

瓦斯爆燃火焰在波纹阻火器内淬熄特性分析

陆明飞,丛立新,周军伟

(哈尔滨工业大学 海洋工程学院,山东 威海 264200)

摘 要:研究瓦斯爆燃火焰淬熄规律是开发防爆抑爆技术的基础。为有效抑制井下爆燃事故,探究瓦斯爆燃火焰在微细孔道内部的发展规律,以波纹型阻火器为研究对象,采用大涡模拟耦合有限速率/涡耗散模型的方法对波纹型阻火器阻火单元内甲烷/空气预混火焰的淬熄过程进行三维模拟。研究基于阻火单元内部温度和化学反应速率的瞬态特征,分析了火焰淬熄机理以及入口火焰速度和壁面温度对淬熄过程的影响。结果表明,火焰在波纹型阻火器内的传播受入口处火焰和内部燃烧化学反应的共同影响;火焰速度和内部燃烧化学反应速率都随着火焰传播距离的增长逐渐降低,但内部燃烧化学反应对火焰传播的影响逐渐占据主导。阻火器壁面对燃烧化学反应有重要影响,减小燃烧化学反应区域有利于火焰的淬熄。火焰速度和燃烧化学反应速率间存在相互促进关系。入口火焰速度越大,淬熄距离越远;随着入口火焰速度增大,影响逐渐减小,火焰淬熄距离增速减小。壁面温度的改变对化学反应速率影响较小;提高壁面温度将阻碍壁面散热,使熄灭层厚度减小。壁面温度越高,火焰淬熄距离越远;入口火焰速度越大,淬熄距离增长越明显。当壁面温度足够大时,火焰将穿过阻火器,造成阻火器失效。

关键词:淬熄;波纹型阻火器;爆燃;天然气;瞬态特征

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2022)04-1579-09

Quenching characteristics of gas deflagration flame in crimped ribbon flame arrester

LU Mingfei, CONG Lixin, ZHOU Junwei

(School of Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai 264200, China)

Abstract: The research on gas deflagration flame quenching is the basis of explosion-proof and explosion suppression technology. Large eddy simulation (LES) coupled with Finite Rate/EDM was used for three-dimensional simulation on the quenching process of methane air premixed flame in the Flame-Resistant element of crimped ribbon flame arrester in order to suppress gas deflagration effectively and reveal the rule of gas deflagration flame development in the micro channel. Based on the transient characteristics of temperature and reaction rate, the mechanism of flame quenching and the effects of inlet flame velocity and wall temperature were analyzed. It has been found that the flame propagation is mainly affected by the entrance flame and the internal combustion reaction. The flame velocity and internal combustion reaction rate decrease with the development of flame. At the later stage, the influence of internal combustion reaction on flame propagation is dominant. The wall of flame arrester has an important effect on the re-

收稿日期:2021-07-11 修回日期:2021-09-18 责任编辑:王晓珍 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2021.1100

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2014EEM048);中央军委装备发展部装备预先研究领域基金资助项目(61402060116)

作者简介:陆明飞(1997—),男,山东临沂人,硕士研究生。E-mail:lmf0@163.com

通信作者:丛立新(1968—),男,山东威海人,副教授,博士。Tel:0631-5682790, E-mail:conglixin@hit.edu.cn

引用格式:陆明飞,丛立新,周军伟. 瓦斯爆燃火焰在波纹阻火器内淬熄特性分析[J]. 煤炭学报,2022,47(4):1579-1587.

LU Mingfei, CONG Lixin, ZHOU Junwei. Quenching characteristics of gas deflagration flame in crimped ribbon flame arrester [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1579-1587.



移动阅读

action rate. Reducing the combustion reaction area is conducive to the quenching of flame. There is a positive feedback relationship between flame velocity and combustion chemical reaction rate. The quenching distance will extend with the increase of inlet flame velocity, and the growth rate will slow down. The change of wall temperature has little effect on the chemical reaction rate. Increasing wall temperature will hinder the wall heat dissipation and extend the quenching distance. The growth rate of quenching distance will be enhanced with the increase of inlet flame velocity. The flame will pass through the flame arrester when the wall temperature is high enough, resulting in the failure of the flame arrester.

Key words: quenching; crimped ribbon flame arrester; deflagration; natural gas; transient characteristics

瓦斯爆燃事故是矿井主要灾害之一,给煤炭行业造成了严重的人员财产损失。阻火器作为一种使火焰发生淬熄的阻燃装置,能够有效抑制矿井下火焰的传播。火焰在其内部微细通道的淬熄涉及到各种复杂的现象,如湍流流动、传热效应、流动不稳定性和边界层等,一直是该领域研究的热点和难点^[1-6]。

1932 年, HOLM 等^[7]采用烧嘴法首次试验测量了不同气体火焰的淬熄直径。1997 年,周凯元^[8]提出了熄灭层理论来解释淬熄,由于忽视了流体的黏性和内部的化学反应,在入口火焰速度较大时预测模型效果并不理想。2005 年,宋占兵^[9]基于 VC++ 建立了二维火焰在狭缝中的淬熄模型,研究专注火焰在狭缝中的流动状态和形状变化,但模拟条件过于理想忽视了壁面温度对淬熄的影响。2019 年,ARIFF 等^[10]试验探究了流动状态对火焰淬熄距离的影响。2020 年, WAN 等^[11]采用高速纹影摄影技术捕捉到了氢/空气预混火焰在多孔板组阻火装置内的 3 种流动现象:“通过”、“淬熄”和“接近极限”。但由于淬熄机理复杂,淬熄过程迅速,所得结果在细节方面仍有不足。

