

酒精浓度对燃烧性能影响研究

周伟勇, 田章福, 谭建国, 周 进
(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南, 长沙 410073)

摘 要: 多组分燃料蒸发燃烧特性是当前国内外研究的热点, 综合采用开窗试验和数值仿真方法, 得到了不同酒精浓度 (50%、65%和 85%) 燃烧的火焰结构, 分析了酒精浓度对燃烧效率的影响。研究表明: 仿真结果和试验结果符合得较好; 酒精浓度越高, 液滴在燃烧室蒸发越快, 燃烧效率越高。

关键词: 多组分; 酒精; 蒸发; 燃烧性能; 开窗试验

中图分类号: V434.1

文献标识码: A

文章编号: (2007) 06-0007-05

Effect of different concentrations of ethanol on combustion performance

Zhou Weiyong, Tian Zhangfu, Tan Jianguo, Zhou Jin

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

Abstract: The study on evaporation and combustion performance of multicomponent fuel becomes prosperous recently in the world. The flame configuration and combustion efficiency in the conditions of different concentrations (50%, 65% and 85%) of ethanol are obtained through fenestration experiment and numerical simulation. Simulation results are in accordance with experiment results: the higher the concentration, and the quicker the evaporation, then the higher the combust efficiency.

Key words: multicomponent; ethanol; evaporation; combustion efficiency; fenestration experiment

1 引言

随着石油工业和汽油机、柴油机的发展, 多

组分蒸发燃烧已成为当前国内外研究的难点和热点问题^[1,2]。Law^[3]对两组分液滴蒸发速率与相对浓度的关系开展了研究, Randolph^[4]通过试验研究了液滴内部质量扩散过程对蒸发燃烧过程的影响。

收稿日期: 2007-06-05; 修回日期: 2007-07-27。基金支持项目。

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

多组分燃料在燃烧室内的燃烧过程比较复杂,不同组分挥发性的差异对液滴蒸发燃烧过程有较大影响。掺水酒精属于多组分燃料范畴,但由于组分较少,便于分析研究。

考虑了酒精和水蒸发特性的差异,通过开窗实验和数值仿真两种方法对不同浓度(全文均为质量百分数)酒精的蒸发燃烧特性进行了研究,着重分析了酒精浓度对燃烧性能的影响。

2 控制方程与数值模型

2.1 控制方程

气相控制方程为:

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

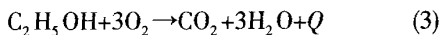
式中, $Q = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho e, \rho Y_i)^T$; E 、 F 、 G 为对流项通量; E_v 、 F_v 、 G_v 为扩散项通量; H 为源项通量。

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, $F_D (U - U_p)$ 为单位质量的粒子受到的阻力项; $\frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p}$ 为粒子受到的浮力项; F_x 为其他附加力项; U_p 为粒子速度; ρ_p 为粒子密度; U 为连续相速度; ρ 为连续相密度。

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:

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

液滴能量方程和质量方程分别为:

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

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

式中, m_p 为液滴质量; c_p 为液滴比热; A_p 为液滴表面积; T_∞ 为连续相温度; h 为对流传热系数; ε_p 为液滴散射系数; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; θ_R 为辐射温度; $M_{\omega,i}$ 为组分 i 的分子量; $k_{c,i}$ 为组分 i 的质量传递系数; $C_{i,\infty}$ 为连续相中组分 i 浓度; 液滴表面组分 i 的蒸汽浓度 $C_{i,s}$ 和其摩尔浓度 X_i 的关系表示为:

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

式中, $p_{sat,i}$ 是第 i 组分的饱和蒸汽压。

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 为所有直径大于 D 的液滴的浓度; \bar{D} 为液滴的平均直径; n 为扩展参数。按照试验中测量的数据, 设计仿真参数为 $\bar{D} = 40 \mu\text{m}$, $n = 2.1$, $D_{\min} = 1.9 \mu\text{m}$, $D_{\max} = 7.9 \mu\text{m}$ 。

3 试验系统简介

开窗试验系统主要包括管路供应系统、测量控制系统及试验台。管路供应系统主要包括氧气、酒精及氮气供应系统。试验中测量了喷注器集气腔压力、集液腔压力、燃烧室压力及燃烧室温度, 并用高速摄影记录了火焰的发展过程。高速摄影的拍摄位置如图 1 所示。

