

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.025

特征管内 H_2 / Air 预混气体燃爆特性数值模拟研究*

孙从煌¹, 曲艳东²

(1. 中国十九冶集团有限公司 工业建设分公司, 成都 610000; 2. 辽宁工业大学 土木建筑工程学院, 锦州 121001)

摘要: 基于标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 EBU-Arrhenius 燃烧模型, 利用流体动力学软件 Fluent 数值模拟研究两种管(水平直管和直角弯管)内 H_2 / Air 预混气体燃爆过程中火焰锋面传播及演变过程以及燃爆特征参数的动态分布情况, 并进一步研究不同初始温度(300 K、373 K、413 K 和 475 K)和初始压力(1.0 Atm、1.5 Atm 和 2.0 Atm)对预混 H_2 / Air 燃爆特征参数的影响。研究表明: 水平直管内 H_2 / Air 预混火焰锋面经历了球形火焰、椭圆形火焰、平面火焰、褶皱“V”形火焰和光滑“V”形火焰的演变过程, 而直角弯管结构促使对称的“V”形火焰锋面演变为上火舌长、下火舌短的非对称“V”形火焰锋面结构。两管中点火前初始温度对管内峰值压力和气流峰值速度的影响呈现负相关性; 而初始压力对管内峰值压力的影响呈现正相关性, 但对管内峰值温度和气流流速的影响并不明显。水平直管内燃烧反应和预混火焰的传播以及直角弯管内上弯壁面阻碍反射和下弯壁面的突扩诱导作用是 H_2 / Air 预混气体燃爆过程湍流涡运动的产生、运动、转变及消散的动态演变过程的根本。

关键词: 预混气体; 初始条件; 湍流效应; 燃爆特性; 数值模拟

中图分类号: X932; TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0155-11

Numerical Simulation of Combustion and Explosion Characteristics of Premixed H_2 / Air Gas in Characteristic Tubes

SUN Cong-huang¹, QU Yan-dong²

(1. Industrial Construction Branch, China 19th Metallurgical Corporation, Chengdu 610000, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: Numerical simulation of the flame front propagation and evolution during the combustion and explosion process of premixed H_2 / Air gas in two kinds of tubes (straight tube and right-angle tube) is conducted through fluid dynamics software Fluent, which based on the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and EBU-Arrhenius combustion model. Such simulation is also applied on the analysis of the dynamic distribution of characteristic parameters of combustion and explosion for the same premixed H_2 / Air gas. Furthermore, the influence of different initial temperatures (300 K, 373 K, 413 K and 475 K) and initial pressures (1.0 Atm, 1.5 Atm and 2.0 Atm) on the characteristics of premixed H_2 / Air gas combustion and explosion parameters are considered. The results show that the flame front in straight tube experiences an evolution process of spherical flame, oval flame, plane flame, folded “V” flame and smooth “V” flame, while in the right-angle tube, the symmetrical “V” shape flame front evolves into an asymmetric “V” shape with long upper flame tongue and short lower flame tongue due to the right-angle structure. The initial ignition temperature shows negative correlation with the peak pressure and flow velocity in the two tubes. The initial pressure shows positive correlation with the peak pressure without significant influence on the peak temperature and airflow velocity in the two tubes. The reason for the generation, movement, transformation and dissipation of turbulent vortex during the premixed H_2 / Air gas combustion and explosion process maybe as follows: the combustion reaction and premixed flame propagation in the horizontal straight tube; the obstruction of reflection from the upper curved

wall and the sudden expansion induced in lower curved wall in the right-angle tube.

Key words: premixed gases; initial conditions; turbulence effect; explosion characteristics; numerical simulation

氢气因具有点火能量低、层流燃烧速度快、燃烧极限大、耗散小等特点,使其燃爆过程中复杂多变;而可燃气体在实际管道的生产、运输和使用过程中,常因管段形式和输送环境的变化而引发泄漏爆炸事故。例如,2002 年 9 月 15 日山东省济宁市山东峰山化工尿素厂压力管道因球罐富氧总阀前后弯头数目过多引发的泄露爆炸事故致 4 死 1 伤;2014 年 7 月 31 日台湾高雄市地下丙烯直管道因地下水气加速腐蚀老化引发的泄漏爆炸事故致 32 死 321 伤;2017 年 12 月 23 日嘉兴市富欣热电厂因锅炉主蒸汽管至减温减压站直管处发生爆裂引发事故致 5 死 4 伤。诸如此类事故案例数不胜数。为此,国内外众多学者对不同初始条件下各种管段形式内可燃气体的燃爆特性展开诸多研究。Xiao 通过实验和数值模拟分别研究了密闭水平直管、半开口水平直管和 90°弯曲管内预混 H₂/Air 燃烧火焰传播及演变过程^[1-3]。何学超借助高速纹影技术对 90°弯曲管内 C₃H₈/Air 预混火焰传播及燃爆特性进行了实验研究^[4]。此外,考虑不同初始条件的影响差异,Li 在研究甲烷-煤灰预混气体燃爆特性时发现爆炸峰值压力及其上升速率随初始压力和初始浓度的增加而增大^[5]。Wan 通过研究中尺度燃烧室内预混 CH₄/Air 燃烧火焰详细反应机理,发现初始压力的不断增加,其反应强度的增加和火焰前锋面的拉伸效应正相互竞争作用导致 CH₄/Air 灭火极限呈现先增大后减小的变化趋势,其竞争结果将影响火焰的稳定性^[6]。Song 利用高速纹影摄像系统实验研究预混气体(天然气-氢气-空气)火焰传播特性时发现,初始温度及氢气组分的增加对层流燃烧火焰传播的稳定性不利,但却能增加层流燃烧火焰传播速率,而随初始压力的增加抑制层流燃烧火焰的传播^[7]。李润之通过 20L 的球形爆炸罐中心点火实验研究不同环境温度对瓦斯爆炸峰值压力及峰值压力上升速率的影响^[8],实验结果揭示了爆炸峰值压力随初始环

境温度的增加而降低,并呈现倒数线性衰减规律,而爆炸峰值压力上升速率的变化趋势却不明显。Moore 通过 C₃H₈/Air 燃烧火焰点燃爆炸罐体内 CH₄/Air 预混气体,以 298 ~ 398 K 的初始温度进行 130 组实验研究发现气态反应物初始温度的升高,加剧了 CH₄/Air 扩散火焰不稳定性^[9]。黄子超通过 RNG $\kappa - \varepsilon$ 湍流模型及多控制机制分布反应燃烧模型数值模拟研究初始温度对瓦斯爆炸压力、火焰温度及气体组分变化等特性参数的影响^[10],其结果显示初始温度的增加,罐内气流燃爆反应速率及峰值温度明显增加,而爆炸峰值压力却随之降低。Jiang 数值模拟研究 100 m 长的半封闭水平直管内 CH₄/Air 预混气体燃爆特性受不同初始温度及初始压力的影响^[11,12],模拟结果显示初始温度和压力的不同对燃爆反应过程中爆炸峰值温度、峰值压力和峰值压力上升速率等参数均存在明显的差异。

