DOI: 10.11883/bzycj-2016-0245 文章编号: 1001-1455(2018)03-0579-07

云爆药剂爆炸超压测试及威力评价*

饶国宁[1],周 莉[1],宋述忠[2],解立峰[1],李 斌[1],彭金华[1]
(1.南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094;
2.北京奥信化工科技发展有限责任公司,北京 100040)

摘要: 借助压力测试系统,在自由场及地面布置压力传感器,分别测量了熔铸 TNT、一次云爆药剂和二次云爆药剂在自由场和地面的爆炸场冲击波超压,经分析处理后拟合得到适用于 3 种炸药的自由场和空中爆炸超压发展公式,并计算云爆药剂的 TNT 当量。实验结果表明:实验选用的二次云爆药剂的自由场和地面平均 TNT 当量相比一次云爆药剂分别提高了 60%和 69%,说明二次云爆药剂比一次云爆药剂具有更大的超压作用效果;3 种药剂的自由场超压峰值都比地面小 10%左右,说明地面的反射效应依旧存在,在实际超压威力评估时应采用一定的修正系数。实验结果可丰富云爆药剂和传统炸药的小当量实验对比数据,为云爆药剂爆炸场参数的研究和威力评估提供参考。

关键词: 云爆药剂;超压测试;TNT 当量;爆炸场
中图分类号: O381; TQ560 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

云爆药剂(FAE)具有爆轰体积大、正压作用时间长、冲量大等特点,相比于传统高能炸药,其爆炸毁伤面积大。就其爆炸超压场而言,云爆药剂在云雾区内爆炸冲击波能量分布均匀,而云雾区外爆炸冲击波在空气中传播时,冲击波的超压值衰减相对较慢[1]。

目前,在炸药爆炸冲击波超压测试时,为避免装药弹体爆炸产生的破片击中并损坏传感器,通常采用壁面式压力传感器采集超压数据,此类型的压力传感器与地面平齐,测试得到的超压数据是沿地面运动的马赫波超压[2],但这种测试方法所造成的真实误差在以往的爆炸物当量评估中常被忽略。陈昊等[3]分析了爆炸场中马赫反射对冲击波超压测试的影响,给出了马赫反射对测试结果的作用以及爆炸高度对测试结果的影响。刘庆明等[4]通过分析气-固-液多相爆轰的特征和压力波形的特点,发现在云雾区内,多相爆轰波压力波形具有多峰结构,爆炸波峰值超压及冲量为恒定值,爆轰区外,爆轰波转变成爆炸冲击波,峰值压力和比冲量迅速衰减,并得到了冲击波峰值超压及比冲量随传播距离变化的规律。由于云爆药剂与常规高能药剂的爆炸场存在着较大的差异,所以为了对 FAE 的爆炸威力进行有效评估,就需要针对其爆炸场特点进行深入研究。

本文中,在相同的无约束实验条件下对自行研制的一次、二次云爆药剂及标准梯恩梯(TNT)药剂进行了爆炸超压测试。通过自由场式与壁面式两种压力测试系统,分别获得空中及地面的爆炸冲击波参数,运用 TNT 现场爆炸标定法计算出云爆药剂的 TNT 当量,有效评估了一次、二次云爆药剂的爆炸威力;两种超压测试系统结合起来进行多次实验,通过分析实测超压值的不确定度发现,实验中采用的自由场式的测试系统测得的超压值的不确定度略低于壁面式测试系统测得超压值的不确定度,说明自由场式超压测试系统应用于普通高能炸药的超压测试中是一种有效的测试手段。而在 FAE 爆炸实验中,其实测超压值的不确定度的分布就表现得较为随机。我们认为联合运用两种超压测试系统,可有效减小云爆药剂爆炸冲击波流场的复杂性对测试结果准确性的影响,为云爆药剂的爆炸场参数研究和威力评估提供参考。

* **收稿日期**: 2016-08-16 ; **修回日期**: 2017-01-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(11102091)
第一作者: 饶国宁(1978—),男,博士,讲师; **通信作者**: 李斌,libin@njust.edu.cn。

