

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.03.004

变截面管道结构对 H_2 /Air 预混气体燃爆特性的影响研究^{*}

孙从煌^① 曲艳东^② 王 帅^① 曹验兵^①

①中国十九冶集团有限公司工业建设分公司(四川成都,610000)

②辽宁工业大学土木建筑工程学院(辽宁锦州,121001)

[摘 要] 实际工业中,管道截面突变可改变预混燃气火焰的燃烧模式和燃爆特性,影响燃气输送的安全性。为此,利用 Fluent 软件,数值模拟研究了 4 种变截面管道结构(突变扩张型管道、突变收缩型管道、渐变扩张型管道和连续突变扩张型管道)对 H_2 /Air 预混气体燃爆过程火焰动态变化的影响,并分析了管内温度场、压力场的分布情况、气体流速和涡量等燃爆特征参数以及焓、熵值等热力学参数的变化规律。研究表明:扩张型管截面的突扩诱导作用和收缩型管截面的收缩阻挡作用改变了管内预混气体燃烧火焰传播的动态结构以及火焰前锋的稀松波和预混气流方向,使火焰出现了“杯口”型和“长颈花瓶”型锋面;突变收缩型管截面的阻挡、反射和抑制作用加强了湍流强度和涡流运动强度,管内最高温度、峰值压力和平均流速等燃爆特征参数也相对较高,而涡团向上、下管壁的运动抑制了火焰尖端的反应强度和传播速度;渐变扩张型管道能降低突扩诱导作用的影响;而连续突变扩张型管内发生在层流向湍流火焰转变阶段的首次截面突扩产生的诱导作用对其燃爆特性的影响更为显著。

[关键词] 变截面管道;预混火焰;燃爆特性;湍流燃烧;火焰前锋

[分类号] X932;TE832

Influence of Variable Cross-section Pipe Structure on Deflagration Characteristics of H_2 /Air Premixed Gas

SUN Conghuang^①, QU Yandong^②, WANG Shuai^①, CAO Yanbing^①

①Industrial Construction branch, China 19th Metallurgical Corporation (Sichuan Chengdu,610000)

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

[ABSTRACT] In industrial applications, the mutation of pipe section can change the combustion model and deflagration characteristic of premixed gas, which would affect its transportation safety. Influence of four kinds variable cross-section pipeline structures (mutational expansive pipe, mutational concrete pipe, gradually expansive pipe and continuous mutation expansive pipe) on the flame dynamic change in the combustion process of H_2 /Air premixed gas was numerically simulated by Software Fluent. Distribution of temperature field and stress field, and change law of combustion characteristic parameters of premixed gas such as flow velocity and vorticity were also analyzed. Results show that induction functions of mutational expansive and blocking functions of mutational concrete in variable cross-section pipelines change dynamic structure of premixed flame propagation and the heading direction of poor ware in front of premixed flame and premixed airflow, generating “cup” type and “long neck vase” type flame fronts. Blocking, reflection and inhibiting effects of mutational concrete pipe strengthened the turbulence intensity and eddy current intensity, and brought deflagration parameters, such as the highest temperature, peak pressure and average flow velocity, to higher level. However, the motion of vortex to upper or lower wall inhibits the reaction strength and propagating speed of the flame tip. Gradually expansive pipe can reduce the influence of induction functions of mutational expansive. Influence of induction functions caused by the first mutational cross-section, in the process of lamina to turbulence, is more significant in the continuous mutation expansive pipe.

^{*} 收稿日期:2017-08-13
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(X201403)
作者简介:孙从煌(1990-),男,硕士,主要从事爆炸力学研究。E-mail:sunconghuang@163.com
通信作者:曲艳东(1978-),男,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

[KEYWORDS] variable cross-section pipe; premixed flame; deflagration characteristics; turbulent combustion; flame front

