

文章编号:1006-9941(2025)03-0213-12

## 隧道内甲烷蒸气云爆炸特性及杀伤效应研究

顾琳琳<sup>1</sup>,徐永行<sup>1</sup>,朱黄浩<sup>1</sup>,王振<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学安全科学与工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为探究隧道内甲烷蒸气云爆炸波的传播规律与特性,采用Ls-dyna软件中的时空守恒元和求解元(CE/SE)法建立隧道内甲烷空气预混爆炸模型,并通过试验数据验证了模型的准确性。通过数值仿真展示了9.5%浓度燃爆波传播至不同位置的典型波形,分析了超压和温度的传播演化规律,探讨了不同浓度甲烷蒸气云爆炸条件下超压和热辐射对隧道内的杀伤效应。研究表明:燃爆压力波在隧道轴向可分为自由扩展、反射耗散、壁面加速和马赫传播4个阶段,压力变化呈现碰壁跃升、反射衰减和稳定传播3种特征;在隧道径向表现为沿壁面做周期性反射传播,强度随甲烷的消耗逐渐递减。温度场的演化规律在隧道轴向表现为由爆炸中心向隧道出入口对称传播,温度峰值沿程衰减迅速;径向则表现为向隧道底部辐射,随着时间推移,截面温度逐渐趋于一致并缓慢降低。综合燃爆超压和热辐射的杀伤效应,5.0%浓度的甲烷燃爆致死范围为距爆源13.51 m,严重损害范围为13.51~23.51 m,中度损害范围为23.51~160 m;6.5%浓度的甲烷燃爆致死范围为距爆源16.46 m,严重损害范围为16.46~45.36 m,中度损害范围为45.36~160 m;9.5%浓度的甲烷燃爆致死范围为距爆源20.58 m,严重损害范围为20.58~160 m。

**关键词:** 隧道;甲烷爆炸;超压分布;温度演化;热辐射;杀伤效应

中图分类号: TJ5;TJ089;X932

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2024155

### 0 引言

工业化发展迅速的时代背景下,我国每年有大量危险化学品通过隧道运输到全国各地,该类物质在隧道内的燃爆事故时有发生,这无疑会对隧道自身结构稳定性、内部人员安全以及周边环境造成巨大威胁。因此,研究隧道内可燃气体泄漏的燃爆问题,尤其是对燃爆冲击波在隧道内的传播特征、演化过程以及毁伤效应的研究,具有极大的科研价值和社会意义。

国内外学者对易燃蒸气云于自由敞开空间的爆炸特征已有较多成果<sup>[1-5]</sup>,近年来,在较强约束空间内,尤其是隧道内甲烷蒸气云爆炸特征研究成为热点问题。

收稿日期:2024-06-17;修回日期:2024-06-21

网络出版日期:2024-08-20

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3002000);国家自然科学基金(42002266)

作者简介:顾琳琳(1987-),女,副教授,主要从事岩土动力学及地下结构防灾减灾和工程防护研究。e-mail:linlin\_gu@njjust.edu.cn

通信联系人:王振(1987-),男,副教授,主要从事结构抗爆及防护工程研究。e-mail:wangzhen\_2012@njjust.edu.cn

引用本文:顾琳琳,徐永行,朱黄浩,等.隧道内甲烷蒸气云爆炸特性及杀伤效应研究[J].含能材料,2025,33(3):213-224.

GU Lin-lin, XU Yong-hang, ZHU Huang-hao, et al. Research on Combustion Characteristics and Injury Effects of Methane Vapor Clouds in Tunnels[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2025, 33(3):213-224.

针对甲烷蒸气云爆炸的超压衰减规律,闫秋实等<sup>[6]</sup>探究了甲烷/空气混合气体在小体积封闭管道内的燃烧爆炸特征,阐述了不同点火能对不同浓度甲烷气体压力峰值的影响。Yang等<sup>[7]</sup>和吴建松等<sup>[8]</sup>采用自主研发的试验系统,研究了不同浓度的瓦斯气体于管道内的爆炸特性,分析了冲击波超压分布特征、气体浓度对超压的影响。甲烷气体爆炸有其独有的爆炸特征外,还伴随着强烈的化学反应放热过程,针对甲烷蒸气云爆炸的温度分布规律,Zhu等<sup>[9]</sup>通过数值模拟得出了不同截面隧道中不同体积甲烷/空气混合物的最大超压的规律,可以较好地预测小型管道和大型隧道中的超压以及有障碍物的箱体中的火焰覆盖情况;Zhang等<sup>[10]</sup>通过数值模拟研究了隧道壁面附近甲烷/空气混合物爆炸的温度分布,得到了壁面绝热和非绝热假设的两种壁面附近温度分布结果。爆炸产生的高温高压都会对区域内不同程度的杀伤,针对爆炸冲击波在约束空间内的杀伤效应,谭迎新等<sup>[11]</sup>对放置在管道式气体爆炸测试装置内的白鼠开展了甲烷爆炸杀伤效应研究,探索了甲烷浓度、障碍物等因素对白鼠的损伤程度影响;Ma等<sup>[12]</sup>数值模拟了液化石油气(LPG)罐泄漏和

爆炸过程,获取了爆炸流场的压力、温度和热辐射分布,分析了液化石油气爆炸后的损伤范围。

在可燃气体爆炸模拟方面,诸多数值模型虽发展较为完善,但描述气体的燃烧爆炸过程均有所欠缺,如TNO-MultiEnergy法<sup>[13-16]</sup>、Baker-Strehlow法<sup>[17-18]</sup>以及等效TNT当量法<sup>[19-20]</sup>,在描述有限速率化学问题时,均忽略了详细的化学反应机理,难以准确揭示燃爆波的产生与传播过程。而Ls-dyna中CE/SE(the method of space-time conservation element and solution element)方法为数值求解系统中的流体动力学方程提供新思路<sup>[21]</sup>,它能统一处理时间与空间问题,基于守恒律设立守恒元和求解元,使得格式从局部到整体都保证物理意义上的守恒律。Wu等<sup>[22]</sup>和管文涛等<sup>[23]</sup>将此方法拓展应用到化学反应流,模拟了自由敞开空间炸药-铝粉尘的两相爆轰过程,分析了双粉尘爆轰过程中粒子密度对爆轰波波速与超压的影响。王放<sup>[24]</sup>基于改进的CE/SE方法并结合实验结果,研究了在连续旋转爆轰发动机中气态及气液两相煤油燃料的爆轰特性。Hamid Rokhy等<sup>[25]</sup>采用CE/SE-IBM有限速率化学反应模型和三维流固耦合方法,评估了氢气爆轰金属成型的准确性,得出的数值结果与经验数据有较高一致性。

目前,采用CE/SE法针对隧道内蒸气云爆炸特征的研究成果尚少,尤其综合考虑冲击波与高温的杀伤效应更是鲜有分析。为此,本研究采用CE/SE方法模拟了隧道内甲烷蒸气云燃爆过程,得到燃爆波的传播及温度场的演化规律,研究了燃爆超压与热辐射于隧道内的杀伤效应,以期为隧道安全防护和紧急救援工作提供科学依据。

## 1 隧道甲烷蒸气云燃爆计算模型

### 1.1 考虑基元反应模型的三维CE/SE方法

燃爆波是含有化学反应的强间断流动,对于数值模拟的精度要求很高。本研究采用的CE/SE方法是一种计算守恒性方程的格式,从控制方程的时空积分形式出发,在时间和空间上都能够很好地保证物理量的守恒性,使得该格式有着较高的精度,并且对间断具有很强的分辨率。为了进行甲烷/空气燃爆的数值计算,在三维CE/SE方法<sup>[26]</sup>的基础上,植入基元化学反应模型,忽略燃料和氧化剂的混合过程,采用无粘条件进行数值计算。三维坐标系下,考虑基元反应的Euler方程<sup>[27-28]</sup>为:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = \mathbf{R} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho Y_1 \\ \vdots \\ \rho Y_i \\ \vdots \\ \rho Y_{ns} \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E \end{pmatrix}, \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \rho Y_1 u \\ \vdots \\ \rho Y_i u \\ \vdots \\ \rho Y_{ns} u \\ \rho u^2 + p \\ \rho v u \\ \rho w u \\ (E + p)u \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho Y_1 v \\ \vdots \\ \rho Y_i v \\ \vdots \\ \rho Y_{ns} v \\ \rho u v \\ \rho v^2 + p \\ \rho w v \\ (E + p)v \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \rho Y_1 w \\ \vdots \\ \rho Y_i w \\ \vdots \\ \rho Y_{ns} w \\ \rho u w \\ \rho v w \\ \rho w^2 + p \\ (E + p)w \end{pmatrix}, \mathbf{R} = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_i \\ \vdots \\ \omega_{ns} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, $x, y, z, t$ 分别是空间和时间坐标, $\mathbf{E}, \mathbf{F}, \mathbf{G}$ 分别是 $x, y, z$ 方向上的流矢量, $\mathbf{U}$ 是守恒项矢量, $u, v, w$ 分别是 $x, y, z$ 方向上的速度分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $Y_i$ 和 $\omega_i$ 分别是第 $i$ 组分的质量分数和质量生成率,%; $\rho$ 是混合气体总密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $p$ 是压强, $\text{Pa}$ ;  $E = \rho h - p + \rho(u^2 + v^2 + w^2)/2$ 是单位体积总能, $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $ns$ 是组分数目; $\mathbf{R}$ 是源项,用于同步化学反应和流场流动的时间。

