

# 高压物理学报

RDX单晶炸药的冲击-斜波加载实验研究  
种涛 莫建军 蔡进涛 王桂吉

**Experimental Study on Shock-Ramp Wave Profiles in RDX Single Crystal Explosive**  
CHONG Tao, MO Jianjun, CAI Jintao, WANG Guiji

引用本文:

种涛, 莫建军, 蔡进涛, 等. RDX单晶炸药的冲击-斜波加载实验研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(5):051301. DOI: 10.11858/gywlxb.20200529  
CHONG Tao, MO Jianjun, CAI Jintao, et al. Experimental Study on Shock-Ramp Wave Profiles in RDX Single Crystal Explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(5):051301. DOI: 10.11858/gywlxb.20200529

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20200529>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[冲击加载和斜波加载下PBX炸药细观结构点火特性对比](#)

Ignition Characteristics of PBX Explosives at Meso-Structural Level under Shock and Ramp Loading  
高压物理学报. 2017, 31(1): 27 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.01.005>

[磁驱动斜波加载下铋的Ⅰ-Ⅱ-Ⅲ相变实验](#)

I - II - III Phase Transition of Bismuth under Magnetically Driven Ramp Wave Loading  
高压物理学报. 2018, 32(5): 051101 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20180511>

[磁驱动斜波压缩实验结果的不确定度分析](#)

Experimental Uncertainty Analysis of Magnetically Driven Ramp Wave Compression  
高压物理学报. 2017, 31(3): 295 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.03.011>

[斜波压缩下锡的相变动力学特性](#)

Dynamic Characteristics of Phase Transition of Tin under Ramp Wave Loading  
高压物理学报. 2020, 34(1): 011101 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190828>

[RDX基含铝炸药三波点高度的数值模拟](#)

Numerical Simulation of the Three-Wave Point of RDX-Based Aluminized Explosives  
高压物理学报. 2018, 32(3): 035101 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20170539>

[冲击加载下NaCl单晶高压声速与温度的同步测量](#)

Simultaneous Measurement of Sound Velocity and Temperature of Single Crystal NaCl under Shock Loading  
高压物理学报. 2017, 31(6): 707 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.2017.06.005>

# RDX 单晶炸药的冲击-斜波加载实验研究

种 涛, 莫建军, 蔡进涛, 王桂吉

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 基于磁驱动加载装置 CQ-4, 完成了冲击-斜波复杂加载实验设计, 开展了 RDX 单晶(210)、(100)两个晶向在不同加载压力下的冲击-斜波压缩实验, 获得了 RDX 单晶样品与 LiF 窗口界面的速度历史曲线和纵波声速。实验结果显示: 速度波剖面可分为冲击压缩、斜波压缩和卸载 3 部分; 当冲击压力较高时, 冲击压缩段中不再出现弹塑性转变以及 4 GPa 附近相变的速度特征波形; 当冲击压力较低时, 在冲击压缩段观测到了弹-黏塑性波形。

**关键词:** RDX 单晶炸药; 冲击-斜波加载; 弹塑性转变; 斜波压缩

中图分类号: O521.2; O347.3

文献标识码: A

炸药晶体的动力学特性与其反应机理、化爆安全性问题紧密相关, 是炸药制备、加工、运输和存储的基础和依据<sup>[1-4]</sup>。由于炸药具有高感度, 因此很难获得较高冲击压力下炸药单晶的动力学响应特性实验结果。近年来发展的斜波压缩加载实验技术<sup>[5]</sup>可以在获得样品材料高压状态的同时, 保持样品中较低的温升, 使炸药不易发生化学反应。目前, 人们已通过该技术获得了很多有价值的研究成果<sup>[6-9]</sup>, 为获得高能炸药的高压物性和细观尺度模拟计算提供了重要的高压物性参数<sup>[10]</sup>。RDX 作为重要的高能炸药, 其高压物性一直备受关注。分子动力学模拟和静高压实验结果<sup>[11]</sup>表明, RDX 存在  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 、 $\delta$  和  $\epsilon$  5 种相, 其中  $\alpha$  相在常温常压下稳定存在, 在 4 GPa 附近出现  $\alpha$ - $\gamma$  相变, 并伴随 1.6% 的体积减小。利用光谱探测技术, 研究人员在静高压实验和冲击加载实验中均发现了 RDX 的明显相变迹象<sup>[12-13]</sup>, 然而在冲击加载实验中却未发现相变波形<sup>[14-17]</sup>。种涛等<sup>[18]</sup>、Cai 等<sup>[19]</sup>开展了斜波加载下 RDX 单晶在 15 GPa 以内的动力学响应研究, 观测到了 RDX 单晶的弹-黏塑性转变和 4 GPa 附近的相变, 完成了实验过程的数值模拟, 并给出了物理模型及其参数。

