

文章编号:1008-1534(2009)01-0008-04

截面形状对洞库内爆冲击波流场影响的数值模拟研究

刘国庆,蔡军锋,易建政,王国栋

(军械工程学院弹药工程系,河北石家庄 050003)

摘要:运用 LS-DYNA 动力有限元软件,采用 ALE 及多物质流固耦合方法,对截面面积相等而形状不同的弹药洞库内部爆炸冲击波流场进行了数值模拟研究。结果表明,截面面积相同而形状不同的 2 个洞库在炸药轴线上对应点的冲击波压力基本相同。

关键词:洞库;爆炸冲击波;数值模拟

中图分类号:O437.5 **文献标识码:**A

Numerical simulation of the influence of cross section shape of cave on blast shock waves propagation

LIU Guo-qing, CAI Jun-feng, YI Jian-zheng, WANG Guo-dong

(Ammunition Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei 050003, China)

Abstract: Using LS-DYNA software, ALE algorithm and the multi-material fluid-solid coupling manner, blast shock waves propagation in the ammunition caves of round and arc section are studied by numerical simulation. The results show that shock wave pressures at the corresponding point of explosive axis caves of round section and arc section are almost equal.

Key words: cave; blast shock wave; numerical simulation

储存在洞库中的弹药,一旦发生意外爆炸,会产生很强的爆炸冲击波。与炸药在空气中爆炸相比,这种冲击波持续时间较长,且峰值压力较高。在洞库壁面的约束作用下,其内的冲击波峰值压力将减得很慢,对内部装备构成了极大的威胁^[1],甚至当冲击波冲出洞口后,会对洞库口外人员和设施造成伤害,因此,研究洞库内爆冲击波压力的流场非常必要。对洞库冲击波流场进行研究的方法目前主要有试验研究和数值研究 2 种。采用试验方法研究,一般应根据相似理论,建立一个相似模型进行试验。采用数值模拟计算可以克服试验设备和试验条件的限制,在不同特征尺寸条件下对洞库内爆炸冲击波

的反射过程和环流现象进行比较直观的描述,又可以节约经费,但不辅以试验研究,其计算结果可能与实际情况差距较大。所以 2 种方法的结合使用,才能达到事半功倍的效果。通过数值模拟的方法来研究管道内冲击波流场,IGRA 等进行了类似的研究^[2];杨科之和王来等人分别对直坑道和 T 型坑道内爆炸冲击波的传播规律进行了研究^[3,4]。

相似第三定理规定了现象相似的条件,它指出:如果描述的那些现象的未知相对量满足相对型全同完整方程组和单值相似条件,那么这些现象就是相似现象。根据这一定理,建立的相似模型应与原型几何相似、材料相同。由于弹药洞库是拱形的钢筋混凝土结构,因此,试验模型也应是拱形的钢筋混凝土结构。然而拱形的钢筋混凝土结构不是标准件,因此考虑用市场上常见的圆截面的钢筋混凝土代替同材料的拱形洞库模型进行试验,从而通过测试圆

收稿日期:2008-11-06;修回日期:2008-11-24

责任编辑:王海云

作者简介:刘国庆(1975-),男,黑龙江青冈人,讲师,博士研究生,主要从事爆炸和安全防护方面的研究工作。

截面洞库内的冲击波参数来得到拱形截面洞库内对应点的冲击波参数。

1 数值仿真模型

1.1 原型描述

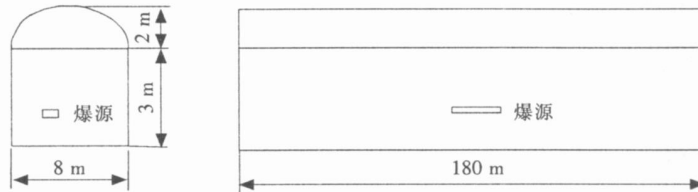


图 1 弹药洞库原型示意图

Fig. 1 Prototype sketch map of the ammunition cavity

1.2 有限元模型

为了节省模拟计算所用机时,根据相似第三定理采取三维 1/10 缩比模型进行计算。炸药形状与洞库中弹药垛形状类似,按原型装药量三维 1/10 计算,密度为 1.60 g/cm^3 ,尺寸为 $5.1 \text{ cm} \times 3.1 \text{ cm} \times 200 \text{ cm}$ 。洞库模型长度为 18 m,横截面宽为 0.8 m;模型与原型对应点冲击波压力相同,原型时间为模型时间的 10 倍。