基元反应模型的基元反应过程可以表示为:



式中, $i=1, 2, \dots, ns; k=1, 2, \dots, nr, nr$ 为模型中基元反应的个数; $v'_{ki}$ 和 $v''_{ki}$ 为第 $i$ 个组分 $k$ 步反应的正向和逆向反应的化学计量系数; $X_i$ 表示组分。

第 $i$ 个组分的质量生成率为:

$$\omega_i = W_i \sum_{k=1}^{nr} (v''_{ki} - v'_{ki}) RP_k \quad (4)$$

式中, $W_i$ 为第 $i$ 组分的摩尔质量, $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $RP_k$ 为第 $k$ 个可逆基元反应的进行速率, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,可表示为:

$$RP_k = TB(K_{f,k} \prod_{i=1}^{ns} (C X_i)^{v'_{ki}} - K_{b,k} \prod_{i=1}^{ns} (C X_i)^{v''_{ki}}) \quad (5)$$

式中, $C_{xi} = \rho_i / W_i$ 是第 $i$ 组分的摩尔密度, $TB$ 是第三体效应指数, $K_{f,k}$ 和 $K_{b,k}$ 为正反应和逆反应常数。

逆反应常数 $K_{b,k}$ 可表示为正反应常数 $K_{f,k}$ 和压力

平衡常数的比值,而正反应常数  $K_{f,k}$  可由 Arrhenius 公式<sup>[27]</sup>求得:

$$K_{f,k} = A_k T^{n_k} \exp\left(-\frac{E_{a,k}}{R_0 T}\right) \quad (6)$$

式中,  $A_k$  为第  $k$  个基元反应方程的指前因子,  $E_{a,k}$  为第  $k$  个基元反应方程的活化能,  $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ ;  $R_0$  为普适气体常数,  $8.31451 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ;  $n_k$  为第  $k$  个基元反应方程的温度指数, 本研究中均为 0。

基元化学反应模型是通过一系列基元反应来描述化学反应过程, 其中反应物、中间产物和生成物的浓度变化是由这些反应叠加得到, 基元反应符合真实的化学反应过程, 并且得到的结果也较为准确。为此本研究使用的基元化学反应模型源于李象远等<sup>[29]</sup>提出的极小网络机理, 由 18 种反应性物质和 22 种反应组成, 包括甲烷/氧气爆炸中的所有重要物质, 详细的反应机理如表 1 所示。

### 1.2 模型建立及通用条件

研究建立隧道物理模型, 隧道径向截面为双曲线圆拱形, 截面高度 8.0 m、宽度 14.2 m, 衬砌厚度 1.5 m、总长度 200.0 m, 结构剖面如图 1 所示。于径向 0 点截面拱顶 A、拱肩 B、拱脚 C、底板 D 和 E 处设置 5 个测点, 以分析甲烷燃爆波在隧道径向的超压传播及温度衰减规律。于爆炸中心设置观察测点 L0、L1、L2...L160, 测点间隔为 1 m, 以监测燃爆波沿隧道轴向距底板 1.5 m 高度的超压和温度衰减规律以及杀伤效应。

研究选用甲烷预混填充方式, 忽略其稳定分布后的浓度分层, 根据甲烷泄漏稳定后的蒸气云团形状特征<sup>[30]</sup>, 沿轴向 0 点位置向两端作楔形填充, 最大填充高度为 3 m, 最大填充长度为 40 m, 填充总体积约为

表 1 甲烷/氧气化学反应机理

Table 1 Chemical reaction mechanism of methane/oxygen

ID	reaction chemistry equations	$A_k$	$E_{a,k}$
1	$\text{CH}_4 + \text{OH} = \text{CH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	4.13E+13	6460
2	$\text{CH}_4 + \text{O}_2 = \text{CH}_3 + \text{HO}_2$	1.04E+13	56940
3	$\text{CH}_4 + \text{M} = \text{CH}_3 + \text{H} + \text{M}$	3.00E+16	85800
4	$\text{CH}_3 + \text{OH} = \text{CH}_2 + \text{H}_2\text{O}$	7.00E+12	0
5	$\text{CH}_3 + \text{O}_2 = \text{CH}_2\text{O} + \text{OH}$	6.38E+11	13500
6	$\text{CH}_3 + \text{M} = \text{CH}_2 + \text{H} + \text{M}$	2.24E+15	82700
7	$\text{CH}_2\text{O} + \text{HO}_2 = \text{HCO} + \text{H}_2\text{O}_2$	6.42E+12	18010
8	$\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 = \text{HCO} + \text{HO}_2$	7.07E+16	46720
9	$\text{CH}_2 + \text{O}_2 = \text{HCO} + \text{OH}$	8.06E+12	1500
10	$\text{HCO} + \text{O}_2 = \text{CO} + \text{HO}_2$	3.70E+13	3110
11	$\text{HCO} + \text{M} = \text{H} + \text{CO} + \text{M}$	1.05E+14	13000
12	$\text{CO} + \text{OH} = \text{H} + \text{CO}_2$	9.72E+11	2630
13	$\text{CO} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{O}$	2.53E+13	47800
14	$\text{H}_2\text{O}_2 (+\text{M}) = \text{OH} + \text{OH} (+\text{M})$	2.21E+15	50230
15	$\text{H}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}$	3.01E+13	26080
16	$\text{H}_2 + \text{OH} = \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	4.38E+13	6990
17	$\text{H}_2 + \text{O}_2 = \text{HO}_2 + \text{H}$	1.76E+14	57820
18	$\text{H}_2 + \text{O} = \text{H} + \text{OH}$	6.83E+13	10380
19	$\text{H}_2 + \text{M} = \text{H} + \text{H} + \text{M}$	3.33E+14	102070
20	$\text{HO}_2 + \text{H} = \text{OH} + \text{OH}$	7.08E+13	1500
21	$\text{O}_2 + \text{H} = \text{O} + \text{OH}$	1.04E+14	15600
22	$\text{O}_2 + \text{H} (+\text{M}) = \text{HO}_2 (+\text{M})$	1.14E+14	0

$600 \text{ m}^3$ , 积聚稳定后的蒸气云团于隧道中线轴向截面和径向 0 点位置截面的分布如图 2 所示。模拟计算中所使用的条件设置如下:

(1) 初始条件: 空气域和甲烷/空气预混域的气压为 101.3 kPa, 温度为 298 K, 空气部分由体积分数 21% 氧气和 79% 氮气组成, 忽略气体的黏性耗散, 预

