高压物理学报

冲击点火反应过程中RDX基PBX炸药的热辐射特性

施鑫辉 杨雷 杨雪 康洪亮 袁文硕 刘福生

Thermal Radiation Characteristics of RDX-Based PBX Explosives during Shock-Induced Ignition Reactions

SHI Xinhui, YANG Lei, YANG Xue, KANG Hongliang, YUAN Wenshuo, LIU Fusheng

引用本文:
施鑫辉, 杨雷, 杨雪, 等. 冲击点火反应过程中RDX基PBX炸药的热辐射特性[J]. 高压物理学报, 2025, 39(1):011301. DOI: 10.11858/gywlxb.20240814
SHI Xinhui, YANG Lei, YANG Xue, et al. Thermal Radiation Characteristics of RDX-Based PBX Explosives during Shock-Induced Ignition Reactions[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(1):011301. DOI: 10.11858/gywlxb.20240814

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240814

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

HMX含量对PBT基推进剂撞击感度和非冲击点火反应特性的影响
Influences of HMX Content on the Impact Sensitivity and Non-Shock Initiation Reaction Characteristics of PBT Based Propellants
高压物理学报. 2024, 38(3): 035201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230824

HNS基PBX炸药爆轰驱动平板实验及产物状态方程参数确定
Experimental Investigation of Plate Driven by HNS-Based PBX Explosive and Equation of State Parameters Determination for Explosive Detonation Products
高压物理学报. 2023, 37(6): 061301 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230669

利用电磁法研究HMX与TATB混合钝感炸药的冲击起爆特性
Impact Initiation Characteristics of TATB Based Insensitive Explosives Mixed with HMX by Electromagnetic Velocity Gauges
高压物理学报. 2020, 34(3): 033403 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190852

RDX单晶炸药的冲击-斜波加载实验研究
Experimental Study on Shock-Ramp Wave Profiles in RDX Single Crystal Explosive
高压物理学报. 2020, 34(5): 051301 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200529

钝感炸药冲击起爆反应过程的PDV技术
PDV Technology of Shock Initiation Reaction Process of Insensitive Explosive
高压物理学报. 2020, 34(2): 023402 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190856

基于小波变换的爆炸电磁辐射研究
Research on Electromagnetic Radiation Generated During Explosion Based on Wavelet Transform
高压物理学报. 2023, 37(5): 054104 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230632

DOI: 10.11858/gywlxb.20240814

冲击点火反应过程中 RDX 基 PBX 炸药的热辐射特性

施鑫辉, 杨 雷, 杨 雪, 康洪亮, 袁文硕, 刘福生

(西南交通大学物理科学与技术学院高温高压物理研究所, 四川 成都 610031)

摘要: 研究冲击波流场中聚合物黏结炸药的热辐射特性可能是获取相关物质组分温度数据的重要途径。利用二级轻气炮加载技术、瞬态辐射测温方法及粒子速度剖面测量技术, 探讨了聚合物黏结炸药/氟化锂窗口界面的热辐射特性及其与界面压力之间的相关性; 同时, 还优化了聚合物黏结炸药样品制备方法, 显著抑制了包裹气体和界面间隙发光背景, 给出了界面辐亮度数据及界面温度数据。结果表明, 在连续 2 次冲击加载过程中, 界面温度随时间衰减特征与反应产物的等熵膨胀行为密切相关, 界面温度反映了界面处产物温度的演化行为, 为直接观测点火反应和起爆释能期间非均质复合炸药的反应产物温度数据提供了一种可行的技术途径。

关键词: 聚合物黏结炸药; 冲击加载; 界面热辐射; 点火反应; 等熵膨胀; 界面温度

中图分类号: O521.2; O561.4 **文献标志码:** A

聚合物黏结炸药(polymer-bonded explosive, PBX)的起爆机理是爆炸力学和爆轰物理研究领域的重要课题之一。环三亚甲基三硝胺(hexogen, RDX)是一种典型的具有 N—NO_2 基团结构的硝胺类含能材料, 被广泛应用作高爆炸药、粉末添加剂、氧化剂和固体推进剂[1−3]。尽管 RDX 单晶均质透明, 但在动态加载下表现出明显的非均质特点和局部热耗散行为[4]。鉴于服役中的各种武器战斗部几乎都是复合炸药结构[5], 因此, 研究含能材料粉体或混合炸药的冲击动力学行为更具实际应用价值[6−7], 研究成果在相关材料设计研发及产品安全性评价等方面具有重要应用前景[8−9]。

在爆轰物理研究领域, 冲击点火反应及起爆机理问题备受关注, 而直接观测含能材料在冲击起爆过程中的发光特性可能为探究其分解反应机理和冲击感度等问题提供重要的实验依据。“热点”的形成、扩展及贯通被认为是非均质含能材料的主要起爆机制[10]。在热点区域形成过程中往往伴随着化学释能, 随着热能的累积和热压增加, 由冲击波诱导的反应性流场迅速发展成为爆轰波流场[11]。在前期化学反应阶段, 研究工作主要集中在“热点”的形成、热能的局部聚集[12−13] 以及对分解路径的理论研究[14−15]; Dattelbaum 等[16] 通过在样品中安装粒子速度计, 测得了整个冲击加载期间冲击波的增长和演化特性, 并捕捉到了起爆过程中冯诺依曼峰的形成和演化特征。然而, 关于 RDX 基 PBX 炸药在冲击释能反应期间的发光特性及热辐射温度的研究还较少, 相信这些直接观测数据可以反映化学反应的程度和速率, 为构建 RDX 炸药的反应速率方程及描述其冲击反应动力学行为提供直接的实验依据。

