DOI: 10.11883/bzycj-2016-0123
文章编号: 1001-1455(2018)01-0197-07

非理想炸药在混凝土介质中的爆炸做功特性*

胡宏伟[1],冯海云[1],陈 朗[2],顾晓辉[3],宋 浦[1]
(1. 西安近代化学研究所燃烧与爆炸技术重点实验室,陕西 西安 710065;
2. 北京理工大学机电学院,北京 100081;
3. 南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要: 为了研究非理想炸药的做功能力,对 TNT、PBXN-109、AFX-757 和 CL-20 基炸药进行了混凝土介质内爆炸实验,测量了实验炸药爆炸形成的混凝土腔体容积,通过量纲分析和实验数据建立了混凝土腔体容积的计算模型,并采用自行设计的混凝土腔体容积方法评价了炸药的爆炸做功特性。结果表明,混凝土腔体容积法能够用于评估非理想炸药的做功能力,单位质量同类型炸药的混凝土腔体容积基本一致。混凝土腔体容积与炸药能量(或炸药质量与爆热的乘积)存在线性关系,炸药混凝土中内爆炸的相对做功能力可以通过爆热当量确定。

关键词: 非理想炸药;混凝土;做功能力;爆热;量纲分析
中图分类号: O383.1 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

炸药的做功能力,即炸药爆炸产生的冲击波和爆轰产物气体对周围介质所做的总功,既是衡量炸药爆炸性能的一个重要参数[1-3],又是炸药应用中重点关注的一个特征量。现役武器装填的主装药大都为非理想炸药,非理想炸药具有能量高、感度低和临界直径大的特点,而且非理想炸药在爆轰时,在 C-J 面外仍有大量的能量释放,用于气体产物膨胀做功[4-6],因此准确地测量非理想炸药的做功能力以及描述炸药爆轰参数与做功能力的关系,对于新型炸药的研制、武器的威力性能设计以及工程爆破研究都具有重要意义。

一般认为,炸药的做功能力决定于炸药爆热(Q_v)及气体产物体积(V_g)。Martin 等[7]认为炸药的做功能力与其分子结构有关,每种分子结构对做功能力的贡献可以用威力指数表示,建立了用威力指数计算炸药做功能力的函数关系。Johansson 等[8-9]依据弹道臼炮的实验数据,获得了炸药做功能力和特性乘积(Q_vV_g)之间的函数关系,但该关系未考虑到非理想炸药爆炸过程中的二次反应。目前,非理想炸药的做功能力测量方法主要有水下爆炸实验法[10]、弹坑体积法[11]和弹道抛掷法[12]等。水下爆炸实验法需要建造大型实验水池并配备昂贵的实验仪器设备,限制了其普及性。弹道抛掷法主要应用于工业炸药的做功能力测量,但需要较大的实验场地,还没有得到广泛应用。弹坑体积法实验药量范围较宽,对于非理想炸药,实验结果受装药位置影响较大,当炸药埋深较浅时,由于上层介质的抛掷效应,不能形成封闭空间而泄压,非理想炸药在炮眼内没有反应完全,二次反应的能量未有效利用,弹坑体积未包含抛掷效应和泄压散失掉的能量,不能完全表征非理想炸药的做功能力。

本文中基于非理想炸药二次反应能量释放的有效做功,设计一种测量炸药做功能力的混凝土腔体容积方法,对几种典型炸药进行混凝土内爆炸实验,结合实验数据和量纲分析研究炸药做功能力与爆轰参数之间的关系,提出利用混凝土腔体容积评价炸药做功能力的方法。

1 实 验

1.1 实验设计

用细绳将炸药装药固定好,在装药上表面几何中心粘贴传爆药柱,将电雷管插入装药上预先压制的

* **收稿日期**: 2016-05-09; **修回日期**: 2017-01-25
第一作者: 胡宏伟(1982—),男,硕士,副研究员; **通信作者**: 宋 浦,songpu73@163.com。

雷管孔中,装药通过炮孔安装到混凝土靶体中,以沙子作为炮泥填塞炮孔,填塞深度为装药上顶面与炮孔上端面之间的距离,连接雷管线与起爆线;炸药引爆后,爆炸冲击波和爆轰气体产物对周围的混凝土介质产生压缩、破碎作用,使炮孔扩张成一个腔体,使用干细沙填充腔体,爆炸后的空腔容积与炮孔容积之差,即炸药爆炸能量有效做功形成的混凝土腔体容积 ΔV,该值可用来表征炸药的爆破做功能力。

