

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0086

# 具有体积分数梯度的连通装置甲烷-空气 爆炸特性数值模拟\*

许晓元<sup>1,2</sup>, 孙金华<sup>1</sup>, 刘暄亚<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;  
2. 应急管理部天津消防研究所, 天津 300381)

**摘要:** 为了研究具有体积分数梯度的连通装置内甲烷-空气爆炸特性, 以60 L圆柱体容器和20 L圆柱体容器通过3 m长, 截面为0.035 m×0.035 m的方形管道而连接形成的容器管道连通装置作为研究对象, 利用Fluidyn软件对均一体积分数的连通装置以及具有体积分数梯度的连通装置中甲烷-空气爆炸的特性进行了数值模拟。结果表明: 连通装置中甲烷的均一体积分数为6.517%~8.067%时, 并由大容器中心点火工况时, 最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、最高温度和最大速度, 以及这些爆炸参数达到最大值时的时刻值随体积分数的变化约呈线性关系; 连通装置大容器甲烷体积分数6.0%体积分数梯度为2.0%~8.0%且大容器中心点火时, 最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、最高温度和最大速度随体积分数梯度总体上呈现先增大后减小趋势; 大容器中心点火时, 最大爆炸压力位于小容器, 最大压力上升速率位于管道1或管道2, 最大速度位于管道3, 速度值可达400~600 m/s。本研究可为连通装置内可燃气体爆炸事故防控提供理论指导。

**关键词:** 连通装置; 体积分数梯度; 甲烷爆炸; 压力上升速率

中图分类号: O381 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

## Numerical simulation of methane-air explosion in a connected device with volume fraction gradient

XU Xiaoyuan<sup>1,2</sup>, SUN Jinhua<sup>1</sup>, LIU Xuanya<sup>2</sup>

(1. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;*  
2. *Tianjin Fire Research Institute of MEM, Tianjin 300381, China*)

**Abstract:** A connected vessel is a common typical chemical plant, and its explosion hazard is much higher than that of an independent vessel. In an actual explosion accident, the combustible gas volume fraction in the connected device presents a non-uniform state, and there is a volume fraction gradient. A connected device was chosen as the research object. The device was formed by connecting two cylindrical vessels with the volumes of 60 litres and 20 litres, respectively, through a square pipe as long as 3 meters, with a cross section of 35 mm×35 mm. To explore the methane-air explosion characteristics in the connected device with combustible gas volume fraction gradient, the Fluidyn software was applied to numerically simulate the methane-air explosions in the connected devices with uniform and non-uniform combustible gas volume fractions, respectively. The results show as follows. When the volume fraction of the methane in the connected device is uniform and ranges from 6.517% to 8.067% and the ignition is located in the center of the large vessel, the maximum explosion pressure, the maximum explosion pressure rise rate, the maximum temperature and the maximum velocity as well as their arrival times change linearly with the volume fraction of the methane. When the volume fraction of the methane in the large vessel of the connected device is 6.0%, the volume fraction gradient of the methane is 2.0% to 8.0%, and the ignition is located in the center of the large

\* 收稿日期: 2020-03-26; 修回日期: 2020-10-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0806600)

第一作者: 许晓元(1986—), 女, 博士, 助理研究员, xuxiaoyuan@tfri.com.cn

vessel, the maximum values of the parameters, including explosion pressure, explosion pressure rise rate, flame temperature and velocity, increase firstly and then decrease with increasing volume fraction gradient. When the ignition is located in the center of the large vessel, the maximum explosion pressure is in the small vessel, the maximum pressure rising rate is in the pipe connected to the large vessel, and the maximum flame velocity is in the pipe connected to the small vessel, and the flame velocity can reach 400-600 m/s. The research results can provide a theoretical guidance for preventing and controlling combustible gas explosion accident in connected devices.

**Keywords:** connected device; volume fraction gradient; methane explosion; pressure rise rate

含有可燃气体的连通型装置在现实中普遍存在。可燃气体通常在密封的封闭空间中,如反应器、反应釜、储罐等各类化工容器或生产装置,这些装置之间并不孤立,而是经由管道连接形成连通型装置。可燃气体在生产、储存、运输和使用过程中由于人为失误、容器和管道的缺陷、外部环境等因素,导致容器管道封闭空间内混入空气等其他助燃性气体,极易发生爆炸。经过前人研究,连通装置爆炸强度比单一容器更高,这是因为爆炸波和燃烧火焰通过管道传播,会导致气体的压缩并使得气体湍流程度更高。研究表明,当连通型装置间的管道较长时,长、径比超过 40,爆燃就有可能在管道内演变为爆轰,此时爆炸传播速度可达 2 000 m/s,压力达到甚至超过 3 MPa。除连通型工艺装置外,实际生产活动中也存在多种形式的连通型结构。如建筑物中畅通的两个或多个房间,矿井中的空间及通道,核电保护装置与冷却循环装置等。这些连通型装置内部都有可能发生危害性极大的可燃气体爆炸事故。在实际生产装置爆炸事故中,由于管道较长、装置结构复杂,因此,发生可燃气体与主燃气体混合过程中,可燃气体混合物在装置内分布不均匀,存在体积分数梯度。另外,煤矿井下通风不畅、密闭的隧道中瓦斯也存在体积分数梯度。因此,研究具有体积分数梯度的连通装置的可燃气体爆炸特性对指导爆炸防控工作更具有实际意义。

