

压力振荡环境下液滴蒸发动态响应特性研究

尹 婷, 吴高杨, 聂万胜

(装备学院, 北京 101416)

摘 要: 设计了压力振荡环境液滴蒸发实验系统, 开展了压力振荡环境下液滴蒸发动态响应特性实验研究, 分析了压力振荡对液滴蒸发过程的影响, 建立了压力振荡环境非稳态蒸发模型, 并基于该模型考察了振荡频率、振幅、燃烧室平均压力及温度对蒸发特性的影响规律。实验表明, 压力振荡环境对液滴蒸发过程具有明显的促进作用, 增加了液滴蒸发速率, 且蒸发速率波形相位滞后压力振荡波形接近 180° 。研究发现, 增加振荡频率会加剧蒸发速率的振荡, 但对蒸发速率平均值并无影响, 蒸发过程中液滴直径变化趋势并无明显区别; 燃烧室的高温环境在增加液滴蒸发速率、促进蒸发的同时, 也会增强压力振荡对蒸发过程的影响效应, 加剧液滴蒸发速率振荡; 对于燃烧室平均压力和振幅, 要将振幅占燃烧室平均压力的百分比作为影响因素之一来进行考察, 百分比越大, 液滴蒸发速率及表面温度振荡越剧烈。

关键词: 压力振荡; 液滴; 蒸发; 影响因素

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 04-0019-10

Study on dynamic response characteristics of droplet evaporation in pressure oscillation environment

YIN Ting, WU Gaoyang, NIE Wansheng

(Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: An integrated experiment system used for single droplet evaporation in pressure oscillation environment was established. The experiments on the dynamic response characteristics of droplet evaporation in pressure oscillation environment were carried out and the effects of pressure oscillation on droplet evaporation process were analyzed. The unsteady evaporation model in pressure oscillation environment was established. On the basis of the model, influence rules of oscillation frequency, amplitude, chamber average pressure and temperature on evaporation characteristics were studied. The experimental results show that pressure oscillation environment can promote droplet evaporation, improve the evaporation rate of droplet, and the evaporation rate waveform phase lag pressure oscillation waveform is close to 180° . It is found in the study that the increase of the oscillation frequency can intensify the oscillation of evaporation rate, but has no effect on the average

收稿日期: 2015-01-12; 修回日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51206185)

作者简介: 尹婷 (1990—), 女, 硕士研究生, 研究领域为液体火箭发动机

evaporation rate, and also the variation tendency of droplet diameter during evaporation process has no distinct difference. While the high temperature environment increases the droplet evaporation rate, the influential effect of pressure oscillation on evaporation process is enhanced. As for chamber average pressure and amplitude, the percentage of the amplitude of chamber average pressure should be regarded as one of the influence factors. The percentage is greater, the oscillation of droplet evaporation rate and surface temperature is more severe.

Keywords: pressure oscillation; droplet; evaporation; influence factor

0 引言

在液体火箭发动机启动及稳态工作过程中,时常伴随有不稳定燃烧现象发生,表现为燃烧室内压力的周期性振荡^[1]。不稳定燃烧不仅影响推进剂燃烧过程,而且激发机理复杂,燃烧过程中的雾化、蒸发、燃烧各子环节与燃烧室声学结构的耦合都会引起不稳定燃烧^[2]。因而,研究不稳定燃烧问题具有极大挑战性,探索液滴蒸发燃烧过程对压力振荡的动态响应特性及其规律,是揭示不稳定燃烧激励机理、解决液体火箭发动机不稳定燃烧问题的前提。有研究指出,液滴蒸发过程对压力振荡的动态响应特性极有可能是导致不稳定燃烧的重要原因^[3]。因此,解决不稳定燃烧问题、探索其激发机理,首先要从蒸发过程开始研究。

国外率先开展了压力振荡环境下液滴蒸发特性规律的研究,在理论分析与数值仿真方面^[4-6],主要考查了压力振荡引发的液滴蒸发速率,液滴表面温度和物性参数的变化;而在实验研究方面^[7-9],主要采用扬声器和麦克风的相互配合在密闭声波导管内形成微小的声波振荡,从而研究振荡环境下液滴蒸发过程,对实验设备和技术要求较高。相较于国外数十年的研究,国内对压力振荡环境下液滴蒸发特性的研究则显得相对落后。尤其在实验研究方面,由于技术水平和实验条件的限制,相关研究还处于起步阶段。

本文针对偏二甲肼液滴,设计了压力振荡环境实验系统,开展了不同振荡环境下液滴蒸发动态响应特性研究,建立了压力振荡环境液滴非稳态蒸发模型,考察了振荡频率、幅值、燃烧室压

力及温度等因素对液滴蒸发特性的影响规律。

1 实验系统设计

压力振荡环境液滴蒸发实验系统的工作原理是高压气源通过旋转换气阀产生振荡气流,不断向燃烧室内进行充、放气过程,从而持续形成压力振荡环境,通过高速摄像机记录该环境下液滴蒸发过程,分析其特性规律。该实验系统由压力振荡产生子系统、燃烧室子系统、高速摄影子系统、燃料液滴生成子系统及数据采集控制子系统组成。

其中,压力振荡产生子系统是实验成功的关键。它包含了气瓶、供气室、交流伺服电机及其驱动器、联轴器、旋转换气阀以及稳流舱。接通电源后,交流伺服驱动器驱动电机旋转,带动了与电机同轴的旋转换气阀转动。换气阀阀盘上等间距的分布了 26 个通气孔,经过供气室过滤减压作用的气源通入旋转换气阀后,形成以一定频率间歇性排出的气流,经过稳流舱的稳流作用后,通入燃烧室形成压力振荡环境。

