

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.02.009

# 模拟高原环境对炸药爆速影响的试验研究<sup>\*</sup>

赵晓莉 夏 斌 刘尊义 高玉刚

中煤科工集团淮北爆破技术研究院有限公司(安徽淮北,235039)

[摘 要] 为了研究高原环境对炸药爆速的影响,将粉状乳化炸药与三级煤矿许用乳化炸药置于自制密闭容器中,通过抽气模拟海拔 0~4 500 m 下的高原环境,用爆速仪对此环境下炸药爆速进行试验研究。试验结果表明:在高海拔压力环境下,粉状乳化炸药爆速几乎没有变化,而三级煤矿许用乳化炸药爆速随着海拔高度的上升,出现先增大后减小的趋势。

[关键词] 炸药;模拟;海拔高度;爆速;高原

[分类号] TQ564;TD235.2+1

## 引言

爆速是研究爆轰过程的一个重要参数,由爆速可以推算其他一系列爆轰参量。研究爆速与爆炸环境、药柱类型的关系是研究爆轰机理的重要依据。同时爆速是炸药内在性质的一种表现形式,也是目前能准确测量的爆轰参数。因此,研究炸药的爆速,对保证爆破作业效果及指导爆破方案设计有重要意义<sup>[1]</sup>。前人通过改变装药密度、装药直径、约束条件及石墨含量,研究了工业炸药爆速的变化<sup>[2-5]</sup>,在高原环境条件下水下爆炸能量方面也做了大量研究<sup>[6]</sup>。而关于高原环境下,高海拔压力环境对工业炸药爆速的影响未见相关报道。

新疆、西藏等西部地区矿产资源丰富,随着国民经济的日益发展,需对西部地区进行开发,但 these 地区都为高原地区,显著特征是海拔高、大气压力低。在这些高原地区修筑高铁、桥梁及矿井,很多项目都涉及到爆破作业。因此,在高原环境下,对爆破器材的选择及爆破参数的调整有了新的要求<sup>[6-7]</sup>。研究高原环境下炸药性能的变化规律,对工程爆破中爆破参数的选择有一定的指导意义。

本文利用随着海拔高度上升、大气压力降低这一物理学原理与爆炸测试技术,通过自制模拟海拔高度的装置,研究 4 500 m 以下不同海拔高度高原环境条件对两种工业炸药爆速的影响。

## 1 试验方案

通过查阅相关文献,找到海拔 2 500 m 以下的大气压力值与对应的海拔高度关系<sup>[6-8]</sup>,将这些数据通过 Origin 软件作图,并进行线性拟合。

得到海拔高度  $x$  与大气压力  $y$  的线性方程:

$$y = -10.547x + 100\,756, \quad (1)$$

相关系数  $r^2$  为 0.998 6。由此线性方程可推算出在海拔 2 500~4 500 m 之间,海拔高度对应的大气压力降低值。分别计算出在海拔高度 500、1 500、2 500、3 500 m 及 4 500 m 条件下对应的高原大气压力,抽取自制简易爆炸容器中气压,对应模拟海拔高度,如表 1 所示。

表 1 模拟海拔高度与大气压力对照

Tab.1 Relationship between simulated altitude and air pressure

模拟海拔高度/ m	需抽取气压/ Pa	自制容器中剩余气压/ Pa
0	0	101 300
500	5 300	96 000
1 500	15 900	85 400
2 500	26 500	74 800
3 500	37 100	64 200
4 500	47 700	53 600

## 2 炸药爆速测试与分析

### 2.1 模拟高原环境下炸药爆速测试条件

试验样品:粉状乳化炸药与三级煤矿许用乳化炸药,其中,三级煤矿许用乳化炸药的敏化方式为化学敏化;样品规格均为直径 32 mm,质量 200 g。

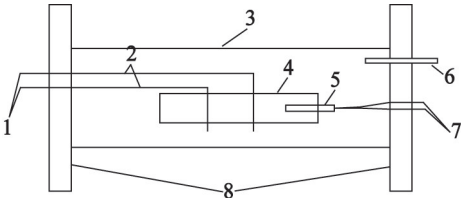
试验仪器:WBS-2 爆速测试仪;真空泵,抽气速率为 60 L/min;S-3400N 型扫描电镜。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-06-17

基金项目:“瓦斯灾害监控与应急技术国家重点实验室,中煤科工集团重庆研究院青年创新基金”资助项目(2012QNJ33)

