文章编号：1000-5773(2012)01-0076-07

面层混凝土对跑道内爆毁伤影响的仿真研究*

康彦龙，蒋建伟，王树有，门建兵

（北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京　100081）

摘要：采用考虑混凝土拉伸破坏的 TCK 失效模型，运用 AUTODYN 软件对跑道内爆毁伤进行了数值模拟。研究了炸点置于面层混凝土底部时，不同装药量和不同面层混凝土厚度对爆破漏斗坑参数的影响规律。结果表明：数值模拟结果较好地反映了混凝土因拉伸损伤引起的破裂和抛掷漏斗现象。基于数值模拟得到的漏斗坑参数值，建立了漏斗坑半径、空腔半径与面层厚度的无量纲表达式，计算得到的漏斗坑参数值得到了实验验证。

关键词：内爆；跑道；多层介质；漏斗坑；数值模拟

中图分类号：O383　　**文献标识码**：A

1　引　言

跑道由混凝土、碎石以及土壤等多层介质组成。由于跑道面层混凝土介质具有多孔性及各向异性，并且跑道各介质间存在分界面，因此跑道内爆毁伤比较复杂。一些学者采用实验和量纲分析手段进行研究，例如：王清洁等人[1]通过相似理论对漏斗坑可见深度及漏斗半径进行数据回归；周宁等人[2]研究了爆破漏斗参数与比炸深的关系。但是由于跑道各层介质非常复杂，关于面层混凝土对跑道内爆毁伤影响研究仍不完善。

跑道在受到内爆毁伤时，面层混凝土在冲击波及复杂应力作用下将产生剥落、裂纹等失效破坏，最终在拉伸波和爆轰产物的作用下产生抛掷漏斗坑。许多学者对此进行了研究，例如：Tu 等人[3]采用数值模拟方法对混凝土受到的拉伸破坏失效进行了研究；金乾坤[4]将 HJC、RHT 模型与能反映拉伸失效的 TCK 材料模型相结合，运用 LS-DYNA 对弹丸侵彻混凝土进行了研究，结果表明该模型能较好地反映混凝土的拉伸失效破坏。

本研究运用 AUTODYN-2D 程序，采用考虑混凝土拉伸破坏的 TCK 失效模型，针对装药在面层混凝土底部起爆的情况，对不同面层厚度的内爆进行数值模拟，分析不同装药量条件下漏斗坑半径、空腔半径与面层混凝土厚度的关系以及冲击波在混凝土中的传播及衰减规律，建立漏斗坑半径、空腔半径与面层厚度的无量纲表达式，并将计算结果与实验结果进行对比验证。

2　数值模拟方法

2.1　几何模型

图 1 为典型跑道结构模型。跑道由面层混凝土、基层碎石以及底层土壤组成。设面层混凝土厚度为 d，基层碎石厚度为 250 mm。整个模型径向尺寸为 4 m。采用球形装药，炸点位于面层混凝土底部，起爆点为装药中心。

2.2　数学模型

* **收稿日期**：2010-05-13；**修回日期**：2010-07-08

基金项目：国防基础科研项目(B1020060357)；爆炸科学与技术国家重点实验室基金(ZDKT11-02)

作者简介：康彦龙(1984－)，男，博士研究生，主要从事弹药工程及系统仿真研究. E-mail：kangyanl@163.com

通讯作者：蒋建伟(1962－)，男，教授，主要从事弹药工程及系统仿真研究. E-mail：bitjjw@bit.edu.cn

炸药在跑道中爆炸涉及混凝土和土壤的压缩破坏、爆轰产物的剧烈膨胀以及爆轰气体与混凝土的相互作用,单一的 Lagrange 或 Euler 算法都不能准确描述整个作用过程。本研究采用 Euler-Lagrange 耦合算法[5],将爆轰气体膨胀以及固体介质中的断裂破坏作用进行耦合计算。

图 2 为建立的数值计算模型,其中混凝土上方的空气及炸药周围区域定义为 Euler 网格区域,多层介质定义为 Lagrange 网格,采用渐变形式进行网格划分。为了描述爆轰气体的飞散以及爆炸应力波在底层的无反射传播,分别在 Euler 边界以及土壤底层网格节点处定义流出边界及无反射边界。在装药 x 方向上的不同位置以及 y 方向自由表面处共定义 6 个观测点,用以分析压缩波的传播规律。

