高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

第 30 卷 第 4 期
2016 年 8 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 30, No. 4
Aug., 2016

文章编号：1000-5773(2016)04-0311-06

新型乳化炸药动压减敏装置的数值模拟研究*

程扬帆[1]，汪 泉[1]，缪广红[1]，沈兆武[2]，颜事龙[1]

(1. 安徽理工大学弹药工程与爆炸技术系，安徽淮南 232001；
2. 中国科学技术大学近代力学系，安徽合肥 230027)

摘要：利用 LS-DYNA 动力学有限元软件，对新型乳化炸药动压减敏装置的作用过程进行了三维数值模拟，研究了该装置在水下爆炸过程中的流场分布特征，及其结构设计对实验结果的影响。对比研究结果表明，新型乳化炸药动压减敏装置中，受压乳化炸药之间的排距是影响实验精度的关键因素，当乳化炸药的半径为 2 cm、主发药 RDX 的质量为 10 g 时，乳化炸药的最小排距(即前排乳化炸药对后排乳化炸药影响最小时的排距)为 20 cm。因此，在乳化炸药动态减敏实验开展之前，可以通过数值模拟的手段预先确定最小排距，减小实验误差。该方法可为乳化炸药动压减敏的后续深入研究提供参考。

关键词：压力减敏；水下爆炸；数值模拟；乳化炸药；延迟爆破

中图分类号：O389 **文献标志码**：A

doi：10.11858/gywlxb.2016.04.007

1 引 言

乳化炸药在延迟爆破作业中存在“动压减敏”的问题[1-3]。这是由于延迟爆破中先起爆的乳化炸药会对后爆的乳化炸药产生动压载荷，导致后爆乳化炸药的敏化气泡被破坏，从而影响乳化炸药的爆轰性能，甚至可能发生半爆和拒爆。乳化炸药的动压减敏不仅影响爆破效果，而且在处理盲炮时容易引发安全事故。在实验室条件下如何合理设计延迟爆破的模拟实验，对乳化炸药的动压减敏研究至关重要。通过文献调研发现，水下爆炸法是研究乳化炸药动压减敏的主要方法[4-6]，将引爆的主发药作为动压源，水作为传压介质，乳化炸药因受到冲击波的动压作用而发生减敏，实验装置如图 1 所示。然而，随着研究的深入，传统的乳化炸药动压减敏装置已不能很好地满足现有实验的要求。在我们的前期研究中，通过对传统动压减敏装置进行优化设计，得到一种新型动压减敏装置(见图2)，使

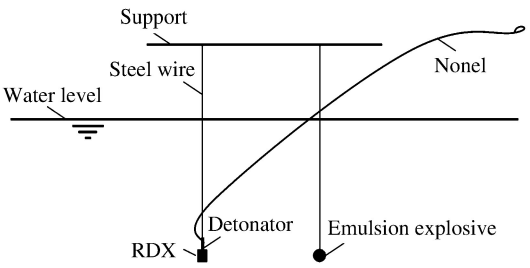


图 1 传统的冲击波动压减敏实验原理图

Fig. 1 Schematic of traditional dynamic pressure desensitization experiment

* **收稿日期**：2015-05-18；**修回日期**：2015-07-08

基金项目：国家自然科学基金(51374189，11502001)；安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2015A074)；安徽省自然科学基金(1608085QA15)

作者简介：程扬帆(1987—)，男，讲师，主要从事含能材料的实验和数值模拟研究.
E-mail：cyf518@mail.ustc.edu.cn

© 2016 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics

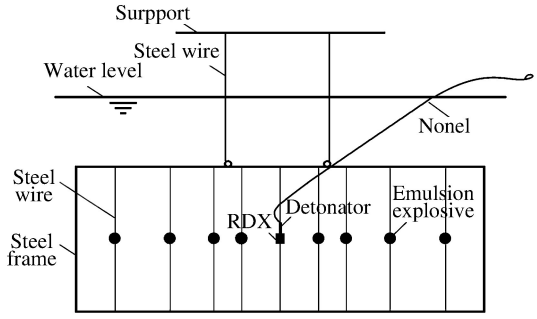


图 2 改进后的冲击波动压减敏实验原理图

Fig. 2 Schematic of improved dynamic pressure desensitization experiment

单个主发药能够同时获得多个受压的乳化炸药样品，不仅节约了实验成本，而且保证实验条件的均一性，减小了实验误差；该新型装置已广泛应用于乳化炸药的动压减敏研究中，取得了很好的实验效果[7-10]。然而，在水下爆炸实验中，该新型乳化炸药动压减敏装置中的流场分布特征及其对实验结果精度的影响尚未探明。因此，本研究拟通过数值模拟的方法，研究该装置在实验过程中的流场分布情况以及流场分布对实验结果的影响，为后续实验装置的优化和乳化炸药动压减敏实验的开展提供指导。

