DOI: 10.11858/gywlxb.20230760

H 型巷道内采用不同布置方式的双爆源瓦斯爆炸传播特性

叶 青[1], 王维建[1,2], 贾真真[1], 刘佳林[1]

（1. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411100;
2. 兴义民族师范学院物理与工程技术学院, 贵州 兴义 562400）

摘要: 为探究复杂巷道内多爆源瓦斯爆炸传播特性及热冲击动力学机制, 运用计算流体力学软件 Fluent, 以 H 型巷道为模型, 在巷道内设置同侧、相对、对角 3 种双爆源布置方式。研究发现: 巷道内的 2 处爆源同时起爆后, 前驱冲击波沿巷道未燃区传播, 当两股冲击波相遇时, 压力叠加, 冲量抵消, 在压力叠加区火焰传播受阻, 导致火焰传播速度放缓甚至反向; 相较于单爆源爆炸, 双爆源工况中导致巷道内特定区域如联络巷、岔口中心及其边壁的压力更高; 同侧和对角布置工况下的压力极值区出现在巷道封闭端, 相对布置工况下的压力极值区出现在分岔口中心处。

关键词: 瓦斯爆炸; H 型巷道; 布置方式; 冲击波; 传播特性

中图分类号: O382.1; X936 **文献标志码:** A

针对瓦斯爆炸问题, 学者们开展了大量研究。到目前为止, 对结构较简单的巷道内的瓦斯爆炸研究较多, 而对复杂巷道内的瓦斯爆炸研究较少[1−3], 对单一爆源的瓦斯爆炸研究较多, 而对多处爆源的瓦斯爆炸研究较少。然而, 这些情况在实际生产中是值得考量的。因此, 有必要针对复杂巷道与多处爆源的耦合问题开展深入研究。不少学者对此开展了研究, 取得了很多有价值的成果。例如: 林柏泉等[4−8]对管道分岔和拐弯区域的瓦斯爆炸火焰传播规律及其加速机理进行了深入研究; Bartknecht[9] 研究了空间几何形状和尺寸对气体爆炸的影响; Savinko[10] 通过实验得出了空气冲击波经过巷道分岔和转弯时的衰减系数; 罗振敏等[11] 采用高速摄录分析系统, 对不同浓度瓦斯爆炸初期火焰的传播特性进行了实验研究, 得到了实验管道中瓦斯的传播时间; 徐景德等[12] 在方形断面巷道中进行了瓦斯爆炸实验研究, 得出了瓦斯爆炸火焰区长度与瓦斯积聚区长度的比例关系; 贾智伟等[13] 通过数值实验得出了一般空气区瓦斯爆炸冲击波在管道拐弯情况下的超压变化规律; 江丙友等[14] 运用 AutoReaGas 软件模拟研究了瓦斯爆炸冲击波在并联巷道中的传播特性, 结果表明, 最高温度沿巷道的变化与超压峰值的变化基本相同, 相向传播的冲击波会产生叠加效应; 朱传杰等[15] 通过数值模拟方法得到了封闭型管道内瓦斯爆炸的传播特征, 结果表明, 闭口型系统内的瓦斯爆炸呈明显的振荡特征; 解北京等[16] 分别通过实验室实验与数值模拟实验开展了分岔管道瓦斯爆炸火焰传播研究, 证实了瓦斯爆炸后管道分岔处会产生漩涡、火焰湍流化、火焰冲击反射等现象; 耿进军等[17] 对非燃烧区瓦斯爆炸冲击波在分岔管道内的传播规律进行了实验研究, 发现在瓦斯燃烧区内冲击波与火焰相互耦合, 当瓦斯燃烧完毕后, 非瓦斯燃烧区的冲击波失去能量支持, 最终恢复至正常大气参数; 许胜铭[18] 通过实验和数值模拟对复杂管道内瓦斯

* **收稿日期:** 2023-10-17; **修回日期:** 2023-12-10

基金项目: 国家自然科学基金（52174177, 52174178）

作者简介: 叶 青（1976—）, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事煤矿瓦斯灾害防治、工业爆炸与防治、安全评价与管理研究. E-mail: cumtyeqing@126.com

通信作者: 王维建（1983—）, 男, 博士, 讲师, 主要从事煤矿瓦斯灾害防治与工业安全评价研究. E-mail: 46774591@qq.com

爆炸冲击波和火焰传播规律进行研究，得到了火焰传播速度与压力的关系；高建良等[19]采用数值模拟方法对在角和并联巷道内的瓦斯爆炸冲击波传播规律进行了对比研究，得出分支后巷道内的冲击波衰减幅度大于并联网络中的对应点。罗振敏等[20]对密闭空间瓦斯爆炸进行了数值模拟研究，发现压力波的反射作用导致瓦斯爆炸压力曲线波动，从而出现多个压力峰值；田诗雅等[21]对密闭管道中的瓦斯爆炸进行了实验研究，得出了体积分数为 9.5% 的瓦斯爆炸冲击波冲量及压力上升速率最大。探讨复杂巷道与多处爆源的耦合问题不仅可以弥补此类研究的不足，提高矿山、隧道等复杂环境下的安全问题认识，更好地掌握此类事故的发生规律，为制定和实施有效的防范措施提供理论支持和指导，而且可以提升此类事故的应急处置能力，缩短应急响应时间，减少人员伤亡和财产损失，为安全生产提供更加科学、先进的技术支持。综上所述，对复杂巷道与多爆源的耦合问题开展深入研究具有重要的现实意义。为此，本研究采用 Fluent 模拟软件，对 H 型巷道内不同布置方式的双爆源瓦斯爆炸进行数值模拟，根据爆炸后流场、压力、温度等参数的分布和耦合情况，分析多爆源工况下巷道内热冲击动力机制及引爆后危险区域的动态分布，以期为实际生产中有针对性地采取预防措施、减少此类事故发生提供理论支持，也为后续复杂巷道内多爆源理论研究奠定基础。

1　数学模型

1.1　基本方程

本研究模型涉及密闭空间内可燃气体爆炸，满足质量、能量、动量、化学组分守恒[22]

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{\mathrm{e}}\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\left(\rho k+\mu_{\mathrm{e}}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\delta_{ij}\right] \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j h-\frac{\mu_{\mathrm{e}}}{\sigma_k}\frac{\partial h}{\partial x_j}\right)=\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}+S_{\mathrm{h}} \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho Y_{\mathrm{fu}})}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j Y_{\mathrm{fu}}-\frac{\mu_{\mathrm{e}}}{\sigma_{\mathrm{fu}}}\frac{\partial Y_{\mathrm{fu}}}{\partial x_j}\right)=R_{\mathrm{fu}} \tag{4}$$

$$\mu_{\mathrm{e}}=\mu+\mu_{\mathrm{t}} \tag{5}$$

式中：x 为空间坐标，t 为时间，ρ为密度，p 为压力，h为总焓，u 为速度，k 为湍流动能，δ_{ij} 为 δ 函数，σ_k为湍流脉动动能扩散有效普朗特数，S_{h} 为能量源项，Y_{fu} 为燃料的质量分数，σ_{fu} 为燃料的普朗特数，R_{fu} 为化学反应速率，μ为层流黏性系数，μ_{t}为湍流黏性系数，μ_{e}为有效黏性系数。

