

文章编号: 1001-1455(2010)05-0529-06

# 瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸的数值模拟\*

李润之

(煤炭科学研究总院重庆研究院, 重庆 400037)

**摘要:** 建立了描述瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘参与爆炸的物理和数学模型, 借助流场模拟平台, 对瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘参与爆炸的过程进行了数值模拟; 并把模拟值与实验值进行了对比; 对爆炸过程中的速度场和温度场进行了深入的分析。通过比较分析爆炸压力、速度场以及温度场, 认为模拟结果清楚地展现了沉积煤尘的扬起和爆炸过程, 达到了瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸数值模拟的要求。

**关键词:** 爆炸力学; 爆炸压力; 瓦斯爆炸; 煤尘爆炸; 温度场; 速度场

**中图分类号:** O381; X932

**国标学科代码:** 130·3520

**文献标志码:** A

## 1 引言

瓦斯煤尘爆炸事故是我国煤矿最严重的事故之一, 在重特大事故中, 瓦斯煤尘爆炸事故的死亡人数已经多年占据首位<sup>[1]</sup>。在煤矿瓦斯煤尘爆炸事故中, 往往是先瓦斯爆炸, 然后卷扬起沉积煤尘形成煤尘云, 同时, 瓦斯爆炸火焰点爆煤尘云, 使得煤尘参与爆炸, 造成更大的人员伤亡和财产损失。可见, 研究瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸的机理, 对预防煤矿瓦斯煤尘爆炸事故的发生、发展至关重要。

为了揭示瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸的机理, 许多学者对快速流动的气体卷扬沉积煤尘现象进行了实验和理论研究, 探讨了气流与沉积煤尘床相互作用的气体动力学机理及其诱导的化学反应历程<sup>[2-6]</sup>。这些研究工作使人们对气体诱导粉尘爆炸现象得到了一些初步认识。

FLUENT 是专门用于计算流体流动和传热问题的程序, 涉及流体、热传递及化学反应等的工程问题, 都可以用 FLUENT 进行解算。为了更加深入地研究瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸的机理, 本文中借助 FLUENT 流场模拟平台对瓦斯爆炸诱导沉积煤尘卷扬并爆炸的过程进行数值模拟, 并对其速度场和温度场进行深入分析。

## 2 爆炸模型

瓦斯煤尘爆炸过程数值模拟结果的正确性依赖于理论模型和数值计算方法等 2 方面, 而理论模型是数值模拟的基础。

### 2.1 物理模型

瓦斯煤尘爆炸过程复杂, 为了使问题简化, 建立了井下半封闭空间瓦斯煤尘爆炸的物理模型作为研究基础:

- (1) 以甲烷的物性作为瓦斯的平均物性, 瓦斯体积分数取最佳爆炸体积分数 9%, 最大的可燃气体体积为 200 m<sup>3</sup>;
- (2) 爆炸发生在一端开口、一端封闭的平直巷道中;
- (3) 预混气体的初始状态为常温、常压;
- (4) 爆炸的点燃过程简化为热点燃;

\* 收稿日期: 2009-07-13; 修回日期: 2009-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50874062); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005cb221500)

作者简介: 李润之(1981—), 男, 博士研究生。

(5)煤尘铺设在瓦斯-空气混合气封闭区域前 50~100 m,体积质量为约 300 g/m<sup>3</sup>。

## 2.2 数学模型

### 2.2.1 连续相流场模型

采用总量  $E = e + u_i u_i / 2$  作为能量的度量,建立  $k-\epsilon$  湍流模型的连续相控制方程组,包括质量方程、动量方程、组分方程、能量方程、 $k$  方程、 $\epsilon$  方程,分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho f_s) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i f_s) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_c \frac{\partial f_s}{\partial x_j} \right) - \omega_s \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j (\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i \tau_{ij,e}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k_c \frac{\partial T}{\partial x_j} + \sum h_s J_s \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_c \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\epsilon \mu_c \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \quad (6)$$