用于材料动力学特性研究的实验技术主要有静高压、冲击和斜波加载, 根据加载特征可知, 这 3 种实验技术得到的数据依次对应热力学平面中的等温线、冲击 Hugoniot 线和(准)等熵线。实际的碰撞、爆炸等动力学过程一般不是单一的静高压、冲击或斜波压缩过程, 而是包含两种或多种加载及卸载过程。将冲击加载和斜波压缩加载相结合, 建立可控热力学路径的实验技术, 将为探索偏离冲击绝热线、等熵线、等温线 3 条主参考线的更宽广热力学空间的材料力学性能提供技术途径, 也为认识炸药化爆机理对热力学路径的依赖性提供实验手段。

为了获取偏离冲击绝热线、等熵线主参考线热力学路径的实验数据, 为物理模型校验提供数据支撑, 本研究拟开展冲击-斜波复杂加载实验设计, 对两种晶向的 RDX 单晶进行不同加载压力下的冲击-斜波压缩加载实验, 以获得 RDX 单晶样品与 LiF 窗口界面的速度历史曲线。

\* 收稿日期: 2020-03-12; 修回日期: 2020-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(11702276, 11972031); 冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金(6142A03192007)

作者简介: 种 涛(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事动高压实验加载技术和材料动力学行为研究.

E-mail: maoda318@163.com

通信作者: 蔡进涛(1984—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事含能材料动力学特性研究.

E-mail: goldennoon@163.com

## 1 冲击-斜波加载实验设计

实验工作在中国工程物理研究院流体物理研究所自行研制的脉冲功率装置 CQ-4<sup>[20]</sup> 上开展。CQ-4 装置是一种基于低电感电容器储能的平板传输线的小型装置, 放电上升沿为 400~600 ns, 峰值电流可达 4 MA。负载区域安装条形对称电极, 保证单发实验中上、下样品加载压力的一致性。装置放电时, 电流流经负载区条形对称电极, 产生洛伦兹排斥力, 从而对不同厚度样品产生一致的加载压力。

本研究设计的冲击-斜波加载实验负载区见图 1(a)。样品平行地放置在距离极板  $H_0$  处, 使极板有一定的飞行距离。飞行距离  $H_0$  的设计方法(图 1(b)): 确定实验加载压力峰值和撞击速度  $u_0$  后, 首先做一发预实验(与真实实验中使用的极板和加载条件完全相同, 只是无样品和窗口), 获取极板自由面速度剖面  $u_t-t$ (红线), 将  $u_t$  对时间  $t$  积分, 获取自由面飞行距离-时间( $H-t$ )曲线(黑线); 在  $u_t-t$  曲线上找到  $u_0$  对应的点  $A_1$ , 然后找到同一时刻  $H-t$  曲线上点的  $A_2$ , 对应的飞行距离  $H_0$  即为实验设计值。冲击-斜波实验中, 在与样品对应的位置处放置窗口材料, 窗口与极板的距离也是  $H_0$ , 在样品和窗口的中心位置放置测速探头。需要指出: 样品后表面为自由面或样品/窗口界面, 若加窗口, 则样品与窗口接触的一面镀反射膜, 另一面镀增透膜; 窗口两面均镀增透膜, 极板内、外两面精加工, 使其都达到镜面; 测速探头测得的速度波剖面依次记录极板自由面速度、撞击速度、撞击后极板/窗口界面速度。

