

# 受限空间瓦斯爆炸特性及其研究进展评述

刘 瞰, 贾真真, 叶 青

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12月20日; 录用日期: 2024年1月22日; 发布日期: 2024年1月29日

## 摘 要

矿井瓦斯爆炸给煤矿生产带来严重的灾害和威胁, 为了控制受限空间瓦斯爆炸的危险性和掌握瓦斯爆炸传播规律及其破坏特征, 国内外学者从理论、实验、数值模拟等方面对此进行了大量的研究, 并获得丰硕的研究成果。但是瓦斯爆炸事故时有发生, 这也暴露了其研究和防治措施中存在的问题。为此, 本文分析了瓦斯爆炸及其传播的影响因素, 综合评述瓦斯爆炸研究方法与成果, 分类分析瓦斯爆炸研究灾害特性及传播规律, 指出当前存在的主要问题。研究表明: 瓦斯爆炸机理、影响因素、爆炸破坏特性、传播特性等方面的研究很深入, 并获得丰硕成果, 部分理论成果已经成为瓦斯爆炸理论的一部分。但是在理论分析时, 往往进行了简化与假设, 很多影响因素很难定量描述并建立有效的多因素耦合数学模型; 在实验研究时不能同时综合实验测定多因素综合作用, 很难测定多因素的协同效应和耦合作用, 同时实验存在尺度效应等问题; 在数值模拟分析过程中, 通常都进行大量的假设和修正相应参数, 同时, 缺乏针对性的软件和模块。期望研究结果能为受限空间瓦斯爆炸及其灾害防治提供参考与依据。

## 关键词

瓦斯爆炸, 受限空间, 爆炸特性, 影响因素, 综述

# Review on the Characteristics and Research Progress of Gas Explosion in Confined Space

Tun Liu, Zhenzhen Jia, Qing Ye

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

Received: Dec. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: Jan. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Mine gas explosion has brought serious disasters and threats to coal mine production. In order to

control the risk of gas explosion in confined space and master the propagation law and damage characteristics of gas explosion, scholars at home and abroad have carried out a lot of research on this from the aspects of theory, experiment, numerical simulation and so on, and achieved fruitful research results. However, gas explosion accidents occur from time to time, which also exposes the problems existing in its research and prevention measures. Therefore, this paper analyzes the influencing factors of gas explosion and its propagation, comprehensively reviews the research methods and achievements of gas explosion, classifies and analyzes the disaster characteristics and propagation laws of gas explosion, and points out the main problems existing at present. The research results show that the research on gas explosion mechanism, influencing factors, explosion damage characteristics, propagation characteristics and other aspects is very in-depth, and has achieved fruitful results. Some theoretical results have become a part of gas explosion theory. However, in theoretical analysis, simplification and assumptions are often made, and many influencing factors are difficult to quantitatively describe and establish an effective multi factor coupling mathematical model; it is difficult to measure the synergistic effect and coupling effect of multiple factors, and there are scale effects in the experiment; In the process of numerical simulation analysis, a large number of assumptions and corresponding parameters are usually modified. At the same time, there is a lack of targeted software and modules. It is expected that the research results can provide reference and basis for gas explosion and disaster prevention in confined space.

## Keywords

Gas Explosion, Confined Space, Explosion Characteristics, Influence Factor, Overview

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

近年来,我国煤矿安全生产状况得到了显著改善,当前攻坚的重点主要是遏制重特大事故的发生,然而,近年来该类事故仍然时有发生,尤其是瓦斯爆炸事故,它导致巷道设备严重破坏和人员伤亡,造成巨大财产损失和不良的社会影响。例如,2013年吉林通化矿业公司八宝煤矿发生瓦斯爆炸事故,造成36人死亡。2014年安徽淮南东方煤矿发生瓦斯爆炸事故,造成27人死亡、1人受伤。2016年内蒙古赤峰宝马矿业有限责任公司发生瓦斯爆炸事故,造成32人死亡、20人受伤。2017年涟源市斗笠山祖保煤矿发生瓦斯爆炸事故,造成10人死亡、2人受伤。2019年山西平遥峰岩集团二亩沟煤矿发生瓦斯爆炸事故,造成15人死亡、9人受伤。2020年潞安集团左权阜生煤业发生瓦斯爆炸事故,造成4人死亡、1人受伤。瓦斯爆炸灾害事故接连不断地发生,这与国家煤矿安全生产方针极不协调,因此瓦斯爆炸事故的控制仍是重中之重。由于低浓度瓦斯具有易燃、易爆的特性,低浓度瓦斯在输送过程中,瓦斯输送管道静电火花、抽放管道中的碎石碰撞等因素会使整个输送管道系统中低浓度瓦斯处于非常危险的状态。山西、重庆、安徽、云南等省市矿区先后也发生了瓦斯抽放管道系统瓦斯爆炸事故,虽然没有造成严重的后果,但也为煤矿瓦斯抽采及利用工作敲响了警钟。所以煤矿瓦斯爆炸灾害预防是个技术难题,也是非常复杂的科学问题,它涉及到灾害动力学、构造力学、爆炸动力学、传热传质、热动力学等理论。瓦斯爆炸及其传播过程的热动力特性主要体现在瓦斯爆炸冲击波、火焰、高温高压的爆炸产物等,同时,瓦斯爆炸热动力灾害体现在超压、冲量、高温等方面。瓦斯爆炸热动力灾害受到许多因素的影响,主要集中在不同条件下瓦斯爆炸特征参数、障碍物对瓦斯爆炸火焰和冲击波的加速作用、瓦斯爆炸条件(如瓦

斯浓度、温度、湿度、气体压力、惰性气体、点火能量和方式、空间结构、位置、传播距离等)对瓦斯爆炸特性的影响、能量的释放形式与释放量等[1]-[7]。为此国内外专家学者进行了深入研究并取得了丰硕的研究成果。Dezhi R [8]对瓦斯爆炸冲击波破坏地下设施情况进行系统评述。Kai Yang [9]描述了密闭空间瓦斯爆炸泄爆峰结构的分布特征,并分析不同因素对各种峰结构的影响,提出了一种定量评价影响因素和峰结构之间关系的方法。贾智伟[10]从火焰传播规律和冲击波传播规律两个方面总结煤矿瓦斯爆炸传播规律的研究进展。胡江慧[11]从不同环境条件、可燃气体等角度对瓦斯爆炸特性进行总结。张莉聪[12]分析说明了放置障碍物条件下瓦斯爆炸参数的研究现状。但国内外目前还没有专门针对受限空间瓦斯爆炸特性及其研究进展进行系统研究,因此本文对其进行综合评述,期望研究结果对煤矿瓦斯爆炸灾害防治、低浓度瓦斯输送与瓦斯爆炸能量的开发利用具有十分重要的现实意义和科研价值,同时研究成果对煤矿井下瓦斯爆炸源、爆炸强度的确定和瓦斯爆炸事故调查能提供理论指导和技术依据,对丰富和完善瓦斯爆炸理论也将起到积极的促进作用。封闭空间瓦斯爆炸特性与开敞空间瓦斯爆炸特性存在差异,巷道(管道)瓦斯爆炸属于非常典型而又常见的受限空间瓦斯爆炸,本次研究集中分析巷道(管道)型受限空间瓦斯爆炸特性。

## 2. 瓦斯浓度及充填量对受限空间瓦斯爆炸的影响

### 2.1. 瓦斯浓度对受限空间瓦斯爆炸的影响

研究表明,不同的瓦斯浓度会形成不同的瓦斯爆炸表征参数,如瓦斯爆炸产生的冲击波超压、压力峰值增长变化率以及火焰速度。一般情况下,瓦斯爆炸极限是5%~16%,其当量浓度是9.5%。根据化学反应分析,浓度为9.5%的瓦斯与空气中的氧气完全燃烧[13],能产生较高的热释放速率,产生最大的火焰速度[14]和压力峰值[15][16]。恰好这时受限空间内的瓦斯浓度能与氧气完全燃烧,所以瓦斯爆炸得更加剧烈[17]。瓦斯浓度对瓦斯爆炸的影响还与管道长度有关。倘若管道长度不够长,瓦斯在层流燃烧阶段没有完全加速,不能产生爆轰,所以瓦斯浓度在当量浓度时的火焰速度与压力峰值比在其他浓度时都更小[18]。在瓦斯爆炸时,由于冲击波的作用,大量气体被冲击,部分气体被排除,浓度也发生变化,因此整个爆炸极限范围内甲烷浓度分布是不均匀的,蔺伟[19]通过模拟总结出横向和纵向两个方向瓦斯浓度梯度对瓦斯爆炸的影响规律。徐景德[20]研究了浓度梯度和障碍物耦合作用对瓦斯爆炸的影响。任少云[21]考虑了瓦斯爆炸下限浓度梯度的影响。

综上所述,均匀分布瓦斯爆炸传播规律研究较为完善,且不同浓度梯度下非均匀分布瓦斯爆炸传播规律也陆续展开了研究,接下来将进一步研究关于全范围下浓度梯度对瓦斯爆炸特性的影响,如压升速率、冲击波速度等爆炸特征参数的研究仍存在空缺。

### 2.2. 瓦斯充填量对受限空间瓦斯爆炸的影响

一般情况下在进行实验时,会让可燃气体与空气的预混气在整个实验管道内充满,在爆炸进行的过程中,火焰会传播至整个受限空间。然而现实情况下瓦斯一般不会在巷道内全部存在,火焰也很难在整个受限空间传播[22][23][24][25][26]。因而需要考虑实际瓦斯充填量对实验以及现实中瓦斯爆炸的影响。瓦斯爆炸火焰传播的最大距离叫做火焰区长度,增大瓦斯充填量,瓦斯填充区与火焰区长度的比值随之增大[27]。WANG [22]进行了数值模拟,发现因为火焰前端预混气体的扩散效应,火焰区长度远大于瓦斯填充区长度并且增大瓦斯充填量,气体流动速度和爆炸压力随之增大。司荣军[28]在大型试验巷道进行实验,探究瓦斯和煤尘气固两相爆炸传播特性中发现,当瓦斯充填量增大,瓦斯爆炸最大压力峰值绝对值也随之增大,且最大压力点距离爆源越近,同时瓦斯爆炸火焰传播速度增大,火焰速度最大点距离爆源越远。王东武[29]在独头巷道进行实验来探究瓦斯爆炸最大爆炸压力时空特性以及火焰速度变化特征

等规律,发现火焰传播长度和瓦斯填充量二者没有正相关关系。ZHANG [23] [24] [25]指出爆炸超压峰值在瓦斯填充区外达到最大值。前驱冲击波和高温流体的危害范围随瓦斯填充量的增大而增大。结构开口处的动压取决于瓦斯填充量。瓦斯填充量越大,结构开口处的动压越高。PANG [26]则指出,火焰区的火焰速度明显低于瓦斯填充区,且火焰区长度随瓦斯填充区长度的增大呈指数关系增长。程方明[30]等进行数值模拟后发现当增大瓦斯填充量到一定程度之后,瓦斯爆炸冲击波的强度会发生突增,最大爆炸冲量随之增大然后逐渐无明显变化。同时,瓦斯填充量也影响着瓦斯爆炸燃烧压力在巷道中的传播过程[31]。高瓦斯矿发火区的瓦斯填充量很高,基于这种条件下压力增加、温度上升、产生的可燃气体浓度增大均能让瓦斯爆炸效应更加剧烈[32]。