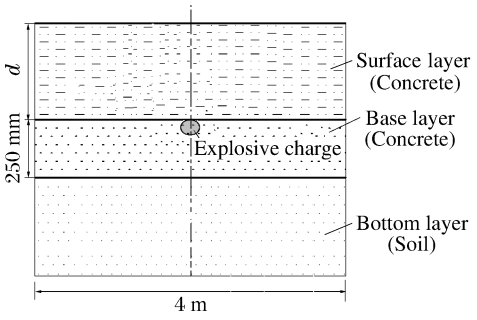


图 1　跑道几何模型

Fig. 1　Geometry model of runway

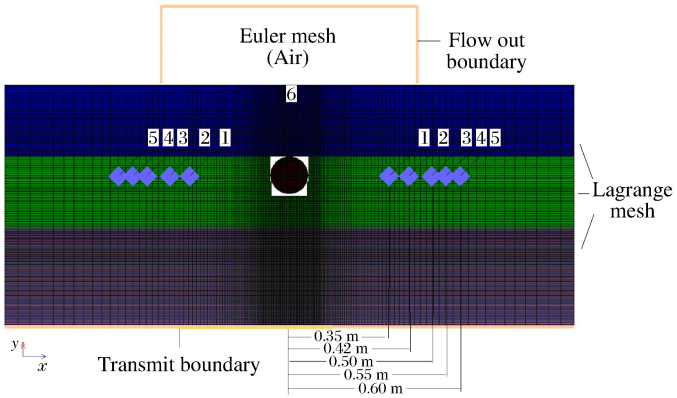


图 2　数值计算模型

Fig. 2　Numerical simulation model

2.3　材料模型

对于面层混凝土,本研究采用考虑爆炸作用下拉伸破坏的 TCK 失效模型。该模型认为混凝土材料只有在体积拉伸状态下才有损伤累计,在压缩状态下混凝土为弹塑性状态,用拉伸失效准则来定义材料在拉伸作用下的破坏。

拉伸损伤变量 D 定义为[4]

$$D = \frac{16}{9}\left(\frac{1-\tilde{\nu}^2}{1-2\tilde{\nu}}\right)C_{\mathrm{d}} \tag{1}$$

$$C_{\mathrm{d}} = \frac{5k}{2}\left(\frac{K_{\mathrm{ic}}}{\rho c\dot{\theta}_{\max}}\right)^2\theta^m \tag{2}$$

$$\tilde{\nu} = \nu\exp\left(-\frac{16}{9}\beta C_{\mathrm{d}}\right) \tag{3}$$

式中:C_{d} 为裂纹密度;θ 为体积应变;K_{ic} 为断裂韧性;$\dot{\theta}_{\max}$ 为断裂前混凝土经历的最大体积应变率;ρ 为材料密度;c 是波速;ν 和 $\tilde{\nu}$ 分别为未损伤和损伤材料的泊松比;β 与材料的卸载有关,且 $0\leqslant\beta\leqslant1$;$m$ 为材料参数。应力-应变关系表示为

$$p = 3K(1-D)\theta \tag{4}$$

$$S_{ij} = 2G(1-D)e_{ij} \tag{5}$$

式中:p 为体积拉应力,S_{ij} 和 e_{ij} 分别为偏应力和偏应变张量分量,K 为未损伤材料的体积模量,G 为未损伤材料的剪切模量。通过求解(1)式~(5)式构成的封闭方程组,可以得到混凝土的拉伸失效。

碎石基层用 10 MPa 低强度混凝土来代替[6],面层及基层混凝土状态方程采用 p-α 状态方程,即

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e \tag{6}$$

式中:A_1、A_2、A_3、B_0 和 B_1 为待定参数,由实验测定;ρ_0 为初始材料密度;e 为比内能;$\mu=(\rho\alpha/\rho_0-1)$ 为相对体积变化,α 为材料多孔度。具体参数见表 1,其中,p_{crush} 为混凝土材料塌陷时的压力,p_{lock} 为多孔度 α 达到一致时的压力。

