

# 空气/煤油/水燃气发生器点火特性试验\*

张新桥, 李清廉, 康忠涛

(国防科技大学 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**燃气发生器是超燃冲压发动机地面试验系统中的关键设备, 为提高系统安全性和经济性设计了空气/煤油/水燃气发生器, 在富燃状态下进行了一系列点火试验, 试验结果表明: 该型燃气发生器, 实现可靠点火的余氧系数下限为 0.51; 水的加入使得化学反应速率和火焰传播速度降低, 燃气发生器点火和火焰稳定困难, 提高余氧系数可以提高点火可靠性。同时, 水的加入容易引起燃烧不稳定, 通过提高余氧系数来消除低频不稳定燃烧。

**关键词:**空气/煤油/水; 燃气发生器; 点火

**中图分类号:** V448    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1001-2486(2013)04-0035-06

## Experimental researches on ignition characteristic of air/kerosene/water gas generator

ZHANG Xinqiao, LI Qinglian, Kang Zhongtao

(Science and Technology on Scramjet Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The gas generator is the key equipment of scramjet ground test system. A kind of air/kerosene/water gas generator was designed in order to improve the system security and economy. A series of ignition performances experiments were conducted in the fuel-rich condition with the gas generator. The experimental results indicate that: the lower limit of excess oxidizer coefficient for reliable ignition was 0.51 with the gas generator. The injection of water, which lowered the flame propagation speed and reduced the chemical reaction rate, would make it difficult to ignite and stabilize the flame. The ignition reliability could be improved by increasing excess oxidizer coefficient. Simultaneously, the injection of water would easily cause combustion instability. Low frequency combustion instability can be damped by increasing excess oxidizer coefficient.

**Key words:** air/kerosene/water; gas generator; ignition

燃气发生器的出口燃气温度较低, 一般介于 600 ~ 1300K, 并且要求出口燃气分布均匀。因此, 燃气发生器一般在较低总温下组织燃烧, 实现低总温燃烧有偏离当量比和加入水等方式。现有的用于引射系统的燃气发生器主要采用醇类燃料(或掺水醇类燃料)和氧气作为推进剂<sup>[1]</sup>, 醇类燃料易挥发, 有一定安全性要求, 基于上述现状, 选用更加常规、安全性更好的空气/煤油/水组合作为推进剂, 设计了一种高安全性及可靠性的新型燃气发生器。

对于空气/煤油/水燃气发生器, 由于采用空气作为氧化剂, 相较于采用氧气, 同等余氧系数下空气的流量显著增大, 致使燃烧室内的流速增大, 同时再向燃烧室加入水介质, 使得点火和火焰稳定比较困难<sup>[1]</sup>。采用加水方案主要是基于两种考虑: 一方面, 产气量是燃气发生器的一个重要性能指标, 水的加入能有效增加产气量, 而水本身是

生活中一种常见的介质, 易于获取; 另一方面水也是调温介质, 水蒸发后可以降低燃烧室温度, 实现了对燃气温度的调节, 同时减少了燃烧室的防热压力。采用加水方案的缺点是水喷入燃烧室后, 降低了燃烧室的温度、液滴蒸发速率、化学反应速率, 从而增加了燃气发生器点火和火焰稳定的难度。

本文设计了空气/煤油/水燃气发生器, 试验研究了该型燃气发生器的点火特性, 分析了余氧系数和含水量对点火性能的影响, 实现该型燃气发生器的可靠点火。

### 1 试验系统

试验系统由供应系统、测控系统、台架系统和燃气发生器四部分组成, 如图 1 所示。供应系统可以实现煤油和空气的平稳流量供应, 采用氮气对煤油储罐进行增压; 测控系统可以控制阀门开

\* 收稿日期: 2012-10-16

作者简介: 张新桥(1986—), 男, 甘肃会宁人, 博士生, E-mail: qiaoningshuang@126.com;