开窗实验系统主要包括同轴直流式喷嘴喷注器、开窗燃烧室。燃烧室两面开窗, 窗口材料采用耐高温熔融石英玻璃, 窗口大小为 $86\text{mm} \times 86\text{mm}$, 窗口设计有气膜进行冷却, 防止试验过程中玻璃内外表面出现较高的温度差。开窗燃烧室的结构见图 2 所示。

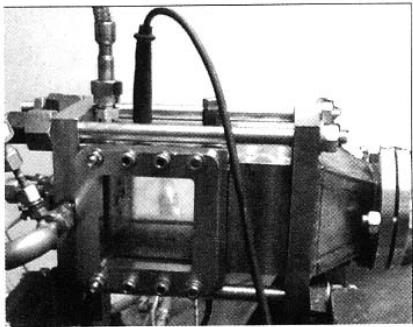
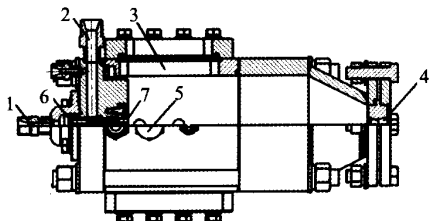


图 1 开窗燃烧室
Fig.1 Fenestrated combustion chamber



1-氧入口; 2-酒精入口; 3-开窗玻璃; 4-燃烧室喉部;
5-火花塞位置; 6 为喷嘴位置; 7-喷注面位置
图 2 开窗燃烧室结构示意图
Fig.2 Configuration of the fenestrated combustion chamber

4 燃烧流场分析

为了考察不同浓度酒精的燃烧流场特性, 采用低浓度、中浓度及高浓度酒精进行开窗试验, 获得了火焰结构、燃烧性能等参数, 并与仿真结果进行了对比分析。

4.1 试验和仿真的火焰结构比较

稳态燃烧时, 射流火焰基本为锥形火焰; 锥形火焰起始于喷嘴出口附近, 包裹在喷雾锥的外侧, 亮度很弱, 如图 3 (a) 所示。稳定燃烧时, 认为燃烧反应主要集中在火焰锥附近, 火焰锥以外的区域仅有较弱的燃烧反应。取轴截面为投影面, 通过数值仿真获得温度在投影面上的分布, 如图 3 (b) 所示, 用高温区结构与火焰结构进行比较分析。

可以看到: 仿真和试验的火焰锥形状吻合较好, 锥角大小都在 15°左右, 充分燃烧后的膨胀

效果也近乎一致, 可以认为仿真结果能够较为真实的反映实际燃烧室内的流场和火焰结构。在火焰前端, 由于酒精蒸发较少, 反应较慢, 火焰锥前端的喷射角与冷试喷雾角大体相等; 酒精液滴在高速氧气流的作用下与氧气混合, 为进一步燃烧做准备。在火焰中后部, 由于剧烈的燃烧反应产生了大量的高温气体, 高温产物在湍流作用下膨胀混合, 引起火焰锥膨胀, 这样有利于氧化剂与燃料的混合, 提高燃烧效率。整个燃烧反应都集中在中心火焰区内, 这样虽然不利于酒精和氧气的充分混合, 降低了燃烧效率, 但是把高温区限制在火焰锥内部, 有利于降低对材料耐热性的限制, 同时提高了调温介质的蒸发速率, 使燃烧室温度降低, 省去了冷却措施, 简化了试验系统结构。

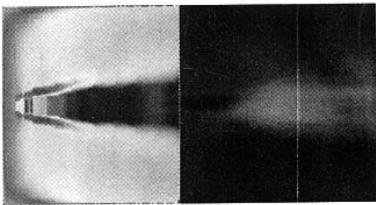


图 3 试验火焰结构(a)和仿真高温区(b)
Fig.3 Flame configuration obtained from experiment (a) and simulation (b)

4.2 多组分蒸发对燃烧性能的影响

为了研究酒精浓度对燃烧性能的影响, 对不同浓度的酒精 (50%、65%和 85%) 进行开窗试验, 获得了燃烧室的火焰结构, 如图 4 所示。可以看出:

(1) 酒精浓度越大, 着火点越靠近喷嘴, 火焰锥角也越大。这是因为浓度越大, 蒸发就越快, 与氧气混合也就越快, 也越有利于着火, 因此着火点就越靠前, 化学反应也越剧烈, 锥角也就越大。