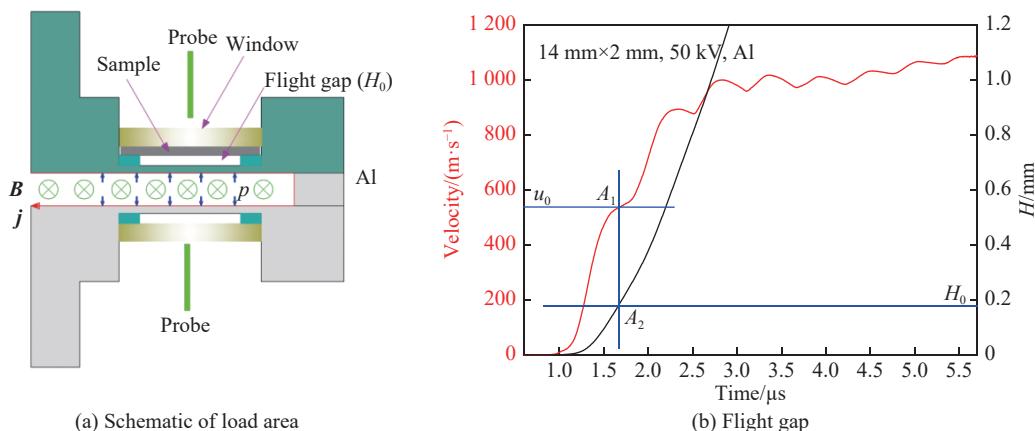


图 1 冲击-斜波加载实验设计示意图  
Fig. 1 Schematic of shock-ramp wave loading experiment

## 2 实验结果与分析

基于设计的冲击-斜波加载实验技术, 对(100)和(210)两个晶向的 RDX 单晶开展了约 7 GPa 和 4 GPa 的冲击-斜波压缩实验, 获得了 RDX/窗口界面速度曲线。加载电极材料选择铝, 电极厚度为 2 mm, 宽度为 12 mm。窗口材料为 LiF 单晶。实验样品为大块单晶 RDX, 由中北大学研制, 采用水冷式线切割技术沿不同晶向进行切割, 经研磨后进行 X 射线衍射(XRD)分析, 确定切片的晶向, 并保证样品的加载面与晶向的偏差小于 0.5°。共进行 4 发实验, 实验参数见表 1, 其中  $d_s$  为 RDX 样品厚度,  $U_0$  为充电电压。

实验结果如图 2 所示, 其中: 黑色曲线为铝极板撞击 LiF 窗口前的自由面速度波剖面, 蓝色曲线为铝极板撞击 LiF 窗口后极板/窗口界面速度。撞击过程瞬间完成, 速度出现间断, 铝极板自由面速度峰值为实验撞击速度( $u_0$ )。考虑到铝和 LiF 材料的声阻抗近似相等, 极板/窗口界面速度起始值近似为极板自由面速度峰值的 1/2, 实验结果与理论预估值一致。

总体上看, 4 发实验的 RDX/LiF 界面速度分为 3 个阶段: 开始的跳跃式增长(冲击压缩过程)、之后的平滑上升(斜波压缩过程)、最后的卸载过程。在加载压力较高的实验 Shot 1 和 Shot 2 中, 界面速度曲线中未观测到 RDX 样品的弹塑性转变和 4 GPa 附近相变对应的特征波形。这是由于冲击波到达样

品/窗口界面前,塑性冲击波已追赶上弹性冲击波和相变波,两个真实的物理过程被掩盖。降低充电电压、减小铝极板飞行距离,开展冲击压力较低的实验 Shot 3 和 Shot 4。结果显示,实测界面速度剖面包含了不同晶向 RDX 晶体的弹塑性转变信息,但仍未能获得 RDX 晶体在 4 GPa 左右的 $\alpha$ - $\gamma$ 相变波形。

表 1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

Exp. No.	Sample 1-LiF		Sample 2-LiF		Lattice orientation of RDX	$U_0/\text{kV}$	$H_0/\text{mm}$
	$d_s/\text{mm}$	Size of LiF/(mm × mm)	$d_s/\text{mm}$	Size of LiF/(mm × mm)			
Shot 1	1.101	$\varnothing 10.0 \times 4.035$	1.040	$\varnothing 10.0 \times 4.157$	(100)	60	0.85
Shot 2	1.295	$\varnothing 10.0 \times 4.042$	1.208	$\varnothing 10.0 \times 4.204$	(100)	60	0.35
Shot 3	1.104	$\varnothing 10.0 \times 4.075$			(100)	50	0.17
Shot 4	1.311	$\varnothing 10.0 \times 3.985$			(210)	50	0.16

