

# 兆巴压力下蓝宝石发光辐射特性与结构相变

张宁超<sup>1\*</sup>, 王鹏<sup>1\*\*</sup>, 华翔<sup>1</sup>, 任娟<sup>2</sup>, 刘福生<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;

<sup>2</sup>西安工业大学理学院, 陕西 西安 710021;

<sup>3</sup>西南交通大学材料先进技术教育部重点实验室, 四川 成都 610031

**摘要** 冲击压缩过程中蓝宝石的发光辐射现象与其在高压下的透明性、结构相变密切相关。采用密实金属与蓝宝石窗口直接接触的靶结构,在二级轻气炮加载平台上研究了蓝宝石在高于兆巴压力(100 GPa)区域的发光辐射特性。利用多通道辐射高温计得到了含有金属界面辐射的典型的发光辐射信号,通过辐射传输模型得到了蓝宝石自身的辐射强度。结果表明:在兆巴以上压缩区域,蓝宝石的辐射温度随压力变化出现明显的转折,在 87 GPa 压力附近蓝宝石发生冲击压缩结构相变。

**关键词** 光谱学; 冲击光谱; 兆巴压力; 蓝宝石; 发光特性; 结构相变

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0730002

## Optical Radiation Characteristics and Structural Phase Transition of Sapphire Under Megabar Pressure

Zhang Ningchao<sup>1\*</sup>, Wang Peng<sup>1\*\*</sup>, Hua Xiang<sup>1</sup>, Ren Juan<sup>2</sup>, Liu Fusheng<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaaxi 710021, China;

<sup>2</sup>School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaaxi 710021, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

**Abstract** The optical radiation of sapphire during shock compression process is closely related to its transparency and structural phase transition under high pressure. This study investigates the optical radiation characteristics of sapphire above megabar pressure (namely, 100 GPa) on the loading platform of two-stage light-gas gun using the target structure of direct contact between dense metal and sapphire window. A typical optical radiation signal containing metal-interface radiation is obtained using a multi-channel radiation pyrometer. The radiation through sapphire is determined using the radiative transfer model. Results show that the change in radiation temperature of sapphire in the shock-compression region under the pressure above megabar is found to show a significant turning and the shock-induced structural phase transition of sapphire occurs under the pressure near to 87 GPa.

**Key words** spectroscopy; shock spectra; megabar pressure; sapphire; luminescence characteristics; structural phase transition

**OCIS codes** 300.2140; 300.6170; 160.4670

## 1 引 言

蓝宝石具有典型的六方晶格结构,常态下具有高强度、高熔点、高阻抗、极好的透明性以及稳定的化学性质,该性质使得蓝宝石在各个领域应用广泛,

比如半导体工业、防御防护工程、高压科学技术及地质学研究领域。尤其是高压科学研究领域,作为冲击波实验中的重要观测窗口材料,蓝宝石经受的冲击压力通常在百万帕(即兆巴)压力以上<sup>[1-3]</sup>。然而研究发现,在兆巴以上的压力区间,蓝宝石窗口自身

收稿日期: 2019-03-27; 修回日期: 2019-04-11; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(11574254)、陕西省创新人才推进计划—青年科技新星项目(2019KJXX-034)、陕西省科技厅重点研发计划(2019GY-075, 2018GY-044, 2017ZDXM-GY-114, 2017GY-085); 陕西省自然科学基金(2018JQ1042)、西安市科技局专项基金(201805031YD9CG15-1)

