

# 透明矿物冲击温度与纵波声速同步测量方法\*

任磊<sup>1</sup>, 甘波<sup>1,2</sup>, 黄钰倩<sup>1</sup>, 何庆<sup>1</sup>, 张友君<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学原子与分子物理研究所, 四川 成都 610065;

2. 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:** 动高压实验技术是产生超高压高温极端条件的重要手段, 在高能量密度物理、地球物理及国防工程等领域具有重要应用。冲击温度和声速分别是表征物质热力学状态与弹性性质的关键物理参数, 然而, 传统冲击实验通常需要分别获取温度和声速信息, 容易引入状态匹配误差, 并增加实验复杂度。针对透明材料体系, 前人提出的冲击温度与纵波声速同步测量方法基于冲击前沿热辐射信号在未压缩区域传播的特性获取温度, 同时, 通过辐射信号时间演化特征反演纵波声速。在此基础上, 针对透明矿物体系对实验结构与信号获取方案进行优化, 探究该方法在冲击熔融条件下的适用性。以天然单晶方解石为研究对象, 在 115.7 GPa 冲击压力下获得冲击温度与纵波声速分别为 3810 K 和 9.32 km/s。结合实验结果及已有相图数据, 结果表明, 方解石在该条件下已发生冲击熔融, 验证了该方法在透明矿物冲击熔融条件下实现温度与纵波声速同步测量的可行性。研究结果为获取透明矿物在高温高压尤其是熔融条件下的热力学与弹性性质提供了一种可行的实验技术路径, 为认识地球深部物质结构与动力学过程以及评估透明窗口材料在高能量密度条件下的动态响应提供了重要实验依据。

**关键词:** 冲击温度; 纵波声速; 透明矿物; 同步测量; 冲击熔融

中图分类号: O521.3; O521.2

文献标识码: A

高温高压极端条件能够显著改变凝聚介质的原子间距、晶格振动状态、电子能带结构及费米面等微观特征, 从而影响物质的物理、化学和力学等宏观性质<sup>[1,2]</sup>, 并可能诱发传统理论难以解释的新奇物理现象<sup>[3,4]</sup>。研究物质在高温高压下的状态及物性演化规律, 不仅是发展凝聚态物理理论的重要基础, 也是理解地球与行星内部演化以及探索新型功能材料的重要途径<sup>[5,6]</sup>。目前, 实现高温高压条件的实验技术主要包括静态高压和动态高压两大类。静高压装置(如大腔体压机和金刚石对顶砧)能够实现稳定加载, 被广泛应用于结构与物性研究<sup>[1,2]</sup>, 但其温压范围受限, 实现超高压(> 200 GPa)较为困难, 难以满足高能量密度物理及行星深部研究需求<sup>[7,8]</sup>。相比之下, 动高压技术(如轻气炮、Z 箍缩装置和高功率激光)可在纳秒至微秒时间尺度内产生极高温压状态(如> 300 GPa、> 10000 K), 在研究状态方程、相变及熔融行为等方面具有不可替代的作用<sup>[9,10]</sup>。

状态方程是高压物理研究的基础, 其中温度是决定相态与热力学性质的关键参数, 但动高压条件下的瞬态加载特性使温度测量面临诸多挑战<sup>[11]</sup>。目前冲击温度测量主要依赖热辐射测温技术, 通常基于普朗克黑体辐射定律并引入灰体发射率修正, 通过拟合多波长热辐射光谱强度获得温度与发射率信息<sup>[12-14]</sup>。对于不透明样品, 通常需在样品后界面贴附透明窗口, 通过测量样品/窗口界面温度间接获得冲击温度<sup>[9]</sup>。该过程依赖多种物性参数, 易引入额外不确定性。相比之下, 透明样品的高温热辐射可通过未压缩区域直接传播至探测系统, 使样品本征热辐射信号能被有效获取, 为冲击温度的直接测量提供了有利条件<sup>[11]</sup>。近年来, 热辐射测温技术在时间分辨率与测温精度方面均取得显著进展, 为冲击温度的直接测量奠定了可靠基础<sup>[9,13,15]</sup>。

\*收稿日期: 2026-04-14; 修回日期: 2026-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(42422201, 42402041); 四川省自然科学基金(2025ZNSFSC0304)

作者简介: 任磊(2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事高压物理研究. E-mail: 1026377025@qq.com

通讯作者: 甘波(1994-), 男, 副研究员, 主要从事冲击波物理与高压矿物物理研究. E-mail: ganbo@scu.edu.cn

除温度外,声速是描述物质弹性性质与热力学状态的另一关键参数,在构建完整的状态方程及行星内部建模等方面具有重要意义<sup>[16,17]</sup>。例如,地震波速度是认识地球与行星内部结构的主要手段<sup>[18]</sup>,而实验测量矿物高温高压声速是解释地震观测结果的关键<sup>[19,20]</sup>。当前高温高压声速测量方法包括静高压下的脉冲透射法<sup>[21]</sup>、脉冲回波重叠法<sup>[22]</sup>、非弹性X射线散射法<sup>[23]</sup>、布里渊散射法<sup>[24]</sup>等,以及动高压下的反向碰撞法<sup>[25]</sup>和正向碰撞台阶法<sup>[26]</sup>等。静高压实验方法温压范围有限,在熔融体系中信号衰减显著<sup>[27-31]</sup>。动高压方法虽可实现更高压力<sup>[25,26,32]</sup>,但通常依赖复杂靶结构或较高撞击速度,实验难度与成本较高<sup>[33,34]</sup>。

更为关键的是,现有动高压声速测量手段通常难以实现温度信息的同步获取。温度与声速往往需要通过不同实验分别获得,这要求多次实验具有严格一致的冲击加载条件。然而,由于碰撞速度及样品初始状态等条件不可避免地存在一定偏差,对应的Hugoniot状态难以严格匹配,从而在建立声速-温度对应关系及后续状态分析时通常引入额外的不确定性。因此,在冲击条件下实现温度与声速的同步测量,对于准确约束物质的相态、稳定性、熔融行为以及热力学性质具有重要意义。

针对透明材料体系,Zhou等学者<sup>[35]</sup>基于冲击加载过程中产生的热辐射信号及其时间演化特征,发展了一种温度与纵波声速同步测量方法,并成功应用于高密度玻璃体系,在52-168 GPa压力范围内获得了冲击温度与纵波声速数据。该方法为温度与声速同步测量提供了重要技术基础。然而,在实际冲击测温实验中,样品与基板(薄膜)或飞片碰撞界面处可能存在微小间隙,同时残余气体在冲击加载过程中也可能产生异常辐射信号,从而降低信号质量。此外,在冲击熔融条件下,材料形态重构可能改变其辐射发射特性,进一步增加辐射光谱时间演化信息识别的不确定性。因此,有必要对该方法的信号质量及其在冲击熔融条件下的适用性开展进一步研究。

透明矿物体系不仅在高压条件下易发生冲击熔融,同时其透明特性有利于冲击前沿热辐射在未压缩区域中传播,为开展上述研究提供了理想对象。地幔及行星内部广泛存在多种透明矿物,如橄榄石( $Mg_2SiO_4$ )、石英( $SiO_2$ )、白云石 $[CaMg(CO_3)_2]$ 和方解石

( $CaCO_3$ )等<sup>[36-39]</sup>。这些矿物是硅酸盐与碳酸盐体系的重要组成部分,其高温高压声速是约束地幔结构、物质组成及动力学过程的关键物性参数<sup>[16,17,40,41]</sup>。然而,目前相关实验数据仍较为有限,尤其是在高温及熔融条件下<sup>[17]</sup>。

基于上述背景,本文在前人工作的基础上,对透明材料冲击温度与声速同步测量方法进行了优化与应用拓展。通过优化样品界面辐射条件、改进靶件密封结构并降低残余气体影响,同时引入多通道高分辨率辐射高温计,提高了辐射信号质量与测量稳定性。依托二级轻气炮动高压实验平台,以天然单晶方解石为研究对象,在115.7 GPa冲击压力下获得冲击温度与纵波声速分别为3810 K和9.32 km/s。实验结果表明,方解石在该条件下已发生冲击熔融,验证了该方法在透明矿物冲击熔融条件下的适用性。本研究为透明矿物在极端条件下热力学与弹性性质的获取提供了一种经过优化的实验实现路径,并为熔融矿物声速测量及透明窗口材料在高能量密度条件下的动态响应研究提供了重要实验基础。