2 装置简介与存在的问题

如图 2 所示，该新型动压减敏装置的主体结构为矩形钢架，主发药压装 RDX（动压源）被固定在矩形钢架的中心，在其两边不同距离（距离可调）处用钢丝将乳化炸药样品绑在矩形钢架上，并使主发药和乳化炸药样品的中心处于同一水平线上，然后将该装置完全浸没在水中，最后引爆主发药在水中形成冲击波，对不同距离的乳化炸药样品进行不同强度的动压加载，从而模拟延迟爆破中乳化炸药的动压减敏现象。通过改变主发药两边乳化炸药的配方，可以研究在相同冲击强度下不同配方的乳化炸药的抗动压减敏性能（横向比较）；通过调整乳化炸药样品与主发药的距离，可以研究某一配方乳化炸药的抗动压减敏性能与受压强度的关系及变化规律（纵向比较）。

然而，在该新型装置水下爆炸动压减敏实验中，除最靠近中心主发药（第一排）的两个乳化炸药样品外，其余乳化炸药样品受到的冲击波加载势必会受到前方乳化炸药阻挡的影响。前期研究[7-10]主要集中在相同冲击强度下不同配方的乳化炸药抗动压减敏性能的横向比较，而在纵向比较研究中，前方乳化炸药的阻挡对后方乳化炸药的冲击波动压加载的影响不可忽视。因此，有必要对该新型动压减敏装置的冲击波流场特征进行研究，分析流场分布对实验结果的影响，以期通过装置的优化设计将纵向比较研究中的实验误差减小到最低。

3 数值模拟研究

3.1 计算模型

我们主要研究前方乳化炸药的阻挡对后方乳化炸药冲击波加载的影响，因此考虑到问题的相似性和计算的经济性，可将问题简化，只模拟研究第一排受压乳化炸药对冲击波的阻挡以及其后方的流场特征。采用 cm-g-μs 单位制进行三维建模，如图 3 所示，水域范围为 100 cm×100 cm×100 cm，主发药压装 RDX 的质量为 10 g，长、宽、高分别为 2.0、2.0、2.4 cm，球形乳化炸药样品的质量为 30 g，半径为 2 cm，压装 RDX 距离第一排乳化炸药 25 cm。利用 LS-DYNA 动力学有限元软件进行计算。压装 RDX 和水采用多物质 ALE 算法，待受压的乳化炸药采用 Lagrange 网格建模，采用渐变网格划分单元，并对模型边界施加无反射边界条件。乳化炸药与水之间使用流固耦合算法。

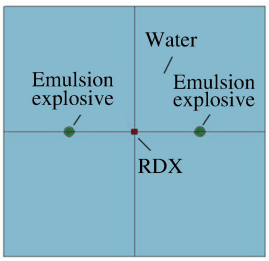


图 3 三维计算模型

Fig. 3 Three-dimensional calculation model

在爆炸载荷作用下，水采用 Mie-Grüneisen 状态方程，其具体形式取决于水的状态，在压缩状态下

$$p_{\mathrm{w}}=\frac{\rho_{\mathrm{w0}}C^{2}\mu\left[1+\left(1-\frac{\gamma_{0}}{2}\right)\mu-\frac{a}{2}\mu^{2}\right]}{\left[1-(S_{1}-1)\mu-S_{2}\frac{\mu^{2}}{\mu+1}-S_{3}\frac{\mu^{3}}{(\mu+1)^{2}}\right]^{2}}+(\gamma_{0}+a\mu)e \tag{1}$$