模型 A 为拱形截面洞库,与洞库原型几何形状

弹药洞库原型示意图见图 1 所示,洞库截面宽度为 8 m,侧墙高度为 3 m,拱高为 2 m,为一直洞,长度为 180 m,壁厚为 0.5 m。库内存放弹药假定为炮弹,等效 TNT 为 5 t,存放于洞库轴向中心位置,在洞库横截面上不对称,而是位于偏左的位置。

相似,大小为原型的 1/10;模型 B 为圆截面洞库,与模型 A 截面面积和长度相同。模型计算中保证材料相同,网格划分一致。这样,即使模拟的结果与真值有误差,但却不影响对比研究 2 个不同截面形状管道内冲击波流场规律。考虑到模型 A 和模型 B 都是相对于过爆源中心点的截面对称的,因此建立了 1/2 的有限元模型进行简化计算,其截面如图 2 所示。模型 A 和模型 B 的左端面设定对称约束边界,右端面为无反射边界。

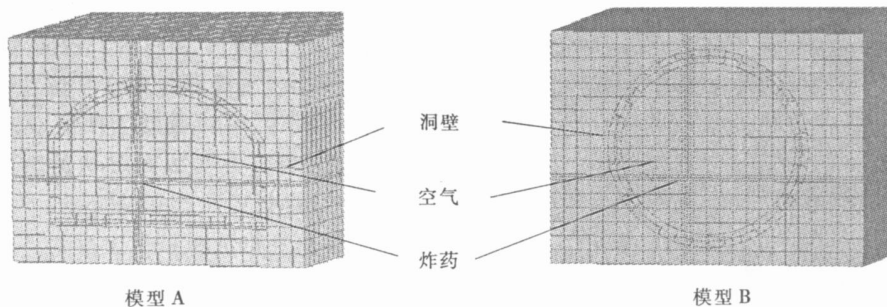


图 2 模拟计算模型图

Fig. 2 Model for simulations

2 数值方法与状态方程

2.1 数值算法简介

笔者采用 LS-DYNA 程序进行数值分析。LS-DYNA 程序是在美国 Lawrence Livermore National Lab,由 HALLQUIST J Q 博士主持开发完成的,是目前著名的非线性动力分析软件,在武器结构设计、内弹道和终点弹道、军用材料研制等方面得到了广泛的应用。LS-DYNA 程序具有广泛而强大的分析功能,可以模拟许多二维、三维结构的物理特性分析、非线性动力分析、热分析、失效分析、裂纹扩张分析、接触分析、准静态分析、欧拉场分析、任意拉格朗

日-欧拉 (ALE) 分析、流体-固体结构相互作用分析等。

笔者主要运用 Lagrange 方法及多物质流固耦合方法进行数值计算。采用 Lagrange 方法描述炸药材料及与之发生相互作用的物质材料。该算法的优点是可得到清晰的物质界面。炸药与结构之间的相互作用通过定义接触关系来实现,一般采用滑动接触来处理接触关系 (*CONTACT_2D_SLIDING, *CONTACT_SLIDING_ONLY)。该方法的不足是:炸药单元在爆炸过程中会发生严重的畸变,有时影响求解的进程。使用流固耦合算法来描

述爆炸过程,对炸药及其他流体材料(如空气、水、材料等)采用 Euler 算法,对其他的结构采用 Lagrange 算法,然后通过流固耦合方式来处理相互作用。该方法的优点是:炸药和流体材料在 Euler 单元中流动,不存在单元的畸变问题,并通过流固耦合方式来处理相互作用,能方便地建立爆炸模型。进行流固耦合一般有 2 种方法:1) 共节点,即 Lagrange 单元与 ALE 单元在边界上共节点,不需要使用关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 来定义流体和固体的耦合,相当于施加了固体边界条件,不能处理相互作用问题;2) 使用 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 关键字把流

