DOI：10.13374/j.issn1001-053x.2006.10.022
第28卷 第10期 北京科技大学学报 Vol.28 No.10
2006年 10月 Journal of University of Science and Technology Beijing Oct. 2006

掘进巷道瓦斯爆炸动态数学模型及数值分析

曲志明[1)] 周心权[2)] 张[illegible]恺[3)] 徐景德[4)]

1) 河北工程大学土木工程学院，邯郸 056038 2) 中国矿业大学资源与安全工程学院，北京 100083
3) 河北工程大学经济管理学院，邯郸 056038 4) 华北科技学院安全培训处，北京 101601

摘 要 根据爆炸力学、爆炸动力学和热力学理论，建立了瓦斯爆炸流场三维动态数学模型．通过实验和理论分析，研究了动态模型边界条件的确定方法，并采用TVD格式数值方法对三维数学模型进行了数值解析．数值分析结果表明，当燃烧区压力大到趋于爆轰状态时，爆炸及其影响区域障碍物附近的压力上升显著，速度场发生显著变化，燃烧区及非燃烧区均有障碍物的激励效应存在．

关键词 瓦斯爆炸；流场；掘进巷道；TVD格式；数值分析

分类号 TD712+.71

煤矿矿井瓦斯爆炸事故统计表明[1-3]，因矿井环境条件不同，绝大部分瓦斯爆炸事故在巷道中发生，同时也在巷道内传播；而且，绝大部分瓦斯爆炸的引爆点火源的能量是小能量．一般情况下，瓦斯爆炸是从瓦斯燃烧形式开始，再逐步演变为爆炸波传播．本文以掘进巷道中瓦斯爆炸冲击波传播过程为例，用TVD格式[4-7]数值方法来解析瓦斯爆炸过程动态数学模型．

1 瓦斯爆炸特性参数

根据研究目的和实验测试结果，选择如表1所示的三种情况进行分析，实验模拟巷道尺寸及测点各有布置．管道长15 m，净断面80 mm×80 mm．用可以忽略破膜压力的薄膜将瓦斯、空气预混气体与正常空气隔开，充气长度7.5 m，瓦斯体积分数为9.5%，用点源引燃．分别在两个地点设置障碍物，障碍物直径20 mm，高80 mm．而沿传播方向上的压力、温度和速度等场量在时间和空间上的分布和变化需要进行计算模拟．

表1 管道瓦斯爆炸传播初始状态参数

Table 1 Initial parameters of gas explosion propagation in pipeline

状态	低温区域			高温区域		
	p_0/MPa	V_0/(m·s^{-1})	T_0/K	p_1/MPa	V_1/(m·s^{-1})	T_1/K
爆燃状态	0.1013	0	300	0.410	0	1800
爆轰状态	0.1013	0	300	0.608	0	1800

2 三维动态数学模型

2.1 基本假设

(1)不考虑瓦斯的化学反应过程，但考虑气体的粘性；(2)为简化计算空间的几何对称条件和减少计算量，取部分物理域为计算域；(3)采用二阶迎风TVD格式，以提高瓦斯爆炸冲击波传播模拟过程中的分辨率；(4)模拟管道绝热、光滑，瓦斯(CH_4)预混气体初始浓度、温度和压力分布均匀，条件为常温常压．

2.2 基本控制方程

在直角坐标系下，掘进巷道三维非定常可压缩瓦斯爆炸流场的守恒方程可写为：

连续方程，

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \tag{1}$$

动量方程，

$$\begin{cases}\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}\\ \frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}\\ \frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}\end{cases} \tag{2}$$

收稿日期：2005-09-01 **修回日期**：2006-07-01
基金项目：国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(No.2005CB221506)
作者简介：曲志明(1970－)，男，讲师，博士研究生

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

能量方程，

$$\frac{\partial e}{\partial t}+u\frac{\partial e}{\partial x}+v\frac{\partial e}{\partial y}+w\frac{\partial e}{\partial z}=0 \tag{3}$$

状态方程，

$$p=p(\rho,T)=\rho RT \tag{4}$$

其中，x，y，z 为直角坐标参量；ρ 为流体密度，$\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$；p 为压力，Pa；u，v，w 分别是 x，y，z 三个坐标方向的速度分量，$\mathrm{m\cdot s^{-1}}$；t 为时间坐标；T 为温度，K；R 为气体常数；e 为比能，$\mathrm{J\cdot kg^{-1}}$，$e=\frac{p}{\gamma-1}+\frac{\rho(u^2+v^2+w^2)}{2}$，其中 γ 是气体指数，为常数.

