

轻气炮加载下蓝宝石的辐射光谱特性

张宁超¹, 任娟², 王鹏¹, 刘福生³

¹西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;

²西安工业大学理学院, 陕西 西安 710021;

³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 冲击压缩过程中透明晶体的发光现象与材料的微观损伤及其结构变化密切相关, 利用轻气炮加载结合多通道辐射高温计以及 ICCD 瞬态光谱测量系统, 在 400~800 nm 的可见光波段获得了蓝宝石晶体的发光光谱; 研究表明蓝宝石的冲击发光呈典型的热辐射特征, 其热辐射温度与该压力下蓝宝石的熔化温度之间存在明显的关联性。最后, 结合辐射温度和光谱分布形态研究了蓝宝石剪切带发光的机理。

关键词 光谱学; 冲击加载; 蓝宝石; 轻气炮

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0530002

Radiation Spectral Characteristics of Sapphire Under Light-Gas Gun Impact Loading

Zhang Ningchao¹, Ren Juan², Wang Peng¹, Liu Fusheng³

¹College of Electronics and Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

²School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China;

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

Abstract Transparent crystal luminescence at impact loading is closely related to its microscopic damage and structure change. The multichannel radiation pyrometer with light-gas gun and spontaneous spectroscopic system are combined to study the light emission of shocked sapphire. The light spectrum of sapphire range is obtained in 400-800 nm wavelength. The spectral distribution exhibits typical thermal radiation characteristics. The radiation temperature is in agreement with the corresponding melting temperature. The mechanism of the luminescence of the sapphire shear band is studied in combination with the radiation temperature and the spectral distribution.

Key words spectroscopy; impact loading; sapphire; light-gas gun

OCIS codes 300.2140; 300.6170; 160.4670

1 引 言

氧化铝单晶也叫蓝宝石,它是一种无色透明且结构稳定的脆性材料,在高温高压环境下仍能保持非常优异的透明性质,因此被广泛用于导弹在中红外信息传输的光学窗口整流罩,更是冲击实验的重要观测窗口材料^[1-3]。如果在强冲击环境下蓝宝石的透明性下降或者自身产生辐射发光,将会影响信

息的准确传输以及实验数据、物理模型的正确解读^[4-6]。由于蓝宝石在高温高压下具有非常重要的应用价值,从 20 世纪 70 年代起,人们在实验室利用轻气炮加载冲击波技术对其进行了研究,结果发现蓝宝石窗口在强冲击荷载下会出现异常发光,从此开启了冲击压缩下蓝宝石发光特性及其机理的探究。这些工作包括 Urtiew 等^[7]采用蓝宝石和氯化钠窗口相叠加、McQueen 等^[8]利用在冲击压缩下会

收稿日期: 2017-10-26; 收到修改稿日期: 2017-12-07

基金项目: 陕西省教育厅科研项目(17JK0366)、陕西省科技厅重点研发计划(2017ZDXM-GY-114)、西安市科技局科研项目(RC038XAGY010)

作者简介: 张宁超(1986—),男,博士,讲师,主要从事冲击波光电测试及高压物性方面的研究。

E-mail: ningchaozhnag@163.com

发强光的液体三溴甲烷作为发光材料、周显明等^[9-10]利用高速电子相机扫描照相技术以及采用三溴甲烷或重玻璃作为发光基板等的一系列研究。Kondo^[11]对 10~85 GPa 压力范围内蓝宝石的冲击辐射特性进行了研究;Partouche-Sebban 等^[12]利用高温计测量技术在蓝宝石样品和窗口之间填充了一种具有流动性的胶水,在实验中观测到随着冲击波在蓝宝石中传播距离增加,其发光辐射强度随时间呈线性增强。此外,还有人研究了冲击压缩作用下的蓝宝石在微观和介观尺度上的变化,以及宏观上光透射率的变化^[13-15]。

