

中文引用格式:李胜男,于鼎淇,高科.掘进巷道瓦斯/氨气/空气混合物的爆炸特性研究[J].中国安全科学学报,2026,36(1):121-129.

英文引用格式:LI Shengnan, YU Dingqi, GAO Ke. Study on explosion characteristics of mixture of methane/ammonia/air in tunneling roadways[J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(1): 121-129.

掘进巷道瓦斯/氨气/空气混合物的爆炸特性研究^{*}

李胜男^{1,2}副教授,于鼎淇¹,高科^{**1,2}教授

(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院,辽宁 葫芦岛 125105;2 辽宁工程技术大学
矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁 葫芦岛 125105)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.01.0931

基金项目:辽宁省科学技术厅项目(2025-BS-0391,2025-BS-0401);国家自然科学基金资助(52274205,52474225)。

【摘要】为探究掘进巷道内掺氨对瓦斯爆炸传播特性的影响特征,从爆炸压力动力学与火焰传播机制2方面,系统研究不同掺氨比、初始压力及初始温度条件下瓦斯/氨气/空气混合物的爆炸行为;通过改变掺氨比例、初始压力与初始温度等关键参数,对比分析混合气体的爆炸超压演变过程与火焰传播特性。结果表明:氨气掺入对混合气体爆炸行为呈现先抑制后促进的作用,爆炸超压随掺氨比增大先降低后升高;火焰锋面位置与传播速度则随掺氨比增加而逐渐增大。在初始压力影响方面,爆炸超压峰值、火焰传播速度及火焰位置均随初始压力升高呈线性增长趋势。不同于初始压力的单一影响,初始温度对爆炸特性的影响较为复杂:在300~700 K范围内,爆炸超压随温度升高而增大,火焰传播轨迹与温度呈显著正相关;而当温度升至900 K时,火焰传播受到明显抑制,火焰锋面位置与速度均显著降低。掺氨比对瓦斯爆炸过程具有非单调影响,初始压力与温度分别以线性与非线性方式调控爆炸强度与火焰传播行为。

【关键词】掘进巷道; 瓦斯/氨气/空气混合物; 爆炸特性; 掺氨比; 火焰传播; 爆炸压力

Study on explosion characteristics of mixture of methane/ammonia/air in tunneling roadways

LI Shengnan^{1,2}, YU Dingqi¹, GAO Ke^{1,2}

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: To investigate the influence of ammonia admixture on methane explosion propagation characteristics in tunneling tunnels, the explosive behavior of methane/ammonia/air mixtures was systematically examined under varying ammonia blending ratios, initial pressures, and initial temperatures. The explosion overpressure evolution and flame propagation characteristics of the mixtures under varying ammonia blending ratios, initial pressures, and initial temperatures. Results indicate that the incorporation of ammonia exhibits a dual effect on the explosion behavior: initial suppression followed by enhancement. The explosion overpressure is observed to decrease first and then increase with rising

* 文章编号:1003-3033(2026)01-0121-09; 收稿日期:2025-09-20; 修稿日期:2025-11-24

** 通信作者:高科(1983—),男,山东莱芜人,博士,教授,主要从事矿井热动力灾害防治等方面的研究。E-mail:gaoke@lntu.edu.cn。

ammonia content, while the flame front position and propagation velocity progressively increase with higher ammonia ratios. Regarding the influence of initial pressure, the peak explosion overpressure, flame propagation velocity, and flame position all show linear increasing trends with elevated initial pressure. The influence of initial temperature on explosion characteristics is more complex. Within the range of 300–700 K, the explosion overpressure increases with temperature, and the flame propagation trajectory show a significant positive correlation with temperature. However, when the temperature reaches 900 K, flame propagation is markedly suppressed and manifested by significant decreases in both the flame front position and velocity. The study reveals that the ammonia blending ratio exerts a non-monotonic influence on the methane explosion process, while initial pressure and temperature regulate explosion intensity and flame propagation behavior in linear and nonlinear ways, respectively.

Keywords: tunneling roadway; methane/ammonia/air mixture; explosion characteristics; ammonia blending ratio; flame propagation; explosion pressure

0 引言

瓦斯爆炸灾害是煤矿重特大事故中占比最高、致灾最严重的灾害,严重制约我国煤矿安全和生产的发展^[1],在现代金属矿山开采中,凿岩爆破技术是提高安全性的重要手段^[2]。在巷道掘进过程中,通常使用炸药开展爆破工作,而铵油炸药作为一种爆破材料,因其优良的性能和广泛的适用性,逐渐成为矿山爆破作业的首选^[3]。与传统炸药相比,铵油炸药具有更高的爆炸速度和更强的破碎能力,同时其优良的水分适应性和低敏感性,使其在潮湿环境下仍能保持稳定的爆破效果^[4-5]。然而,该炸药爆破后常产生大量氨气,在通风能力不足的情况下氨气扩散会存留在井下空间^[6],和瓦斯气体混合后,易形成可燃混合气体,因此,针对瓦斯爆炸的有效抑制研究具有重要的理论和现实意义。

诸多学者针对混合物的爆炸及抑爆问题开展了丰富的研究,例如:滕洋洲等^[7]通过对比单/双爆源作用下爆炸冲击波对围岩冲击的影响发现,巷道内双爆源对巷道的冲击作用更大。李成兵^[8]运用敏感性分析法研究了 N₂、CO₂ 和 H₂O 抑制 CH₄ 爆炸的化学动力学机制,发现在 N₂、CO₂ 和 H₂O 的抑制作用下使后续的链式反应进程受到破坏。罗振敏等^[9]发现,最大爆炸压力与摩尔分数峰值相关性随当量比增大而减小。Li Shengnan 等^[10-11]发现,较小的煤尘可促进瓦斯点火,而高质量浓度煤尘和低压条件,煤尘存在对瓦斯点火有抑制作用;并且发现,更小的煤尘可有效促进两相爆轰,直接起爆发生。荆琦等^[12]研究发现,随着初始压力的增加,体积分数为 4% 的天然气起爆时,所需最低掺氨量逐渐降低。石静等^[13]从反应动力学角度分析了氨气对甲

