

文章编号: 1006-9941(2013)04-0539-08

# 有限空间内部爆炸研究进展

胡宏伟, 宋 浦, 赵省向, 冯海云

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 分析了有限空间内爆炸的能量释放特点和毁伤方式, 从冲击波特性、热效应、准静态压力、结构动态响应、数值模拟、炸药综合威力评估 6 方面综述了有限空间内爆炸作用的研究, 认为应建立表征内爆威力的屋顶举起实验装置, 加强多毁伤元耦合作用对目标破坏的研究, 将屋顶举起作功能力和准静态压力纳入内爆炸威力评估体系, 建立科学、有效的内爆炸威力评估方法。

**关键词:** 爆炸力学; 有限空间内爆炸; 冲击波屋顶举起; 准静态压力

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.026

## 1 引言

随着防御体系的发展, 具有重要战略价值的军事目标(如指挥中心、导弹发射井、机库、舰艇等)结构越来越坚固, 而且这些目标均是由单个或多个密闭、半密闭的空间结构组成, 将发生在密闭和半密闭空间内的爆炸统称为有限空间内部爆炸。为了高效毁伤此类目标, 侵彻技术和钻地武器得到了迅速发展, 涌现了钻地弹和温压弹等以内爆炸作用为显著特点的新型弹药。

弹药有限空间内部爆炸的作用规律, 与开放空间相比差异较大, 约束环境对爆炸作用效果的影响甚为明显。有限空间内部爆炸的特征主要表现为: 冲击波效应显著增强、热效应明显、爆轰产物膨胀作功的有效作用时间更长等, 除了爆炸冲击波和破片的作用外, 热效应和准静态压力成为重要的毁伤方式, 因而装药内爆作用过程的能量利用率更高, 破坏效果大大增强。但由于炸药装药有限空间内部爆炸的作用过程与目标结构的耦合效应显著, 特征参量众多, 作用效应复杂, 致使有限空间内爆炸特征参量的动态测试、表征及毁伤威力的评估非常困难。而国内关于有限空间内爆炸作用的研究, 长期以来基本都集中在冲击波效应, 热效应和准静态压力等毁伤方式没有得到相应的重视, 内

爆作用机理认识不清, 缺乏有效评价内爆威力及其毁伤效果的科学方法及标准, 严重制约了我国内爆型高能炸药及先进弹药战斗部技术的创新发展和提高。

本文在分析有限空间内爆炸的能量释放特点和毁伤方式的基础上, 总结了最近国内外在有限空间内爆炸冲击波特性、热效应、准静态压力、结构动态响应、数值模拟、炸药综合威力评估方面的研究进展, 为深入研究内爆炸作用特性和规律, 揭示弹药有限空间内爆炸的毁伤机理, 提高钻地类武器弹药的研发、毁伤效能预估和防护工程设计提供一定参考和借鉴。

## 2 有限空间内爆炸能量释放特点和毁伤方式

### 2.1 有限空间内爆炸能量释放特点

弹药的发展已经不再局限于传统物质和传统能量释放方式<sup>[1]</sup>, 不仅要借用体系外的物质(例如空气和水)和能量, 还与目标发生耦合作用, 产生新的作用方式。

与开放环境相比, 弹药在密闭/半密闭空间内爆炸具有以下特征: (1) 约束结构与爆炸产物耦合作用产生紊流, 反射冲击波加热爆轰产物且金属粒子可能产生破碎, 使爆轰产物与空气混合更充分, 反应效率更高, 能量释放更充分, 见图 1<sup>[2]</sup>; (2) 壁面反射产生冲击波多峰现象, 能量利用率提高; (3) 热效应显著, 有效作用时间更长; (4) 爆轰产物气体在约束环境内形成准静态压力, 综合杀伤效果更好。密闭空间内爆炸的能量结构组成如图 2 所示<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2012-07-14; 修回日期: 2012-11-01

基金项目: 国家安全重大基础研究(批准号: 61314303), 国防科技工业新产品创新计划火炸药科研专项。

作者简介: 胡宏伟(1982-), 男, 工程师, 主要从事爆炸作用与毁伤技术研究。e-mail: hhw505@163.com

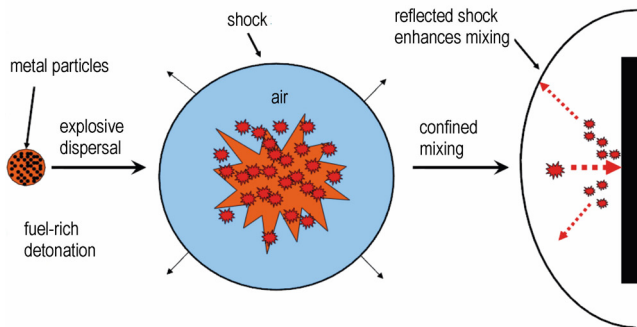


图1 密闭空间内爆炸的能量释放机理

Fig.1 Energy release mechanism from an enclosed explosion

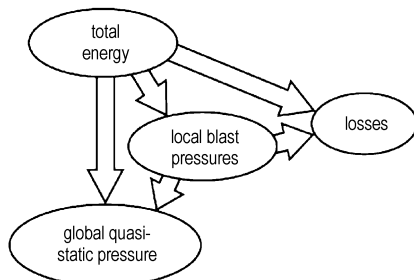


图2 密闭空间内爆炸的能量结构组成

Fig.2 Diagram of energy cascade in confined space

## 2.2 有限空间内部爆炸的毁伤方式

有限空间内爆炸与目标结构的耦合效应显著,特征参量众多,作用效应复杂,其毁伤方式主要包括:

