

# 高温高压环境下煤油液滴蒸发过程实验研究

刘松, 聂万胜, 苏凌宇, 石天一, 刘瑜

(中国人民解放军装备学院, 北京 101416)

**摘要:** 应用高速摄影系统和图像处理技术研究了煤油液滴在温度 473~773 K、压力 1.0~4.0 MPa 静止气体环境下的蒸发过程, 得到了环境温度与环境压力对煤油液滴特性的影响规律。实验结果表明: 环境温度低于 573 K 时, 煤油液滴蒸发  $D^2$  曲线不符合  $d^2$  定律; 环境温度高于 673 K 低于 773 K 时, 液滴直径变化与  $d^2$  定律吻合。环境压力对液滴蒸发的影响与环境温度密切相关, 环境温度低于 473 K 时, 随着环境压力的升高, 液滴蒸发速率变慢; 环境温度高于 673 K 时, 随着环境压力的升高液滴蒸发速率加快。

**关键词:** 煤油液滴; 蒸发特性; 实验研究

**中图分类号:** V433-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 02-0025-07

## Experimental investigation on evaporation process of kerosene droplets at high pressure and high temperature

LIU Song, NIE Wansheng, SU Lingyu, SHI Tianyi, LIU Yu

(Equipment Academy, PLA, Beijing 101416, China)

**Abstract:** An investigation on the evaporation characteristics of kerosene droplets in temperature range of 473~773 K and pressure range of 1.0~4.0 MPa was performed with high-speed CCD camera system and image processing technology in the static gas environment. The effect law of ambient temperature and pressure on the evaporating process of kerosene droplets were obtained. The experimental results shows that the kerosene droplet evaporation  $D^2$  curve does not conform to the  $d^2$  law when the ambient temperature is below 573 K, and the diameter variation of the kerosene droplet conforms to the  $d^2$  law when the ambient temperature is within 673~773 K. The influence of experimental pressure on droplet evaporation is closely related to ambient temperature. When the ambient temperature is lower than 473 K, the droplet evaporation rate becomes slow with the increase of ambient pressure. When the ambient temperature is higher than 673 K, the droplet evaporation rate is increased with the increase of ambient pressure.

**Keywords:** kerosene droplet; evaporation characteristic; experimental investigation

收稿日期: 2016-10-10; 修回日期: 2017-02-13

基金项目: 超临界压力蒸发过程及其对压力震荡的响应机理研究(6132390102)

作者简介: 刘松 (1987—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机推进技术

## 0 引言

煤油作为动力燃料燃烧释放能量产生动力,需要先后经过雾化、蒸发、混合和燃烧等过程,其中蒸发过程主要以液滴形态进行,因此研究煤油液滴的蒸发特性,对于分析燃烧过程有着重要的实际应用意义。目前国内外对液滴蒸发过程已进行全面的理论研究<sup>[1-5]</sup>,构建了多种液滴蒸发模型,并通过模型分析了液滴蒸发特性。针对燃料液滴蒸发过程开展了大量实验研究,国外 Hiroyasu 等人对丁烷与乙醇液滴进行了高温高压下的蒸发实验<sup>[6]</sup>,Ghassemi 等人进行了高温高压环境中的煤油液滴蒸发实验<sup>[7]</sup>,取得了比较系统的实验数据。国内研究多集中于理论模型优化、仿真计算方法改进,对液滴蒸发过程的实验研究较少。苏凌云对低压环境中与压力震荡环境中的液滴蒸发进行了分析<sup>[8]</sup>;马力对高温气流中的液滴蒸发特性进行了实验研究<sup>[9]</sup>;马小康等对柴油、正丁醇及其混合燃料液滴在不同环境温度中的蒸发特性进行了实验分析<sup>[10]</sup>。可以看出,国内实验多局限于低压环境,对高温高压环境中液滴蒸发缺乏深

入细致的研究。

本文利用搭建的高温高压液滴蒸发实验系统,对 RP-3 航空煤油单液滴蒸发过程进行了实验研究,得到了高温高压环境下煤油液滴蒸发过程特性,对于深入理解煤油燃料的燃烧过程具有重要意义。