燃料液滴生成子系统用于偏二甲肼液滴的生成,由燃料贮箱、喷注器、悬挂针头、电磁阀和流量计组成。实验时通过 N_2 提供挤压动力,将燃料贮箱内的燃料挤出,经喷注器在悬挂针头的末端形成液滴,通过流量计确定燃料的流量,通过计算机控制电磁阀的通断及时间间隔,从而控制生成液滴的大小和频率。

燃烧室子系统是一个由 10 mm 厚的不锈钢板焊接而成的长方体密闭容器,其内部体积为 150 mm×150 mm×280 mm,分为顶盖、身部和底盖。顶盖上留有通气孔及测压孔,与单液滴生成

子系统的喷注器直接相连; 身部侧壁上留有观察窗, 方便进行观察和拍摄; 底部装有加热器, 能够将燃烧室迅速加热至实验所需温度。

高速摄影子系统用于拍摄记录液滴蒸发过程, 方便实验数据后期处理, 通过计算机控制高速摄像机的拍摄范围和频率。

数据采集控制子系统由温度、压力传感器和控制线路等组成, 通过传感器的测量, 可以实时测量并记录燃烧室内振荡压力及温度的变化。同时, 操作计算机从而控制各管路阀门开关与电磁阀的通断, 保证实验时各子系统间的紧密衔接与同步。

2 非稳态蒸发模型

2.1 控制方程

对于压力振荡环境下液滴蒸发过程, 由于压力振荡使得物性参数始终处于非稳态变化中, 因而需要建立适用于压力振荡环境的非稳态蒸发模型。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho_g v_g)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ_g 和 v_g 分别为气体密度和速度; 下标 g 表示气相。

能量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho_g C_{pg} T_g)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho_g v_g C_{pg} T_g)}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k_g \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) \quad (2)$$

式中: C_{pg} 为气相比热容; k_g 为导热系数。

组分守恒方程

$$\frac{\partial (\rho_g Y_g)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho_g v_g Y_g)}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \rho_g D_g \frac{\partial Y_g}{\partial r} \right) + W \quad (3)$$

式中: D 为扩散系数; Y 为燃料蒸气质量分数; W 为组分源项。

式 (1) ~ 式 (3) 即为气相流动控制方程。液相控制方程具有类似的表达形式, 连续性方程

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho_l v_l)}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho_l C_{pl} T_l)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho_l v_l C_{pl} T_l)}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k_l \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) + Q_T \quad (5)$$

式中: 下标 l 表示液相; Q_T 表示能量源项, 无化学反应时该项为零。

组分守恒方程

$$\frac{\partial (\rho_l Y_l)}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial (r^2 \rho_l v_l Y_l)}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \rho_l D_l \frac{\partial Y_l}{\partial r} \right) \quad (6)$$

气体满足理想状态方程

$$pV = nRT \quad (7)$$

2.2 边界条件

各区域边界条件如下:

气相远场处

$$T(r \rightarrow \infty) = T_\infty \quad (8)$$

$$Y(r \rightarrow \infty) = 0 \quad (9)$$

液滴中心处的边界条件为

$$\frac{\partial T}{\partial r} (r=0) = 0 \quad (10)$$

气液界面处于平衡状态, 满足温度分布的连续性, 即

$$T_l (r=0^-) = T_g (r=0^+) = T_s \quad (11)$$

假设气体为理想气体, 则有,

$$P_{g,s} = P_{l,s} \quad (12)$$

气液界面处满足能量守恒, 则

$$k_{g,s} \left. \frac{\partial T_g}{\partial r} \right|_{r=R} - k_{l,s} \left. \frac{\partial T_l}{\partial r} \right|_{r=R} = G_s (L + C_{p,l} (T_s - \Delta T_s)) \quad (13)$$

式中: G_s 为液滴表面蒸发流率; L 为蒸发潜热; T_s 为液滴表面温度; ΔT_s 为 Δt 时刻前液滴表面温度。

液滴表面蒸发流率由燃料和介质两部分组成

$$G_s = G_f + G_o \quad (14)$$

式中: G_o 为液滴表面介质蒸发流率; G_f 为燃料蒸发流率; G_s 则为液滴表面蒸发流率。

液滴燃料蒸发流率表达式为

$$G_f = G_s Y_s - \rho_g D_g \left. \frac{dY}{dr} \right|_{r=R} \quad (15)$$

由于介质不聚集在液滴表面，因而，联立式 (14) 和 (15)，可得到液滴表面蒸发流率

$$G_s=\frac{\rho_k D_k}{Y_s-1} \frac{dY}{dr} \Big|_{r=R}$$

(16)

3 实验结果及分析

压力振荡环境下液滴蒸发实验考察了 5 Hz, 13 Hz, 26 Hz 和 130 Hz 四个不同振荡频率下的液滴蒸发过程，同时改变振幅、燃烧室平均压力、温度等工况条件开展了不同工况下的实验研

究，获得了丰富的实验数据，下面选取其中的 26 组实验工况进行分析。

表 1 给出了 26 组压力振荡环境下液滴蒸发实验工况参数。其中，“最大振幅”指压力振荡波峰处到波节处的最大值，按照最大振幅占燃烧室平均压力的百分比来考察；采样频率指压力传感器采集燃烧室内压力变化的频率，为了保证测量精度，表中各工况的采样频率均为 1 000 Hz，远大于燃烧室压力振荡频率，因此能够很好地反映燃烧室内振荡压力的变化。

