DOI: 10.11883/1001-1455(2016)04-0568-05

CL-20 混合炸药的爆轰波结构*

刘丹阳,陈 朗,王 晨,张连生
(北京理工大学爆炸科学与技术重点实验室,北京 100081)

摘要: 基于爆轰数值模拟计算,分析了 CL-20 混合炸药爆轰反应的特征,设计了炸药与窗口的界面粒子速度测量实验装置;采用激光干涉法,测量了 C-1 炸药(CL-20/粘合剂/94/6)与窗口的界面粒子速度;运用先求导、再分段拟合的方法,对界面粒子速度随时间的变化曲线进行了数据处理,确定了炸药爆轰 CJ 点对应的时间位置;根据 CJ 点对应的粒子速度,计算获得了炸药的爆轰反应区宽度和 CJ 爆轰压力。结果显示:密度为 1.943 g/cm^3 的 C-1 炸药的爆轰反应时间为 38 ns,CJ 压力为 34.2 GPa。

关键词: 爆炸力学;爆轰反应区;激光干涉法;CL-20 混合炸药;
中图分类号: O382.1 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

CL-20 炸药爆速快,爆压高,但爆轰反应时间短,这给观测其爆轰波结构带来困难。采用激光干涉法观测炸药与窗口的界面粒子速度,是分析炸药爆轰波结构的主要方法之一。该方法把界面粒子速度随时间的变化与 ZND 爆轰模型中的压力分布假设相对应,将速度曲线中出现的速率变化折点看作爆轰波结构中的 CJ 点,从而得出爆轰反应结束时间,确定出爆轰反应区宽度。W. L. Seitz 等[1]采用 Fabry-perot 激光速度干涉仪,分别测量 TATB 炸药与氟化锂和有机玻璃界面的粒子速度,结合数值模拟分析 TATB 爆轰波结构。S. A. Sheffield 等[2]采用光学记录速度干涉仪获得了炸药与水界面粒子速度在 500 ns 之内的变化。韩勇等[3]采用激光位移干涉仪,测量了 PETN 和 TNT 炸药与有机玻璃界面粒子速度,通过计算爆轰产物等熵线与有机玻璃雨贡纽曲线交点的粒子速度,找到实验测量粒子速度曲线上的对应值,确定炸药到达 CJ 点的时间。

目前,在激光干涉测量中,数据点的采样时间间隔大多在 2 ns 到 10 ns 之间,可以满足绝大部分炸药的测量需求。如果依赖于直接观察法[4],即从曲线上直接读取速度变化拐点,并定义为 CJ 状态点,可分析炸药的爆轰波特性。然而,对于反应时间小于 100 ns 的高能炸药,如 CL-20、HMX 等,从上述采样频率下获得的粒子速度曲线上直接判断爆轰 CJ 点会有一定困难。B. G. Loboiko 等[5]提出了先对速度-时间曲线求导,再对获得的速度导数曲线进行分段线性拟合的方法,将粒子速度变化趋势通过 2 个不同的函数表示,认为 2 个函数的交点就是 CJ 点。

本文中,通过爆轰数值模拟,分析 CL-20 混合炸药的爆轰反应特征,设计炸药与窗口的界面粒子速度测量实验装置。采用激光位移干涉仪,测量 C-1 炸药(CL-20/粘合剂/94/6)与窗口的界面粒子速度随时间的变化。用先求导、再分段拟合的方法,确定界面粒子速度-时间曲线上 CJ 点对应的时间位置;基于 ZND 爆轰模型,分析 C-1 炸药的爆轰反应区宽度和爆轰压力。

1 实验装置设计

测量炸药与窗口界面粒子速度的实验装置如图 1 所示,由雷管、加载炸药、被测炸药和透明窗口等组成。透明窗口与炸药的接触面镀有一层金属薄膜,用于反射激光信号。实验中,首先由雷管起爆加载炸药,加载炸药爆炸引爆被测炸药。采用激光位移干涉仪,记录被测炸药与测试窗口的界面粒子速度。激光探头发出激光束,透过透明窗口照射于炸药与窗口界面的中心位置。通过接收金属薄膜反射的激

* **收稿日期**: 2015-01-06; **修回日期**: 2015-05-27
第一作者: 刘丹阳(1991—),女,博士研究生; **通信作者**: 陈 朗,chenlang@bit.edu.cn。