随着计算机和仿真技术的发展,结果详细、可控性强的商用 CFD 软件已成为解决火焰淬熄问题的主流方法^[12-14]。2014 年,温小萍等^[15]模拟了瓦斯爆燃火焰在狭缝中的淬熄得到了与周凯元试验相似的结果。2017 年,孙少辰等^[16]基于波纹型阻火器内火焰淬熄模拟提出了孔隙率和阻火单元厚度对火焰传播的影响机制,张建全等^[17]和梁胜龙等^[18]则着眼于阻火器的扩张腔和扩张角。然而模拟研究针对阻火芯整体,大都忽略了内部阻火单元的具体形状而将其抽象为孔隙率^[16,19]。BERLAD 和 POTTER^[20]很早就已发现阻火单元的截面形状对阻火效果有着重要影响。喻健良^[21]、胡春明^[22]、李江涛^[23]等学者已对丝网、微型圆管和平板狭缝等结构较为简单的阻火单元进行了二维/三维数值模拟。而应用广泛的波纹型阻火器的阻火单元,研究相对缺失。且由于其结构复杂,难以通过试验取得定量的结果。

因此,笔者针对以往研究的不足,选取波纹阻火器中单一阻火单元为研究对象,基于 CFD 流体动力

学软件模拟不同工况下三维火焰在其内的淬熄过程,进而得出火焰的淬熄机理。研究主要集中在入口火焰速度和壁面温度等对火焰淬熄发展的影响,包括温度、化学反应速率等。本研究有助于指导阻火器的安装设计,为瓦斯的抑燃抑爆提供参考。

1 模型及参数设定

1.1 波纹型阻火器阻火单元物理模型

图 1 为波纹型阻火器的结构,阻火芯由 2 层平板夹 1 层波纹板缠绕而成,板间隙类似于一个个三棱柱狭缝,即波纹型阻火器的阻火单元,火焰的淬熄在这些狭缝内发生。笔者将这些阻火单元统一简化为如图 2 所示的三棱柱,其长 40 mm,截面为边长 1 mm 的等边三角形,选择波纹板的常用的铝材作为阻火器材料。以当量比为 1 的甲烷/空气预混气体完全燃烧后所得燃烧产物表示入口处进入的火焰,温度取绝热燃烧温度。基于以往研究^[24-26],以 1 700 K 等温面代表

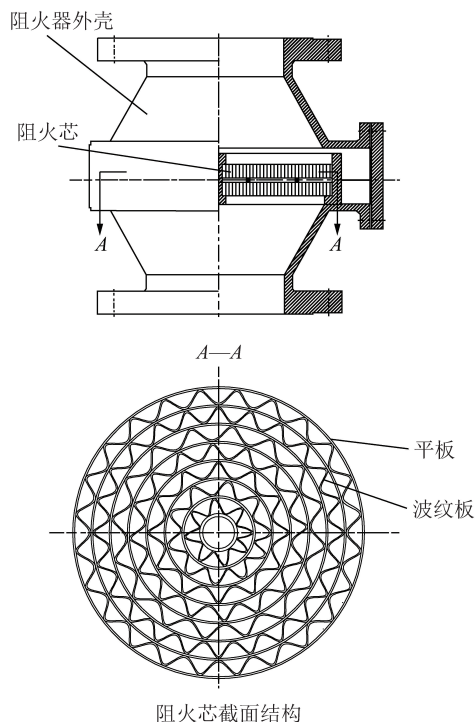


图 1 波纹型阻火器结构

Fig.1 Structure of crimped ribbon flame arrester

火焰面的位置。由于入口爆燃火焰速度极快,燃烧至熄灭的过程短暂,因此模型忽略了热辐射。壁面设置为厚度为0的恒温壁面,这也是研究火焰淬熄时采用较多的设定^[14-15,27]。

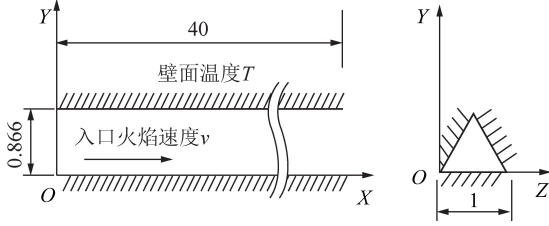


图2 阻火单元几何模型

Fig.2 Geometrical model of crimped ribbon flame arrester elements

1.2 大涡模拟和燃烧模型

阻火单元内火焰的传播通常为高速可压缩流。基于这一问题,通过守恒方程经过滤波函数过滤,结合本构方程和状态方程得到描述火焰淬熄过程的大涡模拟(LES)控制方程。在燃烧过程中密度变化较大,为使N-S方程较易封闭,对变量函数采用密度加权(Favre)过滤。其中,表示过滤后的大尺度分量用上标“-”表示,Favre滤波过滤处理用上标“~”表示。

控制方程:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\bar{p} = \bar{\rho} R \tilde{T} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = & \bar{\rho} \tilde{f}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} u_i u_j - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = & \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \bar{\psi} - \frac{\partial \bar{q}''_j}{\partial x_j} + \\ & \bar{q}''' - \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} h u_j - \bar{\rho} \tilde{h} \tilde{u}_j) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_a}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_a \tilde{u}_j}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} D_a \frac{\partial \tilde{Y}_a}{\partial x_j}) + \bar{m}'''_a - \\ & \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} Y_a u_j - \bar{\rho} \tilde{Y}_a \tilde{u}_j) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, x 为空间直角坐标; u 为瞬时速度,m/s; t 为时间,s;下标 i, j, k 为坐标方向; ρ 为密度,kg/m³; T 为温度,K; R 为气体常数,J/(kg·K); f_i 为容重,N/m³; p 为压力,Pa; τ_{ij} 为切应力,Pa; h 为焓,J/kg; ψ 为耗散函数,W/m³; q'' 为导热、辐射以及扩散引起的热流,W/m²; q''' 为单位体积燃烧的热量释放