综上所述,首先目前瓦斯填充量对瓦斯爆炸的影响研究在巷道、管道实验及数值模拟方面均有开展,并取得一定成果。其次发现增大瓦斯填充量,爆炸冲击波破坏特征参数将发生突变,而这一突变的瓦斯填充量的区间范围受多种因素的影响,探究瓦斯填充量临界区间范围的影响因素及其影响规律可以成为下一步研究方向。

### 3. 惰性气体及多元可燃气体对受限空间瓦斯爆炸的影响

#### 3.1. 惰性气体对受限空间瓦斯爆炸的影响

矿下空气中存在着许多种类的惰性气体,学者们目前主要针对惰性气体中的  $N_2$ 、 $CO_2$ 、 $H_2O$  对瓦斯爆炸的影响展开了大量的研究。MARIA M [33]探究了  $N_2$  对瓦斯爆炸特性的影响,发现  $N_2$  能显著影响瓦斯爆炸火焰,对瓦斯爆炸火焰传播过程起到了阻碍的作用。李成兵[34]进行了数值模拟探究惰性气体  $H_2O$ 、 $N_2$  以及  $CO_2$  对瓦斯燃烧的影响并分析了惰性气体  $H_2O$ 、 $N_2$  以及  $CO_2$  对瓦斯爆炸惰化作用的化学动力学机理。陈金健[35]进行试验来探究  $CO_2$ 、 $N_2$  和  $N_2/CO_2$  对瓦斯爆炸的影响,得出以下结论,首先,惰性气体的存在对瓦斯爆炸极限上下限的影响程度有所不同,对瓦斯爆炸下限的影响比爆炸上限更小,此外,加入惰性气体会对瓦斯爆炸超压峰值产生影响,让瓦斯爆炸超压峰值有所下降。张迎新[36]通过实验的方法,发现增大惰性气体  $N_2$  以及  $CO_2$  的体积分数可以显著降低瓦斯爆炸压力,同时让瓦斯爆炸效应的强度下降,此外,瓦斯浓度越高,  $N_2$  以及  $CO_2$  的抑制瓦斯爆炸的作用越明显。钱海林[37]探究了  $N_2/CO_2$  两种组分惰性气体混合对瓦斯爆炸的影响,得出  $CO_2$  在混合气中所占比例越大,对瓦斯爆炸的抑制效果越好的结论。王华[38]进行实验后得出以下结论,首先,惰性气体对瓦斯爆炸极限影响显著,惰性气体的存在能显著减小瓦斯爆炸极限范围,其次,惰性气体种类不同,对瓦斯爆炸极限的影响也不同,  $CO_2$  对瓦斯爆炸极限的影响大于  $N_2$  对瓦斯爆炸极限的影响,所以  $CO_2$  抑制瓦斯爆炸的效果比  $N_2$  更好。

综上所述,惰性气体有关  $CO_2$ 、 $N_2$  的相关研究已经进行地比较充分,关于其它种类的惰性气体对瓦斯爆炸的影响,需要进行更加深入的研究。

#### 3.2. 多元可燃气体对受限空间瓦斯爆炸的影响

井下煤自燃会产生许多可燃气体,此外瓦斯中除主要成分甲烷外也含有其他种类可以燃烧的气体。罗振敏[39]进行实验后发现多元可燃气体对瓦斯爆炸的影响与瓦斯的浓度有关。罗振敏[40]通过实验方法,来探究  $H_2$ 、 $CO$ 、 $C_2H_4$  和  $C_2H_6$  这 4 种矿井火区可燃气体混合对低浓度瓦斯爆炸的影响。罗振敏[41]进行了数值模拟来探究  $H_2$ 、 $CO$ 、 $C_2H_4$  和  $C_2H_6$  这 4 种气体混合的比例与初始温度对瓦斯爆炸的耦合作用。李秀芳[42]通过数值模拟后发现,  $C_2H_6$  对温度变化曲线斜率以及瓦斯爆炸超压峰值的影响最大,  $C_2H_4$  次之,而瓦斯爆炸的相关特性受到  $CO$  以及  $H_2$  的影响最小。邓军[43]则探究了  $C_2H_4$  和  $CO$  对瓦斯爆炸的影响,发现提高  $CO$  的体积分数,瓦斯爆炸上限值随之提升,瓦斯爆炸下限值也随之提升,而提高  $C_2H_4$  的体积分数,瓦斯爆炸上限值随之提升,瓦斯爆炸下限值却随之下降,此外,  $CO$  能通过阻尼效应来消耗瓦



斯混合气体的能量。

综上所述，目前对于多元可燃气体对瓦斯爆炸的影响研究，主要集中在浓度保持不变的情况下瓦斯爆炸过程的传播，而较少考虑多元可燃气体种类、配比、浓度等多因素耦合作用对瓦斯爆炸的影响，今后可往这方面进行研究。

## 4. 环境条件对受限空间瓦斯爆炸的影响

### 4.1. 环境温度对受限空间瓦斯爆炸的影响

由于煤矿开采深度加大及煤层自燃等因素会使得井下环境温度发生急剧变化，这会导致瓦斯爆炸特性有所改变。黄子超[44]通过数值模拟发现升高环境温度，会使瓦斯爆炸反应速率变快，但瓦斯爆炸压力峰值会减小，原因是[45]初始温度对瓦斯爆炸的影响存在“竞争机制”：初始温度的升高降低了瓦斯初始密度，减小了爆炸能量，产生“抑制作用”；初始温度的升高同时提高了化学反应活化能，对爆炸过程有“促进作用”。而“抑制作用”占主导地位，因此随着初始温度的升高，爆炸压力会减小。此外，升高环境温度，瓦斯爆炸火焰温度升高，这是吸收了环境温度升高所带来的热量的缘故[46]。JIANG [47]得出随初始温度的升高，火焰传播距离增大，但火焰传播速度逐渐减小。李润之[48]通过理论与实验结合的方式得出瓦斯爆炸峰值与温度的倒数是类似线性变化规律，而瓦斯爆炸最大压升速率和温度之间没有线性关系。高娜[49]认为温度升高，会使瓦斯进入爆炸反应阶段的速度加快。温度与其他影响因素耦合对瓦斯爆炸的影响也取得如下进展。白刚[50]进行实验后发现温度与CO耦合下，瓦斯爆炸极限范围变宽，进而瓦斯爆炸更易发生，更加危险。而耦合比单因素对爆炸极限的影响更大，尤其是对于爆炸上限。LUO [51]通过实验与模拟的方法发现在CO与温度双重影响因素耦合条件下添加CO，会使初始温度的敏感性增加。耦合条件下温度升高依然会加剧瓦斯爆炸的强度。高娜[52]则研究了温度与压力的耦合对瓦斯爆炸的影响。罗振敏[41]通过实验与模拟结合的方式探究了温度、瓦斯浓度以及可燃气体浓度耦合对瓦斯爆炸的影响。

综上，学者们最开始是从温度对瓦斯爆炸危险度影响方面入手着重研究，随后得出不同温度下瓦斯爆炸特征参数的变化规律，目前温度对受限空间瓦斯爆炸影响研究已较为完善，当前研究方向是和其他因素对瓦斯爆炸的耦合作用。

### 4.2. 环境湿度对受限空间瓦斯爆炸的影响

环境湿度是指环境空气中水蒸气的含量，空气中的水蒸气能使瓦斯爆炸的压力特性下降，让瓦斯与空气的化学反应弱化，进而抑制瓦斯爆炸[53]。李成兵[54]分析了水蒸气抑制瓦斯爆炸的原因。杨龙龙[55]进行了气体混合后湿度对瓦斯爆炸的影响的实验，实验结果表明，湿度与最大爆炸压升速率和最大爆炸压力具有一定线性关系，增大湿度，最大爆炸压升速率和最大爆炸压力均随之减小。谭汝媚[56]则发现湿度对环氧丙烷爆炸特性的影响具有与瓦斯相同的规律。增大湿度也能缩小瓦斯爆炸极限的范围，这其中有两点原因，其一，水吸收了空气中瓦斯爆炸所需的热量，其二，水的存在让瓦斯浓度降低，于是爆炸反应就要求更多的瓦斯气体参与[57]。此外，司荣军[58]经过实验，发现在环境湿度较小时，增大湿度，让瓦斯爆炸极限范围缩小的作用更明显。但湿度对瓦斯爆炸极限的影响极其有限[53]，主要原因是水蒸气含量在常温常压条件下较低，但高温高压条件下水蒸气含量会增加，不可忽略其对瓦斯爆炸的影响[55]，因此可进行高温高压下湿度对瓦斯爆炸的影响研究。

综上所述，湿度对瓦斯爆炸的影响多采用理论及实验的方法进行，今后可以进行数值模拟研究及尝试在软件开发湿度参数设置等来开展更多湿度与其他因素耦合作用的影响研究，并通过数值模拟与实验相互验证，使研究结果更加精确。

### 4.3. 初始压力对受限空间瓦斯爆炸的影响

初始压力也是影响瓦斯爆炸的环境条件之一。初始压力对瓦斯爆炸的影响主要在爆炸压力方面而非爆炸温度[59]。JIANG [47]的研究表明：随初始压力的增大，爆炸压力、气流密度和燃烧速率均呈线性增大，而初始压力的增加对火焰传播速度和火焰传播距离也影响不大。刘向军[60]进行了初始压力对瓦斯爆炸影响的理论方面研究，综合能量、质量、动量三大守恒定理，推导得到瓦斯爆轰参数公式，并分析了不同初始压力下瓦斯爆炸各参数的变化。高娜[52]进行了热爆炸理论和链式反应理论分析，认为瓦斯爆炸最大压力与最大压升速率均与初始压力呈正相关关系，提高初始压力，瓦斯爆炸强度变大，爆炸火焰方面，火焰燃烧速率更快，火焰温度上升，所需点火能降低。即初始压力越大越有利于瓦斯爆炸链式反应开展[59]。高娜[49]同时进行了压力和温度耦合对瓦斯爆炸的影响研究，研究表明在压力和温度的耦合作用下瓦斯爆炸极限范围会扩大。李润之[61]分析了压力与点火能耦合对瓦斯爆炸的影响，得出了二者耦合对瓦斯爆炸上限的影响比单一因素要大的结论。朱丕凯[62]引入爆炸危险度的概念，来量化压力和温度耦合条件下瓦斯爆炸的危险性。瓦斯爆炸会产生许多有害气体，李艳红[59]研究发现提高初始压力，会产生更多的NO、NO<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>。