光，获得金属薄膜速度变化信息。由于金属薄膜很薄，可以认为金属薄膜速度与炸药粒子速度一致。实验时在加载炸药和被测炸药之间放置一个电离探针，用于给出激光位移干涉仪启动信号。

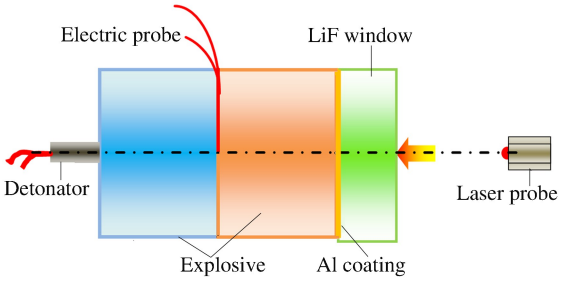

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

在实验中需要选择合适的炸药尺寸，确保爆轰波在到达测量点时已成长为稳定爆轰波，并且不受稀疏波影响。为此，采用 LS-DYNA 有限元分析软件对炸药爆轰进行数值模拟，对实验装置中的炸药尺寸进行设计。根据实验装置的结构特征，建立了二维轴对称计算模型。模型由加载炸药柱、被测炸药柱及透明窗口组成。把加载炸药上表面中心点设为起爆点，代替雷管。采用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程描述加载炸药，采用弹塑性流体力学材料模型和 Grüneisen 状态方程描述窗口材料[6]。采用点火增长反应速率方程和 JWL 状态方程描述 CL-20 混合炸药。点火增长反应速率方程为[7]：

$$\frac{\mathrm{d}\lambda}{\mathrm{d}t}=I(1-\lambda)^b\left(\frac{\rho}{\rho_0}-1-a\right)^x+G_1(1-\lambda)^c\lambda^d p^y+G_2(1-\lambda)^e\lambda^g p^z \tag{1}$$

式中：λ 为炸药反应度，t 为时间，ρ 为密度，ρ_0 为初始密度，p 为压力，I、G_1、G_2、a、b、x、c、d、y、e、g 和 z 为常数。CL-20 混合炸药的方程参数选用 LX-19 炸药(CL-20/Estane/95.8/4.2)的方程参数[8]。

当加载炸药为 JO-9159(HMX/粘合剂/95/5)，其药柱尺寸为∅20 mm×20 mm，被测炸药柱尺寸为∅20 mm×20 mm，窗口材料尺寸为∅20 mm×10 mm 时，图 2 为计算得到的距离起爆面不同距离下 LX-19 炸药内部的压力变化。从图 2 可看出，炸药内部在距离起爆面 3 mm 处已成长为稳定爆轰波。图 3 为计算得到的在爆轰波到达与窗口界面时炸药轴向剖面的压力分布。由图 3 可看出，爆轰波在以中心测量点为圆心、半径为 4 mm 的圆面范围内未受到稀疏波的影响，而照射到测量点的激光束直径小于 0.5 mm。因此，在上述炸药尺寸条件下，实验装置能够满足实验要求。

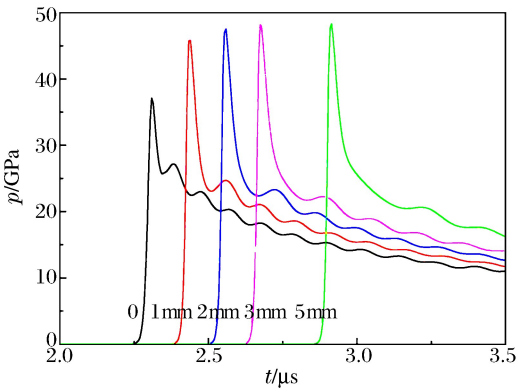

图 2 炸药内部压力历史随轴向距离的变化

Fig. 2 Internal pressure history of explosive varied with axial distances

根据计算结果开展实验，其中 1 发实验的照片如图 4 所示。实验中，加载炸药 JO-9159 的密度为 1.78 g/cm^3；被测炸药为 C-1 炸药(CL-20/粘合剂/94/6)，共进行了 2 发实验，第 1 发实验中被测炸药密度为 1.943 g/cm^3，第 2 发实验中被测炸药密度为 1.940 g/cm^3；测试窗口材料为 LiF(氟化锂)，密度为 2.63 g/cm^3；金属薄膜为铝膜，厚度为 0.6 μm。激光位移干涉仪的激光波长为 1 550 nm。实验结果经处理后，时间分辨率为 5 ns。