烷/空气混合物爆炸的微观作用机制,得到随着氨气的加入,甲烷的爆炸极限线性下降的结论。王文和等^[14]研究了氨气和甲烷混合气体的爆炸极限和动力学过程,结果表明:氨气的存在使混合气体的爆炸下限上升,在某种程度上抑制甲烷爆炸。

目前,国内外关于瓦斯与氨气混合物爆炸的研究仍然十分有限^[15],针对瓦斯与氨气共存条件下的燃烧传播特征、爆压特征及爆炸压力等参数尚缺乏系统、连续和可对比的数据。为此,笔者聚焦于掘进巷道内瓦斯/氨气/空气混合物的爆炸特性,通过构建多尺度分析框架与高精度二维爆炸模型,耦合详细化学反应机制,系统揭示了掺氨比对瓦斯爆炸过程的复杂影响。研究主要从爆炸压力演化与火焰传播两个方面展开,考察了不同掺氨比、初始压力及初始温度条件下的爆炸行为。

1 爆炸特性模拟与模型基本假设

1.1 掘进巷道瓦斯/氨气/空气混合物爆炸特性工况模拟

为系统研究掘进巷道瓦斯/氨气/空气混合物的爆炸特性,考察掺氨比、初始压力与初始温度对混合物爆炸压力、压力震荡幅度及火焰传播行为的影响特征,具体模拟工况及参数设置见表 1。同时,所有计算均采用一致的边界条件、初始化设置及数值模型,以确保研究过程科学严谨、结果可重复。

表 1 参数设置

Table 1 Parameter setting	
研究参数	数值
掺氨比	1.06, 1.41, 1.77, 2.48
初始压力/MPa	0.1, 0.5, 1.5, 2.0
初始温度/K	300, 500, 700, 900

1.2 瓦斯/氨气/空气混合物爆炸过程基本假设

为准确模拟掘进巷道内瓦斯/氨气/空气混合物的爆炸过程,该过程涉及多相流动、化学反应与热传递等高度耦合的复杂机制,在建立数值模型时引入以下基本假设,以合理降低计算复杂度并确保模型的可求解性。

- 1) 瓦斯/氨气/空气混合物和反应生成气体均满足理想气体状态方程,满足质量守恒、动量守恒,能量守恒。
- 2) 所有壁面均设为刚性绝热边界,忽略滑移及传热效应。
- 3) 瓦斯集聚区瓦斯/氨气/空气是均匀混合气体。

1.3 瓦斯/氨气/空气混合物爆炸过程数学模型

1) 控制方程。采用可压缩反应流体纳维-斯托克斯 (Navier-stokes) 方程^[16]和组分输运方程作为控制方程来描述。控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = S_1$$

(1)

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) + \nabla p - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = S_2$$

(2)

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [(\rho E + p) \mathbf{U}] + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{U}) = \dot{\omega}_r + S_3$$

(3)

$$\frac{\partial (\rho Y_m)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{U}(\rho Y_m)] + \nabla \cdot \mathbf{s}_m = \dot{\omega}_m + S_4 (m = 1, 2, \cdots, M - 1)$$

(4)

$$p = \rho R T$$

(5)

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{U}) \mathbf{I} \right]$$

(6)

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{\mathbf{U}^2}{2}$$

(7)

式中: ρ 为气体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; $\mathbf{U}$ 为速度矢量, m/s ; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量, Pa ; Y_m 为组分的质量分数; s_m 为扩散通量, $\text{kg}/(\text{m}^2/\text{s})$; m 为组分编号; M 为组分总数; ∇ 为哈密顿算子; $\dot{\omega}_r$ 为化学反应放热率, W/m^3 ; $\dot{\omega}_m$ 为组分通过化学反应的生成或消耗率, $\text{kg}/(\text{m}^3/\text{s})$; R 为气体常数, $\text{J}/(\text{kg}/\text{K})$; T 为温度, K ; S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 分别为质量源项、动量源项、体积热源项和组分源项, $\text{kg}/(\text{m}^3/\text{s})$ 、 N/m^3 、 W/m^3 、 $\text{kg}/(\text{m}^3/\text{s})$; E 为单位质量流体的总能量, J/kg ; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\nabla \mathbf{U}$ 为速度梯度, s^{-1} ; $(\nabla \mathbf{U})^T$ 为速度梯度张量的转置, s^{-1} ; $\mathbf{I}$ 为单位张量; h 为单位质量流体的总能量为 J/kg ; h 为反应物的总焓, J/kg 。

2) 层流火焰计算公式。可燃气体的层流燃烧速度与温度、压力的计算公式,即

$$S_L = S_{L_0} = \left(\frac{T_u}{T_0} \right)^\alpha \left(\frac{p_u}{p_0} \right)^{-\beta}$$

(8)

式中: S_L 为可燃气体的层流火焰速度, m/s ; S_{L_0} 为可燃气体标准状态下的层流燃烧速度,取 $0.36 \text{ m}/\text{s}$; T_u 和 p_u 分别代表未燃气体的温度和压力, K 和 Pa ; T_0 和 P_0 分别为气体燃烧前的环境温度和压力, K 和 Pa ;指数 α 和 β 取值分别为 1.612 和 0.374 。

