

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.05.005

# 角联管网瓦斯爆炸冲击波与火焰波的传播特性<sup>\*</sup>

贾进章<sup>①②</sup>  田秀媛<sup>①②</sup>  赵  丹<sup>③</sup>  王枫潇<sup>①②</sup>

- ①辽宁工程技术大学安全科学与工程学院(辽宁阜新,123000)
- ②矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室(辽宁阜新,123000)
- ③湛江科技学院建筑工程学院(广东湛江,524000)

[摘  要]  为了得出实际管网中瓦斯爆炸冲击波、火焰波的普适性传播特性,搭建了角联管网实验系统。通过平均升压速率和爆炸威力指数表征冲击波传播特性;通过火焰传播速率表征火焰波传播特性。结果表明:冲击波在角联管网中传播时出现了多次衰减与叠加,冲击波的正向传播和冲击波在管网所有互连管道中的反向传播叠加在一起,导致冲击波的传播呈现复杂无序状态。冲击波传播在不同的管道结构时,经过45°分岔管道时爆炸威力最大;在斜角联支管中,压力损失最大,超压爆炸威力下降幅度最大,火焰波传播速率最快;底部直管中的火焰波传播速率最慢。可为瓦斯爆炸灾害发生后应急救援方案的制定提供理论参考。

[关键词]  角联管网;瓦斯爆炸;冲击波;火焰波;传播特性

[分类号]  TD712<sup>+.7</sup>

## Propagation Characteristics of Shock Waves and Flame Waves of Gas Explosion in Diagonal Pipe Networks

JIA Jinzhang<sup>①②</sup>, TIAN Xiuyuan<sup>①②</sup>, ZHAO Dan<sup>③</sup>, WANG Fengxiao<sup>①②</sup>

- ① College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)
- ② Key Laboratory of Mine Thermal Power Disaster and Prevention, Ministry of Education (Liaoning Fuxin, 123000)
- ③ Institute of Architectural Engineering, Zhanjiang University of Science and Technology (Guangdong Zhanjiang, 524000)

[ABSTRACT]  In order to obtain the universal propagation characteristics of gas explosion shock wave and flame wave in the actual pipe network, a diagonal pipeline networks experimental system was built. The shock wave propagation characteristics were characterized by average pressure rise rate and explosion power index, and the flame wave propagation characteristics were characterized by flame propagation velocity. Results show that the shock wave propagates in diagonal pipe networks with multiple attenuation and superposition. The forward propagation of the shock wave and the reverse propagation of the shock wave in all interconnected pipes of the pipe network are superimposed together, resulting in a complex and disorderly propagation of the shock wave. When the shock wave propagates in different pipe structures, the explosion power is the largest when it passes through 45° bifurcated pipes. In diagonal branch pipe, the pressure loss is the largest, the decline in explosive power is the largest, and flame wave propagation speed is the fastest. The flame wave propagation speed in the bottom straight pipe is the slowest. The obtained conclusions can provide a theoretical reference for the formulation of emergency rescue plans after gas explosion disasters.

[KEYWORDS]  diagonal pipe network; gas explosion; shock waves; flame waves; propagation characteristics

### 引言

瓦斯爆炸是当今工业生产安全的头号杀手。关于瓦斯爆炸产生的冲击波和火焰波传播规律方面的研究引起了众多学者的浓厚兴趣,取得了丰硕的成果<sup>[1-4]</sup>。Mason等<sup>[5]</sup>在半封闭实验管道中进行了甲烷-空

<sup>\*</sup> 收稿日期:2022-01-17  
基金项目:国家自然科学基金(52174183);辽宁省自然科学基金(2019-MS-162)  
第一作者:贾进章(1974-),男,教授,主要从事煤矿热动力灾害防治理论方面的研究。E-mail: jiajinzhang@lntu.edu.cn  
通信作者:田秀媛(1997-),女,硕士研究生,主要从事煤矿热动力灾害防治理论方面的研究。E-mail:1406784586@qq.com

