

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.01.010

基于 AUTODYN 的复合防护结构数值模拟^{*}

崔小杰^① 张孙嘉^② 张国伟^①
①中北大学机电工程学院(太原,030051)
②浙江工业大学计算机科学与技术学院(软件学院)(浙江杭州,310000)

[摘 要] 为了更好地保护小当量爆炸物处理人员的安全,提出了一种由胶体、聚氨酯、泡沫铝和凯夫拉4种材料构成的圆柱形复合防护结构。对100 g TNT爆炸物选择模型比例为1:1,利用AUTODYN软件建立二维仿真模型,采用2D-Euler算法数值模拟此防护结构对爆炸冲击波的减弱效果,并进行分析研究。研究得出:复合防护结构能很好地降低冲击波超压峰值,从而间接地增强人体对超压的忍受度,保证一定范围内人员的生命安全。该防护结构具有便携性、机动性及对爆炸冲击波的高效衰减性,正好适用于轻量、便携及有效防护的应用背景,对相关防护结构的研究设计起到很好的参考作用。

[关键词] 复合防护;爆炸冲击波;超压峰值;高效衰减性;数值模拟

[分类号] TJ410.3

Numerical Simulation of Composite Protective Structure Based on AUTODYN

CUI Xiaojie^①, ZHANG Sunjia^②, ZHANG Guowei^①
① School of Mechatronics Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)
② School of Computer Science and Technology (School of Software),
Zhejiang University of Technology (Zhejiang Hangzhou, 310000)

[ABSTRACT] In order to guarantee the safety of personnel handling small quantities of explosives, a cylindrical composite protective structure made of four materials, including colloid, polyurethane, aluminum foam and Kevlar was proposed. A 1:1 ratio of 100 g TNT explosives was selected. A two-dimensional simulation model was developed by AUTODYN software. The attenuation effect of this structure on the blast shock wave was numerically simulated by 2D-Euler algorithm and analyzed. The study shows that the compound protective structure can well reduce the peak value of shock wave overpressure, thereby indirectly increasing the tolerance of human exposure to overpressure and ensuring the life safety of personnel within a certain range. The protective structure has portability, mobility and high efficiency decay of blast shock wave, which is suitable for the application background of light weight, portable and effective protection and plays a good reference role for the research and design of the relevant protective device.

[KEYWORDS] composite protective; explosion shock wave; overpressure peak; high-efficiency attenuation; numerical simulation

引言

在我国,不断有极端分子用爆炸手段制造恶性事件,对社会和人民产生了严重危害^[1]。以公安反恐防暴人员处理爆炸物为研究背景,以处理爆炸物人员防护为目的,如何安全迅速地处理爆炸物是当前面对的问题,解决这个问题就需要一种便携有

效的防护设备。之前相关研究人员对爆炸冲击波防护研究大多是夹心多层介质组合结构。毛益明等^[2]研究发现防爆墙中水做缓冲介质比混凝土做缓冲介质的防护效果要好一些。彭佳^[3]研究发现相对于水介质,由MAP为基料制备的高分子胶体材料,能够更有效地减小爆炸冲击波对人员的影响,同时对不同外形的防护结构进行对比研究,得出圆柱形是最优的结构。王海福等^[4]研究发现,当设定一

^{*} 收稿日期:2017-06-29
第一作者:崔小杰(1993-),硕士研究生,研究方向:弹药工程与毁伤技术。E-mail:574626213@qq.com

定的初始孔隙度时,聚氨酯泡沫材料的抗冲击减压性能会变得很强。董永香等^[5]发现多层介质中含泡沫铝材料的时候吸能性能较好。凯夫拉材料的力学性能非常好,它在军事上常被用作装甲材料,防护性能也非常好^[6]。已有的研究很多都是防大当量爆炸物,但处理小当量爆炸物方面还没有很可靠的技术和便携的设备。