## 1 实验系统与关键技术

### 1.1 实验系统设计

图 1 为实验系统设计原理图。实验原理为在同一高压环境中实现高、低温实验区空间分离,让液滴在低温区形成,再通过机械机构使形成的高温区移动,从而使液滴由低温环境迅速进入高温环境,研究其蒸发特性。该方法能够可靠地实现液滴生成与悬挂,并有效控制液滴初始状态。实验中采用 Vision Research 公司的 Phantom 7.5 高速摄影仪(拍摄帧频可达 160 000 pps),通过光学观测窗口对液滴的蒸发过程进行记录,并应用图像处理技术对采集图像进行分析处理,得到液滴蒸发数据。该系统可以实现实验环境压力 0.1~10 MPa 和温度 300~900 K 的可调、可控。

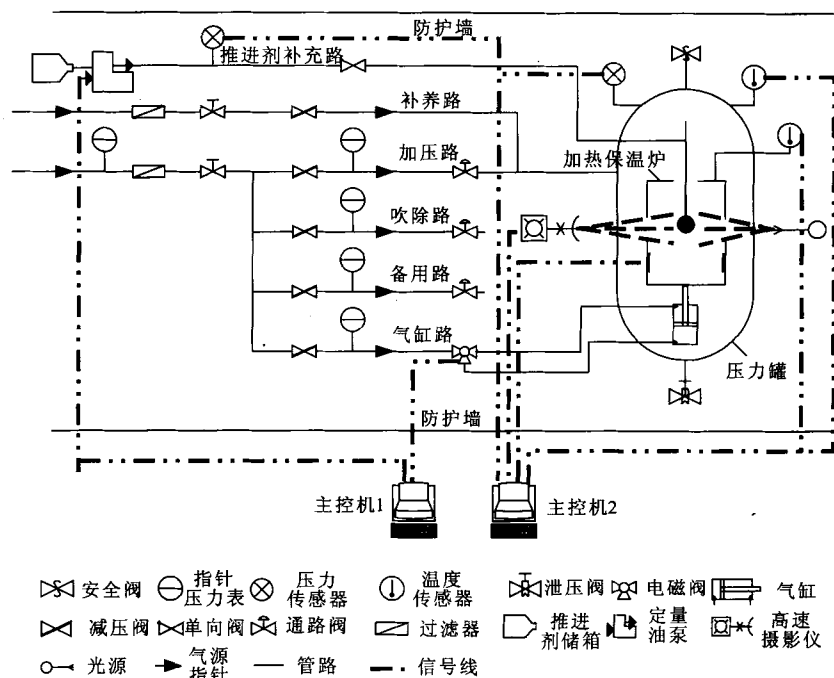


图 1 实验系统设计原理图

Fig. 1 Design principle diagram of experiment system

1.2 挂滴石英丝直径选取

Jeng-Renn Yang 等人研究发现, 悬挂液滴的石英丝会对液滴的蒸发过程有促进作用, 挂丝越粗, 作用越明显<sup>[11]</sup>。表 1 给出了相关文献以及本实验使用石英丝尺寸数据。通过对比可以看出, 本实验所采用石英丝直径与国外同类实验相比尺寸偏大, 这是因为在高温区移动过程中较细尺寸的石英丝极易损坏。 $d_0$  虽然较大, 但形成液滴的  $d_0/d_b$  比值在可以接受范围之内。

表 1 石英丝尺寸对比

Tab. 1 Comparison of quartz wire sizes

对比量	$d_0/\text{mm}$	$d_b/\text{mm}$	$d_0/d_b$
文献 [7]	1.52	0.35	4.34
文献 [11]	1	0.3	3.33
本实验	1.6	0.5	3.2

注:  $d_0$ : 液滴初始直径;  $d_b$ : 石英丝末端球体直径

1.3 液滴尺寸数据计算方法

通过对高速摄影拍摄的液滴变化序列图像进行识别和处理, 得到比较清晰的液滴图像, 采用文献 [10] 中的等效球体积法来计算液滴直径, 利用 Matlab 软件编辑图像处理程序, 得到液滴直径变化数据。

如图 2 所示, 随着液滴蒸发过程的进行,  $d/d_0$

逐渐变小 ( $d$  为液滴直径;  $d_b$  为石英丝末端直径), 石英丝在液滴中所占的体积比重越来越大, 蒸发过程由液滴蒸发逐渐过渡成为薄膜蒸发。与此同时, 石英丝对液滴蒸发的促进作用随蒸发过程进行会越来越明显, 导致液滴蒸发越来越快。实验表明, 挂滴实验时液滴蒸发末期所得到的液滴蒸发数据误差较大, 故本文中的实验不将  $d/d_b < 1.25$  的实验数纳入数据分析。