\* E-mail: ningchaozhang@163.com; \*\* E-mail: 13519178303@139.com

会产生严重辐射,在一定程度失去透明性,此时窗口受到冲击波压缩的辐射区域会对前方的辐射产生吸收、散射等作用。蓝宝石窗口透明性的变化会导致金属测温实验中的测量结果明显偏离样品的实际温度值,进而导致在利用激光干涉测量冲击波自由面速度的实验中,激光测量的准确性下降。蓝宝石的化学组分为氧化铝是地幔的重要组成物质<sup>[4-6]</sup>,而兆巴压力区间也是下地幔物质结构相变容易发生的压力区域,通过研究蓝宝石辐射特性进而分析其与结构相变的关联,对于认识地球内部结构的变化具有重要意义。在蓝宝石窗口兆巴压力区域发光辐射特性的研究方面,Urtiew等<sup>[7]</sup>将蓝宝石和氯化钠窗口叠加,结果发现,当蓝宝石中的压力达到129 GPa时,接收的辐射强度先减弱后增强。他们认为窗口经历了透明性先下降,而当卸载波到来时又升高的过程。然而,在一般的实验中,卸载波的到来只会增大对窗口的拉伸破坏,如果后期发光强度增强,很可能来自于窗口自身的发光。Zhang等<sup>[8]</sup>在对兆巴以上压力区间蓝宝石的发光问题进行较为系统的研究后发现,蓝宝石的光谱辐射表现出随时间线性增强的特征,但是辐射温度却没有随着压力增大而发生较大变化。他认为,在兆巴压力以上,蓝宝石有着非常强的辐射背景,基本不适合作为金属测温的窗口材料。McQueen等<sup>[9]</sup>和周显明等<sup>[10]</sup>的研究的共同点是,利用发光物质作为发光基板,分析光纤接收到的发光强度随时间的变化特征,前者认为蓝宝石窗口在200 GPa冲击压力下仍保持着良好的透明性,而后者则发现其在100 GPa以上冲击压力下存在明显的消光增强和透射率下降现象,并提出该变化可能与其高压结构相变有关。通常采用动高压技术和静高压技术对蓝宝石的高压结构相变进行实验研究。在动高压技术中研究方面,Cao等<sup>[11-12]</sup>利用激光干涉技术,在5~210 GPa压缩区间系统地研究了蓝宝石窗口在冲击压缩过程中光学折射率的变化。实验结果表明,蓝宝石的折射率对压力变化敏感,变化趋势与冲击过程中材料的高压结构相变密切相关,在92 GPa和166 GPa压力下发现了两个高压相边界。此外,Mashimo<sup>[13]</sup>研究了蓝宝石冲击 Hugoniot 线的参数变化,发现,当冲击压力达到79 GPa时,蓝宝石的冲击 Hugoniot 线出现明显的转折,并以此推断该压力处于蓝宝石的高压相变区间。通过测量冲击压缩下样品电导率的变化,Weir等<sup>[14]</sup>发现,当压力达到124 GPa时,电导率明显下降,并认为这源于高压结构相的不同。在静高压技术研究方

面,Lin等<sup>[15]</sup>利用金刚石对顶砧结合X射线进行实验时发现,在压力为96 GPa、温度为1200 K的条件下,蓝宝石从 $\alpha$ 相转变为 $\text{Rh}_2\text{O}_3$ (II)相。Ono等<sup>[16]</sup>利用金刚石压砧技术提高了静高压实验的压力上限,并发现,在压力130 GPa、温度为1500~2000 K的条件下,蓝宝石从 $\text{Rh}_2\text{O}_3$ (II)相转变为 $\text{CaIrO}_3$ 相。上述工作虽然利用不同实验手段研究了蓝宝石的高压结构相变,但对于同时考虑冲击压力及辐射发光特性来界定其高压相边界,甚至在探索它们的固-液相变、获得高压熔化线方面的研究涉及得非常少。本课题组在前期对蓝宝石的发光机理进行了研究<sup>[17]</sup>,蓝宝石作为脆性透明材料,在冲击波诱导下的辐射属于一种非均匀的热辐射,辐射温度来自于局部高温形变区的熔化过程,该结论为直接获得蓝宝石的高压熔化温度提供了参考,也为通过高压熔化线来限定材料的高压相图提供了一种新途径。本文将在前期研究低压区蓝宝石辐射发光机理的基础上,在兆巴及以上压力区域利用二级轻气炮发射平台和冲击光谱测试诊断技术,通过对辐射信号进行解析来研究蓝宝石的冲击发光特性和高压相变。

