

过氧化氢分解后燃气喷注压降对发生器 非正常熄火的影响

周伟勇, 谭建国, 田幸福, 周 进

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南, 长沙 410073)

摘 要: 通过试验和数值仿真分析了过氧化氢催化分解后燃气通过同轴喷嘴的喷注压降对过氧化氢/低浓度酒精燃气发生器非正常熄火的影响。研究表明: 燃气喷注压降或喷注速度是影响发生器正常工作的重要因素, 当燃气喷注压降为 1.0MPa 时, 喷注速度过大, 火焰无法在燃烧室内稳定, 造成熄火; 而当燃气喷注压降为 0.2MPa 后, 喷注速度降低, 火焰稳定并维持正常燃烧。

关键词: 喷注压降; 燃气发生器; 过氧化氢; 低浓度酒精; 非正常熄火

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2008) 01-0007-05

Analysis on influence of decomposed gas velocity of hydrogen peroxide on abnormal flameout of gas generator

Zhou Weiyong, Tan Jianguo, Tian Zhangfu, Zhou Jin

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The influence of the velocity of the decomposed hydrogen gas on the abnormal flameout of the hydrogen peroxide-low concentration ethanol gas generator was analyzed by experiment and simulation. The analysis shows that the velocity of the decomposed gas of hydrogen plays a key role on whether the gas generator works normally after ignition. When the injection pressure drop of the decomposed gas is 1.0MPa, the velocity of the decomposed gas is so high that the flame can not stay in the combustion chamber, the gas generator extinguishes abnormally; if the injection pressure drop reduces to 0.2MPa, the velocity of the decomposed gas is lower, the gas generator works normally.

Key words: injection pressure drop; gas generator; hydrogen peroxide; low concentration ethanol; abnormal flameout

收稿日期: 2007-08-27; 修回日期: 2007-10-26。基金项目: 国家“863”基金资助项目。

作者简介: 周伟勇 (1982—), 男, 硕士研究生, 研究领域为宇航科学与推进理论。

1 引言

近年来,随着社会的进步和对环保和人员健康等方面要求的日益提高,具有无毒、高密度、可常温长时贮存等优点的过氧化氢作为一种绿色推进剂再次引起广泛关注^[1]。国防科技大学对采用过氧化氢催化分解/低浓度酒精补燃方案的燃气发生器开展了研究。该燃气发生器实现了大范围设定温度下的高效稳定燃烧,燃烧室不需要壁面内冷却,具有尺寸小,重量轻等优点。

传统火箭发动机理论认为:对于气液喷嘴,气体喷注压降越大,液体燃料雾化和混合效果越好,发动机燃烧越稳定。90%过氧化氢/低浓度酒精燃气发生器作为一种新型燃气发生装置,引入了大量的水作为调温介质,研制过程中出现了火焰不能维持,点火后容易熄火的现象。

本文通过试验和数值仿真研究表明:与传统的液体火箭发动机理论不同,过氧化氢催化分解后的燃气喷气速度过大,点火完成后火焰被高速气流吹出燃烧室,造成燃气发生器的非正常熄火。

2 数学模型

2.1 控制方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (E - E_v)}{\partial x} + \frac{\partial (F - F_v)}{\partial y} + \frac{\partial (G - G_v)}{\partial z} = H \quad (1)$$

其中, $Q = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho e, \rho Y_i)^T$; E, F, G 是对流项通量; E_v, F_v, G_v 是扩散项通量, H 是源项通量。

粒子的运动方程为:

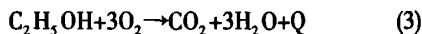
$$\frac{dU_p}{dt} = F_D (U - U_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (2)$$

式中, $F_D (U - U_p)$ 是单位质量的粒子受到的阻力项; $g(\rho_p - \rho)/\rho_p$ 是粒子受到的浮力项; F_x 是其它附加力项; U_p 是粒子速度; ρ_p 是粒子密度; d_p 是粒子直径; U 是连续相速度; ρ 是连续相密度。

湍流计算采用 $k-\varepsilon$ 模型。

湍流两相流采用拉格朗日随机轨道模型。

酒精的燃烧采用 eddy-dissipation 模型控制的单步总包反应模型, 方程式为:



2.2 多组分蒸发和喷雾模型

多组分液滴质量定义为各组分质量之和:

$$m = \sum_i m_i \quad (4)$$

液滴的密度 ρ_p 定义为:

$$\rho_p = \left(\sum_i \frac{m_i}{m \rho_i} \right)^{-1} \quad (5)$$

液滴能量方程和质量方程分别为:

$$m_p c_p \left(\frac{dT_p}{dt} \right) = A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_R^4) + h A_p (T_\infty - T_p) + \sum_i \frac{dm_i}{dt} (h_{i,p} - h_{i,\infty}) \quad (6)$$

$$\left(\frac{dm_i}{dt} \right) = M_{\omega,i} k_{c,i} (C_{i,\infty} - C_{i,\infty}) \quad (7)$$