(1) 冲击波多峰效应。初始冲击波遇到壁面产生多次反射波或汇聚波,对目标造成多次毁伤。

(2) 热效应。环境约束使其有效作用时间更长,主要用来杀伤软目标,热毁伤的因素决定于热流量密度-持续时间。

(3) 准静态压力<sup>[3]</sup>。爆轰产物会产生一个压力比冲击波峰值超压小很多,但作用时间很长的气体压力,其变化过程很慢,可近似为一个准静态过程,因此,爆轰产物气体在约束环境中形成的压力称为准静态压力。由于在约束环境中准静态压力作用时间很长,产生的冲量非常大,对目标的毁伤效应非常好,是有限空间内爆炸的一个重要毁伤元素。

(4) 窒息效应。对于高贫氧炸药,爆炸时周围空气中氧气大部分参加反应,可以造成局部缺氧状态,化学反应过程中又会生成大量一氧化碳、二氧化碳等有毒气体,对人员有窒息作用。

(5) 震塌效应。对于大当量的弹药,爆炸产生的振动效应能够使密闭空间结构产生局部或整体的震塌。

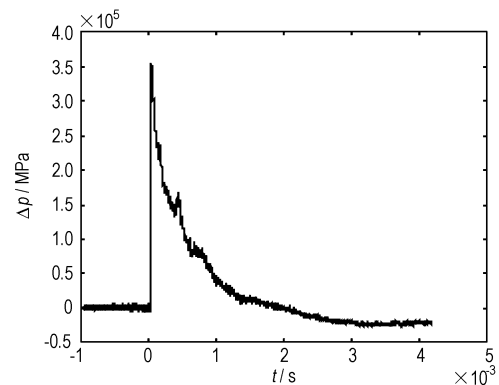
(6) 破片效应。破坏目标局部结构,杀伤结构内的

人员、仪器、设备、装备等。

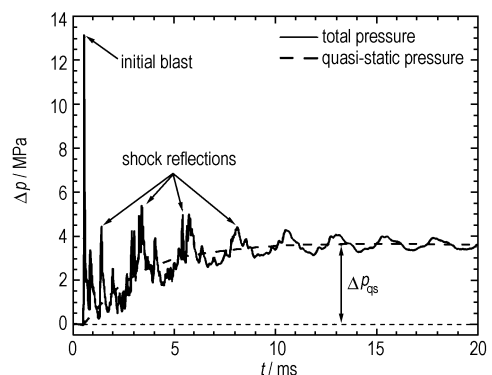
## 3 有限空间内部爆炸作用规律研究

### 3.1 有限空间内爆炸冲击波特性

第二次世界大战以来,人们对简单、复杂和真实的密闭与半密闭结构进行了大量的研究,研究成果也较为丰富。最初的研究认为与开放空间一样,冲击波是破坏目标的主要因素,主要的差异在于冲击波的多次反射作用,因此,研究也主要集中在密闭结构内冲击波载荷的分布和反射<sup>[4-5]</sup>。自由空间和有限空间内爆炸的压力-时间波形图如图3<sup>[3]</sup>所示。



a. air blast wave profile



b. internal blast wave profile

图3 空中爆炸和有限空间内爆炸的压力-时间波形图

Fig.3 Pressure-time curve of explosion in free and confined space

冲击波在结构内壁上发生发射后,圆桶、箱型等复杂结构的内爆炸压力载荷变得非常复杂,不可能精确计算其内爆炸载荷,因此人们在坑道和钢筋混凝土密闭结构内进行了大量的实验研究。目前研究最多、最为成熟的是坑道或洞室中冲击波传播规律,表1为坑道或洞室中冲击波参数的经验计算公式。

表 1 坑道或洞室中冲击波参数的经验计算公式

Table 1 Empirical formulation of calculating the shock wave parameter in tunnels or cave

formula	application range	application conditions	reference
$\Delta p = C(L/D)^{-B} (Q^{1/3}/D)$	a) $-3.5 \text{ m/kg}^{1/3} \leq R/Q^{1/3} < 0.3 \text{ m/kg}^{1/3}$ $C = 2200e^{R/Q^{1/3}}, B = 0.95 + 0.16R/Q^{1/3}$ b) $R/Q^{1/3} \geq 0.3 \text{ m/kg}^{1/3}$ $C = 3000, B = 1.00$	blast at a) the external, entrance and b) internal of tunnel	[7,8]
$\Delta p = 0.155(Q/SL)^{1/3} + 0.92(Q/SL)^{2/3} + 4.4 Q/SL$	$1 \leq (SL/2\pi Q) \leq 10 - 15$	internal blast in long straight tunnel	[9]
$\Delta p = 1.76 Q/D^2 L + 0.426(Q/D^2 L)^{1/2}$	$0.656 \leq (Q/D^2 L) \leq 10.5$	blast at the entrance of tunnel	[10]
$\Delta p = 0.169(Q/SL)^{1/3} + 0.027(Q/SL)^{2/3} + 2.03 Q/SL$	$1.2 \leq R/Q^{1/3} \leq 2.8 \text{ m/kg}^{1/3}$	blast inside tunnel	[11]
$\Delta p = (0.4 + H/(H^2 + L^2)^{1/2})(Q/SL)^{0.87} (Q^{1/3}/H)^{1.11}$	$0.35 < SL/Q < 80,$ $0.26 < H/Q^{1/3} < 0.65$	shock wave overpressure of near field	[10]
$\Delta p_n = \Delta p_0 (0.94)^n$	-	the tunnel which have n right-angle turn	[12]
$\Delta p_2 = \Delta p_0 (A_1/A_2)^{1/2}$	long time shock-wave	shock wave transmit from small space to big space	[12]
$l = 3143(Q^{1/3}/S^{1/2})((Q/RS)^{1/3} - 2(Q/RS)^{2/3} + 1.52Q/RS)$	$1.2 \leq R/Q^{1/3} \leq 2.8 \text{ m/kg}^{1/3}$	blast at the entrance of tunnel	[11]
$t_d = A(L/D)^B (D^2/Q^{1/3})$	constant-area tunnel	blast at the entrance of tunnel	[13]

Note:  $Q$  is TNT equivalent, kg;  $S$  is the cross-sectional area of tunnel or cavern,  $\text{m}^2$ ;  $L$  is the distance from the center of charges to sensors, m;  $D$  is the diameter of tunnel or cavern, m;  $R$  is the distance from charges to the entrance of tunnel, m;  $B, C$  is a constant.

