

某炸药库内爆作用下坑道内隔爆防护墙厚度估算^{*}

徐全军^① 渠银录^① 姜 楠^① 夏裕帅^② 万仁红^①

① 解放军理工大学工程兵工程学院(江苏南京,210007)

② 深圳市蛇口招商港湾建设工程有限公司(广东深圳,518067)

[摘 要] 文章以某炸药库安全评估工程的实际问题为背景,考虑到周围墙体的限制,坑道内的冲击波得以加强,以及附近坑道施工不受到影响为原则,通过数值模拟和简单公式,分析了 10 t 炸药库的爆炸破坏作用,提出了内爆作用下隔爆防护墙厚度的估算方法,并研究在一定的冲击波作用下隔爆防护墙的厚度,为安全评估提供参考。

[关键词] 防护墙 冲击波 炸药库 坑道

[分类号] TU746.5 TD235.4

引言

随着我国经济的不断发展,炸药仓库周边的居民和工程施工越来越多,对炸药仓库安全设施的要求也越来越高。周边的爆破施工等原因使炸药库发生内爆也成为了可能。爆炸瞬间释放的巨大能量在击碎或破坏炸药库的同时,往往也威胁到炸药库附近一定范围内居民或工程施工的安全和稳定。炸药库的内部环境是一个相对封闭的系统,有明显的“封闭效应”^[1-3]。内爆产生的冲击波会沿着炸药库外的坑道传播,对洞口或薄弱环节造成破坏。因此,在爆炸冲击波作用下,荷载对炸药库中按传统方式布置的防护墙构成了严重威胁,为确保防护墙外坑道内施工人员、装备等的安全,有必要研究隔爆防护墙的厚度计算问题。

1 工程概况

某炸药库内装有 10 t 2[#]岩石炸药,相当于 7.6 t TNT 当量。在其附近有凿洞施工,由两条通道(左通道为施工现场,右通道为存放弹药的炸药库)及一条连接通道构成,平面布置似“H”状,截面为直墙拱顶型,炸药库距离防护墙约 50 m,坑道平均直径约 3 m,横截面积约 6 m²。在工程实施过程中为防止炸药库中弹药发生爆炸时伤及施工人员,在连接通道中设一道拱形防护墙,防护墙是一种钢筋混凝土结构。施工现场与炸药库的平面位置如图 1。

2 爆炸冲击波超压和冲量计算

2.1 爆炸冲击波超压计算

爆炸会产生冲击波,在一定距离外的爆炸破坏作用主要是由冲击波产生。冲击波的破坏作用以峰值超压、持续时间和冲量三个特征参量衡量^[4]。冲

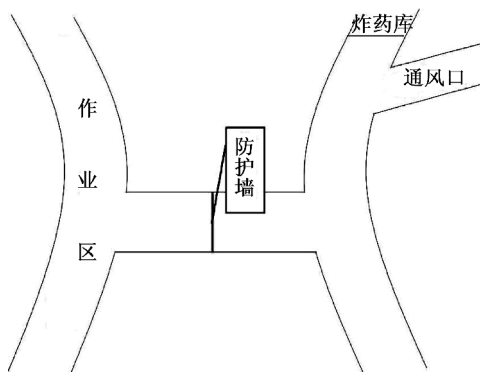


图 1 作业区与炸药库的平面位置

击波破坏准则主要有超压准则、冲量准则和超压—冲量准则等,其中最常用的是超压准则。多数情况下,冲击波的破坏作用是由超压引起的。超出的最大压力称为峰值超压(Δp)。

炸药库内的弹药发生爆炸,计算假定:1) 爆炸冲击波传播到防护墙时,在防护墙破坏段冲击波超压作用方向与墙垂直;2) 沿墙高方向,各点的荷载基本相同;3) 防护隔墙按受均布荷载的单向板进行设计;4) 荷载只考虑最大初始脉冲,不考虑后续波峰及其衰减的影响^[5]。