(2) 酒精浓度越大, 火焰亮度就越大; 酒精浓度越大, 燃烧时局部反应就越剧烈, 辐射的光线强度越大, 因此火焰的亮度也就越大。

酒精浓度过低, 液滴可能没有完全蒸发就跑出燃烧室; 酒精浓度过大, 燃烧过于强烈, 会引

起较强湍流结构,使得局部温度过高,可能烧蚀燃烧室壁面或者喷注面板。试验中,随着酒精浓度的升高,火焰一直被控制在火焰锥角之内,这样就不会由于温度过高而引起材料的烧蚀。



图 4 火焰结构随浓度 (50%、65% 和 85%) 的变化

Fig.4 Flame configuration varied with concentration
(50%, 65% and 85%)

为了考察不同浓度酒精液滴在燃烧室的特征,对所有喷雾液滴浓度和直径沿轴向的变化取平均值,获得液滴浓度沿轴向变化的平均值,以及不同浓度液滴在燃烧室分布变化见图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可以看出:

(1) 酒精的浓度沿着燃烧室轴向逐渐下降。相同温度下,酒精的饱和蒸汽压大于水的饱和蒸汽压,因此在蒸发过程中,酒精的蒸发速率大于水的蒸发速率,导致液滴中酒精的浓度沿着轴向逐渐降低。酒精从液滴中先蒸发出来,和氧气混合,有利于燃烧室的点火和燃烧,提高燃烧效率;

(2) 初始酒精浓度越大,浓度沿着轴向下就更快。初始酒精浓度越大,酒精蒸发速率就越大。高浓度的酒精液滴在离开喷嘴很短的距离后,就会与氧气发生燃烧反应,放出大量的热量,使得温度升高,高温又会加大酒精的蒸发速率,进一步加快反应。因此初始浓度越高,酒精浓度沿着轴向的下降反而越快;

(3) 平均直径为 $40\mu\text{m}$, 浓度为 50%、65% 和 85% 的酒精液滴完全蒸发时沿轴向的距离越来越短,如图 6 所示。说明酒精浓度越大,液滴的平均蒸发速率就越大;酒精蒸发较快,有利用与氧气的混合反应,但是局部可能达到化学当量比,引起较强的湍流结构,不利于温度的控制;液滴完全蒸发,第三组元调温介质水的蒸发会使得燃

烧室的平均温度下降。实验中测量得到的燃烧室主流温度都在 1000K 到 1500K 之间,壁面温度在材料的耐热范围之内,但水的蒸发可能会影响酒精与氧气的混合,降低燃烧室的燃烧效率。

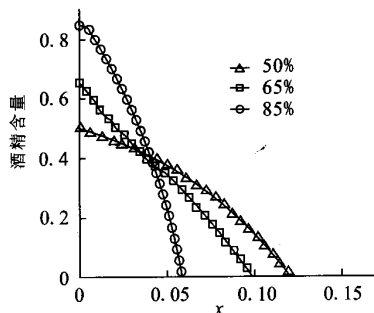


图 5 液滴浓度沿着 x 轴向的变化

Fig.5 Concentration of droplets varied with x -axis

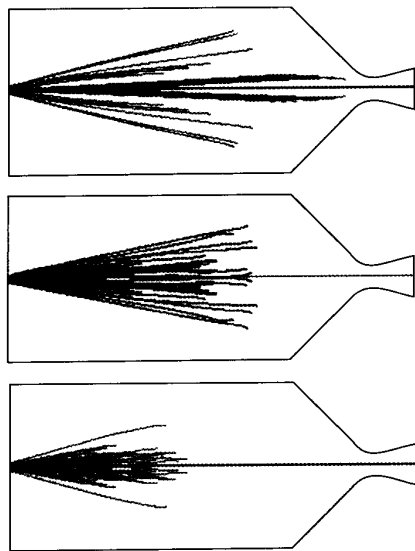


图 6 不同浓度液滴在燃烧室分布图

(从上至下依次是 50%、65% 和 85%)

Fig.6 Distribution of different concentration of droplets
in the combustion chamber

(From top to bottom is 50%、65% and 85%)