1.2　湍流模型

巷道内瓦斯爆燃会出现湍流燃烧现象，采用标准 k-ε 模型描述燃烧过程中湍流流场特性。湍流动能方程和耗散率输运方程的具体形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j k-\frac{\mu_{\mathrm{e}}}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)=G-\rho\varepsilon \tag{6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j \varepsilon-\frac{\mu_{\mathrm{e}}}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)=C_1 G\frac{\varepsilon}{k}-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{7}$$

$$G=\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left[\mu_{\mathrm{e}}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\delta_{ij}\left(\rho k+\mu_{\mathrm{e}}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right] \tag{8}$$

$$\mu_{\mathrm{t}}=\frac{C_\mu\rho k^2}{\varepsilon} \tag{9}$$

式中：ε为湍流耗散率，C_μ、C_1、C_2、σ_ε为模型常数。

2　数值模型

2.1　物理模型

参照典型的 H 型通风巷道建立三维物理模型，其中：水平巷道长 100 m，高 2 m，宽 2 m（4 个支巷 T1、T2、T3、T4）；联络巷 T5 长 10 m，宽 2 m，高 2 m，见图 1。瓦斯聚积区分布在平行巷道 4 端封口处，瓦斯聚积长度为 20 m，点火位置为聚积区中心。模型网格划分如图 2 所示。

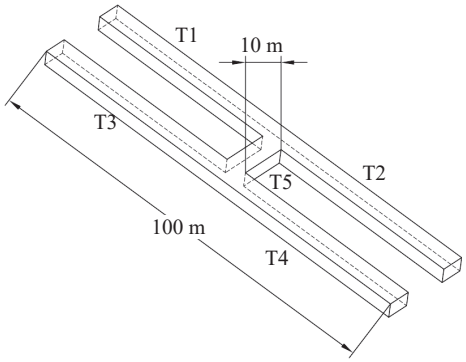


图 1　巷道模型及尺寸

Fig. 1　Tunnel model and dimensions

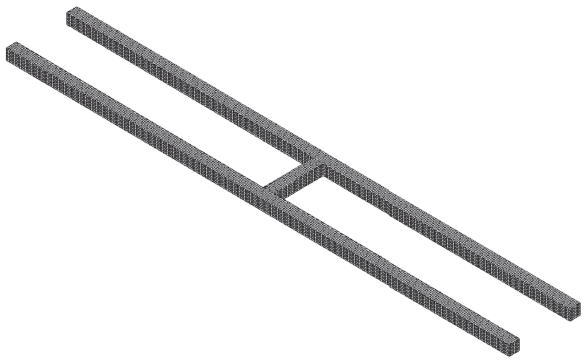
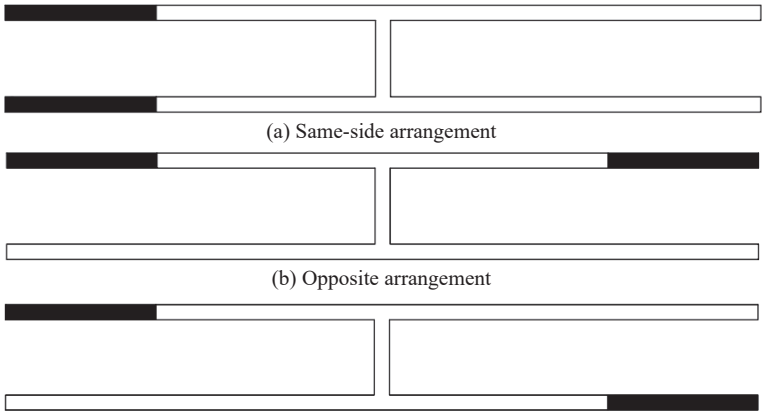


图 2　网格划分

Fig. 2　Grid division

在巷道中采用不同方式布置 2 个同等能量的爆源，研究双爆源同时起爆后巷道中的流场、压力、温度等参数的变化规律。如图 3 所示，双爆源布置方式有 3 种：同侧布置、相对布置、对角布置。



(a) Same-side arrangement

(b) Opposite arrangement

(c) Diagonal arrangement

图 3　巷道内双爆源的布置方式

Fig. 3　Different arrangements of double explosive sources in the tunnel

2.2　模拟假设及边界条件设置

假设爆炸过程快速且不可逆，所有气体均为可压缩气体，不考虑重力的影响，所有壁面为刚性壁面且绝热，爆炸过程中壁面不发生相对位移，爆炸过程为单步反应[3]。边界参数设置见表 1，其中：p_0 为出口压力，T_0 为初始温度，φ_{CH_4} 和 φ_{O_2} 分别为 CH_4 和 O_2 的体积分数，R_z 为内壁表面粗糙度，E_I 为点火能量，t_I 为点火时间，t_{tot} 为总持续时间。

表 1　边界条件设置

Table 1　Boundary condition setting

p_0/kPa	R_z/m	T_0/K	φ_{CH_4}/%	φ_{O_2}/%	E_I/J	t_I/ms	t_{tot}/ms
101.325	0	298	9.5	21.0	0.1	1	400

2.3　数值模拟合理性验证

多爆源瓦斯爆炸时，爆源间的冲击波、压力、湍流等相互耦合，传播过程复杂，开展实验较为困难，为此，通过对比单爆源瓦斯聚积模拟（模拟参数与双爆源设置相同，监测点设置见图 4）与实验数据[23]验证数值模型，结果如图 5 所示。

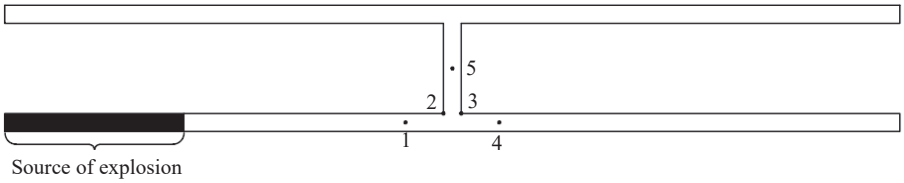


图 4　压力峰值数据采集点

Fig. 4　Pressure peak collection points

从图 5 可以看出：分岔口侧壁监测点 2（近爆源侧）因处于冲击波绕射形成的低压区，其压力峰值小于侧壁监测点 3，而位于联络巷内的监测点 4（处于主干巷道），其压力峰值大于位于支巷道的监测点 5。考虑到数值模拟和实验中巷道尺寸和断面存在差异，虽然模拟结果与实验数据有所不同，但是总体变化规律较为一致，说明数值模型具有一定的合理性。

