DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0393-08

小尺寸管道内二氧化碳抑制甲烷爆炸效果的实验及数值模拟*

罗振敏[1,2],王 涛[1,2],程方明[1,2],宋 钰[1,2],吴 慷[1,2]

(1.西安科技大学能源学院,陕西 西安 710054;
2.西安科技大学西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室,陕西 西安 710054)

摘要:为了有效防治矿井瓦斯爆炸事故,以瓦斯的主要成分甲烷作为模拟气体,运用自主设计改装的XKWB-S型小尺寸石英玻璃管道实验系统,结合高速摄影仪,并采用FLACS数值模拟软件,研究惰性气体抑爆条件下甲烷燃烧爆炸特性,进行体积分数为6%~27%的CO_2抑制体积分数为9%CH_4爆炸的实验及数值模拟,结果表明:各组分混合气体在爆炸传播过程中,爆炸压力、火焰锋面速度和气体运动速度均呈现一定程度的波动,且压力和速度没有同时达到最大值;CO_2的加入有效抑制了甲烷/空气反应,且添加CO_2体积分数越大,抑爆效果越明显,模拟结果与实验结果基本吻合。

关键词:爆炸力学;火焰传播特性;FLACS软件;瓦斯爆炸;CO_2

中图分类号:O381 **国标学科代码**:1303510 **文献标志码**:A

瓦斯爆炸事故是煤炭生产中最主要的灾害之一。瓦斯主要成分是甲烷,对瓦斯(甲烷)爆炸的特性、传播规律已有大量的理论分析、数值模拟和实验研究,对瓦斯抑爆技术也展开了不少有效探索[1-3]。目前较为常见的抑爆技术有惰性气体抑爆、水系抑爆、粉体抑爆、多孔材料抑爆和气溶胶抑爆等。由于瓦斯爆炸的危险性以及实验条件的制约,使得实验研究在规模、全面性等方面具有一定局限性。数值模拟是实验研究的外延,可以弥补实验的不足,与其互为补充,并且具有快速、经济的优点。

在惰性气体抑制瓦斯爆炸的实验研究与数值模拟方面,钱海林等[4]从爆炸极限、抑爆效果和极限氧体积分数3个方面研究了一定比例的N_2/CO_2混合气体对甲烷爆炸的影响;喻健良等[5-6]数值模拟了He与N_2作用下圆管内高速爆燃火焰的淬熄现象,并对惰性气体在可燃性气体活性与圆管直径不同的情况下的淬熄效果做出分析;王建等[7]对于惰性气体对H_2/O_2混合气体爆轰性能的影响机制进行了理论计算、反应机理模拟和实验研究,指出N_2、H_2O、CO_2对H_2/O_2气体的阻尼能力依次增加,且由于其化学阻尼机制不同,各惰性气体抑制爆炸反应进程的能力也不同;王连聪等[8]用化学反应动力学理论和详细的瓦斯爆炸反应机理,对封闭空间内水和CO_2影响瓦斯爆炸反应动力学特性进行了分析;贾宝山等[9-10]运用化学动力学计算软件CHEMKIN模拟了N_2及CO_2对瓦斯爆炸过程中反应物、自由基、爆炸后产生的主要致灾性气体的体积分数以及甲烷总消耗速率等变化的影响,并分析了两者对瓦斯爆炸反应过程影响的异同;何昆[11]研究了纯氧环境下CO_2对甲烷爆炸极限的影响,并用爆炸三角形分析指出,CO_2对甲烷爆炸的抑制效果好于N_2;李成兵等[12-13]对$N_2/CO_2/H_2O$抑制甲烷燃烧进行了数值模拟,并对其抑制机理进行了理论分析。

以上研究,对于惰性气体抑爆条件下瓦斯燃烧爆炸过程中各流场分布特征的研究尚不够深入,因此,本文中拟在前人的研究基础上,以瓦斯的主要成分甲烷作为瓦斯的模型气体,运用小尺寸石英玻璃

* **收稿日期**:2013-11-11;**修回日期**:2014-04-04
基金项目:国家自然科学基金项目(51304155);陕西省科技攻关项目(2015SF280);
陕西省重点科技创新团队计划项目(2012KCT-09);
西安科技大学博士启动基金项目(2013QDJ048)
第一作者:罗振敏(1976—),女,博士,教授,luozm9903@163.com。

爆炸管道和 FLACS 模拟软件对 CO_2 影响下的甲烷燃烧爆炸火焰传播特性及其各流场分布特征进行实验和数值模拟，结果表明：CO_2 的加入有效抑制了甲烷/空气反应，模拟结果与实验结果基本吻合，可对煤矿现场的安全工作有所指导。

