

文章编号: 1001-1455(2012)01-0047-04

煤矿瓦斯爆炸事故中矿车激励效应的数值模拟*

徐景德^{1,2}, 张莉聪¹, 黎体发³, 杨庚宇¹

(1. 华北科技学院安全工程学院, 北京 101601;

2. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081;

3. 国家安全生产监督管理总局信息研究院, 北京 100029)

摘要: 基于矿井生产环境, 构建了相应的物理模型、数学模型, 进行了数值模拟。模拟过程中, 考虑了化学反应, 将爆炸热力学过程和基元反应耦合, 采用 TVD 格式进行数值离散。结果揭示巷道中设置 1~3 辆矿车时, 瓦斯爆炸冲击波及其火焰波的结构和参数变化特征。数值模拟与实验结果对比分析表明, 单一矿车和多辆矿车在激励效应存在明显不同, 矿车数量增加, 激励效应更加显著。

关键词: 爆炸力学; 激励效应; 耦合; 瓦斯爆炸; 矿车

中图分类号: O383.1

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

当传播路线上存在障碍物, 煤矿瓦斯爆炸冲击波经过时, 压力会突然上升, 这称为爆炸冲击波传播的激励效应。激励效应的产生机理已经有系统的解释, 激励效应的产生是由于障碍物导致火焰传播断面积的突然增大和传播有效断面突然缩小引发的紊流度加剧, 但是以往的研究多是定性解释, 而定量研究则比较缺乏^[1-2]。

采用数值模拟方法解释障碍物激励效应是一种非常有效的方法, 传统方法中单纯从热力学过程进行模拟, 忽视瓦斯爆炸传播过程中的基元反应特征, 导致模拟结果与实际物理现象差异较大。本文中, 将爆炸热力学过程和基元反应耦合, 对爆炸传播过程进行数值模拟, 试图为瓦斯爆炸事故防治、事故救援和事故调查提供参考。

1 模拟条件

实验在内截面为 40 mm×40 mm 瓦斯爆炸实验管道中进行, 管道全长 9 m, 在离点火端 6.5 m 的观察窗中心附近装有 1~3 辆模拟矿车模型, 如图 1 所示。矿车沿实验管道内腔中心轴线对称布置, 各矿车重心之间相距 40 mm, 单截面的阻塞比为 4:10; 矿车为可装卸式设计, 辆数和布置点可以进行调节。

点火方式采用氢氧引爆甲烷-空气爆炸, 如图 2 所示。在引爆段与实验段之间用涤纶薄膜隔开, 引爆段充入反应当量比的 H₂+O₂ 混合气体, 试验段充入 CH₄+空气预混气体, 点燃 H₂+O₂ 气体形成较强的爆炸波, 用来点燃 CH₄+空气实验气体。

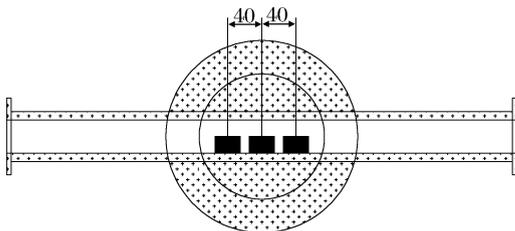


图 1 模拟管道示意图

Fig. 1 Schematic of the experiment tube

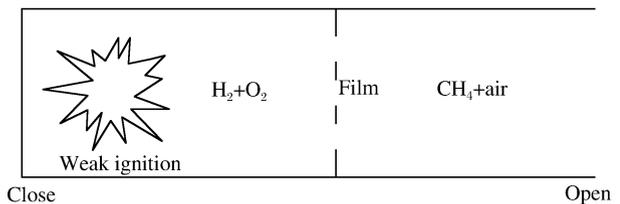


图 2 爆炸点火方式示意图

Fig. 2 Schematic of the ignition method

* 收稿日期: 2010-10-19; 修回日期: 2011-05-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2002CB412707)

