

冲击波毁伤评估方法

李伟¹, 方洋旺¹, 伍友利¹, 彭维仕¹, 章超²

(1.空军工程大学航空航天工程学院,西安,710038;2.94783部队,浙江湖州,313111)

摘要 针对冲击波对建筑物内目标毁伤概率研究的不足以及瞄准点选定困难的问题,首先分析了冲击波在建筑物中的毁伤特点,提出了体积毁伤概率的概念并给出了计算方法;其次通过研究冲击波在建筑物中的传播规律,建立了一种等效的冲击波峰值超压分布模型;然后运用网格划分的方法,得到了建筑物中毁伤概率最大的理想炸点。仿真中通过对离散点遍历得到建筑物内目标情况已知和未知2种不同假设情况下100 kg TNT对飞机毁伤的最佳炸点,分别为(14,14,4)和(22.5,22.5,3),在最佳炸点引爆时毁伤概率分别为1和0.26。仿真表明:建筑物内目标位置明确的情况下毁伤概率明显大于目标位置不明确时,这与真实情况相符。

关键词 冲击波毁伤;体积毁伤概率;离散点法;密闭空间

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.022

中图分类号 TJ410 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0092-04

A Study of the Method of Shock Damage Probability Assessment

LI Wei¹, FANG Yangwang¹, WU Youli¹, PENG Weishi¹, ZHANG Chao²

(1.Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;2.Unit of 94783, Huzhou, Zhejiang, 313111)

Abstract: Aimed at the problems that the study is not enough on the shock wave damage assessment methods of the target in building and the selecting aiming point is difficult, this paper proposes a concept of the volume-damage probability assessment, sets up a simulation model and gives out a computational method of the volume damage probability through the research on the shock wave propagation in buildings, and based on the gridding method, also presents a discrete point method to compute the three-dimensional damage probability. Finally, the result shows that the model accords with the fact, the disperse-point method is effective, and high in precision. Thereby, the concept of the volume damage probability assessment will be of great value to us in our research shock wave damage work and the precision guide missile and selecting aiming point.

Key words: shock wave damage; volume damage probability; discrete point method; confined space

冲击波毁伤是战斗部对目标毁伤的重要形式。研究冲击波毁伤对研究武器的作战效能评估非常重

要。冲击波在建筑物内传播时,冲击波的反射和叠加使得建筑物内冲击波分布非常复杂,从而造成冲

收稿日期:2014-10-27

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2014M562630)

作者简介:李伟(1989-),男,山东菏泽人,硕士生,主要从事导弹毁伤效能评估研究.E-mail:474903114@qq.com

引用格式:李伟,方洋旺,伍友利,等.冲击波毁伤评估方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):92-95. LI Wei, FANG Yangwang, WU Youli, et al. A Study of the Method of Shock Damage Probability Assessment[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 92-95.

击波毁伤概率计算困难,对建筑物打击时最佳瞄准点难以确定等问题,精确制导炸药的作战效能得不到应有发挥。前人通过爆炸试验已经拟合出冲击波在无限空间和刚性地面中传播的一般规律^[1]。Faisal^[2]用实验方法研究了与爆炸速率相关的冲击波强度问题。I. Edril^[3]通过观察密闭空间内爆炸产生的冲击波,发现超压时间变长,内壁超压出现多个峰值。随着动力学仿真软件的发展,冲击波在建筑物内的分布已经能够得到,吴云泉^[4]和 X. F. Deng^[5]分别通过数值仿真对坑道口处冲击波变化规律进行了研究。但此类软件因为使用差分迭代的方法,仿真过程尤其是立体空间的仿真需要大量时间,不利于快速得到毁伤评估结果。文献[6]使用冲击波传播拟合公式划定毁伤圆的方法进行冲击波毁伤评估,但是在建筑物内这种方法无法应用。本文在以上研究基础上通过对冲击波规律研究并进行合理简化,得到一种冲击波在密闭空间的传播规律模型并将其应用于毁伤评估。

1 体积毁伤概率及目标毁伤模型

目标群在建筑物内部时连同建筑物一并称为体目标,对建筑物内目标群进行打击时往往不清楚单个目标具体位置,因此本文通过毁伤体积与体目标体积的比值来定义毁伤概率。假定目标群中同一类目标为并列关系,称为子类。毁伤体积是指能达到毁伤阈值的体积。

