

# 瓦斯爆炸冲击波传播过程的数值模拟

张玉周<sup>1,2</sup> 姚斌<sup>1</sup> 叶军君<sup>1</sup>

(1.厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005; 2.集美大学机械学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 建立瓦斯爆炸沿巷道传播的分析模型, 运用 DYTRAN 软件进行分析, 得到瓦斯爆炸冲击波沿巷道的传播过程的参数变化及障碍物表面的等效应力分布。结果表明, 应用 DYTRAN 可以很好地模拟瓦斯爆炸传播过程及冲击波对障碍物的短暂的瞬态动力学过程, 对进行矿难救生系统的设计研究有重要意义。

**关键词:** 瓦斯爆炸 冲击波 衰减规律 破坏效应 数值模拟 DYTRAN

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1672-4801(2007)03-028-03

## 1 前言

矿难始终是困扰矿产开采企业的一大难题, 每年国家都因为矿难付出了巨大的生命和财产代价。研究表明, 矿难的发生主要有两种原因, 一是矿内瓦斯爆炸或粉尘爆炸, 二是矿内透水。瓦斯爆炸是目前煤矿安全生产中最主要的灾害。多年来, 国内外学者对瓦斯爆炸机理及传播规律, 以理论及试验方式做了大量研究。本文是通过计算机模拟的方法, 建立了瓦斯爆炸沿巷道传播的分析模型, 运用 DYTRAN 软件对冲击波的衰减规律及破坏效应进行分析。分析表明, 在冲击波传播过程中, 未燃气体被压力波锋面压缩后, 密度急剧增大, 压力迅速上升, 此后由于摩擦和粘性作用, 压力波波阵面压力处于衰减状态, 最后衰变为声波, 压力下降到常压; 障碍物对冲击波传播有激励作用, 障碍物表面的冲击载荷、等效应力的衰减并不是单调的, 而是象阻尼震荡一样不断衰减。瓦斯爆炸冲击波衰减规律及破坏效应的模拟分析为矿难救生系统的设计提供了仿真的实验环境, 一定程度上弥补了无法真实爆炸的不足。

## 2 瓦斯爆炸冲击波传播的物理模型

根据研究, 在一条水平巷道中矿井瓦斯爆炸冲击波从空间上可以分成以下三个区段<sup>[3]</sup>, 如图 1 所示。



图 1 瓦斯爆炸冲击波空间示意图

由此可画出矿井瓦斯爆炸传播的物理模型。假设爆炸在平巷发生, 巷道简化为一端封闭一端开口的管状空间, 左侧为爆炸区。为了减少计算时间, 取 130m 长的巷道进行模拟, 端面宽度为 3m ×

3m 如图 2 所示。

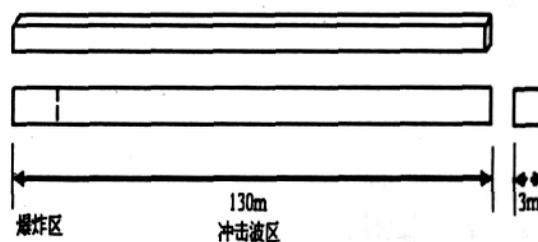


图 2 瓦斯爆炸传播的物理模型

## 3 瓦斯爆炸传播的有限元模型和初始边界条件

为了便于分析, 假设: 忽略 CH<sub>4</sub> 的化学反应过程, 认为甲烷在点火后迅速燃烧完毕, 燃烧以后的高温高压气体为空气。分析的物理模型如图 2, 为一端封闭一端开口的管状空间 (130 m × 3 m × 3m), 在 50m 处存在一半球形障碍物。将管道内的空间用六面体单元离散, 作为欧拉网格, 密度 9 × 9 × 260, 共计 21060 个网格, 用 PEULER1 定义其物理特性。用 DMAT 定义空气的材料特性。半球形障碍物的半径为 0.75m, 厚度 0.01m, 用六面体的拉格朗日单元模拟, 用 DYMAT24 定义其材料特性。用一般耦合定义欧拉网格和拉格朗日网格之间的耦合关系, 其接触的表面作为流固耦合的界面。管状空间的开口端用 FLOW 定义气体流出的边界, 其余自由表面均按边界条件的默认值设为 WALL-LET。

### 3.1 材料的状态方程及参数

爆炸后的高温高压气体和空气均采用 Gamma 律状态方程描述,  $P = (\gamma - 1) e$ , 为气体的比热比;  $\rho$  为材料密度;  $e$  为单位质量内能。本文计算中空气密度  $\rho = 1.2887 \text{ kg/m}^3$ , 空气单位质量内能  $e = 1.967 \times 10^5 \text{ J/kg}$ ; 爆轰产物的比热容  $\gamma = 1.282$ , 爆轰产物的压力  $P = 1.838 \text{ MPa}$ , 爆轰产物密度  $\rho = 2.917 \text{ kg/m}^3$ , 爆轰产物的速度  $v = 808 \text{ m/s}$ 。