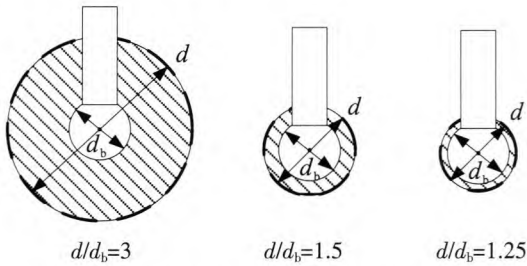


图 2 液滴直径与石英丝尺寸对比示意图

Fig. 2 Comparison of droplet diameter and quartz wire size

2 实验结果与数据分析

利用实验系统, 对煤油液滴在不同工况下进行实验, 研究了在一定压力条件下, 不同环境温度对煤油液滴蒸发过程的影响, 以及在一定温度条件下, 不同压力环境对蒸发过程的影响。图 3 为环境压力 2 MPa 和环境温度 473 K 下煤油液滴蒸发过程中拍摄到的不同时刻的图像。

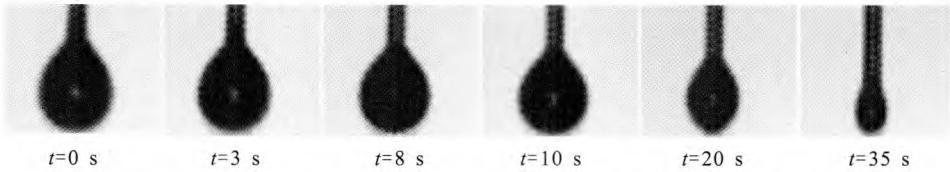


图 3 Pressure=2.0 MPa and temperature=473 K 时煤油液滴蒸发过程图像

Fig. 3 Images taken in kerosene droplet evaporation process as pressure=2.0 MPa and temperature=473 K

2.1 环境温度对蒸发过程影响

图 4 (a) 给出了压力环境为 2.0 MPa 时, 不同环境温度下相同初始温度和初始直径的煤油液滴在蒸发过程中  $D^2$  数值的变化曲线 (其中  $D^2 = d^2/d_0^2$ ,  $d$  为液滴直径,  $d_0$  为液滴蒸发初始直径)。由

图 4 (a) 可以看出, 同一环境压力下, 随着环境温度的升高, 煤油液滴生存时间越短, 液滴蒸发速率越大, 蒸发过程中  $D^2$  曲线逐渐由偏离  $d^2$  定律转变为符合。图 4 (a) 中虚线表明了曲线偏离线性关系的情况。

分析认为,煤油中主要成分为重质饱和烃与轻质饱和烃,其中轻质饱和烃比重质饱和烃有着更强的挥发性。在环境温度较低时(473 K 和 573 K),由环境向煤油液滴内部的热传导速率接近于液滴内部的组分质量扩散速率。液滴蒸发开始后,易蒸发的轻质组分蒸发较快,气液交界面处的轻质组分逐渐减少,同时液滴内部的轻质组分向外部扩散进行弥补,这样就形成了煤油液滴的蒸发按照组分挥发性强弱的次序,

依次蒸发的规律。因此煤油液滴蒸发过程中的直径平方变化偏离  $d^2$  定律。当环境温度较高时(673 K 和 773 K),轻质组分的蒸发速度大于其组分在液滴内部的传质速度,导致原本按照挥发性强弱次序依次蒸发的规律被打乱,液滴呈现整体一致蒸发的单组分液滴蒸发特性,因此煤油液滴蒸发曲线在高温下转变为符合  $d^2$  定律,煤油的多组分属性导致煤油液滴在不同温度下呈现出不同蒸发特性。