1 实验与数值方法

1.1 实验系统

XKWB-S 型实验系统主要由石英玻璃爆炸管道、高速摄影仪、点火系统、时间同步控制系统组成，如图 1 所示。石英玻璃管道内径 88 mm、壁厚 16 mm、长 1 600 mm；高速摄影仪为日本 FASTCAM Super 10K Series，为了拍摄火焰在石英管道中的传播特性，实验中采用为 500、125 s^{-1} 的拍摄速度；时间同步控制系统确保在点火的同时触发高速摄影仪，进行火焰图像采集。实验在常温、常压下进行，温度 14～16 ℃，湿度 56%～64%RH。配制 CH_4 体积分数为 9%的空气/CH_4 混合气体（以下简称 9% CH_4），以及体积分数分别为 6%、9%、12%、15%、18%、21%、24%和 27%的 CO_2 与 9%CH_4 的空气/CH_4/CO_2 混合气体，研究 9%CH_4 在上述各体积分数 CO_2 气体影响下的火焰传播特性。配气时，首先按照质量流量原理往管道内充入一定量的实验所需气体，再用气体循环泵循环 5 min 使其混合均匀，采用 SP3430 高精度气相色谱仪检验所配混合气体浓度。配气和实验过程中，玻璃管道另一端弱封闭，点火后火焰冲击波冲破弱封闭端，起到泄爆作用。

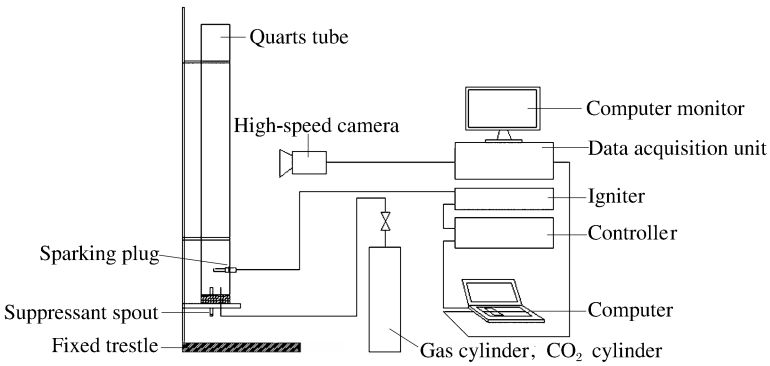

图 1 XKWB-S 实验系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of XKWB-S experimental setup

1.2 数学模型与数值方法

1.2.1 数学模型

受限空间气体爆炸过程是一个快速的燃烧反应过程，满足质量、动量及能量守恒和化学组分平衡方程。对基本方程进行 Reynolds 分解和平均，在各向同性湍流条件下，引入各向同性湍流粘度系数的概念，则可得到以相湍流燃烧的时均方程组[14]为：

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

动量方程：

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

能量方程：

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j h-\frac{\mu_{\mathrm{eff}}}{\sigma}\frac{\partial h}{\partial x_j}\right)=\frac{\mathrm{D}p}{\mathrm{D}t}+S_{\mathrm{h}}+S \tag{3}$$

化学组分平衡方程：

$$\frac{\partial(\rho Y)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j Y-\frac{\mu_{\mathrm{eff}}}{\sigma}\frac{\partial Y}{\partial x_j}\right)=R \tag{4}$$

式中：x_i、x_j 和 t 分别为空间和时间坐标；ρ、p、h 和 Y 分别为密度、压力、总焓、可燃性气体质量分数，k 为湍流动能；u_i 为 i 方向的速度分量，R 为混合气体的时均燃烧速率，σ 为 Prandtl 数，$S_h=\tau_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_j}$，$\tau_{ij}=\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu_{eff}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}$；$S$ 为耦合辐射而引起的辐射源项，在辐射模型中定义，μ_{eff} 为有效黏性，$\mu_{eff}=\mu+\mu_t$，μ_t 为分子黏性系数，$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$ 为湍动黏度，其中 C_μ 为计算常数，ε 为湍动能耗散率；δ_{ij} 为克罗内克符号，$\delta_{ij}=\begin{cases}1 & i=j\\0 & i\neq j\end{cases}$。

对于爆炸过程中的湍流特性，选用 k-ε 湍流模型进行描述，其基本方程如下：

k 方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j k-\frac{\mu_{eff}}{\sigma}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)=G-\rho\varepsilon \tag{5}$$

ε 方程：

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_j\varepsilon-\frac{\mu_{eff}}{\sigma}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right)=C_1G\frac{\varepsilon}{k}-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

