

# 超临界压力下乳化煤油传热性能数值研究<sup>\*</sup>

侯凌云, 王 慧, 钟北京, 国晓慧

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

**摘 要:** 为了减少煤油在冷却时的结焦析碳, 研究乳化煤油在超临界压力工况下传热特性随热负荷变化的规律以及析碳的影响。在对比煤油工质的计算与试验数据的基础上, 改进并验证了模型的可用性, 得到各相、各参数的全场分布及壁温随热负荷变化规律; 在相同工况和热负荷下, 乳化油比煤油更能起到降低壁温、减少析碳的作用; 含水量越大乳化煤油降低壁温效果越好, 但不能进一步减少析碳量。

**关键词:** 超临界压力; 乳化燃料; 煤油; 传热; 数值计算

**中图分类号:** V231.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4055 (2006) 06-0488-04

## Numerical study on heat transfer characteristics of emulsified kerosene at supercritical pressure

HOU Ling-yun, WANG Hui, ZHONG Bei-jing, GUO Xiao-hui

(School of Aerospace, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

**Abstract** Heat transfer and thermal stability characteristics of supercritical emulsified kerosene were studied in order to reduce the deposition of carbon during the cooling of kerosene. Based on the comparison between calculated and experimental data of kerosene, the numerical model of heat transfer was improved and proved to be feasible. Based on the above model, the profile contours of each phase and parameter were shown numerically, and the relations between the wall temperature and heat flux were obtained. The emulsified fuel is superior to kerosene in aspects of bringing down the wall temperature and reducing the deposition of carbon. The more water content there is in the emulsified kerosene, the lower wall temperature becomes. However, the increase of water content can not reduce the deposition of carbon further.

**Key words** Supercritical pressure; Emulsified fuel; Kerosene; Heat transfer; Numerical calculation

### 1 引 言

飞行器的冷却问题随着飞行马赫数的提高而显得愈发重要,也是目前高超声速冲压发动机发展过程中急需解决的关键技术。国内外对燃料冷却问题的研究很多,主要分两方面,一是燃料吸热能力的热沉分析,二是燃料高温热稳定性。

冷却能力的大小完全取决于燃料热沉,燃料热沉又可分为物理热沉和化学热沉<sup>[1]</sup>。物理热沉主要与燃料的蒸发潜热有关,化学热沉则与燃料的裂解、脱氢和催化反应过程有关。水的蒸发潜热比碳氢燃料要大一个数量级,其物理热沉较大。

碳氢燃料作为冷却剂最大问题就是高温时的结焦析碳,碳的沉积形式和沉积量都会对传热燃烧过程产生很大影响,造成热传递的减弱并使得壁温升高,而且析出的碳还容易堵塞燃料和喷射器系统的一些细小管路。尽管目前对结焦的化学机理尚不十分清晰,但可以肯定的是结焦是由构成燃料的烃分子热解和氧化引起的<sup>[2]</sup>。水的加入能够大大减轻碳氢燃料的结焦,特别在高温时,效果更加明显<sup>[3]</sup>。

基于以上两方面的优势,掺入水的乳化燃料作为冷却剂可以提升碳氢燃料的冷却能力,然而对于乳化煤油在超临界压力下的传热性能研究在国内外还没有开展。本文采用 Fluent 软件和自编程序在基于模

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2005-10-21; 修订日期: 2006-01-19。

基金项目: 国家自然科学基金 (50306011); 国家“九七三”项目 (2002CB211600)。

作者简介: 侯凌云 (1972—), 女, 副教授, 研究领域为先进推进动力热研究。E-mail: lyhou@tsinghua.edu.cn

拟纯煤油在超临界工况下气液相变流动规律基础上,研究了乳化燃料的传热特性,探索了掺水乳化煤油在减轻析碳方面的能力。

## 2 物理和数学模型

### 2.1 乳化煤油物性

当乳化煤油在高温高压管道中流动时,要经历从亚临界到超临界的相变过程,物性参数变化很大,常物性条件已不再适用,其变物性参数见参考文献[4]。由于乳化煤油中包含了水和煤油两类相变物质,而它们的临界点又相差较远,煤油临界点为:  $p_{cr} = 2.459 \text{ MPa}$   $T_{cr} = 404.35 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 水的临界点为:  $p_{cr} = 22.1 \text{ MPa}$   $T_{cr} = 375 \text{ }^\circ\text{C}$ , 因此在计算中分别考虑水和煤油的气液两相变化。由于水是一种通用物质,其物性采用 Fluent 默认值代入。对于煤油当流体温度低于  $T_{cr}$  时,认为气、液两相具有相同的物性;当流体温度高于  $T_{cr}$  时,认为液相全部转化为气相。

