doi: 10.7690/bgzdh.2026.10.002

战斗部地面静爆试验安全距离计算方法

文　萍，常　红，谢七国
（国营长虹机械厂工程研究中心，广西 桂林 541003）

摘要：针对国内现有战斗部地面试验安全距离的通用规定中无各项细化计算说明的问题，给出战斗部地面静爆试验时冲击波、破片飞散、地震波、噪音、烟尘和气体的理论安全距离计算方法。从战斗部地面静爆试验时产生的冲击波、破片飞散、地震波等方面进行理论安全距离分析，结合试验示例进行理论计算。结果表明：破片飞散安全距离最大约为 1 200 m，证明了该计算方法的高可靠性。

关键词：静爆；冲击波；破片飞散；安全距离
中图分类号：TJ55　　**文献标志码：**A

Calculation Method of Safety Distance for Warhead Ground Static Explosion Test

Wen Ping, Chang Hong, Xie Qiguo
(*Engineering Research Centre*, *State-Run Changhong Machinery Plant*, *Guilin* 541003, *China*)

Abstract: In view of the problem that there is no detailed for each calculation explanation in the existing general regulations for the safety distance of warhead ground test in China, the theoretical safety distance calculation method for shock wave, fragment dispersion, seismic wave, noise, smoke and gas in the warhead ground static explosion test is given. The theoretical safety distance is analyzed from the shock wave, fragment scattering and seismic wave produced by the warhead ground static explosion test, and the theoretical calculation is carried out with the test example. The results show that the maximum safety distance is about 1 200 m, which proves the high reliability of the calculation method.

Keywords: static explosion; shock wave; fragment dispersion; safety distance

0　引言

战斗部在研制过程中，需要开展各种各样的地面静爆试验来验证产品的毁伤威力。战斗部可靠起爆后，内部炸药瞬间发生剧烈化学反应，产生爆轰波，并生成大量高温、高压气体和高速破片以及振动波，对靶场周边人员、设备、建筑产生杀伤和破坏作用。近些年来，国内多个靶场均发生过地面试验时人员伤亡事故，为确保试验安全，需要在试验开始前对试验安全距离开展分析。

国内现有战斗部地面试验安全距离主要参考《军工燃烧爆炸品工程设计安全规范》WJ 30059-2021：战斗部试验场地，在无防护情况下，从爆心算起，弹重在 50～250 kg 杀伤爆破航空炸弹，警戒距离为 1 500～2 000 m[1]。另外，《废火药、炸药、弹药、引信及火工品处理、销毁与贮运安全技术要求》GJB 5120-2002 中要求战斗部弹重在 100～250 kg 时警戒安全半径不小于 2 000 m[2]。以上规范作为通用规定，给出的警戒范围具有一定参考价值，但未对战斗部试验各项安全距离给出细化计算说明，不利于具体试验安全评估与防范。笔者主要通过战斗部地面静爆试验时产生的冲击波、破片飞散、地震波、静爆产生的噪音、烟尘和气体等方面进行战斗部地面静爆试验理论安全距离分析，得出了冲击波、破片飞散、地震波、噪音、烟尘和气体的理论安全距离计算方法，可为战斗部进行地面静爆试验前进行的试验安全风险防控提供借鉴。

1　冲击波安全距离分析

1.1　冲击波毁伤作用

战斗部可靠引爆时，可在瞬时（10^{-6} s）产生 3 000 ℃以上高温，爆心压力可达 30 GPa 以上。由于爆炸产物急剧膨胀，强烈压缩周边空气介质，使其压力、密度、温度发生跃变，随即形成了冲击波。

冲击波在空气中传播时，如遇到建筑、人员、装备，冲击波受阻后发生入射和反射，对目标产生强烈破坏作用。当冲击波作用至人体时，人体内腔气压急剧增大，可引起人员血管破裂、内出血、内

收稿日期：2025-02-03；**修回日期：**2025-03-02
第一作者：文　萍（1984—），男，四川人，硕士。
通信作者：谢七国（1981—），男，贵州人。

脏破裂、耳膜和肌肉撕裂等。冲击波对人员毁伤情况如表 1 所示[3]。

表 1　冲击波毁伤

伤亡情况	冲击波强度/MPa
无伤亡	＜0.02
轻伤，头晕、耳鸣	0.02～0.03
中等伤害，听觉器官损伤，骨折	0.03～0.05
严重伤害，内脏受损，内出血、骨折	0.05～0.10
重伤，出现死亡	＞0.10
绝大部分死亡	＞0.40