综上所述,目前对预混气体燃爆特性虽有研究,但多集中于水平直管或密闭燃烧室内,对常见的直角弯管内预混气体燃爆特性研究相对较少,且以 H₂/Air 预混气体为研究对象也是寥寥无几,对其燃爆特征参数动态分布及演变过程更是所知甚少,以及初始条件对其差异性影响也未可知。基于此,利用流体动力学软件 Fluent,结合 $k - \varepsilon$ 湍流模型和 EBU-Arrhenius 燃烧模型,数值模拟研究水平直管和直角弯管内 H₂/Air 预混火焰演变及传播过程,并对比分析不同初始温度和压力对两种管内 H₂/Air 预混气体燃爆特征参数的影响。以模拟结果探究火焰面演变历程、峰值温度、峰值压力、气流峰值速度以及流场内的能量和涡量等燃爆参数的动态变化规律。

1 数值模型及初始条件

1.1 控制方程

质量守恒方程

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

动量守恒方程

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

能量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v} (\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_i \vec{h}_i \vec{J}_i) + S_h \quad (3)$$

收稿日期:2020-07-21

作者简介:孙从煌(1990-),男,汉族,研究生、助理工程师,主要从事工程爆破和爆炸力学研究,(E-mail) suncongguang@163.com。

通讯作者:曲艳东(1978-),男,蒙古族,博士、教授,主要从事爆炸力学、爆炸加工与爆炸安全研究,(E-mail) plxfeng2009@sohu.com。

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);辽宁省自然科学基金项目(20170540441、SY201603)

式中: $E = h - \frac{p}{\rho}$, $h = \sum_i Y_i h_i$, $h_i = \int_{T_{ref}}^T C_{p,i} dT$, $T_{ref} = 300 \text{ K}$; Y_i 为组分 i 的质量分数; K_{eff} 为有效传热系数; \vec{J}_i 为组分 i 的扩散流量; S_h 为化学反应热源项。

1.2 几何模型

如图 1 所示, 建立的水平直管和直角弯管的几何模型。其中, 水平直管长 1.0 m, 内径 100 mm, 距左端壁面 50 mm 处设置半径为 35 mm 的点火域。直角弯管的水平段和竖直段管长分别为 700 mm 和 300 mm, 与之相连的直角弯管外半径为 150 mm, 同样位置设置点火域, 采用 1500 K 的高温进行瞬时点火。此外, 为便于捕捉燃爆过程中各项参数, 分别在水平直管和直角弯管内设置 3 个和 8 个数据监测点。基于 Fluent 有限体积法求解原理, 采用 2 mm 均匀结构网格对管内流体域进行网格划分。考虑 H₂/Air 预混气体初始为静止状态, 燃爆过程存在层流向湍流演变过程, 为获得精确真实的模拟结果, 将迭代求解的时间步长设置为 0.1 ms, 一次迭代求解步数为 50 步。此外, 为提高迭代求解过程中的收敛速度和收敛质量, 先采用冷流场进行 50 步的迭代求解, 以获取稳定的预混气体初始值, 再激活化学反应及能量方程进行点火后的预混气体燃爆计算。同时根据残差曲线来确定收敛准则, 再通过调整松弛因子来控制收敛速度。

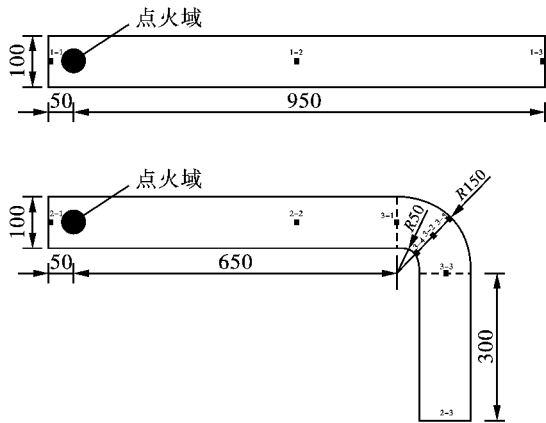


图 1 特征管道几何模型(单位:mm)

Fig. 1 The geometric models of characteristic tubes(unit:mm)

1.3 湍流及燃烧模型

密闭管道内预混气体燃爆过程是伴有复杂化学反应的非线性湍流燃烧过程^[13]。标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型是将湍流动能 k 和湍流耗散能 ε 作为基本未知量的二方程模型, 能精准有效的计算带化学反应燃爆过程, 尤其适合于完全湍流过程的数值模拟^[14]。标准湍流模型相关的运输方程如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i - \frac{u_{eff}}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i}) = G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i - \frac{u_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) = C_1 G \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: x 和 t 分别为空间坐标系统和时间轴; u_i 为速度在 i 方向的分量; σ_k 和 σ_ε 为普朗特数所对应的湍流动能和湍流耗散率; C_1 和 C_2 为常数; μ_{eff} 为有效粘度系数, $\mu_{eff} = \mu + C_D \rho k^2 / \varepsilon$, C_D 为经验常数。

层流有限速率/涡耗散 (EBU-Arrhenius) 燃烧模型能同时考虑湍流效应和化学反应动力学效应, 能同时计算涡耗散反应速率和 Arrhenius 反应速率, 对密闭管道内预混气体燃爆过程及预混火焰传播过程具有较好的数值模拟效果。预混气体的速度计算公式如下

$$R_{fu} = -\min(|R_{fu,A}|, |R_{fu,T}|) \quad (6)$$

$$R_{fu,A} = B \rho^2 Y_1 Y_2 \exp\left[-\frac{E}{RT}\right] \quad (7)$$

$$R_{fu,T} = C_{EBU} \rho \left(\frac{\varepsilon}{k}\right) \min(Y_1, Y_2, Y_3) \quad (8)$$

式中: B 为前导因子; E 为活化能; R 为普氏气体常数; $R_{fu,A}$ 为燃烧速率; C_{EBU} 为经验常数, 通常为 0.34 ~ 0.4; Y_1, Y_2, Y_3 分别为燃料、氧气和燃烧产物的质量分数。

1.4 初始条件及边界条件

考虑管壁与外界环境存在的热传导和辐射效应将造成管内能量的损失, 遂采用光滑、无滑移的固定壁面。由于标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型对完全湍流过程具有较高的模拟精度, 但却无法对壁面低雷诺数流场进行求解计算。并且壁面边界层附近流场受到粘性阻力和剪切流动的影响, 为此采用标准的壁面函数来修正壁面附近的流动方程。基于正交试验设计原理对两种管道内预混气体初始条件进行设置, 具体情况如表 1 所示。

2 结果分析讨论

2.1 火焰演变及传播过程

在常规初始温度为 300 K 和初始压力为 1.0 atm 的工况下, 两种密闭管内 H₂/Air 预混气体不同时刻的燃烧火焰面演变及传播过程如图 2 和图 3 所示。其中, 由图 2 可发现, 水平直管内整个燃爆过程预混火焰前锋面演变过程包括: 球形火焰、椭圆形火焰、平面火焰、褶皱的“V”形火焰和光滑的“V”形火焰。当距左端壁面 50 mm 处的点火域点火引燃时, 预混 H₂/Air 燃烧火焰呈球形向外膨胀扩展,

