

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.02.007

静压作用下两种敏化方式的乳化炸药微观结构变化*

张海涛^① 刘磊^① 彭云昆^② 王远^①

①昆明理工大学国土资源学院(云南昆明,650093)

②云南安宁化工厂有限公司(云南昆明,650301)

[摘 要] 为探究乳化炸药在静压下的微观变化,实时观察乳化炸药在不同压力下的动态变化过程,使用了生物显微镜和爆炸球罐对空气静压加载下的乳化炸药进行微观研究。对亚硝酸钠(化学)敏化和玻璃微球(物理)敏化的乳化炸药进行实时加压观察,并对加压前、后两种炸药的复原性进行了研究。结果表明,两种敏化载体在静压加载下有不同的变化形式:化学敏化气泡可承受压力较小,在 0~0.3 MPa 之间,气泡受压发生收缩和融合,在 0.3 MPa 下 90% 以上的气泡均形成无效热点,卸压复原后的乳化炸药中气泡粒径在 20~30 μm 的数量达到 68.7%,与初始炸药形态相比,粒径更加均匀,但爆炸性能并无明显变化;物理敏化微球在加压过程中会产生不可逆的破裂,并且破裂产生的碎屑会导致周围小范围的乳化基质破乳。

[关键词] 乳化炸药;静压;微观结构;化学气泡;玻璃微球

[分类号] TD235.2⁺1;TQ564

Microstructure Changes of Emulsion Explosives with Two Sensitization Methods under Static Pressure

ZHANG Haitao^①, LIU Lei^①, PENG Yunkun^②, WANG Yuan^①

① School of Land and Resources, Kunming University of Science and Technology (Yunnan Kunming, 650093)

② Yunnan Anning Chemical Factory Co., Ltd. (Yunnan Kunming, 650301)

[ABSTRACT] In order to explore the microscopic changes of emulsion explosives under static pressure and observe the dynamic change process of emulsion explosives under different pressures in real time, a biological microscope and an explosive spherical tank were used to conduct microscopic studies on emulsion explosives under static air pressure. The sodium nitrite (chemical) sensitized and glass microsphere (physical) sensitized emulsion explosives were pressurized and observed. The recoverability of two kinds of explosives before and after pressurization was also studied. Results show that the two sensitized carriers have different change forms under static pressure loading. Chemically sensitized bubbles can withstand a small pressure. Between 0-0.3 MPa, the bubbles shrink and fuse under pressure; and below 0.3 MPa, more than 90% of bubbles form invalid hot spots. In the emulsion explosive after decompression and recovery, the number of bubbles with particle size of 20-30 μm account for 68.7%, which is more uniform than the initial explosive form. However, there is no obvious change in explosion performance. Microspheres in physical sensitization will produce irreversible rupture during pressurization, and the debris produced by the rupture will lead to the demulsification of a small range of surrounding emulsified matrix.

[KEYWORDS] emulsion explosives; static pressure; microstructure; chemical bubbles; glass microspheres

引言

自 20 世纪 70 年代以来,乳化炸药因其优良的

抗水和安全性能而被广泛应用于工程爆破作业中。但因为自身的结构特点,乳化炸药的性能受不同工况影响很大。尤其在水下工程作业中,随外界压力增大,乳化炸药内部结构发生很大变化,导致炸药在

* 收稿日期:2021-10-29

基金项目:国家自然科学基金(11862010)

