

## 抗爆门在爆炸荷载作用下有限元动力数值模拟

陆新征 江见鲸

清华大学土木工程系 北京 100084

摘要: 本文利用动力有限元分析软件 LS-DYNA, 分析了某系列抗爆门在爆炸荷载作用下的动力反应。通过适当选取材料的本构关系, 可以真实模拟材料的弹塑性变形情况。同时, 充分利用 LS-DYNA 提供的强大的接触分析功能, 真实模拟了抗爆门和门框, 门轴之间的接触关系。分析结果再现了抗爆门在爆炸荷载作用下变形和破坏的过程, 并清晰显示出不同时刻抗爆门的薄弱环节。整个分析过程充分发挥数值模拟的优势, 通过修改爆炸荷载的压力时程曲线, 对各种不同工况下抗爆门的技术性能进行评估。

关键词: 抗爆门, 动力有限元, 接触分析

## 1 引言

某系列抗爆门设计 60 年代, 当时设计抵抗的爆炸等效静荷载分别为 500Kpa, 1000Kpa, 4000Kpa, 代号分别为 M0.5、M1、M4。在长期实际应用中发现这些抗爆门的原设计可能过于保守, 为了了解该系列抗爆门在爆炸作用下的动力性能并对其进行安全评估, 特利用动力有限元软件 LS-DYNA 对其进行了动力有限元分析。

## 2 抗爆门的结构

抗爆门结构如图 1 所示。门高 2.13m, 宽 1.03m, 不同规格门扇的厚度和钢板厚度各不相同, 参见表 1。门扇左右两侧有门销门轴各一对, 主要用于抵抗外侧压力作用。

表 1、门扇参数

Table 1 Parameters of the door leaf

编号	门扇厚度 (mm)	正面钢板 厚度(mm)	肋厚度 (mm)	钢材 种类
M0.5	71	6	4.8	Q235
M1	75	6	4.8	Q235
M4	142	8	5	16Mn

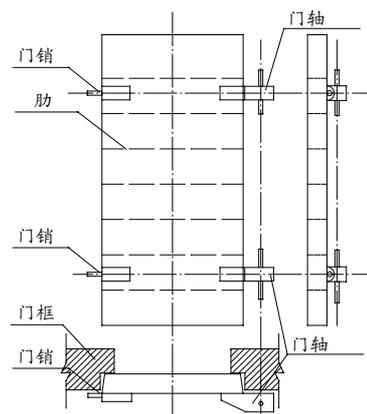


图 1、抗爆门结构

Fig. 1 Structure of the door

## 3 有限元模型

在有限元分析中, 所有计算模型尺寸均严格按照图纸建立。并根据其具体情况选择适当的数学模型。

- 1) 单元选取: 分别使用了 LS-DYNA 中的 shell163 板单元模拟钢板和门框, 门轴瓦; solid164 三维实体单元模拟门轴。
- 2) 材料性质: 钢材采用 LS-DYNA 推荐的 Plastic Kinematic 模型, 其基本公式如下

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (1)$$

方括号里面表示应变速率对屈服应力提高的影响, 圆括号里面表示塑性模型的选取, 如  $\beta=1$ , 则为等向强化模型;  $\beta=0$  为随动强化模型。本次分析中, 各参数选取参见表 2:

\*国家自然科学基金资助项目(编号: 59938180)

作者简介: 陆新征, (1978. 12—), 男, 安徽芜湖人, 博士研究生, 结构非线性分析

表 2、模型参数选取

Table 2 Parameters used in the FEA model

参数	$E_0$	$\nu$	$\rho$	$\sigma_y$	$\beta$
意义	初始弹性模量	泊松比	密度	屈服强度	强化模型系数
数值	$200 \times 10^9 \text{Pa}$	0.27	$7800 \text{Kg/m}^3$	310Mpa(16Mn) 210MPa(Q235)	0
参数	C	P	$\epsilon_f$	$E_p$	
意义	应变速率影响系数		极限应变	硬化模量	
数值	40	5	0.25(16Mn) 0.35(Q235)	$2 \times 10^9 \text{Pa}$	

门框、门轴承采用 LS-DYNA 的 Automatic Contact, Surface to Surface 接触面模型, 假定门框和门扇, 门轴和门轴承为弹性接触面。

