高压物理学报

35 GPa斜波加载下RDX单晶炸药的动力学行为

种涛 张朝辉 王贵林 傅华 李涛 随志磊 郑贤旭

Dynamic Behaviors of RDX Single Crystal under Ramp Wave Compression up to 35 GPa

CHONG Tao, ZHANG Zhaohui, WANG Guilin, FU Hua, LI Tao, SUI Zhilei, ZHENG Xianxu

引用本文:
种涛, 张朝辉, 王贵林, 等. 35 GPa斜波加载下RDX单晶炸药的动力学行为[J]. 高压物理学报, 2022, 36(3):030103. DOI: 10.11858/gywlxb.20210803
CHONG Tao, ZHANG Zhaohui, WANG Guilin, et al. Dynamic Behaviors of RDX Single Crystal under Ramp Wave Compression up to 35 GPa[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(3):030103. DOI: 10.11858/gywlxb.20210803

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210803

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

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

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

RDX塑性炸药的爆电耦合效应

Explosion-Electricity Coupling Effect of RDX Plastic Explosive

高压物理学报. 2021, 35(6): 065201 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20210744

镁铝合金的冲击熔化行为实验研究

Melting of MB2 Alloy under Shock Compression

高压物理学报. 2019, 33(2): 020106 https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190729

DOI: 10.11858/gywlxb.20210803

35 GPa 斜波加载下 RDX 单晶炸药的动力学行为

种 涛, 张朝辉, 王贵林, 傅 华, 李 涛, 随志磊, 郑贤旭

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 利用磁驱动斜波加载 10 MA 装置和激光干涉测速技术, 开展了 35 GPa 压力下 (100) 晶向 RDX 单晶炸药的斜波压缩实验, 获得了 RDX 单晶/LiF 单晶窗口界面速度数据。实验结果显示, 速度波剖面表现为明显的三波结构, 由低到高依次对应弹性波、塑性波和相变波, α-γ 相变的起始压力为 3.1 GPa。结合修正的多相状态方程和非平衡相变动力学模型, 对 RDX 单晶炸药的斜波压缩过程开展一维流体动力学数值模拟, 模拟结果与实验结果基本一致。

关键词: RDX 单晶炸药; 斜波加载; 弹塑性转变; 相变

中图分类号: O521.2; O347.3 **文献标识码:** A

含能材料的弹塑性、相变等高压物性与其反应机理及化爆安全性等问题密切相关, 是炸药制备、加工、运输和存储的基础和依据[1−3]。由于冲击动载固有的温升效应和炸药的高感度特性, 通过冲击加载研究含能材料的动力学特性具有一定的局限性。与冲击加载不同, 斜波压缩动态加载实验技术[4] 是一个连续的压缩过程, 相同压力下样品的温升效应小, 因而可以将力学效应和热效应分解开来单独分析, 有利于细致地开展含能材料的物态方程研究。另外, 斜波压缩下含能材料不易发生化学反应。国内外已利用此技术开展了多种含能材料在高压下的动力学特性研究[5−9]。RDX 是一种广泛应用的高能炸药单晶, 由于其相变复杂, 因此一直以来其高压物性备受关注。分子动力学模拟和静高压实验结果[10] 表明, RDX 有α、β、γ、δ和ε 5 种相, 其中α相在常温常压下稳定存在, 3～4 GPa 开始发生α-γ相变, 该相变引起 1.6% 的体积减小。在基于光谱探测技术的静高压实验和冲击加载实验[11−12] 中, 都发现了 RDX 的明显相变信息, 但是冲击实验的速度剖面[13−16] 不包含相变信息。种涛等[17−20] 开展了斜波加载下 RDX 单晶在 0～15 GPa 内的动力学响应研究, 观测到 RDX 单晶的弹-黏塑性转变和 4 GPa 附近的相变, 结合弹-黏塑性物理模型、多相状态方程和非平衡相变速率方程, 完成了对实验过程的数值模拟。

本研究基于磁驱动加载 10 MA 装置和激光干涉测速技术, 开展了 35 GPa 压力下 (100) 晶向 RDX 单晶炸药的动力学行为分析, 以获取 RDX 单晶/LiF 窗口界面的速度响应数据, 探讨不同加载路径对 RDX 单晶的弹塑性和相变的影响。