1.4 瓦斯/氨气/空气混合物爆炸过程物理模型

模拟采用的物理模型如图 1 所示,长×宽为 $5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的二维模型用于模拟掘进巷道内预混火焰的演化,并在模型内每隔 0.25 m 布置一个监控点 (如 M1—M21),模型采用二维均匀结构网格进行网格划分时,网格单元长度具体表现情况见表 2。考虑网格大小对数值模拟结果的影响,网格尺寸大小分别选择 $\Delta x = 0.5$ 、 1 和 2 mm 网格尺寸开展网格无关性验证最终选择 $\Delta x = 1 \text{ mm}$ 开展下列模拟工作。

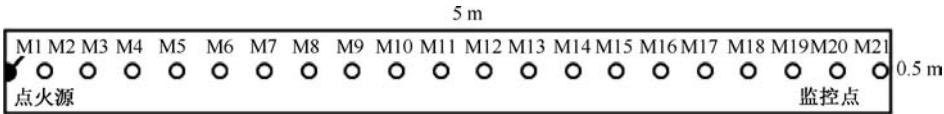


图 1 二维平面几何模型

Fig. 1 Two-dimensional planar geometric model

表 2 网格无关性验证

Table 2 Mesh independence verification			
最大单元长度/mm	网格数量	最小正交质量	计算时间/h
0.5	400 000	0.203 4	23.6
1	100 000	0.241 4	8.5
2	25 000	0.189 6	6.7

2 瓦斯/氨气/空气混合爆炸特性及影响分析

2.1 掺氨比对瓦斯/氨气爆炸特性的影响

1) 掺氨比影响下爆炸压力变化。掺氨比 (φ) 定义为氨气与瓦斯的质量比,不同掺氨比下各监控

点的压力变化如图 2 所示。如图 2a 所示,随着 φ 增加,瓦斯爆炸超压呈现先降低后升高。当 $\varphi = 1.06$, $t = 0.017$ s 时,爆炸压力达到首个压力峰值(4.52 MPa),而 $\varphi = 2.48$,首个压力峰值约为 4.32 MPa。对于 $\varphi = 1.41$ 、1.77 时,首个压力峰值分别为 4.39、4.38 MPa。随着 φ 增加,首个压力峰值逐渐降低。

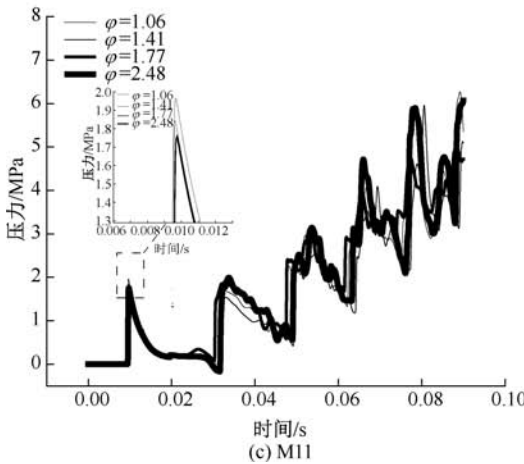
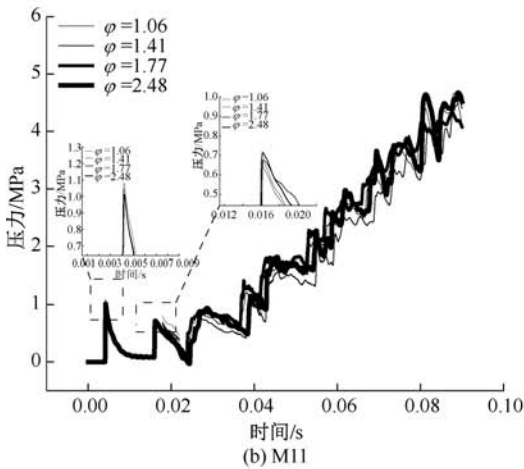
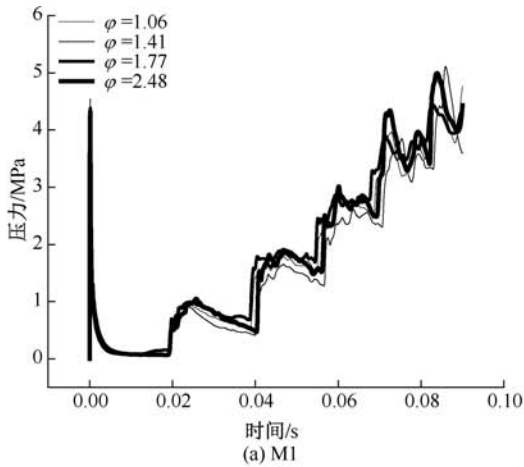


图 2 不同掺氨比下各监控点的压力变化
Fig. 2 Pressure variations at monitoring points
under varying ammonia blending ratios

需特别说明的是,在 $\varphi = 2.48$ 条件下,0.017 s 内出现的快速压力上升现象与压力测点布置的位置密切相关。当冲击波传播到右侧壁面后开始出现激波反射、叠加等复杂过程。随着爆炸波继续向前传播,如图 2b、图 2c 所示,爆炸超压维持先降后升趋势,且监控点 M21 的压力峰值高于点 M11。这是由于混合气体爆炸波传播过程中的能量再分配机制有关高氨掺混比(>1.86)时, NH_3 的吸热分解反应延迟了自由基链式反应进程,导致爆炸波阵面在传播路径上的湍流强化效应加剧。

不同掺氨比震荡幅度随时间变化,如图 3 所示。可知:在后期震荡阶段,随着 φ 增加,压力震荡幅度增大而频率降低。高 φ 下,氨气抑制导致初始燃烧不完全,未燃气体在激波作用下反复压缩并延迟燃烧,二次爆燃释放额外能量加剧波动;此外,氨气高比热容及分解所需活化能减缓反应速率,延长能量释放周期,降低震荡频率。