综上所述，目前初始压力单独对瓦斯爆炸的影响方面的研究较为完善，今后可以考虑开展更多初始压力与其他影响因素对瓦斯爆炸的耦合作用的研究。

### 4.4. 电磁场对受限空间瓦斯爆炸的影响

矿井下存在大量的电气设备，这些电气设备能够产生电磁辐射，因此电磁辐射对瓦斯爆炸的影响需要进行考虑。张辉[63]通过构建实验系统测定电磁场对瓦斯爆炸的影响，测定结果表明有电磁场的存在会让瓦斯爆炸更加剧烈，压力波超压最大值、火焰传播速度、火焰速度最大值均变大。且电磁场的强度与瓦斯爆炸强度呈正相关关系。此外与管道终端是封闭还是开口无关，电磁场的存在对瓦斯爆炸影响规律不变。此外，不是单纯电、磁场两者的叠加就构造出电磁场对瓦斯爆炸传播特性的影响。磁场方面，李静[64]得出，磁场对瓦斯爆炸火焰传播速度的影响非常明显，能够使瓦斯爆炸火焰速度加快、火焰峰值变大。叶青[65]也研究了单独施加磁场对瓦斯爆炸的影响，并从传热、传质、化学反应角度分析了磁场对瓦斯爆炸加剧作用产生的原因。电场方面，李静[66]发现电场的存在会加剧瓦斯爆炸的强度，但存在一个平衡点，当电场强度取这个平衡点时，电场对瓦斯爆炸的加剧效果便会消失。朱传杰[67]进行了电极电场对瓦斯爆炸的影响的研究，研究表明电极电场的存在会减弱瓦斯爆炸强度，并且加大电极电场，这种减弱效果越显著。

综上所述，目前的关于电磁场对受限空间瓦斯爆炸的影响研究均是电场、磁场或电磁场其中一个影响因素对瓦斯爆炸的影响，关于电场、磁场或电磁场和其他影响因素耦合对瓦斯爆炸的综合影响还有待进一步研究。

## 5. 点火源对受限空间瓦斯爆炸的影响

### 5.1. 点火方式对受限空间瓦斯爆炸的影响

诸如煤矿井这类受限空间存在许多不同的火源，也便提供不同的点火方式来诱发瓦斯爆炸。学者们探究的点火方式种类主要有电火花、高温热源、摩擦点火及随着技术的发展出现的等离子体射流点火和脉冲点火。通常，矿井下存在大量电气设备，这为电火花诱发瓦斯爆炸创造了条件。赖芳芳[68]研究了弱点火能电火花点火方式影响下瓦斯爆炸的各项参数的变化规律。由于井下采空区煤自燃产生高温因此引燃瓦斯爆炸的高温热源点火方式也是常见的点火方式之一。王海燕[69]主要进行了电火花和高温热源这两种点火方式影响瓦斯爆炸的研究。此外王海燕[70]探究了电火花以及高温热源两种不同点火方式诱发瓦斯

爆炸后对瓦斯爆炸气体产物生成规律的影响。王毅[71]为了探究煤自燃下瓦斯与可燃煤尘混合爆炸的爆炸特性,开展了高温热源下瓦斯/可燃煤尘爆炸的实验。朱启阳[72]则通过实验研究了电火花和高温热源两种不同点火方式下  $N_2$  抑制瓦斯爆炸的效果,并总结了这两种点火方式对  $N_2$  抑制瓦斯爆炸的火焰传播等参数的影响规律。此外因顶板岩石之间摩擦而产生的高温能量诱发瓦斯爆炸的点火方式称为摩擦点火,在岩块相互摩擦时能产生两种点火源,炽热颗粒(点点火源)和热条痕(面点火源),后者更容易促成瓦斯爆炸的发生[73]。此外,祁文涛[74]得出结论,等离子体射流点火的点火延迟时间比电火花点火更小。金永飞[75]指出,脉冲点火相较传统点火而言更加影响瓦斯爆炸极限。

综上所述,由目前研究可知,点火方式对瓦斯爆炸极限影响较大,和传统电火花点火比较,等离子体射流点火延迟时间大大减少并且更容易形成爆轰,而高温热源在极限边界处比较难引发瓦斯爆炸。此外点火方式对瓦斯爆炸气体产量、爆炸温度变化规律及惰性气体抑爆效果等方面也有一定程度的影响,因此可以通过从点火方式方面入手来开展研究以便结果对瓦斯抑爆提供帮助指导。

### 5.2. 点火能对受限空间瓦斯爆炸的影响

点火能对瓦斯爆炸的影响主要体现在瓦斯爆炸的初始阶段。黄文祥[76] [77]得出结论,点火能越大,瓦斯爆炸火焰传播速度越快,而且能量变化越大,但存在一个限度;瓦斯爆炸火焰传播速度在不同大小的点火能条件下都会出现波浪式增长的现象。并且点火能越大,火焰锋面和前驱冲击波之间的距离就越大。此外,产生瓦斯爆炸火焰锋面所需时间也随着点火能的增加而减少。郑兴忠[78]通过实验得出,瓦斯爆炸火焰长度在点火能小于 1 J 时上升得很迅速,而在点火能大于等于 1 J 时,火焰长度均匀上升。仇锐来[79] [80] [81]探究了点火能对瓦斯爆炸压力以及爆炸火焰速度的影响。李润之[61] [82]发现瓦斯爆炸反应速度随点火能的增大而加快,最大压升速率随点火能的增大而变高,二者有线性变化关系;增大点火能,会减少点火延迟时间;离瓦斯爆炸最佳浓度越远,瓦斯爆炸的点火延迟时间、最大爆炸压力以及最大压升速率受点火能的影响就越大。徐景德[83] [84]对瓦斯爆炸波结构进行分析并由试验得出,增大点火能,压力峰值会更早出现;并从基元反应以及化学反应速率两个层面分析了瓦斯爆炸在强点火能下的热力学特征。郑兴忠[78]则得出了强弱两种不同大小点火能对瓦斯爆炸的感应期变化的影响较小的结论。张云明[85]开展了利用大能量点火系统也即强点火能使可燃气体爆轰直接起爆的特性研究。此外,增大点火能,瓦斯爆炸极限上下区间也会变大,但变化有一定限度[85] [86]。金永飞[75]分析了其变化存在一定限度的原因,并通过实验发现在点火能量达到 106 MJ 之后瓦斯爆炸极限变化幅度便会变小。

综上所述,首先矿井下瓦斯爆炸大部分是由类似于电火花、金属火花、静电火花、金属撞击火花等一类较弱的点火源引起。其次点火能量损失在电路部分的也无法计算。最后点火能只影响瓦斯爆炸初始阶段。对于点火的稳定性、能量的控制和点火能量的耗散等部分需进行深入分析。

### 5.3. 起爆位置对受限空间瓦斯爆炸的影响

现实情况下,瓦斯发生爆炸的位置是不确定的。许多学者着重探索了起爆位置和瓦斯爆炸危险性之间的关系。BRADLEY [87]得出,在容器装置中心点火能使瓦斯爆炸的反应最剧烈的结论。SOLBERG [88]实验得到,在有开口端的管道中,瓦斯爆炸压力最大以及升压速率最快是在点火位置处于中心处。HPHYLAKTOU [89]认为,在有开口的球型容器装置内,能使瓦斯爆炸强度最大的点火位置为容器装置的底部。KASMANI [90]得出在有开口的柱形容器内,点火位置在尾部比在中心能使瓦斯爆炸得更加剧烈。BAUWENS [91]和曹勇[92]则表示,点火位置在何处能使瓦斯爆炸强度最大是无法确定的,因为点火位置还会受到障碍物和泄爆面积的影响。冯长根[93]数值模拟设置管道一端开口,一端封闭,模拟结果发现点火位置处于封闭端时爆炸更为剧烈。用两端密闭管道进行实验,点火位置选取中心点火、端部点火,发



现相比于端部点火,中心点火由于火焰传播的对称特点和受壁面的冷却作用较小,峰值超压更大[94] [95] [96]。同样使用两端密闭管道,点火位置分别设置为底部、侧面、角和顶部,结果由于浮力的作用,容器底部点火更易获得较大的爆炸超压,最接近泄爆口的顶部点火引起的超压最低[97]。刘双双[98]进行数值模拟设置管道两端封闭,得出在接近管道中间点火相较于管道终端点火而言能使瓦斯爆炸产生的火焰速度更快的结论。解北京[99]实验发现点火位置在开口处,瓦斯爆炸火焰速度越来越快,但速度较小,而点火位置位于闭口处时,瓦斯爆炸火焰速度会出现先增后减再增的现象。吕鹏飞[100]进行模拟探究了点火位置对管网瓦斯爆炸的影响。郑立刚[101]进行实验发现,在一端开口的管道内,点火位置对火焰形态与爆炸超压均有很大影响,且当点火位置越接近开口端,震荡幅度与爆炸超压峰值就都越大。王涛等[102]研究了点火位置对瓦斯爆炸火焰形态的影响。王超强等[103]通过实验发现点火位置设置在中心与尾部时比点火位置设置在前端要长得多。栾鹏鹏[104]则研究了点火位置对管道内预混合成气爆炸特性的影响。

综上,针对起爆位置对瓦斯爆炸影响的研究从着重瓦斯爆炸危险性判定发展至瓦斯爆炸超压峰值、压升速率、火焰形态、火焰速度及火焰温度方面的定性定量分析。

## 6. 管道形状及尺度对受限空间瓦斯爆炸的影响

### 6.1. 管道长度对受限空间瓦斯爆炸的影响

在井下煤矿巷道实际情况中巷道长度变化是煤矿生产中经常遇到的,因此需要考虑巷道长度对瓦斯爆炸的影响。江丙友[105]发现增加管道长度,瓦斯爆炸火焰瞬时传播速度会随之增加,增幅则越来越小,而管道长度增加到某一定值后,火焰瞬时传播速度不再增加。朱学亮[106]等人从巷道长度方面研究瓦斯爆炸过程中火焰传播速度的变化规律。丁小勇[107]探究了管道长度对火焰结构以及火焰速度的影响规律,发现增加管道长度,瓦斯爆炸强度更大,火焰阵面变化扭曲更剧烈,火焰更早出现且更亮。刘谦[108]进行了数值模拟来探究管道长度如何影响瓦斯爆炸超压和波前流速耦合关系。祝钊[109]研究了管道长度因素对瓦斯爆炸流场的影响,研究结果表明瓦斯爆炸最大反应速率的峰值随管道长度的增加而增大。郑凯[110]则探究了瓦斯氢气混合爆燃火焰的传播特性,得出增加管道长度,管道中郁金香火焰现象越明显,爆炸超压峰值越大的结论。刘玉姣[111]进行了连通器内瓦斯爆炸的模拟与实验,结果表明增加管道长度,传爆釜中瓦斯爆炸产生的冲击波强度更大。

### 6.2. 管道拐弯对受限空间瓦斯爆炸的影响

现实中井下巷道有不同形状,除了直巷道,还有巷道拐弯的情况,巷道拐弯的情况不同会对瓦斯爆炸产生的冲击波及火焰传播产生不同的影响,当前管道拐弯对瓦斯爆炸影响的研究主要针对拐弯角度、拐弯数量和拐弯方向这几个方面来开展。胡铁柱[112]探究了成 $90^\circ$ 角的拐弯管道对瓦斯爆炸传播的影响,发现瓦斯爆炸冲击波经过管道拐弯的地方时,超压在拐角位置最大。这是压力波的叠加与反射作用的原因,且拐弯处的冲击波超压在管道拐弯角度为 $90^\circ$ 与 $45^\circ$ 时比 $135^\circ$ 更大[113]。翟成[114]发现管道拐弯的角度不同,爆炸超压与火焰速度也不同。林柏泉[115]考虑了拐弯方向以及拐弯数量对瓦斯爆炸传播的作用,进行了单个 $90^\circ$ 、Z形以及U形管道的相关实验。滑帅[116]进行了数值模拟,结果发现:增大管道拐弯角度会使得冲击波发生更复杂的反射,这也是让冲击波衰减速度加快的原因之一。贾智伟[117]等利用可改变拐弯角度的管道探究了多个不同拐弯角度的管道对瓦斯爆炸超压的影响规律并总结计算出冲击波超压衰减系数的公式。李鑫[118]进行了数值模拟,模拟结果显示,增大管道拐弯角度,火焰温度上升速度越大,达到最高温度的时间越短。孙豫敏[119]通过实验结果,得出拐弯管道里火焰传播速度变化的指数函数表达式以及爆炸冲击波超压峰值变化的指数函数表达式,用来帮助估算出管道每一处的火焰速度和超压峰值。