表 1　混凝土 p-α 状态方程参数

Table 1 p-α equation of state parameters for concrete

ρ_p/(g/cm^3)	ρ_0/(g/cm^3)	p_{crush}/(MPa)	p_{lock}/(MPa)	n	A_1	A_2	A_3	B_0	B_1
2.314	2.750	23.3	6 000	3.00	3.53×10^7	3.96×10^7	9.04×10^6	1.22	1.22

采用 Mie-Grüneisen 状态方程及 Drucker-Prager 强度模型[7]来描述土壤在爆炸冲击载荷下的作用过程。模型参数列于表 2。

装药选用 B 炸药，采用 JWL 状态方程来描述炸药的爆轰及能量释放过程。假定爆轰前沿以常速率传播，以炸药爆轰产物压力 p 表示的状态方程为

$$p = A\left(1-\frac{\omega\eta}{R_1}\right)\exp(-R_1/\eta)+B\left(1-\frac{\omega\eta}{R_2}\right)\exp(-R_2/\eta)+\omega\eta e_h \tag{7}$$

式中：$\eta=\rho/\rho_0$，ρ 为爆轰产物密度，ρ_0 为炸药初始密度；e_h 为单位体积的热力学能；A、B、R_1、R_2 和 ω 为常量。表 3 列出了炸药模型参数，其中 v_{CJ} 为 CJ 爆速。

表 2 土壤模型参数

Table 2 Parameters of soil model

ρ/(g/cm^3)	Γ	S	c_0/(km/s)	G/(MPa)	Hydro tensile limit/(MPa)
2.2	0.11	1.5	1.6	240	−0.1

表 3 炸药模型参数

Table 3 Parameters of explosive model

ρ/(g/cm^3)	v_{CJ}/(km/s)	A/(GPa)	B/(GPa)	R_1	R_2	ω	e/(kJ/m^3)
1.658	6.930	373.7	3.734	4.15	4.15	0.35	6×10^6

3 计算结果分析

本研究对药量为 525～900 g、面层混凝土厚度 d 分别为 250、270、300、320、350 和 400 mm 的工况进行数值计算。为了便于分析爆炸强压缩波在混凝土中的传播规律，采用典型药量 725 g 进行计算。

3.1 面层厚度对爆炸压缩波传播的影响

图 3 为不同面层厚度 d 条件下，观测点 3（与装药点处于同一水平面）处压力 p 随时间 t 变化的曲线。从图 3 中可以看出，面层厚度对压缩波在 x 方向上的传播和衰减影响较小。

图 4 为不同面层厚度 d 条件下，观测点 6 处（正对装药点的混凝土层外表面处）抛掷速度 v 随时间 t 变化的曲线。可见，抛掷速度随面层厚度 d 的增大而减小。这主要是因为当 d 增大时，爆炸压缩波在到达混凝土表面时其传播距离增大，与自由表面处拉伸波的叠加作用减小。

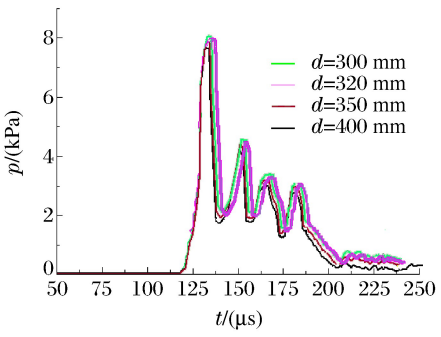


图 3 观测点 3 处的压力剖面

Fig. 3 Profiles of pressure at gauge 3

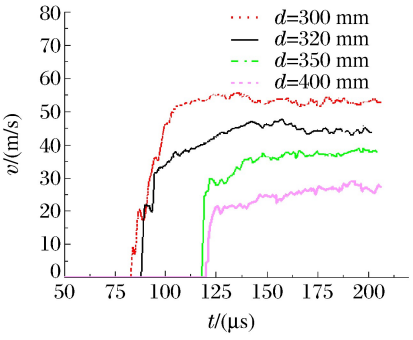


图 4 观测点 6 处的抛掷速度剖面

Fig. 4 Profiles of cast velocity at gauge 6

图 5 为面层厚度 d 为 300 mm 时,不同观测点处的压力随时间变化的曲线。由图 5 可知,压缩波在混凝土中传播时,在离爆心较近的距离上发生较大程度的衰减,此后衰减程度随距离的增大而减小。