李清廉(通信作者), 男, 教授, 博士, E-mail: peakdreamer@163.com

关和点火,并测量和记录试验过程中的测点压强和流量等参数。压力传感器采用膜片电阻传感器,测量精度为 5% FS,控制系统时间控制精度可以达到 ± 50ms。

图 2 为本文试验的燃气发生器,采用气液同轴式喷嘴,中心喷注煤油,周围环缝喷注空气,为确保水均匀加入,水喷孔采用 3 圈 24 喷孔布局均匀分布在喷注器上,喷孔直径为 0.7mm。燃烧室安装 V 型槽火焰稳定器(采用双 V 型槽结构)。

该型燃气发生器采用了涡流器离心式喷嘴,其结构如图 3 所示。

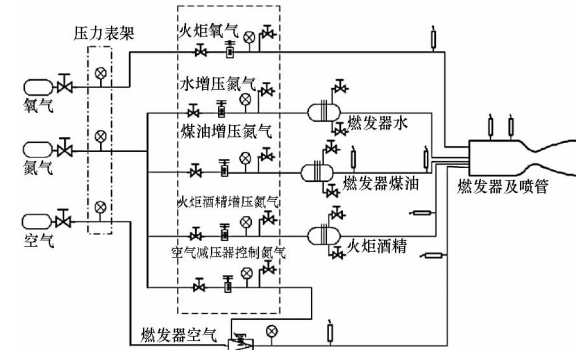
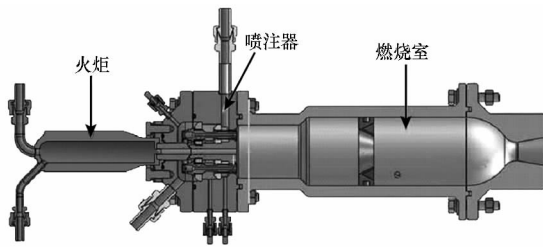
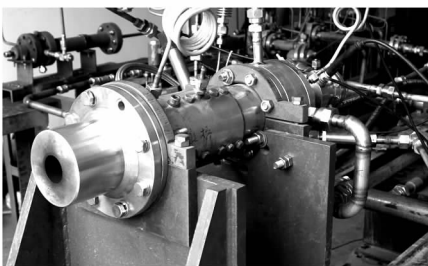


图 1 空气/煤油/水燃气发生器试验系统简图

Fig. 1 Air/kerosene/water gas generator testing system



(a) 燃气发生器结构示意图



(b) 燃气发生器实物图

图 2 空气/煤油/水燃气发生器结构

Fig. 2 Structure of air/kerosene/water gas generator

## 2 试验结果及分析

### 2.1 不加水情况下余氧系数对点火性能的影响

在进行燃气发生器点火试验时,考虑到该型燃气发生器点火及火焰稳定较为困难,在试验时先不加水。试验安装的喷嘴为同一套涡流器离心

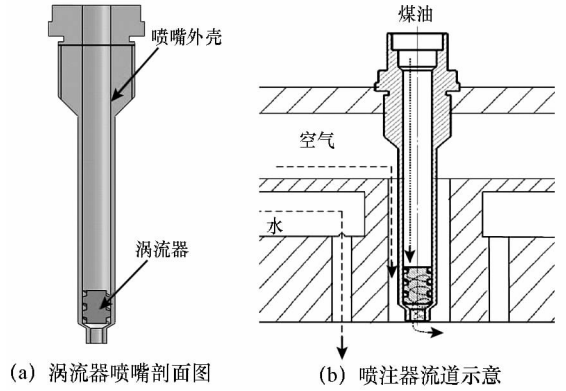


图 3 喷注器及喷嘴结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of injector and injector element

