

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.06.012

基于连续压导探针的炸药爆速和临界直径测试方法^{*}

缪玉松 李晓杰 闫鸿浩 王小红 李科斌
大连理工大学工程力学系(大连辽宁,116024)

[摘 要] 临界直径是确定炸药合理装药直径、预防炸药拒爆和不完全爆轰的重要指标,对炸药性能提高和高效利用有着十分重要的意义。设计了一种连续压导探针和楔形装药装置,在对炸药爆速进行测试的同时,利用炸药在临界直径不完全爆轰的特征,通过寻找爆轰波传播的拐点确定炸药临界直径。试验结果表明:装药密度为 0.9 g/cm³ 的铵油炸药爆速为 3 261 m/s,临界直径为 12.5 mm。提供了一种可同时测得炸药爆速和临界直径的方法,该方法简单,试验费用低,对炸药参数测试具有一定的指导意义。

[关键词] 爆炸力学; 临界直径; 压导探针; 爆速; 炸药参数

[分类号] TD235.1

引言

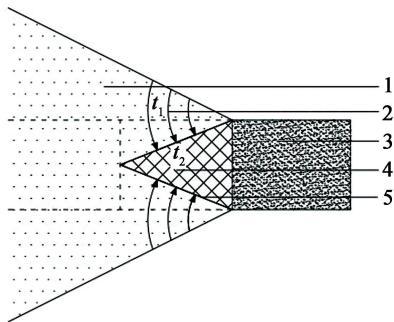
炸药的临界直径是描述炸药能否完全爆轰的重要参数。传统的炸药临界直径测试方法是通过对不同装药直径的药卷进行传爆能力试验,通过观察药卷的传爆情况来确定炸药的临界直径,由于该方法分组多,难以保证每组试验参数的一致性^[1]。因此,新型的试验测试和模型计算方法被研制出来。何远航等^[2]基于二维定常爆轰理论和阵面形状控制方程,给出了获取炸药临界直径的理论方法;于国强等^[3]通过建立炸药临界直径的 Elman 神经网络预测模型,较准确地预测了 RDX、PA 和 TNT 3 种炸药的临界直径;张建雄等^[4]利用末端带有聚能罩的药柱形成聚能流的特性,通过见证板得到 PBX 炸药的临界直径;梅震华等^[5]通过板痕试验,得出膨化铵油炸药的临界直径介于 12 ~ 15 mm 之间;冯志红^[6]应用有限元软件 LS-DYNA3D 对楔形和圆柱形装药结构进行模拟,得出不同装药结构下的爆轰波传播过程及楔形药柱下的炸药拒爆特性;李吉光^[7]通过自制的压药装置测定了不同乳化基质和乳化炸药的临界药层厚度;腾威等^[8]在分析同药卷直径炸药性能的基础上,通过楔形装药测定了炸药的临界直径。本文中,在炸药爆轰波传播特性的基础上,采用连续压导探针和楔形装药的测试方法,得出炸药爆速,进而推导出炸药的临界直径。

1 临界直径

由于炸药爆轰时存在有侧向膨胀现象,致使反

应区的能量密度降低,爆轰波阵面强度降低,炸药反应剧烈程度下降,进而使得爆轰波的传播速度降低。当药柱直径减少到某一值时,爆轰反应区内的能量已不足以补偿侧面能量损失,炸药则不能够达到稳定爆轰的条件,称此时的装药直径为炸药的临界直径 d_c 。如图 1 所示,假设稀疏波到达炸药中心轴线的时间为 t_1 ,爆轰波阵面内的化学反应时间为 t_2 ,当 $t_1 > t_2$ 时,说明在稀疏波到达炸药轴线之前炸药已经反应完全,反应区内的炸药能够达到完全爆轰;反之,稀疏波到达炸药轴线增加爆轰波能量的损耗,致使支撑爆轰波的能量不足,形成未完全爆轰区,最终导致炸药的熄爆。

哈里顿在考虑爆轰能量侧向损失问题的基础



1 - 爆轰产物;2 - 稀疏波;3 - 炸药;
4 - 未完全爆轰区;5 - 稀疏波阵面。

图 1 稀疏波对炸药爆轰的影响示意图
Fig.1 Schematic diagram of detonation influenced by rarefaction wave

^{*} 收稿日期:2016-07-10
作者简介:缪玉松(1986 -),博士研究生,主要从事工程爆破和岩土工程研究。E-mail:393291800@qq.com
通信作者:李晓杰(1963 -),博士,教授,博士生导师,主要从事爆炸力学、爆炸加工和特种爆破方面的研究。E-mail:dalian03@qq.com

