

# 装药埋深对机场跑道爆破效应影响数值模拟<sup>\*</sup>

梁斌, 钱立新, 任时成

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川绵阳 621900)

**摘要:**为评估装药埋深对机场跑道爆破毁伤效应的影响, 采用非线性动力分析程序对机场跑道进行了爆炸破坏数值模拟, 对比分析了不同埋深下爆炸漏斗坑尺寸、爆腔半径、靶体各层损伤区域分布情况, 计算表明, 存在一个最佳爆深使得爆破漏斗坑体积达到最大值。初步给出了爆炸破坏参数与装药埋深的关系。

**关键词:**机场跑道; 最佳埋深; 爆破漏斗; 数值模拟

中图分类号: O389 文献标志码: A

## Numerical Simulation of Influence of Blasting Depth on Runway Damage Effect

LIANG Bin, QIAN Lixin, REN Shicheng

(Institute of Systems of Engineering, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In order to study the damage effect of runway blasting at different depth, the numerical simulation of blasting was carried out to estimate different blasting depth at runway with AUTODYN software. Under the simulation conditions, it was revealed that the depth of charge was a factor controlling the damage radius and crater blasting volume. The calculations of fragmentation indicated that the average damage radius and crater blasting volume increased when the depth of charge increased as observed in practical blasting. The simulation shows that at the optimal blasting depth of the explosive charge, the crater blasting volume reaches the maximum. The relation between the depth of charge and damage parameter has been obtained.

**Keywords:** runway; optimal blasting depth; crater of blasting; numerical simulation

### 0 引言

机场跑道等分层介质中爆炸破坏效应的研究是一个非常复杂的问题, 涉及冲击波的传播, 土壤、卵石层和混凝土层在高温、高压、高应变率条件下的动力学行为, 以及气态爆轰产物和固态介质之间的、固态多层介质之间的相互作用等问题<sup>[1]</sup>。影响跑道爆炸破坏效应因素较多, 文中主要分析装药埋深对爆炸破坏效应的影响, 采用数值模拟方法可减少代价昂贵的实验研究, 解释和分析实验结果, 有助于深入了解爆轰作用的机理。

文中采用 AUTODYN 程序模拟了装药在跑道不同埋深下爆炸产生破坏的过程, 得到了装药埋深与跑道破坏参数之间的初步规律。模拟结果表明, 对于一定结构的装药, 存在一个最佳爆炸深度使其爆炸能量利用率达到最高, 对跑道的破坏作用效果较好, 其计算分析结果可为提高装药结构威力设计提供参考

依据。同时为进一步探索跑道中爆炸机理和爆破规律奠定了基础。

### 1 初始条件和计算模型

#### 1.1 初始条件

机场跑道由混凝土面层、卵石层和压实土壤层组成(如图1), 对于一级军用机场跑道<sup>[2]</sup>, 厚度分别为350mm、400mm和500mm, 压实土层下为当地自然地质材料, 为便于分析, 同样取为压实土。数值计算中, 为减小土壤层厚度方向边界效应对计算结果的影响, 根据装药埋深不同, 取压实土层厚度分别为2250mm和5250mm。

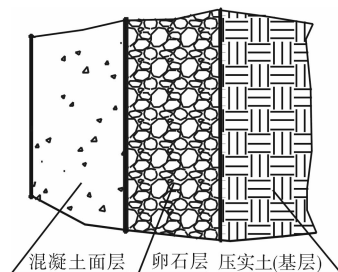


图1 典型一级军用机场跑道结构

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2010-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(11002134); 国防973项目资助

作者简介: 梁斌(1976-), 男, 贵州遵义人, 工程师, 博士, 研究方向: 战斗部毁伤性能评估。

### 1.2 计算模型建立

跑道各层材料模型简化如下<sup>[2]</sup>:混凝土面层,采用 RHT 模型<sup>[4-5]</sup>,抗压强度 50MPa,密度为 2.44g/cm<sup>3</sup>;卵石层:卵石类离散介质,目前没有合适的本构模型来描述,针对卵石与砂浆组成的稳定层,相比之下,采用 RHT 混凝土类脆性材料模拟性能相对接近,暂时采用混凝土模型代替,采用 RHT 模型,抗压强度取为 10MPa,由于卵石之间用砂浆粘结,其拉伸强度较低,抗拉强度取为 1.5MPa,密度为 2.10g/cm<sup>3</sup>;压实层:目前土壤在强动载荷下的本构模型研究还处在起步阶段,还没有合适的土壤动态计算本构模型,为简化问题,结合土壤动态试验结果,初步采用 HJC 模型模拟<sup>[6]</sup>,抗压强度取 4MPa,密度为 1.84g/cm<sup>3</sup>。