气爆炸实验,探究了管道内火焰的加速传播过程。Lee 等<sup>[6]</sup>全面研究了火焰加速传播及其爆燃转爆轰的过程。Blanchard 等<sup>[7]</sup>研究发现,冲击波经过 90°管道时爆炸超压显著增强。Thomas 等<sup>[8]</sup>发现,爆炸冲击波流经弯管时,由于弯曲过度区域的影响,会出现湍流加速与燃烧速率突变现象。Jia 等<sup>[9]</sup>研究了不同截面形状管道中瓦斯爆炸的传播特性,发现梯形管道中爆炸压力达到峰值所需时间最长、温度最低、火焰传播速率最小。赵丹等<sup>[10]</sup>发现,不同形状管道中爆炸超压增长速率由快到慢依次为 T 型、X 型和 L 型,超压衰减速率从大到小依次为 L 型、T 型和 X 型。Niu 等<sup>[11]</sup>发现:横向分支会形成一个超压上升区;在平行支路中,最大爆炸超压呈逐渐下降趋势,火焰传播速率呈上升后下降趋势。杨前意等<sup>[12]</sup>得到了冲击波超压峰值的衰减速率随弯管角度的增大而增大的结论。黄强等<sup>[13]</sup>探究了爆炸腔内不同体积分数的瓦斯发生爆炸时的传播特征和 90°弯管的泄爆特性,结果表明:爆炸冲击波在管道中传播为多次超压,超压峰值逐渐减小;瓦斯体积分数为 5.8%~11.0% 时,冲击波超压峰值和火焰大小经 90°弯管道后均有较明显的衰减。朱传杰等<sup>[14]</sup>发现:在爆炸初期,爆炸超压峰值在并联管道的两端都较为接近,且并联管道中的超压衰减速率较为接近。解北京等<sup>[15-16]</sup>利用透明丁字管道系统和带有任意倾角的实验管道研究了不同封闭条件下甲烷爆炸的火焰前锋传播特性。Qiu 等<sup>[17]</sup>研究了瓦斯爆炸冲击波在不同弯头管道中的超压传播规律,得到了冲击