式中：$G=G_k+G_b$，$G_k=\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\delta_{ij}\left(\rho k+\mu_{eff}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right]$，$G_b=-\frac{1}{\rho}\left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma}\right)g_i\frac{\partial\rho}{\partial x_i}$，为浮升力影响引起的湍流动能产生项，其中 g_i 为重力加速度在 i 方向上分量；C_1、C_2 为经验系数。

1.2.2　数值方法与边界条件

几何模拟内径 88 mm、长 1 600 mm（$L/D=18$）、壁厚 16 mm 的石英玻璃管，一端封闭另一端敞口。点火源位于距离封闭端的底面 10 cm 处的管道中心，传感器设置在管道长轴的正中心处，可采集爆炸过程中管道中心处的温度、压力、气体运动速度等流场参数。对整个计算区域进行均匀网格划分，采用阶梯型边界逼近真实边界。沿容器壁面，速度给无滑移条件，壁面法向压力、温度和密度梯度均指定为 0。点火前混合气体处于常温、常压状态。

整个模拟过程采用三维非稳态数值计算方法，用控制容积积分法导出离散微分方程，SIMPLE 压力修正算法来确定压力、速度场，离散微分方程的求解则采用交替方向迭代法，计算时间步长 $\Delta t=10$ μs。

2　结果与分析

2.1　CO_2 对甲烷爆炸火焰传播特性参数的影响

图 2 为实验过程中 9%CH_4 在 6%～15%CO_2 影响下的火焰传播过程，高速摄影仪拍摄速度为 500 s^{-1}，18%CO_2 影响下管道中只有极微弱的淡蓝色火焰，在此传播过程图像略去。21%～27%CO_2 作用时，点火后根据高速摄影仪的拍摄记录，爆炸管道内没有发生变化，取得点火前后管道内的气体试样进行色谱分析对比，气样成分变化较小，可忽略不计，即 9%CH_4 在 21%～27%CO_2 的影响下没有发生爆炸。从图中可以看出，随着添加 CO_2 体积分数的递增，火焰强度、亮度均逐渐下降。CO_2 添加量为 12%时，由于 CH_4 未完全燃烧生成 CO，管道内开始出现蓝色火焰，随后火焰亮度显著降低，添加量升至 15%时，管道内部只有微弱的火苗传播且时间较长。

体积分数 9%的 CH_4 和其添加 6%～12%的 CO_2 后，其火焰锋面传播速度对比趋势如图 3 所示，加入 CO_2 后爆炸火焰锋面的传播速度明显降低。速度峰值由未添加 CO_2 时的 82.81 m/s 下降至添加 12% CO_2 时的 42.57 m/s，降幅约 49%。加入 CO_2 后，混合气体爆炸火焰锋面速度在 0～24 ms 平缓增大，约 24 ms 时达到峰值，24～34 ms 火焰锋面传播速度稳定下降，34 ms 时速度最小。此后除添加 6% CO_2 外，由于火焰的不稳定性和湍流作用，其余混合气体的火焰锋面速度突然增大，有达到二次波峰的趋势。就其整体而言，随着 CO_2 添加量的增大，火焰锋面速度降低幅度递增。CO_2 气体的抑爆作用在于，其降低了反应罐中 O_2 的体积分数，使得氧分子与 CH_4 分子接触机会减少，没有足够的 O_2 和

氧自由基参加支链反应，导致 CH_4 的氧化反应速率降低；依据分子碰撞理论，CO_2 加入后在分子的碰撞过程中，链式反应中的活化自由基或自由原子的能量转移到 CO_2 上，使其活性降低以致燃烧中断，抑制了爆炸能量的传播[11]。另外，由于 CO_2 本身就是甲烷/空气反应产物的主要组成部分，因此添加的 CO_2 可以有效阻止 CH_4 燃烧爆炸反应向正向进行。

