

文章编号:1006-9941(2009)04-0467-03

用连续爆速法测定工业炸药爆速

徐 森,唐双凌,刘大斌

(南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094)

摘要:采用电测法和连续速度探针法分别测量了粉状乳化炸药和乳化炸药的**平均爆速**和**连续爆速**。结果表明,粉状乳化炸药在装药密度为 $850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $820 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,平均爆速分别为 $4526 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 稳定爆轰时连续爆速范围分别为 $4300 \sim 4600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4000 \sim 4300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。乳化炸药在装药密度为 $900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,平均爆速分别为 $4384 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 连续爆速范围分别为 $3370 \sim 4592 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2871 \sim 3420 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。显然,平均爆速测试结果与连续爆速的测试结果吻合很好,且连续速度探针法能满足准确测量工业炸药在装药结构中爆速连续变化的要求。

关键词:爆炸力学; 连续爆速; 平均爆速; 工业炸药; 爆轰成长

中图分类号: TJ55

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.022

1 引 言

爆速是炸药最重要的爆轰参数之一。目前,测定炸药爆速的方法主要有电测法、道特里士法、高速摄影法等^[1-2]。现在最常用的爆速测试方法是电测法,但它仅能测得两点之间的平均爆速,并不能反映炸药的爆轰成长过程,该方法适用于炸药的爆速检测,但对研究炸药的爆轰状态变化情况就难以满足要求了。工业炸药与单质炸药相比,其爆轰成长时间和爆轰成长距离较长,大部分工业炸药的爆轰都属于非理想爆轰,即炸药颗粒度、外壳强度以及装药密度等因素对爆轰速度有极其重要的影响^[3-5]。因此,研究工业炸药的爆速连续变化对其在工程爆破中的应用具有重要意义。国内于 20 世纪 90 年代开始对炸药的连续爆速进行了相关研究,如章国升^[6]研究了炸药爆速连续测定技术; 谢兴华^[7]等研究了工业雷管爆速的动态测量; 赵根^[8]等研究了孔内炸药连续爆速测试新技术。本实验则同时采用电测法和连续速度探针法测定粉状乳化炸药和乳化炸药在钢管约束下的平均爆速和爆速连续变化,根据试验结果分析两种工业炸药的爆轰成长特性。

2 爆速测试原理

2.1 电测法测试系统及原理

电测法测定工业炸药平均爆速的示意图如图 1 所

示。炸药被雷管引爆后,爆轰波传播至 A 点时,爆轰波阵面中高度电离产物会导通离子探针,离子探针产生触发信号,测时器开始计时; 当爆轰波传播至 B 点时,离子探针产生信号,测时器停止计时,根据测得的爆轰波在 A、B 测点间的传播时间和测点之间的距离经计算可得到炸药的**平均爆速**。

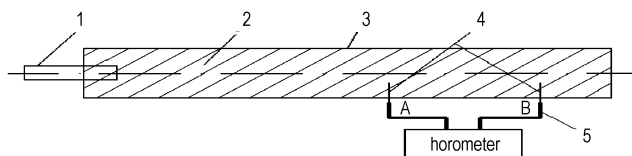


图 1 平均爆速的测试系统示意图

1—雷管, 2—炸药, 3—无缝钢管, 4—离子探针, 5—信号线

Fig. 1 Sketch map of measurement system for average detonation velocity

1—detonator, 2—explosive, 3—steel tube, 4—ion probe, 5—signal wire

2.2 连续速度探针法测试系统及原理

连续速度探针法测试系统示意图如图 2 所示。连续爆速数据采集设备为 HANDITRAP II 型,由加拿大 MREL 公司提供。连续速度探针由镀绝缘层的电阻丝和细铜管组成,速度探针的电阻丝长度为 0.9 m 、电阻为 $360.9 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$,细铜管直径为 1.5 mm 。

连续爆速测试装置的测试原理如下: 连续速度探针的长度为 L 、探针的单位长度电阻值为 R_0 , 则: 速度探针的电阻值为 $R_1 = R_0 \cdot L$, 直流恒流源供给测试线路的电流为 I , 测试线路(包括测试采集装置)的电阻为 R_2 , 接头电阻为 R_3 , 其中 R_0 、 I 、 R_2 、 R_3 均为常量, 则