体积毁伤概率的计算方法为将体目标各子区域的毁伤体积乘以加权系数,然后除以体目标:

$$p = \frac{k_1 v_{s1} + k_2 v_{s2} + \dots + k_n v_{sn}}{k_1 V_1 + k_2 V_2 + \dots + k_n V_n} \quad (1)$$

式中: p 为体积毁伤概率; v_{si} 表示在 V_i 子区域的毁伤体积; k_i 是加权系数, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

建立毁伤模型可分为 2 个步骤:

第 1 步,根据目标子类可能所在位置对体目标划分区域,称为子区域, V_1, V_2, \dots, V_n , 认为每个区域内各处相同。并根据一般性分布规律和分布密度给每一区域赋权, k_1, k_2, \dots, k_n 。

第 2 步,根据需求确定体目标内毁伤子类达到一定毁伤等级时所需超压确定阈值。

2 峰值超压分布模型

因篇幅所限本文使用超压毁伤准则,不对冲量毁伤进行研究。文中采用萨道夫斯基公式计算冲击波无限空气中的传播^[7]:

$$\Delta P = 0.8 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right) + 0.27 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^2 + 0.7 \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R} \right)^3 \quad (2)$$

式(2)的适用范围为 $1 \leq \frac{R}{\sqrt[3]{W}} \leq 15$ 。

冲击波到达墙面、目标和其他障碍物时冲击波超压跃升,计算公式为^[7]:

$$\Delta P_r = 2\Delta P + \frac{6\Delta P^2}{7 + \Delta P} \quad (3)$$

在封闭体、半封闭体和建筑物内冲击波的反射与叠加非常复杂,需要对其进行简化。

在封闭、半封闭和建筑屋内,冲击波刚开始传播与在无限空气中传播相同。在遇到墙壁后,墙壁和空气接触面超压急剧跃升,然后发生反射^[8]。为了便于计算,将反射冲击波峰值超压和入射冲击波峰值超压的关系简化为:

$$P_m = \alpha P_0 \quad (4)$$

式中: α 为反射系数。反射后的冲击波离开墙面附近后峰值降低,在计算时墙壁未被推倒时反射系数的取值范围为 $0 < \alpha < 1$ ^[9]。墙壁被推倒的情况本文不做研究。

当反射冲击波叠加后峰值超压可能大于入射波。第 1 次冲击波到达时峰值为最大值的区域和无限空气中相同,称为峰值规则区域,其余区域称为峰值不规则区。不规则区域由于冲击波反射和叠加的变化规律和规则大致相反,越靠近墙壁峰值超压越大,不规则区域交界处峰值超压最小,见表 1。

表 1 不同比例距离处的峰值超压^[9]

Tab.1 Different proportion distances peak overpressure

$Z/(m \cdot \text{kg}^{\frac{1}{3}})$	0.5	1	1.5	2	3	3.5	4	4.5	5
P_{\max}/MPa	1.32	0.65	0.31	0.19	0.13	0.15	0.16	0.13	0.19

考虑炸点位置时可分为 2 种情况。

情况 1 第 1 次冲击波未与反射冲击波叠加。

将墙面反射系数为 α 的密闭三维空间分为 3 部分:第 1 部分是峰值超压出现在第 1 次冲击波来临时的区域,峰值超压由式(2)计算;第 2 部分是墙面附近出现超压跃升的区域,因体积较小峰值超压可忽略^[1];第 3 部分为靠近棱线和墙角位置。由于第 3 部分冲击波叠加,峰值超压得到加强,可以等效成在棱线和墙角分布有 m 个小装药量炸点,空间内部各处峰值超压值取在此处造成超压最大的炸点作为有效炸点。

$$\Delta P = \max(\Delta P_0, \Delta P_i), i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中: ΔP_0 为炸药产生的第 1 次超压; ΔP_i 为等效炸点产生的超压。

不需要考虑棱角位置时,每条棱线以中点为分界点,靠近墙角的半边和墙角一并看成一个整体。从能量角度分析有 1/8 倍能量在棱角位置叠加,等效成 $(1/8)\alpha$ 装药量在墙角位置爆炸,根据相似原理,有 α 倍能量在无限空间爆炸。

第 1 部分和第 3 部分的交面为第 1 次冲击波峰值与第 3 部分的第 2 次冲击波峰值相等的位置。在二维空间中炸点到棱线的连线上进行考虑:

$$\Delta P_m \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{r} \right) = \Delta P_m \left(\frac{\sqrt[3]{\alpha W}}{s-r} \right) \quad (6)$$