冲击波初次反射的压力值可以用刚性壁面上产生的反射理论来估算。王鹤鸣等<sup>[14]</sup>研究了巷道内爆炸冲击波的多次峰值现象,提出了二次峰值的计算公式。

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \cdot \exp(0.197311) \cdot \left(\frac{H\Delta p_1^{1/3}}{R^{1/3}}\right)^{-0.166251} \cdot \left(\frac{S}{R^2}\right)^{-0.26075} \quad (1)$$

但由于冲击波在地面、侧壁和顶部发生多次反射并发生汇聚作用,后续的冲击波变得十分复杂,三次峰值以后的压力很难精确计算。

### 3.2 有限空间内爆炸热效应

与冲击波研究相比,最初热效应和热杀伤作用的研究主要集中在核爆炸。而常规杀爆战斗部是靠战斗部壳体内凝聚炸药瞬时爆轰来驱动壳体运动,利用冲击波和破片毁伤目标,热效应研究并没有得到重视。主要原因在于:(1)开放空间,常规弹药的热效应持续时间较短,热杀伤作用有限;(2)由于爆炸的瞬间破坏效应,爆炸热效应的实验测量困难。温压炸药出现后,热效应成为一种重要的毁伤方式,在有限空间内,温压炸药产生高热和冲击波无孔不入,可以进入破片无法到达的地方杀伤目标,特别适合毁伤洞穴、地下工事、建筑物等封闭空间内的人员,并对隐匿地下的设备和系统造成严重损毁。

与开放空间相比,有限空间内的高温作用时间变长,金属粉更容易反应释放更多的能量,增强毁伤效果。目前对有限空间内爆炸热效应的研究主要集中在热效应测试技术、热辐射破坏准则、火球和爆炸场的温度效应等方面。惠君明等人<sup>[15]</sup>研究了高温场的燃烧和热作用,研究表明影响热毁伤的因素主要决定于热

流密度及其持续时间,即  $q-t$  关系。TDS 公司<sup>[16]</sup>在  $3.7 \text{ m} \times 3.0 \text{ m} \times 2.4 \text{ m}$  密闭结构中,使用热电偶测量了一系列胶质、复合高能温压炸药内爆炸的热效应,用  $0 \sim 10 \text{ s}$  的温度波形进行积分计算得到的数值用来表示热输出。Astbury<sup>[17]</sup>等人在房间大小的封闭体内进行爆炸的研究发现,一个房间内的火焰传播的另一个房间时,会在第二个房间产生更严重的破坏。李媛媛等<sup>[18]</sup>研究了在半密闭条件下不同含铝炸药爆炸场温度,研究表明铝含量的增加可提高爆炸场温度及温度对环境的作用时间,当铝粉的质量分数为  $30\% \sim 40\%$  时,爆炸温度出现温度平台(大约在  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ )。胡宏伟<sup>[19]</sup>等利用比色测温仪测量了 TNT 和某种非理想炸药的爆炸火球的表面温度,研究发现爆炸火球的表面温度与炸药的性质有关,而炸药的质量对其影响很小。Baker 等<sup>[20]</sup>研究得到了不同种类炸药火球直径、持续时间与炸药(燃料)质量之间的关系模型:

$$D = am^b, t = cm^d \quad (2)$$

式中,  $a, b, c, d$  为常数。

但由于接触测温测试技术还不太成熟,目前的研究工作者主要采用非接触测温(比色测温、红外测温等)开展相关研究,工作相应也较少一些。

### 3.3 有限空间内爆炸准静态压力研究

有限空间内爆炸的爆炸能量由爆轰和后燃烧能量两部分组成<sup>[2]</sup>,即冲击波动压和爆轰产物产生的准静态压力,见图 4<sup>[3]</sup>。准静态(爆炸产物)压力,即高能炸药在结构内爆炸时,冲击波在结构内产生反射,随着时间

的增加, 压力幅值和波动减弱, 并且爆轰产物气体压力在密闭空间内分布均匀, 产生一个压力幅值比反射冲击载荷峰值小很多, 但作用时间很长的压力, 见图 3(b)。此过程与结构容积、泄压面积、爆炸能量释放特性有关。

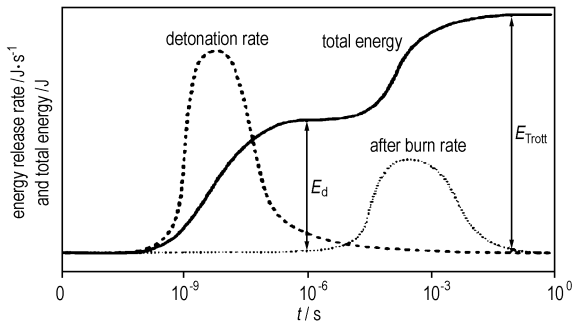


图 4 典型富燃料炸药的总能释放与能量释放率时程曲线

Fig. 4 Time history of total energy release and energy release rates for a typical fuel-rich explosive

