

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0100

## 不同角度分叉管道内氢气-空气爆轰传播特性\*

喻健良, 詹潇兵, 吕先舒, 侯玉洁, 闫兴清, 于小哲

(大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 在 3 种角度分叉管道内开展化学计量比氢气-空气爆轰实验, 采用自制的火焰传感器和烟迹法分别获得了爆轰波传播速度和胞格结构, 探究了不同角度管道分叉对爆轰传播的影响。结果表明: 氢气-空气爆轰在经过分叉三通时受分叉口稀疏波影响导致爆轰波衰减解耦, 但随着入射激波与下游管道壁面碰撞, 逐渐由规则反射向马赫反射转变, 最终完成重起爆过程。其中, 直通支管内爆轰衰减主要受支管入口面积的影响, 随着分叉角度增大, 入口面积减小, 爆轰衰减程度和重起爆距离也随之减小; 而分叉支管内, 爆轰衰减受支管入口面积与入口渐扩程度共同影响, 但随着分叉角度的增大, 入口面积变为主要影响因素。不同角度分叉管内的实验结果均表明, 初始压力升高能显著提高爆轰稳定性, 从而削弱分叉几何结构的影响。

**关键词:** 分叉管; 分叉角度; 氢气-空气爆轰; 爆轰波绕射; 爆轰衰减; 重起爆

中图分类号: O381 国标学科代码: 1303510 文献标志码: A

### Propagation characteristics of hydrogen-air detonation in bifurcated tubes with different angles

YU Jianliang, ZHAN Xiaobing, LYU Xianshu, HOU Yujie, YAN Xingqing, YU Xiaozhe

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

**Abstract:** Study on propagation characteristics of detonation in bifurcated tubes is of great significance to the safety protection of gas explosion in pipelines and engineering application. The propagation states of detonation vary with the geometrical structure when passing through the bifurcated tee. Based on the detonation circular test tube, the stoichiometric hydrogen-air mixture gas with 29.5% H<sub>2</sub> in the volume fraction under different initial pressures was ignited by a 10-kV double high-voltage electrode to be detonated before entering the 30°, 45° and 90° bifurcation tees, respectively. The propagation characteristics of the detonation in the bifurcated tubes were analyzed based on the propagation velocity and cellular structure evolution characteristics obtained from the feedback signals of flame sensors and smoke-foils records. The results show that the H<sub>2</sub>/air detonation will decay when it passes through a bifurcated tee which is affected by rarefaction wave, but it is only a local phenomenon. The detonation re-initiation is gradually completed from regular reflection to Mach reflection after collision of incident shock wave and wall. In the straight branch tube, the detonation decay is mainly affected by the inlet area of the collateral branch tube. With the increase of the bifurcation angle, the inlet area decreases, and the detonation decay and re-initiation distance decrease as well. In the collateral branch tube, the detonation decay is affected by both the inlet area of the collateral branch tube and the gradual expansion of the section. When the bifurcated angle exceeds the critical value, the inlet area becomes the main influence factor. In addition, it is proved that increasing the experimental initial pressure of premixed gas can significantly improve the detonation stability and weaken the influence of bifurcation geometry. The mechanism of detonation decay and re-initiation in the bifurcated tubes is clarified by this study, which enriches the study of detonation diffraction and contributes to provide a scientific reference for engineering application and taking proper measures of explosion

\* 收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(52104187, 52174167)

第一作者: 喻健良(1963—), 男, 博士, 教授, [yujianliang@dlut.edu.cn](mailto:yujianliang@dlut.edu.cn)

safety protection of gas pipelines as well.

**Keywords:** bifurcated tube; bifurcated angle; hydrogen/air detonation; detonation diffraction; detonation decay; detonation re-initiation

分叉管道中的爆轰传播现象一直受到广泛关注。在爆轰推进技术方面,特别是脉冲爆轰发动机(pulse detonation engine, PDE),应用分叉管道内爆轰绕射进入下游支管以实现串联点火起爆,这种起爆方式能有效降低发动机燃烧室内点火能量,缩短起爆时间和距离,促进发动机高效运转<sup>[1-3]</sup>。在工业安全防护中,可燃气管道爆炸事故时有发生,在分叉管路中,爆轰波的绕射传播会造成分叉口及其下游支管爆炸特征突变,隐含更大危险性和不确定性<sup>[4-5]</sup>,特别是对于扩散能力强、反应活性高和爆炸极限范围宽的氢气。因此,分叉管道内爆轰传播特征的研究对涉及以氢气为燃料的工程应用及其管道运输安全都具有重要意义。

爆轰波由前沿诱导激波与化学反应区耦合而成,而诱导激波又是由入射激波与马赫杆交替形成的非平面波,因此爆轰波在分叉管道内发生绕射时会出现复杂的传播现象。学者们围绕 T 形管道内的爆轰波绕射已做了一系列研究。Guo 等<sup>[6]</sup>通过烟迹法对预混气  $H_2/O_2/Ar$  爆轰波在横截面为  $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}$  T 形分叉管内的绕射传播进行了研究,发现在分叉管道内爆轰波传播经历衰减、解耦、爆轰转爆燃、重起爆过程。王昌建等<sup>[7-8]</sup>、Wang 等<sup>[9]</sup>结合纹影以及数值模拟等方法对流场变化进行了研究,确定了稀疏波对爆轰衰减的影响以及入射激波与壁面碰撞反射诱导二次起爆过程,爆轰失效后在支管下游 4~6 倍管道内径处重新恢复到自持爆轰状态。Heidari 等<sup>[10]</sup>基于 ILES 求解器对爆轰波绕射、解耦和重起爆过程进行了数值模拟,明确了 T 形管道作为扰动源对爆轰波绕射局部变化的影响。Jiang 等<sup>[11]</sup>对 T 形管道内爆轰失效后重起爆机理进行了进一步分析,发现分叉管道内入射波与壁面碰撞反射形成的横波数量越多,强度越高,爆轰就越容易在衰减后恢复到自持状态。卢秦尉等<sup>[12]</sup>发现当  $H_2/O_2/Ar$  混合物中 Ar 体积分数提高到 70% 时,爆轰波经过分叉管道后解耦成爆燃波且不再复耦,这也表明了爆轰强度会影响分叉管道内的重起爆过程。随着研究的深入,气相爆轰波经过  $90^\circ$  (T 形)管道绕射进入支管内的衰减和重起爆机理不断明晰。