式中: r 为炸点到棱线的距离, $s-r$ 为炸点到交面的距离, s 为棱线到交面的距离文献[9]试验模型中炸点到棱角的为比例距离为 $5.74 \text{ m/kg}^{1/3}$, 不规则区出现在 $3 \sim 3.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时。式(6)得 $r = 1.87 \text{ m}$, 比例距离为 $3.12 \text{ m/kg}^{1/3}$, 峰值超压分布大致相同, 可见这种等效方法可以较好描述不规则区域范围和超压值分布。

情况 2 第 1 次冲击波与反射的冲击波叠加。

此时炸点离某个墙角、棱线或墙面较近时。根据萨道夫斯基公式可以计算出冲击波强度,再由文献[10]的方法可计算出冲击波传播速度和冲击波正压持续时间,就可知冲击波可以前后叠加的距离。具体过程不再叙述,这里只给出简单等效方法。炸药量为 W 时,炸点在距离墙面比例距离 $0.38 \text{ m/kg}^{1/3}$ 以内就可等效成 $1 + \alpha$ 倍药量在 2 倍空间中爆炸,见图 1(a);在距离棱线位置 $0.38 \text{ m/kg}^{1/3}$ 以内等效成 $1 + 3\alpha$ 倍药量在 4 倍空间中爆炸,见图 1(b);在距离墙角位置 $0.38 \text{ m/kg}^{1/3}$ 以内等效成 $1 + 7\alpha$ 倍药量在 8 倍空间中爆炸,见图 1(c)。

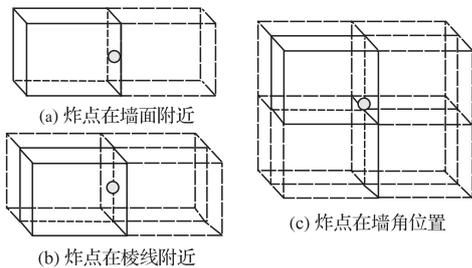


图 1 炸点在不同位置等效示意图

Fig.1 Equivalent for fried points in somewhere

3 毁伤概率计算方法

在文献[6]的基础上,本文提出离散点法,简单讲就是将空间内平均散布 N 个样本点,对每个点进行的研究,再将具有共同性质的点作为一个集合进行

研究,得到需要的结果。具体做法如下:

1)将打击体目标平均分布 n 个样本点 (x_i, y_j, z_k) ,点的间隔为 d :

$$\begin{cases} x_i = x_0 + id \\ y_j = y_0 + jd \\ z_k = z_0 + kd \end{cases} \quad (7)$$

2)考察各个划分区域每个点上冲击波超压值是否达到毁伤对象毁伤等级阈值。若对此点满足毁伤要求,则:

$$\begin{cases} N_1 = N_1 + 1 \\ N_2 = N_2 + 1 \\ \vdots \\ N_n = N_n + 1 \end{cases} \quad (8)$$

3)对各区域点的数目进行加权,计算毁伤概率:

$$p' = \frac{k_1 N_1 + k_2 N_2 + \dots + k_n N_n}{k_1 V_1 + k_2 V_2 + \dots + k_n V_n} \quad (9)$$

显然分割点越多 p 与 p' 的误差就越小,可以近似认为 $p = p'$ 。

4 最优瞄准点选取

Step1 建立笛卡尔直角坐标系。

Step2 按式(7)设置离散点。

Step3 对每个样本点进行分析,在中间区域使用式(2)进行计算,在不规则区域进行 αW 倍药量等效后使用式(2)进行计算。

Step4 对达到给定毁伤级别的点使用式(8)分别计算累计数量。

Step5 使用式(9)计算毁伤概率。

Step6 找到最佳瞄准点。

5 算例与分析

以整体爆破战斗部对机库内战斗机的毁伤为例。战斗部装药为 100 kgTNT ,飞机高度 5 m ,机库尺寸为 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 20 \text{ m}$,模型见图 2。墙壁反射系数为 0.3 。假设情形 a ,寻找最优炸点。

