

液体火箭发动机燃烧室液膜冷却数值研究

张宏伟, 陶文铨, 何雅玲, 丰镇平

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 对液体火箭发动机燃烧室中的液膜冷却进行了数值模拟. 采用有限容积法对燃气和液膜控制方程同时进行求解, 对燃气和液膜分别采用标准 $k-\epsilon$ 模型和修正的 Van Driest 模型描述其湍流流动. 燃气的辐射传热采用热流模型计算, 同时对液膜干涸点下游的流动与传热进行了模拟. 详细研究了气液界面上质量、动量和热量的传输特性, 发现当壁面绝热时, 燃气对流传热和液膜蒸发所吸收的汽化潜热在界面热量传递中起主导作用, 但燃气的辐射传热和液膜显热不能被忽略. 同时, 分析了各种因素对液膜长度的影响, 计算结果与实验符合良好, 对工程实践有指导意义.

关键词: 燃烧室; 液膜冷却; 界面; 湍流; 数值模拟

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)07-0748-05

Numerical Study of Liquid Film Cooling in Combustion Chamber of Liquid Rocket Engine

Zhang Hongwei, Tao Wenquan, He Yaling, Feng Zhenping

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: A numerical study was performed to investigate the liquid film cooling in a rocket combustion chamber. The finite volume method was employed to solve simultaneously the respective governing equations for the liquid film and gas stream. The standard turbulence $k-\epsilon$ model was used to simulate the turbulence gas flow and a modified Van Driest model was adopted to simulate the turbulent liquid film flow. Radiation of gas stream was also considered and simulated with the FLUX model. Downstream of the liquid film dryout point the gaseous film cooling was numerically studied. Mass, momentum, and heat transfer characteristics at the interface were investigated. The results show that heat transfer at the gas-liquid interface in a rocket combustion chamber with insulated wall is mainly dominated by the convection of the free stream and transport of latent heat associated with the evaporation of the liquid film. In addition, the effects of the radiation and sensible heat transfer cannot be ignored. Various effects on the liquid film length were also examined. The numerical predictions agree well with the experimental data for the liquid film length.

Key words: combustion chamber; liquid film cooling; interface; turbulence; numerical simulation

液体火箭发动机燃烧室温度高、热流密度大, 推力室的冷却设计需重点考虑. 液膜冷却是一种有效的冷却方式, 各国学者对液膜冷却开展了多年的研究. 文献[1-2]研究了气液界面的结构和液膜的不稳定性, 文献[3-4]对液膜冷却进行了实验研究和理论分析, 文献[5-6]采用数值模拟的方法研究了液膜的

湍流流动和传热, 并与气流流动进行了耦合求解, 但没有考虑辐射传热的影响, 同时其模拟的气体温度比实际的燃烧室温度低得多, 因而不能真实地反映燃烧室液膜冷却的传热传质特性.

实际上, 燃烧室的温度很高, 必须考虑燃气的热辐射. 本文将研究在燃气对流和辐射共同作用下液

膜冷却的传热传质特性.液膜长度是液膜冷却方案设计的一个重要参数,本文也研究了在不同液膜质量流量和液膜进口温度下液膜长度的变化规律.

1 物理数学模型

1.1 控制方程

图 1 为简化的液膜冷却示意图.假定流动是稳态不可压缩的,燃烧过程在瞬间完成,燃气是燃料和氧化剂完全燃烧后的生成物.忽略黏性耗散、轴向扩散和轴向辐射,假设气液界面平滑无波动,且处于热力学平衡,液膜为不透明体.

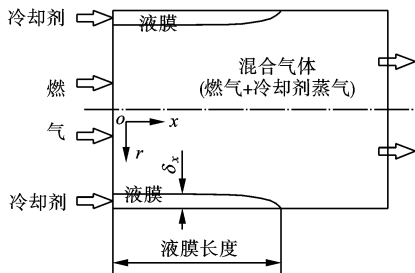


图 1 液膜冷却示意图

雷诺平均的不可压轴对称抛物型 N-S 方程如下.

