**文章编号**：1001-1455(2014)01-0023-05

# 巷道壁面与瓦斯爆炸相互作用的数值模拟*

马秋菊[1]，张 奇[1]，庞 磊[2]
(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081；
2. 北京市劳动保护科学研究所，北京 100054)

**摘要**：通过物理机制分析，建立合理的巷道物理模型，并对燃烧爆炸反应模型中阻力系数 $C_D$ 和湍流特征尺度 $L_t$ 进行修正，模拟实际巷道内壁粗糙情况对瓦斯爆炸传播过程的影响，为模型计算提供修正参数。研究结果表明，巷道壁面条件对瓦斯爆炸过程有很大影响；$C_D$ 和 $L_t$ 越大，爆炸峰值超压越大；当 $C_D=3$、$L_t=0.008$ 时，模拟结果与实验值的偏差最小。

**关键词**：爆炸力学；瓦斯爆炸过程；巷道物理模型；瓦斯爆炸；阻力系数；湍流特征尺度
**中图分类号**：O381；TD712.7 **国标学科代码**：1303510 **文献标志码**：A

瓦斯爆炸过程[1]中，当产生附加湍流或湍流度增加时，瓦斯爆炸火焰传播速度、放热速率增加，冲击波的强度增加[2]。因此，矿井巷道内壁的粗糙度对瓦斯气体爆炸的传播过程具有很大的影响。而现有的瓦斯爆炸数值模拟计算中，往往认为瓦斯爆炸管道是光滑的，大多只在巷道模型内部或端口处设置一定间隔的支护[3]或障碍物[4]，分析巷道系统对冲击波传播的影响。而实际矿井生产中，开掘的巷道壁面非常粗糙，这使模拟结果与实际矿井巷道瓦斯爆炸的传播规律有较大的偏差。

N. R. Popat 等[5]建立了数值模型，并通过与实验结果的对照，对 4 种计算流体力学软件(EXSIM，FLACS，EWAGAS 和 COBRA)中的网格尺寸划分、湍流燃烧速率、模型尺寸等进行了标定，使模拟结果较好地与实验结果吻合。B. Janovsky 等[6]首先用实验证明了壁面粗糙度对巷道内气体火焰加速过程有很大的影响，然后用 AutoReaGas 软件建立数值计算模型，在模型内部设置一定间隔的圆柱体障碍物模拟壁面粗糙度，通过与实验数据对比，对火焰速度因子和湍流燃烧模型常数进行标定。E. Salzano 等[7]研究了 AutoReaGas 软件中物体属性的定义、网格尺寸、模型几何尺寸及混合物活性等对模拟结果的影响，与实验对照评估了 AutoReaGas 软件在模拟气体爆炸方面的有效性。

在我国，大多数巷道或隧道采用光爆锚喷施工技术，巷道内没有因支护结构而产生的宏观凸凹壁面，但即便是锚喷支护，巷道壁面的局部仍然是粗糙的。本文中，通过壁面附近设定的反应流模型和参数修正，实现宏观光滑壁面巷道内瓦斯爆炸过程的数值模拟。拟为宏观光滑壁面约束空间内瓦斯爆炸数值模拟提供技术途径。

## 1 计算模型

### 1.1 气体爆炸模型

质量守恒、动量守恒、能量守恒和燃料质量分数守恒的控制方程分别是：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j E)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_E \frac{\partial E}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial(p u_j)}{\partial x_j}+\tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{3}$$

* **收稿日期**：2012-07-16；**修回日期**：2013-01-08
**基金项目**：国家自然科学基金项目(11372044)；高等学校博士学科点专项科研基金项目(20101101110005)
**作者简介**：马秋菊(1987— )，女，博士研究生。

$$\frac{\partial(\rho m_{\mathrm{fu}})}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j m_{\mathrm{fu}})}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_{\mathrm{fu}}\frac{\partial m_{\mathrm{fu}}}{\partial x_j}\right)+R_{\mathrm{fu}} \tag{4}$$

