

评价现场混装炸药爆热稳定性的实验研究

李世海, 乔继延, 冯春, 郭汝坤
(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 为了在现场条件下了解孔内混装炸药的做功能力, 根据水下爆炸气泡脉动周期与炸药爆热之间的定量关系, 提出一种快速、方便地评价炸药爆热稳定性的方法。取 20~30 克现场混装炸药, 置于盛满水的直径 2.0 米、高 1.6 米的圆柱形金属桶中, 以 6 发雷管起爆炸药, 通过 PVDF 膜片测试水中自由场压力, 得到水下爆炸气泡脉动周期。测试表明, 对同一批次的炸药, 5 次测试的周期值离散度低于 3%, 相应地爆热值的离散度低于 10%。文中所建立的爆热稳定性测试方法有可靠的精度, 所需设备及操作方法简易, 适于在现场应用。

关键词: 现场混装炸药; 爆热; 气泡脉动周期; PVDF 膜片

Experiment of evaluating blasting heat stability of site-mixed explosives

LI Shi-hai, QIAO Ji-yan, FENG Chun, GUO Ru-kun
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

ABSTRACT: Based on the relation between blasting heat and bubble pulse period of under-water explosion, a speedy method of evaluating blasting heat stability of site mixed explosives is presented, for the aim of working capacity of mixed explosives in bore hole is knew in site conditions. About 20~30g explosive is put in a column metal barrel of diameter of 2m and height of 1.6m, which is filled with water, then the explosive is charged by 6 detonators, and the underwater explosion bubble pulse period is obtained by measuring water pressure of free field with PVDF membrane. Results show that, as for explosives of the same production patch, period scatter ratio is lower than 3% and that of the blasting heat is lower than 10% accordingly. So the method is reliable in the point of precision, and the operation is convenient and suitable for site conditions.

KEY WORDS: Site-mixed explosive; Blasting heat; Bubble pulse period; PVDF membrane

1 引言

我国自上世纪 80 年代开始, 研究乳化炸药混装技术及现场连续混装工艺, 取得了成功并开始采用^[1]。炸药的现场混装技术, 具有装药效率高、爆破质量好、成本低、使用方便和安全性好等突出优点, 越来越成为炸药生产和爆破服务的发展方向^[2]。对于爆破效果来说, 炸药的做功能力无疑是重要的。评价现场混装炸药的做功能力, 江小波^[3]指出采用铅铸法测试的不足之处, 提出了爆破漏斗法的设想, 并设计了用该法测试做功能力的方法。郑思友^[4]以 200 克作为试验药量, 100 克 TNT 和 2 号岩石炸药作为起爆药, 利用弹道抛掷试验, 测试了现场混装乳化炸药、混装铵油炸药和混装重铵油炸药的做功能力。这些工作, 在测试现场混装炸药做功能力方面做了有意义的探索。目前, 国内对现场混装炸药的爆轰参数还没有成熟的测试方法, 也未建立与之配套的产品质量国家标准。本文从评价炸药爆热稳定性的角度, 评价现场混装炸药的做功能力, 因为爆热是决定炸药做功能力的最基本因素^[5]。在现场

实施炸药混装和装药时, 由于实际工况的复杂性, 不同批次的混装炸药爆热性能很难达到稳定; 乳化炸药装入钻孔后, 敏化时间和温度难以得到严格保证, 其中敏化温度的问题在东北地区冬季尤其明显。基于工程实践的反馈, 现场混装炸药的性能是否稳定, 是一个没有得到明确解决的问题。本文提出的评价炸药爆热稳定性的方法, 与常规的用量热弹测试爆热的方法有所区别。现场在实施炸药混装和装药前, 已经停止供电, 这使得需要电源的量热弹无法使用; 同时, 从满足工程需求来说, 测试方法必须简便、快速、易行。鉴于此, 本文在前期研究工作的基础上^[6], 根据水下爆炸气泡脉动理论^[7], 将一定药量的现场混装炸药, 置于盛满水的爆炸容器中, 根据药量、爆热与气泡脉动周期之间的定量关系, 评价不同批次的现场混装炸药爆热的稳定性, 从而为工程人员提供炸药性能稳定性的基本判断。在国内外的文献中, 尚未见到现场实测混装炸药爆热稳定性的报道。

2 理论依据

根据水下爆炸气泡脉动的基本理论^[7]，由于爆炸气体的内能和水的动能相互转换，气体可以出现多次胀缩的脉动，一般至少出现脉动一次，第一次脉动的周期为： $T_1 = K \cdot (\eta QE)^{1/3} / P^{5/6}$ ，式中 T_1 为气泡脉动的周期（秒）， Q 为炸药量（千克）， E 为爆热（焦耳/千克）， η 为比例系数， P 为爆源处的压力（静水压力与大气压之和，帕斯卡）， K 为与炸药相关的常数（ $(\text{千克}/\text{立方米})^{1/2}$ ）。可以看出，当炸药种类、水深保持不变时，气泡脉动周期 T_1 与药量的 $1/3$ 次方成正比比例关系。同一种炸药，在相同水深下，如果药量不变，气泡脉动周期应该是相同的；如果药量保持不变，但是周期不相同，说明此时炸药的爆热值发生了变化，或者说的不稳定的。