## 2 实 验

透明材料一般是指在常温常压下对可见光吸收极少的物质,绝大多数在常温常压下具有良好透明性的物质,在冲击压缩下就会失去透明性,表现为波阵面后处于高温状态下的被压缩材料强烈地辐射发光。透明材料冲击波阵面前方介质是透明的,冲击波后介质发射的光辐射能够透过波前介质被光-电探头探测到。基于该基本原理,通过光纤直接引入压缩层的辐射强度,利用辐射高温计对蓝宝石发光辐射强度进行光电转换,并采用示波器进行记录。如图1所示,利用块状密实金属与蓝宝石窗口紧密接触,飞片与基板发生碰撞后产生的冲击波依次通过密实金属进入窗口。实验中基板选用发射率低的金属铜<sup>[17]</sup>,基板尺寸为 $\Phi 40\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ ,抛光后的无氧铜的表面粗糙度小于20 nm。蓝宝石窗口选用晶面取向沿 $c$ 向的单晶块状材料,尺寸为 $\Phi 20\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,表面粗糙程度小于10 nm。为了保证金属/窗口界面达到更为精密的接触,每次实验前都会采用2~3 GPa气压对基板进行均匀压缩,通过观察窗口与金属面之间的牛顿环可以判断接触间隙小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ ,同时对靶腔内部进行抽真空处理。采8通道光纤束采集辐射发光信号,

光纤束前端利用限制孔径角的方法尽量缩小发光界面处的观测范围,避免了其他的杂散光进入接收光纤。高温计每个通道在进行实验前需要进行现场标

定,实验后根据标定结果用最小二乘法将不同波长上观测到的光谱辐亮度拟合成 Plank 灰体谱,就可以得到表观辐射温度<sup>[17]</sup>。

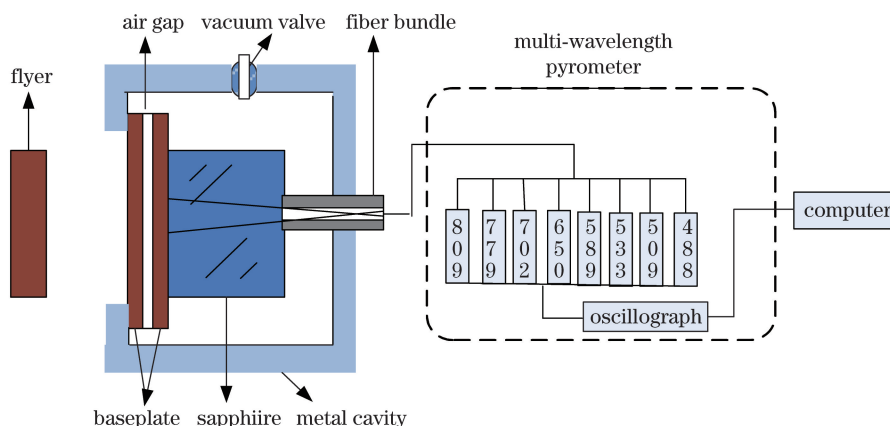


图 1 光谱测量系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of light emitting spectrum measurement system

### 3 结果与讨论

#### 3.1 典型的瞬态光谱信号特性

早期对蓝宝石晶体辐射特性的冲击实验中,由于压力过高,金属表面的辐射和间隙处的杂散光会对窗口辐射产生严重干扰,利用高温计获得的冲击发光历程通常呈现一些复杂和不规律的曲线特征。本研究通过对发射率低的无氧铜基板表面进行优化处理以及对靶体的装配工艺进行改进,在兆巴压力下获得了窗口材料规律性的辐射特征。如图 2 所示,在冲击压力为 100 GPa 下,共获得 8 个不同通道的辐射强度变化曲线,不同波长的辐射历史呈现出非常一致的变化趋势。图 2 中,  $t_1$  时刻非常窄的脉冲尖峰表明冲击波透过金属开始进入窗口,界面处间隙存在的微量空气产生较强辐射,由于本实验严格控制了接触面的间隙,力争实现“理想接触”,因此间隙气体发光很快熄灭,形成的辐射尖峰脉冲非常窄。随后发光强度随着冲击波的传入而呈线性增大,直到  $t_2$  时刻受到卸载波影响而发生偏离。在辐射尖峰熄灭后,起始辐亮度并未归零,因此将其归结为金属界面残余辐射的贡献。

#### 3.2 辐射运输模型分析

与低压区高温计采集的辐射信号不同,当冲击压力达到兆巴以上时,来自炽热基板发出的辐射及间隙产生的热辐射,也将作为一种干扰进入辐射高温计,与预测信号被一并记录。虽然间隙气体产生非常窄的发光脉冲宽度,但来自金属表面的残余辐

