

文章编号: 1000-0887(2004) 12-1271-07

# 泄爆诱导的湍流、旋涡和外部爆炸

姜孝海, 范宝春, 叶经方

(南京理工大学 动力学院, 南京 210094)

(林建忠推荐)

摘要: 基于  $k_\epsilon$  湍流模型和 Eddy\_dissipation 燃烧模型, 采用同位网格 SIMPLE 算法, 对充满甲烷\_氧气预混气的带导管柱形泄爆容器向空气中泄爆的情形进行了数值模拟。根据计算结果, 分析了泄爆后外流场中可燃云团、火焰和压力的变化过程。结果表明, 外部爆炸是因射流火焰点燃高压区中的可燃云团, 从而引起的剧烈湍流燃烧所致。同时还讨论了外流场湍流和涡量的分布特征。射流火焰进入外部可燃云团后, 湍流主要分布在平均动能梯度较大的区域, 而不在火焰阵面上。涡量分布主要受斜压效应的影响, 在压力和密度梯度斜交区域, 其值较大。

关键词: 爆炸; 泄爆; 外部爆炸

中图分类号: O389; X932 文献标识码: A

## 引 言

泄爆是通过泄爆容器的泄爆口卸去高压以防爆炸的技术, 是一种被广泛采用的爆炸防治手段。如何设计具有最佳效果的泄爆容器是人们长期探索的问题。泄爆现象是很复杂的, 实际过程中, 有时会出现意外, 如泄爆后, 出现外部爆炸。因此, 研究泄爆外流场, 了解外部爆炸特性, 对于泄爆容器的设计和周围环境的防护都具有一定的指导意义。

泄爆后, 泄爆容器内外流场均发生剧烈的物理化学变化。对于内流场, 人们进行了很多实验和理论研究<sup>[1~3]</sup>。由于试验中的实际困难和某些不确定性, 外流场的研究则相对较少。Cooper 等人<sup>[2]</sup>将泄爆后容器内仍产生超压的机制分为 4 种, 并对此进行了讨论, 但未涉及容器的外流场。Catlin<sup>[4]</sup>对内外流场为同一种可燃气体的泄爆情形进行了实验研究, 讨论了火焰射流与外部云团的变化过程。但对泄爆过程中射流、湍流和旋涡的分布变化特性以及外部爆炸现象没有进行系统的讨论。

本文基于  $k_\epsilon$  湍流模型和 Eddy\_dissipation 燃烧模型, 采用同位网格的 SIMPLE 算法, 对柱形容器泄爆后的内外流场进行了数值模拟。根据计算结果, 讨论了外流场中的可燃云团、射流火焰和压力分布的变化与发展, 以及湍流和旋涡的形成和分布, 分析了产生外部爆炸的原因。

收稿日期: 2003\_01\_13; 修订日期: 2004\_06\_29

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助(2001CB409600); 国家自然科学基金资助项目(19832030)

作者简介: 姜孝海(1975), 男, 湖北人, 博士(E-mail: xhjiang\_988@yahoo.com.cn);

范宝春(1945), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师(联系人, Tel: + 86\_25\_84315493; Fax: + 86\_25\_84315962; E-mail: bcfan@mail.njust.edu.cn)

# 1 数学模型

## 1.1 基本方程

采用  $k_\epsilon$  湍流模型, 有守恒方程

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

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_i u_j - \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu S_{u_i}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j h - \frac{\epsilon}{h} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \frac{Dp}{Dt} + \nu S_h, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho Y_{fu}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j Y_{fu} - \frac{\epsilon}{Y_{fu}} \frac{\partial Y_{fu}}{\partial x_j} \right) = \nu R_{fu}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j k - \frac{\epsilon}{h} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \nu (G - \epsilon), \quad (5)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_j \epsilon - \frac{\epsilon}{x_j} \right) = C_1 G \frac{\epsilon}{k} - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (6)$$