弹体装填 5kg 含铝炸药,药柱直径为 88mm,长为 480mm。炸药采用 High\_Explosive\_Burn 模型,爆轰产物的等熵膨胀过程用 JWL 状态方程描述<sup>[5,7]</sup>:

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

式中: $E$ 、 $Q$  分别为 CJ 面前、后释放的比内能; $V$  为比容; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为常数; $\lambda$  为非理想成分的燃烧分数。式(1)中,第一项在高压段起主要作用,第二项在中压段起主要作用,第三项代表低压段。在爆轰产物膨胀的后期,方

表 1 炸药 JWL 状态方程参数

参数	参数值
$\rho_0 / (\text{g/cm}^3)$	1.72
$P_{CJ} / \text{GPa}$	25.0
$D / (\text{m/s})$	6240
$Q / (\text{MJ/kg}^3)$	8650
$A / \text{GPa}$	695.13
$B / \text{GPa}$	3.13
$\omega$	0.40
$R_1$	5.4
$R_2$	1.4

程式前两项的作用可忽略,为加快求解速度,将炸药从 JWL 状态方程转换为更为简单的理想气体状态方程(绝热指数  $\gamma = \omega + 1$ )。

炸药 JWL 状态方程参数<sup>[3,5,7]</sup>如表 1 所示。

### 1.3 装药在混凝土及土壤中爆炸计算与试验结果的对比

通过数值模拟与试验结果的对比,验证混凝土以及土壤材料模型及参数。为此,对美军标中提供的混凝土和土壤中静爆破坏效应试验分别进行数值模拟,并将数值模拟结果与试验结果进行比对。

混凝土采用 RHT 模型,抗压强度为 50MPa,土壤采用 HJC 模型,抗压强度为 5MPa。炸药产物采用 JWL 状态方程描述。粒子直径 10mm。装药为 5kg

含铝炸药,埋深 0.4m。

漏斗坑尺寸计算值与试验值比较如表 2 所示。从表中可以看出,爆破漏斗坑半径与体积数值计算与试验结果基本一致,说明本计算模型具有一定的合理性。

为分析装药埋深对静爆破坏效应的影响,建立了 2D 轴对称模型,从上到下依次为面层、卵石层和基层,跑道径向尺寸  $R=4.0\text{m}$ ,在跑道中设置不同的测量点,以便测取不同位置处爆炸响应参数,埋深为 1250mm 情况下静爆计算模型如图 2,为获得跑道中不同位置处爆炸参数,设置了相应的测量点(Gauge 点)。采用 SPH 算法,粒子直径均为 10mm。计算中,炸药从爆轰到产物准静态膨胀做功的阶段,自动将爆轰产物转化为理想气体。

表 2 数值计算与试验结果<sup>[8-9]</sup>比较(5kg 含铝炸药,埋深 0.4m)

	土中爆炸		混凝土中爆炸	
	试验值	计算值	试验值	计算值
漏斗坑半径/m	2.54	2.75	1.82	1.77
漏斗坑体积/m <sup>3</sup>	5.85	6.12	2.25	2.18

## 2 计算结果与讨论

在装药和靶体不变的情况下,从装药中心距离跑道表面距离为 0.3m 开始计算,下一次计算将装药埋深逐渐增加 0.1m,直

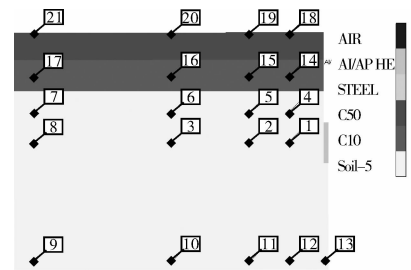


图 2 计算模型(埋深 1250mm)