通过对以往研究结果的分析 and 比较不难发现,早期获得的观测数据分散性大,由于测试手段以及实验技术上的不完善导致研究人员对冲击载荷下蓝宝石的发光特性及机理认识不统一。本课题组通过分析后认为:在采用轻气炮加载结合多通道辐射高温计的测量中,实验过程中杂散光的干扰以及界面接触情况是导致实验数据分散的重要原因;高温计可以获得多个波长辐射亮度随时间变化的信息,但不能完整地获取波长分辨率。基于此,本文针对以上问题进行优化,提出了降低甚至消除杂散光以及界面间隙干扰的方案,同时根据实验要求搭建了瞬态光谱测量平台,系统地研究了蓝宝石冲击发光光谱波长分布和时间演化的瞬态特性,在较宽的压力范围内获得了光谱波长分布和瞬态特性具有规律性分布的实验结果。

2 实 验

2.1 实验样品的制备

对透明材料辐射发光的测量可以通过光纤直接

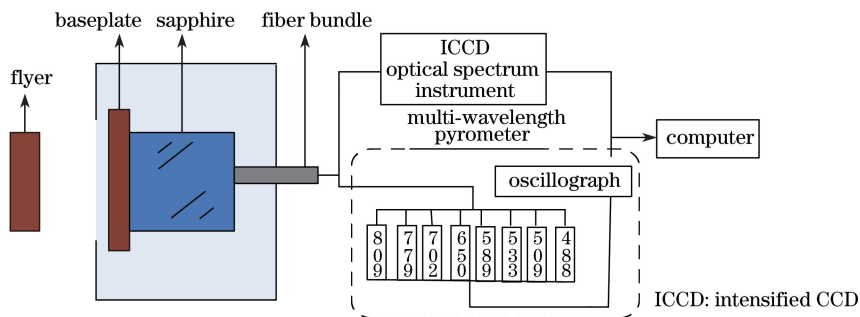


图 1 光谱测量系统结构示意图

Fig. 1 Structure schematic of spectrum measurement system

3 结果与讨论

3.1 典型瞬态光谱信号特性

冲击压力为 48 GPa 时高温计记录的四通道发

引入压缩层的辐射强度来实现。然而在实验中,飞片直接与样品高速碰撞的瞬间会产生强辐射,为了避免该辐射对窗口本身辐射测量的影响,通常利用金属基板/窗口组合进行挡光设置,碰撞产生的冲击波将依次通过基板进入窗口,对于金属界面的发光可以通过相关方法^[16]进行扣除后得到蓝宝石在冲击载荷下的发光特性。在本实验设计过程中,挡光基板选用的是延展性和发射率低的无氧铜材料,这是因为同等压力下蓝宝石的辐射强度远高于无氧铜^[17]。在实验室利用机械抛光法获得的无氧铜的表面粗糙度可保证在 20 nm 以内。实验中选用的蓝宝石样品经过测试确定为 *c* 切向单晶,表面粗糙度能够保证在 10 nm 以内,以保证金属/窗口界面为更精密的接触。

2.2 实验设计的优化

冲击压缩过程中金属卸载的光辐射与蓝宝石发光总是叠加在一起同时被光纤接收导入。为了尽量减弱或消除界面发光的影响,对界面接触间隙和接触区域面积进行优化,将组合基板与窗口贴紧,通过螺杆的机械预压以及气体的均匀挤压实现界面更大区域的“理想接触”,同时使用吸波材料将靶体内部的腔体涂黑,削弱腔壁的漫反射后,杂散光间接进入接收光纤。

图 1 所示为蓝宝石在冲击压缩下的发光特性测量示意图。飞片由二级轻气炮发射,并与靶面基板发生碰撞,产生的冲击波将依次通过基板进入后方窗口。飞片的速度将决定每次实验的加载压力^[18]。钉在窗口后方的光纤束记录蓝宝石在冲击波压缩过程中产生的发光效应,分别获得高温计和瞬态光谱仪的信号。

光典型信号如图 2 所示,图中 t_1 和 t_2 时刻分别代表冲击波透过基板进入样品前表面以及后界面的时刻。在图 2 中没有观察到冲击波在基板/样品界面处诱导的强发光现象,这主要归因于对无氧铜进行