液膜质量、动量和能量控制方程

$$(1/r) \partial(r_L v_L) / \partial r + \partial(u_L) / \partial x = 0 \quad (1)$$

$$(1/r) \partial(r_L v_L u_L) / \partial r + \partial(u_L u_L) / \partial x = -dp/dx + (1/r) \partial(r_L + L_t) \partial u_L / \partial r \quad (2)$$

$$(1/r) \partial(r_L c_{pL} v_L T_L) / \partial r + \partial(c_{pL} u_L T_L) / \partial x = (1/r) \partial(r_L + L_t) \partial T_L / \partial r \quad (3)$$

气流质量、动量和能量控制方程

$$(1/r) \partial(r_G v_G) / \partial r + \partial(u_G) / \partial x = 0 \quad (4)$$

$$(1/r) \partial(r_G v_G u_G) / \partial r + \partial(u_G u_G) / \partial x = -dp/dx + (1/r) \partial(r_G + G_t) \partial u_G / \partial r \quad (5)$$

$$(1/r) \partial(r_G c_{pG} v_G T_G) / \partial r + \partial(c_{pG} u_G T_G) / \partial x = (1/r) \partial(r_G + G_t) \partial T_G / \partial r + (1/r) \partial(r_G (c_{pv} - c_{pa}) (D + D_t) \partial c / \partial r T_G) / \partial r + S_r \quad (6)$$

冷却剂蒸气浓度方程

$$(1/r) \partial(r_G v_G c) / \partial r + \partial(u_G c) / \partial x = (1/r) \partial(r_G (D + D_t) \partial c / \partial r) / \partial r \quad (7)$$

式中:源项 S_r 是考虑燃气辐射而产生的源项,其计算公式在下面说明;下标 t 表示与湍流特性有关的参数,其值由湍流模型确定.

在任一轴向位置,燃气和液膜应满足总体质量守恒

$$\rho_G u_0 (R - r_0)^2 / 2 = \int_0^R r \rho_G u_G dr + \int_0^x \rho_G v_L (R - r_0) dx \quad (8)$$

$$\rho_0 (R - r_0 / 2) = \int_0^R (r u dr)_L - \int_0^x \rho_G v_L (R - r_0) dx \quad (9)$$

式中:下标 0 表示燃烧室进口; ρ_0 表示进口位置的液膜单位周长质量流量.

采用标准 $k-\epsilon$ 模型模拟气流的湍流流动与传热,液膜的湍流流动与传热采用修正的 Van Driest 模型来模拟, Van Driest 模型方程见文献[5].

混合气体的热物性是温度、压力和组分的函数,本文考虑的是氮气-氧气-水蒸气三组元混合气体,各组分的物性数据来自文献[7].混合气体的动力黏度按 Wilke 公式^[8]计算,导热系数按 Lindsay 和 Bromley^[8]关系式计算,质扩散系数来自文献[8].

1.2 边界条件和界面条件

控制方程的边界条件为:给出进出口条件,中心为对称条件,壁面无滑移、非穿透、绝热.

气液界面 ($y = R - r_0$) 上的耦合条件为:界面上气液相的速度和温度相等,剪应力连续.界面蒸气浓度、界面蒸发速度和界面蒸发质量流量分别为

$$c_1 = M_v p_{v,1} / [M_a (p - p_{v,1}) + M_v p_{v,1}] \quad (10)$$

$$v_{1r} = - [(D + D_t) / (1 - c_1)] \partial c / \partial r \quad (11)$$

$$\dot{m}_1 = [G (D + D_t) / (1 - c_1)] \partial c / \partial r \quad (12)$$

式中: M_v 为蒸气的相对分子质量; M_a 为混合气体中其余组分的折合相对分子质量; $p_{v,1}$ 为界面上蒸气的分压力.