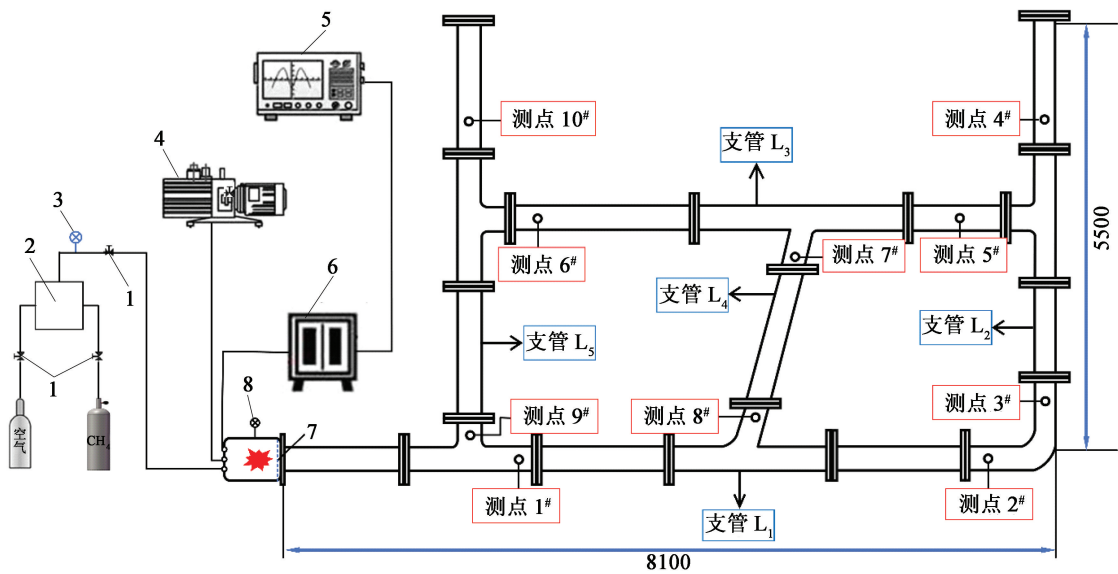
波超压衰减系数的表达式,结果表明:管道方向的改变加速了冲击波的衰减。

高建良等<sup>[18]</sup>研究了冲击波超压在对称角联网络结构内的变化特征和角联分支对主巷道内冲击波传播的影响。景国勋等<sup>[19]</sup>探究了管口封闭材料对分岔管道中爆炸压力和火焰速率的影响,结果表明:随着分岔角度增大,管道中爆炸压力和火焰速率均增大。马恒等<sup>[20]</sup>在 H 型巷道中研究瓦斯爆炸及泄爆过程中压力及风流流态的变化,结果表明:爆炸冲击波经巷道壁面反射后与正向冲击波叠加,增大了叠加区域的压力。刘玉姣等<sup>[21]</sup>基于 HLLC 算法对瓦斯爆炸过程进行了数值模拟,研究了两个爆炸腔体同时点火条件下的冲击波衰减规律。孟亦飞等<sup>[22]</sup>、董铭鑫等<sup>[23]</sup>使用 Fluent 软件研究了大尺寸管网中冲击波和火焰波变化特性,但未研究冲击波衰减特性和火焰波突变特性。

关于瓦斯爆炸传播特性的研究大多从长直管道和简单的平行管道或单分支管道开展<sup>[24-27]</sup>。除此之外,在管网中开展的部分研究<sup>[1,11]</sup>未能定量或定性确定冲击波、火焰波的传播特性,研究结论普适性不强。基于此,将并联管路、分岔管路与带有倾角的角联管路进行组合,研究角联管网中瓦斯爆炸冲击波和火焰波的传播特性。

1 实验

实验管网系统(图 1)主要由实验管网和爆炸腔



1 - 控制阀;2 - 气囊;3 - 流量计;4 - 真空泵;5 - 数据记录仪;6 - 点火装置;7 - 聚四氟乙烯薄膜;8 - 真空计。

图 1 实验系统(单位:mm)

Fig. 1 Experimental system (Unit: mm)

体组成。爆炸腔体容积为 0.5 m<sup>3</sup>,各管道内径为 500 mm,管壁厚度为 15 mm,耐压 20 MPa 以上<sup>[28]</sup>。管网由 5 条支管组合而成,每条支管上设置 2 个测点。各管道之间由螺丝紧密连接,管网出口用法兰盘封闭,管道上设有安装传感器的螺纹孔,各管道连接处均安装密封垫片以提高设备密封性,采用聚四氟乙烯薄膜将爆炸腔体和管道隔开。爆炸腔体抽真空后,通入体积分数 9.5% 的瓦斯实验气体,管道中为常压空气。点火时,接通外触发装置开关,同时确保点火器与数据采集系统同步开始工作,待装置上信号灯亮之后,按下外触发装置上的触发按钮,触发点火。点火系统主要包括 DX-GDH 高能点火器、高能火花塞、耐高压高温电缆、电源电缆以及外部触发装置。火花塞置于爆炸腔体最前端,发火电压 2 200 V,单次储能 30 J。采用 TST6300 数据采集系统收集动态数据。数据采集系统主要包括 CYG1721 型高精度压力传感器、具有侵蚀性探头的 NANMAC-E6 系列快速响应热电偶、CKG100 型光敏火焰传感器。所有传感器的采样时间均为 1 ms,采样精度为 0.2% FS。

2 实验结果分析

2.1 冲击波传播特性

图 2 为测得的各测点的冲击波超压随时间的变化情况。对图 2 分析可得各测点的冲击波参数,如表 1 所示。

支管 L<sub>1</sub> 中,测点 1<sup>#</sup>和测点 2<sup>#</sup>处的超压峰值皆出现在反应初期。测点 1<sup>#</sup>在 0.209 s 达到超压峰值,为 0.453 MPa;在 0.478 s 时,爆炸超压出现明显的拐点并有短暂的持续上升趋势。这主要是由于与