## 1 实验设计与测试原理

### 1.1 实验装置与测试结构设计

在辐射高温计测温体系及已有透明介质温度-声速联合测量方法基础上<sup>[35]</sup>,本文对透明矿物体系的实验结构进行一定优化,实验设计如图1a所示。实验采用轻气炮驱动圆片状金属飞片撞击透明样品,并通过电磁测速法测量飞片速度。样品设计为圆片结构并嵌入样品盒,样品盒设置探头接口与抽气通道。采用16通道高分辨率光学高温计系统实时测量冲击前沿热辐射信号,测量波长范围为400-1000 nm。热辐射信号经多通道硅光纤收集,通过10 nm窄带滤光片后由时间分辨率约2 ns的光电倍增管转换为电压信号,并由高速数字示波器记录。

为降低杂散光与异常辐射干扰,在样品受撞击表面镀覆1-2  $\mu m$ 铝膜,并在样品侧面及测试区域外涂覆黑胶。同时,本文对样品与样品盒及光纤接口进行密封处理,在实验前将靶件内部抽至约1 Pa的准真空环境并在实验过程中保持,以提高信号信噪比。通过上述结构设计,可有效提高冲击前沿热辐射信号的信噪比,并保证信号记录的稳定性与时间分辨

能力，为冲击温度与纵波声速的同步测量提供可靠的实验基础。

## 1.2 同步测试原理

高速飞片撞击透明样品后，在飞片与样品中产生两列反向传播的一维平面冲击波，使局部样品迅速压缩至高温高压状态，并在冲击前沿形成高温热辐射区域。由于冲击波前方样品仍保持透明，该热辐射能够穿过未压缩区域传递至光学高温计系统，并被记录为时间分辨辐射信号（图 1b）。实验前采用标准黑体光源对各测量通道进行热辐射亮度标定，将测得电压信号转换为对应波长的光谱辐射强度。随后基于普朗克灰体辐射定律，采用最小二乘法对多波长（ $\lambda$ ）热辐射强度 $[I_{(\lambda,T)}]$ 进行拟合，从而获得冲击温度 $T_H$ <sup>[12]</sup>：

$$I_{(\lambda,T)} = \varepsilon \cdot c_1 \lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_H}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1)$$

式中， $\varepsilon$  为发射率； $c_1$  和  $c_2$  是辐射常数，分别为  $1.19106 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2/\text{Sr}$  和  $1.43878 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

当飞片中的冲击波到达其后界面时，将反射形成一列向样品传播的追赶稀疏波（图 1c）。该追赶稀疏波进入样品后以纵波声速向前传播，并最终在样品内部追赶上初始冲击波，从而削弱冲击波的加载能力，使冲击前沿的压缩状态减弱，对应的热辐射信号强度降低。因此，通过分析热辐射信号的时间历程，可获得飞片与样品初始碰撞至追赶稀疏波追上冲击波的时间间隔  $\Delta t$ 。在飞片材料 Hugoniot 状态方程与声速已知的条件下，可获得透明样品在冲击状态下的欧拉纵波声速  $C_S^E$ <sup>[32, 35, 42, 43]</sup>：

$$C_S^E = \frac{\rho_0}{\rho_H} \frac{D_S}{1 - d_F / \left( \Delta t \left( \frac{1}{D_F} + \frac{1}{C_F^L} \right) \right)} \quad (2)$$

式中，上标  $E$  和  $L$  分别用于表示欧氏坐标系和拉氏坐标系， $\rho_0$  和  $\rho_H$  分别为样品初始和冲击下的密度， $d_F$  为飞片厚度。 $D_S$  和  $D_F$  分别是样品与飞片中的冲击波速度，可基于测量的飞片撞击速度  $W$  以及飞片与样品的 Hugoniot 参数，采用阻抗匹配法计算获得<sup>[11]</sup>。 $C_F^L$  是飞片的纵波声速。本文所采用的 Hugoniot 参数及飞片纵波声速均来源于前人的实验研究<sup>[32, 42, 44, 45]</sup>。其中，钽飞片的冲击波速度-粒子速度（ $U_S-u_p$ , km/s）关系为  $U_S = 3.293(0.0049) + 1.307(0.025)u_p$  ( $\rho_0 = 16.68 \text{ g/cm}^3$ )<sup>[45]</sup>；方解石的  $U_S-u_p$  关系为  $U_S = 3.71(0.03) + 1.43(0.01)u_p$  ( $\rho_0 = 2.71 \text{ g/cm}^3$ )<sup>[44]</sup>。本方法利用同一辐射信号同时提取辐射强度与波传播时间，实现透明矿物在冲击高温高压状态下温度与纵波声速的同步测量。

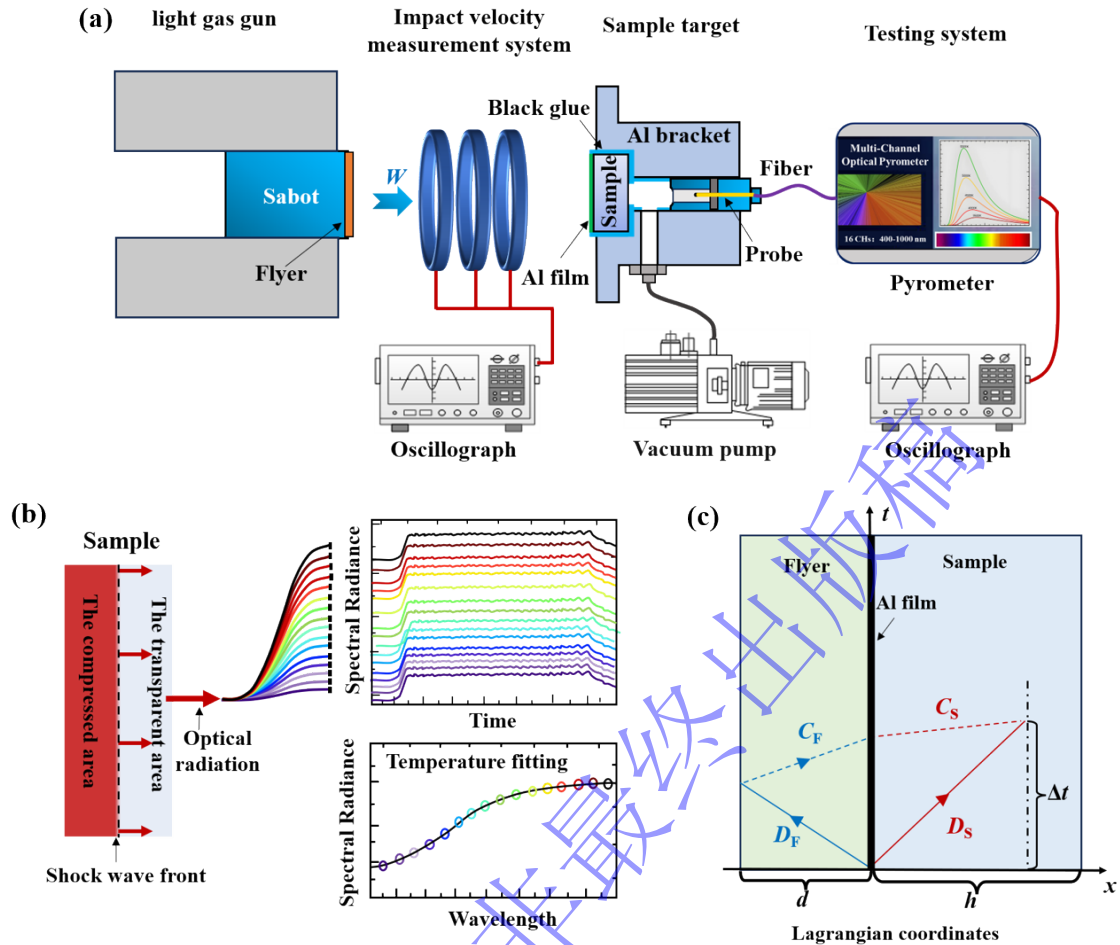


图 1. 冲击下透明矿物声速与温度同步测量方法：(a) 实验设计示意图；(b) 温度测量原理图，其中光谱辐射亮度信号为示意曲线，用于说明测温原理；(c) 波系传播图