射使得辐射信号进入窗口材料时产生明显的起跳。随着冲击波在窗口传输,后期的信号仍以线性规律增长。本实验结果建立在对实验中各类杂散光分析排除的基础之上,可以认为该结果是兆巴压力区蓝宝石窗口的真实辐射信息,但测试信号中同时包含了冲击波压缩下窗口压缩厚度辐射的不断积累过程以及金属界面残余辐射的衰减过程。为此,本文建立了冲击波在蓝宝石传播过程中辐射能量的运输物理模型。已有研究表明,蓝宝石窗口在冲击波压缩过程中会使材料内部产生非均匀分布的冲击绝热剪切带,而冲击波诱导的蓝宝石辐射主要来源于局部分布的剪切带的辐射积累<sup>[18-19]</sup>。随着冲击波在窗口材料中传播,绝热剪切带本身将参与辐射运输过程,既有新产生发射源的辐射,又有对前端光辐射流场的吸收。由于窗口在冲击下的表观辐射温度来自于对辐射信号值与普朗克灰体的拟合,因此灰体模型建立过程的发射率应同时反映出发射、吸收的过程。图 3 给出了热辐射运输的过程,在沿冲击波传播方向上,设单位厚度的光吸收系数为  $\alpha_a$ 、发射系数为  $\epsilon_e$ ,结合灰体辐射模型给出冲击发光辐射能量运输方程可得

$$\frac{dI_{\text{gre}}(\lambda, T, t)}{dx} = -\alpha_a I_0(\lambda) + \epsilon_e I_{\text{pl}}(\lambda, T), \quad (1)$$

式中:  $I_{\text{gre}}$  为灰体辐射光谱辐射强度;  $\lambda$  为波长;  $T$  为辐射对应的温度值;  $t$  为辐射持续的时间;  $I_{\text{pl}}$  为实验测量的光谱辐射强度;  $I_0$  为高温计信号各通道辐射强度的起始值。