1 斜波压缩实验设计

10 MA 装置[21] 是 24 路并联向负载区汇流的大型脉冲电流发生装置, 主要由储能模块、传输系统和负载区组成, 其放电上升沿 300～600 ns 可调, 峰值电流可达 8～10 MA, 斜波加载压力可达 100 GPa。实验负载区见图 1, 加载电流通过由两个极板组成的 U 型回路, 在两电极之间的缝隙产生感应电磁场, 由楞次定律可知, 电磁场与加载电流相互作用, 产生垂直于载流面向外的洛伦兹力, 即磁压力, 磁压力

* 收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(11772311); 科学挑战计划(TZ2016001); 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, 主要从事动高压加载技术和材料动力学行为研究.
E-mail: maoda318@163.com

通信作者: 郑贤旭(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事含能材料物性及实验诊断技术研究.
E-mail: zxxgoal109@sina.com

通过加载电极传入样品。由磁驱动斜波压缩实验设计方法[21−22]可知, 斜波压缩相变实验对负载区极板材料、极板构型尺寸、样品尺寸和窗口尺寸有严格要求。

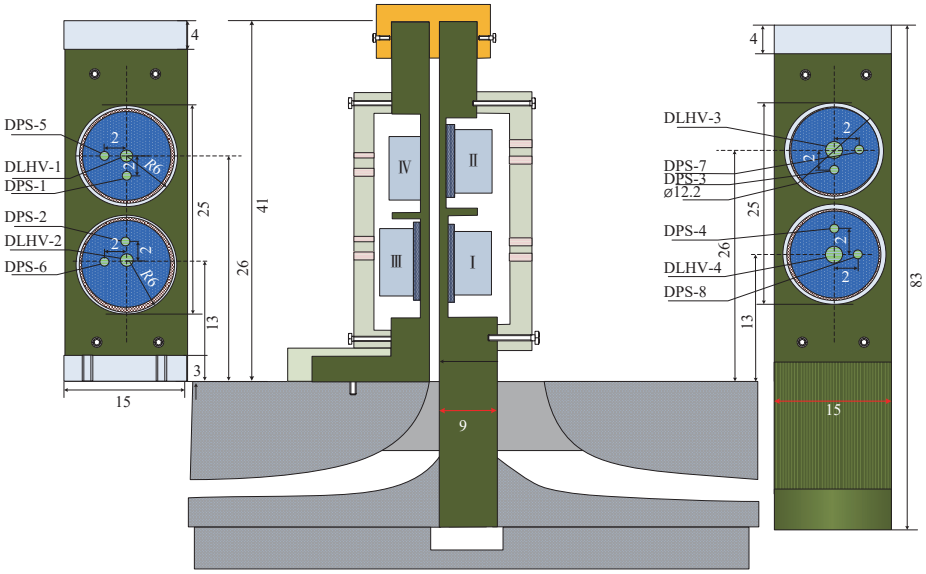

图 1　实验负载区布局(单位: mm)

Fig. 1　Layout of loading area (Unit: mm)

实验样品为 (100) 晶向 RDX 单晶薄片, 由中北大学研制。为了避免样品处于非冲击压缩状态, 并保证实验精度, RDX 单晶样品的厚度小于 0.8 mm, 平面度优于 10 μm。单发实验中, 有 4 个测速位置, 分别位于 3 个样品后表面和 1 个电极板后表面, 样品的具体尺寸见表 1。电极选择物性单一、声阻抗较低的铝材料, 载流面宽度 15 mm, 样品区为直径 12.2 mm 的沉孔, 电极厚度约 0.5 mm。窗口材料选择与铝声阻抗接近的 LiF 单晶。

表 1　实验条件

Table 1　Experimental condition

Component	Material	Thickness/mm	Component	Material	Thickness/mm
Plate Ⅰ	Al	0.535	Plate Ⅲ	Al	0.542
Sample Ⅰ	RDX (100)	0.560	Sample Ⅲ	RDX (100)	0.740
Window Ⅰ	LiF	8.000	Window Ⅲ	LiF	8.000
Plate Ⅱ	Al	0.533	Plate Ⅳ	Al	0.585
Sample Ⅱ	RDX (100)	0.660	Window Ⅳ	LiF	8.000
Window Ⅱ	LiF	8.000			

Note: The diameter of the four windows is 12.2 mm.

