

乳化油的蒸发和燃烧研究

南京航空学院 张青藩、苏 克

摘 要

本文从理论和实验两方面研究航空煤油和0*柴油乳化液的蒸发和燃烧特性。结果表明,乳化油燃烧时出现的微爆现象能明显缩短油珠的生存期,对提高燃烧效率和强化燃烧十分有利;乳化油的燃烧,也为抑制氮氧化物和微碳粒的生成提供了有利的条件。文中也详细讨论了主要工作参数对微爆过程的影响,对乳化油的工程应用有参考价值。

理论与实践表明,燃油乳化能有效地实现节能与减污。油包水型乳化油的燃烧特点是“微爆现象”,即内部水珠过热汽化,冲破外层油膜,使大油珠再次雾化,其结果不仅改善了雾化质量,也增加了燃烧区紊流度,促进油气混合。乳化燃油对航机陆用尤为重要,因为只有采用劣质液体燃料,航机陆用才有生命力。

本文研究乳化油滴的蒸发和燃烧,重点研究影响微爆过程的主要因素。

一、乳化油单滴试验

用悬滴法研究乳化油珠的蒸发和燃烧,试验装置如图1所示。压缩空气在电炉中加热后,从直径为25mm的陶瓷管中流出,形成向上的高温射流,其最高温度和速度分别为1173K和4m/s。悬滴位于射流核心,挂丝分别为热电偶(丝径76 μ m)和石英丝(200 μ m)。本文重点研究RP-2航空煤油和0*柴油乳化液的蒸发和燃烧。试验中以高速相机记录油珠直径随时间的变化,并以热电偶测定油珠的平均温度。

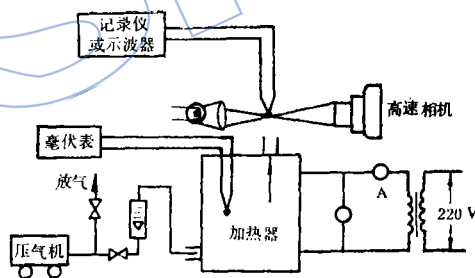


图1 悬滴试验装置简图

二、油滴蒸发和燃烧的数学模型

数学模型主要用于获得油珠的蒸发速率和温度,而后者是判断微爆的依据。文献〔2〕提出球对称模型,但只能计算初径小于10 μ m的油珠,比实用值小得多。本文采用文献〔3〕的稳态冻结模型,适用于任何尺寸的油珠。假定油水分布均匀,蒸发过程中油水浓度不变,即油珠表面的油水蒸发速率之比等于油水初始浓度比。气相区无因次形式的守恒方程为

当 $1 < \tau < \tau_f$ 时

$$\dot{m} Y_F - \tau^2 (dY_E/d\tau) = \dot{m}_F \quad (1)$$

$$\dot{m} Y_W - \tau^2 (dY_W/d\tau) = \dot{m}_W \quad (2)$$

$$\hat{m}(\hat{T} - \hat{T}_S) - \hat{r}(d\hat{T}/d\hat{r}) = -(\hat{m}_F \hat{L}_F + \hat{m}_W + \hat{m} \hat{L}_H) \quad (3)$$

当 $\hat{r}_f < \hat{r} < \infty$ 时

$$\hat{m} Y_o - \hat{r}^2 (dY_o/d\hat{r}) = -\nu_o \hat{m}_F \quad (4)$$

$$\hat{m} Y_W - \hat{r}^2 (dY_W/d\hat{r}) = \hat{m} + (\nu_o - \nu_p) \hat{m}_F \quad (5)$$

$$\hat{m}(\hat{T} - \hat{T}_S) - \hat{r}^2 (d\hat{T}/d\hat{r}) = -(\hat{m}_F \hat{L}_F + \hat{m}_W + \hat{m} \hat{L}_H) + \hat{m}_F \hat{Q}_F \quad (6)$$

其中 $\hat{m}_i = m_i / (4\pi r_S K / C_p)$, $\hat{r} = r / r_S$, $\hat{T} = C_p T / L_W$, $\hat{L}_i = L_i / L_W$, $\hat{Q}_F = Q_F / L_W$, $\hat{L}_H = 4\pi r_S^2$

$\frac{dT}{dr} \Big|_{r_S} / (m L_W)$ 而 m_i 为 i 物质的质量流率, $m = m_F + m_W$ 为总质量流率, r_S 为油珠半径, T 为

温度, Y_i 为 i 物质的质量浓度, L_i 为 i 物质的蒸发潜热。

从 $\hat{r} = 1$ 到 $\hat{r}_f$ 积分方程 (1)~(3), 从 $\hat{r} = \hat{r}_f$ 到 ∞ 积分 (4)~(6), 并利用燃油的饱和蒸汽压与油珠表面温度的关系, 可以求得 $\hat{m}$, $\hat{T}_f$, $\hat{r}_f$ 等参数, 其中注脚 f 表示火焰面。