最先关注准静态压力的是密封抗爆结构强度设计人员, 20 世纪 60 年代以前, 密封抗爆结构的强度设计一般都忽略准静态气体压力, 因为他们认为结构破坏的主要因素是反射冲击波压力。20 世纪 70 年代, Trott<sup>[21]</sup> 发现导致球形爆炸容器破裂的主要原因是准静态的爆炸产物压力, 而非瞬态的爆炸反射冲击波, 准静态气体压力研究逐渐得到了重视, 研究者所关注的参量主要是准静态气体的峰值压力及其持续时间。Weibull H R W<sup>[22]</sup> 和 Esparala E D<sup>[23]</sup> 证明了最大准静态压力与泄压面积无关, 而是装药量与容器容积之比 ( $m/V$ ) 的函数。表 2 为部分有代表性的准静态压力经验计算公式。

表 2 准静态压力的经验计算公式

Table 2 Empirical formulation of calculating the quasi-static pressure

researcher	formula	applicable conditions
Carlson <sup>[24]</sup>	$p = 1.30m/V$	most of HEs
Moir <sup>[25]</sup>	$p = (1.34 \pm 0.19)m/V$	most of HEs
Anthony <sup>[26]</sup>	$p = 0.97m/V$	only LX-13
TM5-1300 <sup>[27]</sup>	$p = 2.26(m/V)^{0.72}$	$m/V < 1$
Ki-Bong Lee <sup>[28]</sup>	$p_{QS} = 0.146 + 0.193\Delta H_c$	most of HEs

海军水面战争中心达兰格林分部<sup>[3]</sup> 提出了一种利用密闭空间爆炸中压力-时间历程来评估爆轰和后燃烧能量释放(即准静态压力)的方法, 该方法假设反应时间被分为两部分, 一部分发生在微秒时间尺度, 一部分发生在毫秒时间尺度, 基于压力即可定量测量初期反应和后燃烧反应的相对数量。Sung-ho Kim<sup>[29]</sup> 测

量了三种 PBXs 炸药隧道内爆炸的准静态压力用于评估炸药的内爆性能, 对比了自由空气中爆炸威力和内爆威力的差异, 发现自由空气中爆炸威力高的炸药并不具有最好的内爆性能。Thomas S F<sup>[30]</sup> 研究发现密闭空间内的冲击波反射和爆轰产物的抑制膨胀使其与自由场爆炸具有不同的能量输出特性, 这是由于自由场缺乏围墙(约束结构)和反射压力使紊流混合较弱, 爆炸产物迅速膨胀, 没有后燃烧过程, 导致密闭结构中爆炸威力较高的炸药在自由空气中爆炸威力不高。

由于准静态压力作用时间很长, 产生的冲量非常大, 而且总能量的释放(即爆轰加后燃烧)仅是终态准静态压的函数<sup>[3]</sup>, 因此, 准静态压力作为评估炸药的内爆性能的一个重要特征参量, 应当纳入内爆类武器的技术指标的评估体系。

### 3.4 有限空间内爆炸结构动态响应

有限空间内爆炸会导致结构变形、破裂、崩塌和解体等效应, 对于内爆类弹药战斗部、舰艇和防护结构的设计非常重要, 目前主要是通过小当量、小尺寸的缩比模拟实验来进行研究, 包括爆炸容器、钢筋混凝土模拟结构、各种等效靶标和实体结构等。

对于爆炸容器, W. E. Baker 等<sup>[31]</sup> 将球对称壳体的振动简化成一维弹性振动或一维弹塑性振动, 建立了一维壳体弹性振动方程以及弹塑性振动方程, 求出了载荷形式为线性衰减的壳体运动的弹性及弹塑性解。Behnem<sup>[32]</sup> 采用带应变硬化的刚塑性模型, 同时考虑冲击载荷及准静态压力的作用, 得到了壳体径向相应的解析解。对于任意形式的载荷或多次循环载荷, Adischer<sup>[33]</sup> 给出有限长圆柱壳的动态振动方程, 文中考虑了边界条件的影响, 得到了方程的本征函数解。Dörr<sup>[34]</sup> 利用理论分析和数值模拟提出了一种预估混凝土结构内爆炸作用下混凝土板飞散速度的半理论经验计算方法。邓国强<sup>[35]</sup> 研究发现密集弹片群不仅产生聚集局部破坏效应, 还会将能量传递到结构, 使之产生整体破坏效应, 弹片群的整体破坏在防护结构设计是不能被忽略的。郭志昆<sup>[36]</sup> 对扁平箱形钢筋混凝土密闭模型结构进行了药量递增直至破坏的内爆炸实验, 结果表明, 作用在结构内表面上的压力是非线性下降的, 具有周期性宏观脉动特征, 结构破坏形式以顶板的双向受弯破坏为主。侯海量等<sup>[37]</sup> 通过对典型半穿甲导弹打靶实验中舰艇结构破坏模式的观察, 结果表明舱内爆炸下, 舱室板架结构承受的冲击载荷及失效模式与敞开环境爆炸下加筋板结构承受的冲击载荷及失效模式有较大区别, 其动态响应难以用敞开环

境爆炸下加筋板结构的动态响应描述,舱室板架结构主要有4种失效模式,舱室板架结构加强筋布置在迎爆面将使板架中部的局部破坏程度增加,但有利于削弱角隅汇聚冲击波强度,减小板架沿角隅部位的撕裂破坏。李伟等<sup>[38]</sup>研究内爆条件下高速破片和爆炸冲击波对舱室结构的联合毁伤效应,研究表明模拟战斗部内爆载荷作用下舱室结构的整体变形以冲击波破坏为主,战斗部破片对舱室板架产生侵入穿孔破坏,并在近爆区板架上形成了破口密集区域,单个破口对舱室整体结构破坏影响不大,而密集破口区在后续冲击波作用下会发生撕裂,形成大破口,影响舱室整体结构性能。