2　实验结果与分析

图 2 显示了由多普勒光纤探针测量系统(Doppler pins system, DPS)和多点双光源外差位移干涉测速仪(dual laser heterodyne velocimetry, DLHV)测得的不同厚度 RDX (100) 单晶炸药、铝电极/LiF 窗口界面速度。整体上看, 不同厚度样品的后界面速度波剖面的波形相似, 均表现出明显的三波结构, 2 个明显的速度拐点分别对应弹塑性转变和相变过程。RDX 在约 63 m/s 出现明显的弹塑性转变波形, 并且 3 个厚度样品的波形基本一致, 界面处与 RDX 样品和 LiF 窗口压力相等, 结合界面速度和 LiF 的动力学参数, 可计算出 63 m/s 对应的压力, 得到 RDX 的屈服强度约为 0.59 GPa。与较低峰值压力下的实验结果[19]不同, 本实验的速度波形在弹性前驱波之后未出现速度衰减, 这是由加载压力在前期上升较缓慢造成的。速度波形在约 290 m/s 出现相变对应的特征波形, 相变起始压力约为 3.1 GPa, 与静压[11−12]、冲击加载[13−15]

实验结果基本一致。相变开始后速度继续提升，并逐步完成相变进入 γ 相，说明此相变为非平衡过程，具有一定的相变演化时间。

需要指出的是，本实验中样品后界面速度波形与铝极板后表面速度波形相似，说明 RDX 单晶炸药未发生爆轰等剧烈化学反应。然而，只看样品后界面速度波形还不能判断 RDX 单晶在压缩过程中是否发生明显的反应，为此需开展数值模拟计算出未反应 RDX 样品后界面速度波形，并与实验结果比较，若实验速度峰值明显大于计算结果，说明样品中发生了明显的反应，否则未发生。

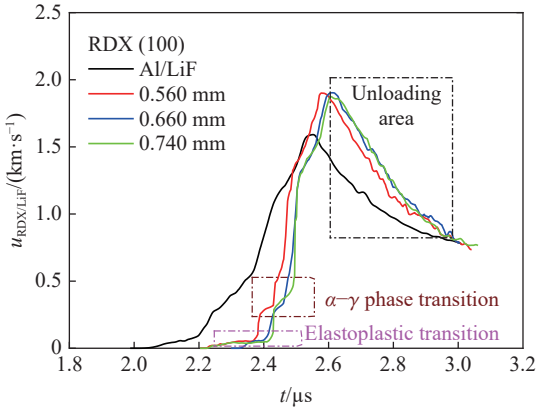

图 2　RDX 单晶的斜波加载实验得到的速度曲线

Fig. 2　Experimental velocity curves of RDX single crystals under ramp wave loading

3　数值模拟

本实验中 RDX (100) 单晶样品先后经历了弹塑性转变和相变过程，鉴于大分子材料的黏性效应，本数值模拟的本构关系选择 Hobenemser-Prager 弹-黏塑性模型。描述相变过程时，需结合多相状态方程和非平衡相变动力学方程。本研究中多相状态方程选择等熵状态方程修正的 Hayes 模型[23]，表达式为

$$\dot{p} = (K_{\xi 0} + K'_{\xi} \cdot p)(\dot{\varepsilon}_V - \Delta\varepsilon_V \cdot \dot{\xi} - \alpha_{\xi}\dot{T}) \tag{1}$$

式中：$K_{\xi 0}$和K'_{ξ}分别为体模量和体模量对压力 p 的一阶系数，$K_{\xi 0} + K'_{\xi} \cdot p$为压力修正后的体模量，$\Delta\varepsilon_V$和$\alpha_{\xi}$分别为相变引起的体应变间断和体积膨胀系数，$\dot{\varepsilon}_V$为体应变率，$\dot{\xi}$为新相质量分数变化率，$\dot{T}$为温度变化速率，$\dot{\varepsilon}_V - \Delta\varepsilon_V \cdot \dot{\xi} - \alpha_{\xi}\dot{T}$为考虑相变和温度效应的体应变率。

相变动力学方程采用基于成核、生长理论的 KJMA 模型。相变判据采用压力阈值法，根据实验结果，RDX (100) 单晶的相变阈值设为 3.1 GPa。数值模拟的边界条件为电极板内表面压力历史，由电极/LiF 窗口界面速度计算得到。模型参数见表 2，其中 τ 为相变弛豫时间，n 为相变速率参数。

