

doi: 10.7690/bgzd.2023.10.002

空地导弹对机场跑道毁伤效果评估

李健宁, 张毅, 张指辉

(海军航空大学航空作战勤务学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对相同速度下不同着角对于侵彻爆炸坑半径的影响, 分析空地导弹着角与机场跑道毁伤弹坑半径之间的关系。对空地导弹侵彻段深度及爆炸坑半径进行预期, 讨论着角对侵彻深度带来的影响, 结合经验公式给出着角与爆炸坑之间的计算公式。结果表明: 该分析能更好地体现单一影响因素在侵彻段对于毁伤效果的影响, 为下一步作战筹划提供参考。

关键词: 毁伤效果评估; 机场跑道; 经验公式; 仿真; 侵彻着角

中图分类号: TJ762.2⁺1 **文献标志码:** A

Damage Effect Evaluation of Air-to-ground Missile on Airport Runway

Li Jianning, Zhang Yi, Zhang Zhihui

(College of Aviation Combat Service, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the influence of different impact angles on the radius of penetration explosion crater under the same velocity, the relationship between the impact angle of air-to-ground missile and the radius of damage crater on airport runway is analyzed. The penetration depth and crater radius of the air-to-ground missile were predicted, and the influence of the impact angle on the penetration depth was discussed. Combined with the empirical formula, the calculation formula between the impact angle and crater was given. The results show that the analysis better reflects the impact of a single factor on the damage effect in the penetration phase, and provides a reference for the next operational planning.

Keywords: damage effect evaluation; airport runway; empirical formula; simulation; penetration angle

0 引言

信息化战争中, 夺取并保持制空权是遂行其他作战任务的前提和基础。在联合作战过程中, 制空权的争夺将更为激烈, 决定着后续作战过程能否顺利实施。而航空兵作为夺取并保持制空权的主要兵力, 战时若能摧毁敌机场跑道, 使其无法使用, 则可实现夺取空中优势的目的。二战后多次局部战争中也大多首先摧毁敌机场设施。如美军空袭南联盟作战行动中就首先使用航空兵打击了南联盟境内的多处重要机场的跑道目标。

空地导弹因精度高和毁伤威力大的特点, 可实现对机场跑道预设点的精准打击。其主要使命是在敌防空火力范围外打击敌纵深高价值地面固定目标, 如地面指挥中心、桥梁、机场、码头等, 可有效地控制敌军航空兵力的起降, 有助于我方兵力夺取空中优势。

目标毁伤效果评估 (battle damage assessment, BDA) 定义为^[1]: “对敌方目标实施火力打击后, 对目标的毁伤效果进行的综合评估。根据目标 BDA 结果, 作战指挥人员可以判断已实施的火力打击是

否达到预期的毁伤效果, 是否需要再次打击, 并为制定火力毁伤计划提供科学依据。”

笔者通过分析机场跑道易损性特性, 结合其基本结构组成, 建立毁伤评判模式, 并划分毁伤等级。分析空地导弹毁伤机理, 建立侵彻和爆炸模型, 研究空地导弹着角对侵彻深度及弹坑半径的影响, 通过建模仿真来模拟出对跑道打击毁伤效果。进而判定空地导弹着角对敌机场跑道毁伤爆炸坑侵彻深度、毁伤半径等重要信息, 帮助指挥员更好地了解战场毁伤情况, 为定下作战决心与制定作战计划提供帮助。

1 跑道结构特性

跑道是保障飞机起降的重要设施。随着军用飞机性能的日益增强, 对起降机场跑道的要求也越来越高。20 世纪初, 最早的飞机机场可以追溯到一块草坪, 受天气气象影响严重, 而且在当时条件下根本无法实现在泥泞地起降; 因此, 水泥和混凝土构造的机场跑道由于其强适应性、高稳定性成为了现代机场跑道的最佳选择, 受到世界各国的青睐, 并且一直沿用至今^[2]。