计算蒸发过程时, 取上述各式中的 $Y_{o\infty} = 0$ 及 $Y_{Ff} = Y_{E\infty}$, 计算燃烧过程时取 $Y_{Ff} = 0$ 。

表面蒸发的液滴内部导热方程为

$$(\partial \hat{T} / \partial \hat{r}) = (\partial^2 \hat{T} / \partial \hat{r}^2) + (2/\hat{r} - \hat{m} K \hat{r})(\partial \hat{T} / \partial \hat{r}) \quad (7)$$

$$\text{初始条件 } \hat{T}(\hat{r}, 0) = \hat{T}_o(\hat{r}) \quad (8)$$

$$\text{边界条件 } (\partial \hat{T} / \partial \hat{r})|_{\hat{r}=0} = 0, (\partial \hat{T} / \partial \hat{r})|_{\hat{r}=\hat{r}_f} = \hat{m} K'(\hat{H} - \varepsilon_F \hat{L}_F - \varepsilon_W) \quad (9)$$

其中 $K = (\lambda_g / \lambda_l) / (C_{pg} / C_{pl})$, $K = \lambda_g / \lambda_l$, $\hat{H}$ 为无次有效蒸发潜热, ε_F 和 ε_W 为油和水的质量百分比。

以隐式差分格式离散 (7) 式, 以三对角矩阵法求解得油珠内部温度分布, 火焰面温度和半径。将该温度分布与水的过热温度 (550—580 K^[3]) 相对比, 可以判断微爆是否发生。

三、结果与讨论

1. 图 2 表明, 纯蒸发时乳化油的蒸发常数减小。但与纯油相比微爆仍使油珠寿命大为缩短, 如纯煤油和纯柴油的蒸发常数分别为 0.90 和 0.73 mm²/s, 而乳化煤油和乳化柴油分别为 0.72 和 0.56 mm²/s, 若不考虑微爆后残存油珠的生存期, 则微爆使煤油和柴油的生存期分别缩短 47% 和 56%。图 3 表示燃烧条件下的结果, 由于微爆的发生, 乳化油珠的生存期缩短 67%。

2. 由图 4 可见乳化油的温升曲线存在峰值。观察表明, 这个峰值与微爆有关。微爆时一方面水珠汽化, 吸收潜热, 另一方面蒸汽流向四周喷射, 阻止外部向油珠供热, 因此瞬时能量不平衡, 导致油珠温度降低, 利用这一温度特性也可以判断微爆的发生。图 5 表示油珠蒸发平衡温度。实际上, 煤油和柴油都是混合物, 不存在确定的蒸发平衡温度, 因此图 4a 中的 a 和 b 点并不等温, 图 5 给出的测量值相应于 a 点温度, 其值略微偏低。

3. 通过计算得到的油珠内部温度分布 (图 6) 可见, 加热过程中油珠表面温度高于中心温度, 其差值与燃油导热系数有关。当液滴内部存在环流时, 由于对流传热, 温差明显降低。至今仍不可能准确估计环流温度分布的影响。本文定义系数 A_h 为环流与无环流的导热

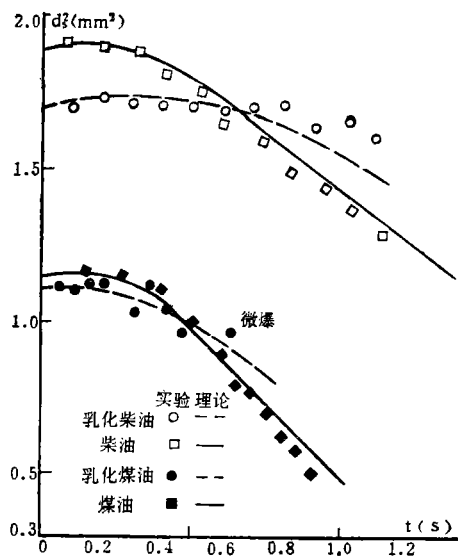


图 2 蒸发过程的直径变化
($T_{\infty} = 873\text{K}$, $p_{\infty} = 100\text{kPa}$
 $U_R = 1.68\text{m/s}$, 乳化时掺水15%)