第一作者:张海涛(1995-),男,硕士研究生,研究方向为工业炸药。E-mail:1604490791@qq.com

通信作者:刘磊(1981-),男,博士,副教授,主要从事矿山开采、工程爆破、工业炸药方面的研究。E-mail:546027603@qq.com

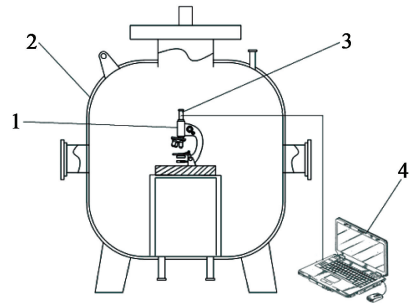
起爆后常发生半爆、拒爆等现象。刘磊等^[1-3]通过研究深水压力下乳化炸药的爆速、猛度等性能参数来表征乳化炸药的静压减敏率,得出不同敏化方式的乳化炸药的抗静压能力优先顺序为:玻璃球敏化、珍珠岩敏化、亚硝酸钠敏化。张立等^[4]利用静水加压实验模拟含水深孔爆破,通过加压前、后炸药的爆速、猛度等参数变化来解释炸药在静压下的爆炸性能下降。汪泉等^[5]对比研究了不同种类含水炸药的爆炸能量。龚悦等^[6]通过研究水下爆炸能量的大小来表征乳化炸药动压减敏率,当玻璃微球质量分数为4%时,爆炸输出能量最大。司剑峰^[7]在静水、动水、水下裸爆、水下钻孔等不同条件下进行现场测试,研究了水下炸礁工程爆破水击波的特性及衰减规律。陈江涛等^[8]使用水下爆炸能量法对炸药爆轰性能进行了实验研究,得出不同炸药的性能优先顺序。郭亮^[9]模拟深水下炸药爆炸后爆轰波的压力、波速、能量变化等数据,发现在深水环境下,空心玻璃微珠会受到一定程度上的结构破坏,使炸药性能下降明显。陈东梁等^[10]使用激光粒度分析仪对乳化炸药进行动压处理,发现动压作用后乳化炸药中敏化剂、乳化基质均发生一定变化。张续等^[11]将中空玻璃微球敏化的乳化炸药置于静压环境下一段时间,发现随着时间的增加,玻璃微球呈聚集状态。然而,松本荣等^[12]研究发现,乳化炸药具有很强的复原性。刘磊^[13]也通过研究乳化炸药抗水、抗压性能,提出乳化炸药受静压作用后有较好的复原性。

研究乳化炸药的抗静压性能必须在受压状态进行。为更契合工程实际背景,并了解压力对乳化炸药的复原性的影响,需研究并观察受压环境下乳化炸药的微观变化。本文中,使用自制的压力球罐以及生物显微镜对静压加载下的乳化炸药减敏过程进行追踪研究,探讨并分析静压过程下乳化炸药的微观减敏机理。

1 实验装置和过程

1.1 爆炸球罐和样品制备

球罐总体呈圆柱状,罐体最大直径1.40 cm、高220 cm、筒壁厚2.2 cm、容积2 m³、工作压力3.0 MPa。3个地脚与地面焊接。筒壁中央有4个连接窗口,窗口处由连接法兰密封,符合HG/T 20592—2009标准。将显微镜与电脑安装好,显微镜放入罐体中,并通过空压机改变球罐内的气压模拟深水静压环境。装置示意图如图1所示。



1—显微镜;2—加压球罐;3—电子目镜;4—笔记本电脑。

图1 实验设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

乳化基质和亚硝酸钠均由云南安宁化工厂有限公司提供,玻璃微球由河北吴星钻井助剂有限公司提供。制作了两种样品,配方为(质量分数):

- 1) 99.8%的乳化基质+0.2%的亚硝酸钠;
- 2) 97.0%的乳化基质+3.0%的玻璃微球。

1.2 显微镜设备及安装

采用SG50-3A43L-A型生物显微镜,加设电子目镜以及S-View配套软件,以便在电脑端进行图像采集和处理。后期采用ImageJ软件进行图片分析。电子目镜外接电脑可观测乳化炸药受压变化的全过程和卸压后的复原性,通过保存图片 and 录像功能实时观测并进行数据保存。

2 结果和分析

通过前期实验可知:亚硝酸钠(化学)敏化的炸药在0.3 MPa下发生半爆;玻璃微球(物理)敏化的炸药在0.8 MPa下发生半爆。所以,压力点取值具体方案如表1所示。

表1 实验方案

Tab. 1 Experimental protocols

敏化方式	压力/MPa				
亚硝酸钠	0	0.1	0.2	0.3	0(复原)
玻璃微球	0	0.3	0.5	0.8	0(复原)

