

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.03.001

燃料液滴在超临界环境中蒸发和燃烧的研究进展

范 玮¹ 靳 乐¹ 孙 亮²

(1. 西北工业大学动力与能源学院, 西安, 710072;

2. 西安航天动力研究所, 西安, 710100)

摘要:随着高超声速飞行器的发展,未来高性能动力装置的燃烧室温度和压力将越来越高,当燃烧环境达到超临界时,液态燃料的蒸发和燃烧过程将涉及高梯度传热传质和临界相变等复杂因素,使得雾化、蒸发和燃烧规律发生改变。本文对燃料液滴在超临界环境中蒸发和燃烧的相关研究进行了综述,总结了已有的重要研究成果,阐述了研究中急需解决的关键问题,为后续深入研究提供参考。

关键词:液滴;超临界;蒸发;燃烧

中图分类号:V231.2

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2016)03-0291-12

Review on Investigations of Droplet Evaporation and Combustion of Liquid Fuel in Supercritical Environment

Fan Wei¹, Jin Le¹, Sun Liang²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an, 710100, China)

Abstract: With the development of hypersonic aircrafts, the temperature and pressure of combustor would significantly increase for high-performance engines in the future, and the supercritical condition will gradually appear in the engine combustor. As the combustor environment reaches to a supercritical condition, the critical phase transition, high-gradient heat and mass transfer will appear, thus leading to different processes of fuel injection, evaporation and combustion from ones under the normal condition. Therefore, an overall related research review about fuel droplet evaporation and combustion in a supercritical environment is provided in this study. Significant results to date are summarized and challenges for subsequent study are clarified, which may be helpful to the further exploration in this area.

Key words: droplet; supercritical; evaporation; combustion

高超声速飞行器的研制受到了世界各国的重视,它将是国家未来科技发展的重中之重,对保障

国家安全和提升综合国力具有重大的战略意义^[1]。高超声速飞行器的发展对与之匹配的高性能动力

收稿日期:2016-04-29;修订日期:2016-05-24

作者简介:范玮,女,1966年4月生,教授,博士生导师,研究方向为航空航天发动机中的燃烧问题、脉冲爆震发动机应用基础研究、燃烧理论及应用等,发表学术论文220余篇,出版专著2部,教材2部,申报专利60余项,授权发明专利20项,获省部级科技奖励4次。

通信作者:范玮,E-mail:weifan419@nwpu.edu.cn。

引用格式:范玮,靳乐,孙亮. 燃料液滴在超临界环境中蒸发和燃烧的研究进展[J]. 南京航空航天大学学报,2016,48(3):291-302. Fan Wei, Jin Le, Sun Liang. Review on investigations of droplet evaporation and combustion of liquid fuel in supercritical environment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(3): 291-302.

装置的需求越来越强烈^[2-3],相比现有的航空航天动力装置,未来高性能发动机由于高超声速和高推重比的要求,使得发动机燃烧室内的温度和压力越来越高,逐渐在工作过程中出现温度和压力超过燃油临界参数的超临界环境^[4]。由于航空航天动力装置均为体积受限系统,应首选能量密度高、易于获得和使用安全的液态碳氢燃料作为燃料,因此,将来肯定会出现液态燃料在超临界燃烧室中喷射、雾化和燃烧的工况。图1是未来高性能航空航天推进装置的燃烧室中可能出现的工况示意图^[5]。

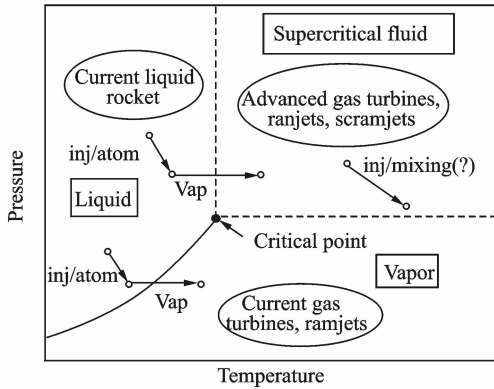


图1 未来高性能航空航天推进装置燃烧室工况的示意图

Fig. 1 Working condition of high performance aerospace engine combustor in the future

当发动机的燃烧室环境达到超临界状态,燃料在组织燃烧过程中雾化形成的液滴边界也可能被加温至超临界状态,超临界燃料具有一些迥然不同的特性:无表面张力,蒸发潜热为零,兼具气体的低黏度和液体的高密度以及介于气体和液体之间的高扩散系数,且物性参数随温度和压力的改变非常敏感^[6]。所以,当液态燃料在超临界燃烧室中燃烧时,燃料和环境气体间的清晰界面会慢慢消失,燃料的燃烧过程将从两相扩散燃烧逐渐向多相扩散燃烧过渡,使其燃烧规律与常规工况产生显著差异,从而造成燃烧室整体性能和工作稳定性的改变。因此,为了探索液态燃料在超临界燃烧室内的

燃烧规律,有必要率先围绕燃料液滴的超临界蒸发和燃烧特性开展相关研究,从细观和微观机理上揭示超临界燃烧过程的主要特性。

总之,液滴在超临界环境中的蒸发和燃烧过程涉及诸多复杂因素,熟悉燃料超临界蒸发和燃烧所伴随的现象并掌握液滴蒸发和燃烧速率的控制机理,发展适合超临界环境下的雾化、蒸发和燃烧模型刻不容缓。近年来,液态燃料在超临界环境中的蒸发和燃烧特性研究虽然已经在国内外广泛开展,但鉴于其复杂性,至今未能构建出系统的理论框架。本文主要对燃料液滴在超临界环境中蒸发和燃烧的研究进行了综述,总结了已有研究中取得的重要成果,分析研究中所急需解决的问题,以求为后续深入研究提供帮助。

1 常规蒸发理论的不适用性

多数亚临界蒸发的研究认为液相流场发展的特征时间远大于气相流场,在此基础上作准稳态近似,忽略质量、动量和能量守恒方程中的瞬变项,便能够在准稳态近似的基础上推导液滴蒸发的 D^2 定律^[7-8],即

$$d(t)^2 = d_0^2 - \beta_v t \quad (1)$$

式中蒸发常数 β_v 可表示为

$$\beta_v = \frac{8\rho_{gs}D_{gs}}{\rho_l} \ln(1+B) \quad (2)$$

式中: ρ_{gs} 代表气体密度; D_{gs} 代表扩散系数; ρ_l 代表液体密度; B 为质量交换数。亚临界条件下认为 β_v 为定值,即液滴直径的平方随时间线性减小。

而研究表明,当燃料液滴在超临界环境中蒸发时基于液滴边界处建立的蒸发模型已不再适用^[8-10]。文献[8]中指出,对于戊烷至十二烷之间的液态碳氢燃料,当环境温度和压力超过其临界点温度和压力两倍以上时,液滴在蒸发过程中表面工质可以达到超临界状态,此时液滴与环境间的清晰边界已不复存在。文献[11]中也通过实验研究观测到了液滴边界的消失现象,如图2所示。