引言

随着可燃气的广泛应用,实际工程中的输气管道存在着多种结构,不同截面的输气管道之间的衔接随处可见,而可燃预混气体在不同形式的输气管道中的燃爆过程也存在诸多差异。为了防止管道燃气泄漏、爆炸事故的发生,国内外学者展开了大量研究。Sun 等^[1]在通过数值模拟的方法研究 4 种不同管径内气相爆轰波的传播特性时发现,管内的最大爆炸超压、气体密度和最高温度等特征参数差异较大,导致所计算出的各管道中最大的防爆距离各不相同,由此说明管径尺寸的改变直接影响管内预混气体燃爆特性。郑路路等^[2]综述了爆轰波在扩散管道中传播时,强调了壁面对爆轰波传播所起的物理机制,并分析了突扩和渐扩管道中爆轰波继续维持传播受到三波点和临界角的影响;印华融等^[3]在数值模拟研究变截面突扩管道内汽油/空气两相爆轰波传播性能时发现,爆轰波在变截面拐点处出现涡流并产生熄爆现象,并且管径越大,马赫反射越靠后,产生的压力也越大;杨磊等^[4]在研究爆轰波进入不可燃突扩管道行为时发现,管内压力突然上升,化学反应停止,爆轰波衰减为激波,并在扩张段入口处发生绕射形成的球面波阵面与壁面发生规则反射和马赫反射。然而,在弯管或分叉管中,局部管腔突扩同样引起燃爆反应的变化。Yuan 等^[5]利用自适应网格加密技术数值模拟研究了爆轰波通过 90°弯管后再进入扩张区域过程,弯管促进了爆轰波绕射并使爆炸能沿曲边界进行重分布;除此之外,管径的突然收缩同样影响爆轰波的传播。郑有山等^[6]基于气体爆炸理论数值模拟研究了径缩连管道对瓦斯爆炸火焰传播的影响规律,并认为壁面反射的激波和三波点的碰撞诱导二次爆炸的产生,从而促进瓦斯爆炸强度的增强。刘巨保等^[7]在对不同缩径和扩径以及缩扩和扩缩变截面圆形管道内爆轰压降的计算方法进行数值模拟研究时,提出了变截面结构压降计算公式。

氢气 H₂ 作为未来的一种新型清洁能源,相比其他含碳可燃气体,具备诸多优点,在未来的石油化工、工业制造业、冶金工业、航天、医疗、轻工业、运输、机械设备的动力系统、化学电源和纳米材料制备等领域具有巨大的利用空间。为了确保 H₂ 的安全

应用并防止燃气泄漏爆炸事故的发生,探讨不同管道结构对预混火焰燃爆特性的影响已成为燃烧领域的研究重点。然而,对比研究突扩、渐扩、连续突扩和突缩等变截面管道结构对爆轰波影响的研究相对较少,且以预混 H₂/Air(空气)作为爆源气体来分析各变截面管道内湍流预混火焰动态结构及燃爆特性也是寥寥无几。对于变截面管道对预混 H₂/Air 燃爆火焰传播规律的影响与其管内燃爆参数变化规律之间的联系还不太清晰。为此,将对对比研究不同变截面管道结构对预混 H₂/Air 燃爆过程及其燃爆特性的影响,揭示不同变截面管道形式对预混火焰动态结构的影响,分析管内不同位置处燃爆参数和热力学参数的动态变化规律,以此来完善该领域的研究并为变截面管道设计提供参考^[8]。

1 几何模型及物理参数

1.1 几何模型

通过建立如图 1 中所示的 4 种变截面管道(即突变扩张型管道、突变收缩型管道、渐变扩张型管道和连续突变扩张型管道)的几何模型来探究变截面管道结构对 H₂/Air 预混气体燃爆过程中火焰动态和燃爆特性的影响。

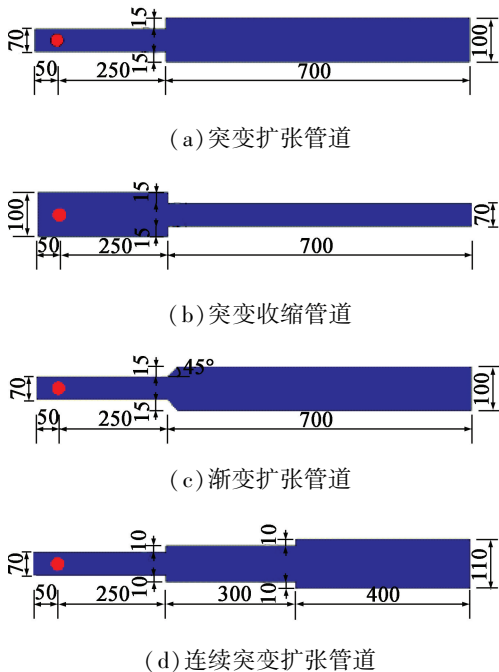


图 1 变截面管道几何模型(单位:mm)

Fig. 1 Geometric models of variable-section pipes(unit:mm)