图 6 为各观测点处质点位移 s 随时间 t 变化的曲线。从图 6 中可以看出:离爆心越远,质点运动的位移越小;当位移减小到一定值时,由于冲击波衰减较大,质点将不再产生径向运动,此时混凝土中只有弹性波传过。

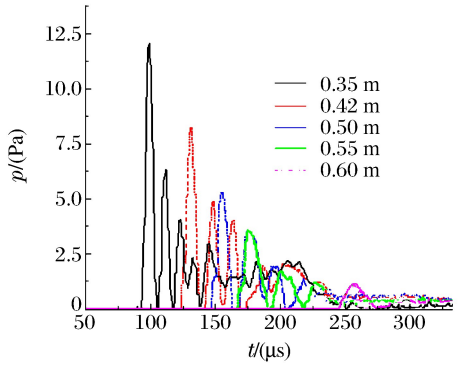


图 5　不同观测点处的压力剖面

Fig. 5　Profiles of pressure at different gauges

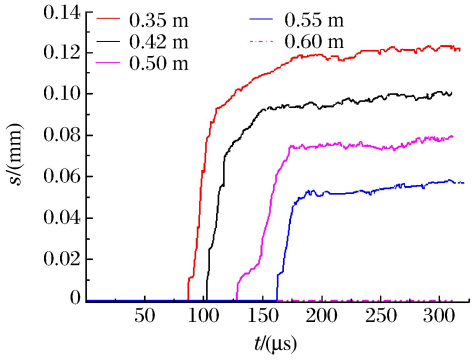
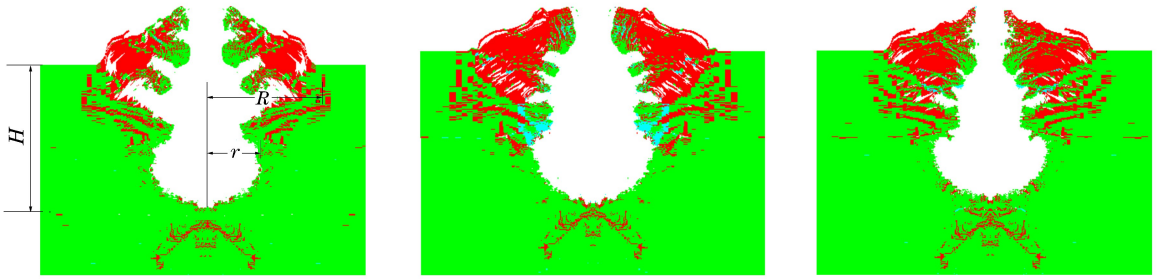


图 6　不同观测点处的质点位移-时间曲线

Fig. 6　Displacement-time curves at different gauges

3.2　面层厚度对爆破漏斗坑的影响

图 7 为装药量为 725 g 时 3 种典型面层厚度对应的爆炸破坏仿真结果。从中可以看出,装药以上的面层混凝土在爆炸压缩波以及拉伸波的共同作用下发生断裂、崩落,并向上抛掷,最终产生了抛掷漏斗坑;在距离炸点较近范围的基层和底层中产生空腔区,空腔区周围分布着不同程度的损伤;当面层厚度 d 增大时,抛掷漏斗坑漏斗半径 R 减小明显,而空腔半径 r 基本不发生变化。



(a) d=300 mm　　(b) d=350 mm　　(c) d=400 mm

图 7　3 种典型面层厚度下爆炸破坏仿真结果

Fig. 7　Simulation results of damage in surface concrete layer with three typical thicknesses

图 8 为装药量为 725 g 时漏斗坑半径 R 随面层厚度 d 的变化曲线。可以看出,R 随面层厚度 d 的增大而减小。当 d 小于 320 mm 时,爆炸应力波到达面层表面时强度衰减程度较小,除了对装药周围介质产生压碎破坏形成空腔外,大部分爆炸能量发生外泄并传递到空气中,因此在面层中形成的漏斗坑较为一致;当 d 大于 320 mm 时,爆炸能量外泄减少,基本全部作用于周围介质,但是由于埋深增加时,装药上方介质的抵抗力增大,所以爆破漏斗坑半径迅速减小。空腔半径 r 随面层厚度 d 变化的曲线如图 9 所示。可见,空腔半径 r 随面层厚度 d 的增加而增大,只是增幅很小。