作者简介: 徐景德(1965—), 男, 博士, 教授。

2 控制方程、定解条件及数值离散方法

2.1 控制方程

在曲线坐标系 (ξ, η, ζ) 下的量纲一控制方程为

$$\frac{\partial \hat{U}_g}{\partial \tau} + \frac{\partial \hat{F}_g}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{G}_g}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{H}_g}{\partial \zeta} = \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial \hat{F}_{g,v}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{G}_{g,v}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{H}_{g,v}}{\partial \zeta} \right) + \frac{1}{J} \mathbf{S} \quad (1)$$

式中: $J = \left| \frac{\partial(\xi, \eta, \zeta)}{\partial(x, y, z)} \right|$, $\hat{U}_g = \frac{1}{J} \mathbf{U}_g$, $\hat{F}_g = \frac{1}{J} (\xi_x \mathbf{F}_g + \xi_y \mathbf{G}_g + \xi_z \mathbf{H}_g)$, $\hat{G}_g = \frac{1}{J} (\eta_x \mathbf{F}_g + \eta_y \mathbf{G}_g + \eta_z \mathbf{H}_g)$, $\hat{H}_g = \frac{1}{J} (\zeta_x \mathbf{F}_g + \zeta_y \mathbf{G}_g + \zeta_z \mathbf{H}_g)$, $\hat{F}_{g,v} = \frac{1}{J} (\xi_x \mathbf{F}_{g,v} + \xi_y \mathbf{G}_{g,v} + \xi_z \mathbf{H}_{g,v})$, $\hat{G}_{g,v} = \frac{1}{J} (\eta_x \mathbf{F}_{g,v} + \eta_y \mathbf{G}_{g,v} + \eta_z \mathbf{H}_{g,v})$, $\hat{H}_{g,v} = \frac{1}{J} (\zeta_x \mathbf{F}_{g,v} + \zeta_y \mathbf{G}_{g,v} + \zeta_z \mathbf{H}_{g,v})$ 。

2.2 化学反应模型

为了提高模拟的准确性,模拟过程中考虑了爆炸传播过程的化学反应,对 $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{N}_2$ 系统,采用 17 组元、58 步反应模型。其中,正反应均满足 Arrhenius 定律, $k_{fi} = A_i T^{B_i} \exp(-E_{ai}/R_u T)$ 。化学反应源项,对第 j 步基元反应,有

$$\sum_{i=1}^{n_s} \nu'_{ij} M_i = \sum_{i=1}^{n_s} \nu''_{ij} M_i \quad j = 1, 2, \dots, N_R; \quad i = 1, 2, \dots, n_s \quad (2)$$

由质量作用定律,得第 i 组元的质量生成率为

$$S_i = W_i \sum_{j=1}^{N_R} (\nu''_{ij} - \nu'_{ij}) (k_{fi} \prod_{l=1}^{n_s} n_l^{\nu'_{lj}} - k_{bi} \prod_{l=1}^{n_s} n_l^{\nu''_{lj}}) \quad (3)$$

2.3 热力学参数

c_{pi} 由四阶多项式拟合得到。相应地,也可确定 $h_i = \int_{T_0}^T c_{pi} dT + h_{i,0}$ 。具体形式为

$$\frac{c_{pi}}{R_i} = a_{1i} + a_{2i} T + a_{3i} T^2 + a_{4i} T^3 + a_{5i} T^4 \quad (4)$$

$$\frac{h_i}{R_i T} = a_{1i} + \frac{a_{2i}}{2} T + \frac{a_{3i}}{3} T^2 + \frac{a_{4i}}{4} T^3 + \frac{a_{5i}}{5} T^4 + \frac{a_{6i}}{T} \quad (5)$$

式中:常系数 $a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{6i}$ 可 JANAF 表查得。

2.4 数值格式^[3]

在黏性定常流的计算中,网格的局部加密限制了时间步长,使计算效率下降,提高计算效率的更好方法是采用隐式方法。本文中采用 LU-SSOR 方法。控制方程的时间离散为

$$\frac{\Delta \hat{Q}_g^n}{\Delta \tau} = -\mathbf{c}^{n+1} + \mathbf{q}^n + \hat{\mathbf{S}}^{n+1} \quad (6)$$