湍流流场用 $k$-$\varepsilon$ 湍流模型描述，该模型是气体爆炸机理中的关键因素，由两个基于湍流能量 $k$ 和耗散率 $\varepsilon$ 的方程构成：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+\tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j\varepsilon)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\varepsilon\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right)+C_1\frac{\varepsilon}{k}\tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-C_2\frac{\rho\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

$$\tau_{ij}=\mu_{\mathrm{t}}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\delta_{ij}\left(\rho k+\mu_t\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right) \tag{7}$$

式中：$\rho$ 为密度，$u$ 为速度，$t$ 为时间，$x$ 为空间坐标，$p$ 为静压，$i$、$j$ 为坐标方向；$\Gamma_*=\mu_{\mathrm{t}}/\sigma_*$，为传输特性的湍流耗散系数，$\sigma_*$ 为湍流普朗特常数；$\mu_{\mathrm{t}}=C_\mu\rho k^2/\varepsilon$，是湍流黏性系数，$k$、$\varepsilon$ 分别为湍流动能及其耗散率，常数 $C_\mu$ 取 0.09；比内能 $E=c_V T+m_{\mathrm{fu}}H_{\mathrm{c}}$，$c_V$ 为定容比热，$T$ 为温度，$m_{\mathrm{fu}}$ 为燃料的质量分数，$H_{\mathrm{c}}$ 为燃烧热，$\delta_{ij}$ 为克罗内克尔算子，$C_1$、$C_2$ 为常数。

### 1.2 模型修正理论依据

认为气体燃烧爆炸反应是单步化学反应过程，体积燃烧速率为：

$$R_{\mathrm{c}}=C_{\mathrm{t}}\rho\frac{S_{\mathrm{t}}^2}{\Gamma}R_{\min} \tag{8}$$

式中：$\rho$ 为密度，$\Gamma$ 为湍流扩散系数，$R_{\min}$ 为燃料、氧气和产物中的最小质量分数，$C_{\mathrm{t}}$ 为量纲一系数，湍流燃烧速度采用经验公式[8]描述：

$$S_{\mathrm{t}}=1.8u'^{0.412}L_{\mathrm{t}}^{0.196}S_{\mathrm{l}}^{0.784}\upsilon^{-0.196} \tag{9}$$

式中：$u'$ 为湍流强度，$\upsilon$ 为运动黏度，$S_{\mathrm{l}}$ 为特定的层流燃烧速度，$L_{\mathrm{t}}$ 为湍流特征尺度。

在建模过程中，设置两种类型的模型属性[9]，尺寸较大的物体被设置成固态属性，以提供体积堵塞；尺寸较小的物体被设置成亚网格结构属性，在数值模拟过程中，亚网格结构需要为每个计算单元合理设置参数：阻力系数 $C_{\mathrm{D}}$ 和湍流特征尺度 $L_{\mathrm{t}}$，为湍流动能方程增加阻力源项，即：

$$S_{\mathrm{KS}}=F_{\mathrm{k}}C_{\mathrm{D}}\frac{1}{2}\rho|u_i|^3 \tag{10}$$

式中：$u_i$ 为速度，$F_{\mathrm{k}}$ 为通用模型常数，加入此项主要是为了考虑阻力引起的湍流动能损失。

实际的巷道壁面局部粗糙，当巷道内为湍流流动时，若雷诺数不太大，壁面粗糙层淹没在黏性底层中，对流动不产生影响。若雷诺数较大，黏性底层变薄，壁面粗糙层几乎全部暴露在湍流核心区中，火焰面到达壁面时发生不同方向的反射，相互叠加，产生褶皱，增大了火焰面积，加速化学反应，燃烧区的向前流动传播处于较高宏观速度并且微观脉动非常强烈的湍流状态，爆炸超压迅速升高。

本文中，在实验巷道内壁上贴附小尺寸物体，设置为亚网格结构属性，模拟巷道内壁沙砾混合物涂层，通过改变所建模型的两个参数 $C_{\mathrm{D}}$ 和 $L_{\mathrm{t}}$，调整阻力及湍流尺度对模拟结果的影响，逐步与现有的实验数据吻合。