图 10、图 11 分别为不同面层厚度 d 条件下爆破漏斗半径 R 及空腔半径 r 随药量 W 的变化曲线。可以看出:在一定面层厚度条件下,漏斗坑半径 R 均随装药量的增加而增大,只是增加幅度随药量的增加而减小;在药量相同的条件下,面层厚度 d 对空腔 r 的影响不大;在面层厚度一定的前提下,空腔半径 r 随装药量的增加显著增大,且呈现近线性关系。

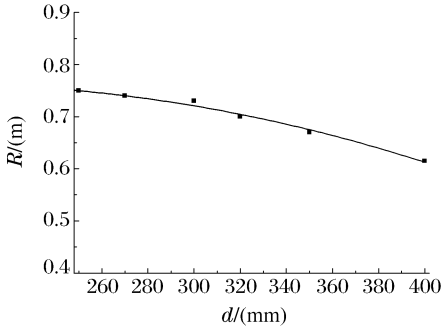


图 8 漏斗坑半径 R 随面层厚度 d 变化的曲线

Fig. 8 Variation of crater radius R with surface concrete thickness d

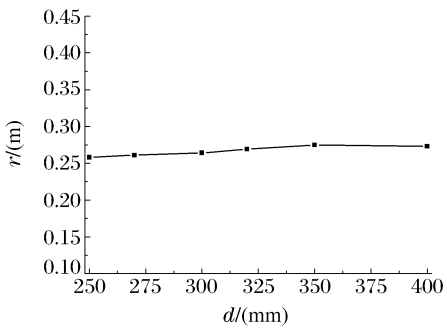


图 9 空腔半径 r 随面层厚度 d 变化的曲线

Fig. 9 Variation of cavity radius r with surface concrete thickness d

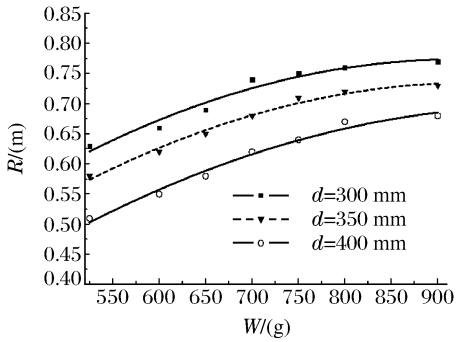


图 10 漏斗坑半径 R 与药量 W 的关系

Fig. 10 Relationship between crater radius R and explosive mass W

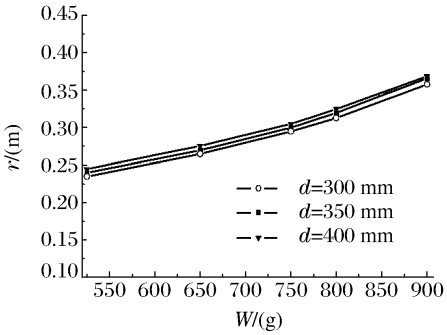


图 11 空腔半径 r 与药量 W 的关系

Fig. 11 Relationship between cavity radius r and explosive mass W

3.3 计算结果分析

基于上述数值模拟结果，通过量纲分析，推导出漏斗坑参数与面层混凝土厚度的关系。漏斗坑半径 R 可表述为

$$R = f(W,\rho_e,v,\delta_1,\rho_1 c_1,d,\delta_2,\rho_2 c_2,d_2,\delta_3,\rho_3 c_3,d_3,h) \tag{8}$$

式中：W 为装药量，ρ_e 为装药密度，v 为装药爆速，δ_1、δ_2、δ_3、$\rho_1 c_1$、$\rho_2 c_2$、$\rho_3 c_3$ 分别为面层、基层混凝土及土壤的抗压强度及波阻抗，d、d_2 和 d_3 分别为面层、基层混凝土及土壤层的厚度，h 为炸点深度。

