

钒的高压声速测量*

俞宇颖[†] 谭叶 戴诚达 李雪梅 李英华 谭华

(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)

(2013年7月27日收到; 2013年9月3日收到修改稿)

采用反向碰撞方法进行了钒冲击实验, 利用激光干涉测速技术对V/LiF窗口界面粒子速度剖面进行测量. 通过对粒子速度剖面的分析获得了32—88 GPa压力范围内钒的高压声速. 实验获得的声速-冲击压力关系在约60 GPa存在间断, 表明钒发生了冲击相变. 相变压力与静高压实验结果及第一性原理计算结果基本一致.

关键词: 声速, 相变, 冲击加载, 钒

PACS: 62.50.EF, 61.50.Ks, 64.70.-p

DOI: 10.7498/aps.63.026202

1 引言

金属钒具有良好的热学、力学特性和化学稳定性, 因此在工业领域有着广泛的应用. 国内外对金属钒的物理、力学等行为已进行了大量研究, 其中高压相变问题是近期的研究热点.

早期的研究通常认为, 金属钒的体心立方晶格结构在极高的压力下都是稳定的^[1]. 2007年, Ding等^[2]利用同步辐射X射线衍射以及金刚石对顶砧技术研究了金属钒的高压相变, 发现在63—69 GPa时, 金属钒将由体心立方结构转变至菱形结构(rhombohedral structure), 这个相变在以前的实验中从未被报道过. 此后的第一性原理计算进一步证实了该固-固相变的存在^[3,4]. 虽然, 金属钒的动态特性研究也早有开展, 但目前尚未观察到冲击加载下该相变的存在. Al'tshuler等^[5]开展了钒的冲击绝热线测量, 发现钒在约183 GPa处的冲击波速度-粒子速度的斜率发生拐折, 曾认为是发生了冲击相变. 但此后McQueen等^[6]和Gather^[7]的实验结果证实冲击绝热线的拐折并不存在. 此外, 声速作为判断材料发生固-固相变和

固-液相变的重要参量^[8], 冲击压缩下钒的高压声速测量也有开展. Dai等^[9]应用光分析法获得了钒在154—250 GPa冲击压力下的高压声速, 结果表明约225 GPa时钒开始发生冲击熔化, 但在此压力范围内未发现固-固相变特征.

本文采用反向碰撞实验技术^[10], 对纯钒在32—88 GPa冲击压力范围内的声速进行了测量, 并通过分析声速是否发生间断来判断冲击加载下钒固-固相变的存在.

2 实验方法

反向碰撞方法是指将待测样品作为飞片安装在弹托上直接撞击窗口的实验方法, 实验原理如图1所示. 在拉氏坐标下, 当飞片即待测样品以冲击速度 W 与窗口发生碰撞时($t = t_0$), 将在飞片和窗口中分别产生左行冲击波(波速为 D_s)和右行冲击波(波速为 D_w), 并同时使飞片/窗口界面的粒子速度发生突跃. 当飞片中的左行冲击波到达后界面时($t = t_1$)将反射稀疏波, 该稀疏波的波速就是样品材料的冲击压缩下的声速(拉格朗日声速 C_L). 由于稀疏波的传播会导致粒子速度的下降, 因此通

* 国防基础科研项目(批准号: B1520110001)、国家自然科学基金(批准号: 11172281, 11272293)和中国工程物理研究院双百人基金(批准号: ZX01115)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: yuyinyu@21cn.com

通过对碰撞界面粒子速度剖面的测量可以确定该稀疏波到达该界面的时刻 ($t = t_2$).

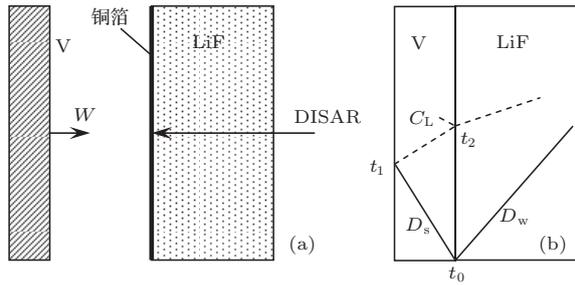


图1 反向碰撞实验原理示意图 (a) 实验装置示意图; (b) 波系作用图

由图 1(b) 波系作用图所示的几何关系可知, 样品材料冲击压缩状态的拉格朗日声速 C_L 为

$$C_L = \frac{D_s h_s}{D_s(t_2 - t_0) - h_s}, \quad (1)$$

式中的 D_s 为样品的冲击波速度; h_s 为样品厚度. 样品的冲击波速度 D_s 由下式计算得到:

$$D_s = C_{0s} + \lambda_s u_s. \quad (2)$$

Gathers 给出了钒的 $C_{0s} = 5.044 \text{ km/s}$ 和 $\lambda_s = 1.242$ [7]. 根据实验测得的冲击速度 W , 可以由阻抗匹配法[11] 计算得到粒子速度 u_s 、冲击压力 P 及冲击压缩密度 ρ .

此外, 在反向碰撞条件下, 样品的冲击波速度 D_s 及对应粒子速度 u_s 也可以由下式直接计算得到:

$$D_s = \frac{\rho_{0w} D_w u_w}{\rho_{0s}(W - u_w)}, \quad (3)$$

$$u_s = W - u_w, \quad (4)$$

式中 ρ_{0s} 和 ρ_{0w} 分别为样品和窗口材料的初始密度; u_w 为碰撞后平衡状态下窗口材料的粒子速度 (对

应飞片/窗口界面粒子速度剖面平台区); D_w 为窗口材料冲击波速度. 由 (3) 和 (4) 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 和飞片/窗口界面粒子速度 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 .

在获得拉格朗日声速 C_L 的基础上可以得到欧拉声速 C_E :

$$C_E = \frac{\rho_{0s}}{\rho} C_L, \quad (5)$$

其中 ρ_{0s} 为样品材料的初始密度. 并通过分析欧拉声速-冲击压力关系是否发生间断可以判断相变的存在.

实验纯钒平均密度约 6.104 g/cm^3 , 样品加工成 $\phi 28 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 表面抛光处理, 平行度 $2\text{--}5 \text{ }\mu\text{m}$. 实验采用 $\phi 28 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 单晶 LiF 为窗口, 密度 2.638 g/cm^3 . 碰撞界面粒子速度剖面采用单点 DISAR (displacement interferometer system for any reflector) 进行测量[12]. 为了提高测试界面对 DISAR 系统入射光的反射效率, 窗口光学反射面镀有 $1 \text{ }\mu\text{m}$ 的铜膜. 此外, 为了避免前冲气体对测试的干扰, 窗口光学反射面贴有 $8 \text{ }\mu\text{m}$ 厚铜箔. 由此实验测得的碰撞界面粒子速度剖面可以确定 t_0 和 t_2 时刻以用于 (1) 式中的声速计算. 弹丸冲击速度 W 采用磁测速技术进行测量.

3 实验结果与分析

在中国工程物理研究院流体物理研究所 $\phi 30$ 二级轻气炮上进行了 5 发钒的反向碰撞实验, 冲击速度 $2.493\text{--}5.359 \text{ km/s}$, 对应于纯钒的冲击压力为 $31.8\text{--}88.2 \text{ GPa}$. 详细实验参数列于表 1 中.

表1 实验参数及实验结果

实验编号	样品厚度 h_s/mm	样品密度 $\rho_{0s}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	冲击速度 $W/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	冲击压力 P/GPa	欧拉声速 $C_E/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$
RL1	2.998	6.106	2.493	31.8	7.343
RL2	2.995	6.104	3.750	54.0	7.547
RL3	2.997	6.103	4.082	60.5	7.499
RL4	2.997	6.103	4.936	78.6	7.849
RL5	2.998	6.103	5.359	88.2	7.969

DISAR 测得的 V/LiF 窗口界面粒子速度剖面如图 2 所示, 该速度剖面已根据李雪梅等[13] 给出的 LiF 窗口折射率变化公式进行了修正. 图中 t_0 为

钒飞片碰撞 LiF 窗口时刻, t_2 为钒飞片卸载稀疏波到达 V/LiF 窗口碰撞界面时刻. 卸载剖面可以看到明显的弹-塑性特征, 表明钒在 $31.8\text{--}88.2 \text{ GPa}$ 冲

击压力范围内还是处于固态.

