DOI: 10.11883/bzycj-2016-0309 文章编号: 1001-1455(2018)03-0622-10

点火条件对密闭管道内预混氢气/空气燃爆特性的影响*

孙从煌,曲艳东,刘万里,翟 诚
(辽宁工业大学土木建筑工程学院,辽宁 锦州 121001)

摘要: 基于流体动力学软件 Fluent,开展数值模拟,研究点火位置(距管左端壁面 100、200 和500 mm)、点火温度(1 000、1 500 和 2 000 K)和点火面积(管左端壁面处半径为 50、35 和 20 mm 的点火域)等点火条件对 1 000 mm 密闭管道中预混氢气/空气(H_2/air)燃爆特性的影响。研究表明:点火位置距管左端壁面越远,中间节点处温度越高,温升越快;不同点火温度下管内最高温升速率基本同步,且提高点火温度,使得燃烧反应更剧烈,能提高管内气体温升速率,但却降低管内的压力峰值;点火面积越小,预混 H_2/air 燃烧前期温升越快。当采用半径为 35 mm 的点火域和点火位置距管左端壁面 100 mm 的点火方式时,预混 H_2/air 燃爆的各项参数相对较高。不同点火条件对密闭管内气体的动能和内能的影响规律类似于其对管内气体的流速和温度的影响规律,而对涡量的影响不明显。

关键词: 点火条件;密闭管道;预混火焰;湍流燃烧;火焰前锋
中图分类号: O381;TD712 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

目前,已开展了多种二元和多元燃料如氢气/甲烷、氢气/乙烷、甲烷/乙烷和空气等的爆炸特性研究,研究集中在爆轰性能[1-3]、火焰面结构及演化规律[4-5]和“郁金香”火焰形成机制等[6]。最近发现,点火条件直接影响气体的燃爆过程及燃爆特性[7-8],导致火焰面结构演变过程不同[9]。郑立刚等[10]通过实验发现预混火焰的震荡强度随点火位置距封闭端距离的增大而逐渐增强。Kindrack 等[11]和 Park 等[12]研究了水平/垂直管道中不同点火位置、有无障碍物以及阻塞比等对爆炸超压及压力上升速率的影响。受实验条件限制,目前对点火条件的研究还主要是测试燃料气体的燃爆压力特征[13]。数值模拟已成为研究爆炸问题的一种重要手段,只要方法得当,其模拟结果可与实际情况吻合。考虑到氢气的点火能低、燃烧极限范围广、层流燃烧和扩散速度快、爆炸威力大,其燃爆过程更具特性[14],且在强约束的密闭空间,湍流预混火焰面结构和传播规律也更复杂[11]。基于此,本文中将利用流体动力学软件 Fluent,开展数值模拟,研究不同点火条件对预混氢气/空气(H_2/air)燃爆特性的影响,揭示点火位置、点火温度和点火面积等对密闭管道中预混 H_2/air 的燃爆过程中压力场和温度场的动态分布、火焰传播速度、能量与涡量的影响。

1 数值模型及模拟方法

1.1 控制方程

流体动力学计算软件 Fluent 可以较好地模拟相对简单的层流燃烧和复杂的带化学反应的湍流燃烧问题。在迭代求解含化学反应的 Navier-Stokes 流动方程时需要建立并求解的控制方程[15-16]有连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程、组分输运方程:

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

* **收稿日期**: 2016-10-20; **修回日期**: 2017-01-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(11302094);辽宁省高等学校优秀人才项目(LJQ2014063);
辽宁省科技厅预研项目(SY201603);辽宁工业大学教师科研启动基金项目(X201403)
第一作者: 孙从煌(1990—),男,硕士研究生; **通信作者**: 曲艳东,quyandong@lnut.edu.cn。

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\frac{\partial[u_i(\rho E+\rho)]}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(k_{\text{eff}}\frac{\partial T}{\partial x_i}-\sum h_m J_m+u_j\tau_{ij}\right)+\dot{Q}_c \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho Y_m)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i Y_m)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho D_m\frac{\partial Y_m}{\partial x_i}\right)-\dot{\omega}_m \tag{4}$$

式中：ρ 为密度，t 为时间，u_i 为速度分量，p 为静压；τ_{ij} 为应力张量，$\tau_{ij}=\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}$，$T$ 为温度，参考温度 $T_{\text{ref}}=300$ K，k_{eff} 为有效热传导系数，μ 为分子黏度，$\dot{Q}_c$ 为化学反应释放的热源项，$E=h-p/\rho+u_i^2$ 为内能，δ_{ij} 为单位张量，D_m、J_m、Y_m、h_m 和 $\dot{\omega}_m$ 分别为燃料组分 m 的扩散系数、扩散通量、质量分数、比焓和化学反应速率。

1.2　几何模型

密闭管道的几何模型见图 1。重点研究采用 1 500 K 点火时，点火域（半径 $R=35$ mm）位于距管左端壁面不同距离处的几何模型（图 1（a））和在管左端壁面处不同半径的点火域内进行 1 500 K 点火的几何模型（图 1（b））。此外，基于图 1(a)的点火模型还考虑了不同点火温度（1 000、1 500 和2 000 K）对预混 H_2/air 燃爆特性的影响。模拟过程中暂不考虑管壁的热传导和热辐射效应，四周设置无滑移刚性绝热的固壁边界条件，点火时管内预混 H_2/air 处于静止状态，管道内各燃料组分和初始条件[15]见表 1。

