

玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸能量的影响研究

龚悦¹, 汪旭光², 何杰³, 颜事龙^{1,3}, 程扬帆³

(1.安徽理工大学土木建筑学院,安徽淮南 232001; 2.北京矿冶研究总院,北京 100160; 3.安徽理工大学化学工程学院,安徽淮南 232001)

摘要:为了研究玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸能量的影响,分别在乳胶基质中外加2%,3%,4%,5%,6%的玻璃微球,制得5种乳化炸药,在相同的实验条件下,采用水下爆炸法对其进行测试.结果表明,玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸能量有较大影响,在一定范围内,随着玻璃微球含量的增加,乳化炸药水下爆炸各能量参数逐渐变大.当玻璃微球质量分数为4%时,其水下爆炸能量输出最大,若玻璃微球含量继续增加则乳化炸药水下爆炸能量随之降低.

关键词:乳化炸药;玻璃微球;冲击波能;气泡能

中图分类号:TQ560.7; TJ55 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2017.05.010

引用格式: 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 Yue, WANG Xuguang, HE Jie, et al. Influence of glass microspheres content on underwater explosion energy of emulsion explosives[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017,47(5):443-447.

Influence of glass microspheres content on underwater explosion energy of emulsion explosives

GONG Yue¹, WANG Xuguang², HE Jie³, YAN Shilong^{1,3}, CHENG Yangfan³

(1.School of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160, China;

3. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To study the influence of glass microsphere content on underwater explosion energy of emulsion explosives, emulsion matrix was mixed with 2%, 3%, 4%, 5% and 6% glass microspheres respectively to make five kinds of emulsion explosives, and underwater explosions were tested under the same experimental conditions. Results show that glass microsphere content has a great influence on underwater explosion energy of emulsion explosives, and that the energy parameters of underwater explosion rise with the increase of glass microsphere content within a certain range. When the mass fraction of glass microspheres is 4%, underwater explosion energy output of emulsion explosives reaches maximum, and underwater explosion energy decreases when the glass microspheres content further increases.

Key words: emulsion explosive; glass microsphere; shock wave energy; bubble energy

收稿日期:2016-08-31;修回日期:2017-02-28

基金项目:国家自然科学基金(51174183),安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2015A074),安徽省自然科学基金青年项目(1608085QA15)资助.

作者简介:龚悦,女,1987年生,博士生.研究方向:含能材料爆轰及热分析.E-mail:yuegong_aust@163.com

通讯作者:何杰,博士/教授. E-mail:jhe@aust.edu.cn

0 引言

乳化炸药以其优良的抗水性、安全性、爆炸性能被广泛地用于各种工程爆破中^[1].敏化剂作为乳化炸药的重要组成部分之一,其对乳化炸药水下爆炸能量有着显著的影响,而水下爆炸能量又涉及水下爆破工程的效果^[2].常用的物理敏化材料有空心玻璃微球、膨胀珍珠岩、泡沫材料等,但在水下爆破作业中,使用封闭的空心微球尤其是玻璃微球是有利的^[3],因为玻璃微球在起爆前不可压缩,这样便使得乳化炸药能在较高的压力环境下保持低密度的特性,而这一特性也是其稳定爆轰所必需的.近年来国内外学者对玻璃微球敏化的乳化炸药做了大量研究,并取得了一定成果.颜事龙等^[4]对不同敏化气泡载体敏化的乳化炸药的减敏压力进行了研究,结果表明,随着压力的增加玻璃微球敏化的乳化炸药的减敏速率最慢;吴红波^[5]等人研究了动压作用下敏化剂对乳化炸药破乳程度的影响,玻璃微球敏化的乳化炸药其抗动压性能高于膨胀珍珠岩敏化的乳化炸药;刘蓉^[6]等人从微观力学角度研究了玻璃微球敏化的乳化炸药的爆轰机理;程扬帆^[7]等人通过水下爆炸实验研究了 MgH_2 对乳化炸药抗冲击波性能的影响,并与玻璃微球敏化的乳化炸药进行了对比.但以上工作中都没有系统地研究玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸性能的影响规律.因此,本文选用玻璃微球作为敏化剂,通过水下爆炸实验对不同含量玻璃微球敏化的乳化炸药进行研究,将得到的冲击波冲量、冲击波能、气泡能、总能量等参数作为评判乳化炸药水下爆炸能量的标准,这对于优化乳化炸药配方、提高水下爆炸能量等方面有着重要的指导意义.