1 实验方法

1.1 样品及测试系统

测试炸药为 TNT 以及两种云爆药剂 SEFAE 和 DEFAE，弹体中的装药量均为 2 kg。TNT 为熔铸药柱，长径比 1∶1，密度 1.60 g/cm^3。SEFAE 主要成分是高能炸药、金属粉和液体氧化剂，采取一次起爆方式，其中心起爆药为梯黑药柱，质量 80 g；DEFAE 主要成分是高能液体燃料，采取传统的两次起爆方式，其中心起爆药是梯黑药柱，质量 80 g，二次起爆药柱是质量为 200 g 的梯黑药柱。

测试装置采用高频响应自动化数字测量系统。超压测试系统所用的仪器有 211B 型压电式石英传感器、402A 型数据调理仪和 JV5201 数据采集仪。

1.2 场地布置

测试条件、测试手段和数据处理，都按 GJB 5412-2005《燃料空气炸药(FAE)类弹种爆炸参数测试及爆炸威力评价方法》进行。

实验中，装有云爆药剂的弹体放置于固定高度的支架中心，以弹体的几何中心位置为爆心，确定所有实验中的炸高为 1.5 m。在压力测试中，采用两路压力平行测试的形式，压力传感器布置图如图 1 所示。一路布置在地面，作为壁面式压力测试系统，由于冲击波因入射角度不同会产生正规斜反射和非正规斜反射(马赫反射)两种现象[5-7]，为取得实验结果的一致性，本文中根据药量选择了合适的炸高和传感器布置位置，将地面测试点全部布置于马赫反射区内，测量到的也就是地面马赫波的超压。压力传感器的布置依据参照文献[8]。

另外，SEFAE、DEFAE 具有不同于高能炸药的云雾爆轰区：在云雾区内，爆轰波压力波形具有多峰结构，爆炸波峰值超压为一恒定值；爆轰区外，爆轰波转变成爆炸冲击波，峰值压力迅速衰减。由云雾爆轰区半径公式[9]的计算得到云爆药剂的云雾爆轰区半径为 1.9 m，因此本实验中传感器的布设位置均超出云爆药剂的爆轰区，所研究的是云雾爆轰区外的冲击波超压变化规律。



图 1(a) 压力传感器布置现场图

Fig. 1(a) Sketch of pressure sensors

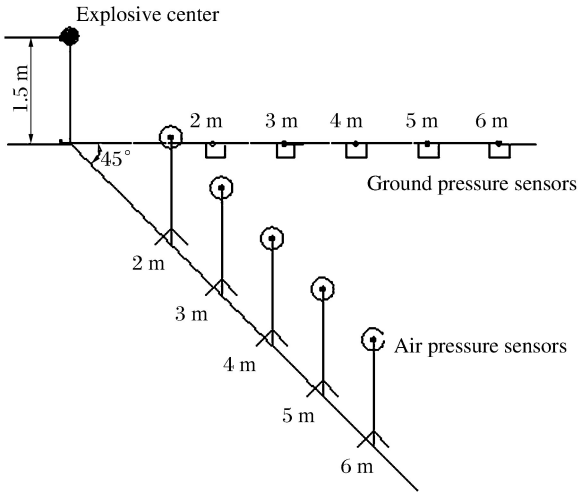


图 1(b) 压力传感器布置示意图

Fig. 1(b) Layout of pressure sensors

2 实验结果和分析

2.1 超压数据分析

在实验中，采用壁面式与自由场式两种超压测试系统进行药剂的爆炸超压测试，实验环境条件一致。为减小由于实验测试仪器问题带来的试验误差，采用平行实验的方式，对每种药剂进行 3 次实验，结果进行均一化处理。3 种药剂的典型超压曲线如图 2 所示。

图 2 中，橙色为 TNT 超压曲线，绿色为 SEFAE 超压曲线，蓝色为 DEFAE 超压曲线。从图中可以看出，DEFAE 有明显的双峰特征，对应两次起爆的效果，第 1 个峰为中心药剂抛撒燃料时产生的超压，第 2 个峰为二次药柱起爆后燃料二次爆轰产生的超压。

从图中可以明显看出，相同的测试条件下，在 3 m 处 TNT 的超压上升沿时刻要早于 SEFAE 和 DEFAE，这是因为 TNT 为凝聚态炸药，其能量释放速率相比其他两种药剂要快得多。同时，正因为如此，TNT 的爆炸超压在空气中衰减迅速，所以在相同测量位置，其超压峰值要比两种云爆药剂略小，且正压作用时间略短。对于 DEFAE，从曲线中能看到明显的双峰，这正是二次型云爆药剂的典型超压特征，由于燃料和空气充分混合后发生二次爆轰，其释放的能量要比 SEFAE 更大且正压持续时间更长。