上,给出临界直径的估算公式^[9]:

$$d_c = 2ct_2. \quad (1)$$

式中: c 为爆轰产物的平均声速。

炸药临界直径受自身和外界多因素的影响。

1) 炸药自身物理状态。同种炸药液态比固态的结构均匀性要好很多,在爆轰过程中能量更为分散,难以形成热点,在爆轰过程中需要更高的压力,因此,一般液态要比固态炸药的临界直径要大。

2) 炸药化学反应速率。一般来讲,反应速率越快的炸药其反应宽度越窄,稀疏波越难以到达炸药中心轴线,临界直径也就越小。

3) 炸药颗粒度的影响。颗粒度越小,爆轰反应速率越高,炸药爆轰阵面内的化学反应时间 t_2 也就越小,炸药临界直径也相对越低。

4) 炸药密度的影响。在压实密度范围内,临界直径一般随装药密度的增大而减小。

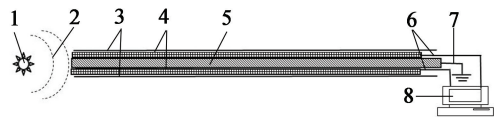
5) 炸药所处空间的影响。由于药柱所处介质引起的侧向膨胀能量损失不同,因此,炸药的临界直径也不同。

2 连续压导探针测试方法

2.1 压导探针测试原理

爆速是衡量炸药及爆轰波传播性能的一个重要参数。目前,常用的爆速测量方法可分为 3 大类,即:类比法^[10-11](导爆索法和导爆管法)、电测法^[12](电阻丝法和箔式探极法等)、光测法^[13](光导索法和扫描转镜法等)。压导探针测量技术隶属于电阻丝法,其基本原理是利用爆轰产物的高压作用,将探针导通,使测试回路形成连续变化的电信号,通过对信号的采集、传输、放大和分析,实现对爆轰波速度的连续测量。

在探针制作过程中,首先使用螺纹钢钢丝绳作为骨架;然后将双股不间断电阻丝沿骨架布置(亦可环绕);为了避免电阻丝受外界电磁波、金属射流和“管道效应”的影响^[14],在电阻丝布置完毕后沿骨架缠绕铜箔;为防止探针在运送和安装过程中被破坏,用热塑套管将上述元件包络在一起,最终得到外径为 2.3 mm 的压导探针,结构如图 2 所示。



1 - 起爆点;2 - 爆轰波;3 - 热塑套管;4 - 铜箔;5 - 螺纹钢钢丝绳;6 - 电阻丝;7 - 地线;8 - HandiTrap[®] 接收器。

图 2 连续压导探针剖面及作业示意图

Fig. 2 Profile and operation schematic diagram of pressure-conduction probe

楔形装药时,炸药在大于临界直径的情况下能够正常爆轰,在高温高压的爆轰产物作用下,原处于短路状态的电阻探针被压制导通,随着爆轰波的不断推进,探针长度和电阻值均连续减小。探针随爆轰传播电阻值逐渐减小的过程,实际上就是炸药爆轰的传播过程。当炸药达到临界直径位置时,炸药因拒爆而不能产生致使探针导通的压力。因此,在知道楔形装药结构参数的基础上,通过导通段探针的电阻随时间的变化,得出爆轰波的推进距离,就可推出炸药的临界直径。

2.2 数据处理方法

为保证探针导通数据的准确性和完整性,采用加拿大 MERL 公司生产的 Handitrap[®] 连续爆速记录仪进行数据的记录和储存。由于压导探针在爆轰波压缩的过程中长度不断减小,其电阻值也不断减小,设电阻丝电阻率为 R_0 ,探针长度为 L_0 ,则探针原有电阻 R_l 可表示为:

$$R_l = R_0 \cdot L_0. \quad (2)$$

回路总电阻为:

$$R_{\text{总}} = R_l + C. \quad (3)$$

式中: C 为常量,其值为测试回路中导线和仪器自身的电阻。

假定测试过程中仪器提供的恒定电流值为 I ,则测试回路中的初始电压 V_0 为:

$$V_0 = I(R_l + C) = I \cdot R_0 \cdot L_0 + IC. \quad (4)$$

随着爆轰波阵面往前推进,探针长度逐渐缩短,当其长度缩减为 ΔL 时,则单位时间 Δt 的电压下降值 ΔV 为:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{IR_0 \Delta L}{\Delta t}. \quad (5)$$