式喷嘴,时序设置相同,改变余氧系数进行点火试验,其中,调节余氧系数的方式为保持空气流量不变,通过减小煤油流量来提高余氧系数,试验结果如表 1 所示。

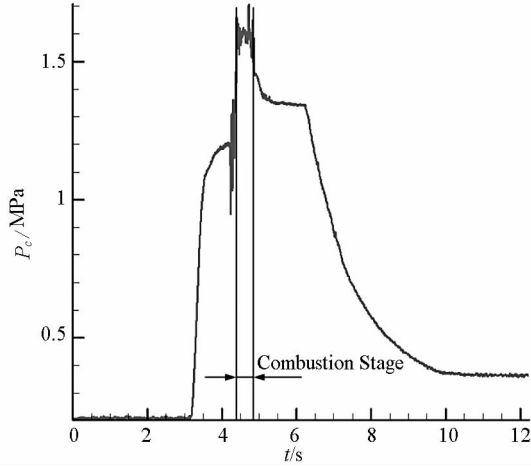
表 1 余氧系数对点火性能的影响

Tab. 1 The effects of excess oxidizer coefficient on ignition performance

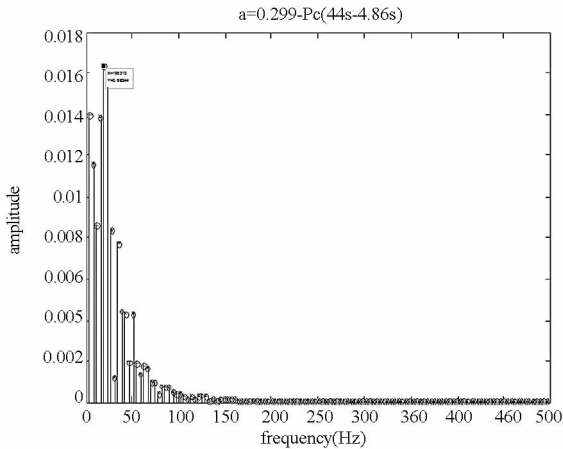
余氧系数	室压 (MPa)	点火结果	备注
0.248	0.98	非正常熄火	
0.265	0.9	失败	未点燃
0.299	1.6	成功	室压振荡一段后熄火
0.333	2.0	成功	室压振荡, ± 0.7MPa
0.510	2.3	成功	室压平稳

从表 1 可以看出,在其他条件不变的情况下,余氧系数小于 0.3 时,火炬未能将燃气发生器点燃;逐渐增大余氧系数,余氧系数介于 0.3 ~ 0.5 时,燃气发生器点火成功且可以自持(或自持一段时间),但燃烧室压出现明显振荡,某些振荡可以导致熄火<sup>[2-3]</sup>,分析认为,这种情况可能与燃气发生器内安装的火焰稳定器有关,猜想此时火焰稳定器实际上已经出现“熄火 - 再点火”过程<sup>[4-5]</sup>,即余氧系数变化使得火焰锋面和剪切层出现局部穿孔,火焰出现局部熄火。新鲜混气被卷入回流区内燃烧,形成新的火核,如果火核能够重新点燃来流,则火焰被重新点燃,即出现熄火 - 再点燃过程;如果火核能量不能将来流再次点燃,则整个火焰被吹熄。正是这种“熄火 - 再点火”过程导致了燃烧室压力的振荡。如图 4 所示为余氧系数为 0.299 时的燃烧室室压曲线和燃烧段的频谱图,从图 4 (a) 可以看出燃烧室室压  $P_c$  存在明显振荡,在时间段 4.4 ~ 4.86s 内持续燃烧,称之为燃烧段,对燃烧段的室压数据做 FFT,即快速傅里叶变换,分析其振荡频率;图 4 (b) 为燃烧段

室压的频谱图,可以看出振荡频率约为 20Hz,对余氧系数为 0.333 的工况进行同样的分析,得到其振荡频率与余氧系数为 0.299 时的振荡频率基本相等。即对该型设计的燃气发生器和推进剂组合,“熄火-再点火”过程导致的燃烧室压力振荡频率为 20Hz。