图1中4种变截面管道均采用长为1 000 mm的水平管道通过改变管道不同部位的直径来实现变截面,考虑到预混气体点火后由层流火焰向前发展,在管道左侧设置点火域后应预留一段层流火焰向湍流火焰发展的距离。因此,在突变扩张型管道、突变收缩型管道以及渐变扩张型管道中,截面突变及渐变位置距离左端壁面的距离为 $x=300\text{ mm}$,而在连续突变扩张型管道中发生两次截面突变,且第二次截面突变位置距离左端壁面600 mm,与前一次突变截面相距300 mm。在4种变截面管道中,截面变化前后所采用的管道直径 D 和 d 分别为100 mm和70 mm,管道截面上下突扩和收缩宽度相互对称,且宽度均为 $b=15\text{ mm}$;渐变扩张型管截面呈 45° 角向右扩张;而连续突变管道的上下管截面突变宽度 $a=10\text{ mm}$;并且,4种变截面管道中均采用1 500 K的高温,在距离左端壁面50 mm的位置进行点火引燃,其圆形点火域的半径为35 mm;点火时,管内H₂/Air预混气体均处于静止状态,整个数值模拟过程中不考虑管壁的热传递及热辐射而导致的热能的损失,理想化为一个封闭空间,但为了提高迭代求解过程中的收敛速度和计算精度,采用冷流场计算方法获取稳定的初始值,并通过设置收敛准则对迭代计算过程进行实时监控,同时利用亚松弛因子进行调控以提高收敛效率。

1.2 数值模型及初始条件

带化学反应的预混可燃气体在变截面管道中燃爆所产生的燃烧火焰会发生明显的湍流现象,并且燃烧火焰锋面与湍流气流之间强烈的耦合作用促使火焰结构复杂多变^[9]。因此,采用标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型能很好地模拟完全湍流的流体问题,并利用EBU-Arrhenius燃烧模型考虑燃爆过程中湍流效应和化学反应动力学效应之间的相互影响机制。此外,由于在管壁边界层处受到剪切流和黏性阻力的影响,导致削弱了管内的湍流效应而转为层流火焰形式向前传播,而采用高精度的标准壁面函数能对此进行很好的修正。众所周知,H₂在空气中的燃烧极限为4%~75%,但其爆炸极限范围相对较窄,为了确保燃爆过程预混火焰能持续传播,避免出现火

焰熄灭现象,应选取预混气体燃料能最大程度反应的混合比。根据Shen等^[10-11]针对混合比例对密闭管内H₂/Air燃爆过程的火焰动态和爆炸超压特性研究,当量比在0.84~4.22的范围内将会出现经典的“郁金香”火焰和褶皱的“郁金香”火焰。为此,所选的预混燃气体积比 $V(\text{H}_2)/V(\text{Air})$ 为0.333,其当量比为1.126,如表1所示。

2 结果及分析

2.1 变截面管内H₂/Air预混火焰传播过程

利用流体动力学软件对图1中4种变截面管内H₂/Air预混气体的燃爆过程进行了数值模拟,燃爆过程中,其火焰向右动态传播过程利用温度场的形式来进行展示,如图2所示。

图2(a)中,在半径为35 mm的圆形点火域内,通过1 500 K的高温点火引燃后,光滑的圆形火焰面逐渐向外扩张;当火焰前锋面接近上、下壁面时,受到壁面约束及前导稀松波反射作用的影响,轴向火焰传播速度大于径向火焰传播速度,火焰面逐渐被拉伸,形成指尖形火焰面;在接触壁面后,预混火焰在剪切流的作用下快速传播,并形成局部涡团,使得管轴中线处形成回流,阻碍此处预混火焰的传播,预混火焰由原来的凸形火焰锋面逐渐被拉平,形成平面火焰;在水平管左端300 mm(即未到达突变截面位置前)的范围内预混火焰就已经历了由球形火焰逐渐转变为指尖形火焰、再转变成平面火焰的过程;然而,在50 ms左右火焰前锋面传播至截面突变位置,由于管截面的突然扩张和上、下壁面处稀松波扰动作用,使得火焰前锋面逐渐变为“杯口型”,并形成局部湍流漩涡运动,加快了上、下壁面附近燃气的输运速率和混合速度,使燃烧反应得到加强,并促使预混火焰后期传播中“V”型结构的形成。