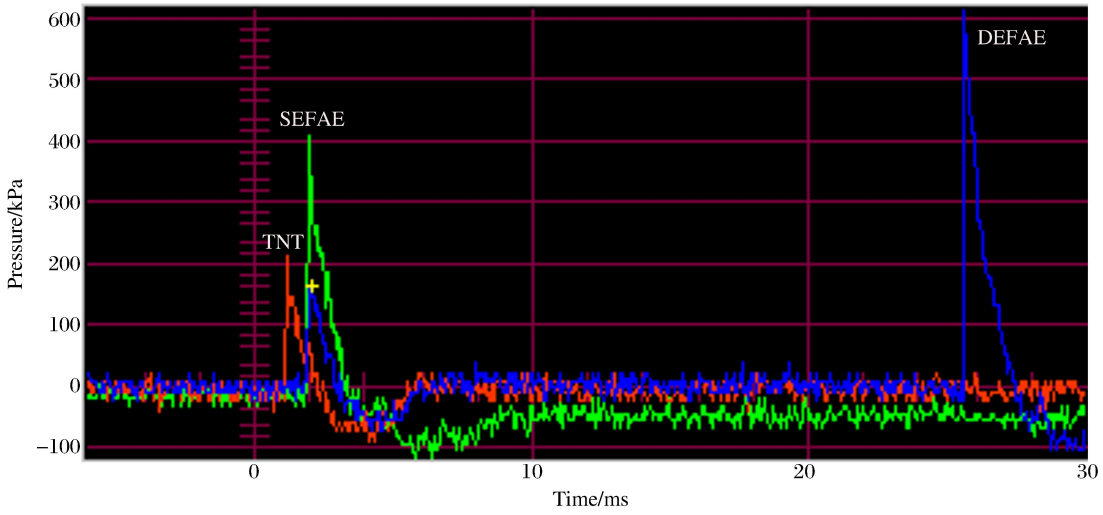


图 2　3 种炸药典型超压原始曲线图

Fig. 2　Typical original overpressrue trends of three explosives

经过处理地面壁面式、空中自由场式的超压系统的测试值后，分别计算 3 种药剂在不同距离的测试超压的平均值及相应的实测超压的不确定度，具体数据见表 1。

由表 1 可以看出：壁面式测试系统测得的炸药爆炸超压峰值均高于自由场式测试系统的炸药爆炸超压峰值，这是由于爆炸冲击波与地面发生非规则反射，除了入射波和反射波外，还存在一个垂直地面的过度压缩的冲击波即马赫波，马赫波的超压值相对较高[10-11]；3 种药剂爆炸冲击波的实验测试值，不管是壁面式还是自由场式测试系统的实测超压值，在距爆心相同位置上 TNT 的超压值最小、SEFAE 其次、DEFAE 最高。

从表 1 和图 3 可以看出，等质量的 3 种药剂的爆炸冲击波超压峰值在相同位置上的关系为 DEFAE 最大、SEFAE 次之、TNT 最小，且爆炸冲击波在空气中传播的衰减率为 DEFAE 最小、SEFAE 次之、TNT 最大。产生这种现象的主要原因为：TNT 是典型的点源爆炸，爆炸后球面冲击波迅速衰减；SEFAE 中心起爆时其起爆药柱首先反应，在爆轰后，灼热的爆炸云团在向四周抛撒的同时，爆炸云团各组分之间以及爆炸云团同环境空气之间，还会继续进行剧烈的快速燃烧反应，SEFAE 这种边抛撒边反应的过程使得它具有明显的体积爆轰特点，但由于反应的高速性，燃料不能与空气充分混合，包含在炸药中的能量不能完全释放，因此，在相同位置处测到的超压均低于 DEFAE；DEFAE 则是先通过中心药柱爆炸抛撒主装药，形成一个具有一定几何尺寸的气溶胶云雾团，同时将云爆管散布于云团中，经预定时间云爆管二次引爆云雾团，形成气溶胶爆轰，也就是说，DEFAE 是整个具有一定体积可燃云团的爆轰[9]。

