

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.03.005

深水静压下化学敏化乳化炸药爆炸能量的输出特性^{*}

刘 磊 王 远 张成良 张海涛
昆明理工大学国土资源工程学院(云南昆明,650093)

[摘 要] 为研究化学敏化乳化炸药能量输出受深水静压的影响,利用可调节深水压力大小的水下爆炸测试系统模拟深水静压环境,获得了亚硝酸钠质量分数分别为 0.1% (Y-0.1%)、0.2% (Y-0.2%)、0.3% (Y-0.3%)、0.4% (Y-0.4%) 的 4 种炸药在静水压力 0、0.1、0.3、0.5 MPa 下的能量变化情况。研究表明:在一定的静水压力变化范围内,压力相同的情况下,4 种炸药能量输出性能从优到劣的顺序分别为 Y-0.4%、Y-0.3%、Y-0.2%、Y-0.1%。当静水压力达到 0.5 MPa 后,4 种炸药均发生不同程度的拒爆。这是因为,随着静水压力的不断增大,炸药中的化学敏化气泡逐渐变小或消失,大部分变为无效热点,不能形成灼热核,炸药发生拒爆。炸药拒爆时所测得的爆炸能量仅为雷管爆炸的能量。

[关键词] 乳化炸药;水下爆炸测试系统;深水静压;亚硝酸钠;能量分析

[分类号] TD235.2⁺1

Output Characteristics of Explosion Energy of Chemically Sensitized Emulsion Explosive under Static Pressure in Deep Water

LIU Lei, WANG Yuan, ZHANG Chengliang, ZHANG Haitao
Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology (Yunnan Kunming, 650093)

[ABSTRACT] In order to study the influence of deep-water static pressure on the output energy of chemically sensitized emulsion explosive, the underwater explosion test system with adjustable deep-water pressure was used to simulate the deep-water static pressure environment. Energy changes of four explosives with sodium nitrite mass fractions of 0.1% (Y-0.1%), 0.2% (Y-0.2%), 0.3% (Y-0.3%) and 0.4% (Y-0.4%) at pressure of 0, 0.1, 0.3 and 0.5 MPa were obtained. The results show that, within a certain range of hydrostatic pressure and under the same pressure, the order of energy output performance of the four explosives from good to bad is Y-0.4%, Y-0.3%, Y-0.2% and Y-0.1%, respectively. When the hydrostatic pressure reaches 0.5 MPa, the four explosives all reject detonation to different degrees. With the increasing hydrostatic pressure, the chemically sensitized bubbles in explosive gradually become smaller or disappear. Most of them become invalid hot spots, which could not form hot nuclei, and the explosive refuses to explode. When the explosive refuses to explode, the measured explosion energy is only from the detonator explosion.

[KEYWORDS] emulsion explosive; underwater explosion test system; deep-water static pressure; sodium nitrite; energy analysis

引言

乳化炸药是一种以氧化剂水溶液作为分散相、油相作为连续相的工业炸药。分散相悬浮于连续相,形成一种油包水型乳化体系,再经过敏化工艺而形成乳化炸药^[1]。在乳化炸药敏化的过程中,敏化

剂的作用是形成微小、规则的敏化气泡并均匀分布在乳化基质中,可以适当地调节炸药的密度;当起爆原件产生冲击波作用后,通过压缩形成微小热点,从而使炸药产生爆轰反应。常用的敏化剂有物理敏化剂(玻璃微球和膨胀珍珠岩)和化学敏化剂(亚硝酸钠)。相比物理敏化,化学敏化有价格低廉、来源广泛、用量少等优势。所以当下,亚硝酸钠作为敏化剂

^{*} 收稿日期:2021-07-14
基金项目:国家自然科学基金(11862010)
第一作者: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
通信作者:张海涛(1995-),男,硕士,主要从事工业炸药、水下爆炸方面的研究。E-mail:1604490791@qq.com