表 1 压力振荡环境液滴蒸发实验工况参数

Tab. 1 Parameters of droplet evaporation in pressure oscillation environment

工况	振荡频率 f/Hz	温度 T/K	燃烧室平均压力 \overline{P}/MPa	最大振幅 $p_{\text{max}}/\overline{P} \times \%$	初始直径 D_0/mm	采样频率 f_p/Hz	液滴生存时间 t_d/s
Test 1	5	347	0.151	5.736	3.225	1 000	—
Test 2		350	0.144	4.861	2.793	1 000	59.275
Test 3		373	0.119	5.882	2.298	1 000	24.260
Test 4		382	0.131	8.833	2.592	1 000	32.630
Test 5		391	0.233	4.859	2.298	1 000	22.860
Test 6		393	0.378	4.036	1.959	1 000	12.695
Test 7		395	0.346	4.028	2.298	1 000	13.000
Test 8	13	348	0.151	6.762	2.698	1 000	46.904
Test 9		377	0.144	6.587	2.298	1 000	9.890
Test 10		377	0.100	9.659	2.392	1 000	0.745
Test 11		379	0.304	3.694	2.078	1 000	12.820
Test 12		380	0.247	4.185	2.498	1 000	31.385
Test 13	26	346	0.169	5.027	2.771	1 000	39.875
Test 14		348	0.221	6.348	2.592	1 000	48.560
Test 15		353	0.140	7.107	2.392	1 000	49.610
Test 16		373	0.135	5.185	2.078	1 000	24.650
Test 17		373	0.221	2.658	1.956	1 000	12.110
Test 18		373	0.221	4.047	2.191	1 000	21.560
Test 19		377	0.326	3.548	2.078	1 000	15.425
Test 20	130	348	0.106	6.283	2.793	1 000	45.135
Test 21		368	0.163	4.804	1.191	1 000	34.450
Test 22		377	0.159	4.897	1.693	1 000	22.800
Test 23		377	0.319	3.588	2.078	1 000	18.91
Test 24		377	0.328	3.122	2.298	1 000	25.675
Test 25		380	0.209	3.279	2.078	1 000	10.120
Test 26		387	0.200	3.931	2.592	1 000	25.725

图 1 为压力振荡环境下不同液滴蒸发过程。由图可知, 液滴尺寸随着蒸发过程的进行而逐步缩小。同时, 部分工况下液滴会在喷注器末端左右摆动, 发生形变, 如图 1(a)。这说明液滴在蒸发过程中受到气流影响, 气流会加速液滴蒸发过程, 因而无法判断液滴在蒸发过程中的变化是来自于气流, 还是压力振荡环境的影响;

而图 1(b)和 1(c) 中的液滴则能够非常稳定地悬挂在喷注器末端, 既没有发生形变, 也没有出现位置的偏移, 可以认为此时液滴并没有受到气流影响。因此, 在压力振荡环境下液滴蒸发的实验中, 为了获得更加准确的实验数据, 选择蒸发过程中没有出现摆动和形变的液滴进行分析。