在冲击压缩下, 非均质光学介质内部间隙填充物的行为[17−18], 特别是空气发光行为[19−20] 不容忽视, 且样品/窗口界面的“间隙”发光背景难以完全消除, 以致于严重干扰炸药样品热辐射信号的观测。由于观测结果的重复精度不高, 其分析结果也在某种程度上受到质疑。采用传统方法测量金属的冲击温度

* **收稿日期:** 2024-05-17; **修回日期:** 2024-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(12072299); 2002 年西南交通大学学位与研究生教育教学改革项目(YJG5-2002-TY001-1)

作者简介: 施鑫辉(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事冲击高压下材料性质研究. E-mail: sxh@my.swjtu.edu.cn

通信作者: 刘福生(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事动高压凝聚态物理和原子分子物理研究. E-mail: fusheng_l@163.com

时[21]，处于样品/窗口界面处的样品受到入射波和反射波连续冲击加载。在观测界面发光期间，界面压力基本保持稳定，因此界面辐亮度随时间演化特性被归因于界面的热弛豫现象。然而，在研究炸药样品时发现，界面处的压力和样品组分都可能随时间而变化。引起界面温度随时间变化的主要因素可能是界面热弛豫，也可能是界面处样品体内的状态演变，有必要通过特定实验设计加以鉴别。本研究将报道在非均质炸药冲击温度测量技术和分析方法方面取得的进展，将通过测量 PBX/氟化锂界面的热辐射历史，获得 RDX 在冲击起爆过程中的热辐射温度数据及其随时间的演化特征，为探究冲击起爆机理和释能特性提供反应产物温度的观测数据。

1　实验方法和样品

1.1　实验方案

本研究采用双波加载实验方案，使处于光学窗口界面处的样品先后经历 2 次冲击波加载。通过调控样品/窗口处样品体内状态的变化路径，拟观测界面辐亮度及热辐射温度随调制压力波形的变化情况。同时，双波实验还有利于检验界面“间隙发光”干扰的抑制效果。

如图 1 所示，冲击实验在二级轻气炮加载平台上完成。固定于弹丸头部的铜飞片经二级轻气炮加速后，由磁测速装置精确测得其速度。飞片撞击基板产生冲击波，冲击波透过基板进入样品。在基板夹层处安装电探针，以准确记录冲击波到达基板的时刻。在冲击压缩状态下，氟化锂窗口在较广波长范围内能够保持光学透明性，确保了热辐亮度观测数据的可靠性。由于氟化锂的冲击阻抗高于样品，光学窗口也起到了样品保压作用。辐射测温原理及数据处理方法参考文献 [21]，采用溴钨灯作为标准光源标定各测量通道的灵敏度系数，辐亮度随波长分布的测量结果借助普朗克灰体模型分析评价。在冲击加载过程中，通过置于窗口后方的光纤透镜收集样品内部和样品/窗口界面处产生的辐射光，并传输到瞬态辐射高温计完成光电转化和信号放大，最后由示波器记录保存电信号。辐射高温计的波长范围为 448～887 nm。实验靶结构如图 2 所示，基板内设置了 0.4 mm 的空气夹层，冲击波被夹层调制后具

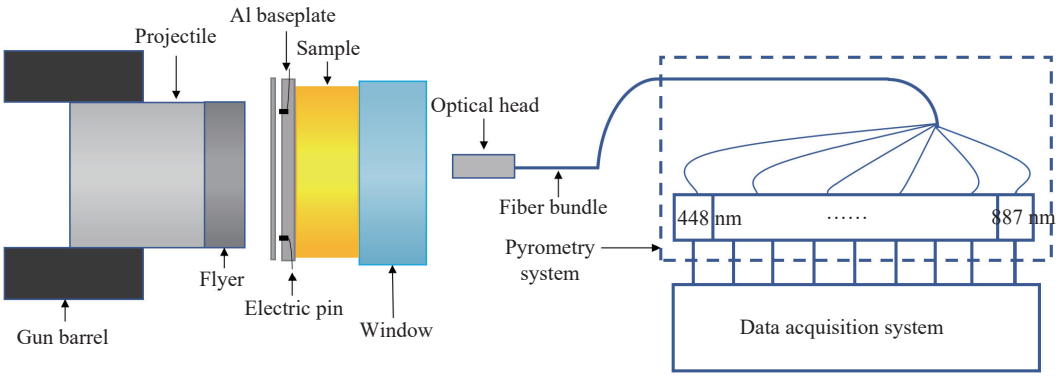


图 1　冲击实验方案示意图

Fig. 1　Schematic diagram of experiment plan

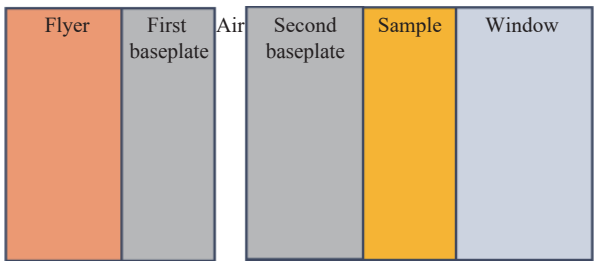


图 2　冲击实验样靶结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of target structure