从物理本质上来讲，掘进巷道瓦斯爆炸的传播属于含冲击波的高温、高压气体在一端开口、一端封闭的管状空间中的流动过程. 由于瓦斯爆炸含有多种气体组分，利用计算空气动力学和包含多组分气体扩散、混合的方程来描述瓦斯爆炸的内部流场. 因此，在直角坐标系下，爆炸流场的控制方程[8-11]：

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}}{\partial t}+\frac{\partial \boldsymbol{F}}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{G}}{\partial y}+\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial z}=\frac{\partial \boldsymbol{F}_\varphi}{\partial x}+\frac{\partial \boldsymbol{G}_\varphi}{\partial y}+\frac{\partial \boldsymbol{H}_\varphi}{\partial z} \tag{5}$$

式中，

$$\boldsymbol{U}=(\rho,\rho u,\rho v,\rho w,E)^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{F}=(\rho u,\rho u^2+p,\rho uv,\rho uw,u(E+p))^{\mathrm{T}},$$

$$\boldsymbol{G}=(\rho v,\rho vu,\rho v^2+p,\rho vw,v(E+p))^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{H}=(\rho w,\rho wu,\rho vw,\rho w^2+p,w(E+p))^{\mathrm{T}};$$

$$\boldsymbol{F}_\varphi=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{xx}\\ \tau_{xy}\\ \tau_{xz}\\ u\tau_{xx}+v\tau_{xy}+w\tau_{xz}+q_x\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{G}_\varphi=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{yx}\\ \tau_{yy}\\ \tau_{yz}\\ u\tau_{yx}+v\tau_{yy}+w\tau_{yz}+q_y\end{bmatrix},\quad \boldsymbol{H}_\varphi=\begin{bmatrix}0\\ \tau_{zx}\\ \tau_{zy}\\ \tau_{zz}\\ u\tau_{zx}+v\tau_{zy}+w\tau_{zz}+q_z\end{bmatrix};$$

$$\begin{cases}q_x=\dfrac{\mu c_p}{Pr}\dfrac{\partial T}{\partial x}\\ q_y=\dfrac{\mu c_p}{Pr}\dfrac{\partial T}{\partial y}\\ q_z=\dfrac{\mu c_p}{Pr}\dfrac{\partial T}{\partial z}\end{cases},\quad \begin{cases}\tau_{xx}=\dfrac{2}{3}\mu\left(2\dfrac{\partial u}{\partial x}-\dfrac{\partial v}{\partial y}-\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)\\ \tau_{yy}=\dfrac{2}{3}\mu\left(2\dfrac{\partial v}{\partial y}-\dfrac{\partial w}{\partial z}-\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)\\ \tau_{zz}=\dfrac{2}{3}\mu\left(2\dfrac{\partial w}{\partial z}-\dfrac{\partial u}{\partial x}-\dfrac{\partial v}{\partial y}\right)\end{cases},\quad \begin{cases}\tau_{xy}=\tau_{yx}=\mu\left(\dfrac{\partial v}{\partial x}+\dfrac{\partial u}{\partial y}\right)\\ \tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu\left(\dfrac{\partial v}{\partial z}+\dfrac{\partial w}{\partial y}\right)\\ \tau_{xz}=\tau_{zx}=\mu\left(\dfrac{\partial u}{\partial z}+\dfrac{\partial w}{\partial z}\right)\end{cases}.$$

其中 $E=\rho e+\frac{1}{2}\rho(u^2+v^2+w^2)$，热力学能，J；$p=\rho e(k-1)$，压强，Pa；$k$ 为气体的绝热指数；q 为外部热源，J；μ 为动力粘度，$\mathrm{Pa\cdot s}$；τ 代表粘性应力张量；Pr 为普朗特参数；c_p 为比定压热容，$\mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$.