(a)  $\alpha = 0.299$  时的室压  $P_c$  曲线



(b) 室压燃烧段(Combustion Stage)的频谱图

图4  $\alpha = 0.299$  时燃烧室室压曲线及燃烧段频谱图

Fig.4 The chamber pressure curve and frequency spectrogram of combustion stage when  $\alpha = 0.299$

## 2.2 含水量对点火性能的影响

为确定水对点火性能的影响,在保持余氧系数不变的情况下,分不加水 and 加水两种情况进行多组比较试验。同时为了避免加水对燃气发生器启动过程的影响,在时序设置上水在燃气发生器稳定工作之后加入,从而分析加水对燃气发生器工作特性的影响,试验时序如图 5 所示。在加水时,余氧系数的定义仍为实际混合比与当量混合比的比值,其中,混合比为氧化剂空气流量与燃料煤油流量的比值,从定义式上看水的加入不影响余氧系数,但是水的蒸发需要吸收热量,造成煤

油的蒸发量减少,这会间接影响火焰稳定器前的余氧系数。

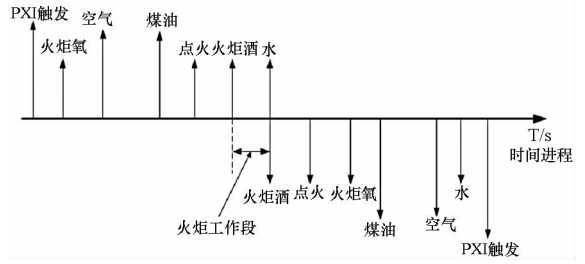


图5 加水试验的时序

Fig.5 Timing scheme of hydrous experiment

图 6 为余氧系数为 0.51,不加水 and 加水(水流量 100g/s)的燃烧室室压曲线,时序设置相同;图 7 为余氧系数为 0.58,不加水 and 加水(水流量 0.1kg/s)的燃烧室室压曲线。

从这两张图上可以看出水的加入对燃气发生器的点火性能影响显著,在接近余氧系数下限 0.51(指在不加水工况下获得的余氧系数下限)的工况下,加入水后燃气发生器不能成功点火,从图 6 可以看出,在水流量设置为 0.1kg/s 时,燃气发生器在火炬着火时形成了初始火焰,但火炬熄火后燃气发生器随之熄火,可见水的加入增大了燃气发生器的点火难度。这是因为水的加入,一方面降低了燃烧室的温度,而燃烧室温度的降低不利于燃料液滴的蒸发,另一方面,文献[6]表明水的加入会显著降低火焰传播速度,不利于燃烧室内火焰的稳定。

从图 7 可看出,当余氧系数为 0.58 时,同等余氧系数下注入流量为 0.1kg/s 的水,发现燃气发生器仍可以成功点火。可见,在水流量相同的情况下,逐步提高余氧系数可以提高点火的成功概率。

从图 7 还可以看出,加水后(水流量 0.1kg/s)燃烧室室压虽然总体上保持平稳,但与不加水的情况比较,发现室压有低幅(约 0.1MPa)的微弱振荡,振荡频率约为 36.7Hz,如图 8 所示为室压曲线局部放大图,这个频率的振荡在液体火箭发动机不稳定燃烧里属于低频不稳定燃烧<sup>[7-8]</sup>。分析认为这个现象与火焰稳定器有关,火焰稳定器处燃烧主要发生在剪切层内,加水后,剪切层的湍流脉动增加,那么燃烧释热也会相应地出现脉动,再与喷雾蒸发过程耦合,引起燃烧不稳定<sup>[5-9]</sup>。同时对照前文降低余氧系数时引起的室压振荡,可以看出低余氧系数引起的振荡频率要小于加水引起的振荡频率,约为加水引起的振荡频率的 1/2。这两种引起振荡的方式的共性是都使得钝