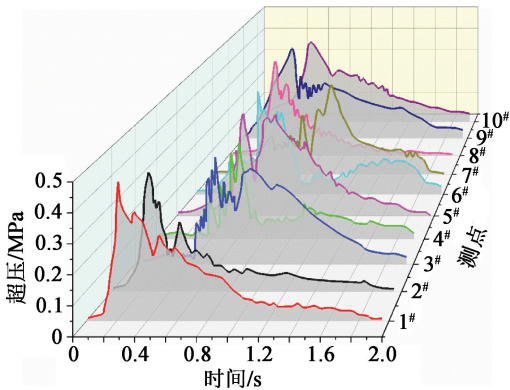


图 2 各测点超压随时间的变化  
Fig.2 Overpressure changes with time at each monitoring point

支管 L<sub>1</sub> 相连接的支管 L<sub>4</sub> 和支管 L<sub>5</sub> 中冲击波压力回流共同作用,在 L<sub>1</sub> 管中出现了较大的超压极大值,反应后期的超压逐渐衰减。测点 2<sup>#</sup>在 0.252 s 达到峰值(0.421 MPa),较测点 1<sup>#</sup>处超压峰值有明显的下降,说明角联管网中的压力冲击波在直管中经过分岔管道后有了明显的衰减现象。在爆炸中后期,测点 2<sup>#</sup>的超压小于测点 1<sup>#</sup>,且波动更小,这是由于测点 2<sup>#</sup>所处位置相对靠后,受其他支管中压力冲击波的影响较测点 1<sup>#</sup>小。

支管 L<sub>2</sub> 中,压力冲击波的叠加与衰减次数较支管 L<sub>1</sub> 中冲击波明显增加,整个过程中出现的超压极大值点数量有所增加。在爆炸初期,由于其他管路中压力冲击波的多次叠加与衰减,测点 3<sup>#</sup>处压力冲击波出现了小幅振荡波动,在 0.574 s 达到超压峰值(0.379 MPa);随后,出现衰减趋势;在 0.732 s 时,由于受到支管 L<sub>1</sub> 中经直角管道后的压力冲击波的叠加作用,爆炸超压出现明显的持续上升趋势,并在

表 1 各测点的冲击波参数

Tab.1 Parameters of shock waves at each monitoring point

支管	测点	超压峰值/MPa	达到峰值时间/s	平均升压速率/(MPa·s <sup>-1</sup> )	爆炸威力指数/(10 <sup>12</sup> Pa <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
L <sub>1</sub>	1 <sup>#</sup>	0.453	0.209	2.120	0.960
	2 <sup>#</sup>	0.421	0.252	1.631	0.687
L <sub>2</sub>	3 <sup>#</sup>	0.379	0.574	0.642	0.243
	4 <sup>#</sup>	0.342	0.615	0.540	0.185
L <sub>3</sub>	5 <sup>#</sup>	0.386	0.769	0.489	0.189
	6 <sup>#</sup>	0.415	0.505	0.802	0.333
L <sub>4</sub>	7 <sup>#</sup>	0.364	0.989	0.358	0.130
	8 <sup>#</sup>	0.402	0.403	0.973	0.391
L <sub>5</sub>	9 <sup>#</sup>	0.392	0.435	0.878	0.344
	10 <sup>#</sup>	0.358	0.495	0.703	0.252



0.850 s 时达到极大值;之后,随着反应的进一步进行,冲击波不断衰减,总体上呈下降趋势。测点 4<sup>#</sup> 处的超压在前 0.400 s 中升降波动变化较小;在 0.400 s 之后,出现了超压激增现象;在经过多次的升降浮动变化之后,于 0.615 s 时,达到了超压峰值(0.342 MPa);随着爆炸反应的进一步进行,后期压力冲击波逐渐衰减。

支管 L<sub>3</sub> 中,压力冲击波的升降次数略有增加。测点 5<sup>#</sup> 处的超压出现了两次明显的极大值:较早一次极大值出现在 0.502 s,此次峰值出现的原因主要是压力冲击波第一次正向传播,并经过两次管道拐弯的加速影响;第二次出现极大值(0.386 MPa)是在 0.769 s,出现的主要原因是正向冲击波衰减过程中,受其他管路中冲击波叠加影响而再次增加,随着爆炸结束,冲击波不断地衰减,超压开始迅速下降。测点 6<sup>#</sup> 因位置更加靠近爆炸源,故超压在 0.505 s 时达到最大(0.415 MPa);在 0.926 s 时,因泄爆口泄压影响,超压降至整个过程中的最小值;此后,虽然受到其他管路中压力冲击波的叠加影响,超压出现小幅升降波动,但总体变化较小。

