

# 侧壁套管泄爆作用下瓦斯爆炸特性研究

何国钦, 张 好

重庆科技大学安全工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年3月11日; 录用日期: 2024年3月31日; 发布日期: 2024年4月24日

## 摘 要

为探究出一种新型高效的煤矿瓦斯爆炸应对方法, 基于自主搭建的爆炸实验平台, 爆炸管道侧壁设有套管泄爆腔体, 通过设置不同泄爆口间距, 研究甲烷爆炸的火焰形态、火焰传播速度及爆炸超压等爆炸特性。研究表明, 套管泄爆作用下, 爆炸火焰传播速度被显著控制。瓦斯爆炸最大火焰传播速度从无侧壁的27.13 m/s, 降低到了18.81 m/s和14.52 m/s, 最大衰减率为47.33%。同时, 在侧壁套管泄爆作用下, 无论是管道上游和管道下游的爆炸超压峰值相比于无侧壁泄爆都有所减小, 其中最大衰减率可达35.5%。研究结果可为煤矿瓦斯爆炸的预防和控制提供理论基础, 促进煤矿安全技术的发展和创新。

## 关键词

煤矿, 套管, 瓦斯爆炸, 泄爆

# Study on Gas Explosion Characteristics under the Action of Side Casing Explosion Venting

Guoqin He, Hao Zhang

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

Received: Mar. 11<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 31<sup>st</sup>, 2024; published: Apr. 24<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In order to explore a new and efficient coal mine gas explosion response method, based on the explosion experiment platform built by ourselves, the side wall of the explosion pipeline is equipped with a sleeve blasting chamber. By setting different blasting outlet spacing, the explosion characteristics of methane explosions such as flame form, flame propagation speed, and explosion over-pressure are studied. The results show that the flame propagation speed is controlled signif-

icantly under the action of casing blasting. The maximum flame propagation velocity of gas explosion decreases from 27.13 m/s without a side wall to 18.81 m/s and 14.52 m/s, and the maximum attenuation rate is 47.33%. At the same time, under the action of sidewall casing blasting, the peak value of explosion overpressure of both upstream and downstream pipelines decreases compared with that without sidewall blasting, and the maximum attenuation rate can reach 35.5%. The research results can provide a theoretical basis for the prevention and control of coal mine gas explosions, and promote the development and innovation of coal mine safety technology.

## Keywords

Colliery, Casing, Gas Explosion, Explosion Venting

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

煤炭是主要的能源和工业原料[1]。煤矿中的瓦斯是一种无色、无味、易燃易爆的气体,当瓦斯浓度超过一定范围并遇到火源时,就会发生爆炸。煤矿瓦斯爆炸不仅会造成人员伤亡和设施损失,还会对煤矿生产秩序和安全稳定造成严重影响。因此,研究如何快速、高效解决瓦斯爆炸波的能量是减少爆炸事故损伤的关键。

近年来,许多学者通过实验研究了惰性气体对瓦斯爆炸的抑制效果,包括  $N_2$ 、 $CO_2$ 、 $CF_3I$  等[2] [3] [4]。研究均得出惰性气体能在一定程度上抑制爆炸。对于液相抑爆剂主要以细水雾为主,常新明[5]等发现细水雾在火焰锋面能够完全蒸发,蒸发时产生的吸热阻氧效应使燃烧反应速率降低。对于惰性粉体抑制瓦斯爆炸的研究也层出不穷,抑爆材料主要有碳酸盐、磷酸盐、聚磷酸盐、卤化物、氢氧化物、 $SiO_2$ 、尿素、硅藻土、高岭石、干水材料等[6]。贾进章[7]等、王亚磊[8]等研究发现  $KHCO_3$ 、 $NaHCO_3$  与  $NH_4H_2PO_4$  都可作为良好的抑爆材料。此外,不少学者也对多孔材料的吸能效果进行了探讨。陈鹏[9]等、魏春荣[10]等实验发现多孔材料可阻断爆炸火焰传播,起到淬火作用。隔抑爆材料主要通过吸收爆炸冲击波的能量来降低瓦斯爆炸的破坏力。具有良好吸能效果的材料可以在一定程度上降低爆炸威力。但是,隔爆材料的使用受到限制,因为当隔爆材料损坏时,隔爆能力会丧失。