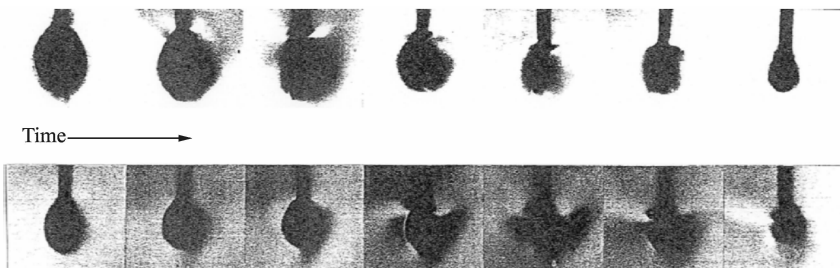


图2 文献[11]实验中观测到的液滴蒸发图像

Fig. 2 Droplet evaporation image in Ref. [11]

当液滴表面达到超临界状态并发生边界迁移时,液滴的表面张力和汽化潜热降为零,蒸发区域内的燃料质量分数呈连续变化趋势^[12-13],整个蒸发过程基本以工质的超临界扩散为主,其物理模型如图3所示。此外,超临界流体具有较高的气相溶解性,当液滴边界消失后,环境气体会溶入液滴内部,从而进一步增加了研究难度。

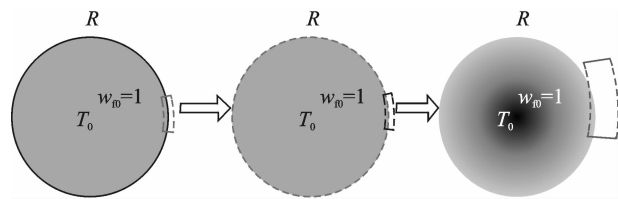


图3 液滴表面出现边界迁移时的物理模型

Fig. 3 Physical model of supercritical transition on droplet surface

2 数值和理论研究中涉及的关键问题

学者们为了探索超临界环境中的液滴蒸发和燃烧特性已经开展了大量的相关研究,在数值和理论研究方面,Rosner等人^[14]早在1973年便从理论上分析了液滴达到超临界蒸发模态所需的温度和压力条件,并对液滴在近临界点处的蒸发过程进行了分析,他们在假定的球面对称模型上忽略了气相和液相中的牵连运动,基于拉乌尔定律构建了液滴表面处的热力学平衡方程,但该模型并未考虑液滴表面的气相溶解性,且模型中的热传导系数、组分扩散系数和热扩散系数等均采用了相对简单的恒定平均值法处理,故此模型用于定量分析时难免会造成一定误差。因此,为了提高分析模型的准确性和科学性,在数值和理论研究中主要存在以下几个关键问题需要特殊对待。

2.1 真实气体效应和状态方程的选择

学者们在早期的研究中^[15-18]已经发现,当环境压力较低时,采用理想气体状态方程分析液滴常规的蒸发过程能够得到较好的结果,而当环境压力升高并逐渐达到超临界状态时,燃料液滴的物性参数随温度和压力的变化将非常敏感(尤其在临界点附近),此时再采用理想气体状态方程进行求解,势必会造成严重的误差,而应该采用考虑真实气体效应的状态方程进行求解^[19-21]。

能够满足液滴超临界蒸发和燃烧过程工质物性计算要求的状态方程主要分为两类:多常数状态方程和立体型状态方程,其中多常数状态方程中最常采用的是Lee和Kesler提出的LK状态方程^[22],而立体型状态方程中采用较多的是Redlich

和Kwong提出的RK状态方程^[23]、Soave在RK方程基础上改进的SRK状态方程^[24]以及Peng和Robinson提出的PR^[25]状态方程。与多常数状态方程相比,立体型状态方程的计算精度和可操作性较高,近年来得到了广泛应用。Peng等人^[25]曾在研究中对分析3种常用立体型状态方程在计算不同物性参数时的优缺点,指出RK方程和SRK方程会在预测液相密度时造成一定误差,而PR状态方程的求解精度较之RK方程和SRK方程更高。Starling^[26]曾指出,SRK状态方程对小分子气体的物性计算结果相对准确,但对于液体(如液态碳氢燃料等)的比体积计算会严重偏高。Zhu等人^[27]在液滴的超临界蒸发研究中着重分析了立体型状态方程的适用性,并发现PR方程既能用于气相也能用于液相的状态方程,且计算精度优于RK和SRK方程。

李云清等人^[28-29]曾以实际气体的立体型状态方程为基础,分别采用RK,SRK和PR三种状态方程对比研究了庚烷液滴在超临界氮气环境中的蒸发和燃烧过程,发现PR状态方程在气液相平衡、热物性参数以及液滴直径变化的计算上都能够与实验数据更好地吻合,而SRK方程对热物性参数和液滴蒸发寿命的计算值偏小,RK方程的计算结果更是出现了明显的误差^[28]。李云清等人^[30]还分别利用VDW,RK,SRK和PR状态方程对甲烷、乙烯、甲醇和乙醇在亚临界及超临界状态下的比热容进行了理论计算,发现PR状态方程在亚临界和超临界状态下的综合计算精度最高,且稳定性最好。赵卫东等人^[31-32]在详细考虑了高压下的非理想气体效应、液滴表面的热动力相平衡和瞬态气液相控制方程的基础上,在综合对比后也选择PR状态方程构建了二甲醚液滴在超临界氮气环境中的蒸发模型,并得到了较好的计算结果。Jia等人^[33]曾在液滴超临界蒸发的研究中发现,与RK方程相比,PR状态方程在计算正己烷平衡态摩尔分数时能够得到更好的结果,同时当环境压力逐渐升高并接近临界状态时,PR状态方程对于气相和液相平衡边界的预测更准确。另外,Chang等人^[13,34]也曾使用PR状态方程分析液滴超临界蒸发和燃烧过程中得到了更为精确的分析结果。

综上所述,研究液滴在超临界环境中的蒸发和燃烧现象时理想气体状态方程已不再适用,较之RK和SRK状态方程,研究者们更多地采用了精度更高且稳定性更好的PR状态方程。由于PR状态方程中参数的取值取决于物质的临界性质,因

此, 研究中还需要根据实际情况对模型中的部分参数进行定量地修正, 从而提高模型的精度。

2.2 液滴的气相溶解性

在液滴蒸发的理想模型中, 环境压力相对较低, 液滴在整个蒸发周期内气液边界始终清晰, 环境气体在液滴内的溶解量很小, 通常可以忽略。而高压工况下, 环境气体在液滴中的溶解性增强, 气体的溶解效应可以改变液滴的物理属性, 从而影响蒸发特性。赵卫东等人^[31]曾在研究中发现当对比压力 $p_r = 2$ 时, 氮气在二甲醚中溶解的最大摩尔分数可以达到 20% 左右, 如图 4 所示。

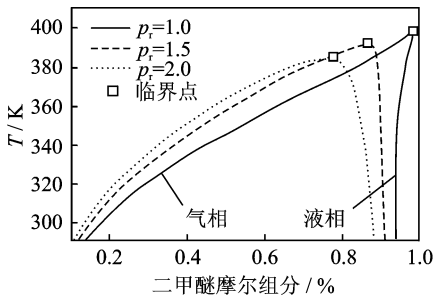


图4 二甲醚/氮气相平衡摩尔浓度分布图

Fig. 4 Molar concentration distribution for phase equilibrium of DME/nitrogen

另外, 由于超临界流体具有较高的气相溶解性, 当液滴边界发生临界相变后, 液滴的气液界面消失, 环境气体在液滴中的溶解量显著提高, 使得单组分的液滴在气液界面变成多组分液体, 以致于液滴边界的组分输运方式发生明显改变。因此, 研究液滴在超临界环境中蒸发和燃烧时必须要考虑环境气体在液滴内的溶解效应。