作者简介:赵晓莉(1982~),女,工程师,主要从事民爆器材检测及工程爆破技术研究。E-mail:17560677@qq.com

高原环境模拟装置:采用自制爆炸容器,其由长 400 mm、管径 200 mm、壁厚 8 mm 的有机玻璃圆管与两块边长 300 mm、壁厚 8 mm 正方形有机玻璃板,通过强力 AB 胶粘结组合而成,该测试装置需通过耐压试验,见图 1。



(a) 示意图



(b) 实物图

1 - 接爆速仪;2 - 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>爆速测试信号线;3 - 有机玻璃管;4 - 工业炸药;5 - 8<sup>#</sup>雷管;6 - 抽气管;7 - 接发爆器;  
8 - 正方形有机玻璃板

图 1 测试装置

Fig.1 Testing device

2.2 测试步骤

1) 试样制作。选取粉状乳化炸药与三级煤矿许用乳化炸药两种工业炸药进行试验,测距  $L$  取 50 mm。两测点的放置原则,末端的测点距炸药试样底面应不小于 20 mm,插入装药雷管底部到首端测点的距离不大于两倍的药卷直径。

2) 信号线安装。信号线采用铜芯漆包线制作成断-通式探针,在试样上准确定位出两信号线的安装位置,距离为 50 mm。将两平行的信号线确定点位上,沿直径方向垂直穿过药卷,信号线尾部用电工胶带折向试样的尾部固定。

3) 爆炸装置设置。将安装好探针的炸药试样,按图 1 所示安装于自制爆炸容器中,为防止起爆线干扰探针信号线,雷管脚线由爆炸容器一侧板上的小孔引出,两个信号线即探针由另一侧板上的小孔引出,随即用 AB 强力胶将引出线的小孔封堵,保证气密性。

4) 高原环境模拟。根据表 1 中的数据模拟高原环境下的海拔高度与对应模拟装置中大气压力的关系,抽取装置中的空气,达到模拟不同的海拔高度的环境。

5) 连接与起爆。将安装好的两探针线与爆速仪信号传输线相连,确认系统连接完好后,起爆。

6) 数据记录。记录爆速仪测得的爆速。重复操作步骤 1 ~ 5,进行下一组试验。

2.3 数据处理与分析

对两种工业炸药,在自制的模拟高原环境的爆炸容器中分别进行爆速测试,数据见表 2 和表 3。

表 2 不同海拔高度下粉状乳化炸药爆速

Tab.2 Detonation velocity of powdery emulsion explosive at different altitudes

模拟海拔高度/m	$v_1/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$v_2/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\bar{v}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
0	3 676	3 731	3 704
500	3 690	3 723	3 707
1 500	3 660	3 655	3 658
2 500	3 671	3 712	3 692
3 500	3 687	3 642	3 665
4 500	3 697	3 723	3 710

表 3 不同海拔高度下三级乳化炸药爆速

Tab.3 Detonation velocity of class 3 coal mine permissible emulsion explosive at different altitudes

模拟海拔高度/m	$v_1/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$v_2/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\bar{v}/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
0	4 121	4 210	4 166
500	4 322	4 280	4 301
1 500	4 456	4 332	4 394
2 500	4 311	4 400	4 356
3 500	3 841	3 900	3 871
4 500	3 421	3 397	3 409

从图 2 中可知,在模拟海拔 4 500m 内,随着模拟海拔高度的增加,粉状乳化炸药爆速始终在 3 700 m/s 左右上下浮动,爆速最大值与最小值分别为 3 710 m/s 与 3 658m/s,相差仅为 1.4%;这说明海拔高度对粉状乳化炸药的爆速几乎没有影响。

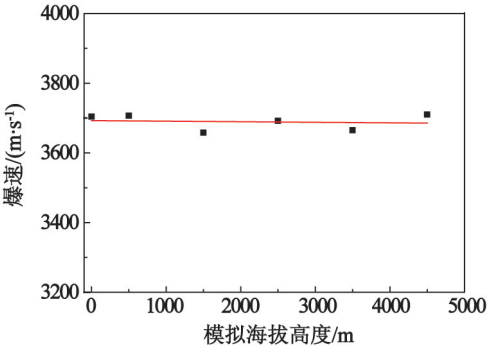


图 2 不同海拔高度下粉状乳化炸药爆速拟合曲线

Fig.2 Fitting curves of detonation velocity of powdery emulsion explosive at different altitudes