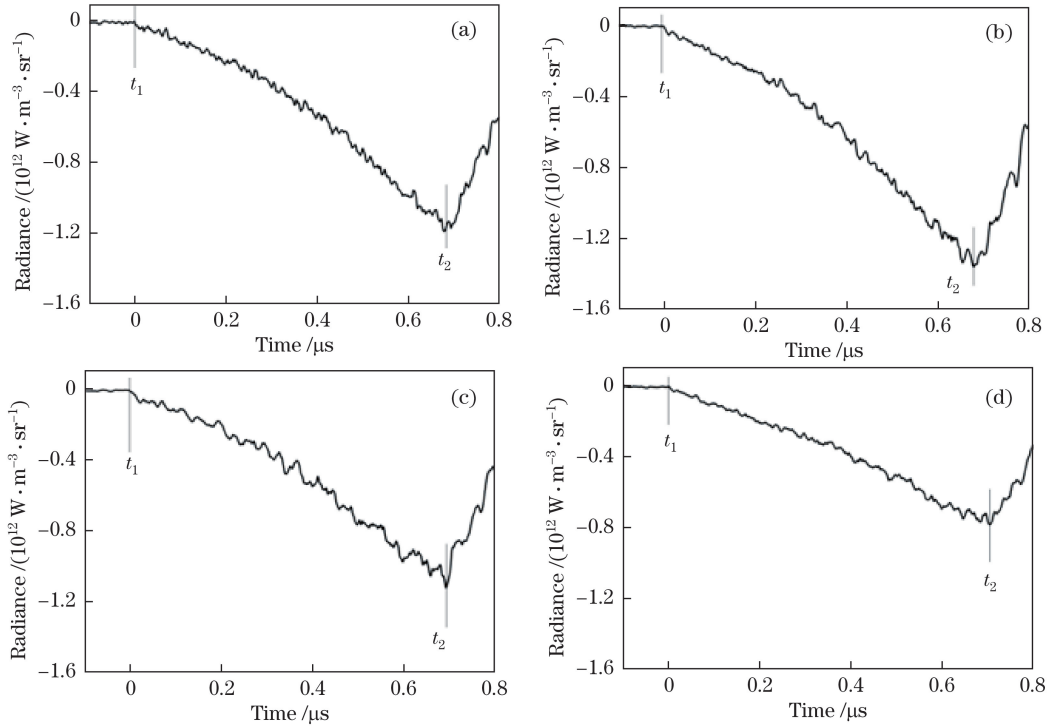


图 2 压力为 48 GPa 时高温计的实验信号。(a) $\lambda=809$ nm; (b) $\lambda=779$ nm; (c) $\lambda=650$ nm; (d) $\lambda=533$ nm

Fig. 2 Experimental signals from pyrometer at pressure of 48 GPa. (a) $\lambda=809$ nm; (b) $\lambda=779$ nm; (c) $\lambda=650$ nm; (d) $\lambda=533$ nm

了精密抛光以及对靶体的装配进行了优化,同时也说明该压力下基板无氧铜的辐射不足以影响后期样品的发光测量。随着冲击波在样品中传播,不同波长的发光强度随时间呈线性增长,而且没有出现明显的拐折,线性增长的特性表明了蓝宝石的发光来自于压缩层厚度和体积的积累。

3.2 高温计辐射温度的拟合

根据冲击压缩物质在高温高压下会发射出光辐射能量的原理,实验中得到的辐射高温计信号就是将物质辐射的光信号通过光电转换传感器转换而成的电信号。在强冲击实验中,物质被冲击加载到高温高压状态且处于热力学平衡时,利用多通道辐射高温计可以记录不同波长的发光强度,然后再根据最小二乘法原理用普朗克模型对发光强度进行拟合,获得辐射温度^[19]。