## 2 模型参数标定与分析

按文献[10]中实验结果对计算模型参数进行标定，实验中巷道断面积为 7.2 m$^2$，长 900 m，为大尺寸的方形巷道。为模拟掘进巷道，巷道的一端用防爆门封闭，另一端敞口。使用桥丝药头作为点火源，测点沿巷道两侧布置，测试段长度 400 m，测点间距 20 m。实验主要为纯瓦斯爆炸，瓦斯体积分数为 9.5%，聚积量为 100 m$^3$，聚积长度为 14 m。

设定物理模型：长 900 m 的独头巷道，横截面 2.7 m × 2.7 m，一端封闭，另一端开口，点火位置在封闭端中心。为了模拟巷道壁面对爆炸波传播的影响，紧贴巷道的两侧和顶部壁面设置厚度为 40 mm 的亚网格结构，铺满整个巷道，计算网格尺寸为 0.54 m×0.54 m×0.5 m。沿巷道中心轴每隔 10 m 布

置一个监测点，第一个监测点坐标为(10 m，1.35 m，1.35 m)。瓦斯的主要成分是甲烷，预混气体甲烷的体积分数为 9.5%，积聚区长度为 14 m。

### 2.1　亚网格结构的影响

当模型内不设置亚网格结构，也不设置其他任何障碍物时，即认为巷道壁面是光滑的；若设置亚网格结构，$C_D$ 和 $L_t$ 分别取默认值，$C_D=2$，$L_t=0.008$。模拟结果如图 1 所示。

对比这两种壁面的峰值超压计算结果，可以看到，光滑巷道壁面比粗糙壁面的峰值超压低，为约 40 kPa，且衰减缓慢，显然，这种情况与实际不符。这是由于爆炸冲击波的产生取决于湍流的诱导作用，壁面粗糙度是产生湍流的主要因素，它对瓦斯爆炸过程中冲击波的传播有重要影响。壁面光滑时，巷道内部很难产生湍流，且能量损失小；壁面粗糙时，燃烧区内部有强烈的微观脉动，在壁面附近的区域里，黏性底层很薄，壁面的粗糙层暴露在湍流区内部，使燃烧区的内部出现大的扰动，增大湍流度，增强了爆轰波的强度。