在膨胀状态下

$$p_{\mathrm{w}}=\rho_{\mathrm{w0}}C^{2}\mu+(\gamma_{0}+a\mu)e \tag{2}$$

式中:p_{w}、ρ_{w}为水的压力和密度,下标"0"代表初始状态;$\mu=\rho_{\mathrm{w}}/\rho_{\mathrm{w0}}-1$,当 $\mu>0$ 时材料处于压缩状态,反之则为膨胀状态;C 为声速;γ_{0} 为 Grüneisen 系数;a 为体积修正系数;e 是单位体积内能;S_{1}、S_{2}、S_{3} 为实验拟合系数,具体参数见表 1。

表 1　水的 Mie-Grüneisen 状态方程参数

Table 1　State parameters of Mie-Grüneisen equation for water

C/(m/s)	S_1	S_2	S_3	γ_0	a
1480	1.92	0	0	0.35	0

乳化炸药的参数参见文献[11]。RDX 采用高能炸药材料模型,相应的爆炸气体采用 JWL 状态方程

$$p=A(1-\omega\eta/R_{1})\,\mathrm{e}^{-\frac{R_{1}}{\eta}}+B(1-\omega\eta/R_{2})\,\mathrm{e}^{-\frac{R_{2}}{\eta}}+\omega\eta\rho_{0}E \tag{3}$$

式中:$\eta=\rho/\rho_{0}$,ρ 为爆炸气体的密度,$\rho_{0}=1.78\ \mathrm{g/cm^{3}}$,为炸药的初始密度;$E$ 是高能炸药的单位体积内能,$\rho_{0}E=9.0$ GPa;模型参数 $A=581.4$ GPa,$B=6.8$ GPa,$R_{1}=4.1$,$R_{2}=1.0$,$\omega=0.35$。

通过调整模拟计算参数和网格划分方式,使 RDX 水下爆炸冲击波在无乳化炸药阻挡的情况下,其模拟结果与文献[12]中的实验结果一致,从而确定最终的计算模型。

3.2　冲击波流场的分布特征

图 4 是新型动压减敏装置在不同时刻的冲击波压力流场分布特征图。从图 4(c)可以看到,当冲击波到达第一排乳化炸药后,由于乳化炸药的阻挡,冲击波会发生绕射、反射和透射现象;由图 4(d)可以看到,与未受乳化炸药阻挡的情况(主发药上、下侧)相比,受到乳化炸药阻挡后冲击波的流场(主发药左、右侧)发生了变化,势必对冲击波的强度造成一定影响。为了研究前排乳化炸药对后排炸药冲击波压缩的影响,分别研究了不同位置处与流场分布图相对应的冲击波压力时程,并与未受乳化炸药阻挡的情况进行对比。

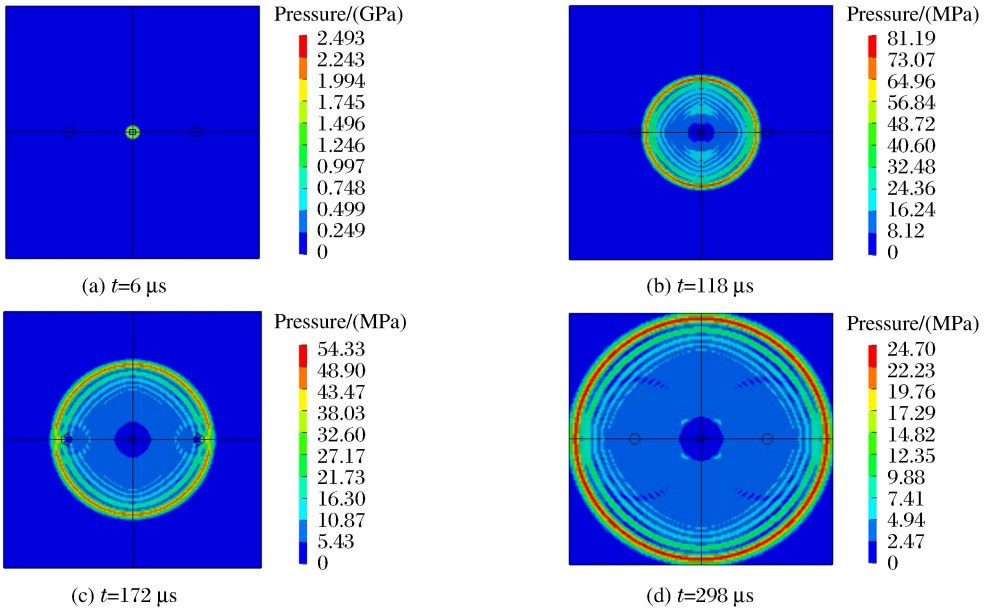
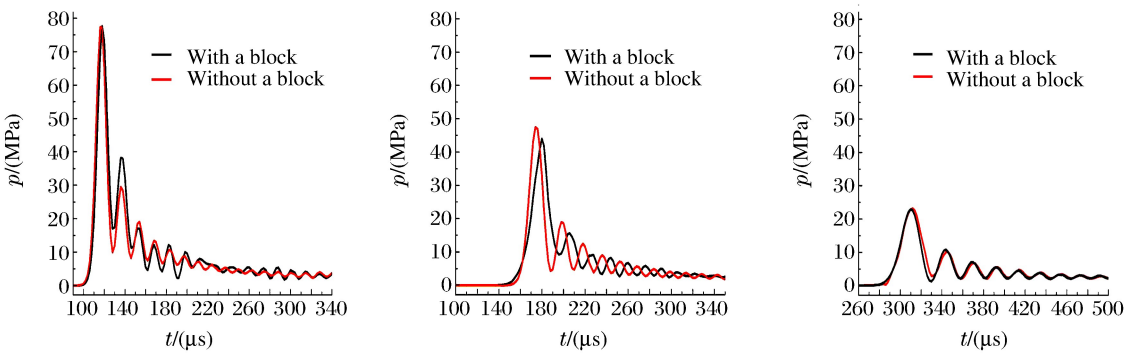