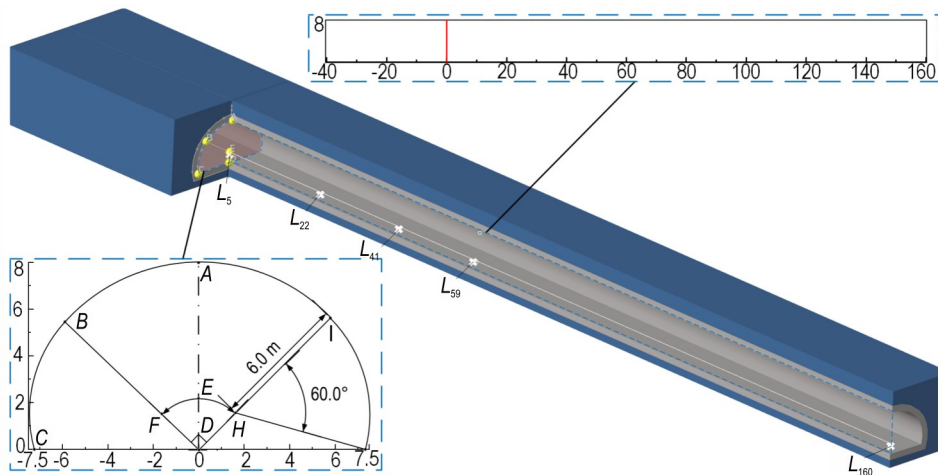


图 1 隧道轴、径向模型及测点布置示意图

Fig.1 Tunnel model in different axis and measuring point layout

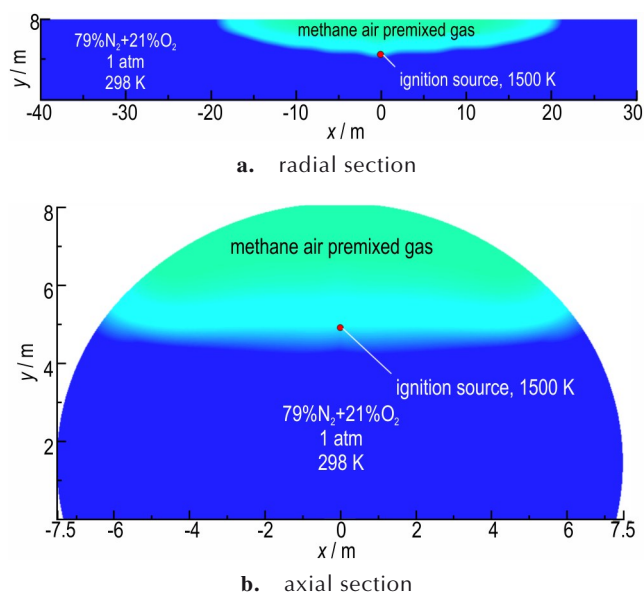


图2 隧道中线轴向及径向0点截面蒸气云图

Fig.2 Vapor cloud diagrams of tunnel in different axis sections

混气部分甲烷和空气中的氧气摩尔比分别取1:2, 1:3, 1:4, 即体积分数分别为9.5%, 6.5%, 5.0%。整个隧道空间处于静止状态, 计算开始时气体界限消失。

(2) 网格划分: CE/SE方法具有网格无关性, 即不同网格下的爆轰波流场结构区别不大, 不会影响爆轰波的位置和传播模式, 只是激波捕捉分辨率略有不同, 综合考虑计算成本和计算精度, 本模型网格划分的单元尺寸设为20 cm, 网格总数为9, 140, 432。

(3) 边界条件: 设置隧道壁及底板为绝热的壁面反射边界条件, 即物质不能在该边界上进行传输; 隧道两端位置为出口边界条件, 即物质可以从该边界流出, 并且流出后不会对隧道内流场产生影响。

(4) 点火设置: 采用瞬时点火的方式, 即在特定时间和位置瞬时引入高温和高能量, 从而引发燃料燃烧。点火圆心设置在甲烷云团最厚位置的最下端, 三维坐标为(0, 0, 5), 计算开始时刻点火源温度1500 K。

### 1.3 数值方法验证

为验证隧道内爆源甲烷/空气混合气体爆炸数值模型的有效性, 并准确地描述爆炸冲击波在隧道中传播的衰减规律, 参照文献[31]的试验条件, 试验采用一条断面为梯形长度518.16 m的巷道, 与本研究的隧道结构相似, 巷道断面及传感器布置见图3a。根据图中尺寸及现场条件, 基于CE/SE方法建立甲烷蒸气云爆炸数值模型, 参照现场试验工况采用体积分数8.6%, 7.6%, 6.8%的甲烷/空气预混

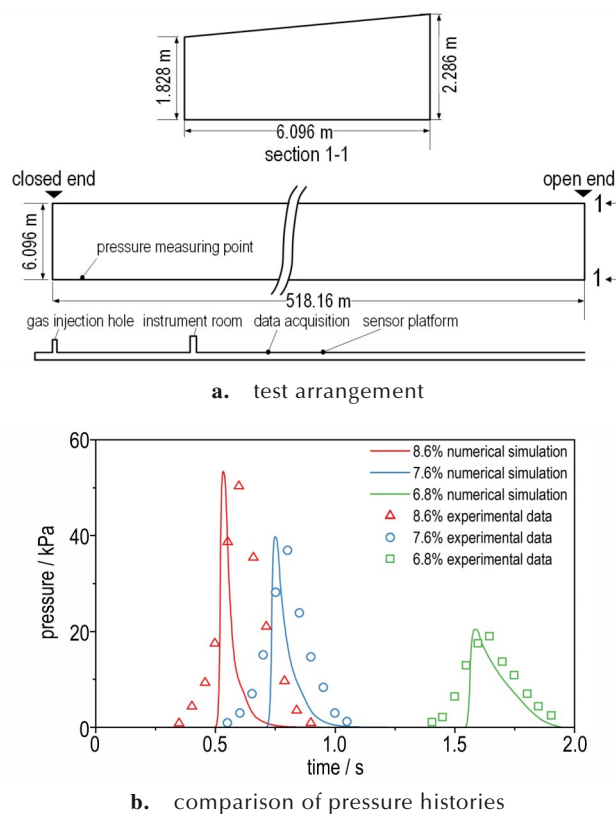


图3 试验布置和数值模拟压力时程结果对比(距封闭端34.85 m处)

Fig.3 Test arrangement and comparison of test and numerical results for pressure histories(34.85 m from the closed end)

气作为模拟浓度, 封闭端爆源气体聚集区填充长度为8.23 m, 距封闭端34.85 m处设置压力测点, 点火方式为1500 K瞬时点火方式。数值模拟与试验结果对比如图3b所示。

由图3b可知, 数值模拟和试验结果的压力峰值和波形接近, 体积分数8.6%, 7.6%, 6.8%浓度超压峰值对应的最大相对误差分别为6.12%, 7.52%, 5.37%。相较于数值模拟, 试验结果的压力峰值更低且出现时间更晚, 而压力持时相对较长, 造成该结果的原因可能是: 巷道试验甲烷预混为人工配气, 试验过程并非完全理想状态, 而数值模型假定气体为理想气体, 预混气绝对均匀混合, 导致数值模拟峰值结果偏大且出现时间更早; 试验巷道壁面相对粗糙, 爆炸冲击波会受壁面摩擦扰动, 而数值模型假定壁面完全光滑绝热, 导致数值模拟结果压力持时较短。总体而言, CE/SE方法计算甲烷/空气预混气爆炸的压力结果准确、有效, 误差在工程可接受范围内, 可用于研究隧道内甲烷蒸气云的爆炸过程。

## 2 隧道内燃爆模波传播规律

### 2.1 燃爆波特性及流场结构

在隧道这类半封闭环境中,燃爆冲击波于传播途中遇到障碍物阻挡时则会发生反射现象<sup>[32]</sup>。垂直入射到刚性墙体时属于正反射现象,见图4a;入射波与壁面成一定角度时,则会形成斜反射波,斜反射一般有两种情况,即入射角较小时的规则斜反射现象,见图4b;入射角较大超过临界角 $\beta$ 的不规则斜反射现象,也称马赫反射,见图4c。

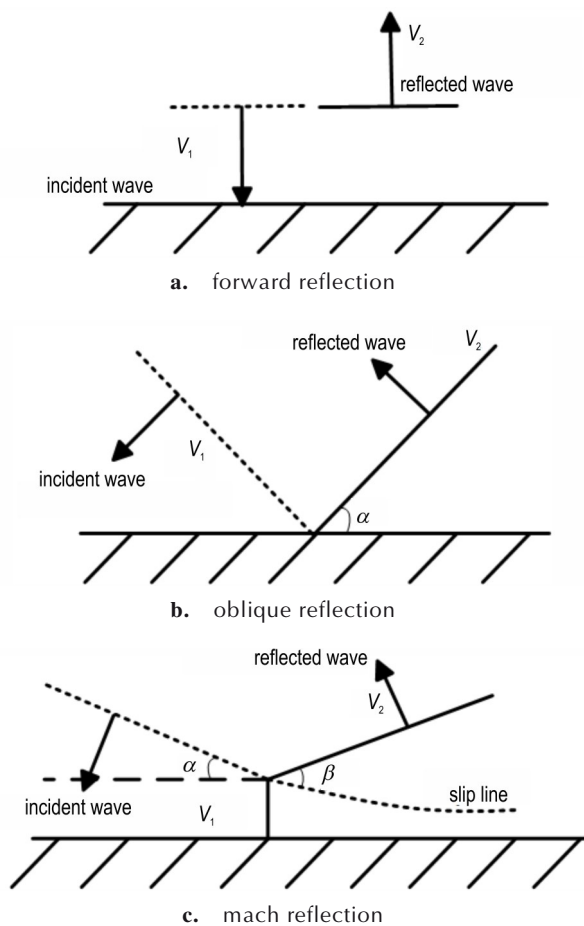


图4 燃爆的三种反射类型

Fig.4 Three reflection patterns of combustion

隧道内甲烷蒸气云爆炸时,压力波会明显先于火焰锋面传播,形成两波三区结构<sup>[33]</sup>:0区为冲击波尚未波及区域;1区代表被冲击波压缩区域;2区则是化学燃烧反应的稀疏波区域。这3段区间的压力、温度等状态参数也不尽相同,如图5所示。