界面能量平衡条件为

$$- [(h + h_r) \partial T / \partial r]_{G,1} + q_{r,1} = - [(h + h_r) \partial T / \partial r]_{L,1} + \dot{m}_1 \quad (13a)$$

上式可用相应的热流密度表示为

$$q_c + q_r = q_s + q_l \quad (13b)$$

式中: q_c 为燃气对流热流密度 (以下简称对流热流); q_r 为燃气辐射热流; q_s 为液膜显热热流,即以导热的方式传向液膜内部的热流; q_l 为液膜汽化吸收的潜热热流.

1.3 辐射模型

液体火箭发动机燃烧室的温度和压力很高,燃气的辐射不能忽略.本文采用径向双通量热流模型^[9]计算燃气热辐射,其控制方程为

$$dq_r^+ / dr = - (a + s) q_r^+ + a E_b + (s/2) (q_r^+ + q_r^-) - (q_r^+ - q_r^-) / r \quad (14)$$

$$dq_r^+ / dr = (a + s) q_r^+ - aE_b - (s/2)(q_r^+ + q_r^-) \quad (15)$$

式中: q_r^+ 和 q_r^- 分别为指向壁面和中心的辐射热流; a 和 s 分别为辐射介质的折合吸收系数和散射系数; $E_b = T^4$ 为黑体辐射力。

上述关于 q_r^+ 、 q_r^- 的常微分方程的边界条件为

$$r = 0 \quad q_r^+ = q_r^- \quad (16)$$

$$r = R \quad \bar{q}_{r,I} = \epsilon_L E_{b,L} + (1 - \epsilon_L) \bar{q}_{r,I}^+ \quad (17a)$$

$$r = R \quad \bar{q}_{r,w} = \epsilon_w E_{b,w} + (1 - \epsilon_w) \bar{q}_{r,w}^+ \quad (17b)$$

式中: 下标 I 表示界面, w 表示壁面, L 表示液膜; ϵ_L 、 ϵ_w 分别表示液膜和壁面的发射率。

燃气能量方程中的辐射源项为

$$S_r = - (1/r) d(rq_r^+ - rq_r^-) / dr \quad (18)$$

在本文的算例中, 水蒸气的吸收系数 a 根据 Hottel 线算图确定, 燃气的散射系数 s 取为 0。壁面按镍基合金考虑, 考虑到液膜很薄, ϵ_L 、 ϵ_w 均取为 0.75。

2 数值方法

抛物型控制方程 (1) ~ (7) 采用有限容积法求解。轴向空间步进的离散采用全隐格式, 径向对流和扩散项采用中心差分离散, 在界面两侧降为一阶差分格式。离散的代数方程采用 TDMA 方法求解。辐射方程 (14) 和 (15) 采用四阶龙格-库塔方法求解。

控制方程在空间上是抛物型的, 求解采用空间步进的方法, 主要求解步骤为: 在任一轴向位置 x , 假定液膜厚度为 δ ; 求解控制方程 (1) ~ (7), 计算 u 、 v 、 t 、 c ; 检验液膜和气流是否满足总体质量守恒方程 (8) 和 (9), 如果不满足, 调整 δ , 并重复第 n 步; 检验流场和温度场是否收敛, 如果迭代收敛, 停止计算, 如果不满足, 则重复第 $n-1$ 步, 直至收敛。

计算网格非均分, 在靠近进口和界面的位置网

表 1 不同网格数下液膜长度计算值的比较

网格数	200 ×92 ×40	100 ×92 ×20	100 ×82 ×20	100 ×72 ×20	50 ×72 ×20
液膜长度/m	0.187	0.189	0.191	0.191	0.190

表 2 计算结果与实验数据的比较

工况	$m_1 \cdot m_2^{-1}$	T_g / K	p / MPa	$G / kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$	$\dot{m} / kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$	L_{exp} / m	L_{comp} / m
1	1.61	2 950	1.74	226	0.269	0.212 0	0.190 0
2	1.50	2 963	1.70	207	0.209	0.162 0	0.146 0
3	1.72	2 935	1.75	220	0.128	0.098 6	0.080 8
4	1.67	2 942	1.77	224	0.296	0.217 0	0.216 0

