

文章编号: 1001-1455(2005)01-0011-06

高压泄爆导致的二次爆炸*

范宝春, 姜孝海

(南京理工大学动力学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 基于计算结果和相关实验结果, 通过理论分析, 对高压泄爆导致的二次爆炸机理进行了系统的阐述。泄爆后, 泄出的高压可燃气体在泄爆口附近形成可燃云团, 由于欠膨胀, 云团内存在稀疏波低压区和 Mach 干高压区。火焰射流泄出后, 在一定条件下, 可使 Mach 干高压区内的可燃云团爆炸式燃烧, 压力迅速上升, 以致产生二次爆炸。

关键词: 爆炸力学; 二次爆炸; 泄爆实验; 高压泄爆; 数值模拟

中图分类号: O383.3 **国标学科代码:** 130 · 3510 **文献标志码:** A

1 引言

当容器内的压力达到某设定值时, 将高压气体从泄爆口放出, 使内部压力迅速降低, 以防止容器爆炸的安全举措称为泄爆, 它是工业部门广泛采用的一种防爆技术。某些情况下, 泄出的可燃气体可能因自身的燃烧而发生爆炸, 称为二次爆炸, 它会对四周的建筑物、设备和人身构成威胁。因此, 泄爆外流场, 特别是产生外部二次爆炸的机制的研究, 具有重要的意义。

关于泄爆的研究, 主要集中于容器的内流场^[1~3]。对于泄爆外流场, 特别是二次爆炸的研究, 则相对较少。F. Tom 等^[4]根据爆炸波理论, 提出了一种计算外部超压的关系式, 但未涉及泄爆外流场的结构以及外部爆炸的产生机制。C. A. Catlin^[5]通过试验, 对低压泄爆引起的外部爆炸现象进行了简单的定性分析。B. Polizy 等^[6]和 A. J. Harrison^[7]分别对低压和敞口泄爆过程中的射流火焰及其可能引起的二次爆炸进行了讨论。关于向空气泄爆的外部流场的数值模拟和理论分析, 特别是关于泄爆诱导的二次爆炸的机理的阐述, 迄今尚未见到公开发表的文章。

本文中基于对柱形容器高压泄爆过程的实验研究和数值模拟, 根据相关理论, 对泄爆后外流场的特征结构和射流火焰的形成以及外部可燃云团的燃烧进行分析, 详细阐述二次爆炸的产生机制和动力学发展变化过程。

2 实验和数值方法

实验采用容积为 8.14 dm³带泄爆导管的柱形泄爆装置, 垂直安装在固定支架上。为了测试外流场的压力变化, 在泄爆容器外流场的轴线上布置了 4 个压力传感器(P-2~P-5), 8 通道的瞬态记录仪(JV5200)用来记录传感器的压力信号。YA-16 高速摄影仪用来拍摄泄爆外流场的时序阴影照片。

基于 $K-\epsilon$ 湍流模型和漩涡破碎(eddy dissipation)燃烧模型^[8], 利用同位网格 SIMPLE 算法求解相应的守恒方程, 对与实验对应的泄爆过程中内外流场的发展进行了数值模拟。实验和数值方法的详细介绍参阅文献^[9]。

3 结果与讨论

根据计算和实验结果, 本文中对高压泄爆引起二次爆炸的原因与发展过程进行了系统分析。高压

* 收稿日期: 2004-04-06; 修回日期: 2004-09-12

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目(2001 CB409603)

作者简介: 范宝春(1945—), 男, 教授, 博士生导师。

泄爆引起的二次爆炸主要包含如下步骤。

(1) 欠膨胀射流

泄爆口破膜后,生成泄爆激波,在外流场以发散方式传播,故迅速衰减。根据气体动力学相关理论,容器内高温高压气体以欠膨胀射流的方式尾随激波泄出,在泄爆口附近形成 Prandtl-Meyer 流区,使压力急速下降,甚至出现负压。此类稀疏波在射流边界上反射,并在轴线附近聚焦碰撞,形成 Mach 干,其后为高压区域。图 1 为实验拍摄的欠膨胀射流的 Mach 干照片。

计算得到的某时刻泄爆外流场轴线上的压力分布曲线如图 2 所示,虚线所包含的部分表示泄爆导管。泄爆口附近为未受稀疏波影响的高压区域,随后为低压膨胀区域,下游依次为 Mach 干高压区、衰减的泄爆激波波后区和波前未扰动区。该结果与上述分析相同。