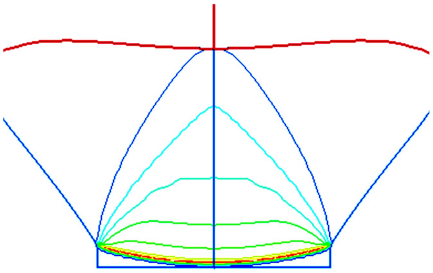

图 3 炸药轴向剖面的压力分布

Fig. 3 Pressure distribution of explosive on axial section

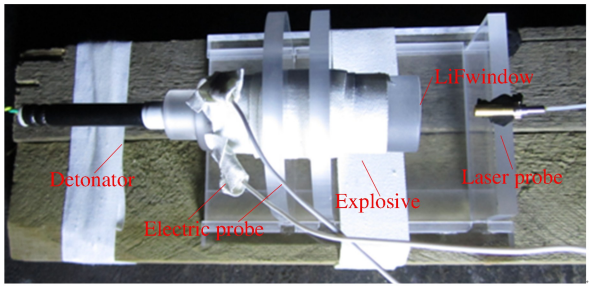

图 4 实验装置照片

Fig. 4 Photo of experimental setup

2 实验结果与分析

在爆炸冲击波作用下，LiF 窗口的折射率发生改变，使得激光速度干涉仪测得的界面粒子速度 u_a 与界面粒子速度的真实值 u_p 存在一定差异[9]，但在一定压力范围内，可认为两者是线性关系，在激光波长为 1 550 nm 时，该关系式为[10]：

$$u_p = u_a / 1.267\ 8 \tag{2}$$

图 5 为经过式(2)修正及数据平滑处理后的 C-1 炸药与 LiF 窗口的界面粒子速度曲线。从图 5 可以看出，第 2 发实验仅记录到 200 ns 的有效信号，但在记录的时间内，2 条曲线的数值和变化趋势几乎相同，说明实验有较好的重复性。本文中主要对第 1 发实验结果进行分析，从图中可以看出，炸药爆轰波到达 LiF 窗口界面时，粒子速度先是瞬间达到最大值，然后在很短时间内快速下降，最后在较长时间内以相对平缓的速度下降。在 ZND 模型中，爆轰波由前导冲击波和紧跟在后面的化学反应区构成：由于前导冲击波的作用，粒子速度会在瞬间达到最大值；之后，炸药发生化学反应，粒子速度快速下降；当炸药反应结束时，到达爆轰 CJ 点，进入爆轰产物等熵膨胀阶段，粒子速度相对缓慢下降。因此，在分析炸药与窗口界面粒子速度曲线时，确定 CJ 点位置是分析炸药爆轰波结构的关键。

从图 5 中的炸药粒子速度曲线，直接判断 CJ 点的位置有一定困难。因此，基于 ZND 爆轰模型假设，采用 G. B. Loboiko 等[5]提出的对曲线求导的计算方法，确定爆轰 CJ 点的位置。

在半对数坐标系下，对速度-时间曲线取导数，粒子速度曲线的变化规律就体现成了可以近似成 2 条相交的直线，并且对应爆轰产物等熵膨胀区的直线斜率几乎为零。2 条直线的交点即为 CJ 点，从而可以得出炸药的爆轰反应时间 t_{CJ}。按照上述方法，对第 1 发实验 C-1 炸药的粒子速度曲线进行处理，结果如图 6 所示。