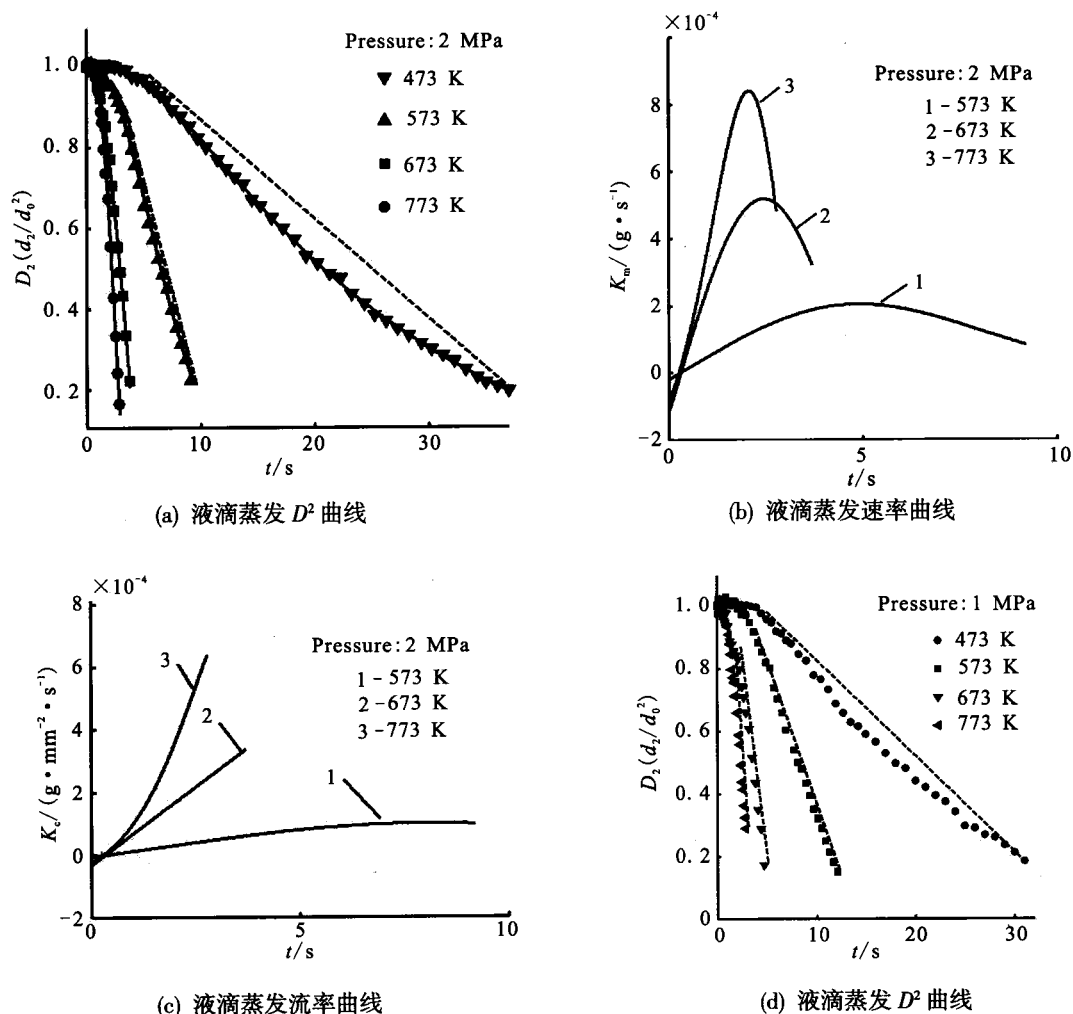


图 4 环境温度对液滴蒸发影响

Fig. 4 Effect of environmental temperature on droplet evaporation

对已经取得的液滴变化尺寸数据进行二阶高斯拟合,利用拟合曲线得到液滴蒸发速率  $K_m$  和蒸发流率  $K_e$ 。从图 4 中可以看出,高压下液滴由低温环境进入高温环境后,液滴受热开始膨胀,初始阶段液滴体积膨胀量在短时间内大于

液滴蒸发引起的体积损失量,使得计算蒸发速率与蒸发流率出现负值。随着液滴体积减小,蒸发速率与蒸发流率开始转为正值并增大。液滴蒸发速率的变化由液滴表面的蒸发流率与液滴蒸发面积共同决定,即  $K_m = S \times K_e$ 。液滴蒸发面积随蒸发

过程逐渐减小, 蒸发速率随蒸发过程逐渐变大, 两者在蒸发过程中的前后作用变化会产生蒸发速率的峰值现象。蒸发速率在蒸发过程中一直增大, 当环境温度较低时 (573 K), 液滴蒸发速率先增大后趋于平缓, 随着环境温度的升高 (673 K 和 773 K), 液滴蒸发速率增大趋势明显。当环境温度较高时, 蒸发速率一直增大至蒸发结束。