综上,国内外研究人员开展了大量瓦斯隔抑爆技术方面的实验研究工作,取得了丰硕成果,但是针对管道一侧加设侧壁套管,进行泄爆研究方向几乎没有、且大多数研究只是发现旁侧泄爆有利于泄放超压,具体影响规律的研究相对较少,泄爆效果有待进一步改进和完善。因此,有必要开展新型泄爆技术的深入探索和研究,为我国大规模煤矿隧道建设和安全运营提供科学的理论和技术支撑。本项目采用小尺寸爆炸管道,同时在管道上设计泄爆口,管道外侧架设泄爆套管,探索套管泄爆效果。对瓦斯爆炸超压和爆炸火焰结构稳定性、爆炸火焰传播速率、持续时间等特性参数开展进一步深入研究,这有利于该技术在工程中的实际应用。

## 2. 实验装置及流程

### 2.1. 实验装置

自主搭建的爆炸实验平台由透明爆炸管道、侧壁套管、点火系统、压力采集系统、高速摄像系统、配气系统装置等组成,实验装置如图1所示。透明爆炸管道和侧壁套管的材质为有机玻璃,全长都为1000

mm。透明爆炸管道截面积为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ，侧壁套管截面积为  $100\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。在管道左端使用厚度为  $10\text{ mm}$  钢板封闭，右端和管道上方泄压口用厚度为  $10\text{ }\mu\text{m}$  的 PVC 薄膜密封，方形泄压口的面积为  $80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 。点火系统采用高频脉冲点火器，工作电压为  $6\text{ V}$ 。数据采集系统里的高频压力传感器分别放置于实验管道和侧壁套管的一侧，距离点火端分别为  $30\text{ cm}$  和  $70\text{ cm}$  详细压力传感器的位置如图所示。配气系统由气体流量计、空气压缩机、阀门和甲烷气瓶组成。