1 实验

1.1 实验样品

100g 乳化基质由 69.5g 硝酸铵、12.2g 硝酸钠、10g 水、5.7g 油相和 2.6g 乳化剂构成.在其他组分、含量、制备工艺不变的情况下,玻璃微球添加量分别为 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 乳化炸药编号依次对应为 1#, 2#, 3#, 4#, 5#. 实验所用玻璃微球来自 3M 公司,平均粒径为 $55\mu\text{m}$,密度为 $0.25\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

1.2 实验测试系统

水下爆炸测试系统^[8]由受测药包、爆炸水池、信息采集系统组成,如图 1 所示.信息采集系统由传感

器、放大器、示波器组成.其中传感器是美国 PCB 公司生产的型号为 138A06 的 ICP(integrated circuit piezoelectric)水下爆炸压力传感器;示波器采用 TELEDYNE LECROY 公司生产的 HDO4034 型示波器.爆炸水池深 3.62m,直径为 5.5m,壁厚 8mm,实验时通过架在水池上方的支架将绑有球形药包、ICP 压力传感器的铁架移至水池中央 2/3 水深处,因为此处可消除来自水池底部和水面边界效应造成的影响^[9-11].使用发爆器将球形药包通过 1 发 8 号工业雷管引爆,ICP 压力传感器将捕捉到的压力信号通过放大器呈现在示波器上,通过示波器上压力信号的大小可判断乳化炸药水下爆炸能量的高低.值得注意的是,绑定球形药包和压力传感器时要保证药包的中心与压力传感器的敏感元件在同一水平面上,且距离为 0.5m.

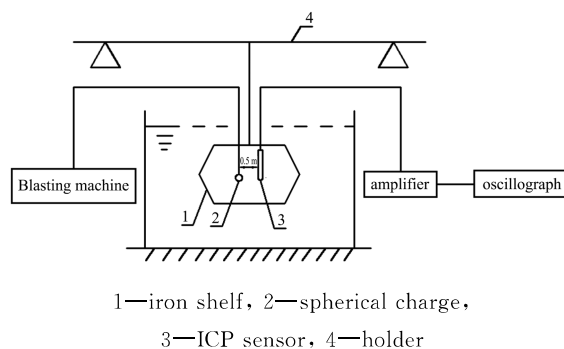


图 1 水下爆炸能量测试装置

Fig.1 Test apparatus of underwater explosion energy

2 实验结果与分析

2.1 水下爆炸参数计算

球形装药在水下爆轰时,炸药能量转变成爆轰产物的内能,并以极大的速度向外压缩水介质从而形成了冲击波,此过程消耗了一部分能量;爆轰产物利用剩下的一部分能量以气泡的形式向外膨胀,气泡内部的压力与周围静水压此消彼长,不断地产生气泡脉动.水下爆炸能量可由冲击波能、气泡能和总能量等确定.

2.1.1 冲击波冲量

冲击波冲量是冲击波压力时程曲线对时间的积分,因此水下爆炸冲击波冲量的计算公式为

$$I = \int_0^{6.7\theta} P(t) dt \quad (1)$$

式中, I 为冲击波冲量,单位为 $\text{kPa}\cdot\text{s}$; θ 为冲击波衰减时间,单位为 μs ; $P(t)$ 为冲击波压力时程曲线.

2.1.2 比冲击波能

比冲击波能的计算公式^[8]为

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_w \cdot C_w \cdot W} \int_0^{6.7\theta} P(t)^2 dt \quad (2)$$

式中, E_s 为测点处比冲击波能, 单位为 $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; ρ_w 为水的密度, 取 $1\,000\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_w 为水中声速, 取 $1\,460\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; W 为装药质量, 单位为 kg ; R 为传感器至药包中心的距离, 单位为 m ; θ 为冲击波衰减时间, 单位为 μs ; $P(t)$ 为冲击波压力时程曲线。