率W/m³; D_a 为组分 a 的扩散系数m²/s; Y_a 为组分 a 的质量分数; $\dot{m}'''_a$ 为组分 a 的单位体积消耗速率或生成速率,kg/(m³·s); $\bar{\rho} u_i u_j - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j$ 为亚格子应力项; $\bar{\rho} h u_j - \bar{\rho} \tilde{h} \tilde{u}_j$ 为亚格子热流; $\bar{\rho} Y_a u_j - \bar{\rho} \tilde{Y}_a \tilde{u}_j$ 为亚格子组分流。

亚格子应力项采用动态 Smagorinsky 模型求解:

$$\bar{\rho} u_i u_j - \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j = \tau_{ij}^{\text{SGS}} \quad (6)$$

$$\tau_{ij}^{\text{SGS}} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk}^{\text{SGS}} = 2 \mu_t (\tilde{S}_{ij} - \frac{1}{3} \tilde{S}_{kk} \delta_{ij}) \quad (7)$$

$$\mu_t = \bar{\rho} (C_s \Delta)^2 |\tilde{S}| \quad (8)$$

式中, $|\tilde{S}| = \sqrt{2 \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij}}$

亚格子热流和亚格子组分流采用梯度输运假设求解:

$$\bar{\rho} h u_j - \bar{\rho} \tilde{h} \tilde{u}_j = - \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \quad (9)$$

$$\bar{\rho} Y_a u_j - \bar{\rho} \tilde{Y}_a \tilde{u}_j = - \frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial \tilde{Y}_a}{\partial x_j} \quad (10)$$

式中,上标SGS为亚网格尺度; δ_{ij} 为Kronecker张量; τ_{kk}^{SGS} 为亚网格尺度应力的各向同性部分; S_{ij} 为变形速率张量; S_{kk} 为变形速率张量各向同性部分; Δ 为局部网格尺度; C_s 为Smagorinsky数; Pr_t 为湍流Prandtl数,取0.5; μ_t 为湍流黏性系数; Sc_t 为湍流Schmidt数,取0.5。

燃烧模型采用有限速率/涡耗散(Finite-Rate/Eddy-Dissipation)模型封闭组分守恒方程(5)。该模型同时考虑到化学反应动力学与湍流混合速率对燃烧时化学反应速率的影响,燃烧速率最终取2种机制影响较小的一方。

基于化学反应动力学的单步反应速率 $\dot{m}'''_a$ 用阿累尼乌斯公式表示:

$$\dot{m}'''_a = A T^B e^{-E/RT} \quad (11)$$

由湍流混合时间尺度 ε/κ 控制的反应速率如下所示,值取其中最小值:

$$\dot{m}'''_a = v'_a M_a B \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \min_{\text{Rec}} \left(\frac{Y_{\text{Rec}}}{v'_a M_{\text{Rec}}} \right) \quad (12)$$

$$\dot{m}'''_a = v'_a M_a B C \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \frac{\sum Y_{\text{Pro}}}{\sum_{n=1}^N v''_n M_{\text{Pro},n}} \quad (13)$$

式中, A 为指前因子; B 为温度指数; E 为反应活化能,J; v' 为反应物的化学计量系数; ε 为单位质量湍动能耗散率,m²/s³; κ 为单元湍动能,J/kg; v'' 为生成

物的化学计量系数; M 为物质的分子量; Y 为质量分数; 下标 n 为自由标, Rec 为反应物, Pro 为生成物; B

和 C 为经验常数, B 取 4.0, C 取 0.5。

边界条件和初始条件的细节见表 1, 2。

表 1 边界条件参数

Table 1 Boundary condition

物质	边界类型	体积分数/%				压强/Pa	温度/K
		CH ₄	O ₂	CO ₂	H ₂ O		
甲烷/空气	Velocity_Inlet	0	0	15.1	12.4	101 325	2 386
	Pressure_Outlet	5.5	22.0	0	0	101 325	300

表 2 初始条件参数

Table 2 Initial condition

初始温度/K	初始速度/(m · s ⁻¹)	体积分数/%				初始压强/Pa
		CH ₄	O ₂	CO ₂	H ₂ O	
300	0	5.5	22.0	0	0	101 325

火焰的传播和瞬态温度密切相关, 取阻火单元中心线上的瞬时温度来验证网格的独立性。如图 3 所示, 选用了 10^{-7} s 作为时间步长和 301 536 个节点的空间六面体网格, 此时已满足计算精度, 继续提升网格密度计算结果改善并不明显。

2 模型验证

2.1 试验案例

数值计算结果与以往的平行板甲烷火焰淬熄试验结果^[8]进行了比较。试验装置布置如图 4 所示, 由长 4 m、宽 0.11 m、高 0.02 m 的激波管和其他试验设备组成。在有机玻璃窗口 G 段设有长 192 mm、宽 12 mm 的平行板狭缝装置, 狭缝间距可调。本试验介质为体积分数为 9.50% 的甲烷/空气预混气。配气方法是采用静态分压法, 试验时向激波管内充预混气采用真空充气的方法, 以提高试验的精确度和可重复性。可燃气用电火花在管端点燃, 点火能量在 0.1~25.0 J 调节。从点火处到激波管窗口之间的距离也可以分段改变, 通过改变这个距离和点火能量来获得火焰进入平行板狭缝时不同的传播速度。火焰进入狭缝前的传播速度用火焰传感器、电荷放大器及瞬态波形存储器测量获得。不同狭缝间距下火焰淬熄距离经相机 B 门拍摄观测, 考虑信号传递时间和观测玻璃折射率修正后得出。