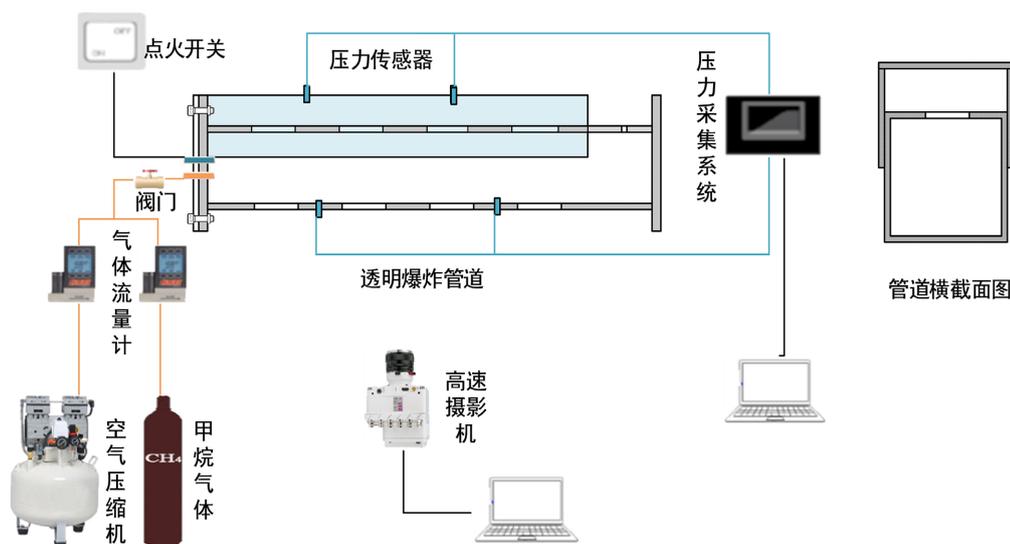


Figure 1. Experimental devices

图 1. 实验装置

## 2.2. 实验流程

首先将各设备按照图 1 所示进行连接并检查装置气密性；然后利用两个质量流量计分别控制甲烷和空气气体流速，使甲烷的体积分数固定为  $9.5\%$ 。确保排净管道内的多余气体，采用 4 倍体积法[11]进行通气，时间为  $8\text{ min}$ ；通气结束关闭阀门，调试数据采集系统，然后按下点火开关进行点火同时开启高速摄影机进行拍摄；最后储存高速摄像机与压力采集系统内的有效数据，将各实验设备恢复至实验准备阶段的状态，排出管道内的杂质气体，准备下一次实验。为确保实验数据的可靠性，每个工况至少重复 3 次。实验总包括三组工况，首先开展的无套管无侧壁泄爆口的空管实验，作为对照组，第二、三组工况分别是泄爆口位置分别位于距点火端  $20\text{ cm} + 40\text{ cm}$  和  $20\text{ cm} + 80\text{ cm}$  处，具体实验工况如表 1 所示。

Table 1. Experimental conditions

表 1. 实验工况

| 工况 | 甲烷体积分数  | 泄爆口位置                         |
|----|---------|-------------------------------|
| 1  | $9.5\%$ | 空管                            |
| 2  | $9.5\%$ | $20\text{ cm} + 40\text{ cm}$ |
| 3  | $9.5\%$ | $20\text{ cm} + 80\text{ cm}$ |

## 3. 实验结果与分析

### 3.1. 火焰传播结构

图 2 为无套管无侧壁泄爆口，未采取泄爆措施时的瓦斯爆炸火焰结构图像。从图中可以看出，瓦斯

爆炸火焰前锋只需要 80 ms 左右即可到达管道末端, 90 ms 左右火焰近乎完全熄灭。瓦斯预混气体在管道左壁面处被点燃, 火焰初始呈现半球形, 然后逐渐转变为手指形, 火焰继续向前传播。传播到一定距离时, 因受到管道上、下壁面的挤压作用, 火焰逐渐转变为平面形, 然后形成“郁金香形”火焰[11]。最后直至火焰完全熄灭。