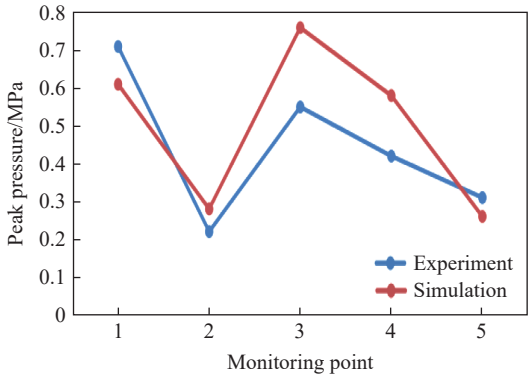


图 5　模拟与实验得到的监测点压力峰值曲线对比

Fig. 5　Comparison of peak pressure curves of monitoring points between simulation and experiments

3　模拟结果与讨论

3.1　同侧布置数值模拟结果与分析

3.1.1　同侧布置工况下冲击波的传播过程

从图 6 可以看出：爆源引爆后产生的冲击波以平面冲击波的形式分别从巷道左部 T1、T3 向右传播（10～100 ms）；到达分岔口时，由于边壁突然开放，巷道截面变大，产生了膨胀扰动，此时（100～150 ms）冲击波由强变弱，波阵面由平面变为曲面，且由于膨胀扰动的扩展，波后气流绕拐角运动形成涡团，一部分冲击波进入联络巷 T5 内，另一部分沿支巷道 T2 继续传播；进入联络巷内的两股冲击波由于方向相反，大小一致，其平行于联络巷的分动量相互抵消，此时（150 ms）在联络巷中心处冲击波速度最低；沿支巷道 T2 传播的冲击波（150～300 ms）到达端口时反射，与入射波相遇耦合，部分动量再次抵消，巷道 T2 和 T4 中段出现速度低值间断点（300 ms）；300～450 ms 时，与之前的情况相似，两侧反射冲击波在联络巷 T5 再次相遇，出现速度低值分布区域。

3.1.2　同侧布置工况下监测点的布置

在同侧布置工况中，监测点的设置如图 7 所示。考虑到巷道为对称模型，因此，只在巷道一侧设置监测点。

3.1.3　同侧布置工况下压力传播规律分析

图 8 显示，起爆后，爆源支巷道内各监测点的超压迅速增大，出现两处波峰，这是爆炸起始冲击波及端口反射波传播所致，随着传播距离的增加，能量减小，压力降低。当冲击波传播至右端端口时，气体压缩，受反射冲击波作用形成驱动爆轰，且由于端口封闭，导致无法像直管那样传播，压力瞬间增大，此处的压力上升速率在所有监测点中最大。联络巷中心出现次高压，这是支巷道 T1 与 T3 两股冲击波在联络巷相遇进而使压力叠加所致。

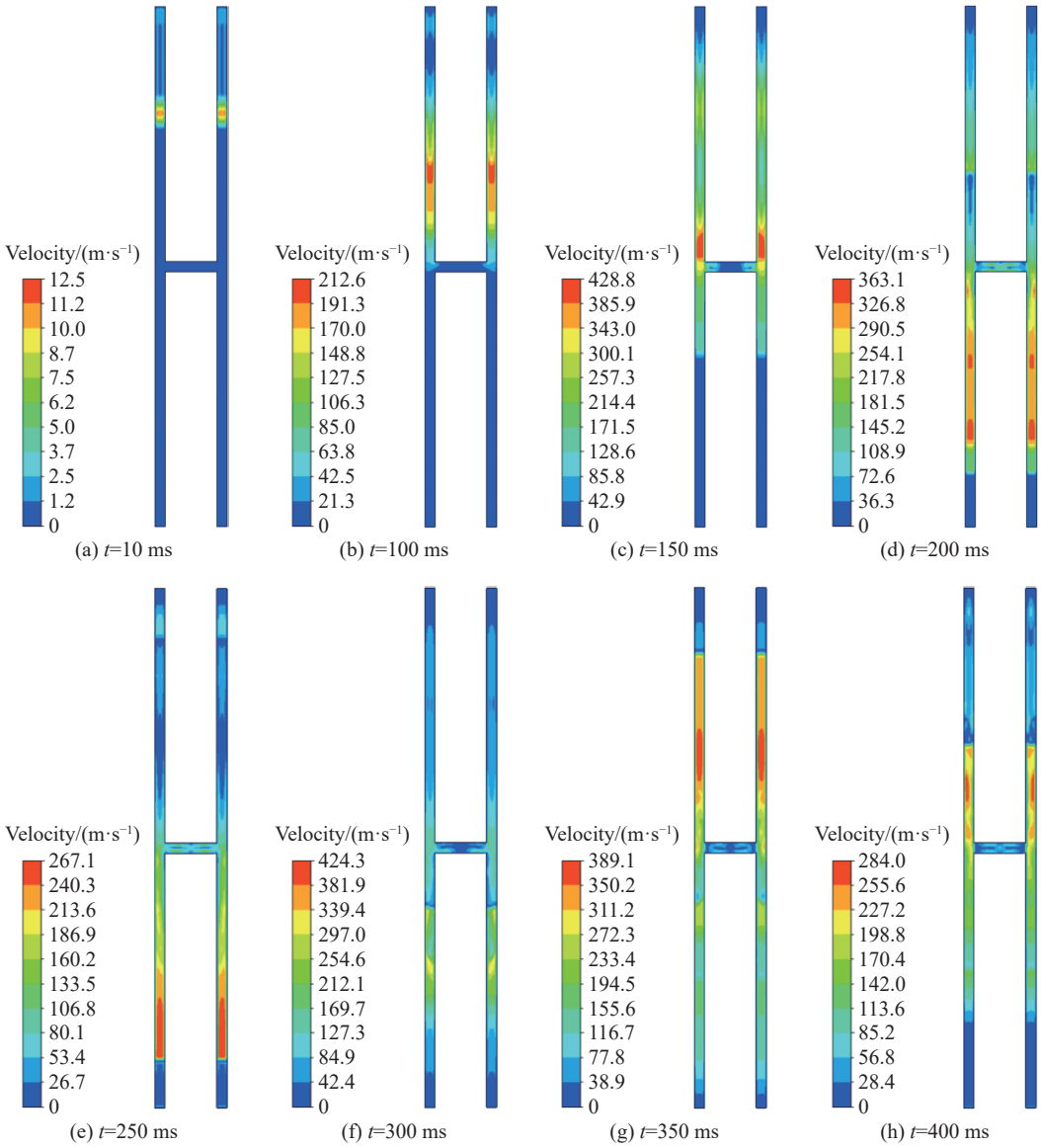


图 6　双爆源同侧布置工况下冲击波传播速度云图

Fig. 6　Shock wave propagation velocity nephogram for dual explosion sources with the same-side arrangement