根据基尔霍夫辐射定律,一定的温度 T 对应的光谱辐射强度 $I_{\text{pl}}(\lambda, T)$ 可由 Planck 公式给出^[20]:

$$I_{\text{pl}}(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \{ \exp[C_2 / (\lambda T)] - 1 \}^{-1}, \quad (1)$$

式中: C_1 、 C_2 分别为 Planck 第一和第二辐射系数, $C_1 = 2\pi c^2 = 1.1910 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$, $C_2 = hc/k = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$, c 为光速, h 为普朗克常数, k 为波尔兹曼常数; λ 为辐射波长; $I_{\text{pl}}(\lambda, T)$ 为光谱辐射强度,表示温度为 T 的黑体在单位面积和单位

时间内向单位立体角内辐射的单位波长间隔内的能量。

这样就可以得到灰体辐射光谱辐射强度的表达式 $I_{\text{gre}}(\epsilon, \lambda, T)$:

$$I_{\text{gre}}(\epsilon, \lambda, T) = \epsilon \cdot I_{\text{pl}}(\lambda, T), \quad (2)$$

式中: ϵ 为灰体的发射率。

在多通道辐射高温计测量光谱辐射强度的实验中,滤波片的中心波长决定每个通道接收的波长,而且在使用前需要采用标准灯对每个通道的输出强度进行标定,获得对已知辐射能量的响应系数。在本实验中,通过滤波片获得的八通道的波长依次为 809, 779, 702, 650, 589, 533, 509, 488 nm, 测量结果根据(1)式进行最小二乘法拟合可获得发射率 ϵ 和温度 T 。

为了获得高温计对每个通道已知辐射能量的响应,每次在实验现场进行标定,测试系统的标定选用能量为已知的溴钨。在标定过程中, l_0 为标定光纤与标准灯的距离,光纤探头接收到的标准光源的能量 $E_c(\lambda)$ 为

$$E_c(\lambda) = N_r(\lambda) \cdot \eta(\lambda) s_0, \quad (3)$$

式中: $\eta(\lambda)$ 为系统的光学几何因子; s_0 为光纤探头接收面积; $N_r(\lambda)$ 为标准溴钨灯的光谱辐射亮度,其值如表 1 所示。

表 1 标准溴钨灯光谱辐射亮度的标定值

Table 1 Calibrated spectral radiant luminance of the standard bromine tungsten lamp

λ / nm	809	779	702	650	589	533	509	488
$N_r(\lambda) / (\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm})$	1.58	1.55	1.40	1.23	0.98	0.71	0.59	0.49

Note: Calibration temperature is 25 °C, current is 11.51 A, $l_0 = 100$ mm.

为了减小杂散光的影响,使用直径为 200 μm 的光纤,其孔径角 $\theta = 12^\circ$ 。为了增加标定幅度,标定时光电倍增管匹配高阻值的负载电阻 R_c ,此时示波器记录幅度可表示为

$$h_c = E_c \cdot R_c, \quad (4)$$

此时光纤接收的能量为

$$E_c = \eta(\lambda) \cdot I_c \cdot \omega \cdot s_0 = \eta(\lambda) \cdot I_c \cdot 2\pi(1 - \cos \theta) \cdot s_0, \quad (5)$$

式中: I_c 为样品单位面积单位时间向单位立体角辐射的能量; ω 为立体角。

如果选用的匹配电阻为 R_L ,则输出幅度为

$$h_e = E_c \cdot R_L, \quad (6)$$

从而可得到样品的辐射强度为

$$I_{\text{exp}} = \frac{h_e}{h_c} \cdot \frac{R_c \cdot N_r(\lambda)}{R_L \cdot 2\pi \cdot (1 - \cos \theta)}. \quad (7)$$

由于辐射温度相同,故可根据 Planck 平衡热辐射定律测得不同波长下的 I_{exp} 。由于每个通道的辐射强度不一样,在数据处理时,使用不等权最小二乘法对不同通道的 $I_{\text{exp}}(\epsilon, \lambda, T)$ 进行拟合:

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\epsilon \cdot I_{\text{pl}}(\lambda_i, T) - I_{\text{exp}}(\lambda_i, T)}{\sigma_{I_{\text{exp}}}^2}, \quad (8)$$

式中: $\sigma_{I_{\text{exp}}}^2$ 为辐射亮度的标准方差。

根据辐射温度的处理对压力为 48 GPa 的八通道的辐射强度进行拟合,伴随冲击波在样品中传播,温度的变化曲线如图 3 所示,图 3 中同时给出了冲击波进入样品 400 ns 时辐射温度和辐射强度与波长分布的拟合误差。

每次实验通过测试系统同时获得蓝宝石辐射发光的高温计信号以及光谱仪信号。图 4 所示为冲击压力 48 GPa 时蓝宝石的瞬态光谱测量结果,内嵌图纵轴表示高温计通过光电倍增管记录的电压信号。增强电荷耦合器件(ICCD)快门宽度选用 $t_1 - t_2 = 200$ ns,通过波长分布与普朗克辐射模型的拟合,在 450~700 nm 波长范围内可以获得发光辐射的温度信息,通过拟合可知发光强度的高分辨波长分布与普朗克灰体辐射模型接近重合。

由于同一次实验中标定用的标准钨灯一致,但 2 个光谱接收的测试光纤系统有所差别,故将高温

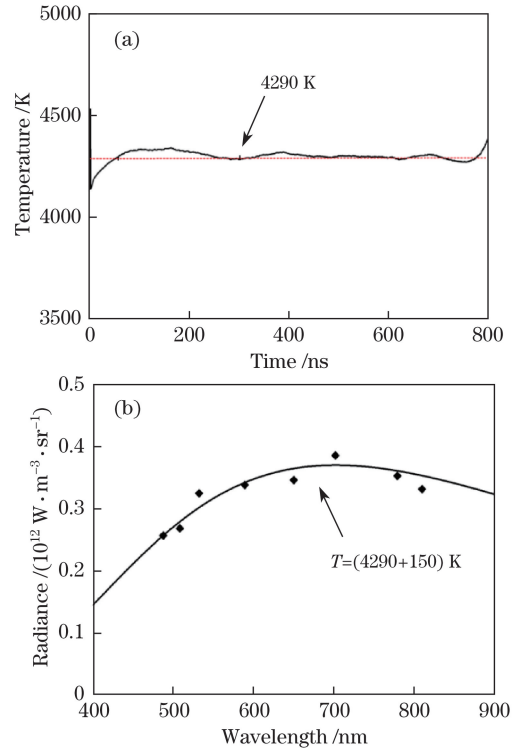


图 3 48 GPa 冲击压力下蓝宝石发光温度的 (a) 拟合曲线和 (b) 拟合误差

Fig. 3 (a) Fitted temperature curve and (b) fitting error of sapphire at impact pressure of 48 GPa

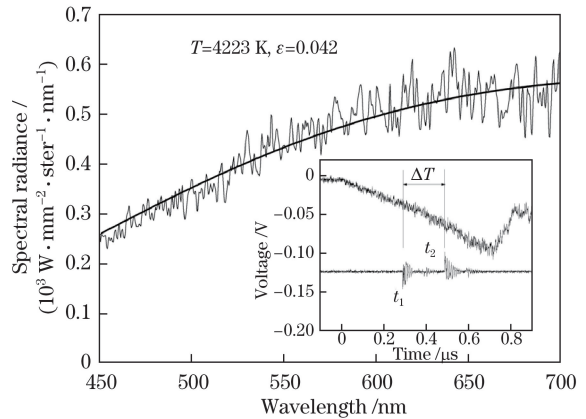


图 4 48 GPa 压力下光谱仪测得的实验信号

Fig. 4 Experimental signal measured by spectrometer at pressure of 48 GPa

计测得的信号与瞬态光谱仪测得的信号进行了比较。为了在辐射时间内取得对应,高温计发光辐射

强度的灰体拟合结果设置为 400 ns 处,拟合得到的辐射温度为 4290 K。瞬态光谱仪的拟合误差在 3% 以内,辐射温度为 4223 K。两者都表明蓝宝石的发光是一种典型的灰体辐射。然而其温度值远远高于冲击温度,热力学计算表明了热辐射的不均匀性。高温计和光谱测试系统得到的辐射强度随波长的分布形态一致,拟合温度的结果也统一,充分说明该系统具有较高的精密性和稳定性。