有“双波”结构特征。“双波形”冲击波进入样品对其实施连续 2 次冲击加载。在具体实验条件下，输入波形由材料物态方程参数及流体力学模拟方法获得。界面粒子速度随时间的变化特征由激光多普勒位移干涉系统（Doppler displacement interferometer system, DPS）测定，根据界面粒子速度的测量数据即可确定界面的压力波形。

1.2　样品制备及材料参数

若直接采用 RDX 粉末压片制备样品，样品内必定存在空气包裹体，这些残余气体在受到冲击压缩时会发出强光，干扰实验结果[19]。鉴于硅油在静高压（64 GPa）下仍然能保持光学透明性[22]，本研究样品由 RDX 粉末和二甲基硅油（质量分数 5%）组成。通过压制成型制备 PBX 炸药样品，使用硅油的目的是填充粒间空穴；同时进行抽真空处理，以减少复合样品内残余孔隙及包裹气体的冲击发光背景。附着在样品表面的薄层硅油也有利于样品与观察窗口之间实现良好接触，并减弱界面“间隙”发光干扰。

共进行了 4 次实验，RDX 基 PBX 炸药压片样品的密度及每次实验样品靶相关几何参数见表 1。其中：ρ_s 为样品密度，v_F 为飞片速度，h_F、h_{p1}、h_{p2}、h_A、h_s、h_w 分别为飞片、第 1 基板、第 2 基板、空气层、样品和窗口的厚度。飞片材料为纯铜，盖板和基板材料均为 2024 铝，各材料的 Hugoniot 参数见表 2[23−25]。其中：ρ为密度，C_0和λ分别为材料的冲击波参数，即冲击波速度与波后粒子速度之间线性拟合关系的系数。

表 1　样品密度及样品靶的几何参数

Table 1　Sample density and geometric parameters of the sample target

Experiment No.	ρ_s/(g·cm^{-3})	v_F/(km·s^{-1})	h_F/mm	h_{p1}/mm	h_A/mm	h_{p2}/mm	h_s/mm	h_w/mm
1	1.71	1.32	3.00	1.00	0.40	4.00	2.01	6.02
2	1.71	1.54	3.00	1.00	0.40	3.99	1.86	6.01
3	1.68	1.42	3.00	1.00	0.40	2.26	1.97	3.00
4	1.81	1.38	3.00	0.97	0.41	2.39	1.95	5.20

表 2　各材料的 Hugoniot 参数[23−25]

Table 2　Hugoniot parameters for each material[23−25]

Material	ρ/(g·cm^{-3})	C_0/(km·s^{-1})	λ
RDX[23]	1.76	2.78	1.90
Aluminum[24]	2.70	5.31	1.41
Copper[24]	8.96	3.93	1.45
LiF[25]	2.64	5.19	1.36

2　实验结果与讨论

2.1　实验信号

实验 1～实验 3 的辐亮度曲线如图 3～图 5 所示，均呈现双峰特征。实验 1 的辐亮度信号的第 1 峰较宽，实验 2 辐亮度信号的信噪比较差；实验 3 的辐亮度信号的第 1 峰较锐，且第 2 峰的起跳特征更清晰。实验 3 非常接近正碰条件，故对实验 3 的结果进行详细讨论。实验 3 中电探针及各波长的辐亮度变化历史见图 5。电探针信号给出了冲击波进入第 2 基板的 t_0 时刻。根据阻抗匹

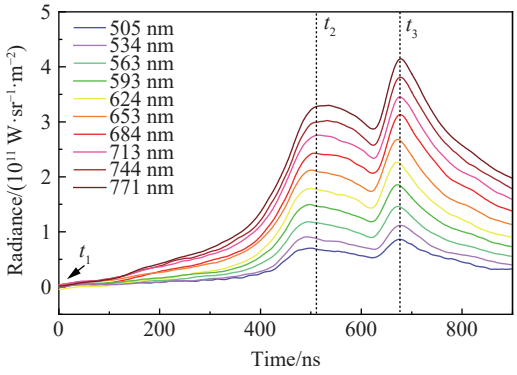


图 3　实验 1 的辐亮度曲线

Fig. 3　Radiance curves of Exp. 1

配计算结果，冲击波在基板中的传播时间约为 338 ns，据此得到冲击波进入样品的时刻 t_1；冲击波在 t_1 时刻进入样品后，开始对样品进行冲击加载；同时，受冲击样品的热辐射光信号能够透过前方未被压缩的半透明样品，而且随着该部分样品厚度的减小，透射光的亮度逐渐增加；在 t_2 和 t_3 时刻，样品后界面连续 2 次受到冲击加载，因此先后出现 2 个明显的辐亮度峰值。为了进一步证实双波效应，进行了实验 4。图 6 给出了相近实验条件下界面粒子速度测量结果，结果表明，样品/窗口界面粒子速度及压力呈现双波特征，其中，t_2 和 t_3 代表的双波特征分别与图 5 所示的辐亮度双峰之间存在关联。鉴于冲击加载状态下样品可能还具有一定的光学透明度，其辐亮度信号也就可能包含体积辐射贡献；而界面速度信号仅仅反映特定位置流场的演化特征。因此，实验 3 的辐亮度波形与实验 4 的界面速度测量波形之间必然存在较明显差异。然而，在第 1 次冲击加载后，界面压力和辐亮度均呈现持续衰减特征，两者具有较好的一致性。压力波形的起跳前沿特征对反应度及样品的初始密度比较敏感，可能受到反应产物体积膨胀效应的影响。