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-07-05

作者简介: 李健宁 (1990—), 男, 安徽人, 硕士。

现代军用机场跑道通常由 3 层结构叠加而成：

1) 最底层是厚度约为 500 mm 的夯实沙土层；2) 中间层是以碎石为主要成分的 300 mm 的贫混凝土层；3) 最上层是组成跑道道面的硬度较高的混凝土层，厚度约为 400 mm，并且在道面同时铺设 20 mm 厚度的沥青以增大军用飞机在起、降落时所需的摩擦力，防止发生意外导致飞机失控或滑出跑道^[3]。对跑道的毁伤手段主要集中在跑道面层，即飞机与跑道直接接触的层面，通过运用侵彻、爆破等手段使其完整性得到破坏，从而使飞机无法正常起降^[4]。军用机场跑道结构如图 1 所示。

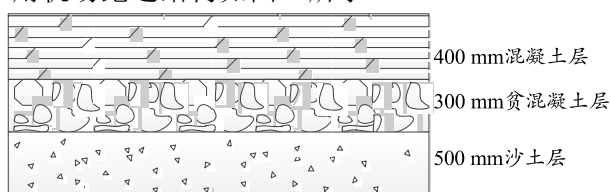


图 1 军用机场跑道结构

2 空地导弹侵彻模型

2.1 空地导弹

导弹主要由导引头、图像发射/指令接收装置、控制与导航系统、引信、战斗部、动力系统、电气系统和弹体结构组成^[5]，笔者主要针对空地导弹复合侵彻战斗部及弹体结构进行简要分析。

对于机场跑道、桥梁道面类平面目标，空地导弹一般采用末端“跃升”打击方式，通过该方式可有效减小着角，并降低跳弹概率和增加毁伤目标的可能性^[5]。

复合侵彻战斗部主要由一个或者多个安装在弹体前部的聚能装药弹药弹头和安装在后部的侵彻弹头组成。第 1 级聚能装药其目的是为在目标上形成一定的弹孔，而第 2 级弹药主要用于获得更大的侵彻深度。其主要的功能是能够有效的侵彻至目标的内部，进而在适当的位置与时间引爆弹药，毁伤目标^[6]。复合侵彻战斗部结构如图 2 所示。

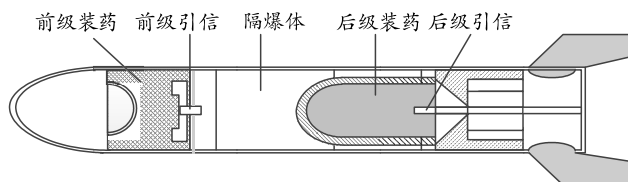


图 2 攻击混凝土目标的串联战斗部

$$H = \left(2d + 0.863m \left(4r^2 / (4rd - d^2) \right) / \rho A \left[v \left(\rho^{0.5} / f_c^{0.5} \right) / 3 - \frac{4}{9} \ln \left(1 + \frac{3v \rho^{0.5}}{4 f_c^{0.5}} \right) \right] \right) \cos \beta \quad (4)$$

式中： d 为弹体直径，m； v_0 为弹体初始速度，m/s；

从导弹弹体结构来看，主要由弹身、进气道、堵盖、弹翼、舵面等结构件组成，其中弹身主要由导引头舱、控制设备舱、战斗部、油箱舱、发动机舱及尾舱组成。弹体结构的主要功能是将组成弹体结构的各受力构件，通过一定的连接方式组合在一起，共同承担导弹在运输、起降、挂飞、发射和自主飞行过程中的各种载荷，并为弹上设备和成附件提供可靠、有效的安装空间。

2.2 侵彻模型

当第 1 级弹药在目标上形成一定的弹坑后，空地导弹进入第 2 阶段——对目标的侵彻。考虑到弹体是以一定角度进入目标内部，则可将空地导弹看作对于着角为目标 β 方向上的正侵彻，如图 3 所示，为此根据 Bernard 公式及对弹体表面侵彻阻力的分析，可求得在正侵彻情况下的侵彻深度^[7]：

$$S = \frac{m N}{A \rho} \left[\frac{v \left(\frac{\rho^{0.5}}{f_c^{0.5}} \right)}{3} - \frac{4}{9} \ln \left(1 + \frac{3v \rho^{0.5}}{4 f_c^{0.5}} \right) \right] \quad (1)$$