2.1 敏化剂微观变化

图2是玻璃微球在0、0.3、0.5、0.8 MPa下同一位置放大400倍的显微拍摄图。在图2(a)中可以看出,未加压时,玻璃微球均匀性一般,有部分玻璃微球不完整;当压力加到0.3 MPa时,有裂缝的玻璃微球开始碎裂,尺寸较小的微球有向大颗粒靠拢现象,整体表现为性能较好状态;当压力提升到0.5 MPa时,并没有出现太多玻璃微球压碎现象;0.8 MPa时,炸药中玻璃微球大部分被压碎,完整保存的

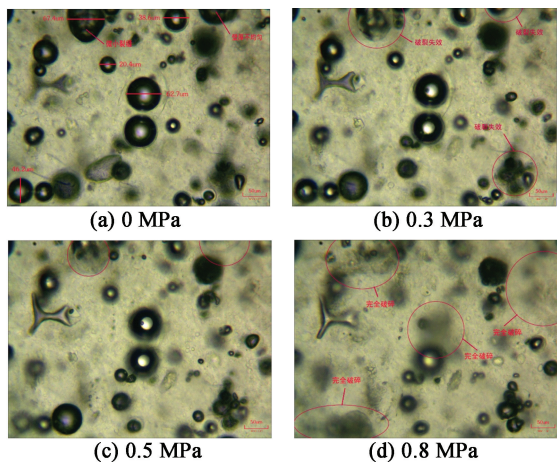


图 2 玻璃微球微观图

Fig. 2 Microscopic images of glass microspheres

不足 1/3。总体上,玻璃微球在压力为 0 ~ 0.5 MPa 之间时具有良好的抗静压性能;当压力超过 0.5 MPa、达到 0.8 MPa 后,大量玻璃微球破裂,不再具备敏化效果。

图 3 分别为亚硝酸钠在 0、0.1、0.2、0.3 MPa 及卸压复原下同一位置放大 400 倍的显微拍摄图。化学敏化中的气泡是亚硝酸钠经过化学反应得到的。在 0 MPa 时,气泡大小不一,小气泡占大部分面积,形状多呈圆形或椭圆形;在 0.1 MPa 下,气泡开始慢慢变小,小气泡有受压移动现象,并融入到附近大气泡中;压力达到 0.2 MPa 时,很多微小气泡已经很难测量,已经不具备敏化条件;0.3 MPa 下,超过 90% 以上的气泡均形成微小的小点,均不具备敏化效果,但无明显的气泡破裂现象。对炸药进行卸压处理后得到复原,见图 3(e);此时,被压缩的气泡恢复到一定粒径,由于受到外界压力作用,炸药中的小气泡融入到较大气泡中,使得气泡粒径的均一性比加压之前更好,气泡形状也更加规则,呈自然球形。

2.2 粒径分析

分别观察亚硝酸钠(化学)敏化和玻璃微球(物理)敏化的乳化炸药在不受压、受压时和受压后 3 个状态下敏化剂的变化,并使用 ImageJ 软件分析图片,得到两种敏化方式下各状态测得的微粒参数,如

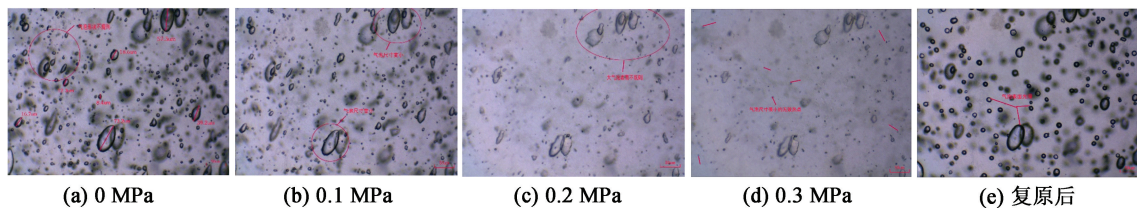


图 3 亚硝酸钠气泡微观图

Fig. 3 Microscopic images of sodium nitrite bubbles

表 2 所示。

表 2 两种敏化方式下乳化炸药静压加载微粒参数
Tab. 2 Static pressure loading particle parameters of emulsion explosive sensitized by two methods