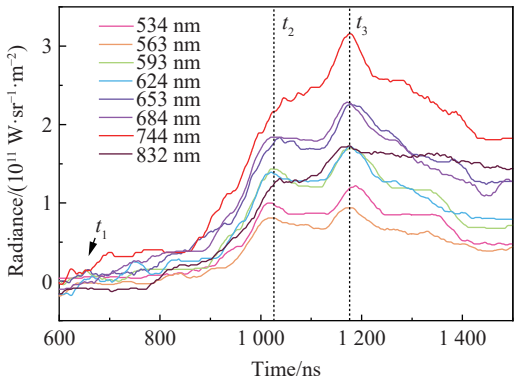


图 4　实验 2 的辐亮度曲线

Fig. 4　Radiance curves of Exp. 2

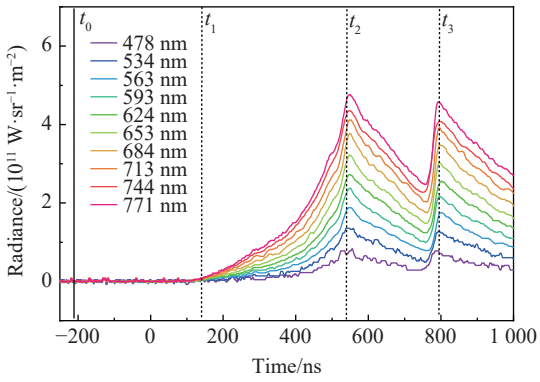
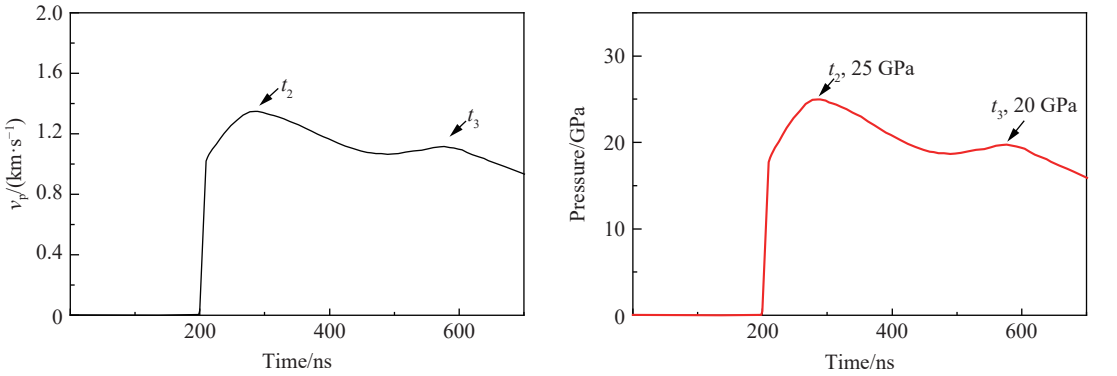


图 5　实验 3 的辐亮度曲线

Fig. 5　Radiance curves of Exp. 3



(a) Particle velocity at the back interface of the sample　　(b) Pressure-time history at the back interface of the sample

图 6　实验 4 中界面的粒子速度和压力曲线

Fig. 6　Interface particle velocity and pressure curves of Exp. 4

图 7～图 9 为实验 1～实验 3 样品后界面的温度随时间变化曲线。图 10 为实验 3 对应时刻温度的拟合结果。对辐亮度随波长的分布特征进行拟合，发现界面发光具有灰体热辐射特征，其发射率 ε 约为 0.85。在第 1、2 次冲击加载期间，实验 3 样品后界面温度从 2 790 K 衰减到 2 550 K，降低了 240 K，随后在 t_3 时刻界面受到第 2 次冲击加载，界面温度再次跃升到 2 730 K，最后缓慢下降。由图 6(b) 所示的压力曲线可知，界面压力经历了衰减过程，压力从 25 GPa 降至 18 GPa，其最高峰值明显低于文献 [26–27] 的爆轰压力。在本实验中，样品温度测量值也未达到文献 [28] 报道的爆轰温度（3 400 K），可见爆轰过程需要足够高的温度和持续时间才能完成能量的充分释放。温度测量值低于稳定爆轰温度，说明在本次实验中，样品处于爆轰前的化学分解和热释能阶段。在此过程中，样品热辐射的发射率仍然小于 1，