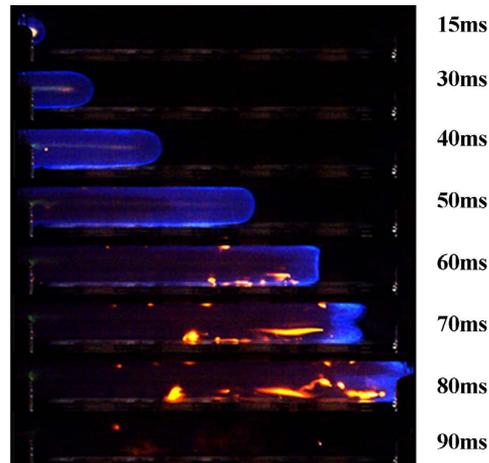
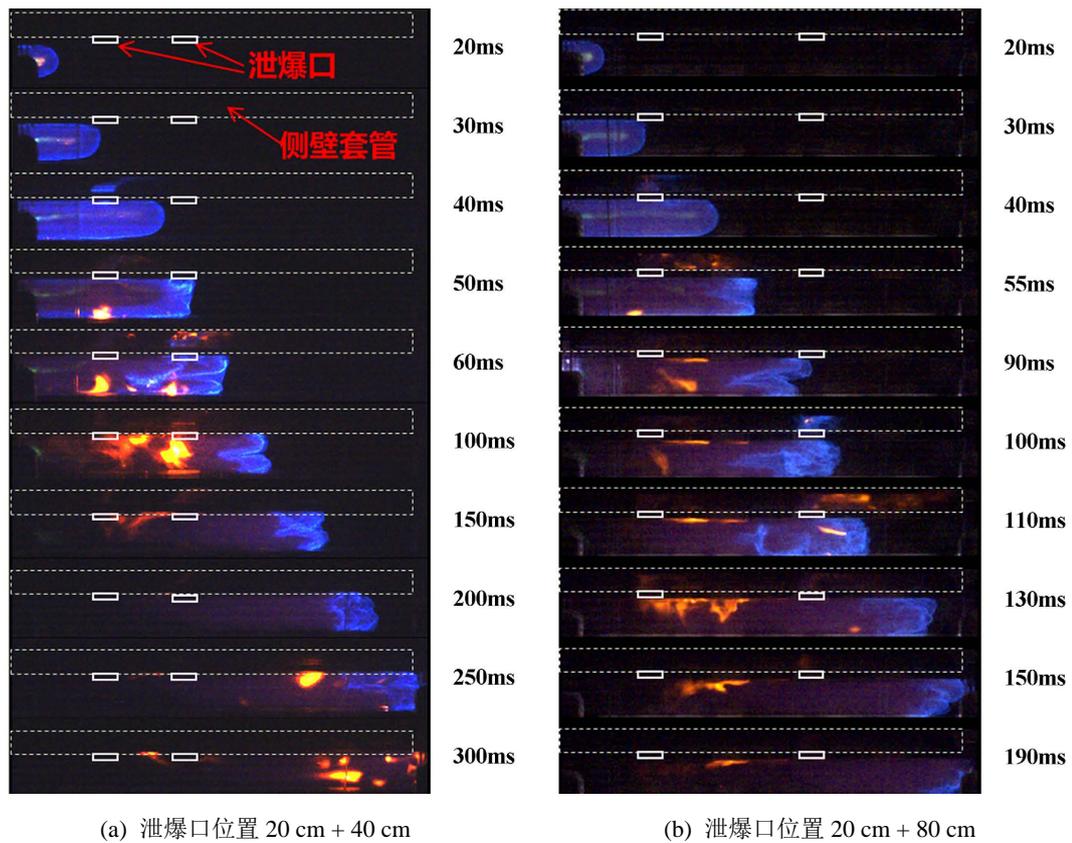


Figure 2. Structure of flame propagation of gas explosion without sidewall blasting

图 2. 无侧壁泄爆作用下瓦斯爆炸火焰传播结构图



(a) 泄爆口位置 20 cm + 40 cm

(b) 泄爆口位置 20 cm + 80 cm

Figure 3. Structure of flame propagation of gas explosion under side-wall blasting

图 3. 侧壁泄爆作用下瓦斯爆炸火焰传播结构图

图 3 为侧壁套管情形下, 开启侧壁泄爆口的瓦斯爆炸火焰图像。图 3(a)、图 3(b)分别为侧壁泄爆口位置在 20 cm + 40 cm 和泄爆口位置 20 cm + 80 cm 的瓦斯爆炸火焰图像, 对比图 3 可知, 采用侧壁套管泄爆模式下, 火焰传播速度被显著控制, 下降一半以上, 火焰到达末端的时间均超过 200 ms, 火焰传播速度大幅降低。两泄爆口位置距离越短时, 火焰到达管道右段的时间越长, 泄爆效果越好。且侧壁套管泄爆作用下, 图 3 中火焰形状因为侧壁卷吸效应, 火焰前沿已经失去了图 2 中的郁金香形态, 被完全破坏, 火焰不能够完整发育, 火焰失去加速传播的动力和基础。

### 3.2. 火焰传播速度

图 4 为不同工况下的火焰传播示意图。根据火焰数据采集系统采集到的火焰图像, 通过火焰发育尖端最大轴向距离随时间的变化, 即采用公式(1)计算平均火焰传播速度  $v$  [12]:

$$V = L / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中:

$L$ ——火焰传播距离, m;

$t_2$ ——火焰传播初始时间, ms;

$t_1$ ——火焰传播截止时间, ms。

从图 4 可知, 三组工况的火焰传播初期都是迅速猛增, 达到峰值, 后迅速减小。在无侧壁套管泄爆措施的情形下, 瓦斯爆炸火焰传播速度最高可加速到 27.13 m/s, 然而在采取侧壁通道泄爆后, 侧壁泄爆口位置 20 cm + 40 cm 和泄爆口位置 20 cm + 80 cm 的火焰速度都得以控制, 最大速度分别降低到了 14.29 m/s 和 17.78 m/s 左右, 其衰减率分别为 47.33% 和 34.46%。在侧壁套管泄爆作用下, 火焰传播速度较无侧壁泄爆作用下的传播速度大幅下降。由于侧壁泄爆口的存在, 火焰在后期的速度起伏不定, 但火焰速度都可控制到 5 m/s 以内, 减速后的爆炸火焰肉眼可见, 最小速度接近 0 m/s 左右。相比之下, 侧壁泄爆口位置在 20 cm + 40 cm 处, 更有利于控制火焰传播。

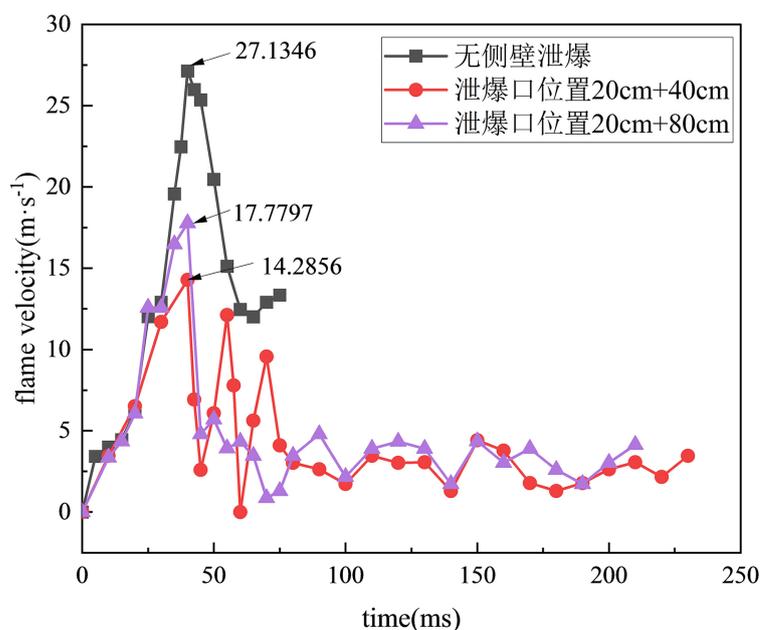


Figure 4. Schematic diagram of flame propagation speed

图 4. 火焰传播速度示意图