2.1.3 比气泡能

有限水域水下爆炸比气泡能公式^[8]为

$$E_b = \frac{1}{8C^3 \cdot K_1^3 \cdot W} (\sqrt{1 + 4CT_b} - 1)^3 \quad (3)$$

式中, C, K_1 都是由给定水池、装药位置和装药量确定的常数, 其中 $K_1 = 1.135\rho_w^{\frac{1}{3}} P_b^{-\frac{5}{6}}$; 由于实测中受气压条件的影响, 限定静水压比较困难, 因此需要将测得的气泡脉动周期 t_b 与装药深度处的静水压和实测的水面大气压修正成同一标准压力下的气泡脉动周期 T_b : $T_b = t_b \left(\frac{P_H}{P_{H0}}\right)^{\frac{5}{6}}$; P_H 为装药深度处的总静水压, 单位为 Pa ; P_{H0} 为装药深度处的标准压力, 单位为 Pa 。

2.1.4 总能量

水下爆炸总能量公式^[8]为

$$E_t = k_f (\mu \cdot E_s + E_b) \quad (4)$$

$$\mu = 1 + 1.3328 \times 10^{-2} p_{C-J} - 6.5775 \times 10^{-5} p_{C-J}^2 + 1.2595 \times 10^{-7} p_{C-J}^3 \quad (5)$$

$$p_{C-J} = \frac{1}{4} \rho_0 D^2 \quad (6)$$

表 1 不同密度样品的水下爆炸能量参数

Tab.1 Energy parameters of five samples with different densities

样品	$\rho_0 /$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$P_m /$ MPa	$t_b /$ ms	$\theta /$ μs	$I /$ ($\text{kPa} \cdot \text{s}$)	$E_s /$ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$E_b /$ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$E_t /$ ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1#	1.23	9.40	27.527	7.9	0.33	0.075 0	0.235 7	0.312 4
2#	1.21	9.63	27.946	7.6	0.38	0.075 3	0.264 8	0.341 9
3#	1.19	22.53	51.454	25.1	0.99	1.371 3	1.649 7	3.135 7
4#	1.18	20.75	50.162	25.7	0.93	1.191 0	1.529 0	2.817 7
5#	1.16	19.78	49.389	27.4	0.90	1.153 8	1.460 4	2.707 1

注: t_b represents the period of bubble pulsation, θ represents the time constant of shock wave's exponential decay.

为了直观地呈现出玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸能量参数的影响, 图 4 给出了 5 组样品水下爆炸能量参数分布图。

式中, E_t 为炸药水下爆炸的总能量, 单位为 $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; μ 是冲击波损失系数; ρ_0 为炸药密度, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; D 为炸药爆速, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 其中球形药包的药型系数 k_f 为 1。

2.2 水下爆炸测试结果

每组样品平行测试 3 次, 取平均值表示乳化炸药水下爆炸的各参数, 图 2 给出了同一种样品在 3 次平行实验中的冲击波压力时程曲线, 以玻璃微球含量(质量分数)为 4% 时为例。由图 2 可知, 实验平行性较好, 且计算得到 3 发实验的冲击波压力峰值误差小于 4%^[12]。

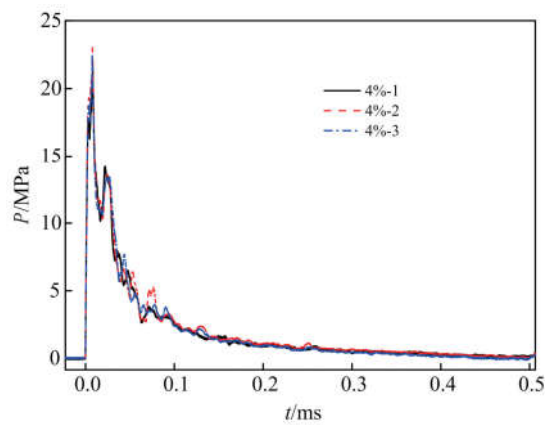


图 2 3 发平行试验的冲击波压力时程曲线对比
Fig.2 Comparison of pressure-time curves of three parallel experiments for sample 3#