3 数值计算与分析

TVD 格式是一种有效的分辨率较高的求解高速流场的方法，该格式具有良好的精度和较高的激波分辨率. TVD 格式的数值粘性的构造是非线性的，它与数值通量的 Jacobi 矩阵的特征值相关联，能在计算中随着特征值的变化而变化并自动地调节数值粘性的大小，从而既照顾了激波又照顾了固壁边界条件. 本文利用文献[8]中方法构造出的三维粘性流动 TVD 格式，对掘进巷道瓦斯爆炸动态过程及温度场、压力场和速度场在空间的分布进行数值分析.

3.1 数值计算

数值分析的初始条件如表 1 所示. 边界条件：(1)沿管道壁面速度不产生滑移；(2)沿管壁法向压力、温度和梯度均设置为 0；(3)在对称面上对称条件或者滑移条件成立.

通过上面理论分析，利用初始条件和边界条件，对掘进巷道内瓦斯爆炸建立的三维数学模型进行数值计算，分析了瓦斯分别处于爆燃和爆轰状态时所产生的压力、温度和密度在时间和空间上的变化. 其中，n 代表计算步长；t 代表点火后经历时间，ms；对于管道，X/H 为长、高比；对于障碍物，X 为测点与圆柱体障碍物中心的距离(m)，H 为圆柱体障碍物高度(m)；压力分布采用 p/p_0，温度分布采用 T/T_0. 图 1～4 为瓦斯处于爆燃状态时管道壁面及障碍物表面压力、速度及温度分布，图 5～8 为瓦斯处于爆轰状态时管道壁面及障碍物表面压力、速度及温度分布.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

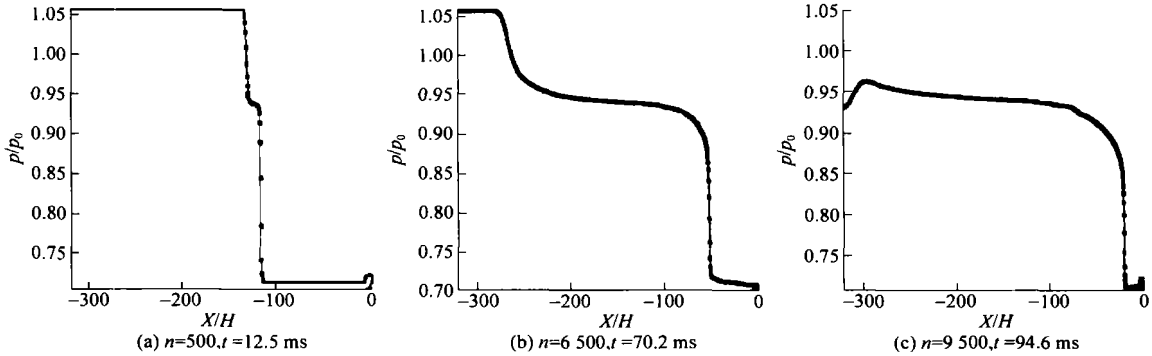

图 1　爆燃状态不同时刻压力沿管道上壁面分布

Fig·1　Pressure distribution along the tube surface during deflagration at different time

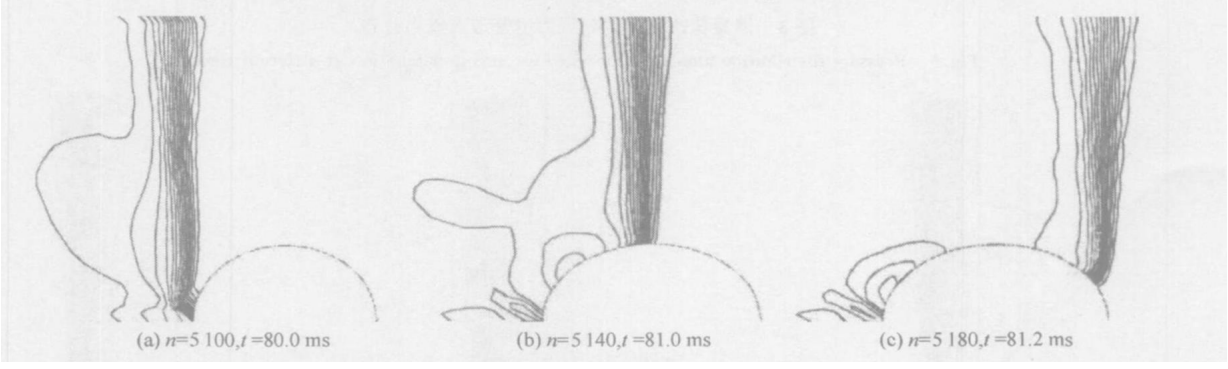

图 2　爆燃状态不同时刻障碍物表面压力等值线分布

Fig·2　Pressure distribution along the obstacle surface during deflagration at different time