式中: $\Delta L/\Delta t$ 为单位时间内探针的缩短速率,实际上为炸药爆轰传播的速度 D ,则

$$D = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{1}{IR_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}. \quad (6)$$

3 临界直径测试

3.1 测试方法

制作楔形装药筒,装药筒中心布置有压导探针。为保证探针与装药筒中心轴线的平行度,在装药筒制作时,通过两端固定装置,提前在实验室内将探针安插在装药筒内;同时,为避免雷管和炸药未达到稳定爆轰而对测试结果有影响,探针头部预留炸药起爆端距离为 15 cm,现场试验装置如图 3 所示。

炸药的临界直径 d_c 可由下式计算得到:

$$d_c = d_1 - \frac{Dt}{H}(d_1 - d_2). \quad (7)$$



图3 现场试验装置图

Fig.3 Installation diagram of onsite test

式中: d_1 为探针初始压导处的装药直径(由于炸药从引爆到达稳定爆轰需要一段距离,因此,探针头部要留出一定的安全距离),cm; D 为拟合得到的爆轰波速度,m/s; t 为爆轰波出现拐点的时间,ms; H 为楔形装药长度,m; d_2 为楔形装药小头直径,cm。

3.2 结论与分析

图4给出了一次试验得到的炸药爆轰波传播距离的时程曲线图,由于在测试时预留了炸药达到稳定爆轰段的距离,因此,数据可从探针被导通的最初端开始,对数据进行一次曲线拟合,该曲线的斜率即为爆轰波的传播速度。通过拟合曲线,可直接得出密度为0.9 g/cm³的铵油炸药爆速为3 299 m/s,且拟合相关度系数达到0.997 6,说明该拟合值精度较高。从图4中可以直接看出,拟合曲线和实际测量在0.202 ms时出现了拐点(如图中圆圈所示,拐点前表示炸药正常爆轰段,拐点后表示冲击波作用段),这样,通过式(7)和楔形装药参数就能够计算出炸药的临界直径。

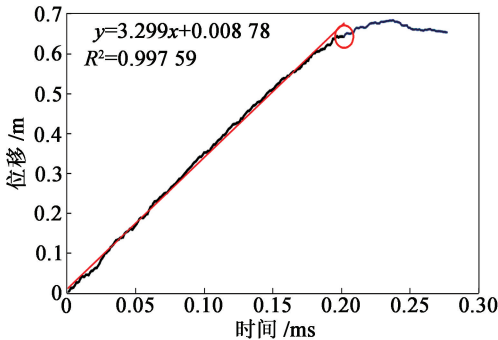


图4 爆速测试结果

Fig.4 Test results of detonation velocity

表1列出了密度为0.9 g/cm³的铵油炸药的试验结果,其中,该铵油炸药的平均爆速为3 261 m/s,临界直径均值为12.5 mm。

4 结论

1)通过楔形装药对炸药爆速和临界直径测试试验得知,炸药的装药直径小于某一临界直径时,炸药不能完全爆轰或产生拒爆的现象。

2)连续压导探针得到的爆速测试结果与厂商提供的参数(>2 800 m/s)基本一致,且拟合相关度系数达到0.997 6,说明连续压导探针在爆速测量方面有着较高的可信度。

表1 爆速和临界直径试验结果

Tab.1 Test results of detonation velocity and critical diameter

编 号	1 [#]	2 [#]	3 [#]
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	0.9	0.9	0.9
爆速 $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3 209	3 299	3 275
时间 t/ms	0.211	0.202	0.203
d_1/cm		7.5	
d_2/cm		0.5	
测试电阻/ Ω	310	317	321
测试临界直径 d_c/mm	11.8	12.8	12.9

3)利用炸药在临界直径不完全爆轰的特征,通过楔形装药和压导探针连续测量技术寻找炸药爆轰拐点,可方便地获得炸药的临界直径。

参 考 文 献

[1] 胡建华,高宏伟,张立. 乳化炸药的临界爆轰直径的实验研究[J]. 爆破, 2015, 32(3): 156-161.
HU J H, GAO H W, ZHANG L. Experimental of critical detonation diameter of emulsion explosive [J]. Blasting, 2015,32(3): 156-161.