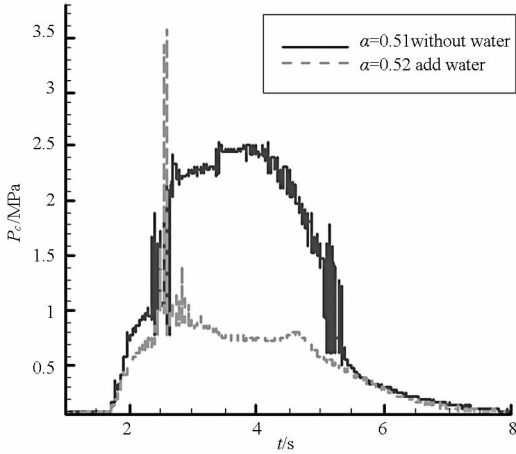


图 6 余氧系数  $\alpha \approx 0.5$  时加水对点火的影响  
 Fig. 6 The effects of water on ignition performance in the condition of  $\alpha \approx 0.5$

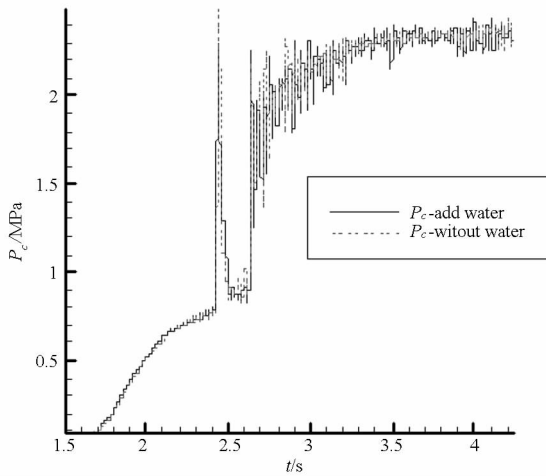


图 7 余氧系数  $\alpha \approx 0.58$  时加水对点火的影响  
 Fig. 7 The effects of water on ignition performance in the condition of  $\alpha \approx 0.58$

体火焰稳定器 (V 槽) 前混气中液滴数目增加, 这样会使得钝体稳定的火焰面上局部熄火的范围增加, 造成火焰振荡。其区别在于, 较低余氧系数还会造成混气当量比减小, 火焰传播速度减小, 火焰面与剪切层相互作用增强而出现局部熄火现象。

从图 8 还可看出, 在加水量较小时, 室压振荡的振幅很小 (小于 0.1 MPa), 可以认为对燃烧稳定性影响不大, 室压仍然是平稳的。在此余氧系数下增大水的喷注流量, 在水流量为 0.18 kg/s 时, 燃烧室室压开始大幅振荡 (振幅约 0.35 MPa), 如图 9 所示。

综上, 水的加入对燃气发生器的点火性能影响显著, 水的加入增大了燃气发生器点火的难度, 在某一特定余氧系数下, 如果加水后燃气发生器无法成功点火, 可以采取提高余氧系数的方式来实现点火。同时, 含水量影响燃气发生器的燃烧稳定性, 水流量较小时室压会出现室压的低幅 (小于 1 atm) 低频振荡, 可以认为室压是平稳的,

当水流量增大的一定程度时, 室压振荡加剧, 燃气发生器无法进行稳定燃烧。同时, 振荡的幅度  $A$  随着含水量的增大而增大, 而振荡的频率  $f$  与含水量没有线性关系, 如图 10 所示。