支管 L<sub>4</sub> 中:测点 8<sup>#</sup> 在正向压力冲击波出现了超压峰值;而测点 7<sup>#</sup> 是受到多股压力冲击波的叠加作用而出现超压峰值。测点 8<sup>#</sup> 因为距离测点 1<sup>#</sup> 较近,所以,在爆炸初期的压力冲击波经过分岔管道而加速,在 0.403 s 出现了超压峰值(0.402 MPa);随后,压力冲击波的衰减作用逐渐超过了冲击波的叠加效应,而成为了超压变化的主导因素,所以超压呈不断下降趋势。测点 7<sup>#</sup> 处,由于受到正向冲击波的作用,约在 0.426 s 时出现了第一个超压极大值;之后,随着压力冲击波的叠加效应,超压出现了 3 个较为明显的极大值,在 0.989 s 时超压达到了最大值(0.364 MPa),此时,爆炸已进入中、后期,所以超压峰值较测点 8<sup>#</sup> 处的峰值有一定差距。

支管 L<sub>5</sub> 中,2 个测点均因为正向冲击波的作用而达到超压峰值。测点 9<sup>#</sup> 距测点 1<sup>#</sup> 较近,所以,爆炸初期的压力冲击波经过直角管道而加速,超压迅速增大,在 0.435 s 时,出现了超压峰值(0.392 MPa);随后,压力冲击波的衰减作用逐渐增强,在此期间,冲击波的叠加与衰减的同时作用下,冲击波在 0.600 s 左右出现了多次振荡波动,最终,随着爆炸的进行,冲击波进一步衰减。测点 10<sup>#</sup> 因靠近泄爆口,压力冲击波的变化趋势波动较小,在 0.495 s 时,达到了超压峰值(0.358 MPa);随后,压力冲击波开始逐渐衰减。

通过上述实验可以发现:与直管或简单分叉管

道中不同,冲击波超压在衰减时期并不随时间的增大呈现逐步减小的状态,而是出现了多次的超压反复增减变化。其原因主要是由于角联管网中各管道的相互连通,组成了多个回路,冲击波在整个传播过程中经历了多次同向叠加与相向对冲,从而出现了与在简单管路中截然不同的传播特性,即冲击波在角联管网中的传播呈现复杂无序状态。

平均升压速率和爆炸威力指数<sup>[29]</sup> 是表征瓦斯爆炸冲击波超压变化特性的重要参数。平均升压速率为

$$v = \frac{p_m - p_0}{\Delta t} \quad (1)$$

式中: $p_m$  为最大爆炸压力,MPa; $p_0$  为初始压力,MPa; $\Delta t$  为由初始压力增大到最大爆炸压力所用时间,s。

瓦斯爆炸破坏力大小主要是由爆炸威力指数决定的。

$$K = p_m v \quad (2)$$

式中: $K$  为爆炸威力指数, $10^{12}$  Pa<sup>2</sup>/s; $p_m$  为最大爆炸压力,MPa; $v$  为平均升压速率,MPa/s。

各测点和平均升压速率爆炸威力指数见表 1。

由表 1 可知:各测点爆炸威力由强到弱的顺序分别为:测点 1<sup>#</sup>、测点 2<sup>#</sup>、测点 8<sup>#</sup>、测点 9<sup>#</sup>、测点 6<sup>#</sup>、测点 10<sup>#</sup>、测点 3<sup>#</sup>、测点 5<sup>#</sup>、测点 4<sup>#</sup>、测点 7<sup>#</sup>;斜角联支管 L<sub>4</sub> 中,测点 8<sup>#</sup> 处爆炸威力指数大于并联支管 L<sub>2</sub>、L<sub>5</sub> 中的测点 3<sup>#</sup> 和测点 9<sup>#</sup>,说明冲击波传播在不同的管道结构时(图 3),流经 45°分岔管道中爆炸威力最大。同时,测点 7<sup>#</sup> 的爆炸威力指数在各测点中最小,说明冲击波在斜角联支管中的压力损失较并联支管压力损失更大,超压爆炸威力下降幅度更大。

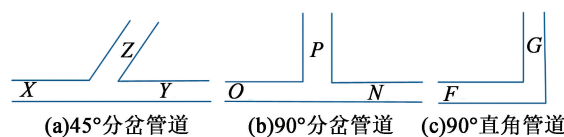


图 3 不同类型的实验管道

Fig. 3 Different types of experimental pipes

## 2.2 火焰波传播特性

火焰波传播速率是表征瓦斯爆炸火焰波变化特性的重要参数<sup>[30-32]</sup>。记录管网各支管中相邻两个测点处的火焰波到达时间,可计算出火焰传播的平均速率

$$v_i = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (3)$$

式中: $v_i$  为相邻 2 个监测点之间的火焰传播平均速率,m/s; $\Delta l$  为相邻 2 个监测点之间的距离,m; $\Delta t$

为火焰波经过相邻 2 个监测点的时间,s。

管网中各支管的火焰波锋面传播速率基于在等效条件下进行的 2 次实验结果。计算 2 个实验测量的算术平均值,以确定每个分支管道中的火焰波速率峰值,计算结果见表 2。