对图 3 进行进一步分析还可以得到：当距离为 3 m 以下时，云爆药剂的爆炸压力下降较快，这可能是由于在近场中燃料与空气介质的反应没有达到平衡。在距离为 3m 以上时，云爆药剂超压的变化则较为平缓，这是由于云爆燃料与空气反应所释放的能量支持了冲击波传播，从而延缓了冲击波的衰减。

从表 1 和图 4 中可以看出:在 TNT 的爆炸过程中,超压测量的不确定度小于 FAE 超压测量的不确定度,这是因为 TNT 是单质炸药,其组分均一,作用过程明确,受外部环境条件和实验操作条件的影响较小,所以爆炸后产生的冲击波流场较为对称,一致性较高;此外,通过 TNT 药剂的实验测试结果同样发现,离爆心距离越远,其不确定度值越小,可知实验测试装置对爆炸近场的爆炸超压峰值测量结果影响更大,导致测量数据的震荡范围较大。同时,对自由场测试和地面测试方法进行对比发现,自由场式测试系统测得的超压值的不确定度略低于地面壁面式测试系统测得超压值的不确定度,说明自由场式超压测试系统应用于普通高能炸药的超压测试是一种有效的测试手段[10-11]。

而在云爆药剂的爆炸实验中,不论是一次云爆药剂还是二次云爆药剂,爆炸超压峰值的测量结果随机性较大,这是由于云爆药剂的组分复杂,同时其爆炸威力受环境条件影响较大,和 TNT 的爆炸测试结果类似,云爆药剂近场超压峰值测试结果的不确定度相比远场要大,进一步说明远场超压测试的结果更为可靠。

表 1 3 种药剂实测的超压数据

Table 1 Overpressure data of three explosives

药剂	布置方式	发次	超压/kPa				
			2 m	3 m	4 m	5 m	6 m
TNT	地面	第 1 发	562.1	209.3	114.6	77.2	57.7
		第 2 发	545.8	224.1	126.6	80.9	60.8
		第 3 发	546.2	218.2	121.8	83.1	58.9
		平均值	551.4	217.2	121.0	80.4	59.1
		不确定度	5.31	4.33	3.48	1.69	0.87
	空中	第 1 发	394.2	132.9	65.9	37.3	23.7
		第 2 发	409.4	137.7	63.8	38.2	25.1
		第 3 发	397.1	128.9	62.2	36.7	25.6
		平均值	400.2	133.2	63.9	37.4	24.8
		不确定度	4.65	2.54	0.99	0.44	0.57
SEFAE	地面	第 1 发	1 031.2	410.4	285.4	131.2	79.5
		第 2 发	991.7	369.5	236.8	148.1	86.9
		第 3 发	1 011.9	370.7	247.9	134.7	86.8
		平均值	1 011.6	383.5	256.7	138.0	84.4
		不确定度	11.41	13.44	14.71	5.13	2.47
	空中	第 1 发	760.4	291.6		72.1	52.1
		第 2 发	697.5		113.9	62.7	33.1
		第 3 发		269.8	114.3	65.3	52.6
		平均值	728.9	280.7	114.1	66.7	45.9
		不确定度	31.45	10.87	0.19	2.79	6.42
DEFAE	地面	第 1 发		576.3	346.3	208.8	126.8
		第 2 发	1 222.8	625.8	349.7	182.8	134.7
		第 3 发	1 285.8	642.3	369.8	199.7	117.4
		平均值	1 254.3	614.8	355.3	197.1	126.3
		不确定度	31.50	19.80	7.31	7.61	5.01
	空中	第 1 发		435.8	199.8	114.5	66.2
		第 2 发	852.2	489.7	220.2	123.8	76.7
		第 3 发	832.8	440.9	208.2	95.6	61.7
		平均值	842.5	455.5	209.4	111.3	68.2
		不确定度	9.64	17.20	5.90	8.30	4.50