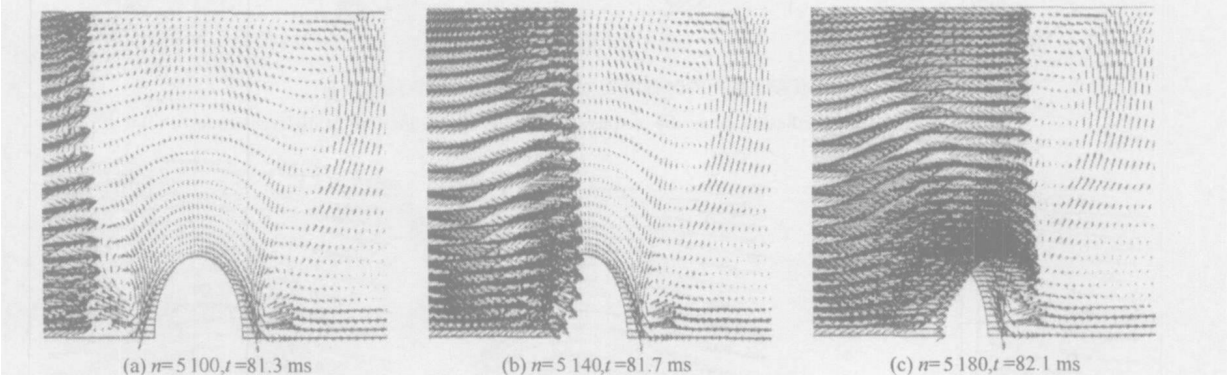

图 3　爆燃状态不同时刻障碍物表面速度场分布

Fig·3　Velocity field along the obstacle surface during deflagration at different time

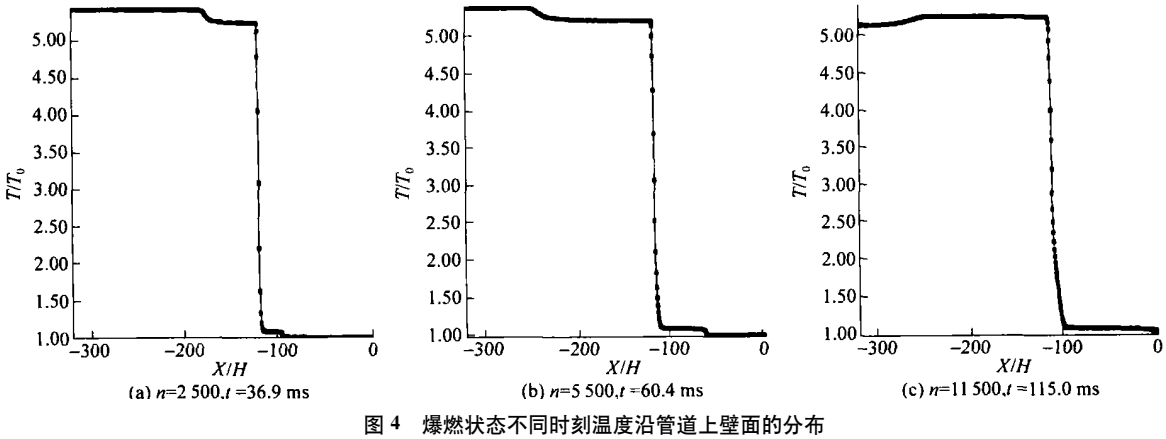

图 4　爆燃状态不同时刻温度沿管道上壁面的分布

Fig·4　Temperature distribution along the tube surface during deflagration at different time