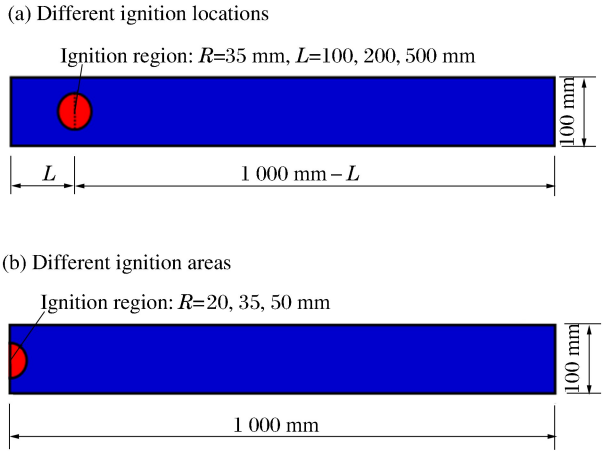


图 1　密闭管道的几何模型

Fig. 1　Geometric model of the closed pipe

表 1　密闭管道内各燃料组分和初始条件[15]

Table 1　Fuel components and initial conditions in the closed pipe[15]

Fluid area	Mass fraction of gas component				Initial temperature/K	Initial pressure/kPa
	H_2	O_2	N_2	H_2O		
Fuel area	0.022 62	0.217 2	0.76	0	300	101.325
Ignition area	0	0.046	0.76	0.213	1 500	101.325

1.3　燃烧模型（湍流模型、壁面函数、燃烧模型）

可燃气体的燃爆过程是一个伴有复杂化学反应的湍流燃烧过程。燃烧火焰面与湍流间强烈的耦合作用会导致火焰结构复杂多变[17]。考虑管壁对扩散火焰的约束效应，火焰在壁面边界层附近以层流火焰形式沿管壁向前传播，而标准的 k-ε 湍流模型无法对壁面低雷诺数流进行求解，因此，需要建立高精度的标准壁面函数对其进行修正。层流有限速率/涡耗散（EBU-Arrhenius）燃烧模型[18]能同时考虑湍流效应和化学反应动力学，同时计算涡耗散反应速率和 Arrhenius 反应速率，能较好地模拟预混火焰的传播过程。预混 H_2/air 燃爆过程的反应模型系数[18]：EBU rate，$A=4$，$B=0.5$；Arrhenius rate，$A_r=9.87\times10^8$，$B_r=0$，$E_r=3.1\times10^7$。由于预混 H_2/air 的燃爆过程的高度非线性，在迭代过程较难收敛，因此采用两步模拟法，即首先进行冷流动模拟以便获得良好的初始值，然后激活化学反应和能量方程，并进行点火计算。采用亚松弛方法来控制收敛速度。

2 结果及分析

2.1 预混 H_2/air 的燃爆过程及其火焰阵面结构

预混 H_2/air 在管道左端管壁面处的半圆形(R=35 mm)点火域内采用 1 500 K 高温点火后,不同时刻管内的燃爆过程及其火焰阵面结构如图 2 所示。从图 2 不难看出:在点火瞬时,燃烧区以半圆形火焰向外部均匀膨胀,预混 H_2/air 以层流火焰的形式向外传播,火焰厚度很薄(见图 2(a)),由于受到上下管壁约束和气压反射作用的影响,径向火焰的传播速度要小于轴向火焰的传播速度;火焰阵面沿着轴向逐渐被拉伸;当 t = 50 ms 时,预混 H_2/air 的燃烧火焰逐渐变为半椭圆形,且与火焰锋面后反应区的温度相比,火焰前沿的温度较高(见图 2(b))。火焰前沿的预热区厚度也逐渐增大,此时径向火焰面也开始接触管壁;管壁对火焰的约束作用,在管道边界形成的湍流会加速火焰传播,在壁面剪切流的作用下,壁面处的火焰逐渐追赶管中轴线处的火焰面,并使其逐渐形成平面火焰(见图 2(c));由于管道壁面处火焰传播速度较快,当燃烧火焰继续向前传播时,管道内上下两侧的燃烧火焰继续被拉伸,使得预混 H_2/air 的燃烧火焰变为“郁金香”火焰面(见图 2 (d));由图 2 (d)~(f)不难看出,开始形成的“郁金香”火焰面上下对称,同时两侧的火舌出现褶皱。随着火焰沿着管道向右侧继续平稳传播,褶皱会逐渐消失。在接近右侧管壁面时,右侧管壁面的反射作用阻挡了上下壁面火焰的传播,使得“郁金香”火焰的内凹深度逐渐减小。总之,管道内预混 H_2/air 燃爆的火焰面结构和其动态变化过程与 Clanet 等[4]提出的“四阶段”火焰基本吻合。

