

弹药洞库内部防殉爆隔爆设计与数值模拟

蔡军锋

(中国人民解放军军械工程学院 弹药工程系, 石家庄 050003)

摘要:基于我军现有弹药洞库的结构特点,以某典型弹药洞库为原型,对其内部进行了防殉爆隔爆防护设计,并运用数值计算分析了隔爆防护的隔爆效能。研究表明,所采用复合隔爆装置可以使弹药堆垛上所遭受的峰值压力、振动速度和最大加速度都得到极大降低;在弹药洞库内部实施防殉爆隔爆设计,可以极大地衰减爆炸冲击波峰值压力,减小冲击波对弹药垛的毁伤作用,降低弹药洞库内贮存弹药的殉爆概率,防止库存弹药发生整体殉爆,最大限度地减小发生爆炸时的损失。

关键词:弹药洞库;爆炸冲击波;隔爆;数值模拟

本文引用格式:蔡军锋. 弹药洞库内部防殉爆隔爆设计与数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2016(9): 67-70.

Citation format: CAI Jun-feng. Study of Anti-Sympathetic Detonation Design and Numerical Simulation in Ammunition Cavity Depot[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(9): 67-70.

中图分类号: 0383.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2016)09-0067-04

Study of Anti-Sympathetic Detonation Design and Numerical Simulation in Ammunition Cavity Depot

CAI Jun-feng

(Department of Ammunition Engineering, Ordnance Engineering College of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Based on structure characteristics of our army ammunition cavity depot and taking the typical ammunition cavity depot as the prototype, the anti-sympathetic detonation explosion protection design was studied and the explosion effect of explosion-proof isolation was analyzed by numerical calculation. The research shows that the anti-sympathetic detonation compound isolation device can make the peak pressure, vibration velocity and acceleration of the ammunition storage be greatly reduced. The explosion proof design in ammunition cavity depot can greatly decrease the peak pressure of shock wave and reduce the ammunition stack damage, and decrease sympathetic detonation probability of storage ammunition and prevent the entirety sympathetic detonation in ammunition cavity depot and minimize the loss when the explosion occurred.

Key words: ammunition cavity depot; shock wave; explosion-proof; numerical simulation

弹药洞库是我军弹药储存与供应的主体场所,具有重要的战略军事价值。随着精确制导武器的命中精度和深钻地武器系统的打击强度不断提高,弹药洞库的生存能力面临着严峻的挑战。弹药洞库一旦遭敌钻地弹药侵入内部爆炸,库存弹药将极易可能引发连锁殉爆,造成难以估量的重大损失。为了有效提高诸如洞库等地下坑道的防护能力,国内外

学者采用理论分析、爆炸试验与数值模拟等方法开展了大量研究,取得了一系列研究成果^[1-4]。本文在对弹药洞库内爆毁伤特性数值分析的基础上^[5],基于我军弹药洞库的结构现状,以某典型弹药洞库为原型,对弹药洞库内部进行了防殉爆隔爆设计,并运用数值计算方法分析了隔爆防护的隔爆效能,为我军弹药洞库的防护升级改造提供技术支持。

收稿日期: 2016-04-24; 修回日期: 2016-05-15

作者简介: 蔡军锋(1979—),男,主要从事装备运用环境与防护技术方面的研究。

1 弹药洞库内部防殉爆隔爆设计

1.1 防殉爆设计要求与原则

与地上环境相比,洞库的内部环境是一个相对封闭的系统,有明显的“封闭效应”。洞库内部爆炸产生的爆炸冲击波在结构表面不断反射,致使结构承受的超压明显提高,作用时间也大为延长,进而对结构及其内部设施造成更为严重的破坏。

就洞库内部防殉爆设计来说,其基本要求与原则主要考虑3个方面:一是所设计的防殉爆结构应有很强的冲击波吸收性能,以自身结构吸收冲击波,避免冲击波在结构表面发生严重的反射,对洞库结构造成更大的破坏。二是整个结构应具有足够的力学强度,能够承受爆炸冲击波的冲击,避免在爆炸冲击波的作用下产生飞散。三在进行防殉爆改造时,隔爆结构应设置简便,工程实施方便可行,对洞库环境影响较小。