也间接反映出在观测界面上存在某些发光较弱的区域，即处于不同区域的炸药样品的能量释放程度有所差异。

2.2　实验结果的可重复性

表 1 给出了 3 发实验的加载参数和样靶结构参数，其加载压力相近，据此考察了冲击发光实验结果的分散性。辐亮度信号及界面温度变化特征均显示出“双波”现象，其中界面温度的第 2 个峰值在 2 650～2 730 K 之间，而第 1 个峰值在 2 750～2 950 K 之间，且 2 个峰之后均呈现相似的衰减趋势，由此可见，界面温度测量结果具有较好的一致性。因此，本研究重点关注界面辐射温度的衰减特性。然而，界面辐亮度测量结果存在明显的分散性：(1) 前、后 2 个辐亮度峰的相对幅值差别较大，其中实验 1 和实验 2 中的第 2 峰值高于第 1 峰值，而实验 3 的 2 个辐亮度峰值接近；(2) 双波信号的时间间隔在 150～230 ns 之间变化，且实验 3 的双波信号具有较大的时间间隔。值得注意的是，前 2 发实验靶的第 2 基板厚度约为 4 mm，而实验 3 中样靶的第 2 基板厚度仅为 2.26 mm。如果不考虑含能材料的释能反应，本实验样靶的冲击动力学行为可简化为一维惰性流体动力学问题。图 11 给出了实验 2 和实验 3 中窗口界面的压力波形。

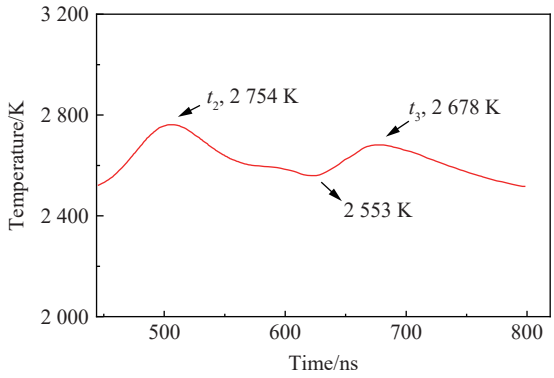


图 7　实验 1 中样品的后界面温度

Fig. 7　Back interface temperature of sample for Exp. 1

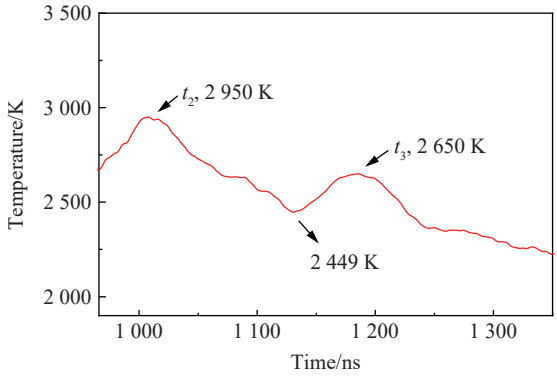


图 8　实验 2 中样品的后界面温度

Fig. 8　Back interface temperature of sample for Exp. 2

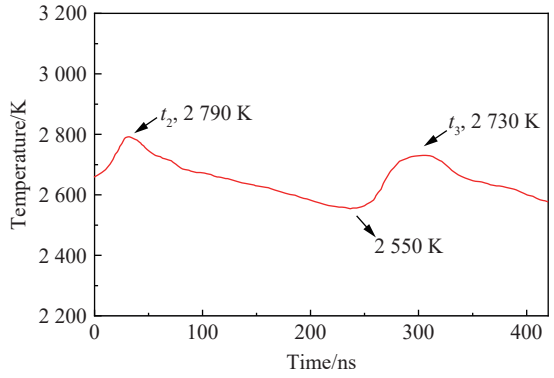


图 9　实验 3 中样品的后界面温度

Fig. 9　Back interface temperature of sample for Exp. 3

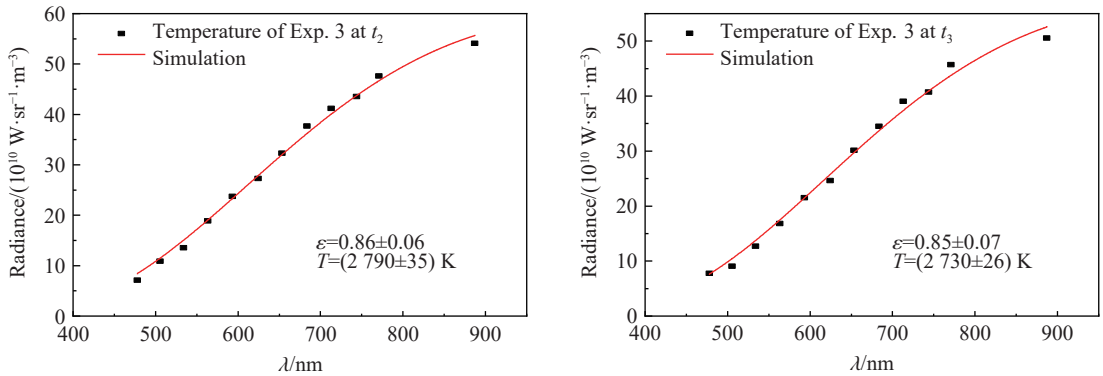


图 10　实验 3 中 t_2 和 t_3 时刻温度拟合结果

Fig. 10　Simulated temperature of Exp. 3 at t_2 and t_3

如图 11 所示，2 片铝基板碰撞产生的冲击波受薄基板后界面卸载的影响，演化为“三角波”，其后跟随斜波卸载衰减，该波形与图 5 中的第 1 辐射峰对应。约 200 ns 后，从飞片界面反射的第 2 冲击波紧随