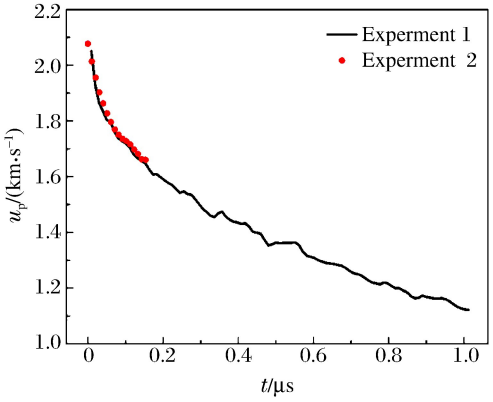

图 5 C-1 炸药与窗口的界面粒子速度

Fig. 5 Particle velocity at C-1-LiF interface varying with time

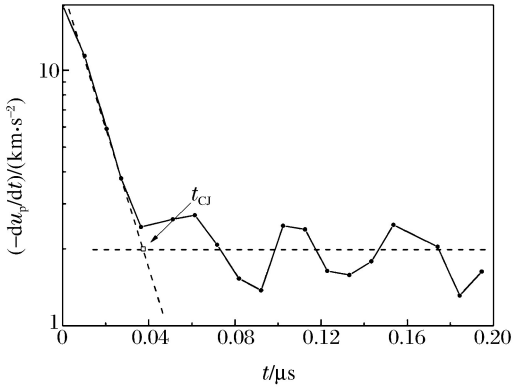

图 6 C-1 炸药粒子速度导数-时间曲线

Fig. 6 Derivative of particle velocity at C-1-LiF interface varying with time

对图 6 中拟合出的 2 条直线积分，可知在 CJ 点前后界面粒子速度 u_p 随时间的变化规律为：

$$u_p = \begin{cases} u_{11} + u_{12}\exp(-t/\tau) & t < t_{CJ} \\ u_{p0} + u't & t \geqslant t_{CJ} \end{cases} \tag{3}$$

式中：u_{11}、u_{12}、u_{p0}、u'、τ 为拟合过程中形成的系数。

已知在 ZND 爆轰模型中，前沿冲击波与爆轰反应区按爆速 D 沿炸药传播，则炸药的反应区宽度 x_0 可以近似为[11]：

$$x_0 = \int_0^{t_{CJ}} (D - u_p)\,\mathrm{d}t \tag{4}$$

根据 Goranson 公式和 LiF 晶体的 Hugoniot 关系可知压力 p 与界面粒子速度 u_p 的关系为[12]：

$$p = \frac{1}{2}u_p[\rho_{m0}(5.15 + 1.35u_p) + \rho_0 D] \tag{5}$$

式中：ρ_0 为被测炸药的初始密度，g/cm^3；ρ_{m0} 为窗口材料的初始密度，g/cm^3；界面粒子速度 u_p 和爆速 D 的单位均为 km/s，压力 p 的单位为 GPa。

通过电探针法测得密度为 1.943 g/cm^3 的 C-1 炸药的爆速为 9 100 m/s。由式(3)～(5)得到的 C-1 炸药的爆轰反应区参数如表 1 所示。考虑到实验数据的离散性，CJ 时刻的粒子速度 $u_{p,CJ}$ 取式(3)2 条拟合曲线的交点，为 1 817 m/s。将 C-1 的实验结果与 LX-19 的模拟计算结果相对比，结果如表 1 及图 7 所示。计算中，将炸药反应度 λ 从 0 到 1 的时间定义为反应时间，粒子速度从峰值经反应时间后达到的速度为 CJ 速度。

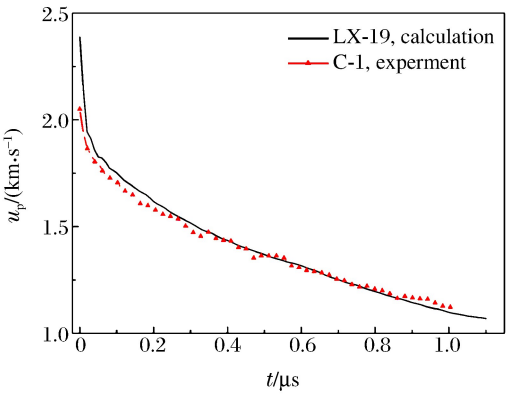

图 7　C-1 炸药与 LX-19 炸药窗口界面粒子速度曲线对比

Fig. 7　Comparison of particle velocity curves at explosive-LiF interfaces between C-1 and LX-19

从表 1 可以看出，C-1 炸药的爆轰反应时间很短，只有 38 ns，而实验中的时间分辨率为 5 ns，这使测量到的炸药反应区内的数据点很少，给判断 CJ 点的位置造成了困难，而由于反应区内粒子速度变化很快，实验中很可能没有测量到粒子速度的最大值，因此，还需要进一步提高测量系统的时间分辨率。从表 1 和图 7 可以看到：C-1 炸药的爆轰反应区参数与 LX－19 炸药的接近，2 种炸药粒子速度随时间的变化规律也基本一致；在炸药爆轰反应区，C-1 炸药的粒子速度略低于 LX－19 炸药的粒子速度，C-1 炸药的粒子速度峰值为 2 050 m/s，低于 LX-19 炸药的 2 388 m/s，在 CJ 点后 2 种炸药反应产物的粒子速度基本相同。

表 1　炸药爆轰反应区参数

Table 1　Parameters for reaction zones of explosives

炸药	ρ/(g·cm^{-3})	方法	t_{CJ}/ns	x_0/mm	p_{CJ}/GPa
C-1	1.943	实验	38	0.27	34.2
LX-19	1.942	计算	40	0.28	35.2