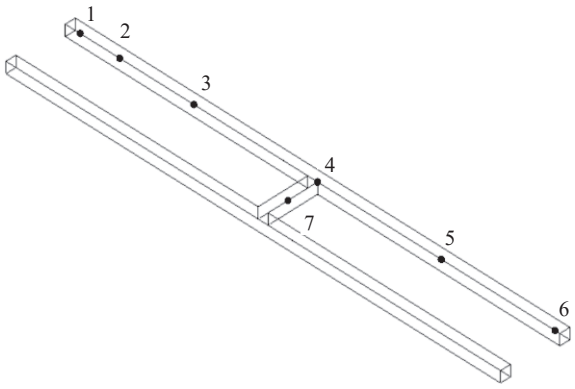


图 7　同侧布置工况下监测点的设置

Fig. 7　Setting of monitoring points under the same-side arrangement

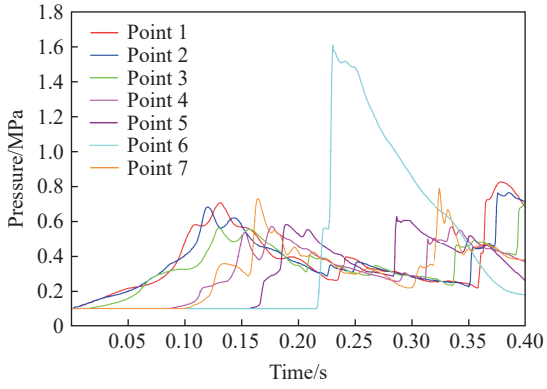


图 8　同侧布置工况下监测点的压力-时间曲线

Fig. 8　Pressure-time curves of monitoring points under the same-side arrangement

3.2　相对布置数值模拟结果与分析

3.2.1　相对布置工况下冲击波的传播过程

从图 9 可以看出，冲击波从瓦斯聚积端口相向传播（0～100 ms），至岔口相遇（100 ms），水平部分动量相互抵消（此时联络巷岔口处速度最小），而通过绕流进入联络巷内的冲击波动量得到叠加而有所增大（150～200 ms），继续向前传播至另一岔口处再次分流，向两端口传播，至封闭端处反射（200～250 ms）。期间，封闭端反射波与入射波在平行巷道内相遇（250～400 ms），在速度云图中出现间断点，即在连续分布中出现极小值。

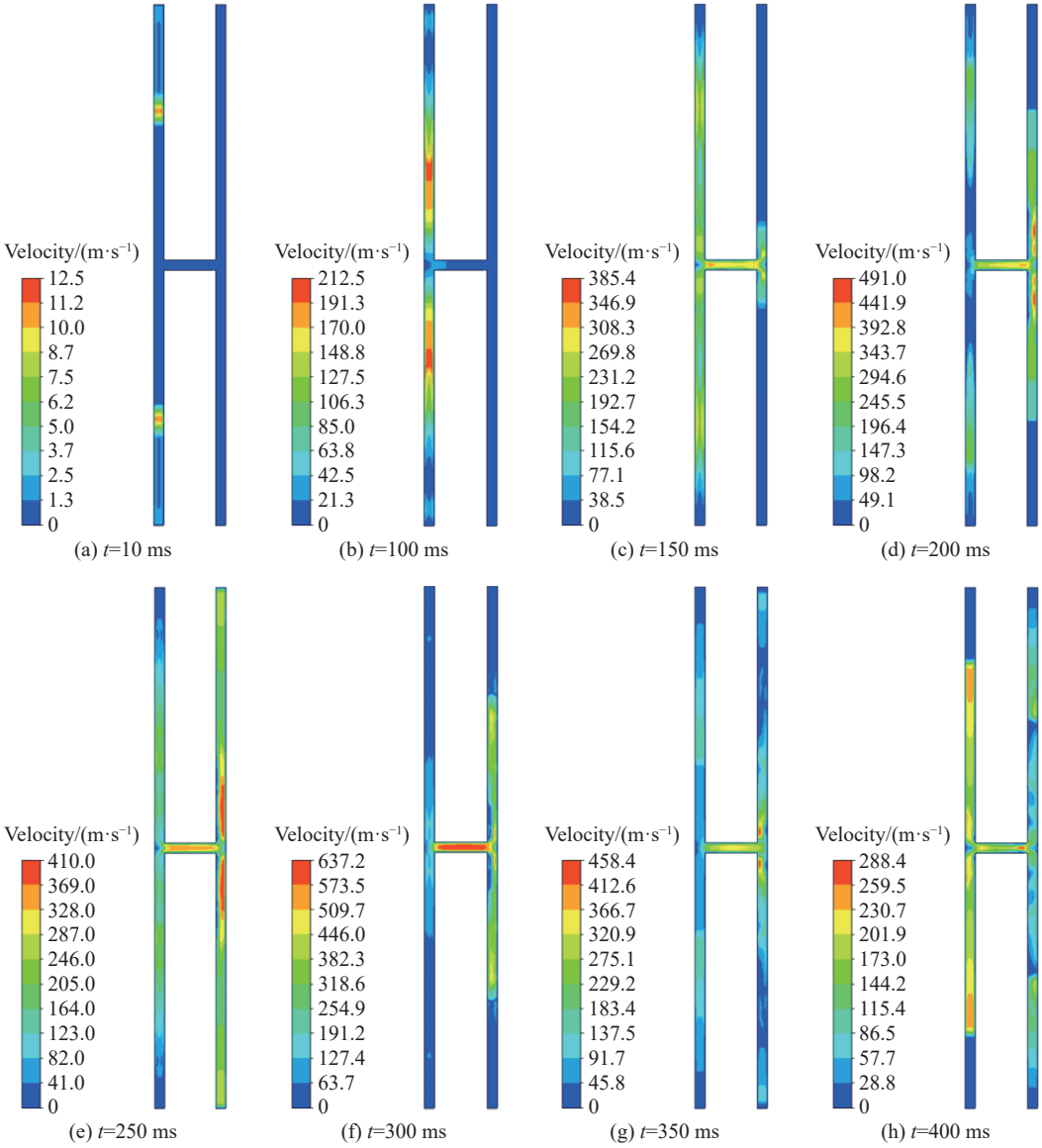


图 9　双爆源相对布置工况下冲击波传播速度云图

Fig. 9　Shock wave propagation velocity nephogram for dual explosion sources with the opposite arrangement