图2(b)中,初始较宽的管内预混火焰面的动态变化相似,但其传播速度相对缓慢,在55 ms左右,火焰前锋面传播至截面收缩处,管道截面的突然收缩阻挡了上、下壁面处火焰的传播和预混气体的流动,燃烧火焰面前导冲击波受到收缩壁面的阻挡而

表1 变截面管内预混气体燃料组分和初始条件
Tab. 1 Premixed gas components and initial conditions in variable cross-section pipes

流体区域	各气体组分的质量比				初始温度	初始压力
	H ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	T_0/K	p_0/Pa
流体域	0.022 62	0.217 2	0.76	0	300	101 325
点火域	0	0.046 0	0.76	0.213	1 500	101 325



图 2 变截面管道中预混 H_2 /Air 燃烧火焰传播过程(单位:K)

Fig. 2 Combustion process of H_2 /Air premixed gas in variable cross-section pipes

反射回来形成压缩波,遇到火焰面后,因压力和密度梯度分布不均产生了斜压效应^[12],即等压面和等密度面成一定角度相互交错或交割,抑制了管轴线处火焰的向右传播;而上、下壁面形成的局部涡团加速了气体的混合速度,使其火焰面紧贴壁面向前传播,逐渐形成类似于“长颈花瓶”型的火焰锋面;随着反

应的进行,“长颈花瓶”颈部逐渐收缩并最终封闭,但在其底部仍然存在未燃的气流团;在 85 ms 左右,燃烧火焰形成了内部圆形锋面和外部“V”型锋面。

图 2(c)中,渐变扩张型管内预混火焰面形态的动态变化类似于突变扩张型管道,但由于截面渐变扩张产生的诱导作用相对较弱,因此,其火焰锋面的

变化频率及变化历程相对较为缓慢。

由图2(d)可知,连续突变扩张管内管截面的首次突变和二次突变对预混火焰面结构的影响存在明显差异。管道截面的首次突扩位置处于湍流预混火焰形成阶段,突扩诱导作用加强了上、下管壁处的湍流强度,形成局部的湍流效应和旋涡运动,涡团的产生、发展、移动及破碎加快了燃烧反应速率和火焰传播速率;然而,管道截面二次突扩时,稳定的预混火焰紧贴管壁传播,并未出现明显的大变形。由此说明,截面突扩对层流火焰向湍流火焰转变阶段的火焰形态影响较大,而对稳定后的湍流火焰影响较小。

由此,4种变截面管道对预混火焰的传播过程的影响差异较为明显,突变扩张型管道的截面突扩诱导作用和收缩型管道的截面收缩阻挡反射作用明显改变了预混火焰传播演变历程和传播形态,且在层流火焰向湍流火焰转变的阶段影响更为显著。

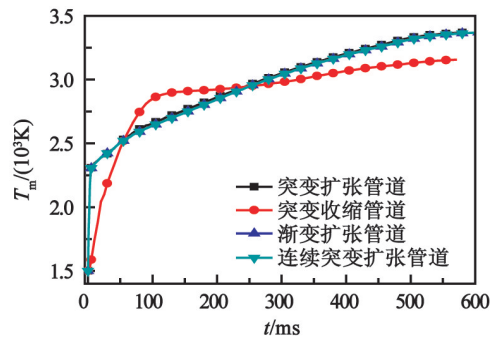
2.2 变截面管道结构对 H₂/Air 预混气体燃爆特性的影响

4种变截面管内 H₂/Air 预混气体燃爆过程中的最高温度 T_m 、峰值压力 p_m 和平均流速 \bar{v} 的时程曲线如图3所示。

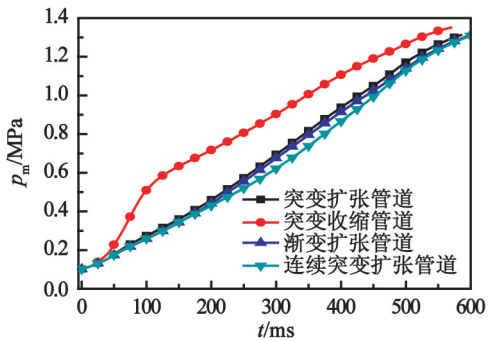
由图3可知,4种变截面管内 H₂/Air 预混气体在相同点火域(点火半径为35 mm)内采用相同的高温点火后,由于水平管左端300 mm长的管径不同,致使初期燃烧火焰所受到的约束效应不同(管截面越小,约束程度越高),因此管内的 T_m 、 p_m 和 \bar{v} 上升速率展现出不同的变化趋势。

