



## 钒的冲击熔化原位X射线衍射测量研究

华颖鑫 陈小辉 李俊 郝龙 孙毅 王玉峰 耿华运

### *In situ* X-ray diffraction measurement of shock melting in vanadium

Hua Ying-Xin Chen Xiao-Hui Li Jun Hao Long Sun Yi Wang Yu-Feng Geng Hua-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 076201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212065

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212065>

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

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 高压高应变率加载下多晶相变的原位X射线衍射

*In situ* observation of phase transition in polycrystalline under high-pressure high-strain-rate shock compression by X-ray diffraction

物理学报. 2020, 69(24): 246201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200929>

#### 难熔金属钒熔化行为的局域原子结构模拟与分析

Simulation and analysis of melting behavior of local atomic structure of refractory metals vanadium

物理学报. 2020, 69(20): 203601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200185>

#### 晶体X射线劳厄衍射分束特性研究

Beam splitting characteristics of crystal X-ray Laue diffraction

物理学报. 2022, 71(4): 046101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211674>

#### 强场X射线激光物理

High field X-ray laser physics

物理学报. 2021, 70(8): 084101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210096>

#### PS3000-b-PAA5000球形胶束温度效应的原位小角X射线散射技术研究

Temperature dependence of spherical micelles of PS3000-b-PAA5000 studied by in-situ small angle X-ray scattering

物理学报. 2018, 67(4): 048301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172167>

#### 上海光源硬X射线相干衍射成像实验方法初探

Preliminary exploration of hard X-ray coherent diffraction imaging method at SSRF

物理学报. 2020, 69(3): 034102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191586>

## 钒的冲击熔化原位 X 射线衍射测量研究\*

华颖鑫# 陈小辉# 李俊† 郝龙 孙毅 王玉峰 耿华运

(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)

(2021 年 11 月 7 日收到; 2021 年 12 月 12 日收到修改稿)

高压结构与相变研究对理解物质在极端压缩条件下的性质变化和动力学响应行为具有重要的科学价值, 然而部分过渡金属的动/静高压熔化线差异一直是多年来悬而未解的科学难题. 其中动、静高压固-液相界幅值差异最大的是第五副族金属, 以钒最为反常, 至今仍缺乏自洽的物理认识和理解. 本文采用高能脉冲激光驱动的瞬态 X 射线衍射诊断技术, 对冲击压缩下钒的熔化特性进行了研究, 首次获取了冲击压缩下钒在 200 GPa 范围内的晶体结构响应随压力变化的衍射图谱. 研究发现, 冲击压力为 155 GPa 时, 钒仍保持固态 bcc 相; 至约 190 GPa 时转变为液态. 这一结果否定了早期确定的静压熔化线, 与最新的冲击熔化线及高温高压相图符合, 为钒高压熔化线的统一认识提供了新的微观实验证据. 本工作亦可推广至其他材料熔化特性的研究工作中.

**关键词:** 钒, 过渡金属冲击熔化, 原位 X 射线衍射, 高功率激光**PACS:** 62.50.Ef, 64.70.D-, 61.05.cp, 52.38.Mf**DOI:** 10.7498/aps.71.20212065

## 1 引言

固体材料在冲击加载的高温高压条件下失去力学强度转变为液态称为冲击熔化. 冲击熔化是材料动力学特性研究的核心问题之一, 在国防科学、地球科学及能源安全等国家战略领域中具有重要的应用价值. 因此精确熔化线测量一直是国际高压界学者关注的焦点, 它不仅对理解材料高温高压相图十分重要, 更为解释不同的熔化机制理论模型提供了可靠证据. 因此, 极端压缩条件下固-液相变一直是凝聚态物理关注的焦点, 当前通过多种实验手段 (如激光加热的 DAC 实验<sup>[1]</sup>, 冲击压缩温度测量, 冲击压缩声速测量<sup>[2]</sup> 等), 开展了许多过渡金属 (如 V, Fe<sup>[3]</sup>, Ta<sup>[4,5]</sup>, Mo<sup>[6,7]</sup> 等) 的动静高压熔化特性研究, 最令人困惑的是部分过渡金属动高压与静高压固-液相界之间的巨大差异, 对于这些差异

的物理解释也并未达成一致.

其中动/静高压固-液相界差异幅度最大的是第五副族钒和钽及其近邻副族的铌和钨<sup>[7]</sup>. 与许多过渡金属一样, 钒在常温常压下具有稳定的体心立方结构 (bcc), 其在高温高压的作用下, 将发生 bcc-rh-bcc-液相的相变序列<sup>[8-14]</sup>, 并与 Nb 一样, 伴随有剪切模量的压致软化和热致硬化双重反常<sup>[13,15,16]</sup>. 针对材料相结构的变化, 特别是涉及固-液相变时, 通常可以通过热力学状态、力学特性变化及原位结构诊断等方法进行甄别. 在静高压实验方面, 2001 年 Errandonea 等<sup>[1]</sup> 利用激光加热金刚石压砧技术 (LH-DAC) 系统地开展了过渡金属的熔化线测量 (压力范围约 100 GPa, 温度范围约 4000 K), 根据样品表面形貌状态作为熔化判据, 确定了钒在 100 GPa 以内的固-液相界, 实验范围内最大压力 80 GPa 时的熔化温度约为 2700 K. 而在动高压实验中, 同年 Dai 等<sup>[2]</sup> 报道了钒在冲击压缩下的固-

\* 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院 NSAF 联合基金 (批准号: U1730248)、国家自然科学基金 (批准号: 11872056) 和国防科工局稳定支持项目 (批准号: JCKYS2020212014) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: lijun102@caep.cn