图 4　不同时刻(t)新型动压减敏装置的流场分布特征图

Fig. 4　Flow field distribution of new dynamic pressure desensitization device at different time

图 5 分别是冲击波刚到达第一排乳化炸药(距离 RDX 24 cm)、冲击波刚好绕过乳化炸药(距离 RDX 26 cm)和冲击波即将到达第二排乳化炸药(距离 RDX 50 cm)时,其压力时程曲线与相应的无乳化炸药阻挡情况的对比,表 2 是与图 5 相对应的模拟数据结果。由图 5 和表 2 可知,当冲击波刚到达乳化炸药时,乳化炸药的阻挡对冲击波的强度没有影响;当冲击波刚好绕过乳化炸药时,乳化炸药的阻挡使冲击波的强度降低了 7.2%;当冲击波绕过第一排乳化炸药且即将到达第二排乳化炸药时,由于冲击波的重新汇聚,使乳化炸药的阻挡对该处冲击波强度的影响降至 0.4%。模拟结果表明,前排乳化炸药的阻挡会对后排乳化炸药的冲击波压缩强度造成一定影响,但随着排距的增大,其影响程度逐渐减弱。



(a) 24 cm away from the RDX (b) 26 cm away from the RDX (c) 50 cm away from the RDX

图 5 若干临界位置处冲击波压力时程曲线与无阻挡情况的比较

Fig. 5 Comparison of shock wave pressure-history at several critical positions with unblocked condition

表 2 乳化炸药的阻挡对若干临界位置处冲击波压力的影响

Table 2 The influence of emulsion explosive on the shock wave at several critical positions

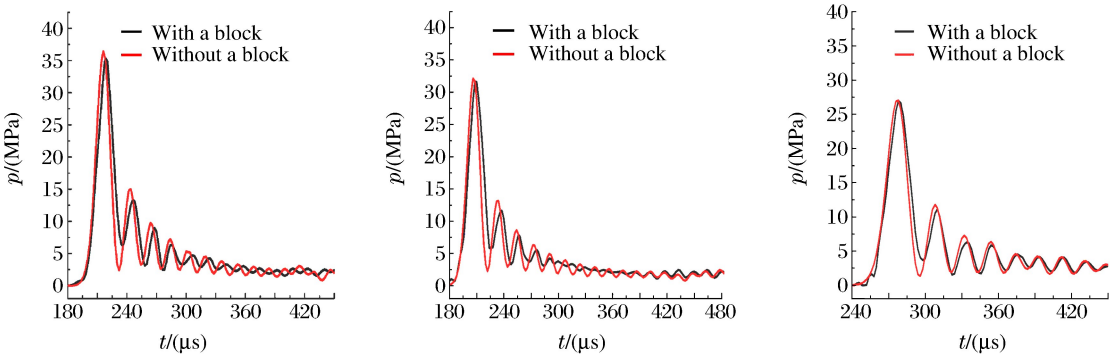
Spacing from the RDX/(cm)	Peak pressure/(MPa)		Influencing degree/(%)
	With a block	Without a block	
24	77.6	77.6	0
26	44.1	47.5	7.2
50	23.1	23.2	0.4