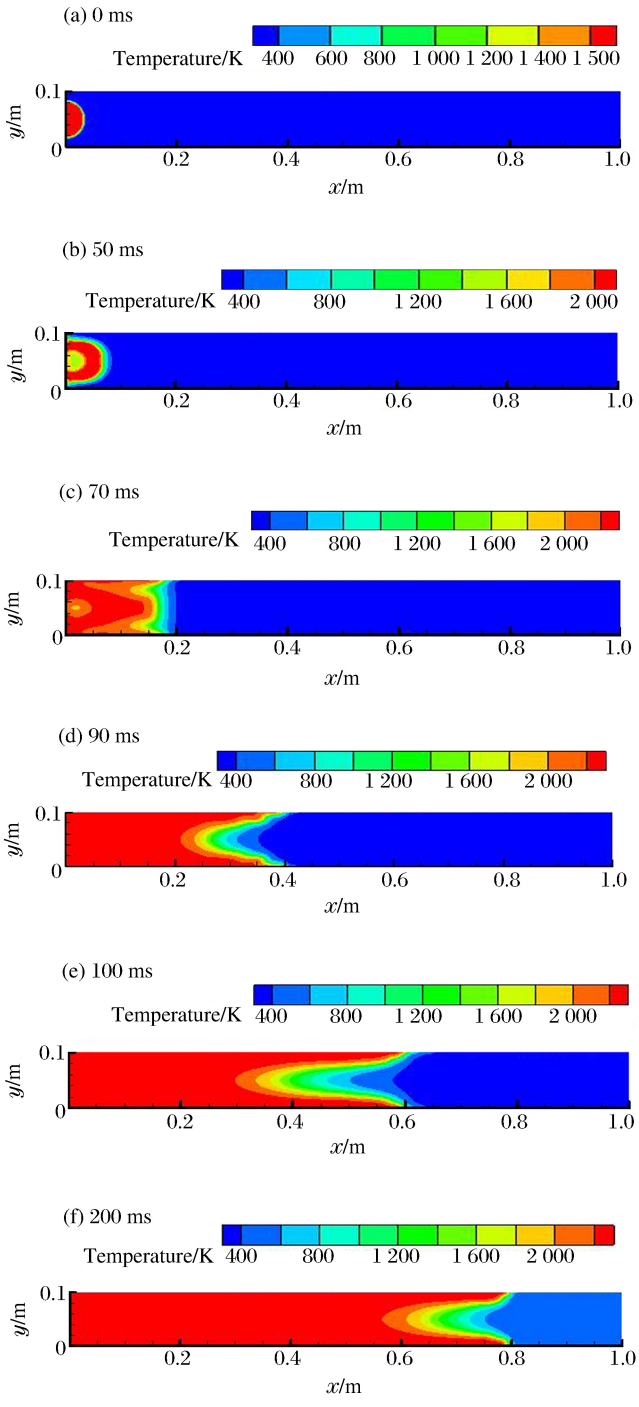


图 2 不同时刻预混 H_2/air 的燃爆过程及其火焰阵面结构图

Fig. 2 Deflagration process and flame front structures of H_2/air pre-mixed gases at different times

2.2　管内气体温度和压力

预混 H_2/air 在管道左端管壁面处的半圆形(R=35 mm)点火区域内采用 1 500 K 高温点火后，管内不同位置的温度时程曲线如图 3 所示。从该图可知：同一横截面处不同位置(距管上壁面分别为 0、20 和 50 mm)的温度场分布不均匀，管内壁处气体域的温升速率要高于管中间流体域，且距内壁面越近，温升越快(图 3(a))。分析原因，主要是由于受壁面约束和 Markstein 扩散效应引起的湍流漩涡运动的影响，在壁面附近形成的小涡流促使更多燃料卷入燃烧区域并快速燃烧，增大了燃烧反应强度，使其热量释放率增高，而中间流域则是由于压力波和反射波的相互影响所形成的逆流效应抑制了火焰传播[19]。从图 3(b)可知，沿管轴线方向距点火位置不同距离处的温升次序随燃烧反应向右传播的先后顺序变化，在管左端点位置点火后的燃烧火焰约在 100 和 480 ms 依次传播至管中间位置和管右端壁面；由于采用高温点火，管左端点火位置的温度相对较高，而管的中点和右端点最终温度几乎相等。

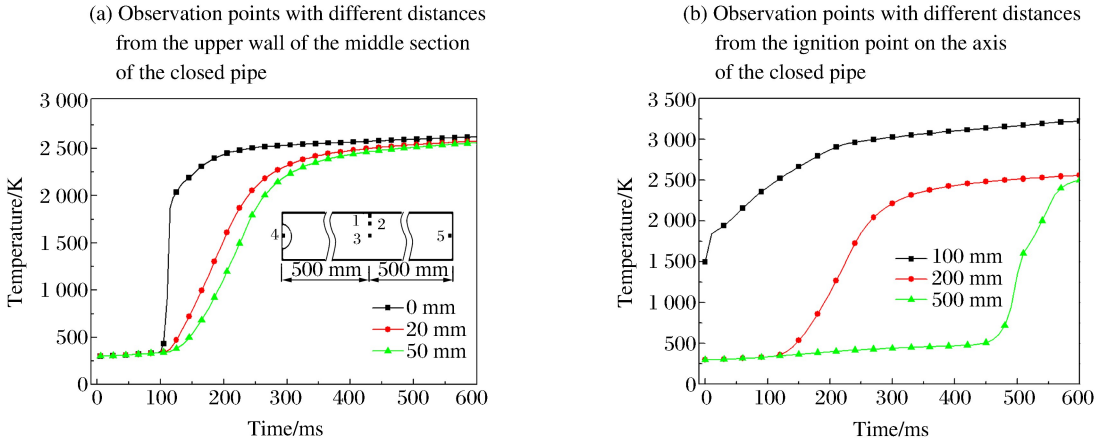


图 3　管内不同位置观测点的温度时程曲线

Fig. 3　Temperature-time curves of different observation points in the closed pipe

图 4 和 5 分别为不同点火条件下管内气体的最高温度和峰值压力时程曲线。从图 4 可以看出，3 种点火温度下管内气体的最高温度曲线的上升速率基本同步，且点火温度越高，燃烧反应越剧烈，管内最高温度也越高；当点火域的半径较小时，自燃烧区域向冷燃气的热损失越少，预混 H_2/air 在管内燃烧前期的温升越快；约在 80 ms 时，采用 20 mm 的点火半径时管内最高温度曲线出现一个峰值，这在一定程度上说明点火域的半径越小，管内气体最高温度的波动性也越明显。点火位置距管左侧壁面越远时，燃烧火焰的双向传播会使得管内最高温度越高；然而，在燃烧反应前期，由于距管左壁面越近，管壁的约束效应越强，使得点火后温升速率也越快。由图 5 可看出，管内的压力峰值随点火温度的升高而降低；而点火域的尺寸对管内压力峰值的影响不太明显；除管道左壁面的端点火外，预混燃烧反应前期，峰值压力随点火位置距管道左壁面的距离增大而降低，待预混火焰稳定传播后，点火距离越远，压力峰值越高。选取管道的中间位置来研究流场内同一位置的温度和压力随时间动态变化情况，如图 6～7 所示。由图 6 可知，约在 100 ms 时，预混火焰尚未传播到管中间节点处，待火焰阵面传至该点后，受点火条件的影响，点火温度越高，上下壁面附近的湍流越强，在一定程度上下火舌形成的涡旋会抑制火焰尖端处流场的燃烧反应，使得该位置的温度较低，且低于上下壁面附近流场的温度；点火半径对管内温度场的影响不明显；点火位置离管道左壁面越远时，中间节点处流场的温度越高，且温升也越快，点火位置为 500 mm 恰处于中间节点，起始温度较高，反应结束后的温度也较高，这说明点火位置的影响较明显。