以机库一个角为原点,3 条棱线分别为 x 轴、 y 轴和 z 轴建立笛卡尔直角坐标系。将体目标以 5 m 为分界面划分成上下 2 个块。

使用 MATLAB 编程后算得体积毁伤概率与炸点关系见图 3。

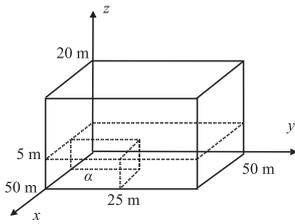
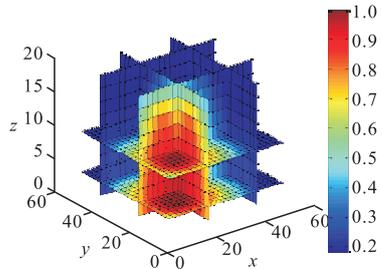
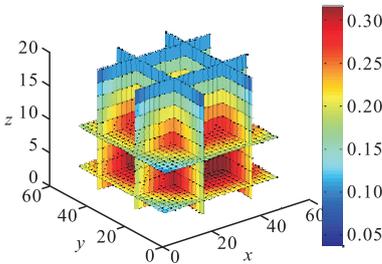


图 2 车库模型图

Fig.2 Model of garage



(a) 飞机位置已知



(b) 飞机位置未知

图 3 炸点位置与概率的关系

Fig.3 The position of blast vs probability

由图 3(a)飞机存在靠近墙角时最优炸点位置为(14, 14, 4),不大于 2 m 时毁伤概率可达到 1,瞄准点应设置为(14, 14, 4)。炸点向其他方向移动时毁伤概率逐渐减小。在墙角位置时峰值超压增强,但是毁伤面积减小,体积毁伤概率为 0.68。

目标位置不明时认为目标均匀分布。由图 3 (b)可知最优炸点位置为(22.5, 22.5, 3),毁伤概率为 0.26,最佳瞄准点应设置为(22.5, 22.5, 3)。由此可见目标位置不清楚时毁伤概率大大降低。

6 结语

本文提出了一种冲击波对建筑物和掩蔽体内目标群毁伤评估方法。通过对冲击波传播、反射和叠加规律的研究,在此基础上得到炸点附近某处冲击波峰值超压的快速计算方法,再通过峰值超压值判断此处目标物是否被摧毁,从而评估炸点毁伤概率,找到最佳瞄准点。仿真结果表明,该方法是一种冲击波毁伤评估的简单可行新思路。

参考文献(References):

[1] Brode H L. Blast Wave from A Spherical Charge [J]. Physics of Fluids, 1959, 2(2): 217-229.

[2] Faisal I K, Abbasi, S.A. Major Accident in Process Industries and Analysis of Causes and Consequence [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999, (12): 361-378.

[3] I Edril, Z Savir, V R Feldgun, et al. On Blast Pressure Analysis Due to A Partially Confined Explosion [J]. International Journal of Protective Structures, 2011, 2(1): 1-20

[4] 吴云泉, 许金余. 坑道口部爆炸冲击波压力传播规律[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2009, 10(5): 90-94.

WU Yunquan, XU Jinyu. Study of Shock Wave Pressure Propagation Laws of the Explosion at the Tunnel Entrance [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2009, 10(5): 90-94. (in Chinese)

[5] X F Deng, J B Zhu, S G Chen. Numerical Study on Tunnel Damage Subject to Blast-Induced Shock Wave in Jointed Rock Mass [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014(43): 88-100.

[6] 史宏亮, 齐少军, 刘忠仕, 等. 基于数值仿真的面杀伤战斗部对面目标成爆弹量计算方法[J]. 战术导弹技术, 2010, (3): 52-56.

SHI Hongliang, QI Shaojun, LIU Zhongshi, et al. The Calculation Method for Exploded Munitions Quantity of Surface Kill Warhead to Surface Target Based on Numerical Simulation [J]. Tactical Missile Technology, 2010, (3): 52-56. (in Chinese)

[7] Gilbert F K, Kenneth J G. Explosive Shocks in Air [M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1985.

[8] 连赅猛. 典型密闭装置内爆炸试验及数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

LIAN Yunmeng. Typical Airtight Implosion Device and Its Simulation Experiment [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2013. (in Chinese)

[9] 胡洋, 康怀宇, 禄宝荣. 密闭空间内爆炸冲击波传播规律及壁面爆炸载荷分布特性的数值仿真研究 [EB/OL]. (2013-8-1) [2014-10-1]. http://d.wanfangdata.com.cn/Conference_8169506.aspx, 2013.

HU Yang, KANG Huaiyu, LU Baorong. Blast Wave Propagation of A Confined Space and Numerical Simulation Wall Explosive Load Distribution Characteristics [EB/OL] (2013-8-1) [2014-10-1]. http://d.wanfangdata.com.cn/Conference_8169506.aspx, 2013. (in Chinese)

[10] 李翼祺. 爆炸力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.

LI Yiqi. Explosion Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)