其中,  $\rho, p, h$  分别表示密度、压力和总焓,  $u_i$  为  $i$  方向的速度分量,  $Y_{fu}$  为燃料质量分数,  $k$  和  $\epsilon$  分别为湍流脉动动能和湍流耗散率,  $\bar{\rho}$  和  $\nu$  分别为面空度和体空度, 用以描述障碍物和壁面的影响

$$S_{u_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \epsilon \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + k \right),$$

$$S_h = \frac{Dp}{Dt} + \bar{\rho} \frac{\partial u_i}{\partial x_j},$$

$$\bar{\rho} = \rho \left( e \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho e \frac{\partial u_k}{\partial x_k},$$

$$G = \rho \left( e \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \rho \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left( \epsilon \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + k \right),$$

$$\epsilon = \nu + C_D \frac{k^2}{k}, \quad \nu = \frac{\epsilon}{k},$$

其中  $\nu$  为分子粘性,  $C_D = 0.09$ ,  $C_D$  为 Prandtl/Schmidt 数,  $\nu$  为  $\epsilon$  的扩散系数

湍流存在时, 时均反应速率采用 Eddy\_dissipation(旋涡耗散)反应模型<sup>[5]</sup>

$$R_{fu} = A \min \left[ Y_{fu}, \frac{Y_{O_2}}{O_2} \right] \frac{\epsilon}{k}, \quad (7)$$

其中,  $A$  为常数,  $O_2$  为氧气的化学反应计量系数

化学组份因燃烧而变化, 混合物的状态方程为

$$p = \frac{M_{mix}}{R_g} \frac{\rho}{T}, \quad (8)$$

其中, 平均分子量  $M_{mix} = 1 / \sum_i (Y_i / M_i)$ ,  $M_i$  为组份  $i$  的分子量

混合物总比焓为

$$h = C_{p,mix} T + Y_{fu} H_{fu} \quad (9)$$

这里  $C_{p,mix} = \sum_i Y_i C_{p,i}$ ,  $C_{p,i} = a_i + b_i T$ ; 其中  $C_{p,i}$  为组份  $i$  的定压比热,  $a_i$  和  $b_i$  为常数,  $H_{fu}$  为燃料生成焓

## 1.2 障碍物与壁面

障碍物将导致流通面积的堵塞和流通区域的减小(如泄爆容器的管壁和泄爆导管外的法兰盘等),故在守恒方程中引入面空度  $\alpha$  和体空度  $\beta$ ,以描述这种影响。同时,障碍物和壁面增加流场的阻力和改变流场结构,此类影响用壁面函数来处理,其中

壁面剪应力:

$$\tau_w = \frac{(C_D^{1/2} k)^{0.5} u_p}{\ln(E x^+)};$$

壁面热流:

$$q_w = \frac{C_{p, \text{mix}} (C_D^{1/2} k)^{0.5} (T_p - T_w)}{h(\ln(E x^+) + P)},$$

$$P = 9.24[(h, \nu/h)^{0.75} - 1], \quad x^+ = \frac{(C_D^{1/2} k)^{0.5} x}{\nu};$$

下标  $w, l$  分别表示壁面和层流,常数  $E = 9.0, \nu = 0.42$

## 1.3 计算方法

本文采用同位网格 SIMPLE 算法<sup>[6]</sup>,即流场中各个变量和物性值置于同一套网格中,界面速度通过插值求得。方程在计算域的离散胞格中积分后,得到通量  $F_i$  的离散方程

$$A_P \rho_P = \sum_i A_i \rho_i + S_C + b \rho_P^0, \quad (10)$$

其中

$$A_i = \left[ \frac{1}{x_i} + \alpha_i u_i \right] A_i, \quad A_P = \sum_i A_i + b - S_P, \quad b = \rho_P^0 V / \Delta t;$$

下标  $P$  表示被积胞格,上标  $0$  表示前一时刻,  $V$  为胞格体积,  $\Delta t$  为时间步长。下标  $i$  表示相邻胞格,  $A_i$  为  $i$  界面的面积,  $x_i$  为相邻格点间的步长。  $\alpha_i$  表示上风格式,当界面法向与相应坐标轴同向时,  $\alpha_i$  内取负值,反之取正值。

界面速度为  $u_i^f = \hat{u}_i^f + d_i(p_i - p_{i+1})$ , 其中

$$\hat{u}_i^f = \hat{u}_i \frac{x_i^+}{x_i} + \hat{u}_{i+1} \frac{x_i^-}{x_i}; \quad d_i = \left[ \frac{A_i}{A_i} \right]_i \frac{x_i^+}{x_i} + \left[ \frac{A_i}{A_i} \right]_{i+1} \frac{x_i^-}{x_i}$$