Fig 1. Simultaneous measurements of shock temperature and sound velocity of transparent minerals under shock compression: (a) Schematic of the experimental setup; (b) Schematic diagram of radiance thermometry, where the spectral radiance signals are illustrative curves used to show the temperature measurement process; (c) Schematic of shock wave and rarefaction wave propagation

### 1.3 实验材料制备和表征

为验证该同步测量方法的可行性，本文选取钽 (Ta) 作为飞片材料，并以天然方解石作为研究对象。钽为动高压实验常用标准材料，其 Hugoniot 状态方程及声速已得到良好约束<sup>[32, 42]</sup>。方解石作为典型透明碳酸盐矿物，在地球深部碳循环研究中具有重要意义<sup>[46]</sup>，同时具有良好的光学透过性能及明确的高温高压响应特征<sup>[47]</sup>，适合作为方法验证材料。

本研究采用钽飞片，直径 20 mm、厚度 0.365 mm。方解石样品直径 20 mm、厚度 8 mm，由天然矿物制备并经精细抛光处理 (图 2a)。样品结构与表面特征通过 X 射线衍射 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 及能量色散谱 (EDS) 进行表征 (图 2b-d)。对原始样品进行 XRD 测试时未获得典型粉末衍射峰，表明样品具有单晶或大晶粒特征；进一步将样品研磨为粉末后进行 XRD 测试，其衍射峰均与标准方解石一致，为三方晶系  $R-3c$  空间群。由于未进行定向切割与晶向测定，样品具体晶向未予限定。SEM 结果显示致密的样品表面，无孔隙或裂隙。EDS 结果表明 Ca、C 和 O 元素分布均匀，未检测到其他元素。阿基米德排水法测得样品密度为 2.71 g/cm<sup>3</sup>，与文献报道的方解石理论密度 (2.71 g/cm<sup>3</sup>) 一致<sup>[48]</sup>，表明样品具有良好的致密性，满足冲击实验要求。

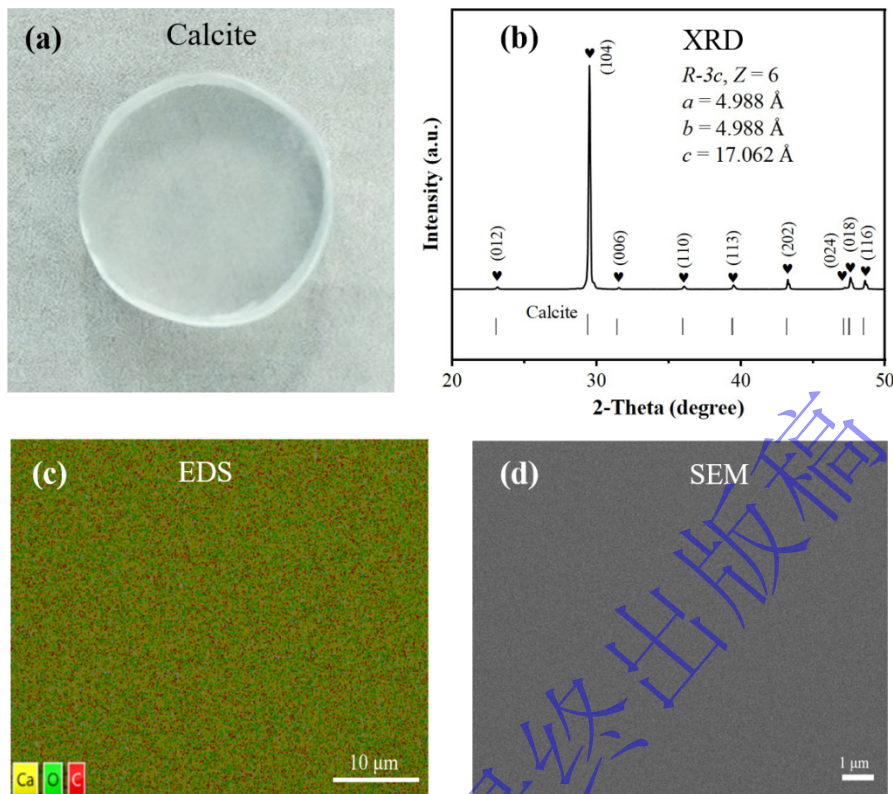


图 2. 样品结构与成分表征: (a) 实物图; (b) XRD 图谱; (c) EDS 元素分布图; (d) SEM 形貌图  
 Fig 2. Structural and compositional characterization of the sample. (a) photograph of the sample; (b) XRD pattern; (c) EDS elemental mapping, (d) SEM micrograph

## 2 结果与讨论

### 2.1 冲击下 $\text{CaCO}_3$ 的 Hugoniot 温度

利用四川大学二级轻气炮动高压实验平台开展了一发验证性实验, 飞片速度 ( $W$ ) 为 5.685 km/s (表 1)。根据方解石<sup>[44]</sup>与钽<sup>[45]</sup>的 Hugoniot 参数, 计算得到方解石中的冲击压力为 115.7 GPa。需要指出的是, 方解石已有的  $U_S-u_p$  测量数据主要集中于压力低于 100 GPa 和高于 200 GPa 区间, 在中间压力范围内的实验约束相对有限<sup>[44]</sup>。因此, 本文在约 115.7 GPa 条件下的状态参数计算在一定程度上依赖于对已有 Hugoniot 关系的外推, 会引入一定的不确定性。实验测得的光谱热辐射信号如图 3a 所示, 各波长通道呈现一致的时间演化特征。在  $t_1$  时刻, 冲击波进入方解石样品并形成高温高压状态, 冲击前沿热辐射通过未压缩区域传播至高温计系统, 使辐射信号迅速增强并进入准平台阶段, 但仍表现出随时间的轻微上升趋势。该上升特征主要源于辐射传播过程中有效光程的变化及样品对辐射的有限吸收, 使到达探测端的辐射强度略有增加。该行为在各波长通道中具有一致性, 对应样品已进入稳定冲击压缩状态。在  $t_2$  时刻, 辐射信号快速下降, 表明追赶稀疏波在样品内部与冲击波相遇, 引发卸载。通过对稳定平台段内的时间平均光谱热辐射强度进行拟合, 将温度与发射率作为自由参数, 基于灰体辐射模型采用最小二乘法进行反演, 获得冲击温度为 3810 K, 对应发射率为 0.34 (图 3b)。拟合结果与实验光谱数据吻合良好。当前温度不确定度约为 100 K, 主要来源于辐射标定误差、多波长拟合不确定性以及样品有限吸收效应导致的辐射强度波动。具体而言, 各波长通道的光谱热辐射强度存在一定测量误差, 通过对热辐射强度施加上下限扰动, 并基于普朗克灰体辐射定律进行多波长重复拟合, 从而获得温度与发射率的变化范围, 并据此确定其不确定度 (图 3b)。

本研究获得的冲击温度较 Gupta 等<sup>[49]</sup>早期实验结果低约 500 K (~10%) (图 4)。该差异可能与实验结构及测温条件改进有关。早期实验通常采用样品与基板直接接触结构, 且未进行高真空处理, 界面微间隙可能产生间隙发光 (Gap flash) 现象<sup>[49, 50]</sup>, 导致辐射信号

异常增强，从而造成冲击温度被系统性高估<sup>[12, 51]</sup>。相比之下，本研究通过在样品表面镀覆金属膜并建立准真空环境，有效改善界面接触状态并降低杂散光干扰，从而显著提高了辐射信号稳定性与测温可靠性。此外，本研究获得 10 个稳定波长通道的有效辐射数据，明显多于早期实验的 4-5 个，从而提高了多波长拟合稳定性。同时，光电转换系统时间分辨率与信号响应精度的提升亦贡献于降低温度拟合误差。

表 1. 方解石冲击温度与声速同步测量条件与结果  
Table 1. Experimental conditions and results for the  $T_H$  and  $V_P$  measurements of  $\text{CaCO}_3$  under shock compression

$d_F$ (mm)	$W$ (km/s)	$P_H$ (GPa)	$T_H$ (K)	$\varepsilon$	$\Delta t$ (ns)	$V_P$ (km/s)
0.365(5)	5.685(30)	115.7(1.1)	3810(100)	0.34(0.03)	295(10)	9.32(24)