对于惰性欠膨胀射流, Mach 干将迅速衰减,外流场也恢复为环境压力。图 3 为惰性气体泄出时,外流场压力分布的计算结果。它描述了高压气体泄出后,低压膨胀区和 Mach 干高压区的生成、发展和衰减。

如果泄出的是可燃气体,则在外流场形成可燃云团。如果 Mach 干高压区在未衰减前被点燃,则易导致二次爆炸。

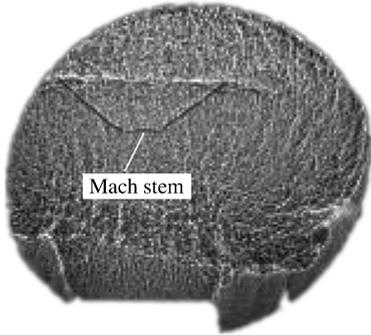


图 1 欠膨胀射流的悬挂激波

Fig. 1 Mach stem of the under-expanded jet

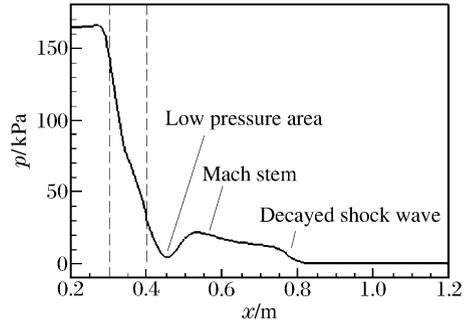


图 2 泄爆外流场轴线上,某时刻的压力分布曲线

Fig. 2 Distribution of the pressure along the axis in the external flow field

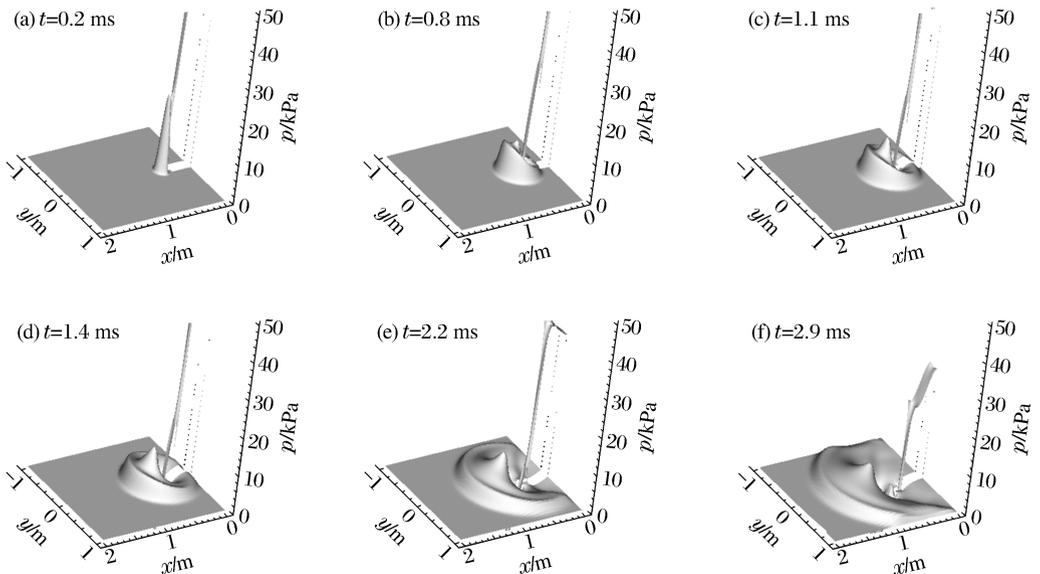


图 3 惰性气体泄出时,外流场的压力分布

Fig. 3 Pressure distributions of the external flow field during the inertia gas venting

