8\%$,这为获得高精度声速数据奠定了重要基础.

利用由上述方法得到的追赶比 R ,再结合表1所给的实测弹速、Bi材料冲击Hugoniot参数以及无氧铜的高精度冲击Hugoniot关系和声速压力关系,便可计算得到不同冲击压力下Bi材料的声速.图4给出了10—40 GPa压力区间内Bi材料的声速(C_s)-压力(P)关系.其中,“●”为本次实验数据,压力 P 和声速 C_s 的相对扩展不确定度分别为1%和3%(扩展系数 $k = 2$);“▲”为Tan等[13]的实验数据.可以看出,在10—40 GPa以内Bi材

料的声速-压力关系呈现出明显的三段式特征,与材料在该压力区间先后处于固相、固液混合相、液相对应.

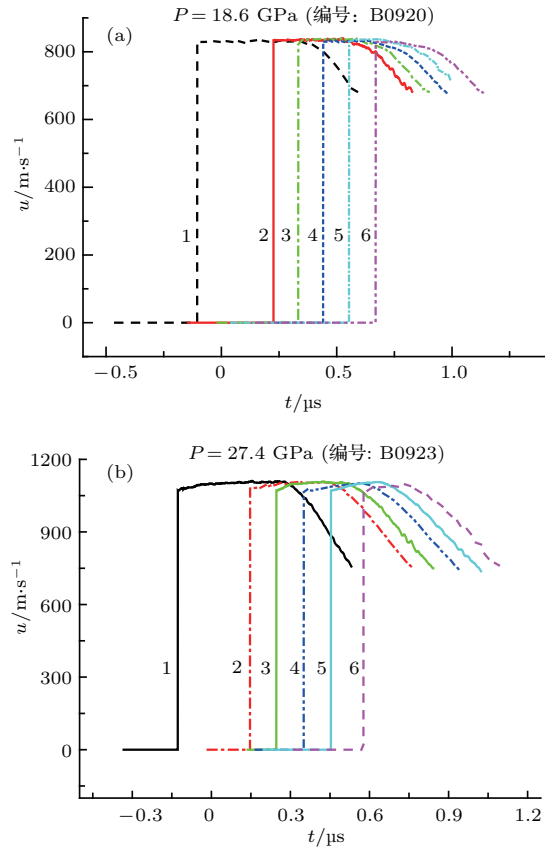


图3 典型的多台阶Bi样品速度剖面测量结果 (a) $P = 18.6$ GPa (实验编号: B0920, 从左向右样品厚度依次增加); (b) $P = 27.4$ GPa (实验编号: B0923, 从左向右样品厚度依次增加)

Fig. 3. Typical velocity profiles between the Bismuth and LiF window at different shock pressure: (a) $P = 18.6$ GPa (exp. No. B0920); (b) $P = 27.4$ GPa (exp. No. B0923); where the thickness of Bismuth sample is successively increased from left to right.

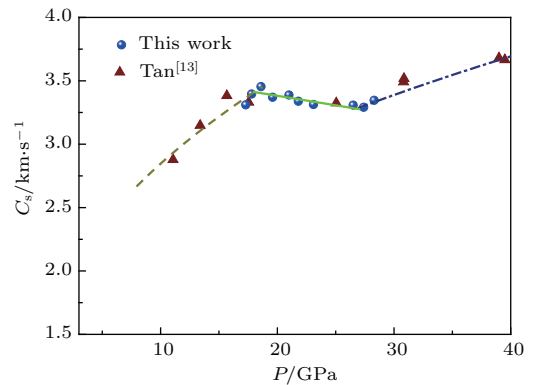


图4 Bi的声速(C_s)-压力(P)关系
Fig. 4. Relation between the sound speed (C_s) and shock pressure (P) for Bismuth.

本文重点关注 Bi 材料的固-液相变区间. 材料在未发生冲击熔化前, 其纵波声速往往随着冲击压力的增加而逐渐增大, 材料逐渐强化 (模量增大). 进入冲击熔化时, 其纵波声速将随着冲击压力的增大而逐渐减小, 表现出强度软化效应 (剪模量减小). 从图 4 的声速数据可以看出, 冲击加载下 Bi 由固相进入液相的起始压力约 18 GPa. 当冲击压力增大至约 27.4 GPa 时, 冲击熔化完成, 纵波声速演化为体波声速 (材料熔化导致剪模量为零), 与高压液相区的体波声速走势趋为一致. 此后, 卸载波将以体波声速传播, 并随着冲击压力的增大而增大. 上述结论与文献 [13] 和文献 [19] 分别给出的实验和理论估算一致.

从图 4 中 18—27.4 GPa 混合相区内的声速压力数据可以看出, Bi 在该固液混合相区的纵波声速软化规律可以近似采用线性衰减函数进行描述. 线性拟合得到的近似方程为

$$C_s = 3.682 - 0.015p, \quad (3)$$

其中压力 P 和声速 C_s 的单位分别为 GPa, km/s.

