

压力振荡环境下液滴非平衡蒸发过程的 理论分析及试验研究

苏凌宇, 刘卫东

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 对压力振荡环境下液滴蒸发过程进行了理论分析与试验研究。结果表明, 压力振荡会引起液滴周围表面边界层内蒸气质量分数的振荡, 从而导致由扩散控制的蒸发速率发生振荡。此外, 压力下降引起的气相场内力的不平衡会驱动蒸气从边界层内流入气相场, 使蒸发速率的最大值出现在压力下降的过程中, 试验研究结果和理论分析所得结论吻合较好。

关键词: 压力振荡; 液滴蒸发; 理论分析

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2009) 05-0001-07

Theoretical analysis and experimental study of droplet evaporation with pressure oscillation

Su Lingyu, Liu Weidong

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Theoretical analysis and experimental study are performed for droplet evaporation with pressure oscillation. The results show that pressure oscillation makes mass fraction of vapor oscillate in the boundary layer around droplet, which produces oscillation of evaporation rate controlled by diffusion. Furthermore, the non-equilibrium force brought by pressure decline drives the vapor in the boundary layer flowing into the gas field, and the maximum of evaporation rate exists in the process of pressure decline. The results of experimental study agree well with that of theoretical analysis.

Key words: pressure oscillation; droplet evaporation; theoretical analysis

收稿日期: 2009-05-11; 修回日期: 2009-08-07。基金项目: 国家自然科学基金(90816016)。

作者简介: 苏凌宇 (1977—), 男, 博士研究生, 研究领域为液体火箭发动机燃烧过程。

0 引言

在液体火箭发动机工作过程中,液体燃料经喷注器雾化后进行燃烧时,液滴的蒸发过程是一个非常重要的环节。一般认为它是燃烧速率的控制过程,对液体燃料燃烧稳定性具有至关重要的影响。Priem 和 Guentert^[1]首先指出燃烧稳定性受蒸发过程的影响,并能通过改变蒸发过程的特性来控制。所以,很多研究者^[2-7]将液滴蒸发过程作为液体火箭发动机燃烧不稳定激励机制中的关键因素进行研究。当液体火箭发动机发生不稳定燃烧时,燃烧室内会出现不同形式的压力振荡。低频不稳定燃烧表现为燃烧室内压力的整体振荡,高频不稳定燃烧表现为燃烧室内压力以波的形式在燃烧室内运动,但是不管那种形式的压力振荡,从微观角度讲,必然改变环境气体分子与液滴表面的碰撞频率与碰撞强度,因而会影响燃料液滴的蒸发相变过程,并最终影响液体燃料的燃烧过程。深入理解液滴蒸发过程对压力振荡(即燃烧过程的振荡)的动态响应特性,建立适用于压力振荡环境下的蒸发模型,是进一步探讨燃烧不稳定性与液滴蒸发过程之间的相互作用机制、分析蒸发过程对燃烧不稳定激励机理的理论前提。然而,迄今为止,虽然对液滴蒸发过程的研究已有半个多世纪的历史,但是研究比较多的也只有恒定环境压力下的准稳态蒸发模型,对压力振荡环境下液滴蒸发过程的动态响应特性的研究还远远不够,至今还没有提出能够应用于液体火箭发动机不稳定燃烧仿真计算的液滴蒸发动态响应模型,已有的准稳态液滴蒸发模型是否适用于压力振荡环境也并不清楚。

要想得出液滴蒸发过程与燃烧不稳定之间的相互作用机制,首先必须获得液滴蒸发过程对燃烧不稳定性的响应特性。本文从宏观以及微观层次上分析了压力振荡环境下液滴蒸发的非平衡过程,并对理论分析所得结论进行了试验验证,所得结果对解决液体火箭发动机燃烧不稳定性具有重要意义。