不同浓度甲烷蒸气云爆炸条件下,隧道内初始压力波反射及后期马赫波形成,如图6所示。蒸气云被

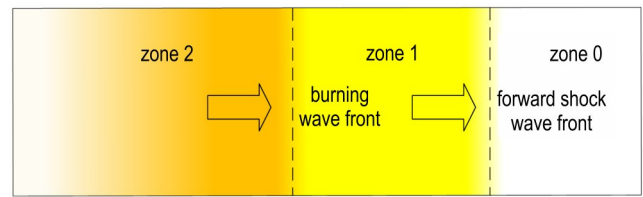


图5 燃爆的两波三区流场

Fig.5 Two-wave and three-zone flow field of combustion

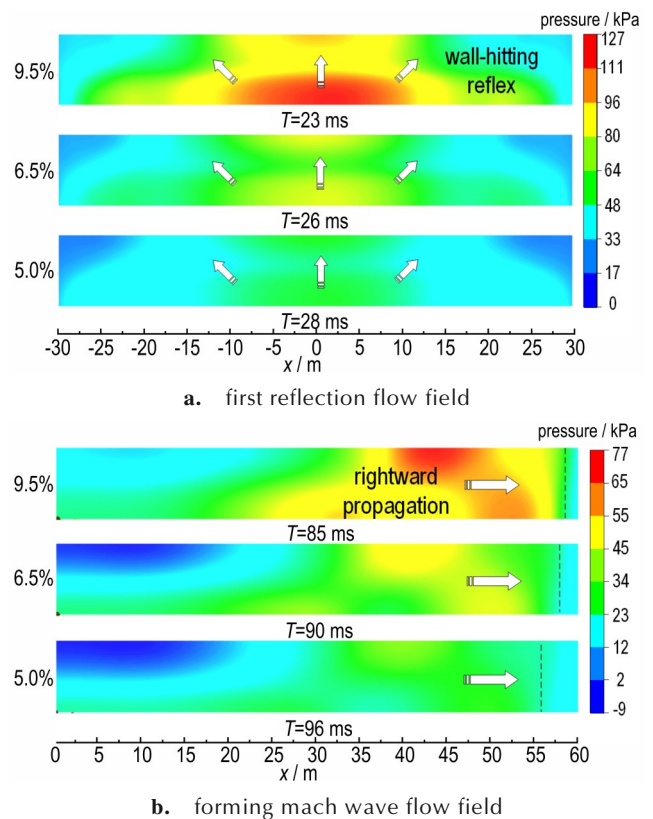


图6 三种不同浓度的甲烷蒸气云爆炸流场云图

Fig.6 Combustion flow field diagrams of methane vapor clouds with three concentrations

引燃后,燃爆波由爆源向四周开始扩散,抵达隧道底板后便开始反射回拱顶,9.5%,6.5%和5.0%体积浓度甲烷爆炸压力波首次反射时间分别为23,26ms和28ms;初始压力波向隧道两端传播一段距离后演变为马赫波,初步形成时间分别为85,90ms和96ms。不同体积浓度甲烷蒸气云燃爆波的超压强度和波速虽有所区别,但波形特征基本相同,其中9.5%体积浓度蒸气云的爆炸威力最大且波形特征也最为明显。

#### 2.1.1 蒸气云爆炸冲击波波形分析

为探究甲烷蒸气云于隧道内爆炸的波形特征,本研究以体积浓度9.5%的甲烷蒸气云为例,模拟得到距爆炸中心5,22,41,59m共4种典型超压波形,如图7所示。冲击波传播至测点位置,压强瞬时升高至

最大超压后骤降,且随着轴向传播距离不断增加,超压峰值也迅速降低,表明初始阶段冲击波随轴向传播距离的增加呈迅速衰减趋势。距气云爆炸中心越近,初始冲击波超压峰值则越大,如图7测点L5所示;此后还会形成多个波峰,这可能是由于冲击波在衬砌壁面上进行了多次反射造成,第一个波峰P1为初始波波阵面经过,后续超压峰值则由冲击在混凝土壁面的反射波引起,如图7测点L22所示;随着传播距离持续增加,初始冲击波波速衰减幅度加大,后继反射波P2、P3

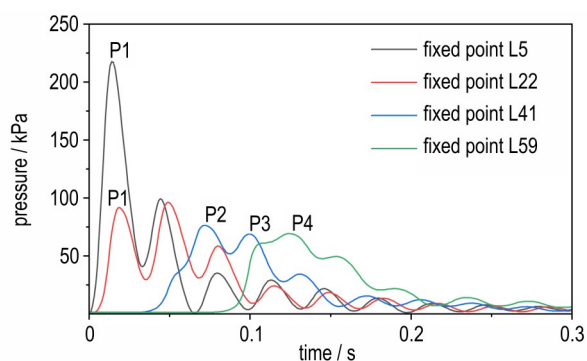


图7 隧道内燃爆波的四种超压波形

Fig.7 Four overpressure waveforms of combustion in tunnel

开始追上初始波,引起超压突然叠加跃升现象,之后超压又迅速衰减且压力峰值逐渐难以辨别,如图7测点L41所示;随着传播距离进一步增加,冲击波进入马赫反射区,最后后继压缩波与初始波整合形成马赫波P4,其波形近似为三角形,如图7测点L59。此外,冲击波在经过各测点时,虽然峰值不断减小,但正压持续时间有所增加,这应该与波速降低使得测点附近空气分子被压缩的时间增加有关。

### 2.1.2 隧道轴向超压传播规律

初始蒸气云爆炸冲击波表现为无规律振荡衰减,爆源附近冲击波以规则正反射和斜反射为主;随着传播距离增加,斜反射逐渐占主导,并在特定角度下形成马赫波,使得降压曲线变得平滑,整个过程涉及化学反应放热、气体膨胀、隧道空间特性对后继波的加速以及流场叠加效应。结合各典型位置测点的波形分析,将隧道蒸气云爆炸分为自由扩展、反射耗散、壁面加速、马赫传播四个阶段。不同阶段甲烷蒸气云爆炸沿隧道轴向的超压云图,如图8所示。

自由扩展阶段为爆炸中心原点至22 m范围内,蒸气云被引燃后形成的初始火焰波迅速向隧道底板和两

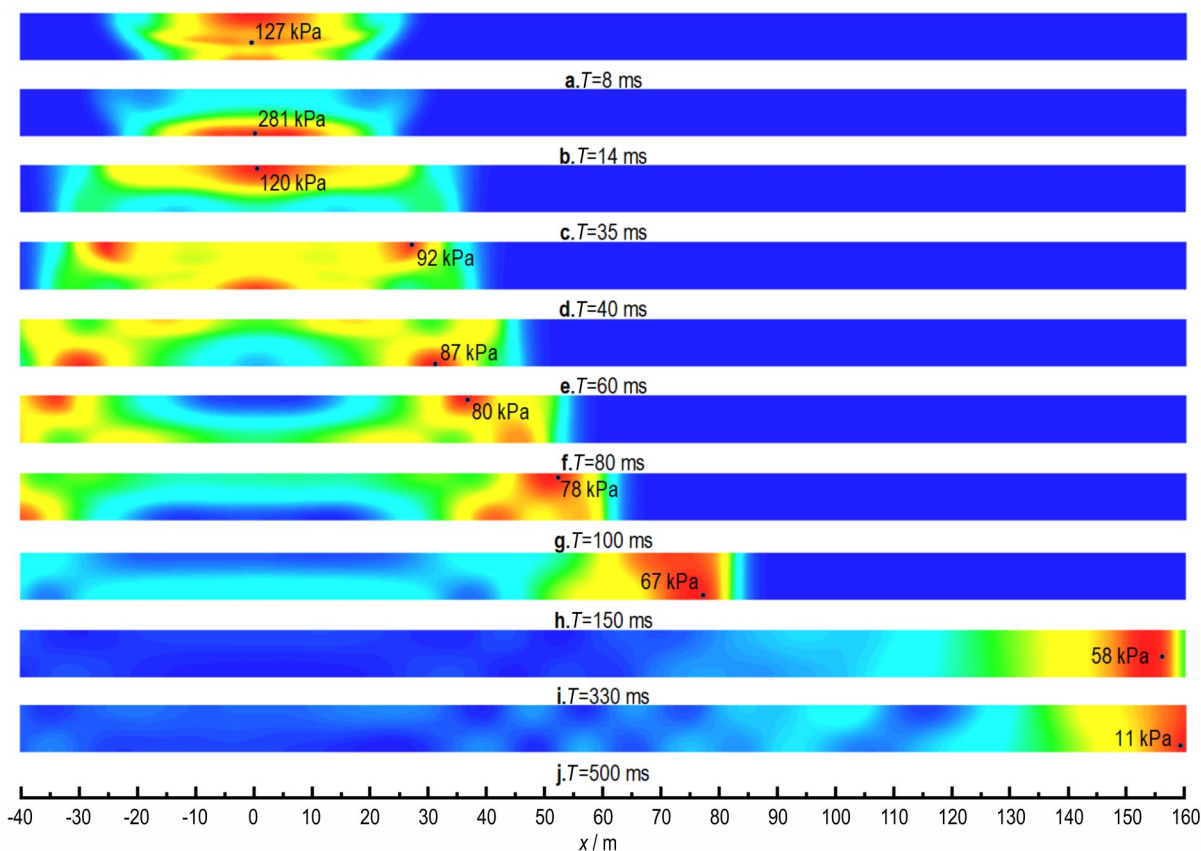


图8 9.5% 体积浓度甲烷蒸气云爆炸沿隧道轴向超压流场云图

Fig.8 Overpressure cloud maps of combustion by 9.5% concentration methane vapor cloud along tunnel axial