3.3 辐射机理分析

无论是在军事应用中还是在高压科学研究中,蓝宝石都是一种重要的窗口材料,研究其在强冲击环境下的发光特性具有非常重要的意义。在利用轻气炮加载平面波的实验研究中,由于在观测技术方面的诸多不足,实验中获得的数据的分散性较大,因此目前对强冲击下蓝宝石的发光辐射机理还没有形成统一的认识。在过去的实验研究中,Kondo^[11]和 Hare 等^[21]的研究最具有代表性,在不高于 100 GPa 的冲击压力下,Kondo 利用轻气炮分别冲击氧化铝粉末样品和单晶块体,得到的两者的辐射温度都非常高,而且比较接近,由此推断粉末与块体在强冲击下的辐射机理应该是相同的;Kondo 根据实验中得到的辐射温度远高于熔化温度,且光谱呈带状的特征,认为蓝宝石在强冲击下的辐射是一种非平衡摩擦发光,发光由氧化铝颗粒之间因相互摩擦、碰撞而形成的寿命较长的陷阱能级所致,并不是平衡的热辐射,也不是由冲击波波阵面诱导的自发热辐射。但是 Hare 等通过高速摄像、辐射高温计以及瞬态光谱的同时测量发现,蓝宝石在冲击压缩下的发光辐射光谱具有明显的普朗克谱分布特征,实验中并没有分辨出带状谱结果;据此他们通过数据分析和理论建模认为强冲击下蓝宝石的发光是一种平衡热辐射,并认为温度的主体来自于样品内形成的绝热剪切带,其温度也应该接近熔化温度;但他们通过对实验数据进行分析 and 拟合后得到的温度仍然远高于其熔化温度,而且温度效应没有呈现规律性分布。为了获得更为系统的实验数据,进一步揭示冲击压缩下蓝宝石晶体的发光辐射机理,本研究在低于 100 GPa 的冲击压力区间内,利用轻气炮加载平面波技术结合辐射高温计和瞬态光谱测试平台,得到了 40~90 GPa 压力区间的有效实验数据。通过对数据进行处理以及与灰体模型的拟合发现,观测到的瞬态光谱的分布非常符合普朗克灰体谱的分布,光谱分布中并没有出现带状谱或线状谱叠加的现象。结合高温计信号中辐射强度与波长之间满足的

分布规律认为,蓝宝石在冲击压缩下的发光辐射是一种典型的热辐射。

表 2 中分别给出了飞片速度 v 、样品冲击压力 F 、高温计辐射温度拟合值 T_p 和瞬态光谱仪温度拟合值 T_1 ,每次实验使用相同的标准灯进行统一标定处理,二者得到的温度也基本保持一致。选用瞬态光谱拟合温度 T_1 与其他研究结果进行比较,如图 5 所示。

表 2 拟合得到的冲击压力和温度

Table 2 Fitted shock pressure and temperatures

No.	$v / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	F / GPa	T_p / K	T_1 / K
1	1.95	40	4095 ± 131	3971 ± 54
2	2.20	48	4290 ± 150	4223 ± 42
3	2.53	60	4910 ± 147	4907 ± 58
4	3.58	87	4709 ± 108	4698 ± 49

