

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.05.005

# 岩石结构中的爆炸应力波对乳化炸药性能的影响<sup>\*</sup>

郑卫东 吴 均 潘伟纲 吴丽君 毛香琴  
浙江利民化工有限公司(浙江丽水,323303)

[摘 要] 利用导电性测试、显微照相、爆轰性能测试等手段,研究在不同岩石结构中、距爆炸源不同距离时受到爆炸应力波作用后的乳化炸药的微观结构的变化情况。试验结果表明:在一定强度的爆炸应力波作用下,乳化炸药会产生析晶破乳现象,在结构致密的岩石介质中,应力波对乳化炸药的影响距离约为药包半径的 16 倍;在裂隙丰富的岩石介质中,应力波对乳化炸药的影响距离大于 300 mm,且乳化炸药受破坏程度与影响距离无线性关系;在砂地介质中,应力波对乳化炸药的影响距离为 320 mm。

[关键词] 爆炸应力波;岩石结构;乳化炸药;药态

[分类号] TQ564

## Effect of Explosive Stress Waves in Rock Structures on the Performance of Emulsion Explosives

ZHENG Weidong, WU Jun, PAN Weigang, WU Lijun, MAO Xiangqin  
Zhejiang Limin Chemical Co., Ltd. (Zhejiang Lishui, 323303)

[ABSTRACT] By means of electric conductivity testing, microphotography and detonation performance test, the micro-structure changes of emulsion explosive under the action of detonation stress wave in different rock mass and with different distances from explosion source were investigated. Experimental results show that the crystallization and demulsification of emulsion explosives will occur under the impact of detonation stress waves of certain intensity. In dense rock media, the influence distance of stress waves on the emulsified explosives is about 16 times of the radius of explosive package. In the rock medium with abundant fissures, the influence distance of stress wave on emulsion explosive is more than 300 mm, and the degree of damage has no linear relationship with the distance. In the sand medium, the influence distance of stress wave on emulsion explosive is 320mm.

[KEYWORDS] stress wave; rock structure; emulsion explosive; drug state

## 引言

乳化炸药是在乳胶基质中加入一定的微气泡敏化而成的爆炸物品,因具有优良的爆炸性能、抗水性能而在各种爆破场所得到了广泛的应用;但也存在着一定的缺陷,其中一个就是抗动态压力能力不高。

在微差爆破作业中,乳化炸药受到先爆炮孔装药产生的冲击波或应力波作用,出现爆轰性能下降,尤其在桩井爆破等小断面爆破作业中,往往会出现残药或拒爆。造成原先精心设计的爆破方案有可能

会失败,轻则达不到设计的爆破效果,岩石的大块率上升;重则容易引发安全事故。这是由于乳化炸药是由油包水组成的乳化液,当受到临近冲击波或应力波作用后,分散相粒径变大,乳化基质中的敏化气泡破裂、逃逸,乳胶颗粒产生聚结、变形、析晶等,使炸药出现半爆或拒爆,这种现象称为受压钝化或压力减敏效应<sup>[1-7]</sup>。

本文中,利用导电性测量、显微分析、爆轰性能测试等方法,研究乳化炸药在不同结构岩石介质中、距主装药不同距离时受爆炸应力波影响的规律。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2019-10-18

基金项目:遂昌县科技计划项目

第一作者:郑卫东(1970-),男,高级工程师,主要从事工业炸药生产技术工作。E-mail:917580129@qq.com。

1 试验部分

1.1 材料与设备

乳化炸药,浙江利民化工有限公司,生产中采用了复合乳化剂、化学敏化等材料和技 术;导爆管雷管,浙江物产光华民爆器材有限公司;ZC25-1 型绝缘电阻表(电压 100 V,量程 2 ~ 100 MΩ),南京金川电表制造有限公司;MM-55E 型金相显微镜、摄像机及二维测量软件,上海长方光学仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 应力波冲击试验<sup>[8]</sup>

在不同地质构造的爆破作业工地,挑选了一处岩石结构致密的花岗岩场地和一处岩石裂隙丰富的沉积岩场地,另选了一处干燥、中等砂粒的砂地做对比试验。

在岩石面中心钻 1 个爆破孔,在爆破孔周边按不同距离依次环形钻 6 ~ 8 个试验孔,孔径 40 mm,孔深 1 m,炮孔布置如图 1(a)所示。爆破孔内装入 2 支塑膜包装乳化炸药(Ø32 mm、200 g),炸药上端插入雷管作为主装药包,装入炮孔后用石粉堵塞;每个试验孔内装入 3 支塑膜包装乳化炸药(Ø32 mm、200 g),不装雷管,作为试验药包,对每支药卷分别做好标记,为方便试验后取出,药卷两端系绳子,装入炮孔后用废纸卷堵塞,如图 1(b)所示。砂地的操作也是同样如此。

