

# 狭长受限空间内甲烷爆炸的认识研究

江 雯, 谢乐源

重庆科技大学安全工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年3月10日; 录用日期: 2024年3月31日; 发布日期: 2024年4月28日

## 摘 要

这篇综述考察了狭长受限空间内甲烷爆炸影响因素的现有知识。重点关注了各种障碍物、湍流、不同点火位置、初始点火能量对甲烷爆炸的影响。研究发现障碍物可能改变火焰传播路径和爆炸过程的动力学行为。其次, 湍流结构的变化可能导致火焰传播速度、火焰形态和爆炸强度的显著变化。此外, 初始点火能量作为另一个关注点, 研究表明它对管内甲烷爆炸过程的发展和爆炸特性有着重要影响, 其大小直接影响着爆炸的启动和发展过程。本文对文献中发现的各种调查进行了分析, 旨在了解甲烷与空气混合引发的爆炸。

## 关键词

甲烷爆炸特性, 障碍物, 湍流, 不同点火位置

# Recognition of Methane Explosions in Long and Narrow Confined Spaces

Wen Jiang, Leyuan Xie

School of Safety Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing

Received: Mar. 10<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 31<sup>st</sup>, 2024; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

This review examines the current knowledge of the factors influencing methane explosions in narrow confined spaces. The effects of various obstacles, turbulence, different ignition positions, and initial ignition energy on methane explosions were focused on. It was found that obstacles may alter the flame propagation path and the kinetic behaviour of the explosion process. Secondly, changes in turbulence structure may lead to significant changes in flame propagation speed, flame morphology, and explosion intensity. In addition, the initial ignition energy, as another concern, has been shown to have a significant influence on the development and explosion characteristics

of the methane explosion process in the tube, and its magnitude directly affects the initiation and development process of the explosion. In this paper, various investigations found in the literature have been analysed with the aim of understanding explosions initiated by methane-air mixing.

## Keywords

Methane Explosion Characteristics, Obstacles, Turbulence, Different Ignition Positions

Copyright © 2024 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

甲烷 - 空气系统是危及生命的混合物, 尤其是在地下煤矿中。这些混合物引发的爆炸摧毁了矿井的基础设施, 过去夺走了数千人的生命。甲烷爆炸和其他与天然气有关的事故造成的死亡人数占 68.34%。在每一次爆炸灾难中, 都有人丧生, 给矿业公司造成巨大的经济损失。在工业和采矿领域, 狭长受限空间内的甲烷爆炸是一种严重的安全隐患, 常常导致严重的人员伤亡和设备损坏。近年来, 研究人员着手探索甲烷 - 空气系统的特性和机理。国内外的许多研究表明, 受限空间中的甲烷爆炸具有一些独特的特点和挑战。这些受限空间, 例如巷道、隧道和管道, 由于其限制了气体扩散和空气流动的能力, 使得其中的甲烷积聚并达到可燃浓度的可能性增加。尤其是在巷道这样的受限空间中, 由于其狭窄的特性, 甲烷爆炸所造成的破坏性更为严重。这些灾难的严重性促使许多研究人员开始对甲烷 - 空气系统进行研究。

随着认识的不断深入, 对受限空间内甲烷爆炸的特性和机理的研究显得尤为重要。在这些狭长受限空间中, 各种设备、风门和风窗不仅影响着气体的流动, 还可能成为爆炸扩散的障碍物。这些障碍物导致气体在巷道中的聚集和局部浓度的不均匀分布, 进而增加了甲烷爆炸的风险[1]。因此, 了解在这些狭长受限空间中甲烷爆炸的特性和机理, 并采取相应的安全措施, 对于预防和减轻事故的发生具有重要意义。

在这一背景下, 本研究旨在通过对狭长受限空间内甲烷爆炸的认识研究, 深入探讨巷道等特定环境下甲烷爆炸的机理和规律, 分析设备及其他障碍物对爆炸扩散的影响, 为制定更有效的安全管理措施提供理论支持和技术指导。

## 2. 甲烷 - 空气爆炸特性

火灾是工业和采矿领域面临的重大安全隐患之一, 其中甲烷 - 空气混合物的爆炸尤为引人注目。这一现象早在 19 世纪就引起了研究者的兴趣, 最初的研究由 Mallard 和 Chatelier 在煤矿井下瓦斯爆炸的探索中奠定了基础。随着工业和科学技术的迅速发展, 研究者们在这一领域投入了大量的精力, 对火焰传播现象的研究进入了一个新的阶段, 不断推动着相关领域的发展。