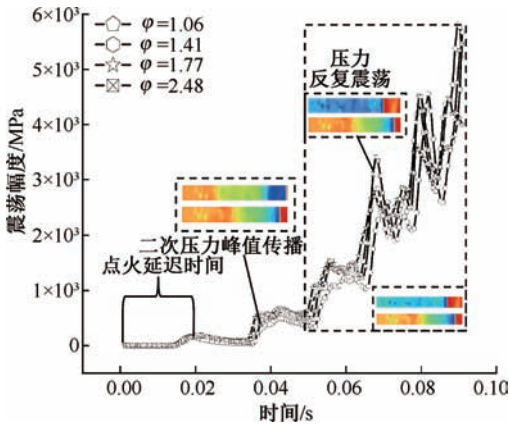


图 3 不同掺氨比震荡幅度随时间变化
Fig. 3 Temporal evolution of oscillation frequency
under varying ammonia blending ratios

图 4 为不同掺氨比条件下爆炸火焰形态变化,如图 4a 所示,巷道内火焰前锋的形态演化呈现显著的阶段性动力学行为,均遵循"指状火焰→内凹形变→准郁金香火焰(Tulip)结构"的演化路径,但不同掺氨比表现出差异化的形变动力学参数。在 $t = 30$ ms 时,火焰前锋呈现特征性指状扩散模式,此时瑞利-泰勒主导不稳定性主导火焰传播过程。当 $t = 60$ ms 时,火焰前锋径向速度梯度诱发火焰不稳定性,导致火焰面产生初期内翻现象,但尚未满足 Tulip 火焰形成的临界条件($t < 140$ ms)。如图 4b、图 4c 所示,当 $\varphi \geq 1.41$ 时,内凹形变起始提前至 $t = 40$ ms,而贫燃工况($\varphi = 1.06$)则延迟至 $t = 60$ ms,表明燃料组分对火焰失稳临界条件的调制作用。当传

播至 $t = 140\text{ ms}$ 时,火焰前锋发生完整的拓扑转变,形成典型的 Tulip 火焰结构。掺氨比与火焰内凹深度呈正相关,当 φ 从 1.06 增至 1.77 时,最大内凹深度增加。

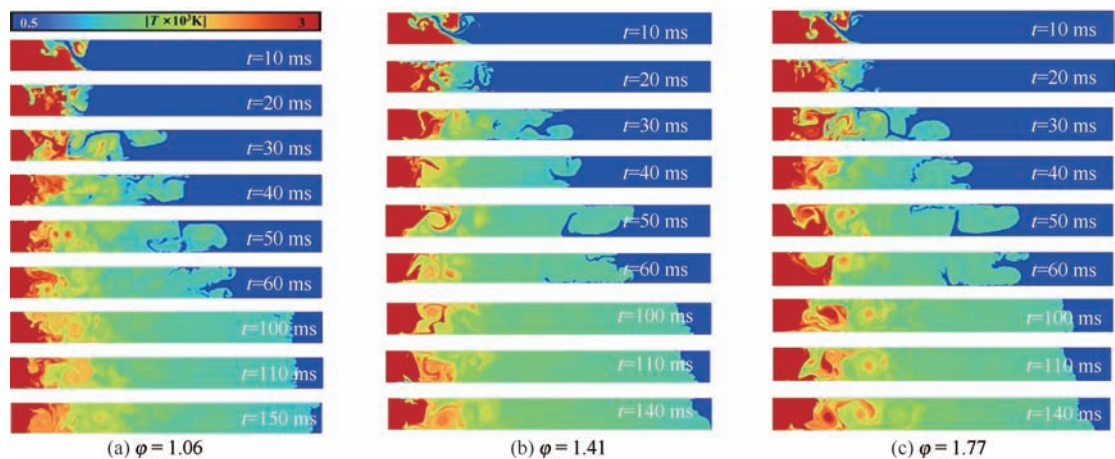


图 4 不同掺氨比下火焰形态

Fig. 4 Flame morphology evolution under varying ammonia blending ratios

2) 掺氨比影响下火焰特征变化。火焰传播位置和火焰传播速度如图 5 所示,图 5a 所示,当 $t = 20\text{ ms}$ 时,已燃气体的温度达到最大值,温度对未燃气体的影响已经达到最大,但管内的压力不断增加,在管内温度达到最大,压力升高,在不存在湍流激励的作用下,层流火焰速度会不断减小,因此,火焰传播速度减小;当 $21\text{ ms} < t < 30\text{ ms}$ 时,火焰传播速度减小;当 $31\text{ ms} < t < 40\text{ ms}$ 时,由于湍流的激励作用,火焰传播速度增加;当 $41\text{ ms} < t < 50\text{ ms}$ 时,火焰传播速度减小。当 $51\text{ ms} < t < 60\text{ ms}$ 时,火焰传播速度增加,当 $61 < t < 80\text{ ms}$ 时,火焰传播速度又短暂上升,在 $t > 80\text{ ms}$ 时,火焰传播速度持续下降。图 5b 展示了不同掺氨比下火焰锋面位移随时间的变化关系,可知:在受限燃烧腔内,火焰锋面的传播轨迹与掺氨比呈显著正相关,随着 φ 从 1.06 提升至 2.48,火焰锋面平衡位置越趋近于燃烧腔前端。掺氨比增大使火焰锋面位置与火焰传播速度均相应提高。

2.2 初始压力对瓦斯/氨气/爆炸特性的影响

1) 初始压力影响下爆炸压力变化。不同初始压力情况下各监测点处的爆炸压力时程曲线如图 6 所示。图 6a 为监控点 1 在不同初始压力下的爆炸超压变化曲线。当 p_0 从 0.1 MPa 增至 2.0 MPa 时,压力峰值显著上升至 8.2 MPa,且压力上升速率随之加快。这是由于 p_0 增加提升了气体能量密度,加快化学反应速率,使能量释放更集中,冲击波强度增强。在激波到达右侧壁面时会发生复杂的反射和叠加现象中,次生压力波峰值与 p_0 呈现显著的正相关性。当 $p_0 = 2.0\text{ MPa}$ 时, $t = 0.032\text{ 49 s}$ 时的次生压力