到达窗口处，该波形与图 5 中的第 2 辐射峰对应。图 11 的第 2 压力波形具有方波特征，但图 5 中的第 2 辐射峰却呈衰减特征，说明样品实际发生了释能反应，偏离了惰性流体模拟波形。图 11 反映了第 1 压力波后伴随的线性卸载过程以及 2 次实验入射波形的差异，即双波时间间隔越小，第 2 压力波幅值越大。该模拟波形能够为理解热辐射波形提供参考，并对辐射波形差异给出定性解释。通过对比发现，实验 1 和实验 2 的双波时间间隔明显低于模拟结果，实验 4 的压力幅值高于模拟结果，结合第 2 辐射峰的衰减特征，我们认为样品实际发生了明显的释能反应，释能反应引起第 2 冲击波幅值增大和加速追赶效应，形成了第 2 辐射峰的“尖峰”特征，同时缩短了双波时间间隔。进一步的定量分析需要开展合理的反应率模拟，该工作正在进行中。本研究结果还表明：具有非均质释能特性的含能材料在冲击波作用下呈现出复杂的热辐射特征，其能量释放过程与加载条件及样品制备工艺控制参数的关系十分密切；同时，为了获得更精密的炸药冲击释能特性，有必要进一步提高样品的制备工艺水平和局部结构的表征能力。

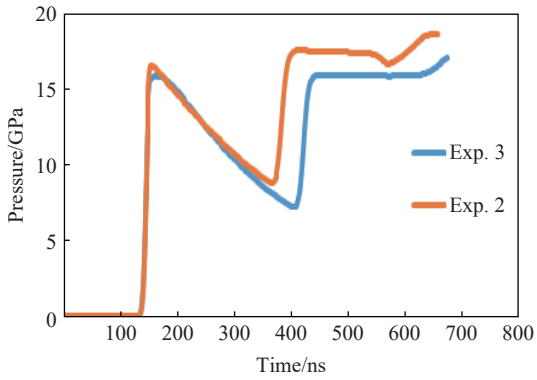


图 11　实验 2 和实验 3 窗口界面的压力波形模拟结果

Fig. 11　Simulation results of window interface pressure curves for Exp. 2 and Exp. 3

2.3　结果讨论

本研究发现，PBX/氟化锂界面的冲击温度测量结果在 2 500～2 800 K 之间变化，且明显高于未反应 RDX 的冲击温度计算值。参考文献 [23] 计算 RDX 的冲击压缩温度[11]，结果显示，界面处样品的压力为 25 GPa，冲击温度为 1 228 K，远低于图 9 中实验测得的样品/窗口界面温度。由此可见，界面处的 RDX 炸药样品发生了明显的化学能释放过程，该结论与 Ravindran 等[29]、Loboiko 等[30] 的观点一致。

如图 3 所示，样品界面先后受到 2 次冲击加载后，发光辐亮度均呈现线性衰减特征。这种辐亮度变化形态与金属测温信号呈现的“尖峰”形态明显不同，其衰减过程更缓慢。类似现象也体现在图 9 所示的界面温度曲线上。在金属测温实验中，界面压力保持恒定，通常将界面辐亮度和辐射温度的衰减归因于界面热传导。本实验中，炸药样品的热传导系数比金属低得多，且界面处不存在空气间隙（视为理想界面），因此，推测由界面热传导效应引起的辐亮度和温度衰减效应不明显。首先将这种典型的“线性”慢衰减现象解释为反应产物的等熵膨胀效应，原因是在相近的冲击条件下，本研究所进行的对比实验的确记录了界面速度的持续衰减现象，如图 6 所示。该过程对应界面压力的持续衰减，必然伴随界面处流场物质发生体积等熵膨胀和温度降低。做出上述解释的另一个支撑证据来自“双波”加载数据。在前期膨胀过程中，界面温度降低，但在经历第 2 次加载后又恢复到原有水平，表明这里界面温度的升降受界面压力调控，而热耗散所致的界面降温效应并不明显。在炸药及其产物组成的反应流场中，介质的组成通常被界定为未反应炸药和反应产物 2 个类别。其中，未反应炸药组分的温度也会因冲击压力的增加而升高，但从图 6 所示的实际测量结果可以看出，即使按第 1 次冲击压力（25 GPa）峰值估算，界面温度也仅为 1 228 K，远低于实际测得的界面辐射温度（2 790 K）。由此可见，未反应炸药组分对界面辐亮度和辐射温度测量结果的贡献可以忽略不计，主要贡献来自于反应产物的热辐射。反应产物是由一些小分子组成的混合流体。从本研究的测量结果可以看到，在 25 GPa 冲击压力下，这些产物的温度约为 2 790 K，直到第 2 次冲击波到达之前，流体压力已衰减到 18 GPa 附近，对应的温度降为 2 550 K。在该过程中，流体温度的降低幅度与利用简单理想气体模型计算的估值相符，该模型在其他有关含能材料冲击动力学问题研究中曾被采用[31−32]。鉴于 RDX 爆炸产生的主要气体组分（混合物中 H_2O、N_2 和 CO_2 的摩尔配比为 3∶3∶1.5）的比热比（$\gamma = c_p/c_V$）取值约等于 1.3～1.4，当其从初始状态（25 GPa，2 790 K）经历绝热膨胀到 18 GPa 时，预计温度会下降至约 2 580 K，该近似结果与本研究中界面温度衰减结果（从 2 790 K 下降至 2 550 K）相符。如果考虑高压下分子相互作用的贡献，体系的比热容会降低，