3.2.2　相对布置工况下监测点的设置

在相对布置工况中，监测点的设置如图 10 所示。

3.2.3　相对布置工况下压力传播规律分析

相对布置工况下监测点的压力-时间曲线如图 11 所示。可以看出，爆炸后，聚积端巷道内的压力

迅速增大，期间出现 2 次波峰，直巷道内监测点距各自端口越远，压力越低。当两侧冲击波传播至岔口时，两侧冲击波同时对岔口中心波阵面空气压缩，导致此处压力急剧上升达到极值（此处峰压为巷道内最大峰压），随后迅速降低至支巷道内压力，此时在联络巷中心处亦出现压力峰值。接着，冲击波传播至下一个岔口，因惯性对岔口壁面产生冲击作用并反射，反射波与入射波相遇形成压力叠加，导致压力迅速增大。传向支巷道 T3 与 T4 的冲击波到达端口后发生反射，压力瞬间增大，其值仅次于冲击波岔口相遇处。

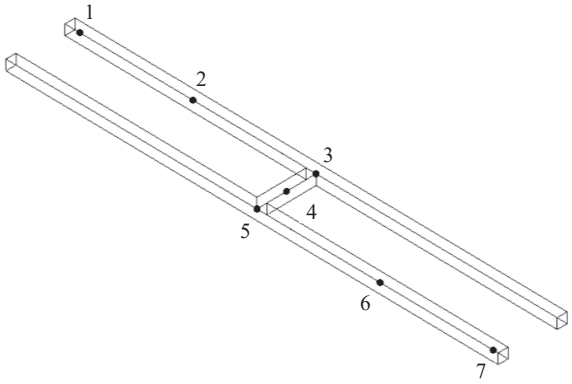


图 10　相对布置工况下监测点的设置

Fig. 10　Setting of monitoring points under the opposite arrangement

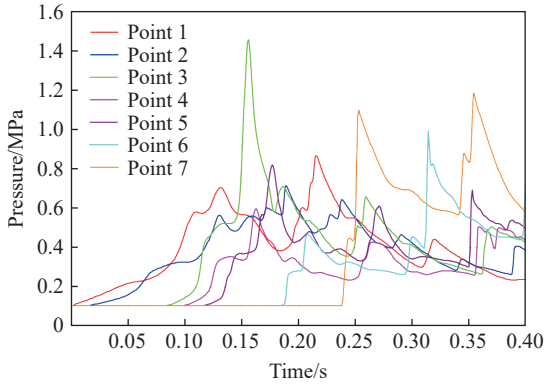


图 11　相对布置工况下监测点的压力-时间曲线

Fig. 11　Pressure-time curves of monitoring points under the opposite arrangement

3.3　对角布置数值模拟结果与分析

3.3.1　对角布置工况下冲击波的传播过程

图 12 为双爆源对角布置工况下冲击波传播速度云图。从图 12 可以看出：在对角布置工况下，两处爆源产生的冲击波分别从对角的两处平行巷道端口相向传播（0～100 ms）；至分岔口时，分别在各自岔口处分流（150～200 ms），进入联络巷内，两股冲击波在中心处相遇，部分冲量抵消，剩余动量继续向对侧传播，至岔口分流，其中分流部分动量与初始气流方向相反的一侧冲击波速度减弱，而与传播速度同向的一侧气流加强，速度提升（200 ms）；随后，到达 4 个端口的冲击波反射，并与入射波相遇，出现冲量抵消区域（250～300 ms）；至 350～400 ms 时段，在两处分岔口分别有从平行巷道两侧端口反射过来的冲击波进入联络巷，冲击波部分动量再次耦合、抵消；其后的变化规律与之前类似，冲击波在巷道内多次反射改变流场分布状态。

3.3.2　对角布置工况下监测点的设置

对角布置工况中监测点的设置如图 13 所示。

3.3.3　对角布置工况下压力的传播规律分析

对角布置工况下监测点的压力-时间曲线如图 14 所示。冲击波在支巷道 T1 或 T4 中传播，与同侧布置及相对布置时的传播规律相似，至岔口分流，分别向联络巷与支巷道后半段 T2 或 T3 传播，联络巷中心处出现除支巷道 T2 或 T3 端口处的压力最大值。过岔口后半段支巷道 T2 或 T3 时，压力随着冲击波传向端口而下降，至封闭端压力迅速升高并达到监测期内最大值。与之前工况相比，对角布置的特点体现在两处爆源产生的冲击波在 T1 和 T4 支巷道内传播时（尚未到达岔口处），其压力变化规律及原因与之前两种模型在支巷道内传播一致，岔口分流后压力变化规律与同侧布置工况相似，即联络巷中心处的压力达到仅次于端口处的次极值，而传播至另一段支巷道端口时的压力峰值达到监测期内最大值。