1.2 隔爆装置

基于以上3方面防殉爆设计要求,本文将多孔材料与密实材料相结合,设计了适用于洞库内部防殉爆的隔爆装置。

隔爆装置采用复合隔爆结构,其示意图如图1。复合隔爆结构中心位置是一层支撑钢板,将支撑钢板通过支架固定到地面上,在防护结构中起支撑作用,防止整个隔爆装置在爆炸冲击波的作用下飞散,同时支撑钢板还可以衰减爆炸冲击波,降低冲击波峰值压力,阻隔破片。支撑钢板两侧是泡沫铝材料,泡沫铝具有优异的吸能特性,在爆炸冲击波的作用下被压缩致密,在此过程中能够吸收大量爆炸冲击波能量,降低冲击波峰值压力。隔爆结构的最外层是课题组研发的专利产品—复合隔爆模块^[6],该产品具有重量轻、衰减爆炸冲击波能力强等特点,并且安装简便,其在防护结构中通过材料的变形飞散降低冲击载荷的强度和吸收爆炸冲击波的能量^[7-8]。

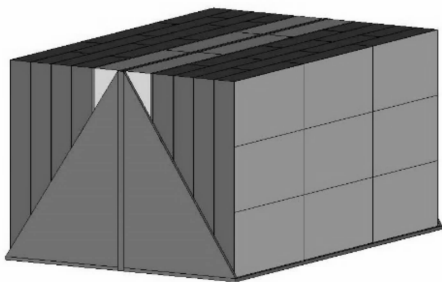


图1 隔爆装置示意图

整个隔爆装置可以用“刚柔并济”来形容其隔爆能力,在隔爆装置的作用下,冲击波峰值压力会得到极大降低,减小对后面防护目标的毁伤。

1.3 防护结构设计

就目前我军的弹药洞库结构来说,一旦攻击武器侵入弹

药洞库发生爆炸,爆炸冲击波就会沿洞库传播,弹药垛发生殉爆,重则引发整个洞库储存弹药发生整体起爆,对周围数百里环境造成破坏,后果不堪想象。因此,弹药洞库防殉爆设计基本构想是采用隔爆结构,将洞库内部隔离成相对独立的弹药储存单元,钻地武器侵入某一单元发生爆炸,由于隔爆装置的防护作用,相邻储存单元弹药不会发生殉爆,以此最大限度增加库存弹药战时安全。

如图2所示,以某典型洞库为例,洞库长约120 m,截面宽度为6.0 m,侧墙高2.4 m,拱高1.6 m,根据洞库尺寸,隔爆装置尺寸宽×高为4.5 m×3.0 m。隔爆装置中支撑钢板厚度为20 mm的结构钢,复合隔爆模块分多层安装固定在钢板外侧,厚度为500 mm。采用5个隔爆装置,将洞库分成4个弹药储存单元。

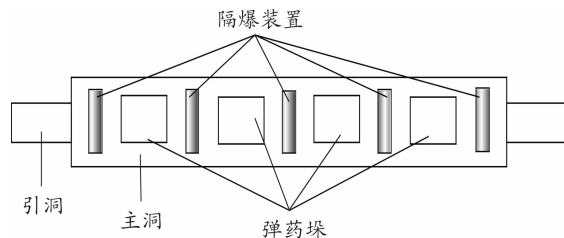


图2 某弹药洞库隔爆防护设计示意图

2 弹药洞库内部隔爆防护数值模拟

2.1 计算方法

本研究采用AUTODYN软件计算,在AUTODYN算法选择上,采用多物质Euler Godunov与流固耦合算法。其中洞库壁与弹药垛采用Lagrange单元,将整个洞库模型覆盖空气,空气与炸药采用Euler Godunov单元,空气与洞库壁和弹药垛之间的耦合方式采用完全耦合(Fully Coupled),并且在欧拉-FCT子循环(Euler FCT subcycling)选项中选择使用欧拉子循环。在洞库壁与弹药垛之间进行Lagrange/Lagrange耦合,在耦合类型上选用外部间隙(External Gap)耦合方式。计算时间步长采用AUTODYN缺省设置。