起爆爆破孔中的主装药包后,观察试验孔状况,并取出试验孔中的试验药卷进行外观观察、电阻检测、显微摄像分析、雷管感度检测等研究。

在花岗岩、沉积岩、砂地 3 种场地共进行了 11 组试验,共取回 213 支试验药卷。

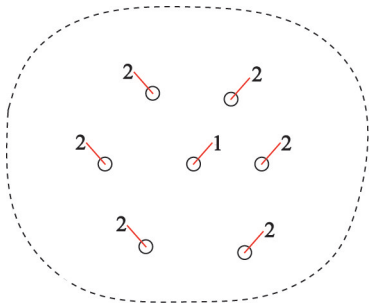
1.2.2 外观观察

观察应力冲击后的试验药卷是否破损,药体是否结块发硬、发干粉化,手摸药体是否有砂质感。

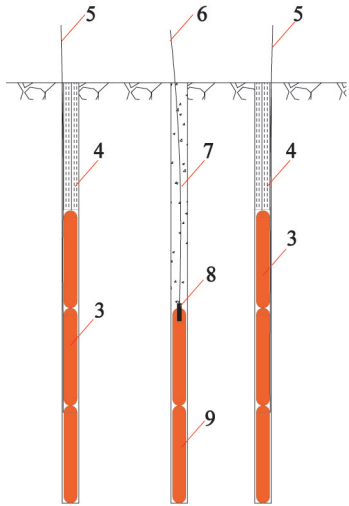
显微摄像分析方法为:取少许试样放在干净的标准载物片上,刮成薄层,然后盖上盖玻片,制成用于观测的试样;将试样放在显微镜的载物台上,调整显微镜的物镜和目镜,得到清晰的视野并进行拍照,观测试验炸药微粒情况,并用二维测量软件测量微粒尺寸。

1.2.3 电阻检测

硝酸铵水溶液是导体,油相材料是绝缘体,正常的乳化炸药基质具有油包水结构,是绝缘体,析晶破裂后变成导体,通过测量电阻判断起爆爆破后乳化炸药的析晶程度。



(a) 平面图



(b) 立面图

- 1 – 爆破孔;2 – 试验孔;3 – 试验炸药;  
4 – 纸卷堵塞;5 – 细绳;6 – 导爆管;  
7 – 石粉堵塞;8 – 雷管;9 – 主装炸药。

图 1 试验布置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental device

检测方法为:剥开试验乳化炸药包装膜,将绝缘电阻表的两根探针垂直插入乳化炸药中,插入深度约 5 mm,两根探针之间距离约 10 mm,快速摇动绝缘电阻表摇臂,读出电阻值。

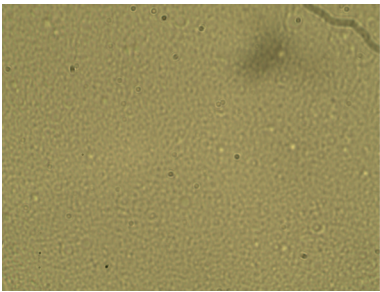
1.2.4 感度检测

选取应力冲击后不同电阻的试验药卷,用 8# 雷管进行引爆试验,检测不同电阻的乳化炸药的爆轰感度。

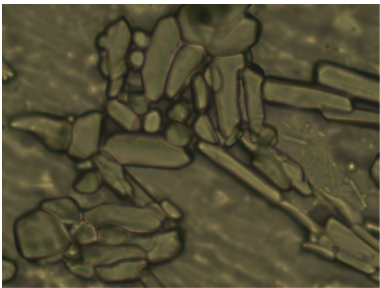
2 结果与分析

受压前、后乳化炸药微观结构变化如图 2 所示。

从图 2(a)可以看出:正常的乳化炸药分散相微粒形状呈球形,具有明显的油包水结构,分散相粒子分布均匀,直径大多在 1.0 ~ 1.5 μm 之间。从图 2(b)可以看出:在冲击作用下,分散相粒子与连续相发生相对运动,相互之间产生剪应力,当剪应力大于



(a) 正常乳化炸药



(b) 部分发硬乳化炸药

图 2 乳化炸药放大 1 200 倍的照片

Fig. 2 Photos of emulsion explosive magnified 1200 times

体系的屈服应力时,乳化基质的分散相与连续相稳定性被打破,连续相油膜变形破裂,水、油相分离,水相颗粒聚集,聚集颗粒发亮,粒径变大,颗粒均匀性变差,形状不规则,最大尺寸达到 30  $\mu\text{m}$  以上。