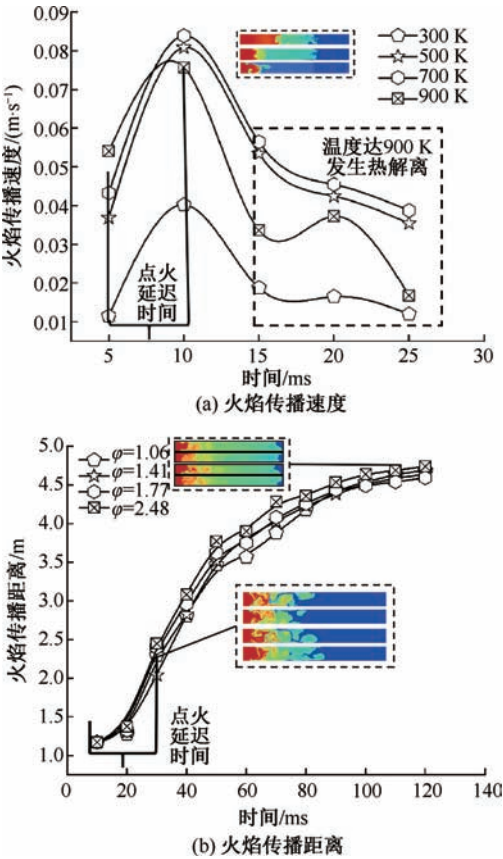


图 5 不同掺氨比火焰传播特性

Fig. 5 Flame propagation characteristics with varying ammonia blending ratios

峰值 3.0 MPa;而 p_0 为 0.1 MPa 时,次生压力峰值仅 0.3 MPa。当 $p_0 = 1.5、0.5\text{ MPa}$,对应的次生压力峰值分别为 2.7、1.1 MPa。随着爆炸波继续向前传播,如图 6b、6c 所示,监控点 M11 和 M21 的压力变

化趋势与监控点 1 基本一致。研究发现初始压力显著改善了冲击波的抗衰减能力,压力峰值随 p_0 上升显著提高。随着初始压力的升高,爆炸强度显著增强,表现为峰值超压呈正相关增长。

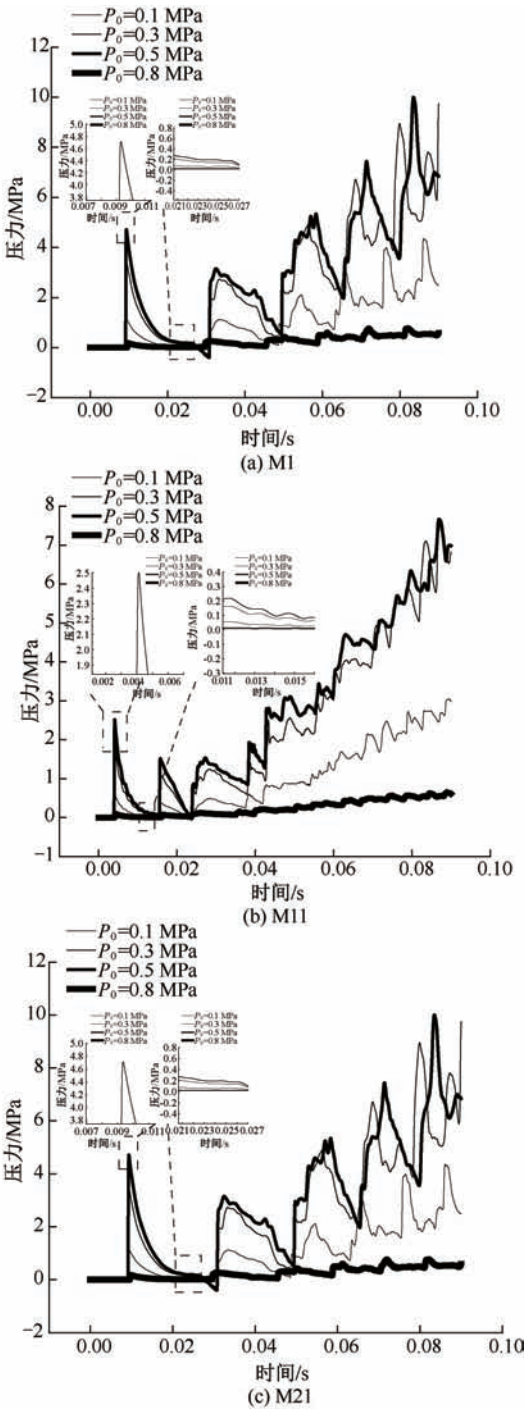


图 6 不同初始压力下各监控点的压力变化
Fig. 6 Pressure variations at monitoring points under varying initial pressures

不同初始压力条件下,压力震荡幅度的变化如图 7 所示。发现随着爆炸波继续传播进入后期震荡过程,初始压力越高,压力震荡幅度越大,震荡频率

越低。高压条件下,介质分子间相互作用力增强,气体黏性耗散效应更为显著。这会延长系统从压缩状态恢复到平衡态的时间尺度,表现为震荡周期拉长、频率降低。

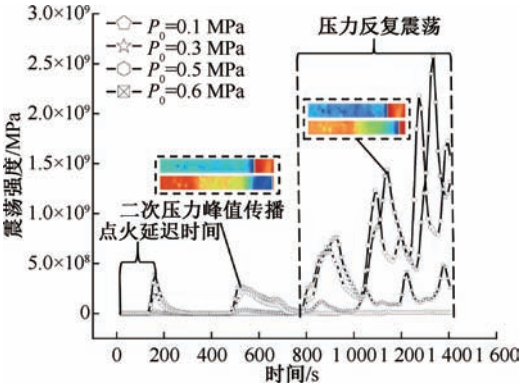


图 7 不同初始压力下震荡幅度随时间变化
Fig. 7 Temporal evolution of oscillation amplitude under varying initial pressures