液相变行为,通过声速的不连续性变化获得在冲击压力 225 GPa 时发生了部分熔化,对应的熔化温度为  $7800 \pm 800$  K. 在压力-温度 ( $P$ - $T$ ) 相图上,将静高压熔化线及其外推线与冲击实验确定的 Lindemann 等<sup>[1]</sup>熔化线进行对比,发现两者在 200 GPa 时熔化温度差异高达 2 倍 (约 4000 K). 这样巨大的差异,给理论计算的准确性和过渡金属在极端条件下的物理模型建立带来了极大的困难. 许多假设,如诊断技术、加载应变率、力学响应等在静态加载与动态加载实验中的不同,被用来解释这种差异,但实验和理论之间的一致性和可靠性还需要更多可靠实验数据的支持. 2019 年,Errandonea 等<sup>[17]</sup>再次通过 LH-DAC 加载,通过原位 X 射线衍射进行结构诊断,结合固定压力下温度-激光功率平台的测量,获取了新的钒的熔化线,发现较之前给出的 DAC 实验熔化线更高,而较 Dai 等<sup>[2]</sup>通过冲击波实验给出的熔化线更低,在 120 GPa 时,熔化温度约 4000 K. 2020 年 Li 等<sup>[18]</sup>成功将 Fe 在冲击测温实验中获得的熔化线与 LH-DAC 实验熔化线结果统一,消除了动静压熔化线间的差异;同年, Zhang 等<sup>[19]</sup>利用 LH-DAC 与冲击波测温实验和理论计算相结合对钒的熔化线进行研究,发现冲击熔化线与静压熔化线的延长线相吻合,并且与理论计算相符较好,同时与 Errandonea 等<sup>[1]</sup>的静压熔化线也相符较好. 可见,通过实验技术的发展,对于动/静高压熔化线争议有了较为统一的认识,但相关研究工作,尤其是动高压实验仍是基于宏观热力学量诊断来推断冲击熔化的发生. 从微观相态变化来进一步识别,对于深化动高压下材料的熔化特性是十分必要的.

确定冲击加载下物相结构是理解动/静固-液相界差异及其物理机制的基础,而原位地获取微观结构的直接证据更是其中的重点. 自 1972 年 Johnson 等<sup>[20]</sup>对冲击压缩状态下的 X 射线衍射测量技术进行探索,但所获取信号质量不高难以充分分析. 此后,相关技术得到了长足的发展,并获得了巨大的突破. 1999 年 Gupta 等<sup>[21]</sup>将火炮加载与 X 射线衍射测量技术结合,使用 HP 闪光 X 射线源 (脉冲为 50—90 ns) 结合 CCD 探测系统记录衍射信号,并利用靶面上的 PZT 探针触发来控制火炮加载与 X 射线光源的时间同步,获得了冲击加载下的 LiF 单晶晶格响应行为. 同年, Kalantar 等<sup>[22]</sup>将激光冲击加载与 X 衍射测量技术结合,以

八路 Nova 激光烧蚀靶对进行冲击加载,另两路指向金属背光靶产生 X 射线源,采用条纹相机进行原位 X 射线衍射测量,获取了 Si(111) 冲击加载下的晶格变化信息. 并且 Kalantar 等<sup>[23]</sup>利用该技术首次观测到单晶铁的冲击加载下  $\alpha \rightarrow \epsilon$  结构相变,这标志着极端条件下材料相结构转变从此可以由直接证据进行验证,引发了相关研究的热潮<sup>[24–26]</sup>. 近年来,国内的相关技术也得到了重视与发展,采用激光进行冲击加载,利用泵浦-探测技术进行冲击加载与 X 射线源的时序控制,并使用 IP 成像板记录衍射图像,在一发实验中实现静态与动态衍射信号的同时获取. 目前已实现了单晶材料<sup>[27]</sup>与多晶材料<sup>[28]</sup>的冲击加载下原位 X 射线衍射测量,证明了该技术路线的可行性. 因此本研究采用高功率激光驱动结合瞬态 X 射线衍射技术,分别选择原有静压熔化线上线下的压力点,获取了冲击加载下的原位物相结构信息,结合冲击 Hugoniot 结果,获取  $P$ - $T$  相图上不同热力学状态点对应的物相结构信息,了解冲击加载至熔化线附近区域可能的相结构变化,对前人报道的差异进行确认和验证.

## 2 实验方法

本文通过纳秒高功率激光装置驱动样品进行冲击加载,产生高温高压的物质状态,利用同时产生的超短超强 X 射线源进行瞬态 X 射线衍射诊断,原位获取冲击加载状态下样品的物相结构. 瞬态 X 射线衍射实验采用透射式衍射,针对多晶样品开展,结合宏观热力学量测量,以确定冲击至不同压力、温度状态时的物相结构.

多晶样品动态加载 X 射线衍射实验 (dynamic X-ray diffraction, DXRD) 冲击加载方式与单晶实验相同,与单晶材料动态晶格响应测量实验方法<sup>[27]</sup>有所不同的是,多晶材料原位 X 射线衍射实验的核心设计采用了透射式衍射技术,结合全光波双光源混频测速技术 (DLHV)<sup>[29]</sup>,实现了速度剖面、晶体结构的宏-微观信息同时获取,建立的实验靶装置及测试系统如图 1 所示. 实验中样品采用多层结构见图 1(b),准直孔由高原子序数钽箔制成,厚度为 100  $\mu\text{m}$ ,孔径为 300  $\mu\text{m}$ . 样品箔前段粘贴聚酰亚胺 (Polyimide, PI) 烧蚀层,两者之间用金箔作为热屏蔽层,防止样品被激光等离子体产生的热电子加热. 当高功率激光直接辐照至 PI 表面,

材料被加热并迅速气化, 形成等离子体向真空高速扩散, 在烧蚀面上产生指向样品的强冲击波, 将样品迅速加载到高温高压状态. 样品盒采用高原子序数的钨合金, 以有效屏蔽高亮度的本底辐射 (包含 X 射线、 $\gamma$  射线和电子束等).