总之，在预混 H_2/air 的燃烧火焰传播过程中，管内最高温度和峰值压力逐渐增大，受点火条件的影响较大，随着点火温度的升高，管内最高温度值也越高，而峰值压力却越小。在燃烧反应前期，点火域半径越小，管内离点火位置越近处的最高温度越高；燃烧火焰的不稳定性及管壁约束和反射作用加强了预混 H_2/air 燃烧火焰的湍流效应，使得预混 H_2/air 在燃烧后期出现点火半径越大、距点火点越远，管内

最高温度值越高的现象;而点火半径对管内峰值压力的影响较小,在层流燃烧阶段出现在 200 mm 位置点火时管内峰值压力最高,随着点火距离的增大,湍流燃烧阶段的峰值压力越大,该结果与文献[12,20]基本吻合。

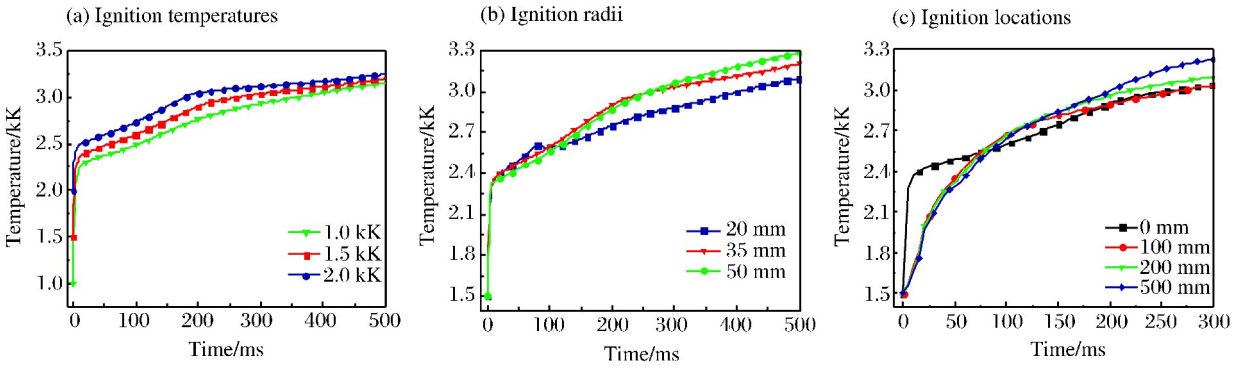


图 4 不同点火条件下管内最高温度的时程曲线

Fig. 4 Maximum temperature-time curves of the closed pipe under different ignition conditions

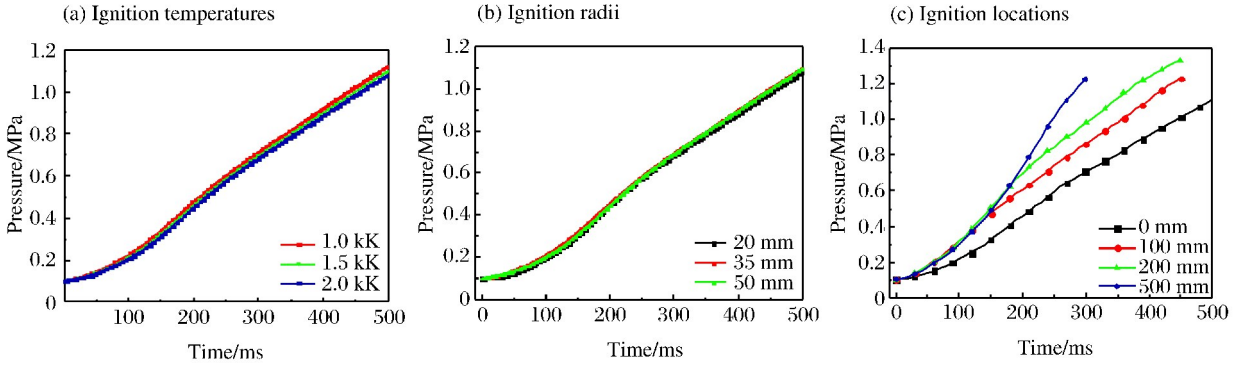


图 5 不同点火条件下管内最大压力时程曲线

Fig. 5 Peak pressure-time curves of the closed pipe under different ignition conditions

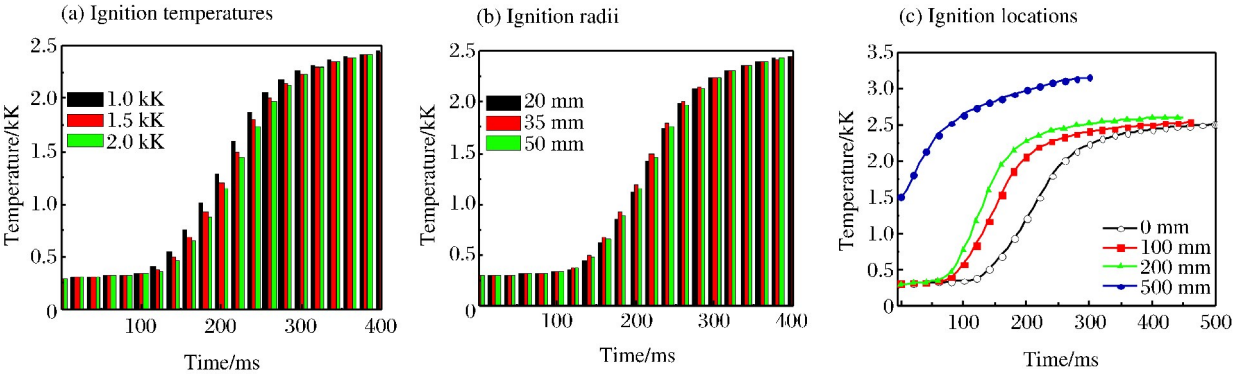


图 6 不同点火条件下中间测点的温度时程曲线

Fig. 6 Temperature-time curves of the middle observation point under different ignition conditions