敏化方式	压力/MPa	个数	总面积/ μm^2	面积占比/%
亚硝酸钠	0	150	287 907.84	23.43
	0.1	150	233 373.69	18.99
	0.2	145	165 396.48	13.46
	0.3	39	98 795.52	8.04
	0(复原)	120	415 948.80	33.85
玻璃微球	0	50	70 147.67	22.95
	0.3	50	93 737.07	30.66
	0.5	43	73 577.42	24.07
	0.8	24	51 660.01	16.90
	0(复原)	24	57 162.35	18.70

图 4 给出了静压加载条件下乳化炸药化学敏化气泡粒径及数量的变化。随着外界压力的增加,敏化气泡的粒径逐渐变小。但压力不同,粒径变小的速率也不同;压力越大,粒径下降的斜率也越大,最终导致气泡无法形成有效热点,炸药发生半爆或拒爆。当外加压力卸载,气泡粒径逐渐恢复。从图 4 可以看出:复原后的乳化炸药中气泡粒径达到 20 μm 的数量为 76 个,占总数的 50.66%;30 μm 左右

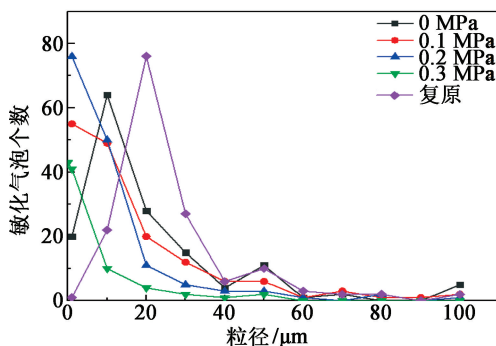


图 4 不同压力条件下亚硝酸钠敏化气泡数量与粒径的关系
Fig. 4 Relationship between numbers and particle sizes of bubbles produced by sodium nitrite sensitization under different pressure conditions

的数量为 27 个,占总数的 18.00%;所以,粒径在 20~30 μm 左右的气泡个数占总数的 68.66%,与未加压前相比,复原后的粒径大小更加均匀。

图 5 中:0、0.3、0.5 MPa 下,玻璃微球的分布没有太大差异;但 0.3 MPa 与 0 MPa 时相比,相同粒径的微球数量略微减少。分析原因,是因为有少部分玻璃微球完整度不高,有微小裂缝或外壳尺寸薄厚不均匀;在压力达到 0.3 MPa 时被压碎,但并不影响乳化炸药整体的爆轰性能。0.5 MPa 时的数据与 0.3 MPa 时并无太大区别,说明完整的玻璃微球具有良好的抗压性能。当压力达到 0.8 MPa 时,大部分玻璃微球发生破碎,这是导致在较大压力下乳化炸药减敏的主要原因。如图 5 所示,释放压力后,玻璃微球数量并没有增加,说明玻璃微球的破碎是不可逆的。

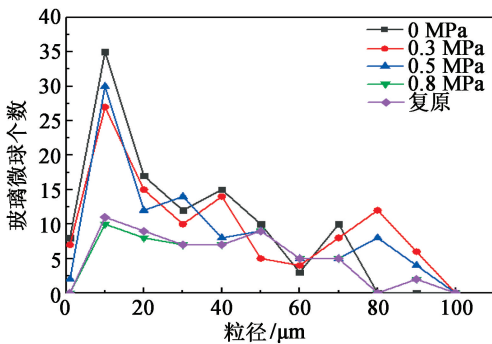


图 5 不同压力条件下玻璃微球数量与粒径的关系

Fig. 5 Relationship between numbers and partial sizes of glass microsphere under different pressure conditions