### 2.2 数值模型

采用双精度,二维轴对称,两相流混合模型,气穴模型,湍流模型,相间传质模型,在极高热负荷条件下还加入了辐射模型进行讨论。考虑煤油结焦时采用了简化析碳空间反应模型。两相模型采用 Euler-Euler 方法中的混合模型,考虑相间的速度滑移,其连续方程、动量方程、能量方程和第二相体积分数如下

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k \vec{v}_k) = \dot{m} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k \vec{v}_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k \vec{v}_k \vec{v}_k) = \\ & - \nabla p + \nabla \cdot \left\{ \mu_m \left[ \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k / \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k / \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \right)^T \right] \right\} + \\ & \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{drk} \vec{v}_{drk} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

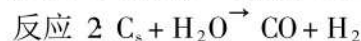
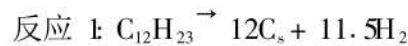
$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + \\ & p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) = - \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{drp}) \quad (4)$$

式中  $\alpha_k$  为第  $k$  相体积分数,  $\dot{m}$  为气穴造成或相变时质量转变造成的质量源,  $S_E$  为体积热源,  $\vec{v}_{drk}$  为相间滑移速度,其滑移速度方程为

$$\begin{aligned} \vec{v}_{drk} &= \vec{v}_k - \vec{v}_m = \frac{(\rho_k - \rho_m) d_k^2}{18 \mu_m f_{drag}} \vec{a} - \\ & \frac{v_m}{\alpha_k \sigma_{drag}} \nabla \cdot \alpha_p - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \vec{v}_{pk} \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $\vec{a}$  由 Schiller Naumann 关系式决定。由于进口  $Re$  数达到  $3.5 \times 10^4$ , 因此其流动按照湍流处理,其湍流模型采用  $k-\epsilon$  双方程湍流模型。其析碳空间反应见参考文献[5]采用简化模型,并考虑碳与水的水煤气反应<sup>[6]</sup>。



反应 1 的化学反应速率为  $\omega_1 = k_1 [C_{12}H_{23}]^{1.81}$ , 反应 2 的化学反应速率为  $\omega_2 = k_2 [H_2O]$ , 其中  $k_1 = 4.4947 \times 10^{15} T^{-1.94} \exp(-1.3379 \times 10^8 / RT)$ , 温度单位为 K, 活化能单位为 J/kmol;  $k_2 = 0.0833 \exp(-1.214 \times 10^8 / RT)$ 。

### 2.3 研究对象和边界条件

为与试验数据对比,计算对象为文献[4]的试验段试件,试验管件采用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢管,试件  $\Phi$  为  $22 \times 0.25 \text{ mm}$ ,总长 320 mm,上下游各 110 mm 稳定段,中间 100 mm 为试验段。均匀电加热试验段,在试验段等距离分布 5 支热电偶测量内壁温。

研究工况中压力分别为 2.5、15 MPa 进口流速分别为 10、20 和 60 m/s 初温分别为 20  $^\circ\text{C}$ , 100  $^\circ\text{C}$  和 200  $^\circ\text{C}$ ,热负荷范围为 0~25 MW/m<sup>2</sup>。

对于进口稳定段,采用气穴模型(即保持温度不变,压力驱动使工质发生相变)来预估进口加热段气相体积分数;进口加热段按研究工况给定进口速度、进口温度和进口  $k$  和  $\epsilon$  值。由于壁面有加热,对于壁面边界传热采用对流换热模型(根据加热量计算出换热量),沿轴向均匀给定等热流边界;在壁面边界依据不同热流条件,分别采用标准壁面函数(低热流下)和增强型壁面函数(高热流下),因高热流下临近壁面的相变造成的扰动加剧,增强型壁面函数更适合壁面有分离效应的情况。

