

富氢燃气与液氧爆轰及补燃特性试验研究

王朝晖,孔维鹏,王 仙,田 原

(北京航天动力研究所,北京 100076)

摘 要:为了研究富氢燃气与液氧之间的爆轰及补燃特性,以某发动机故障归零为依托,采用试验研究的方法,分析了非预混和预混两种情形下发生爆轰的可能性,探究了富氢燃气与液氧自动发生补燃的条件。通过分析试验现象和试验结果发现,在较低混合比和较低温度条件下富氢燃气与液氧不会自动发生补燃,火焰颜色呈无色透明状,白天不可见。管内预混状态下,富氢燃气和液氧可以发生爆轰,最大爆轰压比约 34,且持续时间为毫秒级,在上游无预混物的情况下,爆轰波不会持续向上游传播。

关键词:氢氧发动机;富氢燃气;液氧;爆轰;补燃

中图分类号:V434.13 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2019)06-0010-07

Experimental study on the detonation and spontaneous combustion characteristics of hydrogen-rich gas and liquid oxygen

WANG Zhaohui, KONG Weipeng, WANG Xian, TIAN Yuan

(Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to study the detonation and spontaneous combustion characteristics of hydrogen-rich gas and liquid oxygen, based on the failure analysis of a liquid rocket engine, the possibility of detonation of hydrogen-rich gas and liquid oxygen under non-premixed and premixed conditions was analyzed by means of experimental study, and the conditions of spontaneous combustion of hydrogen-rich gas were explored. Through the analysis of experimental phenomena and experimental results, it is found that the hydrogen-rich gas and liquid oxygen do not react automatically at lower mixing ratios and lower temperature conditions, and the flame color is colorless and transparent, and invisible during the daytime. Under the premixed condition, hydrogen-rich gas and liquid oxygen can detonate, the maximum detonation pressure ratio is about 34, and the duration is milliseconds. However, in the case of no premixed material upstream, the detonation wave will not continue to propagate upstream.

Keywords: hydrogen and oxygen LRE; hydrogen-rich gas; liquid oxygen; detonation; spontaneous combustion

0 引言

燃气发生器循环氢氧液体火箭发动机利用燃

气发生器产生一定温度的富氢燃气驱动涡轮泵做功,做完功后的燃气通过涡轮排气管排入周围环境。氢氧发动机的氧涡轮泵会用到少量的液氧进

行密封隔离,此部分氧会在涡轮排气管附近排入周围环境。因此涡轮排气管附近区域具备同时存在富氢燃气和液氧的情况,此区域共存的富氢燃气和液氧是否能在某种特定的条件下发生爆轰或补燃等现象将会对发动机周围的力热环境造成影响,从而影响到发动机上其他组件的可靠性。目前对此类问题国内尚未进行过系统完整的研究。

在不同种类推进剂液体火箭发动机中,以氢氧液体火箭发动机中的氢氧爆轰威力最大,也最危险,需要特别关注和防范。一般正常情况下,液体火箭发动机稳态燃烧时,燃烧火焰锋面在燃烧室内的位置基本上不会发生变化,燃烧反应属于缓慢燃烧,火焰锋面前后的压力是一致的,并不发生压力突变,但是如果其他异常情况下,比如氧化剂和燃料发生串腔等,可能就会产生爆轰燃烧,爆轰燃烧是一种比缓慢燃烧反应程度剧烈上千倍的爆炸式化学反应,其火焰前锋的波阵面是一种以超声速传播的强激波,未燃混合气体通过该强激波时受到强烈压缩而升温升压从而发生爆炸式化学反应^[1]。由于爆轰燃烧是显著区别与普通缓慢燃烧的一种特殊燃烧方式,吸引了许多人对其进行研究。何小民等^[2]利用离子探针和高频压力传感器等手段对管内火焰的传播速度和燃烧压力波进行了测量,对爆燃到爆轰的转捩过程进行了分析,认为在爆轰产生初期,爆震管内将会出现三道火焰面。韩旭^[3]利用实验手段对超声速预混气中的高速热射流起爆特性进行了研究,分析了来流当量比、来流温度和来流马赫数对起爆特性的影响,认为来流速度是影响高速热射流起爆的关键因素,来流速度较高时起爆将经历一个DDT过程,来流速度较低时则与爆震热射流起爆类似。韩旭等^[4]还利用数值模拟的手段对超声速预混气的热射流起爆过程进行了数值研究,数值计算结果表明逐渐减小射流角度将会依次出现驻定、不驻定和起爆失败三种结果。李自然等^[5]通过实验手段研究了气流状态参数对超声速斜爆震热射流起爆特性的影响,发现一般情况下预混气来流当量比和温度的提高将有利于DDT过程和缩短DDT时间,但是当量比的影响具有一定的随机性。文献^[6]对预混氢气-空气的爆震现象进行了数值研究,主要研究了爆轰波结构以及有限速率化学反应模型对计算结果的影响,计算结果表明,高度简化的化学反应模型(例如单步或两步反应模