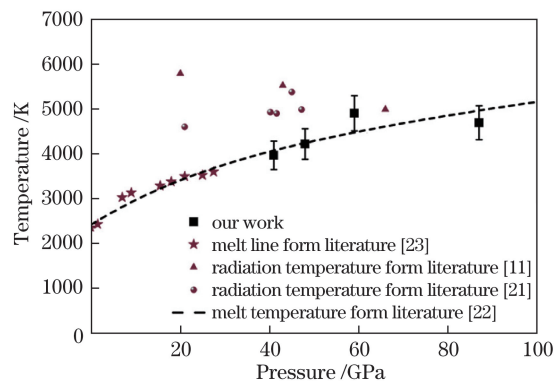


图 5 辐射温度与高压熔化线的比较

Fig. 5 Comparison between radiation temperatures and high pressure melt line

图 5 给出了蓝宝石的辐射温度,同时给出文献^[22]报道的蓝宝石高压熔化温度的计算结果、Shen 等^[23]报道的静高压蓝宝石的熔化温度、Hare 小组^[21]和 Kondo 小组^[11]分别通过冲击波实验获得的蓝宝石的辐射温度。在低于 100 GPa 的压力区内,Kondo 和 Hare 等获得的蓝宝石在冲击载荷下的辐射温度数据点比较分散,而且都高于计算得到的熔化线。Kondo 小组报道的温度都分布在 5000 K 附近,在 20 GPa 压力处,通过冲击氧化铝粉末使得样品的温度更接近 6000 K,但他们认为蓝宝石辐射发光都不具有热辐射特征,将产生的非常高的辐射背景归因于蓝宝石在冲击压缩过程中晶粒间的摩擦发光。相比较而言,Hare 小组在 20 GPa 压力附近测量的温度明显较低,他们根据绝热剪切带的热辐射物理模型提出发光辐射温度与蓝宝石的熔化温度相对应,该观点与 Schmitt 等^[24]研究 MgO 在冲击

载荷下发光辐射的微观机理一致。然而, Hare 小组得到的部分实验结论并没有支持他们的观点, 样品的冲击辐射温度并没有像熔化温度一样随压力发生规律性变化, 对于发光辐射温度远高于熔化温度的现象也没能给出合理的解释。本研究通过对实验样品和测试系统进行优化, 获得的发光辐射温度、静高压实验测量结果与理论计算结果比较一致, 包括低压区温度随压力变化以及实验温度与计算的熔化温度均比较接近, 如果将该温度与绝热剪切带的观点相关联, 也可证明蓝宝石在冲击载荷下形成绝热剪切带的辐射机理。

蓝宝石单晶在制备过程中非常容易在结合键较弱的原子、分子间产生位错等缺陷, 缺陷处因能量高而处于不稳定的非平衡状态^[25-26]。在对样品的回收实验中发现, 缺陷区域更容易发生塑性形变。虽然常态下单晶中非均匀分布的位错缺陷不影响其透光性, 但轻气炮加载的冲击波会导致位错等缺陷区域发生剧烈形变而移动, 并释放周围的剪应力, 因压缩而沿着剪应力方向形成的滑移面在极短的时间内释放能量, 引起局部高温, 形成了绝热剪切带^[27-28]。

4 结 论

蓝宝石是一种重要的窗口材料, 但研究人员并不清楚其在冲击载荷作用下的辐射发光机理。本研究通过改良实验技术, 在样品装配及测试手段上进行优化, 对蓝宝石单晶进行了系统的冲击压缩实验, 得到了以下结论: 1) 通过控制界面间隙抑制杂散光的干扰, 在低于 100 GPa 的压力区间成功获得了蓝宝石的真实辐射数据; 2) 通过瞬态光谱仪和多通道辐射高温计同时获取了蓝宝石的发光辐射光谱, 确认在该压力区间的光谱属于典型的灰体热辐射, 并且无线状谱线叠加的特征; 3) 多通道高温计对发光辐射历史的测量表明, 冲击载荷下辐射强度随样品被压缩厚度的增加而呈线性增长, 证明了蓝宝石在冲击波压缩过程中的辐射是体积累积发光过程, 通过模型分析发现加载过程中的发光辐射温度保持稳定, 是一种典型的压缩过程中半透明物质的辐射能量输运过程; 4) 实验获得的辐射温度与蓝宝石冲击温度热力学计算结果不对应, 说明冲击载荷下产生的热辐射只发生在局部区域。温度与静高压测量得到的蓝宝石的熔化温度以及理论计算的熔化温度一致, 支持了冲击载荷形成绝热剪切带的观点, 而且剪切带处于熔化状态。该方法和结论为测