式中, m_p 是液滴质量; c_p 是液滴比热; A_p 是液滴的表面积; T_∞ 是连续相温度; h 是对流传热系数; ε_p 是液滴散射系数; σ 是 Stefan-Boltzmann 常数; θ_R 是辐射温度; $M_{\omega,i}$ 是组分 i 的分子量; $k_{c,i}$ 是组分 i 的质量传递系数; $C_{i,\infty}$ 是连续相中组分 i 的浓度; 液滴表面组分 i 的蒸汽浓度 $C_{i,s}$ 和其摩尔质量分数 x_i 的关系表示为:

$$C_{i,s} = \frac{p_i}{RT} = \frac{X_i p}{RT} \quad (8)$$

式中, p 是液滴表面压强; p_i 是第 i 组分的分压。液滴速度和大小采用 Rosin-Rammler 分布模型:

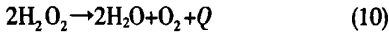
$$Y_d = \exp \left[- \left(\frac{d}{\bar{d}} \right)^n \right] \quad (9)$$

式中, Y_d 是所有直径大于 d 的液滴的质量分数; \bar{d} 是液滴的平均直径; n 是扩展参数。按照试验测量的数据, 设计仿真参数为 $\bar{d} = 40 \mu\text{m}$, $n = 2.1$, $d_{\min} = 1.9 \mu\text{m}$, $d_{\max} = 7.9 \mu\text{m}$ 。

2.3 过氧化氢催化分解模型

试验中, 过氧化氢采用催化床催化分解方式, 由于催化过程复杂, 很难用数值计算模拟催

化过程。因此数值仿真中, 按照过氧化氢完全催化分解后的产物组分和温度给定入口边界条件。



3 试验系统简介

燃气发生器试验系统主要由试车台架、推进剂供应系统、吹除气系统、试验控制系统、数据采集及处理系统、电视监视系统和点火系统等分系统组成。燃气发生器试车台架为固定结构, 试验时燃气发生器通过金属背板固定在试车台架上, 燃气发生器与水平成一定角度, 使燃烧室中的液体推进剂在重力作用下流出燃烧室, 防止燃烧室中聚集的推进剂在点火过程中爆轰。

试验时, 为了更好地实现点火, 点火完毕, 关闭点火器酒精阀门后, 暂不关闭氧气阀门, 继续通入过量的氧气后, 再关闭点火器氧气阀门。

4 燃气喷注压降对燃气发生器熄火性能的影响

试验中, 经常出现点火器工作时燃气发生器正常工作而点火器关闭后燃烧室火焰稳定一段时间后熄火的情况。通过分析认为可能是过氧化氢催化分解后气流速度过大造成火焰无法稳定。

设计节流面积不同的喷嘴 (实现过氧化氢催化分解后喷注压降不同情况下具有相同的流量), 研究过氧化氢催化分解后的气体速度对熄火性能的影响。试验结果表明: 过氧化氢催化分解后喷注压降为 1.0MPa 时, 过氧化氢分解气体速度过大, 燃气发生器点火后非正常熄火, 如图 1 所示。由图 1 可以看出: 在 6.4s~6.7s, 点火器压强急剧升高, 燃烧室压强上升相对缓慢, 点火器压强高于燃烧室压强, 说明点火器工作正常, 燃烧室逐渐被点燃; 6.7s 时刻, 点火器压强急剧下降, 并稍低于燃烧室压强后稳定, 说明此时点火器已经关闭了; 6.7s~6.9s, 燃烧室压强已经高于点火器压强, 说明燃烧室已经被点燃; 6.9s 以后, 燃烧室压强持续约 0.3 后便直线下降, 说明