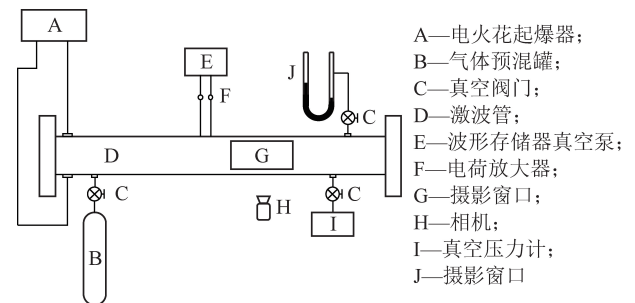


图 4 甲烷/空气预混火焰淬熄试验装置

Fig.4 Experimental device of methane/air premixed flame quenching

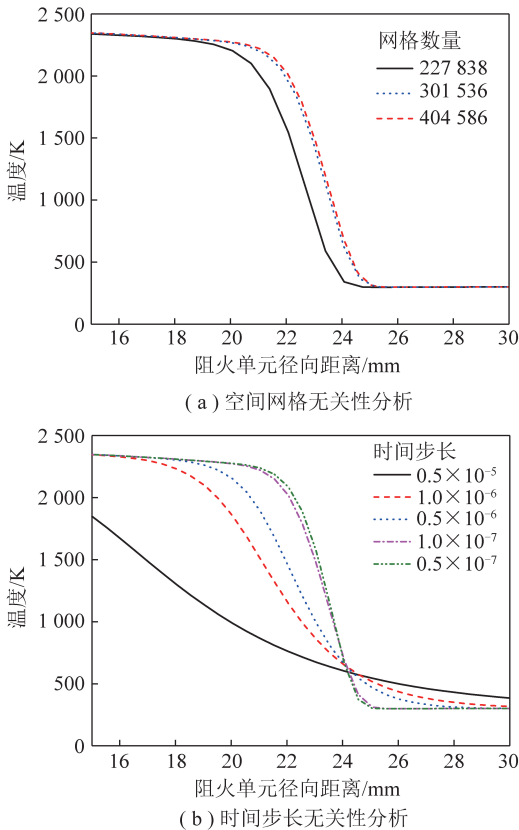


图 3 0.5 ms 时不同网格节点数和时间步长下狭缝中心线上的温度分布

Fig.3 Temperature distribution along slit centerline at 0.5 ms with different grid densities and time steps

2.2 模型验证

由于火焰在微细通道的传播存在着共性,采用平行板试验数据同样可以验证笔者数学模型的有效性。因此笔者根据试验设定和结果,建立长 40 mm、宽 12 mm、狭缝间距从 0.4 mm 到 1.2 mm 不等的多组几何模型,入口火焰速度和试验一样都为 90 m/s,内部为体积分数 9.5% 的甲烷/空气混合气,其他设定与本文所建立的数学模型相同。如图 5 所示,以 1 700 K 等温面观测到的火焰淬熄距离数值模拟结果与试验观测到的对比,结果基本一致,验证了模型的有效性。火焰淬熄距离都随着狭缝间距的增大而增大,且曲线的斜率也逐渐增大。模拟和试验结果间略有误差,这可能是试验条件下火焰的不稳定性和难以准确控制火焰入口速度在 90 m/s 所导致的。

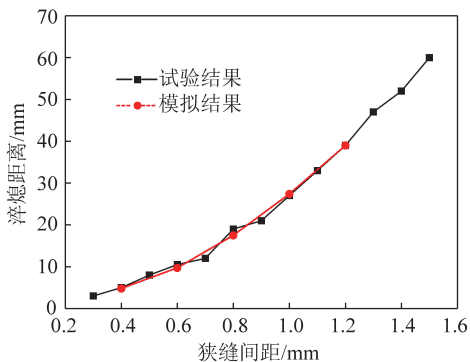


图5 试验和模拟所得不同狭缝间距下的淬熄距离

Fig.5 Quenching distances of experiment and simulation with different slit sizes

3 甲烷/空气预混气体火焰淬熄过程

本部分重点考查了爆燃火焰在波纹型阻火器中的传播特征,以入口火焰速度 60 m/s 的甲烷/空气预混火焰为例,探究其在边长 1 mm 正三角形截面的阻火单元中的传播规律,壁面温度为 300 K。

图 6 为波纹型阻火器阻火元件中线面上的温度分布随时间的变化。从图 6 可以看出,初始时刻,温度场主要受入口火焰的影响,预混气体被点燃后还来不及与火焰面前未燃气体充分换热,因此在阻火单元径向上出现分层,而在纵向上除靠近壁面处温度基本相同。随着入口处火焰的进入,热量通过热传导和活性中心的扩散等传递到火焰面前方预混气体,靠近火焰表面的气体达到着火点后首先被点燃,燃烧释放的热量继续传递,预热更前方的气体达到燃点。就这样,未反应气体不断被加热进入火焰面,燃烧产物不断离开火焰面,循环往复,使得火焰向前移动。而由于壁面的存在,火焰热损失随着火焰的传播不断增