式中： m 为弹体质量，kg； A 为弹体横截面面积， m^2 ； N 为弹头形状系数； ρ 为介质密度， kg/m^3 ； f_c 为岩石抗压强度， N/m^2 ； v 为正侵彻初始速度，m/s。

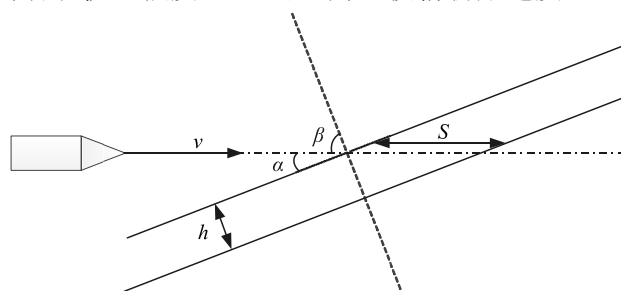


图 3 斜入射侵彻路径

对于卵形弹头来说， $N = 0.863(4r^2 / (4rd - d^2))$ ，而 v 则可看作第 1 阶段弹坑坑底的剩余速度^[8]。

第 1 阶段开坑区的侵彻深度与侵彻阻力呈一定的线性关系；因此，人为定义开坑区的深度为：

$$W = 2d \quad (2)$$

根据着角为 β 时侵彻深度与弹道的几何关系式，可得出斜侵彻的最终侵彻深度为：

$$H = (W + S) \cos \beta \quad (3)$$

将第 1 阶段与第 2 阶段侵彻模型相结合得到斜侵彻的最终深度为：

r 为弹体的曲率半径，m。

为使爆炸效果最佳,当弹体侵彻进入目标内部后,需由侵彻深度与引信延迟时间相配合,在目标道面内部产生巨大的能量释放,形成最佳的爆炸坑,使其毁伤半径最大,对于机场的毁伤效果到达最佳。

根据侵彻深度和爆炸威力可简单分为 3 类:

1) 较为浅层的爆炸,毁伤的部分完全暴露在视野之内,所形成的爆炸坑也近似于一个半球形,围绕爆炸坑四周会有塌陷、大量抛洒物和可能存在的有害物质;2) 更深层次的爆炸,在机场道面基本不产生较为明显的弹坑,其毁伤部分全部在道面以下,在侵彻至道面深层后产生剧烈爆炸,形成一个压缩空腔,在道面以上会有较少的抛洒物,但常会使表层跑道形成明显的隆起或裂痕;3) 介于 1)和 2)之间的爆炸形态,其弹坑整体呈一个圆锥形,在底部会有球状的形态,同时也会产生部分抛洒物,来影响爆炸坑的修复。根据爆炸坑参数工程计算,首先需

$$R = \left(2d + 0.863m(4r^2/(4rd-d^2)) / (\rho A) \left[\frac{v}{3}(\rho^{0.5}/f_c^{0.5}) - \frac{4}{9} \ln \left(1 + \frac{3v\rho^{0.5}}{4f_c^{0.5}} \right) \right] \right)^{0.135} \times 0.969\omega^{0.288} \times \cos\beta^{0.135} \quad (8)$$

3 空地导弹对机场跑道的侵彻仿真

3.1 数值模拟

在 Matlab 上对弹体的斜侵彻研究进行数值模拟,空地导弹参数将参照美制 JASSM 空地导弹。弹体直径为 0.457 m,弹体质量为 1 021 kg,弹体长度为 4.27 m,战斗部装药为 240 lb 的高能钝感炸药 AFX-757,约为 251.6 kg 的 TNT 当量,战斗部曲率半径 0.242 m,机场混凝土道面模型参数基于普通混凝土进行考量,抗压强度为 $3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$,密度为 $2 400 \text{ kg/m}^3$ 。