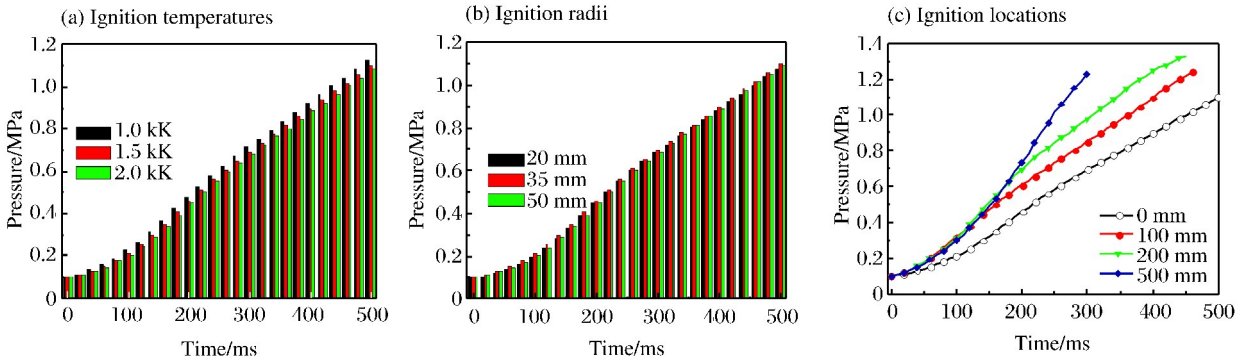


图 7　不同点火条件下中间测点的压力时程曲线

Fig. 7　Pressure-time curves of the middle observation point under different conditions

2.3　火焰锋面及燃烧速率的变化规律

由图 8 可知，在同一时刻，点火温度越高，点火半径越小，火焰前锋前进速度越慢，而在距左壁面 100 mm 处点火后火焰面传播速度最快，在管道左壁面端点火后，火焰面传播速度波动幅度最大。

由图 9 中不同点火条件下管中间节点处气体流速的时程曲线可知，在点火初期 0～50 ms，球形层流火焰燃烧反应的动态不稳定性和产物膨胀形成弱压缩波以及遇上下管壁约束形成的反射压缩波作

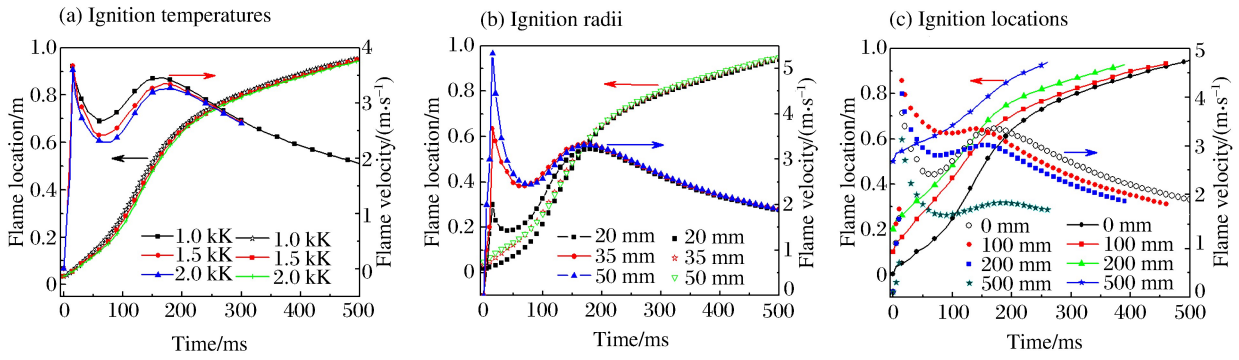


图 8　不同点火条件下火焰前锋位置和速度时程曲线

Fig. 8　Location- and velocity-time curves of flame front under different ignition conditions

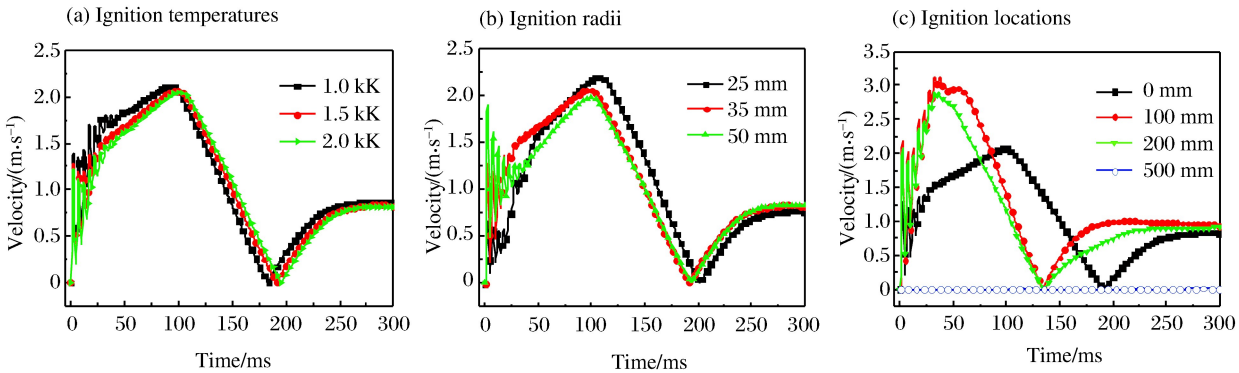


图 9　不同点火条件下中间测点处气流速度曲线

Fig. 9　Airflow velocity-time curves of the middle observation point under different ignition conditions