根据纳乌门科 TNT 球形装药在无限空气介质中爆炸的空气冲击波峰值超压计算公式^[6]:

$$\Delta p = \frac{1.07C}{r^3} - 0.1 \quad \left(\frac{C}{r^3} < 1 \right) \quad (1)$$

式中: Δp 为空气冲击波超压,MPa; C 为 TNT 当量,kg; r 为炸药库到防护墙的距离,m。

同时考虑到坑道内冲击波的衰减主要是由于冲击波正压区随着波的传播不断拉长,以及空气受冲击波绝热压缩所产生的能量耗散而造成的。按照体

* 收稿日期:2011-11-22

作者简介:徐全军(1966~),男,博士,教授,研究方向为爆炸力学。E-mail:xquanjun@hotmail.com

积修正能量相似率计算坑道内等效药量为^[7]:

$$\frac{C_e}{4\pi r^3/3} = \frac{C}{2rS} \tag{2}$$

式中: C_e 为等效药量,kg; S 为坑道截面积,m²。

将等效药量 C_e 代入式(1)中求得防护墙处入射空气冲击波超压值 $\Delta p = 45.95\text{MPa}$ 。

2.2 冲击波的冲量计算

对于一般炸药爆炸,当目标距炸药有一定距离时,其爆炸作用的计算,由目标的自振周期 T 与冲击波正压作用时间 t_+ 来确定。如果 $t_+ \ll T$,那么对目标的破坏作用取决于冲击波的冲量。我国《抗震规范》规定的基本周期(自振周期)计算方法如下^[8]:

钢筋混凝土框架体系和框墙体系:

$$T = 0.33 + 0.00069 \frac{H^2}{\sqrt{B}} \tag{3}$$

钢筋混凝土全墙体系:

$$T = 0.04 + 0.38 \frac{H^2}{\sqrt{B}} \tag{4}$$

式中: H 和 B 分别为建筑物的高度和宽度,m。

根据上面公式可以算得在本工程中防护墙自振周期 $T = 0.33\text{ s}$ 。根据萨道夫斯基给出的正压作用时间计算公式:

$$t_+ = B \times 10^{-3} \sqrt[6]{C} \sqrt{r} \tag{5}$$

式中: C 为 TNT 当量,kg; r 为距爆心的距离。

取 $B = 1.35$,将式(2)代入,算得 $t_+ = 0.048\text{ s}$ 。

由于 $t_+ \ll T$,所以对防护墙的破坏作用取决于冲击波的冲量,作用在防护墙上的冲量可根据萨道夫斯基给出的单位面积冲量计算公式计算:

$$i_+ = 350 \frac{C^{2/3}}{r} \quad (\bar{r} > 0.25) \tag{6}$$

求得 $i_+ = 2.15 \times 10^5 \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

3 数值模拟

本文采用了有限元计算程序 AUTODYN-2D,对炸药在炸药库中爆炸以及爆炸冲击波在坑道内的传播和作用过程进行了有限元仿真,对爆炸引起的冲击波各参量以及一定距离防护墙上的超压等参量进行了计算。

3.1 数值模型

3.1.1 数值模拟方法及网格划分

本模型采用的单位制为 mm、mg、ms。由于该工况实际尺寸比较大,若采用 3D 模型,计算规模过大,效率太低。数值计算模型采用轴对称 2D 模型,只考虑由于坑道支路存在造成的坑道体积增大而引起的冲击波衰减,并采用 Flowout 边界条件来模拟

半无限边界。图 2 为几何模型。

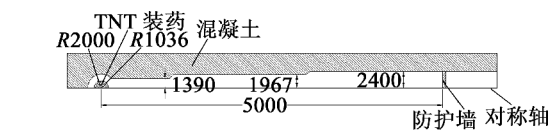


图 2 几何模型

模型采用 EULER 网格,在对模型进行网格剖分时,模型的尺寸大小力求精确,在炸药爆轰及爆炸冲击波传播的区域,网格划分应尽可能细,这样才能减少计算中的能量耗散,保证一定的计算精度。但若是模型整体细分,必然使模型划分的网格数量成倍增大,增加大量的计算机用时;本文在建模时采用了变网格技术,其中最小网格尺寸为 15 mm,单元总数为 105 万。