针对连通装置内可燃气体爆炸特性和泄爆技术的研究,国内外学者做了大量的研究,前人针对连通装置爆炸的绝大多数研究都基于连通装置内的气体为均一体积分数,前人的研究主要集中在爆炸危害后果、爆炸影响因素和泄爆技术几个方面。连通装置可燃气体爆炸的影响因素主要为尺寸效应(容器容积比例、管道的长度、管径的大小等)、点火位置、火焰传播方向、障碍物阻塞率和位置等。在连通装置爆炸危害后果研究方面,Bartknecht<sup>[1]</sup>指出,当连通装置两个容器的容积比为 1:1 时,与独立容器相比压力上升速率提高了 10 倍,压力上升速率增高的原因是气体湍流和喷射火焰;Phylakton 等<sup>[2]</sup>研究发现,连通装置的爆炸强度及压力上升速率与燃烧速度关系密切,而燃烧速度又与湍流程度相关,通过测定,连通装置内最大燃烧速度可达 370 m/s,最大压力上升速率可达  $2.086 \times 10^8$  Pa/s。在连通装置爆炸影响因素研究方面,Lunn 等<sup>[3]</sup>通过粉尘爆炸实验研究了连通装置容积比及连接管径的影响,研究表明,管道体积与容积体积之间的比例也是影响燃烧爆炸的因素之一;Holbrow 等<sup>[4]</sup>针对连通装置的粉尘爆炸做了大量试验研究,可燃物质采用煤粉、石墨粉等,实验发现,管道长度、直径、容器容积比、粉尘的燃爆性能和泄放面积均对爆炸压力有很大影响;Holbrow 等<sup>[5]</sup>开展了实验研究,实验装置为容积为 2~20 m<sup>3</sup> 的圆柱形容器,管道长 15 m、半径分别为 0.15、0.25、0.50 m 的管道容器组合的连通装置,研究了容积比例、管径、泄爆面积等因素对连通装置内粉尘爆炸和泄爆的影响;严建骏等<sup>[6]</sup>、尤明伟等<sup>[7]</sup>、王志荣等<sup>[8]</sup>采用实验方法研究了连通装置内气体爆炸过程,主要从初始条件、点火位置、火焰传播方向来分析连通容器内压力变化;尤明伟等<sup>[9]</sup>分析了障碍物阻塞率和位置、连接管道直径和长度、火焰传播方向、点火位置等因素对火焰传播及爆炸强度的影响。在连通装置泄爆方面,王志荣等<sup>[10]</sup>研究了连通装置内气体的泄爆,结果表明一个泄爆口不能明显降低容器内的超压,而两个泄压口同时泄爆才能更好地实现泄爆。

学者们在研究中将体积分数梯度方向与爆炸波传播方向垂直的情形定义为垂直体积分数梯度,将体积分数梯度方向与爆炸波传播方向平行的情形定义为平行体积分数梯度,见图 1。前人的体积分数梯度气体爆炸研究主要用的方法为实验研究和数值模拟研究,研究的对象大多为单一容器或管道。在受限空间内平行体积分数梯度爆炸研究方面,Thomas 等<sup>[11]</sup>在 22 mm×10 mm×500 mm 的受限空间及直径为

50 mm 的爆轰管内研究了平行体积分数梯度对爆炸传播速度的影响; Kuznetsov 等<sup>[12]</sup> 在内径为 174 mm 长度为 6.0~11.2 m 的爆轰管研究了氢气-空气平行体积分数梯度对爆轰波的影响, 探讨爆轰波熄灭、二次起爆、爆燃转爆轰等动力学行为。在受限空间内垂直体积分数梯度爆炸研究方面, Vollmer 等<sup>[13-14]</sup> 研究了截面 60 mm×300 mm 长 5.4 m 的管道内氢气-空气垂直体积分数梯度、障碍物等对氢气-空气火焰加速、爆燃转爆轰距离的影响; Kessler 等<sup>[15]</sup> 研究了垂直体积分数梯度中爆炸波的稳定性和淬灭概率问题; Ishii 等<sup>[16]</sup> 在截面 40 mm×20 mm 长 0.5 m 的管道内研究了垂直体积分数梯度如何影响爆轰波阵面形状和爆轰不稳定性; Wang 等<sup>[17]</sup> 对前人的实验开展了数值模拟, 对氢气爆炸和丙烷爆炸流场进行研究; Han 等<sup>[18]</sup> 利用数值模拟的方法研究了垂直体积分数梯度对爆轰波前沿结构稳定性的影响。

综上所述, 封闭空间具有体积分数梯度的可燃气体爆炸研究, 由于其与实际工程问题最接近, 且通过研究能解释实际工程问题所面临的难点, 更为重要的是非均匀气体爆炸所涉及的火焰加速、爆燃转爆轰、爆轰波传播机理与均匀气体存在较大的差别, 近年来逐渐成为国外学者的研究热点, 而针对连通装置内体积分数梯度的爆炸研究还鲜有报道。本文将通过数值模拟的方法研究连通装置内均一体积分数和具有体积分数梯度的 CH<sub>4</sub> 爆炸过程中的爆炸参数、爆炸波传播等特点, 以期为连通装置内可燃气体爆炸事故防控、泄爆技术提供理论指导。

## 1 数值模拟研究

### 1.1 物理模型模拟软件及工况设置介绍

选取容器管道连通装置作为研究对象, 研究具有体积分数梯度的容器管道连通装置内甲烷气体爆炸特性。该装置由两个圆柱形爆炸容器通过方形管道连通, 水平布置在地面上, 见图 2。大容器的容积为 60 L, 小容器的容积为 20 L, 两个容器直径与容器高度之比为 1:1, 在大小容器底部由一个截面积为 0.035 m×0.035 m, 长为 3 m 的方形管道连接。为了研究体积分数梯度, 将连通装置划分为 5 个区域, 区域 1 为大容器, 区域 2 为连接大容器的长为 1 m 的管道 1, 区域 3 为连接管道 1 的长为 1 m 的管道 2, 区域 4 为连接管道 2 和小容器的长为 1 m 的管道 3, 区域 5 为小容器。

本文将容积总计 83.7 L 的连通装置划分为 156 244 个非结构化网格, 网格划分情况见图 3。可燃气体初始条件设置: 压力为 10<sup>5</sup> Pa, 温度为 300 K, 爆炸容器的壁面设置为粗糙的绝热壁面。本研究中做了网格无关化分析, 当网格划分为 18 348 个非结构化网格时, 某一工况条件下连通装置爆炸的最大压力为 665.5 kPa, 当网格划分为 85 648 个非结构化网格时, 相同工况条件下连通装置爆炸的最大压力为 680.2 kPa, 当网格划分为 156 244 个非结构化网格时, 相同工况条件下连通装置爆炸的最大压力为 676.9 kPa, 粗糙网格、中等网格与精密网格压力值的误差分别为 -1.68% 和 0.488%, 误差较小, 可知三种网格划分情况对结果的影响很小, 因此, 本研究所有工况的网格设置为 156 244 个