量其他透明脆性材料的高压熔化温度提供了新的技术途径。

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] 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子化现象研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0312002.
- [4] Yoo C S, Holmes N C, See E. Shock-induced optical changes in Al₂O₃ at 200 GPa: implications for shock temperature measurements in metals[C]. *Proceedings of the American Physical Society Topical Conference*, Williamsburg, 1992: 733-736.
- [5] Billings B H, Dwight E G. *American institute of physics handbook*[M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [6] 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.
- [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] McQueen R G, Isaak D G. Characterizing windows for shock wave radiation studies[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1990, 95(B13): 21753-21765.
- [9] Zhou X M, Wang X S, Li S N, *et al.* Optical transparency of α -cut LiF, Al₂O₃ and LiTaO₃ single crystals under strong shock compression[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(8): 4965-4970.
周显明, 汪小松, 李赛男, 等. 强冲击压缩下 LiF、Al₂O₃ 和 LiTaO₃ 单晶的透光性[J]. *物理学报*, 2007, 56(8): 4965-4970.
- [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] Kondo K. Window problem and complementary method

- for shock-temperature measurements of iron[C]. AIP Conference Proceedings, 1994, 309(1): 1555-1558.
- [12] Partouche-Sebban D, Pélissier J L, Anderson W W, *et al.* Investigation of shock-induced light from sapphire for use in pyrometry studies[J]. Physica B, 2005, 364(1/2/3/4): 1-13.
- [13] Kanel G I, Nellis W J, Savinykh A S, *et al.* Response of seven crystallographic orientations of sapphire crystals to shock stresses of 16-86 GPa[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(4): 043524.
- [14] Kuksin A Y, Yanilkin A V. Formation of twins in sapphire under shock wave loading: atomistic simulations[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(3): 033513.
- [15] 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.
- [16] Boslough M B. A model for time dependence in shock-induced thermal radiation of light[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58(9): 3394-3399.
- [17] Window B, Harding G. Thermal emissivity of copper[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71(3): 354-357.
- [18] Jing F Q, Chen J X. Dynamic high pressure experiment principle and technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 34-37.
经福谦, 陈俊祥. 动高压实验原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 34-37.
- [19] Zhang N C. Research on mechanism of the light emission of sapphire and radiation properties of the metal/lithium fluoride interface under shock compression[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014: 32-34.
张宁超. 冲击加载下蓝宝石单晶发光机理及金属/氟化锂界面辐射特性的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014: 32-34.
- [20] Tan H. Shock temperature measurements for metals (I): calibration of pyrometers and data reduction for the temperature at the interface[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1994, 8(4): 254-263.
谭华. 金属的冲击波温度测量(I): 高温计的标定和界面温度的确定[J]. 高压物理学报, 1994, 8(4): 254-263.
- [21] 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(1): 014108.
- [22] Wang Z W, Mao H H, Saxena S K. The melting of corundum (Al_2O_3) under high pressure conditions[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 299(1/2): 287-291.
- [23] Shen G Y, Lazor P. Measurement of melting temperatures of some minerals under the lower mantle pressures[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B9): 17699-17713.
- [24] Schmitt D R, Ahrens T J. Shock temperatures in silica glass: implications for modes of shock induced deformation, phase transformation, and melting with pressure[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B5): 5851-5871.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Kurlov V N, Epelbaum B M. Fabrication of near-net-shaped sapphire domes by noncapillary shaping method[J]. Journal of Crystal Growth, 1997, 179(1/2): 175-180.
- [28] Wang Y, Mikkola D E. Shock deformation of sapphire single crystals[J]. Materials Science and Engineering A, 1991, 148(1): 25-32.