### 6.3. 管道分支对受限空间瓦斯爆炸的影响

学者们针对分支型巷道对瓦斯爆炸的影响研究主要通过改变实验管道分支角度及与其他因素耦合作用来开展。林柏泉[120]通过实验得出如下结论：当瓦斯爆炸在分支位置中传播时，火焰传播速度和爆炸超压在爆炸从分支点位置到分支点后的管壁的传播过程中会先下降再立马上升，这会对分支管壁产生极大的破坏。分支管道相当于有着三角形障碍物的面积突然扩张管道，所以障碍物的存在和面积突扩共同影响分支管道内瓦斯爆炸的传播。胡铁柱[107]进行了数值模拟，模拟结果表明瓦斯爆炸火焰在分支管道比在拐弯管道传播得更快，爆炸反应速率更快。白岳松[121]则得出在分支管道内的瓦斯爆炸与在直管道内的爆炸相比，火焰温度在管道分支位置提升很大的结论。乔奎红[122]总结出，初始压力保持不变，增大管道分支角度，管道 T1 的冲击波衰减系数降低，管道 T2 的冲击波衰减系数增大，且管道 T2 的冲击波衰减系数变化幅度比管道 T1 的更大。而这是管道 T1 与管道 T2 里冲击波分流的缘故，增大管道 T2 的分支角度，管道 T1 内的分流就会越小，两者间相互影响[123]。闫明[124]进行了数值模拟后发现管道分支角度按瓦斯爆炸传播至管道分支位置后破坏严重程度从高到低排序依次是 90°、135°以及 45°。孙豫敏[119]发现分支管道里火焰传播速度变化，能用指数函数表示，而爆炸冲击波超压峰值变化可分成两段，分别能用指数函数、一元二次函数表示，能用来帮助估算出管道每处的火焰速度和超压峰值。

### 6.4. 管道断面变化对受限空间瓦斯爆炸的影响

萨文科等[125]利用微缩管道进行试验，得到了冲击波在管道断面变化条件下传播的冲击波衰减系数近似值。张守中[126]则探究了管道断面变化条件下的冲击波衰减系数和增大系数。贾智伟[127]基于动力学理论分析，通过构造压力波在管道断面变化条件下传递的模型，提出压力波阵面压力与其他空气动力学参数的变化关系式。王凯[128]进行了试验后，得到以下结论：首先，冲击波从管道大断面到小断面的过程中，冲击波超压值增大，而因为管道断面变化的缘故，冲击波总能量会减小。其次，增大管道断面变化率，冲击波衰减系数随之增大。耿瑞雄[129]通过数值模拟探究了管道断面变窄对瓦斯爆炸的影响。蔺照东[130]通过实验探究了管道断面变扩对瓦斯爆炸的影响。郑有山[131]等人基于气体爆炸理论分析，并通过数值模拟得出如下结论：瓦斯在基于管道断面变化条件下的管道中爆炸传播时会导致二次爆炸的发生。管道断面变化能使气体压力加大，促进火焰燃烧，能显著加强爆炸火焰的传输。罗振敏[132]等人利用流体力学软件模拟了管道断面变窄、变扩、不变三种管道断面变化情况对瓦斯爆炸的影响。

### 6.5. 管道断面形状对受限空间瓦斯爆炸的影响

为了研究密闭空间瓦斯爆炸规律，在实验和模拟中需要考虑管道断面的形状，通常管道断面的形状会理想化为规则的矩形或圆形。而断面形状的不同也会对瓦斯爆炸产生不同的影响。对矩形管和圆形管内瓦斯爆炸的研究表明，矩形管内的湍流强度明显低于圆形管内的湍流强度，瓦斯爆炸时矩形管内的火焰传播速度慢于圆形管内的火焰传播速度；但当瓦斯浓度相同时，矩形管和圆形管的最大火焰爆炸压力差别不大[133]。刘玉姣[134]进行了数值模拟，模拟结果表明保持管道长度一致，冲击波的压力峰值在矩形管中比圆形管的低，压升速率在矩形管中也比圆形管的低。冯路阳[135]等通过数值模拟，发现保持管道断面面积一致，在管道断面形状为矩形、圆形、正方形、梯形之中，火焰传播速度在正方形与圆形管道大致相同，在梯形管道中传播速度最慢。管道断面形状的不同对最大瓦斯爆炸压力值大小几乎没有影响，但不同断面形状会使得冲击波到达最大爆炸压力值的速度不一样。班涛[136]等通过实验得出在管道分支条件下，冲击波超压衰减系数在拱形管道内最小，在矩形管道内最大，而在梯形管道内处于两者之间的结论。高科等[137]研究了缝洞型断面形状管道对瓦斯爆炸的影响。今后可以考虑更多类型的断面形状对瓦斯爆炸的影响。

## 6.6. 管道尺寸对受限空间瓦斯爆炸的影响

目前许多瓦斯爆炸实验是在中小型试验管道中进行, 现实情况下的地下密闭空间以及煤矿巷道的尺寸则比试验管道大得多, 瓦斯爆炸存在尺度效应, 所以管道尺寸对瓦斯爆炸的影响不能忽视。沈伟[138]探究了受限空间尺度对可燃气体爆炸过程的影响, 发现可燃气体浓度保持一定, 两种不同空间尺寸内的最大爆炸压力值相差不大, 但空间尺寸越小, 爆炸火焰传播速度越快。徐景德[139]等对比了不同管道尺寸的两条试验巷道后发现管道尺寸对瓦斯爆炸的影响明显, 不同管道尺寸巷道的瓦斯爆炸传播物理机制相同, 然而传播的物理参数不符合流体力学相似规律。小尺寸管道的冲击波爆炸压力衰减速度比大尺寸管道的大得多, 瓦斯浓度相同的条件下, 小尺寸管道内冲击波、火焰传播距离比大尺寸管道小得多。王磊[140]通过实验指出, 管道尺寸对瓦斯爆炸过程的最大爆炸压力以及火焰速度的影响在爆炸反应初期很小, 然而到了爆炸快速发展期, 管道尺寸的影响开始变得明显, 原因是试验装置产生的湍流和反应物浓度所导致。ZHANG 等[141]进行了数值模拟来探究不同管道尺寸对瓦斯爆炸的影响, 得出在 1:1 条件下超压值和火焰速度最大的结论。支航[142]通过研究发现增大管道尺寸, 火焰面传播至管道末端所需时间变长, 管道末端火焰面“内凹”现象越显著。增大管道尺寸, 火焰阵面传播同样的距离, 管道内温度平均值更高。GAO Ke [133]采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)对巷道瓦斯爆炸的非正常流场进行了数值模拟。模拟结果表明, 在整个瓦斯爆炸过程中, 当管道尺寸越大, 瓦斯爆炸冲击波和爆炸火焰的发展进程就越缓慢, 湍流强度也越小。刘玉姣[134]基于计算流体力学软件 FLUENT 进行数值模拟得出了相同的结论。

综上所述, 目前文献对管道参数(长度、拐弯、分支、断面变化、断面形状、尺寸)影响瓦斯爆炸做了大量研究, 较为完善, 但其参数需要更加细化研究, 且未来研究方向需要考虑和其他因素的耦合作用。

## 7. 壁面导热性及粗糙度对受限空间瓦斯爆炸的影响

### 7.1. 壁面导热性对受限空间瓦斯爆炸的影响

目前大多数的研究和实验都是在导热性良好的钢制管道进行, 而实际上煤巷和岩巷内充斥大量岩石和非金属煤, 近乎于绝热管道, 因此需要考虑壁面的导热性对瓦斯爆炸的影响, JIANG [143]利用钢制试验管道代替非绝热管, 钢制试验管道内壁安装隔热材料代替半绝热管, 数值模拟设置完全绝热管, 来获得不同壁面导热性的条件, 得出管道导热性越好, 火焰速度和爆炸超压越小的结论。林柏泉[144]等进行实验发现增大壁面导热性, 爆炸波速大幅度下降, 还可促使产生激波, 并从能量守恒等角度理论分析了管道导热性对瓦斯爆炸的冲击波以及火焰速度等参数造成影响的原因。YE [2]等探究了巷道的壁面绝热层长度对瓦斯爆炸的影响, 利用石棉布为绝热材料, 将长度设置为 0 m、2 m、4 m, 发现当绝热层长度越长, 爆炸产生的火焰速度越快、冲击波超压比越大。

综上所述, 壁面的导热性对瓦斯爆炸的影响很大, 日后实验可以在管道内贴绝热材料, 从而使实验环境更接近真实情况, 得到的结果更加具有实际应用价值。

### 7.2. 壁面粗糙度对受限空间瓦斯爆炸的影响

目前进行瓦斯爆炸实验所使用的管道通常是光滑管道, 这与实际巷道壁面存在一定粗糙度的情况有所差别, 因此学者们开展了壁面粗糙度对瓦斯爆炸影响的研究。翟成[145]进行了试验, 用钢制网的敷设层数代替不同的粗糙度, 来探究壁面粗糙度对瓦斯爆炸的影响, 发现增大管道壁面粗糙度, 管道火焰传播速度显著增加, 同时更快达到速度峰值。而管道末端设置开口和闭口两种条件, 发现壁面粗糙度对这两种条件下的瓦斯爆炸的影响规律是一样的, 影响程度也比较接近。高建康[146]通过实验发现增大壁面粗糙度, 管道内超压峰值显著上升, 并总结出爆炸超压峰值受壁面粗糙度影响的变化规律。MA [147]则

进行了数值模拟, 模拟结果表明预混区内, 粗糙管道中的爆炸压力高于光滑管道, 冲击波衰减区, 光滑管道压力高于粗糙管道。GELFAND [148]进行了理论研究, 指出壁面粗糙度对瓦斯爆炸的影响存在“竞争机制”, 壁面粗糙层能同时带来对于瓦斯爆炸的激励因素和抑制因素。激励因素是壁面粗糙层的存在能加剧燃烧区湍流程度, 促进爆炸反应速率, 使燃烧速度加快, 抑制因素是粗糙层的存在会导致传播过程中产生摩擦阻力进而损失大量能量, 壁面粗糙度对瓦斯爆炸的影响最终取决于激励因素与抑制因素哪一因素占主导地位。