但是,现有的研究表明管道的几何结构也会严重影响爆轰波绕射现象,如凝聚相炸药爆轰波的拐角效应<sup>[13-15]</sup>和不同曲率弯管内爆轰传播状态差异<sup>[16-18]</sup>等。因此,探究不同分叉角度管道内的气相爆轰传播特征的差异,有利于认识分叉结构对爆轰波绕射的影响,并进一步揭示爆轰波绕射机理。然而,目前对气相爆轰在不同角度分叉管道内绕射现象仍缺乏系统性研究。

因此,本文中对  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 和  $90^\circ$ (T 形)圆形分叉管道内不同初始压力下的预混氢气( $H_2$ )-空气(air)(氢气的体积分数为 29.5%)爆轰传播状态进行实验研究,分析不同角度分叉管道内爆轰传播的变化规律,明确管道分叉角度对爆轰传播的影响,以期工程应用和可燃气管道爆炸安全防护提供参考。

## 1 实 验

实验系统如图 1 所示,由密闭实验管道、配气系统、高压脉冲点火系统和控制与数据采集系统 4 部分组成。密闭实验管道内径  $d$  为  $52\text{ mm}$ 。该实验管道由点火段、驱动段、过渡段、分叉三通、直通支管、分叉支管和前后端盲板组成。点火段长度为  $300\text{ mm}$ ;驱动段长度为  $1300\text{ mm}$ ,内置 Shchelkin 螺旋管;过渡段长度为  $1000\text{ mm}$ 。实验中分别采用分叉三通连接主管和支管,其中分叉三通的分叉角度  $\alpha$  为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 和  $90^\circ$ 。点火段采用  $10\text{ kV}$  双头高压电极点火,点火持续时间为  $1.0\text{ s}$ 。燃烧波经过驱动段内螺旋管加速后在分叉三通前形成爆轰波,并经过分叉三通向下游直通支管和分叉支管内传播。配气系统由真空泵、高压气瓶、预混气瓶、压力表以及高压软管和阀门等组成。在预混气瓶和实验管道中配气时,压力通过 2 个精度相同的精密数字压力表监测,压力表量程分别为  $-100\sim 2000\text{ kPa}$  和  $-100\sim 500\text{ kPa}$ ,满量程精度为  $\pm 0.1\%$ 。为了确定不同角度分叉管道主管和支管内的爆轰传播特征,根据实验工况对火焰传感器(N1~N13)间隔  $200\sim 400\text{ mm}$  进行合理布置。

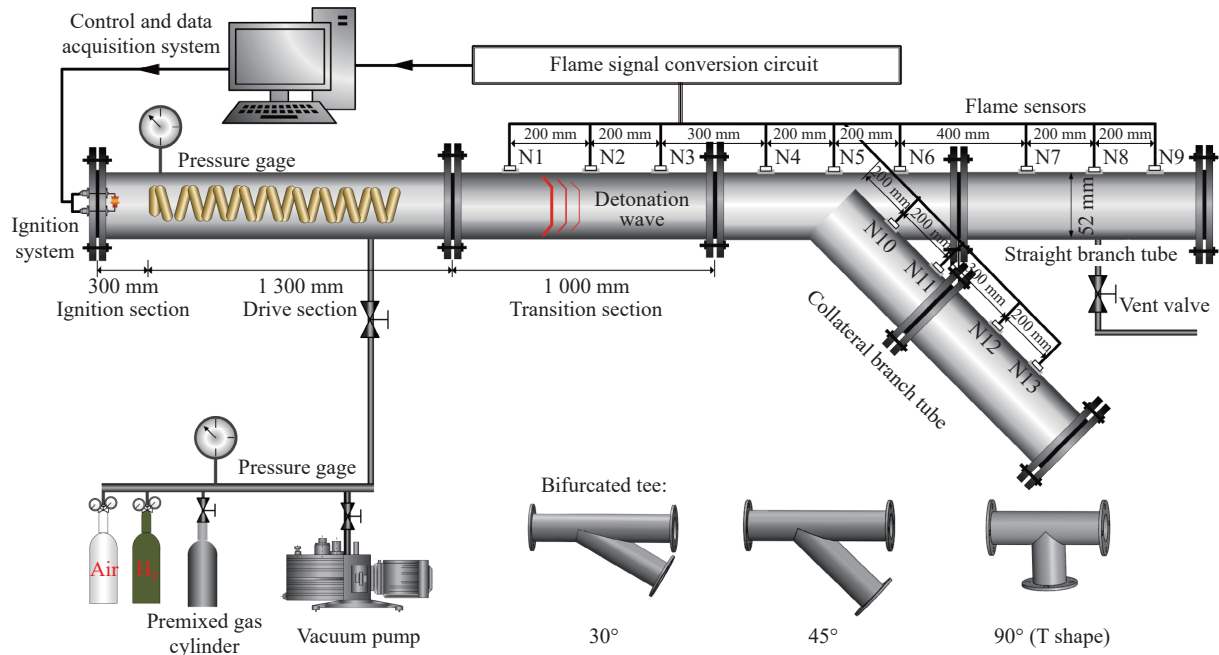


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

采用道尔顿分压法, 在预混气瓶中配置化学计量比氢气/空气(29.5% H<sub>2</sub>/air)预混气, 并静置 24 h。使用真空泵对实验管道抽真空至低于 0.1 kPa, 通入预混气体至既定初始压力  $p_0$ , 关闭进气阀, 并通过控制与数据采集系统完成点火和数据采集。

预混气被引爆后, 爆炸火焰经过实验室自制的 DUTA LightDe 型火焰传感器时, 光电二极管接收火焰锋面向外辐射的光信号, 通过转换电路将其转化成电压信号, 并通过数据采集系统采集。采集到电压值开始升高时对应的的时间即为火焰锋面到达火焰传感器位置的时间。当处于爆轰传播状态时, 火焰锋面紧随爆轰波, 因此通过读取电压信号即可确定爆轰波到达时间。具体测试结果如图 2 所示, 横坐标表示火焰传感器接收到光信号的时间, 左侧的纵坐标表示数据采集系统采集到的电压信号, 右侧纵坐标表示火焰传感器与点火端的距离。计第 1 个火焰传感器接收到光信号为零时刻, 随着火焰锋面经过火焰传感器, 采集到的电压依次从 0 升高到 5.4 V, 如图中各曲线所示。根据相邻火焰传感器间距离和响应时间关系, 即可计算平均火焰传播速度, 如图中折线所示。以第 3 和第 4 个火焰传感器为例, 其距离  $dx_3=300$  mm, 接收到火焰信号的时间差  $dt_3=0.153$  ms, 则平均火焰传播速度  $v_3=dx_3/dt_3 \approx 1961.8$  m/s。将测得的速度与 29.5% H<sub>2</sub>/air 在 298.15 K 以及对应初始压力下 CEA (chemical equilibrium with application) 程序<sup>[19]</sup> 计算的理论爆轰速度相对照, 确定爆炸传播状态。