表 2　数值模型参数

Table 2　Parameters for numerical simulation

Material	τ/ns	n	Yield strength/GPa	Phase	$K_{\xi 0}$/GPa	K'_{ξ}
RDX (100)	30	1.3	0.59	α	13.01	7.20
				β	10.56	6.03

结合弹-黏塑性模型、修正的 Hayes 多相模型和非平衡相变动力学方程，模拟计算得到的速度波剖面如图 3 所示。计算结果与实验结果在时序、整体波形、速度峰值、特征拐点等方面基本一致，验证了本实验方法、物理模型选择的正确性。由于本模拟计算未考虑炸药反应模型，因此本实验中 RDX 单晶炸药未发生明显反应。

结合实验结果和数值模拟结果，计算得到拉氏体波声速-粒子速度(c_L-u_p)关系和压力-相对比容(p-V/V_0)关系，如图 4 所示。由图 4(a) 可知：当粒子速度达到 0.5 km/s 左右时，材料出现由相变引起的体波声速间断，整体变化趋势与 Hooks 等[16] 和 Olinger 等[24] 的结果一致；相变后本研究结果与之前的等熵实验数据吻合，大于 DAC(diamond anvil

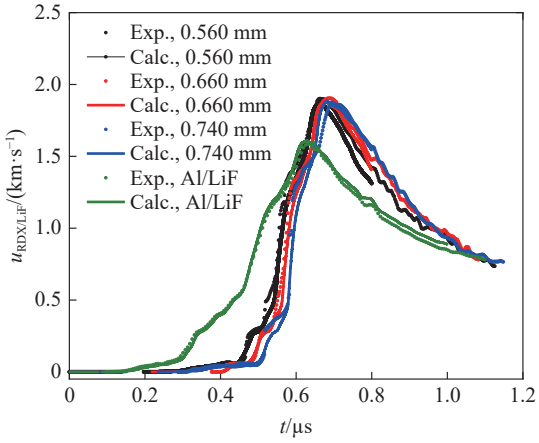

图 3　RDX 单晶斜波加载实验和数值模拟得到的速度曲线

Fig. 3　Experimental and simulated velocity curves of RDX single crystals under ramp wave loading

cell)准静态压缩实验结果。另外, 描述 RDX 单晶相变动力学的物理模型及其参数可能不够精确, 导致本研究计算的声速在相变点附近波动较大。从图 4(b) 可以看出, 在低于 10 GPa 的压力范围内, 本研究计算的 p-V/V_0 数据与准静态实验结果基本吻合。

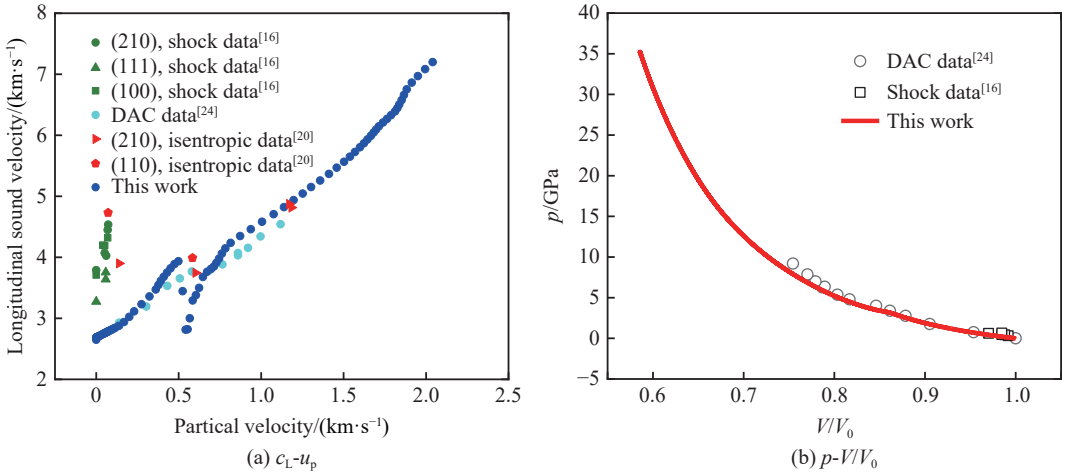

图 4　RDX 单晶的拉氏声速-粒子速度关系和压力-相对比容关系

Fig. 4　Longitudinal sound velocity-partical velocity and pressure-relative specific volume of RDX single crystals