将实验所得数据代入上述式(1)~(6), 便可得到 5 组乳化炸药的水下爆炸能量参数, 计算结果如表 1 所示。图 3 给出了 5 组样品的冲击波时间历程曲线。

当乳胶基质中添加的玻璃微球含量为 2% 时, 通过与单发雷管水下爆炸能量对比判断出乳化炸药在水中发生拒爆; 由表 1 和图 3、图 4 可知, 玻璃微

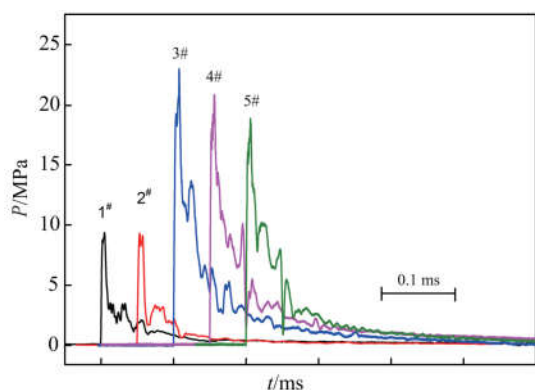


图 3 冲击波时间历程曲线

Fig.3 Time histories of shock wave

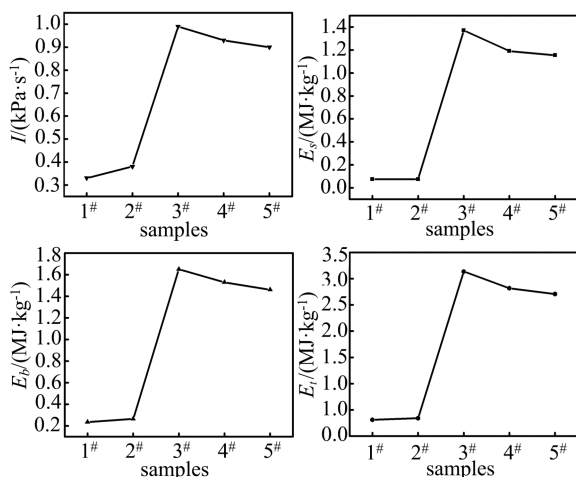


图 4 5 组样品水下爆炸能量参数分布图

Fig.4 Distribution maps of energy parameters of five samples' underwater explosion

球添加量增至 3% 时, 能量参数略有增加; 当加入 4% 的玻璃微球时, 乳化炸药水下爆炸各能量参数均有显著提升, 且上升速率很大. 当继续添加玻璃微球含量达到 5% 时, 乳化炸药的能量参数随之降低, 峰值压力 P_m 、冲量 I 、比冲击波能 E_s 、比气泡能 E_b 、总能量 E_t 分别下降了 7.90%, 6.06%, 13.15%, 7.32%, 10.14%; 若增加玻璃微球的含量至 6%, 乳化炸药的能量参数继续下降, 分别降低 4.67%, 3.23%, 3.12%, 4.49%, 3.93%, 相较于之前降幅明显变小.

对比图 4 中的 4 组图发现, 玻璃微球含量对冲量 I 、比冲击波能 E_s 、比气泡能 E_b 、总能量 E_t 这几种水下爆炸能量参数的作用效果一致. 当玻璃微球含量低于 3% 时能量参数都在一个极低的数值范围内, 随着玻璃微球含量的增加, 各参数数值也随之增大, 且增幅较大, 在玻璃微球含量为 4% 时达到最大

值, 随后各能量参数随着玻璃微球含量的增大而减小, 但下降坡度较平缓.

2.3 结果分析

乳化炸药具有一定的爆轰感度, 它指的是乳化炸药在外界冲能的作用下发生爆炸的难易程度. 在比较重要的影响乳化炸药爆轰感度的因素中, 敏化剂、密度分列其中^[1]. 玻璃微球作为敏化剂将微小气泡引入, 能够调节乳化炸药的密度. 对于本实验而言, 当玻璃微球含量在 2%~4% 时, 乳化炸药样品的冲量 I 、比冲击波能 E_s 、比气泡能 E_b 、总能量 E_t 等水下爆炸能量随着玻璃微球含量的增加而升高, 原因在于, 当玻璃微球含量在较低值时, 能够提供热点的敏化气泡数量很少, 导致乳化炸药在爆轰过程中的热点不足, 微小气泡并不能急剧升温形成灼热点激发乳化炸药爆炸, 从而乳化炸药的爆轰感度降低出现了拒爆现象. 但随着玻璃微球含量的增加, 乳化炸药中的微小气泡不断被加热, 热点逐渐增多, 体系内的压力、温度升高, 使得乳化炸药反应加速, 并在玻璃微球含量为 4% 时, 水下爆炸能量达到最大值.