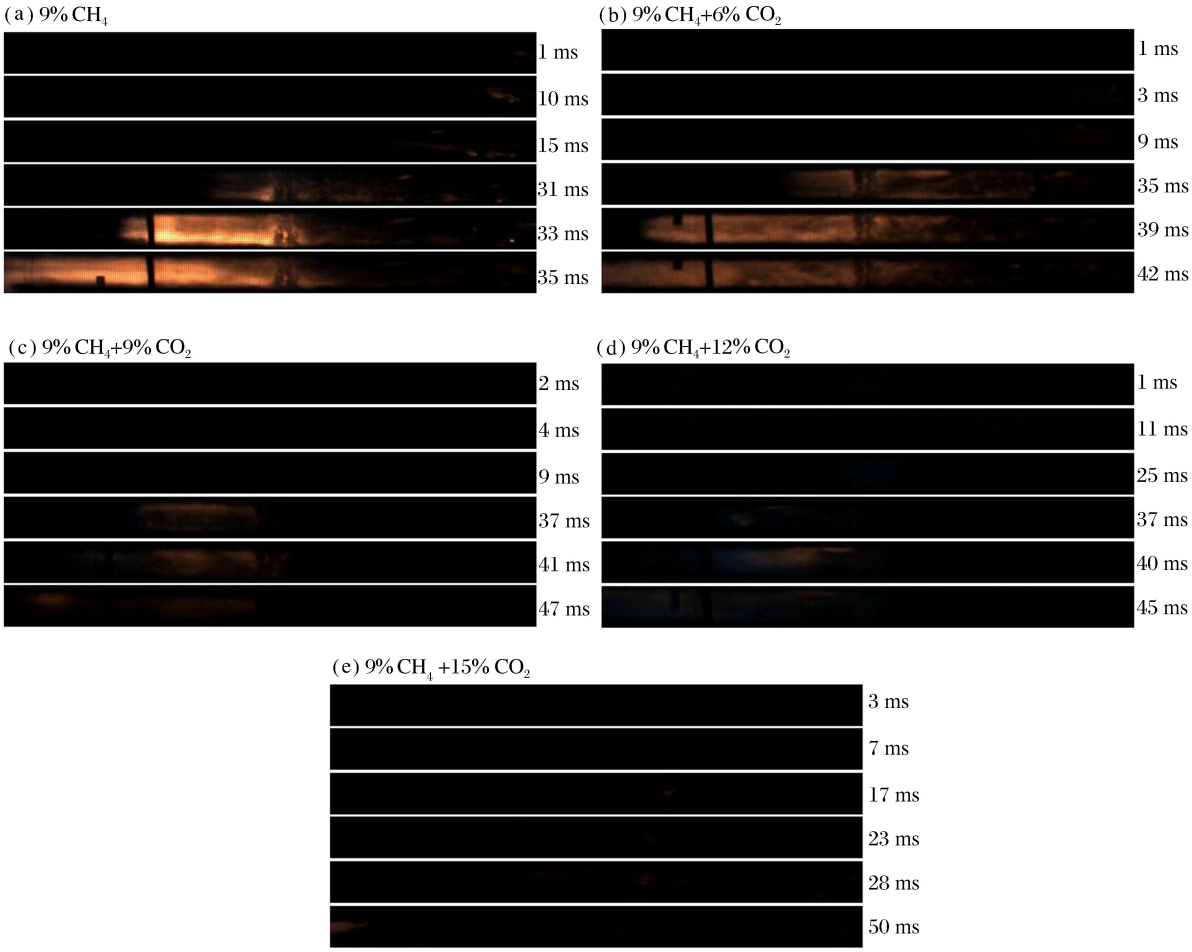

图 2 不同气体组分下火焰传播过程

Fig. 2 Flame propagation processes under different gas compositions

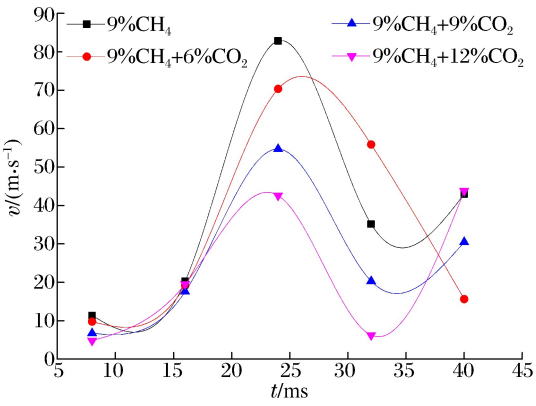

图 3 不同气体组分下火焰锋面传播速度

Fig. 3 Velocities of flame propagation under different gas compositions

图 4 所示分别为爆炸火焰传播时间、火焰锋面平均速度实验与数值模拟结果的对比。图 4(a)中，数值模拟管道内火焰传播时间与实验结果大体吻合，CO_2 添加量为 18%时，两者偏差较大，但变化趋势一致，甲烷火焰的传播时间随着 CO_2 添加量的增大而逐步延长。通过实验管长与管道内火焰传播时间之比计算出管道内火焰传播平均速度，如图 4(b)所示，可见两者存在一定的误差。由于数值模拟过程中的环境条件均为理想状态，而实验过程中混合气体均匀程度、气体状态、火焰传播过程中与玻璃管道的热交换以及壁面的反射作用、还有火焰速度的不稳定等等，导致了误差，这是两者存在差异的主要原因。此外，FLACS 软件在大型工程项目中应用广