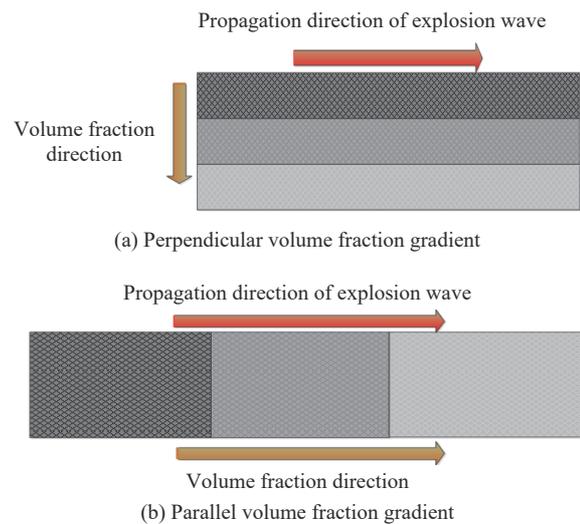


图 1 体积分数梯度分类

Fig. 1 Volume fraction gradient classification

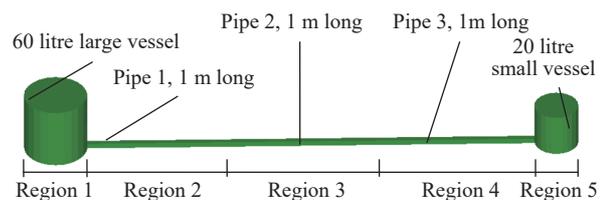


图 2 管道容器连通装置

Fig. 2 A connection device with pipes and vessels

非结构化网格。为了验证 Fluidyn 软件对爆炸模拟的可靠性,本文利用本软件模拟了文献 [19] 中同工况条件 9.5% 甲烷爆炸的实验,物理模型的对比图见图 4,根据实验工况将数值模拟中爆炸容器壁面设置为传热时,通过分析结果可知,数值模拟的结果比实验值高 7.10%,偏差可以接受。由于当壁面假设为绝热时,爆炸危害后果最严重,因此,本文所有的研究中均将壁面设置为绝热条件。

数值模拟软件 Fluidyn 求解 Navier-Stokes 方程以及描述理想气体混合物的物种体积分数、质量和能量守恒的方程。求解紊流方程的雷诺平均,雷诺应力采用线性涡黏模型(LEVM)进行建模。控制方程如下:

$$\frac{\partial(\rho y_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} y_m) = \nabla \cdot (D_m y_m) + S_m \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为密度,  $\mathbf{U}$  为速度矢量,  $y_m$  为物质  $m$  的质量分数,  $t$  为温度,  $D_m$  为物质  $m$  的有效扩散系数,  $S_m$  为物质  $m$  方程的源项  $m = 1, \dots, n$ 。

Fluidyn 中线性涡黏性模型为:

$$\Gamma = \Gamma_l + \Gamma_t \quad (2)$$

式中:  $\Gamma$  为输运系数,下标 l 表示依赖于流体的层流(分子)成分;下标 t 表示湍流成分。

数值模拟软件 Fluidyn 中湍流模型运用的为  $k-\varepsilon$  模型,  $k-\varepsilon$  模型是一个双方程线性涡黏性模型。Fluidyn CFD 求解器在三维空间和时间上求解的控制方程可以表示为一般对流扩散方程,其形式如下:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (3)$$

式中:  $\phi$  为正在求解的变量(动量、温度、体积分数等);  $\Gamma$  为  $\phi$  的交换系数(黏度、热扩散系数等);  $S_\phi$  为  $\phi$  (生成物等)的源项;  $\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}$  为时间导数,  $\nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \phi)$  为对流项,  $\nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi)$  为扩散项。

数值模拟软件 Fluidyn 中爆炸模型的化学反应流模型包含 Arrhenius 化学动力学模型和涡流耗散模型。在 Arrhenius 模型中,反应速率用  $K_j$  表示,涡流耗散模型中,反应速率用  $K$  表示。  $K_j$  完全由化学动力学决定。Arrhenius 形式如下:

$$K_j = -A_j T^{\zeta_j} e^{-E_j/RT} \prod_i x_i^{v_i} \quad (4)$$

式中:  $A_j$  为指数前因子,  $T$  为热力学温度,  $\zeta_j$  为温度指数,  $E_j$  为活化能,  $R$  为通用气体常数,  $x_i$  为物质  $i$  的摩尔分数,  $v_i$  为物种  $i$  速率指数。

Arrhenius 模型只考虑了反应的化学动力学部分,但没有考虑湍流对反应速率的影响。由于湍流微混合,瞬时体积分数变化很大。数值模拟软件 Fluidyn 建立了以燃料和氧化剂为反应物的燃烧反应的涡流耗散模型。在该模型中,反应速率计算如下:

$$K = -\frac{\varepsilon}{k} \frac{\rho}{M_f} A_{\text{edc}} \min\left(y_f, \frac{y_o}{\varphi_o}, B_{\text{edc}} \frac{y_p}{\varphi_p}\right) \quad (5)$$

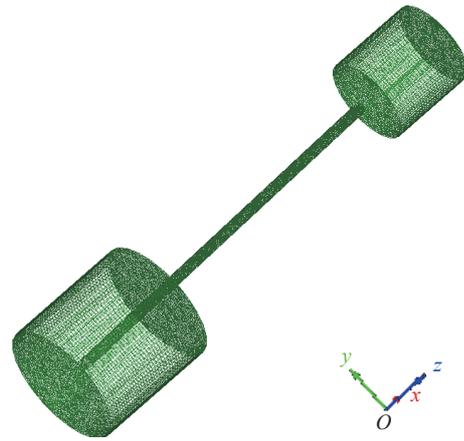


图 3 网格划分

Fig. 3 Model mesh generation

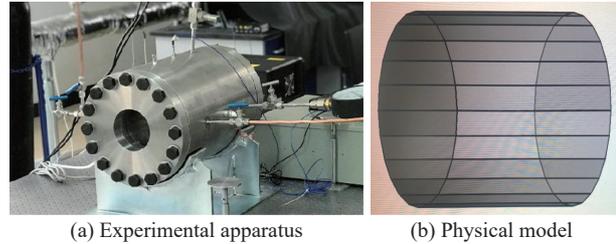


图 4 实验装置和物理模型比较

Fig. 4 Comparison between the experimental apparatus and the physical model

式中:  $k$  为湍流动能,  $\varepsilon$  为湍流耗散率,  $\rho$  为密度,  $M_f$  为燃料分子量,  $A_{\text{edc}}$ 、 $B_{\text{edc}}$  为常数,  $y_f$  为燃料质量分数,  $y_o$  为氧化剂质量分数,  $y_p$  为产物质量分数,  $\varphi_o$  为氧化剂燃料比,  $\varphi_p$  产物燃料比。