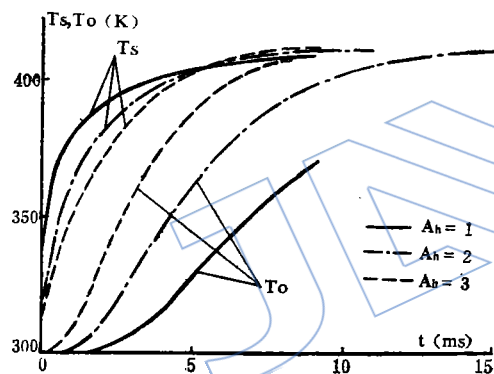


图 6 不同 A_h 值时煤油蒸发的表面温度 T_s 和中心温度 T_o 变化 ($T_{\infty} = 1200\text{K}$, $p_{\infty} = 100\text{kPa}$
 $U_R = 0$, $d_{SO} = 100\mu\text{m}$)

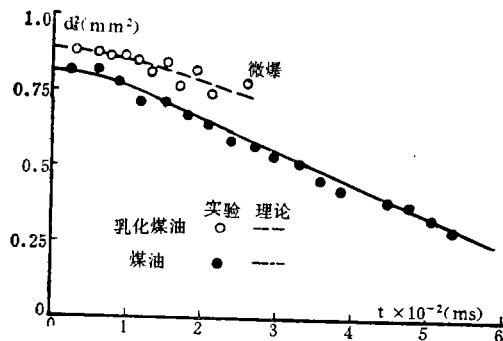


图 3 燃烧过程的直径变化
($T_{\infty} = 310\text{K}$, $P_{\infty} = 100\text{kPa}$
($U_R = 0$, 乳化时掺水15%)

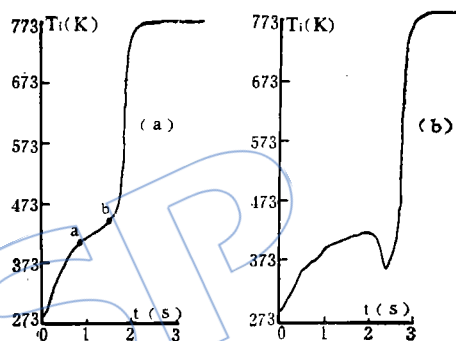


图 4 蒸发过程的温度(热电偶指示温度)变化:
(a)纯煤油 ($T_{\infty} = 781\text{K}$, $U_R = 4.3\text{m/s}$);
(b)乳化煤油 ($T_{\infty} = 794\text{K}$, $U_R = 4.4\text{m/s}$)

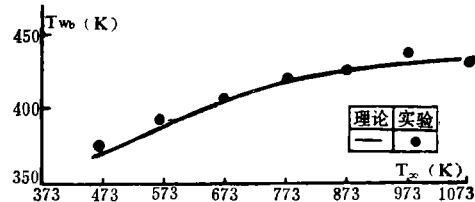


图 5 RP-2煤油蒸发平衡温度 T_{wb} ($P_{\infty} = 100\text{kPa}$)

系数之比, $A_h = 1$ 为无环流, A_h 越大, 环流越强。由图 6 可见, 环流使表层温度上升率降低, 从而推迟表层水珠的过热汽化。

实验表明, 就微爆时油珠直径与初径之比而言, 乳化柴油比乳化煤油大, 这主要与燃油的馏点温度有关。煤油的馏点温度低, 油珠温升速率小于柴油, 换句话说, 乳化柴油温升快, 温度高, 因此微爆直径大, 强度高。

4. 图 2、3 和 5 表明, 理论计算结果与实验吻合良好, 因此利用本文的理论模型计算了主要参数对乳化油微爆的影响, 结果如下:

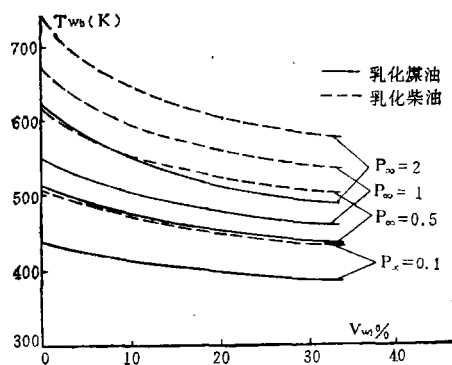


图7 不同压力 P 乳化油燃烧的 T_{wb} 与 V_{w1} 的关系
($d_{50}=100\mu\text{m}$, $T_{\infty}=300\text{K}$, $T_0=300\text{K}$, $U_R=2\text{m/s}$)

(1) 掺水量的影响。由图7可见, 掺水量增加, 蒸发平衡温度降低。据文献〔3〕提出的过热温度, 只要工作压力大于 1MPa 含水量高达30%的乳化柴油仍有可能发生微爆; 但对于乳化煤油, 压力小于 0.5MPa 时不可能微爆, 当压力为 1MPa 时, 含量量低于5%才能微爆。