由图2(b)可知,点火后0~50 ms,预混火焰在水平管左端300 mm的范围内向右传播,突变收缩管内 T_m 的上升速率相对其他变截面管要缓慢,这是由于其他变截面管较小截面的强约束效应,导致燃烧火焰的加速和 H₂/Air 预混气体反应速率的提高;但在50 ms左右,预混火焰已传播至管截面突变或渐变位置,此时因管截面的突变或渐变,导致火焰锋面形态及燃烧模式发生明显转变,收缩型管道截面的突然减小,使其对火焰的阻挡、反射和抑制作用相比扩张型管道的诱导作用要明显,所产生的湍流强度和涡流运动强度均相对较高,引起管内 T_m 和 p_m 的上升速率以及气体流速也相对较高^[13]。

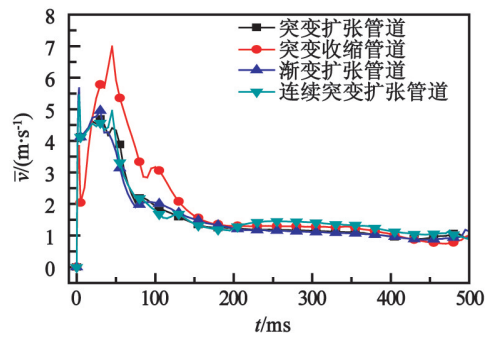
若以突变扩张型管道的燃爆参数为基准,根据图3中数据曲线可知:渐变扩张型管和连续突变扩张型管内的燃爆参数(T_m 、 p_m 、 \bar{v})都相对较低,这说明截面突变产生的诱导、扰动效应相比渐变管道要强,对其预混气体燃爆特性的影响也相对较为明显;然而,在连续突变扩张型管道内管截面的二次突变



(a) 最高温度



(b) 峰值压力



(c) 平均速度

图3 变截面管道内预混 H₂/Air 燃爆过程中的性能参数时程曲线

Fig. 3 T_m - t , p_m - t and \bar{v} - t curves in deflagration of H₂/Air in various variable cross-section pipes

扩张使原本稳定的预混火焰再次受扰,但与此同时却增大了右端预混气体燃料的体积,并削弱了右端壁面的约束效应,从而使预混火焰在传播至接近右端壁面时,燃烧反应速率和传播速率都得到减缓,管内峰值压力上升速率也相应较慢。由此再次说明,突变扩张型截面的诱导作用对层流燃烧向湍流燃烧转变过程的燃爆特性影响较为明显,而对后期稳定的预混火焰传播过程的影响相对较弱。