型)能够很好的模拟氢气-空气的自持爆轰现象。文献^[7]从理论和试验角度研究了混合比对氢氧爆轰特性的影响,所研究的气氢氧混合比范围为2.5~40,理论计算表明爆轰波速度随混合比升高而降低,而其他爆轰参数在化学当量比附近最大,与试验结果吻合较好。王汉良等^[8]利用烟迹技术对氢/氧/氩气混合气在管道内的爆轰现象进行记录,并对爆轰波的绕射和反射特性进行了分析。程关兵等^[9]在方形激波管内对氢/空气混合气进行了爆轰实验研究,获得了DDT转捩图像,并认为采用纹影法得到的DDT距离要比采用压力-时间法更为准确。唐新猛^[10]则重点对无内柱连续旋转爆轰发动机进行了详细研究。文献^[11]研究了不同点火能量、混合比和点火位置对预混气DDT距离的影响,结果表明DDT距离主要取决于混合比,而当点火能量大于一定值后,DDT距离就与点火能量无关。2017年姜凯等^[12]采用经典C-J爆轰理论对于氢氧爆轰问题进行了计算,分析了混合比、初压和初温三个因素对氢氧爆轰特性的影响,结果表明,初温越低、初压越大、混合比越接近化学当量混合比,那么氢氧爆轰的强度也就越大;姜凯的计算结果还表明如果低温氢氧在当量混合比附近发生爆轰时,最高爆轰压力可达220 MPa,最高爆轰温度可达4 500 K,最高爆速可以达3 000 m/s。此外,文献^[13-16]也对爆轰进行了相关的阐述和研究。

本文首先介绍了氢氧等相关爆轰的研究现状,然后针对本文要研究的氢氧液体火箭发动机中的爆轰问题搭建了爆轰试验研究系统,利用试验手段对富氢燃气与液氧之间的爆轰特性及补燃特性进行了探索研究。

1 试验系统

爆轰研究的试验系统原理示意图如图1所示,主要包括富氢燃气发生系统、常温气氢系统、液氧导管部分、排气管试验件以及相关的测量控制系统。

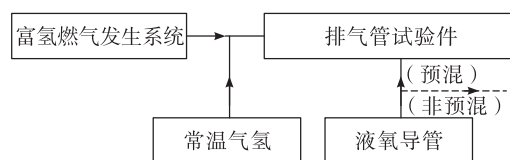


图1 试验系统原理示意图

Fig. 1 Test system schematic

富氢燃气发生系统通过一个氢氧火炬点火器来产生一定温度的富氢燃气模拟氢氧发动机的涡轮废气;常温气氢用来对燃气进行降温,根据液氧导管是否插入排气管试验件内部将试验状态分为预混和非预混。排气管试验件上的压力、温度以及振动等相关测点位置如图 2 所示。