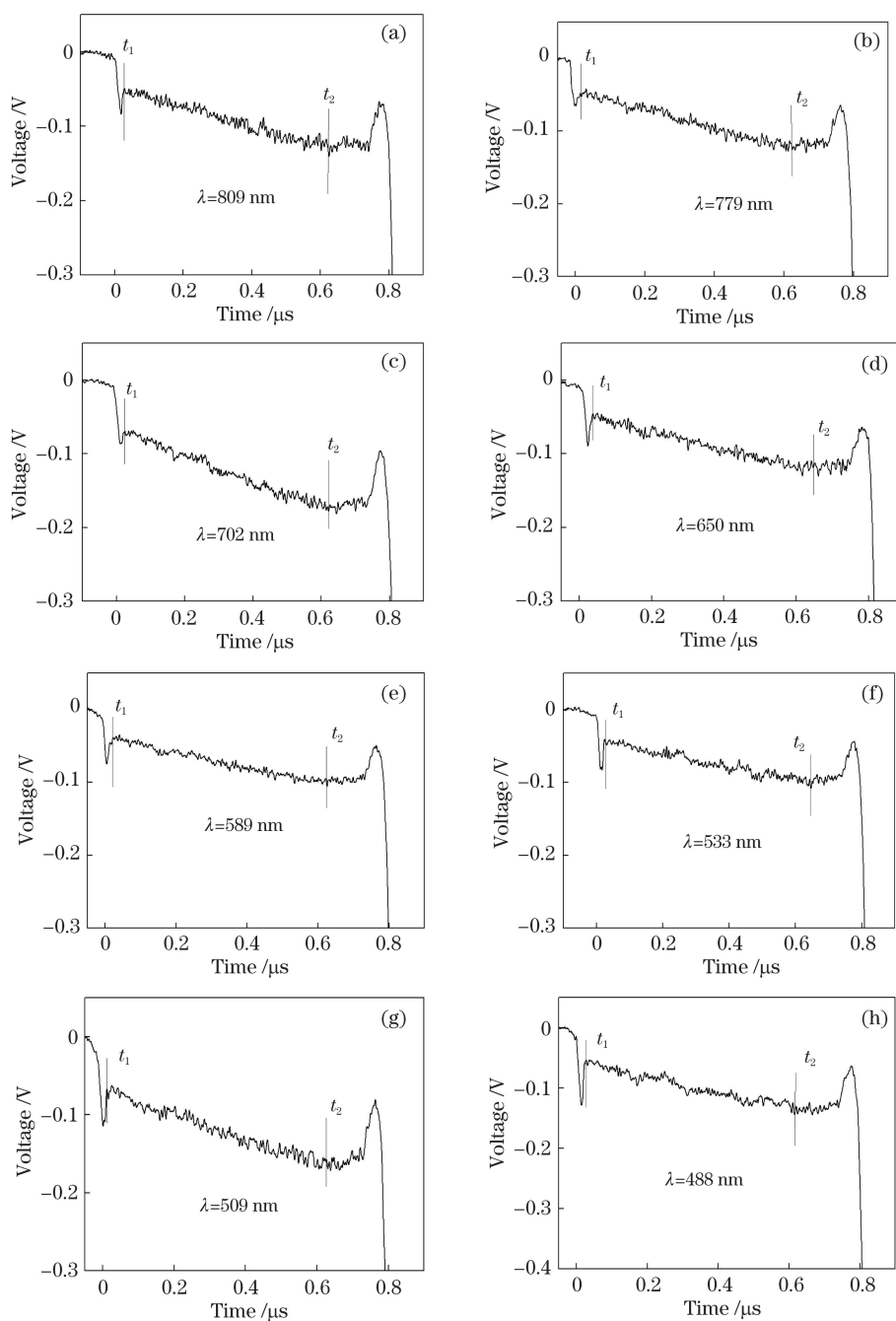


图 2 100 GPa 冲击压力下高温计测得的辐射强度曲线

Fig. 2 Radiation intensity curves measured from pyrometer under 100 GPa shock pressure

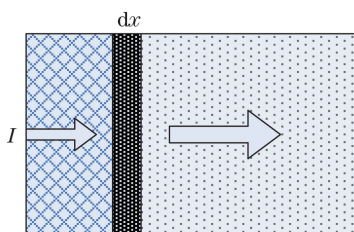


图 3 冲击压缩条件下透明材料的辐射运输模型  
Fig. 3 Radiation transport model of transparent materials under shock compression

在(1)式中,同种材料一般处在同种状态下的  $\epsilon_e = 1 - \exp[-(\alpha_a(D-u)t)]$ ,根据微分方程的通解,可以得到包含界面辐射和窗口材料自身辐射信息的模型方程:

$$I_{\text{gre}}(\lambda, T, t) = -I_0(\lambda) \exp[-(\alpha_a(D-u)t)] + \{1 - \exp[-(\alpha_a(D-u)t)]\} I_{\text{pl}}(\lambda, T) \quad (2)$$

式中: $D$  为冲击波波阵面的传播速度; $u$  为波阵面后粒子的传播速度。

(2)式满足蓝宝石晶体在冲击压缩发光过程中

每部分辐射经过吸收再发射,等号右端第一项  $-I_0(\lambda)\exp[-(-\alpha_a(D-u)t)]$  表示入射光在冲击压缩区域吸收后的剩余部分,等号右端第二项  $\{1 - \exp[-(-\alpha_a(D-u)t)]\}I_{pl}(\lambda, T)$  表示蓝宝石自身产生绝热剪切带的辐射部分。在冲击波计算中,压缩距离可以由  $(D-u)t$  表示,实验中观测到的辐射强度随时间线性增强的特征,既包含了被压缩蓝宝石发光积累增强的效果,也包含了界面的光辐射被吸收减弱的效果。由于冲击波过后材料界面受损,因此(2)式中忽略了金属界面的反射作用,利用辐射输运方程对实验测试结果进行数值拟合计算,结果如图4所示,以  $\lambda = 809 \text{ nm}$  通道为例,数值拟合后可以得到金属表面残余辐射和蓝宝石辐射的积累增强,同时得到对应压力下窗口表观辐射温度  $T_s$  和各个波长对应的光学吸收系数  $\alpha_a$ 。