根据已知的爆炸坑参数工程计算,先将本文中的空地导弹数据代入侵彻机场道面进行预先预估,当式中 $X=Y$ 时:

$$3.615 + \ln\left(\frac{454^{0.25}}{H}\right) = \left[5.145 + 1.39 \left(\ln\left(\frac{454^{1/3}}{H}\right) \right) \right] \times \tan^5 \left[1.598 + 0.4343 \left(\ln\left(454^{1/3}/H\right) \right) \right]; \quad (9)$$

$$H = 171.336. \quad (10)$$

可推断,当空地导弹若侵入跑道深度 $\geq 171.336 \text{ cm}$,即约为 1.71 m 时,在此基础上产生的爆炸会形成在土壤中的爆炸腔,未能对跑道道面进行有效的开放式毁伤打击。

判断弹体侵彻深度下爆炸所形成的是开放式的爆炸坑还是隐性的爆炸腔,采用以下公式^[9]:

$$X = 3.615 + \ln(\omega^{0.25}/H); \quad (5)$$

$$Y = \left[5.145 + 1.39 \left(\ln(\omega^{1/3}/H) \right) \right] \tan^5 \left[1.598 + 0.4343 \left(\ln(\omega^{1/3}/H) \right) \right]. \quad (6)$$

式中: ω 为战斗部内炸药的 TNT 当量, kg; H 为战斗部的侵彻深度, cm。

如果 $X > Y$,则弹丸(战斗部)在土壤中只出现隐形爆炸腔。如果 $X < Y$,则弹丸(战斗部)在土壤中爆炸会出现抛掷爆炸形成的爆炸坑。

爆炸坑真实半径的经验计算公式为^[7]

$$R = 0.969H(\omega^{1/3}/H)^{0.865}. \quad (7)$$

结合式(4)和(5)可推出,对于弹体侵彻目标跑道时,当初始速度确定时,着角对最终弹坑半径的影响为:

3.2 毁伤半径与侵彻深度仿真研究

根据文献[10]的研究,弹体在侵入混凝土跑道目标时,其着角受着速的影响。在一定的着速下,当着角过大时,超过了弹体的临界角将会发生跳弹现象,不能对目标产生有效的毁伤打击。根据实验研究表明在 260、300、340、380 和 420 m/s 速度下,弹体侵彻 30 MPa 混凝土机场道面的临界跳弹着角的角度分别约为 52° 、 50° 、 48° 、 47° 和 46° 。

结合实验数据,为验证理论模型的正确性并研究着角对机场道面毁伤半径的影响,通过不断改变倾角的大小,对侵彻和爆炸过程进行数值模拟和理论计算,在考虑到避免产生跳弹现象,根据不同的着速,着角从 0° 取至相对应的临界着角,结果如图 4、5 所示。

由图 4 可看出,侵彻深度与着角之间的变化规律。在相同的速度条件下,随着着角的不断增大,对机场道面的毁伤深度是在不断减小。结合速度这一影响因素,综合来看,当速度较小,着角偏大时在特定的着角和速度条件下才能毁伤至贫混凝土层,在跑道道面内部的混凝土及贫混凝土层形成浅层爆炸坑,构成一定程度的毁伤,但对于沙土层则会产生明显的挤压效应,不能有效地进行毁伤同时伴随着爆炸的抛洒物也较为稀零;当速度不断增大,

着角变小时则可轻易毁伤至第 3 层沙土层,对机场跑道道面形成较为有成效的毁伤打击,使得爆炸坑更加深层,引起的抛洒物也会随之变多,其内部结构也复杂多变,增加了修复的整体流程步骤,修复难度大大提升,同时还有可能引起二次塌陷,对跑道构成更大的毁伤威胁,有效地延缓敌军飞机恢复空战的时间,为我方争取到更多先机。