选取 W，ρ_e 和 v 为基本量，于是有

$$\frac{R}{(W/\rho_e)^{1/3}} = f\left(\frac{\delta_1}{\rho_e v^2},\frac{\rho_1 c_1}{\rho_e v},\frac{d}{(W/\rho_e)^{1/3}},\frac{\delta_2}{\rho_e v^2},\frac{\rho_2 c_2}{\rho_e v},\frac{d_2}{(W/\rho_e)^{1/3}},\frac{\delta_3}{\rho_e v^2},\frac{\rho_3 c_3}{\rho_e v},\frac{d_3}{(W/\rho_e)^{1/3}},\frac{h}{(W/\rho_e)^{1/3}}\right) \tag{9}$$

在面层、基层以及底层强度一致的条件下，不考虑装药密度等常数，对(9)式进行简化，即

$$R/W^{1/3} = f(d/W^{1/3}) \tag{10}$$

写为一般形式并表示成线性关系为

$$\ln(R/W^{1/3}) = \ln C_1 + \ln(d/W^{1/3})^{D_1} \tag{11}$$

式中：C_1、D_1 为待定系数。同理得到

$$\ln(r/W^{1/3}) = \ln C_2 + \ln(d/W^{1/3})^{D_2} \tag{12}$$

式中：C_2、D_2 为待定系数。

根据跑道破坏特征参数分析，以漏斗坑半径 R 和空腔半径 r 作为衡量跑道破坏的典型特征参数，得到不同面层厚度、不同药量条件下无量纲漏斗坑半径 $\ln(R/W^{1/3})$ 及空腔半径 $\ln(r/W^{1/3})$ 与面层厚度 $\ln(d/W^{1/3})$ 的拟合曲线，如图 12、图 13 所示，则(11)式、(12)式表述为

$$\ln(R/W^{1/3}) = -0.79 - \ln(d/W^{1/3})^{0.534} \tag{13}$$

$$\ln(r/W^{1/3}) = -1.42 - \ln(d/W^{1/3})^{0.34} \tag{14}$$

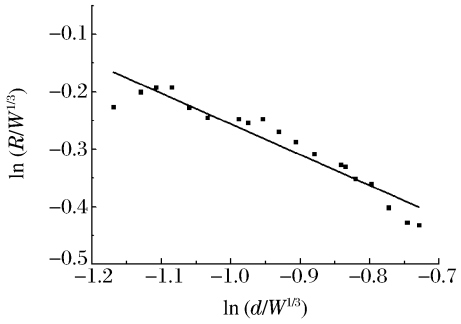


图 12　无量纲漏斗坑半径与面层厚度的关系曲线

Fig. 12　Relationship between dimensionless crater radius and dimensionless surface concrete thickness

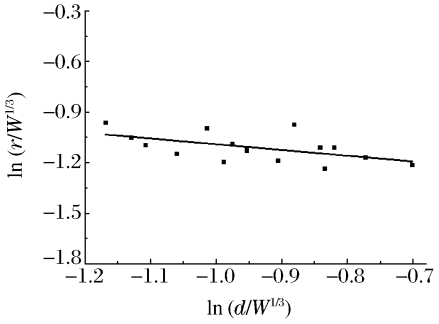


图 13　无量纲空腔半径与面层厚度的关系曲线

Fig. 13　Relationship between dimensionless cavity radius and dimensionless surface concrete thickness

4　实验验证

为了验证(13)式、(14)式的准确性,对面层混凝土厚度分别为 320 及 350 mm 的跑道进行内爆实验。预先钻孔将装药放置于面层底部,装药采用 B 炸药,密度为 1.7 g/cm^3,药量为 1 kg。图 14 为面层厚度为 350 mm 跑道的爆炸实验照片。表 4 为实验结果及(13)式、(14)式计算的漏斗坑参数对比。可见,(13)式、(14)式计算得到的漏斗坑半径及空腔半径比实验结果稍大,这主要是由于(13)式、(14)式是在面层无预制炮孔条件下得出的,未考虑内爆过程中的压力外泄;计算值与实验测量值的相对误差小于 10%,因此漏斗坑尺寸的计算值是可信的。