3.3 最小排距的确定

在研究乳化炸药抗动压减敏性能与受压距离的关系及变化规律(纵向比较)时,单次实验得到不同距离处的受压乳化炸药越多越好,而新型动压减敏装置的尺寸受到限制,因此,在不影响实验精度的情况下,应尽量减小乳化炸药之间的排距。最小排距是指动压减敏实验中当前排乳化炸药的阻挡对冲击波影响最小时,两排乳化炸药间距的最小值。图 6 分别是第一排乳化炸药后 10、15 和 20 cm 处冲击波的压力时程曲线与无阻挡情况的比较。根据图 5 和图 6 可得到第一排乳化炸药后不同位置处冲击波的压力峰值以及阻挡对冲击波的影响程度。

由表 3 可知,当排距为 10 cm 时,前排乳化炸药对后排乳化炸药冲击波压缩的影响程度为 2.7%;当排距为 15 cm 时,该影响程度降低到 0.6%;而当排距超过 20 cm 时,其影响程度降低到 0.4%。综合考虑实验设备的尺寸和实验精度,将本实验条件(球状乳化炸药的半径为 2 cm,RDX 的质量为 10 g)下的受压乳化炸药的最小排距设为 20 cm。

由于乳化炸药的阻挡,冲击波到达乳化炸药后会发生绕射、反射和透射现象。前排乳化炸药对后排乳化炸药冲击波压缩的影响程度不仅与冲击波强度有关,还与“障碍物”乳化炸药的尺寸等因素有关。所以,在进行动压减敏实验之前,可根据主发药的质量和受压乳化炸药的尺寸,通过数值模拟预先确定相邻乳化炸药样品之间的最小排距。



(a) 10 cm behind the 1st row of emulsion explosive　(b) 15 cm behind the 1st row of emulsion explosive　(c) 20 cm behind the 1st row of emulsion explosive

图 6　乳化炸药后不同位置处冲击波的压力时程曲线与无阻挡情况的比较

Fig. 6　Comparison of shock wave pressure-history at several positions behind the emulsion explosive with unblocked condition

表 3　前排乳化炸药的阻挡对其后不同位置处冲击波压力的影响

Table 3　The influence of emulsion explosive of front row on the shock wave at different following positions

Spacing from emulsion explosive of the 1st row/(cm)	Peak pressure/(MPa)		Influencing degree/(%)
	With a block	Without a block	
10	35.5	36.5	2.7
15	31.6	31.8	0.6
20	27.0	27.1	0.4
25	23.1	23.2	0.4

4　结　论

(1) 数值模拟结果表明,新型乳化炸药动压减敏装置中,前排乳化炸药对后排乳化炸药的阻挡会造成后排乳化炸药受到冲击波压缩的强度降低,但通过增大排距的方法可以使其影响降到最低。(2) 在新型动压减敏装置中,当乳化炸药的半径为 2 cm、主发药 RDX 的质量为 10 g 时,要使前排乳化炸药对后排乳化炸药的影响最小,则待受压乳化炸药的最小排距应设为 20 cm。(3) 在利用该装置进行乳化炸药动压减敏实验之前,可以通过数值模拟的方法确定最小排距,从而提高装置的使用率和实验精度。

References:

[1] 王尹军,吕庆山,汪旭光. 冲击波对含水炸药减敏作用的实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2004,24(6):558-562.
WANG Y J,LÜ Q S,WANG X G. Experimental study on the desensitization of water-bearing explosives subjected to shock wave [J]. Explosion and Shock Waves,2004,24(6):558-562.

[2] 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 S L,CHEN D L. Research on the desensitization pressure of emulsion explosives sensitized by different sensitizing bubble carriers [J]. Acta Armamentarii,2006,27(5):887-890.