3 实验的设计与实施

实验前，制作一个直径 2 米，高度 1.6 米的圆柱形开口盛水容器，运抵至现场，向容器内注满水。当装药车到达现场后，从拌药器的出口端取药，放入保温杯内，封口。由于容器尺寸的限制，实验药量控制在 20~30 克范围内。测试时，药包悬挂于容器中心，水深为 1.0 米。以 PVDF 压电膜片贴于容器内壁，通过水压的变化捕捉气泡脉动周期。数据采集频率为 51.2KHz，这个频率无法测到水中冲击波，但是可以测到自由场水压力。地点选择在距离装药孔大约 100 米的开阔地。实验简图如图 1 所示。

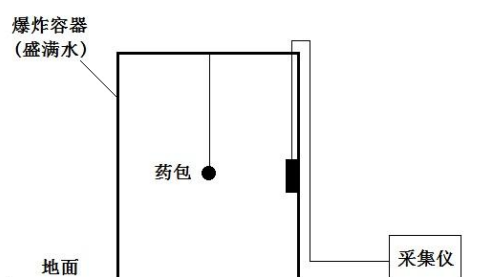


图 1 爆热测试简图

Fig.1 Sketch of blasting heat measurement

实验中，有一些技术环节，叙述如下。

3.1 小药量混装炸药的起爆

由于现场混装炸药起爆感度低，多不具有雷管感度，为了使小药量充分起爆，采用多发雷管起爆的方式。为此，设计了一种可装多发雷管，利于炸药充分起爆，并且使用方便的装药盒。装药盒由两

部分组成，上部是可插入多发雷管的雷管安插器，下部是分成两瓣的空心有底的圆柱形盛药器，两瓣拼接在一起后可在其中装入炸药。雷管安插器和盛药器的内径各为 30 毫米，雷管安插器的高度为 50 毫米，盛药器的高度根据装药量来确定，对应于装药 25 克和 50 克，盛药器的净高度分别为 30 毫米和 60 毫米。装药盒的实物见图 2 和图 3。



图 2 装药盒的实物图

Fig.2 Picture of charging box



图 3 装药完毕后的实物图

Fig.3 Picture of while charge finished

由于现场混装炸药的密度值有一定的变动，因此难以做到按照预定药量准确装药。经现场操作，试验装药量取为 23.6 克，装药量误差小于 0.1 克。共计 5 次实验，每次起爆用 6 发雷管。

3.2 实验误差的控制

很显然，爆破施工的场地远非平整。在摸索性的实验中发现，由于每次爆炸时容器的跳动，水向外溅出，悬挂药包的钢杆发生弯曲变形，因此水深、挂高以及药包的位置总会出现偏差，导致相同药量下的周期产生偏差，对于小药量来说尤其有影响。鉴于此，采取以下措施：(1) 在现场砌了一个厚度为 10 厘米，面积为 2.5×2.5 平方米的混凝土平台，平台上布设厚度 5 厘米的硬泡沫板，钢桶置于泡沫板上。这样，保证钢桶起跳后落回时保持水平；(2) 每次爆炸后向钢桶内补水，这样保证每次起爆时水位不变；(3) 每次爆炸对药包的悬挂位置和挂高进行测量和微调（水深 1.0 米，挂高 0.6 米），误差控制

在 1 厘米以内；(4) 试验前把所有的药包准备好。

3.3 PVDF 压电薄膜灵敏度系数的标定

聚偏氟乙烯(PVDF)压电薄膜具有响应快、测压范围宽、便于加工成形、耐冲击等特点，在由爆炸冲击、振动等引起的应力、应变及声辐射测量领域得以广泛应用。国外已实现 PVDF 应力传感器标准化。国内以 PVDF 压电薄膜为敏感元件的压力传感器尚无设计制作标准，通常由实验室或研究机构自行设计。自制 PVDF 压力计灵敏度系数受多种因素影响，使用前需对其在工况压力范围内进行标定^[8]。本文所关注的，只是爆炸后水压力变化的时间特征，不关注水压力的具体数值，因此对 PVDF 薄膜未做灵敏度系数的标定，输出数据单位为毫伏。