3) 定义接触面

本次计算中共定义了两类接触, 第一种为门与门框之间的接触, 第二种为门轴与门轴瓦间的接触, 各接触面形状参见图 2。

4) 荷载工况

考虑到爆炸荷载的不确定性, 为了详细了解抗爆门在不同荷载条件作用下的变形和破坏情况, 充分发挥数值模拟的优势, 本次计算中, 共考虑了 8 组 24 种工况, 其中包括设计荷载下常规炸药爆炸工况 4 组, 核爆工况 2 组及超设计常规炸药爆炸工况 2 组, 充分覆盖了抗爆门可能遇到的各种荷载情况。

其具体时程关系参加图 3。(为简化起见, 本文中常规炸药爆炸曲线简称常爆曲线, 核爆炸曲线简称核爆曲线), 其中核爆曲线瞬时达到最大荷载<sup>[8]</sup>, 其他部分和常爆曲线 3 相同。

5) 积分步长

为了选取合适的时程积分步长, 需要知道结构的自振频率。一方面, 整个门扇相当于一个简支在门框上的简支板, 另一方面, 门上各个肋之间的钢板也相当与一个四边固支在肋上的小板, 因此计算得到的结构的振型势必是整体振动和局部振动都将出现, 需要计算较多的振型。用 SAP 和 ANSYS 计算得到其前 28 阶自振周期在 0.002222 秒~0.001186 秒之间。在前 28 阶振型中, 已经出现了 9 个整体振动的振型, 我们可以据此决定积分步长。在实际计算中, 我们令积分步长为  $1 \times 10^{-6}$  秒  $\ll T_{28}=0.001186$  秒。因此, 计算具有较高的稳定性和精确性。

6) 单元网格

利用 ANSYS 的自动网格划分程序进行网格划分, 其中, 板单元被划分为四边形和三角形单元, 实体单元为 4 面体单元。并限定板单元最大单元尺寸不得大于 7 厘米, 实体单元不得大于 5 厘米。以保证计算精度。

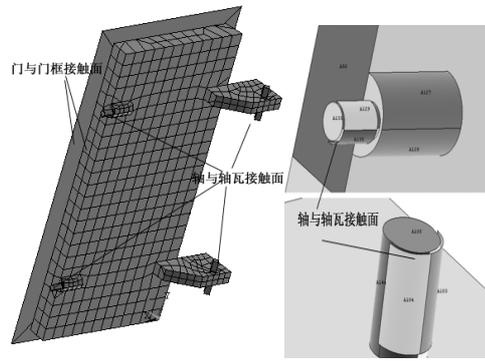


图 2、接触面形状

Fig 2 Contact surface shape

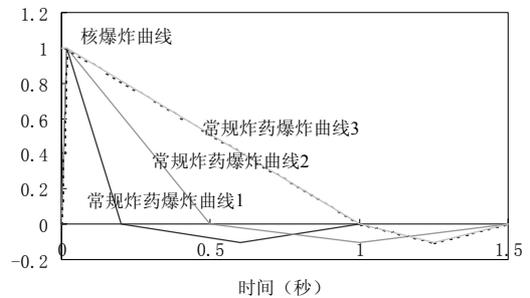


图 3、荷载时程关系

注: 核爆假定瞬时达到最大压力

Fig 3 Load-time curve

Notice: It is assumed that the pressure of nuclear blast reaches maximal value

## 4 计算结果及讨论

### 4.1、门扇中心时程位移曲线

以 M1 为例，计算得到门扇的时程位移曲线如图 4 所示

从图中可以得到以下结论：

- 1) 各常规炸药爆炸的升压时间均假设为 16ms，显著大于抗爆门的第一阶整体振动周期 2.026ms，动力作用效果不很明显，最大抗爆门的最大正向位移和静力计算结果差别不大。
- 2) 由于核爆曲线假设升压时间假设升压时间为零，所以动力作用效果明显，最大正向位移显著大于静力计算结果
- 3) 门扇基本都在 0.1 秒左右达到正向位移最大值，而后开始在门框和门轴的共同作用下往复反弹，正压作用时间越短，反弹作用也越大，即常爆曲线 1 的反弹作用最大。

### 4.2、门扇的塑性变形及破坏方式

仍以 M1 为例，在最大正向位移时塑性应变如图 5 所示。需要注意的是，此时门扇向外鼓，而门轴和门销由于被卡在轴承内，无法随之变形，从而也产生了很大的应力，这是原设计时没有估计到的情况，是门销和门轴设计的一个控制状态。

为了进一步了解该抗爆门的破坏过程和安全储备情况，我们利用数值计算的简单易行的优势，逐步加大最大正压力值进行计算尝试，直至抗爆门破坏，以了解该抗爆门的最大承载能力，最后得到抗爆门的破坏过程如图 6 所示，各抗爆门的所能承受的最大冲击正压力分别为：M0.5：1000Kpa；M1：1500Kpa；M4：5000Kpa。