此时化学反应速率和组分输运速率对层流燃烧速率的影响较为明显,以层流燃烧为主的火焰前锋面逐渐被拉升形成椭圆形火焰,并且燃料区与燃烧区也逐渐被火焰锋面前导稀松波隔开。随着火焰前锋面的进一步扩展,由于受到上下壁面的约束和反射作用,形成了局部湍流效应和涡团运动,在剪切流的作用下加速该处火焰锋面的传播,追赶中轴线凸型火焰锋面,大约在 70 ms 时刻基本完成了椭圆形火焰的锋面向平面火焰锋面的演变。随着壁面处较快速的火焰锋面继续追赶,上下两侧火焰则继续被拉伸,

使预混燃烧火焰由原来的向燃料区凸型火焰演变为内凹形火焰,即形成所谓的“V”形火焰锋面。初始光滑的“V”形火焰锋面在受到上下湍流涡旋运动表现为褶皱的曲面,随着进一步传播受到右端壁面反射的反向稀松波的冲击,减缓了上下壁面的涡运动而使火焰锋面逐渐变为光滑平顺。由此可知,在水平直管内预混火焰的演化及传播过程与早期 Clanet 和 Searby 所提出的“四阶段”火焰演变特征基本一致^[15],且皱褶的 V 型火焰锋面也类似于 Sun 所提出的“三重郁金香”火焰锋面^[16]。

表 1 点火前密闭管道内 H₂/Air 预混气体初始条件

Table 1 The initial conditions of premixed H₂-Air in closed tubes before ignition

序号	初始温度 T_0/K	初始压力 P_0/Atm	初始速度 $V_0/$ $(m \cdot s^{-1})$	H ₂ 质量 比/%	O ₂ 质量 比/%	N ₂ 质量 比/%
1	300	1.0	0	0.0226	0.2172	0.7600
2	300	1.5	0	0.0226	0.2172	0.7600
3	300	2.0	0	0.0226	0.2172	0.7600
4	373	1.0	0	0.0226	0.2172	0.7600
5	413	1.0	0	0.0226	0.2172	0.7600
6	475	1.0	0	0.0226	0.2172	0.7600

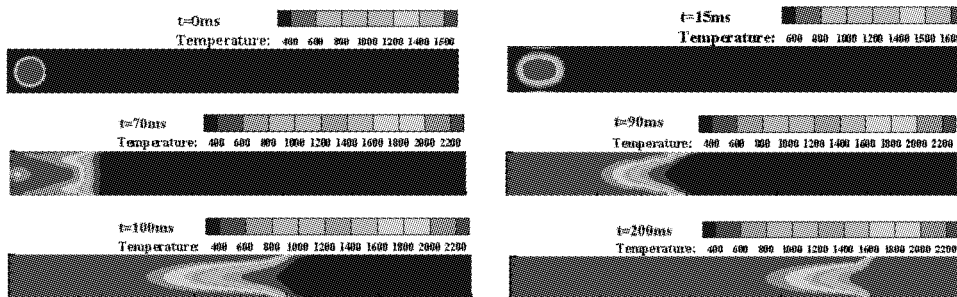


图 2 水平直管内 H₂/Air 预混气体燃爆过程

Fig. 2 Combustion process of H₂-Air Pre-mixture gas in straight tube

由图 3 所示,基于水平管道预混火焰演变传播特性,H₂/Air 预混火焰在直角弯管左端水平直管段的演化传播过程类似于水平直管道,但在形成对称的“V”形火焰锋面后因受到直角弯管的壁面约束及诱导作用而发生畸变,附加的湍流作用使“V”形湍流火焰的对称结构遭到破坏。在上弯壁面的阻挡反射压缩波的作用下加剧了湍流涡运动,从而加快了火焰前锋面的传播速度;而下弯壁面因管截面的突扩产生的稀松诱导作用增加了预混火焰面厚度及湍流强度,如此使得原本对称的“V”形火焰锋面逐渐演变为上火舌长,下火舌短的非对称火焰锋面结构。

2.2 燃爆过程温度场分析

2.2.1 管道形式的影响

根据图 1 中两种管道内所布设的数据监测点,

对 H₂/Air 预混气体燃爆过程的温度场动态分布差异进行对比分析,具体如图 4(a)所示。随着预混火焰向右传播,两种管道内各监测点(1-1 至 1-3 和 2-1 至 2-3)处气流温度均先后依次开始上升,当火焰面接近右端壁面时,除左端壁面区域受点火高温的影响而表现较高峰值温度,其他区域的气流峰值温度几乎相等。对比分析发现,水平直管内 H₂/Air 预混气体前期燃烧速度及温升速率较快,但在直角弯管内预混火焰传播后期通过弯管段后,受直角弯管结构的影响使得管下端 2-3 处的温升时刻要早于水平直管右端 1-3 处,但其温升速率相对较缓慢。为此,对直角弯管结构对预混火焰传播的影响进行详细分析,如图 4(b)所示。受弯曲壁面的阻挡反射作用和稀松诱导作用使得弯曲管段径向同一截面处温度分

布不均匀, 呈现出内侧弯曲壁面(3-4)的气流温度比外侧壁面(3-5)上升时刻早, 且均早于中间位置(3-2), 但最终外弯曲壁面峰值温度稍高于内侧弯曲壁面, 如此形成了图 3 中上火舌长、下火舌短非对称的“V”形火焰前锋面。由此说明, H₂/Air 预混火焰沿两种管道轴向传播均呈现峰值温度依次开始上升

的规律, 且最终峰值温度基本一致, 而直角弯管结构的改变产生了各种约束、反射对流和诱导作用使得靠近小曲率弯曲壁面附近火焰传播速度较快, 气流温升时刻较早, 而管道中轴线处温升时刻较晚, 从而在直角弯管中形成不对称的“V”形火焰面。