(2) 湍流射流火焰

破膜泄爆时, 火焰通常位于容器的内部, 一段时间后, 由容器进入导管。由于传播通道的截面积剧减, 加之导管两端的压力差, 火焰向管口方向加速。由界面稳定性理论可知, 这种由燃烧产物组成的低密度介质向未燃的高密度介质的加速是不稳定的, 称为 Taylor 不稳定, 火焰将由此失稳。加速火焰裹带着未燃气体进入泄爆导管。火焰阵面前的气体因燃烧膨胀而运动, 在导管管壁附近形成剪切层, 这导致运动火焰的阵面变形且诱导 Helmholtz 不稳定, 火焰将进一步加速。加速的火焰更加不稳定, 阵面前的气体也随之加速。在管壁的这种正反馈作用下, 最终形成湍流火焰, 以射流形式泄出。图 4 为计算得到的轴线上的火焰传播轨迹和传播速度, 虚线间为导管。由图 4 可见, 导管内火焰明显加速。

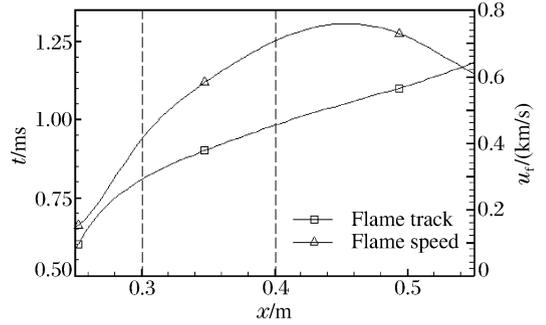


图 4 轴线上火焰传播轨迹和传播速度
Fig. 4 Trace and speed of the flame along the axis

(3) 泄出气云的湍流燃烧

合适条件下, 射流火焰将点燃外流场的可燃云团, 形成不断扩展的火焰阵面。此时, 火焰阵面上同样存在 Taylor 和 Helmholtz 不稳定和强烈的湍流。由于流场结构的复杂变化, 压力梯度和密度梯度在许多地方斜交, 泄爆口壁面附近尤为显著, 这使得流场中产生漩涡, 被称为斜压效应。在湍流和斜压效应等因素的作用下, 火焰阵面发生强烈的翻转, 呈蘑菇云状。图 5 为实验拍摄的燃烧的蘑菇云状的火焰阵面照片, 阵面上可清晰地看到湍流刻痕。图 6 为根据计算绘制的泄爆过程中容器内外流场的结构

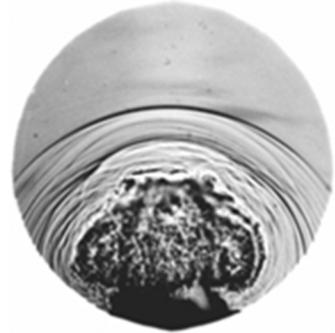


图 5 实验拍摄的外流场蘑菇云状湍流火焰
Fig. 5 The mushroom-like turbulent flame in the external flow field obtained from the test

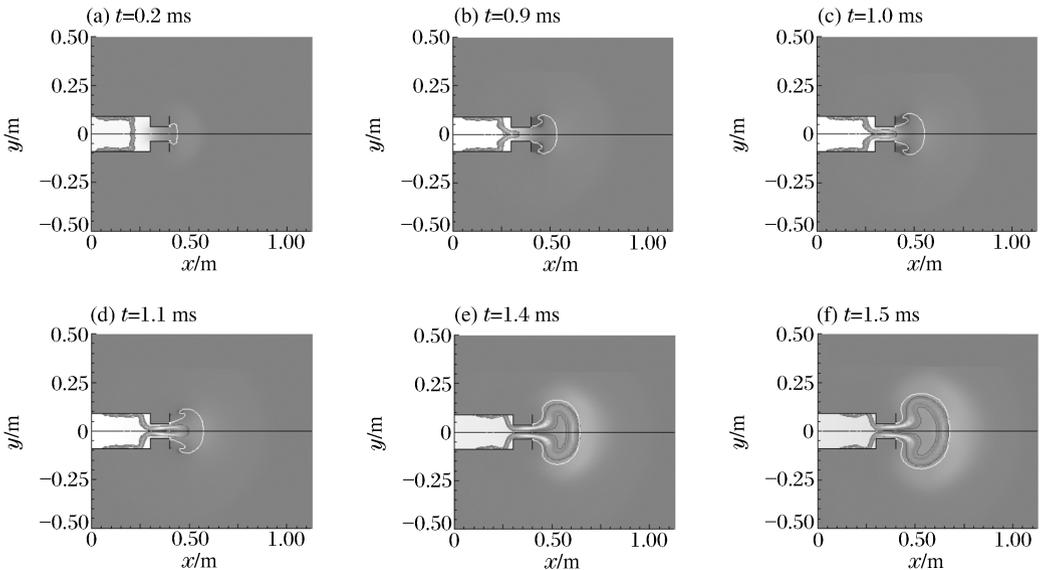


图 6 计算绘制的泄爆过程中容器内外流场结构图
Fig. 6 The predicted structure of the internal and external flow field during venting