加,在靠近壁面处形成了低温的熄灭层。熄灭层厚度随着热损失的增加逐渐增加,当火焰发展到一定程度时交汇,此时火焰发生淬熄。

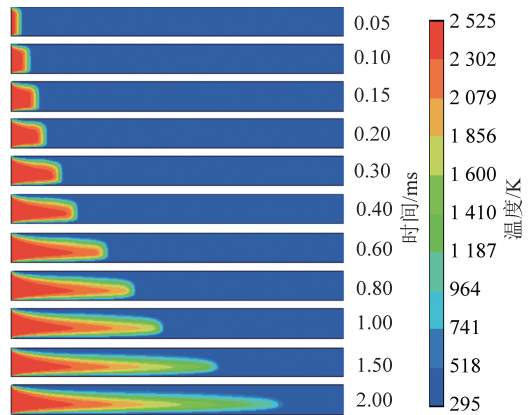


图6 中线面温度随时间的变化云图

Fig.6 Change of temperature cloud chart on the midline plane with time

图 7 为在阻火元件中心线 1 mm 处,0.3~0.8 ms 时的纵向温度变化。可以看到随着火焰的传播,温度场略有萎缩,这是因为火焰刚开始进入阻火单元时,单元内部存在着未燃的预混气体,它们在火焰进入后被点燃并释放热量。而火焰进入三角单元初始时刻速度较快,时间较短,因此还未来得及与壁面进行换热,火焰并不稳定。随着单元内预混气体燃烧殆尽,壁面的散热量增加,火焰逐渐稳定下来,火焰从高温向低温的过渡最终趋于稳定。其中左侧温度降低较为明显;而右侧温度在一开始略有升高,之后才随时间的变化而下降。这是由波纹板阻火器阻火单元的独特形状导致的,温度场的左端贴近截面三角形的底面;右端则贴近三角形的顶端,同时受到两侧壁面夹击,其通过壁面散失的热量大于右侧。且顶部由于碰撞销毁的自由基数量更多,如图 8 所示,随着火焰的传播,三角形底面更加贴近活化中心因而获得更多燃

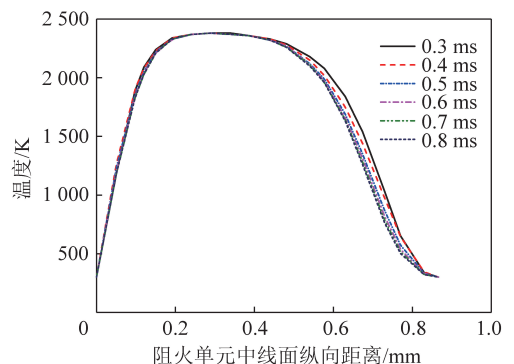


图7 中线面 1 mm 处各时刻的温度分布

Fig.7 Temperature distribution of different time at 1 mm of the midline plane

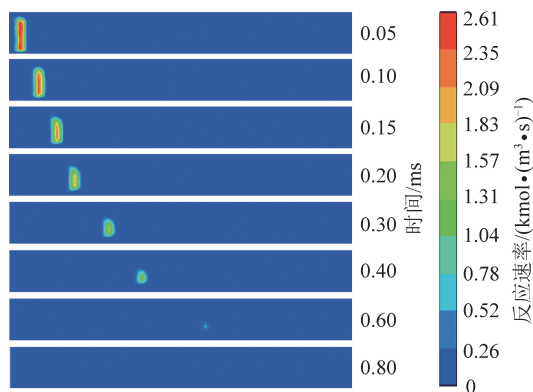


图 8 中线面反应速率随时间的变化云图

Fig.8 Change of reaction rate cloud chart on the midline plane with time

烧释放的热量;同时顶部空间较小,可供反应的可燃气体也相对底部较少。因此右端淬熄效果优于左端,温度更快趋于稳定。

图 8 为在狭缝中线面上的反应速率云图。燃烧化学反应采用单步不可逆甲烷与氧气燃烧完全反应模型进行描述。从图 8 可以看到,随着火焰进入阻火单元距离的增长,壁面对火焰的淬熄效果明显,靠近壁面位置的燃烧受到抑制,而入口进入的高温已燃气体影响逐渐下降,火焰锋面附近温度的下降直接导致了燃烧的减弱,反应区域逐渐由一开始与入口等宽的平面逐渐向阻火单元中心收缩,变为一圆曲面,反应速率也随之降低。

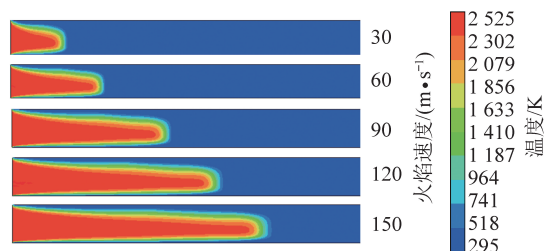
火焰的传播速度由火焰的燃烧速度和流体质点的速度组成,燃烧的增强与减弱直接影响火焰锋面的速度变化。由于黏性作用等,入口火焰在传播一段距离后流体质点速度降低,此时火焰的传播速度主要依靠单元内本身所含有可燃气体燃烧所释放的热量来维持。阻火单元内气体是有限的,燃烧释放的热量远低于壁面处的热量损失。随着火焰的传播,更少的可燃气体被点燃,释放的热量更少,燃烧化学反应速率也更低,反应区域逐渐减小,直至火焰熄灭,火焰区域逐渐萎缩至圆锥形。减小燃烧化学反应区域有利于火焰的淬熄,而当阻火单元截面足够大即燃烧化学反应区域足够大时,甚至会出现火焰分离的现象,即混合气燃烧产生的火焰脱离入口处火焰,此时火焰很有可能通过阻火器导致阻火器失效。

4 不同工况下火焰淬熄过程

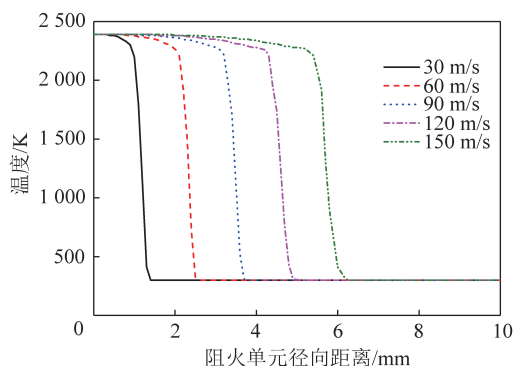
4.1 入口火焰速度影响下火焰淬熄过程

火焰在管道内的传播是一个加速、加压的过程,在管内火焰传播至阻火器时往往伴随有极快的速度。

图 9 为不同速度火焰在壁温 300 K 的 1 mm 边长正三角形截面阻火单元内传播,0.5 ms 时刻的温度分布云图以及温度沿狭缝中心线的变化。可以看到入口速度越大,高温区域向前推进的距离越大,火焰传播的更远,此时火焰传播距离近似与速度大小成正比。且入口速度较大的火焰,高温向低温区的过渡区域要稍厚于入口速度较小的火焰。