泛，精确度较高，对于小尺寸实验管道略有偏差，也会导致产生部分误差。

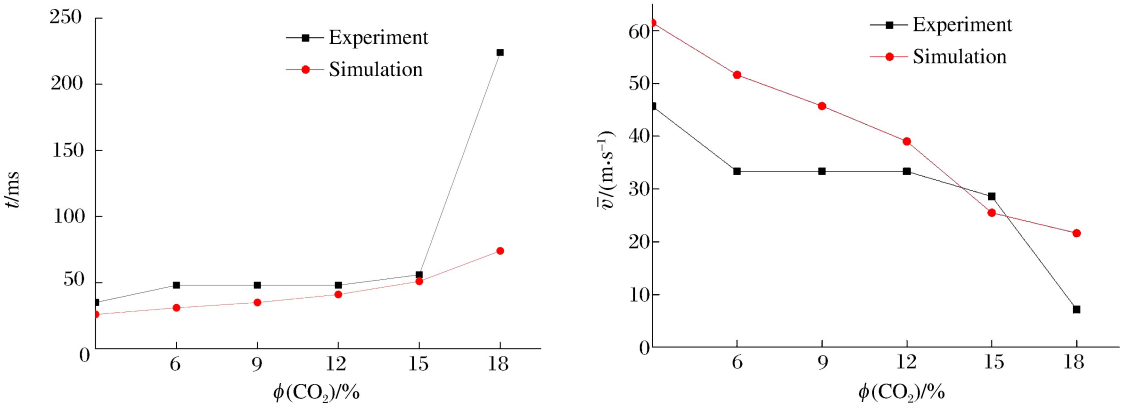

图 4　不同气体组分下火焰传播时间和平均速度的实验与数值模拟对比

Fig. 4　Comparison of flame propagation time and average velocity between simulation and experiment under different gas compositions

2.2　CO_2 对甲烷爆炸流场分布特征的影响

图 5 所示为位于管道中心的传感器所测各个组分爆炸压力-时间曲线，以图中 9%CH_4 压力曲线为例，泄压前管道中心处压力随着火焰的传播而迅速增大，16 ms 内由 0 升至 73 kPa，泄压之后压力值迅速下降，由于受到爆炸传播过程中湍流的影响而出现波动并一度降为负压状态。随着 CO_2 添加量的增大，各组混合气体的爆炸压力峰值逐渐降低，由 9%CH_4 时的 73 kPa 降至 9%CH_4+18%CO_2 时的 17 kPa，降幅约为 77%；压力峰值时间不断延长，由 9% CH_4 时的 17 ms 延长至 9%CH_4+18%CO_2 时的57 ms，延长幅度约为 3.35 倍。

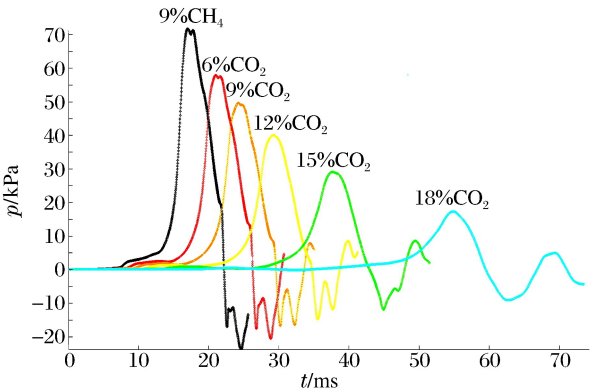

图 5　不同气体组分下气体爆炸压力模拟结果

Fig. 5　Simulation results of explosion pressure under different gas compositions

以 9%CH_4+9%CO_2 数值模拟结果为例，选取石英玻璃管道最大垂直截面作为研究对象，其爆炸传播过程中 5 个特征时刻的压力场、温度场、气体运动速度场分布如图 6 所示。点火源位于石英管道封闭端 10 cm 处，点火后燃烧锋面呈近球形向四周传播，抵达管道壁面之后，沿管道壁面分别朝封闭端、敞口端两个方向传播。当爆炸持续到 22 ms 时，传向管道封闭端的压力波经底面反射回管道中间，并与先前向敞口端传播的前驱压力波重合，两者重叠后朝敞口端运动且有明显的压力梯度，同时管道内部气流运动速率朝敞口方向明显递增；第 25 ms 时，压力波传至敞口端，在其作用下敞口处气流速率显著增大，并在管道敞口处形成负压区域；第 29 ms 时，燃烧火焰冲出管道敞口端，产生泄爆，敞口端负压区域在回流气体的作用下向管道内部移动，同时封闭端处压力逐渐减小，管道内部温度降低，并且气体运动速度在敞口处增至最大值；第 31 ms 时，负压区域运动至管道封闭端，使封闭端气流运动速率有所回升，敞口端气流运动速率迅速减小；第 35 ms 时，管道内部压力在震荡中逐步恢复至常压状态，泄爆后的高温气体在回流作用下缓慢向管道内部移动，使管道封闭端处气体被压缩，温度上升。