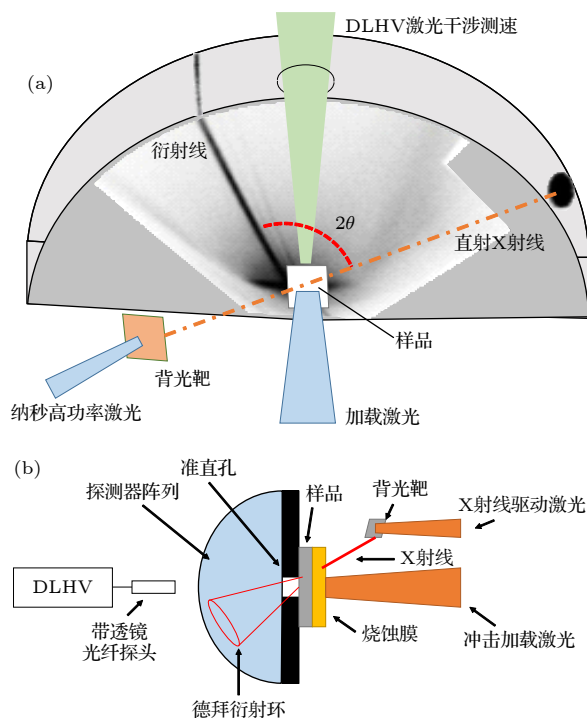


图 1 基于高功率激光驱动的多晶材料瞬态 X 射线衍射诊断技术实验靶装置结构及测试系统布局示意图

Fig. 1. The sketch of experimental setup for *in situ* X-ray diffraction of shock compressed polycrystalline.

由于样品后端面未添加窗口, 因此从 DLHV 技术获取的样品自由面速度历史可近似得到样品中的真实粒子速度 ( $u_p = 1/2 u_f$ ,  $u_p$  为真实粒子速度,  $u_f$  为自由面速度). 样品中的冲击压力可由已知材料 Hugoniot 关系计算获得:

$$u_s = C_0 + \lambda u_p,$$

$$P = \rho_0 u_s u_p,$$

金属钒的 Hugoniot 参数分别为:  $\rho_0 = 6.105 \text{ g/cm}^3$ ,  $C_0 = 5.044 \text{ km/s}$ ,  $\lambda = 1.242$ .

实验中利用高功率激光轰击背光靶金属钒箔, 产生热等离子体, 金属离子退激产生高亮度、准单色的超短、超强脉冲 X 射线源用于原位 X 射线衍射诊断. 特征 X 射线能量由背光靶材料决定, 见图 2. 背光靶距离样品约 28 mm, 与样品被加载面法线呈  $45^\circ$ , X 射线穿过准直孔与样品, 当满足布拉格条件时发生 X 射线衍射, 其诊断采用高感光

度 X 光 IP 板进行记录, 前端加上塑料箔及铝箔作为软 X 光屏蔽层. 加载激光与诊断激光的时间同步性需要通过实验物理设计完成, 利用理论预估加载激光对应的冲击速度, 结合样品厚度得到冲击波渡越时间, 只要在冲击波未抵达样品后界面时刻进行诊断均可获取有效衍射信号. 在实验结束后, IP 板经扫描仪扫描得到 X 射线衍射图像, 根据系统结构将二维衍射图像转化为一维 X 射线衍射曲线, 并通过 XRD 精修获得样品在对应热力学状态下的晶体结构及晶格压缩度等信息.

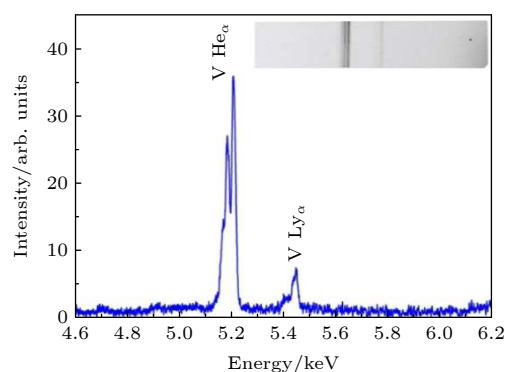


图 2 平面晶体谱仪测得激光驱动钒箔产生的 X 射线源能谱

Fig. 2. The X-ray spectrum of vanadium foil driven by laser were measured by crystal spectrometer.

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 静态衍射图相

实验在神光 III 原型装置上进行, 通过第九路激光 (激光波长 351 nm, 脉冲宽度 3 ns, 能量 500—3000 J) 驱动样品产生强冲击波; 当冲击波阵面传至有效衍射厚度区域时, 四束强激光 (激光波长 351 nm, 脉冲宽度 1 ns, 能量 800 J/束  $\times$  4 束) 聚焦驱动金属钒箔产生 X 射线源. 此刻状态下样品钒的微观原子结构所对应的衍射图像被 IP 成像板记录, 后续实验数据处理分析通过坐标变换将衍射图像转换到  $2\theta - \phi$  空间, 并进一步沿  $\phi$  方向积分得到常规的 X 射线衍射曲线.