### 3.5 有限空间内爆炸作用数值模拟

关于一般爆炸流场的计算已有相当广泛的研究,但是直到1981年才由ZhdanSA<sup>[39]</sup>最早直接针对球

形爆炸容器数值模拟了凝聚相炸药在其内部产生的爆炸流场。此后,不少学者对爆炸流场进行了广泛深入的数值模拟研究。Wang J C T等<sup>[40]</sup>采用有限差分法计算了敞开圆柱形激波管内的爆炸流场。Marchand K A<sup>[41]</sup>则用自由空气中固体炸药的爆炸波参数作为初值,采用射线追踪和镜像炸药法来考虑激波反射,计算了容器的载荷。Giglio M<sup>[42]</sup>利用有限差分法计算了球形爆炸容器壁对爆炸荷载的响应。德国的恩特斯-马赫研究所和美国内华达大学各开发了一种冲击波计算程序,可以计算不同类型坑道和多个连体腔室的冲击波变化规律<sup>[12]</sup>。W. Armond<sup>[43]</sup>等使用轴对称模型对八角形爆炸塔内的爆炸流场分布进行了模拟,爆炸流场的数值模拟结果见图5。

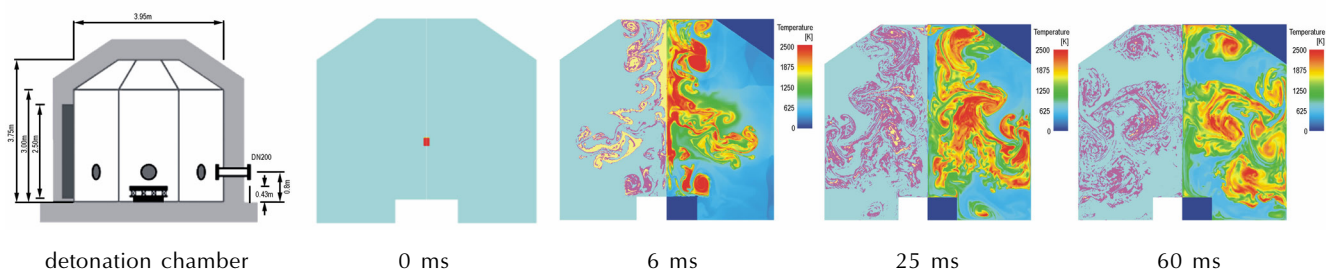


图5 约束空间内爆炸流场的数值模拟

Fig.5 Numerical simulation on explosion flow field in confined space (left, material location; right, temperature)

国内关于有限空间内爆炸流场的数值模拟成果也比较丰富。曹玉忠等<sup>[44]</sup>采用计算流体动力学中的二阶精度TVD差分格式和特殊算子分裂法,按轴对称问题,对半球顶圆柱筒密闭式抗爆容器内部爆炸流场进行了数值模拟,计算得到的容器壁面载荷分布与实验结果基本一致。贾晓东等<sup>[45]</sup>用爆炸动力学程序object MMIC对约束空间内FAE爆炸压力场分布特点的相关问题进行了数值模拟。杨秀敏等<sup>[46]</sup>对封闭空间内爆炸效应进行了数值模拟,分析了冲击波和弹片的复合作用下,封闭结构墙体的破坏效应。宋卫东等<sup>[47]</sup>利用自编程序MMIC3D建立了机库的三维数值模型,采用三维Youngs界面技术对战斗部侵入机库后发生爆炸情况下的流场分布进行了三维数值模拟。给出了不同关键点的压力曲线和一些规律性的仿真结果,并且通过计算结果的动画处理,清晰地看到战斗部在机库内部爆炸后所形成冲击波的传播规律。周清<sup>[48]</sup>利用LS-DYNA软件,采用ALE方法,定性地研究了长方体和无限长坑道等密闭空间内爆炸引起的内壁上超压的分布规律,并且提出了一种计算内壁超压时程的简化方法。

### 3.6 有限空间内爆炸综合威力评估

有限空间内爆炸不同于空中爆炸,只用冲击波能即可表征其爆炸威力,环境约束条件导致其毁伤机理更加复杂,存在冲击波、热效应和准静态压力等多种毁伤元素,爆炸威力的表征及评估非常困难。依据有限空间内爆炸的目标特性和能量释放特点,人们采用了多峰冲击波的峰值压力和冲量、屋顶上升的作功能力、准静态压力来表征内爆炸药的爆炸威力,用于内爆炸药的评估。

海军水面战争中心印第安纳分部(NSWC IHD)和Talley防御系统公司(TDS)在钢筋混凝土双室建筑中(见图2)对几种现存和新开发炸药进行了实验,依据压力和冲量建立了一套内爆炸药筛选准则<sup>[49]</sup>。此外,TDS<sup>[16]</sup>对一系列高能温压炸药进行了内爆炸实验,建立了一种测量比冲量的新型实验设施—屋顶上升实验装置,通过在密闭结构(3.7 m×3.0 m×2.4 m,设计炸药质量500~800 g)上部加盖一定重量的顶盖,观察炸药爆炸后屋顶的上升位移来计算比冲量,并与由压力传感器数据计算的冲量结合起来,评估高爆温压炸药的相对性能,见图6。



