

doi: 10.7690/bgzdh.2019.09.014

侵爆战斗部对建筑毁伤威力影响因素分析

黄鸿鑫, 张会锁, 马珊珊, 张帆
(中北大学机电工程学院, 太原 030000)

摘要: 为了解钻地弹对建筑物的毁伤效应, 对影响侵爆战斗部威力的因素进行分析。构建有限元模型和材料模型, 采用显式动力学软件 AUTODYN, 计算弹丸以不同速度侵彻、静爆和侵爆对混凝土建筑物毁伤效应, 分析不同速度下弹丸侵爆和静爆的区别, 通过不同速度下混凝土建筑顶部裂纹扩展对比, 得到数值模拟结果。计算结果表明, 该分析可以为战斗部的设计以及目标防护设计提供参考依据。

关键词: 战斗部; 静爆; 侵爆; 建筑物; 数值模拟

中图分类号: TJ414.+3 **文献标志码:** A

Influence Factors Analysis of Penetration and Explosion Warhead on Buildings Damage

Huang Hongxin, Zhang Huisuo, Ma Shanshan, Zhang Fan

(College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030000, China)

Abstract: In order to understand the damage effect of the ground-explosive bomb on the building, the factors affecting the power of the invading warhead are analyzed. The finite element model and the material model were constructed. The explicit dynamics software AUTODYN was used to calculate the damage effect of the projectile at different speeds, static explosion, and intrusion on concrete buildings. The difference between projectile intrusion and static explosion at different speeds was analyzed. The crack propagation contrast of the top of concrete building at different speeds, and the numerical simulation results are obtained. The calculation results show that the analysis can provide a reference for the design of the warhead and the design of the target protection.

Keywords: warhead; static explosion; penetration and explosion; building; numerical simulation

0 引言

在军事领域中, 绝大多数军事工事如指挥所、导弹发射井、飞机库和碉堡等都是由钢筋混凝土构成。这些工事一旦遭到打击, 可能会影响整个战争局面。目前, 对于重要目标地下化的特点, 钻地弹(侵爆战斗部)作为破坏敌方机场跑道、摧毁敌方战略指挥防护工程、战略导弹基地等目标的首选弹药, 在现代战争中有着不可替代的地位和作用。世界各国都把钻地弹的研究和使用作为其武器装备发展的一个重要方面。

对于钻地弹的毁伤威力的研究: 1) 通过试验研究; 2) 通过理论分析; 3) 仿真计算研究。随着计算机技术的快速发展与相关理论的成熟, 数值模拟技术已逐渐广泛应用于钻地弹对建筑物毁伤效应的研究。目前, 对于混凝土结构在侵彻和爆炸载荷作用下的动力响应的研究相对独立, 余文力等^[1]对建筑物内爆炸毁伤效应进行了数值模拟; 陈顺禄等^[2]研究了爆炸载荷下建筑物动态响应的数值分析; 吴

越^[3]研究了钻地弹对地堡的毁伤效能, 但是弹丸侵彻和爆轰还是分开研究的。而弹丸侵入到建筑物内部的过程中, 必将对建筑物强度产生很大影响, 如产生预裂纹、部分结构预先产生很大的内应力。笔者将基于 AUTODYN 有限元分析软件, 对比了静爆和侵爆的区别, 以及当弹丸处于不同侵彻速度时混凝土建筑裂纹的扩展情况, 得出不同载荷下混凝土建筑的动态响应。

1 有限元模型和材料模型

1.1 建筑物模型和弹体模型

笔者在参考文献[4]后, 将建筑物设计成长宽为 6 m, 高为 3 m 的单个房间。建筑物顶部楼板厚度为 30 cm, 外墙厚度为 40 cm, 建筑物采用 Lagrange 算法, 建筑物网格共有 32 106 个单元, 39 426 个节点。以某制导导弹为研究对象^[5-6], 文中弹体的几何尺寸: 弹长 2.5 m, 弹径 0.3 m, 弹丸质量为 1 486 kg, 弹丸分别以 600、500、400 和 300 m/s 的速度从建筑物顶部中心位置侵入。其中: 炸药使用 TNT, 装