利用 Fluidyn 软件来对具有体积分数梯度的容器管道连通装置进行研究, 设置的工况见表 1。CH<sub>4</sub> 的可爆体积分数区间为 5.0%~15.0%, 本文研究了整个连通装置内 CH<sub>4</sub> 体积分数均在爆炸区间内的情形, 为保证 CH<sub>4</sub> 的爆炸反应, 将 CH<sub>4</sub> 的体积分数取为 6.0%~14.0%。区域 1 的体积分数保持 6.0% 不变, 其他各区域体积分数按一定数值依次增高。将体积分数梯度定义为区域 5 的体积分数值减去区域 1 的体积分数值。本文中研究了体积分数梯度分别为 2.0%、4.0%、6.0%、6.5%、7.0%、7.5%、8.0% 的工况。将具有体积分数梯度的工况时, 连通装置内平均 CH<sub>4</sub> 体积分数作为此体积分数梯度工况的均一体积分数对比工况, 通过计算, 体积分数梯度为 2.0%、4.0%、6.0%、6.5%、7.0%、7.5%、8.0% 对应的均一体积分数分别为 6.517%、7.034%、7.551%、

7.697%、7.827%、7.958%、8.067%。所有工况中, 点火位置位于区域 1 即大容器的中心。为研究不同工况下的爆炸压力等参数, 在每个区域的中心位置设置测点, 该测点可测量压力、温度、速度。

## 1.2 体积分数梯度对连通装置内最大压力的影响

对不同工况条件下最大爆炸压力、最大爆炸压力所处的位置、达到最大爆炸压力时刻进行分析, 见表 2 和表 3, 表 2 为连通装置不同体积分数时最大爆炸压力情况, 表 3 为连通装置不同体积分数梯度时最大爆炸压力情况。通过分析表 2 和表 3 可知, 连通装置内均一体积分数为 6.517%~8.067% 及区域 1 体积分数 6.0% 体积分数梯度为 2.0%~8.0%, 且区域 1 中心点火时, 最大爆炸压力位于区域 5。由于大容器作为起爆容器, 小容器作为传爆容器, 爆炸激波从大容器经管道的持续加速传播至小容器, 小容器内的气体受到挤压并产生强烈化学反应, 因此导致小容器的爆炸压力最大。

图 5 为不同工况条件下最大爆炸压力随体积分数/体积分数梯度变化曲线图。通过图 5 可知, 连通装置最大爆炸压力随均一体积分数的增大而增大, 约成线性关系; 连通装置最大爆炸压力随体积分数梯度的变化不是线性关系, 最大爆炸压力与体积分数梯度的变化曲线出现 2 个波峰, 一个是 4.0% 一个是 7.0%。这是因为 CH<sub>4</sub> 与 O<sub>2</sub> 的化学应当量比时 CH<sub>4</sub> 的空气体积分数为 9.5%<sup>[20]</sup>, 均一体积分数越接近当量体积分数, 爆炸压力越大。当体积分数梯度为 2.0%~7.0% 时, 所对应的工况比相应工况最大爆炸压力大, 即具有体积分数梯度所发生爆炸危害后果更严重。当体积分数梯度为 7.5%~8.0% 时, 所对应的工况比相应工况的最大爆炸压力小, 即均一体积分数工况发生爆炸危害后果更严重。从图 5

表 1 模拟工况

Table 1 Simulated working conditions

工况	体积分数梯度/%	体积分数分布/%				
		区域1	区域2	区域3	区域4	区域5
1	0			6.517		
2	2	6	6.5	7	7.5	8
3	0			7.034		
4	4	6	7	8	9	10
5	0			7.551		
6	6	6	7.5	9	10.5	12
7	0			7.697		
8	6.5	6	7.625	9.25	10.875	12.5
9	0			7.827		
10	7	6	7.75	9.5	11.25	13
11	0			7.958		
12	7.5	6	7.875	9.75	11.625	13.5
13	0			8.067		
14	8	6	8	10	12	14

表 2 连通装置不同体积分数时最大爆炸压力相关参数

Table 2 Related parameters of the maximum explosion pressures for different volume fractions of connected devices

工况	体积分数/%	最大爆炸压力		
		位置	时刻/s	数值/MPa
1	6.517	区域5	0.157	0.716
3	7.034	区域5	0.147	0.758
5	7.551	区域5	0.139	0.797
7	7.696	区域5	0.137	0.810
9	7.827	区域5	0.135	0.820
11	7.958	区域5	0.133	0.829
13	8.067	区域5	0.132	0.834

可以推断, 在体积分数梯度 7.0%~7.5% 之间, 存在一个体积分数梯度值, 在此体积分数梯度情况下, 所对应的工况与相应工况所产生的效果一致。由于工况 11 和工况 13 的体积分数与化学当量比较接近, 化学反应完全, 释放的能量大, 因此这种情况下, 均一体积分数比具有体积分数梯度的工况产生的最大爆炸压力大; 工况 1、3、5、7、9 的体积分数与化学当量比差距较大, 而工况 2、4、6、8、10 中, 连通装置的部分区域的体积分数与 CH<sub>4</sub> 化学当量比体积分数较为接近, 因此这种情况下, 体积分数梯度比均一体积分数工况所产生的最大爆炸压力大。图 6 所示为不同工况条件下最大压力时刻随体积分数/体积分数梯度的变化。由图 6 可知, 最大压力时刻随体积分数的增大而提前, 并约成线性关系; 而最大压力时刻值随体积分数梯度的增大先提前再滞后。这是因为, 在 6.517%~8.067% 范围内, 随着体积分数的增大, 越来越接近 CH<sub>4</sub> 的化学当量体积分数, 越接近化学当量体积分数, 爆炸反应越快, 因此, 达到最大爆炸压力最大值的时刻越提前。

表 3 连通装置不同体积分数梯度时最大爆炸压力相关参数  
Table 3 Related parameters of the maximum explosion pressures for different volume fraction gradients of connected devices

工况	体积分数梯度/%	最大爆炸压力		
		位置	时刻/s	数值/MPa
2	2.0	区域5	0.154	0.754
4	4.0	区域5	0.147	0.820
6	6.0	区域5	0.151	0.814
8	6.5	区域5	0.154	0.817
10	7.0	区域5	0.156	0.821
12	7.5	区域5	0.158	0.821
14	8.0	区域5	0.160	0.791