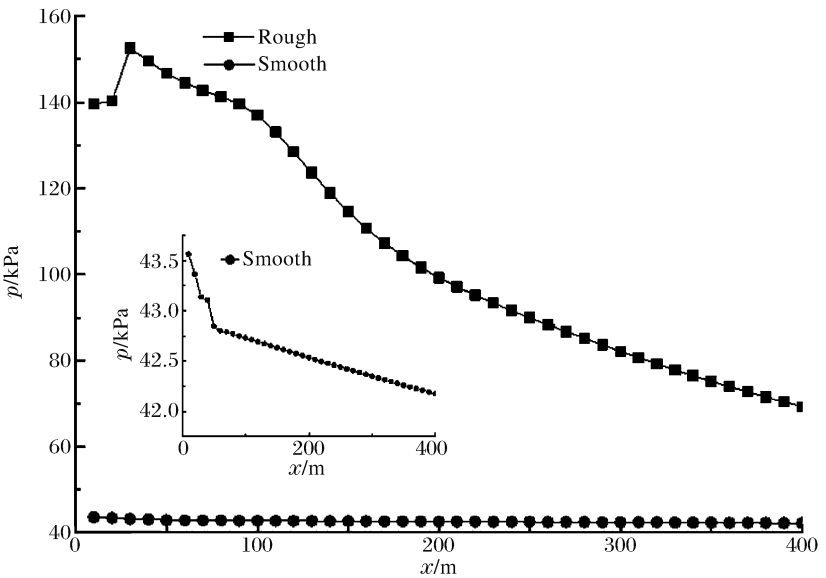



图 1　光滑壁面和粗糙壁面的超压

Fig. 1　Overpressures of rough inner surface and smooth inner surface

### 2.2　参数 $C_D$ 和 $L_t$ 的影响

改变亚网格结构参数阻力系数 $C_D$ 和湍流特征尺度 $L_t$，进行模拟计算，并与实验平均值进行对比，如图 2 所示。

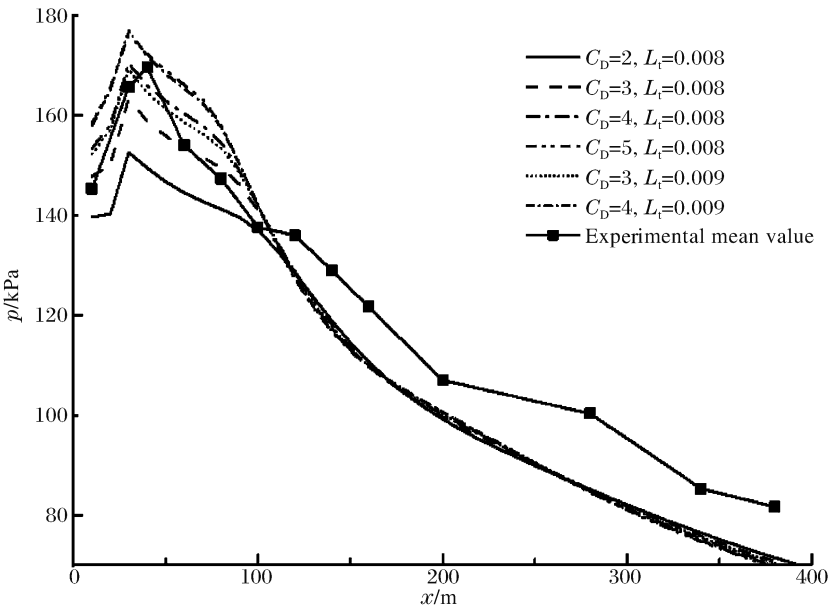



图 2　不同参数的超压

Fig. 2　Overpressures under different parameters

由图 2 可以看出，参数的改变对瓦斯爆炸近场的影响较大，而对远场的影响很小，可以不予考虑。也可以看到，参数 $C_D$ 和参数 $L_t$ 对模拟结果的影响是一致的，即取值越大，峰值超压越大，爆炸强度也越大，这是由于阻力系数 $C_D$ 反映了壁面粗糙度的大小，由式(10)可以看到，增大 $C_D$ 能增加湍流动能，湍流度增加，使反应加剧；由式(9)可以看到，增大湍流特征尺度 $L_t$ 能加快湍流燃烧速度。因此可以调整这两个参数，使模拟结果更接近于实验。此外，可以明显看出，$C_D=2$、$L_t=0.008$，$C_D=5$、$L_t=0.008$ 和 $C_D=4$、$L_t=0.009$ 的结果与实验值的偏差较大，为进一步讨论模拟结果与实验值的误差，提取 $C_D=3$、$L_t=0.008$，$C_D=4$、$L_t=0.008$ 和 $C_D=3$、$L_t=0.009$ 的数据，分别与实验结果进行对比分析，见表 1 和图 3。