### 3.3. 爆炸超压

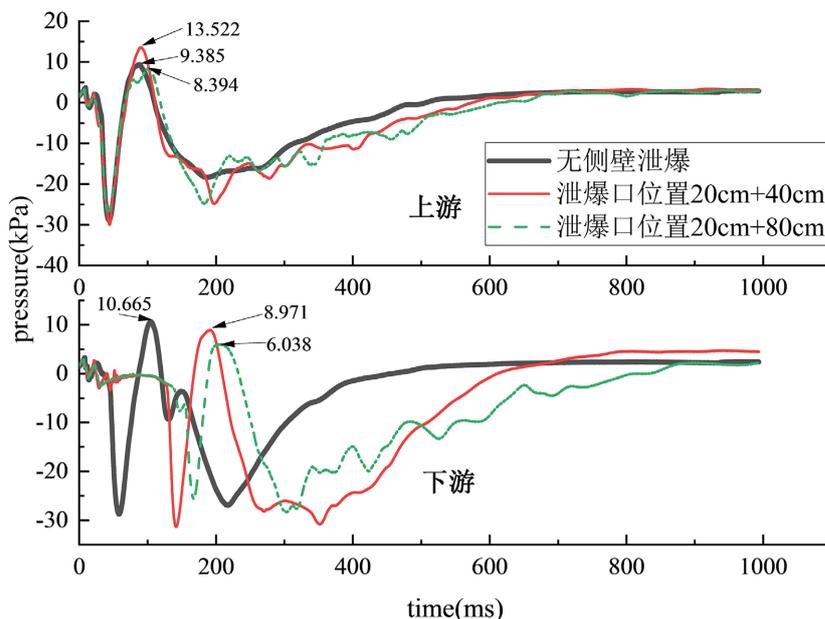


Figure 5. Overpressure of gas explosion under side wall blasting  
 图 5. 侧壁泄爆作用下瓦斯爆炸超压

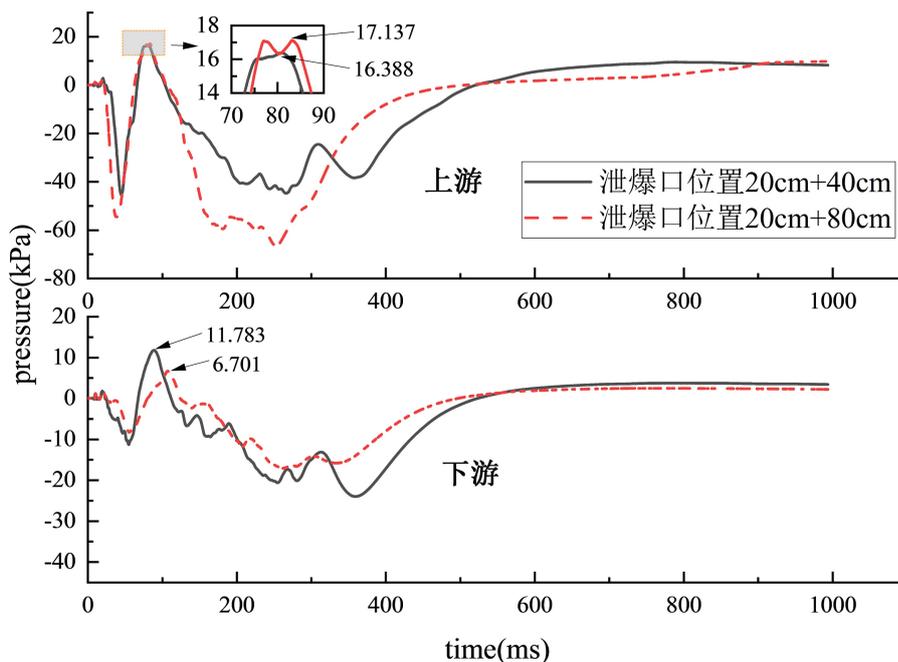


Figure 6. Side casing explosion overpressure under side wall blasting  
 图 6. 侧壁泄爆作用下侧壁套管爆炸超压

图 5 为不同工况下瓦斯爆炸超压变化图。从图 5 可知, 在采取侧壁套管泄爆模式下, 可减小管道下游的瓦斯爆炸超压峰值。若未采取侧壁泄爆措施, 管道上游和管道下游的瓦斯爆炸超压峰值分别为 9.385、10.655 kPa, 管道下游超压峰值略大于上游超压峰值。而在采用侧壁泄爆模式之后, 管道上游的爆炸超压

峰值分别为 13.522、8.394 kPa。对比之下上游峰值压力有所波动, 但波动幅度不大。管道下游的爆炸超压峰值都有所减少, 分别减少到了 8.971、6.038 kPa, 并且达到峰值的时刻有所延迟, 由原来的 100 ms 左右延迟到了 200 ms 左右。管道上游超压峰值都要大于下游超压峰值。