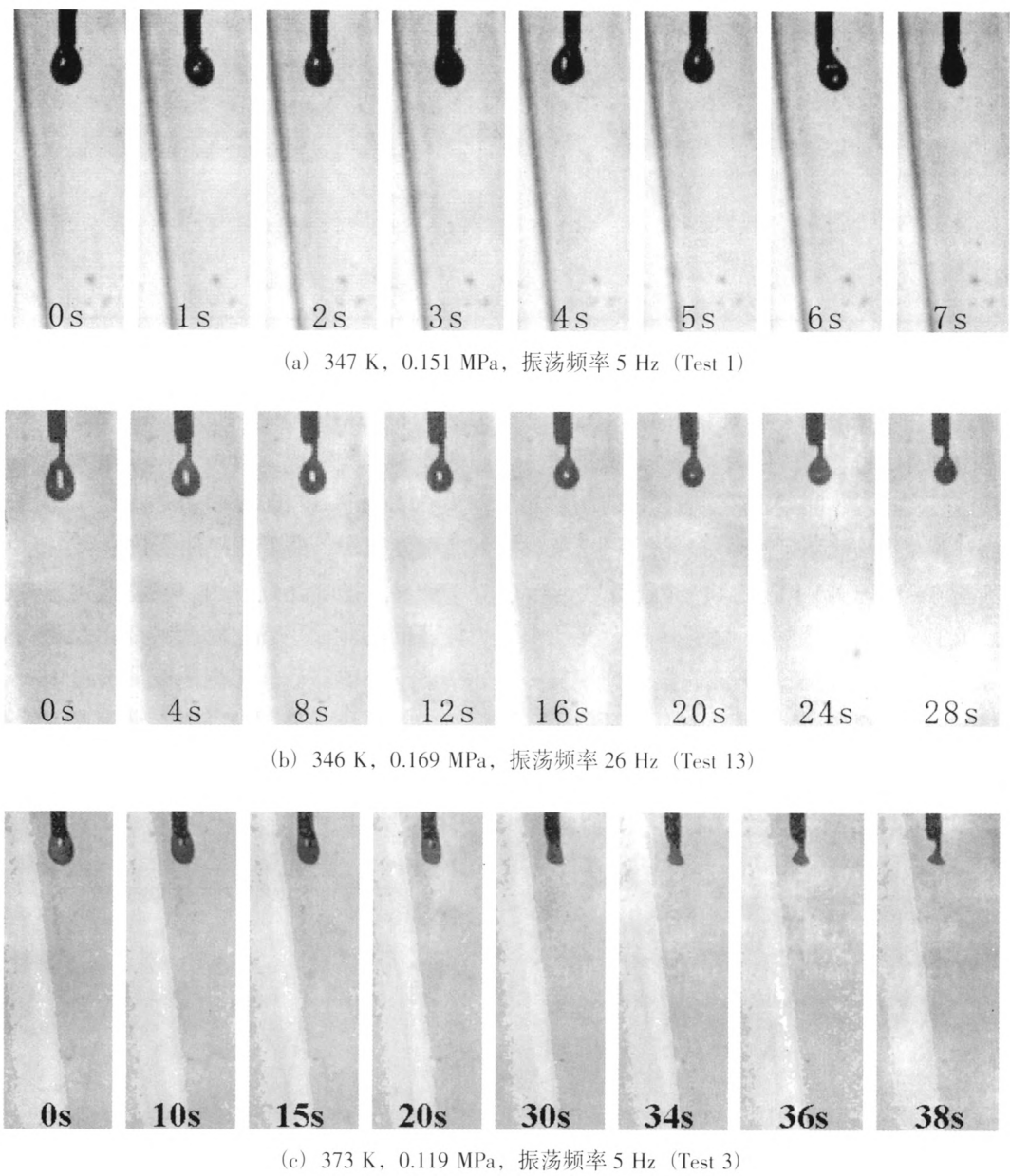


图 1 压力振荡环境下液滴蒸发过程

Fig. 1 Droplet evaporation process in pressure oscillation environment

3.1 液滴生存时间

为了与压力振荡环境下液滴蒸发过程进行对

比, 本文选取了 3 个典型实验工况, 利用上述实验系统, 关闭旋转换气阀, 使燃烧室内压力维持

恒定，开展了压力恒定环境下液滴蒸发实验研究，实验结果如表 2 所示。由表可知，基本相同的工况条件下，压力振荡环境中液滴生存时间明显小于压力恒定环境中液滴生存时间，尽管实验形成的压力振荡幅度有限，但液滴生存时间普遍减少了 15 s 以上。因此，压力振荡环境明显促进了液滴蒸发，大幅缩短了液滴生存时间。

表 2 压力振荡环境及压力恒定环境液滴蒸发典型实验工况参数对比
Tab. 2 Typical experimental parameters of droplet evaporation in pressure oscillation environment and constant environment

工况		燃烧室平均压力	温度	初始直径	振荡频率	最大振幅	液滴生存时间
		\bar{P}/MPa	T/K	D_0/mm	f/Hz	$p_{\max}/\bar{P}\times\%$	t_d/s
压力恒定环境	Test 1	0.100	373	2.272	—	—	48.12
	Test 2	0.100	377	2.378	—	—	56.78
	Test 3	0.380	393	1.538	—	—	28.295
压力振荡环境	Test 1	0.119	373	2.298	5	5.934	24.260
	Test 2	0.100	377	2.392	13	9.659	30.745
	Test 3	0.378	393	1.959	5	4.036	12.695

3.2 液滴蒸发速率

压力振荡环境不但减小了液滴生存时间，对液滴蒸发速率也具有不可忽视的作用。根据高速摄像机记录的液滴蒸发过程，测量到液滴直径随时间的变化，从而计算获得液滴蒸发速率实验值。图 2 分别给出了工况 Test 9 (377 K, 0.144 MPa) 和 Test 6 (393 K, 0.378 MPa) 液滴蒸发速率与振荡压力波形。由图可知，两种工况下液滴蒸发速率分别可达到 35 mg/s 和 27 mg/s，而压力恒定环境下相同工况的液滴蒸发速率不超过 0.1 mg/s，远小于压力振荡环境中的液滴蒸发速率。如图 3 所

示，为压力恒定环境下液滴蒸发速率，工况分别为 377 K, 0.100 MPa 和 393 K, 0.380 MPa，与图 3 中的实验工况十分接近，其最大蒸发速率分别为 0.08 mg/s 和 0.042 mg/s。相比于振荡环境下液滴蒸发速率，两者相差两个数量级。

此外，图 2 还反映出，液滴蒸发速率随着压力振荡的变化而呈现出相应的变化趋势，且蒸发速率波形相位滞后压力振荡波形接近 180°，即燃烧室内振荡压力处于波谷时，液滴蒸发速率接近波峰处，而当振荡压力处于波峰时，液滴蒸发速率则接近波谷处。