Manrique 和 Borman^[35]是最早在数值研究中考虑环境气体溶解效应的研究人员, 他们发现随着环境压力的升高, 环境气体的溶解性增强, 液滴的蒸发速率增大。Delplanque 等人^[36]通过研究指出当蒸发环境超过临界状态时环境气体在液滴内溶解的摩尔分数可达到 20%~40%^[18], 而气体的溶解会影响气液平衡方程的建立。Jia 等人^[33]理论研究了初温为 300 K 的正己烷液滴分别在亚临界和超临界氮气环境中的蒸发特性, 发现当环境压力较低时, 是否考虑环境气体的溶解性对预测液滴蒸发寿命的影响较小, 而当环境压力升高至临界点以上时, 如果不考虑环境气体的溶解效应, 模型对蒸发寿命的预测值会严重偏低。Sengers 等人^[37]通过理论模型研究了气体在处于临界点附近液滴内的组分输运特性, 指出在气液相平衡计算中考虑环境气体溶解效应的重要性。Hohmann 和 Renz^[38]

数值研究了环境气体的溶解效应对液滴超临界蒸发特性的影响, 指出液滴在超临界环境中蒸发时环境气体的溶解效应不能忽略。

国内, 李云清等人^[39]综合考虑了环境气体在液相中的溶解效应以及液滴内部液相域和周围气相域的质量、组分和能量守恒方程, 发现超临界压力下氮气在液相中的溶解性远强于亚临界工况, 且当液滴表面温度升高至临界点时, 液滴边界附近区域液相与气相中的燃料质量分数近似相等。王宏楠等人^[40]也在研究壬烷液滴超临界蒸发时考虑了由于环境气体在液滴内的溶解效应所导致的气液平衡边界的改变, 得到了更为精确的计算结果。

总之, 当液滴蒸发的环境压力较高时, 压力对流体的热物性会产生较大影响, 通常压力愈高, 相变焓愈低, 溶于液滴的氮气愈多^[31]。同时, 液滴的气相溶解性和湿球温度均随环境压力的升高而升高^[8], 从而对液滴蒸发特性的影响越来越严重, 当液滴温度达到接近临界温度时尤为明显。另外, 值得特别说明的是, 当液滴边界发生迁移时, 蒸发过程将基本以超临界扩散为主^[41-42], 此时液滴和环境气体参数对扩散规律的影响还不得而知, 有待在后续研究中进一步探明。

2.3 边界迁移和临界点物性的敏感性

当液滴边界发生相变迁移时, 处于临界点附近的工质表面张力和蒸发潜热瞬间消失, 工质的密度、黏性、导热率和比热容等物性和输运参数对温度和压力的变化非常敏感^[43-45], 甚至会发生突越性改变, 很难通过半经验型状态方程准确描述。另外, 对于临界物性的准确预测还直接影响到对液滴边界迁移条件的预测, 以及对组分输运和超临界扩散系数的计算, 物性的求解误差可能引起严重的模型误差^[10, 46]。

因此, 在建立液滴超临界蒸发模型时需要将液滴发生边界迁移后的蒸发过程进行区别对待, 把液滴表面视为组分、密度和温度连续变化的小区域^[13, 42], 充分考虑临界工质物性的敏感性和输运特性。Umemura 等人^[13]通过理论建模研究了正丁烷液滴在超临界氮气环境中的蒸发规律, 将液滴中未达到临界状态的内部液核和达到临界状态的边界区域分别对待, 通过单独处理临界状态的物性变化来解析内部液核直径的衰减变小。Curtis 等人^[15]在数值研究中发现液滴边界迁移后超临界扩散过程将成为影响蒸发的关键因素, 而临界点附近工质物性和输运参数的剧烈变化是导致超临界蒸发特性显著不同的根本原因。Zhang 等人^[47-49]充

分考虑了临界物性的多变性,采用立方型状态方程处理液相和气相区域物性参数的协同效应以及液相的内循环作用,数值研究了液滴在超临界环境中的蒸发特性,得到了较为精确的结果。

总而言之,当液滴表面发生临界相变后,对液滴临界物性的计算精度直接关系到对液滴蒸发和燃烧寿命预测的准确性^[50],所以在液滴超临界蒸发和燃烧的数值和理论研究中,必须对工质在临界点附近的物性和输运参数做更为细致的处理和修正,必要时应结合实验测量数据,以求达到更高的模型精度。

2.4 多组分燃料的物性不统一性

现有航空航天发动机和内燃机的常用液态燃料中大多属于混合物型燃料^[51-52],燃料的成分构成较为复杂,以 RP-3 航空煤油为例,其构成组分多达上千种^[53-54],且成分会随型号、产地的改变而改变,造成研究其超临界物性时的困难。虽然现有的研究也有关于多组分气液相平衡的计算理论^[8, 55],但其对于各组分间的相互作用尚未形成统一论,混合物型燃料的物性并非各组分物性的简单组合与平均,多组分燃料的气液平衡可能会受到燃料中某单一组分物性的显著影响。

Hsieh 等人^[18]对比研究了正戊烷液滴与正戊烷/正辛烷混合物液滴(正辛烷质量分数为28.4%)在超临界环境中的蒸发生态,研究发现,高临界参数组分正辛烷的加入能够明显提高混合物液滴的临界温度,从而提高液滴表面的蒸发温度和蒸发寿命。Stengele 等人^[56]采用实验和数值模拟相结合的手段,研究了简化的双组分模型液滴在超临界环境中的蒸发特性,对比分析了混合物与纯净物燃料液滴在高压环境下蒸发生态的差异,指出了多组分燃料液滴超临界蒸发的复杂性。

为了研究多组分燃料液滴在超临界环境中的蒸发和燃烧特性,首先需要从其混合物性和输运参数的计算入手。目前,对于多组分燃料混合物性的研究多以寻求替代燃料为主^[57-58]。替代燃料是指采用少数几种碳氢化合物组成的混合物来模拟真实碳氢燃料热物理性质^[59]。Lin 等人^[60]对常用的20种柴油替代模型进行了评估,对临界点、密度、比热容、黏性和导热性等方面进行了比较,分析了不同替代模型的优缺点以及替代模型与真实燃料物性间的差异性。范学军等人^[54]通过替代燃料法和广义对应状态法则对 RP-3 航空煤油的热物性进行了理论和数值研究,发展了三组分替代模型,得到了不同温度和压力下煤油的密度变化曲线。

除了准确选择替代燃料外,还必须恰当选择混合规则。混合规则是指将纯净物组分的性质和对应的混合物性质进行关联的函数关系式。学者们关于混合规则已经开展了一定的研究工作,其中可以用作超临界物性参数计算的混合规则主要包括:Van Der Waals 混合规则^[61]、Stryjek-Vera 混合规则^[62]、Schwartz 等人发展的混合规则^[63]和 Reid 等人发展的混合规则^[64]等。除了正确选择替代燃料和混合规则外,还应该了解超临界输运参数的计算方法^[65-67]。Ely 等人^[68]曾在专著中提到了能够用于碳氢化合物超临界物性和输运参数计算的 SUPERTRAPP 软件。Congiunti 等人^[69]曾在研究中分别采用不同的输运参数计算方法,对流体的超临界物性进行了计算,并分析了不同计算方法的优劣。