针对小当量的爆炸物,彭佳^[3]提出了一种由复合材料和混合液复合而成的防护结构;邵先锋等^[7]提出了一种由泡沫铝、水溶液、凯夫拉材料复合而成的防护结构。两者有个共同的问题,水做防护层的密封性很难保证,而且不可重复利用。所以笔者提出了一种由胶体、聚氨酯(泡沫塑料)和泡沫铝3种材料作防护介质,凯夫拉材料做包裹层的复合防护结构,4种材料共同作用防御爆炸冲击波,更好地保证了防护材料的密封性和重复使用性,并且通过数值模拟研究了此结构的防护效果。

1 仿真方案的确定

对3种防护材料设定不同的参数和不同的排序,防护结构肯定会产生不同的防护效果。本文中,利用AUTODYN软件对胶体、聚氨酯和泡沫铝3种防护材料在同等防护层厚度条件下,不同材料排序时进行仿真结果对比分析,从而得出最优的复合防护结构。

3种材料从内到外共有6种排序方式,又根据文献[8]得出的应力波在分层材料的传播特性,考虑到本防护结构的体积问题和防护效果,选择从内到外依次为泡沫铝(或聚氨酯)和胶体的分层顺序,所以只需要对比泡沫铝和聚氨酯两种材料在两种不同排序下分别对复合防护结构防护效果的影响。故笔者对以下3种方案进行仿真结构对比分析:

- 1)经验公式计算值和空爆仿真值;
- 2)3种防护材料在相同厚度条件下,单独做防护层的仿真结果;
- 3)泡沫铝和聚氨酯两种材料不同排序下的仿真结果。

2 数值模拟

2.1 结构模型的建立

由引言中提出的防护结构的构想,本防护结构的三维实体形状设计为圆柱形,为轴对称结构。模

型高为360 mm,圆柱空心半径为120 mm。圆柱形内防护材料一共分4层,分别由4种不同材料填充,整体结构如图1。

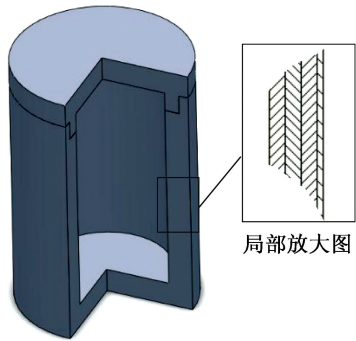


图1 复合结构三维剖面图
Fig.1 3D cross-section of the composite structure

2.2 材料模型的建立

数值模拟中,涉及到炸药、空气、胶体、聚氨酯、泡沫铝和凯夫拉6种材料模型。

其中,炸药采用TNT,其密度 $\rho = 1.63 \text{ g/cm}^3$,采用JWL状态方程描述TNT爆炸爆轰产物膨胀驱动做功的过程,其形式为

$$p = A(1 - \frac{\omega'}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega'}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega' E}{V} \tag{1}$$

式中: p 为压力; E 为爆轰产物内能, $E = 6.0 \times 10^6 \text{ kJ/m}^3$; V 为爆轰产物的相对体积; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω' 是常数, $A = 3.74 \times 10^8 \text{ kPa}$, $B = 3.75 \times 10^6 \text{ kPa}$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 1.2$, $\omega' = 0.35$ 。

空气可以被简化为理想气体,所以空气的状态方程可以采用理想气体状态方程,如式(2)所示。

$$p = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} e_{ipvo} = (\gamma - 1) \rho E \tag{2}$$

式中: γ 为绝热指数,也叫等熵指数,是材料的常数, $\gamma = 1.4$; e_{ipvo} 为起始单位体积内能; E 为单位质量内能, $E = 717.6 \text{ J/kg}$; ρ 为空气密度, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。

以MAP为基料的胶体材料由参考文献[3]可知,其本构模型形式为

$$\sigma = \frac{a}{1 + (\varepsilon \tau)^{-b}} + \frac{c}{1 + (\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon^*})^{-d}} + \frac{e}{[1 + (\varepsilon \tau)^{-b}][1 + (\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon^*})^{-d}]} \tag{3}$$