1 压力振荡环境下液滴非平衡蒸发过程的宏观分析

在应用经典热力学及流体力学理论研究液滴蒸发过程时,必须给出液相场以及气相场的边界条件,即气液界面处热力学参数,主要包括温度、密度以及压力。经典的处理方法是把气液界面看作是厚度为零的分界面,该处液滴蒸气压力始终对应于液滴表面温度所确定的饱和蒸气压,其值由平衡状态下的饱和蒸气压方程式(4)给出,然后根据气体状态方程求出相应的气体热力学参数。在给出气液界面的参数后,根据基于流体力学理论、经典热力学理论以及传热传质理论建立质量、组分与能量守恒方程组,计算出液滴的蒸发速率以及液滴的生存时间。

根据能量守恒,可以给出液滴蒸发过程中气液界面处能量守恒方程如下:

$$Q_g = Q_e + Q_i \quad (1)$$

式中, Q_g 、 Q_e 、 Q_i 分别为气相传向液滴表面的热量、液滴蒸发带走的热量以及用于加热液滴的热量。其中,液滴蒸发带走的热量由液滴的蒸发速率决定,而蒸发速率的大小又受传质过程的制约。当环境压力不变时,在液滴蒸发的过程中,只有两种不平衡存在,即温度不平衡与组分不平衡,前者引起热量的流动,而后者引起质量的流动,它们共同决定着蒸发过程进行的速度。

在液滴蒸发的准稳态理论中,式(2)称为传热数或传热驱动力,它决定着液滴蒸发过程中热量传递的能力,其值越大,由气相传入的热量越大,引起液滴温度以及蒸发速率的值就越大;式(3)称为传质数或传质驱动力,它决定着液滴蒸发过程中质量传递的能力,其值越大,由液滴表面传入气相环境中的液滴蒸气质量越大,液滴的蒸发速率就越大;这两个量通过液滴的表面温度联系起来,它们共同决定着蒸发速率的大小,即蒸发过程的快慢是传热传质综合作用的结果,所以这两个值在蒸发过程中是相等的。一般认为,燃料液滴的蒸发速率等于燃料蒸气离开液滴表面附近进入气相流场的速率。

$$B_r = \frac{C_{p,g}(T_\infty - T_s)}{L_v + C_{p,l}(T_s - T_0)} \quad (2)$$

$$B_D = \frac{Y_{v,s} - Y_{v,\infty}}{1 - Y_{v,s}} \quad (3)$$

式(3)中液滴表面处的蒸气质量分数,由方程(4)求得:

$$Y_{v,s} = \frac{1}{1 + \left(\frac{p}{p_{v,s}} - 1 \right) \frac{M_\infty}{M_v}} \quad (4)$$

根据上述液滴蒸发过程的经典理论,从宏观层次上对压力振荡环境下液滴蒸发过程进行如下分析。在分析过程中,为了便于阐述压力振荡对蒸发过程影响,做如下假设:根据边界层理论,不管液滴处于静止状态,还是处于运动状态,在液滴表面附近均存在一个厚度有限的气体边界层,在该气体边界层内,液滴与环境气体的热量交换主要依靠气体的导热,质量交换主要依靠分子扩散,边界层内蒸气的分压对应于液滴表面温度决定的饱和蒸气压。

首先指出,与无压力振荡时液滴蒸发过程相比,由于环境压力的振荡,气相流场中除了具有温度不平衡、组分不平衡外,流场内还存在由于压力振荡而引起的力不平衡,力的不平衡必然引起气体的快速流动,其结果使压力处处相等。

1.1 压力上升过程液滴表面边界层内流场变化及其对蒸发过程的影响

图1给出了压力上升过程中,液滴周围气体边界层内流场的变化示意图。空心箭头表示环境气体进入气体边界层,实心箭头表示液滴气化产生的蒸气进入气体边界层。当环境压力发生低频振荡时,由于压力是以声速进行传播,整个气相场(包括液滴周围的气体边界层)的密度将会与压力同相地发生振荡。使液滴周围气体边界层内密度增加的物质源有两个:一方面,由于压力升高引起流场内力的不平衡,使环境气体进入边界层,导致边界层内的密度增加;另一方面,压力上升使气相场与液滴之间的传热增强,使液滴气化速度增大,气化产生的蒸气导致边界层内的密度增大。但是,根据传质理论,决定液滴蒸发速率大小的参数并不是液滴表面气体边界层内的