(a) 中线面上的温度云图



(b) 狭缝中心线上的温度分布

图 9 0.5 ms 时不同入口火焰速度下中线面上的温度云图及狭缝中心线上的温度分布

Fig.9 Temperature cloud chart on the midline plane and distribution along slit centerline at 0.5 ms with different inlet flame velocities

图 10 为 0.5 ms 时不同入口火焰速度下,反应速率沿狭缝中线的变化。可以看到反应的活化中心基本与温度的过渡层位置一致,都随着入口速度的增加传播得更远。同时反应速率和反应区域的厚度随着入口速度的增大而增大。这是由于入口速度增大,不仅加快了高温区向前传播,还使得火焰拉伸越加明显,同时火焰面更容易发生褶皱,导致火焰锋面的面积更大,与氧气接触发生反应的面积也就更大。这加剧了燃烧反应的剧烈程度,使得反应速率增大;反应速率越大,反应产生的热量也就更多,热量通过热传导等传递给前方未反应气体,使其更快达到着火点,加快了火焰面的传播速度。可以看出,火焰速度与反应速率之间存在一种相互促进的关系,一方面较大的火焰速度促使反应速率增大,而反过来更大的反应速率也加速了火焰的发展。一般来说,狭窄通道中火焰速度越快,单位时间传播距离越远,对前方气体所做

推进功也就越大,火焰的动能损失也就越大。在通道截面一定时,其动能损失与火焰传播距离成正比。根据动能定理,随着入口处火焰速度的增加,火焰传播距离的增长速度应逐渐放缓。但由于这种动态的相互促进关系的存在,使得火焰燃烧速率提高,加快了火焰的传播速度,最终呈现出上述传播距离与入口火焰速度成线性关系的现象。

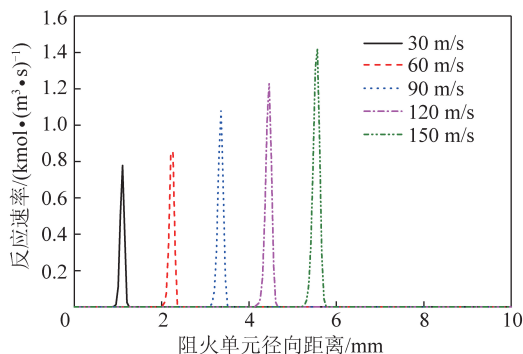


图 10 0.5 ms 时不同入口火焰速度下狭缝中心线上的反应速率

Fig.10 Reaction rate along slit centerline at 0.5 ms with different inlet flame velocities

图 11 为不同壁面温度下淬熄距离随入口火焰速度的变化。入口火焰速度越大,火焰的淬熄距离越远。虽然由于火焰速度与燃烧速率间的相互促进作用,补足了火焰部分动能损失,但随着反应速率的逐渐减小,入口速度较大的火焰动能损失相较速度较低的火焰仍然更多。最终使得图中曲线的斜率逐渐降低,由入口火焰速度的增加导致的淬熄距离增加逐渐放缓。

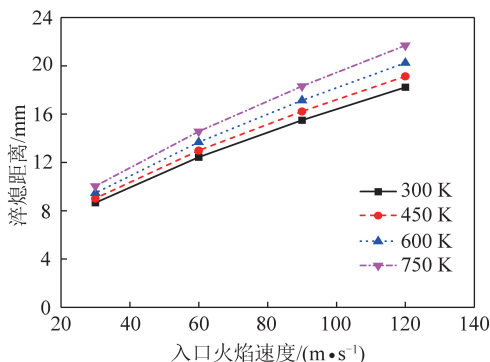


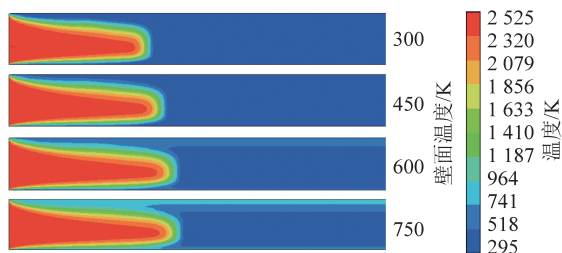
图 11 不同壁面温度下淬熄距离随入口火焰速度的变化

Fig.11 Quenching distance of flame with different inlet flame velocities at different wall temperatures

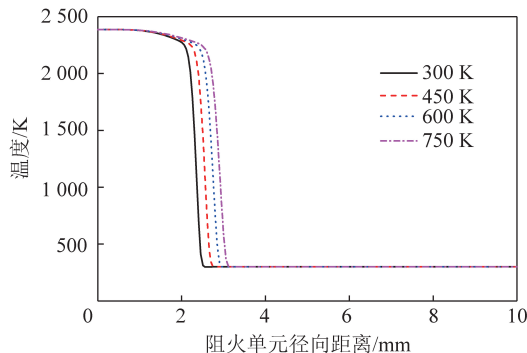
4.2 壁面温度影响下火焰淬熄过程

阻火器的壁面温度会随着其使用环境和使用次数的变化而变化,因此有必要研究壁温对爆燃火焰在阻火单元内传播的影响。图 12 为入口速度 60 m/s

火焰在不同壁面温度 (300,450,600,750 K) 的 1 mm 边长正三角形截面阻火单元内传播,0.5 ms 时刻的温度分布云图以及温度沿狭缝中心线的变化。可以看到壁面温度越大壁面处的温度梯度越不明显,同时高温区域的宽度和火焰向前推进的距离越大,说明壁面温度越大越有利于火焰在狭缝中的传播。与图 9(b) 中不同入口火焰速度下观察到的高温段不同,图 12(b) 中火焰的高温段几乎完全重合,仅在温度梯度变化处出现分离。说明不同壁面温度下,火焰传播距离的增加主要是高温向低温的过渡区域厚度的增加。