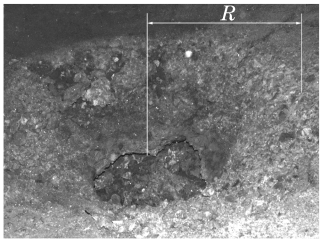


图 14　面层厚度为 350 mm 时跑道内爆破坏图像

Fig. 14　Experimental image of explosion damage in the surface concrete layer with thickness of 350 mm

表 4　漏斗坑参数的实验结果及计算结果

Table 4　Experimental and calculated crater parameters

d/(mm)	R/(mm)		r/(mm)	
	Exp.	Calc.	Exp.	Calc.
320	810	834	330	356
350	775	795	320	345

5　结　论

针对装药在面层底部起爆这一特定问题,对不同面层混凝土厚度的跑道内爆进行了数值模拟,得到了以下主要结论:

(1) 将反映拉伸破坏的 TCK 模型应用于混凝土的失效模型中,仿真结果较好地反映了混凝土在爆炸作用下产生的破裂和抛掷漏斗;

(2) 基于计算结果建立了漏斗坑半径、空腔半径与面层厚度的无量纲表达式,计算预测的漏斗坑参数与实验结果吻合较好,可为工程爆破提供参考;

(3) 在药量相同的条件下,漏斗坑半径随面层厚度增加而减小,而空腔半径变化较小。

(4) 面层混凝土厚度对爆炸压缩波的传播及衰减影响很小,压缩波强度在离爆心较近距离处发生大幅度衰减,随距离增大衰减幅度逐渐减小。

References:

[1] Wang Q J, Gu W B, Xia W G, et al. An experimental study on damage effect caused by an explosion in multilayer medium [J]. Engineering Blasting, 2003, 9(2): 7-11. (in Chinese)
王清洁, 顾文彬, 夏卫国, 等. 多层介质中爆炸破坏效应的实验研究 [J]. 工程爆破, 2003, 9(2): 7-11.

[2] Zhou N, Ren H Q, Shen Z W, et al. Experimental study on the damage effect of projectile explosive in multi-layer medium [J]. Engineering Science, 2006, 8(8): 56-60. (in Chinese)
周 宁, 任辉启, 沈兆武, 等. 弹丸在多层复合介质中的爆炸破坏效应研究 [J]. 中国工程科学, 2006, 8(8): 56-60.

[3] Tu Z, Lu Y. Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations [J]. Int J Impact Eng, 2009, 36(1): 132-146.

[4] Jin Q K. Dynamic damage and failure model for concrete materials [J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(1): 10-14. (in Chinese)
金乾坤. 混凝土动态损伤与失效模型 [J]. 兵工学报, 2006, 27(1): 10-14.

[5] Brown K H, Burns S P, Christon M A. Coupled Eulerian-Lagrangian methods for earth penetrating weapon applications, SAND2002-1014 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratories, 2002.

[6] Yang D M, Wang X M. 3D-numerical simulation of anti-runway bomb penetrating multilayer medium [J]. Journal of Ballistics, 2004, 16(3): 83-87. (in Chinese)
杨冬梅, 王晓鸣. 反机场弹药斜侵彻多层介质靶的三维数值仿真 [J]. 弹道学报, 2004, 16(3): 83-87.

[7] Luccionia B, Ambrosinib D, Nurick G, et al. Craters produced by underground explosions [J]. Comput Struct, 2009, 87(21-22): 1366-1373.

Numerical Simulation on the Effect of Surface Concrete Layer on Inner Explosion of Runway

KANG Yan-Long, JIANG Jian-Wei, WANG Shu-You, MEN Jian-Bing

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The explosion damage of runway is numerical simulated using a hydro code of AUTODYN based on TCK damage model considering tensile failure. The effects of charge and surface concrete layer thickness on the explosion crater diameter are obtained when the detonation is at the bottom of surface concrete layer. The results indicate that the model describes well the process of concrete fracture and crater formation in surface concrete. According to the simulation results, the dimensionless expression relating crater radius, cavity radius and the thickness of the surface concrete layer is established to predict the crater parameters during inner explosion in runway. A good agreement is achieved between the crater sizes measured by experiment and that predicted using this empirical equation.

Key words: inner explosion; runway; multilayer medium; crater; numerical simulation