实验中钒薄膜样品与钒背光靶均采用尺寸为  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  厚度为  $25 \mu\text{m}$  的多晶材料 (Goodfellow 公司, 纯度为 99.8%). 图 3 所示为无冲击载荷下 (静态样品) 多晶钒 X 射线衍射图谱, 图 3(a) 和图 3(b) 显示实测结果 (含钒样品和钒准直孔的谱线) 与实验前数值模拟的衍射图像吻合很好, 能够得



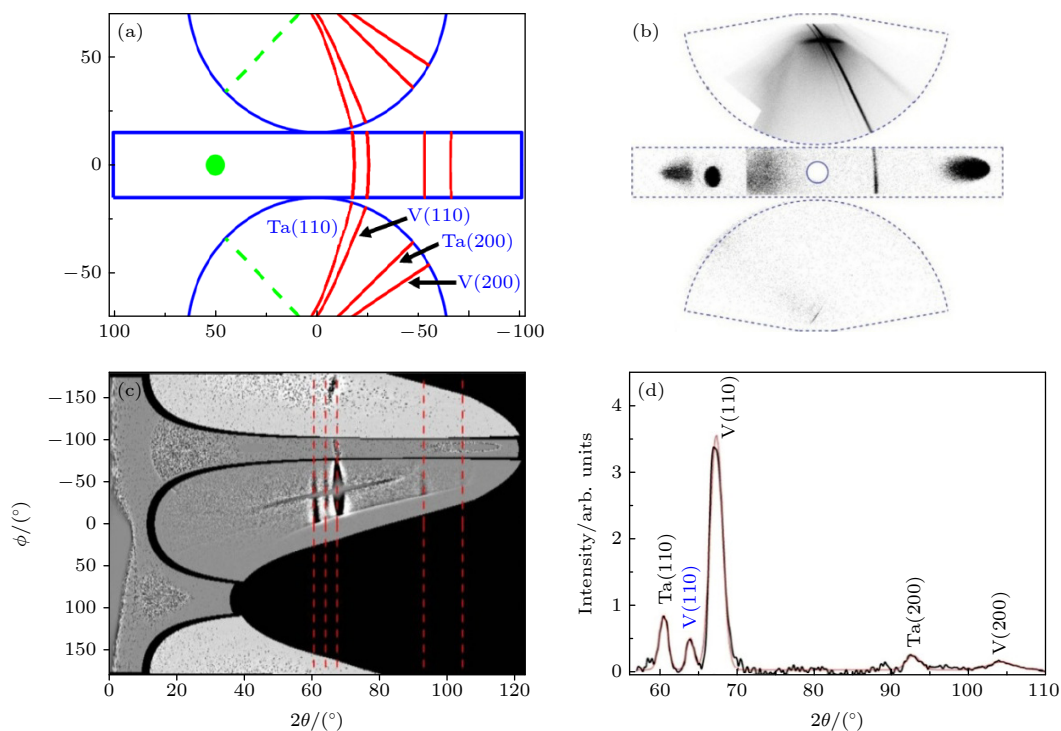


图3 无冲击载荷(静态样品)下多晶钒X射线衍射图谱 (a)数值模拟计算结果; (b)IP板实测图谱; (c)转换至 $2\theta$ - $\varphi$ 空间的衍射图像; (d)沿 $\varphi$ 方向积分的X射线衍射谱线, 图中红色虚线为各衍射峰的理论位置

Fig. 3. The X-ray diffraction image of un-shocked crystalline vanadium: (a) the result of numerical simulation; (b) the original image recorded by image plates; (c) X-ray data projected into  $2\theta$ - $\varphi$  space; (d) the one-dimensional X-ray diffraction pattern, the red dashed lines represent the theoretical position of diffraction peaks.

到 $(110)_{\text{bcc}}$ 和 $(200)_{\text{bcc}}$ 晶面的衍射线. 同时钽 $(110)_{\text{bcc}}$ 和 $(200)_{\text{bcc}}$ 晶面的衍射峰位置在动态加载过程中因钽未受到冲击压缩而保持固定不变, 可作为动态实验中衍射探测器角度校准的参考基线. 从图3中也可看出, 实验获取了较好信噪比的衍射谱线, 屏蔽了激光等离子体产生的高亮度、宽能谱的本底辐射(主要包含X射线和电子束), 由此验证了本实验设计空间布局、X射线屏蔽及防护的有效性.

### 3.2 冲击衍射图相

在获取静态衍射图相基础上, 通过调整第九路激光能量强度, 获取了多个较高冲击压力状态下多晶钒的X射线衍射图谱. 图4所示为冲击压力61.7 GPa多晶钒的动态衍射谱线. 根据实验诊断的泵浦-探测方式, 衍射信号对应于冲击波阵面传至有效衍射厚度区域时的晶体结构, 同时包含了波阵面前的未压缩区和波阵面后的压缩区. 从图4不难看出, 相比于静态样品衍射图谱, 除了原有未压缩的钒 $(110)_{\text{bcc}}$ ,  $(200)_{\text{bcc}}$ 晶面和钽 $(110)_{\text{bcc}}$ 晶面衍射峰之外, 该压力下在 $2\theta = 74.6^\circ$ 处新增了一条衍射峰且谱线存在较明显的展宽特征(图4中红色

箭头指示处). 首先假设钒在当前高温高压条件下依然保持体心立方(bcc)结构不变, 那么新衍射峰则对应于61.7 GPa下钒 $(110)_{\text{bcc}}$ 晶面. 同时基于冲击压缩前、后 $(110)_{\text{bcc}}$ 晶面衍射角度变化, 计算得到钒高压下密度并结合DLHV计算所得样品压力得到实验获取的材料压缩特性状态, 与钒的Hugoniot曲线比较, 符合较好(见图5), 确认了冲击加载至该压力下的多晶钒仍为BCC结构, 未发生相变.