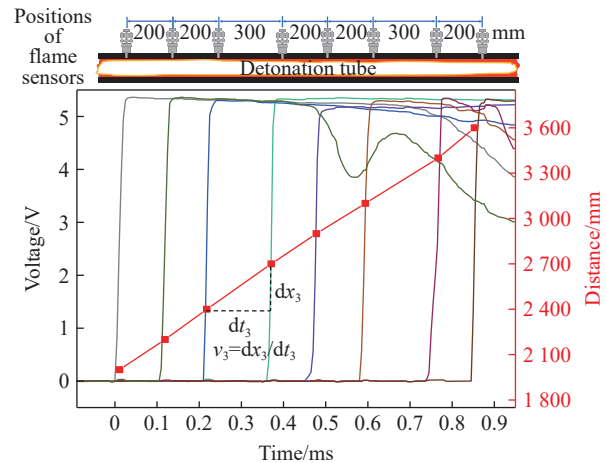


图 2 爆炸火焰信号的采集与处理

Fig. 2 Acquisition and processing of explosion flame signals

实验采用烟迹法记录爆轰波进入分叉管道后的胞格结构变化, 薄膜选用厚度为 0.1 mm 的不锈钢, 实验前将烟熏薄膜固定于管道内既定位置。

## 2 结果与讨论

### 2.1 分叉管道内爆轰波传播速度的变化

图 3 为在直管道内不同初始压力下 H<sub>2</sub>/air 爆轰传播速度变化特征。横坐标为测点与点火端距离, 纵坐标为相邻测点间的平均速度, 图中 2 条虚线分别表示该实验最低初始压力( $p_0=16$  kPa)和最高初始压力( $p_0=21$  kPa)对应的理论爆轰速度, 即当  $p_0=16\sim 21$  kPa 时, 对应理论爆轰速度  $v_{CJ}=1\ 922.8\sim 1\ 929.3$  m/s。如图 3 所示, 当  $p_0=16$  kPa 时, 在 2 100 mm 处火焰传播速度达到约 950 m/s(约  $0.5v_{CJ}$ ), 此后速度逐渐降低, 未能形成爆轰。当  $p_0=17$  kPa 时, 2 100 mm 处火焰传播速度达到  $v_{CJ}$ , 下游速度在  $v_{CJ}$  附近波动。随着初始压力继续升高, 速度在  $v_{CJ}$  上下波动幅度减小, 爆轰稳定性增强。以此判定, 在本实验工况下, 以  $p_0=17$  kPa 为临界压力, 当  $p_0\geq 17$  kPa 时燃烧波经过实验管道驱动段和过渡段后能形成爆轰波。

图 4 为不同初始压力下化学计量比 H<sub>2</sub>/air 爆轰波经过 30°、45° 和 90°分叉三通进入直通支管过程中的速度变化, 其中阴影部分表示爆轰波在分叉口前的传播速度。如图 4(a) 所示, 当爆轰波经过 30° 分叉

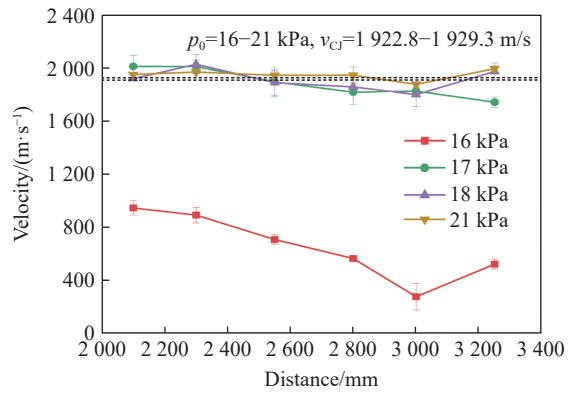


图 3 直管道内不同初始压力下爆炸传播速度变化

Fig. 3 Velocity variation of explosion propagation in the straight tube at different initial pressures