由于试验药卷数量较多,只选取了部分不同电阻的试验乳化炸药用 8# 雷管进行引爆试验,结果见表 1。

表 1 试验乳化炸药的雷管感度试验结果

Tab. 1 Test results of detonator sensitivity of emulsion explosive

电阻/ $\text{M}\Omega$	外观	引爆结果
0	大部发硬	拒爆
0.5 ~ 1.5	部分发硬	爆炸完全
0.8 ~ 2.0	少量发硬	爆炸完全
30 ~ $\infty$	少量发硬	爆炸完全

从表 1 中数据可以看出,电阻为 0  $\text{M}\Omega$  的乳化炸药全部拒爆,电阻大于 0.5  $\text{M}\Omega$  的乳化炸药均能被 8# 雷管引爆。

2.1 在花岗岩场地上的试验结果

在结构致密的花岗岩场地上试验的乳化炸药检测结果见表 2。

从表 2 数据可以看出,在结构致密的花岗岩介质中,应力波对乳化炸药的影响范围比较规律,距主爆药包 250 mm 范围内,试验乳化炸药都发硬、析

晶;而距主爆药包 260 mm(约 16 倍药包半径)外,试验乳化炸药几乎未受到影响。

表 2 在花岗岩场地的试验结果

Tab. 2 Test results at granite sites

距离/mm	外观	电阻/ $\text{M}\Omega$	微观结构
180	大部发硬	1 ~ $\infty$	部分析晶
200	药卷破损	10	析晶
240	少量发硬	0.5 ~ $\infty$	部分析晶
250	药卷破损	0.1 ~ 8.0	析晶
260	完好	$\infty$	未析晶
270	完好	$\infty$	未析晶
280	完好	$\infty$	未析晶
300	完好	$\infty$	未析晶
320	完好	$\infty$	未析晶
350	完好	$\infty$	未析晶
380	完好	$\infty$	未析晶

炸药在岩石等固体介质中爆炸后,形成高温高压爆轰气体,同时还产生爆炸冲击波,冲击波在固体介质内自爆源向四周传播过程中,强度逐渐衰减,变为压缩应力波,进一步衰减后变为地震波直至消失,如图 3 所示。图 3 中, $r$  为药包半径; $t_{\text{H}}$  为介质状态变化时间; $t_{\text{s}}$  为介质状态恢复到静止状态的时间。

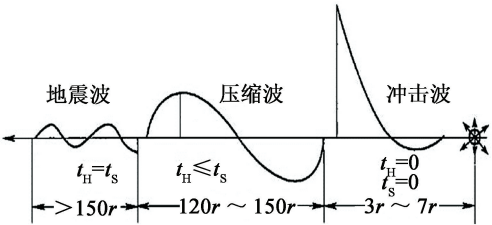


图 3 爆炸应力波及其用范围

Fig. 3 Explosion stress wave and its application range

在压缩应力波的作用下,岩石介质处于非弹性状态,产生连续性破坏的残余应变,作用在乳化炸药上。压缩应力波在衰减过程中,介质质点的振动幅度也逐渐减小,当距爆炸中心大于 16 倍药包半径时,应力波的作用将不足以对乳化炸药产生压力减敏效应。

2.2 在沉积岩场地上的试验结果

在裂隙丰富的沉积岩场地上试验的乳化炸药检测结果见表 3。

从表 3 的数据可以看出,在裂隙丰富的岩石介质中,距主爆药包 300 mm 范围内,试验孔内药卷发硬情况严重,全部析晶,且已无雷管感度;而距主爆药包 310 mm 外,试验孔内药卷受破坏的程度无规律可遁:相同的距离,有的药卷析晶严重,有的药卷

表 3 在沉积岩石场地的试验结果  
Tab.3 Test results at sedimentary rock sites

距离/mm	外观	电阻/MΩ	微观结构
250	破损、发硬	0	析晶
280	发硬	0~0.10	析晶
310	发硬、粉化	0.50	析晶
320	70% 发硬	0.50~∞	部分析晶
340	90% 发硬	0.02~100.00	析晶
360	80% 发硬	0~∞	部分析晶
380	75% 发硬	0~∞	部分析晶
400	90% 发硬	0.05~∞	部分析晶
420	55% 发硬	0.05~∞	部分析晶
450	90% 发硬	0~∞	部分析晶
480	90% 发硬	50.00~∞	部分析晶