密度,而是边界层内的燃料蒸气质量分数。一般情况下,受压力振荡频率与幅值的限制,加上热量传递有很大惰性,液滴气化导致边界层内密度的增加是有限的,边界层内燃料蒸气质量分数是否增加主要受流入边界层内的环境气体质量的大小决定,从而最终决定着液滴蒸发速率的变化。

从以上分析可以看出,在压力上升过程中,液滴周围气体边界层内的蒸气质量分数有可能下降,从而使液滴气化后产生的蒸气向环境气体中的扩散传质能力降低,同时还要受到环境气体流向液滴周围气体边界层时气体流动的影响。受蒸气扩散影响的液滴蒸发速率在压力上升过程中有可能呈现下降的趋势。

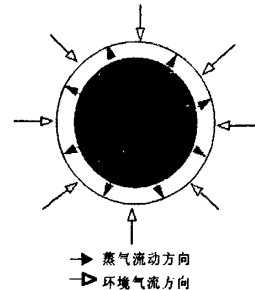


图1 压力升高时液滴周围边界层内流场的变化

Fig.1 The variation of flow field in the boundary layer around droplet during pressure elevation

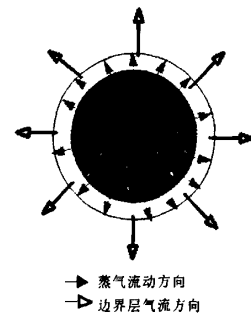


图2 压力降低时液滴周围边界层内流场的变化

Fig.2 The variation of flow field in the boundary layer around droplet during pressure decline

1.2 压力下降过程液滴表面边界层内流场变化趋势及其对蒸发过程的影响

图2为压力下降过程中液滴周围气体边界层

内流场变化示意图, 空心箭头表示边界层内的气体流向环境气体, 实心箭头表示液滴气化产生的蒸气进入边界层。压力下降导致液滴周围气相场密度减小, 与压力上升过程相比, 使液滴周围气体边界层内密度减小的原因只有一个, 即压力下降引起流场内部力的不平衡, 导致边界层内的气体流入气相场使边界层内的密度减小。虽然压力下降使气相场与液滴之间的热量交换减弱, 但是, 由于边界层内的气体流向周围气相场, 使边界层内的蒸气压力低于液滴表面温度对应的饱和蒸气压力, 导致液滴气化速率加快使边界层内的蒸气压等于液滴表面温度对应的饱和蒸气压。另外, 压力下降虽然导致液滴周围边界层内气体密度减小, 但是, 由于液滴气化以及气体边界层内环境气体质量的减小, 导致气体边界层内的液滴蒸气质量分数变大, 结果使传质数增大, 燃料蒸气通过扩散方式传递到环境气体中的能力增强, 使蒸发速率增加。

综合以上分析可以看出, 在环境压力发生振荡时, 压力上升过程与压力下降过程对液滴蒸发速率影响有较大不同。压力上升过程使气相场内存在力不平衡, 导致气相场中的气体流入液滴表面边界层, 有可能使边界层内的质量分数减小; 压力下降使气相场内存在力不平衡, 导致液滴周围边界层内的气体流向周围的气相场, 使气体边界层内的蒸气质量分数增加, 由扩散控制的液滴

蒸发过程加快, 除此之外, 压力下降驱动蒸气快速流出气体边界层, 使蒸发过程大大加快。

2 压力振荡环境下液滴非平衡蒸发过程的微观分析

经典热力学只是给出了物质宏观性质的广泛联系, 但是它并不涉及这些性质的定量分析。自然界广泛存在的蒸发过程, 从微观上看, 是液滴体表面分子从周围其它分子获得足够的能量后, 挣脱液体其它分子对它的束缚进入气相中的过程。在微观层次上, 具有分子热力学以及分子动理论的应用基础。所以这里应用分子热力学以及分子动理论的有关知识, 从微观层次上对压力振荡环境下液滴蒸发过程进行分析, 探讨压力振荡对液滴蒸发过程的影响, 得出液滴蒸发速率随压力振荡变化的微观本质特性^[8]。