2.3 复原性实验

为了检验上述两种敏化方式乳化炸药的复原性,进行了加压前、后乳化炸药的猛度和爆速实验。猛度测量采用铅柱压缩法,取高度为 60 mm 的铅柱标准件以及制作好待测的乳化炸药样品,质量为 50 g;炸药爆速的测试方法参考国标 GB/T13228—2015 实验方法。

为了减少人为因素对乳化炸药复原性的影响,实验前,将准备好需要测量爆速和猛度的炸药试样部分进行加压处理。化学敏化的乳化炸药加压到 0.3 MPa、复原 2 h 后进行实验;物理敏化的乳化炸药加压到 0.8 MPa、复原 2 h 后进行实验。每组实验测量 3 次,结果取平均值,如表 3 所示。

从表 3 中可以看出:卸压复原后与加压前相比,化学敏化乳化炸药爆速与猛度相差不大,有略微的能量升高现象,爆速升高了 75 m/s,但在可接受误差范围之内;物理敏化的乳化炸药爆速降低了 1 510 m/s,铅柱压缩量降低了 7.06 mm。

表 3 加压前、后乳化炸药的爆炸性能参数

Tab. 3 Explosion performance parameters of emulsion explosives before and after pressurization

敏化方式	状态	爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	猛度/ mm
亚硝酸钠	未加压	4 311	14.74
	卸压复原	4 386	14.80
玻璃微球	未加压	5 397	17.67
	卸压复原	3 887	10.61

2.4 受压减敏原因分析

亚硝酸钠和玻璃微球分别通过化学反应生成微小气泡和中空微囊引入炸药,使炸药通过气泡敏化产生爆轰感度,并调节了炸药的密度。通过实时观察静压下乳化炸药微观变化的每一步,得出化学敏化和物理敏化的乳化炸药减敏方式各有不同,从表观上分析,都是因为加压时有效气泡载体数量减少,导致热点减少,炸药减敏。不同点在于:

1) 化学敏化从最初受外界静压作用时就表现出小气泡聚集,大气泡压缩面积减小,最后形成一个微小气泡,此时小气泡内压强与气泡外压强相等;卸压过程中,被压缩的微小气泡逐渐变大、扩张,形成标准的球形气泡。化学敏化乳化炸药在加压和复原的过程中,大部分气泡加压时受外压作用慢慢缩小,增大内部压强平衡外部加压,卸压后随着外部压强减小,调节自身大小以减小内部压强,达到平衡。玻璃微球敏化的乳化炸药在压力 0.5 MPa 时,多数敏化颗粒保持原有的形状;当压力增大到 0.8 MPa 时,大部分被压碎;由于压碎的玻璃微球不可恢复,所以复原后并没有加压前性能好。从本质上讲,化学敏化气泡与物理敏化微球是不相同的,化学敏化气泡是塑性的气泡内、外压强相同的热点,物理敏化微球是刚性的不具有复原能力的热点。

2) 化学敏化的乳化炸药中,随着压力增加,乳化基质有明显的破乳和分散不均匀现象。分析原因,是由于压力作用使得分散相受力不均造成的。物理敏化的乳化炸药同样也存在上述破乳现象,但观察发现,随着压力的增大,玻璃微球破碎,破碎后的玻璃微球周围破乳现象更加明显。分析原因,可能是当玻璃微球被压碎后会产生部分带有尖刺的碎屑,在压力的作用下,碎屑会产生相对位移,刺破周围油相结构,最终导致破乳现象明显。

3 结论

为研究受压状态下乳化炸药中敏化剂微观变化

的全过程,自行设计微观加压观察系统,得出以下结论:

1) 化学敏化和物理敏化的减敏均是有效热点减少和乳化基质破乳共同作用的结果。但两者有效热点减少的方式不同,且破乳程度也有部分差异。

2) 化学敏化气泡并不会产生破裂,而是通过调节自身尺寸大小控制气泡内部压强,达到内、外压强平衡,较小的气泡则通过界面膜作用融合到大气泡中;复原后,敏化气泡略显均匀,但对爆炸性能并没有多大影响。