### 2.1. 不同障碍物配置下的甲烷 - 空气爆炸特性

在工业和采矿环境中, 狭长受限空间内存在各种障碍物, 如设备、管道、风门等, 它们可能对甲烷 - 空气混合物爆炸特性产生重要影响。这些障碍物不仅可能限制气体的扩散和流动, 还可能改变爆炸的传播路径和速度, 从而影响爆炸的严重程度和后果。

自 Chapman 和 Wheeler 首次开展障碍物条件下受限空间内可燃气体爆炸规律研究以来[2], 人们开始关注障碍物作用下火焰传播规律的研究[3]-[10]。Moen 等[11]发现火焰加速主要受控于障碍物扰动所形成的的大尺度流场。Naiinna、Ciaarelli 等[12] [13]则着重研究了阻塞率和障碍物间距对管道气体爆炸时火焰结构及动态超压的影响。McGarry 等[14]对管内火焰加速和湍流作用进行了研究, 得出燃烧产物内所形成的高强度湍流是火焰传播速度明显增加的主要原因, 其湍流大小主要受到障碍物表面剪切流动及火焰不稳定性影响。但 Bychkov 等人[15]提出了一个与前人观点不同的见解, 指出在火焰加速过程中, 湍流的作用较小。相反, 他们认为火焰加速的主要原因是障碍物开口处形成的火焰喷射作用。

Zhang [16]等研究了一个障碍物对连通容器中甲烷 - 空气混合物爆炸强度的影响。实验结果表明, 障碍物可以提高反应速度。当堵塞比达到一定值时, 对火焰的扰动作用最强, 湍流强度和爆炸强度最强。随着点火源与障碍物的距离越短, 障碍物对爆炸的干扰作用越大。Zhou [17]等证明外部障碍物由于压力波的反射和衍射, 导致了邻近区域超压的上升。Wen [18]等发现距离障碍物越远的位置产生的压力越高, 达到最大值需要的时间越长。A. R. Hall [19]等证明增加障碍物的数量会增加超压并扭曲火焰前缘, 导致形成不连贯的火焰。刘磊[20]等利用不同阻塞率和不同位置的障碍物探究了甲烷—空气混合气体的爆炸规律, 发现不同阻塞率的障碍物会使得爆炸压力峰值出现先增大后减小的规律, 且该规律会随着距离的增加而变得更加显著。Wan Shaoji [21]等发现火焰传播至障碍物之后, 火焰速度和爆炸超压均出现持续上升的趋势, 而阻塞率越大, 障碍物对爆炸强度的激励作用越大。

温小平[18]考虑了障碍物的数量、距火源的障碍物距离以及流向和横向障碍物的位置。结果表明, 障碍物数量增加会导致火焰速度和峰值超压的提高, 但达到峰值的时间并不完全受此影响。障碍物配置中具有最远障碍物的情况下, 虽然产生更高的超压, 但火焰传播速度较慢。此外, 中心或交错障碍物配置会导致相对较高的峰值超压和火焰速度。这些发现有助于深入理解甲烷 - 空气爆炸特性受不同障碍物配置影响的规律。

尽管研究者已经通过大量实验对障碍物条件下的火焰传播进行了研究, 但测量爆炸火焰流场内部所有参数仍然十分困难。为了弥补实验研究的不足, 许多学者转向了数值模拟方法[22]-[31]。针对障碍物条件下的火焰加速动力学过程, Chen 等[32]采用大涡模拟技术对不同阻塞率下的火焰加速过程及涡流形成机理进行了深入分析。研究结果显示, 随着阻塞率的增大, 火焰传播时的峰值速度和压力也相应增加。Coates 等[33]利用二维模型研究了障碍物条件下的燃烧转爆轰(DDT)过程, 发现不同形式的障碍物会导致未燃气体内部形成的涡流和压力波, 这是火焰加速的关键原因。董刚等[34] [35]通过模拟研究了障碍物条件下受限空间内激波与火焰的相互作用, 认为激波产生是火焰加速的主要驱动力。Rubtsov 等[36]认为, 在障碍物作用下, 火焰自身的不稳定性和湍流效应共同促成了火焰的加速过程。