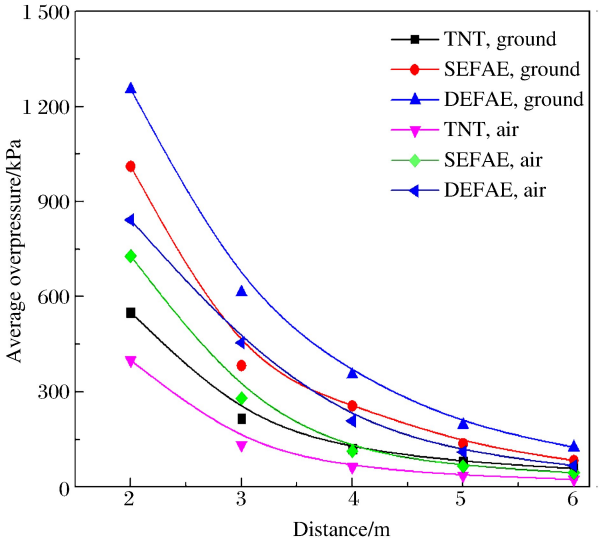


图 3　3 种药剂超压的平均值

Fig. 3　Mean values of three kinds of explosive overpressure

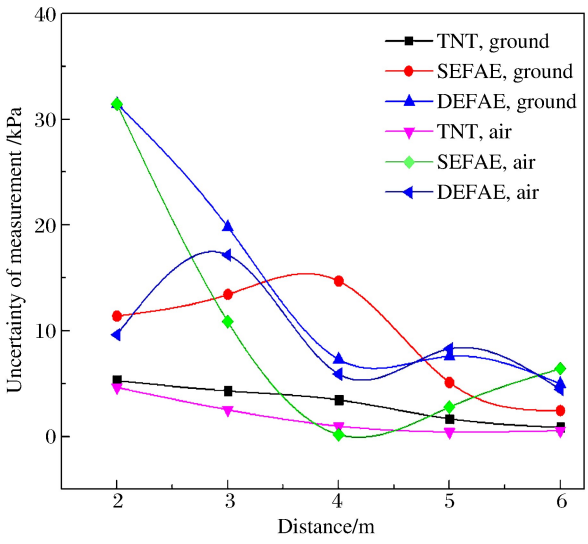


图 4　3 种药剂超压的不确定度

Fig. 4　Uncertainty of three kinds of explosive overpressure

2.2　云爆药剂超压的 TNT 当量分析

爆炸源爆炸时，产生的高温、高压火球膨胀，在周围介质中形成连续向外传播的压力脉冲（冲击波），冲击波阵面传播到空间某点时，超过周围环境大气的压力，便形成了超压[12]。爆炸相似率 $\Delta p=f\left(\frac{\sqrt[3]{m}}{r}\right)$ 中，Δp 为超压，m 为炸药装药量，r 为距爆心的距离。一般地，超压公式简化为：

$$\Delta p=a\left(\frac{m^{1/3}}{R}\right)+b\left(\frac{m^{1/3}}{R}\right)^2+c\left(\frac{m^{1/3}}{R}\right)^3 \tag{1}$$

根据实验所得数据（见表 1），利用最小二乘法可分别拟合出地面和空中的超压公式。

TNT 爆炸地面超压公式为：

$$\Delta p_g=168\left(\frac{m^{1/3}}{R}\right)+247\left(\frac{m^{1/3}}{R}\right)^2+1\ 389\left(\frac{m^{1/3}}{R}\right)^3 \qquad 1.59\leqslant\frac{R}{m^{1/3}}\leqslant 4.76 \tag{2}$$

TNT 爆炸空中超压公式为：

$$\Delta p_a=38\left(\frac{m^{1/3}}{R}\right)+98\left(\frac{m^{1/3}}{R}\right)^2+1\ 350\left(\frac{m^{1/3}}{R}\right)^3 \qquad 1.59\leqslant\frac{R}{m^{1/3}}\leqslant 4.76 \tag{3}$$

式中：Δp、m、r 的单位分别为 kPa、kg、m。

云爆药剂的 TNT 当量是指一定量级装药的云爆药剂爆炸，引起的气体运动（包括冲击波）的全部能量与相应量级（质量）TNT 的爆炸能量之比。采用超压 TNT 当量评价云爆药剂，能够比较准确地反映云爆药剂爆炸场各区域的实际威力。输出参数的选择有多种，通常为爆热、超压等，本实验中以超压作为评价参数。使用拟合得到的 TNT 地面和空中超压数据公式，把云爆药剂测得的超压值分别代入式（2）、（3），算出相应的 TNT 当量值 W_i，由 $\overline{W}=\sqrt{\frac{W_i^2}{n}}$ 求得云爆药剂的 TNT 当量，$\overline{W}$ 与云爆药剂的装药之比 W_0 就是 TNT 当量比。将云爆药剂超压数据反代入 TNT 超压公式求出各点 TNT 当量值，结果见表 2。