边扩散,开始以层流燃烧速度传播,超压曲线瞬时呈指数型增长,见图8a~b;距爆心22~41 m可视为反射耗散阶段,自由扩散的燃烧波与壁面发生碰撞挤压,在靠近爆源附近以正反射为主导,离爆源稍远则发生规则斜反射,由于甲烷蒸气云爆炸持续时间较长,冲击波向隧道两边持续反射推进,见图8c~d;当传播距离到41~59 m时,冲击波处于壁面加速阶段,此时,经反射扰动的燃烧波进入湍流燃烧阶段,受壁面反射的影响,壁面的湍流强度和化学反应速率更强,使得壁面超压强度明显大于隧道截面中心区域,见图8e~g;传播距离大于59 m后冲击波则进入马赫传播阶段,燃烧加热的高温空气向隧道中心扩张,后继压缩波追赶上前驱衰减波,并与之重合叠加,新的压力波峰面逐渐演化成平面马赫波,见图8h~j。

### 2.1.3 径向超压传播规律

图9是9.5%体积浓度甲烷蒸气云爆炸时径向截

面的压力云图,爆炸伊始,隧道拱顶压缩燃烧,测点A、B于2 ms时刻达超压峰值215 kPa和113 kPa;8 ms时刻,燃爆波以椭球面向下传播,经过E点时的压力峰值为109 kPa;燃爆波继续下压,于13 ms时刻,抵达隧道底部,随后碰壁挤压向两侧扩展传播,此时D点超压达到最大值255 kPa;压力波于17 ms传递至拱脚,拱脚C点达到最大超压峰值275 kPa,这是由于拱脚弯曲位置使得湍流增强,加之壁面碰撞反射作用,导致拱脚处压力峰值较高;26 ms时刻,压力波沿拱腰向拱顶传播,途中经过拱肩B点时的压力峰值为113 kPa;33 ms时,边侧两股压力波再次汇聚于隧道拱顶,经隧道壁面反射继续循环向下传播、强度衰减明显。可见,甲烷燃爆波在隧道径向这种受限空间传播时,表现为沿隧道壁面的周期性挤压反射现象,强度随着反射次数及甲烷的消耗迅速衰减,反应瞬时由于气体的消耗会产生负压区,且截面各个位置都会受到较强超压的影响。

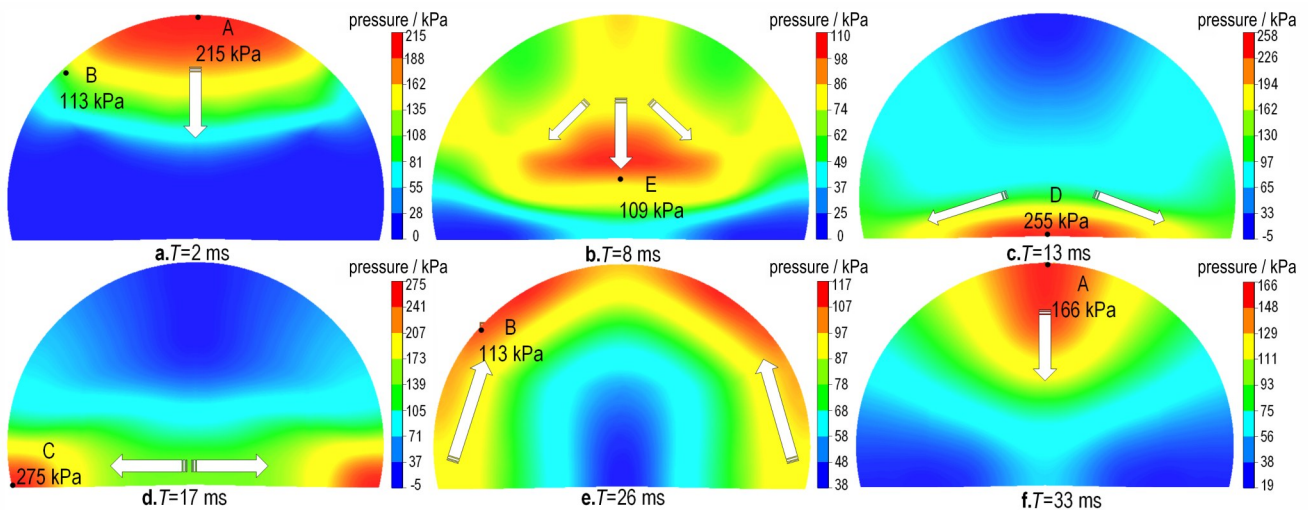


图9 甲烷爆炸时各个监测点峰值超压流场云图

Fig.9 Peak overpressure cloud maps at different monitoring points in a methane vapor cloud combustion

## 2.2 温度场演化规律

### 2.2.1 轴向温度场演化规律

图10为体积浓度9.5%的甲烷蒸气云燃爆时于隧道轴向的温度分布,不难发现,燃爆伊始冲击波便与爆炸产物分离,隧道拱顶附近甲烷气体聚集处的温度约879 K;温度由隧道拱顶向底板,从爆炸中心沿隧道轴向依次递减;在约50 ms时,由于爆炸冲击波波速较快,冲击波挤压空气导致环境温度小幅升高,核心区温度随轴向传播距离增加而逐渐降低至706 K左右;100 ms时,冲击波进一步远离火焰波,核心区迅速向隧道两侧推进,最高温度降至655 K;200 ms时,高温区整体温度下降约270 K,其体积开始从隧道拱顶下移,并逐渐贯穿

整个截面,最高温度也进一步降至596 K左右;0.4~3 s左右,核心区于隧道轴向推进速度放缓,由于热惯性作用,温度降幅也较缓。由于隧道环境较为封闭,热量不能在短时间内释放,爆源附近形成的核心高温区,因两侧温差的不均衡而向隧道远端移动。相较于燃烧波的传播,温度场的辐射演化十分缓慢,传播范围也相对较短,由爆炸中心向隧道两端的温度梯度降幅明显。

结合气体爆炸动力学弱冲击波爆炸理论等知识,建立甲烷爆炸超压随距点火源距离变化的非线性计算公式,并结合实验数据进行了验证。在此基础上进一步推导出温度计算公式(式(7)),对于预测大尺度直巷中甲烷爆炸后空气温度衰减规律具有一定指导