贾静[37]等使用数值模拟的方式将阻塞率为 50%的障碍物分别布置在距离爆炸起点处 10、20、30、70、90 m 的位置, 分析其对爆炸冲击波超压的影响, 经过模拟实验发现障碍物和点火源的距离与爆炸超压峰值成反比, 距离越近, 超压峰值越大。Wang X、Quan Wang、Li 等[38] [39] [40]通过数值模拟研究了密闭容器结构参数、固体障碍物对甲烷爆炸的影响。

除此之外, 其他研究者也对障碍物条件下的火焰传播动力学过程进行了大量模拟研究。

## 2.2. 湍流对爆炸特性的影响

湍流在火灾安全领域一直备受关注, 因为它在爆炸火焰的传播过程中扮演着至关重要的角色。湍流的不规则流动结构和能量传输方式对火焰的加速、扩散和不稳定性产生着显著影响。

Deng J [41]进行了 20 升球形容器中的实验, 测试了静态和湍流条件下甲烷 - 空气的爆炸特性。结果显示, 湍流对甲烷爆炸极限影响不大, 但与静态条件相比, 最大爆炸压力和压力加速度明显增加, 而最

大爆炸时间显著缩短, 尤其是爆炸压力加速度更为显著。随着甲烷浓度的增加, 湍流对爆压的影响更为明显, 尤其是在高浓度情况下。研究结果表明, 减少湍流可以有助于减缓或抑制煤矿瓦斯爆炸。

### 2.3. 点火位置对爆炸特性的影响

在爆炸事件中, 点火位置的选择不仅会影响爆炸的强度和性质, 还会直接影响到爆炸火焰的传播速度、形态和扩散范围。不同的点火位置可能会引发不同的爆炸反应路径, 从而导致爆炸特性发生显著变化。国内外已经使用不同的设备对这一问题进行了研究。

有研究通过泄压管道排放的气体爆炸所采用的方法表明, 端部点火导致的超压高于在圆柱形容器中心点火。Phylaktou [42]等研究发现点火位置和气体浓度对混合气体爆炸强度都产生较大影响。郑立刚[43]等开展了甲烷-空气预混气体爆燃实验研究, 改变点火源位置, 分析点火源位置对甲烷-空气预混气爆燃超压特征的影响。可以看出点火位置的不同对爆炸的影响较大。冯长根[44]等应用 AutoReaGas 软件模拟了煤矿独头巷道(即一端封闭一端开口)内瓦斯爆炸, 认为点火位置离封闭端越近, 各个测点上所得到的超压越大。Kindracki [45]等证明管道中心点火产生的爆炸超压高于管道端部点火。

Sina Davazdah Emami [46]建立了一个由球形容器和水平管组成的实验系统。结果表明, 不同的点火位置导致火焰和压力波的传播不同。在管道内爆炸过程中观察到气体振荡, 在容器壁、容器中心和管道末端点火时, 振荡更为严重。此外, 确定了结构效应对瓦斯爆炸的影响。球形容器点火时, 管道越长, 容器内爆炸强度越弱, 但管道内爆炸强度则越大。管道点火时, 管越长, 管道和容器内的爆炸强度都越大。

虽然对不同点火位置情况下的预混火焰传播进行了广泛的研究, 但对多点火源条件下的甲烷爆炸的研究较少。

### 2.4. 初始点火能量对管内甲烷爆炸的影响

在管道内部, 初始点火能量的大小直接影响到爆炸的发生和发展过程。不同的初始点火能量可能导致爆炸的强度、速度和范围出现显著变化, 甚至影响到火焰的传播路径和形态。因此, 深入探究初始点火能量对管内甲烷爆炸的影响, 对于有效预防和应对火灾事故具有重要意义。

澳大利亚纽卡斯尔大学进行了一项针对甲烷火焰爆燃行为的大规模研究, 利用 30 米长的火焰传播管道(FDT)。他们针对不同初始点火能量(1、5 和 10 kJ)进行了实验研究, 并观察了火焰爆燃、超压上升以及沿管道的压力波速度。研究结果显示, 初始点火能量的增加导致了最大超压的上升。此外, 他们还确定了甲烷的可燃下限(LEL)约为  $4.6 \pm 0.3\%$ , 可燃上限(UEL)约为  $15.8 \pm 0.4\%$ 。