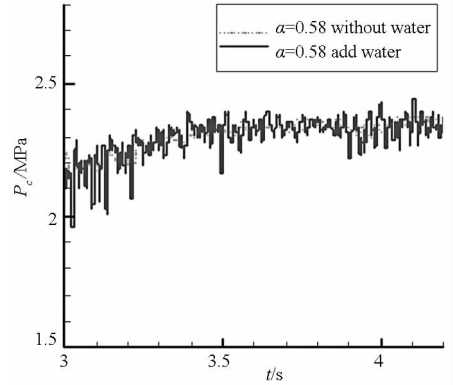


图 8 室压曲线振幅分析

Fig. 8 The analysis on amplitude of pressure curve

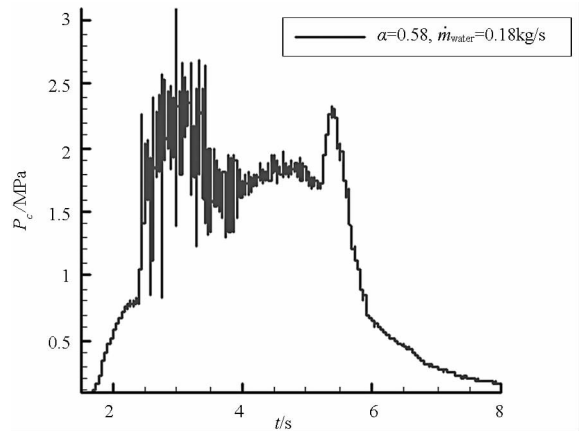


图 9 水流量 0.18 kg/s 时的室压曲线

Fig. 9 The pressure curve when water flow  $m = 0.18 \text{ kg/s}$

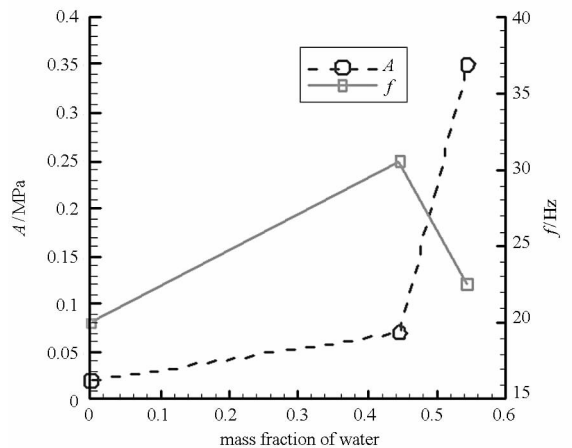


图 10 振荡频率和振幅与含水量的关系

Fig. 10 The relationship between oscillation frequency, amplitude and mass fraction of water

上述通过试验研究了含水量对点火性能的影响, 为了进一步分析水的加入对燃烧室流场的影响, 对燃烧流场进行了数值仿真, 求解方法选用

SIMPLE 算法,湍流模型选取  $k-\varepsilon$  双方程模型,煤油和水的液滴尺寸分布服从 Rosin-Rammler 分布,最小液滴直径为  $40\mu\text{m}$ ,最大为  $120\mu\text{m}$ ,平均直径为  $80\mu\text{m}$ ,采用面喷射,喷射速度垂直于喷射面;燃烧模型采用涡耗散单步化学反应模型;网格划分上,考虑到对称性,选取包含半个喷嘴的 30 度扇面做网格,网格如图 11 所示。选定余氧系数为 0.5,对水质量分数分别为 0、20%、40%、60% 的工况进行了对比仿真计算,其温度分布图如图 12 所示。

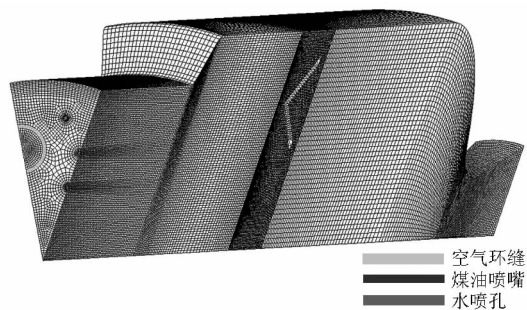


图 11 计算网格  
Fig. 11 Compute grid

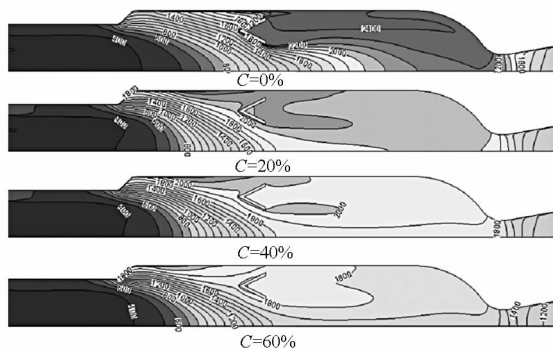


图 12 不同水浓度下的燃烧室温度分布  
Fig. 12 Temperature distribution of chamber under different water concentration distribution