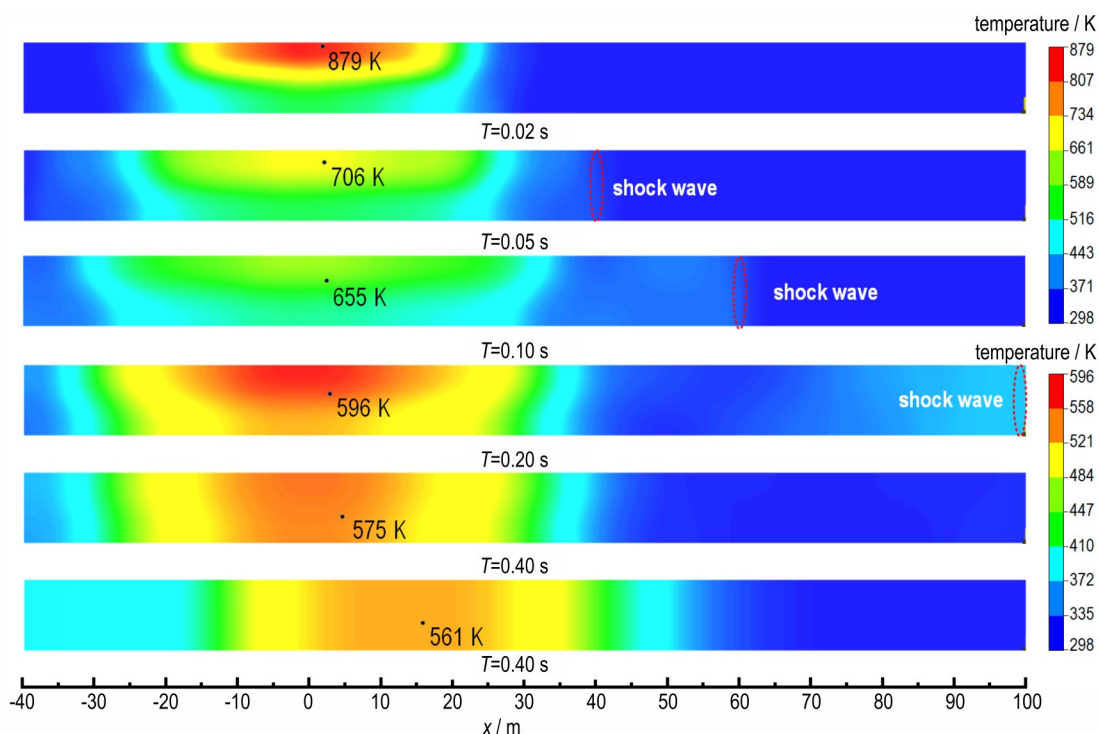


图10 隧道轴向截面温度演化

Fig.10 Temperature evolution maps of axial sections in tunnel

意义<sup>[34-35]</sup>。

$$T = T_1 \left( 1 + \frac{\Delta p}{p} \right)^{\frac{1 + \frac{(k-1)\Delta p}{2kp}}{1 + \frac{(k+1)\Delta p}{2kp}}} \quad (7)$$

式中,  $T_1=298$  K,  $k=1.4$  为绝热系数,  $p=101.3$  kPa,  $\Delta p$  为超压, Pa。

图11为9.5%体积浓度甲烷蒸气云爆炸沿程温度曲线,数值模拟与理论计算对比显示传播距离10 m内两者的最大误差仅为5.83%,而传播距离超过10 m后的温度峰值衰减变化基本一致。

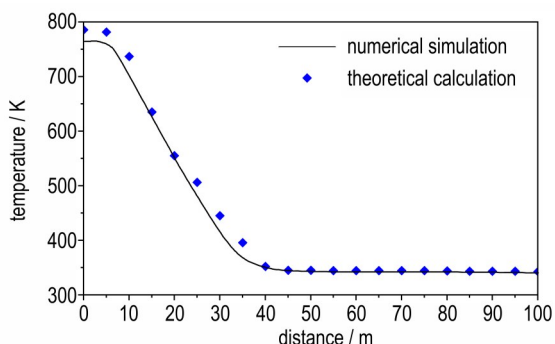


图11 9.5%体积浓度甲烷蒸气云爆炸沿程温度曲线与理论计算比较

Fig.11 Comparison of temperature curves along the explosion path of 9.5% concentration methane vapor cloud with theoretical calculations

## 2.2.2 径向温度场演化规律

图12为甲烷蒸气云爆炸的温度分布云图,气云由火源处向拱顶压缩燃烧,爆炸核心区温度迅速攀升,燃爆波开始形成;12 ms时刻,燃爆波迅速向隧道底板传播,高温区也跟着从拱顶向底板辐射扩展;18 ms时刻,隧道截面整体升温,火焰锋面冲击隧道底板;33 ms时刻,扩散一定程度后火焰热流开始由周围向拱顶收缩;50 ms时刻,火焰波再次向底板扩展;80 ms时刻,截面温度出现稳定分层;1.0 s时刻,随着爆炸化学反应进行与时间推移,甲烷蒸气中的化学能全部转化为热能与动能,隧道截面各点温度趋于一致。对于温度流场扩散一定程度后又向火焰核心收缩的现象,可能是因为爆炸开始甲烷/空气迅速被消耗产生负压区域,周围气体向核心补充导致。

## 3 隧道燃爆超压与热辐射的杀伤效应

### 3.1 燃爆超压

根据人体平均身高及身体薄弱部位,选取距地面1.5 m处的测点观察甲烷蒸气云于隧道内燃爆的杀伤效应。陈国华等<sup>[36]</sup>研究成果表明,无掩体条件下,燃爆超压是造成伤亡的关键因素,其计算得到的地下密闭空间燃气爆炸事故伤亡等级划分,如表2所示。



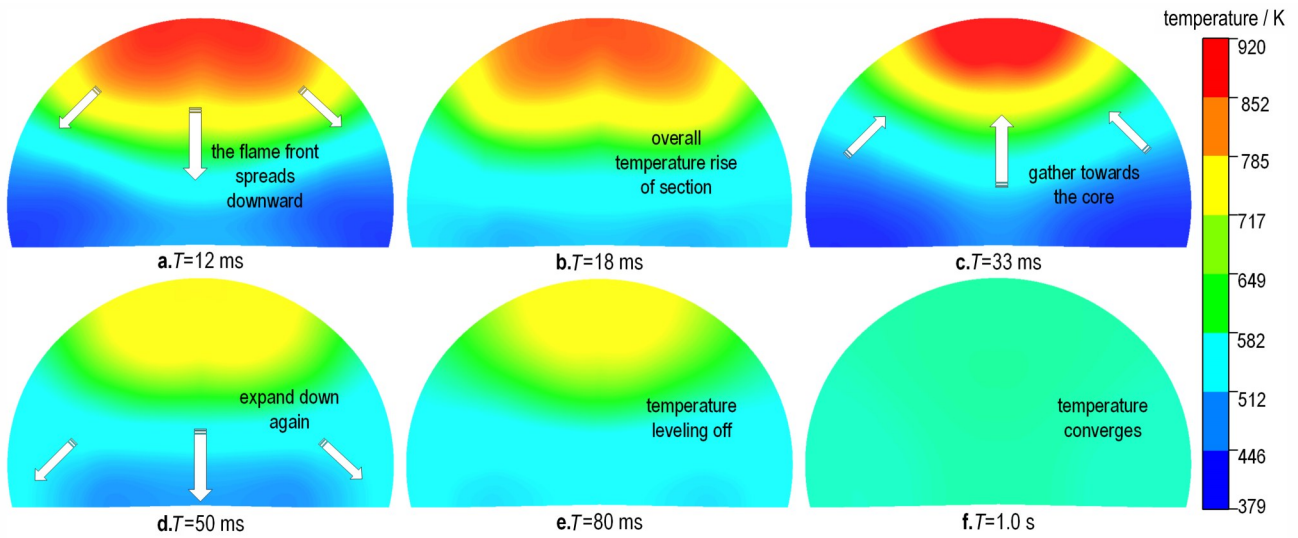


图 12 隧道径向截面温度演化

Fig.12 Temperature evolution maps of radial sections in tunnel

表 2 爆炸超压伤害程度标准

Table 2 Injury hierarchy of combustion overpressure

overpressure strength/kPa	damage effect	degree of injury
127.49	most of the people died	fatal
49.04	severe damage or death to internal organs	severe
23.54	hearing organ damage or fracture	moderate
10.79	flesh wound	slight

三种不同浓度甲烷燃爆的冲击波峰值压力衰减曲线,如图 13 所示。结果表明,燃爆浓度在 5.0% 时、模拟人员的严重损害范围为距爆 23.51 m,中度损害范围为 23.51~160 m,该浓度下的燃爆超压不会致人死亡;燃爆浓度在 6.5% 时,致死范围为距爆源 12.14 m,严重损害范围为 12.14~45.36 m,中度损害范围为 45.36~160 m;燃爆浓度在 9.5% 时,致死范围为距爆源 17.84 m,严重损害范围为 17.84~160 m。

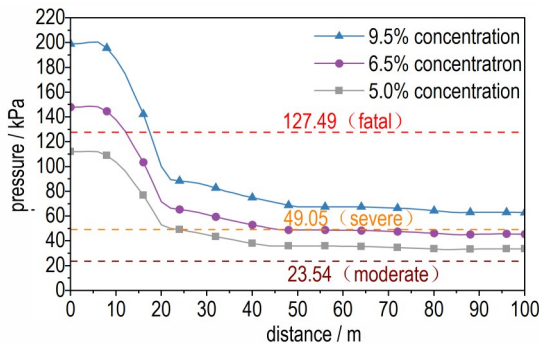


图 13 三种不同浓度甲烷燃爆超压沿程衰减曲线

Fig.13 Decay curves of methane combustion overpressure in three concentrations along the tunnel

### 3.2 热辐射

隧道内发生燃爆产生强烈高温是此类事故的重要表征,主要表现为热辐射对人体的损害。为确定热辐射的杀伤范围,选择 Baker<sup>[37]</sup>提出的火球热辐射评估模型如式(8)~(9):

火球直径:

$$D = 3.88W^{0.32} \quad (8)$$

式中, $W$ 是燃烧的甲烷气的总质量,kg; $D$ 是火球的直径,m。

距爆源中心不同距离的辐射通量:

$$q = GT^4D^2/FR^2 + D^2 \quad (9)$$

式中, $q$ 是热辐射通量, $W \cdot m^{-2}$ ; $R$ 是到爆源中心的距离,m; $T$ 为火球的温度,K; $F$ 、 $G$ 为常数,分别取 161.7、 $5.26 \times 10^{-5}$ (实验值)。