## 3. 结论

尽管现阶段对甲烷爆炸已经进行了大量的研究, 但研究还处于初级阶段, 在实际生活中还有许多方面没有被考虑到。

1) 研究人员多研究同一障碍物的数量、位置、阻塞率不同, 但鲜少研究多种不同形式障碍同时存在时的火焰传播特性。

2) 研究人员研究了不同点火位置对爆炸特性的影响, 点火位置不同会导致爆炸反应路径和强度的变化。但大多数研究的是单点火源, 对多点瓦斯爆炸鲜少研究。

3) 与之前的工作相比, 我们需要对多种不同形式障碍同时存在时的火焰传播特性进行了详细研究, 填补此方面的研究空白。

## 基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(项目批准号: YKJCX2220715)。



## 参考文献

- [1] 林柏泉, 周世宁, 张仁贵. 障碍物对瓦斯爆炸过程中火焰和爆炸波的影响[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 6-9.
- [2] Chapman, W.R. and Wheeler, R.V. (1926) The Propagation of Flame in Mixtures of Methane and Air. Part IV. The Effect of Restrictions in the Path of the Flame. *Journal of the Chemical Society*, **129**, 2139-2147. <https://doi.org/10.1039/JR9262902139>
- [3] 张延炜, 徐景德, 胡洋, 等. 柔性障碍物对甲烷空气爆炸波激励作用的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(5): 145-153.
- [4] 邓浩鑫, 温小萍, 王发辉, 等. 对称障碍物条件下瓦斯爆炸火焰与压力波耦合作用研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 161-165.
- [5] 王成, 回岩, 胡斌斌, 等. 障碍物形状对瓦斯爆炸火焰传播过程的影响[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(7): 661-665+676.
- [6] 蔺照东, 李如江, 刘恩良, 等. 障碍物对瓦斯爆炸冲击波影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(2): 28-32.
- [7] 尉存娟, 谭迎新, 袁宏甦. 水平管道内障碍物数量对瓦斯爆炸过程的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(6): 60-64.
- [8] 汪泉. 有机玻璃方管内瓦斯爆燃火焰传播特性研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [9] 韩蓉, 刘剑, 高科, 等. 密闭空间内障碍物对瓦斯爆炸传播影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(7): 61-66.
- [10] 余明高, 刘磊, 郑凯, 等. 障碍物与管道壁面间距比对瓦斯爆炸传播特性的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(5): 151-156.
- [11] Moen, I.O., Donato, M., Knystautas, R., *et al.* (1980) Flame Acceleration Due to Turbulence Produced by Obstacles. *Combustion and Flame*, **39**, 21-32. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(80\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(80)90003-6)
- [12] Na'inna, A.M., Phylaktou, H.N. and Andrews, G.E. (2013) The Acceleration of Flames in Tube Explosions with Two Obstacles as a Function of the Obstacle Separation Distance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **26**, 1597-1603. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.08.003>
- [13] Ciccarelli, G. and Dorofeev, S. (2008) Flame Acceleration and Transition to Detonation in Ducts. *Progress in Energy & Combustion Science*, **34**, 499-550. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2007.11.002>
- [14] McGarry, J.P. and Ahmed, K.A. (2017) Flame-Turbulence Interaction of Laminar Premixed Deflagrated Flames. *Combustion and Flame*, **176**, 439-450. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.11.002>
- [15] Bychkov, V., Valiev, D. and Eriksson, L.E. (2008) Physical Mechanism of Ultrafast Flame Acceleration. *Physical Review Letters*, **101**, Article ID: 164501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.164501>
- [16] Zhang, K., Wang, Z., Ni, L., *et al.* (2017) Effect of One Obstacle on Methane-Air Explosion in Linked Vessels. *Process Safety and Environmental Protection*, **105**, 217-223. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.11.004>
- [17] Zhou, Y., Li, Y., Jiang, H., *et al.* (2021) Investigations on Unconfined Large-Scale Methane Explosion with the Effects of Scale and Obstacles. *Process Safety and Environmental Protection*, **155**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.09.004>
- [18] Wen, X., Yu, M., Ji, W., *et al.* (2015) Methane-Air Explosion Characteristics with Different Obstacle Configurations. *International Journal of Mining Science and Technology*, **25**, 213-218. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.02.008>
- [19] Hall, R., *et al.* (2009) Effects of Position and Frequency of Obstacles on Turbulent Premixed Propagating Flames. *Combustion and Flame*, **156**, 439-446. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.08.002>
- [20] 刘磊, 宋双林, 葛欢, 等. 障碍物排列方式对甲烷/空气爆炸特性影响研究[J]. 能源与环保, 2022(3): 44.
- [21] Wan, S., *et al.* (2018) Influence of Obstacle Blockage on Methane/Air Explosion Characteristics Affected by Side Venting in a Duct. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **54**, 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.05.003>
- [22] 李志锋, 余明高, 纪文涛, 等. 障碍物诱导瓦斯爆炸湍流火焰数值模拟[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(2): 167-170.
- [23] 梁春利, 毕明树. 设置障碍物密闭容器内气体爆炸数值模拟[J]. 石油化工设备, 2005(6): 26-29.
- [24] 王磊, 司荣军, 苗磊, 等. 障碍物压力反射特性对瓦斯爆炸传播影响的数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(8): 106-112.