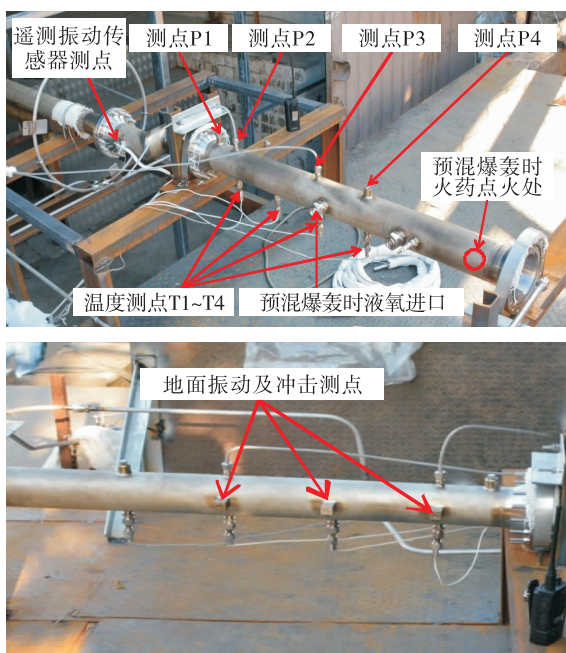


图 2 试验件相关测点位置图

Fig. 2 Measuring point position

2 试验内容及结果分析

2.1 非预混状态下的爆轰

非预混状态爆轰模拟试验主要模拟研究液氧与氧涡轮排气管排出的富氢燃气在排气管外掺混后遇到外点火源后能否产生爆轰及其对排气管试验件的影响。非预混状态爆轰模式示意图如图 3 所示。

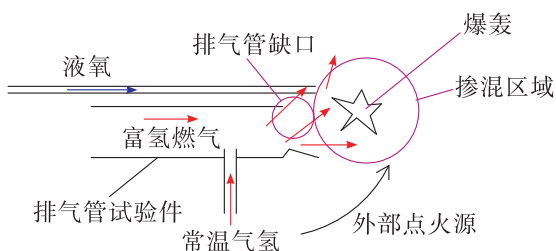


图 3 非预混状态爆轰模式示意图

Fig. 3 Non-premixed detonation mode schematic

非预混状态下的爆轰试验共进行了 6 次,试验参数及状态如表 1 所示。前五次均出现了富氢燃气与空气发生补燃的情况,而富氢燃气一旦与空气发生补燃,就破坏了产生爆轰的条件,因此也就无法产生外场爆轰,富氢燃气与空气补燃可能和点火时序、燃气出流状态等因素有关。试验结果还表明,常温氢气的加入会降低富氢燃气温度,但不会导致已经与空气补燃的富氢燃气熄火;液氧的加入会加剧补燃效果,液氧导管出口端如果插入补燃后的燃气中,其背风面局部会发生烧蚀,火光明亮,并伴有金属烧蚀物呈喷射状随燃气流向下游。

第 6 次非预混爆轰试验时,富氢燃气完全无色透明,未与空气补燃,如图 4 所示,当采用火药点火器将富氢燃气与空气混合气点燃时,火焰变得可见,颜色为淡橙色,如图 5 所示,同时伴随较大的声响,附近的摄像头也发生了大幅抖动,试验件上的振动及冲击传感器上无明显响应,说明燃气冲击波并未传播至试验件内部,试验件无任何损坏。约 2 s 后,导管将液氧斜向喷入燃气,液氧与燃气进一步补燃,补燃区域的光焰亮度增加,如图 6 所示。



图 4 燃气未与空气补燃时的形态

Fig. 4 None afterburning between burned gas with air



图 5 燃气与空气被点燃瞬间形态

Fig. 5 The picture of burned gas ignited

通过对上述试验现象及结果分析,可以初步得出以下结论:

表 1 非预混爆轰试验参数及状态

Tab. 1 Non-premixed detonation test parameters

试验次序	试验件处燃气温度/K	液氧流量/(g·s ⁻¹)	常温氢气流量/(g·s ⁻¹)	结果
1	735	179	无	与空气补燃,未爆轰
2	663	183	无	与空气补燃,未爆轰
3	489 (试验时间短,未平衡)	无	无	与空气补燃,未爆轰
4	515	无	200	与空气补燃,未爆轰
5	510	169	200	与空气补燃,未爆轰
6	550	179	无	未与空气补燃