此外, 对 Bi 材料在 10—18 GPa 固相区、27.4 GPa 以上液相区等另外两个压力区间的现有声速数据进行拟合, 得到相应区域的声速近似关系分别为 $C_s = 1.196 + 0.522p^{1/2}$ ($10 \text{ GPa} < p < 18 \text{ GPa}$), $C_s = 1.422 + 0.359p^{1/2}$ ($p > 27.4 \text{ GPa}$).

另一方面, Bi 材料在固液混合相区的速度剖面特征也值得关注. 理论上, Bi/LiF 窗口界面速度在冲击波到达后应维持为一平台, 直到来自飞片后界面的追赶稀疏波到达该界面引起粒子速度下降. 从图 3 可以看出, 实验测得的 Bi/LiF 界面速度剖面在不同加载压力下却表现出明显差异. 其中图 3(a) 对应的加载压力 (18.6 GPa) 在熔化起始点附近, 在追赶卸载波到达之前, 速度剖面呈现出与理论预期一致的平台特征; 图 3(b) 对应的加载压力 (27.4 GPa) 在熔化完成点附近, 速度剖面预期的平台段却呈现出随时间缓慢爬升的反常特征. 这种速度平台段缓慢爬升的反常现象出现在加载压力大于 23 GPa 的多发实验中; 自由面速度剖面的辅助监测也显示出相同的规律. 此外, 类似现象在文献 [20] 中也曾被报道.

由于全部实验采用的实验装置及装配工艺、加载技术和测试技术均相同, 而对飞片运动历史及碰靶姿态的监测表明, 飞片在击靶前弹速稳定, 碰靶姿态优良, 因此可以推断这种平台区的异常速度爬

升反映了 Bi 在冲击加载下独特的材料力学响应特性. 初步分析认为, 上述反常剖面特性可能与 Bi 材料非均匀相变成核以及冲击熔化完成的时间尺度较长有关 (数十到数百纳秒 [20]). 一方面, 由于 Bi 材料特殊的粉末冶金工艺导致材料内部存在非均匀分布的初始缺陷, 液相成核点易于在这些缺陷处生成; 再者, Bi 材料的熔化完成时间可能较长, 且固液相转变速率随冲击加载压力增加而呈非线性增长. 上述情况下, 当冲击压力超过熔化起始压力较多时, 液相占比迅速增大, 并在材料内形成多处固相/液相界面, 入射冲击波在 LiF 窗口、Bi 样品内部固相/液相界面之间的来回多次反射导致界面速度逐渐增加, 进而使界面速度剖面平台区出现反常速度爬升现象. 当然, 上述分析有待于进一步的数值模拟验证, 并依赖于合适的相变动力学模型的建立.

4 结 论

本文采用火炮加载技术和基于多台阶样品布局的稀疏追赶原理, 获得了 17.3—28.3 GPa 压力范围内 Bi 的高精度高压声速数据和冲击 Hugoniot 参数, 实验分析了 Bi 材料在熔化区间内的声速软化规律和冲击熔化的非均匀动力学特性. 主要结论如下:

1) Bi 材料在 $u_p = 0.5—1.0 \text{ km/s}$ 低压区的冲击波速度 (D_s)-粒子速度 (u_p) 关系具有明显的非线性特征, 采用二次曲线方程 $D_s = 0.401 + 3.879u_p - 0.876u_p^2$ 得到的拟合曲线与实验数据符合较好, 并能更好地描述固液混合相区的材料冲击响应, D_s-u_p 曲线在该区间的这种非线性特征可能与 Bi 材料发生冲击熔化有关;

2) 声速测量结果确定了 Bi 的冲击熔化压力区间为 18—27.4 GPa, 与已有文献结论一致; 在 10—40 GPa 以内的压力区, Bi 材料的声速-压力关系具有三段式特征, 其中, 在本文所关注的固液混合相区, Bi 材料的声速随压力增加而减小, 两者近似呈 $C_s = 3.682 - 0.015p$ 的线性关系;

3) 在固液混合相区, 实测 Bi/LiF 界面速度剖面的峰值平台段表现出奇特的特征, 随着压力增加出现明显的缓慢爬升, 初步分析认为该现象与 Bi 材料的非均匀熔化动力学行为及熔化完成时间尺度较长有关.