- [25] 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.
- [26] 李焯. 障碍物对瓦斯爆炸冲击波传播影响的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [27] 师峥. 管道内预混可燃气体爆炸及其泄爆的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2017.
- [28] 王公忠, 张建华, 李登科, 等. 障碍物对预混火焰特性影响的大涡数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(1): 68-76.
- [29] 杨凡, 陶刚, 张礼敬, 等. 障碍物对气体爆炸压力场影响数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(2): 59-63.
- [30] 唐平, 蒋军成. 障碍物对采用泄爆管泄放气体爆炸影响的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(6): 151-156.
- [31] 吴兵, 张莉聪, 徐景德. 瓦斯爆炸运动火焰生成压力波的数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2005(4): 423-426.
- [32] Chen, P., Li, Y., Huang, F., *et al.* (2016) Experimental and LES Investigation of Premixed Methane/Air Flame Propagating in a Chamber for Three Obstacle BR Configurations. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **41**, 48-54. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.02.020>
- [33] Coates, A.M., Mathias, D.L. and Cantwell, B.J. (2019) Numerical Investigation of the Effect of Obstacle Shape on Deflagration to Detonation Transition in a Hydrogen-Air Mixture. *Combustion and Flame*, **209**, 278-290. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.07.044>
- [34] 朱跃进, 董刚, 刘怡昕, 等. 激波诱导火焰变形、混合和燃烧的数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 430-437.
- [35] 朱跃进, 董刚, 范宝春. 受限空间内激波与火焰作用的三维计算[J]. 推进技术, 2012, 33(3): 405-411.
- [36] Rubtsov, N.M. (2016) *The Modes of Gaseous Combustion*. Springer International Publishing, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25933-8>
- [37] 贾静, 苏霏洋. 掘进工作面障碍物对瓦斯爆炸影响的研究[J]. 山西科技, 2020, 35(6): 21-23+27.
- [38] Wang, X., Guo, P., Wang, Z., *et al.* (2021) Simulation of the Influence of Structural Parameters on Methane Explosion in Closed Vessels. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, **766**, Article ID: 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/766/1/012038>
- [39] Li, Z., Chen, L., Yan, H., *et al.* (2021) Gas Explosions of Methane-Air Mixtures in a Large-Scale Tube. *Fuel*, **285**, Article ID: 119239. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119239>
- [40] Wang, Q., Ma, H., Shen, Z., *et al.* (2013) Numerical Simulation of Premixed Methane-Air Flame Propagating Parameters in Square Tube with Different Solid Obstacles. *Procedia Engineering*, **62**, 397-403. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.081>
- [41] Jun, D., Cheng, P. and Hua, L.W. (2008) Experimental Study on Methane Explosion Property in Turbulent Flow. *China Safety Science Journal (CSSJ)*, **18**, 85-88.
- [42] Phylaktou, H.N. and Andrews, G.E. (1993) Gas Explosions in Linked Vessels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **6**, 15-19. [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(93\)80015-E](https://doi.org/10.1016/0950-4230(93)80015-E)
- [43] 郑立刚, 吕先舒, 郑凯, 等. 点火源位置对甲烷-空气爆燃超压特征的影响[J]. 化工学报, 2015, 66(7): 2749-2756.
- [44] Feng, C.G., Chen, L.S. and Qian, X.M. (2001) Influence of Ignition Location on Explosion Overpressure in Coal Mine Blind Tunnel. *Journal of Safety and Environment*, **1**, 56-59.
- [45] 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>
- [46] Emami, S.D., Rajabi, M., Hassan, C.R., *et al.* (2013) Experimental Study on Premixed Hydrogen/Air and Hydrogen-Methane/Air Mixtures Explosion in 90 Degree Bend Pipeline. *International Journal of Hydrogen Energy*, **38**, 14115-14120. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.056>