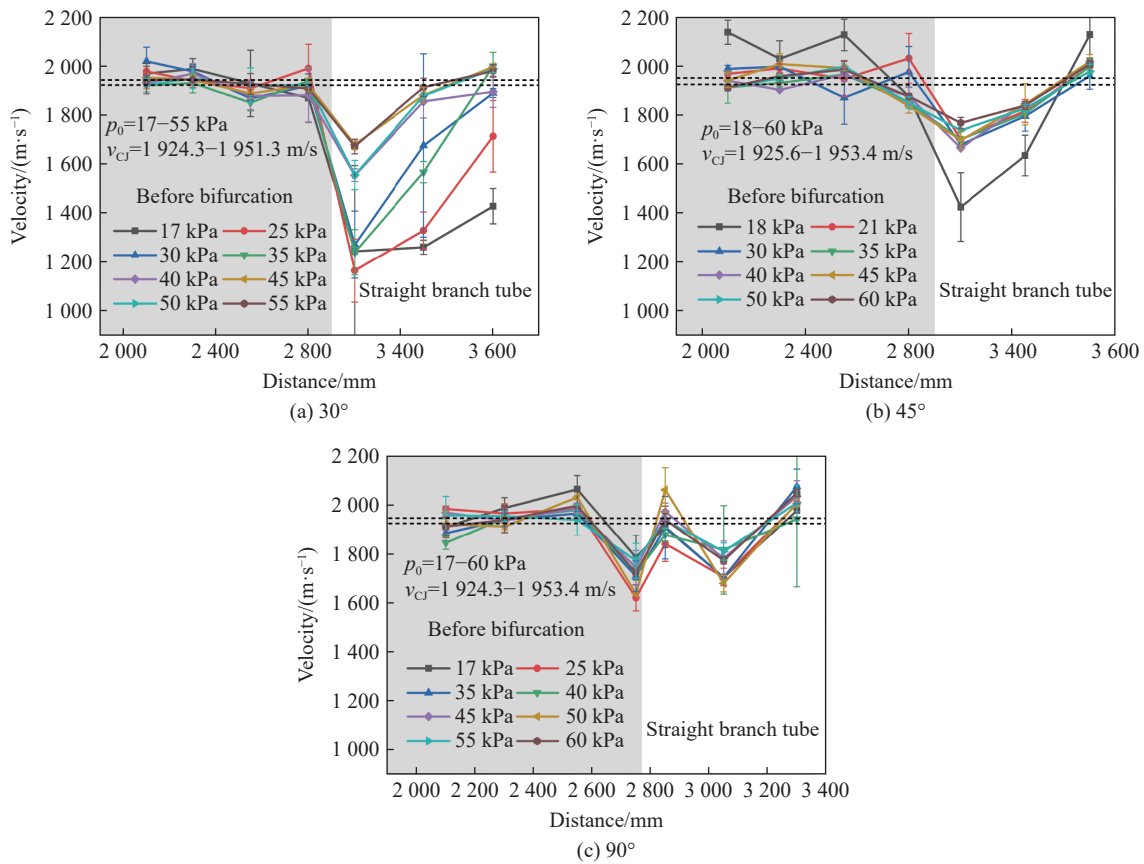


图 4 爆轰波经过不同角度的分叉三通进入直通支管过程中的速度变化

Fig. 4 Velocity variation of detonation wave through different degree bifurcated tees entering into the straight branch tube

三通进入直通支管的过程中, 爆轰波传播速度衰降至最低, 随后逐渐升高。当  $p_0 < 30$  kPa 时, 爆轰波传播速度存在较大波动, 根据速度增长趋势, 重起爆距离(即爆轰波经过分叉口衰减后重新形成爆轰波的距离, 用  $L$  表示)约为  $16d$ , 甚至更长; 当  $p_0 = 30 \sim 40$  kPa 时, 爆轰波传播速度衰减后恢复至理论爆轰速度的距离明显缩短, 约为  $14d$ ; 随着初始压力进一步升高, 爆轰波传播速度的衰减显著减弱, 同时在直通支管下游  $8d$  左右位置恢复到爆轰状态。而当爆轰波经过  $45^\circ$  分叉三通进入直通支管时, 如图 4(b) 所示, 爆轰波传播速度同样呈现先降低后升高的趋势。其中当  $p_0 = 18$  kPa 时, 爆轰波传播速度波动幅度大, 表现出爆轰状态的高度不稳定性。而随着初始压力升高, 爆轰波传播速度变化趋于一致, 均在衰减至  $1700 \sim 1800$  m/s 后升高, 相较于爆轰波经过  $30^\circ$  分叉三通进入直通支管时的速度衰减程度显著减小。同时, 在直通支管  $10d$  左右完成重起爆过程, 并且速度呈持续上升的趋势, 并超过  $v_{CJ}$ , 表现出明显的过驱现象。如图 4(c) 所示, 爆轰波经过  $90^\circ$  分叉三通进入直通支管时, 爆轰波传播速度衰减后快速升高, 在支管下游  $(1 \sim 2)d$  距离内完成重起爆过程, 随后爆轰波传播速度处于波动的不稳定状态。

与直通支管相比, 爆轰波绕射进入分叉支管时的传播速度衰减更剧烈, 重起爆过程更复杂。图 5(a) 所示, 爆轰波经过  $30^\circ$  分叉三通进入分叉支管后, 根据初始压力表现出 3 种爆轰恢复特征: 当  $p_0 = 17 \sim 21$  kPa 时, 经过三通爆轰波传播速度降低至约  $1000$  m/s, 随后速度升高, 但在距分叉口  $12d$  附近速度呈下降趋势, 说明该初始压力区间内爆轰衰减后可能无法完成重起爆过程; 当  $p_0 = 25 \sim 30$  kPa 时, 速度衰减呈现与  $p_0 = 17 \sim 21$  kPa 相同的规律, 但后续速度呈持续上升趋势; 当  $p_0 \geq 35$  kPa 时, 速度衰减随着初始压力升高逐渐减小, 并在分叉口后  $(12 \sim 16)d$  内速度恢复到  $v_{CJ}$ , 完成重起爆过程。如图 5(b) 所示, 爆轰波经过  $45^\circ$  分叉三通进入分叉支管时的传播速度以  $p_0 = 55$  kPa 为分界线, 当  $p_0 < 55$  kPa 时, 爆轰波经过分叉三通后速度持续下降至  $(0.52 \sim 0.58) v_{CJ}$ , 但均能在支管下游  $18d$  左右位置恢复到爆轰状态; 当  $p_0 \geq 55$  kPa 时,