4　总　结

利用磁驱动加载装置和激光干涉测速技术, 开展了 0～35 GPa 压力范围内 (100) 晶向 RDX 单晶的斜波压缩加载实验。实验结果显示, 速度波剖面表现为明显的三波结构, 由低往高依次对应弹性波、塑性波和相变波。数据分析得到 (100) 晶向 RDX 单晶的弹塑性转变压力约为 0.59 GPa, 相变起始压力约为 3.1 GPa。结合修正的 Hayes 多相状态方程和非平衡相变动力学模型, 对 RDX 单晶炸药的斜波压缩过程开展了一维流体动力学数值模拟, 计算结果与实验结果吻合良好。计算得到的 (100) 晶向 RDX 单晶在 0～35 GPa 压力区间的高压声速-粒子速度关系和压力-比容关系与前人实验结果在整体变化趋势上基本一致。

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所的计策、李勇、傅贞、任济、丁瑜等在实验运行和测试方面给予的帮助!

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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 wave effect [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(3): 5–8.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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: Lawrence Livermore National Laboratory, 2004.

[8] 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.

[9] BAER M R, HALL C A, GUSTAVSEN R L, et al. Isentropic loading experiments of a plastic bonded explosive and constituents [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(3): 034906.

[10] INFANTE-CASTILLO R, PACHECO-LONDO L C, HERNÁNDEZ-RIVERA S P, et al. Monitoring the $\alpha\rightarrow\beta$ solid-solid phase transition of RDX with Raman spectroscopy: a theoretical and experimental study [J]. Journal of Molecular Structure, 2010, 970(1): 51–58.

[11] 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 (γ-RDX) [J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2006, 110(47): 23655–23659.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] CAWKWELL M J, SEWELL T D, ZHENG L 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.

[16] 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.

[17] 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]//Proceedings of the 11th National Detonation Conference. Yuxi, 2016.

[18] CAI J T, ZHAO F, WANG G J, et al. Experimental research on elastic-plastic transition and α to γ phase transformation of RDX crystal under ramp loading [C]//Proceedings of the 2015 International Autumn seminar on Propellants. Qingdao, 2015.

[19] 种涛, 莫建军, 郑贤旭, 等. 斜波压缩下 RDX 单晶的动力学特性 [J]. 物理学报, 2020, 69(17): 176101.
CHONG T, MO J J, ZHENG X X, et al. Dynamic behaviors of RDX single crystal under ramp compression [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(17): 176101.

[20] 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.
CHONG T, MO J J, CAI J T, 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.

[21] 王贵林. 磁驱动平面加载实验技术及其在高压物态方程研究中的应用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
WANG G L. Magnetic loading techniques and its applications in high-pressure EOS [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.

[22] 种涛. 斜波加载下铋、锡等典型金属材料的相变动力学研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
CHONG T. Study on kinetics of phase transition of metals under ramp wave loading [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.

[23] CHONG T, TANG Z P, TAN F L, et al. Phase transition and dynamics of iron under ramp wave compression [J]. Acta Mechanica Sinica, 2018, 34(5): 902–909.

[24] OLINGER B, ROOF B, CADY H. The linear and volume compression of β-HMX and RDX [C]//Proceedings of the Symposium (International) on High Dynamic Pressures. Paris: CEA, 1978: 3–8.

Dynamic Behaviors of RDX Single Crystal under Ramp Wave Compression up to 35 GPa

CHONG Tao, ZHANG Zhaohui, WANG Guilin, FU Hua, LI Tao, SUI Zhilei, ZHENG Xianxu

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

Abstract: A ramp wave compression experiment of (100) RDX single crystal under 35 GPa was carried out with the magnetic driven 10 MA device and laser interferometry, and then the interface velocity data of RDX single crystal/LiF window were obtained. The experimental results show that the velocity wave profile shows a three wave structure, which corresponds to elastic wave, plastic wave and phase transition wave from low to high pressure. The onset pressure of α-γ phase transition is 3.1 GPa. One dimensional hydrodynamic simulation of ramp wave compression process of RDX single crystal was also carried out by combining the modified Hayes multi-phase equation of state and non-equilibrium phase transformation dynamic model. The calculated and experimental data are basically consistent.

Keywords: RDX single crystal; ramp wave loading; elastic-plastic transition; phase transition