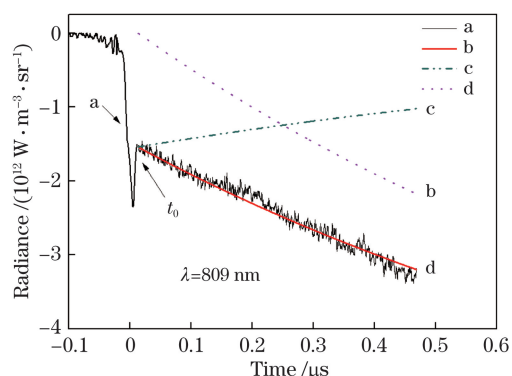


图4 蓝宝石辐亮度实验结果与拟合结果的比较

Fig. 4 Comparison between fitting curves and experimental results of sapphire radiance

在拟合结果中,辐射尖峰闭合后的起跳辐射强度对应  $I_0$ ,其中  $a$  曲线是实验测试结果,拟合后得到的  $b$  曲线是冲击压缩过程中窗口自身辐射的积累, $c$  曲线是界面残余辐射被吸收衰减的过程。根据辐射输运方程(2)式,将曲线  $c$  和曲线  $d$  的辐亮度结合起来,得到在冲击压缩过程中,表观辐射强度随时间的变化曲线的模型拟合结果曲线  $b$ ,将其与测量曲线  $a$  比较后可知,模型拟合结果很好地反映了兆巴压力下蓝宝石实验靶的冲击发光特征。利用该模型分别对其他7个波长的辐射信号进行拟合,得到了蓝宝石在兆巴压力下真实的辐射发光强度值。对8个波长的辐射历史利用普朗克灰体辐射模型进行拟合,得到蓝宝石在100 GPa冲击压力下的表观辐射温度  $T_s = 4416 \text{ K}$ ,光学吸收系数  $\alpha_a = 1.2 \text{ cm}^{-1}$ 。

### 3.3 辐射温度与高压结构相变

冲击波加载技术是在实验室中产生极端高温高

压环境,研究材料高温高压状态方程和高压相变的重要手段,在地球物理和行星物理研究领域也有着重要的应用。蓝宝石是下地幔重要的物质组分,研究冲击压缩下该类晶体材料的结构相变,对认识地球内部结构性质非常重要。冲击压缩属于绝热压缩过程,在材料高压相变的实验研究中,很难直接获得材料冲击熔化线的特征,往往通过测量声速、电导率、折射率、温度等参量随压力的突变来确定冲击绝热相边界。冲击波压缩下的极端应力-应变过程属于绝热过程,冲击熔化需要的能量全部来自于冲击波本身,只有提高冲击压力才能增强冲击波携带的能量,使被压缩物质获得更多热能,并熔化。因此固体的冲击熔化只能在一定的压力区间实现。实验上,由于固体冲击熔化很难通过  $D-u$  绝热线来判定发生熔化的起始压力,理论上也不能严格阐明高压熔化的普遍规律,加之固-液相变和固-固相变纠缠在一起,进一步加深了高压熔化实验测量和理论研究的困难。目前尚没有统一的理论模型精确描述固体在高压下的熔化温度随压力的变化规律,虽然静高压实验建立了一些描述低压区熔化规律的半经验-半理论熔化方程,但更高压力区间固体的熔化现象和规律却无法实现。根据前期研究可知,在低于100 GPa的压力区间,蓝宝石在冲击压缩下的辐射特性表现出非均匀辐射和异常高温的特性,而且辐射温度远高于冲击 Hugoniot 温度,且接近冲击熔化温度,这为利用冲击辐射温度得到蓝宝石的高压熔化线提供了可能,为研究蓝宝石的固-液相变提供一种实验途径。

结合前期的研究结论,将蓝宝石在40~120 GPa压力区间的辐射温度与其高压相图进行比较。如图5所示,在低于兆巴压力区间,蓝宝石辐射温度基本上呈线性上升的趋势,且与静高压实验结论<sup>[20]</sup>较为一致。当冲击压力上升到兆巴以上压力区时,辐射温度分布明显偏离熔化温度的计算值,且随压力的变化不明显。通过与金刚石对顶砧静高压实验得到的蓝宝石发生高压结构相变边界<sup>[16]</sup>进行比较可以发现,辐射温度随压力发生偏离的区域位于蓝宝石 Corundum 结构向  $\text{Rh}_2\text{O}_3(\text{II})$  结构转变的区域。蓝宝石属于透明脆性材料,在冲击波压缩下容易在位错和缺陷处产生绝热剪切带,并形成非均匀的热辐射区域<sup>[21-22]</sup>。在高于兆巴压力区间,虽然蓝宝石的辐射温度随压力增加未发生显著变化,且明显偏离了计算的熔化温度分布,但该压力区的辐射仍具有普朗克热辐射特征,辐射温度仍然能够反