图6给出了更高冲击压力下多晶钒的动态X射线衍射图谱, 3个压力点分别为187.3 GPa, 197.6 GPa和253.7 GPa. 容易观察到随着冲击压力的增大, 衍射线谱的信噪比变差: 1) 冲击压力为187.3 GPa时, 能够较清晰获取参考基线——钽 $(110)_{\text{bcc}}$ 和 $(200)_{\text{bcc}}$ 晶面的衍射峰, 钒的衍射线极为微弱; 2) 冲击压力为197.6 GPa时, 除了钽的基准衍射线之外, 原有钒的衍射线呈现为片状曝光区域; 3) 冲击压力为253.7 GPa时, 在强冲击条件下, 加载激光与物质相互作用产生高额的本底. 另外高压条件下样品衍射效率显著下降, 因此所有衍射线均无法有效获取. 此外, 获取了冲击

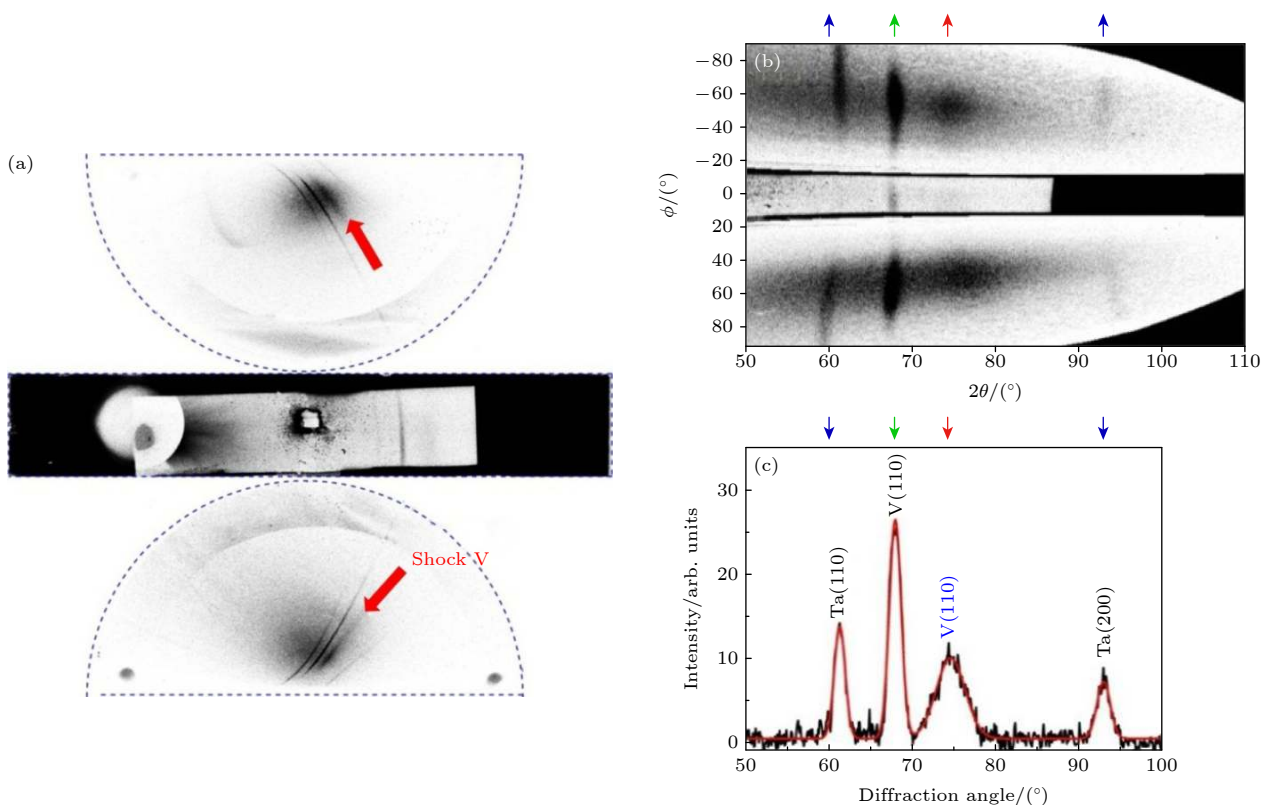


图 4 冲击压力 61.7 GPa 下获得的钒原位衍射图谱 (a) IP 板实测图谱, 新增衍射峰见红色箭头所示; (b) 转换至  $2\theta$ - $\phi$  空间的衍射图像; (c) 沿  $\phi$  方向积分后的 X 射线衍射谱线.

Fig. 4. The *in situ* X-ray diffraction images under 61.7 GPa: (a) the original image recorded by image plates, the new diffraction peak is indicated by the arrow; (b) X-ray data projected into  $2\theta$ - $\phi$  space; (c) the one-dimensional X-ray diffraction pattern.

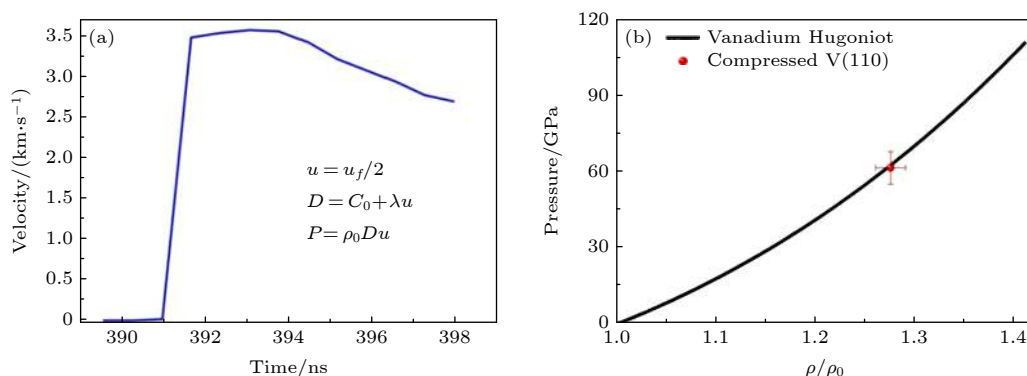


图 5 原位 X 射线衍射给出的密度与自由面速度波剖面测量结果的比较 (a) 自由面粒子速度剖面, 结合钒的已知 Hugoniot 关系计算出冲击压力、密度; (b) DXRD 衍射数据与压力-密度 ( $P/\rho_0$ ) Hugoniot 曲线的比较

Fig. 5. (a) The particle velocity of free surface; (b) the pressure-density relation calculated by DXRD data compare to vanadium Hugoniot curve.