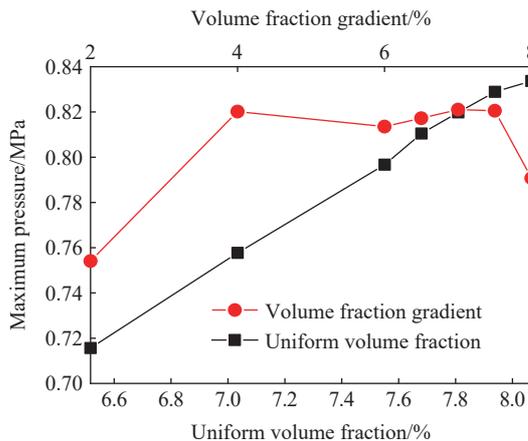


图 5 不同工况条件下最大爆炸压力随体积分数和体积分数梯度变化曲线

Fig. 5 Changes of the maximum explosion pressure with volume fraction and volume fraction gradient under different working conditions

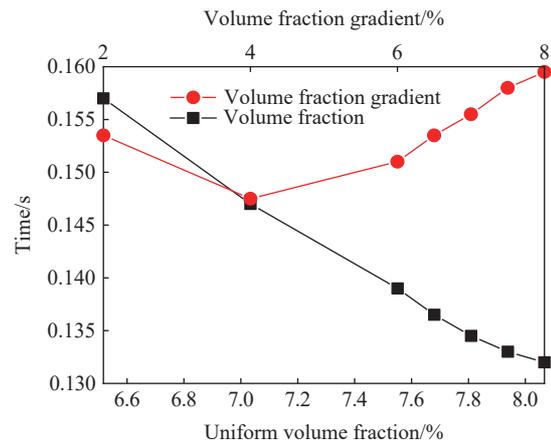


图 6 不同工况条件下最大爆炸压力时刻值随体积分数和体积分数梯度变化曲线

Fig. 6 Changes of the arrival time of the maximum explosion pressure with volume fraction and volume fraction gradient under different working conditions

### 1.3 体积分数梯度对连通装置内最大压力上升速率的影响

对不同工况条件下最大压力上升速率、最大压力速率所处的位置、达到最大压力上升速率时刻进行了分析, 见表 4 和表 5, 表 4 为连通装置不同体积分数时最大压力上升速率情况, 表 5 为连通装置不同体积分数梯度时最大压力上升速率情况。通过分析表 4 和表 5 可知, 连通装置内均一体积分数为 6.517%~8.067% 及区域 1 体积分数 6.0% 体积分数梯度为 2.0%~8.0%, 且区域 1 中心点火时, 最大压力上升速率位于区域 2 或区域 3。这是因为, 压力上升速率代表着爆炸气流的湍流程度, 爆炸压力波从区域 1 传播至区域 2, 空间骤然变小, 导致爆炸气流湍流程度增强, 因此, 区域 2 附近的管道位置压力上升速率最大。

图 7 所示为不同工况条件下最大压力上升速率随体积分数/体积分数梯度变化曲线。通过图 7 可知, 连通装置最大压力上升速率随均一体积分数的增大而增大, 约成线性关系; 连通装置最大压力上升速率随体积分数梯度的变化不是线性关系, 最大压力上升速率与体积分数梯度的变化曲线出现 2 个波峰, 一个是 4.0% 一个是 7.5%。这是因为均一体积分数越接近当量比体积分数, 爆炸越剧烈, 最大压力上升速率也越大。当体积分数梯度为 2.0%~4.0% 时, 体积分数梯度工况比对应的均一体积分数工况最大压力上升速率大, 当体积分数梯度为 6.0%~8.0% 时, 体积分数梯度工况比对应的均一体积分数工况最大压力上升速率小。从图 7 可以推断, 在体积分数梯度 4.0%~6.0% 之间, 存在一个体积分数梯度值, 在此体积分数梯度情况下, 爆炸的最大湍流程度与对应的均一体积分数工况一致。图 8 所示为不同工况条件下最大压力上升速率时刻随体积分数/体积分数梯度的变化。由图 8 可知, 最大压力上升速率时刻随体积分数的增大而提前, 并约成线性关系; 而最大压力上升速率时刻随体积分数梯度的增大先提前再滞后。这是因为, 最大压力上升速率存在于压力快速上升即爆炸的过程中, 在 6.517%~8.067% 范围内, 随着体积分数的增大, 越来越接近 CH<sub>4</sub> 的化学当量体积分数, 越接近化学当量体积分数, 爆炸反应越快, 因此, 达到最大压力上升速率最大值的时刻越提前。

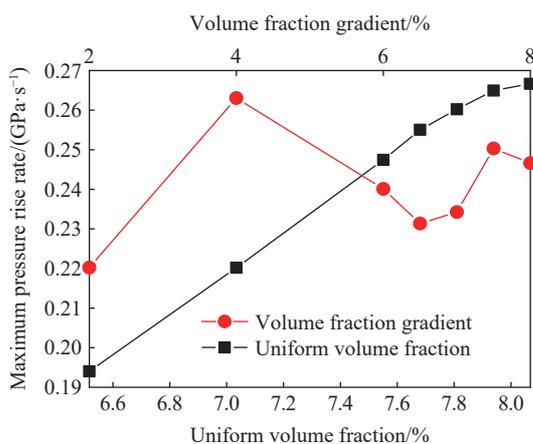


图 7 不同工况下最大压力上升速率随体积分数和体积分数梯度的变化

Fig. 7 Changes of the maximum pressure rise rate with volume fraction and volume fraction gradient under different working conditions

表 4 连通装置不同体积分数时最大压力上升速率相关参数  
Table 4 Related parameters of the maximum pressure rise rates for different volume fractions of connected devices

工况	体积分数/%	最大压力上升速率		
		位置	时刻/s	数值/(GPa·s <sup>-1</sup> )
1	6.517	区域2	0.150	0.194
3	7.034	区域3	0.138	0.220
5	7.551	区域2	0.132	0.247
7	7.697	区域2	0.130	0.255
9	7.830	区域2	0.129	0.260
11	7.958	区域2	0.127	0.265
13	8.067	区域3	0.123	0.267

表 5 连通装置不同体积分数梯度时最大压力上升速率相关参数

Table 5 Parameters related to the maximum pressure rise rates in the connected devices with different volume fraction gradients

工况	体积分数梯度/%	最大压力上升速率		
		位置	时刻/s	数值/(GPa·s <sup>-1</sup> )
2	2.0	区域3	0.144	0.220
4	4.0	区域2	0.141	0.263
6	6.0	区域2	0.144	0.240
8	6.5	区域2	0.146	0.231
10	7.0	区域2	0.148	0.234
12	7.5	区域2	0.151	0.250
14	8.0	区域2	0.153	0.247