式中: σ 、 ε 和 $\dot{\varepsilon}$ 分别为应力、应变、应变率; a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 τ 和 ε^* 为实验值。选取质量分数为1.8%且应变率为 $9\,500 \text{ s}^{-1}$ 的胶体材料为实验对象时, $a = 63.18$

MPa, $b = 1.12 \text{ MPa}$, $c = 1.83 \text{ MPa}$, $d = 21.77 \text{ MPa}$, $e = 58.95 \text{ MPa}$, $\tau = 8.49 \text{ }\mu\text{s}$, $\varepsilon^* = 0.023$ 。

聚氨酯泡沫材料使用 AUTODYN 材料库中 Polyureth 材料模型。

泡沫铝材料看作是多孔可压缩材料模型,使用 AUTODYN 材料库中 Crushable Foam 本构模型。起始材料参数: ρ_0 为起始密度, $\rho_0 = 1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; E 为弹性模量, $E = 1.2 \text{ GPa}$; ν 为泊松比; p_{out} 为失效的拉伸应力截止值, $p_{\text{out}} = 10 \text{ MPa}$ 。

凯夫拉丝织品材料的本构模型采用 AUTODYN 材料库中的 Puff 状态方程和 Hydro(Pmin) 失效模型。

2.3 仿真模型的建立

模型建立:采用二维欧拉多物质算法,模型比例为 1:1,建立 6 000 mm × 3 000 mm ($I \times J$) 的空气域,并添加透射(无反射)边界条件,防护结构放置于地面,为了研究方便,把真实的地面简化为刚性地面,为此,把所建空气域模型的底边当作与地面接触的公共线,并对此边添加刚性约束条件。以刚性轴 Y 轴为地面,沿 X 轴方向填充材料和炸药,观测点 (1[#]、2[#]、3[#]) 设在距爆炸中心 800、1 500、2 500 mm 处。爆炸中心设在距离刚性地面 180 mm 处,中心起爆。二维仿真模型如图 2;防护过程模型如图 3。

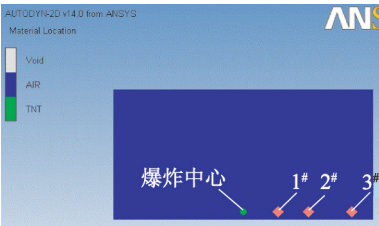


图 2 二维仿真模型

Fig. 2 The 2D simulation model

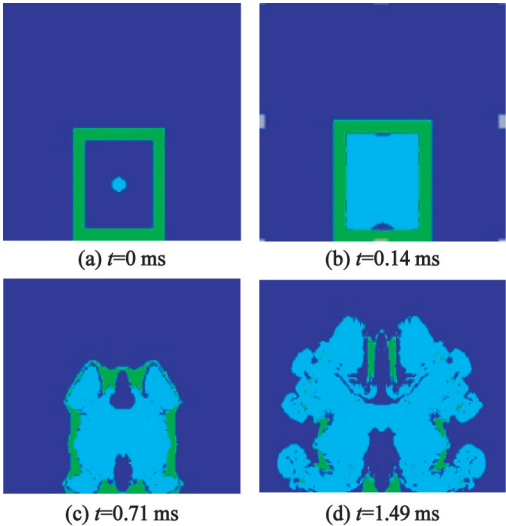


图 3 防护过程图

Fig. 3 Protection process diagram

从图 3 中可以看到, $t = 0$ 为起爆时刻,起爆后爆炸生成物迅速扩散,压缩周围空气,造成空气域压力的突变,产生冲击波,并在 $t = 0.14 \text{ ms}$ 时爆炸产物充满整个防护装置,此时,防护结构尖角处出现突变应力,并在 $t = 0.71 \text{ ms}$ 时尖角处被破坏,但最终破坏发生在 $t = 1.49 \text{ ms}$ 时,整个防护装置完全破坏,防护层被完全炸开,飞散出去。