体和固体单元耦合在一起。本文采用后一种方法。

2.2 材料参数与状态方程

本文数值模拟所采用的材料主要为 TNT 炸药、空气、混凝土。炸药采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型以及 JWL 状态方程^[5]加以描述:

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

式(1)中: p 为爆轰压力; V 是相对体积; E 是单位体积内能; A, B, R_1, R_2 为材料常数。

在用 LS-DYNA 进行计算时,该模型需要输入的参数如表 1 所示。

表 1 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型计算输入参数

Tab. 1 Input parameter for material model of HIGH_EXPLOSIVE_BURN

项目	类别						
符号	A	B	R_1	R_2	E_0	V_0	
意义	材料常数/MPa	材料常数/Pa	材料常数	材料常数	材料常数	初始内能/J	初始相对体积
数值	3.71×10^{11}	3.231×10^9	4.15	0.95	0.30	7.0×10^9	1.0

空气模型简化为非黏性理想气体,冲击波的膨胀假设为绝热过程,采用 NULL 材料模型以及 LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程加以描述。线性多项式状态方程为

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (2)$$

其中: $\mu = \frac{1}{V} - 1$ 。

式(2)中: p 为爆轰压力; E 为单位体积内能; V 为相对体积。

当线性多项式状态方程用于空气模型时: $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0, C_4 = C_5 = 0.4$ 。

空气的密度取为 1.225 kg/m^3 ,初始相对体积 V_0 取 1.0。

混凝土采用 *MAT_JOHNSON_HOLMGUIST_CONSTRETE 模型。该模型将强度以规范化等效应力描述,其方程为

$$\sigma^* = [A(1 - D) + B p^*]^N (1 + \ln \epsilon^*) \quad (3)$$

式(3)中: $\sigma^* = \sigma / f_c$ 为实际等效应力与静态屈服强度之比; $p^* = p / f_c$ 为无量纲压力; $\epsilon^* = \epsilon / \epsilon_c$ 为无量纲应变率; D 为损伤因子($0 \leq D \leq 1$)。

3 仿真结果及其分析

从模拟计算结果中可以看到爆炸发生后冲击波在洞库内部的完整传播过程。弹药在洞库内部爆炸

后,由于受到洞库壁面的约束,冲击波在洞库壁之间反复反射,反射波与入射波叠加后向两边迅速传播。

如图 3 所示,在 2 个计算模型长度上对应拾取 5 个位置,并给出了这 5 个位置处的冲击波压力时程曲线。从结果中可以看到位置 1 处冲击波峰值压力相差较大,主要原因是这个位置距炸药较近,炸药爆炸后在不同形状截面上反射造成了压力的不同,也就是这点压力受截面形状的影响较大。位置 2, 3, 4, 5 处两截面压力差别不大,因为这些点距炸药较远,爆炸冲击波在壁面上反射不多,从而其受到截面的形状影响较小。当选取的点不在炸药轴线上时,2 个不同形状截面洞库对应点的压力相差也不大。

4 结论

通过数值计算得到了 2 种不同形状截面的弹药洞库内部爆炸冲击波的流场规律。对比分析表明:1) 在距炸药一定距离以外,不同形状截面上洞库对应点的冲击波压力差别不大;2) 通过超压流场图可以看到炸药爆轰完毕后,形成的空气冲击波在洞库内部发生强烈的反射,而后逐渐稳定向外传播;3) 从模拟计算结果中可以看出,相同条件下,在爆源附近截面为拱形的洞库比截面为圆形的洞库易于被破坏。