模拟爆炸过程中管道中心处气体爆炸压力和气体运动速度随时间变化的对比曲线如图 7～8 所示，选取 9%CH_4 和 9%CH_4+9%CO_2 这 2 种组分的模拟结果。

2 种组分的爆炸过程中爆炸压力-时间曲线和气体运动速度-时间曲线可以划分为 3 个阶段，第 1 阶段，9%CH_4 时的 0～16 ms(9%CH_4+9%CO_2 时的 0～24 ms)，爆炸发生后，气体急速膨胀使得管道中心处质点的速度和压力迅速上升，压力达到最大值，气体运动速度达到其第 1 个波峰；第 2 阶段，9%

CH_4 时的 16～23 ms(9%CH_4+9%CO_2 时的 24～30 ms),压力由峰值迅速下降至负压,根据图 6 模拟压力场和气体运动速度场分析可知,由于泄爆之后管道内部压力梯度增大,湍流强度增大,导致中心处气体运动速度在大幅度震荡中达到最大值;第 3 阶段,9%CH_4 时的 23～26 ms(9%CH_4+9%CO_2 时的 30～36 ms),泄爆后敞口端处的负压区域在回流气体的带动下向管道内部运动,由于湍流的影响,使管道中心处的压力在波动中恢复常压状态,气体运动速度在震荡中逐步减小。所以,在爆炸传播过程中爆炸压力和气体运动速度没有同时达到最大值,可以认为主要是受爆炸传播过程中以及泄爆之后管道内部的压力梯度变化和湍流的影响。

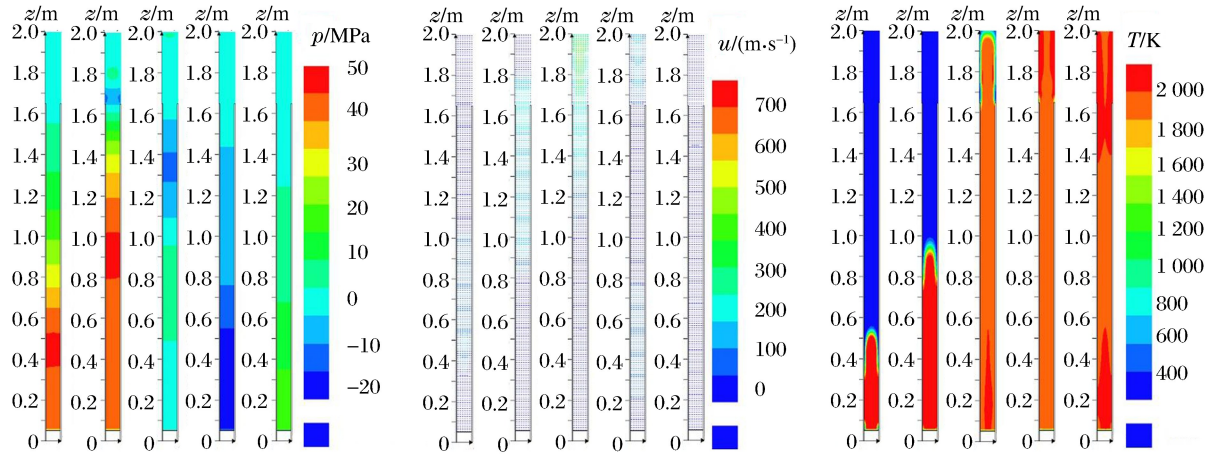

图 6 石英管道内最大垂直截面处模拟压力场、温度场和速度场分布

Fig. 6 Distribution of pressure, temperature and velocity field in the cross section of quartz tube center by simulation

