

不同点火能对甲烷爆炸的影响

程于, 叶青, 贾真真, 李淑娟, 张浩浩

湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2023年3月3日; 录用日期: 2023年4月4日; 发布日期: 2023年4月12日

摘要

甲烷爆炸会带来巨大的财产损失、人员伤亡、环境破坏以及社会不良效应, 影响甲烷爆炸的因素众多, 其中点火能是影响甲烷爆炸及其破坏特性的一个重要因素。为探究点火能对甲烷爆炸传播性能的影响, 利用Fluent模拟软件建立燃气管道模型, 模拟在密闭空间内甲烷爆炸的传播过程, 并进行模型可靠性验证。本次模拟了在5种不同点火能条件下的甲烷爆炸传播规律, 测定了温度、超压峰值和速度等参数。研究表明: 从弱点火能到强点火能, 密闭管道内火焰传播速度加快, 甲烷爆炸超压峰值增大, 温度升高, 超压峰值和温度均与点火能量大小呈对数函数关系。

关键词

甲烷爆炸, 点火能, 数值模拟, Fluent

Effects of Different Ignition Energy on Methane Explosion

Yu Cheng, Qing Ye, Zhenzhen Jia, Shujuan Li, Haohao Zhang

School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Mar. 3rd, 2023; accepted: Apr. 4th, 2023; published: Apr. 12th, 2023

Abstract

Methane explosion brings huge property losses, casualties, environmental damage and social adverse effects. There are many factors affecting methane explosions, among which ignition energy is an important factor affecting methane explosion and its destructive characteristics. In order to investigate the effect of ignition energy on the propagation performance of methane explosion, fluent simulation software is used to simulate the propagation process of methane explosion in a two-dimensional confined space and verify the results with previous experiments to obtain the peak overpressure, temperature and flame propagation rate of methane explosion under different

ignition energy conditions. The results of the study show that from weak ignition energy to strong ignition energy, the flame propagation speed in the confined pipe increases, the peak overpressure of the methane explosion increases, the temperature increases, and both the peak overpressure and temperature are logarithmically related to the magnitude of the ignition energy.

Keywords

Methane Explosion, Ignition Energy, Numerical Simulation, Fluent

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着燃气的全面推广,燃气用户使用率的增加,燃气事故起数略有降低,但根据《全国燃气事故分析报告》指出因燃气泄漏进入密闭空间造成燃气爆炸导致人员伤亡的比例较高。燃气中的主要成分是甲烷气体,甲烷的爆炸特性严重影响着燃气的爆炸特性。因此,本次以甲烷为研究对象进行分析燃气爆炸的传播特性。影响甲烷爆炸的因素有许多,其中点火源对甲烷爆炸的影响较为突出,点火源对甲烷爆炸影响体现在三大方面,包括点燃方法,点火方位及点火能大小[1] [2] [3],而点火能大小对甲烷爆炸影响则更为广泛,为此国内外学者进行了大量的研究并取得优异的成果。徐景德,董世宁[4] [5] [6]等研究了点火能量大小对不同含量的甲烷爆炸超压的不同程度影响。王海燕[7]等认为点点火源比面点火源更容易造成瓦斯灾害,因为点点火源的能量更为集中,达到瓦斯爆炸的条件更为迅速。吴红波[8]等发现在弱点火源条件下点火能与火焰传播速率呈正相关,且火焰速率会先减小后增大。仇锐来[9] [10] [11] [12]等实验研究发现点火能量增加,爆炸压力峰值增大,爆炸压力峰值出现的时间缩短,火焰传播速度也增大。周宁[13]等探究了不同点火能条件下瓦斯爆炸冲击波的发展规律,发现点火能增大,爆炸反应的程度就越剧烈,管道中的爆炸超压峰值就越高,火焰二次加速和抵抗抑制火焰传播的能力越强。李润之[14] [15]等实验分析了点火能量对甲烷爆炸超压及超压上升速率的影响,发现了点火能量与各参数之间呈不同的指数函数关系。黄文祥[16] [17] [18]等探究了瓦斯爆炸火焰特征与火焰传播速率,发现了在同一含量的瓦斯内,强点火能的火焰传播速率比弱点火能的速率大。周蓉芳[19]等验证了点火能量大小会影响火核的形成,并会干扰初期火焰的发展。郑兴忠[20]等实验证明了当点火能 $E \geq 1 \text{ J}$ 时,火焰长度会随之增加;当点火能 $E < 1 \text{ J}$ 时,火焰长度迅速增长至最大值。Eckhoff [21]测定了不同当量比下甲烷混合气体的最小点火能量。Vishwakarma [22]、Kindracki [23]、Bi [24]等发现了在中心点火比在端点点火的爆炸超压峰值更大,因为在中心点火会减少壁面的能量消耗。