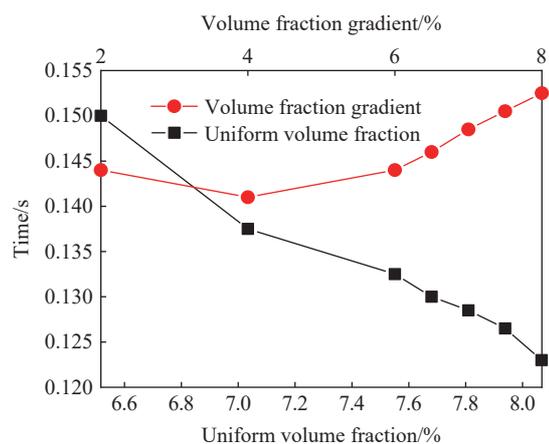


图 8 不同工况下最大压力上升速率时刻随体积分数和体积分数梯度的变化

Fig. 8 Changes of the arrival time of the maximum pressure rise rate with volume fraction and volume fraction gradient under different working conditions

### 1.4 体积分数梯度对连通装置内最高温度的影响

对不同工况条件下最高温度、最高温度所处的位置、达到最高温度时刻进行了分析, 见表 6 和表 7, 表 6 为连通装置不同体积分数时最高温度情况, 表 7 为连通装置不同体积分数梯度时最高温度情况。通过分析表 6 和表 7 可知, 连通装置内均一体积分数为 6.517%~8.067%, 且大容器区域 1 中心点火时, 最高温度位于区域 1; 连通装置区域 1 体积分数 6.0% 体积分数梯度为 2.0%~8.0%, 且区域 1 中心点火时, 最高温度位于区域 5。

表 6 连通装置不同均一体积分数下最高温度相关参数

Table 6 Related parameters of the maximum temperatures in connected devices with different volume fractions

工况	体积分数/%	最高温度		
		位置	时刻/s	数值/℃
1	6.517	区域1	0.189	1 917.58
3	7.034	区域1	0.182	2 023.45
5	7.551	区域1	0.179	2 121.45
7	7.697	区域1	0.176	2 156.08
9	7.827	区域1	0.175	2 181.71
11	7.958	区域1	0.173	2 209.39
13	8.067	区域1	0.172	2 223.58

表 7 连通装置不同体积分数梯度时最高温度相关参数

Table 7 Rrelated parameters of the maximum temperatures in connected devices with different volume fraction gradients

工况	体积分数梯度/%	最高温度		
		位置	时刻/s	数值/℃
2	2.0	区域5	0.208	1 946.72
4	4.0	区域5	0.201	2 250.03
6	6.0	区域5	0.205	2 248.07
8	6.5	区域5	0.207	2 247.44
10	7.0	区域5	0.208	2 291.28
12	7.5	区域5	0.217	2 302.43
14	8.0	区域5	0.242	2 251.81

图 9 所示为不同工况条件下最高温度随体积分数/体积分数梯度变化曲线图。通过图 9 可知, 连通装置最高温度随均一体积分数值增大而升高, 约成线性关系; 连通装置最高温度随体积分数梯度的变化不是线性关系, 最高温度与体积分数梯度的变化曲线出现先升高后降低的趋势, 体积分数梯度为 4.0% 时, 达到最高温度。这是因为当均一体积分数值越接近当量比体积分数时, 爆炸越激烈, 因此最高温度也越高。研究中不同体积分数梯度工况下比对应的均一体积分数工况的最高温度偏高, 说明连通装置内相同总量的 CH<sub>4</sub>, 区域 1 体积分数低, 区域 2 至 5 体积分数依次增高, 区域 1 中心点火时, 具有体积分数梯度的工况比对应的均一体积分数工况释放的能量多。图 10 所示为不同工况条件下最高温度时刻值随体积分数/体积分数梯度的变化。由图 10 可知, 最高温度时刻随体积分数的增大而提前, 并约成线性关系; 而最高温度时刻随体积分数梯度的增大先提前再滞后。这是因为, 在 6.517%~8.067% 范围内, 随着体积分数的增大, 越来越接近 CH<sub>4</sub> 的化学当量体积分数, 越接近化学当量体积分数, 爆炸反应越剧烈, 释放的能量越大, 因此, 达到最高温度的时刻越提前。

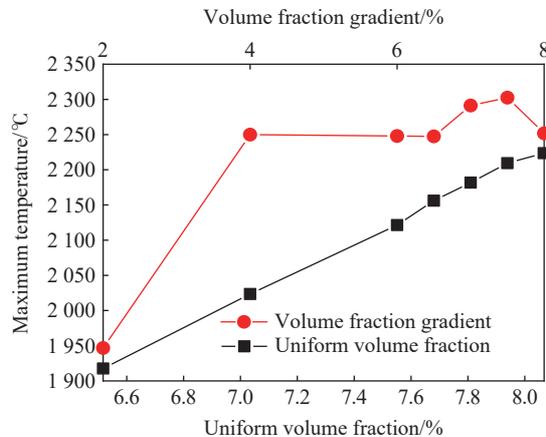


图 9 不同工况下最高温度随体积分数和体积分数梯度的变化

Fig. 9 Changes of the maximum temperature with volume fraction and volume fraction gradient under different working conditions

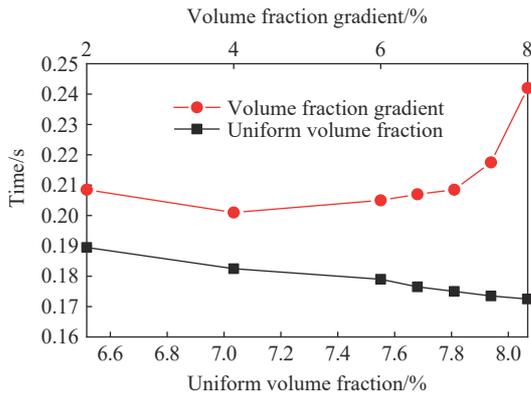


图 10 不同工况下最高温度时刻值随体积分数和体积分数梯度的变化

Fig. 10 Changes of the arrival time of the maximum temperature with volume fraction and volume fraction gradient under different working conditions