为了从微观层次上清晰的阐述环境压力振荡对液滴蒸发过程的影响, 在分析中做如下两点假设: (1)不管是静止液滴, 还是运动液滴, 根据宏观上的边界层理论, 在气液界面附近的气相侧存在一个边界层, 在该边界层内导热与分子扩散是能量与质量较交换的主要形式; (2)在边界层内, 液体蒸气的分子数由气液界面的温度决定。

2.1 准稳态蒸发过程液滴表面边界层内气体分子组成

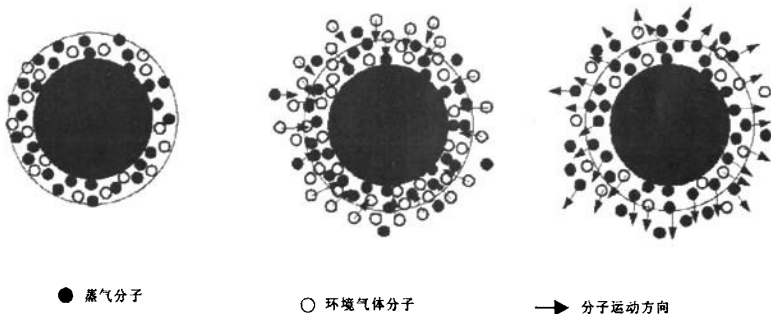


图3 压力不变时液滴周围边界层内分子组成变化趋势示意图

Fig.3 The variation of molecule component in the boundary layer around droplet with constant pressure

图4 压力升高时液滴周围边界层内分子组成变化趋势示意图

Fig.4 The variation of molecule component in the boundary layer around droplet during pressure elevation

图5 压力下降时液滴周围边界层内分子组成变化趋势示意图

Fig.5 The variation of molecule component in the boundary layer around droplet during pressure decline

图 3 给出了液滴在准稳态蒸发时边界层内分子组成的示意图。当液滴处于准稳态蒸发时,由于环境气体分子作用于气液界面的碰撞频率以及碰撞强度基本不变,所以气液界面特性以及蒸发相变的速率基本不变,边界层内和蒸气分子数(即蒸气的质量分数)基本不变。液滴蒸发速率近似等于蒸气分子从边界层内进入气相场内的速率,也等于燃料分子从液滴表面挣脱而进入边界层内的速率,边界层内处于一种动态的准平衡过程,液滴的蒸发速率基本保持不变。

2.2 压力上升过程液滴表面边界层内气体分子组成的变化趋势及其对蒸发过程影响

图 4 给出了压力上升阶段液滴表面边界层内分子组成变化示意图。环境压力上升使气相场中气体分子的数密度增大,液滴表面边界层内气体分子数必然增多。液滴表面边界层内增多的气体分子主要来自两个方面:一方面,压力上升使气相场内存在力的不平衡,驱动边界层外的气体分子向边界层内运动;另一方面,边界层内分子数的增加,使气体分子与气液界面的碰撞频率增大,气液界面上液体分子的气化速率增大,从而使边界层内气体分子数增多。在压力上升过程中,虽然边界层内的气体分子数增多,但是蒸气分子数占边界层内总分子数的比例(即边界层内液体蒸气的质量分数)以及燃料蒸气分子运动到边界层外气相场的速率未必增加。

通过以上分析可以看出,压力上升使液滴表面边界层内的气体分子数增加。边界层内液体蒸气分子所占比例的变化,主要由进入边界层内的环境气体分子数以及液滴气化产生的蒸气分子数决定,边界层内的蒸气分子进入气相场中的方式仍然依靠分子扩散,并受边界层外气体分子向边界层内运动的影响,液滴蒸发速率主要由边界层内液体蒸气分子向周围气相场中的扩散速率决定。