在一阶精度内 ($o(\Delta \hat{Q}_g)$), 有

$$\begin{aligned} \mathbf{c}^{n+1} = & \frac{\partial}{\partial \xi} (\hat{\mathbf{E}}_g^n + \hat{\mathbf{A}}^n \cdot \Delta \hat{Q}_g^n) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\hat{\mathbf{F}}_g^n + \hat{\mathbf{B}}^n \cdot \Delta \hat{Q}_g^n) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\hat{\mathbf{G}}_g^n + \hat{\mathbf{C}}^n \cdot \Delta \hat{Q}_g^n) = \\ & \frac{\partial}{\partial \xi} (\hat{\mathbf{A}}^n \cdot \Delta \hat{Q}_g^n) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\hat{\mathbf{B}}^n \cdot \Delta \hat{Q}_g^n) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\hat{\mathbf{C}}^n \cdot \Delta \hat{Q}_g^n) + \mathbf{c}^n \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\hat{\mathbf{A}} = \frac{\partial \hat{\mathbf{E}}_g}{\partial \hat{Q}_g}$, $\hat{\mathbf{B}} = \frac{\partial \hat{\mathbf{F}}_g}{\partial \hat{Q}_g}$, $\hat{\mathbf{C}} = \frac{\partial \hat{\mathbf{G}}_g}{\partial \hat{Q}_g}$, 分别是对流项的 Jacobian 矩阵; \mathbf{c} 为对流项, \mathbf{q} 为黏性项。整理后,有

$$\frac{\Delta \hat{Q}_g^n}{\Delta \tau} + \frac{\partial}{\partial \xi} (\hat{\mathbf{A}}^n \cdot \Delta \hat{Q}_g^n) + \frac{\partial}{\partial \eta} (\hat{\mathbf{B}}^n \cdot \Delta \hat{Q}_g^n) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (\hat{\mathbf{C}}^n \cdot \Delta \hat{Q}_g^n) - \mathbf{T}^n \cdot \Delta \hat{Q}_g^n = \mathbf{R}_{HS}^n \quad (8)$$

$\Delta \xi, \Delta \eta, \Delta \zeta$ 为任意坐标系下 3 个方向的空间步长,本文中均取为 1。对流项的 TVD 格式离散为

$$\begin{aligned} \mathbf{c} = & \frac{1}{2 \Delta \xi} [(\hat{\mathbf{E}}_{g,i+1/2,j,k}^n - \hat{\mathbf{E}}_{g,i-1/2,j,k}^n) - (\hat{\mathbf{F}}_{g,i,j+1/2,k}^n - \hat{\mathbf{F}}_{g,i,j-1/2,k}^n) - (\hat{\mathbf{G}}_{g,i,j,k+1/2}^n - \hat{\mathbf{G}}_{g,i,j,k-1/2}^n) + \\ & (\mathbf{R}_{i+1/2,j,k}^n \varphi_{i+1/2,j,k}^n - \mathbf{R}_{i-1/2,j,k}^n \varphi_{i-1/2,j,k}^n) + (\mathbf{R}_{i,j+1/2,k}^n \varphi_{i,j+1/2,k}^n - \mathbf{R}_{i,j-1/2,k}^n \varphi_{i,j-1/2,k}^n) + \end{aligned}$$

$$(\mathbf{R}_{i,j,k+1/2}^n \varphi_{i,j,k+1/2}^n - \mathbf{R}_{i,j,k-1/2}^n \varphi_{i,j,k-1/2}^n)]$$

式中: $\mathbf{R}_{i,j,k+1/2}^n$ 、 $\mathbf{R}_{i,j,k-1/2}^n$ 、 $\mathbf{R}_{i,j,k\pm 1/2}^n$ 的列向量为 $\frac{\partial \hat{F}}{\partial \hat{U}}$ 、 $\frac{\partial \hat{G}}{\partial \hat{U}}$ 、 $\frac{\partial \hat{H}}{\partial \hat{U}}$ 的右特征向量。 φ 为 TVD 黏性因子。