然而,虽然学者们针对多组分燃料混合物性和输运参数的计算方法开展了大量的相关研究,解决了部分基础性难题,但基于现有的理论成果仍然无法实现高精度的数值和理论计算。学者们在多组分燃料超临界蒸发和燃烧理论模型的建立过程中大多都对特定的物理过程进行了简化,尽管巧妙地回避了一些棘手难题,但难免会引入模型误差。因此,关于多组分燃料液滴的超临界蒸发和燃烧的研究方面才刚刚起步,仍然存在大量的实际问题需要解决。

通过上述分析可知,现有的数值和理论研究已经针对液滴超临界蒸发和燃烧过程的真实气体效应、边界迁移现象和环境气体的溶解效应等问题开展了定量分析,部分研究还分别对超临界和亚临界工况、纯净物和混合物燃料的蒸发和燃烧规律进行了对比,分析了超临界环境下蒸发加速现象与边界迁移现象之间的逻辑关系。然而,由于液滴超临界蒸发和燃烧过程的复杂性,目前对于其蒸发和燃烧过程中组分和能量输运的详细机理仍不够明确,对于液滴边界迁移过程和环境气体溶解的理论建模还难以完成,因此,发展液滴超临界蒸发和燃烧的精确物理模型依然任重而道远。

3 实验研究的主要进展

现有的实验研究与数值和理论研究的侧重点有所不同,研究者们更多地关注环境温度、环境压力、初始温度和氧气浓度等参数对液滴蒸发和燃烧寿命、点火延迟现象、液滴直径变化和火焰形态发展的影响。研究液滴在超临界环境中的蒸发和燃烧现象,涉及在恶劣实验工况下的细观和微观测试,故开展实验研究的难度较大,目前开展的相关

研究工作还较少。目前,在液滴超临界蒸发和燃烧的实验研究方面需要重点关注的问题主要包括以下几个方面。

3.1 高温高压环境中的液滴悬停

为了研究液滴在超临界环境中的蒸发和燃烧规律,首先需要形成温度和压力参数可调且便于光学观测的高温高压环境。随着科学技术的发展,目前基于各类加热方式的高温高压容腔已经发展得相对成熟,用作光学观测的视窗材料(包括石英玻璃、铝硅盐酸玻璃和蓝宝石玻璃等)也存在较为成熟的产品,故本文不再赘述。由于高温高压的超临界环境对密封和保温要求比较高,所以液滴的形成和蒸发过程不能与外界环境接触,且不能引起容腔内温度场的明显改变,这就对液滴的稳定悬停提出了严峻挑战。

为了实现燃料液滴在高温高压环境中的稳定悬停,Nomura 等人^[11]采用了带圆球形头部的二氧化硅纤维丝作为液滴悬停器,并在高压容腔底部将常温的庚烷液滴注射到悬停器头部位置,待液滴稳定后迅速升高至位于高压容腔上部已加热至特定温度的超临界容腔内,实验系统如图5所示。该装置和方法的优点在于液滴的初始体积便于控制,且液滴初温基本等于被注射前的工质温度,便于实验测量;但缺点是高温容腔与液滴间未采取有效的隔热措施,液滴生成和移动过程中初始温度会升高,同时,液滴移动过程中难免会导致抖动或滑落,故实验存在一定的失误率。

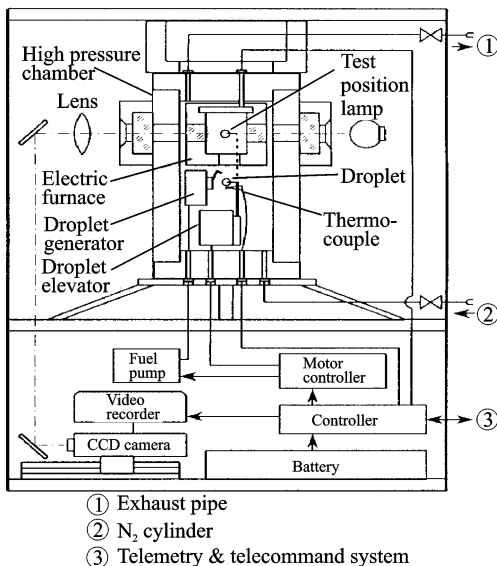


图5 文献[11]研究液滴蒸发特性所采用的实验装置

Fig. 5 Experimental apparatus for droplet evaporation in Ref. [11]

Kadota 和 Segawa^[70-71]采用了与 Nomura^[11]相似的实验系统,但为了降低高温容腔对液滴的导

热效应,他们在高温容腔与液滴之间安装了防辐射铝盘,有效降低了液滴生成和移动过程中的温升效应。另外,为了提高实验效率,他们还对比液滴的生成装置做了改进,保证了实验的高效性,如图6所示。Ghassemi 等人^[72-73]采用了与 Nomura^[11]和 Kadota 等人^[70-71]相似的实验系统,但为了避免液滴移动过程中可能引起的抖动和滑落,他们将 Nomura 实验系统中移动液滴改为移动加热容腔,该装置的设计能够充分保证液滴初始状态的稳定,如图7所示。此外,Hartfield^[74]和 Chauveau 等人^[75]也采用了带圆球头部玻璃纤维悬停液滴的方式分别对正庚烷液滴在高温高压环境中的超临界蒸发特性进行了研究。

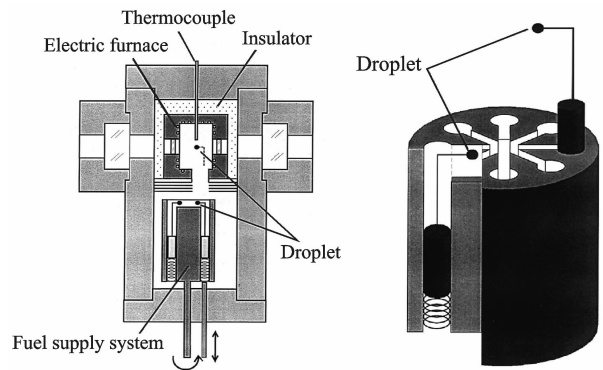


图6 文献[70,71]中研究液滴蒸发特性所采用的实验装置

Fig. 6 Experimental apparatus for droplet evaporation in Refs. [70,71]

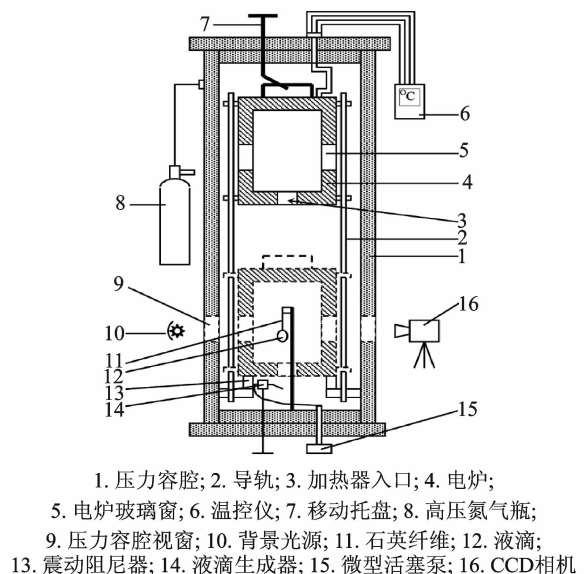


图7 文献[72,73]中的实验装置

Fig. 7 Experimental apparatus used in Refs. [72,73]