图 12 中,随着水浓度的增加,燃烧室温度逐渐减小,这说明通过加水来降低燃气温度是一个切实可行的方案,对比不加水 and 加水 20% 的情况可知, V 型槽前的高温区有向喷注面板推进的趋势。由于加水增强了气相扰动从而促进煤油液滴的蒸发,使得煤油蒸汽与空气混合达到合适当量比的位置提前,从而使得化学反应的位置也相应地向喷注面板推进。随着水浓度的增加,高温区的移动由向喷注面板推进减弱为向喷管后移,同时燃烧室温度进一步减小。这一方面是由于水浓度的增加,使得水蒸发吸收反应释放的热量增多,从而使得燃烧室温度降低,水液滴在此过程中体现为物理作用。另一方面,水液滴蒸发与煤油液滴蒸发竞争能量,造成煤油液滴的蒸发减少,从而

使得反应区域向喷管推移,同时反应释放的热量也发生了一定程度的减少,水液滴在这一过程中体现为间接化学作用。可见,水的加入可以在一定程度上增强了煤油的蒸发速率,从而对火焰稳定和燃烧效率的提高起到一定的促进作用。但是随着水浓度的增加,水液滴的蒸发与煤油液滴的蒸发竞争燃烧释放的能量,使得煤油的蒸发量又呈现出减少的趋势,这又对火焰稳定和燃烧效率的提高不利,因此需要对水浓度进行优化设计。

### 2.3 由余氧系数和含水量确定的点火特性

综上试验数据和分析,可以获得该型燃气发生器的点火特性,如图 13 所示。在不改变燃气发生器及火焰稳定器结构的情况下,影响燃气发生器点火和燃烧性能的主要是余氧系数和含水量。根据试验结果可以将燃气发生器的状态空间分为 I ~ III 三个区域。其中, I 为燃气发生器稳定工作区域,其特征为燃气发生器室压平稳、燃烧室内火焰稳定; II 为燃气发生器振荡燃烧区域,火炬点火器可以将燃气发生器点燃,但燃烧室压力存在低频振荡,火焰稳定器后火焰存在局部熄火现象; III 为燃气发生器不启动区域,在这一区域内火炬点火器不能将燃气发生器点燃,即燃气发生器不能启动。

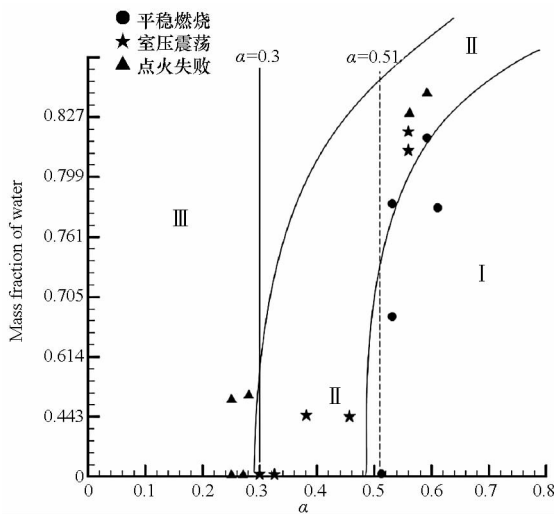


图 13 点火特性曲线

Fig. 13 The curve of ignition characteristic

当含水量一定时,随着余氧系数的增加燃气发生器由不启动状态逐渐过渡到振荡燃烧和稳定燃烧状态;同样当余氧系数一定时,随着含水量的增加燃气发生器由稳定工作状态逐渐过渡到振荡燃烧和不启动状态;随着含水量的增加,成功点火和稳定燃烧所需的余氧系数逐渐增加,当含水量大于某个值后,通过提高余氧系数已不能实现燃气发生器的成功点火和稳定燃烧。当余氧系数小