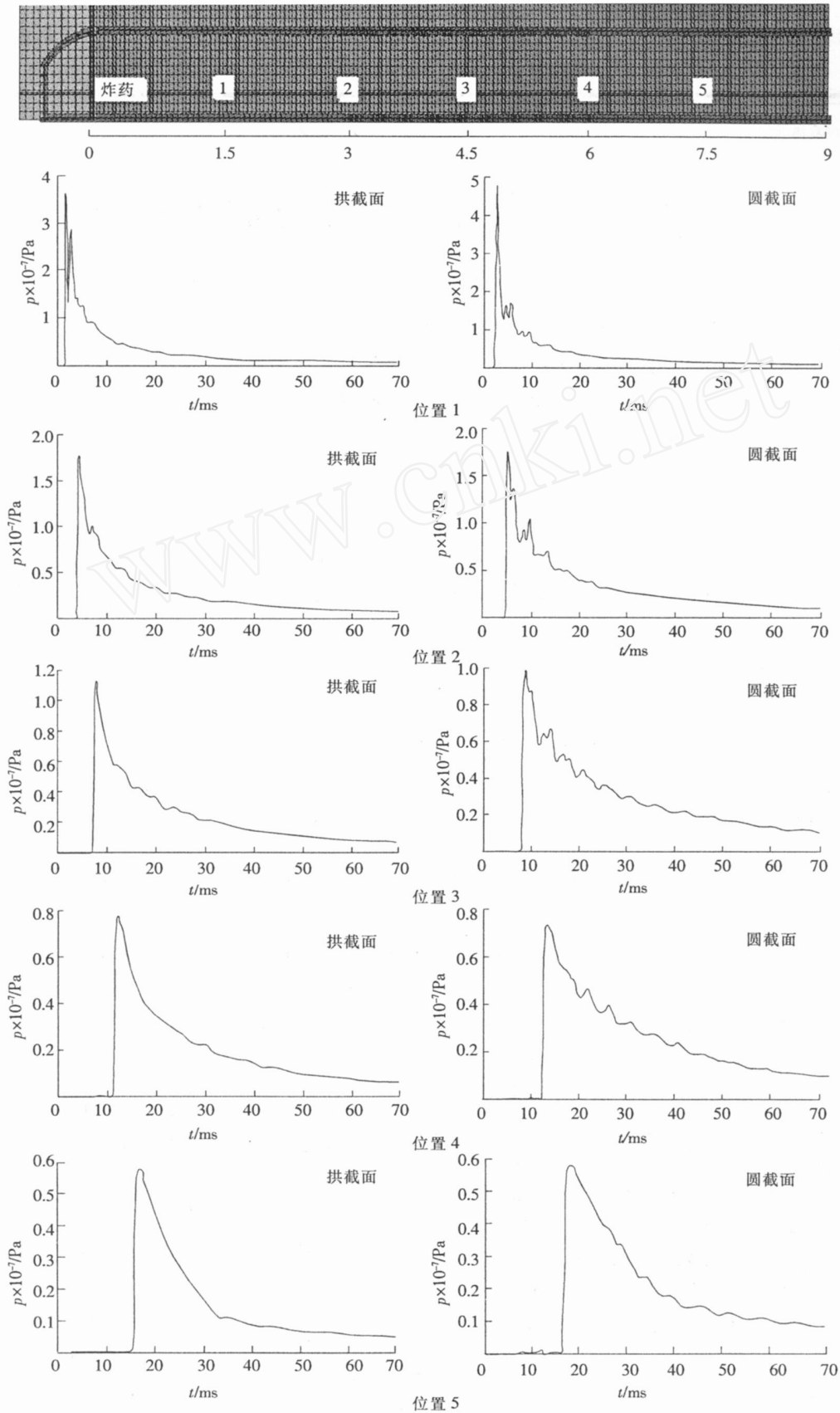


图 3 与炸药同轴线上 5 个位置的冲击波压力时程曲线

Fig. 3 Time and procession curves of shock waves for 5 points same axial to explosive

(下转第 14 页)

$$T_E = \begin{cases} 0.2 + 0.1424 \bar{T} - 0.00247 \bar{T}^2 + 0.0000181 \bar{T}^3, & 0 < \bar{T} < 0.6, \\ 0.4 + 0.2665 \bar{T} - 0.00668 \bar{T}^2 + 0.000065 \bar{T}^3, & 0.6 < \bar{T} < 0.8, \\ 3.25 + 0.1424 \bar{T} + 0.0597 \bar{T}^2 + 0.00029 \bar{T}^3, & 0.8 < \bar{T}. \end{cases} \quad (17)$$