计算时采用预估校正方法,速度修正值  $u_i = d_i(p_i - p_{i+1})$ , 校正压力  $p$  满足:

$$A_P^p \rho_P = \sum_i A_i^p \rho_i + S^p, \quad A_P^p = \sum_i A_i^p, \quad A_i^p = A_i \left[ d_i \frac{u_i^p}{C_S^2} + \frac{1}{C_S^2} u_i \right],$$

其中  $C_S$  为当地声速,  $D_P^u = A_i / A_i^u$ ,  $x_i^+$  和  $x_i^-$  分别为  $i$  界面到  $i+1$  和  $i$  节点的距离,  $\hat{u}_i$  为假设速度

$$S^p = [(\rho u)_B^* - (\rho u)_T^*] y z + [(\rho v)_W^* - (\rho v)_E^*] x z + [(\rho w)_S^* - (\rho w)_N^*] x y + \frac{(\rho_P^0 - \rho_P^*)}{\Delta t} x y z,$$

其中上标  $*$  表示迭代当前值,下标  $B, T, N, S, E, W$  表示相邻胞格

## 2 算例

柱形泄爆容器的内径为 0.18 m,长 0.26 m,泄爆导管内径为 0.07 m,长 0.106 m,法兰盘外径为 0.17 m。将它们置于 2 m × 2 m 的区域中,三者同轴,如图 1 所示。容器内充满当量比为 1 的甲烷-氧气混合气,外部为空气。初始时刻,在柱形容器左端面中心点火,设点火区域有

15% 的燃料瞬间燃烧 泄爆压力为 0.22 MPa 计算时采用圆柱坐标

### 3 计算结果与分析

点火后, 火焰阵面将容器内混合气体分为高温已燃和低温未燃两部分 泄爆时, 由于高温已燃气体的挤压和管内外的压差, 使得未燃气体以很高的速度喷出, 形成可燃气体云团 云团膨胀过程中, 与静止大气形成速度剪切层, 从而存在 Helmholtz 不稳定<sup>[7]</sup>, 加上斜压效应的作用, 可燃云团将发生强烈变化, 逐渐呈蘑菇云状 火焰进入泄爆导管后, 在泄爆导管壁面的作用下加速, 以湍流射流的形式泄出 进入外部云团后, 进一步发展和失稳, 阵面发生皱褶 图 2 背景为压力阴影图, 颜色越深处, 压力值越小 白线为可燃云团轮廓线, 黑线为反应速率等值线, 表示火焰阵面 该图清晰地描述了蘑菇云(可燃云团)以及火焰射流的形成和变化过程

泄爆破膜瞬间, 先形成激波, 其阵面不断扩大, 并很快衰减为声波 波后未燃气体泄出时, 在泄爆导管出口处膨胀, 形成 Prandtl-Meyer 流, 使出口轴心附近压力下降, 形成低压区 由于膨胀波在可燃云团边缘反射并在轴心处集聚, 从而形成高压区 当火焰射流点燃高压区的未燃物时, 压力迅速升高, 以致产生外部爆炸 图 2 描述了膨胀波和压缩波的分布以及火焰射流进入高压区的过程