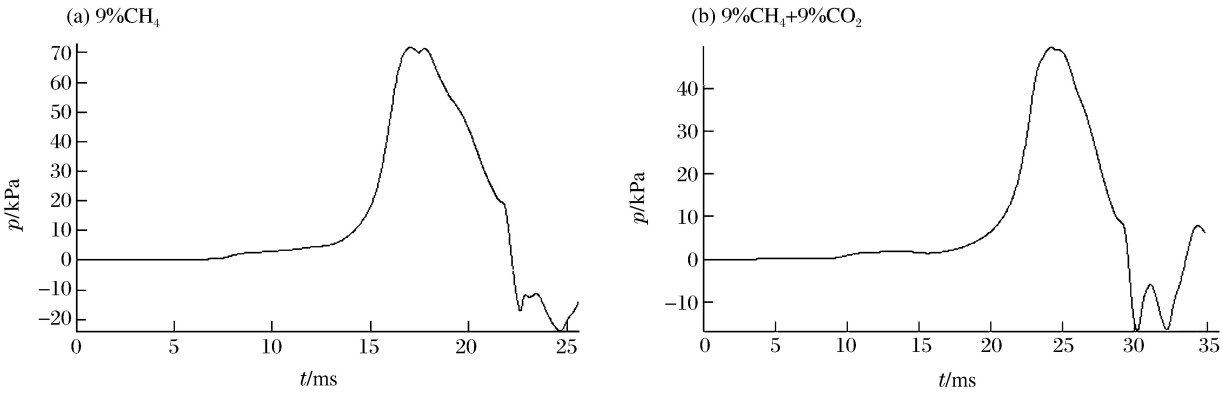

图 7 管道中心处不同组分气体爆炸压力对比

Fig. 7 Explosion pressure under different gas compositions in the center of quartz tube

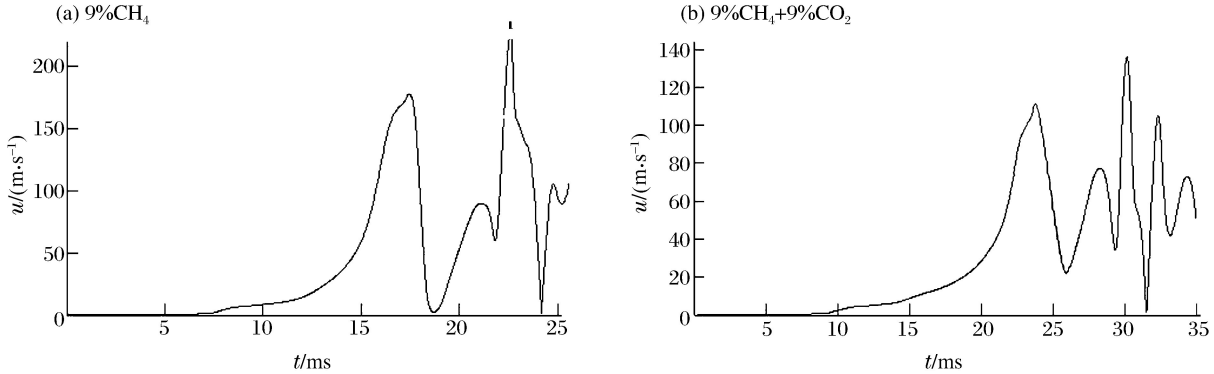

图 8 管道中心处不同组分气体运动速度对比

Fig. 8 Velocities of reaction products under different gas compositions in the center of quartz tube

3　结　论

通过小尺寸管道内二氧化碳抑制甲烷爆炸的实验及数值模拟研究，可以得出以下结论：

(1) 9%的 CH_4 在 6～18% CO_2 作用下仍会发生爆炸现象，且随着 CO_2 添加量的增大爆炸压力减小，火焰的强度、亮度均逐步降低，传播速度逐渐递减，添加体积分数 18%的 CO_2 后，9%CH_4 爆炸压力峰值降低约 77%，压力峰值到达时间延长约 3.35 倍。21～27%的 CO_2 完全抑制了 9%CH_4 的爆炸。

(2) 在 CO_2 惰性气体影响下，9%CH_4 爆炸传播过程中，火焰锋面速度和气体运动速度经历上升、下降、二次波峰和下降的过程，爆炸压力经历压力积聚、传播、泄压、负压回流和震荡并恢复常压等阶段。由于压力波、反射压力波、壁面作用和形成湍流的影响，压力和速度均呈现一定程度的波动。泄爆后的高温气体在回流作用下向管道内移动，使管道封闭端处气体被压缩，温度上升。

(3) 受到爆炸传播过程中以及泄爆之后管道内部的压力梯度变化和湍流的影响，各组分混合气体在爆炸传播过程中爆炸压力和气体运动速度没有同时达到最大值。

参考文献：

[1] 陈东梁，孙金华，刘义，等. 甲烷/空气预混气体火焰的传播特征[J]. 爆炸与冲击，2008，28(5)：385-390.
Chen Dong-liang, Sun Jin-hua, Liu Yi, et al. Propagation characteristics of premixed methane-air flames[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(5): 385-390.

[2] 卢捷，宁建国，王成，等. 煤气火焰传播规律及其加速机理研究[J]. 爆炸与冲击，2004，24(4)：305-311.
Lu Jie, Ning Jian-guo, Wang Cheng, et al. Study on flame propagation and acceleration mechanism of city coal gas [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(4): 305-311.

[3] 杨艺，何学秋，刘建章，等. 瓦斯爆燃火焰内部流场分形特性研究[J]. 爆炸与冲击，2004，24(1)：30-36.
Yang Yi, He Xue-qiu, Liu Jian-zhang, et al. Fractal characteristics of flame inner flow field in methane/air explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(1): 30-36.