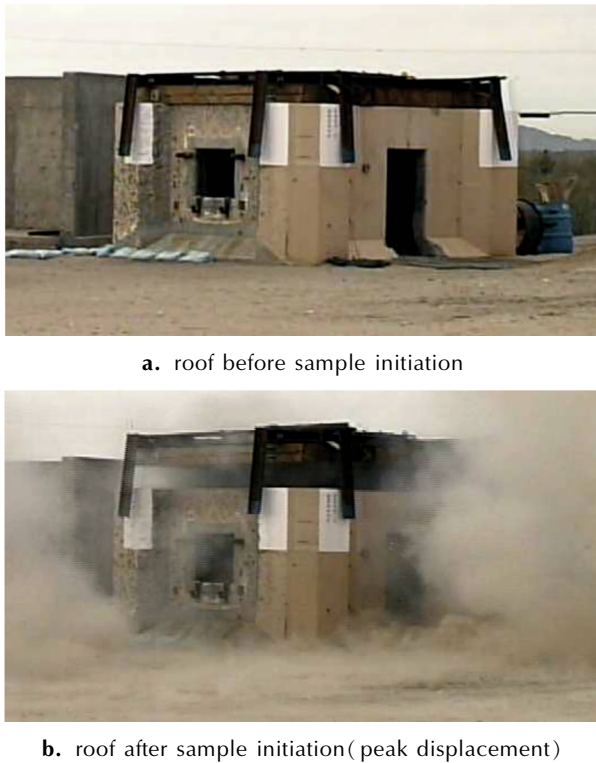


图6 屋顶举起实验装置  
Fig.6 Roof lift experiment facility

Ki-Bong Lee<sup>[28]</sup>等研究发现约束空间内爆炸的举起高度与炸药燃烧热存在一个线性关系,并建立了二者的数学模型方程:

$$Heave(\text{Tritonal}) = -1.309 + 1.147\Delta H_{as} \quad (3)$$

为了评价美国海军“战斧”导弹和空军先进侵彻炸药技术(APET)战斗部所需炸药在密闭腔体内的爆炸威力,海军水面战争中心<sup>[50]</sup>(NSWC)在白橡树试验基地50磅(22.7 kg)试验设施(6.1 m×6.1 m×4.88 m)内对九种备选炸药进行了内爆炸试验,测量了每一种炸药的准静态压力以确定威力,并与PBXN-109炸药进行对比排序,实验证明,PBXN-109和Tritonal证明具有最好的威力。国内,兵器工业204研究所也建立了一套屋顶上升实验装置,测量了十多种炸药的上升位移和平均冲量,对评估内爆炸药的性能效果明显。

但由于不敏感弹药的临界直径较大,大质量装药有限空间内爆炸实验费用较高,美国海军水面战争中心的Granholtm R H<sup>[51-52]</sup>等开发了一个以白橡树试验基地50磅(22.7 kg)试验设施基础的1/40<sup>th</sup>比例模型实验装置(SSBT),用于测量小质量(<0.5 g)的炸药爆炸瞬时(prompt)和后续(late)反应,瞬时爆炸反应通过铝见证块上的炸坑观察,后续反应性通过超压(准静压)测试获得。

国内,武器装备设计中对内爆类型炸药的选取缺乏理论依据,还没有统一的评估准则和标准,应当借鉴国外的经验,依据炸药装药内爆炸作用特点,建立相应的实验装置、评估准则和合理的评判依据等。

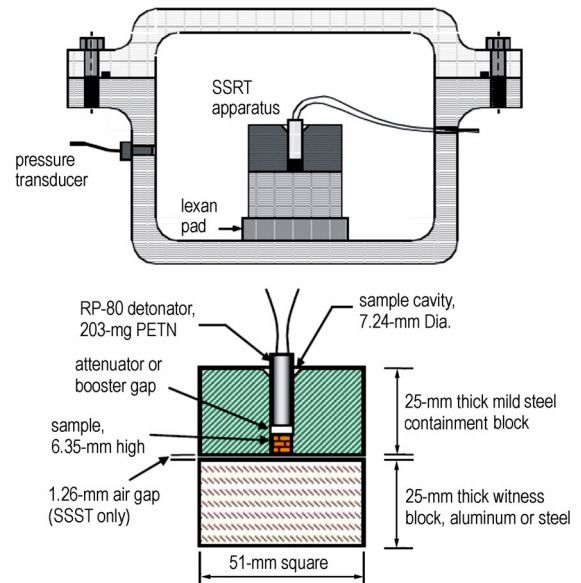


图7 小型爆炸实验装置  
Fig.7 Small-scale blast test in device

#### 4 结束语

随着侵彻/钻地类弹药战斗部的快速发展,国内对侵彻过程的研究已较为完善,但对于内部爆炸作用规律的研究还没有系统展开,缺乏对炸药装药及弹药战斗部在有限空间内部爆炸作用特点、作用规律及效能评估的深入研究。为提升我国侵彻/钻地类弹药的设计及效能评估水平,缩小与国外的差距,建议进行以下研究:

(1) 由于约束结构与爆炸产物耦合作用显著,致使有限空间内部爆炸特征参量的动态测试、表征及毁伤威力评估非常困难,应建立屋顶上升实验装置和准静态压力测试系统等能够表征内爆威力的实验装置和方法。

(2) 内爆弹药的设计以冲击波作为最主要的技术指标,没有突出有限空间内爆炸的能量释放特点和毁伤方式,屋顶上升作功能力和准静态压力作为表征内爆威力的重要毁伤元素,没有得到相应的重视,建议纳入内爆类武器的技术指标评估体系,例如建立考虑了能量权分配分配的冲量-准静态压力评估方法。