绝热膨胀所引起的降温幅度会有所减少，毕竟在含能材料中因温度非均匀而导致的热弛豫效应也会引起温度降低。在实验 3 中，样品的辐亮度和辐射温度都回升到了衰减前的水平，证明界面温度主要受压力的影响。只有在考虑反应产物的化学反应平衡，并引用产物组分相关的状态方程模型后，才能对等熵膨胀效应和热弛豫效应的相对大小给出比较准确的反应流场动力学和热力学计算结果。如果在冲击加载下样品 RDX 的反应率较低，气体产物相对较少（对应实验 3 情形），第 2 次加载波（铜飞片/铝基板界面的反射波）的压力幅值与第 1 次冲击加载波（基板夹层碰撞）的压力幅值相当；如果反应速率较高，随着气体产物占比增大，因产物膨胀导致阻抗降低效应会更明显，致使第 2 次加载波幅值被削弱，与图 6 中的界面速度和压力测量结果相符。

实验中 PBX 炸药的冲击发光辐亮度分布满足灰体辐射模型，没有记录到“包裹气体”或界面间隙导致的“辐射尖峰”信号，因此可以认为本研究采用的样品制备方法基本抑制了残留气体问题。样品内部和界面处的气孔和间隙已经被第 1 次冲击波完全压实，因此在第 2 次冲击波到达界面时不存在残余气体发光问题。将第 1 次冲击的发光峰与第 2 次冲击的发光峰对比，发现两者的起跳特征和衰减行为非常相似。据此认为，第 1 次冲击加载时，也不存在明显的包裹气体和间隙气体发光问题。通过这种双波加载实验，证实本研究采用的制样方法有效抑制了界面“间隙”和粒间空穴塌缩引起的热辐射背景干扰信号。

3　结　论

本研究针对 RDX 基 PBX 非均质复合炸药的冲击温度测量问题，探索了样品制备方法和测试技术，获得以下结论：(1) 通过“双波”加载实验和冲击辐亮度检测，发现孔隙塌缩及界面间隙发光背景得到了有效抑制；(2) 借助瞬态原位辐射测温技术获得了样品/氟化锂界面的辐射谱演变特性，发现辐亮度随波长变化的分布特征满足普朗克灰体辐射模型，表明冲击发光主要来自炸药样品的热辐射；(3) 利用激光位移干涉技术获得了样品/氟化锂界面的粒子速度剖面，分析发现，界面温度的时间演化特性主要受界面压力调制影响，界面温度测量结果反映了炸药内局部热区分解产物的高温环境。研究结果为 RDX 基 PBX 炸药的冲击起爆反应机理以及反应模型的建立和完善提供了重要依据。

参考文献：

[1] BRADY J J, ARGIRAKIS B L, GORDON A D, et al. Polymorphic phase control of RDX-based explosives [J]. Applied Spectroscopy, 2018, 72(1): 28–36.

[2] YOUNG G, WILSON D P, KESSLER M, et al. Ignition and combustion characteristics of Al/RDX/NC nanostructured microparticles [J]. Combustion Science and Technology, 2021, 193(13): 2259–2275.

[3] WANG B B, LIAO X, DELUCA L T, et al. Effects of particle size and content of RDX on burning stability of RDX-based propellants [J]. Defence Technology, 2022, 18(7): 1247–1256.

[4] GRILLI N, KOSLOWSKI M. The effect of crystal orientation on shock loading of single crystal energetic materials [J]. Computational Materials Science, 2018, 155: 235–245.

[5] SZALA M. Development trends in artillery ammunition propellants [J]. Materiały Wysokoenergetyczne, 2020, 12(2): 5–16.

[6] LI Y, JIANG C L, WANG Z C, et al. Experimental study on reaction characteristics of PTFE/Ti/W energetic materials under explosive loading [J]. Materials, 2016, 9(11): 936.

[7] ZEMAN S, JUNGOVÁ M. Sensitivity and performance of energetic materials [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2016, 41(3): 426–451.

[8] BRILL T B, RUSSELL T P, TAO W C, et al. Decomposition, combustion, and detonation chemistry of energetic materials [C]// Proceedings of the Materials Research Society Symposium Proceedings. Pittsburgh: Materials Research Society, 1996.

[9] MA J C, CHINNAM A K, CHENG G B, et al. 1, 3, 4-oxadiazole bridges: a strategy to improve energetics at the molecular level [J]. Angewandte Chemie, 2021, 133(10): 5557–5564.

[10] 钟凯, 刘建, 王林元, 等. 含能材料中“热点”的理论模拟研究进展 [J]. 含能材料, 2018, 26(1): 11–20.