综上所述,点火能影响着甲烷爆炸的火焰传播速度、爆炸压力峰值及压力上升速度等因素[25] [26],但实验中的点火过程存在能量损失,导致点火能与理论计算存在差异。Fluent 软件可应用于流体的化学反应模型,高效安全地计算模拟甲烷爆炸工程。为此,本文利用 Fluent 软件模拟不同点火能条件下密闭管道内甲烷爆炸过程[27] [28],并分析甲烷爆炸及其传播过程,验证和完善相关研究成果,期望研究结果能对预防甲烷爆炸以及减少甲烷爆炸带来的损失提供一定的参考意义。

2. 计算方法

2.1. 假设条件

密闭空间内甲烷爆炸本质上是一个快速的化学反应过程,为了简化计算,减少其他因素对甲烷爆炸

的影响,做出如下假设:(1)在常温常压条件下;(2)甲烷爆炸单项不可逆;(3)甲烷与空气混合均匀,混合气体满足气体状态方程;(4)管道内壁为光滑绝热刚性壁面,不与外界产生热交换现象;(5)管道内无障碍。

2.2. 数学模型

根据甲烷爆炸特性,本文在假设条件基础上针对甲烷爆炸过程建立湍流模型,过程中包含质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及化学组分平衡方程四大方程[20],见下式(1)~(3)。

质量守恒方程:

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

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + u_e \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j h - \frac{u_e}{\sigma_h} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \frac{dP}{dt} + S_h \quad (3)$$

化学组分平衡方程:

$$\frac{\partial \rho Y_{fu}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u Y_{fu} - \frac{u_e}{\sigma_{fu}} \frac{\partial Y_{fu}}{\partial x_j} \right) = R_{fu} \quad (4)$$

式中:下标 ijk 为求和约定; ρ 为密度; t 为时间; u 为某方向上的速度分量; x 为空间坐标; μ_e 是流体动力系数; δ_{ij} 为克罗尼克尔符号; P 为压力; g 为重力加速度; h 为总焓; σ_h 为湍流脉动动能扩散的有效普朗特数; S_h 为源项; Y_{fu} 为燃料的质量分数; R_{fu} 为化学反应速率。

2.3. 建立几何模型与网格划分

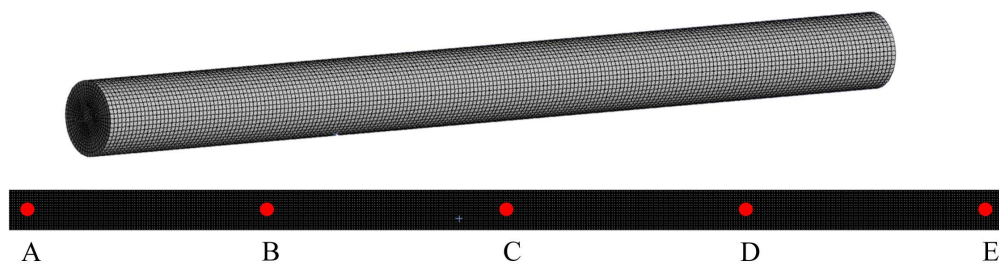


Figure 1. Pipeline model
图 1. 管道模型

为了更加准确地模拟甲烷在密闭管道内的爆炸过程,通过资料查询,以直径为 80 mm 的两米管道为原型,建立长 2 m、宽 0.08 m 的二维矩形模型,并对模型建立五个测点,分别是点 A (0.1, 0.04)、B (0.5, 0.04)、C (1.0, 0.04)、D (1.5, 0.04)、E (1.9, 0.04),如图 1 所示(ABCDE 表示 5 个测点)。本文将点火能小于 100 mJ 称为弱点火能,点火能大于 100 mJ 称为强点火能。利用 mesh 将模型网格划分为 1 mm,分别设置弱点火能与强点火能两种条件下的甲烷混合气体进行模拟。