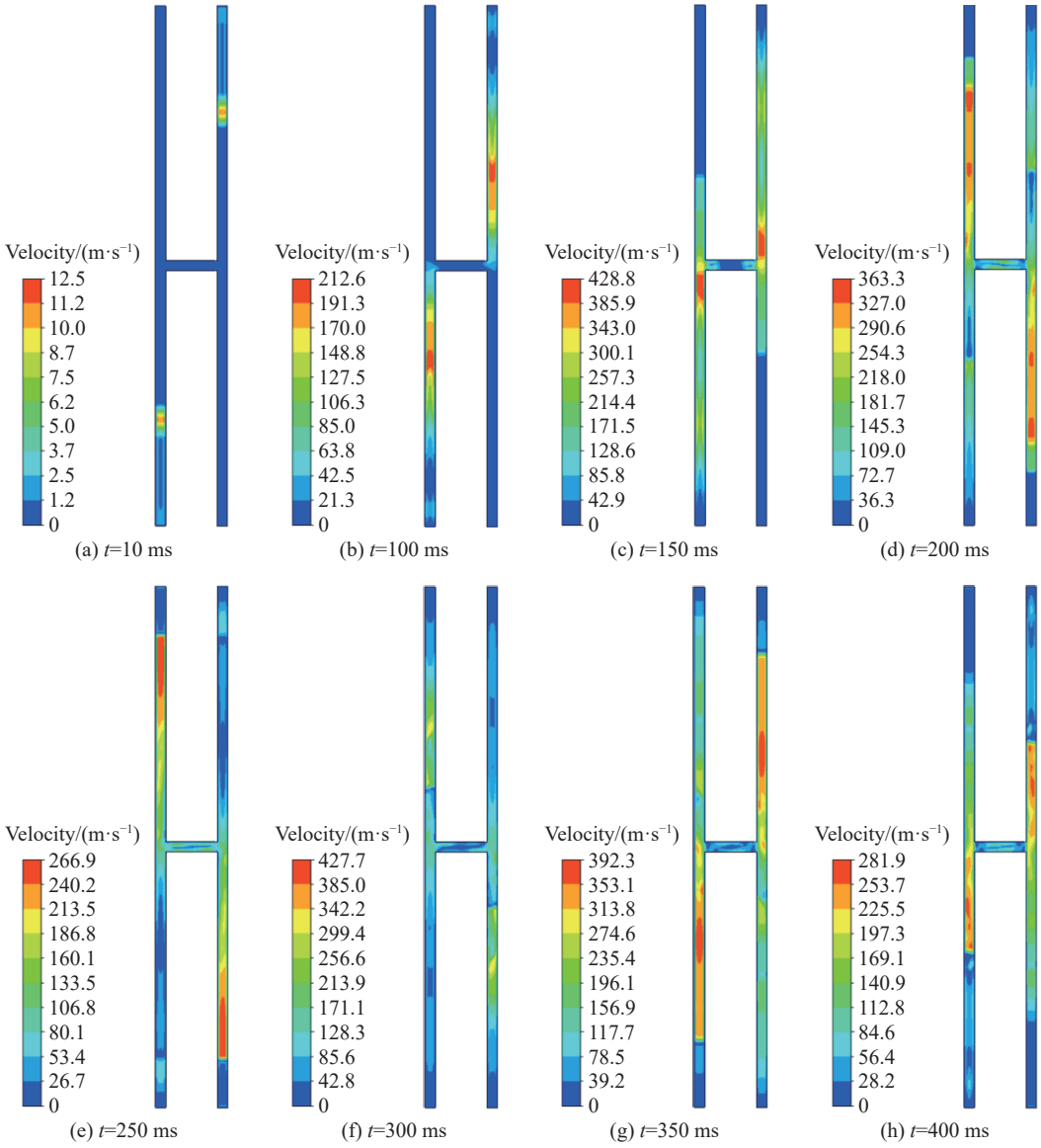


图 12　双爆源对角布置工况下冲击波传播速度云图

Fig. 12　Shock wave propagation velocity nephogram for dual explosion sources with the diagonal arrangement

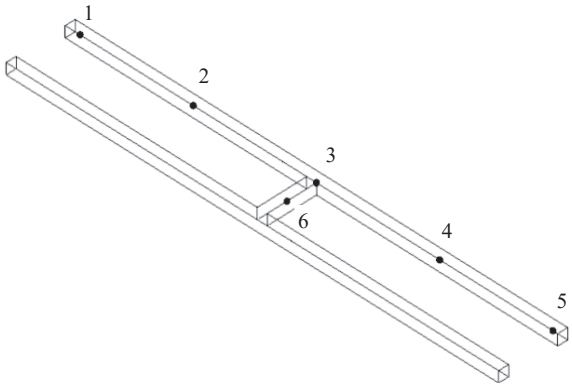


图 13　对角布置工况下监测点的设置

Fig. 13　Setting of monitoring points under the diagonal arrangement

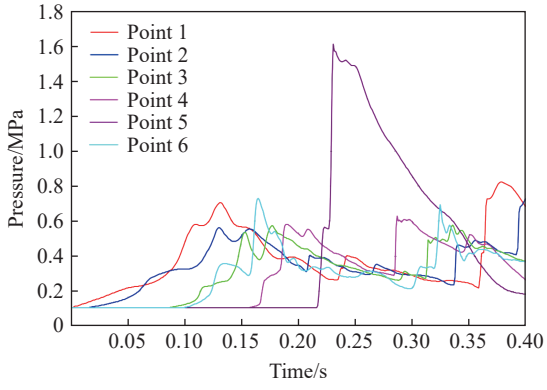


图 14　对角布置工况下监测点的压力-时间曲线

Fig. 14　Pressure-time curves of monitoring points under the diagonal arrangement

3.4　不同爆源布置方式下巷道内压力极值承受区域

相对于单爆源，双爆源同时起爆产生的压力更大，对巷道的破坏更严重，特别是冲击波相遇点、压力叠加区等，因此，有必要厘清巷道内的重点防范区域，即压力较大区域。图 15 为 3 种不同工况下巷道内承压较大区域的模拟云图。