选取在4种变截面管道的轴线中点,对比分析 H₂/Air 预混气体燃爆特性参数的差异及其变化规律,从而深度探究管道截面的突变或渐变对预混气

体燃爆特性的影响机制,如图 4 所示。

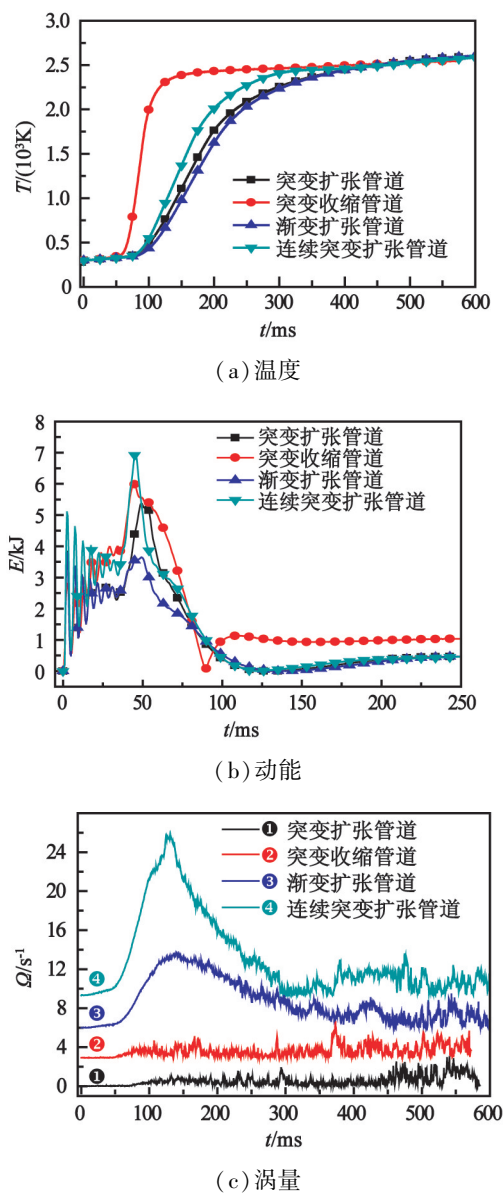


图 4 预混气体在变截面管道内中间测点的性能参数时程曲线

由图 4(a) 各管中点位置的温度时程曲线可知,在高温点火后 60 ~ 100 ms,4 种变截面管中间观测点的温度上升速率由大到小依次为:突变收缩型管道、连续突变扩张型管道、突变扩张型管道和渐变扩张型管道,说明管道截面的收缩和扩张产生的阻挡反射作用和诱导效应对预混火焰的燃烧强度都具有促进作用。

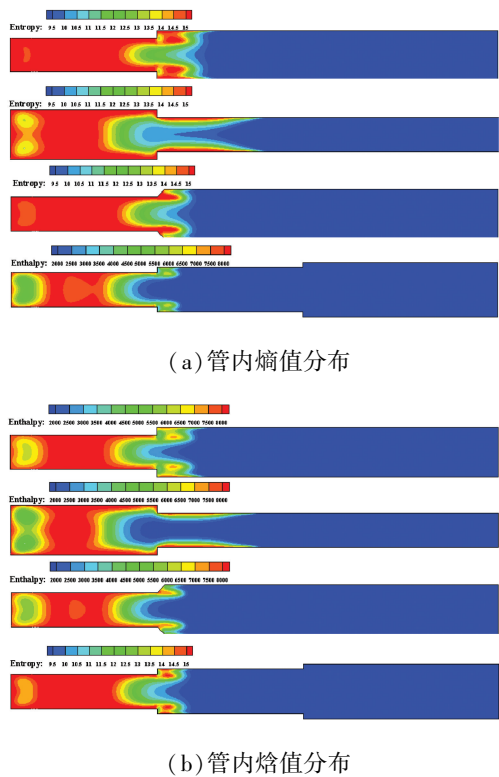
而图 4(b) 中,4 种变截面管的动能变化曲线在燃烧反应初期阶段均出现了高频波振荡现象,且大约在 50 ms 左右预混火焰已传播至截面突变或渐变位置,此时的湍流效应和漩涡运动最强烈,由此出现

了动能峰值,按其从大到小依次为:连续突变扩张型管道 6.98 kJ,突变收缩型管道 6.01 kJ,突变扩张型管道 5.38 kJ 和渐变扩张型管道 3.64 kJ。

由图 4(c) 可知,在高温点火后至 50 ms 期间,预混火焰主要以层流的形式向右传播,管内的涡量变化非常平缓;而在 100 ~ 300 ms 左右涡量曲线出现了明显的弥散峰值,此时的预混火焰基本已传播至各管中点位置,且在连续突变扩张型管道中的涡量较高,其次是渐变扩张型管道,而突变扩张管道和突变收缩管道的涡量变化相对较弱,且未出现明显的涡量峰值。由此说明,突变收缩型管内的壁面阻挡和反射压缩波产生的斜压效应使火焰锋面前后的湍流漩涡运动得到增强;同时,管壁面的强约束效应加速了中轴线处的气流速度,而涡流由中轴线处向上下壁面的运动却又减弱了火焰尖端处的涡量。

而在连续突变扩张型管内的预混火焰由于两次受到管截面的突然扩张所产生的诱导作用,使预混气流的速度和动能均出现强烈的振荡现象,并加速混合气体分子的运动;而湍流振荡的同时伴随着气流漩涡运动,漩涡的萌生、运动和消散过程反过来又加强了湍流效应;因此,预混火焰在前后两次经过扩张截面时,管内的动能和涡量均相对较高。