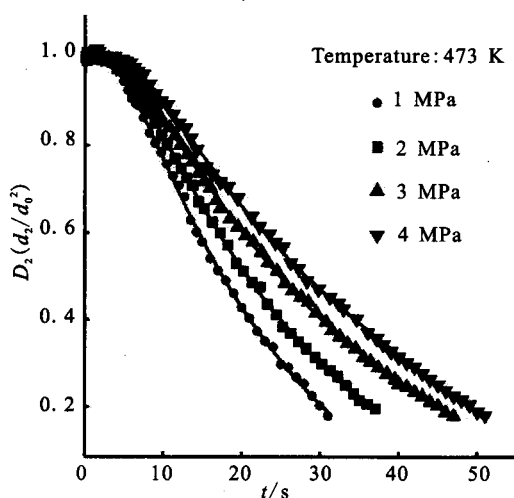
实验中还研究了环境压力为 1.0 MPa 时, 环境温度对液滴蒸发特性的影响规律, 如图 4 (d) 所示, 随着环境温度的升高液滴蒸发速率增大, 液滴蒸发曲线逐渐由偏离  $d^2$  定律向符合  $d^2$  定律

转变, 与环境压力 2.0 MPa 时环境温度影响规律一致。这表明环境温度对液滴蒸发特性的影响与环境压力相关性不明显。

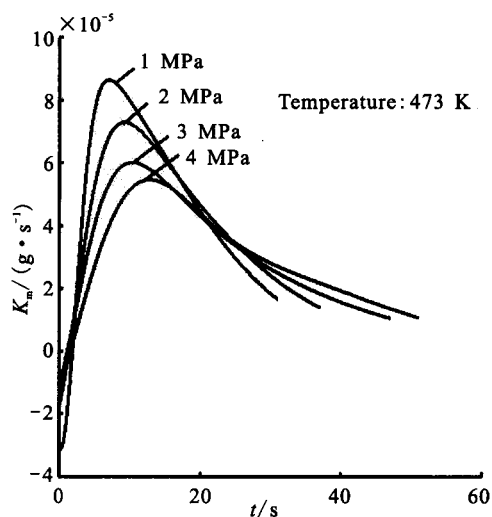
## 2.2 环境压力对蒸发特性的影响

### 2.2.1 低温环境下压力变化对煤油液滴蒸发特性的影响

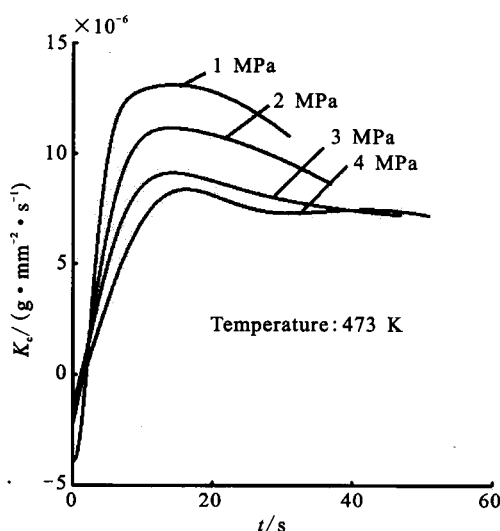
由图 5 (a) 可以看出, 环境温度  $T=473$  K 时, 随着环境压力增大, 液滴蒸发速率变慢, 生存时间变长。这是因为: 一方面压力升高会增强液滴表面与周围环境气体的传热, 提高液滴表面温度, 有利于液滴蒸发; 另一方面, 压力的升高



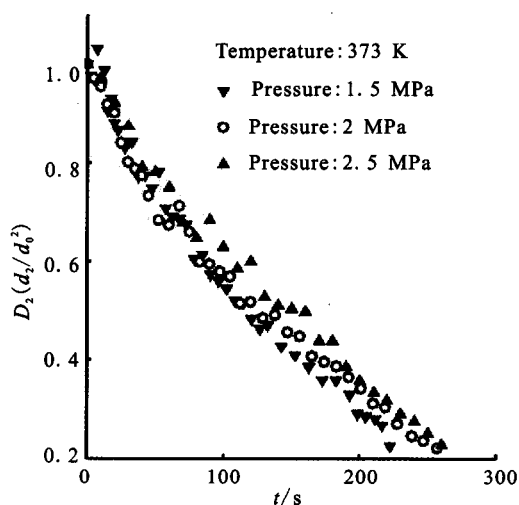
(a) 液滴蒸发  $D^2$  曲线



(b) 液滴蒸发速率曲线



(c) 液滴蒸发速率曲线



(d) 液滴蒸发  $D^2$  曲线

图 5 环境压力对液滴蒸发过程的影响

Fig. 5 Effect of environmental pressure on droplet evaporation

也会降低气液平衡时煤油蒸汽的组分浓度,从而削弱了煤油蒸汽从液滴表面向环境扩散的能力,抑制液滴蒸发。当环境温度较低时(473 K),压力升高对煤油蒸汽向周围环境扩散的抑制作用大于压力升高引起的液滴表面与周围环境气体传热增强对蒸发促进作用,从而表现为压力升高抑制了液滴蒸发。