混凝土腔体容积的计算公式为:

$$\Delta V = V_2 - V_1 \tag{1}$$

式中:ΔV 为混凝土腔体容积,V_1 为炮孔的容积,V_2 为炸药装药爆炸后混凝土靶体中的腔体容积(含炮孔的容积)。

单位质量炸药的混凝土腔体容积为:

$$\Delta v = \Delta V / m \tag{2}$$

式中:Δv 为单位质量炸药的混凝土腔体容积,m 为炸药的质量。

混凝土作为一种非均质材料,炸药爆炸后腔体的扩张成型和测量精度受到以下因素的影响:首先,配方、制作工艺、养护时间和条件等因素会影响到混凝土的强度;其次,炸药爆炸后,空腔周围会有裂纹,影响测量精度;另外,炮孔中炮泥的限制较弱,会泄露掉小部分能量。为简化问题,作出如下假设:

(1)忽略制作工艺和养护环境等因素的影响,相同的混凝土配方,靶体养护 28 d 以上,认为混凝土靶体的强度一致;

(2)炸药爆炸后,混凝土靶体结构完整、裂纹较小,可忽略裂纹对混凝土腔体容积测量精度的影响;

(3)炸药装药爆炸能量绝大多数在靶体内部对混凝土做功,炮孔泄露掉的能量很小,可以忽略。

1.2 实验样品

实验样品为 TNT、95CL-20/5 粘、PBXN-109 和 AFX-757 炸药,包括理想炸药、含 Al 炸药、含 Al 和 AP 的复合炸药三种类型,其中 TNT 作为标准炸药。实验样品全部为圆柱形装药。

95CL-20/5 粘炸药装药由于冲击波感度高、临界直径小,用 8# 铜雷管直接起爆,质量 50、80 和 110 g的 TNT 装药采用导爆索起爆,质量 300 g 装药采用一端带雷管孔的 10 g JH-14 传爆药和 8 号铜雷管起爆,每种炸药进行两发平行性实验。雷管的装药量一般为 0.2~0.4 g,本实验导爆索长度为 10 cm,装药量约为0.8 g,雷管/传爆药组合和导爆索的装药量相对于炸药装药质量分数都在 3.5%以内,这里忽略了雷管、传爆药和导爆索对爆炸能量的贡献。实验炸药组分、密度 ρ 和爆热 Q_v,见表 1。

表 1 实验炸药的组分与性能参数

Table 1 Composition and performance parameters of test explosives

炸药	组分	ρ/(g·cm^{-3})	m/g	D/mm	l/mm	l/D	Q_v/(MJ·kg^{-1})
TNT		1.57	50.0	40	26	0.65	4.230
TNT		1.57	80.0	40	42	1.05	4.230
TNT		1.57	110.0	40	57	1.43	4.230
TNT		1.57	300.0	60	68	1.13	4.230
1#	95CL-20/5binder	1.94	18.2	20	30	1.50	5.471
2#	95CL-20/5binder	1.94	36.4	20	60	3.00	5.471
PBXN-109	64RDX/20Al/16binder	1.64	300.0	60	65	1.08	6.045
AFX-757	25RDX/33Al/30AP/12binder	1.83	300.0	60	59	0.98	7.339