3.1.2 材料模型和参数的选取

在本模型中,炸药采用 TNT,坑道壁以及防护墙采用普通混凝土材料。材料参数取自 AUTODYN 软件材料自带参数^[9]。在计算中选取的各部分材料材料模型和状态方程如表 1 所示。

表 1 计算中所用材料模型类型和状态方程类型

材 料	状态方程类型	材料模型类型
TNT	JWL	NONE
空气	IDEAL_ GAS	NONE
混凝土	P—ALPHA	RHT

3.2 计算结果

炸药起爆之后,不同时刻冲击波的压力云图如图 3 所示。

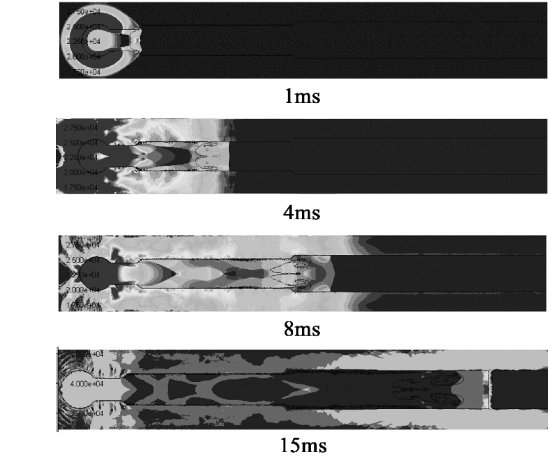


图 3 不同时刻的压力云图

由图 3 可以看出,炸药爆炸产生的冲击波进入坑道之后,在坑道壁面上发生斜反射。因为反射波、入射波等互相作用,流场较为混乱,经过一段时间,逐渐成为较为平稳的平面冲击波。同时,爆轰产物和冲击波作用在混凝土介质上,使其中也有应力波向四周传播。

图 4 为防护墙前距离爆心 49 m 处的压力时间曲线,其中入射波峰值压力为 11.1 MPa,反射波的峰值压力为 83 MPa。数值模拟计算未考虑坑道转角对冲击波衰减影响,故其值小于理论计算值。