映绝热剪切带熔化过程的温度值。透明晶体的高压熔化温度与其粒子之间化学键的强度密切相关, Lin 等<sup>[15]</sup> 已利用金刚石压砧实验研究证明了蓝宝石的 Corundum 相与  $\text{Rh}_2\text{O}_3(\text{II})$  相粒子间的化学键不相同, 随着外界压力持续增大, 蓝宝石晶体内部  $\text{AlO}$  结合键变长, 然而冲击压缩过程又会使样品的体积减小, 据此认为, 当冲击使得蓝宝石进入  $\text{Rh}_2\text{O}_3(\text{II})$  时, 化学键就会发生很大程度的变形, 该过程在宏观上表现为剪切力减弱。所以当蓝宝石进入新的相结构时, 熔化温度值反而会出现降低的现象。但是  $\text{Rh}_2\text{O}_3(\text{II})$  相结构也影响了辐射温度随压力变化的趋势, 即温度并没有随压力的增加而升高, 表现出对压力变化不敏感的特性。

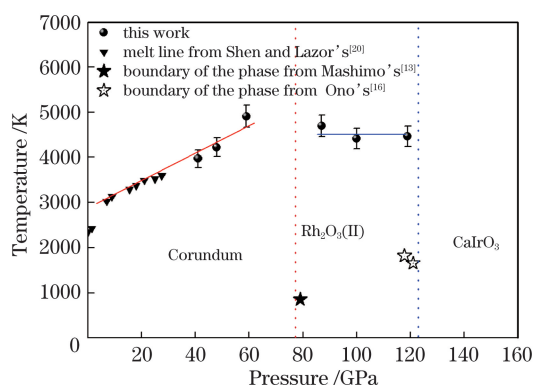


图 5 蓝宝石辐射温度与结构相变的关系图

Fig. 5 Relationship between radiation temperature and structural phase transition of sapphire

## 4 结 论

在兆巴及以上压力区间, 蓝宝石是不透明金属材料测温实验的重要窗口, 蓝宝石自身的发光辐射必然会影响金属辐射测温数据的真实性以及模型结构的合理性。兆巴压力区域也是下地幔物质发生结构相变的高压区间。本文将蓝宝石单晶的冲击波诱导辐射特性作为一类重要的物性加以系统研究。实验中, 在兆巴及以上压力区域, 通过样品改善制备工艺和优化靶体装配, 利用辐射高温计得到了蓝宝石辐射的规律性变化信息。同时, 通过透明晶体发光辐射流场发射、吸收等特征构建了辐射运输模型, 利用模型对实验结果进行拟合求解, 合理地扣除了金属界面对表观辐射的贡献, 从理论上定量得到对应压力下蓝宝石自身辐射的强度以及吸收系数, 该结论可以为合理修正不透明材料冲击温度测量偏差提供依据, 在一定程度上拓宽测温实验的压力区间, 在材料的高温高压状态方程研究领域具有重要的科学

价值。同时, 基于蓝宝石辐射发光的机理分析了辐射温度来自于局部高温形变区的熔化过程, 将辐射温度与蓝宝石熔化温度相关联, 在不同高压结构相区得到温度的不同分布特征。在发生冲击结构相变的压力附近发现蓝宝石的冲击辐射温度随压力变化的曲线出现了转折, 这表明结构相变对高压熔化线的走势具有明显影响, 且在 87 GPa 压力附近发现蓝宝石的高压相图中对应液相、Corundum 相和  $\text{Rh}_2\text{O}_3(\text{II})$  相的三相点边界。该结论不仅为透明脆性材料高压熔化线的研究提供了一种途径, 还完善了地幔物质的高压相图。