2.3 压力下降过程液滴表面边界层内气体分子组成的变化趋势及其对液滴蒸发过程影响

图 5 给出了压力下降过程中,液滴表面边界层内分子组成变化的示意图。环境压力下降使气相场内的气体分子数密度减小,液滴表面气体边

界层内的气体分子数也必然相应减少。这主要是由于压力下降引起气相场中存在力的不平衡,驱动边界层内的分子向周围气相场中运动。边界层内分子的减少,使环境气体分子与气液界面的碰撞频率降低,界面上液滴分子的的气化速率会有所减小。同时,由于边界层内的分子数的迅速减少,使得边界层内的液体蒸气分子数低于界面温度所决定的蒸气分子数,这会促使气液界面上的液相分子的气化过程加快。在压力下降阶段,由于气体分子数密度的减小,会使液体蒸气分子在边界层内所占的比例增大,导致边界层内的蒸气分子向周围气相场中的扩散能力增强,使蒸发速率相应的增加。

通过以上分析可以看出,压力下降使液滴表面边界层内的液体蒸气分子数减少,但是在边界层内液体蒸气分子所占的比例反而增大,从而使由分子扩散控制的蒸发过程的加快。最重要的是,压力下降引起流场内部力的不平衡会驱动边界层内的液体蒸气分子迅速向边界层外的气相场运动,使边界层内燃料蒸气分子的数目低于界面温度所决定的饱和值,从而使气液界面上的燃料分子快速气化,使蒸发速率大大增加,这一过程在液滴蒸发过程中占主导地位。

综合以上微观分析,在环境压力不变时,处于准稳态蒸发过程的液滴,其表面边界层内的蒸气分子数基本保持不变,由扩散控制的蒸发速率也基本保持不变;当环境压力上升时,表面边界层内的气体分子数增加,但是边界层内燃料蒸气分子所占的比例未必增加,从而由扩散控制的蒸发速率未必增大;当环境压力下降时,液滴表面边界层内的气体分子减少,但是燃料蒸气分子所占的比例却增大,由扩散控制的蒸发速率会有所增大。此外,与压力上升过程不同的是,压力下降引起边界层内燃料蒸气分子迅速向边界层外运动,使边界层内的燃料蒸气分子数低于气液界面温度所决定的饱和值,从而使气液界面上的液相分子加速气化,使蒸发速率大大增加。

通过对压力振荡环境下液滴蒸发过程的理论分析可以看出,液滴蒸发速率在压力上升过程中并不会明显改变,而在压力下降过程中,由于液

滴表面边界层内蒸气质量的增加，以及由于压力下降引起流场内力的不平衡会驱动边界层内蒸气快速流向气相场，会使蒸发速率大大增加。

3 对理论分析的试验验证

液体乙醇在常温下具有良好的挥发性，采用乙醇液滴为试验对象可以在室温下清楚地拍摄到压力振荡环境下液滴蒸发引起的密度梯度变化的阴影图像，获得蒸发速率对压力变化的动态响应。表 1 给出乙醇液滴蒸发过程对压力振荡动态响应的试验工况和基本参数。表中最大振荡幅值是指各个振荡周期中振幅的最大值，最大压力值

和最小压力值是指整个振荡过程中压力的最值。

从图 6 可看出，在压力上升阶段，气流的高速流动使悬挂的乙醇液滴产生晃动，但在液滴周围并没有出现阴影图像，表明液滴周围密度梯度没有明显变化。从图 7 中可看出，在压力下降的初始阶段，液滴周围也没有阴影图像，但是当压力下降一定范围后，开始出现阴影图像，表明液滴的蒸发速率明显增大，使平行光线发生偏转产生了阴影。同时从图 7 中可以看出，在压力下降过程中，液滴并没有出现明显的晃动和变形，表明这一过程中气流基本无扰动。由此可以看出，气流扰动并没有使蒸发速率发生明显的改变，压力的突然降低是导致蒸发速率改变的主要原因。

图 8 给出了图 6、图 7 中序列图像所对应的

表 1 试验条件及基本参数
Tab.1 Experimental condition and basic parameters

序号	高速摄像机频率/ (f/s)	振荡频率/ Hz	最大振幅/MPa	最大压力/MPa	最小压力/MPa
1	3000	2	1.376814	1.52125	0.144436
2	4000	5	1.16904	1.65282	0.48378
3	8000	7	0.780342	1.36806	0.587718



图 6 压力升高过程中液滴蒸发的系列阴影图像（试验 1）

Fig.6 The serial shadow images of droplet evaporation with pressure elevation (No.1 of tests)