图 6 通入液氧后的火焰形态

Fig. 6 The picture of gas after the inflow of liquid oxygen

- 1) 富氢燃气一旦与空气发生补燃,就破坏了产生爆轰的条件,也就无法产生外场爆轰;
- 2) 富氢燃气在不与空气补燃的情况下,待其积存一定量后再通过外能源点燃能够产生较为强烈的冲击波,对周围环境造成冲击,但在试验件的振动测量上基本无响应;
- 3) 富氢燃气与空气不补燃时,白天状态下,火焰颜色呈无色透明状,与空气补燃后火焰颜色呈淡橙色或淡黄色,富氢燃气与氧补燃会使补燃区域的火焰亮度增加。

2.2 预混状态下的爆轰

预混状态爆轰模拟试验主要模拟研究液氧导管插入排气管试验件内部与富氢燃气掺混后遇到外点火源被点燃后能否产生爆轰及其对排气管试验件的影响。预混状态爆轰模式示意图如图 7 所示。

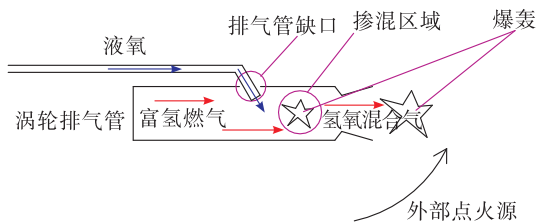


图 7 预混状态爆轰模式示意图

Fig. 7 Premixed detonation mode schematic

共有两次预混状态爆轰试验观察到了氢氧爆轰现象。第一次试验富氢燃气总流量约 148 g/s、混合比约 0.69、燃气温度约 728 K,排气管内的压力为 0.11 MPa,燃气喷出排气管后火焰无色、透明,未与空气发生补燃。第 20.85 s 时 180 g/s 液氧从垂直方向喷入燃气,使得排气管内的温度下降约 23 K,压力升高至 0.13 MPa,火焰仍然无色透明,表明液氧在排气管内未与燃气产生补燃。第 26.85 s 时安装在排气管壁上的火药点火器点燃管内的液氧与富氢燃气的混气(液氧与富氢燃气中残留氢的混合比约 2.1),发生了爆轰,在管内距液氧进口下游 120 mm 的高频脉动压力测点 P4 处产生了约 2.6 MPa 的压力峰(未点燃前的预混燃气压力为 0.13 MPa,二者比值 20),约 1 ms 后压力降为 1 MPa 左右,又经过 3.5 ms 左右降为 0.1 MPa,如图 8 所示,爆轰发生时,液氧进口上游约 500 mm 处的 P1 高频速变压力测点监测到了 0.36 MPa 的压力峰,与测点 P4 相比压力衰减明显。爆轰瞬间,排气管出口处火焰突然变得明亮,可见界面清晰的波峰面,同时排气管内燃气温度急剧上升,并在约 3 s 后烧穿排气管壁。图 9 是爆轰瞬间的火焰形态,图 10 和图 11 是试验件发生烧蚀瞬间及试后检查情况。