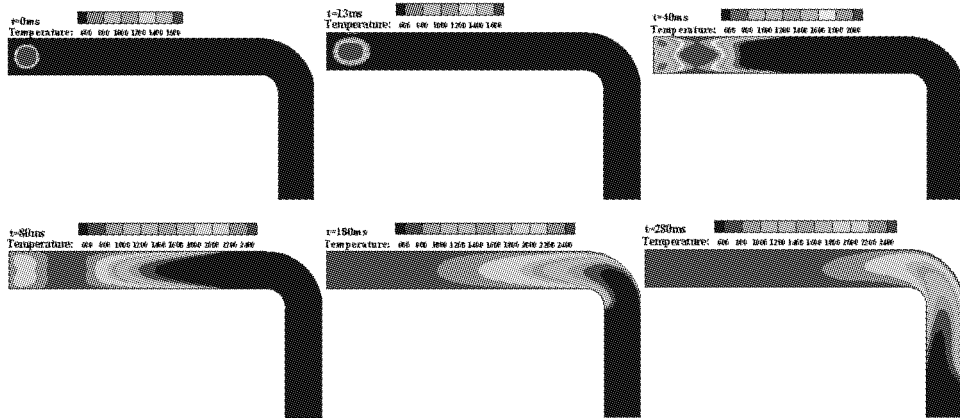


图 3 直角弯曲管道内 H₂/Air 预混气体燃爆过程

Fig. 3 Combustion process of H₂/Air Pre-mixture gas in right-angle tube

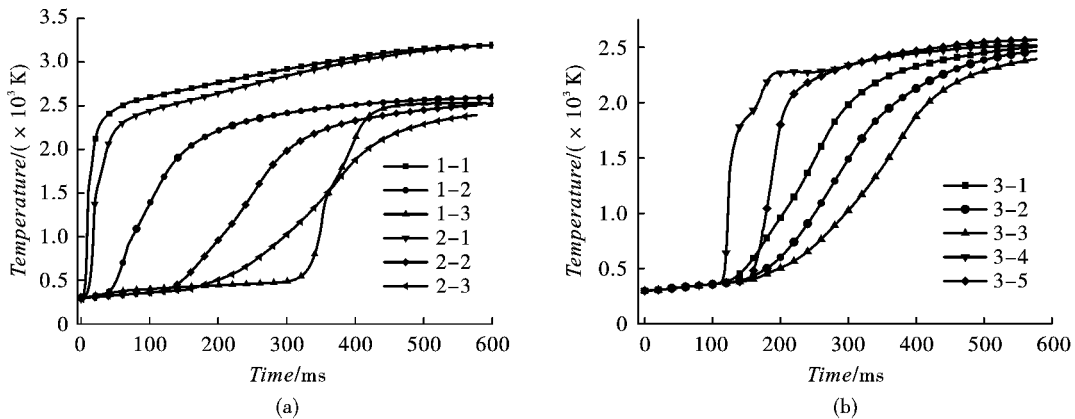


图 4 两种管道内不同监测点的温度时程曲线

Fig. 4 The temperature time cure of different monitor points in two kinds of tubes

2.2.2 初始温度的影响

初始温度的不同将直接改变 H₂/Air 预混气体分子的活化能, 使得初始阶段所发生的燃爆反应程度存在明显差异。由图 5(a) 可知, 在点火引爆前期, 水平直管内 H₂/Air 预混气体初始温度越高, 气体分子吸收能量转变为活化分子并发生燃烧反应越剧烈, 燃烧放热使管内峰值温度越高; 而在 120 ms 以后, 由于此时湍流火焰已形成, 火焰前锋附近的漩涡运动使管中轴线处出现逆流现象, 抑制了燃烧反应及火焰面向前传播, 且初始温度越高产生的湍流效应越强, 抑制现象越明显, 峰值温度上升速度越缓慢。图 5(b) 中直角弯管内不同初始温度下的

H₂/Air 预混气体最高温度变化趋势与水平直管相似, 但上升速率相对较为平缓。由此说明, 初始温度的不同使得两种管道内 H₂/Air 预混气体在燃爆过程中, 均表现出初始温度越高, 反应初期的峰值温度越高, 而反应后期的峰值温度却越低。而直角弯管结构改变了预混火焰传播方向, 使得峰值温度上升速度较缓。

2.2.3 初始压力的影响

由图 6 所示, 在三种初始压力 (1.0 Atm、1.5 Atm 和 2.0 Atm) 作用下, 两种管道内 H₂/Air 预混气体燃爆过程中管内峰值温度所呈现出的变化趋势基本一致, 由此可判断初始压力对管内峰值温度

的影响并不明显。然而,水平直管内最高温度上升曲线出现过两次明显的转折和三种上升斜率,且上

升斜率依次减小;而直角弯管内峰值温度曲线上速度相对平缓,上升速率逐渐减少。

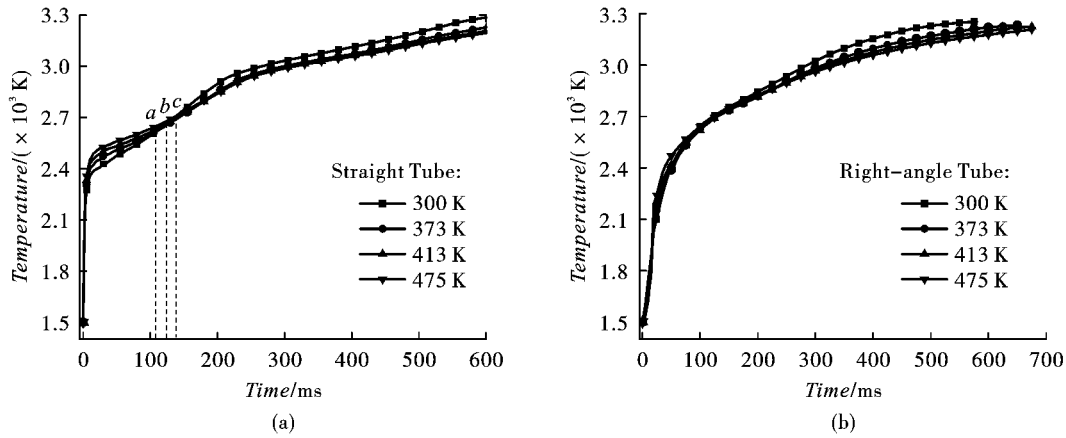


图 5 不同初始温度下两种管道内燃爆过程峰值温度时程曲线

Fig. 5 The maximum temperature time cure of gas explosion under different initial temperature in two kinds of tubes

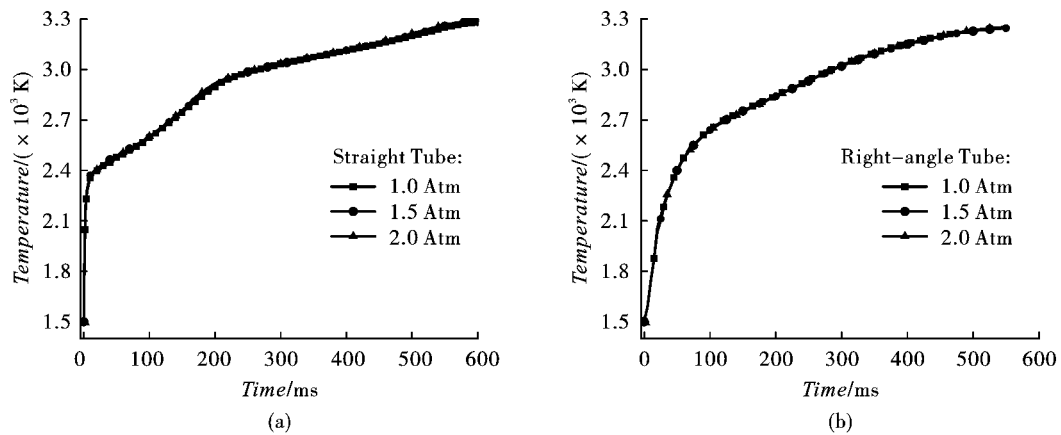


图 6 不同初始压力下两种管内燃爆过程峰值温度时程曲线

Fig. 6 The maximum temperature time cure of gas explosion under different initial pressure in kinds of tubes