图 7 压力下降过程中液滴蒸发的系列阴影图像（试验 1）

Fig.7 The serial shadow images of droplet evaporation with pressure decline (No.1 of tests)

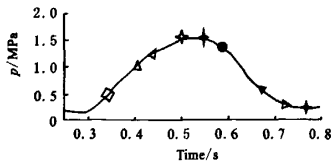


图 8 图 6 和图 7 对应的时刻以及压力值
Fig.8 Time and pressure values corresponding to images in figure 6 and figure 7

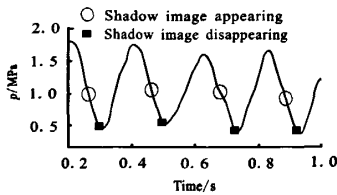


图 9 试验 2 所得结果
Fig.9 The result of No.2 tests

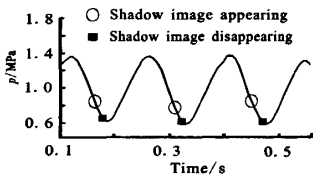


图 10 试验 3 所得结果
Fig.10 The result of No.3 tests

图 9 和图 10 为试验 2 和试验 3 所对应的试验结果。从图中可以看出, 除压力振荡的频率以及振幅不同使液滴周围出现的阴影对应的时刻和压力值稍有不同外, 得出了与试验 1 相同的规律。另外还可以看出, 在压力由下降转为上升的瞬间恰好是阴影图像从有到无转变的瞬间。

对于试验所得结果进行总结归纳, 可以得出这样的定性结论: 在压力快速振荡时, 液滴蒸发速率并不和环境压力的值成正比变化, 蒸发速率的最大值出现在压力下降过程的后期阶段, 蒸发速率的大小与压力振荡的频率、振幅有关。试验结果与理论分析所得结论一致, 说明理论分析所得结论是正确的。

4 结论

在压力上升过程中, 液滴周围气体边界层内的蒸气质量分数的变化主要由压力振荡的幅值和频率决定, 在此过程中, 有可能使蒸气质量分数下降, 从而会使蒸发速率降低; 在压力下降过程中, 液滴周围气体边界层内的蒸气质量分数会增大, 从而使扩散引起的蒸发速率增加。此外, 压力下降会驱动蒸气从边界层内快速流入周围气相场, 大大增加了液滴的蒸发速率。在压力振荡过程中, 液滴蒸发速率的最大值会出现在压力下降阶段。

参考文献:

- [1]Priem R J, Guentert D C. Combustion instability limits determined by a nonlinear theory and a one-dimensional model[R]. NASA, Rept. TN D-1409, 1962.10
- [2]Lee G Y, Kim S Y, Yoon W S. Oscillatory vaporization and acoustic response of droplet at high pressure [J]. Int. Communications in Heat and Mass Transfer. 2008, (35): 1302-1306.
- [3]Sheu W J, Liou N C. Effect of temporal variation of pressure on vaporization of liquid droplets [J]. Int. J. of Heat and Mass Transfer. 1999(42): 4043-4054.
- [4]Kim S Y, Yoon W S. Responses of droplet evaporation to high-pressure oscillations[R]. AIAA 2004-1161.
- [5]Saito M, Hoshikawa M, Sato M. Enhancement of evaporation/combustion rate coefficient of a single fuel droplet by acoustic oscillation [J]. Fuel. 1996, 75 (6): 669-674.
- [6]Sujith R I, Waldherr G A, Jagoda J I, et al. Experimental investigation of the evaporation of droplets in axial acoustic fields[R]. AIAA 1995-0495.
- [7]刘卫东, 周进, 王振国. 振荡环境下推进剂液滴亚临界蒸发响应特性[J]. 航空动力学报, 2001, 16(1): 52-54.
- [8]Su Lingyu, Liu Weidong. Molecular dynamics simulation of gas-liquid phase transition's dynamic response to pressure variation [R]. 7th International Symposium on Heat Transfer 2008, Beijing, 2008, 10.

(编辑: 王建喜)