收稿日期: 2019-05-14; 修回日期: 2019-06-25

作者简介: 黄鸿鑫(1995—), 男, 江苏人, 硕士, 从事兵器科学与技术研究。E-mail: 99861851@qq.com。

药量为 100 kg；弹体采用 Lagrange 算法；炸药导入 AUTODYN 再转化为 SPH 算法。对于炸药这种大变形的材料采用 SPH 算法，效率更高，其精度和 Euler 算法基本一致。弹体网格共有 2 020 个单元，2 698 个节点；粒子尺寸为 7 mm，粒子数量为 44 367。为了提高计算效率，根据模型的对称性，采用 1/4 模型进行计算分析。有限元模型如图 1 所示。

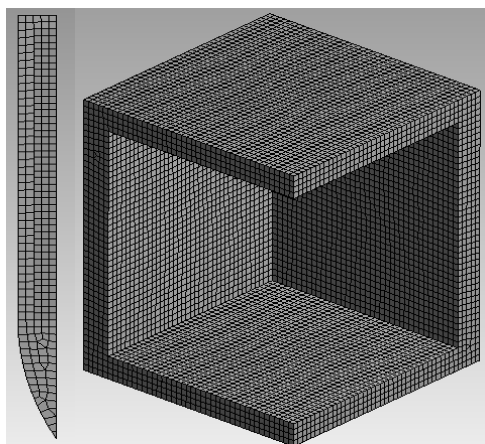


图 1 弹体和建筑物网格

1.2 材料模型

混凝土靶采用 CONC-35 MPA 材料模型。混凝土材料通常会出现应变率效应。笔者采用 RHT^[7-8] 模型模拟混凝土在弹体侵彻、爆炸作用下的损伤发展过程。该模型除了具有压力依赖性、应变速率敏感性和压缩损伤软化等特点外，同时引入了偏应力张量第三不变量对破坏面形状的影响，考虑了拉静水区和压静水区应变率敏感性的差异性。RHT 模型中引入了弹性极限面、失效面及残余强度面作为 3 个控制破坏面，以描述混凝土材料的初始屈服强度、失效强度和残余强度。

RHT 模型失效方程为

$$Y_{\text{fail}}(p^*, \theta, \dot{\epsilon}) = Y_c(p^*) R_3(\theta) F_{\text{rate}}(\dot{\epsilon}) \quad (1)$$

式中： $R_3(\theta)$ 为任意应力角对应的子午线半径和压缩子午线半径之比； $F_{\text{rate}}(\dot{\epsilon})$ 为应变速率强化因子； $Y_c(p^*)$ 为压缩子午线强度； p^* 为标准化压应力； θ 为 Lode 角； $\dot{\epsilon}$ 为应变率。其中

$$Y_c(p^*) = f_c \left\{ A [p^* - p_{\text{spall}}^* F_{\text{rate}}(\dot{\epsilon})]^N \right\} \quad (2)$$

式中： f_c 为抗拉强度； p_{spall}^* 为归一化层裂强度； $p_{\text{spall}}^* = p_{\text{spall}} / f_c$ ； A 为失效面的常数； N 为失效面指数。

RHT 本构模型的损伤定义为：

$$D = \sum (\Delta \epsilon_p / \epsilon_p^{\text{failure}}) ; \quad (3)$$

$$\epsilon_p^{\text{failure}} = D_1 (p^* - p_{\text{spall}}^*)^{D_2} \geq \epsilon_p^{\text{min}} \quad (4)$$

式中： D 为损伤参数， D_1 和 D_2 为损伤常数； $\epsilon_p^{\text{failure}}$ 为失效应变； $\Delta \epsilon_p$ 为塑性应变增量； ϵ_p^{min} 为最小失效应变。混凝土靶具体参数如表 1 所示。