在国内得到广泛应用。早期,学者们通过试验研究炸药的爆速、猛度等参数,定性分析炸药的能量输出性能^[2-4]。近年来,又利用水下爆炸测试系统对工业炸药的爆炸能量输出性能开展了大量研究。周霖等^[5]通过典型炸药爆炸的性能参数,分析计算了几种混合炸药的冲击波能、气泡能等,并修正了能量计算公式;田俊宏等^[6]研究了铝氧比对含铝炸药能量输出特性的影响;赵倩^[7]对黑索今含铝炸药水中爆炸能量输出做了系统研究;卢勇等^[8]通过温压炸药配方设计,研究了温压炸药的能量输出特性;牟金磊等^[9]通过计算与试验研究分析小药量试验条件下有效比冲能随距离变化的关系;龚悦等^[10]研究了玻璃微球含量对乳化炸药水下爆炸能量的影响;汪泉等^[11]对几种不同工业炸药的水下爆炸能量输出特性进行了对比研究。虽然研究炸药水下爆炸能量的报道很多,但研究深水静压对炸药的能量输出影响的较少。

本文中,使用自行设计的可改变静水压力大小的水下爆炸测试系统,选用化学敏化的乳化炸药进行水下爆炸试验,测量在静水压力下乳化炸药的水下爆炸能量变化情况。通过冲击波峰值压力 p_m 、比冲击波能 E_s 、气泡能 E_b 和总能量 E_t 的变化关系,定量研究化学敏化乳化炸药在不同静水压力下的能量变化规律。

1 试验方案

按照表1的配方,乳化基质水相在110℃下加热溶解,复合油相在100℃下加热熔化,将两组分乳化4 min,然后将乳化基质温度控制在50~60℃。配制亚硝酸钠水溶液(亚硝酸钠与水质量比为1:2),加入乳化基质中,随后加入2~3滴促进剂磷酸溶液(磷酸与水的质量比为1:3),搅拌2~3 min即可。将制备好的乳化炸药自然冷却至常温。

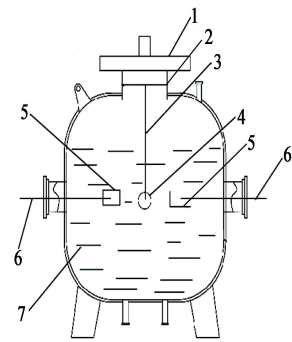
表1 乳化基质基本配方

Tab. 1 Basic formula of emulsion explosive				
	%			
组分	硝酸铵	硝酸钠	水	油相
质量分数	74	10	10	6

乳化炸药试样中,亚硝酸钠质量分数分别为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%,试样分别对应标记为Y-0.1%、Y-0.2%、Y-0.3%、Y-0.4%。乳化炸药入水初始深度为0.36 m,所受压力可忽略不计(0 MPa)。设置0、0.1、0.3、0.5 MPa 4个静水压力分

别对应0.36、10.36、30.36、50.36 m的水深。每组测量3次,试验结果取平均值。

水下爆炸信号的采集流程为:传感器接收并输出冲击波信号、电缆传输信号、波形采集仪采集并储存、笔记本电脑数据处理。传感器与波形采集仪之间通过电缆连接。电缆有两个功能,即信号传输线和电流、电压传输线。在安装传感器时,通过带孔螺栓将传感器头部伸入爆炸球罐内,ICP接口在外部,带孔螺栓用防水密封胶密封。爆炸球罐高220 cm,最大直径140 cm,筒壁厚2.2 cm,容积2 m³,工作压力3.0 MPa。药包位于球罐中心,入水深0.36 m,与传感器距离0.58 m。测试系统如图1所示。