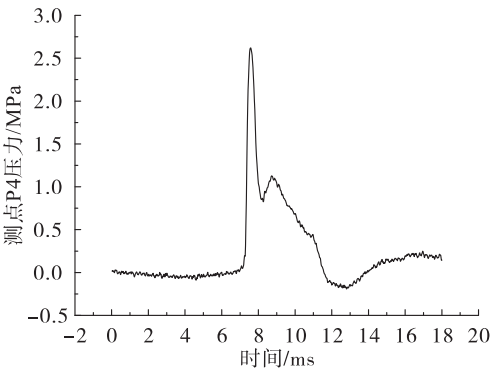


图 8 高频压力曲线

Fig. 8 High frequency pressure pulsation curve

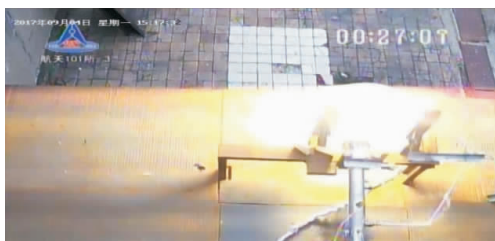


图9 爆轰瞬间火焰形态

Fig. 9 The picture of the flame at the moment of detonation



图10 爆轰后试验件烧蚀火焰形态

Fig. 10 The picture of the ablative flame after detonation

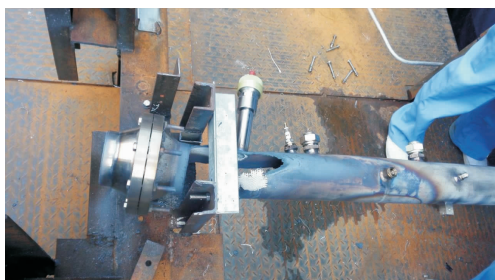


图11 爆轰后试验件外观

Fig. 11 The test product appearance after detonation

第二次试验时,产生富氢燃气的火炬点火器在启动过程中,常温气氢与液氧间形成了爆轰现象。试验时常温气氢先进入火炬点火器下游的燃气管路,之后火炬点火器电火花塞开始点火,约3.5 s后间隔约1 s依次打开火炬点火器的液氧阀和液氢阀。由于液氧比液氢先进入,其与常温气氢在燃气管路中掺混后形成了预混好的可燃混合气,在火炬点火器点火后被引燃形成管内爆轰,在管内P1测点处测到多个压力峰,持续时间约37 ms,其中最大的压力峰约4.1 MPa,约为爆轰前当地压力的34倍,P1和P4压力曲线如图12所示。

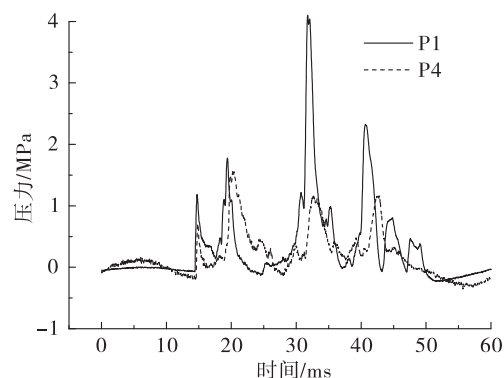


图12 爆轰时压力曲线

Fig. 12 The pressure curve at the moment of detonation

预混状态的爆轰试验表明:

1) 当富氢燃气与液氧未补燃同时混气的中液氧与燃气中残余氢气的混合比为2.1且被外能源点燃时,可以发生爆轰,爆轰后局部压力峰可达2.6 MPa,约为未爆轰前混气压力的20倍,压力峰持续时间约1 ms;

2) 爆轰波从氢氧混合区向上游富氢燃气区传播时会发生显著衰减;

3) 气氢与液氧混合气在管内被点燃时会形成爆轰,产生多个瞬时压力峰,爆轰压比最大可达34。

2.3 液氧与燃气补燃特性

2.3.1 大流量液氧泄漏状态

大流量液氧泄漏状态试验只进行了一次,试验系统与预混状态爆轰试验系统相同,但排气管中未设置点火源。试验时,富氢燃气流量为128 g/s,混合比0.88,排气管内燃气温度721 K,压力0.46 MPa,35 s后,177 g/s液氧垂直喷入排气管内燃气中(此时试管内液氧/燃气比例1.38,液氧/当地残余氢气比例2.93),喷入点下游的T4测点温度降至约630 K,表明液氧并未与燃气发生燃烧,温度变化曲线如图13所示。当液氧喷入点上游富氢燃气温度逐渐升高至733 K时,排气管内缓变压力测点数值急剧升高至最高0.94 MPa,如图14所示,液氧与燃气补燃瞬间录像截图如15所示;同时T4测点温度也快速升高并被烧坏,随后排气管试验件也烧穿。试验结果表明,富氢燃气在温度较高时是能够与液氧发生自动补燃的。