燃烧室点燃后, 火焰持续约 0.3s 便非正常熄火。

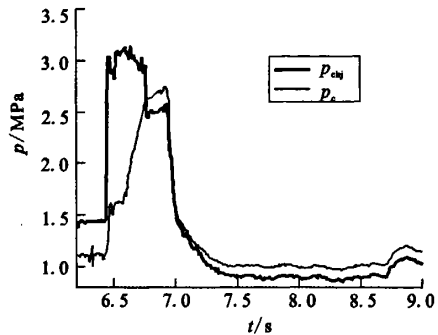


图 1 着火后非正常熄火

Fig.1 Abnormal flameout after ignition

其它参数不变, 将过氧化氢催化分解后燃气的喷注压降低至 0.2MPa, 降低过氧化氢分解后气体速度, 得到的试验结果如图 2 所示。由图 2 可以看出: 将过氧化氢分解后气体的喷注压降低, 从而降低分解后的气体速度, 点火完成后, 燃烧室压强波动较小, 相对平稳; 说明燃烧室燃烧状态较好, 燃气发生器正常工作。点火器关闭后, 6.7s 附近燃烧室室压有个较高的压力峰值, 这是由于点火器的酒精阀关闭后, 为了更高地实现燃烧室的点火, 向燃烧室通入了过量氧气, 因此产生了相对较高的室压; 之后, 氧气阀关闭, 燃烧室室压稳定。图 1 之所以没有这个压力峰是因为过量的氧气阀门关闭后, 燃烧室便非正常熄火。

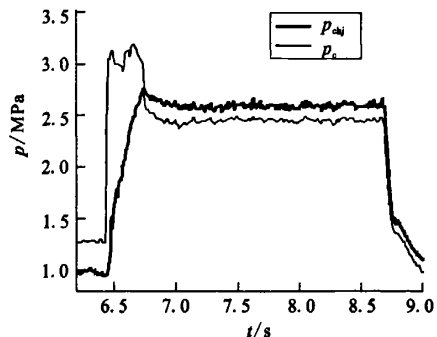


图 2 着火后正常工作

Fig.2 Work normally after ignition

两种状态下试验参数的对比如表 1 所示。从表 1 可以看出, 在过氧化氢流量一定 (213g/s),

余氧系数一定(0.61)的情况下,过氧化氢催化分解后的气体速度对燃气发生器能够正常工作起着至关重要的作用。燃气喷注压降过大,提高了过氧化氢分解气体速度,使得燃烧室中气体流速增加,当火焰传播速度低于气体流动速度时,火焰无法在燃烧室中保持稳定,导致燃气发生器非正常熄火。

表1 过氧化氢喷注压降对熄火的影响

Tab.1 Influence of injection pressure drop of hydrogen peroxide on flameout

过氧化氢浓度	90%	90%
过氧化氢流量/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$	213	213
过氧化氢喷注压降/MPa	0.2	1.0
燃烧室压力/MPa	2.9	—
燃烧室温度/K	1100	—
试验结果	正常工作	着火后熄火
燃烧效率	0.91	—

5 喷注压降对熄火影响的数值仿真分析

通过数值仿真获得燃气发生器着火后压力变化,并与试验得到的数据相比较(见图3和图4)。

燃气喷注压降为1.0MPa时非正常熄火的试验和仿真压强数据如图3所示。由图3可以看出,非正常熄火过程的仿真与试验的压强变化曲线吻合较好,说明仿真获得的数据比较准确,可以用来分析试验参数。

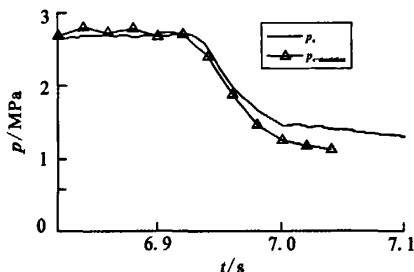


图3 喷注压降为1.0MPa时压强比较

Fig.3 Comparison between pressures when pressure drop is 1.0MPa

此时,其他参数不变,如果将过氧化氢分解后燃气喷注压降变为0.2MPa,发动机正常工作,试验和仿真的压强数据如图4所示。可以看出,仿真的压强变化和试验值基本吻合,燃烧室压强基本稳定在2.6MPa附近,说明点火后关闭过量氧气,燃气发生器依旧正常稳定工作。

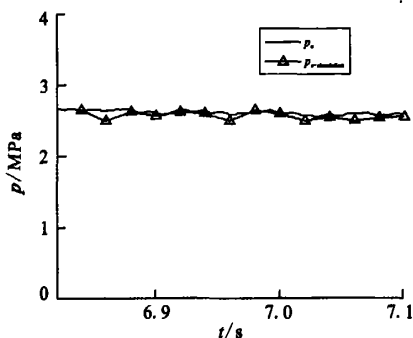


图4 喷注压降为0.2MPa时压强比较

Fig.4 Comparison between pressures when pressure drop is 0.2MPa

通过数值仿真研究非正常熄火过程中燃烧室内部温度场的变化情况见图5~图9所示。初始 $t=0.0\text{s}$ 时,模拟试验中通入过量氧气使得燃气发生器燃烧稳定,获得内部初始温度场,如图5所示。可以看出,内部燃烧基本稳定,燃烧室最高温度达1600K,平均温度大约在1100K左右。由于头部通入过量氧气,因此前段温度较高,火焰区主要集中在该区域。