3 数值模拟结果分析

3.1 爆炸相似原理仿真验证

已有的经验公式^[9]能很好地符合不同比例距离时的炸药爆炸冲击波超压情况,冲击波超压峰值公式为

$$\begin{cases} \Delta p = \left(\frac{20.06}{\bar{r}} + \frac{1.94}{\bar{r}^2} - \frac{0.04}{\bar{r}^3} \right) \times 9.8 \times 10^2; \\ \Delta p = \left(\frac{0.67}{\bar{r}} + \frac{3.01}{\bar{r}^2} + \frac{4.31}{\bar{r}^3} \right) \times 9.8 \times 10^2. \end{cases} \quad (4)$$

式中:第一个式子比例距离 \bar{r} 的范围为 $0.05 \text{ m} \leq \bar{r} \leq 0.50 \text{ m}$;第二个式子比例距离 \bar{r} 的范围为 $0.50 \text{ m} < \bar{r} \leq 70.90 \text{ m}$ 。比例距离 $\bar{r} = r/\sqrt[3]{W}$,其中 W 为炸药的质量,kg; r 为实际观测点距爆炸中心的距离,m。

由图 4 和表 1 得出,由于仿真计算是理想化的计算,忽略了实际中可能存在的影响因素,且仿真计算中的观测点距地面较近,地面的刚性反射也会对各观测点的超压值产生影响,仿真的超压值比工程

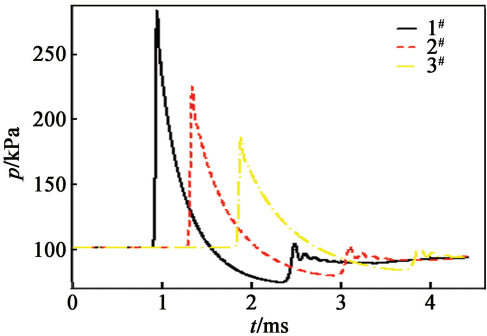


图 4 1 kg TNT 球形装药空爆各观测点压力变化曲线

Fig. 4 Pressure changing curve at each observation point of 1 kg TNT spherical charge in air explosion

表 1 超压峰值和经验公式计算结果

Tab. 1 Calculation results of overpressure peak and empirical formula

观测点	距离/m	工程计算值/kPa	仿真计算值/kPa
1 [#]	0.8	135	182
2 [#]	1.5	82	123
3 [#]	2.5	59	84

计算中的超压值大,但这对测试防护结构性能是有利的,所以认为该数值仿真算法是符合要求的。

3.2 同等厚度的3种材料单独作为防护层

针对相同厚度、不同材料的防护结构的防护特性进行仿真,并对仿真结果进行对比。厚度统一设定为10 mm,各防护下观测点的压力变化如图5;仿真结果如表2所示。

由表2可以得出,在经过每种材料防护结构后,超压峰值有明显的降低,说明防护结构能够起到防护的作用。另外,在一样厚度情况下,泡沫铝的防护效果最好,其次是聚氨酯和胶体材料。如果能使3种材料结合起来共同做防护层,就可以更进一步地

表2 3种材料压力峰值对比

Tab.2 Comparison of pressure peaks of three materials

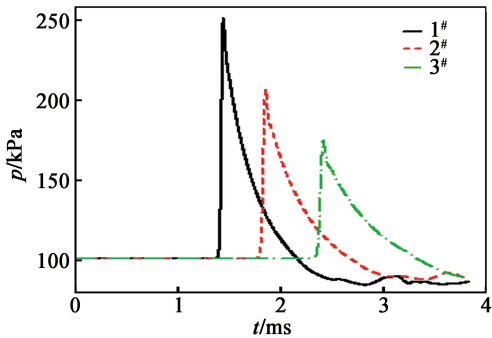
观测点	距离/m	胶体/kPa	聚氨酯/kPa	泡沫铝/kPa
1 [#]	0.8	152	138	116
2 [#]	1.5	109	90	81
3 [#]	2.5	75	61	58