为了在上述实验系统的基础之上降低系统复杂度,提高实验的可操作性,靳乐等人^[76]将燃料供

给装置与高温容腔进行了分离,整个实验系统保持供压平衡,燃油液滴由容腔上方的储油罐流经导油管并最终在处于容腔中心处的石英纤维上悬停,为了保证液滴初始温度的精准控制,他们还在暴露于容腔内部的导油管部分安装了恒温水槽,实验系统如图8所示。

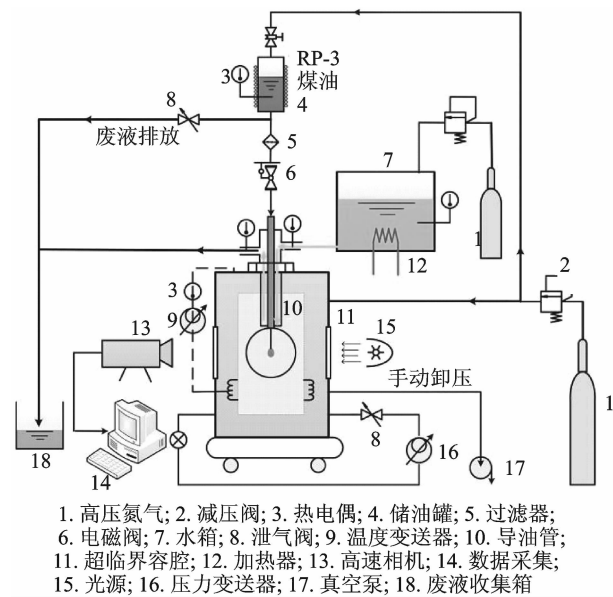


图8 文献[76]所采用的实验系统

Fig. 8 Experimental apparatus used in Ref. [76]

可见,采用带头部纤维丝悬停液滴的方式在实验中被研究者们广泛采用,通过不断改进已经能够获得较好的实验效果,但这种方法形成的液滴中心包裹了纤维的圆球头部,导致实验过程中无法观测到液滴蒸发和燃烧的完整周期(即液滴蒸发至直径为零),尤其当液滴初温较高时,液滴的黏性和表面张力下降,纤维头部能够悬停的液滴直径仅比头部直径大30%左右^[76],使得实验结论的科学性大大降低,很难模拟实际发动机燃烧室中液滴的蒸发和燃烧过程。

纤维丝悬停液滴的方式往往只能用作研究液滴形态和寿命的变化,而无法实时检测液滴蒸发和燃烧过程中内部温度的变化。为了解决这一难题,Matlosz和Faeth等人^[10,77]在研究中采用了热电偶偶丝交点悬停液滴的方式,分别研究了正己烷和正癸烷液滴在超临界环境下的蒸发和燃烧特性,从而巧妙地实现了热电偶对液滴核心处温度的实时监测。然而,这种液滴悬停方式明显提高了悬停难度,同时,由于偶丝交点处存在一定的空间结构,燃料会因自身的吸附效应而呈不规则状,导致液滴的初始体积和直径难以准确计算;另外,较之导热系

数较低的石英纤维丝而言,高温环境中热电偶金属偶丝的导热系数较高,大大增强了液滴蒸发和燃烧过程中的悬垂器导热效应,从而对液滴的真实蒸发规律造成干扰。

综上所述,已有的实验研究中采用的液滴悬停方式大多采用各类纤维丝作为支撑点来进行,由于实验难度的限制,目前还没有较好的液滴悬停方式能够完全排除悬垂器头部对蒸发过程的干扰。

3.2 液滴直径的测量和计算方法

为了研究液滴的蒸发和燃烧规律,首先需要同时对不同时刻的液滴直径进行测量和计算,最简单的方法就是对不同时刻高速摄影图片中液滴的长和宽进行直接测量和平均。然而,在高温高压的恶劣环境中对不规则液滴的主观测量难免会造成一定误差,故需要发展相对客观的测量方法。

Nomura等人^[11]通过监测背景光(图9(a))透射液滴区域后的光强分布实现了对液滴直径的间接测量,光强曲线如图9(b)所示。图中A和B分别代表某方向上无液滴遮挡的光强信号值,故光强曲线的凹陷区长度即为液滴在该方向上的尺寸。此方法的优点在于不仅能够通过采集不同时刻的光强信号精确计算液滴尺寸,还能根据光强曲线的凹陷斜率判断液滴边界的相变形态,例如,图中第4条曲线的凹陷斜率明显小于其他3条曲线,表明此时的液滴边界已经发生了临界相变,燃料工质呈连续过渡状态。然而,液滴投影并非规则的圆形,此方法只能得到一个方向上的液滴尺寸,而为了精确计算液滴直径,需要同时采集多个方向上的光强信号,从而工作量大大增加。

靳乐等人^[76]在Nomura^[11]所用方法的基础上进行了改进,取不同工况下相同拍摄区域的数码照片,基于数码照片中液滴与环境区域的高对比度,通过编程对特定灰度范围的像素点进行筛选,从而完成对液滴部分的提取,通过计算液滴部分的面积间接求得液滴直径,如图10所示。此外,该方法还能够通过改变所选灰度值和灰度区间的设置,定量计算液滴边界的相变区域面积。简而言之,此方法将文献[11]中的二维方法进行了一维化处理,提高了采集效率。

然而,液滴在蒸发过程中通常难以保证形状完全不变,其会因环境参数、初始温度、工质物性和蒸发时间的不同而呈有差异的水滴状,上述方法只能对液滴的一个二维投影平面进行测量,得到的液滴直径与真实直径并非等效概念,而直径的计算误差直接关系到液滴蒸发和燃烧寿命的计算因此,关于

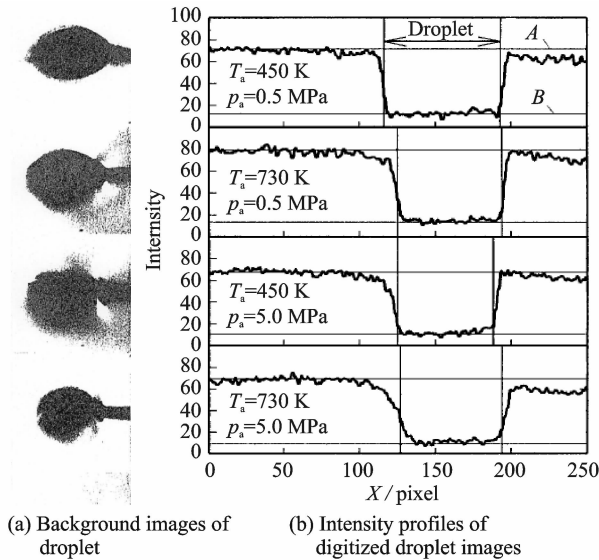


图9 文献[11]在实验中拍摄到的液滴图像和收集到的光强曲线

Fig. 9 Background images and intensity profiles of digitized droplet images acquired in Ref. [11]