(a) 中线面上的温度云图



(b) 狭缝中心线上的温度分布

图 12 0.5 ms 时不同壁面温度下中线面上的温度云图和狭缝中心线上的温度分布

Fig.12 Temperature cloud chart on the midline plane and distribution along slit centerline at 0.5 ms with different wall temperatures

图 13 为不同壁面温度下的反应速率云图。随着壁温的增加,反应活化中心更加靠前。反应活化中心的最大反应速率基本都在 $0.8 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 左右,且反应速率在 $0.35 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 以上的区域面积基本一致,靠近壁面两侧的反应速率增加较为明显。这导致火焰传播初期壁面温度对火焰的燃烧速度的影响并不大。

图 14 为狭缝中线 1 mm 处 0.5 ms 时不同壁面温度下的纵向温度变化。可以看到,虽然狭缝两侧受壁面影响,温度各不相同,但在纵向上 0.2~0.6 mm 的部分温度基本保持一致。这也就解释了为何壁面温度在火焰传播过程中对反应活化中心的影响并不大。

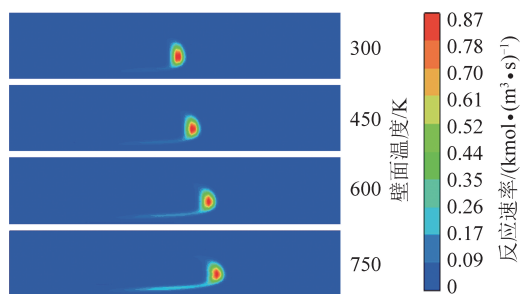


图 13 0.5 ms 时不同壁面温度下中线面上的反应速率云图

Fig.13 Reaction rate cloud chart on the midline plane at 0.5 ms with different wall temperatures

虽然壁面温度的增加有利于未燃反应气体的预热,但其值仍然远小于传播过程中甲烷/空气爆燃火焰的温度,预热效果有限。而高温的已燃气体的热传导和燃烧释放的热量巨大,这是造成未燃气体预热和火焰传播的主要原因。

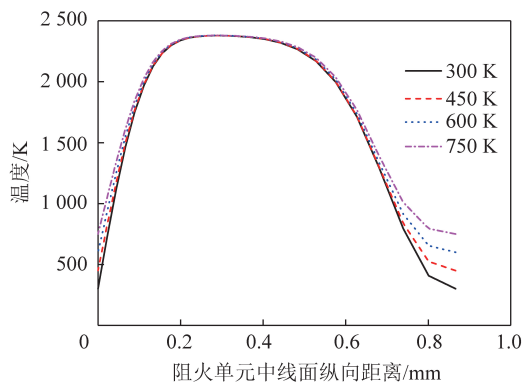


图 14 0.5 ms 时不同壁面温度下中线面 1 mm 处温度分布

Fig.14 Temperature distribution at 1 mm of the midline plane with different wall temperatures at 0.5 ms

图 15 为不同入口火焰速度下淬熄距离随壁面温度的变化。淬熄距离随着壁面温度的增加而增加,且入口火焰速度越大增加越明显。较高的壁面温度降

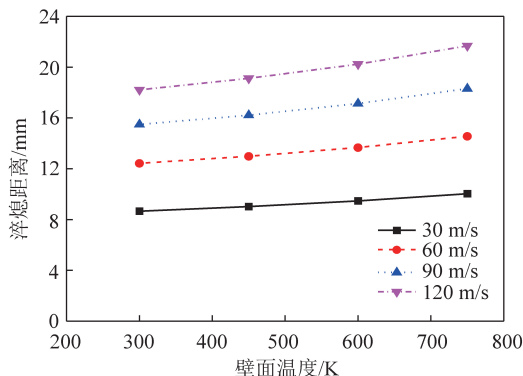


图 15 不同入口火焰速度下淬熄距离随壁面温度的变化

Fig.15 Quenching distance of flame with different wall temperatures at different inlet flame velocities

低了壁面的散热能量,不利于通过壁面将燃烧释放的热量传递出去,这会导致熄灭层厚度减小,火焰的淬熄距离增加,最终导致火焰穿过阻火器,造成阻火器失效。

5 结 论

(1) 火焰在波纹型阻火器阻火单元内的传播受到入口处火焰和内部燃烧化学反应的共同作用。随着火焰的传播,燃烧化学反应逐渐占据主导。

(2) 火焰速度和燃烧化学反应速率间存在相互促进关系,入口火焰速度 150 m/s 时的最大燃烧反应速率是 30 m/s 时的 2 倍。入口火焰速度越小,淬熄距离越短,但影响逐渐降低。

(3) 壁面温度改变对化学反应速率影响较小,实验条件下不同温度下最大燃烧反应速率都在最大反应速率基本都为 0.8 kmol/(m³·s)。提高壁面温度将阻碍壁面散热,使得熄灭层厚度减小,淬熄过程延迟。

参考文献 (References):