连通装置最大速度随均一体积分数值增大而增大, 约成线性关系; 连通装置最大速度随体积分数梯度的变化不是线性关系, 最大速度随体积分数梯度增大先增大后减小。这是因为, 均一体积分数值越接近当量体积分数, 爆炸反应越激烈, 连通装置内最大速度越大。最大速度时刻值随体积分数的增大而降低, 并约成线性关系; 而最大速度时刻随体积分数梯度的增大先提前再滞后。这是因为, 在 6.517%~8.067% 范围内, 随着体积分数的增大, 越来越接近 CH<sub>4</sub> 的化学当量体积分数, 越接近化学当量体积分数, 爆炸反应越激烈, 因此, 达到最大速度的时刻越提前。

表 8 连通装置不同体积分数时最大速度相关参数

Table 8 Related parameters of the maximum velocities in connected devices with different volume fractions

工况	体积分数/%	最大速度		
		位置	时刻/s	数值/(m·s <sup>-1</sup> )
1	6.517	区域4	0.141	450.01
3	7.034	区域4	0.133	486.93
5	7.551	区域4	0.125	517.60
7	7.696	区域4	0.122	527.40
9	7.827	区域4	0.121	533.92
11	7.957	区域4	0.119	540.47
13	8.067	区域4	0.118	543.77

### 1.5 体积分数梯度对连通装置内最大速度的影响

对不同工况条件下最大速度、最大速度所处的位置、达到最大速度时刻进行了分析, 见表 8 和表 9, 表 8 为连通装置不同体积分数时最大速度情况, 表 9 为连通装置不同体积分数梯度时最大速度情况。通过分析表 8 和表 9 可知, 连通装置内均一体积分数为 6.517%~8.067% 及区域 1 体积分数 6.0% 体积分数梯度为 2.0%~8.0%, 且区域 1 中心点火时, 最大速度位于区域 4。这是因为当连通装置大容器发生爆炸时, 细长管道内从大容器方向向小容器方向气流速度持续加大, 呈不断加速过程, 因此, 与小容器相连的管道内速度最大, 可达 400~600 m/s。

表 9 连通装置存在不同体积分数梯度时最大速度相关参数

Table 9 Related parameters of the maximum velocities in connected devices with different volume fraction gradients

工况	体积分数梯度/%	最大速度		
		位置	时刻/s	数值/(m·s <sup>-1</sup> )
2	2.0	区域4	0.138	445.20
4	4.0	区域4	0.133	456.60
6	6.0	区域4	0.136	448.40
8	6.5	区域4	0.138	443.01
10	7.0	区域4	0.141	437.55
12	7.5	区域4	0.143	431.70
14	8.0	区域4	0.145	427.08

### 1.6 结果分析

在区域 1 中点火爆炸后, 未燃气体迅速膨胀, 产生火焰锋面前后的密度差导致流体力学不稳定, 膨胀比越大, 流体力学不稳定易使火焰失稳, 热膨胀比可用如下公式计算<sup>[21]</sup>:

$$\sigma = \frac{\rho_u}{\rho_b} \tag{6}$$

式中:  $\sigma$  是热膨胀比,  $\rho_u$  是未燃气体密度,  $\rho_b$  是燃烧产物体积分数,  $\rho_u$  和  $\rho_b$  可通过 GASEQ 软件计算得到。

通过计算, 区域 1 中 6.0% 体积分数的甲烷燃烧热膨胀比为 5.598, 当区域 1 气体完全燃烧, 体积完全膨胀后为 335.88 L, 该数值远大于其他区域的体积总和, 这意味着区域 1 的未燃气体将区域 2~4 的气体全部压缩至区域 5 中。

从整个爆炸过程来看,各区域内的气体混合物温度随容器中压力的升高而增加,因此可近似的看作绝热压缩的过程,绝热压缩使得未燃气体温度升高,对火焰燃烧速率产生了影响<sup>[22]</sup>,即:

$$S_u = K_r \left( \frac{T_u}{T_0} \right)^2 \left( \frac{p_0}{p} \right)^\beta \quad (7)$$

式中:  $S_u$  为火焰速度,  $K_r$  为室温下的燃烧速率,  $T_u$  为未燃气体温度,  $T_0$  为初始温度,  $p_0$  为初始压力,  $p$  为爆炸压力,  $\beta$  是压力对燃速的影响因子。

文中涉及的 7 种体积分数梯度工况,刚好经历贫燃至富燃的燃烧过程,而由贫燃向富燃转变过程中,最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、火焰温度及最大速度总体均呈现先升后降的趋势。

区域 1 内点火后发生层流燃烧,通过区域 2、区域 3、区域 4 传播后,由于容器形状改变和管道刚性壁面的作用,火焰受到扰动,由层流燃烧转变为湍流燃烧,加速向区域 5 传递,并对区域 5 进行了预压缩,在压力累积与喷射火焰的共同作用下,区域 5 直接发生了湍流燃烧,因此,压力高,上升速率快。

区域 2~4 均为管道内,管内流团燃烧时,因体积膨胀而对周围介质做功,从而在火焰前方形成压缩波,诱导和加速当地质点的运动。火焰因此而变形,燃烧面积增大,燃烧速率加快,加速火焰的进一步推动又导致火焰阵面的更大变形。由于壁面附近存在粘性边界层,流速的增大会使管内出现湍流。大涡湍流使火焰皱褶,增加燃烧面积,小涡湍流可提高火焰内部的有效输运能力,这些都有助于提高燃烧速率。湍流强度随轴向流速的增加而增加。当湍流足够强时,未燃流团将被火焰所吞食形成燃烧的相干流块。这些流块在轴心附近温度高、流速大,壁面附近温度低流速小<sup>[23]</sup>。推测由于可燃气体在轴向体积分数呈不均匀分布,导致区域 2~4 内湍流程度呈现较为复杂的变化,在总体先升后降的趋势下发生波动,根据式(7)可发现最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、最大温度及最大速度均会受到一定影响。