[2] 何远航,黄风雷,浣石. 凝聚炸药直径效应和熄爆直径的理论研究[J]. 兵工学报,1997, 18(1): 38-41.
HE Y H, HUANG F L, HUAN S. Theoretical studies on the diameter effect and the failure diameter of condensed explosives [J]. Acta Armamentarii, 1997, 18(1): 38-41.

[3] 于国强,刘玉存. 基于 Elman 网络的炸药临界直径预测模型[J]. 火炸药学报,2009, 32(1): 62-65.
YU G Q, LIU Y C. The evaluating model of critical diameter of explosive based on Elman neural network [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(1): 62-65.

[4] 张建雄,席鹏,王永顺,等. 炸药临界爆轰直径测试新方法[J]. 科学技术与工程,2015,15(28): 156-159.
ZHANG J X, XI P, WANG Y S, et al. Estimating the critical diameter of explosive by shaped charge method [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(28): 156-159.

[5] 梅震华,曾贵玉,钱华,等. 影响膨化铵油炸药爆轰能力的因素探讨[J]. 爆破器材,2010, 39(4): 13-14, 17.
MEI Z H, ZENG G Y, QIAN H, et al. Discussion on factors affecting detonation performance expanded ANFO [J]. Explosive Materials,2010, 39(4): 13-14,17.

[6] 冯志红. RDX 混合炸药临界直径的实验与数值模拟研究[D]. 太原:中北大学, 2007.
FENG Z H. Experiment and numerical simulation of criti-

- cal diameter of RDX compound explosive [D]. Taiyuan: North University of China, 2007.
- [7] 李吉光. 乳化基质和乳化炸药熄爆研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- LI J G. Investigation on detonation failure of emulsion matrix and emulsion explosive [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [8] 滕威, 征本鉴, 刘明喜, 等. 炸药小药卷性能的初步研究[J]. 爆破器材, 1997, 26(4): 5-7.
- TENG W, ZHENG B J, LIU M X, et al. A preliminary study on the performance of small explosive cartridges [J]. Explosive Materials, 1997, 26(4): 5-7.
- [9] 张宝铨, 张庆明, 黄风雷, 等. 爆轰物理学[M]. 2 版. 北京: 兵器工业出版社, 2006: 180-186.
- [10] SUMIYA F, TOKITA K, NAKANO M, et al. Experimental study on the channel effect in emulsion explosives [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 85(1): 25-29.
- [11] 杜明阳. 导爆索法测定工业炸药爆速准确性的讨论[J]. 爆破器材, 1998, 27(2): 7-9.
- DU M Y. A discussion on the detonation velocity measurement of industrial explosive by detonating fuse [J]. Explosive Materials, 1998, 27(2): 7-9.
- [12] 王亚朋, 李晓杰, 张程娇, 等. 柱状炸药水下冲击波连续测量研究[J]. 工程爆破, 2015, 21(4): 17-19.
- WANG Y P, LI X J, ZHANG C J, et al. Study on continuous measurement of underwater shock wave of cylindrical explosive [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(4): 17-19.
- [13] 李明明, 李国新. 光纤在燃速及爆速测试中的应用[J]. 火工品, 2000(3): 13-16.
- LI M M, LI G X. Application of optical fibers for measuring combustion and detonation velocities [J]. Initiators and Pyrotechnics, 2000(3): 13-16.
- [14] 李现远. 二维柱对称装药爆轰波与水下斜冲击波测试[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- LI X Y. Detonation wave and underwater oblique shock wave test of two-dimensional column symmetric explosive loaded [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

Detonation Velocity and Critical Diameter Testing Method for Explosive Based on Pressure-conduct Probe Design

MIAO Yusong, LI Xiaojie, YAN Honghao, WANG Xiaohong, LI Kebin

Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology (Liaoning Dalian, 116024)

[ABSTRACT] As an important parameter to determine the reasonable charge diameter and avoid misfire and incomplete detonation, the critical diameter of explosive has a vital signification on performance improvement and utilization efficiency. In this paper, a continuous pressure-conduct probe and wedge charge device was designed to measure the detonation velocity of the explosive and its critical diameter was determined using the incomplete detonation characteristics and locating the detonation inflection point. The experimental results on the ANFO having a charge density of 0.9 g/cm^3 show a detonation velocity of 3 261 m/s and a critical diameter of 12.5 mm. It provides a simple and low cost method for testing detonation velocity and critical diameter of explosives at one time, which can be taken as a guideline for the determination of explosive parameters.

[KEYWORDS] mechanics of explosion; critical diameter; pressure-conduct probe; detonation velocity; explosive parameters