2.2 计算模型建立

在模型构建上,选取弹药洞库口部以内30.0 m进行建模,弹药垛前端面距离洞口为20.0 m,弹药垛侧面端距离洞库侧墙距离为1.0 m。设定爆源距离洞库口部为6.0 m。将隔爆装置固定在距洞库口部12 m处,距离爆炸点为6 m。为了提高计算效率,在建模时略去隔爆装置的底部支撑与三角支撑钢板,假定所设置的复合隔爆装置支撑钢板在隔爆防护过程中不发生大的移动。在模型边界的处理上,空气单元非对称面采用flow_out边界类型,对称面采用对称边界类型;洞库壁非对称面采用Transmit边界,对称面采用对称边界类型;弹药垛与地面接触面定义Ground边界,定义此面z方向速度为零。最终隔爆装置结构组成及安放位置如图3所示。

在材料模型上,炸药的爆轰产物采用JWL状态方程,空

气简化为非黏性理想气体,采用理想气体状态方程^[9]; 洞室围岩材料采用 Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) 模型^[9-11]; 由于复合隔爆装置结构比较复杂,没有相应的材料模型,本研究在数值计算中将隔爆装置复合结构进行简化处理,应用 AUTODYN 中层状复合材料定义,将聚氨酯泡沫材料、泡沫铝材料以及结构钢材简化为 AUTODYN 中的“GROUP”来处理^[9]。

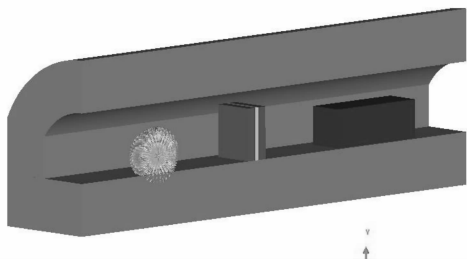


图3 隔爆防护计算模型

2.3 数值计算结果

洞库内部隔爆的主要目的是防止弹药洞库发生内爆的情况下弹药垛产生殉爆,防止连锁殉爆的发生,最大限度地减小损失。因此,在隔爆防护数值计算中,主要关注弹药垛附近空气峰值压力以及分布情况和弹药垛的振动速度,加速度的大小。在计算结果分析中,取距洞库口部 19 m、21 m、23 m、25 m、27 m 5 个截面,在每个截面上取 256 个测点,计算出每个点所在位置的峰值压力,从而研究不同平面冲击波的峰值压力分布规律。同时,在弹药垛内部中心位置取测点

A,考察测点位置速度、加速度情况。所取观测点位置如图 4 所示。

2.3.1 弹药垛周围空气峰值压力分析

如表 1 所示为无隔爆与有隔爆两种情况下所选取的不同截面中爆炸冲击波的最高峰值压力与平均峰值压力。从表 1 可以看出,在有隔爆情况下,所选截面测点最高峰值压力是无隔爆情况下最高峰值压力的 33.8% - 39.8%; 隔爆情况下所选截面所有测点的平均峰值压力是无隔爆情况下平均压力的 34.4% - 39.6%。因此,在进行隔爆情况下,弹药垛发生殉爆的几率大大降低。

2.3.2 弹药垛损伤分析

如表 2 所示为无隔爆与有隔爆两种情况下测点 A 的最大振动速度、加速度对比数据。对比有无隔爆条件下所选测点的振动速度和振动加速度里程曲线,发现最大振动速度和最大振动加速度有所滞后^[5],并且隔爆情况下所取测点的最大振动速度是无隔爆时的 24.5% ~ 46.2%,隔爆最大加速度是无隔爆时的 48.9% ~ 72%。

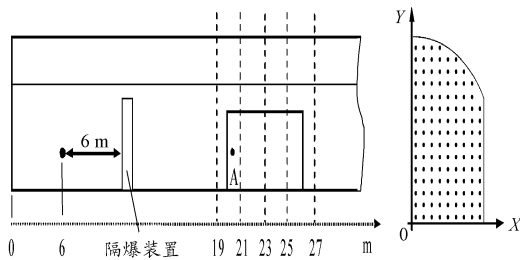


图4 测点位置示意图

表 1 有无隔爆情况下压力对比

测点所在截面	无隔爆数值模拟		有隔爆数值模拟		$P_{有隔爆}/P_{无隔爆}$	
	平均峰值压力/kPa	最高峰值压力/kPa	平均峰值压力/kPa	最高峰值压力/kPa	平均压力/%	最高压力/%
19 m	957.59	1468.63	329.32	521.12	34.4	35.5
21 m	729.02	1450.43	267.89	576.95	36.7	39.8
23 m	632.21	1192.32	240.02	349.98	37.9	29.4
25 m	578.89	828.69	229.51	302.37	39.6	36.4
27 m	469.48	752.98	184.68	255.34	39.4	33.8