表 2 各支管火焰传播速率

Tab. 2 Propagation speed of flame in each branch pipe

支管	火焰传播速率 $v_f/(m \cdot s^{-1})$
$L_1$	343.6
$L_2$	370.8
$L_3$	382.7
$L_4$	364.2
$L_5$	352.1

由表 2 可知,各支管中的火焰传播速率由大到小为: $L_3$ 、 $L_2$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 、 $L_1$ 。 $L_3$  中的火焰传播速率最快,主要原因是由于  $L_3$  中出现了更大的压力损失,损失的一部分压力发生了能量转换,对火焰锋面起到了加速作用,导致  $L_3$  中的火焰波在加速过程中具有更高的加速梯度,火焰波传播速率峰值在所有支管中最高。

同理, $L_2$ 、 $L_4$  和  $L_5$  中的火焰传播速率峰值在火焰自加速机制的基础上受到了压力损失而带来的能量转化的加速作用,但因压力损伤较  $L_3$  更小,所以加速程度相对较小。而  $L_1$  中的火焰传播速率峰值在所有支管中最低。这是因为,在爆炸的初始阶段, $L_1$  中 2 个测点的超压峰值在所有监测点中分列前两位,因此, $L_1$  中的超压峰值高于其他支管;同时,意味着  $L_1$  中的压力损失在所有支管中最小。而爆炸初始阶段火焰波的加速梯度较小, $L_1$  中较小的压力损失带来的能量转化对火焰波自加速机制的促进作用较小,导致  $L_1$  中的火焰波速率峰值在所有支管中最小。

3 结论

在自主设计搭建的角联管网中研究了瓦斯爆炸冲击波、火焰波的传播特性,得到以下主要结论:

1)在角联管网中,瓦斯爆炸出现了多次的超压反复增减变化,冲击波的正向传播和在管网所有互连管道中的反向传播叠加在一起,导致冲击波的传播呈现复杂无序状态。

2)各测点爆炸威力由强到弱的顺序为:测点 1<sup>#</sup>、测点 2<sup>#</sup>、测点 8<sup>#</sup>、测点 9<sup>#</sup>、测点 6<sup>#</sup>、测点 10<sup>#</sup>、测点

3<sup>#</sup>、测点 5<sup>#</sup>、测点 4<sup>#</sup>、测点 7<sup>#</sup>。冲击波在不同的管道结构传播时,流经 45°分岔管道中爆炸威力最大。冲击波在斜角联支管中的压力损失较并联支管压力损失更大,超压爆炸威力下降幅度更大。

3)各支管中,斜角联支管中的火焰波传播速率最快,底部直管中的火焰波传播速率最慢。压力损失更大的支管中的火焰波加速梯度更大,火焰波传播速率更高,而压力损失较小支管中的火焰波加速梯度更小,火焰波速率更低。

综上,瓦斯爆炸冲击波、火焰波传播过程中的传播特性明显受到管网几何结构的影响。在实际煤矿生产活动中存在类似的角联结构巷网。因此,在角联管网中研究瓦斯爆炸冲击波、火焰波传播过程中的特性对掌握瓦斯爆炸灾害的传播规律具有一定的借鉴意义。在此研究基础上可为瓦斯爆炸灾后应急救援方案的拟定和实施提供理论指导。

参 考 文 献

[1] 石必明,牛宜辉,张雷林,等.角联管网瓦斯爆炸超压演化及火焰传播特性研究[J].煤炭科学技术,2021,49(1):257-263.

SHI B M, NIU Y H, ZHANG L L, et al. Study on methane explosion overpressure evolution law and flame propagation characteristics in diagonal pipe networks [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 257-263.

[2] 贾进章,朱金超,甄纹浩.乙炔对瓦斯爆炸的化学动力学影响模拟研究[J].中国安全科学学报,2020,30(9):29-36.