综上所述, 壁面粗糙度对瓦斯爆炸的影响需要从定性研究转向定量研究, 并确定准确的抑制瓦斯爆炸的壁面粗糙度范围从而对瓦斯防爆的巷道壁面设计提供帮助。

## 8. 障碍物对受限空间瓦斯爆炸的影响

### 8.1. 障碍物阻塞率对受限空间瓦斯爆炸的影响

障碍物阻塞率对瓦斯爆炸特性参数中的爆炸压力有着很大程度的影响。INNA [149]发现增大障碍物阻塞率, 冲击波爆炸超压也增大, 并且障碍物阻塞率高的情况下, 相比低阻塞率, 超压最大值出现的位置离点火源的距离更近。王志青[150]通过实验得出在单个障碍物存在的管道中, 障碍物阻塞率为 50%, 所产生的爆炸超压值最高的结论。刘磊[151]等进行实验得出以下结论, 障碍物分布位置保持一致, 存在多个障碍物的情况下, 障碍物阻塞率越大, 瓦斯爆炸超压值越高。JOHANSEN [152]指出, 火焰前锋面褶皱程度随障碍物阻塞率增加而增加, 并且高障碍物阻塞率能起到使火焰速度显著加快的作用。杨春丽[153]进行了数值模拟, 模拟结果表明保持障碍物数量一致, 火焰传播速度随障碍物阻塞率增加而增加, 同时保持障碍物数量相同, 增大障碍物阻塞率, 瓦斯爆炸发展至最大压力与最高温度所需的时间将变短。周宁[154]进行了数值模拟, 发现管道内障碍物阻塞率为 70%能最大程度地促进瓦斯爆炸火焰的传播。王海宾[155]则通过实验得出障碍物阻塞率大约为 70%时, 爆炸火焰传播速度不再增大, 相反开始减小, 以至于还有造成熄火的可能, 同时爆炸超压峰值也开始下降。徐阿猛[156]进行了不同形状障碍物的阻塞率对瓦斯爆炸影响的数值模拟。WANG [157]发现较高的障碍物阻塞率能造成爆燃向爆轰转变, 此外即使障碍物阻塞率不高但瓦斯浓度较高同样能造成爆燃向爆轰转变, 但暂时没有得出低阻塞率、高瓦斯浓度和爆燃转爆轰的形成之间确切的关系。

### 8.2. 障碍物位置对受限空间瓦斯爆炸的影响

障碍物处在不同位置, 火焰与其接触的时间不同, 那么对火焰加速等爆炸传播特性参数产生的影响也不同。唐平[158]进行了数值模拟来探究容器内障碍物位置对容器内气体爆炸的影响。障碍物由于能产生湍流效应, 而湍流效应能使火焰的速度加快, 但这种加速效果随经过障碍物之后距离的增大呈现先加强后减弱的趋势, 因此火焰速度受到障碍物所处位置的影响较大[159]。程方明[160]进行实验后发现将障碍物远离点火处放置, 火焰传播速度峰值上升, 火焰燃烧强度增大, 火焰燃烧亮度更亮, 火焰燃烧持续时间缩短。邓浩鑫[161]通过实验探究了对称放置的障碍物的位置变化对管道密闭空间内瓦斯爆炸的影响。郝雪辰[162]则进行了数值模拟来探究平行和交错放置障碍物的位置变化对管道密闭空间内瓦斯爆炸的影响。余明高[163]通过实验探究了障碍物与管道壁面距离变化对瓦斯爆炸的影响规律。目前障碍物位置与其他障碍物条件对瓦斯爆炸及其传播特性的耦合作用方面研究较少, 往后可以开展障碍物位置与其他障碍物条件耦合作用的相关研究。

### 8.3. 障碍物数量对受限空间瓦斯爆炸的影响

障碍物数量对瓦斯爆炸超压有着显著促进作用。QU 等[164]进行了数值模拟后得出障碍物的数量越



多, 火焰传播速度和爆炸超压越大的结论。DONG 等[165]进行实验后发现只有一个障碍物时只会对瓦斯爆炸的压升速率产生影响, 且影响只在一定范围内, 而对爆炸超压峰值没有影响, 增加障碍物数量后, 爆炸超压峰值随之上升, 且上升幅度较大。杨春丽[153]进行数值模拟探究了障碍物数量和障碍物阻塞率的耦合作用对瓦斯爆炸的影响规律。尉存娟[166]则通过实验的方法来研究障碍物数量的影响规律, 总结出以下结论, 障碍物数量对瓦斯爆炸的影响也受到激励因素和抑制因素的共同作用, 激励因素即障碍物的湍流诱导作用能促进燃烧, 加快反应速率, 抑制因素即火焰与压力波经过障碍物后将损失一定的能量。障碍物数量较少的条件下, 因此时激励因素的作用大于抑制因素的作用, 所以爆炸超压、压升速率以及火焰速度随障碍物数量的增加而增加。而增加障碍物数量到一定程度以后, 这时抑制作用大于激励作用, 压升速率以及爆炸超压值便不再上升反而下降, 火焰速度的增加幅度也会随之降低。

#### 8.4. 障碍物形状对受限空间瓦斯爆炸的影响

受限空间瓦斯爆炸产生的火焰与冲击波经过不同形状障碍物产生不同反射与绕射, 产生不同的传播特性参数。应展峰[167]指出火焰阵面传播至障碍物前会发生改变, 且火焰阵面的形状和障碍物的形状有关。李国庆[168]进行实验后发现气体爆炸受到障碍物形状的影响比受到气体浓度的影响要小。景国勋[169]进行试验后得出改变障碍物的形状会对放置障碍物情况下不同分岔角度管道内瓦斯爆炸变化规律产生不同影响的结论。叶经方等[170]探究了不同形状障碍物对瓦斯爆炸火焰的影响, 发现不同形状的障碍物均能加快瓦斯爆炸火焰的传播速度以及促使瓦斯爆炸火焰由层流燃烧向湍流燃烧发生转变, 但不同形状障碍物对火焰的各影响因素大小不同, 所以呈现的特点不一样。王成等[171]通过进行实验, 探究了障碍物形状为挡板、网状、圆环、半圆环、四孔圆环以及十字圆环的障碍物对瓦斯爆炸特性的影响。秦润[172]研究了障碍物形状为挡板、弓形、圆环以及四孔圆环的障碍物对瓦斯爆炸特性的影响。张增亮[173]等探究了中心分别开正三角形、方形以及圆形孔的障碍物对瓦斯爆炸的影响。王志青[150]探究了形状为条形、半圆形、圆环的障碍物对瓦斯爆炸特性的影响。综上所述, 今后可以考虑研究更多种类的障碍物形状以及障碍物形状与其他障碍物条件耦合对受限空间瓦斯爆炸及其传播特性的影响。

#### 8.5. 障碍物材料对受限空间瓦斯爆炸的影响

为了保证矿井下生产的安全进行, 在巷道内会设置风门、密闭墙之类柔性物体, 当瓦斯爆炸时, 这类柔性物体可视为柔性障碍物, 与风机、液压支架之类的刚性障碍物相比, 柔性障碍物对瓦斯爆炸的激励作用机理是不一样的[174]。GAO Ke [175]等为了探索隧道内柔性管道系统和管线支架对管内火焰演化和冲击波传播的影响, 进行了数值模拟, 模拟结果表明, 火焰形状容易在有柔性障碍物的管道中形成许多褶皱。同时, 在柔性管道系统和管线支架模型中, 最大压力分别比空管最大压力增加 29%和 77.8%, 最大火焰传播速度分别比空管火焰传播速度增加 6.8%和 20%。乔征龙[176]等进行数值模拟得出在瓦斯爆炸中后期, 柔性障碍物会使瓦斯爆炸压力降低的结论。张延炜[177]使用双向拉伸聚丙烯薄膜(Biaxially Oriented Polypropylene, BOPP)薄膜作为柔性障碍物进行试验, 探究柔性障碍物数量对瓦斯爆炸的影响规律。刘珊珊[178]通过使用不同厚度的 BOPP 薄膜进行试验来探究柔性障碍物厚度对瓦斯爆炸的影响。徐景德[179]探究了柔性障碍物与瓦斯浓度梯度分布对瓦斯爆炸的耦合作用, 发现瓦斯浓度梯度差会使柔性障碍物产生的激励效应增强, 并能促进瓦斯燃烧得更充分, 加快爆炸反应速率, 大幅提升瓦斯爆炸超压、爆炸温度, 从而扩大了瓦斯爆炸灾害破坏范围。

#### 8.6. 障碍物间距对受限空间瓦斯爆炸的影响

障碍物的间距不一样, 对瓦斯气体爆炸冲击波产生的扰动作用及叠加效果不一样。尉存娟[180]进行了实验后发现, 增加障碍物间距, 火焰速度随之增加, 爆炸超压峰值增大。秦润[181]进行试验后发现改

变障碍物间距,能使瓦斯爆炸火焰传播速度的加速度变化,但对爆炸压力上升速率等瓦斯爆炸过程参数影响较小。余立新[182]通过实验后发现,保持阻塞率相同的情况下,障碍物间距仅影响火焰加速度,不影响最终的火焰稳态速度,此外,当障碍物间距与管道直径相同时,火焰加速度最大,火焰加速距离最短。陈道阳[183]等进行了数值模拟,得出保持障碍物数量相同的情况下,增大障碍物间距,火焰加速度会先增大再减小最终保持不变的结论。INNA [184] [185]等探究了障碍物间距对瓦斯爆炸的影响,发现存在一个障碍物间距范围,在这个范围内能使得瓦斯爆炸的强度最剧烈,后果最严重,也即能使爆炸产生最大的瓦斯爆炸压力和火焰速度。GAMEZO [186]进行数值模拟后得出增加障碍物间距到一定距离后会使得爆轰发生的结论。WANG [157]指出当障碍物间距较小时,足够大的障碍物阻塞率也能促使瓦斯爆炸转爆轰的过程发生。

综上所述,许多学者对障碍物影响瓦斯爆炸特性进行了一些研究,但是做了一部分假设和理想化分析,例如研究使用的管道主要为长的平直管,虽还原了井下巷道形状,但没有能够把矿井巷道障碍物的复杂情况给真实地还原。针对特殊环境条件下瓦斯爆炸特性的变化研究还不够深入,例如对火焰温度、冲击波速度以及爆炸压升速率等爆炸影响更直观的参数研究较少,因此仍需加大研究力度。

## 9. 煤尘对受限空间瓦斯爆炸的影响

在矿井开采的过程中会产生大量的煤尘悬浮于空气当中,这些煤尘通常具有爆炸性,在发生瓦斯爆炸时会参与其中,因此需要考虑煤尘对瓦斯爆炸的影响。李江波[187]进行试验后发现当瓦斯浓度较低时,煤尘的存在使得瓦斯爆炸强度显著增大,即爆炸超压峰值、压升速率峰值以及火焰速度都大幅提升。司荣军[188]进行了实验探究了煤尘浓度对瓦斯爆炸超压和压升速率的影响。徐婷婷[189]采用数值模拟方法探究了不同粒径的煤尘对瓦斯爆炸的影响。景国勋[190]通过试验,得出以下结论,煤尘浓度的提升使得火焰传播速度的加速度值出现开始提升然后下降的变化趋势,且煤尘浓度取  $50 \text{ g/m}^3$  可以使传播管中火焰传播速度的加速度最大。此外,煤尘浓度的提升对火焰在爆炸室末端传播的影响较大。李海涛[191]利用实验和数值模拟结合探究了煤尘的存在对瓦斯爆炸火焰的影响。汪泉[192]通过实验得出以下结论,煤尘的存在会显著增加瓦斯火焰超压波脉冲宽度,此外加入煤尘,能显著延迟燃烧反应时间,最后,加入的煤尘会和瓦斯火焰一起产生瓦斯-煤尘复合火焰,会增加火焰温度半峰宽度,瞬时火焰温度曲线出现显著“双峰”现象。姜海鹏[193]则通过实验探究了高挥发分煤尘对瓦斯爆炸的影响。