(3) 有限空间内爆炸特征参量众多,作用效应复杂,多个毁伤元综合作用下,目标结构及其内部目标的特性在不断变化,需深入开展多种毁伤元素耦合作用

对目标的破坏效应研究,同时开展目标在多次毁伤作用下的易损性研究。

#### 参考文献:

- [1] 王晓峰. 军用混合炸药的发展趋势[J]. 火炸药学报, 2011, 34(4): 1-9.  
WANG Xiao-feng. Developmental trends in military composite explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(4): 1-9.
- [2] Michael D, Andrews W S, Jaansalu K M. The Fragmentation of Metal Cylinders by Thermobaric Explosives[D]. Kingston, CANADA: Royal Military College of Canada, 2005.
- [3] Richard G A, Jason T D, Joseph S, et al. Quantitative distinction between detonation and after burn energy deposition using pressure-time histories in enclosed explosions [C]//13th International Detonation Symposium, Norfolk Virginia, 2006.
- [4] Baker W E. The response of elastic shells spherically symmetric to internal blast loading [C]//Proceedings of the Third U. S. National Congress of Applied Mechanics, ASME, New York, 1958.
- [5] Baker W E, Hu W C L, Jackson T R. Elastic response of thin spherical shells to axisymmetric blast loading [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1966, 33(4): 800-806.
- [6] Kingery C N, Schumacher R N, Ewing W. Internal pressures from explosions in suppressive structures [R]. ADA059966: 1978.
- [7] Charles R W. In tunnel air blast engineering model for internal and external detonations [C]//Proceedings of the International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions With Structures, McLean Virginia, 1997.
- [8] Lunderman C, Ohrt A P. Small scale experiment of in tunnel air blast from external and internal detonations [C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, McLean Virginia, 1997.
- [9] 叶序双. 爆炸作用基础[M]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2001: 104-108.
- [10] 田志敏, 邹玉斌, 罗奇峰. 隧道内爆炸冲击波传播特性及爆炸荷载分布规律研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 21-26.  
TIAN Zhi-min, WU Yu-bin, LUO Qi-feng. Characteristics of in-tunnel explosion-induced air shock wave and distribution law of reflected shock wave load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(1): 21-26.
- [11] 杨科之, 杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 37-40.  
YANG Ke-zhi, YANG Xiu-min. Shock waves propagation inside tunnels [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(1): 37-40.
- [12] 李小军, 张殿臣, 李青献, 等. 常规武器破坏效应与工程防护技术[M]. 洛阳: 总参工程兵科研三所, 2001: 153-170.
- [13] 庞伟宾, 何翔, 李茂生, 等. 空气冲击波在坑道内走时规律的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 573-576.  
PANG Wei-bin, HE Xiang, LI Mao-sheng, et al. The formula for airblast time of arrival in tunnel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 573-576.
- [14] 王鹤鸣, 胡峰. 巷道内爆炸冲击波多次峰值的初步研究[J]. 爆破, 1991(1): 14-15, 46.  
WANG He-ming, HU Feng. A preliminary study on multi-peak pressure of blast wave in tunnels [J]. *Blasting*, 1991(1): 14-15, 46.
- [15] 惠君明, 郭学永. 云炸弹与热压弹 [C]//2002 火炸药技术及钝感弹药学术研讨会, 珠海, 2002.  
HUI Jun-ming, GUO Xue-yong. Fuel air explosive and thermobaric [C]//Proceedings of Symposium on Propellants, Explosives and Insensitive Munitions, Zhuhai, 2002.
- [16] Scott D H, Gregory D K. Development, characterization and testing of high blast thermobaric compositions [C]//The 31th International Pyrotechnics Seminar, Fort Collins, Colorado, 2004.
- [17] Astbury N F, West H W H, Hodgkinson H R. Experimental gas explosions: report of further tests at potters marston [R]. British Ceramic Research Association, special publication No. 74, 1972.
- [18] 李媛媛, 南海. 半密闭条件下爆炸场的温度与压力测量[J]. 火炸药学报, 2008, 31(1): 48-52.  
LI Yuan-yuan, NAN Hai. Detonation field temperature and pressure test under semi-enclosed conditions [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(1): 48-52.
- [19] HU Hong-wei, SONG Pu, FENG Hai-yun, et al. Surface temperature of blast fireball measured by colorimetric thermometer [C]//Proceedings of the first international conference on mechatronic system and measurement technology, Nanjing, 2012.
- [20] Baker W E, Cox P A, Westine P S, et al. 爆炸危险性及其评估(下册)[M]. 张国顺, 文以民, 刘定吉译. 北京: 群众出版社, 1985: 473-479.
- [21] Trott B D, Backofen J, Joseph E, et al. Design of explosion blast containment vessels for explosive ordnance disposal units [R]. ADB016707: 1975.
- [22] Weibull H R W. Pressures recorded in partially closed chambers at explosion of TNT charges [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1968, 152(1): 357-361.
- [23] Esparza E D, Baker W E, Oldham G A. Blast pressures inside and outside suppressive structure [R]. ADA025504, 1975.
- [24] Carlson R W. Confinement of an explosion by a steel vessel [R]. LA-390, 1945.
- [25] Moir D C. Safety analysis of the M-2 confinement systems [R]. LA-TM-264, 1979.
- [26] Anthony J R, Foster P A. Explosive containment study [R]. MH-SMP-85-04, 1985.
- [27] Departments of the army, the navy and the air force. Structures to resist the effects of accidental explosions [R]. TM5-1300: 1990.
- [28] Ki-Bong Lee, Keun-Deuk Lee, Jeong-Kook Kim. Relationship between combustion heat and blast performance of aluminized explosives [C]//Proceedings of the 36th International Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, 2005.
- [29] Sung-ho Kim, Jung-su Park, Jeong-kook Kim. Internal blast test on explosives developed in Korea [C]//Proceedings of the 35th International Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, 2004.
- [30] Thomas S F, Armin K, Peter G, et al. Characterisation of explosives with enhanced blast output in detonation chamber and free field experiments [C]//Proceedings 14th International Detonation Symposium, Idaho, 2010.
- [31] Baker W E. The elastic-plastic response of spherical shells to internal blast loading [J]. *Journal of Applied Mechanical*, 1960, 24(1): 139-144.
- [32] Behnem R A, Duffey T A. Experimental-theoretical correlation on the containment of explosions in closed cylindrical vessels [R]. SLA-73-0508, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1973.