但是当玻璃微球的含量由 4% 逐渐升至 6% 时, 样品的爆炸威力不升反降, 是因为乳化炸药爆轰所需热点的数量一定, 当继续添加玻璃微球时只能导致炸药密度降低、体系内热点过剩, 给爆破效果带来不利影响. 分析认为, 乳化炸药中细小的氧化剂液滴与油相材料的油膜紧密接触才使得爆轰能够被激发且传递^[13], 而玻璃微球作为敏化剂夹在水相和油相的界面膜之间, 使得乳化炸药中存在很多微界面^[14], 减少了油、水相的接触面积; 另一方面, 随着玻璃微球含量的增加, 体系内惰性成分也随之增加, 乳化炸药产生的能量逐渐减少, 所以导致样品的冲量、比冲击波能、比气泡能、总能量等水下爆炸性能降低.

3 结论

玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸能量有较大的影响. 在 2%~6% 范围内, 乳化炸药水下爆炸各能量参数先是随着玻璃微球含量的增加而升高, 当玻璃微球含量为 4% 时, 乳化炸药对应的冲量 I 、比冲击波能 E_s 、比气泡能 E_b 、总能量 E_t 增加明显并达到最大值. 此后, 若继续添加玻璃微球, 则乳化炸药水下爆炸性能呈现出降低的趋势.

参考文献(References)

- [1] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 3-11.
- [2] BJARNHOLT G. Explosive expansion works in under water detonations [C]//Proceedings of the 6th Symposium (International) on Detonation, San Diego, 1976: 540-550.
- [3] MEDVEDEV A E, FOMIN V M, RESHETNYAK A Y. Mechanism of detonation of emulsion explosives with microballoons [J]. Shock Waves, 2008, 18 (2): 107-115.
- [4] 颜事龙, 陈东梁. 不同敏化气泡载体敏化的乳化炸药减敏压力研究[J]. 兵工学报, 2006, 27(5): 887-890.
YAN Shilong, CHEN Dongliang. Research on the desensitization pressure of emulsion explosives sensitized by different sensitizing bubble carriers [J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(5): 887-890.
- [5] 吴红波, 颜事龙, 刘锋. 动压作用下敏化剂对乳化炸药破乳程度的影响[J]. 含能材料, 2008, 16(3): 247-250.
WU Hongbo, YAN Shilong, Liu Feng. Effect of sensitizing agent on demulsification degree of emulsion explosive under dynamic pressure [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(3): 247-250.
- [6] 刘蓉, 程扬帆, 周宗福, 等. 玻璃微球敏化的乳化炸药数学模型[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(12): 990-994.
LIU Rong, CHENG Yangfan, ZHOU Zongfu, et al. A mathematical model for the detonation reaction of emulsion explosives with microballoons [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(12): 990-994.
- [7] 程扬帆, 马宏昊, 沈兆武. MgH_2 对乳化炸药的减敏影响实验[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(4): 427-432.
CHENG Yangfan, MA Honghao, SHEN Zhaowu. Experimental research on pressure desensitization of emulsion explosive sensitized by MgH_2 [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(4): 427-432.
- [8] 张立. 爆破器材性能与爆炸效应测试[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006: 259-266.
- [9] 张立, 汪大立. 水下爆炸炸药能测量消除边界效应的研究[J]. 爆破器材, 1995, 24(2): 1-5.
ZHANG Li, WANG Dali. A study on elimination of the boundary effects in underwater explosion testing [J]. Explosive Materials, 1995, 24(2): 1-5.
- [10] 陈正衡. 工业炸药测试新技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1982: 88-105.
- [11] 王建灵, 赵东奎, 郭炜. 水下爆炸能量测试中炸药入水深度的确定[J]. 火炸药学报, 2002(2): 30-32.
WANG Jianling, ZHAO Dongkui, Guo Wei. Determination of the reasonable depth of explosives in water to measure under water explosive energy [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002 (2): 30-32.
- [12] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 3-21.
- [13] 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 Yinjun, WANG Xuguang, YAN Shilong. Relationship of emulsifier content to desensitization of emulsion explosives [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2005, 56(9): 1809-1815.
- [14] 胡福增, 陈国荣, 杜永娟. 材料表界面[M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2007: 56-78.