1.2　冲击强度计算

战斗部爆炸时，炸药能量并不是全部用于冲击波，其中一部分消耗在战斗部壳体变形、破裂以及破片动能，通常这部分消耗的能量占炸药总能量的 1%～2%，在进行安全核算时，可忽略该部份能量损耗，将战斗部静爆等同于无壳体炸药爆炸。

1) 在实际研究中，空气冲击波详细计算方法非常复杂，因此各国学者都提出了多个简化公式[4-5]，常用的计算冲击波超压方法为：

① 勃路德经验：

$$\Delta p=0.096(\sqrt[3]{\omega}/R)+0.143(\sqrt[3]{\omega}/R)^2+0.573(\sqrt[3]{\omega}/R)^3-0.001\,9。\tag{1}$$

② 萨道夫斯基经验：

$$\Delta p=0.093\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R}+0.382\left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R}\right)^2+1.274\left(\frac{\sqrt[3]{\omega}}{R}\right)^3。\tag{2}$$

③ 海军弹药安全性试验与评估：

$$\Delta p=0.066\,2(\sqrt[3]{\omega}/R)+0.405(\sqrt[3]{\omega}/R)^2+0.328\,8(\sqrt[3]{\omega}/R)^3。\tag{3}$$

式中：Δp 为冲击波超压值，MPa；R 为距离爆心距离，m；ω 为有效装药 TNT 当量，kg。

2) 在工程实践上，为便于核算，可直接采用经验公式进行估算爆心安全距离，常用的计算方法为：

① 爆破安全规程[3]：

$$R=25Q^{1/3}。\tag{4}$$

② 国家军事防护工程[6]：

$$R=10Q^{1/3}。\tag{5}$$

式中：R 为距离爆心距离，m；Q 为有效装药 TNT 当量，kg。计算 R 时考虑的极限冲击波超压值为 0.02 MPa。

2　破片飞散安全距离分析

2.1　破片安全标准

战斗部起爆后，装药在几十微秒内爆轰完成，产生极高压力，战斗部壳体膨胀变形，不断产生裂纹，形成自然破片。由于该反应速度很快，产生能量很高，因此破片获得很高的初始速度，在飞行中受空气中阻力减速，直至命中目标或自然坠地。破片由于具有高动能，因此对人员、装备都具有很强杀伤力，在战斗部地面试验中，更多考虑对人员的安全防护。

破片对人员的损伤，其本质上是一种机械伤害，破片击中人体后，造成人体出血、骨折、内脏破裂等致伤。经长期研究，能够有效杀伤人员的破片质量通常不小于 1 g，此时对破片安全的标准就转换为对破片剩余动能的要求。

世界各国对破片动能杀伤标准规定相差较大，法国标准为 40 J，美国为 70 J，中国为 98 J，但均为使战斗人员在战斗中丧失战斗力标准，以此标准作为试验时安全防护标准要求过低。试验中动能接受标准应以最多造成软组织伤为限，根据对与人组织结构相似的狗开展试验情况来看，1 g 破片造成软组织伤上限动能不宜超过 27 J[7]。

2.2　破片初速计算

由于战斗部爆炸由壳体自然形成的破片大小不一，达不到人们理想的杀伤效果，故目前主流杀伤战斗部均采用预制破片技术，包括全预制破片和半预制破片战斗部。

2.2.1　炸药的规格

炸药爆炸是战斗部破片动能的主要来源，炸药能量越强，越容易获得高初速的破片。经研究发现，炸药的爆速和破片速度有着正比关系，因此杀爆类战斗部多使用高爆速炸药。

2.2.2　战斗部壳体材料

影响破片速度的另一大因素为战斗部壳体材料的弹塑性，塑性高的材料具有更长的膨胀时间才会发生破裂，由此破片可以有更长加速时间从而获得更高初始速度。

破片初始速度可以通过试验测试得到，也可以通过经验公式估算。试验测试方法主要有网靶法、光幕法、天幕法、超声波和高速摄影法等。试验测试数据较准确，但成本高、代价大，故多使用公式计算法估算。战斗部破片初速度常用哥尼公式[8]：