收稿日期:2009-01-19; 修回日期:2009-03-13

作者简介:徐森(1981-),男,在读博士研究生,主要从事爆炸品危险性分级研究。e-mail: xusen_345@sohu.com

通讯联系人:刘大斌(1963-),男,博士,教授,主要从事含能材料研究。e-mail: dabin63@vip.sina.com

测试线路的总电阻为 $R_{\text{总}} = R_1 + R_2 + R_3$ 。

测试回路中的电压值 $V_1 = IR_{\text{总}} = I(R_0L + R_2 + R_3)$, 式中 $I(R_2 + R_3)$ 在测试过程中为常量, 则: $V_1 = IR_0 \cdot L + C$ (C 为常量)。

随着爆轰波阵面的推进, 速度探针逐渐缩短, 当长度缩短 ΔL 时, 单位时间内的电压降为 $\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{IR_0(\Delta L)}{\Delta t}$,

可得: $\frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{1}{IR_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$, 单位时间内电阻探针减少的长度 ($\Delta L/\Delta t$), 就是炸药爆轰波传播的速度, 即爆速, $D = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{1}{IR_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} = k \cdot \frac{dV}{dt}$ (k 为常数)。

利用瞬态数据记录仪可以采集到探针的电压随时间变化曲线 (dV/dt), 经过数据处理系统的处理, 将电压-时间曲线转化为探针长度随时间变化曲线 (dL/dt), 从 $L-t$ 曲线的斜率变化可以直观地知道炸药爆速连续变化 (以下简称连续爆速)。

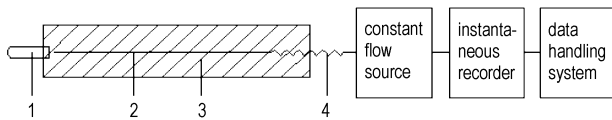


图2 连续爆速的测试系统示意图

1—雷管, 2—连续速度探针, 3—炸药, 4—信号线

Fig. 2 Sketch map of measurement system for continuous detonation velocity

1—detonator, 2—continuous velocity probe, 3—explosive, 4—signal wire

3 实验部分

3.1 试验条件

用电测法测量粉状乳化炸药和乳化炸药的爆速时, A 点的离子探针距钢管顶端 650 mm, A 、 B 两个测点的间距为 200 mm。用连续速度探针测量连续爆速时, 将速度探针水平插入装药中, 前端距起爆端 40 mm。用于装药的无缝钢管长度为 (1000 ± 5) mm, 外直径为 (48 ± 2) mm, 壁厚为 (4.0 ± 0.1) mm。

3.2 试验样品

试验所用的两种样品分别是粉状乳化炸药和乳化炸药, 样品由南京长山化工有限责任公司提供, 制式药卷的直径均为 $\Phi 32$ mm, 质量为 150 g。

3.3 试验结果与讨论

用电测法测得的粉状乳化炸药和乳化炸药的爆速结果见表 1。

表 1 样品的平均爆速

Table 1 Average detonation velocity of the samples

sample	constraint condition	charge density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	average detonation velocity/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
powdery emulsion explosive	steel tube	850	4526
		820	4020
emulsion explosive	steel tube	900	4384
		840	2345

从表 1 可知, 粉状乳化炸药在装药密度为 850, 820 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 用电测法测得的平均爆速分别为 4526, 4020 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。乳化炸药在装药密度为 900, 840 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 用电测法测得的平均爆速分别为 4384, 2345 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

用连续速度探针法测得的粉状乳化炸药和乳化炸药的连续爆速曲线分别见图 3 ~ 图 6。

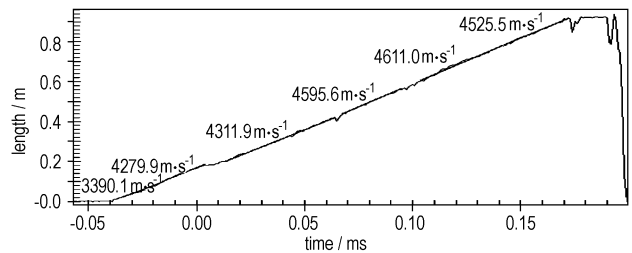


图3 粉状乳化炸药连续爆速曲线 ($850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 3 Curve of continuous detonation velocity for powdery emulsion explosive ($\rho = 850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

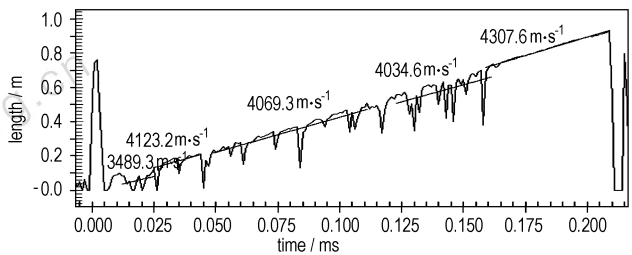


图4 粉状乳化炸药连续爆速曲线 ($820 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 4 Curve of continuous detonation velocity for powdery emulsion explosive ($\rho = 820 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