式中:  $\tau_{ij,e}$  为湍流中的总粘性力,包括分子粘性力和湍流粘性力;  $\omega_s$  为组分方程的修正项;  $E$  是总能;  $k_c$  是热传导系数;  $\frac{\partial}{\partial x_j} \sum h_s J_s$  是由于组分扩散而导致的对焓的运输的影响;  $G_k$  是由层流速度梯度而产生的湍流动能,  $Y_M$  是由于在可压缩湍流中过渡的扩散产生的波动;  $C_1$ 、 $C_2$  是常量,  $\alpha_k$  和  $\alpha_\epsilon$  是  $k$  方程和  $\epsilon$  方程的湍流 Prandtl 数,  $R_\epsilon$  为  $\epsilon$  方程的修正项。

### 2.2.2 瓦斯爆炸燃烧模型

燃烧模型采用 2 步反应模型,反应 1、反应 2 分别为



### 2.2.3 颗粒相模型

煤尘爆炸过程中的非连续相—沉积煤尘在爆炸过程中将经历卷扬、释放挥发份、焦炭燃烧等复杂过程,一般的多相流模型对该过程的模拟有较大的难度,因此采用颗粒相模型对煤尘进行直接模拟。

颗粒的作用力平衡方程在笛卡尔坐标系下的形式( $x$  方向)为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (9)$$

式中:  $F_D(u - u_p)$  即为颗粒所受到的气动阻力,在 FLUENT 流体模拟里面称之为颗粒的质量曳力,  $F_D$  为相间速度差形成的作用力,为

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (10)$$

式中:  $u$  为流体相速度,  $u_p$  为颗粒速度,  $\mu$  为流体动力粘度,  $\rho$  为流体密度,  $\rho_p$  为颗粒密度,  $d_p$  为颗粒直径,  $Re$  为相对雷诺数(颗粒雷诺数),  $C_D$  为曳力系数。

## 3 瓦斯煤尘爆炸的数值模拟

### 3.1 建模和分网

采用流场模拟的方法来模拟瓦斯、煤尘的爆炸过程,爆炸发生场所的几何建模和计算网格的划分是必不



图 1 平面局部网格的示意图

Fig. 1 Sketch map of local mesh

可少的前处理工作。GAMBIT 是专用前处理软件包,用来为 CFD 模拟生成网格模型,由它所生成的网格可供多种 CFD 程序或商用 CFD 软件所使用,它主要功能包括 3 个方面:构造几何模型、划分网格和指定边界。以 GAMBIT 为基础进行爆炸场所的几何建模和网格划分,几何模型为平面 2 维模型,共划分了 3 个区域,分别为点火区域、瓦斯空气混合气密封区域和煤尘铺设区域,局部网格划分如图 1 所示。

### 3.2 初始及边界条件

根据所建立的瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸物理模型,确定其初始条件与边界条件。

#### 3.2.1 初始条件

点火区域和传播区域的初始压力均为 0;点火区域和传播区域的初始温度分别为 2 000 和 300 K;点火区域和传播区域的初始速度均为 0;瓦斯的初始体积分数为 9%。煤尘的初始条件:煤尘颗粒直径为 50  $\mu\text{m}$ ,煤尘总质量为 42.22 kg,煤尘密度为 1 400  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,蒸发温度为 400 K,挥发分质量分数为 41%,固定碳质量分数为 52.5%。

#### 3.2.2 边界条件

2 边及封闭端离散相壁面边界选为反射模型,不考虑壁面热传导,为静止无滑移剪切壁面。出口边界类型设为压力出口边界,离散相边界类型为逃逸类型。

### 3.3 数值模拟结果与实验结果的对比

地下大型实验巷道中,瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸的实验是将煤尘同时铺设在地面和煤尘架上,煤尘铺设距离较长(38~160 m),而且在实际规模的实验巷道中进行,不确定的影响因素很多,进行模拟研究,需要对整个过程进行简化处理。为了分析沉积煤尘的扬起过程,将煤尘全部铺设在地面上,煤尘体积质量按 300  $\text{g}/\text{m}^3$  计算,数值模拟结果与实验结果存在差异,但在可接受的误差范围内。