(2) 压力对微爆的影响。不难理解, 随着环境压力的升高, 燃油的馏点温度也升高, 因此蒸发平衡温度上升。由图7可见, 含水量为10%时为保证微爆发生, 乳化煤油的环境压力应大于 2MPa 。总之, 压力升高微爆趋向增强。

柴油机和高压燃气轮机中一般易达到微爆; 但在汽油机中工作压力较低, 加上汽油本身的馏点温度低, 一般不易产生微爆, 这时燃油中的水份仅起催化剂作用。此外, 沸点高, 不易蒸发的燃料, 如工业重油, 产生微爆的可能性更大, 这类燃油粘性大, 雾化性能差, 利用微爆可明显改善雾化质量, 因此乳化效益更佳。

(3) 蒸发平衡温度随环境温度升高而升高, 但其变化量一般不超过5%。然而, 随着环境温度增高, 油珠的温升速率明显加快, 对强化燃烧有利。

(4) 燃油初温对蒸发平衡温度无影响。但初温升高可明显缩短加热时间, 如初始直径为 $100\mu\text{m}$ 的油珠, 在 300K 的环境中燃烧时, 若初始温度从 300K 增加到 380K , 则加热时间可缩短一半。因此燃油予热可以有效地改善燃烧过程。

(5) 理论与实践表明, 油和气之间相对速度不影响蒸发平衡温度。实际上, 当油珠表面的普朗特数和斯米特数相等、或刘易斯数为1时, 相对速度(或油珠运动雷诺数)对传热和传质的影响是相同的。因此表现为蒸发平衡温度和相对速度无关。由于油珠表面的热质交换速率随相对速度的增加而增强, 因此增大相对速度可缩短油珠寿命, 有利于强化燃烧。

5. 本文的计算还表明, 乳化油在减轻排气污染方面的作用主要表现如下:

- (1) 球形焰面温度随掺水量增加而降低, 对抑制氮氧化物的生成有利。
- (2) 球形焰面的半径随掺水量增加而降低, 因而缩短了燃油蒸汽在高温缺氧环境中的停留时间, 有利于抑制微碳粒的生成, 减轻冒烟。
- (3) 油珠蒸发平衡温度随掺水量增加而降低, 有利于抑制液态油珠的热裂化, 因而减轻冒烟。

此外, 水份与燃烧过程中生成的碳粒起反应, 有利于加速碳粒的燃烧, 减轻冒烟。

参 考 文 献

- 〔1〕 李天祥、程久生, “油水乳液单滴的燃烧与微爆”, 工程热物理学报, Vol. 3, No. 3, (1982).
- 〔2〕 Law, C.K., “A Model for the Combustion of Oil/Water Emulsion Droplets”, Combustion Science and Technology, Vol. 17, pp. 29—38, (1977).
- 〔3〕 Dryer, F.L., “Water Addition to Practical Combustion Systems—Concepts and Applications”, 16th Symposium on Combustion, pp. 279—295, (1977).
- 〔4〕 Ivanov, V.M. et al, NASA TTF-258, (1965).

(责任编辑 王华芳)

A STUDY ON EVAPORATION AND COMBUSTION OF OIL/WATER EMULSIFIED FUEL

Zhang Qingfan and Su Ke

(Nanjing Aeronautical Institute)

Abstract

The evaporation and combustion processes of RP-2 aviation kerosene/water and No2 diesel oil/water emulsified fuel are studied experimentally and analytically. The micro-explosion processes of suspended droplets are demonstrated by high-speed photography and also testified by abrupt temperature variation measured with the suspended thermo-couple. A steady state frozen model for an oil/water droplet is adopted to calculate droplet evaporation and combustion. The micro-explosion is assumed to occur as the droplet temperature reaches so called "superheat temperature", which is from 550K to 580K. The calculated results are in good agreement with experimental data. The micro-explosion makes life-time of droplet cut down significantly, and formation of NO_x and soot suppressed by water emulsification. Finally, influences of some parameters, such as ambient pressure and temperature, water content, initial temperature of fuel, and relative velocity of droplet to gas on micro-explosion are investigated.

CALCULATION OF COMPRESSIBLE FLOW AND HEAT TRANSFER ON A ROTATING DISK

Wu Dingyi and Liu Songling

(Northwestern Polytechnical University)

Abstract

In this paper, "BOX" method is extended to swirling compressible flow on a body of revolution, after the boundary layer equation is non-dimensionalized. The torque coefficients and local heat transfer coefficients in the laminar, turbulent and transitional flow regions on the rotating disk are calculated. The variable air properties are taken into account in the calculation. The investigation shows that the modified two-layer turbulence model is suitable to the calculation of the flow on the rotating disk. An appropriate analytical formulation of the turbulence model and relevant constants are also given.