半球型障碍物采用弹塑性材料, 密度  $\rho = 7800$

kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量 E=196GPa, 泊松比  $\nu=0.3$ , 屈服应力  $\sigma_s=235\text{MPa}$ 。

### 3.2 模拟结果分析

#### 3.2.1 衰减规律分析

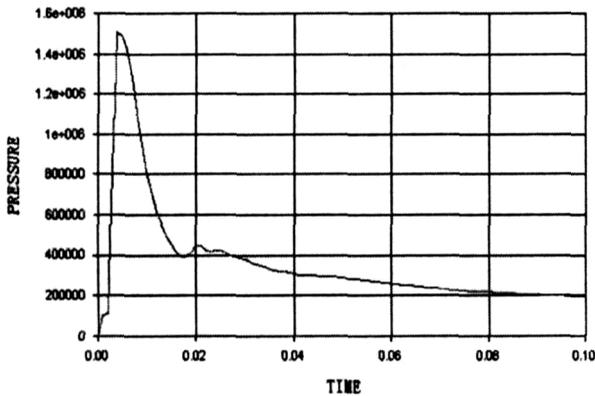


图3 非障碍物区压力—时间历程曲线

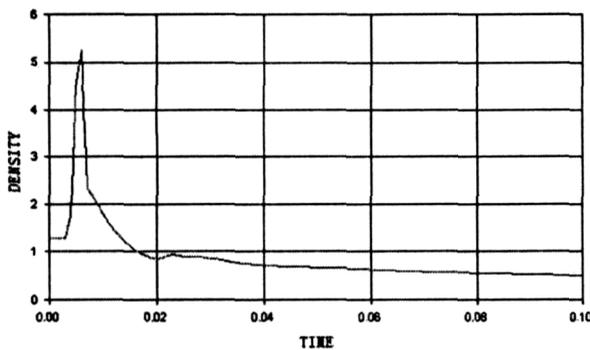


图4 非障碍物区密度—时间历程曲线

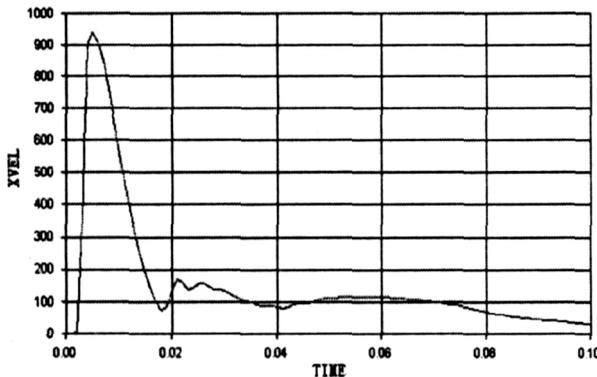


图5 非障碍物区速度—时间历程曲线

(1)从理论分析<sup>[3]</sup>, 瓦斯爆炸可以分成三个阶段: 第一阶段, 点火阶段, 在外界火源作用下, 激发链式反应, 瓦斯被点燃, 反应产生的热量使气体产生膨胀, 压力升高, 燃烧区未燃气体扩张, 由于热力作用, 已燃气体与可燃气体之间出现压力梯度, 压力梯度增大到一定程度, 即产生压力间断, 形成冲击波。这一阶段由于时间极为短暂, 爆炸涉及空间也很小, 因此可以忽略。第二阶段, 压缩燃烧阶段。在冲击波作用下, 已燃气体向远离火源方向移

动, 未燃气体被压力波锋面压缩, 在高温作用下迅速被点燃, 燃烧产生的热量一方面用来克服冲击波向前传播产生的阻力耗散和气体膨胀产生的阻力, 另一方面使前驱冲击波的锋面压力和能量不断增加。第三阶段, 单一冲击波传播阶段, 可燃气体被耗尽后, 高温气体在压力梯度作用下继续向前传播, 但由于摩擦和粘性作用, 压力波波阵面压力处于衰减状态, 最后衰变为声波, 压力下降到常压。

(2)图的模拟结果分析, 从图 3、4、5 的模拟结果看, 在很短时间以前, 瓦斯与空气的混合物未受到冲击波扰动的影响, 超压为零; 受到冲击波扰动后, 气体被压力波锋面压缩, 气体密度急剧增大, 压力迅速上升, 峰值超压可达到 1.5MPa; 最后压力波波阵面压力处于衰减状态, 衰变为声波, 压力下降到常压。模拟的结果和理论分析是吻合。

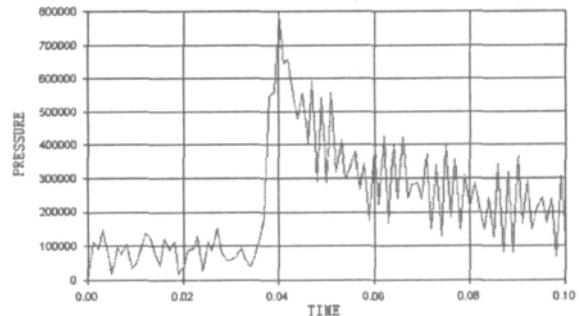


图6 障碍物表面压力—时间历程曲线

图 6 为障碍物表面的压力分布, 和图 3 对比可知, 障碍物的存在引起了附近压力的突然变化, 障碍物对冲击波的传播有激励效应。

#### 3.2.2 破坏效应分析

描述冲击波破坏效应的主要参数有三个: 峰值超压、正压作用时间和冲量。实验研究表明, 当正压区作用时间超过 10 倍的物体自振动周期时, 物体的破坏可以靠冲击波峰值超压计算。从图 7 的模拟结果可知, 障碍物表面压力载荷峰值可达到 1MPa, 同时因其对冲击波传播的激励效应, 峰值超压衰减并不是单调的, 而是象阻尼震荡一样