1 - 密封盘;2 - 固定杆;3 - 悬挂绳;4 - 炸药;
5 - 传感器;6 - 信号线;7 - 水。

图1 测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test system

在炸药爆炸时,必须满足一定的药包直径。当药包直径较小时,炸药会发生不完全爆轰;随着药包直径的增大,爆轰趋向稳定,最后达到理想爆轰。

在实验室使用3、5、7 g炸药进行输出能量测试,并综合考虑爆炸振动和对测试系统的保护,主体试验药量选5 g。将炸药与传感器置于同一水平面上,经过标定,稳定性和灵敏度等均符合要求。需要注意的是,在测量中必须设置预起爆时间,以便获得完整波形。通过加压,获得静水压力为0.3 MPa时炸药Y-0.3%的爆炸压力实测波形,如图2所示。

2 结果与分析

2.1 水下爆炸测试结果

比冲击波能^[12]

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_w C_w W} \int_0^{6.7\theta} p^2 dt. \tag{1}$$

式中: p 为冲击波压力,MPa; θ 为衰减时间常数,s; ρ_w 为水的密度,取1 000 kg/m³; C_w 为水中声速,取1 460 m/s; W 为药量,kg。

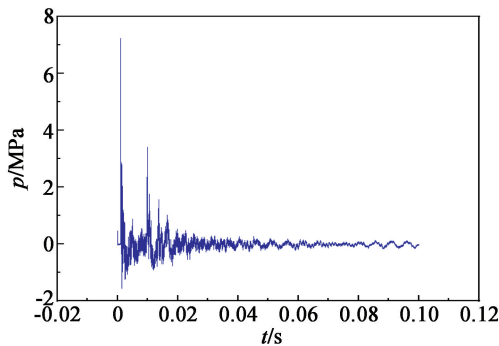


图 2 静水压力 0.3 MPa 时 Y-0.3% 的爆炸压力实测波形图
Fig.2 Measured waveform of explosion pressure of Y-0.3%
at hydrostatic pressure of 0.3 MPa

气泡能^[13]

$$E_b = \frac{(\sqrt{1 + 4CT_b} - 1)^3}{8C^3K_1W} \quad (2)$$

式中： C 为给定水池和装药位置等测试条件下的固有常数， $C = b/a^2$ ，根据球罐参数，计算得 $C = -4.3938 \text{ m/s}$ ； K_1 为常数； T_b 为气泡脉动周期，s。

炸药的总能量^[13]

$$E_t = K_f(\mu E_s + E_b) \quad (3)$$

式中： K_f 为药形系数，对于球形药包， K_f 为 1； μ 为冲击波损失系数。

结合式(1)～式(3)，计算得到采用不同敏化剂敏化的乳化炸药的水下爆炸参数，并与雷管水下爆炸的参数进行比较，结果见表 2。表 2 中， p_m 为冲击波峰值压力，MPa。

2.2 无静水压力下乳化炸药水下爆炸能量的变化

无静水压力时，4 种质量分数的亚硝酸钠敏化的乳化炸药水下爆炸能量参数分布，如图 3 所示。

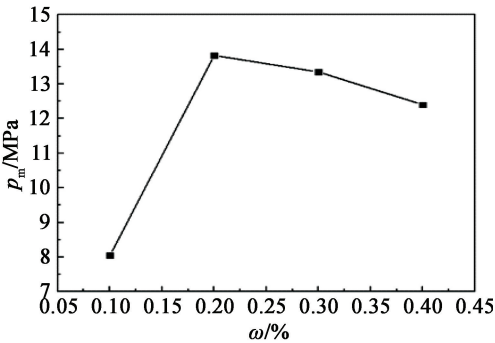
表 2 中，雷管试验作为一个测量基准，是为了对比炸药的爆轰能量下降程度。从 4 组参数可以看出：无静水压力时，炸药 Y-0.1% 的爆炸能量较小；当亚硝酸钠质量分数增加到 0.2% 时，炸药爆炸能量均显著提高；当质量分数增加到 0.3% 时，炸药爆炸能量呈现下降趋势；当质量分数增加到 0.4% 时， p_m 、 E_s 、 E_b 和 E_t 呈现下降趋势，与 Y-0.3% 相比，分别下降了 7.11%、13.73%、9.49%、11.80%。综上可得：Y-0.2% 炸药的能量最佳；随着亚硝酸钠质量分数的增加，炸药的能量将会有所下降；亚硝酸钠质量分数越大，能量下降速率越大。