图 2 列出了瓦斯煤尘爆炸和单纯的瓦斯爆炸过程中爆炸压力最大时各测点压力数值模拟结果和实验结果<sup>[7]</sup>,从图中可以看出,数值模拟结果与实验结果非常接近,说明达到了瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸数值模拟的要求。

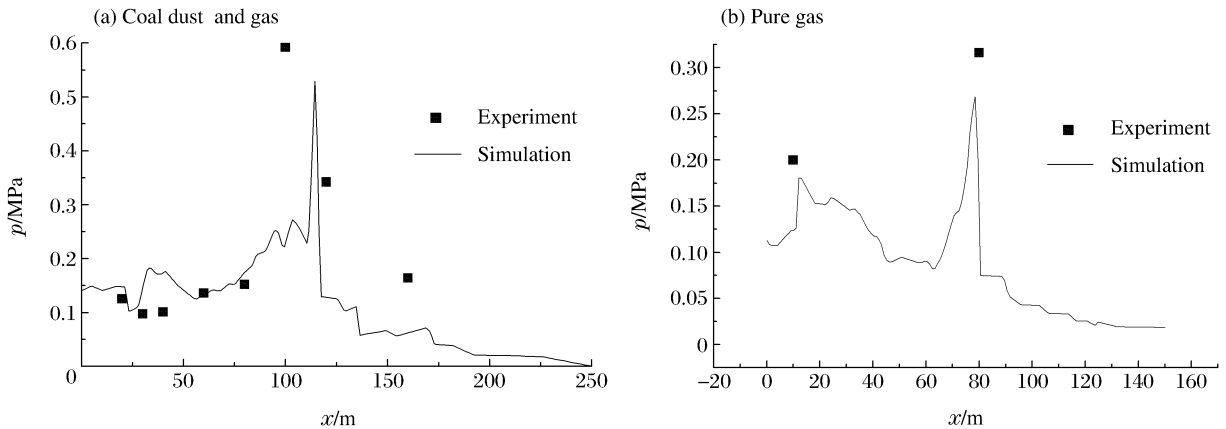


图 2 爆炸压力最大时各测点压力

Fig. 2 Pressures at the survey points in the case of the highest explosion pressure

### 3.4 扬起过程分析

利用以上计算方法对瓦斯爆炸扬起沉积煤尘的过程进行了数值模拟,不同时间点煤尘的扬起情况如图 3 所示。从图中可以看出,单个沉积煤尘颗粒上扬过程经历了启动、加速和减速等 3 个阶段。

图 3(a)~(b)所示为启动阶段,在此阶段,沉积煤尘受到瓦斯爆炸压力波的冲击,使近底板流体有较大的速度梯度,煤尘颗粒受到的扬升动力大于所需的最小动力,煤尘颗粒开始扬起。

冲击波过后,扬起的煤尘颗粒在波后湍流效应的影响下,扬起速度逐渐加大,这是煤尘扬起的加速阶段,如图 3(c)~(e)所示。

当煤尘颗粒上升到一定高度时,气流剪切力减小,使上升作用力减小,上扬速度有所减缓。当煤尘

扬起到巷道顶部后,或黏附在巷道顶部,或发生折返。此阶段称为减速阶段,如图3(f)~(g)所示。整个巷道的煤尘在上扬的过程中,由于巷道底部的湍流效应以及剪切力都比空间中的大,所以巷道底部煤尘上扬速度大于巷道空间中煤尘的上扬速度,这使得煤尘在巷道内能够充分混合,充满巷道。