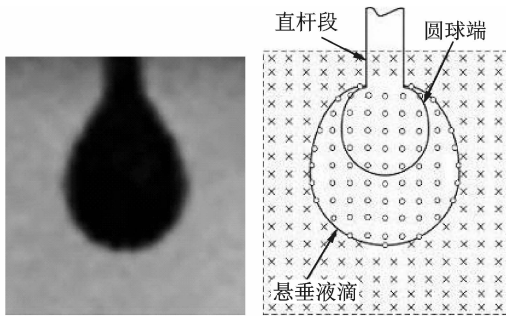


图10 液滴直径的计算原理图

Fig. 10 Calculation schematic diagram of droplet diameter

非规则形状液滴等效直径的三维计算方法仍有待在后续研究中不断完善。

3.3 提高实验精度的相关改进措施

除了上文所提到的液滴核心的悬垂器头部和液滴等效直径的计算误差等因素对提高实验精度的限制外,悬垂器导热、高温壁面辐射、重力作用和自然对流等因素也会对液滴蒸发和燃烧特性造成影响。

悬垂器导热和高温壁面辐射能够促使液滴吸收额外热量,Wong和Yang等人^[78-80]曾针对液滴悬垂器对液滴的导热效应开展了研究,指出了悬垂器导热能够加速液滴蒸发,降低蒸发和燃烧寿命,尤其对于悬垂器较粗或蒸发寿命较长的实验工况。Kadota等人^[80]研究了容腔的过热壁面对液滴的热辐射作用,指出当液滴同时受壁面辐射和悬垂器

导热时,液滴寿命会明显降低。Ghassemi等人^[72-73]也在研究中指出,在500℃和3.0 MPa的氮气环境中,正庚烷液滴在超临界蒸发过程中如果受到壁面辐射和悬垂器导热同时影响时,蒸发寿命最多可降低约15%。

因此,为了降低悬垂器导热效应的影响,实验应尽量在较高的环境温度下进行,以缩短液滴蒸发时悬垂器的导热时间。同时,尽量采用导热系数较低且直径较小的石英纤维作为悬垂器,避免采用金属材料制成的直径较大的悬垂器。另外,为了降低高温壁面对液滴的热辐射效应,实验中应对测试区域增加多层金属遮挡物(例如Kadota^[70-71]实验系统中采用的多层防辐射铝板),以降低热辐射效应,从而提高实验精度。

为了克服重力和自然对流作用对液滴蒸发和燃烧特性的影响,研究者们也开展了相关的实验尝试。Nomura等人^[11]分别借助5 m和110 m高的自由坠落塔以及抛物线飞行等过程,最长实现了25 s的微重力状态(约0.001 g),研究了无重力和无自然对流工况下正庚烷液滴的超临界蒸发特性,分析了液滴量纲一直径的平方受环境温度和压力的影响规律,并观察到了液滴在蒸发后期的边界迁移现象。Hartfield^[74]和Chauveau等人^[75]曾通过坠落塔自由落体方式获得微重力和无自然对流工况下液滴蒸发和燃烧的相关规律。Kadota和Segawa等人^[70-71]也曾通过抛物线飞行的方式研究了十八醇和十八烷液滴在无重力、无自然对流的超临界环境中的蒸发、自点火和燃烧特性,他们在实验中所拍摄到的液滴燃烧的图像如图11所示。然而,液滴无重力蒸发和燃烧实验虽然得到了相对精确的实验结果,但对实验系统的精度和匹配测试技术提出了全新的挑战。

总之,由于研究液滴在超临界环境中蒸发和燃烧的实验难度较大,实验过程中常不可避免地引入其他干扰性因素,实验过程中应针对所出现的实际问题,采取相应的改进措施,从而尽可能提高实验精度。

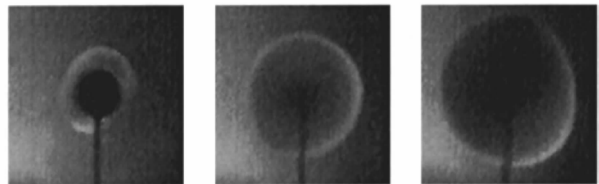


图11 文献[70,71]中所观测到的液滴燃烧的实验图像
Fig. 11 Sequential images of burning fuel droplet in Refs. [70,71]

综上所述,目前关于液滴超临界蒸发和燃烧的实验研究大多属于偏离工程应用的基础研究,且对于液滴迁移边界的组分扩散和能量输运规律的研究还开展较少,研究仍处于起步阶段,仍需开展大量的实验来探究液滴在超临界环境中的组分和能量输运规律,从而为建立液滴超临界蒸发和燃烧的精确定模型提供帮助。

4 结 论

随着高超声速飞行器的快速发展,未来高性能发动机的燃烧室中将越来越多地出现超临界工况。本文针对与液滴亚临界蒸发和燃烧显著不同的超临界蒸发和燃烧的相关研究进行了综述,对重要研究成果进行了总结和分类,阐述了研究中所急需解决的关键问题。本文的结论主要包括以下3个方面:

(1)当液滴表面达到超临界并发生边界迁移时,蒸发区域内的燃料质量分数呈连续分布趋势,整个蒸发过程基本以超临界扩散为主,此时基于液滴表面处质量、能量和组分守恒方程建立的液滴蒸发理论已经不再适用。

(2)液滴超临界蒸发和燃烧的研究涉及多相流、临界相变和高梯度传热传质等复杂问题,因此在数值和理论模型的建立过程中应分别针对超临界工况下的真实气体效应、临界物性的敏感性、环境气体的溶解性、边界迁移、组分和能量输运以及多组分燃料的物性求解等方面作特殊处理,并借助实验测量结果对模型中的敏感参数进行修正。