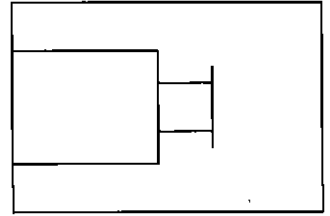


图 1 柱形泄爆容器内外流场计算区域

图 3 为  $t = 8.3 \text{ ms}$  时压力的分布图, 其中图 3(b) 为图 3

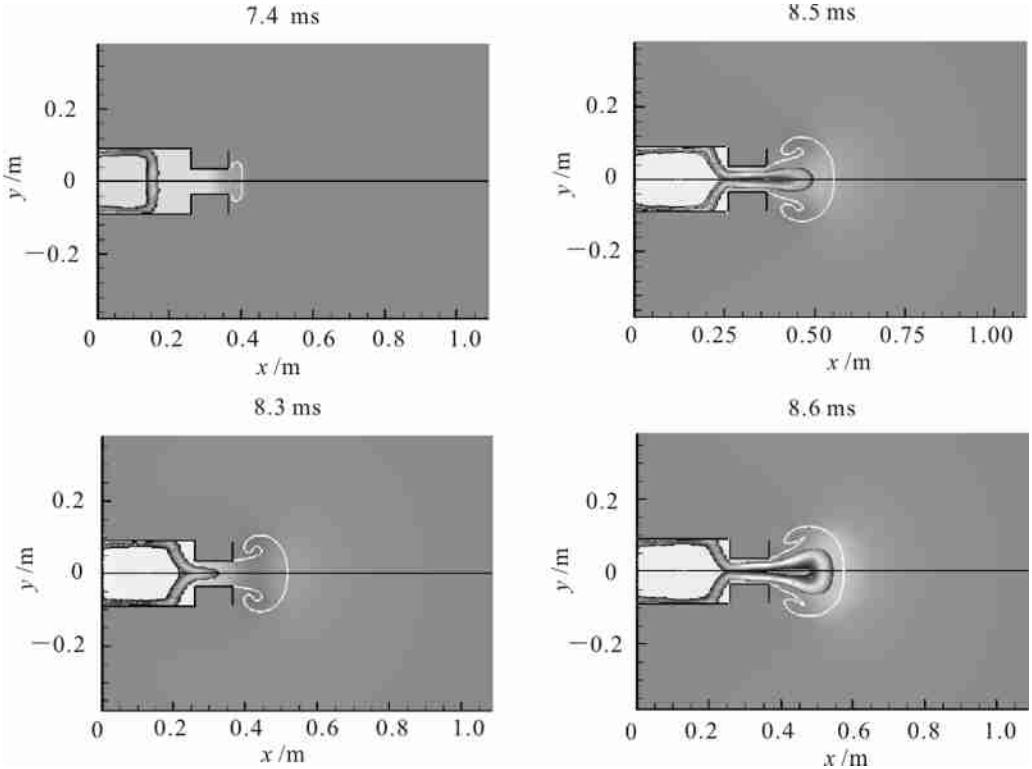


图 2 压力阴影图为基础的反应速率和可燃云团的变化图

(a) 的倒置图 由图 3(a) 图可见, 外流场存在两个压力波峰, 第一个波峰是破膜形成的, 第二

个波峰是膨胀波的反射集聚且随后被点火而形成的 其中第二个波峰的分布形如圆锥, 明显大于第一个波峰值 由图 3(b) 可见管口附近存在两低压区, 其所在位置为旋涡出现的地方