至 155 GPa 时  $(100)_{\text{bcc}}$  单晶钒的动态衍射谱线 (见图 7), 捕获了  $(002)_{\text{bcc}}$  晶面在冲击压缩前、后的衍射谱线, 表明该压力下钒仍保持 bcc 相结构. 关联上述不同热力学状态点的物相信息, 可以推断在 187.3 GPa 及以上钒衍射线获取的缺失可能对应着非晶态转变, 即冲击熔化的发生.

### 3.3 冲击熔化及相图

进一步将获取的动态 X 射线衍射数据置于相图中 (其冲击温度由状态方程计算得到) 与文献报道的原有动、静高压熔化线进行比较, 如图 8 所示. 分析表明, 在原有静压熔化线下方的固相区域, 冲击加载下获取的动态晶体结构与静高实验结

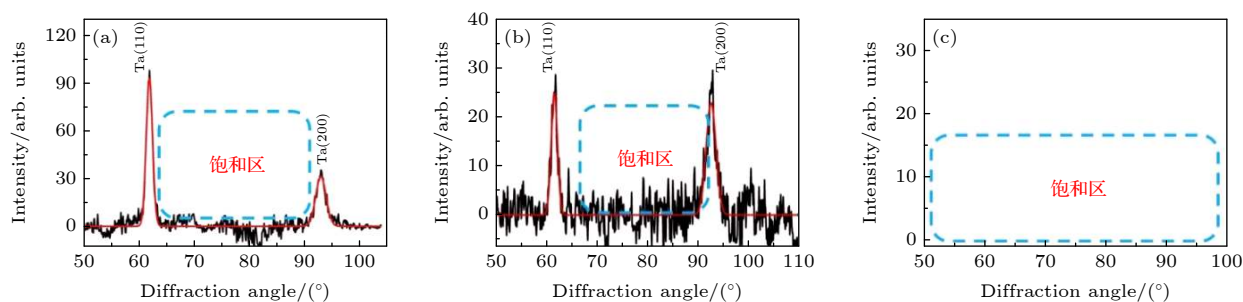


图 6 更高冲击压力下钒的原位衍射图谱 (a) 187.3 GPa; (b) 197.6 GPa; (c) 253.7 GPa

Fig. 6. The *in situ* X-ray diffraction pattern under higher pressure: (a) 187.3 GPa; (b) 197.6 GPa; (c) 253.7 GPa.

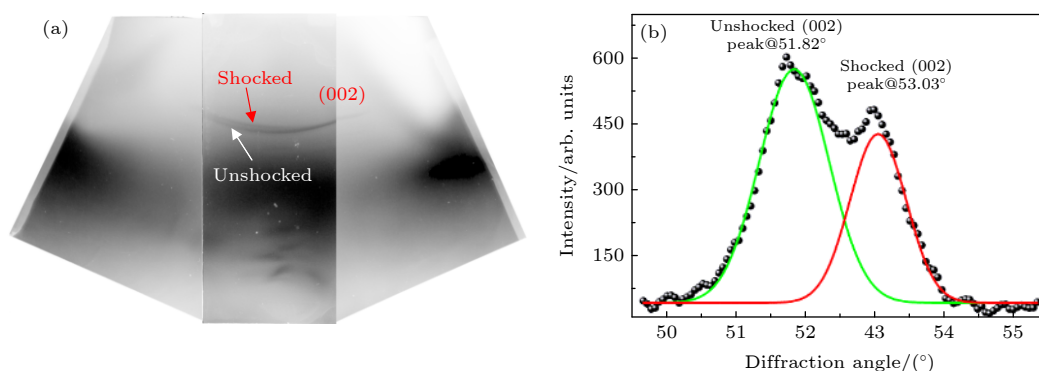


图 7 冲击压缩下 (155 GPa) 单晶钒的衍射数据 (a) 实测衍射图谱; (b) 冲击压缩前后 (002) 晶面谱线

Fig. 7. The X-ray diffraction data of shock compressed single crystal vanadium: (a) The diffraction image; (b) the diffraction data of shocked (002) and unshocked (002).

果一致, 都为 bcc 结构; 但在原有 DAC 熔化线上方、冲击熔化线下方的区域 (155 GPa), 冲击压缩下钒仍保持固态结构 (bcc 结构), 至更高压力后 (187.3 GPa) 可能变为液体非晶态, 基于衍射数据推断固-液相变发生在 190 GPa 附近区域. 对此, 本文首次通过直接证据确定了冲击加载下钒的物相结构, 也清楚地确认出沿冲击路径的固-液相界面明显偏高于原有静压熔化线, 并低于原有的冲击熔化线.

在最近的报道中, Errandonea 等<sup>[17]</sup> 重新进行了 LHDAC 加载下的熔化温度实验测量, 并结合 DFT 计算, 所得的新静压熔化线较原有报道更高, 同时较原有冲击熔化线更低; Zhang 等<sup>[30]</sup> 利用 AIMD 方法, 对 470 GPa 内熔化线进行了计算, 得到新的理论熔化线; Zhang 等<sup>[19]</sup> 利用 LH-DAC 加载技术结合同步辐射 XRD 衍射测量、二级轻气炮动高压加载技术结合冲击温度测量以及从头算分子动力学结合密度泛函理论计算, 对钒的熔化线进行了精细研究, 给出了动态与静态加载熔化线基本一致的结果. 将本文结果与近期报道比较 (见图 9),

DXRD 测量的非晶态区域恰好处于新给出的熔化线附近, 从原位微观结构演化观测到的钒的冲击熔化的角度, 为新的熔化线及动静压熔化线统一认识提供了可靠的微观证据.