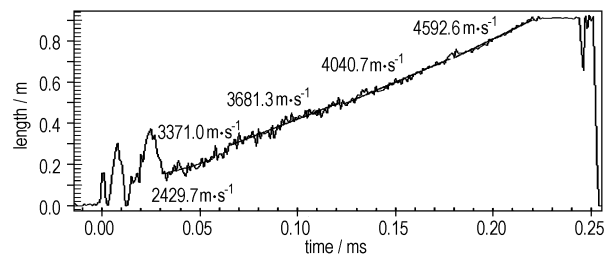


图5 乳化炸药连续爆速曲线 ($900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 5 Curve of continuous detonation velocity for emulsion explosive ($\rho = 900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

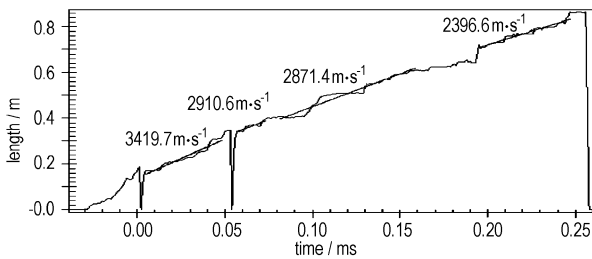


图6 乳化炸药连续爆速曲线 ($840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 6 Curve of continuous detonation velocity for emulsion explosive ($\rho = 840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

图3的连续爆速曲线比较平滑,炸药爆速稳定在 $4300 \sim 4600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,爆速比较稳定;从图4可知,炸药爆速稳定在 $4000 \sim 4300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,而图4的连续爆速曲线开始阶段出现一个较大的波峰,这主要是因为探针前端与起爆位置太接近,起爆时对探针造成明显的干扰信号,这在连续爆速的测量中比较常见,还没有很好的方法来消除这种影响;曲线中出现大量的干扰波形(波谷),这在非理想炸药(特别是工业炸药)的连续爆速测定中比较常见。主要是因为采用手工装药时,对装药密度为 $820 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的粉状乳化装药而言,容易出现钢管底部装药密度较大,而前半部的装药密度较小、空隙率较大,起爆后,前端前部分装药爆轰不完全,爆轰波阵面上的等离子体浓度较低,使电阻丝与细铜管发生接触不良,导致探针上的电压降突然增大所致。因此需要对图4的曲线进行滤波处理,国外MREL公司建议的处理方法是忽略干扰波上的点,利用曲线上正常的点来进行计算炸药的实时爆速,从图4的处理结果可以看出,虽然曲线的干扰波形较多,但从处理后的炸药连续爆速数据发现:粉状乳化炸药的爆速在 $4000 \sim 4300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,与电测法测得的平均爆速基本吻合。

图5和图6是乳化炸药在钢管约束条件下的连续爆速试验曲线,从图5曲线可知,乳化炸药的连续爆速范围为 $3370 \sim 4592 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这与电测法测得的平均爆速为 $4384 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 完全吻合。当炸药爆速在 $4000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时,连续爆速曲线上的干扰较小,这主要是因为炸药爆轰越完全,爆轰波阵面上的等离子体的浓度越大,电阻丝与细铜管的导通性越好,数据采集受到的干扰越小。从图6的连续爆速数据可知,乳化炸药的连续爆速范围为 $2871 \sim 3420 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而电测法测得的平均爆速为 $2345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,由于平均爆速测的是钢管后半部的爆速,从图6的爆速曲线可知,连续爆速数据与平均爆速的数据一致。样品初始阶段的连续爆速约 $3420 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此后爆速逐渐下降直到

$2396 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明样品的爆轰波没能得到稳定传播。而且连续爆速曲线中还有较多的平台,这是因为乳化炸药是黏度很大的胶状物,而采用手工装药不能将装药中的空气完全排空,容易发生装药不连续,导致爆轰波不能稳定地传播。

比较表1和图3~图6的爆速数据可见,连续速度探针法和电测法测得的爆速数据重现性很好,即两种方法都能准确测得炸药的爆速。从连续爆速曲线的线斜率变化,可以得到炸药从低爆速发展成稳定爆速的过程,即炸药从不稳定爆轰逐渐发展成稳定爆轰的过程,从图3~图6可知,装药密度越大,粉状乳化炸药和乳化炸药从低爆速发展成稳定爆速时间越短,越容易达到稳定爆轰,其平均爆速也越大。