图,该图以压力为背景,愈浅处压力愈高。白线为可燃云团轮廓线,黑线为火焰阵面轮廓线,其间为燃烧区域。该图描述了泄爆后可燃云团、火焰和压力场的发展。图 7(a)~(d)分别为根据计算绘制的某时刻湍流强度、湍流脉动动能、湍流耗散率和 Reynolds 应力分布图。颜色愈浅,相应的值愈大,白线为火焰轮廓,黑线为流体平均动能的等值线。由图 7 可见,湍流强度较大的区域形如漏斗,深入到泄爆导管内部,基本上分布在轴线附近的已燃区域内。

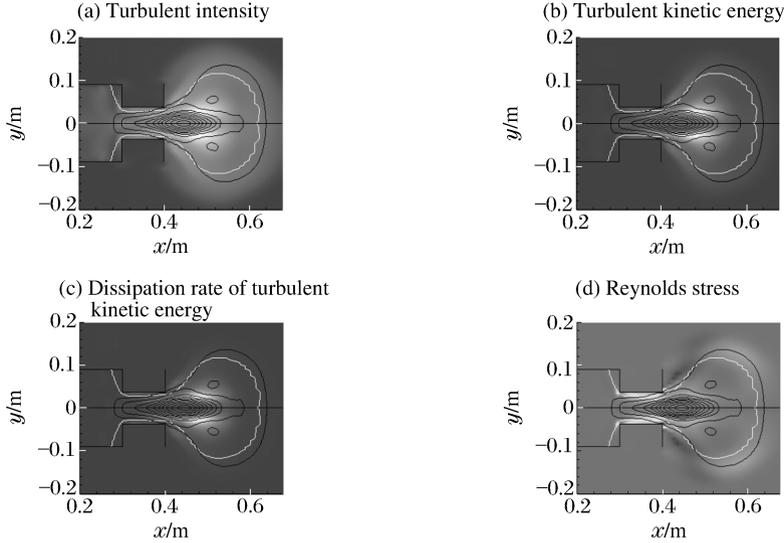


图 7 计算绘制的湍流强度、湍流脉动动能、湍流耗散率和 Reynolds 应力分布图

Fig. 7 The predicted distributions of average kinetic energy and flame outline with turbulent intensity, turbulent kinetic energy, dissipation rate of turbulent kinetic energy and Reynolds stress shade

(4) 二次爆炸

射流火焰喷出泄爆口后,如果外部可燃云团具有合适的浓度分布和湍流分布,火焰会穿过稀疏区进入 Mach 干区域。此时,该区域如果仍具有足够的强度,燃烧速率会急剧增加,从而导致局部区域的压力剧增,并在火焰阵面前产生系列压缩波(见图 6),它们的追赶与迭加,使得本已衰减的泄爆激波得以加强。这种因射流火焰点火,使可燃云团燃烧,并导致外流场压力剧增的现象称为二次爆炸。

图 8 为不同测点上,压力随时间的变化曲线,其中图 8(a)为实验结果,图 8(b)为计算结果。从图 8 可看出,压力曲线上存在两个峰值,首先是破膜产生的激波峰值,其后为二次爆炸的压力峰。