3　小　结

(1)采用点火增长模型对 CL-20 混合炸药爆轰过程进行数值模拟，设计了 CL-20 混合炸药与窗口的界面粒子速度测量实验。

(2)根据计算设计的实验装置，采用激光干涉法获得了 C-1 炸药与 LiF 窗口的界面粒子速度随时间的变化曲线。数据处理结果显示，密度为 1.943 g/cm^3 的 C-1 炸药的爆轰反应时间为 38 ns，反应区宽度为 0.27 mm，CJ 压力为 34.2 GPa。

(3)由于 CL-20 混合炸药爆轰反应时间很短，还需要进一步提高测量系统的时间分辨率，从而提高其测量精度。

参考文献：

[1]　Seitz W L, Stacy H L, Wackerle J. Detonation reaction zone studies on TATB explosives[C]// Proceedings of 8th Symposium (International) on Detonation. Albuquerque, NM, USA, 1985.

[2]　Sheffield S A, Bloomquist D D, Tarver C M. Subnanosecond measurements of detonation fronts in solid high explosives[J]. The Journal of Chemical Physics, 1984,80(8):3831-3844.

[3]　韩勇，龙新平，刘柳，等. 炸药化学反应区结构试验研究[C]// 全国危险物质与安全应急技术研讨会论文集：上. 2011:230-235.

[4]　彭其先，马如超. VISAR 测试技术研究炸药反应区厚度[J]. 流体力学实验与测量，2003,17(1):43-45.

Peng Qixian, Ma Ruchao. VISAR used in explosive reaction zone measurement[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003,17(1):43-45.

[5] Loboiko B G, Lubyatinsky S N. Reaction zones of detonating solid explosives[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2000,36(6):716-733.

[6] Livemore Software Technology Corporation. LS-DYNA users' manual[M]. Version 971. California: Lawerence Livermore National Laboratory, 2007:15.11-15.12.

[7] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives[J]. Physics of Fluids, 1980,23(12):2362-2372.

[8] Tarver C M, Simpson R L, Urtiew P A. Shock initiation of an ε-CL-20-estane formulation[J]. AIP Conference Proceedings, 1996,370(1):891-894.

[9] 李雪梅,俞宇颖,张林,等.<100>LiF 的低压冲击响应和 1 550 nm 波长下的窗口速度修正[J].物理学报,2012,61(15):414-419.
Li Xuemei, Yu Yuying, Zhang Lin, et al. Elasic-plastic response of shocked <100> LiF and its window correction under 1 550 nm wavelength[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(15):414-419.

[10] 赵万广,周显明,李加波,等.LiF 单晶的高压折射率及窗口速度的修正[J].高压物理学报,2014,28(5):571-576.
Zhao Wanguang, Zhou Xianming, Li Jiabo, et al. Refractive index of LiF single crystal at high pressure and its window correction[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2014,28(5):571-576.

[11] Lubyatinsky S N, Loboiko B G. Density effect on detonation reaction zone length in solid explosives[J]. AIP Conference Proceedings, 1998,429(1):743-746.

[12] 陈清畴,蒋小华,李敏,等.HNS-Ⅳ炸药的点火增长模型[J].爆炸与冲击,2012,32(3):328-332.
Chen Qingchou, Jiang Xiaohua, Li Min, et al. Ignition and growth reactive flow model for HNS-IV explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(3):328-332.

Detonation wave structure of CL-20 composite explosive

Liu Danyang, Chen Lang, Wang Chen, Zhang Liansheng

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The detonation reaction of CL-20 composite explosive was numerically simulated to analyze its detonation reaction characteristics, and then an experimental setup was designed for measuring the particle velocity at the explosive-window interface. The laser interference method was used to measure the particle velocity at the interface between the LiF window and the C-1 explosive, and ninety-four percent of the C-1 explosive is CL-20 and six percent is binder by weight. And the measured particle velocity-time curves were processed by the method of derivation and piecewise fitting to determine the corresponding CJ point. According to the corresponding CJ velocity, the reaction time and CJ pressure were determined. The detonation reaction time of the C-1 explosive with the density of 1.943 g/cm^3 is 38 ns and the CJ pressure is 34.2 GPa.

Key words: mechanics of explosion; detonation reaction zone; laser interference method; CL-20 composite explosive

(责任编辑 张凌云)