对图2所示的粒子速度剖面平台区 (t_0-t_2) 进行了统计平均得到了 u_w . 在此基础上, 应用(3)和(4)式计算得到了钒在上述冲击压力下的冲击波速度 D_s 及对应粒子速度 u_s . 计算时单晶 LiF 窗口的密度 $\rho_{0w} = 2.638 \text{ g/cm}^3$, 冲击波关系式 $D_w = 5.148 \text{ km/s} + 1.353u_w$ [14]. 5发实验给出的冲击波速度-波后粒子速度关系如图3所示, 图中同时包含了 McQueen 等 [6], Gathers [7] 和 Chhabildas 等 [15] 给出的实验数据. 从图3可以看出, 本文的实验结果与已发表的实验数据具有较好的一致性, 并且与 Gathers [7] 给出的线性拟合关系 $D_s = 5.044 \text{ km/s} + 1.242u_s$ 符合得很好. 这表明本文所用纯钒材料的冲击压缩特性与国外基本一致, Gathers 给出的线性关系同样适用本文的纯钒材料.

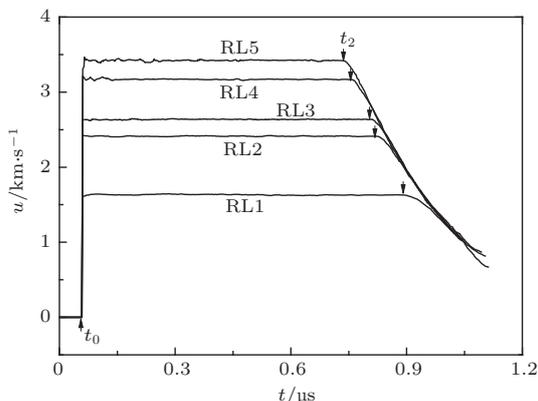


图2 DISAR 测得的 V/LiF 窗口界面粒子速度剖面

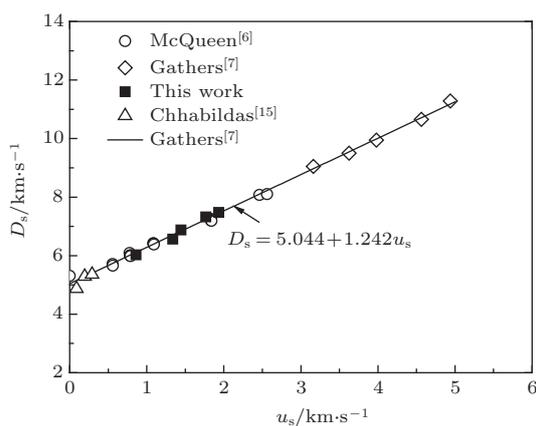


图3 钒冲击波速度-粒子速度关系

在上述方法中, 冲击波速度和对应粒子速度的不确定度来源于飞片速度、界面粒子速度和窗口材料 Hugoniot 参数. 在较低冲击压力下, 由(3)和(4)式计算得到冲击波速度和粒子速度具有较高精度:

不确定度分别为约2% 和约1% [11]. 但在高压情况下, 目前窗口材料折射率修正参数的缺乏, 尚无法对上述方法获得的冲击波速度和粒子速度进行全面评估. 因此, 本文采用阻抗匹配法来计算钒的冲击波速度并用于声速计算.

根据图2所示的粒子速度剖面给出的特征时刻 t_0 和 t_2 , 结合阻抗匹配法来计算得到的冲击波速度及冲击压缩密度, 由(1)和(5)式计算得到了 31.8—88.2 GPa 冲击压力范围内钒的欧拉声速, 计算结果列于表1中. 根据胡建波等 [9] 的分析, 本文采用的实验方式和数据处理方法获得的钒声速数据不确定度约为2%.