4 实验数据分析

图 4 是 23.6 克混装炸药 + 6 发雷管的周期测试结果。

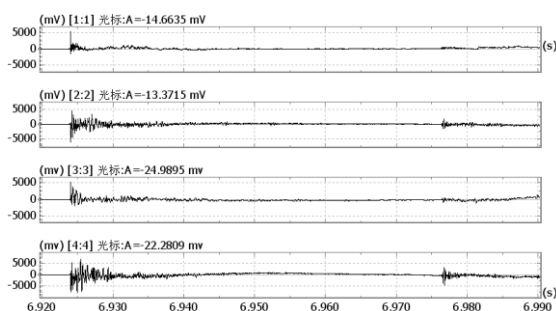


图 4 23.6 克炸药+6 发雷管的水压波形

Fig.4 Water pressure wave of 23.6g explosives+6 detonators

图中的 4 个通道，代表的是每次实验在容器内壁的不同位置布置 4 个 PVDF 传感器。在 23.6 克混装炸药 + 6 发雷管的相同药量下，做 5 次实验。图 3 只是其中一次的水压输出波形（毫伏），其余四次的波形类

参考文献(References)：

[1] 段宝福主编. 工程爆破[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
DUAN Bao-fu. Engineering Blasting[M]. Beijing: Beijing University Press, 2012.

[2] 汪旭光主编. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
WANG Xu-guang. Blasting Design and Construction[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2011.

[3] 江小波. 现场混装乳化炸药做功能力测试标准及方法初探[J]. 人民长江, 2012(12): 39-41.
JIANG Xiao-bo. Standard and Method of Work Capacity Test of Site Mixed Emulsion Explosive[J]. Yangtze River,

似。根据图 4，水压波形中出现明显的二次压力，气泡脉动的周期 T_1 可读性很强。综合 5 次实验的结果，把气泡脉动周期数据列于表 1 中，周期的单位为毫秒。

表 1 5 次实验结果统计

Table 1 Results of 5 experiments

序号 No.	1	2	3	4	5
周期 Period	52.695	52.168	53.535	52.852	53.301

从表 1 的数据看，对于同一批次的混装炸药，取相同的药量，测得的气泡脉动周期值重复性很好。这里定义离散度为，离散度 = (最大测量值 - 最小测量值) / 平均测量值，那么周期的离散度为 2.58%，小于 3%。根据爆热正比于周期的三次方，这意味着爆热的离散度低于 10%，从而能够满足工程要求。看来，验证炸药爆热值是否稳定，通过测试气泡脉动周期是可行的。

5 结论

通过一系列试验，得到以下一些认识：(1) 根据水下爆炸的基本理论，提出了一种在爆破现场快速评价炸药爆热稳定性的方法，建立了水下爆炸气泡脉动周期的测试系统；(2) 实测数据说明，在小药量情况下，本文的测试精度满足工程实际的需要；(3) 对于小药量的现场混装炸药，起爆时所用雷管数过多，涉及到雷管自身能量所占的份额，但是数量过少难以保证充分起爆。因此，采用多少发雷管起爆合适，是下一步需要实验的内容。

2012(12): 39-41.

[4] 郑思友. 现场混装炸药做功能力试验方法研究[J]. 爆破, 2015, 32(1):121-125.
ZHENG Si-you. Study of Testing Method on Power of Site Mixed Explosives[J]. Blasting, 2015, 32(1):121-125.

[5] 汪旭光. 乳化炸药(第2版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
WANG Xu-guang. Emulsion Explosives (Ver. 2) [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2011.

[6] 方正, 李世海, 乔继延, 丁汉堃. 水中爆炸气泡脉动周期的试验研究[J]. 工程爆破, 2001, 7(2):29-33.

FANG Zheng,LI Shi-hai,QIAO Ji-yan,DING Han-kun.
Study on Period of Bubble Impulse Induced by Underwater
Explosion[J]. Engineering Blasting,2001,7(2):29-33.

[7] 库尔著,罗耀杰等译.水下爆炸[M].北京:国防工业出版社,1960.

COLE, translated by LUO Yao-jie etc. Underwater
Explosion[M].Military Industry Press,1960.

[8] 范志强,马宏昊,沈兆武,林谋金,王德宝.夹心式PVDF
压力传感器压电特性及标定装置[J].研究振动与冲击,
33(16):68-71.

FAN Zhi-qiang,MA Hong-hao,SHEN Zhao-wu,LIN
Mou-jin,WANG De-bao. Piezoelectric Property of Sandwich
PVDF Pressure Gauge and Its Calibration Device[J]. Journal of
Vibration and Shock, 33(16):68-71.

作者简介: 李世海(1958-),男,研究员,主要从事工程地质力学应用和爆破方面的研究。E-mail:shili@imech.ac.cn。

通讯作者: 乔继延(1969-),男,助理研究员,主要从事工程地质力学应用和爆破方面的研究。E-mail:qiaojijian@imech.ac.cn。