图 6 为侧壁泄爆作用下侧壁套管的瓦斯爆炸超压, 从图 6 可知, 在侧壁泄爆机制下, 在泄爆口位置 20 cm + 40 cm 和泄爆口位置 20 cm + 80 cm 的侧壁套管上游爆炸超压峰值分别为 16.388 kPa 和 17.137 kPa; 在下游爆炸超压峰值分别为 11.783 kPa 和 6.701 kPa。超压峰值比实验管道内部稍大, 这是因为压力冲击波进入到套管内部, 套管内部空间小, 且套管末端与大气相通, 从而导致冲击波传播快, 冲击波稍大。

#### 4. 结论

1) 在套管侧壁泄爆下, 爆炸火焰传播速度被显著控制。瓦斯爆炸最大火焰传播速度在无侧壁泄爆措施的情形下, 瓦斯爆炸火焰传播速度最高可加速到 27.13 m/s, 采取套管侧壁泄爆后, 最大速度降低到了 18.81 m/s 和 14.52 m/s, 其最大衰减率可达 47.33%。

2) 在套管侧壁泄爆作用下, 瓦斯爆炸的爆炸超压峰值相比于无侧壁泄爆有所减小, 当未采取侧壁泄爆措施时, 管道上游和管道下游的瓦斯爆炸超压峰值分别为 9.385、10.655 kPa。而在采用侧壁泄爆模式之后, 管道下游的爆炸超压峰值都有所减少, 分别减少到了 8.971、6.872 kPa, 最大衰减率可达 35.5%。

3) 在套管侧壁泄爆下, 两泄爆口之间的间距是影响泄爆效果的重要因素, 泄爆口之间间距越小, 对火焰的传播控制越好, 即泄爆效果越好, 但与之相反的是泄爆口之间间距越大, 对管道的泄压效果越好。

#### 基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目(YKJ CX2220704)。

#### 参考文献

- [1] 张迎新, 王佳伟, 唐露. 复杂管网中支路增设通风设施对瓦斯爆炸超压传播的影响[J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33(5): 649-654.
- [2] 胡洋, 吴秋遐, 庞磊, 等. 惰性气体抑制瓦斯爆燃火焰传播特性实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(11): 72-78.
- [3] 李成兵.  $N_2/CO_2/H_2O$  抑制甲烷爆炸化学动力学机理分析[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 88-92.
- [4] 程方明, 南凡, 肖昉, 等.  $CF_3I$  和  $CO_2$  抑制甲烷——空气爆炸实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(6): 158-166.
- [5] 常新明, 张红军, 魏垂胜, 等. 细水雾粒径对管内瓦斯爆炸特性的影响机理研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 8-15.
- [6] 纪文涛, 张国涛, 杨帅帅, 等. 惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸特性及机理研究 [J/OL]. 煤炭科学技术, 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20231130.1614.003.html>, 2024-03-24.
- [7] 贾进章, 张先如, 王枫潇.  $NH_4H_2PO_4-KHCO_3$  混合粉体对管网甲烷爆炸的抑制特性[J]. 爆破器材, 2024, 53(1): 43-50.
- [8] 王亚磊, 郑立刚, 于水军, 等.  $NaHCO_3$  分散状况对其抑制甲烷爆炸的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 80-85.
- [9] 陈鹏, 黄福军, 何昕, 等. 多孔材料对管道内甲烷——空气预混火焰传播的影响[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(1): 49-52.
- [10] 魏春荣, 徐敏强, 王树桐, 等. 多孔材料抑制瓦斯爆炸火焰波的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(2): 206-213.
- [11] 余明高, 陈传东, 王雪燕, 等. 管道内瓦斯非均匀预混火焰传播特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1781-1790.
- [12] 余明高, 郑凯, 郑立刚, 等. 基于 Matlab 图像处理的瓦斯爆炸火焰传播速度研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(1): 6-9.