计算网格采用了  $800 \times 400$  分布,壁面加密;对流项采用迎风格式,扩散项采用中心差分格式。

## 3 计算结果与分析

### 3.1 超临界压力下乳化油内部传热流动分析

图 1~图 4 均为 20 MW/m<sup>2</sup>, 20 m/s, 15 MPa 工况下,掺水 10% (质量百分数)的乳化油,并考虑空间析碳反应所计算的结果。图 1 反映出在出口处流体

温度最高,但中心处温度要远远低于靠近壁面附近的温度。图 2和图 3为煤油蒸汽和水蒸汽的体积分数分布,气相各组分随着流动方向不断增加,在贴近壁面很小的范围内数值较大,越往内场越稀薄,其截面反映出的梯度符合温度场的分布规律。图 4为气相碳摩尔浓度分布,析碳在出口处壁面最为明显,因此处温度高,析碳的空间反应速率较大,生成物气相也比较集中,这与文献 [ 7~ 9] 所得规律一致。

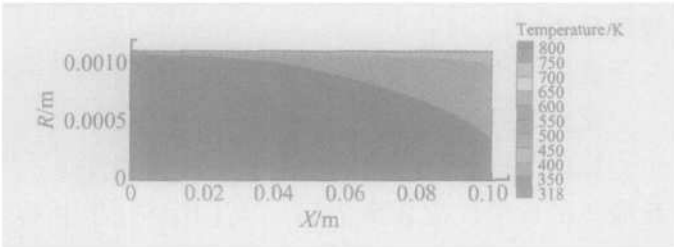


Fig 1 Temperature contour of emulsified kerosene(10w % water content)