到跑道出现隐炸情况为止。图 3 给出了埋深为 0.3m 时跑道损伤随时间变化云纹图。

从图 3 可以看出,在爆炸初期,主要形成爆腔和压碎区,其毁伤主要是冲击波的作用,跑道内开始形成裂纹并逐渐扩展;随着爆炸产物的膨胀,损伤区域逐渐增大,靶体裂纹逐渐增多并且扩展和连通,局部形成贯穿裂纹,靶体径向边界由于拉伸作用而形成局部层裂;在装药轴向,由于爆炸产物的膨胀,形成较大的抛掷碎块,最终形成爆破漏斗坑。

图 4 及图 5 分别给出了装药在不同埋深情况下跑道损伤云纹图和爆破漏斗坑与埋深关系曲线,从图中可看出,随着装药在跑道中埋深的增加,跑道损伤区域呈逐渐增大—最大—逐渐减小的趋势;装药轴向垂直于机场跑道道面静爆时,装药中心位于压实土层-地基层(自然土层)附近爆炸时,爆炸漏斗坑半径

最大,此时爆炸产生的损伤区域最大,贯穿裂纹分布较密,毁伤效果相对较好;随着装药中心距离道面距

离减小,跑道损伤范围逐渐减小,在一定范围内出现“空炮”现象。

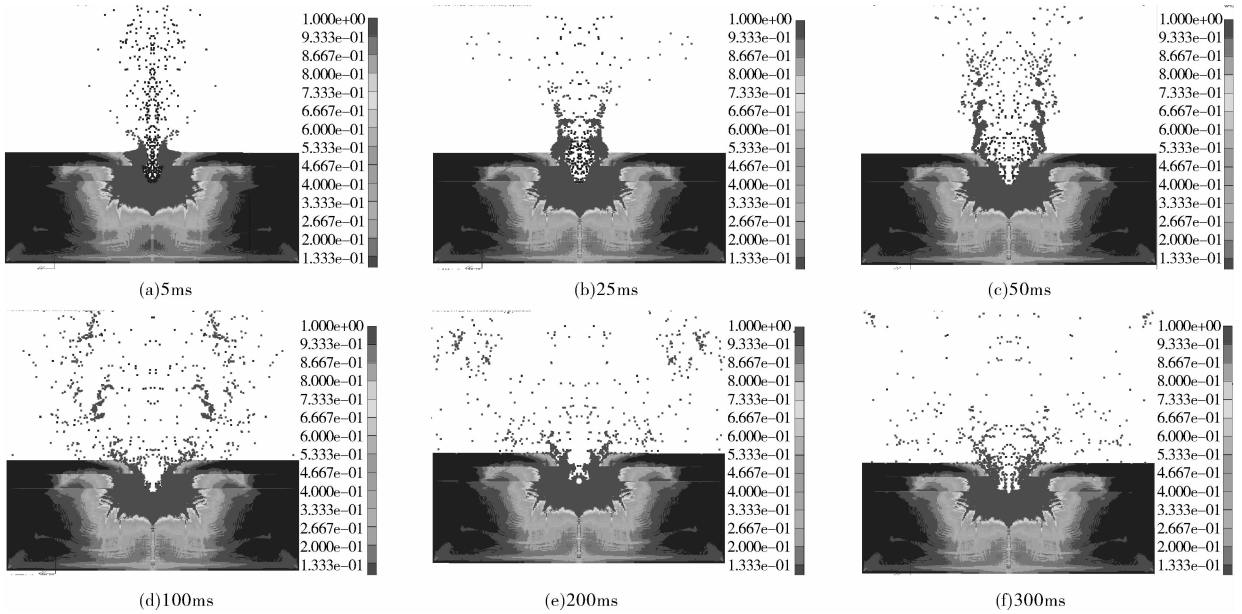


图 3 不同时刻跑道损伤云纹(埋深为 0.3m)