这与粉状乳化炸药自身的特殊结构及其生产工艺有一定的联系<sup>[9]</sup>。粉状乳化炸药采用乳化技术

将氧化剂与高热值燃料混制成高均一性的乳胶,然后使用先进的喷雾技术,制得粉状乳化炸药。因此,粉状乳化炸药兼有乳化炸药与粉状炸药的特点。粉状乳化炸药采用喷雾干燥、冷风造型等喷雾制粉技术,使胶体基质雾化脱水,形成具有一定粒度分布、颗粒微观结构为 W/O 型的粉状乳化炸药。在制粉过程中,乳胶基质中的部分水分被脱除,一方面产品中的水分质量分数最终低于 3%<sup>[10]</sup>;另一方面内部会产生很多微气泡,主要集中在硝酸铵晶体的“裂隙”中,与硝酸铵饱和水相共存,同时 PEE 的粉体状态使得固体颗粒之间本身就存在空气和间隙,形成爆炸所需的“热点”。与乳化炸药相比,粉状乳化炸药无需添加任何形式的敏化剂,就具有雷管起爆感度。因此,粉状乳化炸药密闭容器中压力的变化对其微观结构几乎没有影响,也即对粉状乳化炸药自身所形成的“热点”几乎没有影响。所以随着密闭容器压力的降低,即模拟海拔高度的增加,粉状乳化炸药的爆速基本不变。

从图 3 中可知,在模拟海拔 4 500 m 内,随着模拟海拔高度上升,三级煤矿许用乳化炸药爆速出现先增大后下降的趋势,在 1 500 m 左右爆速达到最大值。

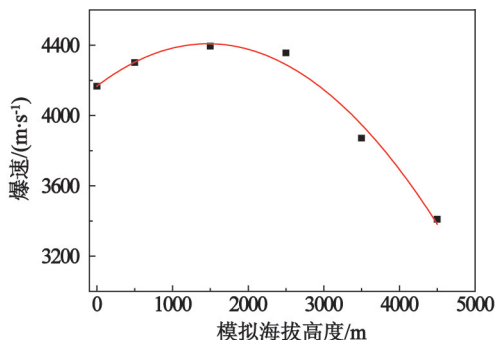


图 3 不同海拔高度下三级乳化炸药爆速拟合曲线  
Fig. 3 Fitting curves of detonation velocity of class 3 coal mine permissible emulsion explosive at different altitudes

通过线性曲线拟合,得线性方程为:

$$y = -0.0001x^2 + 0.3278x + 4167.4, \quad (2)$$

其线性相关系数  $r^2$  为 0.9845。

笔者认为,在海拔 1 500 m 以内,随着海拔高度的上升,乳化炸药爆速增大,这是由于在常压状态敏化的乳化炸药,置于负压环境时,部分“无效”气泡(直径小于“有效气泡直径”的极小气泡)的直径在负压作用下增长,使之成长为满足热点半径的有效气泡。由于乳化炸药“有效”热点增加,导致炸药爆炸反应中心点增多,反应更剧烈,从而提高乳化炸药的爆速。

而当海拔高度从 1 500 m 继续增大时,爆速迅

速下降。

为了考察炸药爆速性能突然下降的原因,针对乳化炸药做了一组扫描电镜试验。扫描电子显微镜(SEM)测试采用日本 Hitachi 公司 S-3400N 型扫描电镜测定,样品表面经喷金处理。扫描电镜成像系统的工作环境是近真空条件。

从图 4 乳化炸药的扫描电镜照片可以看出,负压环境下,乳化炸药中不可缺少的起爆炸“热点”作用的微气泡迅速逸出,留下一个个“无效”空洞。炸药中“微气泡”的大量减少,势必影响炸药的爆炸性能,反应在爆速上,爆速降低。随着模拟海拔高度继续增大,需从自制密闭容器中抽取的气压更多,以达到模拟海拔高度的条件。由于抽出的气体增多,一方面低于热点最小半径的气泡增长,而大量在热点半径范围的气泡被抽出或气泡破裂,由于乳化炸药“有效”热点数减少,导致炸药爆炸反应的中心点减少,从而降低乳化炸药的爆速。

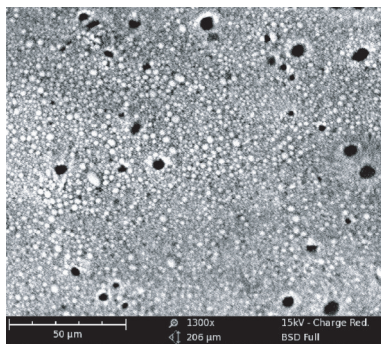


图 4 乳化炸药的扫描电镜

Fig. 4 SEM photograph of the emulsion explosive

根据试验结果,在高原地区的工程爆破中进行爆破设计时,若采用粉状乳化炸药可不考虑海拔高度对爆破效果的影响;但当采用乳化炸药时,应根据海拔高度,对爆破方案进行适当调整,亦可进行试爆,找到适合的爆破方案及孔网参数,从而降低炸药消耗,提高安全性。