表 2 有无隔爆情况下测点 A 的速度、加速度极值对比

类别	$V_x \text{ max}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$V_y \text{ max}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$V_z \text{ max}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$a_x \text{ max}/$ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-2}$)	$a_y \text{ max}/$ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-2}$)	$a_z \text{ max}/$ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-2}$)
无隔爆	0.21	1.92	0.56	0.77	4.7	1.25
有隔爆	0.056	0.74	0.26	0.38	2.88	0.9
比值	26.8%	38.6%	46.2%	48.9%	61.3%	72%

3 结论

基于我军现有弹药洞库的结构特点,对弹药洞库内部隔爆防护进行了初步工程设计,运用数值计算的方法,对有隔爆防护情况下洞库内爆进行了研究。研究表明,在有隔爆情况下,弹药堆垛上所遭受的峰值压力、振动速度和最大加速度都得到极大降低,采用复合隔爆装置应用于弹药洞库内爆防护,可以极大地衰减爆炸冲击波峰值压力,减小冲击波对弹药堆的毁伤作用,降低弹药洞库内贮存弹药的殉爆概率,防止库存弹药发生整体殉爆,最大限度地减小发生爆炸时的损失。

参考文献:

- [1] 蔡军锋,易建政. 坑道内爆毁伤效应与隔爆防护研究综述[J]. 地下空间与工程学报,2009,5(2):354-357.
- [2] SPYROS SKLAVOUNOS, FOTIS RIGAS. Computer simulation of shock waves transmission in obstructed terrains [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2004, 17:407-417.
- [3] 张晓倩,易建政,蔡军锋. 基于巡航导弹攻击的国防洞库防护技术[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(1):16-19.
- [4] LUNDERMANT C, OHRT A P. Small scale experiment of in tunnel airblast from external and internal detonations [C]//Proceedings of the 8th International Symposium on

Interaction of the Effects of Munitions with Structures. McLean Virginia,1997:209-221.

- [5] 蔡军锋,易建政,刘国庆,等. 弹药洞库内爆毁伤特性数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(4):751-755.
- [6] 易建政,蔡军锋. 一种抗爆炸复合材料[P]. 中国专利:ZL200510001255.0,2008.07.
- [7] 蔡军锋,易建政,赵然. UHMWPE-PUF 复合材料结构设计及隔爆实验[J]. 高分子材料科学与工程,2012,28(5):69-72.
- [8] 蔡军锋,傅孝忠,易建政. 超高分子量聚乙烯-聚氨酯泡沫复合材料的抗爆实验与数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程,2013,29(11):79-83.
- [9] AUTODYN. AUTODYN user manual Revision 6.1, Century dynamics[Z]. 2005.
- [10] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA2B2500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C]//9th International Symposium, Interaction of the Effects of Munitions with Structures. [S. l.]: [s. n.], 1999.
- [11] PAUL A, RAMAMURTY U. Strain Rate Sensitivity of a Closed-cell Aluminum Foam [J]. Material Science & Engineering, 2000(281):1-7.

(责任编辑 周江川)

勘 误

本刊2016年第7期第4页第14行起,应为:当天线偏离通信卫星时,场强 $\vec{\partial U}/\partial x \neq 0, \vec{\partial U}/\partial y \neq 0$;当天线对准通信卫星时,场强 $\vec{\partial U}/\partial x = 0, \vec{\partial U}/\partial y = 0$ 接收机输出的信号,经电子坐标分解及梯度法寻找极值,使天线精确跟踪通信卫星。

因印前发片时电脑程序发生技术故障造成内容遗漏,谨向该论文《移动卫星通信天线系统的矢量控制法》的作者滕云鹤教授和广大读者致歉!

《兵器装备工程学报》编辑部