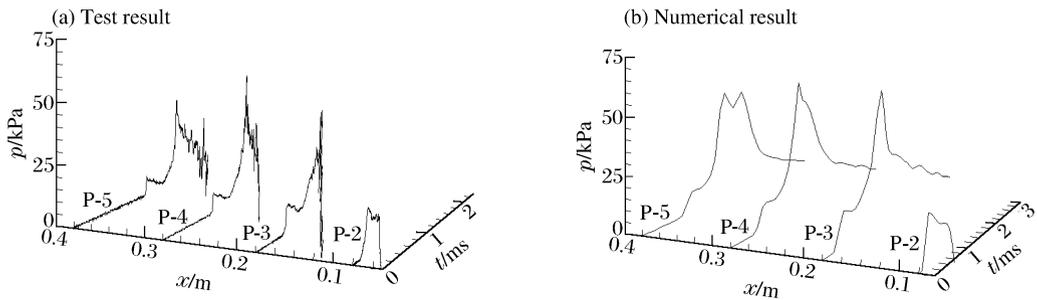


图 8 不同测点上,压力随时间的变化

Fig. 8 Pressure histories of the different measure points

图 9 为泄爆过程中,不同时刻外流场的压力分布图。泄爆的初始阶段,外流场存在两个高压区域,其中环形区域是泄爆激波形成的,圆锥形区域则由稀疏波反射汇集而成,其后还有一稀疏低压区,如图 9(b)。火焰射流深入环形高压区后,燃烧导致压力的迅速上升,波峰值明显升高。波峰前还存在由压缩波迭加形成的激波,如图 9(c)~图 9(d)。随着火焰阵面向四周扩散以及可燃气体的消耗,波峰压力

逐渐下降,如图 9(e),由于激波迭加,泄爆激波有所加强,但最终衰减为声波,如图 9(f)。

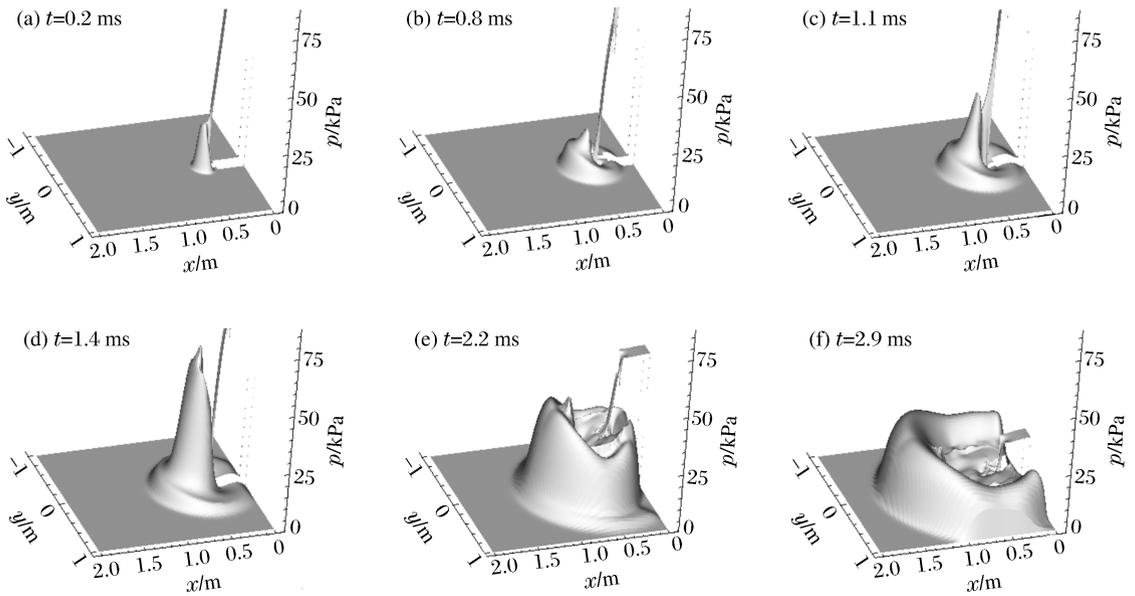


图 9 泄爆过程的外流场压力分布

Fig. 9 The predicted distribution of the external flow field during venting

图 10 为泄爆后,轴线上的压力分布随时间变化图。泄爆初期,火焰仍在容器内燃烧,此时,排出气体导致的压力下降不足以抵消容器内因燃烧而导致的压力上升,故容器内的压力继续呈上升趋势。随着火焰的排出,管内压力才不断下降。泄爆激波一直呈衰减趋势,但后来被压缩波追赶,有所增强。悬吊激波区域可燃气体被点燃后,压力迅速增加,然后呈衰减趋势。由于加速火焰的压缩,火焰阵面前出现系列压缩波,故悬吊激波与泄爆激波之间出现多个压力峰值。