2.3 燃爆过程压力场分析

受管道尺寸效应的影响,管内不同位置处的 H_2/Air 预混气体燃爆过程的峰值压力相差并不明显,但因初始温度和初始压力的不同,两种管道内的峰值压力则表现出明显差异。由图 7 和图 8 可发现,两种密闭管内的峰值压力均随燃爆反应的进行而逐渐升高,但预混气体初始温度越高,峰值压力上升速率越慢,最终管内的峰值压力值越小;而预混气体初始压力越高,管内峰值压力上升速度越快,最终峰值压力值也越大。由此说明,预混气体初始压力对管内峰值压力呈正相关影响,即促进作用;而初始温度对密闭管内峰值压力呈现负相关影响,即抑制作用。

2.4 燃爆过程流体域分析

两种密闭管内 H_2/Air 预混气体燃爆过程中各观测点的气流速度时程曲线,如图 9 所示。由此可知,点火后随着预混火焰向右传播,燃烧放热促使气

流向右流动,两种管道中轴线上各观测点的气流流速由左向右先后依次出现单峰值,但中间观测点涉及到预混火焰层流燃烧和层流向湍流燃烧的演变,在前导稀松波诱导作用和湍流涡团运动作用下反复震荡后出现向右的高峰值流速。随着湍流运动的不断增强,形成“V”形火焰前锋面后,管中轴线处气流出现逆流现象,使得中间测点的峰值流速迅速衰减。随着预混火焰继续向右传播,受右端壁面阻挡及反射冲击波的压缩作用,中监测点出现向左的反向峰值流速,并随着燃烧火焰的熄灭和反向冲击波的弱化及消散而逐渐衰减。然而,对比分析发现,直角弯管结构的影响使得中间测点(2-2)向右的峰值流速衰弱了 19.49%,且向右流速衰减后并出现向左的反向流速的时刻也延迟了 38.5 ms,但向左的反向峰值流速却增加了 39.37%。为此,进一步分析直角弯管段的流场情况,由图 9(b)所示。弯曲管

段中轴线上各观测点(3-1 至 3-3)的峰值流速时程曲线的变化趋势随预混火焰的传播趋于相同,但同截面内侧弯曲壁面(3-4)处的峰值流速要比外侧弯曲壁面(3-5)处的峰值流速明显要高,气流波动时刻也相对较早,且均明显高于中轴线(3-2)处峰值流速。由此说明,直角管道结构能明显改变 H₂/Air 预

混气体燃爆过程的气流流速,顺应气流导向方向的弯曲壁面附近的气流流速相对较大,而垂直于气流流向的壁面附近气流速度较小。弯曲壁面的存在改变了燃爆过程中各应力波的传播及反射方向,增加了湍流涡运动强度,从而加快预混气体燃烧反应强度和气流速度。

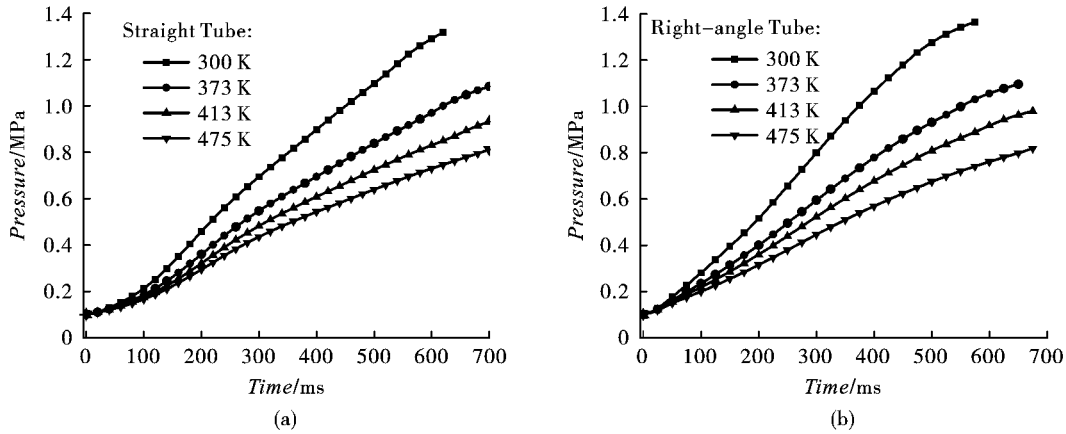


图 7 不同初始温度下两种管内燃爆过程峰值压力时程曲线

Fig. 7 The peak pressure time cure of gas explosion under different initial temperature in kinds of tubes

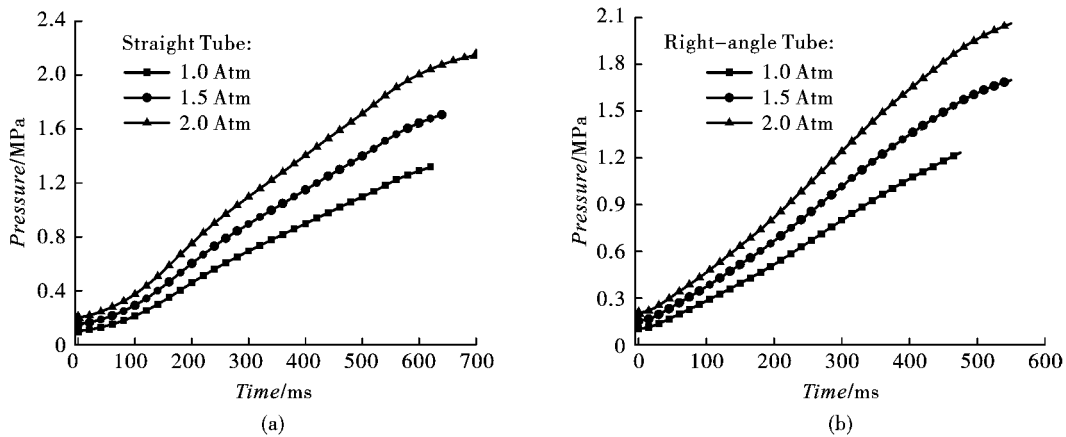


图 8 不同初始压力下两种管内燃爆过程峰值压力时程曲线

Fig. 8 The peak pressure time cure of gas explosion under different initial pressure in kinds of tubes