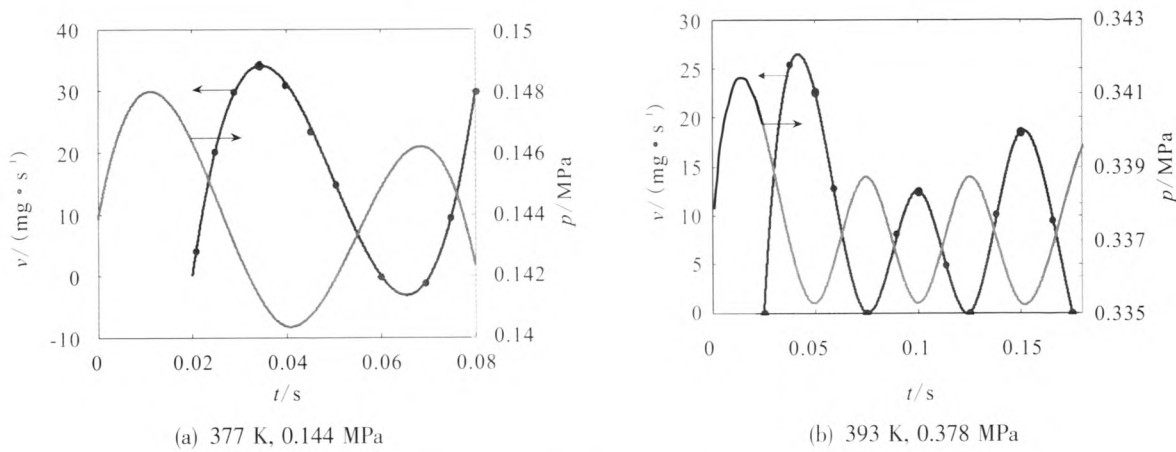


图 2 压力振荡环境下液滴蒸发速率
Fig. 2 Droplet evaporation rate in pressure oscillation environment

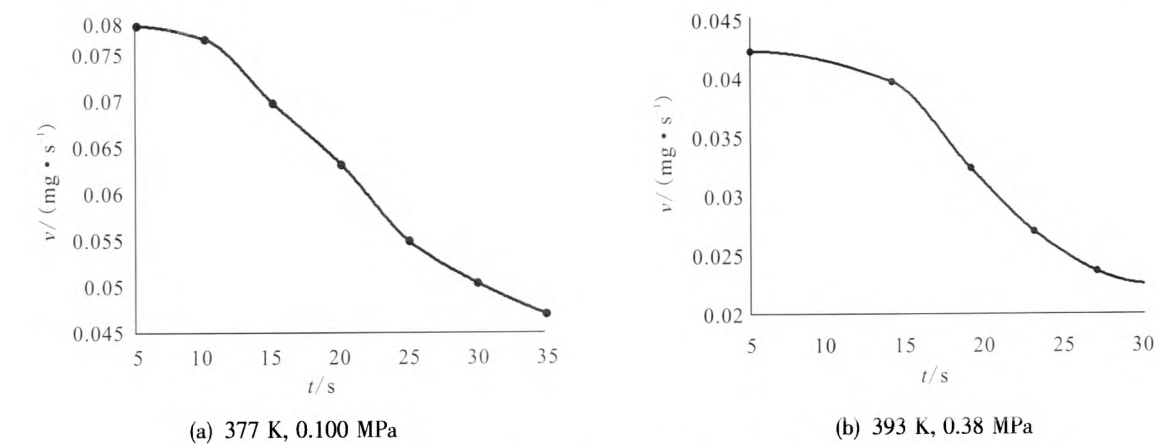


图 3 压力恒定环境下液滴蒸发速率

Fig. 3 Droplet evaporation rate in constant pressure environment

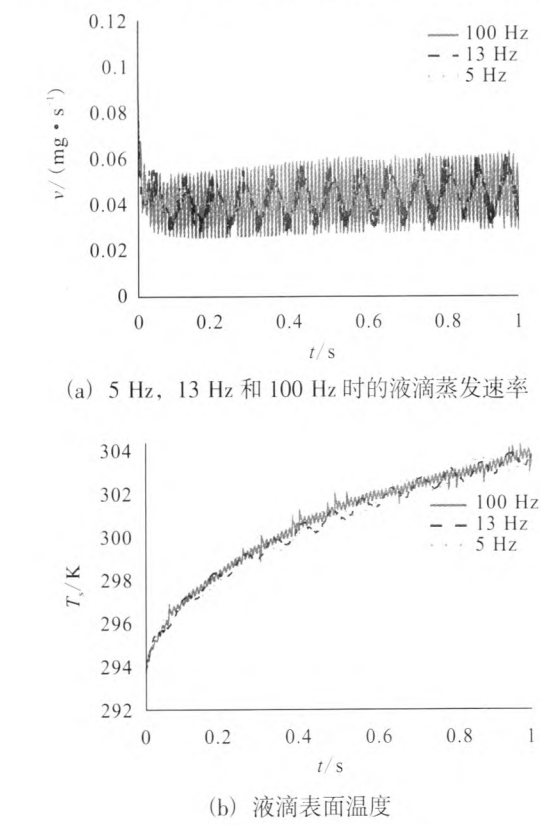
4 仿真结果及分析

通过实验虽然能够对压力振荡环境下液滴蒸发过程进行直观地观察,但由于实验条件的限制,液滴蒸发速率较低、环境因素影响较多,只能定性地得到结论,而无法定量获得因压力振荡而造成的蒸发特征参数的变化。因此,基于前文压力振荡环境下液滴非稳态蒸发模型,通过仿真获得了不同振荡频率、振幅、燃烧室平均压力及温度条件下液滴蒸发过程特征参数,弥补了实验的不足,有助于进一步了解燃烧不稳定问题。