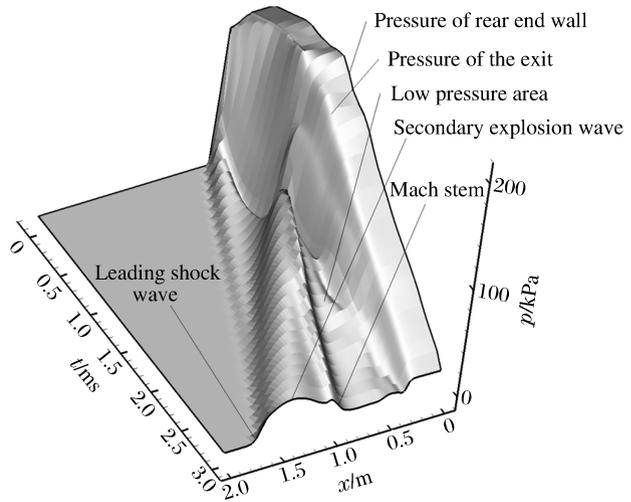


图 10 泄爆后,轴线上压力分布随时间变化曲线

Fig. 10 Pressure variation on the axis at the different times during venting

5 结 论

泄爆过程中出现的二次爆炸是一个复杂的动力学过程。基于气体动力学相关理论,依据数值计算结果和若干实验结果,本文中认为,高压泄爆过程中,形成二次爆炸的主要步骤:

- (1) 高压未燃气体泄出,形成含有 Mach 干的可燃云团;
- (2) 火焰以射流形式喷出,点燃可燃云团;
- (3) 具有足够大的压力和湍流强度的 Mach 干区域被点燃,形成二次爆炸。

如果因某些因素使上述过程受阻,则不易发生二次爆炸。

参考文献:

- [1] Cooper M G, Fairweather M, Tite J P. On the mechanisms of pressure generation in vented explosions[J]. *Combustion and Flame*, 1986,65:1-14.
- [2] Razus D M, Krause U. Comparison of empirical and semi-empirical calculation methods for venting of gas explosions[J]. *Fire Safety Journal*, 2001,36:1-23.
- [3] 胡俊,浦以康,万士昕,等. 柱形容器开口泄爆过程中压力发展特性的实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2001,21(1):48-52.
HU Jun, PU Yi-kang, WAN Shi-xin, et al. Experimental investigations of pressure development during explosion vent from cylindrical vessels[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001,21(1):48-52.
- [4] Tom F, Robert Z. External pressures generated by vented gas and dust explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000,13:411-417.
- [5] Catlin C A. Scale effects on the external combustion caused by venting of a confined explosion[J]. *Combustion and Flame*, 1991,83:399-411.
- [6] 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*, 1999,116:259-271.
- [7] Harrison A J, Eyre A J. External explosions as a result of explosion venting[J]. *Combustion Science and Technology*, 1987,52:91-106.
- [8] Hjertager B H. Simulation of transient compressible turbulent reactive flows[J]. *Combustion Science and Technology*, 1982,27:159-170.
- [9] 姜孝海,范宝春,叶经方. 泄爆外流场的可视化研究[J]. *爆炸与冲击*, 2005,25(1):5-11.
JIANG Xiao-hai, FAN Bao-chun, YE Jing-fang. Visualization of the external flow field in vented explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(1):5-11.

Secondary explosion induced by vented explosion

FAN Bao-chun^{*}, JIANG Xiao-hai

(*Institute of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*)

Abstract: Based on the $K-\epsilon$ turbulence model and the eddy dissipation combustion model, the explosion venting to the air in a cylindrical vessel filled with the stoichiometric methane-air mixture was simulated using the colocated grid SIMPLE scheme. The dominant mechanisms of the occurrence of the secondary explosion during the venting processes were elucidated according to the numerical and relevant experimental results. After venting, there existed the low pressure area of rarefaction wave and the high pressure area of suspended shock inside the external combustible cloud forming from the discharged combustible gas. Under some suitable venting conditions, the violent combustion in the high pressure area was induced by the flame jet, which gave rise to the pressure increasing rapidly, and even the secondary explosion.

Key words: mechanics of explosion; secondary explosion; vented explosion tests; vented explosion under high pressure; numerical simulation

* Corresponding author: FAN Bao-chun
E-mail address: bcfan@mail.njust.edu.cn
Telephone: 025-84303235