2) 初始压力影响下火焰特征变化。不同初始压力下的火焰形态演变如图 8 所示,分析表明:初始压力显著改变了火焰失稳的动力学发展路径。如图 8a 所示,在高压工况 ($p_0 = 0.5$ MPa) 下,火焰呈现出一个非典型的演化序列:首先形成 Tulip 结构,随后火焰锋面骤然收缩,继而发展为二次指状传播,最后经历一个延迟的再次内翻过程。这一路径明显区别于基准工况。如图 8b 所示, $t = 20$ ms 出现锋面坍塌现象,且收缩速率与初始压力呈正相关,该阶段可能与压力梯度诱导的瑞利泰勒不稳定性增强有关。 $t = 50$ ms 时,火焰以再生指状形态进入观测区域,表明热扩散不稳定性主导传播过程。值得关注的是,火焰传播路径呈现压力依赖的空间各向异性。

图 9 显示了不同初始压力下的火焰特征变化,其中,不同初始压力条件下的火焰位置展示如图 9a 所示。当时间 $t = 20$ ms 时,已燃气体的温度达到最大值,随后压力不断增加,在管内温度达到最大,压力升高,在不存在湍流激励的作用下,层流火焰速度会不断减小,因此,火焰传播速度减小;当 21 ms $< t < 40$ ms 时,火焰传播速度减小; 40 ms $< t < 60$ ms 时,湍流激励使火焰传播速度再次上升;当 $t > 60$ ms 时,火焰传播速度减小。图 9b 展示了不同初始压力条件下火焰锋面位移随时间演变的定量关系,数据表明:在受限燃烧腔内,火焰锋面的传播轨迹与初始压力呈显著正相关,随着 p_0 从 0.5 MPa 提升至 1.5 MPa,火焰锋面平衡位置越趋近于燃烧腔前端。

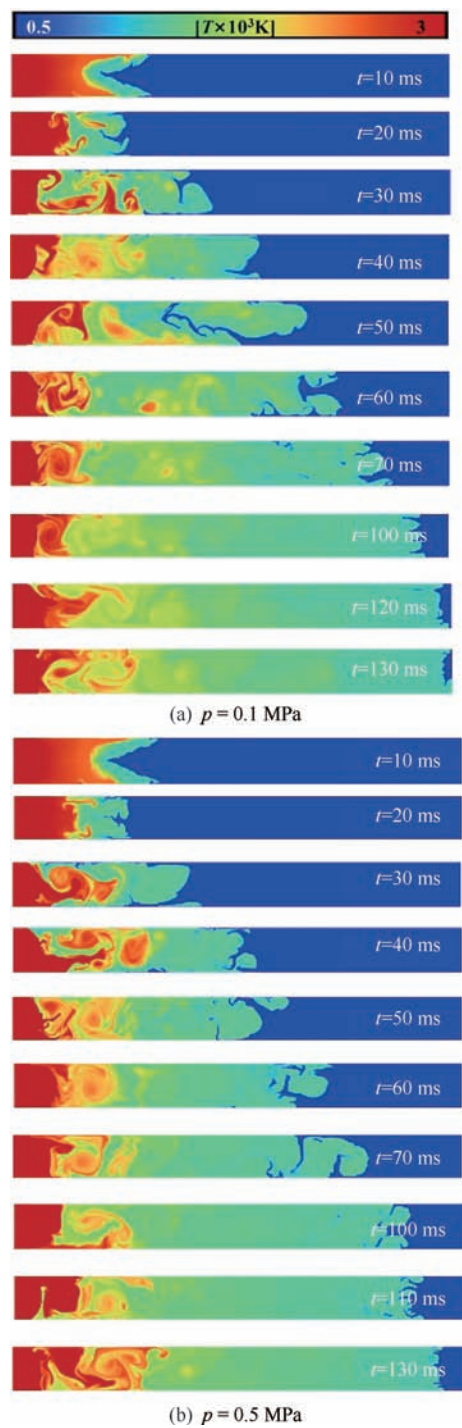


图 8 不同初始压力下的火焰形态

Fig. 8 Flame morphology evolution under varying initial pressures

2.3 温度对瓦斯/氨气的爆炸特性的影响

1) 温度影响下爆炸压力变化。不同温度下各监测点的压力变化如图 10 所示,由图 10a 可知:当初始温度从 300 K 增至 900 K 时,压力峰值由 0.42 MPa 上升至 1.78 MPa,且压力上升速率随初始温度的升高而增大。高温降低了反应活化能,促进燃料