2.3 不同静水压力下乳化炸药水下爆炸性能的变化

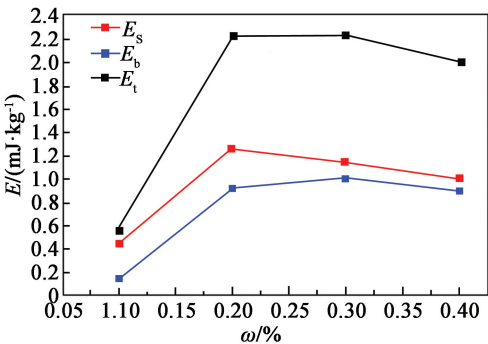
图 4 对比了亚硝酸钠敏化的乳化炸药在不同水压下爆炸后的能量分布。无静水压力时，只有 Y-0.1% 发生半爆；外加压力增大后，直接拒爆。与 Y-

表 2 水下爆炸参数
Tab.2 Underwater explosion parameters

种类	参数	静水压力/MPa			
		0	0.1	0.3	0.5
雷管	p_m/MPa	7.357	7.169	7.229	7.050
	$E_s/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.352	0.334	0.339	0.323
	$E_b/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.103	0.086	0.079	0.065
	$E_t/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.476	0.440	0.441	0.406
Y-0.1%	p_m/MPa	8.046	7.579	7.406	7.233
	$E_s/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.421	0.373	0.356	0.339
	$E_b/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.138	0.117	0.160	0.100
	$E_t/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.584	0.513	0.548	0.459
Y-0.2%	p_m/MPa	13.824	8.354	8.058	7.309
	$E_s/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.242	0.453	0.422	0.347
	$E_b/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.926	0.140	0.162	0.100
	$E_t/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	2.241	0.621	0.609	0.467
Y-0.3%	p_m/MPa	12.401	9.037	8.880	7.668
	$E_s/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.158	0.470	0.444	0.351
	$E_b/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.011	0.148	0.173	0.102
	$E_t/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	2.237	0.646	0.624	0.473
Y-0.4%	p_m/MPa	13.350	8.502	8.268	7.352
	$E_s/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.999	0.531	0.512	0.382
	$E_b/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.915	0.143	0.197	0.108
	$E_t/(\text{mJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	1.973	0.705	0.740	0.511



(a) 冲击波峰值



(b) 爆炸能量

图 3 无静水压力下乳化炸药水下爆炸参数与亚硝酸钠质量分数的关系

Fig.3 Relationship between underwater explosion parameters of emulsion explosive and mass fraction of sodium nitrite at 0 MPa