3 计算实例

运用上述计算方法,对中国沪光集团有限公司生产的35 kV S9系列三相浸油式变压器进行了平均油温升和顶油温升的计算,并与试验所测结果进行了比较见表1;该浸油式变压器主要技术参数如下。

额定容量:100 kVA;

额定电压:高压35 kV,低压:6.3 kV;

频率:50 Hz;

冷却方式:ONAN;

温升限值:绕组温升 65 K;顶油温升 60 K。

所遵循的标准:GB 1094 电力变压器;IEC 60076 电力变压器;GB/T 6451-1999 三相油浸式电力变压器技术参数和要求。

表1 平均油温升和顶油温升的计算与试验所测结果

Tab.1 Calculation results and experimental results of the mean oil temperature rise and the top oil temperature rise

比较项	平均油温升/	顶油温升/
计算值	31.2(其中 $T_2 = 0.85$ K)	45.8
测量值	26.6(其中 $T_2 = 0.9$ K)	40.2

由表1可知计算得到的平均油温升和顶油温升与测量值较为接近,测量值偏小,但其原因如下:

1) 计算与测量结果显示,平均油温升中散热器内、外壁之间的温升(T_2)所占比例均非常小,工程计算中这一部分温升可以忽略。

2) 由于变压器中油温分布不均匀,测点位置较少,在油温较低的位置有可能造成测量值较低。

3) 由于温度计通过温度计套管测量油的温度,

套管顶端向根部导热,油与套管外表面进行对流换热,所以温度计测得的温度一定低于油的真实温度。

4 结论

本文运用传热学基本原理和经典试验换热准则式,将平均油温升分为油对散热器内壁的温升、散热器内壁与外壁之间的温升、散热器外壁与空气之间的温升分别予以推导,得到平均油温升的计算方法;计算与测量结果显示,平均油温升中散热器内、外壁之间的温升所占比例均非常小,工程计算中这一部分温升可以忽略;对于顶油温升计算引进了文献公布的经验修正方法;并针对一款三相油浸式变压器进行了平均油温升和顶油温升的计算,进一步与试验所测结果进行了比较。关于浸油变压器平均油温升和顶油温升计算方法具有一定的工程可靠性。

参考文献:

- [1] LINDEN W P. An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer winding[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(3): 1347-1355.
- [2] 王秀春,俞昌铭. 强油导向冷却结构变压器中导向油流量和油温升计算[J]. 中国机电工程学报, 2000, 20(8): 14-17.
- [3] 杨增军,王秀春,毛一之,等. 高燃点油变压器散热器进出口油温差的计算方法[J]. 变压器, 2003, 40(9): 18-19.
- [4] KARSAI K, KEREN YI D, LISS L. Large Power Transformers[M]. The Nether Lands: Elsevier, 1987. 41-47.
- [5] INEROPERA F P, KONX A L, MAUGHAN J R. Mixed-convection flow and heat transfer in the entry region of a horizontal reetangular duct[J]. Transaction of the ASME, 1987, 109(5): 434-439.
- [6] 杨世民,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998.

(上接第11页)

参考文献:

- [1] HADER H J. Design and application of reinforced concrete armoured doors[A]. Proceeding of the 2th Symposium on the Interaction of Nonnuclear Munitions with Structures[C]. Panama City Beach: FL, 1985. 494-499.
- [2] IGRA O, WU X, FALCOVITZ J, et al. Experimental and theoretical study of shock wave propagation through ducts with abrupt changes in the flow direction[J]. Journal of Fluid

Mechanics, 2001, 255-282.

- [3] 杨科之,杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 37-40.
- [4] 王来,李延春. 直角拐角中空气冲击波的传播及数值模拟[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(4): 146-150.
- [5] 杨军,金乾坤,黄风雷. 岩石爆破理论模型及其数值计算[M]. 北京:科学出版社,1999.