结合模拟得到的各测点的温度值从而计算出距爆源中心不同距离的辐射通量,热辐射强度引起的热损伤危害标准<sup>[38]</sup>如表 3 所示。

三种不同浓度的甲烷燃爆热辐射强度沿程衰减曲线,如图 14 所示。当热辐射强度大于  $37.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  时,对应 5.0%、6.5%、9.5% 浓度的甲烷燃爆致死范围分别为距爆源 13.51,16.46,20.58 m。热辐射强度在  $1.6 \sim 37.5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  之间人员均有不同程度的损伤,当热辐射小于  $1.6 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$  时,此热辐射强度定义为安全临界值,相应的安全距离为该值之外的区域。因此,5.0%、6.5%、9.5% 浓度的甲烷燃爆对应热辐射安全距离分别为 37.8,40.06,43.58 m。

超压和热辐射强度的杀伤范围,如表 4 所示。可

表3 热辐射强度危害标准<sup>[38]</sup>Table 3 Injury hierarchy of thermal radiation intensity<sup>[38]</sup>

thermal intensity / kW·m <sup>-2</sup>	damage effect	degree of injury
37.5	1% death within 10 s; 100% death within 1 min	fatal
25.0	more than second-degree severe burns within 10 s; 50% death within 1 min	severe
12.5	first-degree burns within 10 seconds; 1% death within 1 minute	moderate
4.0	exposure for more than 20 seconds can cause pain	sight
1.6	prolonged exposure does not cause discomfort	safe

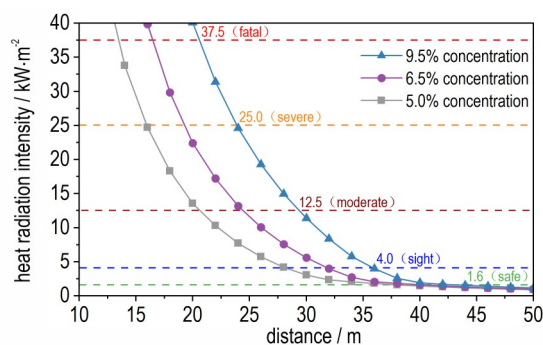


图14 三种不同浓度甲烷燃爆热辐射强度沿程衰减曲线

Fig.14 Decay curves of methane combustion thermal radiation intensity in three concentrations

表4 超压和热辐射强度的杀伤范围

Table 4 Injury scope of overpressure and thermal radiation intensity

degree of injury	volume fraction	explosion overpressure / m	thermal radiation / m	combined effect / m
fatal	9.5%	0-17.84	0-20.58	0-20.58
	6.5%	0-12.14	0-16.46	0-16.46
	5.0%	/	0-13.51	0-13.51
severe	9.5%	17.84-160	20.58-23.87	20.58-160
	6.5%	12.14-45.36	16.46-19.32	16.46-45.36
	5.0%	0-23.51	13.51-15.92	13.51-23.51
moderate	9.5%	/	23.97-29.42	/
	6.5%	45.36-160	19.32-24.39	45.36-160
	5.0%	23.51-160	15.92-20.63	23.51-160
sight	9.5%	/	29.42-43.58	/
	6.5%	/	24.39-40.06	/
	5.0%	/	20.63-37.8	/
safe	9.5%	/	43.58-160	/
	6.5%	/	40.06-160	/
	5.0%	/	37.8-160	/

见,隧道内甲烷燃爆超压和热辐射均可导致死亡,燃爆超压的致死范围小但其致伤范围很大;而热辐射的致死范围相对较大,致伤范围较小。综合燃爆超压和热辐射的杀伤效应,5.0%浓度的甲烷燃爆致死范围为距爆源 13.51 m,严重损害范围为 13.51~23.51 m,中度

损害范围为 23.51~160 m;6.5%浓度的甲烷燃爆致死范围为距爆源 16.46 m,严重损害范围为 16.46~45.36 m,中度损害为范围 45.36~160 m;9.5%浓度的甲烷燃爆致死范围为距爆源 20.58 m,严重损害范围为 20.58~160 m。

## 4 结论

基于三维 CE/SE方法和化学反应模型,建立了隧道内甲烷空气预混蒸气云爆炸模型,并通过试验数据验证了模型的准确性,揭示了燃爆波的传播及温度场的演化规律,探究了三种不同浓度下燃爆超压与热辐射对隧道内的杀伤效应。主要结论如下:

(1)甲烷蒸气云爆炸超压在隧道轴向传播可分为自由扩展、反射耗散、壁面加速、马赫传播。超压峰值呈现先瞬时上升,达到峰值后骤减,且各个阶段对应的典型波形也均有差异。在隧道径向传播表现为沿壁面传播,上下反射,爆炸产生的最大超压在拱脚处,为 275 kPa,强度随甲烷的消耗逐渐递减。

(2)甲烷蒸气云爆炸的温度演化规律沿轴向表现为由爆炸中心往隧道出入口对称传播,温度沿程衰减迅速,随着时间的推移核心高温区向隧道远端移动的特征。爆炸中心于径向截面产生温度峰值为 920 K,高温核心区从拱顶向底板辐射,随着时间推移,截面温度逐渐趋于一致并缓慢降低。

(3)燃爆超压和热辐射均可导致死亡,低浓度(5.0%)的甲烷燃爆超压即会对隧道内所有位置人员造成中度以上伤害,中高浓度(6.5%和9.5%)的燃爆超压存有致死威胁,致死范围分别为 12.14 m、17.37 m。热辐射的致死范围更大,低中高浓度(5.0%、6.5%、9.5%)对应致死范围分别为 13.51,16.46,20.58 m。

## 参考文献:

- [1] 于成龙,李浩淼,范韬.乙醇水溶液蒸气云爆炸特征试验研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(S2):75-80.  
YU Cheng-long, LI Hao-miao, FAN Tao. Experimental study on vapor cloud explosion characteristics of ethanol aqueous