2.5 网格生成

对于复杂区域,初始网格采用代数方法,并向壁面、障碍物等处吸引。对于复杂计算域,为保证网格的正交性,需求解 Laplace 方程对初始网格进行修正。

3 结果分析^[4-5]

图 3 给出了不同工况下,观察窗内瓦斯爆炸产生的冲击波在矿车附近的数值模拟和实验对比结果。可以看出,数值模拟和实验的结果基本一致,当遇到矿车后,冲击波反射形成的激波向后传播,干扰紧跟冲击波阵面的火焰波的传播;瓦斯爆炸冲击波在矿车附近发生多次反射、绕射后汇聚,形成冲击波点火现象,爆炸强度急剧上升,超压值远大于无矿车的瓦斯爆炸压力;矿车辆数越多,冲击波波系越复杂,出现的激波阵面就越多。在不规则

障碍物区域,冲击波阵面发生很大的畸变,已非平面波阵面,但是经过矿车后冲击波又逐步恢复为平面波形式向前传播。这主要是由于管道壁面的约束作用,使壁面附近的冲击波得到加强,传播速度逐步加快,从而与中间区域的冲击波保持一致向前传播。

图 4 给出了不同工况下,观察窗内瓦斯爆炸产生的火焰在矿车附近的数值模拟和实验对比结果。从火焰对比示意图来看,火焰的形状基本一致,从图中可以看到:当火焰不断接近矿车,火焰锋面开始变形,矿车辆数越多爆炸火焰面越复杂;随着时间的推移,火焰阵面从矿车上方越过,同时火焰阵面被拉长,在矿车的两侧附近能看到湍流漩涡的存在,这是因为矿车的存在导致瓦斯爆炸流场湍流程度加大,并在矿车附近区域形成气流涌塞,气流传播速度减慢;矿车辆数越多,这种影响程度就越大,所产生的爆炸火焰区也越长。

图 3 给出了不同工况下,观察窗内瓦斯爆炸产生的冲击波在矿车附近的数值模拟和实验对比结果。可以看出,数值模拟和实验的结果基本一致,当遇到矿车后,冲击波反射形成的激波向后传播,干扰紧跟冲击波阵面的火焰波的传播;瓦斯爆炸冲击波在矿车附近发生多次反射、绕射后汇聚,形成冲击波点火现象,爆炸强度急剧上升,超压值远大于无矿车的瓦斯爆炸压力;矿车辆数越多,冲击波波系越复杂,出现的激波阵面就越多。在不规则障碍物区域,冲击波阵面发生很大的畸变,已非平面波阵面,但是经过矿车后冲击波又逐步恢复为平面波形式向前传播。这主要是由于管道壁面的约束作用,使壁面附近的冲击波得到加强,传播速度逐步加快,从而与中间区域的冲击波保持一致向前传播。

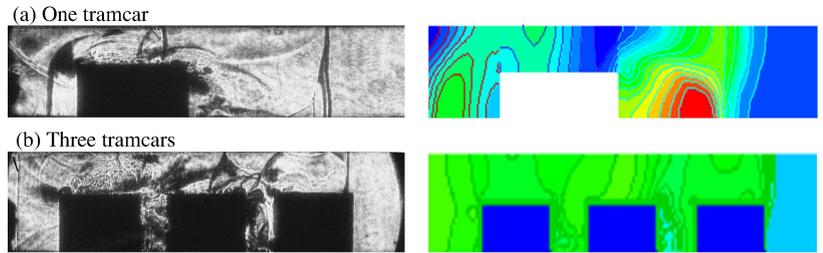


图 3 瓦斯爆炸冲击波

Fig. 3 The shock waves from the methane explosion

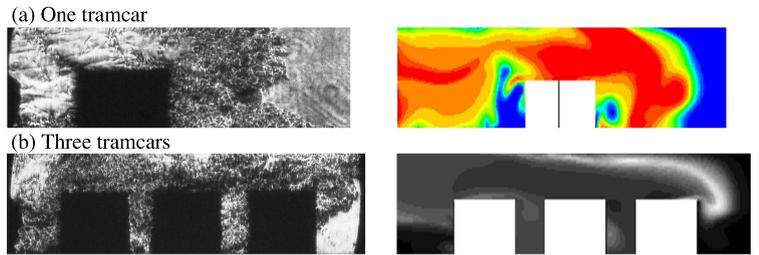


图 4 火焰与矿车作用

Fig. 4 The interaction of the flame and the tramcar

4 结论

(1)将基元化学反应模型与爆炸过程的数学模型进行耦合,提高了数值模拟过程的真实性。在模拟中采用了区域计算的方法,大大地节省了计算时间,为瓦斯爆炸数值模拟提供了较好的研究方法。实验和模拟的结果基本吻合,验证了程序的可靠性。