4.1 振荡频率对液滴蒸发过程影响

图 4 给出了不同振荡频率下液滴蒸发过程特征参数,其中,各算例除了振荡频率不同外,其余参数均保持一致。由图 4 (a) 可知,液滴蒸发速率会随着燃烧室内压力的振荡而产生相应振荡,这与实验结论相同。此外,振荡频率的增加加剧了蒸发速率的振荡,但对其平均值并无影响,因而蒸发过程中液滴直径的变化趋势基本相同,如图 4 (c) 所示。分析认为,振荡压力通过改变环境中气体的密度来影响液滴蒸发速率,而较高的频率使得液滴表面周围气体密度变化加快,增加了燃料蒸气进入环境的速度,从而加剧了蒸发速率振荡,但由于液滴处于相同的温度、压力环境中,从周围环境吸收热量的能力基本相同,因而蒸发速率的平均值相同。由图 4 (b) 可知,不同频率下液滴表面温度的变化趋势基本相

同。相较于 100 Hz 及以上的振荡频率,频率较低时 (5 Hz, 13 Hz),液滴表面温度振荡更为明显。这是因为低频振荡导致液滴吸收的热量与蒸发实际需要的热量不平衡,从而使得液滴表面温度产生了较大波动。综合分析认为,100 Hz 以上的振荡会影响液滴蒸发速率,而较低频率振荡 (<100 Hz) 则会对液滴表面温度及液滴直径的变化趋势产生影响。因此,研究压力振荡环境下的蒸发问题要综合考虑不同频率振荡所带来的影响。



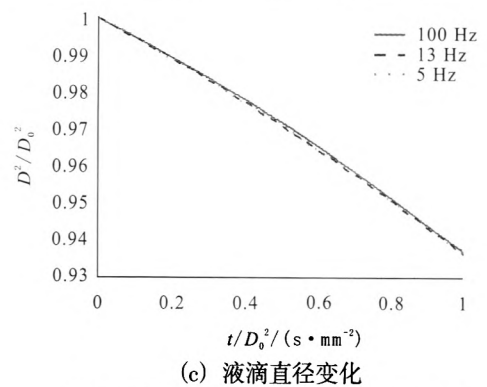


图 4 不同振荡频率下液滴蒸发特征参数

Fig. 4 Droplet evaporation characteristic parameters at different oscillation frequency

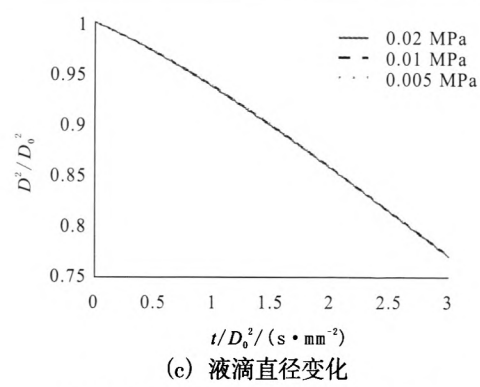
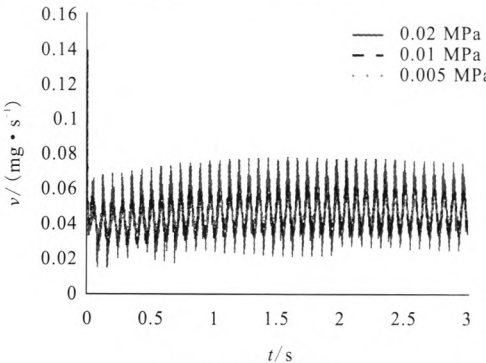


图 5 不同振荡幅值下液滴蒸发特征参数

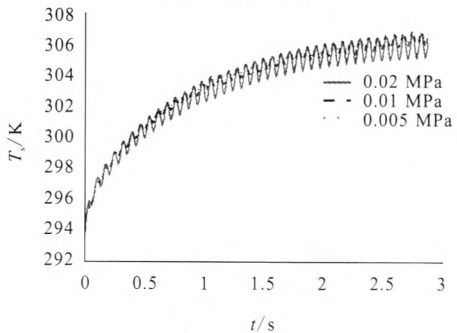
Fig. 5 Droplet evaporation characteristic parameters at different oscillation amplitude

4.2 振荡幅值对液滴蒸发过程影响

图 5 给出了相同环境下不同振荡幅值的液滴蒸发过程特征参数，算例中燃烧室平均压力为 0.1 MPa，振幅分别为燃烧室压力的 5%，10%和 20%。由图可知，压力振荡幅值越大，液滴蒸发速率振荡越剧烈，液滴表面温度振荡越剧烈。分析认为，较大振幅引发了液滴表面附近环境压力的变化，从而对液滴蒸发过程产生了较大影响，使得蒸发速率和液滴表面温度产生明显振荡；而较小振幅不足以使液滴表面环境压力产生明显变化，因而对液滴蒸发过程影响较小。