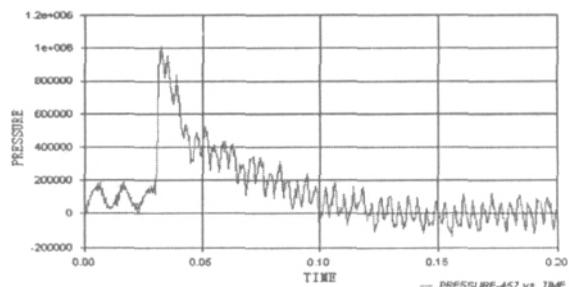


图7 障碍物表面某单元冲击载荷—时间历程曲线

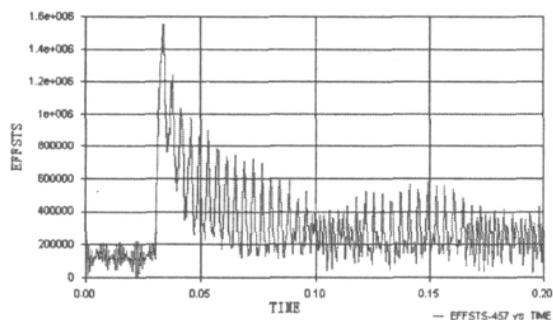


图8 障碍物表面某单元等效应力—时间历程曲线

不断衰减,这和非障碍区峰值超压的衰减(图3)明显不同。图8是模拟得到的等效应力—时间历程曲线,等效应力最大值为1.6MPa,而该障碍物材料

#### 参考文献:

- [1] 周昕清.爆炸动力学及其应用[M].合肥:中国科技大学出版社,2001.
- [2] 王新月,杨清真.热力学与气体动力学基础[M].西安:西北工业大学出版社,2004.
- [3] 徐景德.置障条件下的矿井瓦斯爆炸传播过程数值模拟研究[J].煤炭学报,2004,29(1).
- [4] 胡学义.煤矿瓦斯爆炸事故数值模拟分析[J].爆破,2003,20(3):3-5.
- [5] 周心权,吴兵,徐景德.煤矿井下瓦斯爆炸的基本特性[J].中国煤炭,2003,28(9):8-11.
- [6] 林柏泉.瓦斯爆炸动力学特征参数的测定及其分析[J].煤炭学报,2002,27(2):164-167.
- [7] 王子佳,南宝.井下瓦斯爆炸爆源特征尺寸计算方法的分析[J].中国煤炭,2004,30(7):47-48.
- [8] 王礼立.爆炸与冲击载荷作用下结构和材料动态响应研究的新进展[J].爆炸与冲击,2001,21(4).
- [9] 苏艳艳,尹群.可燃气体爆炸载荷作用下海洋平台舱室结构动态响应的数值模拟研究[J].中国海洋平台,2007,22(1)

作者简介:张玉周,(1971年-),男,实验师,主要从事CAD/CAM/CAE等方面的研究。

(接第37页)

#### 参考文献:

- [1] 李端玲,戴建生,张启先,金国光.基于构态变换的变胞机构结构综合.机械工程学报,2002,7(7):12-16
- [2] Dai J S, Rees J J. Mobility in metamorphic mechanism of foldable/erectable kinds[J]. Transaction of the ASME, Journal of Mechanical Design, 1999, 121(3): 375-382.
- [3] Jin G G, Zhang Q X. Dynamic modeling of metamorphic mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 16(1): 94-99
- [4] Dai J S, Zhang Q X. Metamorphic mechanism and their configuration models [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 13(3): 212-218
- [5] 金国光,丁希仑等.变胞机构全构态动力模型及其数值仿真研究[J].航空学报,2004,4(7):401-405
- [6] 李端玲,戴建生等.一种变胞机构-魔术花球的自由度分析[J].机械工程学报,2002,9(9):12-16.
- [7] 曲志刚,安子军,杜秀菊.变自由度机构的功能及应用研究[J].机械传动,2001,25(2):6-8.
- [8] 黄真,孔令福,方跃法.并联机器人机构学理论与控制[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [9] 郑福延.平面连杆机构设计[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [10] 肖位枢.图论及其算法[M].北京:航空工业出版社,1993.
- [11] 郭宗和,马履中等.基于变胞原理的变自由度机构拓扑型分析[M].中国机械工程,2005,16(1),1-7.

作者简介:柯江岩,(1980年-),男,集美大学工程技术学院助教,西安交通大学机械学院硕士研究生。