于某个值时,即使不加水也不能实现燃气发生器的成功点火。

之所以燃气发生器的状态空间会出现上述三个区域是因为水的蒸发会吸收部分热量使得用于煤油蒸发的热量减少,煤油的蒸发量减少,燃气发生器的点火和火焰稳定更加困难。另一方面水用于降低燃气温度使得燃烧室内火焰传播速度减小,反应的完成度减小,从而降低了燃烧效率,这进一步降低燃烧室温度使得燃烧室内火焰难以稳定。提高余氧系数可以提高燃烧室温度和火焰传播速度,从而抵消加水对点火和火焰稳定造成的不利影响。

### 3 结论

(1)对于该型设计的燃气发生器,存在实现点火的余氧系数下限,在不加水的情况下余氧系数下限为 0.51;

(2)水的加入增大了燃气发生器点火的难度,在某一特定余氧系数下,如果加水后燃气发生器无法成功点火,可以采取逐步提高余氧系数的方式来实现点火;

(3)含水量影响燃气发生器的燃烧稳定性,水流量较小时室压会出现室压的低幅(小于 1atm)低频震荡,可以认为燃气发生器仍为稳定燃烧,当水流量增大到一定程度时,室压震荡加剧,燃气发生器无法进行稳定燃烧。

### 参考文献 (References)

[1] 钟战. 燃气发生器点火与燃烧性能研究[D]. 长沙:国防

科技大学,2008.

ZHONG Zhan. Research on the ignition and combustion performance of gas generator [D]. Changsha: National University of Defense Technology,2008. (in Chinese)

[2] 谭建国,潘余,王振国. 冲压发动机燃烧室内低频燃烧不稳定试验[J]. 推进技术,2011,32(2):188-190.

TAN Jianguo, PAN Yu, WANG Zhenguo. Experimental research on low-frequency instability in ramjet combustor[J]. Journal of propulsion technology,2011,32(2):188-190. (in Chinese)

[3] Shanbhogue S J, Husain S, Lieuwen T. Lean blowoff of bluff body stabilized flames [J]. Scaling and dynamics, 2009, 35(1):98-120.

[4] Chaudhuri S, Kostka S, Renfro M W, et al. Blowoff dynamics of bluff body stabilized turbulent premixed flames [J]. Combustion and Flame,2010,157(4):790-802.

[5] Chaudhuri S, Kostka S, Tuttle S G, et al. Blowoff mechanism of two dimensional bluff-body stabilized turbulent premixed flames in a prototypical combustor[J]. Combustion and Flame, 2011, 158(7):1358-1371.

[6] 周伟勇. 低浓度酒精燃气发生器燃烧性能试验与仿真研究[D]. 长沙:国防科技大学,2007.

ZHOU Weiyong. Experiment and numerical simulation research on the combustion performance of low concentration ethanol gas generator [D]. Changsha: National University of Defense Technology,2007. (in Chinese)

[7] 萨顿 G P, 比布拉兹 O. 火箭发动机基础[M]. 北京:科学出版社,2003.

Sutton G P, Biblarz O. Rocket propulsion elements [M]. Beijing:Science Press,2003. (in Chinese)

[8] M S J, B Y, T P. Low-frequency combustion instability mechanisms in a side-dump combustor[J]. Combustion and Flame, 1993, 94(4):363-380.

[9] 苏凌宇. 基于液滴蒸发过程的空气加热器低频不稳定燃烧研究[D]. 长沙:国防科技大学,2009.

SU Lingyu. The study of low-frequency combustion instability in air-heater based on droplet evaporation [D]. Changsha: National University of Defense Technology,2009. (in Chinese)