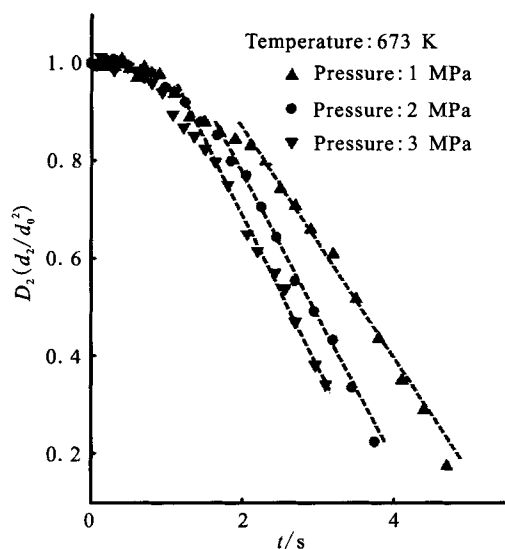
图 5 (a) 中显示的液滴蒸发曲线均不符合  $d^2$  定律,说明在环境温度恒定的条件下,环境压力的改变并不能影响液滴的蒸发曲线形态。环境压力对液滴蒸发的影响是通过气液界面的传热和组分扩散来实现的,对各组分的影响具有共性,因此不会引起煤油液滴的多组分蒸发性质转变。图 5 (b)、图 5 (c) 中曲线与图 4 (b)、图 4 (c) 相比,蒸发速率达到峰值过后,减小趋势放慢,蒸发流率没有在蒸发过程中一直增大,而是在快速增大后趋于平缓。蒸发流率没有一直增大是由于在较低的环境温度下(473 K),煤油液滴后期主要蒸发的重质饱和烃不足以支撑由快速蒸发的轻质饱和烃所带动的蒸发流率的增大,因此当轻质饱和烃含量下降时,蒸发流率随之增加的趋势减慢,重质饱和烃随着蒸发进行温度升高,从而保持了液滴蒸发流率的平稳。蒸发流率由增大转变为稳定,使得蒸发面积的作用提前占据主导,液滴蒸发速率峰值提前出现。

随着环境压力的增大,气液平衡时煤油蒸汽组分浓度减小,对煤油蒸汽从液滴表面向环境扩散不利,液滴蒸发流率因此变小,蒸发速率随流率变小而变小。

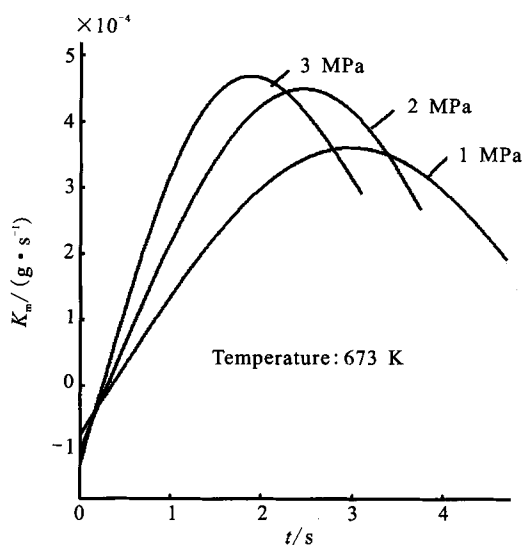
图 5 (d) 给出了环境温度 373 K 时不同压力下的液滴蒸发  $D^2$  曲线,可以看出随着环境压力的增大液滴蒸发速率变慢,液滴生存时间变长,与环境温度 473 K 时的变化趋势一致。