用,使管中间节点处气流速度发生高频的震荡现象;随着球形火焰面逐渐拉伸成指尖形火焰面,与燃料区接触的火焰燃烧面积逐渐增大,燃烧膨胀气流速度迅速上升,约在 100 ms 达到最高点;火焰面接触壁面后受壁面剪切流的影响使壁面附近燃烧速度快于管中间流,火焰前锋接触的燃烧面积逐渐减小,使管内气流迅速减小;约 200 ms 后由于火焰前锋面发生褶皱,湍流强度和火焰面积增大,加快了反应速率和流动速度;随着湍流火焰继续向前传播,反应物浓度逐渐减小,反应强度也就随之降低,并受管道右壁面反射流的反向压缩阻挡作用使燃烧反应速率和气流速度逐渐降低。从图 9 还可发现,点火温度越低,点火半径越小,气体流速越高;而不同点火位置的差异较大,100 mm 处点火的中间测点(500 mm 处)流速最高,500 mm 处点火中间测点流场基本处于静止。

2.4 能量和涡量的变化规律

图 10 和 11 分别为不同点火条件下管内气体的动能和内能的时程曲线。从图 10(a)可知,点火后管内流体的动能迅速增加,$t\approx50$ ms 时达到峰值,且点火温度越高,动能的最大值越高;$t=50\sim180$ ms 时,管内气体的动能迅速下降,且点火温度越高,下降速度越快;$t\approx200$ ms 时,动能发生小幅度增加后缓慢下降。从图 10(b)可知,点火半径越大,动能峰值越小,而采用半径为 35 mm 的点火域点火时,在气体的动能时程曲线上出现峰值的时刻最早,采用半径为 50 mm 的点火域点火后出现能量峰值最晚。由图 10(c)可知,采用 100 mm 的点火位置,点火初期动能增长速率最快,气体的动能的峰值最高,而采用中间位置点火,其动能最小。考虑管内各能量间的相互转换,由图 11 可知,管内气体的内能随燃烧反应的进行而逐渐升高,受点火条件的影响变化规律与管内最高温度的变化趋势类似;点火温度越高,气体的内能越大,其增速基本同步;点火域的点火半径增大,在点火初期阶段气体的内能越低,而在湍流火焰稳定传播阶段,其内能越高;点火位置距管左壁越远,其内能越高,且采用管道左壁面端点火时,点火瞬间内能迅速增大。

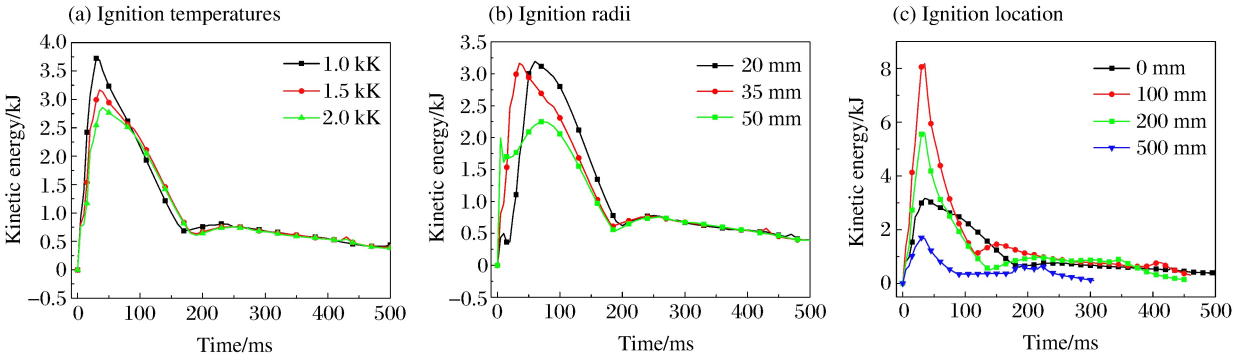


图 10 不同点火条件下动能时程曲线

Fig. 10 Kinetic energy-time curves under different ignition conditions

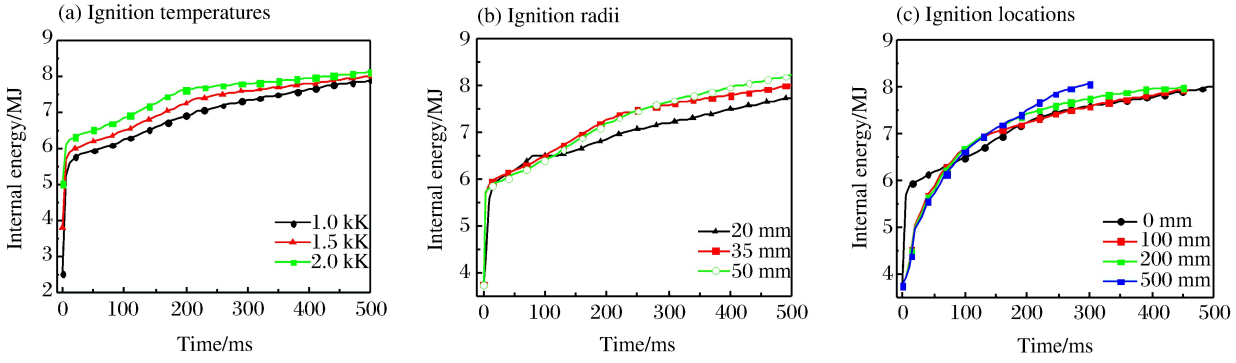


图 11 不同点火条件下内能变化时程曲线

Fig. 11 Internal energy-time curves under different ignition conditions

以点火温度为 1 000 K、左端壁面处点火为例，其管内总涡量的变化如图 12 所示。在点火初期，由于左壁面和上下壁面的约束作用，使得涡旋主要形成于管道左端。随着燃烧火焰向右传播，旋涡沿着管壁向前传播，且越靠近壁面其涡量越大。在点火瞬间，管壁约束强度较大，燃烧气体膨胀形成的压力波及壁面反射波使管道左端涡量较大，随着火焰向前传播，弱压缩波向右端自由扩张，涡量迅速减小；随后由于火焰阵面的结构变化以及其与压缩波耦合作用，使得管内涡量发生震荡现象。