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

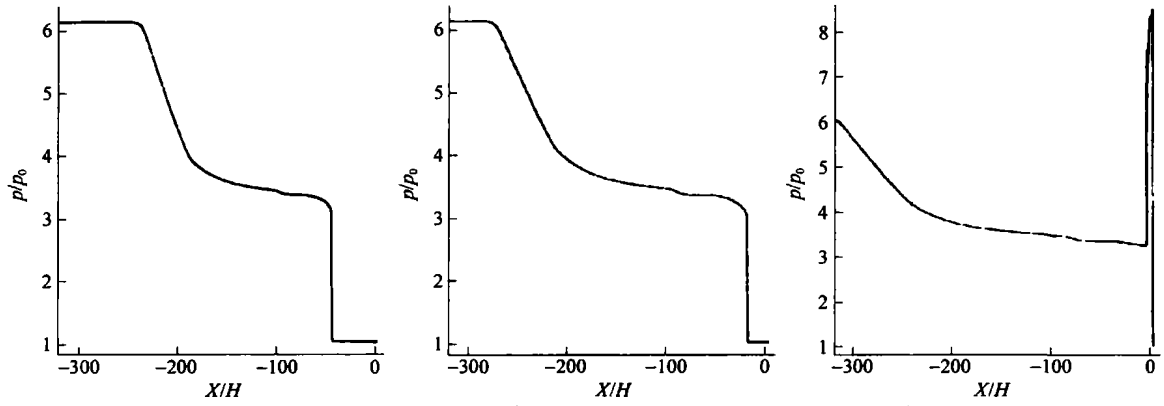

图 5 爆轰状态不同时刻压力沿管道上壁面分布

Fig·5 Pressure distribution along the tube surface during detonation at different time

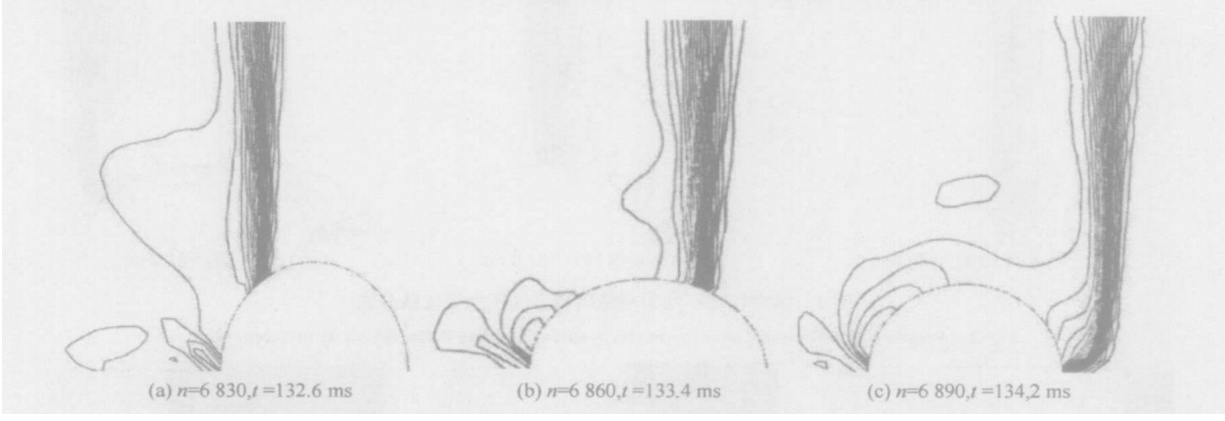

图 6 爆轰状态不同时刻障碍物表面冲击波压力等值线分布

Fig·6 Pressure distribution along the obstacle surface during detonation at different time

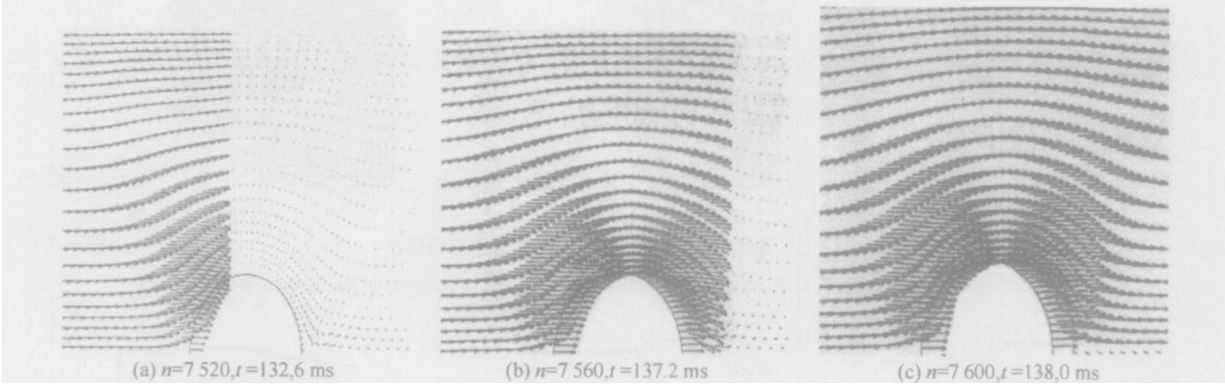

图 7 爆轰状态不同时刻障碍物表面速度场分布

Fig·7 Velocity field along the obstacle surface during detonation at different time