- [1] WANG Bing, RAO Zhuming, XIE Qiaofeng, et al. Brief review on passive and active methods for explosion and detonation suppression in tubes and galleries[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 280-290.
- [2] BAI Bing, CHEN Zheng, ZHANG Huangwei, et al. Flame propagation in a tube with wall quenching of radicals[J]. Combustion and Flame, 2013, 160(12): 2810-2819.
- [3] PALECKA J, JULIEN P, GOROSHIN S, et al. Quenching distance of flames in hybrid methane-aluminum mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015, 35(2): 2463-2470.
- [4] LUKAS W, FELIX L, DOMINIC F, et al. Experimental investigation of the flame propagation and flashback behavior of a green propellant consisting of N₂O and C₂H₄[J]. Journal of Energy and Power Engineering, 2017, 11(12): 735-752.
- [5] MOHAMMED J, JAFAR Z, BEHDAD M, et al. Application of flame arrester in mitigation of explosion and flame deflagration of ventilation air methane[J]. Fuel, 2019, 257: 115985.
- [6] GUIBERTI T, BELHI M, DAMAZO J, et al. Quenching distance of laminar methane-air flames at cryogenic temperatures and implications for flame arrester design[J]. Applications in Energy and Combustion Science, 2020, 1(1-4): 100001.
- [7] JOHN M, HOLM B II. On the initiation of gaseous explosions by small flames[J]. Philosophical Magazine Series 7, 1932, 14(89): 18-56.
- [8] 周凯元. 气体爆燃火焰在狭缝中的淬熄[J]. 火灾科学, 1998, 8(1): 22-32.
ZHOU Kaiyuan. Quenching of gas deflagration flame in slit[J]. Fire Safety Science, 1998, 8(1): 22-32.
- [9] 宋占兵. 预混火焰在狭缝中的传播机理与熄灭条件的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
SONG Zhanbing. Study on propagating mechanism and quenching of

- premixed flames in narrow channels [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [10] ARIFF M, DAMAZO J, KWON E. Effect of propagation speed on the quenching of methane, propane and ethylene premixed flames between parallel flat plates [J]. *Fuel*, 2019, 256(1): 115870.
- [11] WAN Yang, WANG Changjian, LI Quan, et al. Experimental study of premixed hydrogen-air flame quenching in a channel with the perforated plate [J]. *Fuel*, 2020, 263(1): 116733.
- [12] BOZORG M, BIDABADI M, BORDBAR V, et al. Numerical investigation of flame behavior and quenching distance in randomly distributed poly-dispersed iron dust cloud combustion within a narrow channel [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 367(1): 482–491.
- [13] 程方明, 常助川, 史合. 金属丝网对甲烷/空气预混火焰管道内传播的影响 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(1): 135–140.
- CHENG Fangming, CHANG Zhuchuan, SHI He. Influence of wire mesh on propagation of methane/air premixing flame in pipe [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(1): 135–140.
- [14] 崔晋恺. 波纹型阻火器结构单元内预混火焰淬熄特性的数值研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2020.
- CUI Jinkai. Numerical study on quenching characteristics of premixed flame in structural unit of crimped ribbon flame arrester [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.
- [15] 温小萍, 余明高, 解茂昭, 等. 瓦斯爆燃火焰在狭缝中的动态传播及淬熄特性 [J]. *煤炭学报*, 2013, 38(S2): 383–387.
- WEN Xiaoping, YU Minggao, XIE Maoshao, et al. Dynamic propagation and quenching characteristics of gas deflagrating flame in narrow channel [J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(S2): 383–387.
- [16] 孙少辰, 毕明树, 刘刚, 等. 爆轰火焰在管道阻火器内的传播与淬熄特性 [J]. *化工学报*, 2016, 67(5): 2176–2184.
- SUN Shaochen, BI Mingshu, LIU Gang, et al. Detonation flame propagation and quenching characteristics in crimped-ribbon flame arrester [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2016, 67(5): 2176–2184.
- [17] 张健全, 李宝林, 吴晓蓉, 等. 防爆格栅结构对火焰淬熄的影响 [J]. *煤矿安全*, 2009, 40(9): 9–12.
- ZHANG Jianquan, LI Baolin, WU Xiaorong, et al. Influence of fire arresters structure on flame quenching [J]. *Safety in Coal Mines*, 2009, 40(9): 9–12.
- [18] 梁胜龙, 马俊. 基于 CFD 柴油机进气系统防爆栅栏结构优化设计 [J]. *机械设计与制造*, 2020, 9(40): 167–171.
- LIANG Shenglong, MA Jun. Structural optimization design of explosion-proof fence in diesel engine intake system based on CFD [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020, 9(40): 167–171.
- [19] 王鲁庆, 马宏昊, 沈兆武, 等. 波纹板阻爆燃型阻火器对丙烷-空气预混火焰的淬熄研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(4): 766–772.
- WANG Luqing, MA Honghao, SHEN Zhaowu, et al. Quenching of propane air premixed flame with crimped ribbon deflagration flame arrester [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(4): 766–772.
- [20] BERLAD A, POTTER A. Prediction of the quenching effect of various surface geometries [J]. *Elsevier*, 1955, 5(1): 728–735.
- [21] 喻健良, 李江涛, 胡春明. 多层丝网结构对火焰传播抑制作用的数值模拟 [A]. 全国高等学校过程装备与控制工程专业教学改革与学科建设成果校际交流会 [C]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 280–287.
- [22] 胡春明. 预混火焰在平板狭缝中传播与淬熄的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- HU Chunming. The study of premixed flame propagating and quenching in narrow channel [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [23] 李江涛. 微型圆管结构对火焰传播抑制作用的数值模拟 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- LI Jiangtao. Numerical study on the propagation and quenching of premixed flame in tubule [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [24] YU Hongzeng, REN Ning. A methodology for applying the counter-flow flame extinction propensity to the flame extinction determination in fire simulations [J]. *Fire Safety Journal*, 2021, 120(1): 113100.
- [25] 丁信伟, 宋占兵, 喻健良. 预混火焰在冷壁面狭缝中传播与熄灭的判据 [J]. *燃烧科学与技术*, 2005, 11(4): 308–314.
- DING Xinwei, SONG Zhanbing, YU Jianliang. Criterion of propagation and quenching of premixed flames in cold walled narrow channels [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2005, 11(4): 308–314.
- [26] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [27] KIM K, LEE D, KWON S. Effects of thermal and chemical surface-flame interaction on flame quenching [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 146: 19–28.