JIA J Z, ZHU J C, ZHEN W H. Simulation study on influence of  $C_2H_2$  on chemical kinetics of gas explosion [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(9): 29-36.

[3] 贾宝山,温海燕,李宗翔.煤矿巷道内  $N_2$  及  $H_2O$  抑制瓦斯爆炸的机理特性研究[J].自然灾害学报,2013,22(5):269-276.

JIA B S, WEN H Y, LI Z X. Study on mechanism characteristic of  $N_2$  and  $H_2O$  on inhibiting gas explosion in coal mine tunnel [J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5): 269-276.

[4] 贾进章,王枫潇.瓦斯爆炸对躲避硐室影响的数值模拟[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2019,38(6):517-522.

JIA J Z, WANG F X. Numerical simulation study on influence of gas explosion on refuge chamber [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),

- 2019, 38(6): 517-522.
- [5] MASON W, WHEELER R V. The propagation of flame in mixtures of methane and air [J]. Journal of the Chemical Society, Transactions, 1920, 117: 36-47.
- [6] LEE J H, OPPENHEIM A K. Current views on gaseous detonation [C]//International Colloquium on Gasdynamics of Explosions. Brussels, BE, 1969.
- [7] BLANCHARD R, ARNDT D, GRÄTZ R, et al. Explosions in closed pipes containing baffles and 90 degree bends [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(2): 253-259.
- [8] THOMAS G, OAKLEY G, BAMBREY R. An experimental study of flame acceleration and deflagration to detonation transition in representative process piping [J]. Process Safety & Environmental Protection, 2010, 88(2): 75-90.
- [9] JIA J Z, WANG F X. Propagation of gas explosions in roadways with different cross-sectional shapes [J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2021, 43(4): 495-505.
- [10] 赵丹, 齐昊, 潘竞涛, 等. 不同类型管道内瓦斯爆炸冲击波传播试验研究 [J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(3): 79-83.
- ZHAO D, QI H, PAN J T, et al. Experimental study on gas explosion shock wave propagation in different types of pipelines [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(3): 79-83.
- [11] NIU Y H, SHI B M, JIANG B Y. Experimental study of overpressure evolution laws and flame propagation characteristics after methane explosion in transversal pipe networks [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 154: 18-23.
- [12] 杨前意, 石必明, 张雷林, 等. 拐弯角度对瓦斯爆炸诱导煤尘爆炸的影响研究 [J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(7): 58-63.
- YANG Q Y, SHI B M, ZHANG L L, et al. Study on influence of pipelines' bending angle on coal dust explosion induced by gas explosion [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(7): 58-63.
- [13] 黄强, 穆朝民, 王亚军, 等. 瓦斯体积分数对 90° 弯管泄爆特性的影响 [J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(11): 101-107.
- HUANG Q, MU C M, WANG Y J, et al. Effects of gas volume fraction on venting features of 90° elbows after explosion [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(11): 101-107.
- [14] 朱传杰, 林柏泉, 江丙友, 等. 瓦斯爆炸火焰和冲击波在并联巷网的传播特征 [J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(3): 385-389.
- ZHU C J, LIN B Q, JIANG B Y, et al. Characteristics of flame and blast-wave propagation during a gas explosion in parallel tunnels [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3): 385-389.
- [15] 解北京, 杜玉晶, 王亮. 分岔管道内瓦斯爆炸火焰传播规律实验及数值模拟 [J]. 重庆大学学报, 2019, 42(6): 69-77.
- XIE B J, DU Y J, WANG L. Experimental and numerical simulation of gas propagation law of gas explosion flame in bifurcation pipeline [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(6): 69-77.
- [16] 解北京, 王广宇, 董春阳, 等. T 型管道不同封闭状态瓦斯爆燃火焰传播特征 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(8): 19-25.
- XIE B J, WANG G Y, DONG C Y, et al. Propagation characteristics of gas deflagration flame in T-type pipe with different closed states [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(8): 19-25.
- [17] QIU J W, JIANG B Y, TANG M Y, et al. Effect of different bend pipes on the propagation characteristics of premixed methane-air explosion in confined spaces [J]. Geofluids, 2021: 6635156.
- [18] 高建良, 吴泽琳, 王文祺, 等. 瓦斯爆炸冲击波在角、并联巷道内传播规律对比研究 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2494-2499.
- GAO J L, WU Z L, WANG W Q, et al. Comparative study on the propagation law of gas explosion shock wave in the diagonal and parallel roadway [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(6): 2494-2499.
- [19] 景国勋, 贺祥, 郭绍帅, 等. 封闭材料对分岔管道中瓦斯爆炸特性的影响 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(11): 64-70.
- JING G X, HE X, GUO S S, et al. Influence of sealing materials on gas explosion characteristics in bifurcated pipes [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(11): 64-70.
- [20] 马恒, 陈晓军, 荆德吉. H 型通风巷道瓦斯爆炸及泄爆过程模拟研究 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 45-51.
- MA H, CHEN X J, JING D J. Simulation study on gas explosion and discharge process in H-type ventilation roadway [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(1): 45-51.
- [21] 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.
- LIU Y J, GAO K, JIA J Z. Numerical simulation of gas explosion in enclosed interconnected vessel based on HLLC algorithm [J]. China Safety Science Journal,