Note:  $P_H$  为根据撞击速度  $W$ ，结合飞片与样品的已知 Hugoniot 参数，通过阻抗匹配法确定的冲击压缩碳酸钙的冲击压力； $T_H$  为实验测量的碳酸钙冲击温度； $\varepsilon$  为实验测量的碳酸钙发射率； $V_P$  为碳酸钙在冲击压缩下的纵波声速。

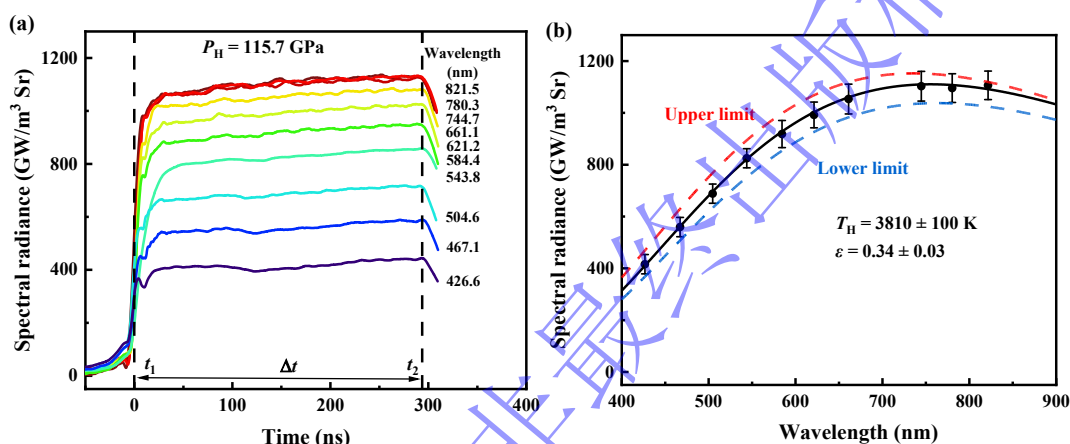


图 3. 实验测得的热辐射信号及其温度拟合结果：(a) 时间分辨光谱热辐射信号；(b) 基于灰体辐射模型的拟合结果。温度与发射率作为自由参数，通过最小二乘法拟合稳定平台阶段的热辐射强度获得  
Fig 3. Measured thermal radiation signal and its temperature fitting results: (a) Time-resolved spectral thermal radiation signal; (b) Fitting result based on the gray-body radiation model. Temperature and emissivity were treated as free parameters and determined by least-squares fitting of the thermal radiation intensity during the steady plateau stage.

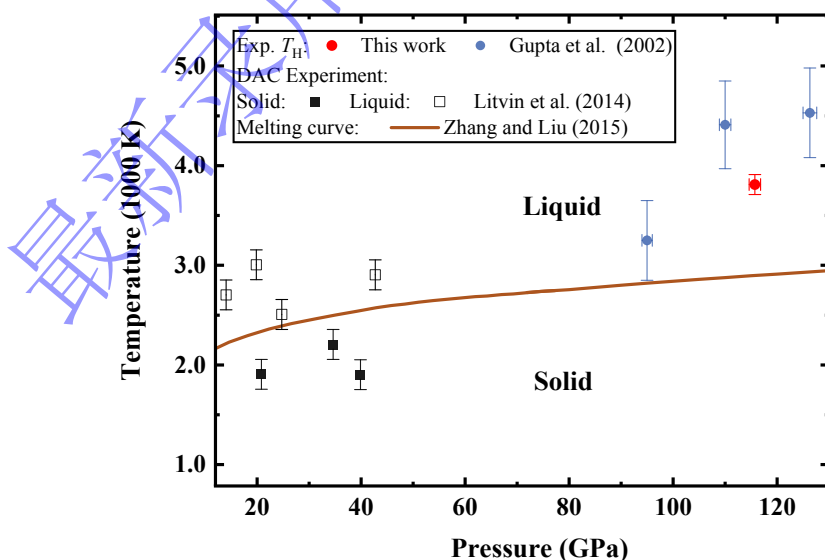


图 4. 方解石的高压熔融温度：红色和蓝色圆分别代表本研究及早期冲击测温结果<sup>[49]</sup>；黑色实心 and 空心矩形分别代表静高压实验下的固态和液态<sup>[52]</sup>；橙色曲线为第一性原理分子动力学计算的高压熔融线<sup>[53]</sup>  
Fig 4. High-pressure melting temperature of calcite: Red and blue circles represent shock temperature

measurements from this study and previous work<sup>[49]</sup>, respectively. Solid and open rectangles represent the solid and liquid  $\text{CaCO}_3$  in static experiments<sup>[52]</sup>, respectively. The orange curve is the high-pressure melting temperatures calculated by first-principles molecular dynamic simulations<sup>[53]</sup>

近期激光冲击结合 X 射线自由电子激光 (XFEL) 实验表明, 方解石沿 Hugoniot 路径在 80–110 GPa 范围内可能发生结构无序化或者熔融<sup>[44, 47]</sup>。然而, 方解石在该压力区间的熔融温度仍缺乏直接实验约束。目前静高压实验数据主要集中在 40 GPa 以下 (图 4)<sup>[52]</sup>, 更高压力区间主要依赖理论计算<sup>[53]</sup>。第一性原理分子动力学模拟获得的  $\text{CaCO}_3$  高压熔融线与静高压实验结果吻合良好<sup>[53]</sup>, 具有较好的可靠性。本研究获得的冲击温度比同压力下的理论熔融温度高约 1000 K。当实验状态点位于熔融线以上时, 表明冲击路径已穿越固-液相边界并进入液态稳定区。因此, 当前温压状态在相图中的位置关系 (图 4) 表明, 方解石在 115.7 GPa 条件下已发生冲击熔融。该结果与激光冲击 XFEL 衍射测量在约 120(10) GPa 冲击压力下未观测到明显布拉格衍射峰具有一致性<sup>[47]</sup>, 进一步支持方解石在该压力区间已发生显著的晶体结构无序化甚至熔融。然而, 由于目前实验数据仍较为有限, 尚不足以建立两者之间的严格对应关系, 也无法对方解石的冲击熔融区间及熔融起始条件进行有效约束。因此, 未来仍需在更宽温压条件范围内开展冲击温度测量实验, 以进一步约束其高压熔融行为。

对于透明矿物, 在发生相变或熔融时, 其光学吸收性质通常会显著增强, 从而引发有效发射率的变化<sup>[54 - 56]</sup>。当前结果显示方解石在 115.7 GPa 条件下已发生冲击熔融, 因此稳定平台段记录的热辐射信号主要反映冲击熔融态的辐射特性。通过对稳定平台段内的多通道光谱数据进行逐时刻拟合, 获得温度与发射率的时间演化曲线 (图 5)。结果显示, 温度与发射率在平台区内整体变化平缓, 未见显著系统性波动, 表明冲击压缩后样品已表现为光学不透明状态, 后续压缩或持续熔融过程对辐射谱特征的影响难以进一步分辨。因此, 本文获得的发射率主要对应于该冲击条件下熔融态碳酸钙的有效发射率, 而熔融对发射率的具体影响仍需未来通过与较低压力固态区冲击测温结果的系统对比加以评估。

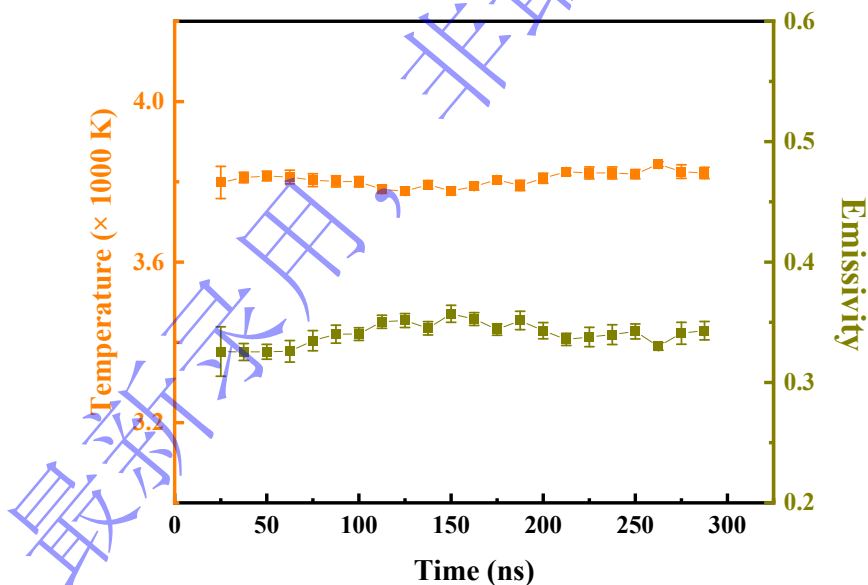


图 5. 方解石在冲击熔融下信号稳定平台区温度与发射率的时间演化: 橙色和棕色点线分别表示温度与发射率随时间的变化

Fig 5. Temporal evolution of temperature and emissivity within the stable signal plateau under shock melting conditions of calcite. The orange and brown dashed curves represent the variation of temperature and emissivity with time, respectively