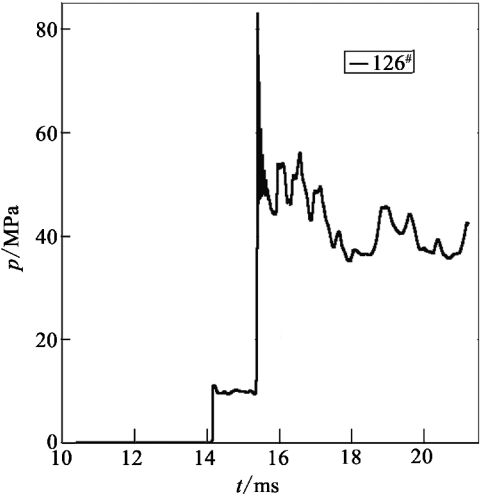


图 4 距离爆心 49 m 处压力—时间曲线

图 5 为防护墙内示踪点位置,图 6 为防护墙内各点应力波压力—时间曲线,其中迎爆面上点 153 的峰值压力为 188.53 MPa。

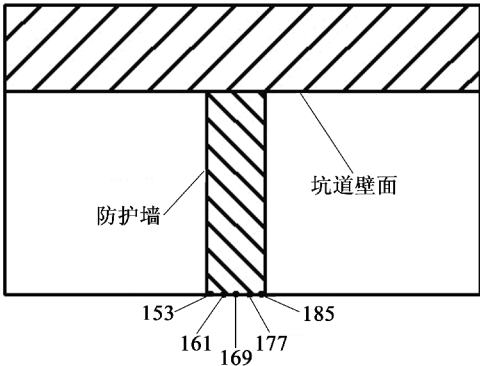


图 5 防护墙内示踪点位置

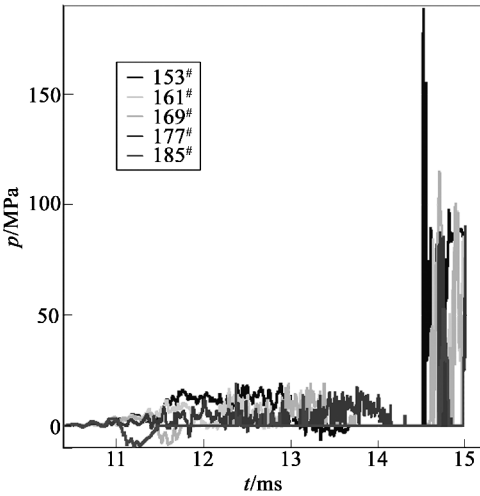


图 6 防护墙内应力波压力—时间曲线

该数值模拟计算中为直坑道形式,而在实际工程中,还需考虑到爆炸冲击波在坑道分叉处对坑道壁面的各种反射作用对冲击波也起着衰减作用,因此在实际情况下,冲击波的超压等参数会比该数值模拟计算值小。

4 冲击波压力在防护墙的冲量及墙的厚度

在爆炸载荷作用下,单位面积上的防护墙获得了冲量而发生变形破坏。根据能量的平衡关系可写出函数关系式:

$$M = F(I_0)$$
$$\text{单位面积冲量 } i = \frac{I_0}{b}$$

冲击波的爆破冲量全部变成防护墙的变形能量,并假设爆破冲量是均匀分布的。由于材料是带有延展性的,因此可以得到关系式^[4]:

$$i = h \sqrt{2\rho A_M}$$
(7)

式中: ρ 为材料密度, kg/m^3 ; b 为宽度, m ; h 为厚度(高度), m ; A_M 为金属材料的单位破坏功, N/cm^2 。

查一些金属材料的破坏功(表 2)可知,中等硬度钢单位破坏功为 11180 N/cm^2 。

表 2 一些金属材料的破坏功

材料名称	单位破坏 $A_M/(\text{N} \cdot \text{cm}^{-2})$
软钢	10790
中等硬度钢	11180
硬钢	13340
高强度合金钢	15200

由以上公式可以计算出防护墙的厚度 $h = 0.16 \text{ m}$ 。

计算结果表明,如果采用中等硬度钢材来防护,则所需的防护墙厚度为 16 cm。如采用钢筋混凝土作为防护墙材料,为保证墙体内钢筋不被破坏,等效的钢筋混凝土的厚度如采用 $\varnothing 25\text{mm}$ 的螺纹钢,大约需要 7 根,螺纹钢之间相距 10 cm 排列。因此混凝土墙的厚度大约为 70 cm。

5 结论

通过炸药库内爆炸对防护墙的厚度计算和分析,得到以下结论:

在炸药库大药量爆炸产生的冲击波作用下,坑道中的防护墙破坏主要由冲击波的冲量决定。因此要根据冲击波的冲量大小来计算防护墙的厚度及配筋率,本文近似给出了 70 cm 的厚度。