**表 1 数值模拟和实验的超压**

**Table 1 Overpressures by numerical simulation and experiment**

| $x$/m | 实验 | | | | $C_D=3, L_t=0.008$ | | $C_D=4, L_t=0.008$ | | $C_D=3, L_t=0.009$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $p_{exp,1}$/kPa | $p_{exp,2}$/kPa | $p_{exp,2}$/kPa | $\bar{p}_{exp}$/kPa | $p_{sim}$/kPa | $\varepsilon$/% | $p_{sim}$/kPa | $\varepsilon$/% | $p_{sim}$/kPa | $\varepsilon$/% |
| 10 | 120 | 160 | 156 | 145.3 | 147.8 | 1.7 | 153.4 | 5.6 | 152.3 | 4.8 |
| 30 | 171 | 167 | 159 | 165.7 | 163.2 | 1.5 | 170.5 | 2.9 | 169.2 | 2.1 |
| 40 | 180 | 168 | 161 | 169.6 | 161.7 | 4.7 | 166.0 | 2.1 | 164.6 | 2.9 |
| 60 | 136 | 163 | 163 | 154.0 | 153.6 | 0.2 | 160.3 | 4.1 | 158.6 | 3.0 |
| 80 | 167 | 145 | 130 | 147.3 | 150.0 | 1.8 | 154.7 | 5.0 | 153.5 | 4.2 |
| 100 | 151 | 137 | 125 | 137.7 | 141.0 | 2.4 | 141.8 | 3.0 | 141.9 | 3.1 |
| 120 | 139 | 131 | 138 | 136.0 | 128.9 | 5.2 | 128.1 | 5.8 | 128.5 | 5.5 |
| 140 | 128 | 129 | 130 | 129.0 | 118.2 | 8.4 | 117.3 | 9.1 | 117.7 | 8.8 |
| 160 | 118 | 126 | 121 | 121.7 | 110.0 | 9.6 | 109.8 | 9.8 | 110.0 | 9.6 |
| 200 | 90 | 125 | 106 | 107.0 | 99.7 | 6.8 | 100.2 | 6.4 | 100.2 | 6.4 |
| 280 | 98 | 118 | 85 | 100.3 | 85.1 | 15.2 | 84.8 | 15.5 | 85.1 | 15.2 |
| 340 | 66 | 110 | 80 | 85.3 | 75.9 | 11.0 | 75.3 | 11.7 | 75.6 | 11.4 |
| 380 | 74 | 95 | 76 | 81.7 | 70.8 | 13.3 | 70.1 | 14.2 | 70.4 | 13.8 |

由表 2 和图 3 可以看出，数值模拟和实验得到的峰值超压尽管存在一定差异，但随传播距离的变化趋势非常接近。造成冲击波超压误差的原因主要包括以下几方面：首先，数值模拟与真实环境存在一定差异，如数值模拟中认为壁面是刚性、绝热的，而实际管道壁面在瓦斯爆炸过程中存在微小的变形及一定的热量损失，这些因素对冲击波的传播都有影响。其次，点火源参数及位置、甲烷浓度、甲烷与空气预混气体混合的均匀程度等因素对误差也有一定影响。

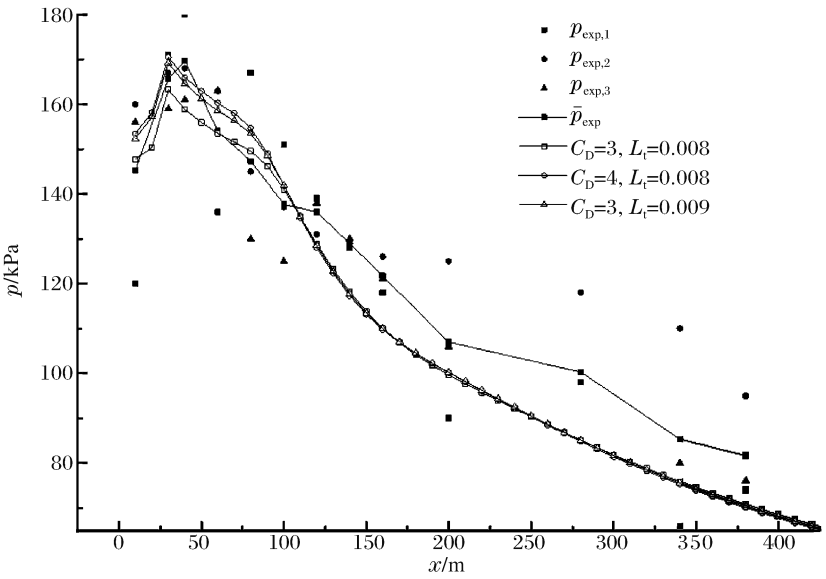



图 3 数值模拟和实验的超压

Fig. 3 Overpressures by numerical simulation and experiment

对比这 3 组模拟结果可以得出，$C_D=3$、$L_t=0.008$ 的结果与实验值的误差最小，爆炸近场的误差都在 5% 以下，即 $C_D=3$、$L_t=0.008$ 时，模拟结果与实验值最接近。