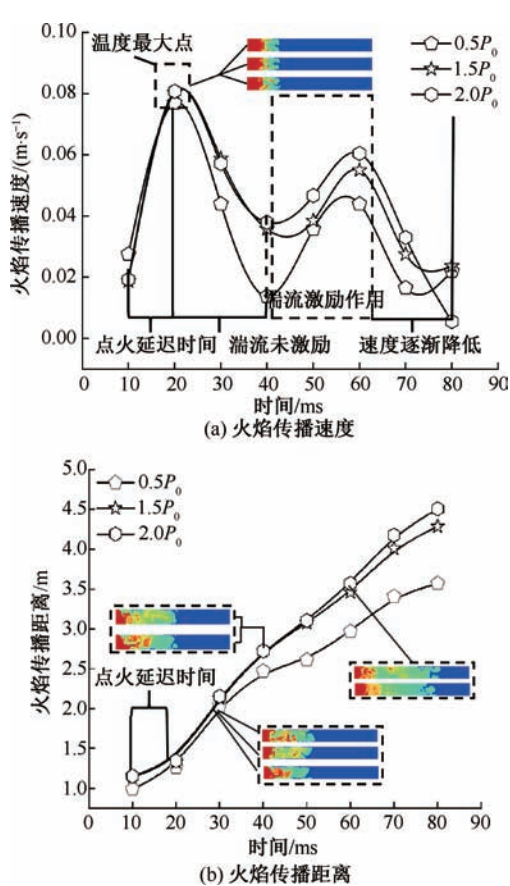


图 9 不同初始压力火焰传播特性

Fig. 9 Flame propagation characteristics at different initial pressures

分子解离生成更多自由基(如·OH、·H),加速链式反应进程,导致能量释放速率加快。且氨气在高温下更易分解为 H₂ 和 N₂,生成的氢气具有更宽可燃极限和更高燃烧速度,与瓦斯协同作用进一步强化爆炸强度。随着爆炸波的继续传播,激波后期发展为震荡过程,随初始温度的不断增加,后期震荡幅度逐渐增大,震荡频率逐渐降低。图 10b、图 10c 为监控点 M11、M21 点的压力变化特征,其趋势与监控点 M1 基本一致。当初始温度 T₀=900 K 时,监控点 M11 的压力峰值达到 5.84 MPa。由于监控点 M11 位于传播路径的中段,较高的温度增强了初始冲击波强度。监控点 M21 压力曲线表明:随着初始温度增大,压力峰值提升。

2) 温度影响下火焰特征变化。不同温度影响下的火焰传播如图 11 所示,当 T₀≤700 K 时,火焰传播呈现“加速-稳定-结构转变”的经典演化路径;而 T₀=900 K 工况则表现出反常的“速度抑制-形态退化”现象。在 T₀=500 K 工况中,t=20 ms 时火焰以典型指状结构侵入燃烧腔体,最终于 t=50 ms 抵

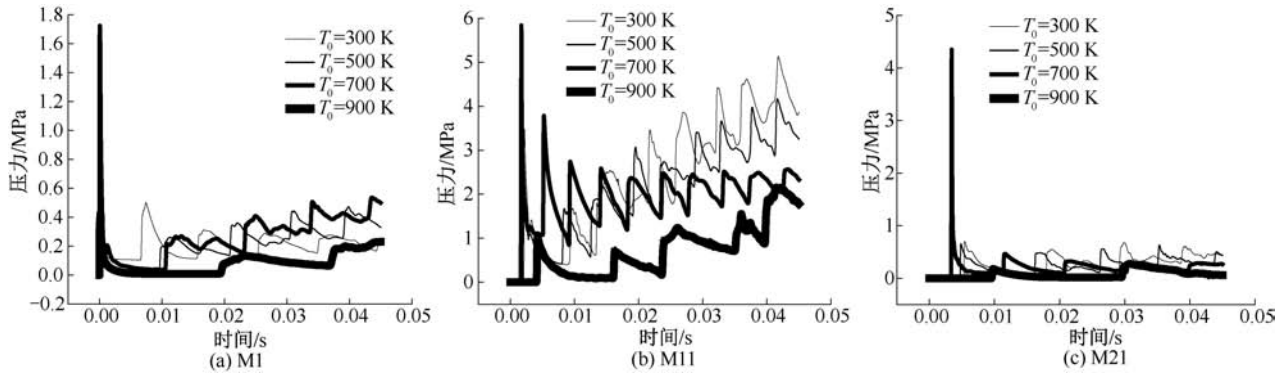


图 10 不同温度下各监控点的压力变化

Fig. 10 Pressure variations at monitoring points under varying temperatures

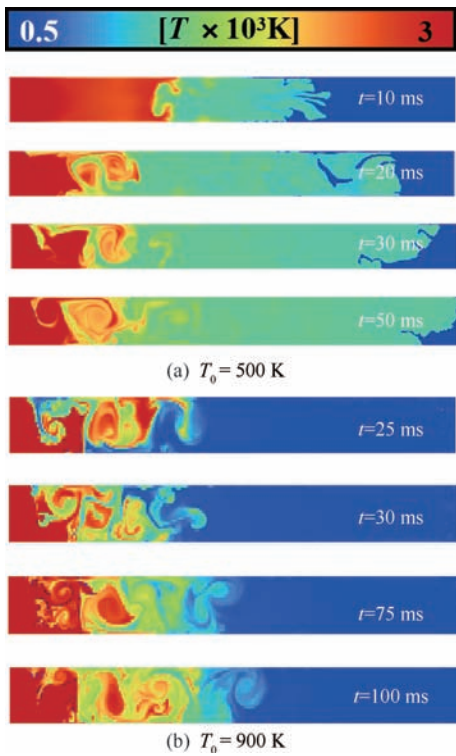


图 11 不同初始温度下的火焰形态

Fig. 11 Flame morphology evolution under varying initial temperatures

达约束边界。而当 T_0 提升至 700 K 时,火焰动力学呈现显著相变特征: $t = 20$ ms 时即出现曲率反转现

象,形成准 Tulip 结构锥形;至 $t = 40$ ms 时形成完整转变。当温度在 500~700 K 范围时,随温度升高,火焰传播速度也随之升高,当温度为 900 K 时,火焰传播要远慢于另外三种工况。当时间 $t = 10$ ms 时,已燃气体的温度达到最大值,对未燃气体的影响已经达到最大。当 $11 \text{ ms} < t < 25 \text{ ms}$ 时,火焰传播速度持续下降。当温度处在 500~700 K 区间内,火焰锋面的传播轨迹与温度呈显著正相关,但当温度为 900 K 时,火焰传播受到抑制。

3 结 论

1) 随着掺氨比增加,对爆炸超压的抑制作用先增强后减弱,最终转变为促进作用。存在临界掺氨比例阈值,超过该阈值($\varphi = 1.86$)后,系统从抑制燃烧转为促进爆炸强度。此外,随着掺氨比增大,增加火焰锋面位置和火焰锋面速度越大。