1.3 实验装置与布局

实验采用 C-35 素混凝土靶,预制时间大于 28 d,混凝土靶体有 3 种尺寸。

(1)靶体 1:长 0.9 m、宽 0.9 m、高 0.9 m,炮孔直径 24 mm,装药深度 450 mm。

(2)靶体 2:长 1.2 m,宽 1.2 m,高 1.2 m,炮孔直径 43 mm,装药深度 600 mm。

(3)靶体 3:直径 2.0 m、高 2.0 m,炮孔直径 63 mm,装药深度 1 000 mm,靶体外包裹了一层厚为 2 mm的薄铁皮,用于混凝土成型。

混凝土靶外围无钢箍和有钢箍时,实验布局图相同,如图 1 所示。

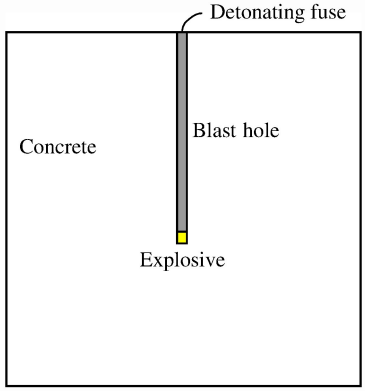


图 1 实验布局图

Fig. 1 Schematic of experimental layout

2 结果与讨论

2.1 实验结果

不同质量的 TNT 装药在混凝土靶体中爆炸后，靶体的破坏效果如图 2 所示。对于靶体 2，当 TNT 装药质量小于等于 80 g 时，靶体未发生碎裂，见图 2(a)、(b)；对于靶体 3，300 g TNT 装药爆炸后，靶体也未发生碎裂，见图 2(d)。上述工况中，混凝土靶体只有微小的裂纹，而且裂纹的最大间隙基本都小于 5 mm，结构完整性保持较好，因此，可以忽略裂纹对测量结果的影响。110 g TNT 装药爆炸后，混凝土靶体碎裂，结构完整性被破坏，混凝土腔体容积无法测量，见图 2(c)。

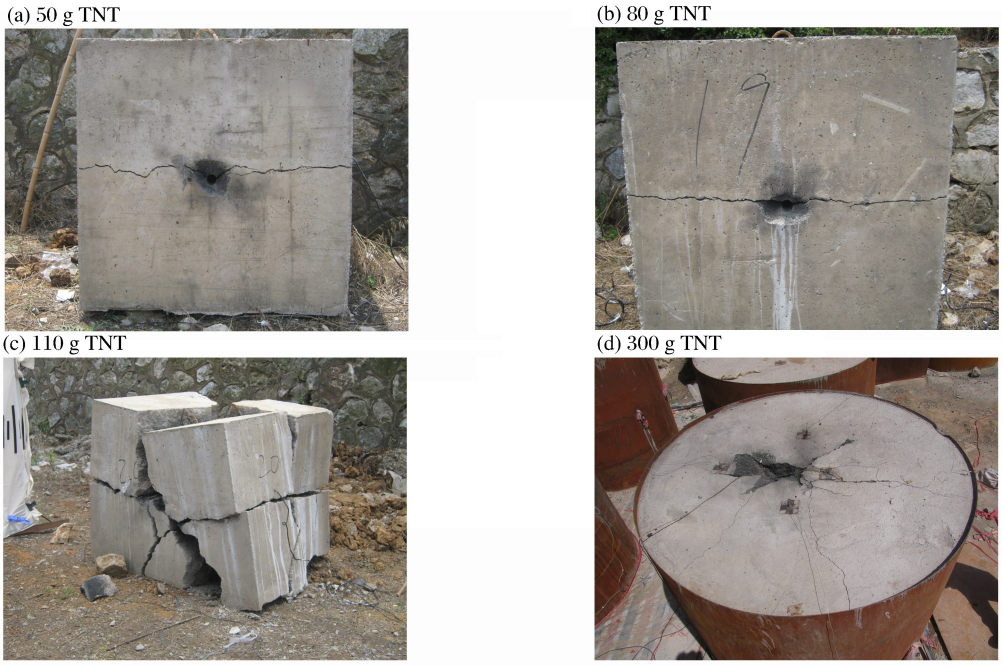


图 2 不同质量的 TNT 装药在混凝土靶中爆炸的破坏效果

Fig. 2 Destructive effects from explosion of TNT of different qualities in concrete

为了确保混凝土靶体结构完整不碎裂，依据不同质量 TNT 装药的实验结果，研究了装药等效半径 r 与靶体尺寸 L(边长或直径)的关系。装药的等效半径[13]可由下式计算：

$$V_s = V_c \tag{3}$$

$$\frac{4}{3}\pi r_s^3 = \pi r_c^2 l \tag{4}$$

$$r_s = \left(\frac{3l}{4r_c}\right)^{\frac{1}{3}} r_c \tag{5}$$

式中：V_s 为球形装药的体积，V_c 为圆柱形装药的体积，r_s 为球形装药的半径，r_c 为圆柱形装药的半径，l 为圆柱形装药的长度。

装药等效半径与靶体尺寸的关系见表 2。由表 2 可知，当混凝土靶体的直径或边长与炸药装药等效半径之比大于等于 45 时，炸药装药爆炸后，混凝土靶体完整，无较大裂纹。靶体 3 直径为装药等效半径的 56 倍，钢箍对混凝土强度的影响很小。

表 2 装药等效半径与混凝土靶体尺寸的关系

Table 2 Relation between charge equivalent radius and concrete target size

m/g	r_s/cm	L/cm	L/r_s	靶体的破坏情况
50	2.29	120	52	结构完整,有小裂纹
80	2.67	120	45	结构完整,有小裂纹
110	2.97	120	40	解体
300	3.57	200	56	结构完整,有小裂纹