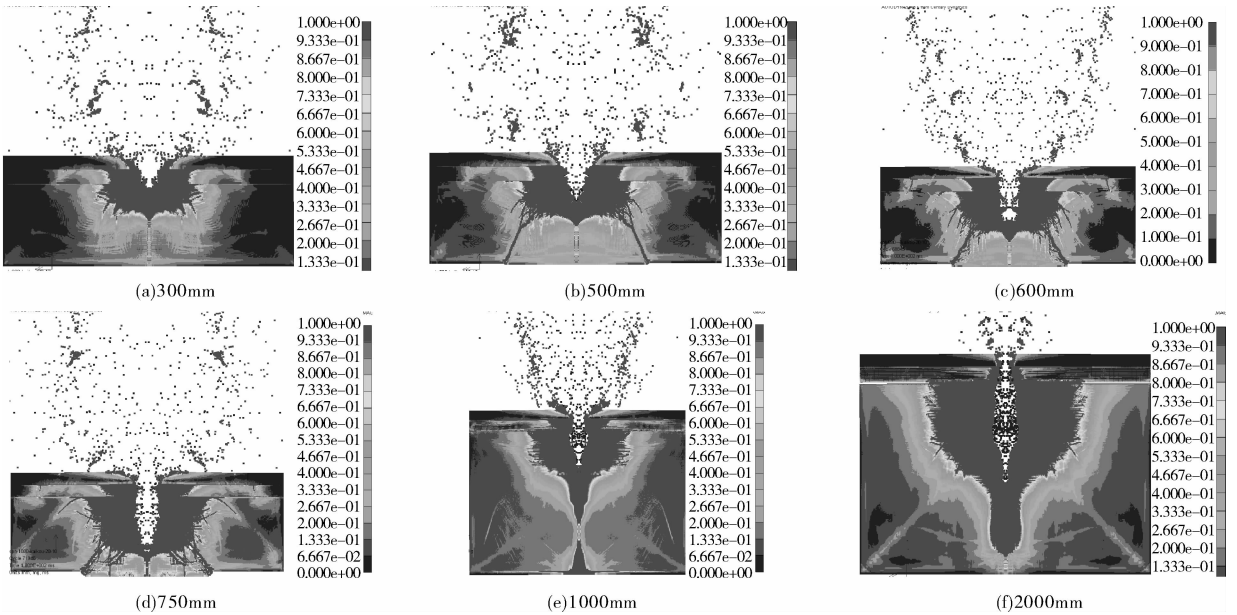


图 4 装药在不同埋深下爆炸跑道漏斗坑(100ms)

图 5(a)和图 5(b)中可以看出,在装药埋深较小时,爆炸产生漏斗坑半径及其相应体积均较小,顺着装药埋深的逐渐增加,爆破漏斗坑半径和体积逐渐增大,对于 5kg 含铝炸药,在装药埋深为 0.9m 时,产生的爆破漏斗坑体积达到最大,此时装药埋深称为最佳埋深,因此本研究装药的最佳埋深为 0.9m;装药埋深继续增大到 0.95m 时,爆炸产生的漏斗坑半径达到最大值。随着埋深的继续增加,爆破漏斗坑半径和漏斗坑体积均减小,在埋深为 2.3m 时,几乎在跑道道面不产生漏斗坑,对于本研究所用装药结构,在埋深大于 2.3m 后爆炸只在跑道中产生隐爆空腔。

从图 5(c)可以看出,随着埋深的增大爆炸空腔深度逐渐增大,但在埋深超过 1.0m 时,爆腔深度增加速度变缓;从图 5(d)和图 5(e)可以看出,在埋深为 0.95m 时,跑道面层和卵石层损伤区域达到最大值。而从图 5(f)可以看出,基层损伤区域随埋深的增加呈平缓增大的趋势。