## 2.2 冲击熔融 $\text{CaCO}_3$ 的声速

本文通过分析热辐射谱的时间演化特征获得方解石沿 Hugoniot 的纵波声速。Δt 通过辐射信号一阶导数的变化特征进行判定获得, 并且多个波长通道热辐射信号独立分析结果具

有良好一致性，对应纵波声速的偏差小于 0.5%，表明该方法在时间识别方面具有较高可靠性。样品有限吸收主要影响辐射强度而不影响时间演化特征，因此对  $\Delta t$  提取及声速计算无显著影响。综合各通道结果，方解石在 115.7 GPa 和 3810 K 条件下的纵波声速为 9.32 km/s。需要指出的是，该过程涉及钼的 Hugoniot 声速，而不同文献报道的数据存在一定分散性<sup>[32, 42, 43, 57]</sup>。本文以典型测量结果为基准<sup>[43]</sup>，并采用误差带形式涵盖多数已有数据<sup>[32, 42, 43, 57]</sup>，将该范围作为钼声速的不确定度，并在后续计算中传递至样品声速的不确定性估计。当前声速的不确定度为  $\pm 3.0\%$ ，主要来源于  $\Delta t$  的判读误差、钼的初始厚度测量误差、钼与方解石 Hugoniot 参数的不确定性以及钼 Hugoniot 声速的不确定性，由下式计算：

$$\sigma_{V_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_p}{\partial D_S^L} \sigma_{D_S^L}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_p}{\partial d_f} \sigma_{d_f}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_p}{\partial \Delta t} \sigma_{\Delta t}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_p}{\partial D_F^L} \sigma_{D_F^L}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_p}{\partial C_F^L} \sigma_{C_F^L}\right)^2} \quad (3)$$

实验测得的纵波声速明显低于第一性原理计算固态  $\text{CaCO}_3$ （如  $Pm\bar{m}n$  或  $P2_1/c-h$  结构）的纵波声速，差异达到 25–30%（图 6）<sup>[58, 59]</sup>。尽管晶体各向异性可能引起一定的声速差异，但已有研究表明其幅度通常显著小于当前偏差<sup>[60, 61]</sup>，因此该结果更可能反映在当前冲击温压下  $\text{CaCO}_3$  的弹性响应已明显偏离固体特征。相比之下，实验结果与热力学计算 Hugoniot 路径下的体波声速（ $V_B$ ）一致（图 6），其表达式如下<sup>[62]</sup>：

$$V_B^2 = -V_H^2 \frac{dP_H}{dV} \left[1 - \left(\frac{\gamma}{V}\right)_H \frac{(V_0 - V_H)}{2}\right] + V^2 \left(\frac{\gamma}{V}\right)_H \frac{P_H}{2} \quad (4)$$

上式右端中， $V$ 、 $P$  和  $\gamma$  分别表示比容、压强和 Grüneisen 参数，下标 H 和 0 分别表示冲击状态与零压状态。其中， $\gamma$  采用常用函数形式<sup>[63]</sup>：

$$\gamma = \gamma_0 \left(V/V_0\right)^n \quad (5)$$

式中  $\gamma_0 = 1.84$ <sup>[49]</sup>。由于 Hugoniot 体波声速主要反映材料在冲击条件下的体积响应特征，纵波声速接近体波声速通常指示材料抗剪切强度显著降低。结合冲击测温结果，当前观测到的体波与纵波声速一致性支持方解石在 115.7 GPa 和 3810 K 冲击状态下处于完全熔融状态，即本文获得了熔融态  $\text{CaCO}_3$  的纵波声速。

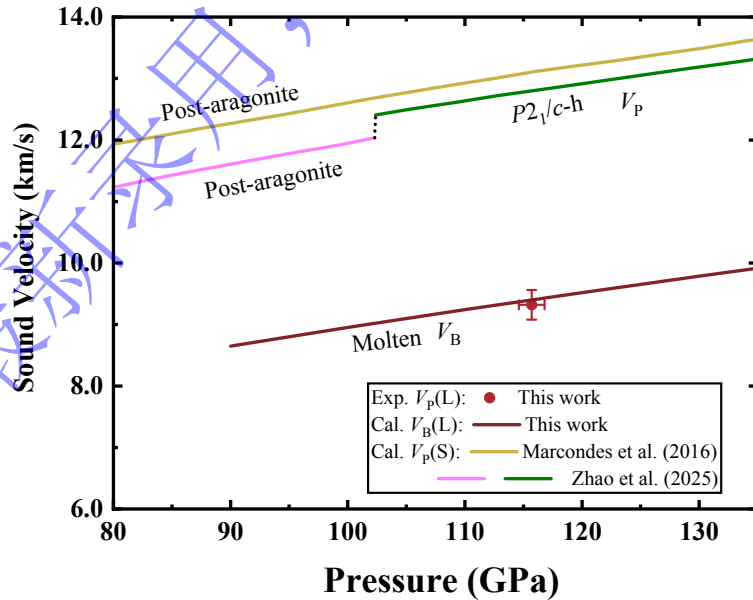


图 6.  $\text{CaCO}_3$  的高温高压声速：红色圆和曲线分别表示本研究测量的纵波声速（ $V_p$ ）和计算的体波声速（ $V_B$ ）；黄色<sup>[59]</sup>和绿色曲线<sup>[58]</sup>分别表示第一性原理计算的  $Pm\bar{m}n$  和  $P2_1/c-h$  结构的纵波声速  
Fig 6. Sound velocity of  $\text{CaCO}_3$  under high temperature and high pressure: The red circle and curves represent the longitudinal wave velocity ( $V_p$ ) and bulk wave velocity  $V_B$  determined in this study, respectively; the yellow curve<sup>[59]</sup> and green curve<sup>[58]</sup> represent the  $V_p$  of the  $Pm\bar{m}n$  and  $P2_1/c-h$  structures from first-principles calculations, respectively

静高压实验结合能量色散 X 射线衍射技术对  $\text{CaCO}_3$  的高温高压相变与结构特征研究表明, 高压下  $\text{CaCO}_3$  在熔融前会发生温度诱导非晶化。在 3.9–7.5 GPa、温度高于 1000 K 条件下, 文石相转变为无定形相, 该无定形相具有与液相相似的结构特征, 但 C–O 与 Ca–Ca 键长更长、密度更低<sup>[64]</sup>。尽管当前的纵波声速明显低于固态结构的理论计算值, 但仅凭单一冲击状态点仍难以判定是否存在冲击熔融前的无定型化。因此, 未来仍需在更宽压力范围内开展系统声速测量, 以厘清方解石在冲击加载中的无定型化与熔融转变行为, 从而揭示碳酸盐矿物在极端条件下的结构演化规律。

### 2.3 温声同测方法特点及应用展望

本文在已有温度–声速联合测量方法基础上<sup>[35]</sup>, 对透明矿物体系进行了结构优化, 实现了冲击熔融态矿物温度与纵波声速的同步获取。通过优化界面辐射条件并实现多波长温度与声速的同步获取, 提高了冲击温度测量的稳定性与可靠性, 同时避免了温度与动力学状态之间的失配问题, 从而为透明矿物在超高压条件下的相变与熔融行为研究提供了更加可靠的实验约束。目前, 静高压技术下的超声干涉法<sup>[65]</sup>、激光超声法<sup>[66]</sup>、布里渊散射法<sup>[24]</sup>、非弹性 X 射线散射 (IXS)<sup>[67]</sup>、核共振非弹性散射 (NRIXS)<sup>[68]</sup>等方法已广泛应用于固态材料声学性质的研究, 但其适用温压范围仍受到实验技术条件及信号强度的限制 (表 2)。例如, 超声和布里渊方法通常适用于约 50 GPa 以内; NRIXS 方法受限于特定同位素 (如  $^{57}\text{Fe}$ ) 体系; IXS 虽可扩展至更高压力, 但依赖大型同步辐射装置。此外, 静高压下透明样品的高温加载通常依赖电阻或激光加热, 前者温度上限较低 ( $\square 1200$  K), 后者需借助吸收介质间接加热, 易引入明显温度梯度<sup>[69]</sup>; 同时, 熔融过程中材料结构和形态变化会导致声学信号显著衰减, 从而限制熔融态声速的直接测量能力 (表 2)。相比之下, 冲击加载可在纳秒时间尺度内实现体积加热, 获得近似均匀的高温高压状态, 并轻松实现超高压条件。本研究方法在该条件下可同步获取透明矿物冲击熔融下的纵波声速与温度, 避免了静高压实验中的温度梯度及熔融信号衰减问题, 从而显著拓展了可测温压范围, 并提高了热力学与弹性参数之间的对应一致性。