实验炸药的混凝土腔体容积见表 3。由表 3 中的实验结果可知,随着炸药质量的增加,混凝土腔体的容积逐渐增大,但单位质量同类型炸药的凝土腔体容积基本一致。

表 3 实验炸药的混凝土腔体容积

Table 3 Concrete cavity volume of test explosives

炸药	m/g	ΔV/L	Δv/(L·kg^{-1})
TNT	50.0	0.350	7.19
TNT	80.0	0.556	6.95
TNT	300.0	2.289	7.63
1#	18.2	0.171	9.34
2#	36.4	0.349	9.58
PBXN-109	300.0	2.933	9.77
AFX-757	300.0	3.592	11.97

2.2 分析与讨论

2.2.1 相似理论分析

炸药混凝土中爆炸分为炸药的爆轰、应力波在混凝土中传播及爆炸空腔的扩张与成型等阶段。运用量纲分析的方法,设计和进行小规模模拟实验,获得相似规律模型,用于指导炸药选型与工程设计。

实验的混凝土靶体直径或边长与炸药装药等效半径之比大于等于 45,靶体可近似为无限域,而且爆心位于靶体的几何中心,靶体直径或边长、高度以及爆心位置对混凝土爆炸腔体成型的影响可以忽略。ΔV 为炸药装药混凝土中爆炸后形成的腔体容积与炮孔体积之差,炸药装药体积相对于 ΔV 很小,因此炸药尺寸(m/ρ_e)对 ΔV 的影响可以忽略。炸药的能量包含了炸药质量和爆热 2 个参数,体现了装药密度的影响。

混凝土介质内部爆炸腔体容积的控制参数有:

(1)混凝土介质的力学参数:混凝土密度 ρ_c,抗压强度 σ_c,弹性模量 E_c,泊松比 ν;

(2)炸药参数:炸药能量 E_t,爆轰产物的绝热指数 γ_e;

装药爆炸后混凝土腔体容积为 ΔV,则有:

$$\Delta V = f(\rho_c, \sigma_c, E_c, \nu, E_t, \gamma_e) \tag{6}$$

基本量取 σ_c、ρ_c、E_t,依据 π 定理对上式进行量纲一化得:

$$\frac{\Delta V}{E_t \sigma_c^{-1}} = f\left(\frac{E_c}{\sigma_c}, \nu, \gamma_e\right) \tag{7}$$

若混凝土靶体参数不变,规定 ΔV 的单位为 L,E_t 的单位为 MJ/kg,上式变为:

$$\frac{\Delta V}{E_t \sigma_c^{-1}} = f(\gamma_e) \tag{8}$$

式(8)右端是依赖于 γ_e 的常数,将 $f(\gamma_e)$ 记作 k,即

$$\frac{\Delta V}{E_t} = \frac{k}{\sigma_c} \tag{9}$$

因此,混凝土腔体容积与炸药能量和混凝土强度(破坏强度)有关,与炸药能量成正比,与混凝土的抗压强度成反比。

混凝土靶体的强度确定，σ_c 为一常数，用 k_c 表示 σ_c^{-1}，上式简化为：

$$\frac{\Delta V}{E_t}=kk_c \tag{10}$$

或

$$\Delta V=kk_cE_t \tag{11}$$

可见，混凝土腔体容积与炸药能量呈线性关系。

由于 $E_t=mQ_v$，式(11)可变为：

$$\Delta V=kk_cmQ_v \tag{12}$$

单位质量炸药的混凝土腔体容积则为：

$$\Delta v=\frac{\Delta V}{m}=kk_cQ_v \tag{13}$$

对于大多数高密度的凝聚相炸药，绝热指数 γ_e 一般可近似等于 3.0[1,14-16]，k 可认为是一个与炸药种类无关的常数，令 $K=kk_c$，K 则仅与混凝土强度相关，式(11)～(13)变化为：