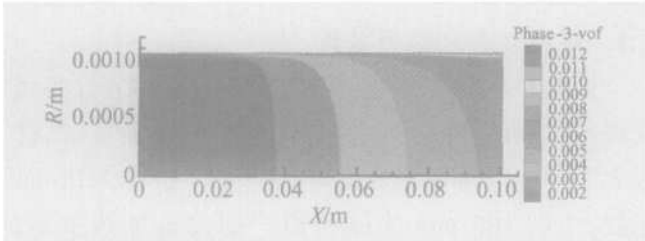


Fig 2 Volume fraction contour of kerosene vapor

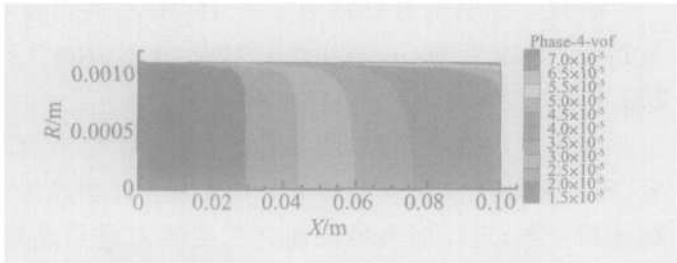


Fig 3 Volume fraction contour of steam

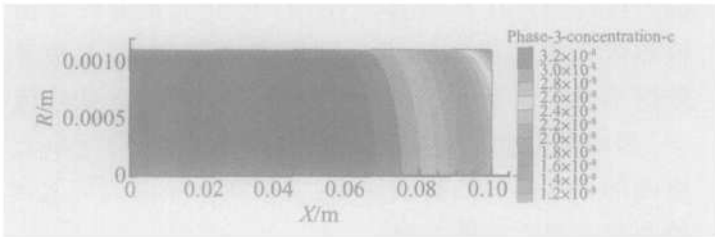


Fig 4 Mole fraction contour of gas-phase C,

3 2 超临界压力下乳化油与煤油传热性质对比

图 5是在 20 m /s 15 MPa工况下,热负荷变化对管壁壁温的影响,煤油计算与试验值<sup>[8]</sup>在大部分热负荷范围下吻合较好。在相同工况下,同一热负荷,同一测温点条件下,煤油工质传热得到的壁温均要高于乳化油工质。并且随着热负荷的增加,二者的差异逐渐加大。按照目前的模型计算结果来看,乳化油的整个传热过程与煤油类似,也可以大致分为四个阶段:低热负荷传热区(热负荷低于 14 MW /m<sup>2</sup>),一次换热强化(热负荷为 14~ 18 MW /m<sup>2</sup>),传热恶化(热负荷为 18~ 23 5 MW /m<sup>2</sup>)和极高热负荷条件下的二次换热强化(热负荷高于 23 5 MW /m<sup>2</sup>)。在低热负荷区,壁温随热负荷增加而增加;在一次换热强化区,壁温基本保持恒定,不随热负荷增加而增加;在传热恶化区,壁温再次随热负荷增加而增加;在二次传热强化区,壁温再次随热负荷增加而趋于平缓变化,该区域乳化油与煤油壁温有差异,主要是由于在高热流情况下,水煤气反应(反应 2)加剧(从表 1中 25 MW /m<sup>2</sup>的碳析出对比中也可看出),水煤气反应本身也是一种吸热反应,从而使壁温低于纯煤油的。

另外从图 5中看出,乳化油一次换热强化对应的壁温和热负荷都要略低于煤油的。从传热机理来看,一次换热强化主要与工质的拟临界温度有关。在计算工况为 15 MPa的条件下,煤油处于超临界工况,而水仍为亚临界工况。由此,必然导致原一次换热强化对应壁温的下降。

计算中还发现,如表 1所示,同样热负荷条件下,乳化油的析碳量要远低于煤油相应的析碳量,因此二者的差异也很大。造成这个结果的原因主要是,水的蒸发潜热很大,同样热流条件下,乳化油比煤油产生的气相量要小<sup>[10]</sup>。对于反应而言,气相的减少会造成反应速率下降,进而导致生成物碳量的减少。

在表 1中还可以看到,当外界热负荷升高时,析碳量也显著增加。尽管煤油和乳化油在此析碳量增加规律上基本相同,但是温度越高,二者差异越大,甚至达到了 3个数量级之多。这是由于此时碳与水的

Table 1 Comparison of carbon quantum between emulsified and pure kerosene

| Heat flux/(MW /m <sup>2</sup> )               | 5                         | 10                       | 15                       | 20                       | 25                       |
|-----------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| For pure kerosene/(mol/m <sup>3</sup> )       | 8 809 × 10 <sup>-12</sup> | 1 314 × 10 <sup>-9</sup> | 3 357 × 10 <sup>-7</sup> | 5 260 × 10 <sup>-6</sup> | 1 320 × 10 <sup>-5</sup> |
| For emulsified kerosene/(mol/m <sup>3</sup> ) | 1 03 × 10 <sup>-13</sup>  | 6 29 × 10 <sup>-12</sup> | 2 18 × 10 <sup>-9</sup>  | 3 44 × 10 <sup>-8</sup>  | 7 42 × 10 <sup>-8</sup>  |

水煤气反应的作用逐渐增强,按照其动力学关系,随着温度的升高,气相中水蒸气的浓度增高,反应程度加剧,对反应物碳的消耗量也越大,从而出现上述现象。

3 3 乳化油含水量对传热和析碳的影响

乳化油中的水份对其传热性能的影响很大,另外,掺水后乳化油的热稳定性也更好,析碳量减少,结

焦情况减弱。以下就乳化油含水量的不同作了一些比较,见表 2。从表中看出,乳化油含水量对壁温的影响更大一些。水的质量分数越大,壁温降低的程度越低。相比较而言,含水量变化对析碳的影响不大,没有数量级的增加。而相同热负荷下,煤油和乳化油的区别比较显著,只要有水参与,则析碳量就大幅下降,从计算数据来看,通常为两到三个数量级。