2.4. 边界条件与初始条件

在前面假设条件中已说明甲烷爆炸过程绝热，因此边界条件为管道壁面，管道固定厚度为零。

为研究不同点火能对甲烷爆炸特性的影响，本次模拟设置的初始条件如表 1 所示，忽略空气中 CO_2 与 H_2O 的影响。

Table 1. Initial conditions

表 1. 初始条件

参数	数值
ω_{CH_4}	0.053
ω_{O_2}	0.021
T_0/K	273
P_0/Mpa	0.101

根据上述条件将混合气体充满管道模型，并在模型的最左侧设置一个半径为 0.005 m 的点火源，点火位置为(0.04 m, 0.04 m)。选择 k- ϵ 湍流模型，打开能量方程，湍流相关参数采用二阶迎风格式，求解器选择压力基，时间设置为瞬态，单位时间步长为 0.00005 s，步数 8000。选择组分输运模型，添加甲烷与氧气，但在甲烷爆炸过程中涉及多种中间产物与瞬间产物，因此采用 methane-air-2step 的两步化学反应，并使用 PISO 算法与有限体积法对甲烷爆炸过程进行模拟计算。

3. 模拟结果的验证与分析

3.1. 数值模拟结果的验证

利用该模型，本次设置点火能为 1 J 来进行甲烷爆炸的数值模拟，模拟结果如图 2 所示。

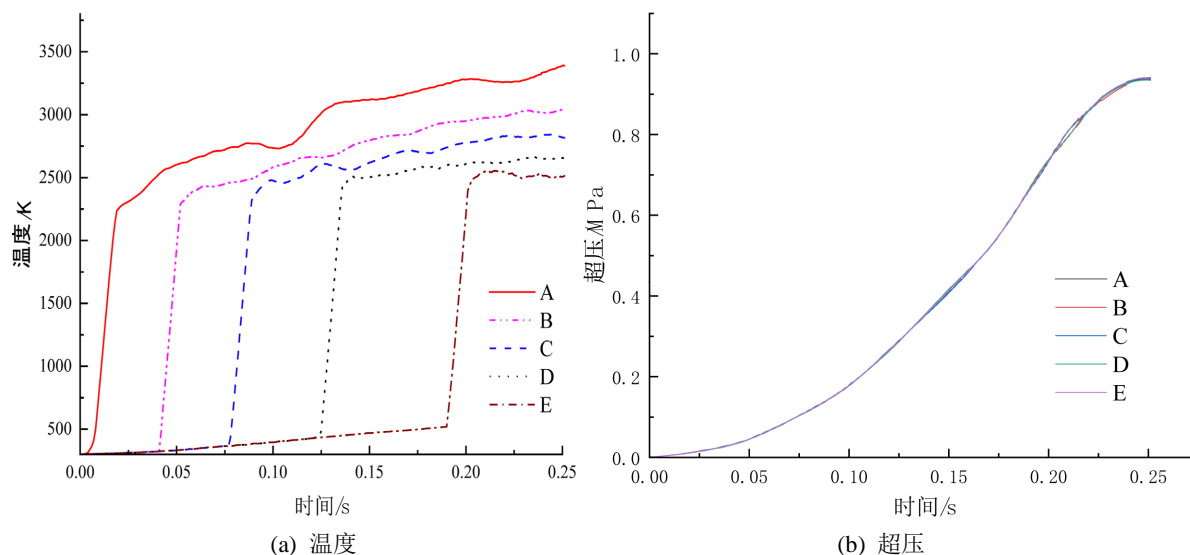


Figure 2. Methane explosion simulation results for $E = 1 \text{ J}$

图 2. $E = 1 \text{ J}$ 的甲烷爆炸模拟结果

从图 2 中可以看出，在强点火能 1 J 的情况下，甲烷爆炸后密闭管道内的最高温度为 3410 K，超压峰值为 0.96 MPa。高娜[29]在研究初始温度与初始压力对瓦斯爆炸特性影响实验中测得同样条件下的瓦