- 2018, 28(12): 65-70.
- [22] 孟亦飞, 董铭鑫, 赵东风, 等. 大尺寸通风管网中障碍物对瓦斯爆炸冲击波传播特性影响的数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(2): 99-104.
- MENG Y F, DONG M X, ZHAO D F, et al. Numerical simulation on influence of obstacle on propagation characteristics of shock wave caused by gas explosion in large size ventilation pipe network [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(2): 99-104.
- [23] 董铭鑫, 赵东风, 尹法波, 等. 通风管网中瓦斯爆炸火焰波传播特性三维数值模拟[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊1): 291-299.
- DONG M X, ZHAO D F, YIN F B, et al. Flame propagation characteristics of gas explosion in 3D ventilation pipe network by numerical simulation [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Suppl.1): 291-299.
- [24] LIN B Q, GUO C, SUN Y M, et al. Effect of bifurcation on premixed methane-air explosion overpressure in pipes[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 43: 464-470.
- [25] ZHU C J, GAO Z S, LU X M, et al. Experimental study on the effect of bifurcations on the flame speed of premixed methane/air explosions in ducts [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 545-550.
- [26] 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: 199-216.
- [27] 景国勋, 贾智伟, 程磊, 等. 复杂条件下瓦斯爆炸传播规律及伤害模型[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 126-137.
- [28] ASTM International. Standard test method for minimum explosible concentration of combustible dusts: ASTM E1515-14 [S]. ASTM International, 2014.
- [29] TURNS S R. 燃烧学导论: 概念与应用[M]. 姚强, 李水清, 王宇, 译. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- TURNS S R. An introduction to combustion: concepts and applications [M]. YAO Q, LI S Q, WANG Y, translated. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [30] 丁海平, 陈姚杰, 于彦彦, 等. 复杂地形对平面波散射问题频域解的数值求解方法[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 20-27.
- DING H P, CHEN Y J, YU Y Y, et al. Numerical solution in frequency domain for scattering of plane wave by complex topography [J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(3): 20-27.
- [31] WANG K, HAO H Q, JIANG S G, et al. Experimental study on the characteristics of overpressure wave to ventilation facilities during gas explosion and automatic shock relief devices [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 2361-2384.
- [32] GAO K, LI S N, LIU Y J, et al. Effect of flexible obstacles on gas explosion characteristic in underground coal mine [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 149: 362-369.

(上接第 23 页)

- LÜ K Z, HAN C, GAO T B, et al. Influence of temperature on internal quality of pressed RDX-based PBX [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(1): 48-52.
- [10] 周忠彬. 高聚物粘结炸药宏/细观力学行为及变形破坏研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2012.
- ZHOU Z B. Study on macro and micro mechanical behavior and deformation failure of polymer bonded explosive [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2012.
- [11] 陈鹏万, 黄风雷, 张瑜, 等. 用巴西实验评价炸药的力学性能[J]. 兵工学报, 2001, 22(4): 533-537.
- CHEN P W, HUANG F L, ZHANG Y, et al. Brazilian test and its application in the study of the mechanical properties of explosives [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4): 533-537.
- [12] ZHOU Z B, CHEN P W, DUAN Z P, et al. Comparative study of the fracture toughness determination of a polymer-bonded explosive simulant [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(17): 2991-2997.