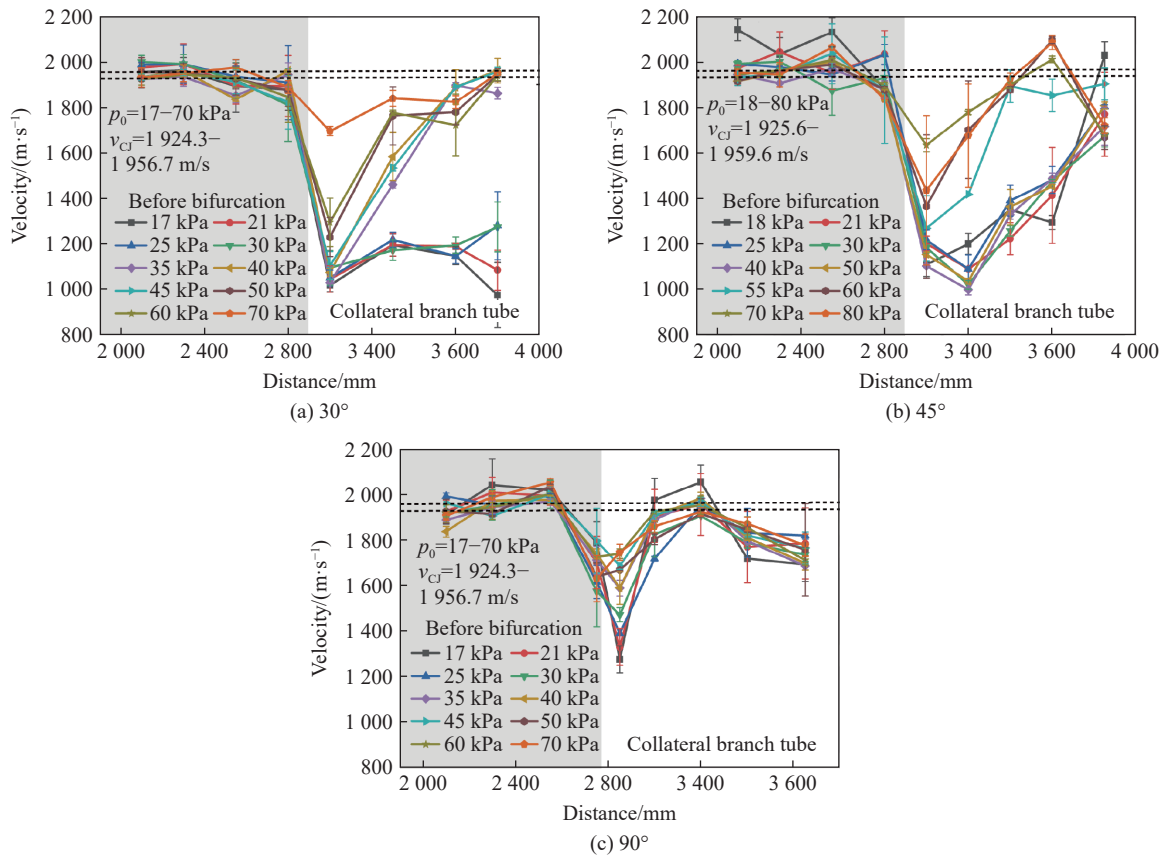


图 5 爆轰波经过不同角度得分叉三通进入分叉支管过程中的速度变化

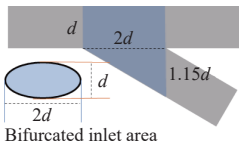
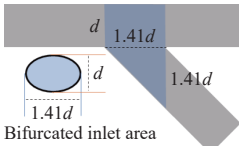
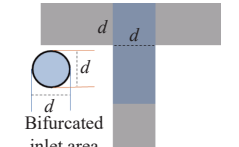
Fig. 5 Velocity variations of detonation wave through different degree bifurcated tees entering into the collateral branch tube

爆轰波传播速度衰减后持续增加,并在  $10d$  左右恢复到  $v_{C1}$ ,完成重起爆过程。如图 5(c) 所示,爆轰波经过  $90^\circ$  分叉三通进入分叉支管内爆轰衰减明显减弱,且速度均能在距离分叉口  $(3\sim 6)d$  内恢复至  $v_{C1}$ 。在分叉支管内,爆轰波传播速度同样表现出波动变化,显示出明显的过驱现象以及不稳定状态。因此,在 3 种角度分叉管道内重起爆过程速度波动进一步说明了分叉管道显著增强了爆轰传播的不稳定性。

表 1 为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  分叉管道的平面结构以及支管内爆轰衰减和重起爆特征。可以清晰地看到,在 3 种分叉角度的分叉管内,爆轰波的绕射都会造成爆轰波传播速度的衰减,但绕射进入分叉支管时爆轰衰减更明显,并且在支管下游经过更长的距离完成重起爆过程。同时,从不同角度分叉管道内的爆轰波传播速度变化特征可以看出,在直通支管内,随着角度的增大,爆轰波传播速度衰减程度显著降低,并且重起爆距离也大幅缩短。由于通过不同角度分叉口进入直通支管后边界条件一致,均为水平支管,因此认为支管入口面积是影响直通支管内爆轰衰减和重起爆的主要原因,随着支管入口面积减小,爆轰衰减程度降低,越易于恢复到爆轰状态。但在分叉支管内表现出的速度变化特征有所不同,在经过  $30^\circ$  和  $45^\circ$  分叉三通进入分叉支管内爆轰衰减程度基本一致,并且在低初始压力下, $45^\circ$  分叉支管内速度表现出连续衰减现象。但随着分叉角度增大到  $90^\circ$ ,爆轰衰减又显著弱于  $30^\circ$  和  $45^\circ$  分叉支管。这表明,分叉支管内不仅受到分叉支管入口面积的影响,也受到支管入口渐扩面变化程度的影响,其中在大的分叉角度内分叉支管入口面积仍是主要因素。与此同时,随着角度增大,重起爆距离呈现减小的趋势,表明分叉角度的增大更利于恢复至爆轰状态。在初始压力较高时,3 种角度分叉管道内的爆轰波传播速度衰减程度和重起爆距离差异均缩小,这说明增大初始压力能降低分叉三通几何结构对爆轰波绕射的影响程度,并且有利于减弱爆轰的衰减程度和缩短重起爆距离。

表 1 直通支管和分叉支管平面结构以及爆轰衰减和重起爆特征

Table 1 Plane structures of straight and collateral branch tubes as well as detonation decay and re-initiated characteristics in them

$\alpha/^\circ$	分叉管道平面结构	直通支管		分叉支管	
		$p_0/\text{kPa}$	传播特征	$p_0/\text{kPa}$	传播特征
30		$< 30 \text{ kPa}$	$v_{\min}=(0.60\sim 0.65)v_{C1}$ $L\geq 16d$	$17\sim 21 \text{ kPa}$	$v_{\min}\approx 0.53v_{C1}$ 不能重起爆
		$30\sim 40 \text{ kPa}$	$v_{\min}=(0.66\sim 0.79)v_{C1}$ $L\approx 14d$	$25\sim 30 \text{ kPa}$	$v_{\min}=(0.54\sim 0.57)v_{C1}$ 有重起爆趋势
		$\geq 40 \text{ kPa}$	$v_{\min}\geq 0.79v_{C1}$ $L\leq 8d$	$\geq 35 \text{ kPa}$	$v_{\min}> 0.53v_{C1}$ $L=(11\sim 16)d$
45		$18 \text{ kPa}$	$v_{\min}=0.74v_{C1}$ $L\approx 10d$ 速度波动大	$< 55 \text{ kPa}$	$v_{\min}=(0.52\sim 0.58)v_{C1}$ $L\approx 18d$
		$> 18 \text{ kPa}$	$v_{\min}\geq 0.86v_{C1}$ $L\approx 10d$	$\geq 55 \text{ kPa}$	$v_{\min}\geq 0.65v_{C1}$ $L\approx 10d$
90		$\geq 17 \text{ kPa}$	$v_{\min}\geq 0.84v_{C1}$ $L=(1\sim 2)d$	$\geq 17 \text{ kPa}$	$v_{\min}\geq 0.72v_{C1}$ $L=(3\sim 6)d$