增加防护效果,减小超压峰值。也可作为复合防护的研究提供依据。

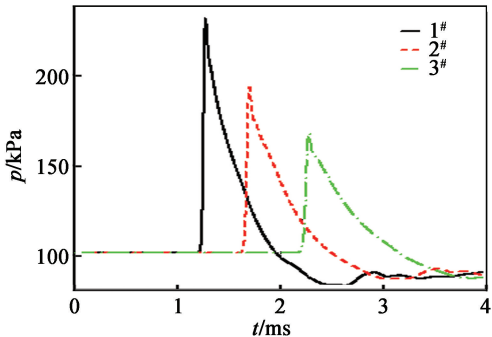
3.3 两种材料不同排序下的复合防护结构

对以 MAP 为基料的胶体材料、聚氨酯、泡沫铝及凯夫拉丝织品 4 种材料组合成的复合防护结构进行模拟仿真。对于最外层的包覆层,考虑到运输和储存过程中的耐磨损性,选择具有高强度弹性和抗切割的凯夫拉丝织品,且外层的凯夫拉丝织品的厚度为 3 mm。接下来对泡沫铝和聚氨酯的分层顺序对复合防护效能的影响进行仿真分析。

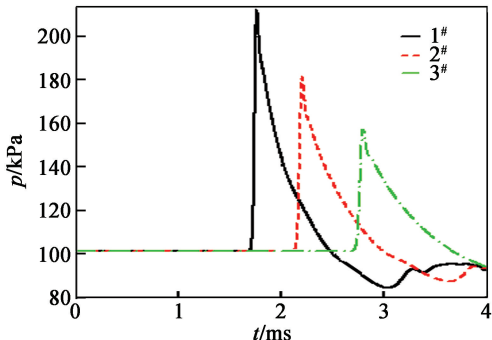
由图6和表3可对比两种不同防护层排序下各观测点超压峰值和3.2部分3种材料单独做防护层时的超压峰值,再结合表4发现,由内到外为泡沫铝、聚氨酯、胶体和凯夫拉的防护层顺序下组成的防



(a) 胶体防护



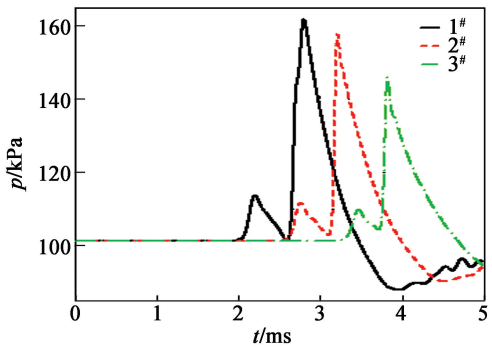
(b) 聚氨酯防护



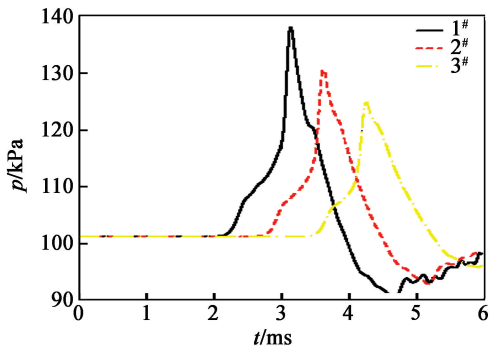
(c) 泡沫铝防护

图5 3种不同防护材料下压力变化曲线

Fig.5 Pressure variation curves under three different protections



(a) 泡沫铝(外)-聚氨酯(内)



(b) 泡沫铝(内)-聚氨酯(外)

图6 两种防护层不同排列顺序压力变化曲线

Fig.6 Pressure distribution curve of two protective layers in different order of arrangement

表 3 两种顺序下复合防护超压峰值对比
Tab. 3 Comparison of overpressure peaks
of composite protection in two sequences

观测点	距离/m	泡沫铝(内)- 聚氨酯(外)/kPa	泡沫铝(外)- 聚氨酯(内)/kPa
1 [#]	0.8	39	62
2 [#]	1.5	31	58
3 [#]	2.5	25	46

表 4 持续压力脉冲对人员的伤害
Tab. 4 Damages of continuous pressure
pulse to personnel

超压峰值/MPa	损伤程度
0.013 8~0.027 6	耳膜失效
0.027 6~0.041 4	出现耳膜破裂
0.010 4	50% 耳膜破裂
0.138 0~0.241 0	死亡率为 1%
0.276 0~0.345 0	死亡率为 50%
0.379 0~0.448 0	死亡率为 100%