上述计算结果分析并结合以往试验结果可以得到:弹坑深度通常在比最佳爆深稍小的爆深处达到最大值,而最大的可见弹坑直径发生在比最佳爆深稍大的爆深处。

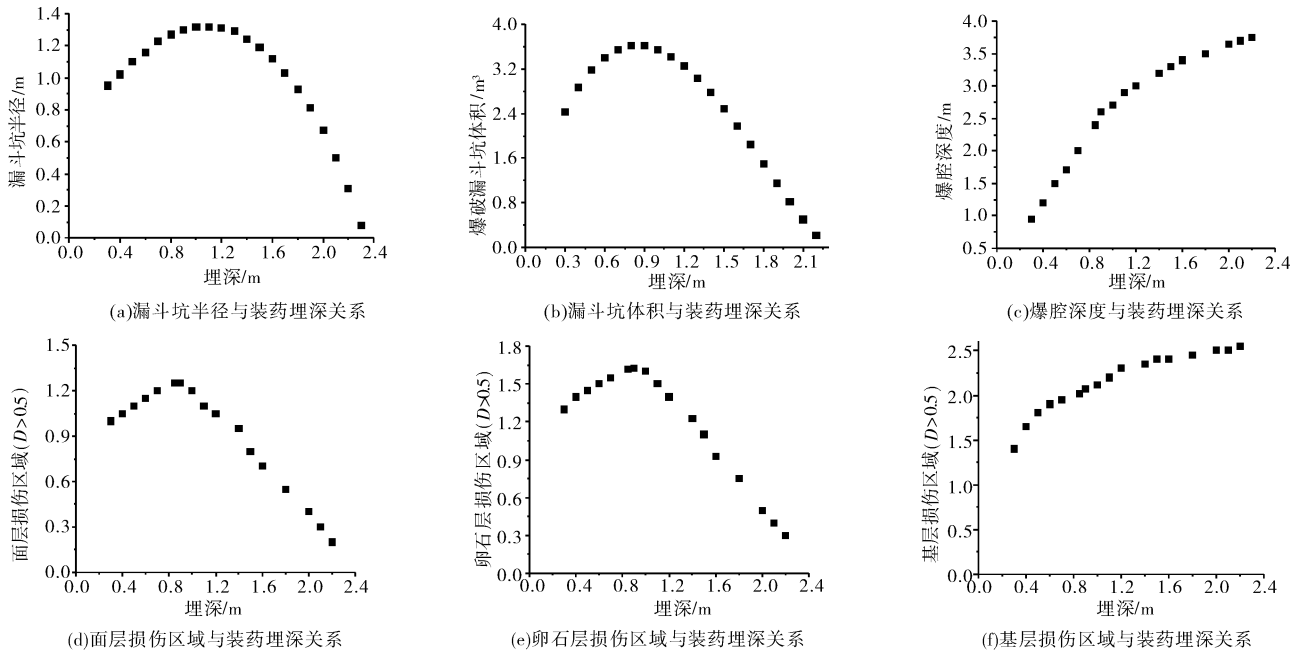


图 5 爆破漏斗坑参数与装药埋深之间的关系

根据对数值计算结果的分析,并结合已有岩土介质中爆破效应试验结果<sup>[8-9]</sup>,对跑道中爆破效应分析认为,对于一定当量的装药来说,随着装药中心距离道面距离减小,消耗在道面外空气域中的爆炸波和爆炸产物的能量逐渐增多,跑道损伤范围逐渐减小,在一定范围内出现“空炮”现象;而随着装药埋深的增加,用于破坏跑道的爆炸能量逐渐增大,弹坑半径和体积随爆炸深度的增加而增大,在某一称之为“最佳”爆深处,弹坑体积达到最大。如果进一步增大爆深,位于爆心上方的介质材料会限制形成弹坑,同时耦合到大地中的爆炸能量逐渐增多,爆炸产生的能量不足以将抛掷物散落在爆坑边缘外时,更多的抛掷物将回落在弹坑的边界内,可见弹坑半径将有所减小,直至弹坑完全消失致使跑道表面隆起。继续增加装药埋深,爆后跑道表面基本无扰动或较小扰动,爆炸只形成一个地下洞穴,此时为爆破工程中所称的“封闭爆炸”或“隐爆”。

### 3 结论

通过对装药在跑道中不同埋深情况下爆炸数值计算,得到以下初步结论:

对于一定当量的装药来说,存在一个最佳埋深,使得爆破漏斗坑体积达到最大;装药埋深大于一定值时,道面中将出现隐炸现象,对于本研究中装填 5kg 含铝炸药,最佳埋深约为 0.9m,出现隐炸的临界装药埋深在 2.3m 附近。

弹坑深度通常在比最佳爆深稍小的爆深处达到最大值,而最大的可见弹坑直径发生在比最佳爆深稍大的爆深处。制约动能侵彻弹药威力的首要因素是炸点位置。

#### 参考文献:

- [1] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [2] 中国人民解放军总后勤部. GJB 1278-1991 军用机场水泥混凝土道面设计规范[S]. 1992.
- [3] Josef Leppanen. Experiments and numerical analyses of blast and fragment impacts on concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(7): 843-860.
- [4] Riedel W. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C]//Pro. of the 9th Int. Sym. on Interaction of the Effects of Munitions with Structures. Berlin: Norwegian Defense Construction Service, 1999:315-322.
- [5] AUTODYN Users manual[M]. California: Century Dynamics Corporation, 2005.
- [6] Holmquist T J, Johnson G R. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[C]//Michael J. M, Joseph E. B. 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada: 1993:591-600.
- [7] 董海山. 炸药及相关物性[M]. 北京: 科学出版社出版, 1999.