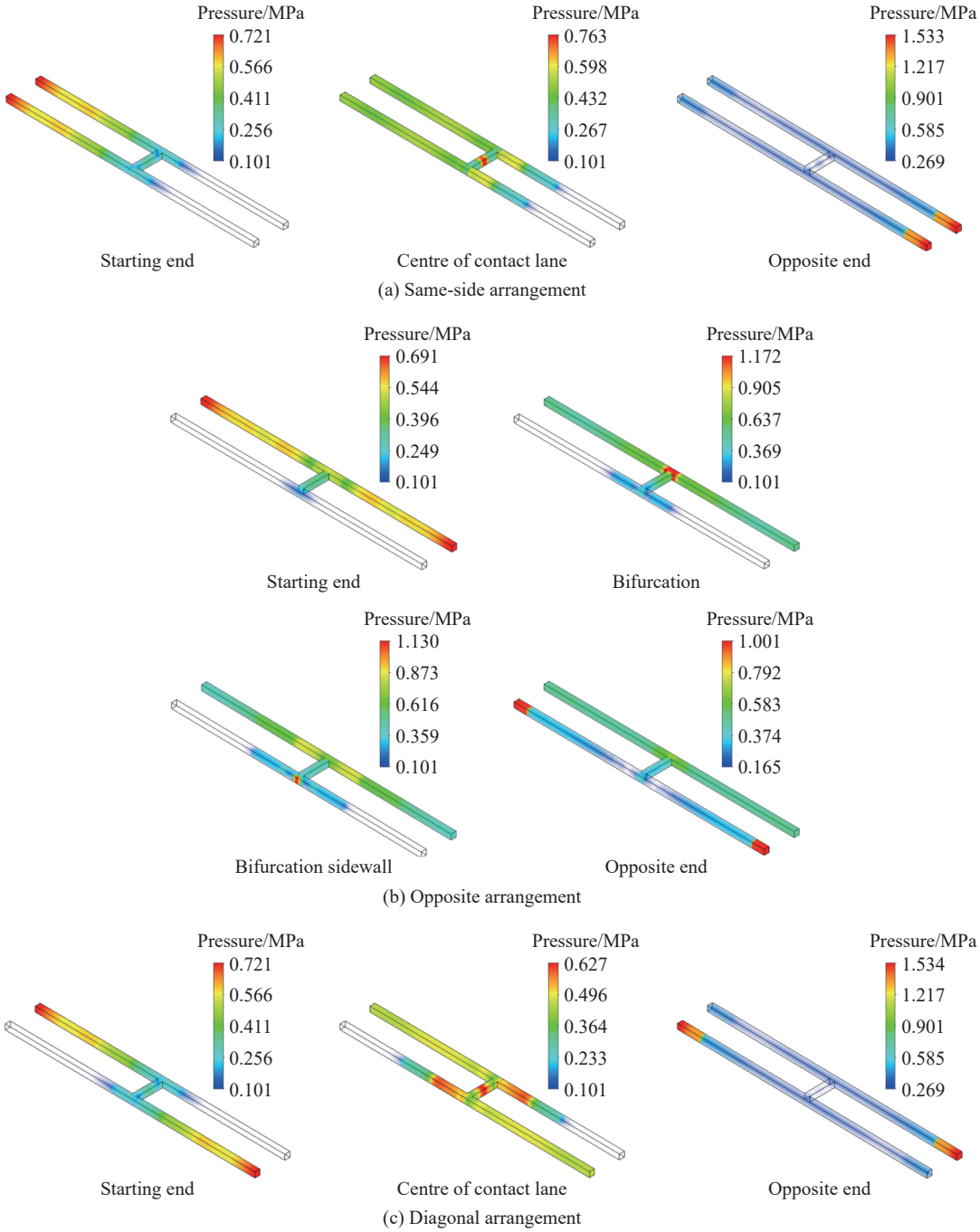


图 15　双爆源不同布置工况下压力极值分布区域云图

Fig. 15　Peak pressure cloud diagram for dual explosion sources with different arrangements

从图 15 可以看出，双爆源模型的压力极值主要分布在封闭端、联络巷中心、岔口气流汇集处、岔口边壁。其中：封闭端高压为冲击波传播受阻、反射波与入射波相遇引起的压力叠加所致，与爆源布置无关；联络巷和岔口中心处出现高压是双爆源冲击波相遇、压力叠加所致，如双爆源同侧布置和对角布

置工况下双爆源冲击波在联络巷内相遇，相向布置时双爆源冲击波在岔口中心相遇；岔口边壁的压力极值是冲击波在联络巷内向前传播时由于惯性作用对边壁的冲击所致，该现象在爆源相向布置工况下尤为明显。

表 2 列出了不同爆源布置工况下各区域出现的压力极大值（前 3 位）。可见，爆源位置对压力分布区域的影响显著，如相对布置工况下岔口和边壁的冲击压力大于同侧和对角布置工况，而同侧和对角布置工况下冲击波对巷道封闭端的冲击压力更大。为了便于对比，单爆源模型对照组（聚积长度与双爆源相同）的压力峰值也列于表 2。可以看出，双爆源与单爆源工况下，端口处的压力峰值差别不大，而在双爆源压力汇集区，两者区别很大，如同侧和对角布置工况下，联络巷中心处的压力峰值约为单爆源工况下的 2.8～3.1 倍，而相对布置工况下，岔口中心处的压力峰值约为单爆源工况下的 2.4 倍。

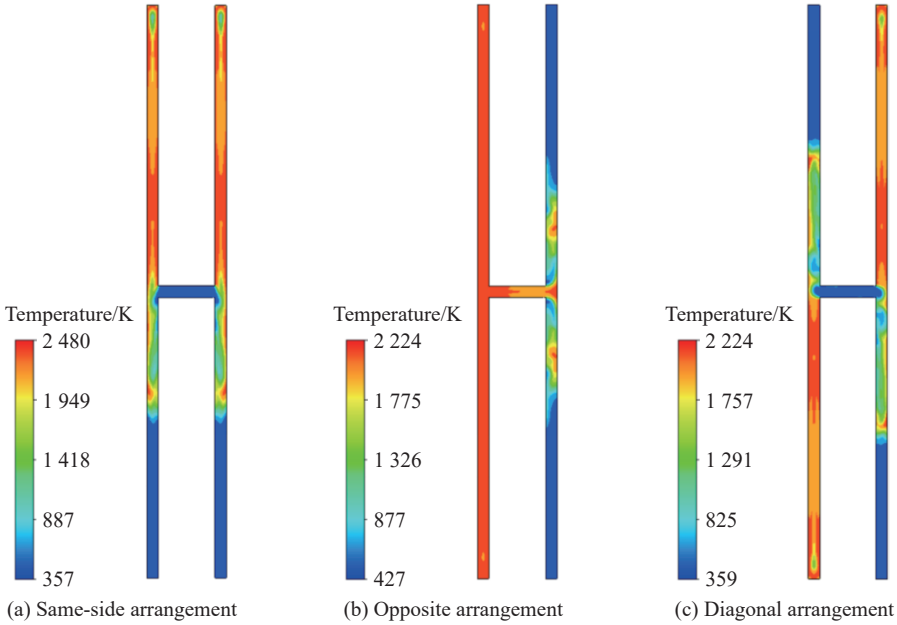
表 2　不同工况下巷道区域的峰值压力

Table 2　Peak pressure of tunnel under different cases

Position	Peak pressure for dual explosion sources/MPa			Peak pressure for single explosive source/MPa
	Same-side	Opposite	Diagonal	
Starting end	0.82		0.82	0.82
Centre of contact lane	0.80		0.72	0.25
Opposite end	1.66	1.27	1.66	1.54
Bifurcation		1.45		0.42
Bifurcation sidewall		1.31		0.77

3.5　不同工况下火焰覆盖最大区域

瓦斯爆炸后产生的巨大火球对生产中的人和物造成严重损害，因此，有必要考虑爆炸后火焰区覆盖范围。不同工况下爆炸火焰在巷道内的最大覆盖区域如图 16 所示。



(a) Same-side arrangement　(b) Opposite arrangement　(c) Diagonal arrangement

图 16　不同双爆源布置工况下的火焰云图

Fig. 16　Flame nephogram for dual explosion sources with different arrangements

从图 16 可以看出，3 种工况下火焰都未能传播到整个巷道。区别在于，在同侧和对角布置工况下火焰向联络巷传播，受巷道中心高压汇集区影响，火焰速度放缓甚至反向，而相对布置工况下火焰能顺利在联络巷内传播。相同之处在于，3 种工况下，火焰传向巷道另一端时，火焰传播速度逐渐放缓甚至

反向，原因在于火焰传播相对于前驱冲击波而言有所滞后，前驱冲击波传播至巷道端口时反射，反射波抑制了火焰波继续向前传播，甚至回传。值得注意的是，相对于单爆源火焰传播，双爆源火焰传播受压力汇集点（冲击波相遇时）的影响明显。

4 结　论

(1) 巷道内的压力极值主要分布在端口、岔口中心及边壁、联络巷内：在双爆源同侧布置工况下，压力极值出现在爆源对面支巷道端口处与联络巷中心处；在双爆源相对布置工况下，压力极值出现在冲击波首次相遇岔口中心及联络巷岔口边壁；在双爆源对角布置工况下，压力极值出现在端口处与联络巷中心处。

(2) 在同侧布置工况下，爆源支巷道内火焰受端口反射波的影响，速度增大，而在联络巷中心处受聚积压力波的影响，速度减小甚至反向；在相对布置工况下，火焰波在岔口首次相遇时，受岔口中心压力影响，火焰传播受到抑制，而在联络巷内，因两处冲击波的传播方向与火焰一致，火焰传播速度得到激励而增大；同样，在对角布置工况下，火焰在联络巷中心处的传播受到抑制。

(3) 对比单爆源工况与双爆源的 3 种工况，结果显示，端口处的压力差别较小，而在双爆源汇集区压力差别较大，如同侧和对角布置工况下的联络巷中心、相向布置工况下的岔口中心。

参考文献：

[1] 王鹏军, 李晋生, 马晋民. 网格型和“H”型通风系统在高瓦斯矿井中的应用 [J]. 山西煤炭, 2009, 29(4): 45–47.
WANG P J, LI J S, MA J M. The application of grid and H shape ventilation systems in gasy mines [J]. Shanxi Coal, 2009, 29(4): 45–47.