## 2.2 分叉管道内爆轰胞格结构演化与传播机制

初始压力  $p_0=40 \text{ kPa}$  时形成的爆轰波通过  $30^\circ$  分叉三通分别进入直通和分叉支管过程的速度变化如图 6 所示。当爆轰波经过分叉三通到达直通支管内第 1 个测点时速度衰减至  $0.79v_{C1}$ ,重起爆距离约为  $7d$ ,而在分叉支管内对应值分别为  $0.56v_{C1}$  和  $11d$ 。该过程中爆轰波在分叉口附近和支管下游  $240\sim$

400 mm 内形成的胞格结构见图 7。在分叉口上游爆轰胞格结构明显, 呈现自持爆轰状态。当爆轰波传播至分叉口时, 受支管入口突扩影响, 爆轰波解耦, 胞格结构消失。在直通支管安装烟熏薄膜的位置爆轰已逐渐恢复, 出现入射波和马赫杆结构, 说明随着入射激波与壁面碰撞反射增强, 规则反射逐渐向马赫反射转变, 并完成重起爆过程。同时, 局部出现密集的小胞格结构, 反映了爆轰的不稳定状态。而在分叉支管相同的安装位置, 烟熏薄膜前端呈扇形无胞格结构区, 接着出现入射激波与壁面碰撞反射留下的不规则结构, 随后结构逐渐清晰形成大面积细小胞格结构, 并表现出不断扩大的趋势, 表明爆轰已逐渐恢复但传播并不稳定。速度和胞格结构的演变过程相互验证了相比于直通支管, 分叉支管内的爆轰波绕射使爆轰衰减更剧烈, 重起爆距离更长。

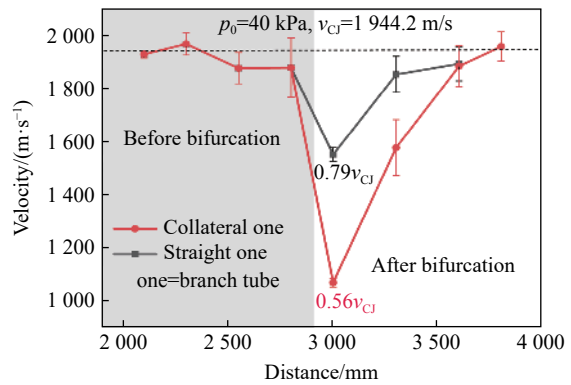


图 6 爆轰波在 30° 分叉管道内传播时的速度变化特征 ( $p_0=40$  kPa)

Fig. 6 Velocity variation of detonation wave propagation in the 30° bifurcated tube at  $p_0=40$  kPa

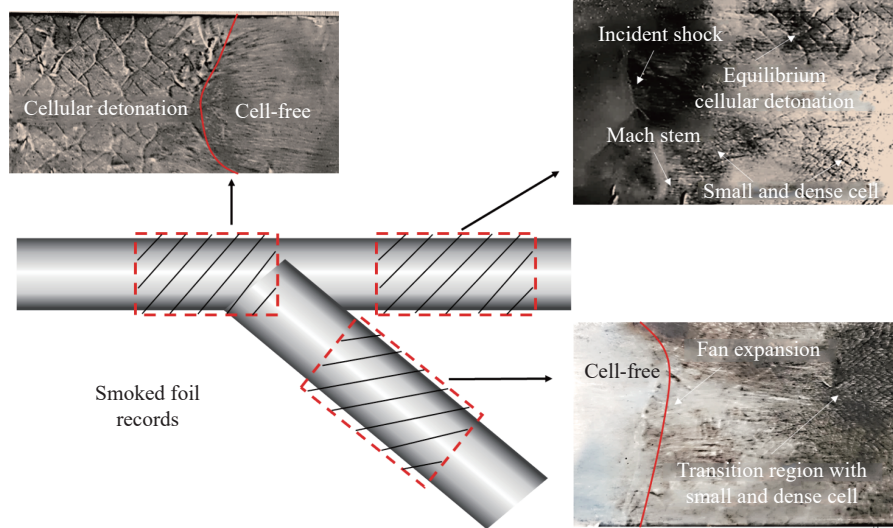


图 7 30° 分叉管道内胞格结构 ( $p_0=40$  kPa)

Fig. 7 Cellular structures in the 30° bifurcated tube at  $p_0=40$  kPa

图 8 为  $p_0=40$  kPa 下形成的爆轰在经过 30°、45° 和 90° 分叉三通进入分叉支管下游 200~740 mm 内烟熏薄膜记录的胞格结构演化过程。如图 8(a) 所示, 爆轰波绕射进入 30° 分叉支管后, 爆轰胞格结构消失, 在距离支管口 240 mm 左右出现扇形分界面, 随后的烟熏薄膜局部区域出现入射激波与壁面碰撞反射印记。随着入射激波与下游壁面的反复碰撞加强, 在过渡区域内形成局部小胞格结构, 并且面积不断扩大, 胞格逐渐清晰, 最终形成更完整的胞格结构, 但胞格尺寸大小不一。这说明, 爆轰波绕射进入 30° 分叉支管时, 会受支管入口稀疏波影响, 前沿诱导激波与化学反应区分离, 爆轰波持续衰减, 在 5d 左右区域内以爆燃波形式传播。随着入射激波与壁面碰撞反射形成更多横波, 同时强度不断增强, 促使规则反射向马赫反射转变, 从而逐渐完成重起爆过程, 形成新的胞格结构, 但爆轰并不稳定。如图 8(b) 所示, 45° 分叉支管内的胞格结构演化过程经历从无胞格结构到出现密集小胞格并逐渐形成清晰的胞格结构。与 30° 分叉支管相比, 无胞格区域更大, 出现均匀胞格结构的位置更滞后, 说明 45° 分叉支管内爆轰衰减更显著。如图 8(c) 所示, 90° 分叉支管内的烟熏薄膜初始位置已恢复清晰的胞格结构, 因此, 判定在

烟熏薄膜安装位置已经形成爆轰, 同时尺寸不一的胞格结构也说明爆轰处于不稳定传播状态。3 种角度分叉支管内胞格演化特征说明爆轰衰减受支管入口面积与支管入口渐扩变化程度共同影响, 并且主导因素也会随着分叉角度增大而发生转变。在小角度分叉支管内爆轰衰减过程主要受支管入口渐扩程度影响, 随着分叉角度增大, 支管入口渐扩程度逐渐提高, 爆轰衰减也随之增强。但当分叉角度超过某个值时(根据实验结果该角度应大于  $45^\circ$ ), 支管入口面积成为影响爆轰衰减和重起爆过程的主要因素, 因为随着分叉角度增大, 爆轰衰减距离显著减小, 爆轰衰减程度也随之降低。