实际情况的冲击波强度比数值模拟结果小,而数值模拟结果比经验公式小,因此由经验公式计算出的防护墙厚度值较大,若需获较大的安全系数,则

- [2] 舒服华,王洪平. 横包机烟包推送机构的运动分析与改造[J]. 烟草科技,2007,235(2):16-19.
- [3] 冯霞,贺蜀山. 曲柄摇杆机构设计中的禁区[J]. 机械,2004,31(8):24-26.
- [4] 李明,贺红林,张玉斌. 曲柄摇杆机构的解析法设计[J]. 大庆石油学院学报,2002,26(1):75-76.
- [5] 彭文生,李志明,黄华梁. 机械设计[M]. 第二版. 北京:高等教育出版社,2008:28-47.
- [6] 孙横,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 第七版. 北京:高等教育出版社,2006:153-168.
- [7] 熊滨生,崔光彩,杨双朝,等. 摆动从动件盘型凸轮机构的计算机辅助设计[J]. 郑州纺织工学院学报,1995,6(1):38-43.
- [8] 常勇,杨富富,皮钧. 一种凸轮—连杆组合机构中凸轮最小基圆半径的确定方法[J]. 机械设计,2010,27(9):52-55.
- [9] 翁慧燕,竺金波. 凸轮机构所运动分析与仿真[J]. 机械工程师,2010,27(11):96-97.
- [10] 罗海滔,胡炳成,吕春绪. 膨化硝铵炸药生产专用凸轮粉碎机安全性研究[J]. 爆破器材,2011,40(3):14-18.

Study on a Kind of Pushing Equipment of High Speed Explosive Roll Stocking Device

KANG Xiaojuan, XIANG Tongyan, LI Quanhua, WANG Yunliang

Wuhan Rentian Packaging Technology Co., Ltd. (Hubei Wuhan, 430205)

[ABSTRACT] The crank rocker sliding-block is designed based on predetermined quick return motion of the rocker. The cam model and motion analysis are formatted by computer software to obtain the velocity and acceleration curve in the motion of oscillating follower cam. The impact force of pushing slab can be decreased during motion by the correct selection of cam motion law. Of the 2 s cycle of whole device, it is stopped for 1 s, and the go and return process of pushing complete in the other 1 s.

[KEY WORDS] explosive roll stocking device, pushing equipment, crank rocker sliding-block, oscillating follower cam, motion analysis

(上接第 36 页)

隔 2m 处再设一道 30cm 左右的钢筋混凝土墙。

参 考 文 献

- [1] 蔡军锋,易建政,张晓倩. 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] 李秀地,郑颖人,郑云木,等. 坑道内冲击波冲量传播规律的试验研究[J]. 爆破器材,2007,36(3):4-7.
- [3] 穆朝民,任辉启,李永池,等. 爆炸冲击波在复杂坑道内传播规律的数值研究[J]. 爆破器材,2008,37(5):1-4.
- [4] 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.
- [5] 夏志成,王静,施翠英. 内爆炸作用下抗爆单元防护隔爆墙厚度计算[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(1):144-147.
- [6] 顾文彬,孔劲松,吴腾芳,等. 环状分布装药容器中爆炸载荷研究[J]. 爆破器材,1999,28(5):19-21.
- [7] 吴世永,张舵,卢芳云. 坑道内爆炸波的传播规律研究[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(2):396-399.
- [8] 中国建筑科学研究院. GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [9] Century Dynamics. AUTODYN Theory Manual [M]. 2005.

Thickness Calculation of Tunnel Explosion Protection Wall under the Blasting Destroy in Explosive Magazine

XU Quanjun^①, QU Yinglu^①, JIANG Nan^①, XIA Yushuai^②, WAN Renhong^①

^①Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

^②Shenzhen Shekou Commercial Investment and Harbour Construction Limited Company (GuangDong Shenzhen, 518067)

[ABSTRACT] In this paper, an actual project in explosive magazine safety evaluation is taken as the background. When the explosion happens in the magazine, consider the limit of the wall, the blast shock wave in the tunnel will strengthen, and it should not affect the adjacent tunnel project. Based on those above principles, the numerical simulation and the formula calculation are used to analyze the blast destruction effect, and a thickness calculation method of the explosion protection wall under the blast shock wave load is proposed. The thickness of the explosion protection wall under a certain blast shock wave is also studied, to provide references for safety evaluation.

[KEY WORDS] protection wall, blast wave, explosive magazine, tunnel