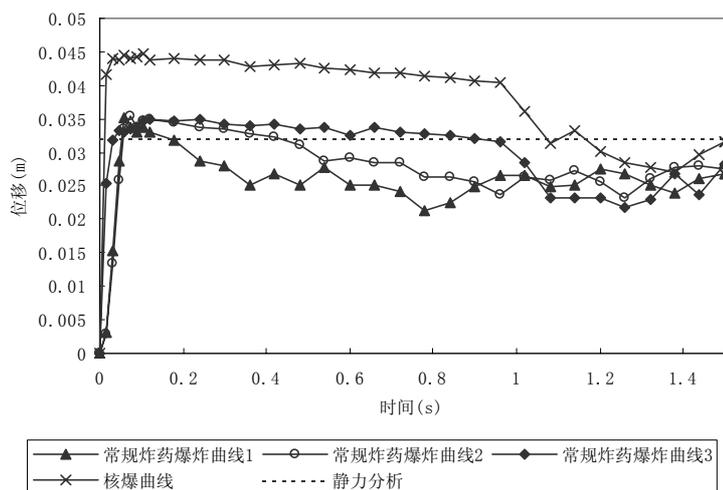


图 4、门扇中心时程位移曲线

Figure 4 Time-displacement curve of the door leaf center

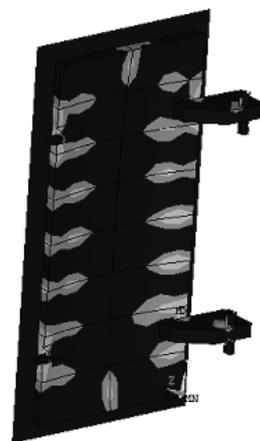


图 5、门扇塑性应变分布  
Figure 5 Plastic strain distributions in the door leaf

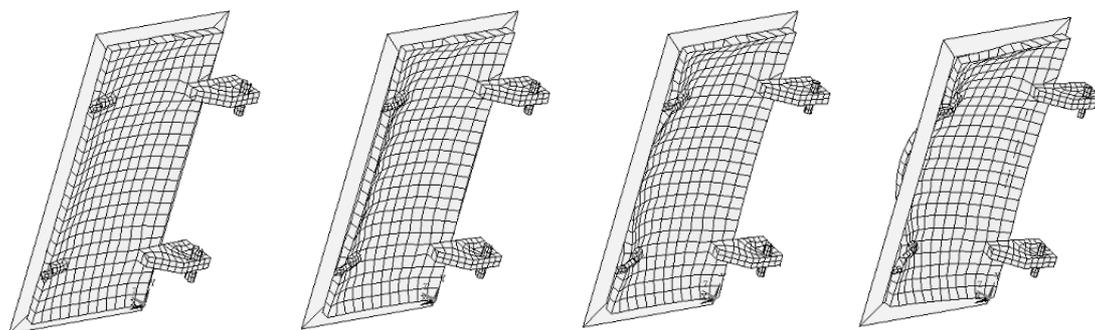


图 6、抗爆门破坏过程

Figure 6 Damage process

由抗爆门的塑性变形和破坏过程可以得出以下结论：

- 1) 抗爆门的破坏方式是因为门扇发生过大大变形，导致门的左右两侧从门框中滑出而破

坏。

- 2) 在设计最大冲击荷载过用下，抗爆门虽然已经有一定的塑性变形，但还远没有达到破坏的程度。
- 3) 由于抗爆门属于特殊结构，爆炸荷载又属于偶然性荷载，且抗爆门的设计要求只需要抵抗一次爆炸作用，设计的时候应该适当降低安全储备。从以上分析我们也可以看出，即使门扇出现较大的塑性变形，在考虑材料性能离散度后，但仍然有 20~100% 的安全储备。因此，我们认为，钢结构传统的容许应力法设计在这里是不合适的，可能会造成较大的浪费，应该采用基于一定试验和有限元分析基础上的极限状态设计方法。
- 4) 由于门扇破坏关键在于门框两侧边的滑脱，因此，底边支撑情况对整个抗爆门的安全情况影响不大，可以省去底部门框以简化施工，方便使用。

#### 4.3、核爆作用和常规炸药爆炸作用对比

核爆曲线假设升压时间为零，常爆曲线 3 假设升压时间为 16ms，其他参数两曲线都一样，计算得到各抗爆门在核爆和常爆曲线 3（最大荷载均假设为设计荷载）作用下最大位移对比如表 3 所示