表 1 混凝土材料主要参数

密度/(g/cm ³)	纵波速/(m/s)	A_1 /GPa	G /GPa
2.750	2 920	35.27	16.7
F_c /MPa	f_i/f_c	f_s/f_c	D_1
35	0.1	0.18	0.04
D_2	A	N	Q_0
1	1.600	0.610	0.690
B_Q	B	M	α
0.010 5	1.800	0.7	0.032

炸药用 JWL 状态方程来描述，JWL^[9] 方程的一般压力形式：

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 \bar{V}} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 \bar{V}} + \frac{\omega E}{V} \quad (5)$$

式中 $E = \rho_0 e$ 为单位初始体积的内能，具体参数如表 2。

表 2 TNT 材料参数

密度/(g/cm ³)	D /(m/s)	p /GPa	A /GPa	B /GPa
1.63	6 930	21	373.77	3.74
R_1	R_2	ω	E_0	
4.15	0.9	0.35	0.09	

2 数值模拟结果分析

笔者分别计算了弹丸以 400、500、600 和 800 m/s 的速度侵彻、静爆和 600 m/s 侵爆对混凝土建筑物毁伤效应，分析了不同速度下，混凝土裂纹的扩展、静爆和侵爆在相同测点位置的超压峰值。不同测点位置如图 2 所示。

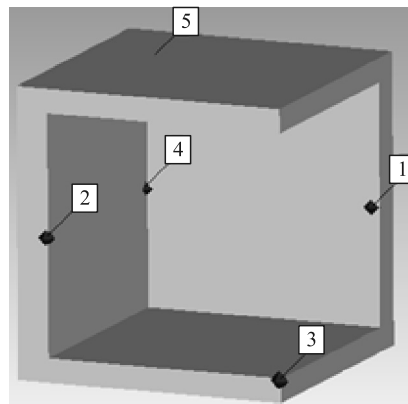


图 2 测点位置

2.1 不同速度下混凝土建筑顶部裂纹扩展对比

为研究不同速度对混凝土裂纹扩展的影响，选

取弹丸着靶速度为 400 和 600 m/s 进行数值仿真，计算结果如图 3 所示。弹丸速度对混凝土裂纹的扩展影响很大，低速冲击时裂纹扩展得更长，且扩展的半径明显大于高速冲击时的扩展半径。主要原因是混凝土属于脆性材料，抗拉强度不到抗压强度的 1/10，弹丸低速侵彻时与混凝土作用时间更长，所以裂纹扩展的长度要大于高速侵彻时的裂纹长度。

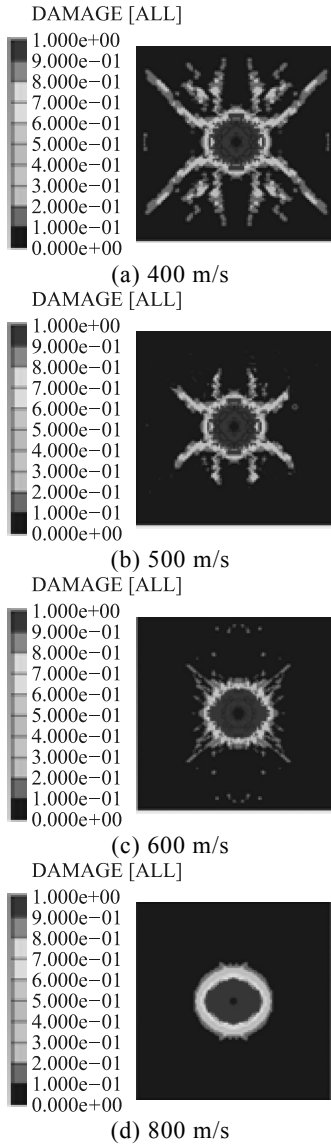


图 3 不同速度侵彻混凝土裂纹扩展

图 4 是静爆与 600 m/s 侵爆对混凝土建筑最终毁伤效果。从图可以看出：静爆情况下，混凝土建筑处于完全密封状态，炸药爆轰所释放的能量可全部作用于建筑物的壁面上。如图 5 所示，对比建筑物的顶部能够看出：静爆情况下，对顶部的毁伤更大，而侵爆则是由于爆轰产物提前从冲孔中外泄，使得顶部毁伤程度明显低于静爆情况下的毁伤程度。