4.3 不同浓度酒精燃烧效率的试验和仿真

燃烧效率通常采用特征速度的实际值与理论值之比:

$$\eta_c = C_{\text{exp}}^* / C_{\text{th}}^* \quad (10)$$

式中, C_{exp}^* 为试验得到的实际特征速度; C_{th}^* 为相

同工况参数下的理论特征速度。

按实验得到的喷雾流量、氧流量和入口压降等参数给定仿真的边界条件;按马尔文测粒仪测量的距离喷嘴 100mm 处的液滴大小和速度,反推给出仿真的喷雾入口边界条件,这样可以认为仿真的喷雾混合效果与试验值大体相同。通过试验和仿真获得不同酒精浓度下的燃烧效率比较,如表 1 所示。可以看出,实验实现了不同浓度酒精的高效稳定燃烧(燃烧效率在 94%以上)。仿真条件和试验条件相同时,仿真得到的燃烧效率与试验值相差不大(1%以内),仿真得到的温度与理论燃烧温度相差也在 120K 以内,认为仿真数据能够较好地反映试验结果,可用于分析试验参数。试验中,采用浓度为 85%的酒精时,燃烧效率仅为 94.2%。虽然酒精浓度较高,但由于此时余氧系数仅为 0.76,因此燃烧效率反而降低。

表 1 不同浓度酒精的燃烧效率
Tab.1 Combustion efficiency of different concentrations

酒精 浓度 %	酒精 流量 g·s ⁻¹	理论 压强 MPa	测量 压强 MPa	仿真 压强 MPa	余氧 系数	实验 效率 %	仿真 效率 %
50	14.3	0.640	0.605	0.606	0.96	94.5	94.7
65	20.6	0.744	0.735	0.730	1.13	98.8	98.1
85	19.3	0.765	0.721	0.715	0.76	94.2	93.4

在试验中,若采用较高的余氧系数,燃烧室温度可能过高,引起燃烧室的烧蚀。因此通过仿真对相同余氧系数(1.13)下不同浓度的酒精的燃烧效率进行分析,如表 2 所示。

表 2 相同余氧系数下的燃烧效率
Tab.2 Combustion efficiency with the same oxygen coefficient

余氧 系数	酒精 浓度 %	酒精 流量 g·s ⁻¹	理论 压强 MPa	仿真 压强 MPa	仿真 效率 %
1.13	50	20.3	0.679	0.644	94.8
1.13	65	20.6	0.744	0.730	98.1
1.13	85	17.4	0.940	0.939	99.9

从表 2 可以看出,相同喷雾条件和余氧系数相同下,燃烧效率随着浓度的增大而升高(从 91%、98.1%到 99.9%),燃烧室温度也依次升高。因此认为酒精浓度越高,燃烧室燃烧反应就越剧烈,这有利于酒精和氧气的混合反应,提高燃烧效率;但酒精浓度较高会使得燃烧室温度较高,引起材料的烧蚀。在实际应用中,应该综合考虑燃烧效率和温度等因素,以获取最佳的燃烧性能。

5 结论

通过试验和数值仿真对不同浓度酒精燃烧性能开展了研究,得到的主要结论有:

- (1) 利用低浓度酒精的多组分特性能够实现稳定高效燃烧,燃烧高温区集中在燃烧室轴线附近,降低了燃烧温度,这样就省略了冷却措施,简化了试验设备。
- (2) 通过数值仿真得到的燃烧性能参数与试验结果相差不大,仿真数据能够较为真实地反映试验的火焰结构,燃烧效率等参数。
- (3) 在相同喷雾条件和余氧系数(1.13)下,燃烧效率随着酒精浓度的增大而升高。

参考文献:

[1] Aggarwal S K, Mongia H. Multicomponent and High-pressure Effects on Droplet Vaporization[A]. Transactions of the ASME -J. of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002.

[2] Zhao Y, Qiu H H. Measurements of Multicomponent Microdroplet Evaporation by Using Rainbow Refractometer and PDA[J]. Experiments in Fluids, 2006, 40(1): 60-69.

[3] Law C K. Multicomponent Droplet Combustion with Rapid Internal Mixing[M]. Combustion and Flame, 1976.

[4] Randolph A L, Makino A, Law C K. Liquid-phase Diffusional Resistance in Multicomponent Droplet Gasification [A]. Twenty-First Symposium (International) on Combustion, 1988.

(编辑: 马 杰)