3.2 结果分析

(1)对于瓦斯的爆燃状态(图 1,图 2),由于燃烧区的压力不高,导致向右形成的右行冲击波传播速度慢,且冲击波前后的压力比较小,但随着计算时间的增加右行冲击波的强度也变小. 当燃烧区压力大、且趋于爆轰状态(图 5,图 6)时,障碍物附近的压力上升显著. 这表明了在非燃烧区同样存在障碍物的激励机制,但是激励程度取决于瓦斯爆炸状态和压力峰值.

(2)不同时刻压力和温度等值线的分布以及圆柱附近速度场的分布不同. 速度场(图 3 和图 7)的分布结果表明,由于计算网格的非正交性,导致附近的流场计算存在偏差,在冲击波未传到的区域存在数值较小的速度. 总之,当高温区

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

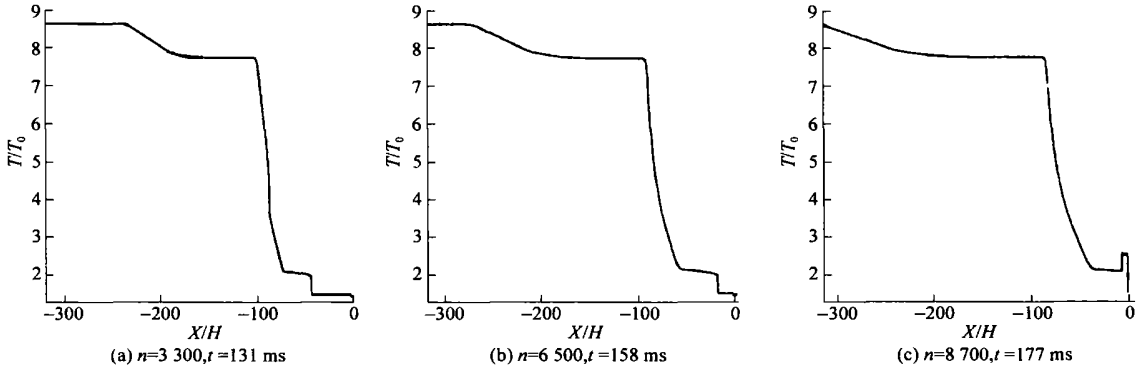

图 8　爆轰状态不同时刻温度沿管道上壁面分布

Fig·8　Temperature distribution along the tube surface during detonation at different time

的压力提高时会使得冲击波的强度变大，此时的热效应和破坏效应明显增加.

(3)与冲击波波阵面比较，温度分布(图 4，图 8)存在梯度较大的较宽区域，且右行的传播速度慢，但对压力大、温度绝对值高的爆炸，在某个时间跨度内温度变化明显. 高温区的温度对冲击波形成和传播没有贡献，却会造成火灾等非冲击波的破坏效应.

4　结论

(1)根据巷道瓦斯爆炸传播的物理机制分析和建立物理模型，利用爆炸力学、爆炸动力学和热力学基本理论，建立了以直角坐标系下掘进巷道瓦斯爆炸三维非定常控制方程组. 在数值模拟过程中，考虑了气体的粘性，建立了有限差分格式.

(2)瓦斯爆炸的传播主要是爆炸波、火焰传播和爆炸气体流动的合流动的结果. 瓦斯爆炸产生的冲击波是一种强压缩波，冲击波前后介质的状态参数发生急剧的变化，而冲击波是介质状态参数发生急剧变化的分界面. 障碍物的激励机制主要体现在障碍物的存在，引起其附近速度和压力的突然变化，而对附近温度场的变化未产生显著影响. 障碍物的激励效果与经过其附近的爆炸冲击波的压力、速度密切相关. 当冲击波压力高、传播速度大时，激励机制引起的速度增量高.