综上所述,目前煤尘对受限空间瓦斯爆炸的影响研究基本通过在管道内实验来开展,因此今后可在实际巷道进行实验来修正小型管道带来的尺度效应问题,其次可以更多考虑其他环境因素与煤尘的多因素耦合作用对瓦斯爆炸特性的影响。

## 10. 受限空间瓦斯爆炸建模软件研究进展

对于受限空间瓦斯爆炸,我们需要使用建模软件进行数值模拟来对实验结果进行补充和修正。然而数值模拟软件发展到现在仍然存在许多不足,对于需要改进的地方整理如下:第一,CFD方法能够模拟复杂的几何结构,并具有良好的预测能力,但受到其高计算成本的限制。第二,对于流量,工程师可能被迫花费大量时间手动将流动区域输入CFD模拟模型;因此,选择能够使用布尔逻辑提取该数据的CFD软件更有效。除非工程师对物理和数学有广泛的理解,否则从众多可用工具中选择合适的CFD解算器可能非常困难。第三,由于涉及广泛的活动时空尺度,表现爆炸中发生的湍流运动会非常复杂和具有挑战性。湍流模型模拟和预测湍流的行为,取决于环境的条件和周围的环境。湍流的非线性性质和无穷多个方程的参与导致了闭合问题,而目前,闭合问题尚未解决。如今运用最为广泛的是FLACS和FLUENT这两种软件,下面将着重讨论这两种软件。首先FLACS生成的爆炸压力相比实际爆炸产生的压力可能会

偏高或者偏低。与实验数据相比, FLACS 产生的结果在更狭窄区域的爆炸超压偏高了。其次, 由于缺乏声学模型, 在 FLACS 中爆炸压力也可能偏低。FLACS 的另一个局限性是只能使用典型的  $k-\varepsilon$  湍流模型, 因为其湍流模型与子网格建模相耦合, 提高了其几何表示的精度; 用更先进的湍流模型代替 FLACS 中的  $k-\varepsilon$  湍流模型, 不会给 FLACS 中进行的典型模拟增加太多价值。FLUENT 则在版本 15 中使用的预混合燃烧模型有一些局限性。预混合燃烧模型使用基于压力的解算器, 因此仅限于爆燃等亚音速流动。最后, 这两个软件的共同问题是在捕获爆炸过程中的主要机制的同时, 对不重要的对象使用更粗糙的计算网格。虽然这些方法可以显著降低模型的计算成本, 因为几何体、计算网格和模拟结果之间存在明确的关系, 它们可能会对结果准确性产生影响。

## 11. 结论

受限空间瓦斯爆炸特性受到诸多因素的影响, 深入研究这些因素对受限空间瓦斯爆炸特性的影响, 对于瓦斯爆炸能量的开发利用、预防和控制受限空间瓦斯爆炸、瓦斯爆炸事故调查及丰富和完善瓦斯爆炸理论具有十分重要的现实意义和科研价值。本文依据受限空间瓦斯爆炸特性的影响因素来分类归纳、总结及评述国内外的研究成果, 提出目前研究所存在的问题并指出下一步研究方向。

1) 理论问题, 瓦斯爆炸特性取得的丰硕研究成果丰富和完善了瓦斯爆炸理论, 并且能够指导工程实践, 但在理论分析时, 往往进行了简化, 缺乏全面地分析。例如瓦斯爆炸的中间产物、中间过程等。很多影响因素只能从理论方面定性描述, 因此需加大对瓦斯爆炸机理的研究, 从而更好地描述瓦斯爆炸特性和影响因素之间的关系, 揭示瓦斯爆炸的动力现象及过程。

2) 实验问题, 考虑实验成本、实验难度等原因, 不能同时对多因素的综合作用进行综合实验测定, 很难实现真实现场情况, 而且各参数之间耦合作用致使爆炸发展过程复杂, 导致受限空间内爆炸特征参数的表征较为困难。因此建议结合相似性理论加大对定量表征模型的研究, 使结果能对受限空间瓦斯爆炸的危险程度进行更准确的预测并确定改变瓦斯爆炸特性的主要影响因素。

3) 数值模拟问题, 在数值模拟分析过程中, 通常都进行大量的假设和修正相应参数(例如当量法、体积法等), 同时缺乏针对性的软件和模块。因此需要加大瓦斯爆炸相关软件和模块的开发力度, 从而能提供更精确的受限空间结构、材料及流-固耦合的综合分析模块, 让数值模拟结果与真实情况更加接近。

## 基金项目

国家自然科学基金项目“矿井瓦斯爆炸能量释放转化特性及热冲击能量损耗研究”(编号: 52174177)、“矿井多爆源瓦斯爆炸传播特性及热冲击动力学机制研究”(编号: 52174178)。

## 参考文献

- [1] 叶青, 林柏泉. 受限空间瓦斯爆炸传播特性[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012: 8.
- [2] Ye, Q., Wang, G., Jia, Z., et al. (2017) Experimental Study on the Influence of Wall Heat Effect on Gas Explosion and Its Propagation. *Applied Thermal Engineering*, **118**, 392-397. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.084>
- [3] Ye, Q., Lin, B.Q., Jian, C.G., et al. (2012) Propagation Characteristics of Gas Explosion in Duct with Sharp Change of Cross Sections. *Disaster Advance*, **15**, 999-1003.
- [4] Ye, Q., Jia, Z., Wang, H., et al. (2013) Characteristics and Control Technology of Gas Explosion in Gob of Coal Mines. *Disaster Advance*, **6**, 112-118.
- [5] Ye, Q. and Jia, Z. (2014) Effect of the Bifurcating Duct on the Gas Explosion Propagation Characteristics. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **50**, 424-428. <https://doi.org/10.1134/S0010508214040108>
- [6] Yang, Z., Ye, Q., Jia, Z., et al. (2020) Numerical Simulation of Pipeline-Pavement Damage Caused by Explosion of Leakage Gas in Buried PE Pipelines. *Advances in Civil Engineering*, **2020**, Article ID: 4913984. <https://doi.org/10.1155/2020/4913984>



- [7] 伍堂锐. 瓦斯爆炸冲击作用下巷道壁面损伤破坏特性研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2018.
- [8] Ran, D., Cheng, J., Zhang, R., *et al.* (2021) Damages of Underground Facilities in Coal Mines Due to Gas Explosion Shock Waves: An Overview. *Shock and Vibration*, **2021**, Article ID: 8451241. <https://doi.org/10.1155/2021/8451241>
- [9] Yang, K., Hu, Q., Sun, S., *et al.* (2019) Research Progress on Multi-Overpressure Peak Structures of Vented Gas Explosions in Confined Spaces. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **62**, Article 103969. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.103969>
- [10] 贾智伟, 李小军, 杨书召. 煤矿瓦斯爆炸传播规律的研究进展[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(6): 73-75.
- [11] 胡江慧. 矿井瓦斯爆炸特性研究的综述及展望[J]. 西部皮革, 2019, 41(14): 33.
- [12] 张莉聪, 周振兴, 李斯曼. 煤矿含障碍物的瓦斯爆炸数值模拟研究综述[J]. 华北科技学院学报, 2022, 19(4): 106-110.
- [13] Bjerkvedt, D., Bakke, R.J. and Wingerden, K.V. (1997) Gas Explosion Handbook. *Journal of Hazardous Materials*, **52**, 1-150. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(97\)81620-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(97)81620-2)
- [14] 任瑞娥, 吕荣, 李媛. 不同浓度甲烷爆炸火焰传播过程的实验研究[J]. 化工中间体, 2014, 10(3): 45-48.
- [15] 尉存娟, 谭迎新. 管道内不同浓度甲烷爆炸传播特性的实验研究[J]. 煤矿安全, 2009, 40(10): 4-6+10.
- [16] 余明高, 孔杰, 王燕, 等. 不同浓度甲烷-空气预混气体爆炸特性的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(6): 85-90.
- [17] 宫广东, 刘庆明, 白春华, 等. 10 m<sup>3</sup> 爆炸罐中甲烷燃烧爆炸发展过程[J]. 实验力学, 2011, 26(1): 91-95.
- [18] 陈先锋, 张银, 许小江, 王亚平, 李星. 不同当量比条件下矿井瓦斯爆炸过程的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 429-433.
- [19] 蔺伟, 宋清官, 王成, 等. 浓度梯度对瓦斯爆炸影响的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(4): 336-340.
- [20] 徐景德, 冯若尘, 田思雨, 等. 100%置障与浓度梯度耦合作用甲烷爆炸激励效应实验研究[J]. 爆破, 2020, 37(1): 134-140.
- [21] 任少云. 密闭管道内爆炸下限甲烷-空气混合及爆炸规律[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(12): 1642-1645.
- [22] Wang, C., Zhao, Y. and Addai, K. (2017) Investigation on Propagation Mechanism of Large Scale Mine Gas Explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **49**, 342-347. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.07.011>
- [23] Zhang, Q., Pang, L. and Liang, H. (2012) Coupling Relation between Air Shockwave and High-Temperature Flow from Explosion of Methane in Air. *Flow Turbulence Combust*, **89**, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9389-9>
- [24] Zhang, Q. and Ma, Q. (2014) Pressure and Flow Propagation Rule beyond Original Premixed Area of Methane-Air in Tunnel. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, **24**, 1626-1635. <https://doi.org/10.1108/HFF-08-2013-0259>
- [25] Zhang, Q. and Ma, Q. (2015) Dynamic Pressure Induced by a Methane-Air Explosion in a Coal Mine. *Process Safety and Environmental Protection*, **93**, 233-239. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.05.005>
- [26] Pang, L., Wang, T., Zhang, Q., *et al.* (2014) Nonlinear Distribution Characteristics of Flame Regions from Methane-Air Explosions in Coal Tunnels. *Process Safety and Environmental Protection*, **92**, 193-198. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.10.016>
- [27] 徐景德, 徐胜利, 杨庚宇. 矿井瓦斯爆炸传播的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 33(7): 55-57.
- [28] 司荣军. 矿井瓦斯煤尘爆炸传播规律研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2007.
- [29] 王东武, 杜春志. 巷道瓦斯爆炸传播规律的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 475-480+485.
- [30] 程方明, 邓军, 蔡周全, 等. 瓦斯积聚范围对独头巷道瓦斯爆炸冲击波破坏特征与传播规律的影响[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(4): 1-5+9.
- [31] 王磊. 大型巷道与小型管道瓦斯爆燃传播规律实验和数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [32] 周西华, 孟乐, 史美静, 等. 高瓦斯矿发火区封闭时对瓦斯爆炸界限因素的影响[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 351-356.
- [33] Mitu, M., Prodan, M., Giurcan, V., *et al.* (2016) Influence of Inert Gas Addition on Propagation Indices of Methane-Air Deflagrations. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers. Process Safety and Environmental Protection*, **102**, 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.05.007>
- [34] 李成兵, 吴国栋, 周宁, 等. N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 抑制甲烷燃烧数值分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(3): 288-293.