由表 2 可以看出：对于 SEFAE，壁面式超压测试系统得到的 TNT 当量比为 2.37，自由场式超压系统测到的 TNT 当量比为 2.10。对于 DEFAE，壁面式超压测试系统得到的 TNT 当量比为 3.81，自由场式超压系统测到的 TNT 当量比为 3.55。

表 2 两种云爆药剂各测点对应的 TNT 当量

Table 2 Measuring points of FAE corresping to TNT equivalent

药剂	布置方式	W_i/kg					$\overline{W}$/kg	$\overline{W}/W_0$
		2 m	3 m	4 m	5 m	6 m		
SEFAE	地面	4.56	4.28	5.97	4.79	3.77	4.73	2.37
	空中	3.80	4.61	3.97	4.12	4.49	4.21	2.10
DEFAE	地面	5.30	7.72	9.19	8.08	7.23	7.61	3.81
	空中	4.42	7.76	7.88	7.53	7.31	7.10	3.55

分析两种测试方法计算的 TNT 当量结果，可以看出根据壁面式测试系统所测超压计算得到的云爆药剂的 TNT 当量高于自由场式测试。云爆药剂属于体积爆轰，爆轰时燃料边抛撒边和空气反应，形成持续的后燃反应，单质炸药则属于点源爆轰；因此，在单质炸药爆轰形成的冲击波传播发生马赫反射的测点处，云爆药剂不一定发生相同类型的冲击波反射，所以单纯地采用地面反射的方法对云爆药剂进行 TNT 当量计算可能不够准确。相对而言，虽然自由场式超压测试系统有一定的局限性，如实验场中自由场式传感器的布置方式对流场有一定影响，但实际上可以认为自由场式超压测试系统能直接测得云爆药剂的静压，可以获得较为准确的 TNT 当量。云爆药剂威力评估的主要参数为超压和正压作用时间，其正压作用时间比普通高能炸药长，发生马赫反射时入射波和反射波的交点被抬升而离开地面，三波点处的各个区域间相互作用复杂，马赫杆是强间断面而不是爆轰波阵面本身，因此采用壁面式超压测试系统实测的波形中的超压与正压作用时间并不能真实地反映爆炸冲击波本身波形。

由表 1 可以看出：由于地面存在马赫反射，所以测试获得的超压值相对较高。在 GJB 5412-2005《燃料空气炸药(FAE)类弹种爆炸参数测试及爆炸威力评价方法》中，针对云爆药剂爆炸冲击波流场复杂性的考虑，均利用壁面式超压测试系统得到马赫波的超压值，但是壁面式和自由场式超压测试系统都有各自特点。我们希望通过以后的实验研究，将壁面式和自由场式超压测试系统结合起来运用，设计相对合理的实验场及测试系统，用以减小 FAE 爆炸冲击波流场的复杂性给测试带来的影响，为云爆药剂的爆炸场参数研究和威力评估提供有效的参考。

3 结 论

(1)从壁面式与自由场式两种超压测试系统得到的结果可以看出，SEFAE 和 DEFAE 的超压值均高于 TNT，具有典型的云雾爆炸场特征，表明 SEFAE 和 DEFAE 是优于普通高能炸药的药剂。

(2)采用 TNT 现场爆炸标定法计算 SEFAE、DEFAE 的 TNT 当量：SEFAE 壁面式超压测试法所得的 TNT 当量比为 2.37，其自由场式超压测试得到的 TNT 当量比为 2.10；DEFAE 壁面式超压测试法所得的 TNT 当量比为 3.81，其自由场式超压测试得到的 TNT 当量比为 3.55。