Table 2 Effect of water content on wall temperature and carbon quantum in emulsified kerosene

| Heat flux /<br>(MW /m <sup>2</sup> ) | Pure kerosene |                                           | Emulsified kerosene   |                                           | Emulsified kerosene    |                                           | Emulsified kerosene    |                                           |
|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|
|                                      | W all         | Carbon quantum /<br>(mol/m <sup>3</sup> ) | water content 5% (wt) |                                           | water content 10% (wt) |                                           | water content 15% (wt) |                                           |
|                                      |               |                                           | W all                 | Carbon quantum /<br>(mol/m <sup>3</sup> ) | W all                  | Carbon quantum /<br>(mol/m <sup>3</sup> ) | W all                  | Carbon quantum /<br>(mol/m <sup>3</sup> ) |
| 15                                   | 653.4         | 3.36 × 10 <sup>-7</sup>                   | 663.7                 | 4.41 × 10 <sup>-9</sup>                   | 603.6                  | 2.18 × 10 <sup>-9</sup>                   | 577.4                  | 1.25 × 10 <sup>-9</sup>                   |
| 20                                   | 788.3         | 5.26 × 10 <sup>-6</sup>                   | 770.3                 | 6.69 × 10 <sup>-8</sup>                   | 739.0                  | 3.44 × 10 <sup>-8</sup>                   | 711.4                  | 2.03 × 10 <sup>-8</sup>                   |
| 25                                   | 1137.0        | 1.32 × 10 <sup>-5</sup>                   | 1001.9                | 1.91 × 10 <sup>-7</sup>                   | 962.8                  | 7.42 × 10 <sup>-8</sup>                   | 925.1                  | 3.39 × 10 <sup>-8</sup>                   |

4 结 论

本文采用 Fluent 数值模拟乳化油在超临界压力下的传热过程,并对结果进行讨论。在煤油计算与实验值吻合基础上,由此分别得到了乳化油各参数全场分布规律,对比分析了煤油和乳化油的传热特性,主要讨论其在降低壁温和减少析碳量两方面的问题。并且还通过几个典型工况的计算比较了乳化油含水量不同,对其传热性能的影响。其主要结论如下:

(1)使用乳化油工质可以增强壁面热流向内流场的传递,从而降低壁面温度,延长壁面材料的使用寿命。

(2)在考虑空间反应的模型下发现,乳化油中的水可以改善原有煤油的热稳定性,大大抑制析碳过程,防止结焦。其原因主要是在煤油临界压力附近范围,气液相水的导热系数较大,且液态水的气化潜热也远远大于液态煤油。

(3)含水量越大,乳化油降低壁温的效果越好,但是,增大水量并不能进一步的减小析碳量,改善结焦问题。

参考文献:

[ 1 ] Huang H, Sobel D R, Spadaccini L J. Endothermic heat-sink of hydrocarbon fuels for scramjet cooling[ R]. AIAA

2002-3871.  
[ 2 ] Edwards T, Zabamick S. Supercritical fuel deposition mechanism [ J]. Ind. Eng. Chem. Res., 1993, 32 ( 12): 3117~ 3122  
[ 3 ] 傅维标,葛阳. 正确认识油掺水燃烧的节能降污机理 [ J]. 节能, 1998, 4: 20~ 22  
[ 4 ] 胡志宏,陈昕宽,罗毓珊,等. 超临界压力下煤油传热特性试验研究 [ J]. 西安交通大学学报, 1999, 33 ( 9): 62~ 70  
[ 5 ] Wang T S. Thermophysics characterization of kerosene combustion[ R]. AIAA 2000-2511.  
[ 6 ] 岑可法,姚强,曹欣玉,等. 煤浆燃烧、流动、传热和气化的理论与应用技术 [ M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1997.  
[ 7 ] Linne D L, Meyer M L, Edwards T, et al. Evaluation of heat transfer and thermal stability of supercritical JP-7 fuel[ R]. AIAA 97-3041.  
[ 8 ] 胡志宏. 火箭发动机特种煤油传热特性的试验研究 [ D]. 西安: 西安交通大学, 1996  
[ 9 ] Katta V R, Grant E G. Modeling of deposition process in liquid fuels[ R]. AIAA 97-3040  
[ 10 ] 侯凌云,国晓慧,钟北京. 煤油在超临界压力下冷却性能数值研究 [ C]. 中国工程热物理年会, 2005

(编辑: 刘梦威)