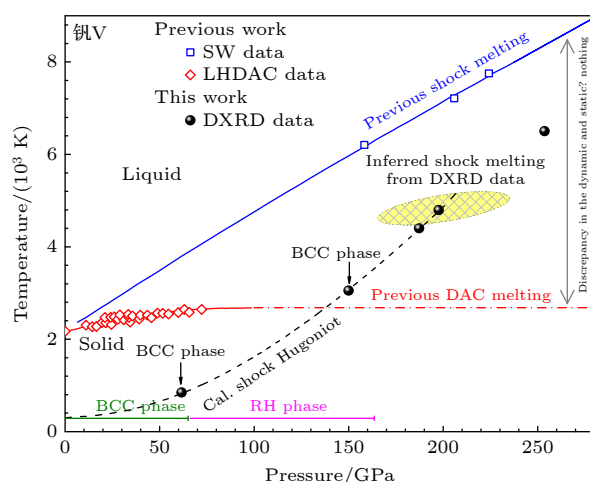


图 8 钒的 DXRD 实验数据与早期动、静高压熔化线的比较<sup>[1,2]</sup>

Fig. 8. The DXRD data of vanadium compared to previous shock/DAC melting line<sup>[1,2]</sup>.

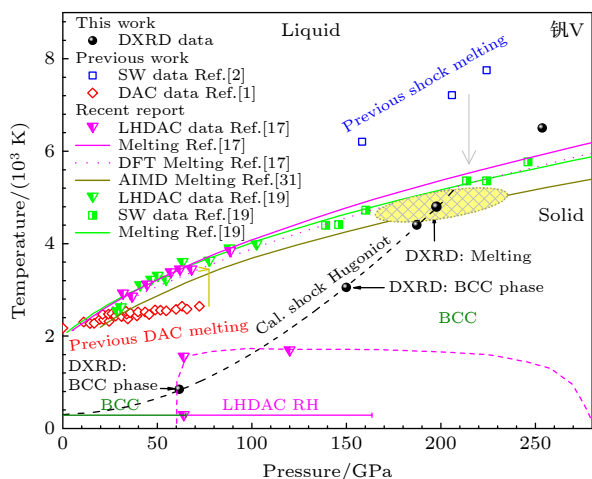


图9 钒动-静高压熔化线的统一相图<sup>[1,2,17,19,30]</sup>

Fig. 9. The phase diagram of vanadium with melting curve at high pressure<sup>[1,2,17,19,30]</sup>.

## 4 结论

作为动/静高压熔化线幅值差异最大的典型材料, 确定钒冲击加载至静压熔化线附近及以上区域的物相结构或形态, 探测它可能的相结构变化以及至冲击熔化发生的过程是深入理解过渡金属动/静固-液相界差异及物理机制的必要基础. 本文利用高功率激光驱动的动态 X 射线衍射技术, 实现了沿冲击路径 200 GPa 内钒相结构的原位测量, 获取了钒在动态响应过程中晶体结构变化的直接图像: 确认了钒在冲击加载 60 GPa 附近的结构为 bcc 结构; 确认了在原有 DAC 熔化线的上方、冲击熔化线的下方区域 (155 GPa) 仍保持为 bcc 相固态; 结合最近文献结果对比, 发现实验结果与文献中新动的、静高压熔化曲线相一致, 为动/静高压相界具有统一性的认识提供了直接的微观证据, 确认了 200 GPa 内钒的固-液相界. 该研究成果的获得, 极大地拓展和丰富了后续工作的视野和思路, 对进一步理解和解释过渡金属的高压熔化行为具有重要的科学意义.

## 参考文献

- [1] Errandonea D, Schwager B, Ditz R, Gessmann C, Boehler R, Ross M 2001 *Phys. Rev. B* **63** 132104
- [2] Dai C D, Jin X G, Zhou X M, Liu J J, Hu J B 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 3064
- [3] Yoo C S, Holmes N C, Ross M, Webb D J, Pike C 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 3931
- [4] Dai C D, Hu J B, Tan H 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 043519
- [5] Dewaele A, Mezouar M, Guignot N, Loubeyre P 2010 *Phys.*