几乎无破坏;不同的距离,有些距离大的药卷受破坏的程度反而比距离小的严重,总的趋势是距离越大,影响越小。受试验场地的限制,最大距离只有 480 mm,因此,未能测出完全不受应力波影响的最小距离。

在裂隙丰富的岩石中,主炸药包爆炸产生的高温高压爆轰气体在约束条件下,能通过岩石缝隙传播到较远的地方,甚至产生冲击波,这些对乳化炸药的影响远比在各种岩石介质传播的应力波大。沉积岩体具有独特的割裂结构,表现出非均质性、非连续性和各向异性,岩石缝隙的杂乱无序是应力波对乳化炸药影响程度无规律性的主要原因。

2.3 在砂地上的试验结果

在砂地上试验的乳化炸药检测结果见表 4。

表 4 在砂地上的试验结果

Tab.4 Test results at sandy ground

距离/mm	外观	电阻/MΩ	微观结构
240	发硬	0~1.4	析晶
260	发硬	0	析晶
280	部分发硬	0.5~∞	部分析晶
300	部分发硬	1.5~∞	部分析晶
320	少量发硬	8.0~∞	部分析晶
360	完好	∞	未析晶
380	完好	∞	未析晶
400	完好	∞	未析晶

在干燥、中等粗细的砂介质中,应力波对乳化炸药的影响范围比较规律。距主炸药包 260 mm 范围内,试验乳化炸药都发硬、析晶;距主炸药包 280~320 mm 范围内,试验乳化炸药部分发硬、析晶,多数药卷面对主炸药包一侧发硬,背对主炸药包一侧状

态正常;距主炸药包 320 mm 外,试验乳化炸药几乎未受到影响。

砂介质结构松散,各向性质相同,对乳化炸药影响的范围有规律;缝隙多且均匀,易被爆炸气体扩散,砂还具有减振作用。因此,在砂介质中的应力波衰减较快,对乳化炸药的影响范围较小。

2.4 试验结果分析

在 3 种介质中,爆炸应力波对乳化炸药的破坏程度与距离的关系见图 4。

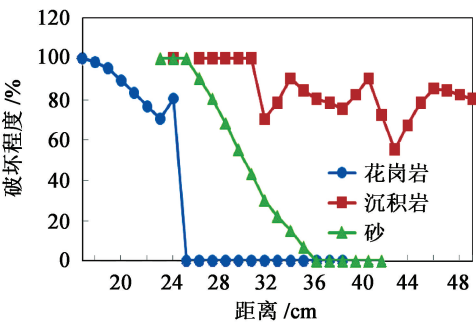


图 4 破坏程度与距离的关系

Fig. 4 Relationship between damage degree and distance

不难看出,在 3 种介质中,爆炸应力波对乳化炸药的影响距离区别很大:花岗岩介质中,距离大于 260 mm 无影响;在沉积岩介质中,距离大于 310 mm 时,影响程度随距离增大呈不规则减小;在砂介质中,距离在 280~320 mm 范围内,影响程度随距离增大,呈线性减小。

3 结论

1)在结构致密的岩石介质中,爆炸应力波对乳化炸药产生减敏效应的距离是有规律的,在本试验条件下影响距离约为药包半径的 16 倍。在结构致密的岩石中爆破,炮孔间距大于 260 mm 时,基本可以消除受压钝化现象。

2)在裂隙丰富的岩石介质中,炮孔间距小于 300 mm 时,试验乳化炸药 100% 失效;炮孔间距大于 310 mm 时,试验乳化炸药受破坏的程度无规律。在裂隙丰富的岩石中开展微差爆破作业,不同段别的炮孔间距应尽可能大且不小于 310 mm,应避免将炮孔布置在主要裂隙上。

3)在砂介质中,爆炸应力波对乳化炸药的影响距离为 320 mm;距离小于 260 mm 时,试验乳化炸药全部失效;距离在 280~320 mm 之间,试验乳化炸药受破坏程度随距离增大而逐渐减小。