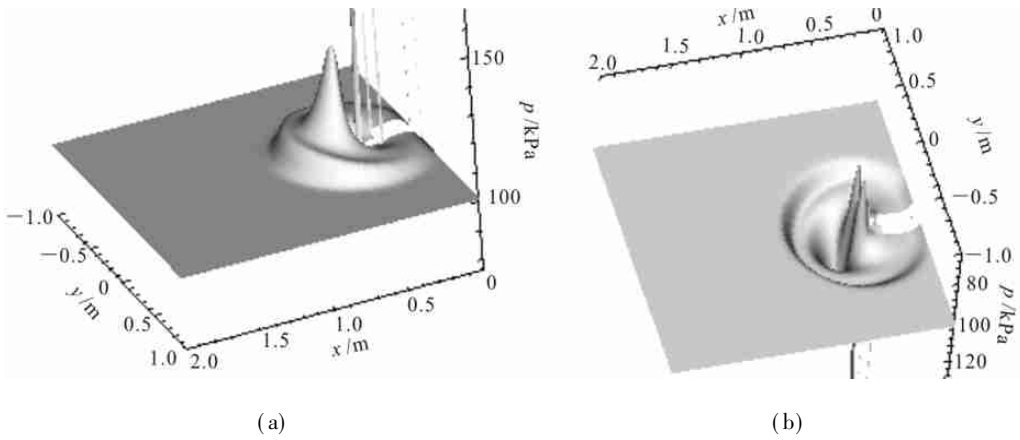


图 3 压力的三维分布图

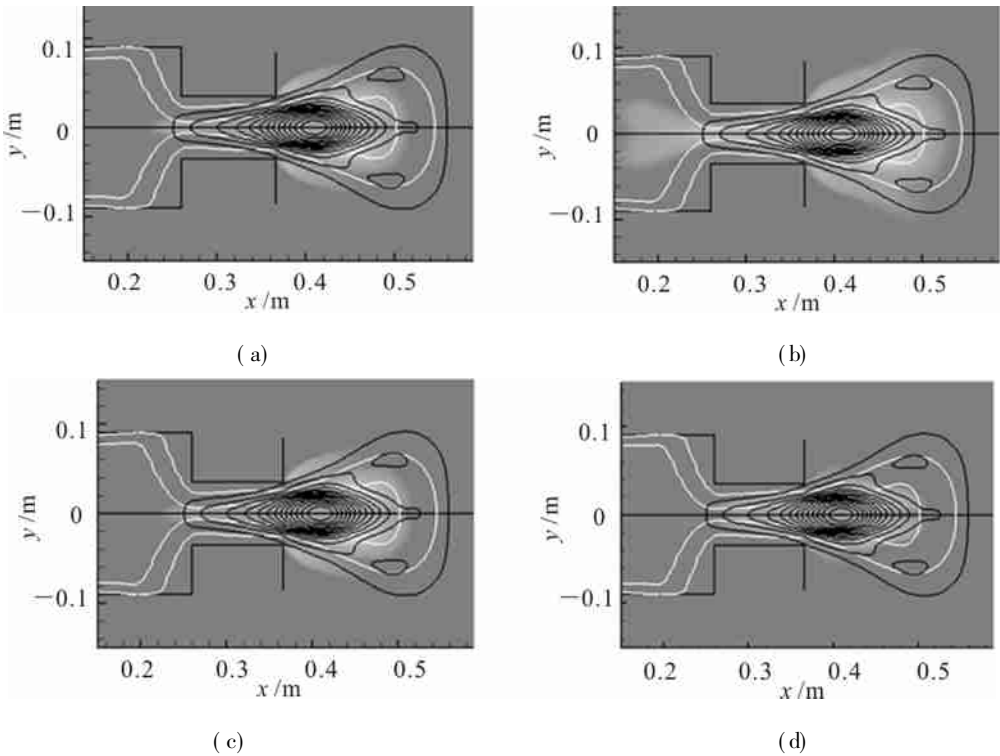


图 4  $t = 8.6 \text{ ms}$  时湍流强度(a)、湍流脉动动能(b)、湍流耗散率(c)和 Reynolds 应力(d) 阴影图为底的平均动能分布和火焰轮廓线图

泄爆后, 流场结构发生复杂的变化, 部分区域出现湍流 图 4 中白线为  $t = 8.6 \text{ ms}$  时刻的火焰轮廓线 背景阴影图分别对应于湍流强度、湍流脉动动能、湍流耗散率和 Reynolds 应力, 相应的值按颜色由深到浅而递增 由图可见, 容器内, 由于器壁的作用以及泄爆导管入口处的速度梯度, 强湍流的分布区域形如漏斗, 深入到泄爆导管内 导管内, 主要由于壁面边界层的影响, 轴心附近的湍流强度较大 管外流场的轴心附近, 轴向和径向速度的梯度都比较大, 对应湍流强度也比较大 法兰附近的速度梯度较大, 相应湍流强度也很大

由图还可以看出,湍流强度较大的区域基本上分布在轴线附近的已燃区域内,而不是火焰阵面头部。图中黑线为流体平均动能的等值线。显然,已燃区域内,动能梯度较大的地方,湍流强度也较大。

由于可燃气从管口喷出后的急速膨胀和变形,压力梯度与密度梯度在许多区域斜交,根据方程

$$\frac{d}{dt} \quad \frac{1}{2} \rho,$$

其中  $\frac{d}{dt}$  为涡量,  $\frac{1}{2} \rho$  表示梯度,流场将产生旋涡,称此为斜压效应。图5为  $t = 8.5 \text{ ms}$  时,容器外,压力梯度线、密度梯度线和涡量的分布图。图的背景为涡量分布,愈深处涡量愈小。黑线的切线方向为密度梯度方向,称为密度梯度线,白线则为压力梯度线。在高涡量区域,两类梯度线趋于正交。图6为  $t = 8.2 \text{ ms}$  时,流场的流线分布图,管口附近的两个完整旋涡说明流场中存在环型的旋涡区。