整个过程,煤尘在爆炸冲击波的带动下沿巷道传播,如图3(h)~(j)所示。就整个煤尘层的扬起过程来说,它是在冲激波及湍流等的相互影响下的1个紊乱的扬起过程。

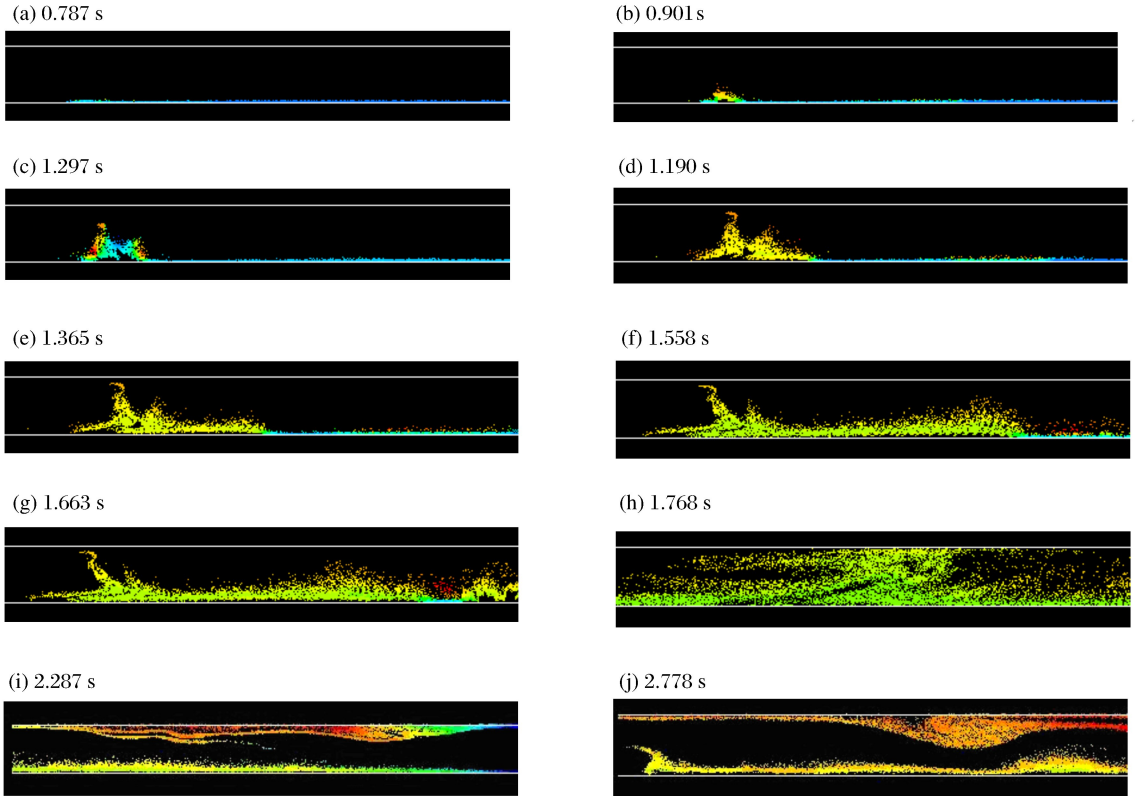


图3 沉积煤尘被扬起的情况

Fig. 3 Kicking-up situation of deposited coal dust

### 3.5 煤尘速度场分析

瓦斯爆炸后,冲击波经过沉积的煤尘时会引起沉积煤尘上扬,使沉积煤尘处于飞扬的状态。在此过程中,煤尘一边上扬,一边在冲击波及波后暴风的带动下沿巷道向前运动。在此将煤尘的运动轨迹分为水平方向和垂直方向,沉积煤尘在开始上扬时,其垂直方向上的速度是相当快的,通过数值模拟得出,垂直方向上的速度最高可达几十米甚至上百米每秒。且上部煤尘先上扬,上扬速度快,下部煤尘后上扬,上扬速度慢。