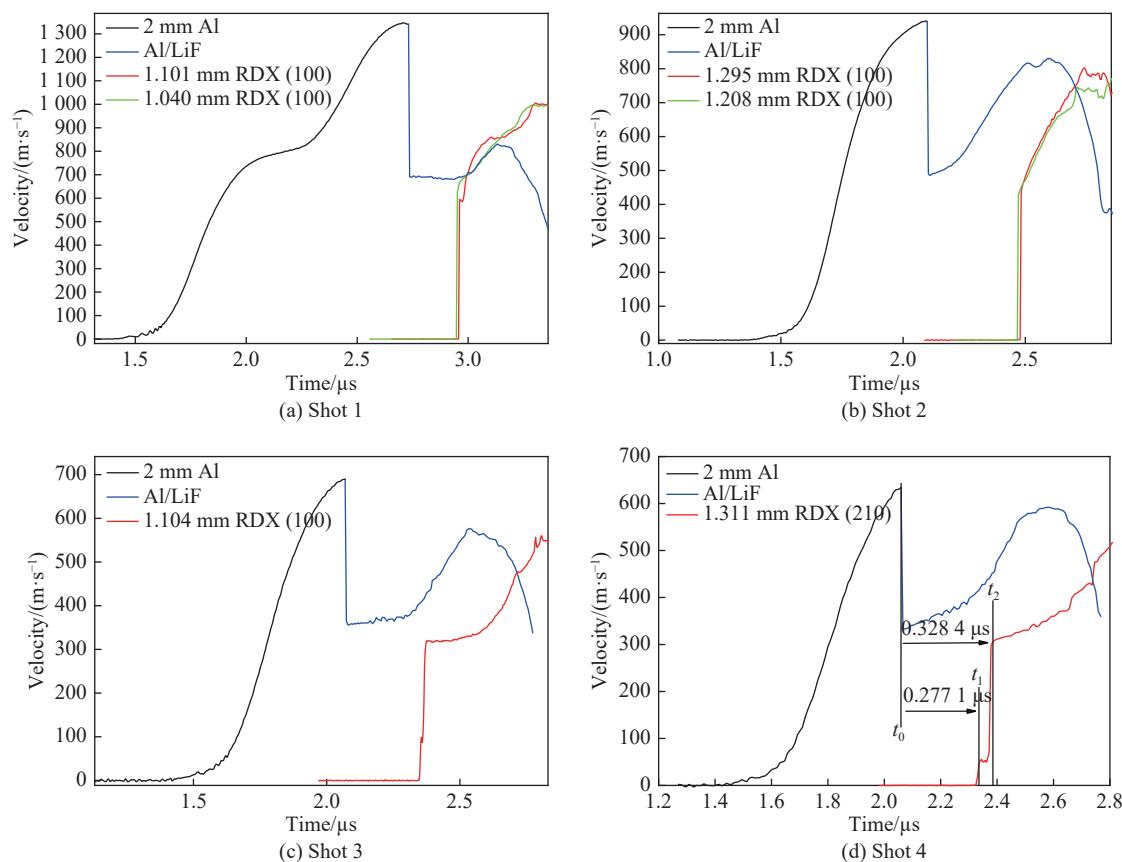


图 2 不同晶向 RDX 单晶的冲击-斜波加载实验速度曲线

Fig. 2 Experimental data of shock-ramp wave loading on RDX single crystals with different orientations

铝极板与 RDX 单晶样品、LiF 窗口接触后进入加载阶段,数据分析时假设铝极板和 LiF 窗口的界面速度(图 2 中蓝色曲线)是“零厚度样品”后界面速度,起始时刻  $t_0$  为冲击波进入 RDX 单晶样品时刻,分别提取 RDX 单晶样品弹性波和塑性波到达后界面的时刻  $t_1$  和  $t_2$ (见图 2(d)),弹性波和塑性波从 RDX 样品前加载面传播到后表面的时间分别为  $\Delta t_1$ ( $\Delta t_1 = t_1 - t_0$ ) 和  $\Delta t_2$ ( $\Delta t_2 = t_2 - t_0$ ),将样品厚度( $d_s$ )除以冲击波传播时间,就可以获得 RDX 单晶的纵波声速。