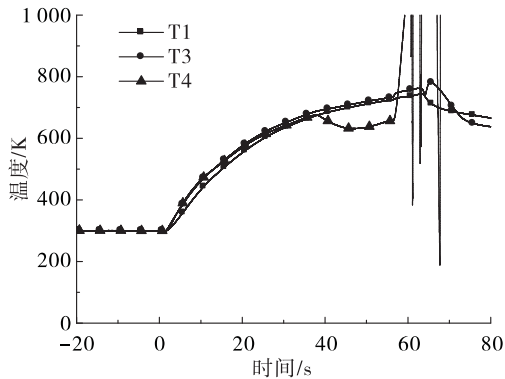


图 13 燃气温度变化曲线
Fig. 13 The temperature curve of the gas

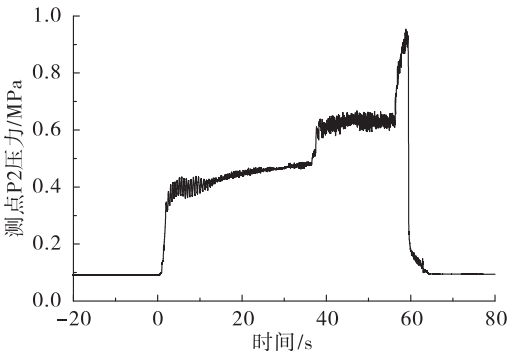


图 14 燃气压力变化曲线
Fig. 14 The pressure curve of the gas

2. 3. 2 小流量液氧泄漏状态

小流量液氧渗漏补燃特性试验共进行了 6 次,液氧通过 1 个直径 0.5 mm 小孔渗漏进燃气中,其中液氧渗漏方向与燃气来流方向分别呈顺流、垂直和逆流,如图 16 所示,试验参数如表 2 所示。试验结果表明,此流量比例下渗漏的液氧不会与温度 960 K 以下的富氢燃气自动补燃。



图 15 液氧与燃气补燃瞬间
Fig. 15 The time of spontaneous combustion of liquid oxygen and gas

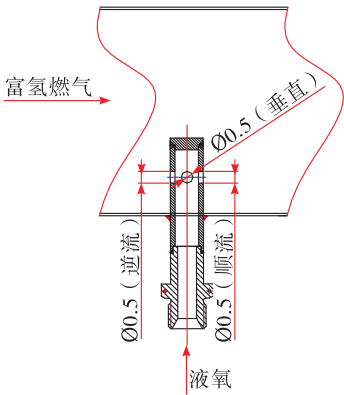


图 16 液氧出口小孔与燃气流相对位置示意图
Fig. 16 The schematic diagram of the relative position of a liquid oxygen outflow small hole and gas

从液氧与燃气的补燃试验结果来看,液氧与富氢燃气相遇后是否自燃与二者流量比例有一定的关系,当液氧流量与富氢燃气流量比例为 1.38 时,燃气温度达到 733 K 就可自动发生补燃;当液氧流量与富氢燃气流量比例小于 0.038 时,燃气温度在 960 K 以下时,液氧与富氢燃气无法自动发生补燃。

表 2 小流量液氧与燃气补燃特性试验参数

Tab. 2 Test parameter table of the afterburning characteristics of small flow liquid oxygen andgas								
试验 次序	燃气 温度/K	燃气流量/ (g·s ⁻¹)	燃气 混合比	液氧流量/ (g·s ⁻¹)	液氧/燃气 比例	液氧/当地残 余氢气比例	液氧渗漏 方向	液氧与燃气 是否补燃
1	624	134.7	0.67	5.40	0.040	0.073	顺流	否
2	960	139.2	1.16	5.22	0.038	0.095	顺流	否
3	593	136.0	0.62	5.65	0.042	0.073	垂直	否
4	785	117.7	0.91	5.41	0.046	0.099	垂直	否
5	600	136.2	0.64	5.15	0.038	0.067	逆流	否
6	834	120.4	0.93	4.78	0.040	0.086	逆流	否