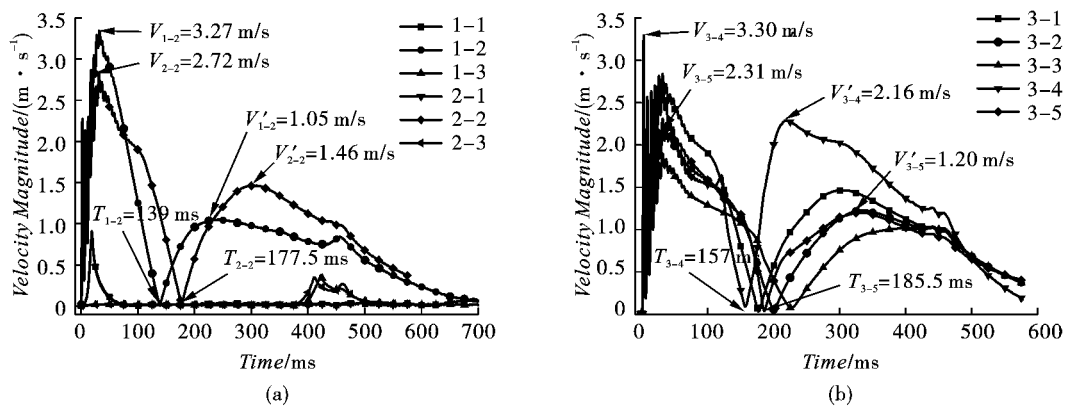


图 9 两种管内不同监测点处的气流速度时程曲线

Fig. 9 The flow-velocity time cure of different monitor points in kinds of tubes

不同初始温度和初始压力对两种管道 H_2/Air 预混气体燃爆过程的气流峰值速度的影响的对比分析如图 10 和图 11 所示。不同初始温度使管内气流峰值速度的波动趋势基本一致,均在 100 ms 前出现

单峰值后逐渐开始波动衰减,但初始温度越高,管内峰值流速越小,峰值速度突变时刻也相对较晚。然而,初始压力的不同对管内气流峰值速度的影响并不明显。

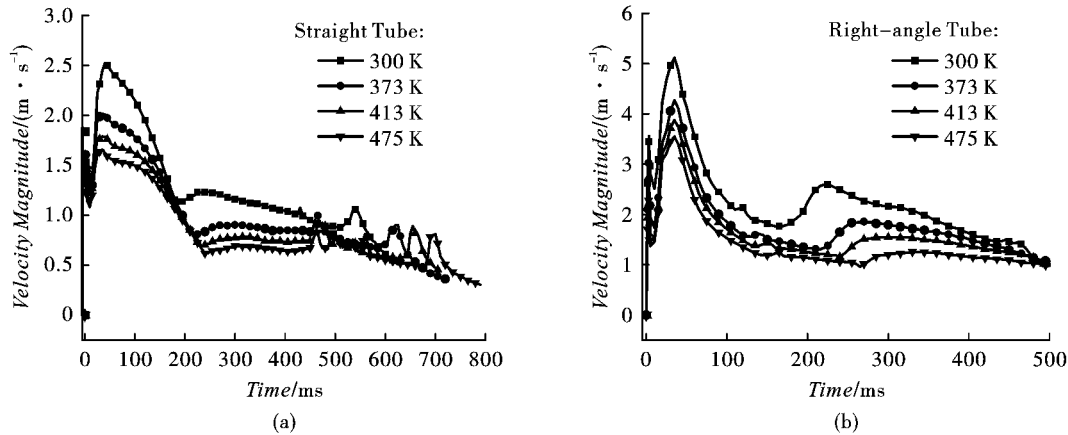


图 10 不同初始温度下两种管内气流速度时程曲线

Fig. 10 The flow-velocity time cure of gas explosion under different initial temperature in kinds of tubes

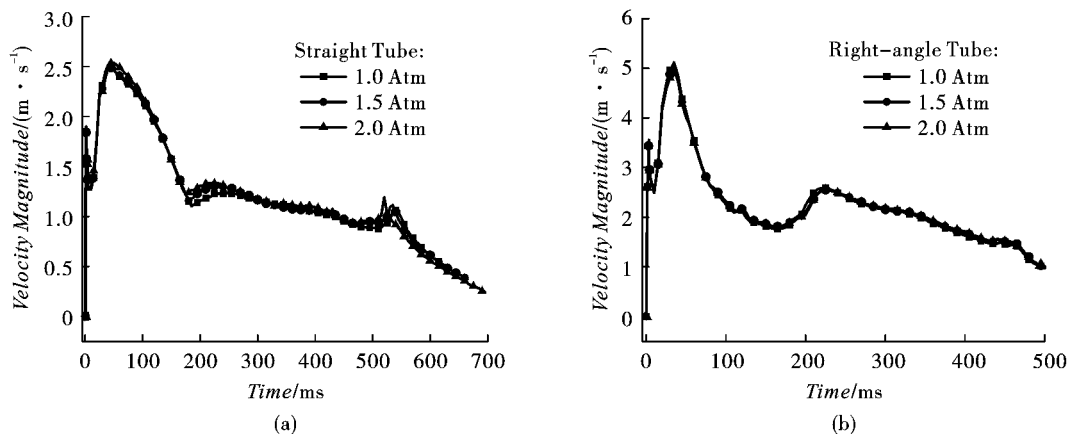


图 11 不同初始压力下两种管内气流速度时程曲线

Fig. 11 The flow-velocity time cure of gas explosion under different initial pressure in kinds of tubes

2.5 燃爆过程流体域能量及流量分析

预混气体的燃爆过程伴随着复杂的能量释放、传播和转化过程。由气体分子动理可知,气体分子在永不停息地做无规则的热运动,因此密闭管内预混气体动能的大小宏观上反应在气流流速上。由图 12 可知,预混气体燃爆过程中动能的变化趋势及特性与气流流速的变化趋势相同,只是中间测点(1-2 和 2-2)的峰值动能及波动时刻存在差异, $E_{K1-2} > E_{K2-2}$ 且 $T_{K1-2} > T_{K2-2}$,说明直角弯管结构削弱了中间测点的动能,延长了峰值动能的衰减时间,但在接触壁面出现反向流时增加二次峰值动能,且直角弯管结构明显增加小曲率内侧弯管壁面处的动能。分子无规则热运动的动能和分子间相互作用的势能统称为分子内能,而气体温度越高,分子间的热运动越剧

烈,因此在固定体积的密闭管道内,气体分子内能的大小宏观表现在气体温度的高低。由图 13 可知,预混气体内能的变化趋势与管内气体温度变化趋势基本相同。在空气动力学原理中,又常用涡旋来描述流体湍流运动特征,涡团的产生、运动、转移和消散均伴随着复杂的流体动力学运动。由图 14 可知,预混气流的涡团是随着预混火焰自左向右传播而产生、增强及震荡的,燃爆反应及预混火焰的传播是密闭直管内涡团产生及运动的根本。而直角管结构增强了气体分子的涡运动,且下弯曲壁面处的涡量要明显高于上弯曲壁面及中轴线流域,由此说明该阶段弯曲壁面结构是加强气流漩涡运动的决定性因素,其根本原因是由于上壁面阻碍作用和反射波压缩作用,以及下壁面截面突扩诱导作用和稀松波拉