(3)在测试 TNT 爆炸实验中，自由场式测试系统测得超压值的不确定度略低于壁面式测试系统测得超压值的不确定度，说明自由场式超压测试系统应用于普通高能炸药的超压测试中是一种有效的测试手段。而在 FAE 爆炸实验中，测量超压值的不确定度分布就表现得较为随机，其原因在于云爆药剂的爆炸冲击波流场的复杂性，云爆药剂爆炸冲击波流场不是理想柱对称的。相对于近场测试超压值的不确定度，远场则相对较小，说明远场的超压测试值的还是具有较高的可信度。

参考文献：

[1] 白春华，张奇，刘庆明，等. FAE 武器威力评价方法探讨[J]. 爆破，2001，18(2)：83-86.
BAI Chunhua, ZHANG Qi, LIU Qingming, et al. Study on the evaluation methods of FAE-weapon strength[J]. Blasting, 2001, 18(2): 83-86.

[2] 胡华权，裴明敬，许学忠，等. 燃料空气炸药爆炸威力评价方法研究[C]// 第四届全国爆炸力学实验技术学术会议. 2006：313-318.

[3] 陈昊，陶钢，蒲元. 冲击波的超压测试与威力计算[J]. 火工品，2010(1)：21-24.
CHEN Hao, TAO Gang, PU Yuan. Shock wave overpressure measurement and power calculation[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(1):21-24.

[4] 刘庆明，白春华，李建平. 多相燃料空气炸药爆炸压力场研究[J]. 实验力学，2008，23(4)：360-370.
LIU Qingming, BAI Chunhua, LI Jianping. Study on blast field characteristics of multiphase fuel air explosive[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008,23(4):360-370.

[5] BEN-DOR G, IVANOV M, VASILEV E I. Hysteresis processes in the regular reflection↔Mach reflection transition in steady flows[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002,38(4/5):347-387.

[6] COURANT R, FRIEDRICHS K O. Supersonic flow and shock waves[M]. Springer, 1976:331.

[7] 张陶，惠君明，解立峰，等. FAE 爆炸场超压与威力的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2004，24(2)：176-181.
ZHANG Tao, HUI Junming, XIE Lifeng, et al. Experimental research on the overpressure and power in the FAE blast field[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):176-181.

[8] 周莉. 温压炸药的爆炸参数测试与威力评估[D]. 南京：南京理工大学，2013.

[9] 谢立君，叶剑飞，周凯元，等. 固态燃料小型 FAE 装置空中爆炸场效应分析[J]. 实验力学，2005，20(4)：579-583.
XIE Lijun, YE Jianfei, ZHOU Kaiyuan, et al. Effects analysis of blast field of solid FAE Device in free air[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005,20(4):579-583.

[10] 张玉磊，苏健军，姬建荣，等. 超压测试方法对炸药 TNT 当量计算结果的影响[J]. 火炸药学报，2014，37(3)：16-19.
ZHANG Yulei, SU Jianjun, JI Jianrong, et al. Effect of overpressure test method on calculated results of TNT equivalence[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2014,37(3):16-19.

[11] 周杰. 爆炸冲击波作用下的人体创伤及泡沫材料对冲击波的衰减机理研究[D]. 南京：南京理工大学，2014.

[12] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组. 爆炸及其作用(第二册)[M]. 北京：国防工业出版社，1979：279-280.

Explosion overpressure measurement and power evaluation of FAE

RAO Guoning[1], ZHOU Li[1], SONG Shuzhong[2],
XIE Lifeng[1], LI Bin[1], PENG Jinhua[1]
(1. *School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Beijing Auxin Chemical Technology Ltd., Beijing* 100040, *China*)

Abstract: In this paper, we measured the blast overpressures of TNT, SEFAE and DEFAE using a pressure measuring system and pressure transducers installed in the free field and on the ground. The data obtained were analyzed and fitted with the blast overpressure development formulas for three explosives. The results showed that the average TNT equivalence of DEFAE in the free field and on the ground were 60% and 69% bigger than that of SEFAE respectively, suggesting that the power of DEFAE was bigger than that of SEFAE. For each of the three explosives the overpressure measured was 10% lower than that on the ground due to the reflection wave generated by the ground. In the actual test, a fixed correction factor needs to be adopted. These results may add to analysis of small quantity of FAE and traditional explosives and serve as reference for the investigations of the blasting power of FAE.

Keywords: fuel air explosive; overpressure measurement; TNT equivalence; blasting field

(责任编辑　丁　峰)