关闭过量氧气输入,获得的燃烧室内部温度场随时间的变化见图5~图9所示。由图6可看出:氧气关闭0.02s后,高温区已经无法在燃烧室内稳定,从燃烧室前半段被吹到燃烧室后半段,最高温度也由1600K降低到1100K。这是因为过氧化氢喷注压降为1.0MPa时,过氧化氢分解后气体速度过大,虽然燃烧室已经被点燃,燃烧室也有了较高的温度场,但是由于低浓度酒精和过氧化氢分解产物中都含有大量的水,使得氧气与酒精反应速率较低,故而燃烧室最高燃烧温度下降;同时,水的掺入降低了燃烧速率,酒精与氧气来不及充分混合和反应,高温区就被高速气流吹走。在燃烧室前段,平均温度大约750K

左右,局部出现低温区,温度降低到400K左右。这是由于此时虽然高温区被吹走,但是前段温度依旧相对较高,低浓度酒精液滴蒸发速率相对较大,不断的蒸发吸热,使得局部温度偏低。

从图7~图9可以看出:随着时间的推移,最高温度逐渐下降,高温区被吹出燃烧室,燃烧室温度场分布最终趋向一致,平均温度降低到400K左右。这是由于高温区被吹走以后,燃烧室温度降低,酒精与氧气几乎不再反应,没有反应热放出;此时低浓度酒精的蒸发速率也逐步降低,其对温度场的影响减小,加上由于高速气流的混合作用,燃烧室温度分布逐步趋向均匀。燃烧室已经完全熄火。

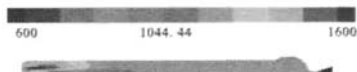


图5 $t=0.0s$ 时燃烧室的温度图像

Fig.5 Temperature distribution in the combustion chamber when $t=0.0s$



图6 $t=0.02s$ 时燃烧室的温度图像

Fig.6 Temperature distribution in the combustion chamber when $t=0.02s$

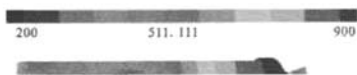


图7 $t=0.04s$ 时燃烧室的温度图像

Fig.7 Temperature distribution in the combustion chamber when $t=0.04s$

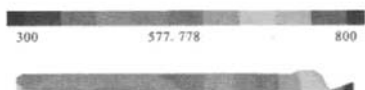


图8 $t=0.06s$ 时燃烧室的温度图像

Fig.8 Temperature distribution in the combustion chamber when $t=0.06s$

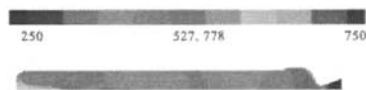


图9 $t=0.08s$ 时燃烧室的温度图像

Fig.9 Temperature distribution in the combustion chamber when $t=0.08s$

6 结论

通过开展过氧化氢催化分解后的气体速度对过氧化氢-低浓度酒精燃气发生器燃烧性能的试验和仿真研究,得到如下主要结论:

(1) 其他参数不变,如果过氧化氢催化分解后燃气喷注压降为1.0MPa,速度过大,燃气发生器着火后非正常熄火;如果将催化分解后燃气喷注压降降低为0.2MPa,燃气速度降低,燃气发生器着火后正常工作;说明过氧化氢分解后的燃气喷注压降对过氧化氢-低浓度酒精燃气发生器能否正常工作起着关键作用;

(2) 通过数值仿真分析了过氧化氢催化分解后燃气喷注压降为1.0MPa时,燃气发生器非正常熄火过程中燃烧室内温度场随着时间的变化。认为非正常熄火的原因是:过氧化氢分解后燃气喷注压降过大使气流速度较大,火焰被高速气流吹出燃烧室,燃烧室高温区将无法稳定,造成非正常熄火。

参考文献:

- [1] Funk J E, Heister S D, Humble R, et al. Development Testing of Non-toxic, Storable Hypergolic Liquid Propellants [R]. AIAA 1999-2878.
- [2] Humble R. Bipropellant Engine Development Using Hydrogen Peroxide and Hypergolic Fuel[R]. AIAA 2000-3554.
- [3] Ventura M, Yuan S. Commercial Production and Use of Hydrogen Peroxide[R]. AIAA 2000-3556.
- [4] 黄兵, 张楠. 液体火箭发动机初始雾化液滴分布预测[J]. 火箭推进 2007, 33(2):31-39.

(编辑:王建喜)