ZHONG K, LIU J, WANG L Y, et al. Lssue of ‘hot-spot’ in energetic materials: recent progresses of modeling and calculations [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(1): 11–20.

[11] 经福谦, 陈俊祥. 动高压原理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 121−128.
JING F Q, CHEN J X. Dynamic high-pressure generation principle and related technologies [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 121−128.

[12] BARUA A, HORIE Y, ZHOU M. Energy localization in HMX-estane polymer-bonded explosives during impact loading [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(5): 054902.

[13] BARUA A, KIM S, HORIE Y, et al. Ignition criterion for heterogeneous energetic materials based on hotspot size-temperature threshold [J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(6): 064906.

[14] OWENS F J, SHARMA J. X-ray photoelectron spectroscopy and paramagnetic resonance evidence for shock-induced intramolecular bond breaking in some energetic solids [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(3): 1494–1497.

[15] BOTCHER T R, WIGHT C A. Explosive thermal decomposition mechanism of RDX [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1994, 98(21): 5441–5444.

[16] DATTELBAUM D M, SHEFFIELD S A, GUSTAVSEN R L. *In-situ* electromegnetic gauging and its application to shock compression science and detonation physcis: LA-UR-11-00984 [R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2011.

[17] BOURNE N K, MILNE A M. The temperature of a shock-collapsed cavity [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2003, 459(2036): 1851–1861.

[18] KARAKHANOV S M, PLASTININ A V, BORDZILOVSKII D S, et al. Time of hot-spot formation in shock compression of microballoons in a condensed medium [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2016, 52(3): 350–357.

[19] BOURNE N K, FIELD J E. Shock-induced collapse and luminescence by cavities [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1999, 357(1751): 295–311.

[20] WANG Y P, LIU F S, LIU Q J, et al. Raman spectra of liquid nitromethane under singly shocked conditions [J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2016, 29(2): 161–166.

[21] 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.
TAN H. Shock temperature measurements for metal (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.

[22] SHEN Y R, KUMAR R S, PRAVICA M, et al. Characteristics of silicone fluid as a pressure transmitting medium in diamond anvil cells [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(11): 4450–4454.

[23] GIBBS T R, POPOLATO A. LASL explosive property data [M]. Berkeley: University of California Press, 1980: 141−151.

[24] MITCHELL A C, NELLIS W J. Shock compression of aluminum, copper, and tantalum [J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(5): 3363–3374.

[25] COPPARI F, LAZICKI A, FRATANDUONO D, et al. New Hugoniot measurements on LiF and diamond from laser-driven compression [C]//Proceedings of the APS Topical Conference on the Shock Compression of Matter, 2015.

[26] LU J P. Evaluation of the thermochemical code-CHEETAH 2.0 for modelling explosives performance: DSTO-TR-1199 [R]. Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001: 1−24.

[27] HOBBS M L, BAER M R. Calibrating the BKW-EOS with a large product species data base and measured C-J properties [C]// Proceedings of the 10th Symposium (International) on Detonation. Boston: Office of Naval Research, 1993: 409−418.

[28] HENGLEIN F A. Chemical technology [M]. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 1969: 718−728.

[29] RAVINDRAN T R, RAJAN R, VENKATESAN V. Review of phase transformations in energetic materials as a function of pressure and temperature [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2019, 123(48): 29067–29085.

[30] LOBOIKO B G, LUBYATINSKY S N. Reaction zones of detonating solid explosives [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2000, 36(6): 716–733.

[31] KARIMI M, OCHS B, LIU Z F, et al. Measurement of methane autoignition delays in carbon dioxide and argon diluents at high pressure conditions [J]. Combustion and Flame, 2019, 204: 304–319.

[32] CHEN J N, LI A N, HUANG Z, et al. Numerical study on CO_2 non-equilibrium condensation considering shock waves for the potential of flue gas decarbonization [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 144: 106749.

Thermal Radiation Characteristics of RDX-Based PBX Explosives during Shock-Induced Ignition Reactions

SHI Xinhui, YANG Lei, YANG Xue, KANG Hongliang, YUAN Wenshuo, LIU Fusheng

（*Institute of High Pressure and High Temperature*, *College of Physical Science and Technology*, *Southwest Jiaotong University*, *Chengdu* 610031, *Sichuan*, *China*）

Abstract: Studying the impact initiation radiation and temperature of polymer bonded explosives in the shock wave flow is crucial for understanding and predicting their reaction kinetics and detonation behavior. This work uses the two-stage light gas gun for shock loading, transient radiation pyrometer temperature measurement, and laser displacement interference system, to study the thermal radiation characteristics of the polymer bonded explosive/lithium fluoride window interface and its correlation with the interface pressure. This work optimized the polymer bonded explosives sample preparation method, significantly suppressed the luminous background of the wrapped gas and interface gap, and provided interface radiance data and interface temperature data. The results show that the time attenuation characteristics of the interface temperature during two consecutive impact loading processes are closely related to the isentropic expansion behavior of the reaction products, and the interface temperature reflects the temperature evolution behavior of the products at the interface. It provides a feasible technical way to directly obtained the reaction product temperature of heterogeneous composite explosives during the ignition reaction and energy release.

Keywords: polymer bonded explosive; shock loading; thermal radiation of interface; ignition reaction; isentropic expansion; interface temperature