伸作用, 促使 H₂/Air 预混火焰前锋面的涡流发生扰动和曲折, 从而明显增加火焰表面积, 提高燃烧反应

强度。

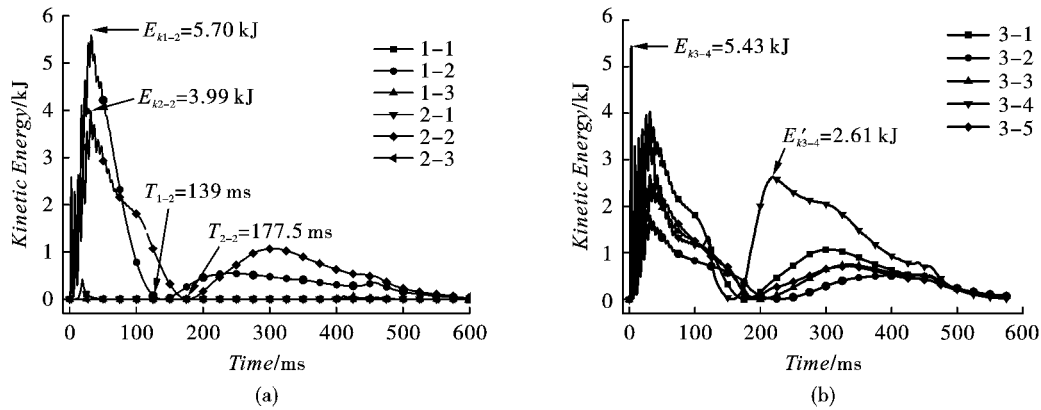


图 12 两种管内不同监测点处的气流动能时程曲线

Fig. 12 The kinetic energy time cure of different monitor points in kinds of tubes

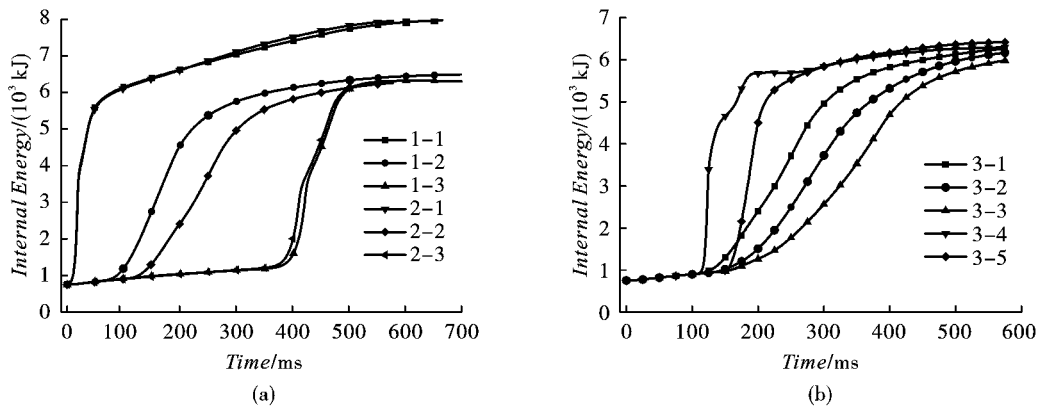


图 13 两种管内不同监测点处的气流内能时程曲线

Fig. 13 The internal energy time cure of different monitor points in kinds of tubes

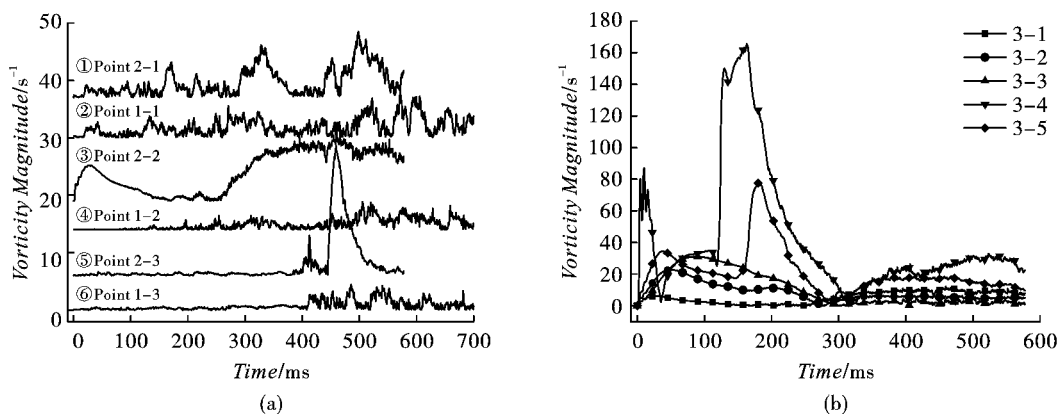


图 14 两种管内不同监测点处的气流涡量时程曲线

Fig. 14 The vorticity time cure of different monitor points in kinds of tubes

3 结论

通过流体动力学软件 Fluent, 对两种输气管段内 H₂/Air 预混气体燃爆过程中预混火焰的传播及演变过程, 以及不同初始条件下各管内预混气体燃

爆特征参数的变化规律进行了数值模拟研究, 根据数值模拟结果得出以下结论:

(1) 水平直管内 H₂/Air 预混气体燃爆过程经历了球形火焰、椭圆形火焰、平面火焰、褶皱的“V”型火焰和光滑的“V”型火焰的演变过程。直角弯管结

构所产生的阻挡反射、扩张诱导以及壁面间各应力波多次反射和叠加作用的影响,致使原本对称结构的“V”形火焰锋面扰动演变为上火舌长、下火舌短的非对称结构的“V”形火焰。并在燃爆过程管内温度场分析中,通过管道结构的改变所产生的各种约束、反射对流和诱导作用很好的解释了直角弯管内特征的非对称结构V型火焰锋面。

(2) 初始温度和初始压力对密闭管内预混气体燃爆特征参数的影响表现为:点火前的初始温度越高,燃爆反应初期的峰值温度越高,但反应后期的温度却越低;初始温度对管内峰值压力及气流峰值流速的影响却呈现负相关性,即初始温度越高,管内峰值压力和气流的峰值速度却越小,压力及速度的转变时刻相对较晚。然而,点火前的初始压力越高,管内峰值压力也越高,即初始压力对管内峰值压力的影响呈现正相关性。但初始压力的改变对管内峰值温度和气流流速的影响不明显。

(3) H_2 /Air 预混气体动能和内能的变化趋势分别同流场内流速及温度的变化趋势相同,而以涡量时程曲线描述两种管内湍流运动的产生、运动、转移及消散的动态演变过程,发现燃烧反应和预混火焰的传播是水平直管内湍流运动的根本,而直角弯管结构的上弯壁面的阻挡反射和下弯壁面的突扩诱导作用对火焰锋面的扰动和曲折拉伸效应是其加强湍流运动运动的根本,如此改变了湍流运动和各应力波的传播和反射方向,使顺应气流导向方向的弯曲壁面附近气流流速较大,而垂直于气流流向的壁面附近气流流速相对较小。

参考文献 (References)