## 参 考 文 献

- [1] Knudson M D, Desjarlais M P, Dolan D H. Shock-wave exploration of the high-pressure phases of carbon[J]. *Science*, 2008, 322(5909): 1822-1825.
- [2] Huang H J, Fei Y W, Cai L C, *et al.* Evidence for an oxygen-depleted liquid outer core of the Earth[J]. *Nature*, 2011, 479(7374): 513-516.
- [3] Schmitt D R, Ahrens T J. Temperatures of shock-induced shear instabilities and their relationship to fusion curves [J]. *Geophysical Research Letters*, 1983, 10(11): 1077-1080.
- [4] Yoo C S, Holmes N C, See E. Shock-induced optical changes in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  at 200 GPa; implications for shock temperature measurements in metals[C] // *Proceedings of the American Physical Society Topical Conference*, June 17-20, 1991, Williamsburg. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1992: 733-736.
- [5] Barker L M, Hollenbach R E. Shock-wave studies of PMMA, fused silica, and sapphire[J]. *Journal of Applied Physics*, 1970, 41(10): 4208-4226.
- [6] Wang F, Peng X S, Liu S Y, *et al.* Ionization effect in the transparent window for shock-wave diagnosis under indirect drive[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312002.  
王峰, 彭晓世, 刘慎业, 等. 辐射驱动条件下冲击波诊断用透明窗口离化现象研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0312002.
- [7] Urtiew P A, Grover R. Temperature deposition caused by shock interactions with material interfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(1): 140-145.
- [8] Zhang D Y, Liu F S, Hao G Y, *et al.* Shock induced emission from sapphire in high-pressure phase of  $\text{Rh}_2\text{O}_3(\text{II})$  structure[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, 24(8): 2341-2344.
- [9] McQueen R G, Isaak D G. Characterizing windows for shock wave radiation studies[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(B13): 21753-21765.

- [10] 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): 481-487.  
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): 481-487.
- [11] Cao X X, Li J B, Li J, *et al.* Refractive index of r-cut sapphire under shock pressure range 5 to 65 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(9): 093516.
- [12] Cao X X, Wang Y, Li X H, *et al.* Refractive index and phase transformation of sapphire under shock pressures up to 210 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(11): 115903.
- [13] Mashimo T, Tsumoto K, Nakamura K, *et al.* High-pressure phase transformation of corundum ( $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) observed under shock compression [J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(14): 2021-2024.
- [14] Weir S T, Mitchell A C, Nellis W J. Electrical resistivity of single-crystal  $\text{Al}_2\text{O}_3$  shock-compressed in the pressure range 91-220 GPa (0.91-2.20 Mbar) [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 80(3): 1522-1525.
- [15] Lin J F, Degtyareva O, Prewitt C T, *et al.* Crystal structure of a high-pressure/high-temperature phase of alumina by *in situ* X-ray diffraction [J]. *Nature Materials*, 2004, 3(6): 389-393.
- [16] Ono S, Oganov A R, Koyama T, *et al.* Stability and compressibility of the high-pressure phases of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  up to 200 GPa: implications for the electrical conductivity of the base of the lower mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 246(3/4): 326-335.
- [17] Zhang N C, Ren J, Wang P, *et al.* Radiation spectral characteristics of sapphire under light-gas gun impact loading [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0530002.  
张宁超, 任娟, 王鹏, 等. 轻气炮加载下蓝宝石的辐射光谱特性 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0530002.
- [18] Hare D E, Holmes N C, Webb D J. Shock-wave-induced optical emission from sapphire in the stress range 12 to 45 GPa: images and spectra [J]. *Physical Review B*, 2002, 66: 014108.
- [19] Liu Q C, Zhou X M. Time-resolved light emission of a, c, and r-cut sapphires shock-compressed to 65 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(13): 135902.
- [20] Shen G Y, Lazor P. Measurement of melting temperatures of some minerals under lower mantle pressures [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100(B9): 17699-17713.
- [21] Liu Y, Xu W D, Zhao C Q, *et al.* A detecting system of sapphire internal defects based on laser light scattering tomography [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0902007.  
刘洋, 徐文东, 赵成强, 等. 基于激光光散射层貌术的蓝宝石内部缺陷检测系统 [J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902007.
- [22] Luo Z L, Xie X Z, Wei X, *et al.* Experimental study on acoustic emission signal detection in process of laser-induced backside wet etching of sapphire [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0402003.  
罗志良, 谢小柱, 魏昕, 等. 激光诱导背向湿式刻蚀蓝宝石过程中声发射信号检测试验 [J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0402003.