## 2 结 论

(1) 连通装置均一甲烷体积分数 6.517% 至 8.067%,且大容器中心点火工况时,最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、最高温度和最大速度,以及这些爆炸参数达到最大值时的时刻值随体积分数值的变化约呈线性关系;(2) 连通装置大容器甲烷体积分数 6.0%,体积分数梯度为 2.0%~8.0%,且大容器中心点火时,最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、最高温度和最大速度随体积分数梯度总体上先增大后减小,但由于管道内湍流程度高呈现较为复杂的变化,在体积分数梯度 6.0%~7.5% 之间可能出现波动;(3) 连通装置内均一甲烷体积分数在 6.517%~8.067% 范围内,且大容器内甲烷的体积分数 6.0%,体积分数梯度为 2.0%~8.0%,大容器中心点火时,最大爆炸压力位于小容器内;(4) 连通装置内均一甲烷体积分数在 6.517%~8.067% 范围内,且大容器内甲烷的体积分数为 6.0%,体积分数梯度为 2.0%~8.0%,大容器中心点火时,最大压力上升速率位于管道 1 或管道 2 中;(5) 连通装置内均一甲烷体积分数为 6.517%~8.067% 范围内,大容器中心点火时,最大温度位置在大容器内;连通装置大容器内甲烷的体积分数为 6.0%,体积分数梯度为 2.0%~8.0% 时,大容器中心点火时,最高温度位置在小容器内;(6) 由于火焰传播在管道内呈现持续加速现象,因此连通装置内均一甲烷体积分数为 6.517%~8.067% 范围内,大容器中甲烷体积分数 6.0%,体积分数梯度为 2.0%~8.0%,且大容器中心点火时,最大速度位于管道 3,速度值可达 400~600 m/s。

## 参考文献:

- [1] BARTKNECHT W. Explosion course prevention protection [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981.
- [2] PHYLAKTON H, ANDREWS G E. Gas explosions in linked vessels [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1993, 6(1): 15-19. DOI: 10.1016/0950-4230(93)80015-E.
- [3] LUNN G A, HOLBROW P, ANDRES S, et al. Dust explosions in totally enclosed interconnected vessel systems [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1995, 9(1): 45-58.
- [4] HOLBROW P, ANDRES S, LUNN G A. Dust explosions in interconnected vented vessels [J]. *Journal of Loss Prevention in*

- the Process Industries, 1996, 9(1): 91–103. DOI: 10.1016/0950-4230(95)00055-0.
- [5] HOLBROW P, LUNN G A. Dust explosion protection in linked vessels: guidance for containment and venting [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1999, 12: 227–234. DOI: 10.1016/S0950-4230(98)00050-3.
- [6] 严建骏, 蒋军成, 王志荣, 等. 连通容器内预混气体爆炸过程的实验研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2009, 4(6): 10–14.  
YAN J J, JIANG J C, WANG Z R, et al. Experimental investigation into explosion of premixed gases in linked vessels [J]. *Safety Production Science and Technology in China*, 2009, 4(6): 10–14.
- [7] 尤明伟, 蒋军成, 王志荣, 等. 连通容器中不同连通管径爆炸数值模拟分析 [J]. *工业安全与环保*, 2010, 36(12): 25–26.  
YOU M W, JIANG J C, WANG Z R, et al. Numerical simulation of gas explosion in linked vessels with different pipe diameters [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2010, 36(12): 25–26.
- [8] 王志荣, 蒋军成, 郑杨艳. 连通容器内气体爆炸过程的数值分析 [J]. *化学工程*, 2006, 34(10): 13–16. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2006.10.004.  
WANG Z R, JIANG J C, ZHENG Y Y. Numerical analysis of gas explosion process in linked vessels [J]. *Chemical Engineering*, 2006, 34(10): 13–16. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2006.10.004.
- [9] 尤明伟, 喻源, 蒋军成, 等. 不同管长条件下连通容器预混气体的爆炸 [J]. *燃烧科学与技术*, 2012, 18(3): 256–259.  
YOU M W, YU Y, JIANG J C, et al. Premixed flammable gas explosion in containers connected by pipes with different lengths [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2012, 18(3): 256–259.
- [10] 王志荣, 周超, 师喜林, 等. 连通容器内预混气体泄爆过程 [J]. *化工学报*, 2011, 62(1): 287–291.  
WANG Z R, ZHOU C, SHI X L, et al. Gas explosion venting of premixed gases in linked vessels [J]. *CIESC Journal*, 2011, 62(1): 287–291.
- [11] THOMAS G O, SUTTON P, EDWARDS D H. The behavior of detonation waves at concentration gradients [J]. *Combustion Flame*, 1991(84): 312–322.
- [12] KUZNETSOV M S, ALEKSEEV V I, DOROFEEV S B, et al. Detonation propagation, decay, and reinitiation in nonuniform gaseous mixtures [C]// Twenty-Seventh International Symposium on Combustion/The Combustion Institute, 1998:2241–2247.
- [13] VOLLMER, K G, ETTNER F, SATTELMAYER T. Influence of concentration gradients on flame acceleration in tubes [J]. *Energetic Matter Science Technology*, 2011, 72: 74–77.
- [14] VOLLMER K G, ETTNER F, SATTELMAYER T. Deflagration-to-detonation transition in hydrogen-air mixtures with a concentration gradient [J]. *Combust Science & Technology*, 2012, 184(10-11): 1903–1915. DOI: 10.1080/00102202.2012.690652.
- [15] KESSLER D A, GAMEZO V N, ORAN E S. Wave structures and irregular detonation cells in methane-air mixtures with concentration gradients[C]//49th AIAA Aerospace Science Meeting. Orlando, Florida, 2011.
- [16] ISHII K, KOJIMA M. Behavior of detonation propagation in mixtures with concentration gradients [J]. *Shock Waves*, 2007, 17(1): 95–102.
- [17] WANG C J, WEN J X. Numerical simulations of hydrogen-air detonation wave propagation in a non-uniform semi-confined flat layer [C]//The Sixteenth International Colloquium on Dust Explosions and the Eleventh Colloquium on Gas, Vapour, Liquid and Hybrid Explosions. Bergen, Norway, 2014.
- [18] HAN W H, WANG C, CHUNG K. Role of transversal concentration gradient in detonation propagation [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 865: 602–649. DOI: 10.1017/jfm.2019.37.
- [19] 陈昊驰. 柱状空间内不同浓度甲烷爆炸传播特性的实验研究 [D]. 石家庄: 华北科技学院, 2018: 38–44.
- [20] 王信群, 王婷, 徐海顺, 等. BC 粉体抑爆剂改性及抑制甲烷/空气混合物爆炸 [J]. *化工学报*, 2015, 66(12): 5171–5178.  
WANG X Q, WANG T, XU H S, et al. Modification of commercial BC dry chemical powder suppressant and experiments on suppression of methane-air explosion [J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(12): 5171–5178.
- [21] XIAO H H, HE X C, DUAN Q L, et al. An investigation of premixed flame propagation in a closed combustion duct with a 90° bend [J]. *Applied Energy*, 2014, 134: 248–256. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.07.071.
- [22] 尤明伟. 连通容器气体爆炸及泄爆动力学过程研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2011.
- [23] 王志荣. 受限空间气体爆炸传播及其动力学过程研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2005.

(责任编辑 王易难)