$$\Delta V=KE_t \tag{14}$$

$$\Delta V=KmQ_v \tag{15}$$

$$\Delta v=\frac{\Delta V}{m}=KQ_v \tag{16}$$

2.2.2　混凝土腔体容积与炸药爆轰能量的关系分析

依据量纲分析建立的混凝土腔体容积 ΔV 与炸药能量 E_t 的函数模型，拟合了不同质量、种类炸药的混凝土腔体容积与炸药能量的关系，如图 3 所示。

混凝土腔体容积与炸药能量的关系表达式为：

$$\Delta V=1.655E_t \tag{17}$$

带入 $E=mQ_v$，得到：

$$\Delta V=1.655mQ_v \tag{18}$$

由于 $\Delta v=\Delta V/m$，则：

$$\Delta v=1.655Q_v \tag{19}$$

由以上分析知，混凝土腔体容积与炸药能量存在线性关系，验证了量纲分析建立的模型，绝热指数 γ_e 对混凝土腔体容积与炸药能量的关系影响较小。混凝土强度为 35 MPa 时，对于大多数高密度的凝聚相炸药，$K=1.655$，其他强度等级混凝土的 K 值还需依据实验确定。因此，已知炸药能量或炸药质量与爆热，由上述计算模型即可以计算该炸药的爆炸腔体容积。

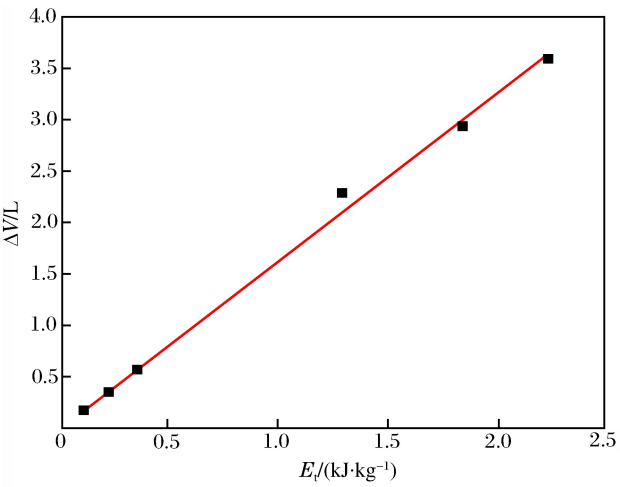


图 3　混凝土腔体容积与炸药能量的关系

Fig. 3　Relation between concrete cavity volume and explosive energy

2.2.3　炸药做功能力的评价

实验炸药的相对混凝土腔体容积与相对爆热见表 4，其中以 TNT 为基准炸药。由表 4 可知，AFX-757 的做功能力最大，其次是 PBXN-109，95CL-20/5 粘的最低。3 种炸药混凝土腔体容积的 TNT 当量分别为 1.65、1.35 和 1.30，爆热 TNT 当量分别为 1.74、1.43 和 1.29，二者的相对误差小于 6.0%，炸药的做功能力(或混凝土腔体容积)与炸药爆热之间具有密切的相关性。

混凝土内部爆炸时，炸药与外部环境中的氧未发生反应，炸药装药在混凝土炮孔中具有强约束，炸药爆热测量是在真空环境下进行的，也没有外部氧参与反应，同时装填炸药的金属壳或陶瓷壳体也具有较强的约束，因此，可认为两种工况下，相同质量炸药释放能量基本一致。而且混凝土腔体是冲击波和爆炸气体产物共同作用的结果，可以全面反映炸药的爆破做功能力。

表 4 实验炸药的相对混凝土腔体容积与相对爆热

Table 4 Relative concrete cavity volume and relative detonation heats of test explosives

炸药	$\Delta v/(\mathrm{L}\cdot\mathrm{kg}^{-1})$	$\Delta v/\Delta v_{\mathrm{TNT}}$	$Q_{\mathrm{v}}/(\mathrm{MJ}\cdot\mathrm{kg}^{-1})$	$Q_{\mathrm{v}}/Q_{\mathrm{vTNT}}$
TNT	7.26	1.00	4.230	1.00
95CL-20/5 粘	9.46	1.30	5.471	1.29
PBXN-109	9.77	1.35	6.045	1.43
AFX-757	11.97	1.65	7.339	1.74

结合式(15)和(16),炸药在混凝土中内爆炸的相对做功能力可由下式确定:

$$A=\frac{\Delta V_i}{\Delta V_{\mathrm{TNT}}}=\frac{\Delta v_i}{\Delta v_{\mathrm{TNT}}}=\frac{Q_{\mathrm{v}i}}{Q_{\mathrm{vTNT}}} \tag{20}$$