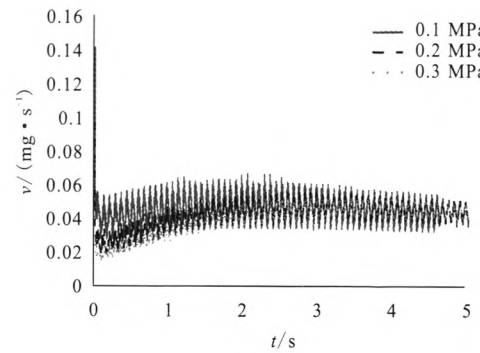
(a) 液滴蒸发速率



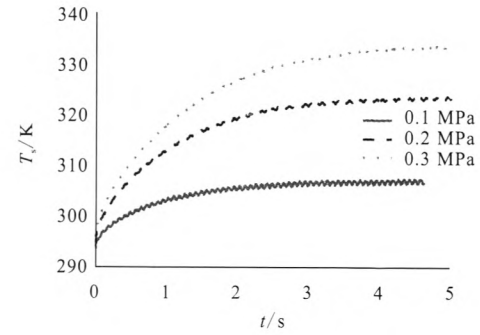
(b) 液滴表面温度

4.3 燃烧室平均压力对液滴蒸发过程影响

图 6 给出了不同燃烧室平均压力下液滴蒸发过程特征参数。由图可知，增加燃烧室平均压力大幅增加了液滴稳态蒸发时的平衡温度，液滴表面达到平衡温度的时间延长，如图 6 (b)，液滴直径减小更为缓慢，如图 6 (c)。此外，由图 6 (a) 可知，液滴表面未达到平衡温度前，压力越大，液滴蒸发速率越小；当液滴表面达到平衡温度后，三个工况下液滴蒸发速率基本相同。



(a) 液滴蒸发速率



(b) 液滴表面温度

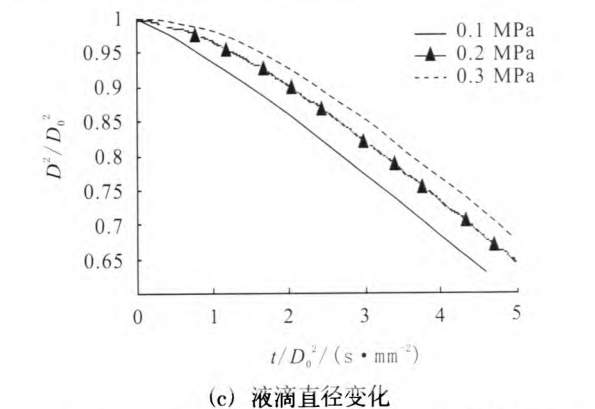


图 6 不同燃烧室平均压力下液滴蒸发特征参数

Fig. 6 Droplet evaporation characteristics parameters at different chamber average pressure

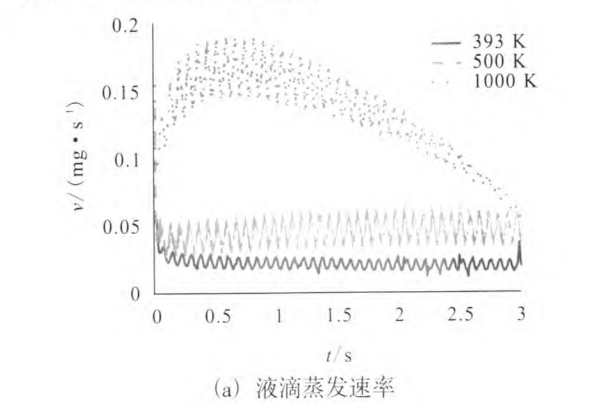
同时, 增加燃烧室平均压力, 抑制了蒸发速率、液滴表面温度等参数的振荡。这是因为, 尽管算例增加了燃烧室平均压力, 但压力振荡幅值并没有相应增加, 即振幅所占燃烧室平均压力百分比减小, 从而导致蒸发过程对振荡的响应程度减弱。因此, 不仅燃烧室平均压力影响液滴蒸发过程, 振幅所占燃烧室平均压力百分比对蒸发过程同样具有重要作用。由此得出结论: 在研究压力振荡环境下的蒸发问题时, 不能单纯地研究燃烧室平均压力或振荡幅值, 而是要将两者结合起来共同分析, 把振幅占燃烧室平均压力的百分比作为影响因素之一来进行考察。

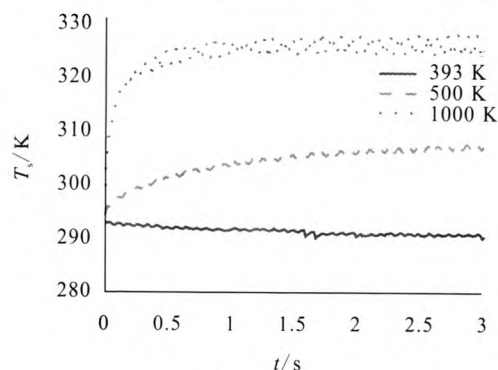
由图 6 可知, 增加燃烧室平均压力大幅增加了液滴稳态蒸发时的平衡温度, 液滴表面达到平衡温度的时间延长, 如图 6 (b), 液滴直径减小更为缓慢, 如图 6(c)。此外, 由图 6(a) 可知, 液滴表面未达到平衡温度前, 压力越大, 液滴蒸发速率越小; 当液滴表面达到平衡温度后, 三个工况下液滴蒸发速率基本相同。同时, 增加燃烧室平均压力, 抑制了蒸发速率、液滴表面温度等参数的振荡。这是因为, 尽管算例增加了燃烧室平均压力, 但压力振荡幅值并没有相应增加, 即振幅所占燃烧室平均压力百分比减小, 从而导致蒸发过程对振荡的响应程度减弱。因此, 不仅燃烧室平均压力影响液滴蒸发过程, 振幅所占燃烧室平均压力百分比对蒸发过程同样具有重要作用。由此得出结论: 在研究压力振荡环境下的蒸发问