3 结 论

本文采用试验研究的方法对不同状态下的富氢燃气与液氧间爆轰及补燃特性进行了研究分析,得到以下结论:

1)富氢燃气和液氧可以在管内预混状态下发生爆轰,试验得到的最大爆轰压比约 34,且持续时间为毫秒级,但由于上游并不存在预混物,因此爆轰波向上游传播时会在很短距离内发生迅速衰减。

2)富氢燃气与空气不补燃时,白天状态下,火焰颜色呈无色透明状,与空气补燃后火焰颜色呈淡橙色或淡黄色,富氢燃气与氧补燃会使补燃区域的火焰亮度增加。

3)液氧与富氢燃气之间是否能自动发生补燃主要因素是与二者混合比例及温度有关,当混合比例和温度同时满足一定条件时才能发生补燃,当混合比例不合适时,即使燃气温度很高也不会发生自动补燃。

参考文献:

- [1] 任汉芬,刘国球,方照奎. 液体火箭发动机原理[M]. 北京:中国宇航出版社,1993.
- [2] 何小民,张彭岗,王家骅. 爆震管内爆燃到爆震转捩过程的实验研究[J]. 推进技术,2005,26(3):252-255,269.
- [3] 韩旭. 超声速预混气中爆震波起爆与传播机理研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2013.
- [4] 韩旭,周进,林志勇,等. 超声速预混气的热射流起爆过程数值模拟[J]. 推进技术,2012,33(4):650-656.
- [5] 李自然,林志勇. 来流状态对超声速气动斜劈诱导爆震起爆过程的影响[J]. 火箭推进,2015,41(1):29-35.
LI Z R, LIN Z Y. Influence of flow state on initiation process of oblique detonation wave induced by hydrodynamic wedge in supersonic combustible flow[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2015, 41(1):29-35.
- [6] HSU K, JEMCOV A. Numerical investigations of detonation in premixed hydrogen-air mixture-assessment of simplified chemical mechanisms[C]//Fluids 2000 Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2000.
- [7] GUO H J, LIANG G Z. Theoretical and experimental investigation of influence of mixture ratio on hydrogen-oxygen detonation characteristics[C]//45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, Virginia: AIAA, 2009.
- [8] 王汉良,周凯元,杨志,等. 气体爆轰波在管道中绕射和反射的实验研究[J]. 火灾科学,2005,14(3):177-181,124.
- [9] 程关兵,王国大,黄燕晓. 氢气爆燃转爆轰特性试验研究[J]. 中国安全科学学报,2016,26(12):64-68.
- [10] 唐新猛. 无内柱连续旋转爆轰发动机研究[D]. 北京:北京大学,2014.
- [11] SINIBALDI J O, BROPHY C M, ROBINSON J P. Ignition effects on deflagration-to-detonation transition in gaseous mixtures: AIAA 2000-3590[R]. USA: AIAA, 2000.
- [12] 姜凯,何允钦,梁国柱. 氢氧发动机中激波与爆轰波热力参数计算分析[J]. 火箭推进,2017,43(6):14-25.
JIANG K, HE Y Q, LIANG G Z. Computation and analysis of thermodynamic parameters of shock wave and detonation wave in H_2/O_2 rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(6):14-25.
- [13] RAGLAD K W, COSENS G L. Detonation of hydrogen-oxygen at low temperature and high pressure[J]. AIAA Journal, 1964, 2(1):142-144.
- [14] COY E B, WATTS J M. Cryogenic, multiphase, hydrogen-oxygen detonations: AIAA 2005-1462[R]. USA: AIAA, 2005.
- [15] LEE H S. The detonation phenomenon[M]. New York: Cambridge University Press, 2008.
- [16] LEE J H, KNYSTAUTAS R, CHAN C K. Turbulent flame propagation in obstacle-filled tubes[J]. Symposium (International) on Combustion, 1985, 20(1):1663-1672.

(编辑:马 杰)