表 3、核爆作用和常规炸药爆炸作用对比  
Table 3 Compare between nuclear blast and conventional blast

	M0.5	M1	M4
核爆最大位移 (m)	0.0261	0.0351	0.0598
常爆最大位移 (m)	0.0273	0.0449	0.0802
比例	1.05	1.28	1.34
门的安全系数	2.0	1.5	1.2

由上表我们可以看出，由于 M0.5 安全储备比较大 (>2.0)，门扇大部分在弹性阶段，因此，两种不同荷载工况差别不大，而对于 M4，其安全储备约为 1.2~1.3，在设计荷载作用下，门扇已经有很大区域进入了塑性，所以，面对略强与常规炸药爆炸的核冲击，其变形有明显增加。

#### 4.4、反弹作用力系数

在正向冲击波作用以后，一方面，门扇随之要受到一个负压作用；另一方面，门扇在正压作用下和门框碰撞，也会产生一个很大的反弹作用。这两个作用力都要由门销和门轴来承受，是门销和门轴设计的关键参数。而反弹作用力的大小用普通的静力计算方法是无法得到的，但在本次分析中，通过利用 LS-DYNA 中的接触计算功能，可以真实模拟出门扇和门框，门销、门轴和轴承之间的接触和碰撞，并得到了反弹作用力的大小，详见表 4。

表 4、反弹作用力  
Table 4 Rebound force

	M0.5	M1	M4
总反弹力 (KN)	801	1492	4739
最大正压力 (KN)	1097	2194	8776
等效负压系数*	0.73	0.68	0.54

\*等效负压系数=总反弹力/最大正压力

前苏联的抗爆结构规范规定反弹作用力系数为 0.7，而美国规定为 0.5。对照计算结果，我们可以发现，因为 M0.5 安全储备大，门扇基本都处于弹性阶段，因此，反弹作用强烈，如简单照搬国外规范设计可能会不安全。而 M4 安全储备比较小，塑性发展较大，塑性变形

耗能较多，因此，反弹作用相对也就比较小，照搬规范时安全储备过大。

## 5 结论：

- 1) 本文利用动力有限元方法对某系列抗爆门进行了全过程动力仿真分析。计算不仅真实再现了抗爆门的受力、变形和破坏过程，而且得到了很多静力计算所无法得到的数据。
- 2) 对于抗爆门这种特殊结构，为了保证设计的安全性和合理性，最好采用基于试验或动力有限元分析基础上的极限状态设计方法，并在详细了解其破坏过程的前提下，来确定其安全系数。
- 3) 抗爆门在冲击作用下门框和门扇，门轴、门销和轴承之间接触碰撞作用明显，且对门的安全性影响较大，在有限元分析中应该加以仔细考虑。
- 4) 由于爆炸作用的不确定性，分析爆炸作用下结构的安全度时，最好多分析几种荷载工况，以确保分析的准确性和全面性。

## 参考文献：

1. ANSYS 分析指南[M]，ANSYS 公司北京办事处，1999
2. LS-DYNA Structured User's Manual[M]，Livermore Software Technology Corp. 1999
3. 陈肇元等，钢筋混凝土结构在冲击荷载作用下的性能[M]，清华大学出版社，1986
4. 李翼祺，爆炸力学[M]，科学出版社，1992
5. 过镇海，钢筋混凝土原理[M]，清华大学出版社，1999
6. 王国强主编，实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]，西北工业大学出版社，2000
7. 王国周，瞿履谦主编，钢结构——原理与设计，清华大学出版社[M]，1993
8. 江见鲸，龚晓南，王元清等，建筑过程事故分析与处理[M]，中国建筑工业出版社，1998

## Dynamic Finite Element Simulation of Blast-resistant Doors Under Explosion Load

Lu Xinzheng Jiang Jiangjing

Department of Civil Engineering Beijing 100084

**Abstract:** Simulation for blast-resistant doors under explosion load is processed in this paper with the dynamic finite element software of LS-DYNA. With proper material constitution relationship, the numerical results show the elastic-plastic deformation of the doors. With the special contact ability of LS-DYNA, the numerical simulations show the contact relationship between the door and the frame, the door blot and bearing, respectively. The damage process of the doors is obtained from the numerical results and the weak points of the door in different time points are shown clearly. By changing the load-time curve of the explosion, the safety of the blast-resistant doors is discussed in detail.

**Keywords:** Blast-resistant door, dynamic finite element, contact analysis.