图 5 为 4 种变截面管内 H₂/Air 预混气体燃爆



(b) 管内焓值分布

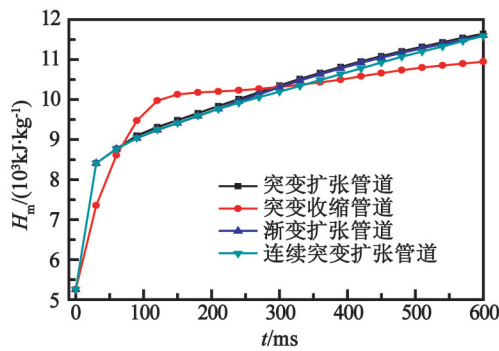
图 5 变截面管道内特征时刻焓、熵的分布情况

Fig. 5 Enthalpy and entropy distribution in various variable cross-section pipes

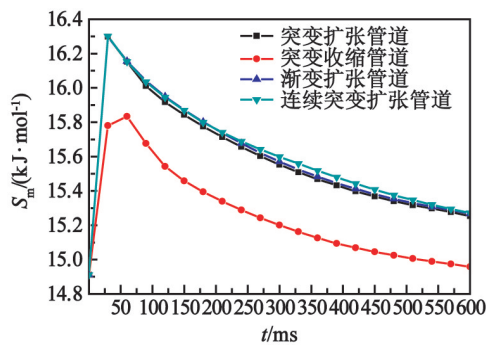
过程中管内最大焓、熵值的变化情况及在特征时刻的分布状况,以此进一步探究变截面管道对H₂/Air预混气体燃爆过程中系统热力学特性的影响。

在预混火焰传播至管截面突变或渐变位置的特征时刻(突变扩张管道60 ms、突变收缩管道60 ms、渐变扩张管道55 ms、连续突变扩张管道50 ms),管内焓、熵的分布状况体现了封闭管内能量的分布情况,不考虑管壁热传递所带来的能量损失,4种变截面管内在燃烧区域都表现出较高的焓和熵。焓值代表的是物质系统在某一时刻所具有的能量,在封闭管内预混气体燃爆过程的能量主要表现为内能,因此,其分布状况与管内温度分布情况相似,而熵值反应的是系统对外做功的能力^[14],因此,若系统具有较高的能量,那么对外做功的能力也就越强。由图5可知,当预混火焰传播至管截面的突变/渐变的位置时,在管截面突变诱导作用及收缩阻挡作用下使气流的传播方向发生变化,尤其在管壁附近受到剪切流的影响,焓、熵值均先聚集在管道上、下壁面附近,而轴向中部相对较低。

图6为变截面管道内最大焓、熵时程曲线。



(a)最大焓值



(b)最大熵值

图6 变截面管道内最大焓、熵时程曲线

Fig.6 H_m - t and S_m - t curves in various variable cross-section pipes

由图6可知,在预混火焰还未传播至管截面突变或渐变位置之前,突变收缩型管内的最大焓值上

升速率相对较快,而当预混火焰受到管截面突变/渐变的影响后,其焓值的上升速率迅速减缓,最终在预混火焰传播至右端管壁后,其焓值反而相对较低,这是由于收缩管内气体相对含量较少,由化学能转化的热能并表现在焓值上就越少,因此后期其焓值上升速率逐渐降低。而在H₂/Air预混气体整个燃爆过程中,4种变截面管内的熵值的变化趋势相似,均表现为前期迅速增加,后期逐渐降低,但由于收缩型管内气体含量低,化学能转换内能的速率相对较缓慢,其对外做功的能力也相对较弱。

综上所述,不同变截面管道结构对H₂/Air预混气体燃爆特性的影响非常明显,尤其是扩张型管道的截面突扩诱导作用和收缩型管道的截面收缩阻挡作用,改变了管内预混火焰传播的动态过程以及火焰前锋的稀松波和预混气体流动方向,从而使管内温度场、压力场、速度场以及管内气体能量和涡量的变化均出现明显不同。

3 结论

通过数值模拟4种变截面管道对H₂/Air预混气体燃爆过程及燃爆特性的影响,得出结论:

1)4种变截面管道对H₂/Air预混气体燃爆过程的影响存在明显差异。当预混火焰经过变截面时,在突变扩张型管内截面的突扩诱导作用促使预混火焰出现“杯口”型火焰前锋面,在突变收缩管内截面的收缩阻挡反射作用使管内出现“长颈花瓶”型火焰前锋面,渐变扩张管道减缓了截面扩张诱导作用对预混火焰的影响,而连续突变管截面对预混火焰的影响主要发生在层流向湍流转变阶段,对后期稳定的预混火焰的影响不明显。

2)突变收缩型管截面的阻挡、反射和抑制作用加强了预混气体的湍流强度和涡流运动强度,使管内 T_m 、 p_m 和 \bar{v} 均得到提高。但涡团的运动由管中轴处向管上、下壁面运动,抑制了尖端处火焰的传播,从而降低管道中点的动能和涡量。