$$V=\sqrt[2]{2E}\sqrt{\frac{M_1}{M_2+0.5M_1}}。\tag{6}$$

式中：$\sqrt[2]{2E}$ 为炸药哥尼常数，m/s；M_1 为炸药质量，kg；M_2 为战斗部破片整体质量，kg。

式(6)在计算使用过程中需注意：1) 忽略了战斗部壳体变形的能量损耗；2)计算得到的破片速度完全一致，故对预制破片战斗部估算较好，对自然破片战斗部估算偏差较大。

常见炸药哥尼常数在 2 300～2 700 之间，其值可通过试验方法获得，也可通过炸药爆速进行初步估算，估算方法为：

$$\sqrt[2]{2E}=0.354D。\tag{7}$$

式中 D 为炸药爆速，m/s。目前战斗部装药常用炸药类型和爆速如表 2 所示[9]。

表 2 常用炸药爆速 m/s

TNT	RDX	HMX	JH-2	THL	JO-8
6 856	8 741	9 010	8 425	7 119	8 700

2.3 破片速度衰减计算

破片在战斗爆炸瞬间急剧加速，随后在空气中自由飞行，受空气阻力破片速度不断衰减，直到失去杀伤力，故破片的速度衰减情况是试验中考量安全距离的重要因素。

破片飞行中除受空气阻力外，还受到重力影响，由于破片速度较快，飞行时间短，因此不考虑重力影响，此时破片在空气中运动方程为[7]：

$$V=V_0\exp(-\frac{CS\rho R}{2m})。\tag{8}$$

式中：V 为破片存速，m/s；V_0 为破片初始速度，m/s；m 为破片质量，kg；C 为破片阻力系数；S 为破片平均迎风面积，m^2；ρ 为空气密度，kg/m^3；R 为飞行距离，m。

由于破片形状不同和飞行姿态不稳定，因此不规则的破片阻力系数 C、平均迎风面积 S 测算难度很大。目前通过风洞试验对 6 大类破片进行了测试，通过试验发现，破片迎风面积可以通过破片质量进行估算[7]：

$$S=Km^{2/3}。\tag{9}$$

式中：S 为破片平均迎风面积，m^2；K 为破片形状系数，$m^2/kg^{-2/3}$；m 为破片质量，kg。

结合破片质量、动能上限计算得到破片安全距离。常见的 6 大类破片 C、K 经验值如表 3 所示[7]。

表 3 破片参数

参数	球形	方形	柱形	菱形	长文体	不规则
C	0.97	1.56	1.16	1.29	1.3	1.5
K	3.07×10^{-3}	3.09×10^{-3}	3.35×10^{-3}	3.4×10^{-3}	3.7×10^{-3}	4.75×10^{-3}

3 振动安全距离分析

3.1 振动幅度计算

战斗部在近地面或地下爆炸时，小部分能量转换为地震波进行传递。地震波一般包括纵波、横波、剪切波和表面波。爆炸地震波具有频率高、时间短、振动幅度大和衰减时间快的特点。地震波传递后，可对周边建筑产生破坏作用，使其产生裂纹、破损甚至倒塌。

由于地质情况的复杂和不连续性，要想精确计算出爆炸地震波的振动幅度是很困难的。经量纲推导和实验归纳，得到了不少经验公式[3]。

1) 前苏联和我国常用计算公式为：

$$H=K\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^a。\tag{10}$$

2) 美国常用计算公式[3]：

$$H=K\left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-a}。\tag{11}$$

3) 日本常用计算公式[3]：

$$H=K\sqrt[3]{Q^2}\cdot R^{-a}。\tag{12}$$

式中：H 为振动幅度，cm/s；Q 为炸药当量，kg；R 为计算点到爆心距离，m；K 为地质系数；a 为衰减系数。

常用各类地质的地质系数和衰减系数如表 4 所示[3]。

表 4 地质系数、衰减系数

参数	软岩石	石灰岩	砂土	黄土
K	250～350	152	240	339
a	1.8～2.0	1.3	2.0	1.92

3.2 振动幅度对人员、建筑的安全范围

振动对人员一般不产生直接伤害，但当人体自振频率和振动波频率一致时，此时可能发生共振现象，让人感到不舒服、厌恶，精神状态变差，从而间接产生不安全因素。根据医学研究，人员受到的振动幅度一般不宜超过 2.5 cm/s。

由于建筑结构差异、自身频率多样、地基方式水平不一，振动对建筑的影响差异较大，难以从理论上计算出建筑的安全振幅，人们在实际中根据经验对建筑设定参考值，常见建筑振动允许值如表 5 所示[3]。