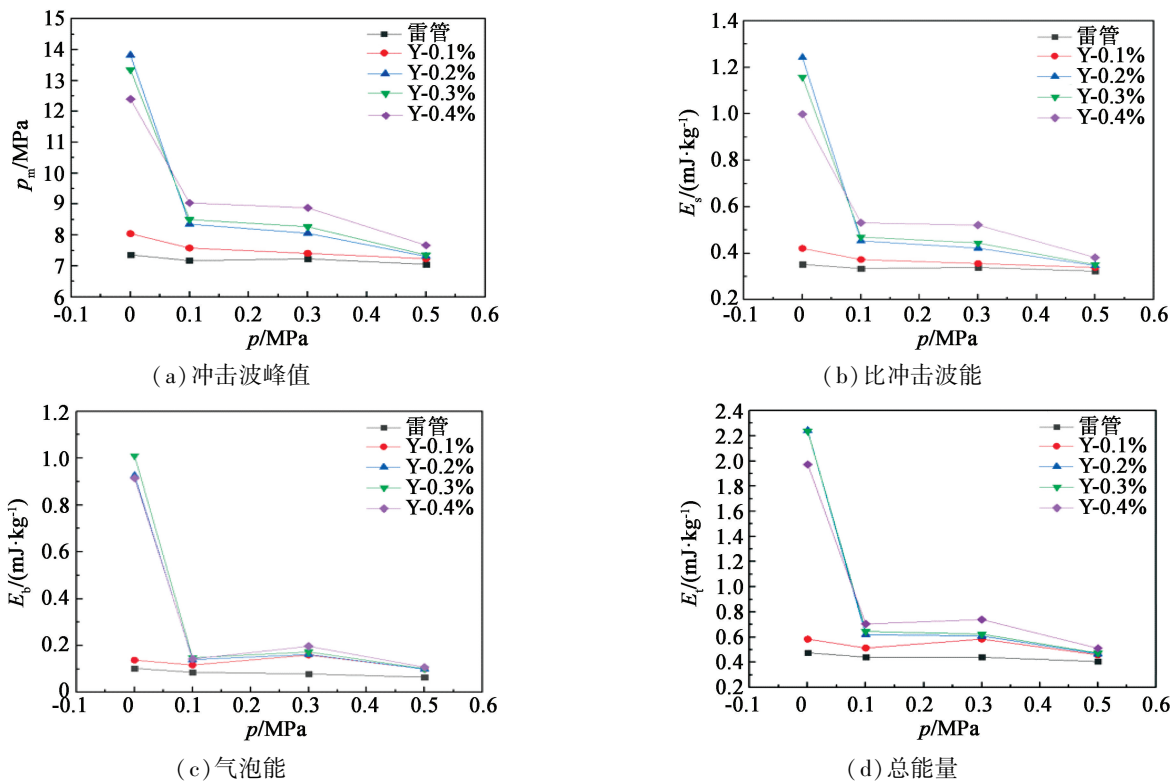


图4 不同静水压力下水下爆炸参数

Fig. 4 Variation curves of underwater explosion parameters under different hydrostatic pressures

0.1%相比,Y-0.2%各项能量均显著提高;通过分析,此时,乳化炸药达到完全爆轰。分析 Y-0.3%可以看出,无静水压力时, p_m 、 E_s 、 E_t 比 Y-0.2%的稍低一些,这是因为 Y-0.3%中加入了过量的亚硝酸钠,使得乳化炸药中气泡空穴过多,导致乳化炸药的密度减小,从而能量释放减小。当静水压力增加到0.1 MPa时,所有炸药试样的能量均发生断崖式下降,除 Y-0.1%以外的3种炸药均发生不同程度半爆。当外加压力增加到0.1~0.3 MPa时,3种乳化炸药的各能量由大到小顺序为 Y-0.4%、Y-0.3%、Y-0.2%;当静水压力增加到0.5 MPa后,所测炸药的冲击波峰值与单发雷管的冲击波峰值相差不大,说明对于所测量的3种乳化炸药,当外界压力增大到一定程度时,均会失去爆轰感度。

2.4 机理分析

根据上述试验结果,分析 p_m 、 E_s 、 E_b 和 E_t 4个能量参数在静水压力下变化的原因。无静水压力时,Y-0.1%的4个能量参数均与单发雷管能量相当,发生拒爆;原因在于亚硝酸钠含量较低,反应生成的气泡数量很少,敏化后乳化炸药内部生成的热点不足,无法形成从点到面的爆轰,继而影响乳化炸药能量的释放。亚硝酸钠质量分数提升到0.2%时,亚硝酸钠在炸药中反应并形成大量敏化气泡,此时炸药中

的热点数目足够多,且尺寸相当,雷管起爆使热点温度升高到爆发点,进而引起热点周围炸药发生爆炸。当亚硝酸钠质量分数继续增加到0.3%~0.4%时,4个能量参数不升反降;这是因为在乳化炸药质量一定的情况下,过量添加亚硝酸钠会导致乳化炸药体积增大、密度减小,使炸药内部孔隙率增大。根据生成敏化气泡的化学机理可知,亚硝酸钠在生成敏化气泡时会消耗硝酸铵的量,所以过量的亚硝酸钠既会使炸药的有效成分降低,又会增加孔隙率以减少炸药水相、油相的面面接触,最终导致炸药样品的爆轰性能下降。