式中:下标 i 为实验炸药的种类,下标 TNT 为标准 TNT 炸药的参数。因此,非理想炸药混凝土中爆炸的相对做功能力可以通过炸药的爆热当量确定。

3 结 论

(1)混凝土腔体实验考虑了炸药的二次反应和爆轰产物气体膨胀两个因素,能够评价爆轰感度较低、临界直径较大的非理想炸药的做功能力。

(2)炸药爆炸形成的混凝土腔体容积与炸药能量(或单位质量混凝土腔体容积与爆热)存在线性关系,已知炸药能量或炸药质量与爆热,即可计算爆炸形成的混凝土腔体容积。

(3)炸药的做功能力(或混凝土腔体容积)与炸药爆热之间具有密切的相关性,混凝土中内爆炸的相对做功能力可以通过炸药的爆热当量确定。

衷心感谢洛阳工程兵科研三所的吴彪研究员、徐翔云副研究员在混凝土靶的制作与实验方面给予的大力支持。

参考文献:

[1] 郑孟菊,余统昌,张银亮. 炸药的性能及测试技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1990:190-193;254-270.

[2] COOK M A. 工业炸药学[M]. 陈正衡,孙姣花,译. 北京:煤炭工业出版社,1987:152-193.

[3] 曹新茂. 世界爆破器材手册[M]. 北京:兵器工业出版社,1999:1110-1112.

[4] 周俊祥,徐更光,王廷增. 含铝炸药能量释放的简化模型[J]. 爆炸与冲击,2005,25(4):309-312.
ZHOU Junxiang, XU Gengguang, WANG Tingzeng. A simplified model of energy release for aluminized explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(4):309-312.

[5] MILLER P J. A reactive flow model with coupled reaction kinetics for detonation and combustion in non-ideal explosives[J]. Materials Research Society, 1996,21(2):413-420.

[6] 胡宏伟,宋浦,赵省向,等. 有限空间内部爆炸研究进展[J]. 含能材料,2013,21(4):539-546.
HU Hongwei, SONG Pu, ZHAO Shengxiang, et al. Progess in explosion in confined space[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013,21(4):539-546.

[7] MARTIN A R, YALLOP H J. The correlation of explosive power with molecular structure[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 1959,9(6):310-315.

[8] JOHANSSON C H, PERSSON P A. 猛炸药爆轰学[M]. 北京:国防工业出版社,1976:253-255.

[9] JOHANSSON C H, SJOLIN T. Measurement of the "strength" of explosives by the ballistic mortar[J]. Review of Scientific Instruments, 1968,39(8):1173-1180.

[10] BJARNHOLT G, HOLMBERG R. Explosive expansion work in underwater detonations[C]// Proceedings of the 6th International Symposium on Detonation. San Diego, USA, 1976:540-550.

[11] 奥尔连科 Л П. 爆炸物理学[M]. 3 版. 孙承纬,译. 北京:科学出版社,2011:390-392.

[12] 王肇中,汪旭光,夏斌. 工业炸药做功能力的测试方法研究[J]. 火炸药学报,2007,30(6):24-26.
WANG Zhaozhong, WANG Xuguang, XIA Bin. Study on power test method of industrial explosives[J]. Chinese

Journal of Explosives & Propellants, 2007,30(6):24-26.
[13] HAMMOND L. Underwater shock wave characteristics of cylindrical charges: DSTO-GD-0029[R]. Aeronautical and Maritime Research Laboratory Ship Structures and Materials Division, 1995.
[14] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组. 爆炸及其作用(上册)[M]. 北京：国防工业出版社，1979：122-124；129-133.
[15] 张宝平，张庆明，黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京：兵器工业出版社，1999：162-170.
[16] 赵国志，张运法. 战术导弹战斗部毁伤作用机理[M]. 南京：南京理工大学，2002：256.

Characteristic work capability of non-ideal explosives in concrete

HU Hongwei[1], FENG Haiyun[1], CHEN Lang[2], GU Xiaohui[3], SONG Pu[1]
(1. *Science and Technology on Combustion and Explosion Laboratory, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an* 710065, *Shaanxi, China*;
2. *School of Mechano Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
3. *School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: In this study we carried out internal blast tests on TNT, PBXN-109, AFX-757 and CL-20 based explosives and measured the concrete cavity volumes of several explosives tested to study the characteristic work capability of non-ideal explosives. A calculation model of the concrete cavity volume was established on the basis of dimensional analysis and experimental dada. The characteristic work capacity of test explosives was evaluated using self-designed concrete cavity volume method. The results show that the concrete cavity volume can be used to evaluate the work capability of non-ideal explosives. The concrete cavity volume and the explosive energy (or detonation heat) forms a linear relationship. The relative work capacity of the explosive in concrete can be determined by the TNT equivalent of the detonation heat.

Keywords: non-ideal explosives; concrete; work capability; heat of detonation; dimensional analysis

(责任编辑　王易难)