由图 13 不同点火条件下管中间节点处流场的涡量变化趋势发现：在点火后 100 ms 内，燃烧火焰尚未传播至中间节点处，其涡量基本为零；100～200 ms 出现涡量逐渐增加，湍流效应逐渐增强，大约在 300 ms 出现第 1 次高频振荡的涡量峰值，随后涡量稍有减弱；到 500 ms 左右出现第 2 次高强度峰，此时预混火焰已基本传播至右端管壁处，受到反射回流的压缩阻碍，增大其湍流强度。总之，点火温度和点火域半径对管内涡量的影响不明显，而点火位置越远，火焰传播至中间节点位置越早，涡量增加的时间也越早。密闭管内预混 H_2/air 燃爆过程的涡旋主要受管壁约束作用，导致在壁面附近的涡旋强度要比中间流明显。

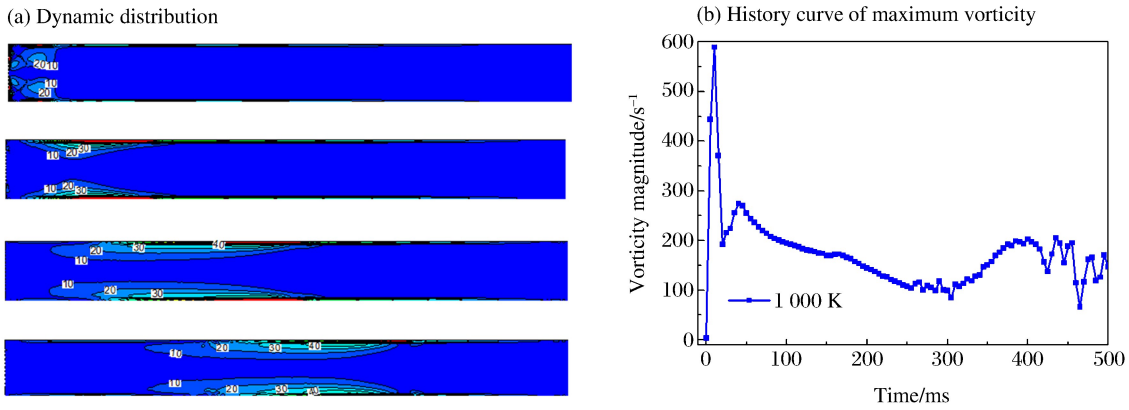


图 12　管内涡量运动及最大涡量的变化情况

Fig. 12　Movement of vorticity and change of maximum vorticity

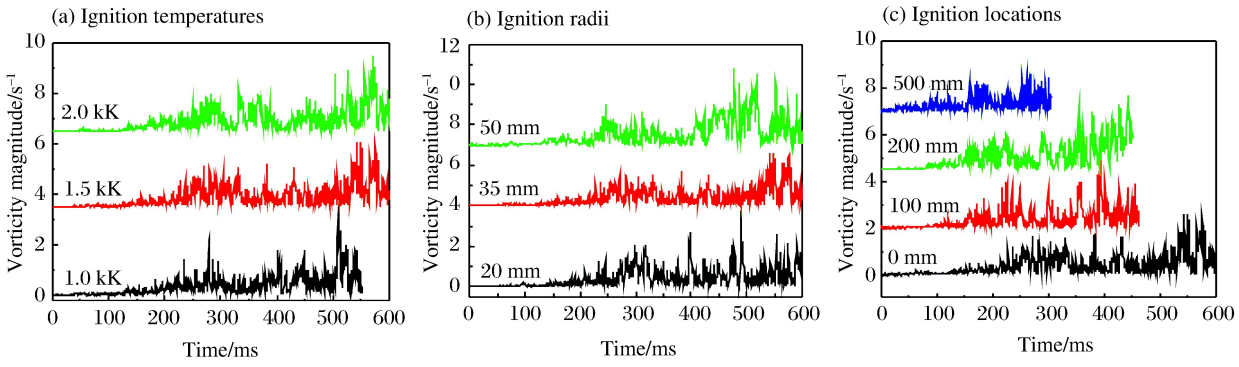


图 13　不同点火条件下管内中间节点处涡量时程曲线

Fig. 13　Vorticity-time curves of the middle node in the closed pipe under different ignition conditions

3　结　论

(1)受点火条件的影响，提高预混 H_2/air 的高点火温度能加快管内气体的温升速率，但却降低了管内气体的峰值压力，而点火域半径和点火位置对预混 H_2/air 的燃烧前期和湍流燃烧后期的温度场及压力场的影响不同，综合分析发现当采用点火域半径为 35 mm 和点火位置距管左端壁面 100 mm 的点火

方式时，预混 H_2/air 的各项燃爆特性参数相对较高。

(2)火焰面传播速度先增大后减小，在 180 ms 左右小幅度增大后缓慢减小；其变化规律与气体的流速震荡后的变化规律一致，说明密闭管内预混 H_2/air 的燃烧火焰传播速率受湍流效应的影响较明显，且点火温度越高，点火半径越小，预混火焰的传播速度越小，采用距管左侧壁面 100 mm 的点火位置进行点火时气流的流速最快。

(3)在点火初期，强约束作用形成的大涡旋运动使管内气体的动能增加，湍流火焰面后的小尺寸涡旋使其动能衰减，燃烧反应放热使管内气体的内能持续增加。不同点火条件对密闭管内气体的动能和内能的影响规律和其对管内气体的速度和温度的影响规律类似，但对涡量的影响不明显。

参考文献：

[1] ZHU X C, SFORZA L, RANADIVE T, et al. Experimental and numerical study of flame kernel formation processes of propane-air mixture in a pressurized combustion vessel[J]. SAE International Journal of Engines, 2016,9(3):1494-1511.