4 结论

(1) 在相同起爆条件下,装药密度越大,粉状乳化炸药和乳化炸药的爆速越大。

(2) 电测法和连续爆速探针法两种测试方法所得结果一致,且后者更能体现工业炸药在不同装药位置的爆速以及爆轰成长过程等方面的信息,因而对研究工业炸药爆轰成长特性具有更大的优势。

参考文献:

- [1] 刘桂涛,吕春绪,曲虹霞. 超细RDX爆速和作功能力的研究与测试[J]. 爆破器材,2003,32(3): 1-3.
LIU Gui-tao, Lü Chun-xu, QU Hong-xia. Study and test on detonation velocity and power of superfine RDX[J]. *Explosive Materials*, 2003, 32(3): 1-3.
- [2] 蔡昇,魏晓安,王泽山. 含发射药的粉状低爆速炸药研制[J]. 含能材料,2004,12(4): 231-234.
CAI Sheng, WEI Xiao-an, WANG Ze-shan. Development of powdery low detonation velocity explosives from propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(4): 231-234.
- [3] 颜事龙,刘辉,王海华,等. 水胶炸药与乳化炸药低温下爆速的测试[J]. 爆破器材,1999,28(3): 1-4.
YAN Shi-long, LIU Hui, WANG Hai-hua, et al. Detonation speed measurement under low temperature of water gel and emulsion explosives[J]. *Explosive Materials*, 1999, 28(3): 1-4.
- [4] 吕春绪. 工业炸药理论[M]. 北京:兵器工业出版社,2003.
- [5] 松全才,杨崇惠,金韶华. 炸药理论[M]. 北京:兵器工业出版社,1997.
- [6] 章国升. 炸药爆速的连续测定技术[J]. 爆破器材,1994,23(5): 32-34.
ZHANG Guo-sheng. Measurement technology of continuous detonation velocity of explosive[J]. *Explosive Materials*, 1994, 23(5): 32-34.

(下转 485 页)

8-14 μm 波段红外烟幕透过率的测试与修正

朱晨光, 吕春绪, 王 俊, 魏 峰

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了减少烟幕温度对 8-14 μm 波段烟幕透过率的影响, 分析了有红外辐射源和没有红外辐射源的燃烧型红外烟幕的透过率。结果发现两种情况下 5 g 发烟剂被点燃后的透过率分别是 40% - 50% 和 15% - 20%, 燃烧形成的红外烟幕导致烟幕云团具有很强的红外辐射。为此提出了减差修正法, 烟幕的透过率通过减去没有红外辐射源时的透过率得到修正, 5 g 发烟剂的透过率减小为 25% - 35%。

关键词: 红外物理; 烟幕; 辐射; 透过率

中图分类号: TJ55; TQ567

文献标识码: A

(上接 469 页)

[7] 谢兴华, 张涛. 工业雷管连续爆速动态测量[J]. 淮南矿业学院学报, 1995, 15(2): 47-53.

XIE Xing-hua, ZHANG Tao. Dynamic measurement of continuous detonation velocity of industrial detonators[J]. *Journal of Huainan Mining Institute*, 1995, 15(2): 47-53.

[8] 赵根, 王文辉. 孔内炸药连续爆速测试新技术[J]. 工程爆破, 2008, 14(3): 63-66.

ZHAO Gen, WANG Wen-hui. New measurement technology of continuous detonation velocity of explosive in blast hole[J]. *Engineering Blasting*, 2008, 14(3): 63-66.

Measurement of Detonation Velocity of Industrial Explosive Using Continuous Detonation Velocity Method

XU Sen, TANG Shuang-ling, LIU Da-bin

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The average detonation velocity and continuous detonation velocity of powdery emulsion explosive and emulsion explosive were measured respectively by electrometric method and continuous velocity probe. Results show that, for powdery emulsion explosive with the charge density of $850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $820 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, the average detonation velocities are $4526 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $4020 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; the corresponding continuous detonation velocity ranges are $4300 - 4600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $4000 - 4300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ during the stable detonation phase. For emulsion explosive with the charge density of $900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, the average detonation velocities are $4384 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $2345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; the corresponding continuous velocity ranges are $3370 - 4592 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and $2871 - 3420 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The detonation velocity measured by the continuous velocity probe method is in accord with the detonation velocity measured by the traditional electrometric method, and the continuous velocity probe method can even give the true course of detonation development for industrial explosive.

Key words: explosion mechanics; continuous detonation velocity; average detonation velocity; industrial explosive; detonation development