4发实验获得的纵波波速与已发表文献结果的对比如图3所示。整体上看,本实验获得的RDX单晶的纵波声速与相关文献<sup>[17, 21]</sup>结果基本吻合,并且其弹性部分比 Hooks 等<sup>[17]</sup>的冲击实验结果稍高,塑性部分与 Olinger 等<sup>[21]</sup>利用金刚石对顶砧(DAC)得到的准静态实验结果基本一致。

### 3 总 结

完成了冲击-斜波复杂加载实验设计,开展了(210)、(100)两个晶向的RDX单晶在不同加载压力下的冲击-斜波压缩加载实验。实验结果显示:加载段的速度剖面分为冲击压缩和斜波压缩两部分;当加载压力较高时,冲击压缩段中不再出现塑性转变和4 GPa附近相变对应的速度特征波形;当加载压力较低时,在冲击压缩段观测到了弹-黏塑性波形。经数据处理后,获取了RDX单晶的纵波声速,其弹性部分相对冲击实验结果稍高,塑性部分与准静态压缩实验结果基本一致。

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所的吴刚、邓顺益、税荣杰等在实验运行和测试方面给予的帮助!

### 参考文献:

- [1] 谭武军. 含能晶体力学性能研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008.  
TAN W J. Studies on the mechanical properties of energetic crystals [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2008.
- [2] 李明, 陈天娜, 庞海燕, 等. RDX 晶体的破碎与细观断裂行为 [J]. *含能材料*, 2013, 21(2): 200–204.  
LI M, CHEN T N, PANG H Y, et al. Ruptures and mesoscale fracture behaviors of RDX crystals [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2013, 21(2): 200–204.
- [3] 王国栋, 刘玉存. 神经网络在炸药晶体密度预测中的应用 [J]. *火炸药学报*, 2007, 30(1): 57–59.  
WANG G D, LIU Y C. Application of artificial neural network in predicting the density of explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(1): 57–59.
- [4] 花成, 傅华, 田勇, 等. 冲击波作用下 HMX 晶体的细观响应 [J]. *火炸药学报*, 2010, 33(3): 5–8.  
HUA C, FU H, TIAN Y, et al. Meso-scale response of HMX crystal under the shock waveeffect [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(3): 5–8.
- [5] HALL C A, ASAY J R, KNUDSON M D, et al. Experimental configuration for isentropic compression of solids using pulsed magnetic loading [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(9): 3587–3595.
- [6] HARE D E, FORBES J W, REISMAN D B, et al. Isentropic compression loading of octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine (HMX) and the pressure-induced phase transition at 27 GPa [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(6): 949–951.
- [7] HARE D E, REISMAN D B, GARCIA F, et al. The isentrope of unreacted LX-04 to 170 kbar [J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 706(1): 145–148.
- [8] HARE D E, REISMAN D B, DICK J J, et al. Isentropic compression loading of HMX and the pressure-induced phase transition at 27 GPa: UCRL-JRNL-202601 [R]. Livermore, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2004.
- [9] BAER M R, ROOT S, DATTELBAUM D, et al. Shockless compression studies of HMX-based explosives [J]. AIP Conference Proceedings, 2009, 1195(1): 699–702.
- [10] BAER M R, HALL C A, GUSTAVSEN R L, et al. Isentropic loading experiments of a plastic bonded explosive and