[2] 潘振华，范宝春，归明月. T 型管内流动气体中爆轰绕射过程的数值模拟[J]. 爆炸与冲击，2014,34(6):709-715.
PAN Zhenhua, FAN Baochun, GUI Mingyue. Numerical investigation on evolution of detonation diffraction in moving gas inside a T-shaped channel[J]. Explosion and Shock Waves, 2014,34(6):709-715.

[3] 赵焕娟，LEE J H S，张英华，等. 边界条件对甲烷预混气爆轰特性的影响[J]. 爆炸与冲击，2017, 37(2):201-207.
ZHAO Huanjuan, LEE J H S, ZHANG Yinghua, et al. Effects of boundary conditions on premixed CH_4+2O_2 detonation characteristics[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(2):201-207.

[4] CLANET C, SEARBY G. On the "Tulip flame" phenomenon[J]. Combustion and Flame, 1996,105(1/2):225-238.

[5] XIAO Huahua, SUN Jinhua, CHEN Peng. Experimental and numerical study of premixed hydrogen/air flame propagation in a combustion chamber[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014,268(3):132-139.

[6] PONIZY B, CLAVERIE A, VEYSSIERE B. Tulip flame: The mechanism of flame front inversion[J]. Combustion and Flame, 2014,161(12):3051-3062.

[7] GROGAN K P, IHME M. Weak and strong ignition of hydrogen/oxygen mixtures in shock-tube systems[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015,35(2):2181-2189.

[8] GAO Wei, ZHONG Shengjun, MIAO Nan, et al. Effect of ignition on the explosion behavior of 1-Octadecanol/air mixtures[J]. Powder Technology, 2013,241(3):105-114.

[9] XIAO Huahua, DUAN Qiangling, JIANG Lin, et al. Effects of ignition location on premixed hydrogen/air flame propagation in a closed combustion tube[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(16):8557-8563.

[10] 郑立刚，吕先舒，郑凯，等. 点火源位置对甲烷-空气爆燃超压特性的影响[J]. 化工学报，2015,66(7):2749-2756.
ZHENG Ligang, LÜ Xianshu, ZHENG Kai, et al. Influence of ignition position on overpressure of premixed methane-air deflagration [J]. CIESC Journal, 2015,66(7):2749-2756.

[11] KINDRACK J, KOBIERA A, RARATA G, et al. Influence of ignition position and obstacles on explosion development in methane-air mixture in closed vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007,20(4/5/6):551-561.

[12] PARK D J, LEE Y S. Experimental investigation of explosion pressures and flame propagations by wall obstruction ratios and ignition positions[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2012,29(2):139-144.

[13] 李润之，司荣军. 低温环境下甲烷爆炸流场特性模拟[J]. 爆炸与冲击，2015,35(6):901-906.
LI Runzhi, SI Rongjun. Simulation study of flow field characteristics[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(6):901-906.

[14] XIAO Huahua, WANG Qingsong, HE Xuechao, et al. Experimental study on the behaviors and shape changes of premixed hydrogen-air flames propagation in horizontal duct[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011,36(10):6325-6336.

[15] 孙从煌. 爆炸反应管的研制及管内气体燃爆特性研究[D]. 锦州：辽宁工业大学，2017:32-35.

[16] 范宝春. 两相系统的燃烧、爆炸和爆轰[M]. 北京：国防工业出版社，1998：5-8.

[17] CICCARELLI G, DOROFEEV S. Flame acceleration and transition detonation in ducts[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008,34(4):499-550.

[18] 孙胜，陈松，吴超. 尾矿库污染物传输过程的数值仿真研究及其经验[J]. 铁道科学与工程学报，2012,9(1):36-41.
SUN Sheng, CHEN Song, WU Chao. Research on the numerical simulation of the pollutant transferring of tailings and experiences[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2012,9(1):36-41.

[19] 陈先锋，陈明，张庆明，等. 瓦斯爆炸火焰精细结构及动力学特性的实验[J]. 煤炭学报，2010,35(2):246-249.
CHEN Xianfeng, CHEN Ming, ZHANG Qingming, et al. Experimental investigation of gas explosion microstructure and dynamic characteristics in a semi-vented pipe[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(2):246-249.

[20] BI Mingshu, DONG Chengjie, ZHOU Yihui. Numerical simulation of premixed methane-air deflagration in large L/D closed pipes[J]. Applied Thermal Engineering, 2012,40:337-342.

Influence of different ignition conditions on deflagration characteristics of a premixed mixture of H_2 and air in a closed pipe

SUN Conghuang, QU Yandong, LIU Wanli, ZHAI Cheng

(*College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou* 121001, *Liaoning, China*)

Abstract: Numerical simulation was carried out by applying the fluid dynamics software Fluent to explore the influences of different ignition conditions, such as ignition locations (the distances from the left wall of the closed pipe are 100, 200, and 500 mm, respectively), ignition temperatures (1 000, 1 500 and 2 000 K) and ignition area (ignition radius: 50, 35 and 20 mm) on the deflagration characteristics of the premixed H_2/air mixture in a closed pipe with 1 000 mm in length. The results show that, when the ignition positions are far away from the left wall of the closed pipe, the temperature of the intermediate node in the flow field is higher and the temperature rising is faster in the closed pipe. The rising rates of the maximum temperatures are basically synchronous on the conditions of the three different ignition temperatures (1 000, 1 500 and 2 000 K). Meanwhile, the combustion reaction of H_2/air is more intense with the increasing of the ignition temperatures. The temperature rising rate in the closed pipe is accelerated. However, the peak pressure in the closed pipe is reduced. Moreover, the smaller the ignition area, the faster the temperature rising of H_2/air in the early stage. When the radius of the ignition area is 35 mm and the ignition position away from the left side wall of the closed pipe is 100 mm, the deflagration parameters of H_2/air are relatively higher. The influence of different ignition conditions on the kinetic energy and internal energy is similar to the influence of different ignition conditions on the velocity and temperature of the premixed gas, but the ignition conditions hardly influence the vorticity.

Keywords: ignition condition; closed pipe; premixed flame; turbulent combustion; frame front

(责任编辑　张凌云)