3) 物理敏化在 0 ~ 0.3 MPa 之间时,劣质的玻璃微球会受压产生破裂。优质的玻璃微球可承受 0.5 MPa 的外加压力。0.8 MPa 时,玻璃微球大部分被压碎,与初始数量相比减少 2/3,且卸压后不可复原。

参 考 文 献

- [1] 刘磊,汪旭光,张成良. 受静压作用乳化炸药的实验研究[J]. 爆破,2014,31(2):139-143.
LIU L, WANG X G, ZHANG C L. Experimental research of emulsion explosives under static effect [J]. Blasting, 2014, 31(2): 139-143.
- [2] LIU L, LIU S Z, ZHAO H Q. Influence of compound sensitizers on compression resistance of deep water of emulsion explosives [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3044 : 738-743.
- [3] LIU L, ZHANG Z H, WANG Y, et al. Experimental study on the influence of chemical sensitizer on pressure resistance in deep water of emulsion explosives [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 128:012137.
- [4] 张立,熊苏,刘洁,等. 乳化炸药抗静水压力实验研究 [C]//中国工程院. 第 233 场中国工程科技论坛:爆破新理论、新技术与创新成果暨第十一届中国爆破行业学术会议论文集. 北京:高等教育出版社,2016:1027-1031.
ZHANG L, XIONG S, LIU J, et al. Experimental research on anti-hydrostatic pressure of emulsion explosives [C]// Chinese Academy of Engineering. The 233th China Engineering Science and Technology Forum: Proceedings of New Theory and New Technology of Blasting and Innovation Achievements and the 11th China Blasting Industry Academic Conference. Beijing: Higher Education Press, 2016: 1027-1031.
- [5] 汪泉,徐定博,张显丕. 乳化炸药水下爆炸能量输出特性的实验研究 [J]. 山东工业技术,2016(23):297-298.
- [6] 龚悦,汪旭光,何杰,等. 玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸能量的影响研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2017,47(5):443-447.
GONG Y, WANG X G, HE J, et al. Influence of glass microsphere content on underwater explosion energy emulsion explosives [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(5): 443-447.
- [7] 司剑峰. 水下爆破冲击传播理论分析及试验研究 [D]. 武汉:武汉科技大学,2013.
SI J F. Theoretical analysis and test research on shock wave of underwater explosion [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.
- [8] 陈江涛,吴红波,朱可可,等. 树脂微球对乳化炸药爆轰性能影响的实验研究 [J]. 安徽化工,2019,45(1):52-54,59.
CHEN J T, WU H B, ZHU K K, et al. Experimental study on the effect of sensitization method on detonation performance of emulsion explosives [J]. Anhui Chemical Industry, 2019,45(1):52-54,59.
- [9] 郭亮. 深水型乳化炸药水下爆轰数值计算和实验研究 [D]. 大连:大连理工大学,2020.
GUO L. Numerical calculation and experimental study on underwater detonation of deep water emulsion explosives [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [10] 陈东梁,颜事龙,刘义,等. 动压作用下乳化炸药微结构变化的实验 [J]. 煤炭学报,2006,31(3):287-291.
CHEN D L, YAN S L, LIU Y, et al. Experiment on microstructure changing of emulsion explosives under dynamic pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2006,31(3): 287-291.
- [11] 张续,吴红波,朱可可,等. 中空玻璃微球在抗压乳化炸药中的研究 [J]. 火工品,2020(5):48-51.
ZHANG X, WU H B, ZHU K K, et al. Application of hollow glass microspheres in emulsion explosives [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2020(5): 48-51.
- [12] 松本荣,田中雅夫,韩学波. 关于含水炸药在加压下的爆轰及复原性研究 [J]. 爆破器材,1987(1):36-39.
- [13] 刘磊. 乳化炸药在水下爆破中抗水抗压性能的实验研究与机理分析 [D]. 昆明:昆明理工大学,2010.
LIU L. Experimental study and mechanism analysis of water and pressure resistance of emulsion explosives in underwater blasting [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010.