表 5　常见建筑振动幅值　　cm/s

建筑物类别	＜10 Hz	10～50 Hz	50～100 Hz
泥土房	0.5～1.0	0.7～1.2	1.1～1.5
普通砖房	2.0～2.5	2.3～2.8	2.7～3.0
混凝土房	3.0～4.0	3.5～4.5	4.2～5.0
古建筑	0.1～0.3	0.2～0.4	0.3～0.5
交通隧道	10.0～20.0	10.0～20.0	10.0～20.0

4　噪音、烟尘和有毒气体

4.1　噪音

除冲击波、破片飞散、振动外，战斗部静爆中还会产生强烈的噪音、烟尘和有毒气体，也需要关注其警戒范围。噪音本质上也是一种冲击波，当战斗部起爆后，冲击波随传播距离不断衰减，当强度小于 7×10^3Pa 且频率位于人耳可识别范围时，称其为噪音。

高强度、长时间的噪音可能导致人听力下降，战斗部试验产生的噪音频率较低，试验人员可采用耳塞、耳罩、捂耳等手段进行防护；但需要注意的是，如靶场周边距离居民区较近，需要充分考虑噪音扰民带来影响。

4.2　粉尘和有毒气体

战斗部爆炸的本质是炸药发生剧烈的化学反应，一般均会生成明显黑色烟尘。炸药通常由 C、H、O、N 及 Al 等元素组成，在炸药配制阶段，一般考虑为零氧平衡，即完全氧化，同碳元素生成 CO_2，同氢元素生产 H_2O；但因炸药加工工艺、装配等过程影响，实际爆炸中化学反应可能为正氧平衡或负氧平衡，正氧平衡时，多余的氧将生成有 NO_2，负氧平衡时，碳元素不能完全氧化，此时易生成有 CO。NO_2、CO 均具有一定毒性，大量吸入可导致人体出现头晕、无力、呕吐等症状，在地下坑道内进行试验时，NO_2、CO 气体达到一定浓度有可能致人死亡。

战斗部爆炸同时还会冲击地面尘土，混杂爆炸生成物在一起形成复杂的烟尘。烟尘中可能包含未反应完全的金属粉末、反应生成的碳粉、泥土里的 SiO_2 等，如大量吸入，会导致人员身体不适、中毒。当粉尘直径小于 8 μm，可随风飘散到 120 m 以外。

5　实例分析

现有某战斗部拟开展地面静爆试验，战斗部装药 THL，其 TNT 当量 150 kg，外壳体为薄铝结构，内装预制长方体破片 45 mm×45 mm×12 mm，材料为钢。试验靶场面积约 0.267 km^2，四面环山，警戒点距离爆心 1 200 m，起爆点距爆心 200 m，距爆心 500 m 处有泥土房、砖混房数间。

5.1　冲击波安全距离核算

根据战斗部装药 TNT 当量为 150 kg，在泥土地面上起爆时，冲击波将反射增强，TNT 当量折算为 270 kg。将爆心距离 200 m 和药量分别代入式(1)—(3)，计算得出冲击波强度为 0.001 3、0.003 4、0.002 5 MPa，远小于安全值 0.02 MPa；结合式(4)和(5)，计算得出安全距离为 161.5 和 64.6 m，小于 200 m。

以上计算结果可知，起爆点距爆心 200 m 满足冲击波防护需求。

5.2　破片安全距离核算

因战斗部壳体爆炸产生的自然破片速度衰减更快，故只核算战斗部装配的预制破片飞散安全距离。根据式(7)计算出 THL 炸药哥尼常数为 2 520，得出破片初速为 1 800 m/s。根据警戒距离 1 200 m，根据式(8)计算出破片飞行 1 200 m 后衰减速度为 2.34 m/s，结合破片质量可计算出此时具有的动能为 0.48 J，远小于 27 J。

由以上计算结果可知，1 200 m 距离满足破片飞散防护需求。

5.3　振动幅度距离核算

靶场地质为泥土，结合式(10)—(12)，计算出战斗部爆炸时在 500 m 处能够产生的最大振幅为 0.055、0.273、0.056 cm/s，对比表 5，振幅均小于泥土房高频下的振动幅值 1.1～1.5 cm/s 的要求。故 500 m 距离满足振动防护需求。