- [1] XIAO H H, D M, SUN J H, et al. Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(4): 1523-1538.
- [2] XIAO H H, WANG Q S, SHEN X B, et al. An experimental study of premixed hydrogen/air flame propagation in a partially open duct[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(11): 6233-6241.
- [3] XIAO H H, HE X C, WANG Q S, et al. Experimental and numerical study of premixed flame propagation in a closed duct with a 90 curved section[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 66: 818-822.
- [4] 何学超,孙金华,丁以斌,等. 90°弯曲管道对丙烷空气预混火焰传播的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2010, 16(3): 241-245.
- [4] HE X C, SUN J H, DING Y B, et al. Influence of 90° bend on propane-air premixed flame propagation [J]. *Journal of combustion science and Technology*, 2010, 16(3): 241-245. (in Chinese)
- [5] LI Y, WANG X S. Experimental study on the influence of initial pressure on explosion of Methane-Coal dust mixtures[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 62: 980-984.
- [6] WAN J L, FAN A W, YAO H, et al. Effect of pressure on the blow-off limits of premixed CH_4 /air flames in a mesoscale cavity-combustor[J]. *Energy*, 2015, 91: 102-109.
- [7] SONG Z F, ZHANG X, HOU X S, et al. Effect of initial pressure, temperature and equivalence ratios on laminar combustion characteristics of hydrogen enriched natural gas[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2018, 91(06): 887-893.
- [8] 李润之,黄子超,司荣军. 环境温度对瓦斯爆炸压力及压力上升速率的影响[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(4): 415-419.
- [8] LI Y Z, HUANG Z C, SI R J. Influence of environmental temperature on gas explosion pressure and its rise rate [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(4): 415-419. (in Chinese)
- [9] JEFFREY D MOORE, GRANT A RISHA, KENNETH K KUO, et al. Effect of reactant initial temperature on methane/oxygen diffusion flame stability in a furnace [J]. *Combustion Science and Technology*, 2005, 177(11): 2069-2089.
- [10] 黄子超,司荣军,张延松,等. 初始温度对瓦斯爆炸特性影响的数值模拟[J]. *煤矿安全*, 2012, 43(5): 5-7.
- [10] HUANG Z C, SI R J, ZHANG Y S, et al. Numerical simulation of the influence of initial temperature on gas explosion characteristics [J]. *Safety in Coal Mines*, 2012, 43(5): 5-7. (in Chinese)
- [11] JIANG B Y, LIN B Q, SHI S L, et al. A numerical simulation of the influence initial temperature has on the propagation characteristics of, and safe distance from, a gas explosion [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2012, 22: 307-310.
- [12] JIANG B Y, LIN B Q, SHI S L, et al. Numerical simulation on the influence of initial temperature and initial pressure on attenuation characteristics and safety distance of gas explosion [J]. *Combustion Science and Technology*, 2012, 184: 135-150.
- [13] 张彭岗,潘振华,朱跃进,等. 不同燃料及初始条件下的胞格测试实验 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(17): 292-296.
- [13] ZHANG P G, PAN Z H, ZHU Y J, et al. The testing experiment of cellular under different fuels and initial conditions [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(17): 292-296. (in Chinese)

- [14] 孙从焯. 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.
- [14] SUN C H. Developing detonation reaction pipe and research on characteristics of gaseous deflagration in the pipe[J]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] CLANET C, SEARBY G. On the "Tulip flame" phenomenon[J]. Combustion and Flame, 1996, 105(1/2): 225-238.
- [16] XIAO H H, SUN J H, CHEN P. Experimental and numerical study of premixed hydrogen/air flame propagation in a combustion chamber[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 268(3): 132-139.

英文编辑:柯 波

(上接第62页)

通过合理炮孔布置优化,尤其是掏槽布孔方式的调整,光爆技术能够减少炸药单耗、提高爆破进尺,降低爆破成本。

参考文献 (References)

- [1] 林福荣. 大红山铁矿西上采区巷道光面爆破掘进爆破参数优化应用[J]. 中国矿业, 2018, 27(5): 252-253.
- [1] LIN Fu-rong. Optimization and application of blasting parameters for smooth blasting and driving in the roadway in the west mining area of Dahongshan Iron Mine[J]. China Mining Industry, 2018, 27(5): 252-253. (in Chinese)
- [2] 马春德,刘泽霖,龙 珊,等. 预留光爆层工法在大断面隧道安全快速施工中的应用[J]. 矿冶工程, 2019, 39(6): 25-28, 34.
- [2] MA Chun-de, LIU Ze-lin, LONG Shan, et al. Application of reserved light-explosive layer construction method in safe and rapid construction of large-section tunnel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(6): 25-28, 34. (in Chinese)
- [3] 张 迅. 光面爆破不耦合装药参数优化的试验研究[J]. 工程爆破, 2019(12): 27-31.
- [3] ZHANG Xun. Experimental research on uncoupling charge parameter optimization of smooth blasting[J]. Engineering Blasting, 2019(12): 27-31. (in Chinese)
- [4] 马 力,牛志军,姚强岭,等. 恒源矿深井大断面岩巷快速掘进技术的研究与应用[J]. 中国矿业, 2020, 29(3): 159-166.
- [4] MA Li, NIU Zhi-jun, YAO Qiang-ling. Research and application of rapid excavation technology of large section rock roadway in deep shaft of Hengyuan Mine[J]. China Mining Industry, 2020, 29(3): 159-166. (in Chinese)
- [5] 杨小平,麦宗华,程传钊,等. 光面爆破技术在大红山铁矿采切作业面的应用[J]. 中国矿业, 2019, 28(6): 209-211.
- [5] YANG Xiao-ping, MAI Zong-hua, CHENG Chuan-zhao, et al. Application of smooth blasting technology in mining and cutting working face of Dahongshan Iron Mine[J]. China Mining Industry, 2019, 28(6): 209-211. (in Chinese)
- [6] 杨跃宗,邵珠山. 岩石爆破中径向和轴向不耦合装药的对比分析[J]. 爆破, 2018, 37(4): 26-33, 146.
- [6] YANG Yue-zong, SHAO Zhu-shan. Comparative analysis of radial and axial uncoupled charge in rock blasting[J]. Blasting, 2018, 37(4): 26-33, 146. (in Chinese)
- [7] 邓永兴,张中雷,管志强,等. 螺旋管聚能药包根底光面爆破机理研究及应用[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(3): 92-99.
- [7] DENG Yong-xing, ZHANG Zhong-lei, GUAN Zhi-qiang et al. Research and application of smooth blasting mechanism at the base of spiral tube shaped charge bag[J]. Explosion and Shock, 2019, 39(3): 92-99. (in Chinese)
- [8] 张继春,潘 强,郑爽英,等. 特大断面公路隧道的光面爆破技术研究[J]. 爆破, 2018, 35(4): 52-57.
- [8] ZHANG Ji-chun, PAN Qiang, ZHENG Shuang-ying, et al. Research on smooth blasting technology of super-large cross-section highway tunnel[J]. Blasting, 2018, 35(4): 52-57. (in Chinese)
- [9] 王怀勇,裴 斌. 光面爆破在节理裂隙发育巷道掘进中的试验研究[J]. 中国矿业, 2019, 28(2): 373-376.
- [9] WANG Huai-yong, PEI Bin. Experimental research on smooth blasting in jointed fissure development roadway[J]. China Mining Industry, 2019, 28(2): 373-376. (in Chinese)
- [10] 梁 瑞,解丽娜,周文海,等. 中部空气间隔装药结构不耦合状态光面爆破效果研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(2): 25-28.
- [10] LIANG Rui, XIE Li-na, ZHOU Wen-hai, et al. Research on the effect of smooth blasting in the uncoupled state of the air space charge structure in the middle[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019, 39(2): 25-28. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