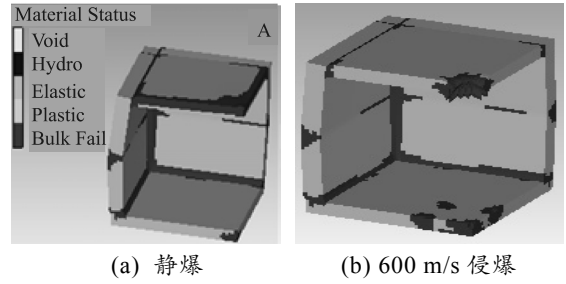


图 4 静爆和侵爆毁伤效果对比

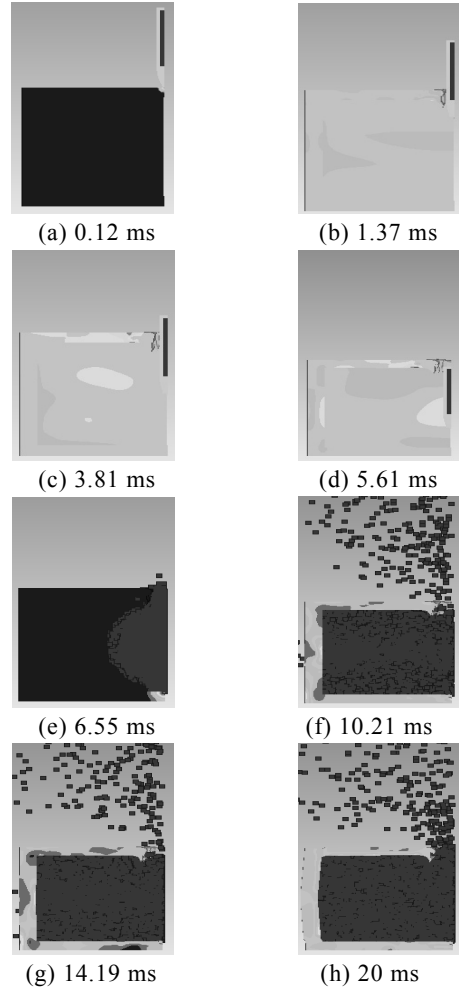


图 5 侵爆毁伤建筑物过程

2.2 理论分析与经验公式

钻地弹对建筑物毁伤主要包括 3 个方面：弹体的撞击、炸药爆炸产生的爆轰效应和破片。对于钻地弹而言，其毁伤主要靠动能撞击和爆轰效应，因此，笔者对钻地弹毁伤只考虑爆轰和侵彻。

在我国，一般采用弹丸侵彻深度计算公式^[10]为

$$H = \lambda_p \cdot K_t \frac{m_p \cdot v_{p0}}{d_p^2 \cos \alpha} \tag{6}$$

式中： H 为侵彻深度，m； λ_p 是弹形修正系数， $\lambda_p = 1 + 0.3(l_p/d_p - 0.5)$ ， l_p 是弹头长度； K_t 是靶介质

性质决定的阻力系数，一般 $K_r=(0.8\sim 0.9)\times 10^{-6}$ ； m_p 为弹丸质量，kg； d_p 为弹丸直径，m； v_{p0} 是弹丸着靶速度，m/s； α 为着角。弹丸若想从建筑物顶部一直侵入到一楼，所要穿透的混凝土厚度为 0.3 m，而根据上述经验公式算得，该弹丸最大侵彻深度为 2.963 7 m。