[3] 颜事龙,张少波,刘　义. 煤矿许用乳化炸药动态压力下减敏的研究 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2003,23(3):27-31.
YAN S L,ZHANG S B,LIU Y. Study on the desensitization of the coal mine permitted emulsion explosives under dynamic pressure [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science),2003,23(3):27-31.

[4] 吴红波,颜事龙,刘　锋. 动压作用下乳化剂含量对乳化炸药破乳程度的影响 [J]. 火工品,2011(2):47-50.
WU H B,YAN S L,LIU F. Influence of emulsifier content on demuisification degree of emulsion explosive under dynamic pressure [J]. Initiators & Pyrotechnics,2011(2):47-50.

[5] NIE S. Pressure desensitization of a gassed emulsion explosive in comparison with micro-balloon sensitized emul-

sion explosives [C]//Proceedings of Thirteen Annual Symposium on Explosives and Blasting Research. Las Vegas, Nevada, USA: International Society of Explosives Engineers, 1997: 2-5.

[6] 陈东梁,颜事龙,薛 里. 动态压力作用下乳化炸药减敏的实验研究 [J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2004,24(增刊 1):88-92.
CHEN D L, YAN S L, XUE L. Experimental study on the desensitization of emulsion explosives under dynamic pressure [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2004, 24(Suppl 1): 88-92.

[7] CHENG Y F, MA H H, LIU R, et al. Explosion power and pressure desensitization resisting property of emulsion explosives sensitized by MgH_2 [J]. J Energ Mater, 2014, 32(3): 207-218.

[8] CHENG Y F, MA H H, SHEN Z W. Pressure desensitization influential factors and mechanism of magnesium hydride sensitized emulsion explosives [J]. Propell Explos Pyrot, 2014, 39: 267-274.

[9] 程扬帆,马宏昊,沈兆武. MgH_2 对乳化炸药压力减敏影响的实验研究 [J]. 爆炸与冲击,2014,34(4):427-432.
CHENG Y F, MA H H, SHEN Z W. Experimental research on the pressure desensitization of emulsion explosives sensitized by MgH_2 [J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(4): 427-432.

[10] 程扬帆,刘 蓉,马宏昊,等. 新型敏化气泡载体对乳化炸药爆炸威力及减敏性的影响 [J]. 煤炭学报,2014,39(7):1309-1314.
CHENG Y F, LIU R, MA H H, et al. Effects of new type of chemical bubbles carriers on emulsion explosive explosion power and anti-pressure ability [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7): 1309-1314.

[11] 宋锦泉. 乳化炸药爆轰特性研究 [D]. 北京:北京科技大学,2000:130-131.
SONG J Q. Research on detonation characteristics of emulsion explosives [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2000: 130-131.

[12] 林谋金,马宏昊,沈兆武,等. 铝薄膜含量对 RDX 基铝薄膜炸药水下爆炸性能影响 [J]. 含能材料,2014,22(5):678-683.
LIN M J, MA H H, SHEN Z W, et al. Effect of aluminum film content on underwater explosion performance of RDX-based aluminum film explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(5): 678-683.

Numerical Simulation on a Novel Dynamic Pressure Desensitization Device for Emulsion Explosives

CHENG Yang-Fan[1], WANG Quan[1], MIAO Guang-Hong[1],
SHEN Zhao-Wu[2], YAN Shi-Long[2]

(1. *Department of Explosive Engineering and Explosion Technology, Anhui University of Science and Technology, Huainan* 232001, *China*;
2. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*)

Abstract: By using the dynamic finite element software LS-DYNA, we simulated the working process of a novel emulsion explosive pressure desensitization device, and investigated the characteristics of its flow field distribution and the influence of its structural design on the experimental results. The comparison of simulation and experiment results shows that the row spacing is the critical factor that determines the degree of accuracy in experiment. For the novel dynamic pressure desensitization equipment, when the radius of the emulsion explosive is 2 cm and the weight of RDX is 10 g, the smallest row spacing, which minimizes the effect of the emulsion explosive in the front row on that in the back row, is determined as 20 cm. Therefore, in order to decrease the experiment error, we can decide on the smallest row spacing through numerical simulation before the dynamic desensitization experiments take place. Our work can serve as a reference for the further research.

Key words: pressure desensitization; underwater explosion; numerical simulation; emulsion explosive; delay blasting