斯爆炸温度为 2900 K、爆炸超压为 0.77 MPa，与上述模拟结果相似。

3.2. 甲烷爆炸温度的模拟结果分析

在上述验证的基础上，再分别设置了 5 种点火能条件，分别为 0.005 J、0.045 J、0.09 J、0.3 J 与 0.6 J，并对甲烷爆炸温度、超压和火焰传播速度进行了数值模拟，模拟结果如下。

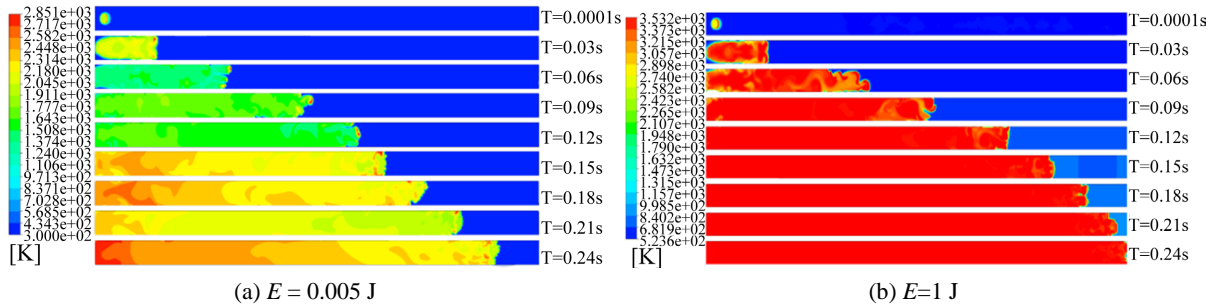


Figure 3. Methane explosion flame propagation diagram

图 3. 甲烷爆炸火焰传播图

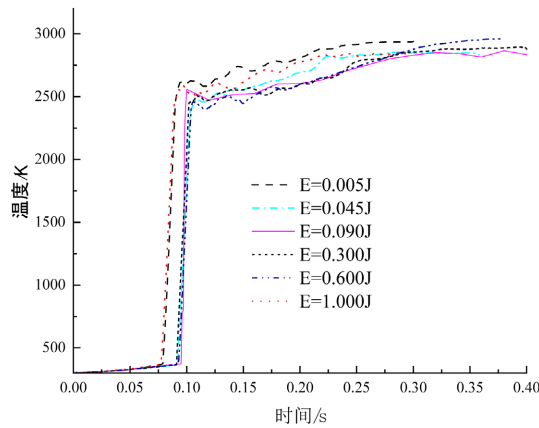


Figure 4. Methane explosion temperature under different ignition conditions

图 4. 不同点火条件下甲烷爆炸温度

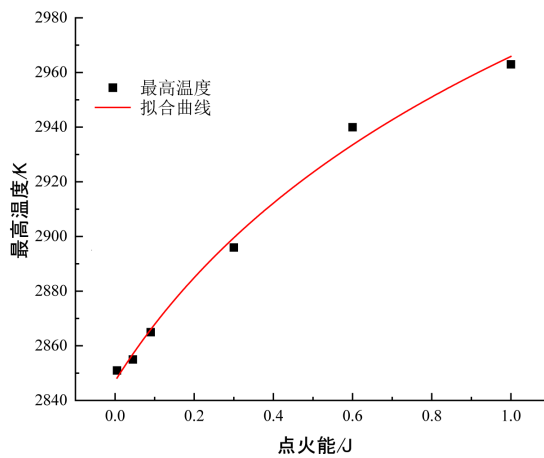


Figure 5. Maximum temperature of methane explosion under different ignition conditions

图 5. 不同点火条件下甲烷爆炸最高温度

选择点火能为 0.005 J 的弱点火能与强点火能进行对比分析, 将两种点火能的甲烷爆炸火焰传播过程绘制在图 3 中。从图 3 中可以看出, 在左侧的点火位置点燃甲烷后, 混合气体受热膨胀并向右压迫未燃烧气体, 火焰沿爆炸波阵面加速向右燃烧, 甲烷气体在爆炸过程中呈现了“两波三区”的现象。在管道的前半部, 管道壁面会消耗甲烷爆炸的能量, 因此火焰锋面中部的传播速度比火焰锋面两侧的传播速度快; 在管道的后半部, 受管道空间的限制, 气流反向流动, 火焰锋面中部的传播速度比火焰锋面两侧的传播速度慢, 火焰逐渐传播至管道末端, 直到爆炸结束。从图中也可以对比看出在点火能 0.005 J 条件下的甲烷爆炸火焰最高温度比在点火能 1 J 条件下的甲烷爆炸火焰温度低, 两者的传播过程都类似, 但两者的火焰传播速度的不同。