[4] 钱海林，王志荣，蒋军成. N_2/CO_2 混合气体对甲烷爆炸的影响[J]. 爆炸与冲击，2012，32(4)：445-448.
Qian Hai-lin, Wang Zhi-rong, Jiang Jun-cheng. Influence of N_2/CO_2 mixture on methane explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(4): 445-448.

[5] 喻健良，陈鹏. 惰性气体对爆燃火焰淬熄的影响[J]. 燃烧科学与技术，2008，14(3)：193-198.
Yu Jian-liang, Chen Peng. Influence of inert gases to deflagration flame quenching[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(3): 193-198.

[6] 赵涛. 惰性气体对管道内预混火焰淬熄的研究[D]. 大连：大连理工大学，2009.

[7] 王建，段吉员，赵继波，等. 惰性气体对可燃气体爆炸反应进程的阻尼效应研究[J]. 工业安全与环保，2011，37(7)：39-41.
Wang Jian, Duan Ji-yuan, Zhao Ji-bo, et al. Damping effect of the inert gas on the explosion reaction in combustible mixture[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2011, 37(7): 39-41.

[8] 王连聪，陈洋. 封闭空间水及 CO2 对瓦斯爆炸反应动力学特性的影响分析[J]. 煤矿安全，2011，42(7)：16-20.
Wang Lian-cong, Chen Yang. Analysis of the impact of water and CO_2 on reaction kinetic for gas explosion in enclosure space[J]. Safety in Coal Mines, 2011, 42(7): 16-20.

[9] 贾宝山，温海燕，梁运涛，等. 煤矿巷道内 N_2 及 CO_2 抑制瓦斯爆炸的机理特性[J]. 煤炭学报，2013，38(3)：361-366.
Jia Bao-shan, Wen Hai-yan, Liang Yun-tao, et al. Mechanism characteristics of CO_2 and N_2 inhibiting methane explosions in coal mine roadways[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 361-366.

[10] 贾宝山，李艳红，曾文，等. 定容体系中氮气影响瓦斯爆炸反应的动力学模拟[J]. 过程工程学报，2011，11(5)：87-94.
Jia Bao-shan, Li Yan-hong, Zeng Wen, et al. Kinetic simulation for the effect of N_2 content on gas explosion in an constant volume system[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, 11(5): 87-94.

[11] 何昆. 二氧化碳抑爆性能实验研究[J]. 消防科学与技术，2011，30(6)：476-478.
He Kun. Experiment on performance of CO_2 suppressing methane explosion[J]. Fire Science and Technology,

2011,30(6):476-495.

[12] 李成兵,吴国栋,周宁,等. $N_2/CO_2/H_2O$ 抑制甲烷燃烧数值分析[J]. 中国科学技术大学学报,2010,40(3):288-293.
Li Cheng-bing, Wu Guo-dong, Zhou Ning, et al. Numerical analysis of methane combustion suppression by $N_2/CO_2/H_2O$[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010,40(3):288-293.

[13] 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 Cheng-bing. Chemical kinetics mechanism analysis of $N_2/CO_2/H_2O$ suppressing methane explosion[J]. China Safety Science Journal, 2010,20(8):88-92.

[14] 王华. 矿井多元可燃性气体爆炸特性实验及数值模拟研究[D]. 西安:西安科技大学,2009.

Experimental and numerical studies on the suppression of methane explosion using CO_2 in a mini vessel*

Luo Zhen-min[1,2], Wang Tao[1,2], Cheng Fang-ming[1,2], Song Yu[1,2], Wu Kang[1,2]
(1. *School of Energy Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an* 710054, *Shaanxi, China*;
2. *Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an* 710054, *Shaanxi, China*)

Abstract: Gas explosion is the leading accident in underground coal mining in China. In order to prevent mine gas explosion effectively, methane, the dominant sector of mine gases, was taken as experimental medium. A quartz tube test system, in which the ratio of length to diameter is 18, was designed and made. A high-speed camera and numerical simulation software FLACS was employed to study the characteristics of methane explosion. The impact of CO_2 at various concentrations on the suppression of 9% methane explosion was investigated. Fluctuations were observed on the explosion pressure, the velocity of the flame front and the velocity of the mixed gases during the propagation of the gas explosion. The time to reach the maximum for the pressure was not simultaneous with that for velocity. Additionally, carbon dioxide can effectively suppress the reaction between methane and oxygen and the larger the concentration of CO_2 is, the better the suppression effect will be. Simulation results are in accordance with the experiments.

Key words: mechanics of explosion; flame propagation characteristics; FLACS; gas explosion; CO_2

(责任编辑 王易难)