乳化炸药中的化学敏化气泡受外界环境压力的影响很大。由于亚硝酸钠是在常压下加入乳化基质的,所以为达到内、外压力平衡,此时生成的敏化气泡内、外压力均为常压。随着外加压力的增大,敏化气泡会出现体积缩小、相邻气泡融合的现象,体积较小的气泡经过体积压缩,无法在爆炸过程中形成有效灼热核,部分大气泡和新融合的气泡尺寸相当,形成有效热点,所以炸药发生半爆。静水压力提升至0.3 MPa时, p_m 、 E_s 、 E_t 3个参数下降速率变慢;这是因为在此过程中不断会有小气泡与相邻气泡聚集、融合,形成新的有效气泡,但更多的是由于外加压力过大,使气泡缩小到无效尺寸,所以炸药的能量依然

会处于下降状态,发生更深程度的半爆。0.3 MPa 时,3 种炸药的 E_b 会呈现上升状态;分析原因,随着静水压力的增大,炸药的各项爆轰感度均下降,但还具有一定的爆轰性能,而且雷管在其中发挥了很大作用,所以水深增加后, E_b 相应提升。当静水压力增加到 0.5 MPa 后,3 种炸药的各项能量下降速率又增大;这是因为随着外加压力的不断增大,炸药中生成的化学敏化气泡均变成一个个尺寸很小的点,均为无效热点,不能形成灼热核,炸药发生拒爆,此时测到的爆炸能量仅为雷管释放的能量。

3 结论

研究了亚硝酸钠化学敏化的乳化炸药在深水静压作用下爆炸能量的输出特性。主要结论如下:

1)随着外加压力的增大,乳化炸药的爆炸能量输出性能呈递减趋势:0~0.1 MPa 下,能量下降最快;从 0.1 MPa 以后,能量下降趋势变缓;0.3 MPa 后,4 种炸药呈半爆或拒爆;当外界压力达到 0.5 MPa 后,所测得爆炸能量仅为雷管爆炸的能量。

2)在一定的静水压力变化范围内,Y-0.2%、Y-0.3% 和 Y-0.4% 3 种炸药的 p_m 、 E_s 、 E_b 和 E_t 下降明显;当压力增加到 0.5 MPa 时,Y-0.4% 的 4 个参数的下降速率比 Y-0.2%、Y-0.3% 两种炸药的下降速率显著增高。

3)根据热点理论:随着静水压力的不断增大,炸药试样中的化学敏化气泡逐渐变小或消失,大部分变为无效热点,不能形成灼热核;当静水压力过大时,炸药会发生拒爆。

参 考 文 献

- [1] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 周霖,徐少辉,徐更光. 炸药水下爆炸能量输出特性研究[J]. 兵工学报,2006,27(2):235-238.
- [6] 田俊宏,孙远翔,张之凡. 铝氧比对含铝炸药水下爆炸载荷及能量输出结构的影响[J]. 高压物理学报,2019,33(6):146-154.
- [7] 赵倩. 黑索今含铝炸药水中爆炸能量输出与效应研究[D]. 北京:北京理工大学,2017.
- [8] 卢勇,王伯良,何中其,等. 温压炸药爆炸能量输出的实验研究[J]. 含能材料,2014,22(5):684-687.
- [9] 牟金磊,朱锡,李海涛,等. 炸药水下爆炸能量输出特性试验研究[J]. 高压物理学报,2010,24(2):88-92.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 恽寿榕,赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京:国防工业出版社,2005:233-236.
- [13] 颜事龙,王尹军. 冲击波作用下乳化炸药压力减敏的表征方法[J]. 爆炸与冲击,2006(5):441-447.