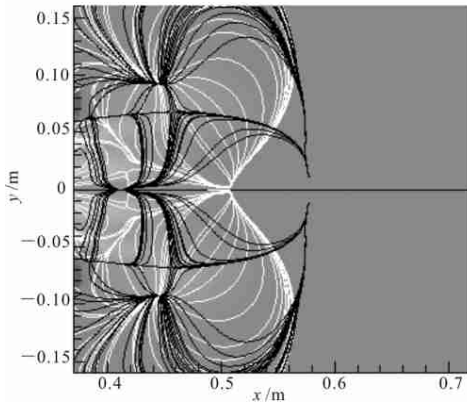


图5 涡量阴影图为底压力和密度梯度线的分布图

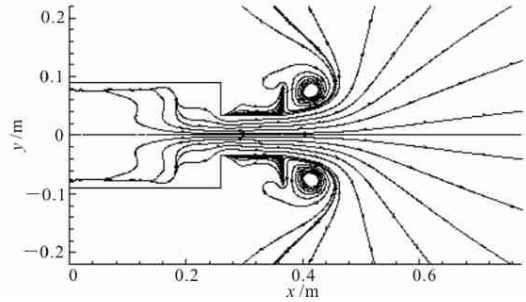


图6 流线分布图

## 4 结 论

泄爆后,泄爆容器外流场存在两个压力波峰,第一个波峰是破膜压缩波,随波阵面的迅速扩大,而衰减为声波;第二个波峰是反射波汇集形成的。火焰射流从管口喷出后,深入到外部可燃云团内(即先于火焰射流泄出的未燃气体),使未燃气体燃烧。当该火焰点燃高压区的未燃气体时,第二波峰的强度会得以加强,有可能形成外部爆炸。随着流场的剧烈变化,湍流和涡量的分布亦发生变化。火焰泄出管口后,高湍流强度不在火焰阵面头部,主要分布在火焰内部速度梯度较大处。在密度和压力梯度线斜交的区域,由于斜压效应,对应的涡量值较大。

### [参 考 文 献]

- [1] Mccann D P J, Thomas G O, Edwards D H. Gasdynamics of vented explosions Part I: Experimental studies[J]. *Combustion and Flame*, 1985, **59**(3): 233-250.
- [2] Cooper M G, Fairweather M, Tite J P. On the mechanisms of pressure generation in vented explosions[J]. *Combustion and Flame*, 1986, **65**(1): 1-14.
- [3] Ponizy B, Leyer J C. Flame dynamics in a vented vessel connected to a duct. 1: Mechanism of vessel-duct interaction[J]. *Combustion and Flame*, 1999, **116**(2): 259-271.
- [4] Catlin C A. Scale effects on the external combustion caused by venting of a confined explosion[J].

- Combustion and Flame, 1991, **83**(4): 399–411.
- [5] Hjertager B H. Simulation of transient compressible turbulent reactive flows[J]. Combustion Science and Technology, 1982, **27**(5): 159–170.
- [6] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 181–186.
- [7] 王继海. 二维非定常流和激波[M]. 北京: 科学出版社, 1994, 348–383.

## Turbulence, Vortex and External Explosion Induced by Venting

JIANG Xiao\_hai, FAN Bao\_chun, YE Jin\_fang

(College of Dynamics, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing 210094, P. R. China)

**Abstract:** The process of explosion venting to air in a cylindrical vent vessel connected to a duct, filling with a stoichiometric methane\_oxygen gas mixture, was simulated numerically by using a collocated grid SIMPLE scheme based on  $k_{\epsilon}$  turbulent model and Eddy\_dissipation combustion model. The characteristics of the combustible cloud, flame and pressure distribution in the external flow field during venting were analyzed in terms of the predicted results. The results show that the external explosion is generated due to violent turbulent combustion in the high pressure region within the external combustible cloud ignited by a jet flame. And the turbulence and vortex in the external flow field were also discussed in detail. After the jet flame penetrating into the external combustible cloud, the turbulent intensity is greater in the regions with greater average kinetic energy gradient, rather than in the flame front; and the vortex in the external flow field is generated primarily due to the baroclinic effect, which is greater in the regions where the pressure and density gradients are nearly perpendicular.

**Key words:** explosion; vented explosion; external explosion