(3)已开展的液滴超临界蒸发和燃烧的实验研究大多属于偏离工程应用的基础研究,研究者们更多关注各种因素对液滴蒸发和燃烧形态的影响,而针对改善超临界蒸发和燃烧性能的研究还较为少见。关于液滴超临界蒸发和燃烧过程的组分扩散和能量输运机理还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨亚政,李松年,杨嘉陵.高超音速飞行器及其关键技术简论[J].力学进展,2007,37(4):537-550.
Yang Yazheng, Li Songnian, Yang Jialing. A review on hypersonic vehicles and key technologies[J]. Advances in mechanics, 2007, 37(4): 537-550.
- [2] Jackson T A, Eklund D R, Fink A J. High speed propulsion: Performance advantage of advanced materials[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(19):5905-5913.
- [3] 吕晓红.高超音速飞行器动力装置的研制问题[J]. 飞航导弹, 1996(2): 31-37.
- [4] Lü Xiaohong. Problems in propulsion system research of hypersonic vehicles[J]. Winged Missiles Journal, 1996(2): 31-37.
- [5] Yang V. Modeling of supercritical vaporization, mixing, and combustion processes in liquid-fueled propulsion systems [J]. Proceedings of Combustion Institute, 2000(28): 925-942.
- [6] Zong N, Yang V. Dynamics of simplex swirl injectors for cryogenic propellants at supercritical conditions [R]. AIAA Paper 2004-1332, 2004.
- [7] Holland M, Eaton E, Hanley H. A correlation of the viscosity and thermal conductivity data of gaseous and liquid Ethylene [J]. J Chem Ref Data, 1983, 12(4): 917-932.
- [8] 严传俊,范玮.燃烧学[M].西安:西北工业大学出版社,2005.
Yan Chuanjun, Fan Wei. Combustion[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2005.
- [9] Shawn D, Abraham J. Supercritical droplet vaporization and combustion studies [J]. Prog Energy Combust Ser, 1996(22): 1-28.
- [10] Spalding D. Theory of particle combustion at high pressures [J]. ARSJ, 1959(29): 828-835.
- [11] Matlosz R L, Leipziger S, Torda T P. Investigation of liquid drop evaporation in a high temperature and high pressure environment [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972(15): 831-852.
- [12] Nomura H, Rath H J, Sato J. Experimental study on high pressure droplet evaporation using microgravity conditions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 1996, 26(1): 1267-1273.
- [13] Shuen J S, Yang V, Hsiao C C. Combustion of liquid-fuel droplets in supercritical conditions [J]. Combustion and Flame, 1992(89): 299-319.
- [14] Umemura A, Chang X, Fujiwara T. Supercritical droplet vaporization [J]. NIST Special Publication, 1991(813): 89-96.
- [15] Rosner D, Chang W. Transient evaporation and combustion of a fuel droplet near its critical-temperature [J]. Combustion Science and Technology, 1973, 7(4): 145-158.
- [16] Curtis E W, Farrell P V. A numerical study of high-pressure droplet vaporization [J]. Combustion and Flame, 1992, 90(2): 85-102.
- [17] Curtis E W, Farrell P V. Droplet vaporization in a supercritical microgravity environment [J]. Acta Astronautica, 1988(17): 1289-1293.
- [18] Manrique J A, Borman G L. Calculations of steady

- state droplet vaporization at high ambient pressure [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1969(12): 1081-1095.
- [18] Hsieh K, Shuen J, Yang V. Droplet vaporization in high-pressure environments 1: Near-critical conditions [J]. *Combustion Science and Technology*, 1991(76): 111-132.
- [19] 范珍涪, 范玮. 流动参数对超临界喷射特性影响的数值模拟 [J]. *航空学报*, 2013, 34(5): 1045-1057. Fan Zhencen, Fan Wei. Numerical simulation on effects of flow parameters on supercritical injection characteristics [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(5): 1018-1027.
- [20] 范珍涪. 液态碳氢燃料闪蒸及超临界喷射研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2013. Fan Zhencen. Investigation on flash vaporization and supercritical jet of liquid hydrocarbon fuel [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013.
- [21] 范珍涪, 范玮, 靳乐. PR 状态方程在超临界喷射模型中的应用 [J]. *航空发动机*, 2015, 41(4): 12-17. Fan Zhencen, Fan Wei, Jin Le. Application of PR equation of state in supercritical jet model [J] *Aero-engine*, 2015, 41(4): 12-17.
- [22] Lee B, Kesler M. A generalized thermodynamic correlation based on three-parameter corresponding states [J]. *AICHE Journal*, 1975, 21(3): 510-527.
- [23] Redlich O, Kwong J. On the thermodynamics of solutions V: An equation of state—Fugacities of gaseous solutions [J]. *Chem Rev*, 1949, 44(1): 233-244.
- [24] Soave G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state [J]. *Chem Eng Sci*, 1972(27): 1197-1204.
- [25] Peng D, Robinson D. A new two-constant equation of state [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1976, 15(1): 59-64.
- [26] Starling K. Fluid thermodynamic properties for light petroleum systems [M]. Houston: Gulf Publishing Co, 1973.
- [27] Zhu G S, Aggarwal S K. Transient supercritical droplet evaporation with emphasis on the effect of equation of state [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, 43(7): 1157-1171.
- [28] 李云清, 王宏楠, 王德福. 状态方程对高温高压条件下燃料液滴蒸发计算的影响 [J]. *内燃机学报*, 2009, 27(4): 344-351. Li Yunqing, Wang Hongnan, Wang Defu. Effect of state equation on numerical simulation of fuel droplet evaporation at high temperature and high pressure [J]. *Transactions of CSICE*, 2009, 27(4): 344-351.
- [29] 李云清, 王宏楠, 陈威. 亚临界和超临界压力下燃料液滴的蒸发特性 [J]. *燃烧科学与技术*, 2010, 16(4): 287-294. Li Yunqing, Wang Hongnan, Chen Wei. Fuel droplet evaporation in sub-critical and super-critical pressure environments [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2010, 16(4): 287-294.
- [30] 李云清, 何鹏, 王金成. 碳氢燃料在亚临界及超临界状态下的状态方程研究 [J]. *石油与天然气化工*, 2007, 36(1): 1-5. Li Yunqing, He Peng, Wang Jincheng. Investigation on equation of state for hydrocarbon fuel at subcritical and supercritical conditions [J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2007, 36(1): 1-5.
- [31] 赵卫东, 魏明锐, 孔亮, 等. 超临界工况下二甲醚蒸发的数值模拟 [J]. *燃烧科学与技术*, 2007, 13(5): 468-473. Zhao Weidong, Wei Mingrui, Kong Liang, et al. Numerical simulation on DME droplet evaporation in supercritical condition [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2007, 13(5): 468-473.
- [32] 刘斐, 魏明锐, 赵卫东. 二甲醚液滴超临界蒸发的数值模拟 [J]. *工程热物理学报*, 2007, 27(4): 553-556. Liu Fei, Wei Mingrui, Zhao Weidong. A numerical study on the supercritical evaporation of dimethyl ether droplets [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 27(4): 553-556.
- [33] Jia H, Gogos G. High pressure droplet vaporization; effects of liquid-phase gas solubility [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993(46): 4419-4431.
- [34] Chang X, Fujiwara T, Umemura A. Analysis of droplet combustion at supercritical conditions [J]. *Dynamics of Reactive Systems*, 1988, 113(2): 347-359.
- [35] Manrique J A, Borman G L. Calculations of steady state droplet vaporization at high ambient pressures [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1969(12): 1081-1095.
- [36] Delplanque J P, Sirignano W A. Numerical study of the transient vaporization of an oxygen droplet at sub- and super-critical conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993(36): 303-314.
- [37] Sengers J V. Transport properties of gases and binary liquids near the critical point [R]. CR-21, 1972.
- [38] Hohmann S, Renz U. Numerical simulation of fuel sprays at high ambient pressure: The influence of real gas effects and gas solubility on droplet vaporiza-