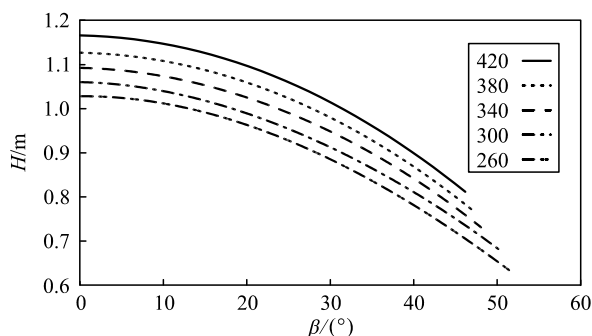


图 4 空地导弹着角与侵彻深度的关系

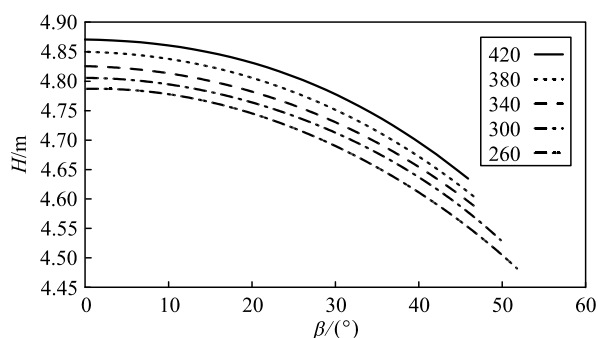


图 5 空地导弹着角与毁伤半径的关系

由图 5 可看出,着角对于机场道面毁伤半径的变化规律,同样是呈递减的状态,当速度一定时,着角越大,毁伤半径则越小,且变化速率越来越大,即着角对毁伤半径的影响越来越大。根据分析可得,当侵彻的初始速度越大,着角越接近于垂直时,毁伤面积达到峰值,爆炸坑结构越复杂,修复难度随之增高,对于机场封锁起到了很好效果。

4 结束语

笔者分析了空地导弹着角对于机场混凝土跑道毁伤弹坑半径的影响,得出以下结论:

(上接第 3 页)

- [3] 中国人民解放军总参谋部军训部. 96A 式坦克炮手教材[M]. 北京: 解放军出版社, 2013: 71.
- [4] 王洋, 李宏飞, 刘洪亮, 等. 初速、弹道与瞄准[J]. 兵器知识, 2018(4): 82-87.
- [5] 中国人民解放军总参谋部装甲兵部. 五四式 12.7 毫米

1) 根据受力分析,结合能量守恒定律,分析了着角、侵彻深度和爆炸坑半径的关系,结合 Bernard 公式和爆炸坑的工程计算经验公式,建立斜侵彻下弹体着角侵彻混凝土道面的计算模型,推导了着角对于弹坑半径之间的影响公式。

2) 根据着角对弹坑之间的影响公式,计算在弹体侵彻时不同着角下所产生弹坑的半径。结果证明,在相同条件下,随着着角的不断增大,弹坑的半径减小。

3) 在 Matlab 中对弹体斜侵彻过程进行数值模拟计算,结合不同的弹体结构和机场跑道道面构造,考虑到弹药爆炸效能的偏差以及经验公式所带来的方法误差,理论数值模拟计算与实际毁伤情况存在一定偏差,需进一步进行修正处理。可结合实际,参考误差分析理论对理论模型进行合理修正。

参考文献:

- [1] 马志军, 贾希胜, 陈丽. 基于贝叶斯网络的目标毁伤效果评估研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(12): 1509-1513.
 - [2] 林小平. 复杂条件下机场跑道沥青加铺层结构设计理论与方法[D]. 上海: 同济大学, 2007.
 - [3] 许强. 反跑道战斗部侵彻过程研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2014.
 - [4] 刘阔. 子母弹对机场跑道毁伤评估研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
 - [5] 李颖. 空地导弹仿射非线性建模及其模糊 PID 控制[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.
 - [6] 严平, 谭波, 苗润, 等. 战斗部及其毁伤原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 160-161.
 - [7] 孙惠香, 牛欢, 路锋, 等. 弹体斜侵彻混凝土的倾角作用研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(12): 1080-1085.
 - [8] 高一涵. 爆炸荷载作用下机场跑道毁伤效应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
 - [9] 黄正祥, 祖旭东. 终点效应[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 76-78.
 - [10] 段建, 王可慧, 周刚, 等. 弹体侵彻混凝土的临界跳弹[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(6): 797-802.
- 坦克高射机枪射表[M]. 北京: 中国人民解放军战士出版社, 1983.
- [6] 王建民. 坦克射击训练、方法、原理[M]. 北京: 军事译文出版社, 1996: 173-174.
 - [7] 赖瑜鸿, 荆海辉, 帅少鹏. 中国参赛队“坦克两项”“空降排”项目均获佳绩[N]. 解放军报, 2020-08-25(3).