## 3 结 论

针对光爆锚喷支护巷道（宏观光滑局部粗糙），通过在壁面上贴附亚网格结构模拟巷道锚喷层，并修正模型参数，对宏观光滑壁面巷道内瓦斯爆炸过程进行了数值模拟，解决了长期以来光滑巷道内瓦斯爆炸数值模拟结果与实际差异较大的问题。得到以下结论：(1)巷道壁面条件对瓦斯爆炸过程有很大的影响，光滑巷道壁面的瓦斯爆炸峰值超压比粗糙壁面低，且冲击波衰减缓慢；(2)模型参数的改变对瓦斯爆炸近场的影响较大，而对远场几乎没有影响；(3)参数 $C_D$ 和 $L_t$ 对模拟结果的影响一致，即取值越大，峰值超压越大，爆炸强度也越大；(4)当阻力系数 $C_D=3$、湍流特征尺度 $L_t=0.008$ 时，模拟结果与实验值最接近，爆炸近场的模拟结果与实验数据的误差最小，都在 5% 以下。

## 参考文献：


[1] Bjerketvedt D, Bakke J R, van Wingerden K. Gas explosion handbook[J]. Journal of Hazardous Materials, 1997, 52(1):1-150.

[2] Peraldi O, Knystautas R, Lee J H. Criteria for transition to detonation in tubes[J]. Symposium (International) on Combustion, 1988,21(1):1629-1637.

[3] Pang L, Zhang Q, Wang T, et al. Influence of laneway support spacing on methane/air explosion shock wave[J]. Safety Science, 2012,50(1):83-89.

[4] 曲志明.掘进巷道瓦斯爆炸数值及实验分析[J].湖南科技大学学报:自然科学版,2008,23(2):9-14.
Qu Zhi-ming. Numerical and experimental analysis of gas explosion in the excavation[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2008,23(2):9-14.

[5] Popat N R, Catlin C A, Arntzenb B J. Investigations to improve and assess the accuracy of computational fluid dynamic based explosion models[J]. Journal of Hazardous Materials, 1996,45(1):l-25.

[6] Janovsky B, Selesovsky P, Horkel J, et al. Vented confined explosions in Stramberk experimental mine and Auto-ReaGas simulation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006,19(2/3):280-287.

[7] Salzano E, Marra F S, Russo G, et al. Numerical simulation of turbulent gas flames in tubes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2002,95(3):233-247.

[8] AutoReaGas: Reactive gas dynamics and blast analysis software user manual: Version 3.1[M]. Century Dynamics and TNO, 2002.

[9] AutoReaGas: Interactive software theory manual[M]. Century Dynamics and TNO, 2002.

[10] 吴兵.矿井半封闭空间瓦斯爆燃过程热动力学研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2003.


# Numerical simulation on interaction between laneway surface and methane explosion*


Ma Qiu-ju[1], Zhang Qi[1], Pang Lei[2]

(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing* 100054, *China*)



**Abstract**: To investigate the effects of the laneway surfaces on the methane explosion, the mechanism of the methane explosion was analyzed and a physical model for the laneway was proposed. Based on the above, numerical simulations were conducted to explore the effects of the inner surface roughness on the explosion propagation by modifying the drag coefficient and the turbulent length scale in the reaction model of the methane explosion. The simulated results display that the laneway surface can influence evidently the methane explosion in it. The higher the values of the drag coefficient and the turbulent length scale, the higher the peak overpressure of the methane explosion. And the simulated results correspond best to the experimental data when the drag coefficient and the turbulent length scale are 3 and 0.008, respectively.



**Key words**: mechanics of explosion; methane explosion process; physical model of laneway; methane explosion; drag coefficient; turbulent length scale


---


* Received 16 July 2012; Revised 8 January 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (11372044)


Corresponding author: Ma Qiu-ju, maqiuju@bit.edu.cn



(责任编辑　丁　峰)