## 2.2.2 高温环境下压力变化对煤油液滴蒸发特性的影响

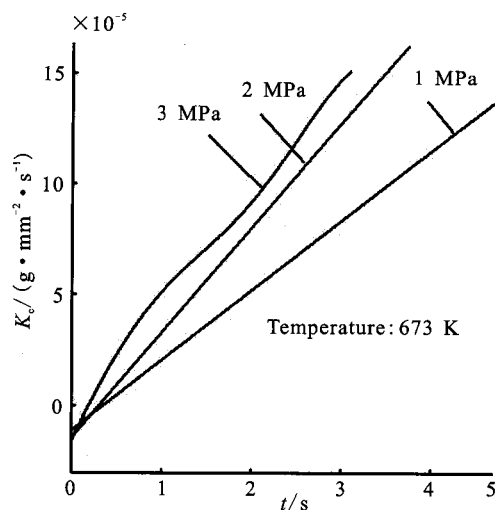
由图 6 (a) 中可以看出,在环境温度  $T=673$  K 时,随着环境压力的升高,煤油液滴的生存时间缩短,液滴蒸发过程中的  $D^2$  变化曲线在稳态蒸发阶段符合  $d^2$  定律。这是因为在高温环境下,压力的升高对液滴蒸发促进作用大于其产生的抑制作用,促进了液滴蒸发。2 种作用强弱变化导致煤油液滴在高温环境中与低温环境中有着不同蒸发规律。Hiroyasu H 在其研究中指出庚烷与乙醇分别在 423 K、393 K 左右存在转折温度点<sup>[6]</sup>,在转折温度点前,液滴寿命随环境压力增大而延长,转折温度点之后,液滴寿命随环境压力增大而缩小。实验中煤油是多种烷烃组分的混合物,不同组分在蒸发过程中对环境压力都有不同的转折点温度。本实验中煤油的具体转折点温度有待进一步研究。



(a) 液滴蒸发  $D^2$  曲线



(b) 液滴蒸发速率曲线



(c) 液滴蒸发流率曲线

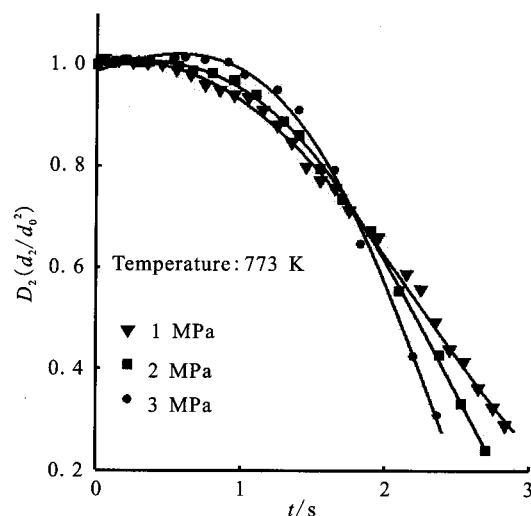
(d) 液滴蒸发  $D^2$  曲线

图6 环境压力对液滴蒸发影响

Fig. 6 Effect of environmental pressure on droplet evaporation

从图6(b)中可以看出,蒸发速率的变化曲线在不同压力下均呈现出先增大后减小的趋势,但是与环境温度较低时相比(图5(b)),煤油液滴达到蒸发速率峰值的时间与低温环境相比占整个液滴生存时间的比重增加。从图6(c)中可以看出,煤油液滴的蒸发流率在不同的压力下均呈增大趋势,环境压力越高增大越明显。

图6(d)给出了环境温度773 K时环境压力对液滴蒸发特性的影响,可以看出液滴蒸发 $D^2$ 曲线与环境温度673 K时规律一致。

综合上述分析可知,环境压力对液滴蒸发过程的影响主要有2个方面:一方面压力升高会增强液滴表面与周围环境气体的传热,提高液滴表面温度,有利于液滴蒸发;另一方面,压力的升高也会降低气液平衡时煤油蒸汽的组分浓度,从而削弱了煤油蒸汽从液滴表面向环境扩散的能力,抑制液滴蒸发。环境温度较低时,压力升高对液滴蒸发的抑制作用占主导,环境温度较高时,压力升高对液滴蒸发的促进作用占主导。

### 3 结论

1) 环境温度对液滴蒸发过程的影响与环境压力的相关性不明显。当环境温度低于573 K

时,煤油液滴在稳态蒸发过程的 $D^2$ 曲线不符合经典的 $d^2$ 定律,表现为多组分液滴蒸发的特点;当环境温度高于673 K时煤油液滴蒸发过程的 $D^2$ 曲线符合 $d^2$ 定律,此时,多组分煤油液滴在高温环境中表现出了单组分液滴蒸发性质。