不同点火能条件下管道内测点 C (1.0, 0.04) 的爆炸温度变化如图 4 所示。将温度陡升的点称为起跳点, 从图中可以看出弱点火能条件下甲烷爆炸温度起跳点会比在强点火能条件下甲烷爆炸温度起跳点晚, 管道内的温度呈爆发式增长在 100 毫秒内。在强点火能条件下的管道温度会比在弱点火能条件下的管道温度高。不同点火能条件下的管道内最高温度如图 5 所示。将最高温度与点火能量进行拟合, 可以得到温度与点火能量呈对数函数关系, 拟合函数如 5 所示, R^2 指拟合优度, 下同:

$$y = 98.17182 \ln(x + 0.42471) + 2931.12725, \text{ 其中 } R^2 = 0.9932 \quad (5)$$

3.3. 甲烷爆炸超压的模拟结果分析

从图 2(b) 中可以看出管道内各测点的超压是相差无几的, 将不同点火能条件下测点 C (1.0, 0.04) 的超压变化情况如图 6 所示。从图 6 中可以看出甲烷爆炸超压峰值在 0.9 MPa 左右, 随着点火能的增大, 甲烷爆炸的超压峰值也在扩大, 且达到超压峰值的时间变短, 在强点火能条件下的甲烷爆炸达到超压峰值时间约为 0.2 s, 在弱点火能条件下的甲烷混合气体爆炸达到超压峰值时间约为 0.3 s, 且强点火能下的甲烷爆炸超压增长速率比弱点火能条件下的甲烷混合气体爆炸超压增长速率快。不同点火能条件下甲烷爆炸的超压峰值以及到达超压峰值的时间如图 7 所示。从图 7 中对比可知, 点火能量的增加会小幅增大甲烷混合气体爆炸的超压峰值, 并缩短到达超压峰值的时间。将点火能与超压峰值、到达超压峰值的时间进行拟合, 得到甲烷混合气体爆炸超压峰值 y_1 、到达超压峰值时间 y_2 与点火能量大小均呈对数函数关系, 所得拟合函数如 6、7 所示。

$$y_1 = 0.18397 \ln(x + 3.16353) + 0.69892, \text{ 其中 } R_1^2 = 0.92015 \quad (6)$$

$$y_2 = -0.17194 \ln(x + 1.00035) + 0.38653, \text{ 其中 } R_2^2 = 0.93358 \quad (7)$$

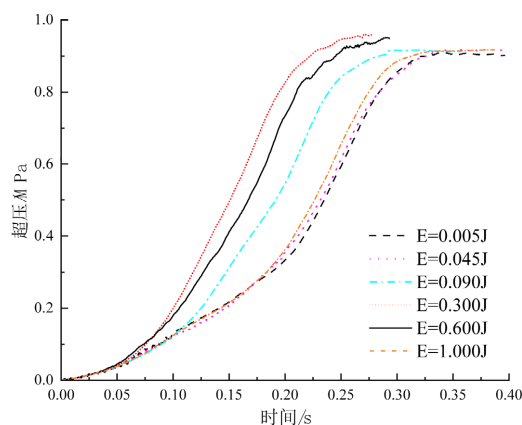


Figure 6. Methane explosion overpressure under different ignition conditions
图 6. 不同点火条件下甲烷爆炸超压

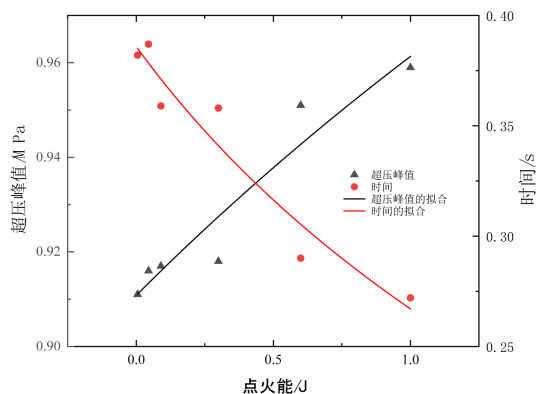


Figure 7. Peak overpressure of methane explosion under different ignition conditions
图 7. 不同点火条件下甲烷爆炸超压峰值