## 参 考 文 献

- [1] 刘锋,颜事龙,吴红波. 冲击作用下乳化炸药基质微观结构的变化[J]. 火工品,2008(1):25-28.  
LIU F, YAN S L, WU H B. Microstructure change of emulsion matrix under shock pressure [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(1):25-28.
- [2] 王尹军,李进军,方宏. 乳化炸药密度对其压力减敏的影响[J]. 爆炸与冲击,2009,29(5):529-534.  
WANG Y J, LI J J, FANG H. Influences of emulsion explosive density on its pressure desensitization [J]. Explosion and Shock Waves,2009,29(5):529-534.
- [3] 吴红波,颜事龙,郭子如,等. 动压作用下乳化炸药减敏因素的实验探讨[J]. 火工品,2008(2):16-19.  
WU H B, YAN S L, GUO Z R, et al. Experimental discussion on desensitization factors of emulsion explosives under dynamic pressure [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2008(2):16-19.
- [4] 王尹军,汪旭光,李进军. 冲击波作用后乳化炸药贮存性能及其影响因素实验研究[J]. 含能材料,2009,17(2):214-217,232.  
WANG Y J, WANG X G, LI J J. Experimental study on the storage properties and its influence factors of the emulsion explosive after pressed by shockwave [J]. Chi-

nese Journal of Energetic Materials, 2009,17(2):214-217,232.

- [5] 张福场,郭子如. 乳化炸药减敏机理的研究现状[J]. 煤矿爆破,2008(3):19-22.  
ZHANG F Y, GUO Z R. Current research situation on the desensitization mechanism of emulsion explosive [J]. Coal Mine Blasting,2008(3):19-22.
- [6] 王尹军,汪旭光. 乳胶基质抗冲击波性能研究[J]. 兵工学报,2005,26(5):697-701.  
WANG Y J, WANG X G. A study on the anti-shockwave performance of emulsion matrix [J]. Acta Armamentarii, 2005,26(5):697-701.
- [7] 王尹军,汪旭光,颜事龙. 乳化剂含量与乳化炸药压力减敏关系[J]. 化工学报,2005,56(9):1809-1815.  
WANG Y J, WANG X G, YAN S L. Relationship of emulsifier content to desensitization of emulsion explosives [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005,56(9):1809-1815.
- [8] 程扬帆,颜事龙,汪泉,等. 乳化炸药动压减敏装置的优化设计和试验研究[J]. 爆破器材,2015,44(5):27-30.  
CHENG Y F, YAN S L, WANG Q, et al. Optimal design and experimental research of dynamic pressure desensitization device of emulsion explosives [J]. Explosive Materials,2015,44(5):27-30.

(上接第 23 页)

## 参 考 文 献

- [1] QIAN H, YE Z W, LÜ C X. An efficient and facile synthesis of hexanitrohexaazaisowurtzitane (HNIW) [J]. Letters in Organic Chemistry, 2007, 4(7): 482-485.
- [2] BAYAT Y, MOKHTARI J, FARHADIAN N, et al. Heteropolyacids; an efficient catalyst for synthesis of CL-20 [J]. Journal of Energetic Materials, 2012, 30(2): 124-134.
- [3] VASILEVA A A, DASHKO D V, DUSHENOK S A, et al. Preparing and some properties of spheroid  $\varepsilon$ -HNIW [R]//Czech Republic: New Trends in Research of Energetic Materials. 2013: 954-966.
- [4] WILLER R L. The early history of CL-20 (HNIW) [R]//Czech Republic: New Trends in Research of Energetic Materials. 2013: 384-397.
- [5] YADOLLAH B, MOHAMMAD A Z, ARDESHZR K, et al. Synthesis of 2,4,6,8,10,12-hexanitro-2,4,6,8,10,12-hexaazaisowurtzitane using melaminium-tris-(hydrogensulfate) by a simple one-pot nitration procedure

[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013, 38: 745-747.

- [6] 王昕,彭翠枝. 国外六硝基六氮杂异伍兹烷的发展现状[J]. 火炸药学报,2007,30(5):45-48.  
WANG X, PENG C Z. Development of hexanitrohexaazaisowurtzitane at abroad [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007,30(5):45-48.
- [7] 杨利,王绍宗,赵鹏娟,等. 超细 CL-20 晶形控制技术研究[J]. 含能材料,2008,16(3):254-257.  
YANG L, WANG S Z, ZHAO P J. et al. Morphology controlling technique for submicron CL-20 [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008,16(3):254-257.
- [8] JOANNA S, SANDRA C, PAWEL M, et al. Friction sensitivity of the  $\varepsilon$ -CL-20 crystals obtained in precipitation process [J]. Central European Journal of Energetic Materials,2011,8(2):117-130.
- [9] 杨宗伟,刘玉存,于国强. 基于神经网络的 HMX 爆轰临界厚度预测研究[J]. 火工品,2009(3):33-36.  
YANG Z W, LIU Y C, YU G Q. Study on the evaluation of critical thickness of HMX based on neural net work [J]. Initiators & Pyrotechnics,2009(3):33-36.