- [35] 陈金健, 胡双启, 曹雄. 多元惰气对瓦斯爆炸特性影响的实验研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(8): 161-164.
- [36] 张迎新, 吴强, 刘传海, 等. 惰性气体  $N_2/CO_2$  抑制瓦斯爆炸实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(5): 906-912.
- [37] 钱海林, 王志荣, 蒋军成.  $N_2/CO_2$  混合气体对甲烷爆炸的影响[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(4): 445-448.
- [38] 王华, 葛岭梅, 邓军. 惰性气体抑制矿井瓦斯爆炸的实验研究[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(1): 4-7+91.
- [39] 罗振敏, 王子瑾, 苏彬, 等. 多元可燃气体对  $CH_4$  爆炸及其自由基发射光谱影响试验[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(4): 1-7.
- [40] 罗振敏, 刘利涛. 以氢气为主要成分的其他可燃气体对低浓度甲烷爆炸特性的影响[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1): 167-172.
- [41] 罗振敏, 王磊, 李秀芳, 等. 变温下多元可燃气体对甲烷爆炸特性的影响数值模拟[J]. 煤矿安全, 2020, 51(3): 6-11.
- [42] 李秀芳. 非常温下多元气体对甲烷爆炸影响的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2017.
- [43] 邓军, 吴晓春, 程超.  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $C_2H_4$  多元可燃气体爆炸的实验研究[J]. 煤矿现代化, 2007(5): 63-65.
- [44] 黄子超. 环境温度对预混瓦斯气体爆炸特性的影响[J]. 煤矿安全, 2021, 52(2): 1-6.
- [45] Jiang, B., Lin, B., Shi, S., et al. (2012) A Numerical Simulation of the Influence Initial Temperature Has on the Propagation Characteristics of, and Safe Distance from, a Gas Explosion. *International Journal of Mining Science & Technology*, **22**, 307-310. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2012.04.004>
- [46] 黄子超, 司荣军, 李润之. 不同环境温度下瓦斯爆炸特性的数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(5): 29-31+35+99.
- [47] Jiang, B., Lin, B., Shi, S., et al. (2012) Numerical Simulation on the Influences of Initial Temperature and Initial Pressure on Attenuation Characteristics and Safety Distance of Gas Explosion. *Combustion Science and Technology*, **184**, 135-150. <https://doi.org/10.1080/00102202.2011.622321>
- [48] 李润之, 黄子超, 司荣军. 环境温度对瓦斯爆炸压力及压力上升速率的影响[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 415-419.
- [49] 高娜, 张延松, 胡毅亨. 温度压力对瓦斯爆炸危险性影响的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(2): 218-223.
- [50] 白刚, 周西华, 宋东平. 温度与  $CO$  气体耦合作用对瓦斯爆炸界限影响实验[J]. 高压物理学报, 2019, 33(4): 189-196.
- [51] Luo, Z., Li, R., Wang, T., et al. (2020) Explosion Pressure and Flame Characteristics of  $CO/CH_4$ /Air Mixtures at Elevated Initial Temperatures. *Fuel*, **268**, 117-377. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117377>
- [52] 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.
- [53] 刘丹, 司荣军, 李润之. 环境湿度对瓦斯爆炸特性的影响[J]. 高压物理学报, 2015, 29(4): 307-312.
- [54] 李成兵, 吴国栋, 经福谦. 水蒸气抑制甲烷燃烧和爆炸实验研究与数值计算[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(1): 118-124.
- [55] 杨龙龙, 刘艳, 杨春丽. 不同湿度和近爆炸下限条件下甲烷-空气混合物爆炸特征[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(2): 166-175.
- [56] 谭汝媚, 张奇, 黄莹. 环境湿度对环氧丙烷蒸气爆炸参数的影响[J]. 高压物理学报, 2013, 27(3): 325-330.
- [57] 朱丕凯. 环境因素对甲烷爆炸极限浓度的影响研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(6): 108-111.
- [58] 司荣军, 李润之. 低浓度含氧瓦斯爆炸动力特性及防控关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 17-36.
- [59] 李艳红, 贾宝山, 曾文, 等. 受限空间初始压力对瓦斯爆炸反应动力学特性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2011, 30(5): 697-701.
- [60] 刘向军, 陈昊. 初始压力对矿井瓦斯爆炸过程影响的理论研究[J]. 矿冶, 2006, 15(1): 5-9.
- [61] 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.
- [62] 朱丕凯, 司荣军. 温度压力耦合对瓦斯爆炸危险度的影响研究[J]. 中国煤炭, 2019, 45(1): 118-122.
- [63] 张辉, 菅从光. 电磁场对瓦斯爆炸影响的实验研究与理论分析[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(1): 11-13.
- [64] 李静, 徐健. 磁场对瓦斯爆炸过程中火焰传播的作用[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(11): 85-88.
- [65] 叶青, 林柏泉, 菅从光, 等. 磁场对瓦斯爆炸及其传播的影响[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 153-157.
- [66] 李静. 电场对瓦斯爆炸过程中火焰传播和爆炸波的作用[J]. 建井技术, 2007, 28(5): 26-29.

- [67] 朱传杰, 林柏泉, 陆振国, 等. 直流高压电场对瓦斯爆炸传播的影响研究[C]//2010 (沈阳)国际安全科学与技术学术研讨会. 沈阳: 东北大学出版社, 2010: 706-711.
- [68] 赖芳芳. 电火源引爆瓦斯的规律和特征研究[D]: [硕士学位论文]. 廊坊: 华北科技学院, 2015.
- [69] 王海燕, 张雷, 郭增乐. 基于自研设备高温源诱发甲烷爆炸特性研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(5): 11-15.
- [70] 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.
- [71] 王毅, 王海燕, 张雷, 等. 高温热源表面点燃甲烷和煤尘实验研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(9): 85-90.
- [72] 朱启阳. 点火源对氮气惰化抑制甲烷爆炸的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [73] 周锦龙, 易永华. 煤矿采空区顶板岩石摩擦对瓦斯的点火特性[J]. 煤炭技术, 2015, 34(10): 193-195.
- [74] 祁文涛, 何立明, 赵兵兵, 等. 空气等离子体射流点火器特性实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(11): 2107-2113.
- [75] 金永飞, 宋跃, 程方明. 脉冲点火方式下点火能对甲烷爆炸极限的影响[J]. 煤矿安全, 2017, 48(10): 28-30.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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.
- [83] 徐景德, 周心权, 吴兵. 瓦斯浓度和火源对瓦斯爆炸传播影响的实验分析[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(11): 15-17.
- [84] 徐景德, 赖芳芳, 杨鑫, 等. 强火源条件下瓦斯点火化学热力学特征[J]. 煤矿安全, 2015, 46(2): 158-160.
- [85] 张云明. 可燃气体火焰传播与爆轰直接起爆特性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [86] 卢平. 排放钻孔有效半径的简易确定方法[J]. 东北煤炭技术, 1996(2): 38-40.
- [87] Bradley, D. and Mitcheson, A. (1978) The Venting of Gaseous Explosion in Spherical Vessels: I: Theory. *Combustion and Flame*, **32**, 237-255. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0010-2180(78)90099-8)
- [88] Solberg, D.M., Pappas, J.A. and Skramstad, E. (1981) Observations of Flame Instabilities in Large Scale Vented Gas Explosions. *Symposium on Combustion*, **18**, 1607-1614. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(81\)80164-6](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(81)80164-6)
- [89] Hphylaktou, G. and Andrews, E. (1999) Gas Explosions in Linked Vessels. *13th ICDERS*, Japan, July 1999.
- [90] Kasmani, R.M., Andrews, G.E. and Phylaktou, H.N. (2013) Experimental Study on Vented Gas Explosion in a Cylindrical Vessel with a Vent Duct. *Process Safety and Environmental Protection*, **91**, 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2012.05.006>
- [91] Bauwens, C.R., Chaffee, J. and Doroev, S. (2010) Effect of Ignition Location, Vent Size, and Obstacles on Vented Explosion Overpressures in Propane-Air Mixtures. *Combustion Science and Technology*, **182**, 1915-1932. <https://doi.org/10.1080/00102202.2010.497415>
- [92] 曹勇. 点火位置对氢气-空气泄爆特性影响的实验研究[D]: [硕士学位论文]. 安徽: 安徽理工大学, 2016.
- [93] 冯长根, 陈林顺, 钱新明. 点火位置对独头巷道中瓦斯爆炸超压的影响[J]. 安全与环境学报, 2001, 1(5): 56-59.
- [94] 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>
- [95] 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>
- [96] Bi, M., Dong, C. and Zhou, Y. (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>
- [97] Park, D.J. and Lee, Y.S. (2012) Experimental Investigation of Explosion Pressures and Flame Propagations by Wall Obstruction Ratios and Ignition Positions. *Korean Journal of Chemical Engineering*, **29**, 139-144. <https://doi.org/10.1007/s11814-011-0159-5>
- [98] 刘双双, 赵亚军, 刘培培. 点火源位置对瓦斯爆炸传播规律的影响[J]. 内蒙古煤炭经济, 2017(1): 127-128.



- [99] 解北京, 王亮, 严正. 点火位置对独头巷道瓦斯爆炸火焰参数影响实验[J]. 煤炭工程, 2019, 51(2): 87-91.
- [100] 吕鹏飞, 张家旭, 梁涛, 等. 点火位置对污水管网可燃气体爆燃特性影响模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(10): 51-56.
- [101] 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.
- [102] 王涛, 文虎, 罗振敏, 等. 敞口端点火条件下甲烷-空气爆炸火焰传播实验[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(5): 617-622.
- [103] 王超强, 杨石刚, 方秦, 等. 点火位置对泄爆空间甲烷-空气爆炸荷载的影响[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(4): 898-904.
- [104] 栾鹏鹏. 点火位置对管道内预混合成气爆炸特性影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [105] 江丙友, 林柏泉, 朱传杰, 等. 瓦斯爆炸过程中火焰瞬时传播规律研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 97-101.
- [106] 朱学亮, 程国强. 巷道内瓦斯爆炸传播规律的数值研究[J]. 煤炭工程, 2011(9): 93-95.
- [107] 丁小勇. 甲烷-空气爆炸火焰传播的微观研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学, 2013.
- [108] 刘谦, 林柏泉, 朱传杰, 等. 管道长度对爆炸波前流速与超压耦合关系影响研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(3): 476-482.
- [109] 祝钊. 管道瓦斯爆炸流场及其影响因素数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(2): 300-305.
- [110] 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.
- [111] 刘玉姣, 高科, 贾进章. 基于 HLLC 算法的连通器瓦斯爆炸模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(12): 65-70.
- [112] 胡铁柱. 瓦斯爆炸传播规律数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2008.
- [113] 杨春丽. 突出诱发瓦斯爆炸数值模拟及实证研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
- [114] 翟成, 林柏泉, 叶青, 等. 结构异常管路对瓦斯爆炸传播特性的影响[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(2): 274-278.
- [115] 林柏泉, 朱传杰. 煤矿井下巷道拐角效应及其对瓦斯爆炸传播的影响作用[C]//中国职业安全健康协会 2009 年学术年会论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 2009: 321-327.
- [116] 滑帅, 梁金燕, 王莉霞, 等. 巷道拐弯对瓦斯爆炸影响的数值模拟研究[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(3): 135-138.
- [117] 贾智伟, 刘彦伟, 景国勋. 瓦斯爆炸冲击波在管道拐弯情况下的传播特性[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 97-100.
- [118] 李鑫. 管道拐弯角度变化情况下瓦斯爆炸火焰传播规律研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- [119] 孙豫敏. 基于管道异常特征的瓦斯爆炸传播特性研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [120] 林柏泉, 叶青, 翟成, 等. 瓦斯爆炸在分岔管道中的传播规律及分析[J]. 煤炭学报, 2008, 33(2): 136-139.
- [121] 白岳松. 受限空间瓦斯爆炸传播规律数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [122] 乔奎红. 巷道内瓦斯爆炸事故热辐射与冲击波伤害模型研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2009.
- [123] 许胜铭. 复杂管道内瓦斯爆炸冲击波、火焰及有毒气体传播规律研究[D]: [博士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
- [124] 闫明. 分岔管道内预混气火焰传播过程数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [125] C·K·萨文科. 井下空气冲击波[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979.
- [126] 张守中. 爆炸基本原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [127] 贾智伟, 景国勋, 程磊, 等. 巷道截面积突变情况下瓦斯爆炸冲击波传播规律的研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(12): 92-94.
- [128] 王凯, 周爱桃, 魏高举, 等. 巷道截面变化对突出冲击波传播的影响[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 989-993.
- [129] 耿瑞雄. 巷道截面变窄瓦斯爆炸传播特性的数值模拟[J]. 山西化工, 2014, 34(1): 21-24.
- [130] 蔺照东, 李如江, 陈兴, 等. 水平管道截面积突然扩大对冲击波传播的影响[J]. 煤矿安全, 2014, 45(5): 141-143+147.
- [131] 郑有山, 王成. 变截面管道对瓦斯爆炸特性影响的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(11): 947-949.
- [132] 罗振敏, 苏彬, 程方明, 等. 基于 FLACS 的煤矿巷道截面突变对瓦斯爆炸的影响数值模拟[J]. 煤矿安全, 2018,