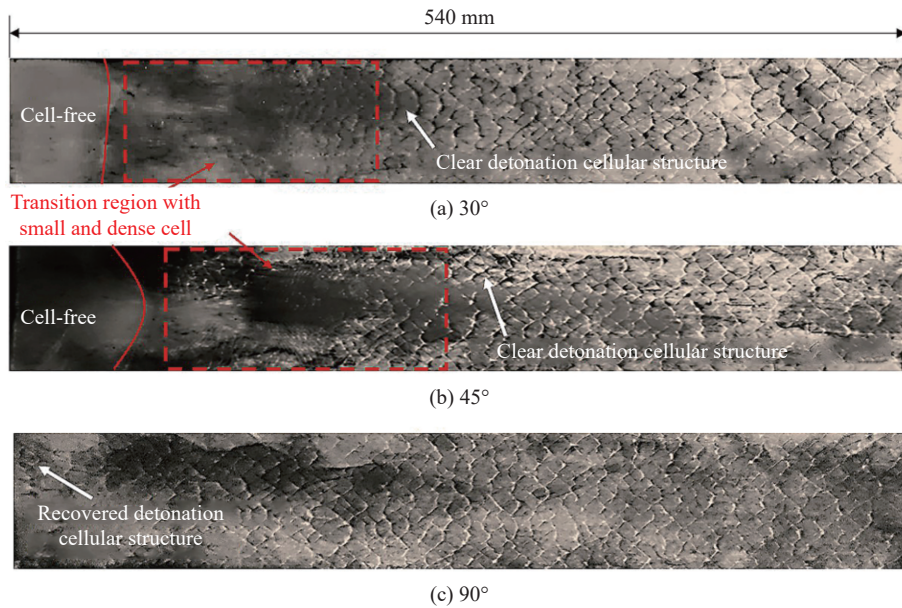


图 8 爆轰波经过分叉三通进入分叉支管后的胞格结构演化 ( $p_0=40$  kPa)

Fig. 8 Cellular structure evolution of detonation wave entering collateral branch tubes through  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$  bifurcated tees, respectively, at  $p_0=40$  kPa

根据 3 种角度分叉三通下游爆轰波传播速度和胞格结构演化过程, 以及前人对 T 形分叉管内爆轰波绕射机理的研究<sup>[11,20-21]</sup>, 对不同角度分叉管道内爆轰衰减与重起爆过程进行分析。爆轰波向直通支管内传播时, 爆轰波受到分叉支管入口方向稀疏波的影响, 在进入分叉口后, 横波衰减并最终消失, 与此同时爆轰波波阵面逐渐弯曲变形, 诱导激波与化学反应区分离程度加剧并最终解耦。随着分叉角度增大, 支管入口面积逐渐减小, 爆轰波整体受到稀疏波的影响也随之减弱, 爆轰衰减减弱且更易于在支管下游恢复至自持爆轰状态。但是, 爆轰波经过支管入口左边拐点绕射进入分叉支管时, 会产生扇形稀疏波使得爆轰波衰减为爆燃波, 随着分叉角度增大, 支管入口的渐扩变化程度也随之提高, 甚至在  $90^\circ$  情况下转变为垂直突扩变化, 这也导致爆轰波更大程度的扭曲变形。而与此同时, 支管入口面积减小, 受稀疏波影响距离显著缩短, 爆轰持续衰减距离减小, 衰减后的入射激波更快到达支管入口右边拐点, 且倾斜壁面更利于入射激波与壁面碰撞反射, 从而爆轰衰减后在更短的距离内完成重起爆过程。因此, 分叉支管内的爆轰衰减主要受支管入口面积和渐扩变化综合因素的影响, 重起爆过程主要受壁面碰撞反射强度的影响, 即分叉角度越大, 越有利于衰减后的入射激波与支管壁面碰撞形成反射, 并不断加强产生横波, 从而推动规则反射向马赫反射转变。在入射激波与管道壁面碰撞反射的同时, 反射激波诱导高温高压, 局部发生剧烈的化学反应, 放热量激增, 并促使形成爆炸中心, 而局部爆炸中心形成的强压缩波会导致火焰锋面速度迅速提高, 并向前追赶前沿诱导激波, 从而造成过驱爆轰现象以及不稳定传播状态, 表现为传播速度大于  $v_{CI}$  且波动变化。随着初始压力升高, 化学反应区内反应速率提高, 爆轰稳定性增强<sup>[22]</sup>, 爆轰波绕射受分叉三通几何结构影响减弱, 更有利于爆轰的恢复。



### 3 结 论

通过对不同初始压力化学计量比  $H_2/air$  在  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $90^\circ$  分叉管道内爆轰传播特性进行研究, 得出以下结论。

(1) 当爆轰通过分叉三通时, 由于在分叉口处产生稀疏波, 导致爆轰波弯曲变形, 诱导激波与化学反应区分离解耦。但随着支管下游壁面边界条件的恢复, 入射激波与管道壁面碰撞反射加强, 产生横波的同时, 反射激波诱导高温高压, 局部发生剧烈的化学反应, 放热量激增, 并促使形成爆炸中心, 完成重起爆过程。分叉管道内的爆轰衰减是局部现象, 直通和分叉支管内均能恢复至爆轰状态。但与直通支管相比, 分叉支管内爆轰波绕射造成诱导激波阵面更大程度的弯曲, 加剧了诱导激波与化学反应区分离, 使得爆轰衰减更严重, 同时重起爆距离更长。

(2) 直通支管内, 爆轰衰减主要受支管入口面积的影响, 分叉角度越大, 支管入口面积越小, 爆轰衰减程度就越小。从数据上看, 随着分叉角度增大, 直通支管内爆轰波传播速度衰减依次减弱, 同时重起爆距离也显著缩短。

(3) 在分叉支管内, 爆轰衰减受支管入口面积与支管入口渐扩程度共同影响。爆轰波经过  $45^\circ$  分叉三通进入分叉支管内爆轰衰减程度相对于  $30^\circ$  更大, 但随着角度的增加入口面积变为主要因素, 其中经过  $90^\circ$  分叉三通进入分叉支管内的爆轰衰减就显著低于  $30^\circ$  和  $45^\circ$  分叉支管, 并且重起爆距离更短。