图4为爆炸压力最大时煤尘垂直方向的速度XY散点图,从图中可以看出,煤尘扬起后其速度大部分集中

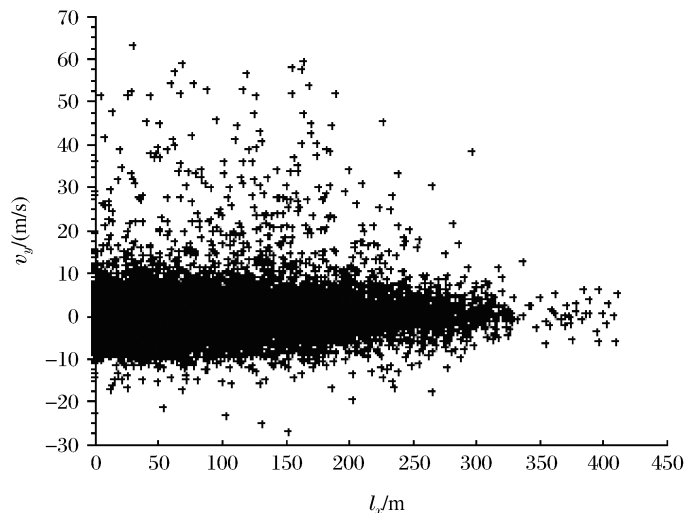


图4 爆炸压力最大时煤尘垂直方向速度XY散点图

Fig. 4 XY scatter plot of coal dust velocity in the vertical orientation in the case of the highest explosion pressure

在 $-10\sim 10\text{ m/s}$ 的范围内,说明煤尘因为受力大小不同以及湍流的影响,运动方向有上有下,基本维持在一定的速度范围内,这使煤尘在巷道内能够充分混合,充满整个巷道。在本文的数值模拟条件下,爆炸压力达到最大时,煤尘垂直方向的速度分布在 $-27\sim 63\text{ m/s}$ 的范围内,水平方向的速度分布在 $-55\sim 172\text{ m/s}$ 的范围内。

### 3.6 煤尘温度场分析

图5为爆炸压力最大时煤尘粒子温度的XY散点图。从图中可以看出,煤尘扬起并爆炸后的温度分布在 $310\sim 2\,900\text{ }^\circ\text{C}$ 的范围内,大部分煤尘粒子的温度分布在 $1\,700\sim 2\,700\text{ }^\circ\text{C}$ 之间。关于煤尘的引燃温度,同样是随煤尘的性质和实验条件的不同而有很大的差异,在国内外的实验中得出了几种引燃温度: $610$ 、 $650\sim 700$ 、 $700\sim 800$ 、 $820\sim 840$ 、 $850\sim 1\,015\text{ }^\circ\text{C}$ 。图5中显示,部分煤尘粒子的温度分布在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,认为这部分煤尘粒子在巷道底部未被扬起,从煤尘的引燃温度来看,说明这部分煤尘粒子并没有参与爆炸,而只受热分解释放出挥发分气体。

实际的瓦斯煤尘爆炸过程中,由于受到多种因素的影响,如燃烧峰面的热损失、边界层的能量损失、燃烧区域与巷道壁面的热交换等,这些热损失可以使煤尘爆炸的强度减弱,温度也会相应降低。有资料显示,煤尘爆炸后的瞬时温度可高达 $2\,300\sim 2\,500\text{ }^\circ\text{C}$ ,这与模拟过程中所得数值基本相符。

## 4 结束语

(1)建立了瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘参与爆炸的物理和数学模型,借助流场模拟平台,对瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘参与爆炸的过程进行了数值模拟,模拟结果与实验结果非常接近,说明达到了瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸数值模拟的要求。

(2)从沉积煤尘扬起情况图以及煤尘速度场的分布中可以看出沉积煤尘的扬起过程经历了启动阶段、加速阶段和减速阶段;垂直方向的速度比水平方向的速度慢;压力达到最大时,煤尘垂直方向的速度分布在 $-27\sim 63\text{ m/s}$ 的范围内,水平方向的速度分布在 $-55\sim 172\text{ m/s}$ 的范围内。

(3)通过对瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸的温度场的分析可知,大部分煤尘粒子的温度分布在 $1\,700\sim 2\,700\text{ }^\circ\text{C}$ 之间;部分煤尘粒子的温度在 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,这部分煤尘粒子是在巷道底部未被扬起,没有参与爆炸,而是只受热分解,释放出挥发分气体。

### 参考文献:

- [1] 司荣军,王春秋,张延松,等. 瓦斯煤尘爆炸传播研究综述及展望[J]. 矿业安全与环保,2007,34(1):67-69.  
SI Rong-jun, WANG Chun-qiu, ZHANG Yan-song, et al. Review and prospect for study of gas and coal-dust explosion propagation[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007,34(1):67-69.
- [2] 司荣军. 矿井瓦斯煤尘爆炸传播实验研究[J]. 中国矿业,2008,17(2):81-84.  
SI Rong-jun. Experiment study on the propagation laws of gas and coal dust explosion in coal mine[J]. China Min-