2) 初始压力增加会加快压力上升速率,缩短超压达到峰值的时间、增加火焰锋面位置和火焰锋面速度。源于较高的初压可抑制冲击波能量耗散,降低衰减率。

3) 初始温度越高,爆炸超压峰值越大,压力上升速率越快。初始温度对火焰传播有非线性双重效应:在 300~700 K 区间内,火焰传播轨迹与温度正相关;但当温度为 900 K 时,火焰传播受到抑制。

参 考 文 献

- [1] 李敏,王丹,贺珊,等. 煤矿瓦斯爆炸风险评估研究综述及进展[J]. 中国安全科学学报, 2025,35(2):127-136. LI Min, WANG Dan, HE Shan, et al. Review and progress of coal mine gas explosion risk assessment research[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(2):127-136.
- [2] 于振建,侯钧,田向亮,等. 李楼铁矿井下爆破开采氨气体积分数分布规律及溯源分析[J]. 工业安全与环保, 2025,51(8):99-104. YU Zhenjian, HOU Jun, TIAN Xiangliang, et al. Distribution and source analysis of ammonia concentration in underground blasting mining of Lilou iron mine[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2025, 51(8): 99-104.

- [3] 马国强. 乳化铵油炸药耦合装药结构在掘进爆破中的应用[J]. 采矿技术, 2024,24(2):113-118.
MA Guoqiang. Application of emulsion ANFO coupling charge structure in tunneling blasting[J]. Mining Technology, 2024,24(2):113-118.
- [4] 汪旭光. 乳化炸药[M]. 北京:冶金工业出版社, 2008:18-20.
- [5] 王运敏, 李刚, 刘建国, 等. 我国非煤矿山职业健康防控技术研究现状、挑战及展望[J]. 金属矿山, 2024(9):1-12.
WANG Yunmin, LI Gang, LIU Jianguo, et al. Research status, challenges and prospects of occupational health prevention and control technology in non-coal mines in China[J]. Metal Mine, 2024(9):1-12.
- [6] 黄子超, 司荣军, 薛少谦. 抑爆粉剂浓度及粒度对瓦斯爆炸抑制效果的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2018,14(4):89-94.
HUANG Zichao, SI Rongjun, XUE Shaoqian. Influence of concentration and particle size of explosion suppression powder on gas explosion suppression effect[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018,14(4):89-94.
- [7] 滕洋洲, 叶青, 贾真真. 双爆源瓦斯爆炸对巷道冲击破坏特性的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2025,35(2):196-202.
TENG Yangzhou, YE Qing, JIA Zhenzhen. Influence of double explosion sources gas explosion on impact damage characteristics of roadway[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(2):196-202.
- [8] 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.
LI Chengbing. Chemical kinetic mechanism analysis of methane explosion suppression by $N_2/CO_2/H_2O$ [J]. China Safety Science Journal, 2010,20(8):88-92.
- [9] 罗振敏, 罗传旭, 刘利涛, 等. 多元混合气体对瓦斯爆炸动力学特性影响研究[J]. 安全与环境学报, 2024,24(8):2 949-2 960.
LUO Zhenmin, LUO Chuanxu, LIU Litao, et al. Effect of multi-component mixed gases on dynamic characteristics of gas explosion[J]. Journal of Safety and Environment, 2024,24(8):2 949-2 960.
- [10] LI Shengnan, GAO Ke, XIA Huihuang, et al. Effect of low blockage ratio obstacle on explosion characteristic in methane/air mixture[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2024,17(9):DOI:10.1016/j.arabjc.2024.105890.
- [11] LI Shengnan, LI Shangpeng, XIE Shumeng, et al. Numerical simulations of direct detonation initiation and propagation in methane/air mixtures containing coal particles[J]. Combustion and Flame, 2025,275:DOI:10.1016/j.combustflame.2025.114120.
- [12] 荆琦, 周硕, 周芮, 等. 多组分天然气掺氢爆炸下限实验及模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024,20(7):43-48.
JING Qi, ZHOU Shuo, ZHOU Rui, et al. Experimental and model study on lower explosion limit of multi-component natural gas blended with hydrogen[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2024,20(7):43-48.
- [13] 罗振敏, 石静, 王涛, 等. NH_3 影响 CH_4 爆炸特性及反应动力学研究[J]. 中国安全科学学报, 2020,30(9):51-58.
LUO Zhenmin, SHI Jing, WANG Tao, et al. Study on influence of NH_3 on CH_4 explosion characteristics and reaction kinetics[J]. China Safety Science Journal, 2020,30(9):51-58.
- [14] 王文和, 牟丹, 李润之, 等. NH_3/CH_4 混合气体爆炸极限试验研究及动力学分析[J]. 安全与环境学报, 2021,21(4):1 545-1 551.
WANG Wenhe, MOU Dan, LI Runzhi, et al. Experimental study and kinetic analysis on explosion limits of NH_3/CH_4 mixture[J]. Journal of Safety and Environment, 2021,21(4):1 545-1 551.
- [15] 张莉聪, 李斯曼, 周振兴. 煤矿瓦斯多相协同抑爆的研究进展与展望[J]. 中国安全科学学报, 2023,33(增1):97-104.
ZHANG Licong, LI Siman, ZHOU Zhenxing. Research progress and prospect of multi-phase cooperative suppression of coal mine gas explosion[J]. China Safety Science Journal, 2023,33(S1):97-104.
- [16] BATCHELOR G K. An introduction to fluid dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1967:151-161.

作者简介: 李胜男 (1996—),女,辽宁铁岭人,博士,副教授,主要从事矿井爆炸、矿井通风等方面的研究。E-mail:leeseungnan@163.com。