- Rev. Lett.* **104** 255701
- [6] Hixson R S, Boness D A, Shaner J W, Moriarty J 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 637
- [7] Errandonea D 2005 *Physica B: Condensed Matter* **357** 356
- [8] Ding Y, Ahuja R, Shu J, Chow P, Luo W, Mao H K 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 085502
- [9] Qiu S L, Marcus P M 2008 *J. Phys. Condens. Matter.* **20** 275218
- [10] Jenei Z, Liermann H P, Cynn H, Klepeis J H P, Baer B J, Evans W J 2011 *Phys. Rev. B* **83** 054101
- [11] 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]
- [12] Foster J M, Comley A J, Case G S, Avraam P, Rothman S D, Higginbotham A, Floyd E K R, Gumbrell E T, Luis J J D, McGonegle D, Park N T, Peacock L J, Poulter C P, Suggit M J, Wark J S 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 025117
- [13] Wang Y X, Wu Q, Chen X R, Geng H Y 2016 *Sci. Rep.* **6** 32419
- [14] Akahama Y, Kawaguchi S, Hirao N, Ohishi Y 2021 *J. Appl. Phys.* **129** 135902
- [15] Wang Y X, Geng H Y, Wu Q, Chen X R, Sun Y 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 235903
- [16] Wang Y X, Geng H Y, Wu Q, Chen X R 2020 *J. Chem. Phys.* **152** 024118
- [17] Errandonea D, MacLeod S G, Burakovsky L, Santamaria-Perez D, Proctor J E, Cynn H, Mezouar M 2019 *Phys. Rev. B* **100** 094111
- [18] Li J, Wu Q, Li J B, Xue T, Tan Y, Zhou X M, Zhang Y J, Xiong Z W, Gao Z P, Sekine T 2020 *Geophys. Res. Lett.* **47** e2020GL087758
- [19] Zhang Y J, Tan Y, Geng H Y, Salke N P, Gao Z P, Li J, Sekine T, Wang Q M, Greenberg E, Prakapenka V B, Lin J F 2020 *Phys. Rev. B* **102** 214104
- [20] Johnson Q, Mitchell A C 1972 *Phys. Rev. Lett.* **29** 1369
- [21] Gupta Y M, Zimmerman K A, Rigg P A, Zaretsky E B, Savage D M, Bellamy P M 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 4008
- [22] Kalantar D H, Chandler E A, Colvin J D, Lee R, Remington B A, Weber S V, Wiley L G, Hauer A, Wark J S, Loveridge A, Failor B H, Meyers M A, Ravichandran G 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 629
- [23] Kalantar D H, Belak J F, Collins G W, Colvin J D, Davies H M, Eggert J H, Germann T C, Hawreliak J, Holian B L, Kadau K, Lomdahl P S, Lorenzana H E, Meyers M A, Rosolankova K, Schneider M S, Sheppard J, Stolken J S, Wark J S 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 075502
- [24] Coppari F, Smith R F, Eggert J H, Wang J, Rygg J R, Lazicki A, Hawreliak J A, Collins G W, Duffy T S 2013 *Nat. Geosci.* **6** 926
- [25] Gorman M G, Briggs R, McBride 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
- [26] Sharma S M, Turneaure S J, Winey J M, Li Y, Rigg P, Schuman A, Sinclair N, Toyoda Y, Wang X, Weir N, Zhang J, Gupta Y M 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 045702
- [27] Li J, Chen X H, Wu Q, Luo B Q, Li M, Yang Q G, Tao T J, Jin K, Geng H Y, Tan Y, Xue T 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 136101 (in Chinese) [李俊, 陈小辉, 吴强, 罗斌强, 李牧, 阳庆国, 陶天炯, 金柯, 耿华运, 谭叶, 薛桃 2017 *物理学报* **66** 136101]
- [28] Chen X H, Tan B Z, Xue T, Ma Y C, Jin S, Li Z J, Xin Y F,



Li X Y, Li J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 246201 (in Chinese) [陈小辉, 谭伯仲, 薛桃, 马云灿, 靳赛, 李志军, 辛越峰, 李晓亚, 李俊 2020 物理学报 **69** 246201]  
 [29] Tao T J, Weng J D, Wang X 2011 *Opto-Electron. Engineer.*

**38** 39 (in Chinese) [陶天炯, 翁继东, 王翔 2011 光电工程 **38** 39]  
 [30] Zhang T, Wang S, Song H, Duan S, Liu H 2019 *J. Appl. Phys.* **126** 205901

# *In situ* X-ray diffraction measurement of shock melting in vanadium\*

Hua Ying-Xin<sup>#</sup>    Chen Xiao-Hui<sup>#</sup>    Li Jun<sup>†</sup>    Hao Long  
 Sun Yi    Wang Yu-Feng    Geng Hua-Yun

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

( Received 7 November 2021; revised manuscript received 12 December 2021 )

## Abstract

The solid-liquid phase transition under shock wave loading in materials is called shock melting. Shock melting is important not only in fields like high pressure EOS or material dynamic response, but also in applications like device protection in modern industry and national defense construction. The obtaining of precise melting curve is more than understanding the high pressure melting behavior, and it can provide the reliable evidence for the theoretical model of melting mechanism. So the solid-liquid phase transition under extreme conditions is a research hotspot, and a lot of researches have been carried out. But, the enormous discrepancy between the melting curve of dynamic loading and hydrostatic loading in transition metals, especially, the vanadium has been unclear for decades. The difference in melting temperature under 200 GPa between dynamic loading and hydrostatic loading is as large as twice (about 4000 K). Recently, Errandonea and Zhang's experiments present a new insight into this discrepancy, indicating that the new shock melting curve is consistent with the extrapolated melting curve contained by LH-DAC. But all the dynamic loading experimental data are measured by macroscopic quantities; they can determine the occurrence of the phase transition, but cannot provide the microscopic structure of the material under extreme conditions. So, as the technic of *in situ* X-ray diffraction has developed well in recent years, we use the high power laser driving technic combining with *in situ* X-ray diffraction measurement to explore the structure of vanadium near the melting line. We measure the micro structure of vanadium at up to 200 GPa in shock experiment for the first time. We find that the bcc phase transition is not observed at around 60 GPa, which is different from previous experiments in DAC or gas gun loading experiments, but consistent with Chen's laser driving experiment. The result confirms that when the impact pressure is 155 GPa, vanadium still remains solid BCC phase. It becomes liquid at about 190 GPa. In contrast to Zhang's results, the DXRD melting point is consistent with the new melting line. This work provides the evidence of the consistency of shock and hydrostatic melting curve, confirming the phase boundary of vanadium under 200 GPa. This work has important scientific significance in understanding the pressure melting behavior of transition metals. The method in this work can be applied to the research of melting properties of other materials.

**Keywords:** vanadium, shock melting, *in situ* X-ray diffraction, high power laser facility

**PACS:** 62.50.Ef, 64.70.D-, 61.05.cp, 52.38.Mf

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212065

\* Project supported by NSAF (Grant No. U1730248), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11872056), and the National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics (Grant No. JCKYS2020212014).

<sup>#</sup> These authors contributed equally.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lijun102@caep.cn](mailto:lijun102@caep.cn)