- solution[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(S2): 75-80.
- [2] 赵洪祥, 袁景. 蒸气云爆炸荷载计算方法比选研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(11):3944-3950.  
ZHAO Hong-xiang, YUAN Jing. Research on calculation method selection of vapor cloud explosion load[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2023, 23(11):3944-3950.
- [3] GRAHAM A, EDMUND C, JULIE H, et al. A review of very large vapor cloud explosions: Cloud formation and explosion severity[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 48:367-375.
- [4] 李静野, 蒋新生, 余彬彬, 等. 大尺度开敞空间油料蒸气云爆炸超压与火焰传播机制研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(3): 160-175.  
LI Jing-ye, JIANG Xin-sheng, YU Bin-bin, et al. Visualization experimental research of oil gas vapor cloud deflagration in large-scale unconfined space[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(3):160-175.
- [5] EUGENIA D M, TASNEEM A, S. M T, et al. A method for the estimation of overpressure generated by open air hydrogen explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 52:99-107.
- [6] 闫秋实, 张亚楠, 李述涛, 等. 综合管廊内燃气爆炸荷载特性实验研究和数值模拟[J]. 爆破, 2021, 38(1):140-146.  
YAN Qiu-shi, ZHANG Ya-nan, LI Shu-tao, et al. Experimental study and numerical simulation of gas explosion load characteristics in integrated pipeline corridor[J]. *Blasting*, 2021, 38(1):140-146.
- [7] YANG Y, YANG S G, FANG Q, et al. Large-scale experimental and simulation study on gas explosion venting load characteristics of urban shallow buried pipe trenches[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 123:104409.
- [8] 吴建松, 蔡继涛, 赵亦孟, 等. 城市综合管廊燃气爆炸传播特性实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(6):987-993.  
WU Jian-song, CAI Ji-tao, ZHAO Yi-meng, et al. Experimental study of the propagation characteristics of gas explosions in urban utility tunnels[J]. *Journal of Tsinghua University. Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2022, 62(6): 987-993.
- [9] ZHU Y F, WANG D M, SHAO Z L, et al. Investigation on the overpressure of methane-air mixture gas explosions in straight large-scale tunnels[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 135:101-112.
- [10] ZHANG Q, PANG L. Analysis of the temperature distribution in the explosion of a methane/air mixture in a tunnel[J]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, 85: 1413-1418.
- [11] 谭迎新, 张一博, 王海宾, 等. 封闭空间内甲烷爆炸对白鼠的杀伤作用研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(3): 38-41.  
TAN Ying-xin, ZHANG Yi-bo, WANG Hai-bin, et al. Study on animal injury caused by gas explosion in enclosed space[J]. *China Safety Science Journal(CSSJ)*, 2014, 24(3):38-41.
- [12] MA Qiu-ju, ZHONG Ming-yu, GUO Yu-hao, et al. Study on the characteristic of boiling expansion process of superheated LPG and its vapor cloud explosion[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 78:104831.
- [13] 张瑞华, 陈国华, 张晖, 等. TNO多能法在蒸气云爆炸模拟评价中的工程应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(5):109-114.  
ZHANG Rui-hua, CHEN Guo-hua, ZHANG Hui, et al. Engineering applications of TNO multi-energy method in VCE simulation assessment[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2006, 34(5):109-114.
- [14] 郑远攀, 张应安, 冯长根, 等. 基于多能法和概率方程的井喷爆炸后果分析[J]. 科技导报, 2008, 26(21): 43-47.  
ZHENG Yuan-pan, ZHANG Yin-gan, FENG Chang-gen, et al. Consequence analysis for explosion of blowout based on multi-energy model and probit equation[J]. *Science & Technology Review*, 2008, 26(21): 43-47.
- [15] 王邵军, 吕东, 张网. 基于TNO多能法的蒸气云爆炸伤害范围评估研究[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(8):180-181.  
WANG Shao-jun, LV Dong, ZHANG Wang. Research on damage range assessment of steam cloud explosion based on TNO multi-energy method[J]. *Fire Science and Technology*, 2009, 28(8): 180-181.
- [16] VANDEN B, A C. The multi-energy method: A framework for vapor cloud explosion blast prediction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1989, 12:1-10.
- [17] 吕东, 李晋, 杨军. 蒸气云爆炸定量评估系统的研究与开发[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(12): 82-84.  
LV Dong, LI Jin, YANG Jun. Research and development of quantitative evaluation system for vapor cloud explosion[J]. *Fire Science and Technology*, 2009, 28(12): 82-84.
- [18] BAKER Q A. Vapor cloud explosion analysis[J]. *Process Safety Progress*, 1996(2):106-109.
- [19] 李春孝. 民用液化气泄漏爆炸威力的探析[J]. 消防科学与技术, 2004, 23(2):173-174.  
LI Chun-xiao. Analysis on explosion power of civil liquefied gas leakage[J]. *Fire Science and Technology*, 2004, 23(2): 173-174.
- [20] 宋元宁, 于立友, 李彩霞. TNT当量法预测某石化设备爆炸后果评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(3): 66-68.  
SONG Yuan-ning, YU Li-you, LI Cai-xia. Evaluation of explosion consequences of a petrochemical equipment predicted by TNT equivalent method[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2005, 1(3): 66-68.
- [21] CHANG S C, TO W M. A New Numerical Framework for Solving Conservation Laws—The Method of Space-Time Conservation Element and Solution Element [R]. NASA TM-104495, 1991.
- [22] WU Y, MA F, YANG V. Space-time method for detonation problems with finite-rate chemical kinetics[J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2004, 18(3): 277-287.
- [23] 管文涛, 洪滔, 董贺飞. 基于CE/SE方法模拟空气中RDX-Al悬浮粉尘的两相爆轰[J]. 爆炸与冲击, 2016, 36(5): 603-610.  
ZAN Wen-tao, HONG Tao, DONG He-fei. Numerical simulation of two-phase detonation of suspending RDX-Al dust in air with CE/SE[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(5): 603-610.
- [24] 王放. 基于改进CE/SE方法的煤油/空气连续旋转爆轰发动机工作特性研究[D]. 南京:南京理工大学, 2022.  
WANG Fang. Research on Operating Characteristics of kerosene/Air Continuous Rotating Detonation Engine based on improved CE/SE method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.
- [25] HAMID R, HOSSEIN S. Fluid structure interaction with a finite rate chemistry model for simulation of gaseous detonation

- metal-forming [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(41):23289–23302.
- [26] SHEN H, LIU K X, ZHANG D L. Three dimensional simulation of detonation propagation in a rectangular duct by an improved CE/SE scheme [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(12): 124–135.
- [27] WANG G, ZHU H, SUN Q, et al. An improved CE/SE scheme and its application to dilute gas-particle flows[J]. *Computer Physics Communications*, 2011, 182(8): 1589–1601.
- [28] ZHANG Z J, WEN C Y, LIU Y F, et al. Application of CE/SE method to gas-particle two-phase detonations under an Eulerian-Lagrangian framework [J]. *Journal of Computational Physics*, 2019, 394: 18–40.
- [29] 李象远, 姚晓霞, 申屠, 等. 高等学校化学学报[J]. 2020, 41: 512–520.
- [30] LIAO K X, WANG Y W, CHEN D, et al. Parametric study on natural gas leakage and diffusion in tunnels[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2023, 14(2): 04023003.
- [31] 徐景德. 矿井瓦斯爆炸冲击波传播规律及影响因素的研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2006.  
XU Jing-de. Research on shock wave propagation law and influencing factors of mine Gas explosion [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2006.
- [32] 武丹, 王健平. 粘性及热传导对于爆轰波的影响[J]. *应用力学学报*, 2012, 29(6): 630–635.  
WU Dan, WANG Jian-ping. Influences of viscosity and thermal conductivity on detonation waves [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2012, 29(6): 630–635.
- [33] 张连玉, 汪令羽, 苗瑞生. 爆炸气体动力学基础[M]. 北京:北京工业出版社, 1987.
- [34] 段玉龙, 周心权, 龚武, 等. 矿井瓦斯爆炸后巷道空气温度分布规律[J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(3): 318–323.  
DUAN Yu-long, ZHOU Xin-quan, GONG Wu, et al. Temperature Distribution in Lane-way Air After Mine Methane Explosions[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2010, 39(3): 318–323.
- [35] 段玉龙, 余明高, 姚新友, 等. 瓦斯爆炸后空间温度分布及热危害区域分析研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(1):56–62.  
DUAN Yu-long, YU Ming-gao, YAO Xin-you, et al. Spatial temperature distribution and thermal hazard region analysis after gas explosion [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(1):56–62.
- [36] 陈国华, 吴家俊. 地下密闭空间燃气爆炸冲击波传播规律[J]. *天然气工业*, 2017, 37(2):120–125.  
CHEN Guo-hua, WU Jia-jun. Propagation laws of gas explosion shock waves in underground confined space [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(2):120–125.
- [37] BAKER W E, COX P A, WESTINE J J, et al. *Explosion Hazards and Evaluation*[M]. Elsevier Science, 1983.
- [38] WANG Kan, QIAN Xin-ming, HE Yu-ru, et al. Failure analysis integrated with prediction model for LNG transport trailer and thermal hazards induced by an accidental VCE: A case study[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 108:104351.

## Research on Combustion Characteristics and Injury Effects of Methane Vapor Clouds in Tunnels

GU Lin-lin<sup>1</sup>, XU Yong-hang<sup>1</sup>, ZHU Huang-hao<sup>1</sup>, WANG Zhen<sup>2</sup>

(1. School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094; 2. School of Mechanical Engineering, Nanjing 210094)

**Abstract:** In order to explore the propagation patterns and characteristics of methane vapor cloud combustion waves in tunnels, the CE/SE (space-time conservation element and solution element) method in LS-DYNA software was employed to establish a pre-mixed explosion model of methane and air in the tunnel, which was validated through experimental data. In this paper, typical combustion waveforms of methane vapor cloud with a concentration 9.5% in different test positions were demonstrated by numerical simulation. The propagation and evolution law of overpressure and temperature was analyzed. The injury effects of overpressure and thermal radiation on human in tunnel were investigated. It was revealed that the combustion pressure wave along the tunnel can be divided into four stages: free expansion, reflection dissipation, wall acceleration, and Mach propagation. The pressure variation presented three characteristics: wall impact rise, reflective decay, and stable propagation. The pressure wave presented a sort of periodical reflection propagation mode radially, while the intensity was declining according to the consumption of methane. The temperature field evolved symmetrically from the ignition point to the tunnel entrance and the peak temperature decayed rapidly along the path. The temperature field radiated from the ignition point to the bottom of the tunnel, leading to a gradual convergence of in a certain section and decreased slowly over time. For the injury effects caused by a combination of combustion overpressure and thermal radiation, the fatal distance was 13.51m, the severe injury distance was 13.51–23.51 m, the moderate injury distance was 23.51–160 m while the concentration of methane vapor cloud was 5%. For the methane vapor cloud with a concentration 6.5%, those distances were 16.46 m, 16.46–45.36 m and 45.36–160 m respectively. As for a concentration 9.5%, the fatal distance was 20.58m and the severe injury distance was 20.58–160 m.

**Key words:** tunnel; methane combustion; combustion overpressure; temperature evolution; thermal radiation; injury effects

**CLC number:** TJ5; TJ089; X932

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024155

**Grant support:** National Key Research and Development Program (No. 2021YFC3002000), National Natural Science Foundation of China (No. 42002266)

(责编:高毅)