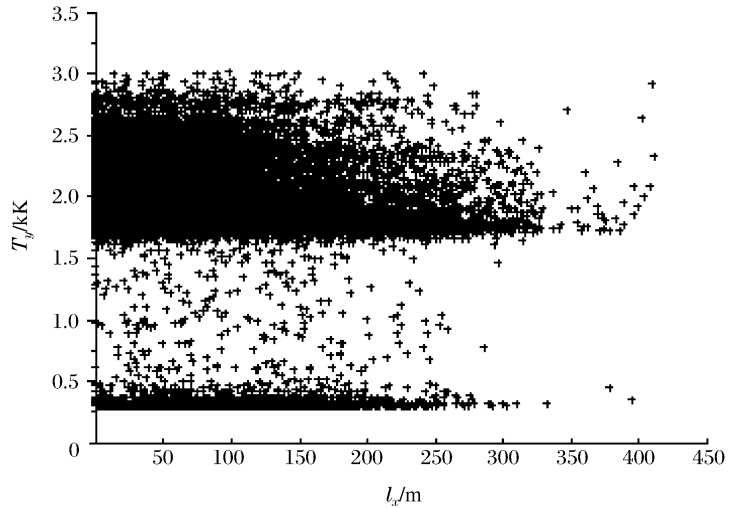


图5 爆炸压力最大时煤尘温度XY散点图  
Fig.5 XY scatter plot of coal dust temperature in the vertical orientation in the case of the highest explosion pressure

ing Magazine, 2008,17(2):81-84.

- [3] Torrent J G, Fuchs J C. Flammability and explosion propagation of methane/coal dust hybrid mixtures[C]//Proceedings of the 23rd International Conference of Safety in Mines Research Institute. Washington DC, 1989:823-830.
- [4] 费国云. 独头巷道中瓦斯爆炸引爆沉积煤尘的试验[J]. 矿业安全与环保, 1997, 24(4):16-19.  
FEI Guo-yun. Experiments on detonation of deposited coal dust by gas explosion in a blind roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 1997, 24(4):16-19.
- [5] 张华, 金龙哲, 张文平. 煤尘与瓦斯混合爆炸范围的确定[J]. 煤矿安全, 1998, 29(9):27-29.  
ZHANG Hua, JIN Long-zhe, ZHANG Wen-ping. Scope determination of gas and coal dust mixed explosion[J]. Safety in Coal Mines, 1998, 29(9):27-29.
- [6] 严楠, 浦以康. 封闭圆柱形粉尘爆炸罐内扬尘诱导湍流特性的确定[J]. 流体力学实验与测量, 1999, 13(3):59-64.  
YAN Nan, PU Yi-kang. Determination of dispersion induced turbulent feature in a closed cylindrical explosion bomb[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 1999, 13(3):59-64.
- [7] 司荣军. 矿井瓦斯煤尘爆炸传播规律研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2007.

## Numerical simulation of coal dust explosion induced by gas explosion \*

LI Run-zhi

(Chongqing Institute, China Coal Research Institute, Chongqing 400037, China)

**Abstract:** Physical and mathematical models were developed to describe the kicking-up and explosion process of deposited coal dust due to gas explosion. Based on the developed models, the process, in which the deposited coal dust was kicked up and involved in gas explosion, was numerically simulated by using the commercial computational fluid dynamics (CFD) code, FLUENT. The simulated results were compared with the experimental results, and the velocity and temperature fields in the explosion process were analyzed. Analyses on the explosion pressure, velocity and temperature fields display that the simulated results can expressly exhibit the kicking-up and explosion process of deposited coal dust.

**Key words:** mechanics of explosion; explosion pressure; gas explosion; coal dust explosion; temperature field; velocity field

\* Received 13 July 2009; Revised 9 November 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (50874062);

the National Basic Research Program of China (973 Program) (2005cb221500)

Corresponding author: LI Run-zhi, runzhi\_li@126.com