参考文献

- [1] Bancroft D, Peterson E L, Minshall S 1956 *J. Appl. Phys.* **27** 291
- [2] Larson D B 1967 *J. Appl. Phys.* **38** 1541
- [3] Romain J P 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 135
- [4] Asay J R 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 2832
- [5] 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
- [6] Colvin J D, Reed B W, Jankowski A F, Kumar M, Paisley D L, Swift D C, Tierney T E, Frank A M 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 084906
- [7] Gorman M G, Briggs R, McBrid E E, Higginbotham A, Arnold B, Eggert J H, Fratanduono D E, Galtier E, Lazicki A E, Lee H J, Liermann H P, Nagler B, Rothkirch A, Smith R F, Swift D C, Collins G W, Wark J S, McMahon M I 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 095701
- [8] Jensen B J, Cherne F J, Cooley J C, Zhernokletov M V, Kovalev A E 2010 *Phys. Rev. B* **81** 214109
- [9] Yu Y Y, Tan Y, Dai C D, Li X M, Li Y H, Wu Q, Tan H 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 201910
- [10] Hu J B, Zhou X M, Dai C D, Tan H, Li J B 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 083520
- [11] Song P, Cai L C, Tao T J, Yuan S, Chen H, Huang J, Zhao X W, Wang X J 2016 *J. Appl. Phys.* **120** 195101
- [12] Tan Y, Yu Y Y, Dai C D, Tan H, Wang Q S, Wang X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 106401 (in Chinese) [谭叶, 俞宇颖, 戴诚达, 谭华, 王青松, 王翔 2011 物理学报 **60** 106401]
- [13] Tan Y, Yu Y Y, Dai C D, Jin K, Wang Q S, Hu J B, Tan H 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 093509
- [14] Weng J D, Tan H, Hu S L, Ma Y, Wang X 2005 *Sci. Instrum. Rev.* **76** 093301
- [15] Jin F Q 1999 *Introduction to Experimental Equation of State* (2th Ed.) (Beijing: Science Press) p200 (in Chinese) [经福谦 1999 实验物态方程导引 (第二版) (北京: 科学出版社) 第200页]
- [16] Jensen B J, Holtkamp D B, Rigg P A, Dolan D H 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 013523
- [17] Mitchell A C, Nellis W J 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 3363
- [18] Marsh S P 1981 *LASL Shock Hugoniot Data* (California: University of California Press) p23
- [19] Wetta N, Pelissier J L 2001 *Physica A* **289** 479
- [20] Hayes D B 1975 *J. Appl. Phys.* **46** 3438

Softening of sound velocity and Hugoniot parameter measurement for shocked bismuth in the solid-liquid mixing pressure zone*

Li Xue-Mei[†] Yu Yu-Ying Tan Ye Hu Chang-Ming Zhang Zu-Gen Lan Qiang
Fu Qiu-Wei Jing Hai-Hua

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

(Received 2 October 2017; revised manuscript received 9 December 2017)

Abstract

Polymorphic phase transformation and melting under shock wave loading are important for studying the material dynamic mechanical behavior and equation of state in condensed matter physics. In this paper, the accurate Hugoniot parameter and sound velocity of shocked pure bismuth (Bi) in a pressure range of 17.3–28.3 GPa are obtained by using flyer impact method and rarefaction overtaking technique, respectively, and the sound velocity softening trend in shock-induced melting zone and the melting kinetics of Bi are then analyzed. In each experiment, six Bi samples with different thickness values are affected by oxygen-free-high-conductivity copper flyer fired through power gun. Shock wave velocity and particle velocity in Bi are experimentally determined through measuring the impact velocity and shock wave time in the thickest sample by photon Doppler velocimetry (PDV) technique. The velocity profiles on each interface between Bi and lithium fluoride (LiF) window are measured by displacement interferometer system of any reflector (DISAR), and then the sound velocity of shocked Bi is determined using the rarefaction overtaking method. The analyses of our results show that the softening of sound velocity of Bi approximately satisfies the linear relation of $C_s = 3.682 - 0.015p$ in the solid-liquid coexistence zone, and the pressure zone of the solid-liquid coexistence phase is further affirmed to be in a range of 18–27.4 GPa. Additionally, the obtained Hugoniot data for Bi in this paper supply a gap in the pressure zone of solid-liquid mixing phase. The quadratic equation with the expression of $D_s = 0.401 + 3.879u_p - 0.876u_p^2$ can better demonstrate the relation between shock wave velocity and particle velocity than a linear one when the particle velocity lies in a range of 0.5–1.0 km/s, and this non-linear property maybe has a relationship with the shock-induced melting of Bi. Finally, our wave profile measurement of the Bi/LiF interface shows peculiar ramp characteristics in the expected velocity plateau zone in the pressure zone of solid-liquid coexistence phase, which may be associated with both the nonhomogeneous melting kinetics and the long time scale of melting for bismuth.

Keywords: sound velocity, shock-induced melt, wave profile, Bismuth

PACS: 64.70.D-, 64.30.Ef, 62.50.Ef, 62.50.-p

DOI: 10.7498/aps.67.20172166

* Project supported by the Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2015B010106).

† Corresponding author. E-mail: lixuem@caep.cn