护结构,能有效地降低冲击波超压峰值,增加正压作用时间。

然而,冲击波对目标的作用由冲击波超压 F 和冲量 I 共同影响,冲量是冲击波超压在正压作用时间内的压力积分。

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt。$$
 (5)

即压力曲线和标准大气压线包围部分的面积。如图 7 所示。

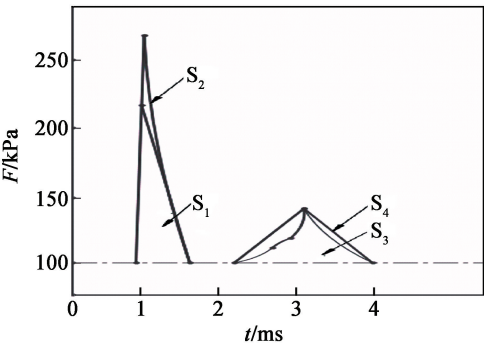


图 7 0.8 m 处空爆和复合防护下所受冲量对比
Fig. 7 Comparison of impulses under air
explosion and composite protection at 0.8 m

简单对比在 0.8 m 位置处空爆和复合防护的结果。面积 S_2 是空爆时产生的冲量,面积 S_3 是复合防护下产生的冲量,面积 S_1 和面积 S_4 为两个曲线简化的三角形面积,由已知的数据可求得:

$$S_1 = (1.6 - 0.9) \times \frac{220 - 100}{2} = 42.0 \text{ kPa} \cdot \text{ms};$$

$$S_4 = (4.0 - 2.2) \times \frac{139 - 100}{2} = 35.1 \text{ kPa} \cdot \text{ms}。$$

即 $S_4 < S_1$,且由图 7 可知, $S_1 < S_2, S_3 < S_4$,所以 $S_3 < S_2$ 。即在 0.8 m 位置处复合防护下产生的冲量要低于空爆下产生的冲量,其他位置处也如此。

所以,虽然正压作用时间增加,但由于超压降低较多,总的作用冲量仍然减小了。所以,由内到外为泡沫铝、聚氨酯、胶体和凯夫拉的防护层顺序下组成的防护结构具有优良的防护能力,有效地保护了一定距离的人员的安全。

3.4 结果分析

通过仿真实验对比的方法,首先分析确定了 3 种材料防护层对防护结构防护性能的影响,然后分析对比了 3 种材料不同排序下组成的复合防护结构的防护性能。最终发现由内到外为泡沫铝、聚氨酯、胶体和凯夫拉的防护层顺序下复合结构的防护效果非常明显。此仿真结果还未经过实验验证。但已有的文献可以间接对比加以说明。

彭佳^[3]做过的类似试验结果表明:空爆的情况下试验结果和仿真模拟的结果误差在 10% 以内,而且从试验结果可以看出,柔性防护结构防爆效果明显,有防护结构时超压峰值明显降低。

4 结论

- 在合理简化情况下,对复合结构进行数值模拟,对由胶体、聚氨酯、泡沫铝和凯夫拉丝织品 4 种材料组成的圆柱形防护结构进行仿真计算和结果分析,得出以下结论:
- 1) 防护材料中的胶体介质不仅密封性好于水介质,而且具有显著减弱冲击波的能力,增强了人体对超压的忍受度。
 - 2) 仿真结果表明防护层由外到内依次为凯夫拉丝织品、胶体、聚氨酯、泡沫铝材料组成的复合防护结构,能有效地降低冲击波超压峰值。
 - 3) 该复合防护结构具有便携性、机动性及对爆炸冲击波的高效衰减性,可以很大程度上降低爆炸物爆炸形成的冲击波对一定范围内的人员的伤害,从而很好地达到此研究的目的。

数值模拟为实验模型的优化设计提供参考。笔者只是对胶体、聚氨酯、泡沫铝和凯夫拉丝织品 4 种材料组成的防护结构做了些分析,接下来还可以对其他不同材料组成的防护结构的防护效果进行对比研究。

参 考 文 献

[1] 方向,高振儒,周守强,等.反爆炸恐怖袭击防排爆技术综述[J].中国工程科学,2013,15(5):80-83.
FANG X,GAO Z R,ZHOU S Q,et al. Summarization of prevention and removing technology against terrorist attacks explosion[J]. Engineering Science, 2013,15(5): 80-83.