2) 环境压力对液滴蒸发过程的影响与环境温度明显相关。当环境温度低于473 K时,环境压力由1.0 MPa升高至4.0 MPa,煤油液滴蒸发速率变慢,液滴生存时间变长;当环境温度高于673 K时,煤油液滴蒸发速率增大,液滴生存时间变短。

#### 参考文献:

- [1] SPALDING D B. Combustion of liquid fuels [J]. Symposium on combustion, 1953, 4(1): 847-864.
- [2] KADOTA T, HIROYASU H. Evaporation of a single droplet at elevated pressures and temperatures: 2nd report, theoretical study [J]. Bulletin of jsme, 1976, 19 (138): 1515-1521.
- [3] 庄逢辰,陈新华. 燃料液滴高压蒸发理论[J]. 工程热物理学报, 1982, 3(3): 277-283.
- [4] 周进,吴道洪,庄逢辰. 液体推进剂液滴高压蒸发研究[J]. 国防科技大学学报, 1993, 15(2): 1-5.

(下转第39页)

- [6] 黎红, 杨林億. 锂 / 亚硫酸氯电池的发展现状[J]. 船电技术, 2009, 29(8): 57-60.
- [7] 康文政, 李文成. 电动自行车用锂电池 [J]. 中国自行车, 2013, 26(10): 78-80.
- [8] 崔妍, 江卫军, 张溪, 等. 三元锂电池将成为后起之秀[J]. 中国金属通报, 2013, 20(28): 30-31.
- [9] 游保平. 动力锂电池困局[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(6): 652-654.
- [10] 墨柯. 下一代二次锂电池发展趋势及展望[J]. 新材料产业, 2013(10): 4-8.
- [11] 刘云霞, 詹晖. 锂硫电池性能改进的研究进展[J]. 电池, 2013, 43(5): 296-299.
- [12] 李伟, 姚岑, 吴兴隆, 等. 高比能锂-硫电池研究进展[J]. 分子科学学报, 2013, 29(6): 448-460.
- [13] 刘春娜. 锂硫电池研发动态 [J]. 电源技术, 2013, 37(7): 1105-1106.
- [14] 索鉴敏, 胡勇胜, 李泓, 等. 高比能锂硫二次电池研究进展[J]. 科学通报, 2013, 58(31): 3172-3188.
- [15] 胡文艳. 钕铁硼永磁材料的性能及研究进展[J]. 现代电子技术, 2012, 35(2): 151-155.
- [16] 杨金波, 韩景智, 刘顺荃, 等. 新型永磁材料的研究[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43 (10): 1188-1205.
- [17] 朱俊. 稀土永磁电机的应用现状及其发展趋势[J]. 中国重型装备, 2008, 24(4): 38-42.
- [18] 肖军. 解读直流无刷永磁电机[J]. 电气工程应用, 2012, 27(4): 23-29.
- [19] 范瑞祥, 田玉蓉, 黄兵. 新一代运载火箭增压技术研究[J]. 火箭推进, 2012, 38(4): 9-16.
- FAN Ruixiang, TIAN Yurong, HUANG Bing. Study on pressurization of new generation launch vehicle [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(4): 9-16.

(编辑: 马 杰)

(上接第 31 页)

- [5] 何博, 肖强, 聂万胜, 等. 燃烧室高压环境下喷雾液滴非稳态蒸发数值研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(4): 55-60.
- [6] HIROYASU H, KADOTA T, SENDA T, et al. Evaporation of a single droplet at elevated pressures and temperatures: part1, experimental study[J]. Transactions of the Japan society of mechanical engineers, 1974, 40(339): 3147-3154.
- [7] GHASSEMI H, BAEK S W, KHAN Q S. Experimental study on evaporation of kerosene droplets at elevated pressures and temperatures[J]. Combustion science & technology, 2006, 9(178): 1669-1684.
- [8] 苏凌宇. 负压环境下燃料液滴蒸发过程的试验和理论研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- [9] 马力, 仇性启, 王健, 等. 单液滴蒸发影响因素实验研究[J]. 石油化工, 2013, 33(1): 103-106.
- [10] 马小康, 张付军, 韩恺, 等. 柴油、正丁醇及其混合燃料单液滴蒸发特性的试验[J]. 内燃机学报, 2016, 34(1): 48-52.
- [11] YANG J R, WONG S C. An experimental and theoretical study of the effects of heat conduction through the support fiber on the evaporation of a droplet in a weakly convective flow [J]. Ineternation journal of heat & mass transfer, 2002, 45(23): 4589-4598.

(编辑: 马 杰)