- tion [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(16): 3017-3028.
- [39] 李云清, 何鹏. 超临界环境下燃料液滴蒸发过程的计算研究 [J]. *内燃机学报*, 2008, 26(1): 56-61.
Li Yunqing, He Peng. Numerical investigation of fuel droplet evaporation in a supercritical environment [J]. *Transactions of CSICE*, 2008, 26(1): 56-61.
- [40] 王宏楠, 熊永华. 超临界环境条件对碳氢燃料液滴蒸发特性的影响 [J]. *内燃机学报*, 2014, 32(2): 172-177.
Wang Hong, Xiong Yonghua. Effect of supercritical ambient conditions on hydrocarbon fuel droplet evaporation characteristic [J]. *Transactions of CSICE*, 2014, 32(2): 172-177.
- [41] Guildner L A. The thermal conductivity of carbon dioxide in the region of the critical point [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1958(44): 1149-1153.
- [42] Umemura A, Chang X, Fujiwara T. Supercritical droplet vaporization [J]. *Nist Special Publication*, 1991(813): 89-96.
- [43] Fritsch K, Carome E F. Behavior of fluids in the vicinity of the critical point [M]. [S. l.]: National Aeronautics and Space Administration, 1970.
- [44] Sengers J V. Behavior of viscosity and thermal conductivity of fluids near the critical point [J]. *NBS Misc Pub*, 1965(273): 165-177.
- [45] Basu R S, Sengers J V. Thermal conductivity of steam near the critical point [C]// *Seventh Symposium on Thermophysical Properties*. New York: [s. n.], 1977.
- [46] Kadota T, Hiroyasu H. Evaporation of a single droplet at elevated pressures and temperatures [J]. *JSME*, 1976(19): 1515-1521.
- [47] Zhang H. Evaporation of a suspended droplet in forced convective high-pressure environments [J]. *Combustion Science and Technology*, 2003 (175): 2237-2268.
- [48] Zhang H, Gogos G. Numerical research on a vaporizing fuel droplet in a forced convective environment [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004 (30): 181-198.
- [49] Zhang H, Raghavan V, Gogos G. Subcritical and supercritical droplet evaporation within a zero-gravity environment: Low Weber number relative motion [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008(35): 385-394.
- [50] Zhang H. Evaporation of a spherical moving fuel droplet over a wide range of ambient pressures within a nitrogen environment [D]. *Dissertation; University of Nebraska-Lincoln*, 2000.
- [51] Edwards T, Maurice L. Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(2): 461-466.
- [52] Huber L, Lemmon W, Bruno J. Surrogate mixture models for the thermophysical properties of aviation fuel jet-a [J]. *Energy Fuels*, 2010, 24(10): 3565-3571.
- [53] 周养群. 中国油品及石油精细化学品手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
Zhou Yangqun. Handbook of Chinese oil and petroleum fine chemicals [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [54] 范学军, 俞刚. 大庆 RP-3 航空煤油热物性分析 [J]. *推进技术*, 2006, 27(2): 187-192.
Fan Xuejun, Yu Gang. Analysis of thermophysical properties of Daqing RP-3 aviation kerosene [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(2): 187-192.
- [55] 童景山. 流体热物性学 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2008.
Tong Jingshan. Fluid thermal physical properties [M]. Beijing: Sinopec Press, 2008.
- [56] Stengele J, Prommersberger K, Willmann M, et al. Experimental and theoretical study of one- and two-component droplet vaporization in a high pressure environment [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999(42): 2683-2694.
- [57] Dagaut P. On the kinetics of hydrocarbons oxidation from natural gas to kerosene and diesel fuel [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2002, 11(4): 2079-2094.
- [58] Violi A, Eddings E, Sarofim F. Experimental formulation and kinetic model for JP-8 surrogate mixtures [J]. *Combustion Science and Technology*, 2002, 174(11): 399-417.
- [59] Wood C, McDonnell V, Smith R. Development and application of a surrogate distillate fuel [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1989, 5(4): 399-405.
- [60] Lin R, Tavlarides L L. Thermophysical properties needed for the development of the supercritical diesel combustion technology: Evaluation of diesel fuel surrogate models [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2012(1): 136-146.
- [61] Soave G. Improvement of the Van Der Waals equation of state [J]. *Chemical Engineering Science*, 1984, 39(2): 357-369.
- [62] Stryjek R, Vera J. An improved peng-robinson equa-

- tion with new mixing rules for strongly nonideal mixtures [J]. *Can J Chem Eng*, 1986(64): 323-333.
- [63] Schwartzen T, Galivel S, Renon H. Representation of the vapor-liquid equilibrium of the ternary system carbon dioxide-propane-methanol and its binaries with a cubic equation of state; A new mixing rule [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 1987, 38(3): 217-226.
- [64] Reid R, John M, Bruce E. The prosperities of gases and liquids [M]. Singapore; McGraw Hill International Editions, 1989.
- [65] Ely J F, Hanley H J M. Prediction of transport properties-1: Viscosity of fluids and mixtures[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1981, 20(4): 323-332.
- [66] Ely J F, Hanley H J M. Prediction of transport properties-2: Thermal-conductivity of pure fluids and mixtures [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 1983, 22(1): 90-97.
- [67] Chung T, Ajlan M, Lee K. Generalized multiparameter corresponding state correlation for polyatomic, polar fluid transport prosperities [J]. *Industrial and Chemical Engineering Research*, 1988(77): 671-679.
- [68] Ely J F, Huber M. NIST standard reference database 4-nist thermophysical properties of hydrocarbon mixtures [M]. Gaithersburg, MD; National Inst of Standards, 1990.
- [69] Congiunti A, Bruno C, Ciacomazzi E. Supercritical combustion properties [R]. AIAA 2003-478, 2003.
- [70] Kadota T, Satoh K, Segawa D, et al. Autoignition and combustion of a fuel droplet in supercritical gaseous environments under microgravity [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1998, 27(2): 2595-2601.
- [71] Segawa D, Kadota T, Nakainkyo A. Effects of ambient pressure on autoignition of a fuel droplet in supercritical and microgravity environment [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000(28): 1063-1069.
- [72] Ghassemi H, Baek S W, Khan Q S. Experimental study on binary droplet evaporation at elevated pressures and temperatures [J]. *Combustion Science and Technology*, 2006, 178(6): 1031-1053.
- [73] Ghassemi H, Baek S W, Khan Q S. Experimental study on evaporation of kerosene droplets at elevated pressures and temperatures [J]. *Combustion Science and Technology*, 2006, 178(9): 1669-1684.
- [74] Hartfield J P. Droplet vaporization in a high pressure gas [D]. Madison; University of Wisconsin-Madison, 1991.
- [75] Chauveau C, Chesneau X, Gokalp I. Burning characteristics of n-heptane droplets under different regimes [R]. AIAA 93-0824, 1993.
- [76] 靳乐, 范玮, 周舟, 等. 液滴初温对 RP-3 航空煤油超临界蒸发特性的影响 [J]. *燃烧科学与技术*, 2016, 22(3): 207-212.
- Jin Le, Fan Wei, Zhou Zhou, et al. Influence of droplet initial temperature on supercritical evaporation characteristics of RP-3 aviation kerosene [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2016, 22(3): 207-212.
- [77] Faeth G M, Dominics D P, Tulpinsky J F, et al. Supercritical bipropellant droplet combustion [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1969, 12(1): 9-18.
- [78] Wong S C, Lin A C. Internal temperature distributions of droplet vaporizing in high-temperature convective flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1992(237): 671-687.
- [79] 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]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002(45): 4589-4598.
- [80] Kadota T, Hiroyasu H. Evaporation of a single droplet at elevated pressures and temperatures [J]. *Bulletin of the Jsme-Japan Society of Mechanical Engineers*, 1976, 19(138): 1515-1521.