(2)在瓦斯爆炸传播过程中,随着爆炸火焰传播速度增大,在同一时刻爆炸波火焰阵面与压力波阵面的时间差逐步减小,火焰阵面将逐步接近压力波阵面,存在火焰面与压力波面耦合的趋势,在一定条件下,可能达到爆轰状态,形成危害性大、涉及面广的强瓦斯爆炸。另外,随着爆炸火焰的加速,爆炸压力的超压值不断增大,爆炸强度显著增强,将会形成较强的爆炸冲击波,危害性也很大。当瓦斯爆炸波经过矿车附近时,瓦斯爆炸火焰长度明显变长,传播速度较快;爆炸冲击波流场压力突然上升,冲击波运动速度突然加快。经反射、绕射后形成的冲击波汇聚,波系异常复杂,爆炸危害性剧增^[6]。

(3)模拟结果显示,3 辆矿车和 1 辆矿车对爆炸波流场激励效应存在明显不同,多辆矿车存在时,使爆炸波结构变化趋于复杂,燃烧面积进一步加大,压力上升幅度加大。而井下矿车经常是多辆矿车以链状形式存放于巷道中。因此,在矿车存放区域及其附近往往破坏会更加严重,在矿车存放区域的人员受到伤害更为严重。在事故调查与救援中必须充分重视这一现象。

参考文献:

- [1] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
- [2] 徐景德. 矿井瓦斯爆炸冲击波传播规律及影响因素研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2003.
- [3] 水鸿寿. 一维流体力学差分方法[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [4] 徐景德,周心权,吴兵. 瓦斯浓度和火源对瓦斯爆炸传播影响的实验分析[J]. 煤炭科学技术,2001,29(11):15-17.
XU Jing-de, ZHOU Xin-quan, WU Bing. Experimental analysis on gas density and fire resource affected to expansion of gas explosion[J]. Coal Science and Technology, 2001,29(11):15-17.
- [5] Lee J H, Knystautas R, Chan C K. Turbulent flame propagation in obstacle-filled tubes[J]. Symposium (International) on Combustion, 1985,20(1):1663-1967.
- [6] 巴尔特克纳西特 费. 爆炸过程和防治措施[M]. 北京:化学工业出版社,1985.

A numerical simulation of stimulating effect of tramcars during the methane explosion propagation *

XU Jing-de^{1,2}, ZHANG Li-cong¹, LI Ti-fa³, YANG Geng-yu¹

(1. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3. National Institute for Occupational Safety, State Administration of Work Safety, Beijing 100021, China)

Abstract: Tramcars are used as transport equipment, especially in the central area of a mine. As obstacles in the cloud of pre-mixed gas, they produce stimulating effect during the methane explosion accidents in coal mining. Based on conditions of coal mining process, a set of models is built for the numerical simulation. The chemical reaction mechanism, thermodynamics of explosion and elementary reaction are taken into consideration in the simulation. The TVD scheme is used for numerical discretization. The result shows the changes of shock wave and fire flame because of the influence of 1 to 3 tramcars. By comparison with previous experimental results, the conclusion is that the stimulating effect will be enhanced with the increase of the number of tramcars. The result will be helpful for the gas explosion prevention, emergency response and rescue, and incident investigation in coal mines.

Key words: mechanics of explosion; stimulating effect; coupling; methane explosion; tramcars

* Received 19 October 2010; Revised 15 May 2011

Supported by the National Basic Research Program of China (973 Program) (2002CB412707)

Corresponding author: XU Jing-de, xujd1430@126.com