- [33] Adischer V V, Komev V M. Calculation of the shell of explosion chambers [J]. *Combustion Explosions and Shock Waves*, 1979, 15(6): 780-784.
- [34] Dörr A, Michael K. Experimental investigations of the debris launch velocity from internally overloaded concrete structures [R]. Final Report DLC 4-2002, Institut Kurzeitdynamik Ernst-Mach-Institut, 2002.
- [35] 邓国强, 杨科之, 杨秀敏. 密集弹片群对钢筋混凝土墙体的整体破坏效应分析[J]. *土木工程学报*, 2005, 38(11): 102-105, 122.  
DENG Guo-qing, YANG Ke-zhi, YANG Xiu-min. Integral damage effect analysis of RC walls under impact of dense fragment cluster[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(11): 102-105, 122.
- [36] 郭志昆, 宋锋良, 刘峰, 等. 扁平箱形密闭结构内爆炸的模型试验[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 9(4): 345-350.  
GOU Zhi-kun, SONG Feng-liang, LIU Feng, et al. Experiment of closed flat box structure subjected to internal detonation[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2008, 9(4): 345-350.
- [37] 侯海量, 朱锡, 梅志远. 舱内爆炸载荷及舱室板架结构的失效模式分析[J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(2): 151-158.  
HOU Hai-liang, ZHU Xi, MEI Zhi-yuan. Study on the blast load and failure mode of ship structure subject to internal explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(2): 151-158.
- [38] 李伟, 朱锡, 梅志远, 等. 战斗部舱内爆炸对舱室结构毁伤的实验研究[J]. *舰船科学技术*, 2009, 31(3): 34-37.  
LI Wei, ZHU Xi, MEI Zhi-yuan, et al. Experimental studies on damage effect of missile warhead on cabin's structure under internal explosion [J]. *Ship Science and Technology*, 2009, 31(3): 34-37.
- [39] Zhdan S A. Calculation of the initiation of a heterogeneous detonation with a charge of condensed explosive[J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1981, 17(6): 674-679.
- [40] Wang J C T, Widhopf G F. Numerical simulation of blast flow fields using a high resolution TVD finite volume scheme [J]. *Computers and Fluids*, 1990, 18(1): 103-137.
- [41] Marchand K A, Cox P A, Polcyn M A. A design guide and specification for small explosive containment structures [R]. SAND-94-2255:1994.
- [42] Giglio M. Spherical vessel subjected to explosive detonation loading [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 1997, 74(2): 83-85.
- [43] Arnold W, Rottenkolber E. Combustion of an Aluminized Explosive in a Detonation Chamber[C]// Proceedings of the 39th International Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, 2008.
- [44] 曹玉忠, 卢泽生, 管怀安. 抗爆容器内爆炸流场数值模拟[J]. *高压物理学报*, 2001, 15(2): 127-133.  
CAO Yu-zhong, LU Ze-sheng, GUAN Huai-an. Numerical simulations of blast flow fields in closed blast-resistant containers [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(2): 127-133.
- [45] 贾晓东, 郭彦懿. FAE武器在约束空间内爆炸效应的数值模拟研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2006, 26(4): 154-159.  
JIA Xiao-dong, GUO Yan-yi. The study on numerical simulation of FAE weapon explosion in confined space[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(4): 154-159.
- [46] 杨秀敏, 杨科之. 封闭空间内爆炸效应[J]. *中国人民防空*, 2006, 8(2): 64-64.  
YANG Xiu-min, YANG Ke-zhi. The explosion effects in closed space[J]. *Chinese Civil Air Defence*, 2006, 8(2): 64-64.
- [47] 宋卫东, 吴开腾, 宁建国. 机库内爆炸效应的数值模拟研究[J]. *兵工学报*, 2007, 28(11): 1129-1134.  
SONG Wei-dong, WU Kai-teng, NING Jian-guo. Numerical simulation on the explosion effects in a hangar deck [J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(11): 1129-1134.
- [48] 周清. 密闭空间内爆炸引起的内壁超压分布规律及简化计算研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.  
ZHOU Qing. Distribution law and simplified computation of overpressure on walls due to explosion inside the closed space [D]. Tianjin: Tian University, 2008.
- [49] Johnson N, Carpenter P, Newman K, et al. Evaluation of explosive candidates for a thermobaric M72 Law shoulder launched weapon[C]//NDIA 39th Annual Gun & Ammunition/Missiles & Rockets Conference, Arlington, 2004.
- [50] David tassa P E. Internal blast test to support the tomahawk and APET programs [C]// Insensitive Munitions Technology Symposium, San Diego, 1996.
- [51] Granholm R H, Sandusky HW. Small-scale shock reactivity and internal blast test shock compression of condensed matter[C]// American Institute of Physics Conference Proceedings, Baltimore, MD, 2005.
- [52] Granholm R H, Sandusky H W. Small-scale shock reactivity and internal blast[C]// Proceedings of the 13th Detonation Symposium, Norfolk, VA, 2006.

## Progress in Explosion in Confined Space

HU Hong-wei, SONG Pu, ZHAO Sheng-xiang, FENG Hai-yun

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The energy release characteristics and damage mode of explosion in confined space were analyzed. The research on the internal explosion effect was reviewed from the 6 aspects of the shock wave characteristics, thermal effect, quasi-static pressure, dynamic response of structural, numerical simulation and explosive synthetic power evaluation. The roof lift facility should be established and strengthen the study on multiple kill element coupling effect on damage of target. The roof lift displacement and quasi-static pressure bring into system of internal weapons power evaluation.

**Key words:** explosion mechanics; explosion in limited space; roof lift; quasi-static pressure

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.04.026