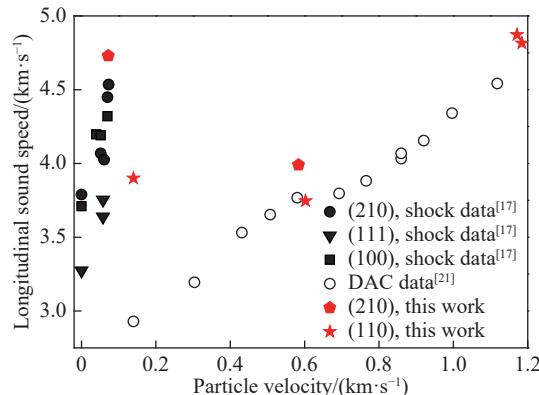


图3 RDX 单晶的纵波声速与文献结果的比较

Fig. 3 Comparison of the longitudinal sound speed of RDX single crystal with the results of literatures

- constituents [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(3): 034906.
- [11] INFANTE-CASTILLO R, PACHECO-LONDOÑO L C, HERNÁNDEZ-RIVERA S P. Monitoring the  $\alpha \rightarrow \beta$  solid-solid phase transition of RDX with Raman spectroscopy: atheoretical and experimental study [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2010, 970(1/2/3): 51–58.
- [12] GOTO N, FUJIHISA H, YAMAWAKI H, et al. Crystal structure of the high-pressure phase of hexahydro-1, 3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine ( $\gamma$ -RDX) [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2006, 110(47): 23655–23659.
- [13] PATTERSON J E, DREGER Z A, GUPTA Y M. Shock wave-induced phase transition in RDX single crystals [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2007, 111(37): 10897–10904.
- [14] CAWKWELL M J, RAMOS K J, HOOKS D E, et al. Homogeneous dislocation nucleation in cyclotrimethylene trinitramine under shock loading [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(6): 063512.
- [15] RAMOS K J, HOOKS D E, SEWELL T D, et al. Anomalous hardening under shock compression in (021)-oriented cyclotrimethylene trinitramine single crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108(6): 066105.
- [16] CAWKWELL M J, SEWELL T D, ZHENGL Q, et al. Shock-induced shear bands in an energetic molecular crystal: application of shock-front absorbing boundary conditions to molecular dynamics simulations [J]. *Physical Review B*, 2008, 78(1): 014107.
- [17] HOOKS D E, RAMOS K J, MARTINEZ A R. Elastic-plastic shock wave profiles in oriented single crystals of cyclotrimethylene trinitramine (RDX) at 2.25 GPa [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(2): 024908.
- [18] 种涛, 蔡进涛, 赵剑衡, 等. 斜波压缩下 RDX 单晶弹塑性及相变过程的数值模拟 [C]//第 11 届全国爆轰学术会议. 玉溪, 2016.
- CHONG T, CAI J T, ZHAO J H, et al. Numerical simulation of elastoplasticity and phase transformation of RDX single crystal under ramp wave loading [C]//11th National Detonation Conference. Yuxi, 2016.
- [19] CAI J T, ZHAO F, WANG G J, et al. Experimental research on elastic-plastic transition and  $\alpha$  to  $\gamma$  phase transformation of RDX crystal under ramp loading [C]//Proceedings of 2015 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. Qingdao, 2015.
- [20] WANG G J, LUO B Q, ZHANG X P, et al. A 4 MA, 500 ns pulsed power generator CQ-4 for characterization of material behaviors under ramp wave loading [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(1): 015117.
- [21] OLINGER B, ROOF B, CADY H H. The linear and volume compression of  $\beta$ -HMX and RDX [C]//Proceedings of Symposium (International) on High Dynamic Pressures. Paris: CEA, 1978: 3–8.

## Experimental Study on Shock-Ramp Wave Profiles in RDX Single Crystal Explosive

CHONG Tao, MO Jianjun, CAI Jintao, WANG Guiji

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China)

**Abstract:** The shock-ramp wave loading experiment is fulfilled using pulsed power generator CQ-4. For RDX single crystal samples with the orientations of (210) and (100), the interfacial velocity profiles between the RDX sample and LiF window are obtained by photonic Doppler velocimetry (PDV). The experimental results show that the interfacial velocity profile is divided into three parts: shock compression, ramp wave compression and unloading waves. At the shock pressure of 4 GPa, an elastic-viscoplastic waveform is observed. When the shock pressure is as high as 7 GPa, the characteristic waveform corresponding to the elastic-plastic transition disappears in the measured wave profile.

**Keywords:** RDX crystal; shock-ramp loading; elastic-plastic transition; ramp wave compression