(3)由于冲击波的传播过程是不等熵过程，空气混合气体受冲击压缩后要将部分机械能转变成热能而消耗，促使维持冲击波运动的能量减少. 因此，空气冲击波在传播过程中压力必然要迅速衰减. 由于能耗，被冲击波压缩过的混合气体的传播速度和温度等参数最终也要衰减，冲击波的传播速度最终会衰减成当地声速，即冲击波终将衰减为声波.

参　考　文　献

[1]　范天吉. 煤矿瓦斯综合治理技术手册(第二卷). 吉林：吉林音像出版社，2003

[2]　张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术. 北京：煤炭工业出版社，2001

[3]　周心权，吴兵，徐景德. 煤矿井下瓦斯爆炸的基本特性. **中国煤炭**，2002，28(9)：8

[4]　居江宁，吴文权. TVD 方法在瓦斯爆炸可压缩流场中的应用. **淮南工业学院学报**，2000，20(3)：19

[5]　陈宏冀. 非定常隐式 TVD 格式的基本理论和验证. **工程热物理学报**，2004，25(1)：49

[6]　蔚淑君. 一种二阶 TVD 差分格式构造方法. **内蒙古师范大学学报：自然科学版**，2004，33(4)：382

[7]　郑华盛，赵宁. 双曲型守恒律的一种高精度 TVD 差分格式. **计算物理**，2005，22(1)：16

[8]　李国君，常建忠，丰镇平，等. TVD 格式在超音速喷管三维粘性流动求解中的应用. **应用力学学报**，1998，15(1)：95

[9]　张海波，白春华. 三维有限体积 TVD 方法与冲击波的多级扩散研究. **爆炸与冲击**，2000，20(1)：19

[10]　王嘉松，倪汉根，何友声. 双曲型线性方程三阶和四阶 TVD 格式的新构造. **上海交通大学学报**，2003，37(4)：548

[11]　徐景德. 矿井瓦斯爆炸冲击波传播规律及影响因素的研究[学位论文]. 北京：中国矿业大学，2002

(下转第 916 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Microbe catalysis co-leaching of deep sea polymetallic nodules and pyrite and its reaction kinetics model

FENG Yali[1)], *LI Haoran*[2)], *FENG Fuzhang*[1)]

1) Civil and Environmental Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) State Key Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

ABSTRACT In order to characterize the interdependence of all the factors directly in the process of bioleaching polymetallic nodules in deep sea, this paper conducted the aerobic and anaerobic leaching experiments of a microbe catalysis MnO_2—FeS_2—H_2SO_4 system. The dynamic model of valuable metals by microbe catalysis leaching under anaerobic condition, that is the shrinking core model, was established using the DLVO theory. In the oxidation—reduction process of polymetallic nodules and pyrites, the Mn-leaching mechanics under anaerobic condition was the circulate transformation between Fe^{2+} and Fe^{3+} by microbe catalysis. The microbes absorbed on the surface of mineral and accelerated the reaction process, the mineral particles got small continuously during the reaction. The further study on the experiments indicates that retract model curves fit the experimental ones nicely, which verified the reliability of the model.

KEY WORDS deep sea polymetallic nodules; pyrite; valuable metal; microbiological leaching; leaching rate; reaction kinetic model

---

(上接第 911 页)

Dynamic mathematical model and numerical analysis of gas explosion in excavation roadway

QU Zhiming[1)], *ZHOU Xinquan*[2)], *ZHANG Yikai*[3)], *XU Jingde*[4)]

1) Civil Engineering School, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

2) Resources and Safety Engineering School, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

3) Economy and Management School, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

4) Safety Training Department, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China

ABSTRACT A 3-D dynamic mathematical model of gas explosion flow field was built based on explosion mechanics, explosion dynamic mechanics and thermodynamics. The way of boundary conditions defining was studied by experiment and theory analysis, and the total variation diminishing (TVD) was used to numerically solve the mathematical model. Numerical simulation results show that barricade excitation will be formed in combustion and other areas while the pressure is increased to detonation, and the fields of pressure and velocity around the barricade is greatly changed in the whole area of explosion.

KEY WORDS gas explosion; flow field; excavation roadway; total variation diminishing; numerical analysis

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net