3.4. 甲烷爆炸火焰传播速度的模拟结果分析

管道内火焰到达某点的时间,可测出火焰在管道内某段距离的传播速度,表 2 是在不同点火条件下火焰到达各测点所需时间。从表中可以看出在弱点火能条件下,火焰传播速度相差无几,随着点火能量的增加,火焰到达各测点的时间逐渐缩短。从甲烷爆炸火焰传播时间可以看出,与在弱点火能条件相比,在强点火能条件下的火焰传播速度更快,这是因为随着点火能量的增加,会使体系内产生的活化能增多,活化的甲烷分子之间碰撞会变得剧烈,这会加快甲烷反应速率。

Table 2. Time for the flame to reach each measurement point in a methane explosion

表 2. 甲烷爆炸中火焰到达各测点的时间

点火能/J	火焰到达各测点所用时间/s				
	A	B	C	D	E
0.005	0.0086	0.0500	0.0950	0.179	0.254
0.045	0.0086	0.0503	0.0957	0.189	0.266
0.090	0.0086	0.0496	0.0964	0.182	0.259
0.300	0.0086	0.0500	0.0956	0.143	0.219
0.600	0.0080	0.0490	0.0835	0.118	0.181
1.000	0.0078	0.0460	0.0829	0.117	0.180

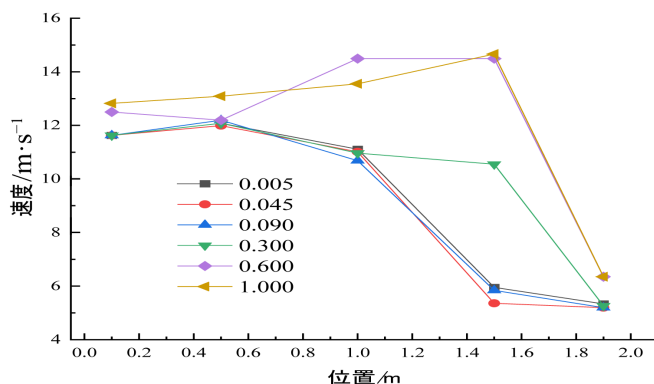


Figure 8. Flame propagation speed under different ignition energy conditions
图 8. 不同点火能条件下火焰传播速度

根据上表计算各测点的火焰传播速度,如图8所示。从图8中可以看出强点火能条件下的火焰初始速度比弱点火能条件下的火焰初始速度高,在靠近管道终端时,受气压的阻碍,火焰传播速度会急剧减小。

4. 结论

本次利用 Fluent 模拟软件建立了燃气管道的二维密闭模型,模拟在不同点火能条件下甲烷爆炸过程,分析了甲烷爆炸传播过程中管道内的超压、爆炸温度及火焰传播速度,得出如下结论:

1) 密闭管道内甲烷爆炸过程中,随着点火能由弱至强,爆炸超压峰值增大,管道内最高温度升高,火焰传播速度加快。

2) 密闭管道内温度场变化较为规律,从点火端开始,管道内温度分布呈现阶梯状,最高温度、超压峰值与点火能量呈对数函数关系。

3) 提出一种密闭管道甲烷爆炸数值模拟方法,通过对比分析强弱点火能对甲烷爆炸的影响,为燃气爆炸特性提供了理论依据。

基金项目

国家自然科学基金(52174177, 52174178); 湖南省教育厅科研基金项目(18A187, 20B240)。

参考文献

- [1] 陈国华,董浩宇,张强,赵一新,胡盛,李少鹏.狭长受限空间甲烷-空气爆炸事故研究评述[J].安全与环境学报,2020,20(3):946-959.
- [2] 郑凯.管道中氢气/甲烷混合燃料爆燃预混火焰传播特征研究[D]:[博士学位论文].重庆:重庆大学,2017.
- [3] 罗振敏,吴刚.圆柱体障碍物对密闭管道内瓦斯爆炸特性影响的数值模拟[J].安全与环境工程,2020,27(4):189-194.
- [4] 徐景德,董世宁,刘梦杰.点火能与瓦斯浓度对瓦斯爆炸压力的影响实验研究[J].煤炭与化工,2020,43(7):112-115.
- [5] 董世宁.点火源对瓦斯爆炸的影响综述及展望[J].煤炭与化工,2020,43(3):108-111.
- [6] 董世宁.电火源点火能量与瓦斯浓度对瓦斯爆炸传播影响的实验研究[D]:[硕士学位论文].廊坊:华北科技学院,2020.
- [7] 王海燕,张雷,吕佳溪.点火方式对甲烷爆炸生成气体产物的影响研究[J].煤矿安全,2020,51(5):16-20+26.
- [8] 吴红波,张立,郭子如.点火能对瓦斯火焰传播影响的实验研究[J].煤矿爆破,2004(1):5-7.
- [9] 仇锐来.点火能量对瓦斯爆炸传播的数值模拟研究[J].煤矿安全,2011,42(1):5-8.
- [10] 仇锐来,张延松,张兰,等.点火能量对瓦斯爆炸传播压力的影响实验研究[J].煤矿安全,2011,42(7):8-11.
- [11] 仇锐来,张延松,司荣军,等.点火能量对瓦斯爆炸传播影响的实验研究[J].矿业安全与环保,2011,38(1):6-9+12.
- [12] 仇锐来.点火能量对瓦斯爆炸火焰传播速度的影响[J].煤炭科学技术,2011,39(3):52-55.
- [13] 周宁,耿莹,冯磊,等.点火能对预混气体爆炸过程及管道薄壁加载响应的影响[J].实验力学,2015,30(5):643-648.
- [14] 李润之,司荣军.点火能量对瓦斯爆炸压力影响的实验研究[J].矿业安全与环保,2010,37(2):14-16+19+91.
- [15] 李润之.点火能量与初始压力对瓦斯爆炸特性的影响研究[D]:[博士学位论文].青岛:山东科技大学,2010.
- [16] 黄文祥.变点火能作用下瓦斯爆炸火焰传播特征实验研究[D]:[硕士学位论文].西安:西安科技大学,2010.
- [17] 黄文祥,李树刚,李孝斌,等.不同点火能量作用下管道内瓦斯爆炸火焰传播特征[J].煤矿安全,2011,42(8):7-10.
- [18] 黄文祥,陈玉涛,秦江涛.管道内瓦斯爆炸变点火能系统构建与爆炸初期火焰三维分析[J].煤矿安全,2016,47(11):181-183.

-
- [19] 周蓉芳, 魏若男, 周竹杰, 等. 点火能量对天然气空气预混合气层流燃烧的影响[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7): 21-25.
- [20] 郑兴忠, 郑丹. 甲烷浓度和点火能量对瓦斯爆炸火焰长度影响的实验研究[J]. 消防技术与产品信息, 2015(3): 12-15.
- [21] Eckhoff, R. (2005) *Explosion Hazards in the Process Industries*. Gulf Publishing Company, Houston.
- [22] Vishwakarma, K.R., Ranjan, V. and Kumar, J. (2014) Comparison of Explosion Parameters for Methane-Air Mixture in Different Cylindrical Flame Proof Enclosures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **31**, 82-87. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.07.002>
- [23] Kindracki, J., Kobiera, A., Rarata, G., *et al.* (2007) Influence of Ignition Position and Obstacles on Explosion Development in Methane-Air Mixture in Closed Vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **20**, 551-561. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.05.010>
- [24] Bi, M.S., Dong, C.J. and Zhou, Y.H. (2012) Numerical Simulation of Premixed Methane—Air Deflagration in Large L/D Closed Pipes. *Applied Thermal Engineering*, **40**, 337-342. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.065>
- [25] 邵惠阁. 电火花放电点火过程能量释放规律研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [26] 李祥春, 聂百胜, 杨春丽, 等. 封闭空间内瓦斯浓度对瓦斯爆炸反应动力学特性的影响[J]. 高压物理学报, 2017, 31(2): 135-147.
- [27] 丁欣硕, 焦楠. FLUENT 14.5 流体仿真计算从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 16-17.
- [28] 王健, 屈世甲. 密闭空间瓦斯爆炸多场演化特点模拟研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(10): 154-159.
- [29] 高娜. 初始温度和初始压力对瓦斯爆炸特性的影响研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2016.