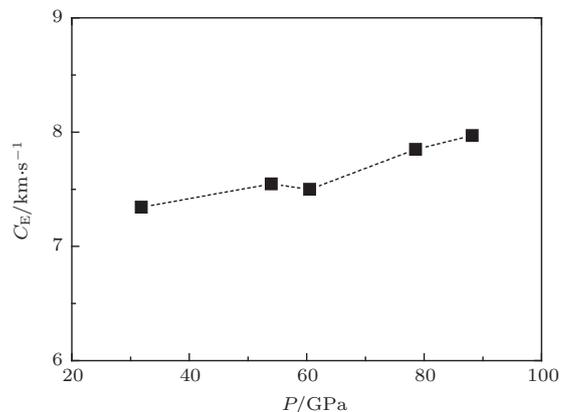


图4 钒的高压声速随冲击压力的变化

纯钒的欧拉声速随冲击压力的变化如图4所示. 从图中可以看到, 在 60.5 GPa 冲击压力下的声速-压力关系存在一定程度的间断变化, 初步表明钒发生了相变. Ding 等 [2] 静高压实验确定的体心立方结构转变至斜方六面体结构的相变压力为 63—69 GPa, Verma 和 Modak [3] 以及 Qiu 和 Marcus [4] 采用第一性原理计算的相变压力分别为 60 GPa 和 65 GPa. 上述相变压力与本文声速间断对应压力基本一致, 由此进一步确认冲击加载下钒在约 60 GPa 附近发生了结构相变. 该相变特性未能在图3所示的冲击波速度-粒子速度线性关系中体现, 表面钒的体心立方结构转变至斜方六面体结构时体积变化很小.

4 结 论

本文进行了 32—88 GPa 压力范围内钒的反向碰撞实验, 采用 DISAR 技术对 V/LiF 窗口界面粒子速度剖面进行测量, 对粒子速度剖面的分析获得了钒的高压声速. 根据静高压实验和第一性原理计

算结果, 推断 60 GPa 处的声速间断表明钒发生了从体心立方到斜方六面体的固-固相变。

感谢靳开诚、叶素华、王为、向曜明、方茂林、陈志云、康强、黄金和王青松等在实验中的帮助。

参考文献

- [1] Moriarty J A 1992 *Phys. Rev. B* **45** 2004
- [2] Ding Y, Ahuja R, Shu J, Chow P, Luo W, Mao H K 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 085502
- [3] Verma A K, Modak P 2008 *EPL* **81** 37003
- [4] Qiu S L, Marcus P M 2008 *J. Phys.: Condens. Matter* **20** 275218
- [5] Al'thuler L V, Bakanova A A, Dudoladov I P 1968 *Sov. Phys. JEPT* **26** 1115
- [6] McQueen R G, Marsh S P, Taylor J W 1970 *High Velocity Impact Phenomena* (New York: Academic Press) p293
- [7] Gathers G R 1986 *J. Appl. Phys.* **59** 3291
- [8] Yu Y Y, Tan H, Hu J B, Dai C D 2008 *Chin. Phys. B* **17** 264
- [9] Dai C D, Jin X G, Zhou X M. 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 3064
- [10] Hu J B, Tan H, Yu Y Y, Dai C D, Ran X W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 405 (in Chinese)[胡建波, 谭华, 俞宇颖, 戴诚达, 冉宪文 2008 物理学报 **57** 405]
- [11] 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]
- [12] Weng J D, Tan H, Wang X, Ma Y, Hu S L, Wang X S 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 111101
- [13] Li X M, Yu Y Y, Zhang L, Li Y H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 156202 (in Chinese)[李雪梅, 俞宇颖, 张林, 李英华 2012 物理学报 **61** 156202]
- [14] Marsh S P 1980 *LASL Shock Hugoniot Data* (Berkeley: University of California Press) p296
- [15] Chhabildas L C, Hills C R 1985 *Metallurgical Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena* (New York: Marcel Dekker) p429

Sound velocities of vanadium under shock compression*

Yu Yu-Ying[†] Tan Ye Dai Cheng-Da Li Xue-Mei Li Ying-Hua Tan Hua

(National Key Laboratory of Shock Waves and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 27 July 2013; revised manuscript received 3 September 2013)

Abstract

A series of reverse-impact experiments is performed on vanadium at peak shock pressures from 32 GPa to 88 GPa. A displacement interferometer is used to measure the particle velocity profile at the vanadium/LiF window interface. Analysis of these profile provides a measure of sound velocity of vanadium in the Hugoniot state. The transition from body-centered cubic structure to rhombohedral structure phase at ~ 60 GPa is identified by the discontinuity of the sound velocity against shock pressure. This transition pressure is consistent with the data from high pressure diamond anvil cell experiments and first-principle calculations.

Keywords: sound velocity, phase transition, shock compression, vanadium

PACS: 62.50.EF, 61.50.Ks, 64.70.-p

DOI: 10.7498/aps.63.026202

* Project supported by the Defense Industrial Development Program (Grant No. B1520110001), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11172281, 11272293), and Talent Development Project of CAEP (Grant No. ZX01115).

[†] Corresponding author. E-mail: yuyinyu@21cn.com