[2] 毛益明,方秦,张亚栋,等.水体防爆墙与混凝土防爆墙削波减爆作用研究[C]//第九届全国冲击动力学学术会议论文集.2009:395-401.

[3] 彭佳.复合柔性防护结构防爆炸作用技术研究[D].太原:中北大学,2015.
PENG J. Research of the anti action of composite flexible protection structure[D]. Taiyuan:North University of China,2015.

[4] 王海福,冯顺山.爆炸载荷下聚氨酯泡沫中冲击压力特性[J].爆炸与冲击,1999,19(1):78-83.
WANG H F, FENG S S. Properties of shock pressure caused by explosion loads in polyurethane foam[J]. Explosion and Shock Waves,1999,19(1):78-83.

[5] 董永香,黄晨光,段祝平.多层介质对应力波传播特性影响分析[J].高压物理学报,2005,19(1):59-65.
DONG Y X, HUANG C G,DUAN Z P. Analysis on the influence of multi-layered media on stress wave propagation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005,19(1):59-65.

[6] 高性能材料凯夫拉[J].广东塑料,2005(Z1):20.

[7] 邵先锋,赵捍东,朱福林,等.一种新型柔性复合防护结构的数值模拟[J].兵器装备工程学报,2017,38(6):142-145.
SHAO X F ,ZHAO H D, ZHU F L ,et al. Numerical simulation of a new flexible compound protective structure [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(6):142-145.

[8] 李刚,陈正汉,谢云.波在分层材料中的传播及防冲击波分层材料结构的设计[J].振动与冲击,2005,24(2):89-105.
LI G, CHEN Z H, XIE Y. Wave propagation in sandwich materials and design of anti-shockwave sandwith structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005,24(2):89-105.

[9] 张国伟.爆炸作用原理[M].北京:国防工业出版社,2006.

[10] 艾尔防务-柔卫甲柔性防护[EB/OL][2018-10-10].
<http://www.rouweijia.cn/>.

[11] 苗朝阳,李秀地,杨森,等.温压弹爆炸效应与防护技术研究现状[J].兵器装备工程学报,2016,37(4):155-159.
MIAO C Y, LI X D, YANG S,et al. Research status of explosion effect and protection technology of thermobaric bomb[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering , 2016,37(4):155-159.

[12] 张姝红,陈高杰,高浩鹏,等.高速摄像防护结构抗水中爆炸冲击仿真研究[J].兵器装备工程学报,2016,37(5):53-56.
ZHANG S H, CHEN G J, GAO H P,et al. Simulation on behavior of protecting structure for high-speed camera to underwater explosions shock[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016,37(5):53-56.



(上接第 51 页)

[17] 谢作军.添加物对 ANFO 热稳定性影响的实验研究[D].淮南:安徽理工大学,2017.
XIE Z J. Experimental study on the effect of additives on the thermal stability of ANFO [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology,2017.

[18] HAN Z, SACHDEVA S, PAPADAKI M I, et al. Effects of inhibitor and promoter mixtures on ammonium nitrate fertilizer explosion hazards [J]. Thermochimica Acta, 2016,624:69-75.

[19] TURCOTTE R, LIGHTFOOT P D, FOCHARD R, et al. Thermal hazard assessment of AN and AN-based explosives [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 101 (1):1-27.

[20] XU S, TAN L, LIU J P, et al. Cause analysis of spontaneous combustion in an ammonium nitrate emulsion explosive [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016,43:181-188.

[21] WANG K, XU S, LIU D B, et al. Research on the critical temperature of thermal decomposition for large cartridge emulsion explosives [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,38:199-203.