5.4　试验结果

在靶场按相同布置先后开展了 5 发战斗部静爆试验，试验现场和起爆如图 1 所示。

(a) 试验现场

(b) 起爆现场

图 1 战斗部布置及起爆

试验后 200 m 处起爆人员精神无异常，无不舒服感；1 200 m 处警戒人员描述未观察到破片掉落情况；泥土房、砖混房未观察到崩落、掉落现象。以上结果表明安全距离可行。

6 结论

1) 对比核算出的安全距离可以发现：破片飞散安全距离最大约为 1 200 m，风险系数最高，因此试验中应重点防护。

2) 通过理论计算得到冲击波、破片飞散、振动的安全距离，经起爆检验，满足安全防护要求，表明本文中选择的计算公式可靠性高，可为同类型战斗部试验安全距离设置提供参考。

参考文献：

[1] 国防科工局. 军工燃烧爆炸品工程设计安全规范: WJ 30059−2021[S]. 北京: 国防科技工业局, 2021.

[2] 孙守会, 李宗智, 白殿俊, 等. 废火药、炸药、弹药、引信及火工品处理、销毁与贮运安全技术要求: GJB5120-2002[S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2002.

[3] 顾毅成, 史雅语, 金骥良. 爆破安全规程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 480.

[4] 张先锋, 李向东, 沈培辉, 等. 终点效应学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017: 68−69.

[5] 焦纲领, 庞爱民, 沈永福, 等. 海军弹药安全性试验与评: HJB929.1-2002[S]. 北京: 军械装备局, 2002.

[6] 章克凌, 徐春. 航炮弹销毁安全距离计算[J]. 爆破, 2003, 4(20): 24−26.

[7] 张国伟, 徐立新, 张秀艳. 终点效应及靶场试验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 168−169.

[8] 曹兵, 郭锐, 杜忠华. 弹药设计理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016: 279−280.

[9] 李福平, 刘忠良, 蒲若珩, 等. 火炸药手册第一分册单质炸药和混合炸药[M]. 北京: 第五机械工业部第二〇四研究所, 1981: 214−219.

（上接第 5 页）

[39] 翟丽, 杨霜洁, 胡桂兴, 等. 电动汽车电机驱动系统传导电磁干扰建模[J]. 北京理工大学学报(自然版), 2022, 42(8): 824−833.

[40] WANG K B, LU H M, CHEN C C, et al. Modeling of System-Level Conducted EMI of the High-Voltage Electric Drive System in Electric Vehicles[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2022, 64(3): 741−749.

[41] BOGLIETTI A, CARPANETO E. An accurate induction motor high-frequency model for electromagnetic compatibility analysis[J]. Electric power components and systems, 2001, 29(3): 191−209.

[42] FREI S, LOBAW R, KARKASHADZC D, et al. Calcu-lation of Low Frequency EMC Problems in Large Systems with a Quasi-Static Approach[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Santa Clara, CA, 2004: 798−803.

[43] CHUNG H S H, HUI S Y, TANG S C. Development of a multistage current-controlled switched-capacitor step-down DC/DC converter with continuous input current[J]. IEEE transactions on circuits and systems i-regular papers, 2000, 47(7): 1017−1025.

[44] KIM W, SENG C, SEO J, et al. High-frequency circuit modeling and analysis for common-mode noise voltage of a single-phase inverter[J]. Journal of electrical engineering & technology, 2022, 17(2): 1239−1248.

[45] MAKI K. Automated technique for building high-frequency equivalent circuits of motors based on electromagnetic field analysis[J]. Electrical engineering, 2022, 215(3): 463−470.

[46] 高印寒, 安占扬, 王举贤, 等. 等效线束法在汽车线束时域辐射敏感度分析中的应用[J]. 吉林大学学报, 2015, 45(3): 946−952.

[47] 吴定超, 王珂, 马喜来, 等. 基于小波包分解和特征能量提取技术的车内传导干扰源识别[J]. 汽车工程, 2008, 30(12): 1103−1107.

[48] 俞集辉, 周尚华, 汪泉第, 等. 永磁直流电动机传导电磁干扰的建模与仿真[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(5): 539−543.

[49] 段建东. PWM 驱动电机系统传导干扰预测模型的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.

[50] 陈名, 孙旭东, 黄立培. 三相逆变器共模传导电磁干扰的建模与分析[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(1): 18−21.