题时, 不能单纯地研究燃烧室平均压力或振荡幅值, 而是要将两者结合起来共同分析, 把振幅占燃烧室平均压力的百分比作为影响因素之一来进行考察。

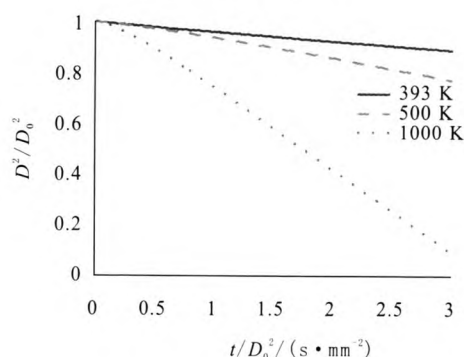
4.4 燃烧室温度对液滴蒸发过程影响

图 7 给出了不同燃烧室温度下液滴蒸发过程特征参数。由图 7 可知, 高温环境在加快了液滴蒸发速率的同时, 也加剧了蒸发速率的振荡。为了便于观察, 图 7(a)显示了蒸发时间 0~3 s 内蒸发速率的变化。当燃烧室温度较大时 (>1 000 K), 液滴稳态蒸发时的平衡温度较高, 促进了蒸发速率大幅增加, 且液滴表面在较短时间内迅速达到平衡温度, 使得液滴蒸发速率迅速上升至最大值; 由于快速蒸发加快了燃料蒸气的产生, 使得液滴表面燃料蒸气质量分数迅速增加, 从而抑制了液滴蒸发, 造成蒸发速率的减小, 因而高温下液滴蒸发速率呈现出先增加后减小的趋势; 而燃烧室温度较低时 (<1 000 K), 增加温度对液滴蒸发速率的促进作用较小, 因而液滴蒸发速率并未呈现出先增加后减小的趋势。同时, 较高的温度环境增大了液滴表面与周围环境的温度梯度, 使得环境的传热能力增强, 因而液滴表面能够更快地达到平衡温度, 如图 7 (b) 所示; 液滴蒸发更为迅速, 直径减小得更快, 如图 7(c)所示。分析认为, 蒸发的加快使得液滴表面燃料蒸气增多, 而环境压力的振荡造成燃料蒸气不断进入到气相环境中, 液滴蒸发又不断地产生新的燃料蒸气。温度越高, 燃料蒸气进入环境的速度就越快, 蒸发产生燃料蒸气的速度也越快, 液滴表面燃料蒸气质量分数处于不断变化中, 从而使得液滴蒸发速率产生大幅振荡。





(b) 液滴表面温度



(c) 液滴直径变化

图7 不同燃烧室温度下液滴蒸发特征参数

Fig. 7 Droplet evaporation characteristics parameters at different chamber temperature

5 结论

利用压力振荡环境实验系统,开展了压力振荡环境下液滴蒸发实验研究,分析了压力振荡对液滴蒸发过程的影响,建立压力振荡环境液滴非稳态蒸发模型,并基于该模型考察了振荡频率、振幅,燃烧室平均压力及温度等因素对液滴蒸发特性的影响规律,得出了以下主要结论:

1) 与压力恒定环境相比,压力振荡环境对液滴蒸发过程具有明显的促进作用,极大地增加了液滴蒸发速率,缩短了液滴生存时间;此外,液滴蒸发速率随着压力振荡的变化呈现出相应的变化趋势,且蒸发速率波形相位滞后压力振荡波形接近 180° 。

2) 增加振荡频率会加剧蒸发速率的振荡,但对蒸发速率平均值并无影响,不同频率下的液滴直径变化趋势并无明显区别。

3) 在研究压力振荡环境下的蒸发问题时,不能单纯地考察燃烧室平均压力或者振荡幅值的

影响作用,而要将两者结合起来共同分析,把振幅占燃烧室平均压力的百分比作为影响因素之一来进行考察,因为百分比越大,液滴蒸发速率及表面温度振荡越剧烈。

4) 燃烧室的高温环境在增加液滴蒸发速率,促进蒸发的同时,也会增强压力振荡对蒸发过程的影响效应,加剧液滴蒸发速率振荡。因此,液体火箭发动机燃烧室中的超高温环境会加剧不稳定燃烧。

参考文献:

- [1] 程心. 液体火箭发动机燃烧不稳定性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1965.
- [2] 苏凌云, 聂万胜, 刘卫东. 低频压力振荡环境下运动液滴蒸发过程的准稳态模型[J]. 推进技术, 2011, 32(5): 670-675.
- [3] YANG V. Liquid propellant rocket engine combustion instability [M]. USA: American Institute of Aeronautics & Astronautics, 1995.
- [4] STRAHLE W C. A theoretical study of unsteady droplet burning: transients and periodic solutions [D]. Princeton, NJ: Department of Aeronautical Engineering, Princeton University, 1963.
- [5] SHEU W J, LIOU N C. Effect of temporal variation of pressure on vaporization of liquid droplets [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1999(42): 4043-4054.
- [6] YANG Vigor, MICHAEL M M. Liquid rocket motor combustion stability using coaxial injectors and supercritical droplet combustion and dynamics, SA-SA G-F49620-93-1-0126[R]. [S.l.]: [s.n.], 1995.
- [7] OKAI K, MORIUE O, ARAKI M, et al. Combustion of single droplets and droplet pairs in a vibrating field under microgravity[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2000, 28: 977-983.
- [8] TANABLE M, MORITA T, AOKI K, et al. Influence of standing sound waves on droplet combustion [J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2000, 28: 1007-1013.
- [9] TANABLE M, KUWAHARA T, SATOH K, et al. Droplet combustion in standing sound waves[J]. Proceeding of the Combustion Institute, 2005 (30): 1957-1964.

(编辑: 王建喜)