(4) 随着初始压力升高, 爆轰稳定性增强, 从而显著降低分叉三通几何结构对爆轰波绕射的影响, 有利于减弱爆轰的衰减和缩短重起爆距离。

#### 参考文献:

- [1] 范玮, 李建玲. 爆震组合循环发动机研究导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 80–86.
- [2] 魏雁昕, 李宝星, 翁春生. 分叉管内爆轰波传播特性实验研究 [J]. *航空兵器*, 2017(2): 49–54. DOI: 10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2017.02.010.  
WEI Y X, LI B X, WENG C S. Experimental study on propagation characteristics of detonation wave in bifurcated pipe [J]. *Aero Weaponry*, 2017(2): 49–54. DOI: 10.19297/j.cnki.41-1228/tj.2017.02.010.
- [3] HOPPER D R, KING P I, HOKE J L, et al. Development of a continuous branching pulsed detonation engine [C]// Proceedings of the 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, USA: AIAA, 2008. DOI: 10.2514/6.2008-112.
- [4] LIAW H J. Lessons in process safety management learned in the Kaohsiung gas explosion accident in Taiwan [J]. *Process Safety Progress*, 2016, 35(3): 228–232. DOI: 10.1002/prs.11818.
- [5] HOU L F, LI Y Z, QIAN X M, et al. Large-scale experimental investigation of the effects of gas explosions in underdrains [J]. *Journal of Safety Science and Resilience*, 2021, 2(2): 90–99. DOI: 10.1016/j.jnlssr.2021.03.001.
- [6] GUO C M, WANG C J, XU S L, et al. Cellular pattern evolution in gaseous detonation diffraction in a  $90^\circ$ -branched channel [J]. *Combustion and Flame*, 2007, 148(3): 89–99. DOI: 10.1016/j.combustflame.2006.11.001.
- [7] 王昌建, 徐胜利, 朱建士. 气相爆轰波在分叉管中传播现象的数值研究 [J]. *计算物理*, 2006, 23(3): 317–324. DOI: 10.3969/j.issn.1001-246X.2006.03.009.  
WANG C J, XU S L, ZHU J S. Numerical study of gaseous detonation propagation through a bifurcated tube [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2006, 23(3): 317–324. DOI: 10.3969/j.issn.1001-246X.2006.03.009.
- [8] 王昌建, 徐胜利, 费立森. 气相爆轰波绕射流场显示研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(1): 27–32. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)01-0027-06.  
WANG C J, XU S L, FEI L S. Flow-field visualization for gaseous detonation diffraction experiments [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(1): 27–32. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)01-0027-06.
- [9] WANG C J, XU S L, GUO C M. Gaseous detonation propagation in a bifurcated tube [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 599: 81–110. DOI: 10.1017/S0022112007009986.
- [10] HEIDARI A, WEN J. Numerical simulation of detonation failure and re-initiation in bifurcated tubes [J]. *International Journal*

- of *Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7353–7359. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.174.
- [11] JIANG C, PAN J F, ZHU Y J, et al. Influence of concentration gradient on detonation re-initiation in a bifurcated channel [J]. *Fuel*, 2022, 307: 121895. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121895.
- [12] 卢秦尉, 熊焱, 范玮. 稀释氩气对分叉管内爆轰波绕射的影响 [J]. *推进技术*, 2014, 35(11): 1566–1576. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2014.11.019.
- LU Q W, XIONG C, FAN W. Effects of argon dilution on detonation diffraction in branch tube [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(11): 1566–1576. DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2014.11.019.
- [13] 李生才, 冯长根, 赵同虎. 拐角角度对爆轰波拐角效应的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 1999, 19(4): 289–294.
- LI S C, FENG C G, ZHAO T H. The influence of the angle of convex corner on the effect of detonation waves [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(4): 289–294.
- [14] 恽寿榕, 马峰, 康敬. 爆轰波传播拐角效应的近似理论分析 [C]//中国空气动力学学会第十届物理气体动力学专业委员会会议论文集. 福建厦门: 中国空气动力学学会, 2001: 3–8.
- [15] SHORT M, CHIQUETE C, BDZIL J B, et al. Detonation diffraction in a circular arc geometry of the insensitive high explosive PBX 9502 [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 196: 129–143. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.06.002.
- [16] 赵曦, 孙校书, 刘诚. 弯管角度对爆轰波传播特性的影响 [J]. *海军航空工程学院学报*, 2009, 24(5): 591–593, 600. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1522.2009.05.026.
- ZHAO X, SUN X S, LIU C. Effects on explosion wave spreading features by the angle of siphon [J]. *Journal of Naval Aeronautical Engineering Institute*, 2009, 24(5): 591–593, 600. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1522.2009.05.026.
- [17] GWAK M C, YOJ J J. Effect of multi-bend geometry on deflagration to detonation transition of a hydrocarbon-air mixture in tubes [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(26): 11446–11457. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.06.108.
- [18] 齐骏, 潘振华, 张彭岗, 等. 弯管内连续旋转爆轰波传播模式实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(2): 435–439.
- QI J, PAN Z H, ZHANG P G, et al. Experimental study on the propagation mode of continuous rotating detonation through the bend [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(2): 435–439.
- [19] MCBRIDE B J, GORDON S. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications: II. users manual and program description: 19960044559 [R]. Washington, USA: NASA, 1996.
- [20] 杜扬, 李国庆, 吴松林, 等. T 型分支管道对油气爆炸强度的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(5): 729–734. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0729-06.
- DU Y, LI G Q, WU S L, et al. Explosion intensity of gasoline-air mixture in the pipeline containing a T-shaped branch pipe [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(5): 729–734. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0729-06.
- [21] LI L, LI J M, NGUYEN V B, et al. A study of detonation re-initiation through multiple reflections in a 90-degree bifurcation channel [J]. *Combustion and Flame*, 2017, 180: 207–216. DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.03.004.
- [22] 喻健良, 高远, 闫兴清, 等. 初始压力对爆轰波在管道内传播的影响 [J]. *大连理工大学学报*, 2014, 54(4): 413–417. DOI: 10.7511/dllgxb201404007.
- YU J L, GAO Y, YAN X Q, et al. Effect of initial pressure on propagation of detonation wave in round tube [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2014, 54(4): 413–417. DOI: 10.7511/dllgxb201404007.

(责任编辑 张凌云)