表 2 典型高压声速测量方法汇总  
Table 2. Methods for sound velocity measurement under high pressure

Technique	Method	$P$ – $T$ range	Advantages	Applicability to molten	Limitations
Static	PTM <sup>[21]</sup> , PEO <sup>[22]</sup> , UI <sup>[65]</sup>	0–30 GPa 300–1200 K	Simple operation; stable signal quality	Limited applicability due to strong signal attenuation <sup>[27,29,30]</sup>	Severe signal decay at high $P$ – $T$ ; restricted sample compatibility
	BLS <sup>[24,70]</sup>	0–60 GPa 300–1200 K	High sensitivity to elastic properties	Applicable to transparent or low-turbidity melts <sup>[31]</sup>	Limited $P$ – $T$ ; requires transparent samples
	IXS <sup>[67,71]</sup>	0–160 GPa 300–3000 K	Applicable to extreme $P$ – $T$ conditions	Applicable to liquids (derived from dispersion relations) <sup>[72]</sup>	Limited beam availability; complex data analysis
	NRIXS <sup>[68,73]</sup>	0–60 GPa 300–1200 K	Stable at high pressure, reliable data	Rarely applicable to molten <sup>[74,75]</sup>	Complex configuration; disturbance sensitive; low success rate
Dynamic	RIT <sup>[33]</sup>	0–100 GPa 300–2000 K	Simple experimental configuration;	Suitable for solids that readily undergo shock melting <sup>[33]</sup>	Limited accessible pressure range; Strict sample integrity requirements during acceleration
	DIST <sup>[32]</sup>	0–500 GPa 300– $10^4$ K	Applicable to very high pressures; minimal sample property restrictions	Suitable for molten <sup>[26]</sup>	Complex experimental configuration; sensitive to disturbances; low success rate
	STVM	0–300 GPa,	Simultaneous $T$ and	Suitable for molten	Limited to transparent

(Zhou et al. <sup>[35]</sup> and This study)	300–10 <sup>4</sup> K	$V_p$ , stable signal quality	materials
--	-----------------------	-------------------------------	-----------

Note:  $P$ 、 $T$  表示测量声速方法的压力和温度范围。缩写: PTM 表示脉冲透射法 (Pulse Transmission Method); PEO 表示脉冲回波重叠法 (Pulse Echo Overlap Method); UI 表示超声干涉法 (Ultrasonic Interferometry Method); BLS 表示布里渊散射法 (Brillouin Light Scattering); IXS 表示非弹性 X 射线散射法 (Inelastic X-ray Scattering); NRIXS 表示核共振非弹性散射 (Nuclear Resonant Inelastic X-ray Scattering); RIT 表示反向碰撞法 (Reverse Impact Technique); DIST 表示正向碰撞台阶法 (Direct Impact Step Technique); STVM 表示温度-声速同步测量法 (Simultaneous Temperature-Velocity Measurement Method)。

在动高压实验中, 纵波声速的测量方法主要包括反向碰撞法和正向碰撞台阶法两类<sup>[25]</sup>。反向碰撞法通常采用样品作为飞片撞击透明窗口材料 (如单晶氟化锂和蓝宝石), 并结合激光干涉测速技术 (如 VISAR、DISAR、PDV) 测量样品/窗口界面粒子速度历史, 从而反演纵波声速<sup>[76, 77]</sup>。该方法依赖透明窗口材料, 其冲击阻抗特性在一定程度上限制了可测量的压力范围<sup>[25]</sup>, 且通常仅获取声速信息, 温度需独立实验或模型估算。正向碰撞台阶法通过设置不同厚度的台阶样品, 并在样品后方配置透明窗口材料, 根据稀疏波在不同厚度下的追赶时间确定追赶比参数, 进而求解纵波声速<sup>[11, 78]</sup>。基于其测量原理, 该方法亦被称为光分析法<sup>[11, 79]</sup>。根据窗口材料在冲击加载下的光学响应特性, 该方法可采用冲击发光窗口材料 (如三溴甲烷、重玻璃和熔石英), 通过辐射测温技术监测热辐射强度变化识别稀疏波到达时间<sup>[11, 80]</sup>; 该方法亦可采用在冲击下保持透明的窗口材料 (如单晶氟化锂和蓝宝石), 结合激光干涉测速技术测量界面粒子速度历史以确定稀疏波到达时刻<sup>[11, 81]</sup>。正向碰撞台阶法虽可实现较高压力测量, 但实验结构复杂, 对信号质量要求较高, 实验实现难度相对较大, 并且样品熔化条件下易受形态变化影响, 同时也难以直接获取样品的温度信息。相比之下, 温度-声速同步测量方法采用高阻抗飞片实现较高冲击压力的前提下, 基于辐射测温实现温度与声速的同步获取, 在同一冲击状态下直接约束关键热力学与弹性参数。该方法采用单界面结构, 实验相对简便, 信号重复性较好。通过对界面辐射条件及密封结构进行优化, 当前研究结果表明, 该温度-声速同步测量方法在高温高压尤其是冲击熔融条件下仍能够获取可识别的有效信号, 为透明矿物在地球内部极端条件下相变及热力学行为研究提供了可靠的实验方案。

需要指出的是, 温度-声速同步测量方法主要适用于具有良好初始透光性的矿物体系, 并要求矿物在冲击压缩下发生显著光学吸收增强, 由透明状态转变为近似不透明并表现出接近灰体辐射特征, 从而保证冲击前沿产生足够强的热辐射信号, 使辐射强度随冲击加载与卸载过程呈现清晰变化特征。同时, 该方法还依赖于样品及飞片材料 Hugoniot 状态方程及飞片纵波声速的准确约束。未来可在两方面进一步拓展: 首先, 在碳酸盐体系上推广应用至硅酸盐与硫酸盐等关键地幔透明矿物, 系统获取极端温压条件下的固态及熔融态声速数据, 为行星内部科学研究提供关键实验约束; 其次, 在实验技术上结合更高冲击阻抗的飞片材料 (如 Au、W 等), 进一步拓展可实现的温压范围。

### 3 结 论

本文在已有温度-声速同步测量方法基础上, 针对透明矿物体系对实验结构与界面辐射条件进行了优化, 并依托二级轻气炮动高压实验平台与多通道高分辨率热辐射测温系统, 对该方法的信号质量及适用范围开展进一步研究。以天然单晶方解石为研究对象, 在 115.7 GPa 冲击压力下获得了熔融态  $\text{CaCO}_3$  的 Hugoniot 温度与纵波声速数据, 验证了该方法在透明矿物熔融条件下的可行性与稳定性。与传统静高压与动高压声速测量方法相比, 温度-声速同步测量方法显著拓展了透明矿物声速的可测温压范围, 克服了熔融态声速测量的难题, 并实现了声速与温度的同步获取, 提高了关键物理参数之间的对应一致性。该方法采用单界面实验结构, 实验相对简便, 且在矿物熔融条件下仍能稳定获取有效信号, 在透明矿物熔融态声速研究中具有独特优势。该方法为透明材料高温高压相变行为、熔融动力学及热力学性质研究提供新的实验路径, 并为冲击波物理、地球物理和高能量密度物理相关研究提供重要技术支撑。

参考文献:

- [1] MAO H K, CHEN X J, DING Y, et al. Solids, liquids, and gases under high pressure [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2018, 90(1): 015007.
- [2] ZHANG Z, HAN X. Microscopy sparks development [J]. *Nature Materials*, 2016, 15(7): 695-697.
- [3] ZHU Y, PENG D, ZHANG E, et al. Superconductivity in pressurized trilayer  $\text{La}_4\text{Ni}_3\text{O}_{10-\delta}$  single crystals [J]. *Nature*, 2024, 631(8021): 531-536.
- [4] LIU Y, LIU Z Y, BAO J K, et al. Superconductivity under pressure in a chromium-based kagome metal [J]. *Nature*, 2024, 632(8027): 1032-1037.
- [5] STACEY F D. High pressure equations of state and planetary interiors [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, 68(2): 341.
- [6] ZHANG L, WANG Y, LV J, et al. Materials discovery at high pressures [J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2(4): 17005.
- [7] DENG J, XIE W, FENG S, et al. From concept to reality — A review to the primary test stand and its preliminary application in high energy density physics [J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2016, 1(1): 48-58.
- [8] 黄钰倩, 蒋刚, 张友君. 地核中的轻元素及其地核动力学意义 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2025, 44(01):51-71.  
HUANG Y Q, JIANG G, ZHANG Y J. Light elements in the Earth's core and implications for core dynamics [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2025, 44(1): 51-71.
- [9] 甘波, 李俊, 蒋刚, 等. Fe 高压熔化线的实验研究进展 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(6): 060101.  
GAN B, LI J, JIANG G, et al. A review of the experimental determination of the melting curve of iron at ultrahigh pressures [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(6): 060101.
- [10] SEILER F, IGRA O. *Hypervelocity launchers* [M]. Springer International Publishing, 2016.
- [11] 谭华. *实验冲击波物理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.  
TAN H. *Experimental shock wave physics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018.
- [12] GAN B, LI J, WU Q, et al. Shock temperatures and melting curve of an Fe-Ni-Cr alloy up to 304 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2022, 131(4): 045901.
- [13] LI J, WU Q, LI J, et al. Shock melting curve of iron: a consensus on the temperature at the earth's inner core boundary [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(15): e2020GL087758.
- [14] NELLIS W J, YOO C S. Issues concerning shock temperature measurements of iron and other metals [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1990, 95(B13): 21749-21752.
- [15] ZHANG Y, TAN Y, GENG H Y, et al. Melting curve of vanadium up to 256 GPa: consistency between experiments and theory [J]. *Physical Review B*, 2020, 102(21): 214104.
- [16] TRUBOWITZ C, MURAKAMI M, PETITGIRARD S, et al. Structural evolution of basaltic melts in the deep earth: insights from high-pressure sound velocity of glass [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2024, 129(9): e2024JB028969.
- [17] XU M, JING Z, BAJGAIN S K, et al. High-pressure elastic properties of dolomite melt supporting carbonate-induced melting in deep upper mantle [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(31): 18285-18291.
- [18] DZIEWONSKI A M, ANDERSON D L. Preliminary reference earth model [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1981, 25(4): 297-356.
- [19] ZHANG Y, WANG Y, HUANG Y, et al. Collective motion in hcp-Fe at earth's inner core conditions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2023, 120(41): e2309952120.
- [20] HUANG Y, HE Y, ZHANG Y, et al. Experimental evidence for superionic Fe-C alloy revealed by shear softening in earth's inner core [J]. *National Science Review*, 2025, 12(11): nwaf419.
- [21] MATTABONI P, SCHREIBER E. Method of pulse transmission measurements for determining sound velocities [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(20): 5160-5163.
- [22] HIGO Y, IRIFUNE T, FUNAKOSHI K ichi. Simultaneous high-pressure high-temperature elastic velocity measurement system up to 27 GPa and 1873 K using ultrasonic and synchrotron

- X-ray techniques [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(1): 014501.
- [23] TAKAHASHI S, OHTANI E, SAKAMAKI T, et al. Sound velocity of Fe<sub>3</sub>C at high pressure and high temperature determined by inelastic X-ray scattering [J]. *Comptes Rendus. Géoscience*, 2019, 351(2-3): 190-196.
- [24] ZHANG J S, BASS J D, ZHU G. Single-crystal brillouin spectroscopy with CO<sub>2</sub> laser heating and variable q [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(6): 063905.
- [25] ZHOU L, JIANG G, GAN B, et al. Sound velocities of natural goethite across  $\alpha$ - $\epsilon$  phase transformation under dynamic compression [J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, 133(14): 145902.
- [26] BERRYMAN E J, WINEY J M, GUPTA Y M, et al. Sound velocities in shock-synthesized stishovite to 72 GPa [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(23): 13695-13703.
- [27] JING Z, YU T, XU M, et al. High-pressure sound velocity measurements of liquids using in situ ultrasonic techniques in a multianvil apparatus [J]. *Minerals*, 2020, 10(2): 126.
- [28] ALMOND D P, BLAIRS S. An apparatus employing the pulse-echo overlap technique for the measurement of sound velocities in liquid metals [J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1980, 13(9): 964-968.
- [29] RIVERS M L, CARMICHAEL I S E. Ultrasonic studies of silicate melts [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1987, 92(B9): 9247-9270.
- [30] KATAHARA K W, RAI C S, MANGHNANI M H, et al. An interferometric technique for measuring velocity and attenuation in molten rocks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1981, 86(B12): 11779-11786.
- [31] SINOGEIKIN S V, LAKSHTANOV D L, NICHOLAS J D, et al. High temperature elasticity measurements on oxides by brillouin spectroscopy with resistive and IR laser heating [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, 25(8): 1313-1324.
- [32] XI F, JIN K, CAI L, et al. Sound velocity of tantalum under shock compression in the 18–142 GPa range [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(18): 185901.
- [33] HUANG H, LENG C, WANG Q, et al. Measurements of sound velocity of liquid Fe-11.8 wt % S up to 211.4 GPa and 6150 K [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(6): 4730-4739.
- [34] LIU L, BARON A Q R, OHTANI E, et al. Sound velocities of the hydrous iron-rich HH1-phase: implications for lower mantle seismic heterogeneities [J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(1): e2024GL112963.
- [35] ZHOU X, LIU X, LI J, et al. Shock-induced decomposition of a high density glass (ZF6) [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(1): 013507.
- [36] GUI W, SHEN K, LIU J. Phase stability and reactions of subducting CaCO<sub>3</sub> under upper mantle conditions [J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2023, 97(1): 309-315.
- [37] LIU S, SU X, WAN S, et al. Subduction of sedimentary carbonate in the mariana trench [J]. *Geochemical Perspectives Letters*, 2024, 31: 8-13.
- [38] WORDEN R H, BURLEY S D. Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone [M]. *Sandstone diagenesis: Recent and ancient*, 2003, 1-44.
- [39] MCDONOUGH W F, SUU S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical geology*, 1995, 120(3-4): 223-253.
- [40] LIU J, LIN J. Abnormal acoustic wave velocities in basaltic and (Fe,Al)-bearing silicate glasses at high pressures [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(24): 8832-8839.
- [41] DASGUPTA R, HIRSCHMANN M M. The deep carbon cycle and melting in earth's interior [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 298(1-2): 1-13.
- [42] HU J, DAI C, YU Y, et al. Sound velocity measurements of tantalum under shock compression in the 10-110 GPa range [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(3): 033511.
- [43] AKIN M C, NGUYEN J H, BECKWITH M A, et al. Tantalum sound velocity under shock compression [J]. *Journal of Applied Physics*, 2019, 125(14): 145903.
- [44] UMEDA Y, FUKUI K, SEKINE T, et al. Hugoniot and released state of calcite above 200 GPa with implications for hypervelocity planetary impacts [J]. *Icarus*, 2022, 377: 114901.
- [45] MITCHELL A C, NELLIS W J. Shock compression of aluminum, copper, and tantalum [J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52(5): 3363-3374.
- [46] FARSANG S, LOUVEL M, ZHAO C, et al. Deep carbon cycle constrained by carbonate solubility [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4311.