3)相比突变扩张型管,渐变扩张型管内壁面呈45°角渐变,降低了管道截面扩张的诱导作用,管内各燃爆特征参数的变化均相对较平缓。而在连续突变扩张型管内,两次管道截面突扩对预混气体燃爆特性的影响存在显著不同,层流火焰向湍流火焰转变过程受截面突扩诱导作用的影响更为明显。

4)变截面管道结构对管内混合气体的焓、熵值的影响也存在差异,尤其对突变收缩型管内混合气体的热力学参数影响较为明显,由化学能转化为管

道内热能的速率受到管内预混气体浓度、燃烧速率和湍流火焰燃烧形态的影响,变截面管道结构通过改变燃爆参数进而影响混合气体的热力学性能。

参 考 文 献

- [1] SUN L T, JIANG B Y, GU F J. Effects of changes in pipe cross-section on the explosion-proof distance and the propagation characteristics of gas explosions [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 25: 236-241.
- [2] 郑路路, 窦华书. 扩散通道内爆轰波传播特性的研究进展[C]//第十六届全国激波与季博馆学术会议论文集. 洛阳, 2014: 111-116.
ZHEN L L, DOU H S. Advance on research of detonation wave propagation in diffusion channels [C]//Proceedings of the 10th national shock wave management seminar. Luoyang, 2014: 111-116.
- [3] 印华融, 翁春生. 爆轰波在变截面突扩管道中的传播特性研究[J]. 航空兵器, 2016(6): 66-72.
YIN H R, WENG C S. Propagation characteristics of detonation wave in variable cross-section sudden expansion pipe [J]. Aero Weaponry, 2016(6): 66-72.
- [4] 杨磊, 杨向尤, 李焕威, 等. 爆轰波进入不可燃突扩管道行为研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2008, 25(2): 129-133.
YANG L, YANG X Y, LI H W, et al. Detonation wave propagation in an incombustible abrupt expansion pipe [J]. Journal of Shengzheng University (Science and Engineering), 2008, 25(2): 129-133.
- [5] YUAN X Q, ZHOU J, LI Z Y, et al. Numerical study of detonation diffraction through 90-degree curved channels to expansion area [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(10): 7045-7059.
- [6] 郑有山, 王成. 变截面管道对瓦斯爆炸特性影响的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(11): 947-949.
ZHENG Y S, WANG C. Numerical simulation for the influence of variable cross-section tube on explosion characteristics of methane [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(11): 947-949.
- [7] 刘巨保, 姚利明, 张宇, 等. 圆管变截面结构局部压降计算方法研究[J]. 机械设计与制造, 2016(5): 83-87.
- LIU J B, YAO L M, ZHANG Y, et al. The calculation method of local pressure drop on variable cross-section circular tube structure [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016(5): 83-87.
- [8] 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.
- [9] CICCARELLI G, DOROFEEV S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(4): 499-550.
- [10] SHEN X B, WANG Q S, XIAO H H, et al. Experimental study on the characteristic stages of premixed hydrogen-air flame propagation in a horizontal rectangular closed duct [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(6): 12028-12038.
- [11] XIAO H H, WANG Q S, HE X C, et al. Experimental study on the behaviors and shape changes of premixed hydrogen-air flames propagating in horizontal duct [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(10): 6325-6336.
- [12] 朱跃进, 董刚, 刘怡昕, 等. 激波诱导火焰变形、混合和燃烧的数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 430-437.
ZHU Y J, DONG G, LIU Y X, et al. A numerical study on shock induced distortion, mixing and combustion of flame [J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(4): 430-437.
- [13] 许航, 秦润, 张一博. 变直径管内甲烷爆炸压力的测试[J]. 测试技术学报, 2013, 27(1): 25-28.
XU H, QIN J, ZHANG Y B. Measurement of methane explosion pressure in variable diameter tube [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2013, 27(1): 25-28.
- [14] 杨传路, 朱正和, 汪荣, 等. 临界点附近 H_2 气体的焓和熵的热力学计算 [J]. 原子与分子物理学报, 2002, 19(2): 231-236.
YANG C L, ZHU Z H, WANG R, et al. A thermodynamics calculation of specific enthalpy and entropy for gas H_2 near the critical state [J]. Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics, 2002, 19(2): 231-236.