[2] 肖培华, 刘畅峰. H. Y 型通风系统在城山煤矿的应用 [J]. 江西煤炭科技, 2009(4): 31, 64.
XIAO P H, LIU C F. Application of H. Y-type ventilation system in Chengshan colliery [J]. Jiangxi Coal Science and Technology, 2009(4): 31, 64.

[3] 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.

[4] 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.
LIN B Q, YE Q, ZHAI C, et al. Propagation law and analysis of gas explosion in bifurcated pipeline [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(2): 136–139.

[5] 林柏泉, 张仁贵, 吕恒宏. 瓦斯爆炸过程中火焰传播规律及其加速机理的研究 [J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 56–59.
LIN B Q, ZHANG R G, LYU H H. Research on accelerating mechanism and flame transmission in gas explosion [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(1): 56–59.

[6] ZHAI C, LIN B Q, YE Q, et al. Influence of geometry shape on gas explosion propagation laws in bend roadways [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 193–198.

[7] YE Q, LIN B Q, JIA Z Z, et al. Propagation law and analysis of gas explosion in bend duct [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 316–321.

[8] ZHU C J, LIN B Q, LU Z G, et al. Experiments on flame and shock wave propagation in a parallel tunnel in underground coal mines [C]//Progress in Safety Science and Technology. Beijing: Science Press, 2010: 1204–1208.

[9] BARTKNECHT W. 爆炸过程和防护措施 [M]. 何宏达, 译. 北京: 化学工业出版社, 1985.
BARTKNECHT W. Explosion process and the protective measures [M]. Translated by HE H D. Beijing: Chemical Industry Press, 1985.

[10] SAVINKO C K. 井下空气冲击波 [M]. 丁亚伦, 龙维祺, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1979.
SAVINKO C K. Ударные воздущные волны в подземных выработка [M]. Translated by DING Y L, LONG W Q. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1979.

[11] 罗振敏, 邓军, 文虎, 等. 小型管道中瓦斯爆炸火焰传播特性的实验研究 [J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(5): 106–109.
LUO Z M, DENG J, WEN H, et al. Experimental study on flame propagation characteristics of gas explosion in small-scale duct [J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(5): 106–109.

[12] 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, 32(7): 55–57.
XU J D, XU S L, YANG G Y. Experimental study on mine gas explosion diffusion [J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(7): 55–57.

[13] 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.
JIA Z W, LIU Y W, JING G X. Propagation characteristic about shock wave of gas explosion at laneway corner [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 97–100.

[14] 江丙友, 林柏泉, 朱传杰, 等. 瓦斯爆炸冲击波在并联巷道中传播特性的数值模拟 [J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(3): 250–254.
JIANG B Y, LIN B Q, ZHU C J, et al. Numerical simulation on shock wave propagation characteristics of gas explosion in parallel roadway [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2011, 17(3): 250–254.

[15] 朱传杰, 林柏泉, 江丙友, 等. 瓦斯爆炸在封闭管道内冲击振荡特征的数值模拟 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(16): 8–12, 17.
ZHU C J, LIN B Q, JIANG B Y, et al. Numerical simulation on oscillation and shock of gas explosion in a closed end pipe [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(16): 8–12, 17.

[16] 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.

[17] 耿进军, 许胜铭, 景国勋, 等. 非燃烧区瓦斯爆炸冲击波在单向分岔管道内传播规律的试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2015, 15(5): 108–111.
GENG J J, XU S M, JING G X, et al. Propagating regularity of the gas explosion shock waves at unidirectional bifurcation of pipeline in the non-combustion zone [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(5): 108–111.

[18] 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]. 焦作: 河南理工大学, 2015.
XU S M. Study on propagation law of gas explosion shock wave, flame and poisonous gas in complex pipeline [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2015.

[19] 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.

[20] 罗振敏, 吴刚. 密闭空间瓦斯爆炸数值模拟研究 [J]. 煤矿安全, 2020, 51(2): 1–4.
LUO Z M, WU G. Numerical simulation of gas explosion in confined space [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(2): 1–4.

[21] 田诗雅, 刘剑, 高科. 密闭管道瓦斯爆炸冲击波冲量及压力上升速率的实验研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(8): 16–21.
TIAN S Y, LIU J, GAO K. Experimental study on shock wave impulse and pressure rise rate of gas explosion in airtight pipeline [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(8): 16–21.

[22] 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.
YE Q, LIN B Q. Propagation characteristics of gas explosions in confined spaces [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2012.

[23] 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]. Chinese Safety Science Journal, 2018, 28(3): 79–83.

Propagation Characteristics of Dual Explosive Sources Gas Explosion in Different Arrangements in H-Type Tunnel

YE Qing[1], WANG Weijian[1,2], JIA Zhenzhen[1], LIU Jialin[1]

（1. *College of Resources*, *Environment and Safety Engineering*, *Hunan University of Science and Technology*, *Xiangtan* 411100, *Hunan*, *China*;

2. *School of Physics and Engineering Technology*, *Minzu Normal University of Xingyi*, *Xingyi* 562400, *Guizhou*, *China*）

Abstract: In order to investigate the propagation characteristics and thermal shock dynamics of multiple explosive sources gas explosion in complex roadways, numerical simulations were conducted using the Fluent software under three types of dual explosive sources arrangements in the H-type tunnel, including the same side, opposite positions, and diagonal positions. It was found that, after the two explosive sources in the tunnel were ignited simultaneously, its prodromic shock wave propagated along the unburned area of the tunnel. When the two shock waves encountered, the pressure superimposed while the impulse canceled out, and the propagation of flame was blocked by the pressure superposition area, resulting in a slowdown or reversal of the speed. Compared to the single source explosion, the dual explosive sources led to a higher pressure in specific areas such as contact lane, center of bifurcation, and sidewalls. Extreme pressure zones occur at the closed end of the roadway under same-side and diagonal arrangement conditions and at the center of the bifurcation under the opposite arrangement condition.

Keywords: gas explosion; H-type tunnel; arrangement; shock wave; propagation characteristics