- [47] UMEDA Y, OZAKI N, SEKINE T, et al. In situ observation of shock-induced structural evolution of calcite [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2025, 52(2): 20.
- [48] KERLEY G I. Equations of state for calcite minerals. I. theoretical model for dry calcium carbonate [J]. *High Pressure Research*, 1989, 2(1): 29-47.
- [49] GUPTA S C, LOVE S G, AHRENS T J. Shock temperature in calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) at 95–160 GPa [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(1): 1-12.
- [50] LUO Y, XIANG S, LI J, et al. Equation of state of MgO up to 345 GPa and 8500 K [J]. *Physical Review B*, 2023, 107(13): 134116.
- [51] ZHANG Y, SEKINE T, LIN J, et al. Shock compression and melting of an Fe-Ni-Si alloy: implications for the temperature profile of the earth's core and the heat flux across the core-mantle boundary [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(2): 1314-1327.
- [52] LITVIN Y, SPIVAK A, SOLOPOVA N, et al. On origin of lower-mantle diamonds and their primary inclusions [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2014, 228: 176-185.
- [53] ZHANG Z, LIU Z. High pressure equation of state for molten  $\text{CaCO}_3$  from first principles simulations [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2015, 34(1): 13-20.
- [54] LOBANOV S S, SPEZIALE S, LIN J, et al. Radiometric temperature determination in nongray bridgmanite: applications to melting curve and post-perovskite transition boundary in the lower mantle [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(5): e2021JB021723.
- [55] LOBANOV S S, SOUBIRAN F, HOLTGREWE N, et al. Contrasting opacity of bridgmanite and ferropericlaase in the lowermost mantle: implications to radiative and electrical conductivity [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 562: 116871.
- [56] LI H, ANDUJAR J, SLODCZYK A, et al. Spectral emissivity of phonolite lava at high temperature [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 60: 1-15.
- [57] RIGG P A, SCHARFF R J, HIXSON R S. Sound speed measurements in tantalum using the front surface impact technique [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(3): 032018.
- [58] ZHAO Y, DENG X, WANG W, et al. Seismic visibility of carbonated subducted oceanic crust in the lower mantle [J]. *Communications Earth & Environment*, 2025, 6(1): 146.
- [59] MARCONDES M L, JUSTO J F, ASSALI L V C. Carbonates at high pressures: possible carriers for deep carbon reservoirs in the earth's lower mantle [J]. *Physical Review B*, 2016, 94(10): 104112.
- [60] KURNOSOV A, CRINITI G, BOFFA BALLARAN T, et al. High pressure and high temperature brillouin scattering measurements of pyrope single crystals using flexible  $\text{CO}_2$  laser heating systems [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2024, 51(4): 38.
- [61] LI L, YU Y, MAO Z, et al. Low-velocity structure of subducted oceanic crust in the upper mantle: Insights from high pressure and temperature elasticity measurements of aragonite [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2023, 128(12): e2023JB027838.
- [62] BROWN J M, MCQUEEN R G. Phase transitions, grüneisen parameter, and elasticity for shocked iron between 77 GPa and 400 GPa [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B7): 7485-7494.
- [63] ANDERSON W W, AHRENST J. An equation of state for liquid iron and implications for the earth's core [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1994, 99(B3):4273–4284.
- [64] HOU M, ZHANG Q, TAO R, et al. Temperature-induced amorphization in  $\text{CaCO}_3$  at high pressure and implications for recycled  $\text{CaCO}_3$  in subduction zones [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1963.
- [65] LI B, LIEBERMANN R C. Study of the earth's interior using measurements of sound velocities in minerals by ultrasonic interferometry [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2014, 233: 135-153.
- [66] DECREMPS F, BELLARD L, PERRIN B, et al. Sound velocity and absorption measurements under high pressure using picosecond ultrasonics in diamond anvil cell. Application to the stability study of AlPdMn [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(3): 035502.
- [67] FIQUET G, BADRO J, GUYOT F, et al. Application of inelastic X-ray scattering to the measurements of acoustic wave velocities in geophysical materials at very high pressure [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2004, 143-144: 5-18.
- [68] DELBRIDGE B, ISHII M. Seismic wave speeds derived from nuclear resonant inelastic X-ray

- scattering for comparison with seismological observations [J]. *Minerals*, 2020, 10(4): 331.
- [69] ANZELLINI S, BOCCATO S. A practical review of the laser-heated diamond anvil cell for university laboratories and synchrotron applications [J]. *Crystals*, 2020, 10(6): 459.
- [70] WEI W, LI X, SUN N, et al. Sound velocity of neon at high pressures and temperatures by brillouin scattering [J]. *American Mineralogist*, 2019, 104(11): 1650-1655.
- [71] SAKAMAKI T, OHTANI E, FUKUI H, et al. Constraints on earth's inner core composition inferred from measurements of the sound velocity of hcp-iron in extreme conditions [J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1500802.
- [72] NAKAJIMA Y, IMADA S, HIROSE K, et al. Carbon-depleted outer core revealed by sound velocity measurements of liquid iron-carbon alloy [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 8942.
- [73] LIN J F, STURHAHN W, ZHAO J, et al. Sound velocities of hot dense iron: birch's law revisited [J]. *Science*, 2005, 308(5730): 1892-1894.
- [74] HU M Y, STURHAHN W, TOELLNER T S, et al. Measuring velocity of sound with nuclear resonant inelastic X-ray scattering [J]. *Physical Review B*, 2003, 67(9): 094304.
- [75] BOCCATO S, GAUTHIER M, SIERSCH N C, et al. Picosecond acoustics: a new way to access elastic properties of materials at pressure and temperature conditions of planetary interiors [J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2022, 49(6): 20.
- [76] 周显明, 操秀霞, 李俊, 等. 氟化锂和蓝宝石单晶冲击消光及其对辐射测温的影响 [J]. *原子与分子物理学报*, 2012, 29(3): 481-486.  
ZHOU X M, CAO X X, LI J, et al. Shock-induced optical extinction in LiF and sapphire crystals and its significance in the radiant temperature determination [J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2012, 29(3): 481-486.
- [77] YOUNG G, LIU X, LENG C, et al. Refractive index of [100] lithium fluoride under shock pressures up to 151 GPa [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(12): 125310.
- [78] MCQUEEN R G, HOPSON J W, FRITZ J N. Optical technique for determining rarefaction wave velocities at very high pressures [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1982, 53(2): 245-250.
- [79] WANG B, PRAKASH V. Sound speed measurements in shock compressed cemented tungsten carbide: evolution of elastic moduli with damage at pressures to 100 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2024, 135(13): 135901.
- [80] DAI C, JIN X, ZHOU X, et al. Sound velocity variations and melting of vanadium under shock compression [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, 34(20): 3064-3070.
- [81] HUANG H, FAN L, LIU X, et al. Inner core composition paradox revealed by sound velocities of Fe and Fe-Si alloy [J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 616.

## A Method for Simultaneous Measurement of Shock Temperature and Sound Velocity in Transparent Minerals

REN Lei<sup>1</sup>, GAN Bo<sup>1,2</sup>, HUANG Yuqian<sup>1</sup>, HE Qing<sup>1</sup>, ZHANG Youjun<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;*

2. *State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation and Maintenance of Deep Underground Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)*

**Abstract:** Dynamic compression techniques serve as a critical approach to generate ultrahigh pressure and high temperature conditions, with wide applications in high-energy-density physics, geophysics, and defense-related research. Shock temperature and sound velocity are key physical parameters for characterizing thermodynamic states and elastic properties. Nevertheless, conventional shock experiments typically require separate measurements of sound velocity and temperature, which increases experimental complexity and may introduce state mismatch between different physical quantities. For transparent materials, previous studies have established a method for the simultaneous measurement of shock temperature and longitudinal sound velocity. In this method shock temperature is determined from thermal radiation emitted at the shock front, which transmitted through the uncompressed region; while longitudinal sound velocity ( $V_p$ ) is derived from the temporal evolution of radiation signals. In this study, the experimental configuration and signal acquisition scheme were optimized for transparent minerals, and the applicability of this method under shock melting conditions was evaluated. Natural single-crystal calcite was selected as a model material. At a shock pressure of 115.7 GPa, the shock temperature and  $V_p$  were determined to be 3810 K and 9.32 km/s, respectively. Combined with experimental observations and previously reported phase diagrams, the results indicate that calcite underwent shock melting under these conditions, validating the feasibility of this method under shock melting conditions. Our study provides a feasible approach for simultaneously measuring thermodynamic and elastic properties of transparent minerals under extreme conditions, especially melting. The results also provide important constraints for understanding deep-Earth processes and evaluating the dynamic response of transparent window materials under high-energy-density environments.

**Keywords:** shock temperature; sound velocity; transparent minerals; simultaneous measurement; shock melting