- 49(1): 183-186.
- [133] Gao, K., Liu, J., Jia, J., *et al.* (2015) Numerical Simulation on Influence of Pipeline Attribute on Gas Explosion Wave Propagation. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, **8**, 1353-1357.
- [134] 刘玉姣. 管道属性对瓦斯爆炸冲击波传播影响规律模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- [135] 冯路阳. 管道结构对瓦斯爆炸压力及温度的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [136] 班涛. 复杂条件下瓦斯煤尘混合爆炸特性及冲击波传播规律研究[D]: [博士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
- [137] 高科, 李胜男, 王晓琪, 等. 缝洞型管道瓦斯爆炸特性数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 50-54.
- [138] 沈伟, 杜扬. 受限空间尺度对可燃气体爆燃波发展过程的影响[J]. 实验力学, 2006, 21(2): 122-128.
- [139] 徐景德, 周心权, 吴兵. 矿井瓦斯爆炸传播的尺寸效应研究[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(6): 49-53.
- [140] 王磊. 大型巷道与小型管道瓦斯爆燃传播规律实验和数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- [141] Zhang, Q., Pang, L. and Zhang, S.X. (2011) Effect of Scale on Flame Speeds of Methane-Air. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **24**, 705-712. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2011.06.021>
- [142] 支航. 瓦斯爆炸特性的实验尺度效应研究[D]: [硕士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
- [143] Jiang, B., Lin, B., Zhu, C., *et al.* (2013) Premixed Methane-Air Deflagrations in a Completely Adiabatic Pipe and the Effect of the Condition of the Pipe Wall. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **26**, 782-791. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2013.02.004>
- [144] 林柏泉, 菅从光, 张辉. 管道壁面散热对瓦斯爆炸传播特性影响的研究[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(1): 1-4.
- [145] 翟成, 林柏泉, 菅从光, 等. 壁面粗糙度对瓦斯爆炸火焰波传播的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 39-43.
- [146] 高建康, 菅从光, 林柏泉, 等. 壁面粗糙度对瓦斯爆炸过程中火焰传播和爆炸波的作用[J]. 煤矿安全, 2005, 36(2): 4-6+46.
- [147] Ma, Q., Zhang, Q. and Pang, L. (2014) Influence of the Tunnel Wall Surface Condition on the Methane-Air Explosion. *Combustion Explosion and Shock Waves*, **50**, 208-213. <https://doi.org/10.1134/S0010508214020129>
- [148] Gelfand, B.E., Bartenev, A.M., Frolov, S.M., *et al.* (1992) Thermal Detonation in Molten Sn-Water Suspension. *Archivum Combustionis*, **12**, 459-473. <https://doi.org/10.2514/5.9781600866272.0459.0473>
- [149] Inna, A.M., Phylaktou, H.N. and Andrews, G.E. (2014) Effects of Obstacle Separation Distance on Gas Explosions: the Influence of Obstacle Blockage Ratio. *Procedia Engineering*, **84**, 306-319. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.439>
- [150] 王志青, 谭迎新. 障碍物形状对瓦斯爆炸影响的研究[J]. 煤炭工程, 2010(9): 76-78.
- [151] 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]. 能源与环境, 2022, 44(3): 55-61.
- [152] Johansen, C.T. and Ciccarelli, G. (2009) Visualization of the Unburned Gas Flow Field Ahead of an Accelerating Flame in an Obstructed Square Channel. *Combustion & Flame*, **156**, 405-416. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.07.010>
- [153] 杨春丽, 李祥春. 障碍物和阻塞比对瓦斯爆炸影响的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2015, 46(12): 1-3.
- [154] 周宁, 刘超, 王文秀, 等. 置障管道内天然气爆炸过程微观特性数值模拟研究[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(11): 9-12.
- [155] 王海宾, 尉存娟. 障碍物影响下管道内气体爆炸对动物杀伤研究[J]. 中北大学学报, 2011, 32(6): 727-731.
- [156] 徐阿猛, 陈学习, 贾进章. 障碍物对瓦斯爆炸冲击波传播的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(9): 96-101.
- [157] Wang, C., Huang, F., Addai, E.K., *et al.* (2016) Effect of Concentration and Obstacles on Flame Velocity and Overpressure of Methane-Air Mixture. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **43**, 302-310. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.05.021>
- [158] 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.
- [159] 何学秋, 杨艺, 王恩元, 等. 障碍物对瓦斯爆炸火焰结构及火焰传播影响的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 186-189.

- [160] 程方明, 常助川, 高彤彤, 等. 不同位置多孔障碍物对预混火焰传播的影响[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(11): 114-120.
- [161] 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.
- [162] 郗雪辰, 张树海, 苟瑞君, 等. 障碍物位置对瓦斯爆炸火焰传播影响的数值模拟[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 61-66.
- [163] 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.
- [164] Qu, Z. (2010) Numerical Study on Shock Wave Propagation with Obstacles during Methane Explosion. *Applied Mechanics & Materials*, **33**, 114-118. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.33.114>
- [165] Dong, C., Bi, M. and Zhou, Y. (2012) Effects of Obstacles and Deposited Coal Dust on Characteristics of Premixed Methane-Air Explosions in a Long Closed Pipe. *Safety Science*, **50**, 1786-1791. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.04.002>
- [166] 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.
- [167] 应展烽, 范宝春, 陈志华, 等. 管道中不同形状悬置障碍物与火焰相互作用的实验观察[J]. 实验流体力学, 2008, 22(2): 46-50.
- [168] 李国庆, 杜扬, 白洁, 等. 平板障碍物通道形状对油气爆炸传播特性影响[J]. 化工学报, 2020, 71(4): 1912-1921.
- [169] 景国勋, 贺祥, 班涛, 等. 障碍物在分岔附近对瓦斯爆炸压力影响的实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(11): 128-133.
- [170] 叶经方, 范宝春, 应展烽, 等. 甲烷-空气预混火焰越过不同形状障碍物的实验研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(4): 40-44.
- [171] 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.
- [172] 秦润, 谭迎新, 王志青, 等. 管道内障碍物形状对瓦斯爆炸影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 60-62.
- [173] 张增亮, 王昕, 王吴平. 带孔障碍物对管道中可燃气体爆炸特性的影响[J]. 化工学报, 2019, 70(11): 4497-4503.
- [174] 田思雨. 柔性置障条件下甲烷爆炸传播过程的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 廊坊: 华北科技学院, 2020.
- [175] Gao, K., Li, S. and Liu, Y. (2021) Effect of Flexible Obstacles on Gas Explosion Characteristic in Underground Coal Mine. *Process Safety and Environmental Protection*, **149**, 362-369. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.004>
- [176] 乔征龙, 马恒, 邓立军. 基于 Charlette 模型的柔性障碍物对瓦斯爆炸的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(5): 2420-2427.
- [177] 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.
- [178] 刘珊珊, 徐景德, 张延炜, 等. 柔性障碍物厚度对甲烷爆炸激励效应影响的实验研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(1): 106-110.
- [179] 徐景德, 田思雨, 叶年年, 等. 瓦斯体积分数梯度分布及柔性置障耦合作用下爆炸灾变范围研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1053-1062.
- [180] 尉存娟, 谭迎新, 张建忠, 等. 不同间距障碍物下瓦斯爆炸特性的实验研究[J]. 中北大学学报, 2015, 36(2): 188-190.
- [181] 秦润, 谭迎新. 环形障碍物对瓦斯爆炸影响的实验研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2011, 32(6): 717-722.
- [182] 余立新, 孙文超, 吴承康. 障碍物结构对管道中预混火焰加速的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2002, 8(6): 483-486.
- [183] 陈道阳, 张礼敬, 陶刚, 等. 障碍物对火焰传播过程影响数值模拟[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(6): 35-37.
- [184] 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>
- [185] Inna, A.M., Somuano, G.B., Phylaktou, H.N., et al. (2015) Flame Acceleration in Tube Explosions with up to Three Flat-Bar Obstacles with Variable Obstacle Separation Distance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **38**, 119-124. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.08.009>



- 
- [186] Gamezo, V.N., Ogawa, T. and Oran, E.S. (2008) Flame Acceleration and DDT in Channels with Obstacles: Effect of Obstacle Spacing. *Combustion & Flame*, **155**, 302-315. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2008.06.004>
- [187] 李江波. 密闭管内甲烷-煤粉复合爆炸实验研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [188] 司荣军, 李润之, 苏岱峰. 煤尘云质量浓度对瓦斯爆炸压力影响的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1796-1798.
- [189] 徐婷婷, 李树岗, 郝慧斌, 等. 瓦斯-煤尘爆炸特性研究[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(1): 113-115+120.
- [190] 景国勋, 张胜旗, 段新伟, 等. 竖直管道内煤尘浓度对瓦斯爆炸特性影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(3): 15-20.
- [191] 李海涛, 陈晓坤, 邓军, 等. 湍流状态下竖直管道内甲烷-煤尘预混特征及爆炸过程数值模拟[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1769-1779.
- [192] 汪泉, 沈兆武, 郭子如, 等. 内铺煤粉方管内瓦斯预混火焰传播特性[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1693-1697.
- [193] 姜海鹏, 司荣军, 李润之. 高挥发分煤尘对瓦斯爆炸极限的影响[J]. 煤矿安全, 2015, 46(8): 174-177.