在冲击波超压峰值的计算上，不同学者通过实验总结得到的经验公式存在较大的离散型，但在这些公式中，亨利奇(Henrych)公式得到了广泛的应用。Henrych 公式^[4]如下：

$$\left. \begin{aligned} \Delta p &= \frac{14.0717}{r} + \frac{5.5397}{r^2} - \frac{0.3572}{r^3} + \frac{0.00625}{r^4} (0.05 \leq \bar{r} \leq 0.3) \\ \Delta p &= \frac{6.1938}{r} - \frac{0.326}{r^2} + \frac{2.1324}{r^3} (0.3 \leq \bar{r} \leq 1) \\ \Delta p &= \frac{0.662}{r} + \frac{4.05}{r^2} + \frac{3.288}{r^3} (1 \leq \bar{r} \leq 10) \end{aligned} \right\} (7)$$

式中 $\bar{r} = r/\sqrt[3]{W_{TNT}}$ ， W_{TNT} 为 TNT 质量， r 是测点与爆心之间的距离。

2.3 静爆和侵爆超压峰值对比

从表 3、4 可看出：测点 3 的压力最大，而测点 5 误差较大，据分析是由于炸药采用了 SPH 算法，粒子的大小为 7 mm，在达到测点 5 拐角位置时，容易出现粒子不充分的现象，若进一步缩小粒子尺寸，就可以有效地解决该问题。

表 3 静爆各测点超压峰值 MPa

测点编号	数值模拟值	理论计算值	误差
1	21.589	19.178 548	0.125 702
2	21.686	19.178 548	0.130 759
3	168.780	142.971 614	0.180 514
4	7.610	9.446 259 23	0.194 310
5	6.420	9.376 304 12	0.315 295

表 4 600 m/s 侵爆各测点超压峰值 MPa

测点编号	数值模拟值	理论计算值	误差
1	18.029	19.178 254 8	0.059 924
2	17.322	19.178 254 8	0.096 789
3	144.450	142.97 161 4	0.010 340
4	8.210	9.446 259 23	0.130 872
5	6.940	9.376 304 12	0.366 488

3 结束语

笔者对弹丸的静爆和侵爆建筑物进行了数值模

拟，以及弹丸处于不同侵彻速度时混凝土建筑裂纹的扩展情况，并分析了影响侵爆战斗部威力的主要影响因素。数值模拟结果与经验公式吻合较好，得到以下结论：

1) 弹丸侵彻速度是影响侵彻深度的重要因素，也是衡量侵爆战斗部威力的重要因素，直接影响对建筑物的毁伤程度，弹丸低速冲击混凝土建筑更加有利于混凝土裂纹的扩展，但高速冲击则又可以提高侵彻深度，在设计侵爆战斗部的过程中必须重视弹丸的着速。

2) 侵爆过程的连续仿真可以实现动能侵彻与炸药毁伤的耦合作用。耦合过程中引起的损伤裂纹增多，会造成炸药起爆后建筑物内壁超压降低；因此，评价侵爆类战斗部威力设计时应该兼顾考虑侵、爆耦合作用。

参考文献：

- [1] 余文力, 黄显明, 王少龙, 等. 建筑物内爆炸毁伤效应的数值模拟[J]. 弹箭与控制学报, 2009, 29(5): 139-141.
- [2] 陈顺禄, 徐全军, 龙源, 等. 爆炸载荷下建筑物动态响应的数值分析[J]. 爆破, 2015, 32(3): 74-78.
- [3] 吴越. 钻地弹对典型地堡侵彻复合毁伤效能影响要素研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [4] 王海峰. 大跨平屋盖结构内爆炸超压场的分布及简化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [5] 张立杰, 梁赠友, 马林. 钻地弹战斗部技术特点及发展趋势[J]. 机械, 2012, 4(39): 1-5.
- [6] 周义. 美军钻地弹现状与发展趋势[J]. 中国航天, 2002, 7(39): 31-34.
- [7] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model or hydrocodes[C]//9th International Symposium, Interaction of the Effects of Munitions
- [8] 李秀地, 孙建虎, 王起帆, 等. 高等防护工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 52-43.
- [9] 门建兵, 蒋建伟, 王树有, 等. 爆炸冲击数值模拟技术基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 143-144.
- [10] 李向东, 杜忠华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013: 236-237.