### 3 结论

1) 粉状乳化炸药和乳化炸药由于生产工艺不同,海拔高度的增加对其产生不同的影响。

2) 粉状乳化炸药的爆速随海拔高度上升,爆速没有变化,与粉状乳化炸药乳化后喷雾干燥工艺的生产原理所形成的炸药爆炸“热点”有一定联系。

3) 随海拔高度的增加,三级煤矿许用乳化炸药爆速出现先增大后减小。约在海拔 1 500 m 左右达到最大值。扫描电镜试验表明乳化炸药爆速海拔 1 500 m 后下降是由于形成“热点”的微气泡逸出。

4) 在高原地区进行爆破时,应考虑海拔高度是



否对工业炸药有影响,从而选择合适的工业炸药,或针对海拔高度适当调整爆破方案,以确保爆破效果及施工安全。

### 参 考 文 献

- [1] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 2 版. 北京:冶金工业出版社, 2008.
- [2] 倪欧琪,解立峰,李斌,等. 弯曲装药条件下粉状乳化炸药爆轰特性的试验研究[J]. 爆破器材, 2014, 43(2):20-23.  
Ni Ouqi, Xie Lifeng, Li Bin, et al. Experimental study on the detonation characteristic of powdery emulsion explosive in curved charge[J]. Explosive Materials, 2014, 43(2):20-23.
- [3] 王玮,王建灵,郭伟,等. 装药密度及尺寸对 RDX 基含铝炸药爆压爆速的影响[J]. 含能材料, 2010, 18(5): 563-567.  
Wang Wei, Wang Jianling, Guo Wei, et al. Effect of charge density and size on detonation pressure and detonation velocity of RDX-based aluminized explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2010, 18(5): 563-567.
- [4] 赵海霞,胡双启,张少明,等. 装药直径和约束条件对小直径装药爆速影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(1): 95-96, 100.  
Zhao Haixia, Hu Shuangqi, Zhang Shaoming, et al. Study on effects of confinement condition and charge diameter on detonation velocity[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(1): 95-96, 100.
- [5] 曹渊,全毅,黄风雷. 石墨含量和粒度对 RDX/石墨混合炸药爆速的影响[J]. 火炸药学报, 2013, 36(6): 39-42.
- [6] 黄麟. 模拟不同海拔水下爆炸的实验研究——能量输出和作功能力[D]. 淮南:安徽理工大学, 2012.  
Huang Lin. Experimental research on underwater explosion in the simulated different altitude--energy output and functional force[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2012.
- [7] 高玉刚,赵晓莉,徐龙,等. 高海拔压力环境对炸药猛度影响的实验研究[J]. 火工品, 2013(5):36-39.  
Gao Yugang, Zhao Xiaoli, Xu Long, et al. Experimental research on brisance of explosive in simulated high altitude environment[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2013(5):36-39.
- [8] 百度文库. 海拔高度与大气压对比表[EB]. <http://wenku.baidu.com/view/4c9482fb770bf78a652954b4.html>.
- [9] 倪欧琪. 粉状乳化炸药微观结构研究[J]. 爆破器材, 1998, 27(3): 6-8.  
Ni Ouqi. The research of microstructure of powdery emulsion explosive[J]. Explosive Materials, 1998, 27(3): 6-8.
- [10] 吴国群. 自乳化粉状硝铵炸药的研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2009.  
Wu Guoqun. Study of powdery self-emulsion explosive[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2009.

## Experimental Research on Detonation Velocity of Explosive in Simulated Plateau Environment

ZHAO Xiaoli, XIA Bin, LIU Zunyi, GAO Yugang

HuaiBei Blasting Technology Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group (Anhui HuaiBei, 235039)

[ABSTRACT] In order to investigate the detonation velocity performance under high plateau environment, powdery emulsion explosive and class 3 coal mine permissible emulsion explosives were both laid in a closed container, the pressure conditions at an altitude of 0-4 500 meters were simulated by air extraction, and then experimental research on detonation velocity under this environment was conducted by time measuring instrument. The results show that the detonation velocity of powdery emulsion explosive almost exhibited invisible change under high altitude conditions, while the detonation velocity of class 3 coal mine permissible emulsion explosives increased at first and then decreased as altitude increasing.

[KEY WORDS] explosive; simulate; altitude; detonation velocity; plateau