注: m_1 、 m_2 分别为氧化剂与燃料的质量流量; T_g 为进口燃气温度; p 为燃烧室压力; G 为单位面积燃气质量流量; \dot{m} 为单位周长液膜质量流量; L_{exp} 为液膜长度实验值; L_{comp} 为液膜长度计算值。

格逐渐加密。气相湍流在界面附近采用两层模型壁函数处理。在不同网格数下对一种典型的工况进行了计算, 在网格数 200 ×92 ×40 和 50 ×72 ×20 下计算的液膜长度偏差小于 2% (见表 1), 以下计算均在 50 ×72 ×20 网格下进行。

3 计算结果与讨论

3.1 计算结果与实验资料的比较

对 Morrell 的 LO_x/NH₃ 火箭^[4]进行了计算。Morrell 实验的燃烧室直径为 10.16 cm, 推进剂为液氧和氨, 冷却剂为水。

对 4 种典型工况进行了计算, 表 2 中列出了文献^[4]给出的影响计算结果的主要参数值, 本文中均按此计算。此外计算中燃气进口速度按 1/7 幂次分布考虑, 燃气进口温度、浓度为均匀分布; 液膜进口厚度取为 0.12 mm, 进口速度和温度均匀分布; 水蒸气进口浓度按推进剂完全燃烧考虑, 取为 0.6。

从表 2 看出, 与实验数据相比, 液膜长度计算结果偏小, 其相对误差为 0.5% ~ 18%, 液膜越长, 相对误差越小。由于 Morrell 的实验报告中没有给出进口温度分布的详细数据, 在计算中进口按等温进行处理, 这一假定可能与实际情况不符, 以至在进口段计算的热流偏大, 液膜长度减小。由于液膜越短, 进口效应越显著, 因此液膜长度的相对误差越大。总的来看, 计算结果与实验数据符合良好。

在以下的算例中, 除液膜参数之外, 其余参数均按典型工况 1 的参数计算。

3.2 轴向热流密度分布

图 2 显示了气液界面上热流密度沿轴向的分布, 可以看出随着温度和浓度边界层的发展, q_c 和 q_s 在进口段沿轴向迅速下降, 之后渐趋平缓, 其中 q_s 沿流向逐渐趋近为 0, 说明随着液膜温度的增大,

燃气侧传来的热流主要被液膜汽化潜热所吸收。 q_t 沿流向缓慢下降,因为燃气的平均温度逐渐降低。 q_c 在进口段逐渐增加,大约在 $x/D = 0.5$ 的位置达到最大值,此后趋于平稳并缓慢下降,这说明液膜的蒸发在进口段下游维持在一个比较平稳的状态。总的来看,在本文的计算条件下,燃气的辐射热流占对流热流的 30% 左右,液膜的显热吸热占汽化潜热的 35% 左右。

图 2 还显示出液膜干涸点下游的热流分布情况。很显然,此时液膜显热和潜热都变为 0,因为液膜已经消失。值得注意的是,对流换热热流为负值,并与辐射热流达到新的平衡,因为假定了壁面绝热。负的对流热流表示热量从壁面传向近壁气体,说明在辐射作用下壁温升高,而近壁气体由于低温冷却剂蒸气的掺混,温度较低,从而起到了对壁面的冷却作用,这就是所谓的气膜冷却。当考虑外部再生冷却时,在液膜干涸点下游壁面温度降低,燃气的对流热流可能为正,但液膜下游的低温气幕隔开了高温燃气与壁面的直接接触,从而降低壁面热流,同样起到对壁面的冷却作用却是不争之事实。

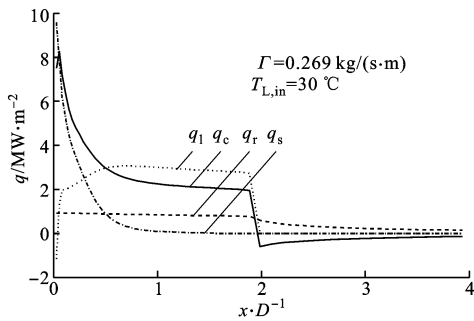


图 2 热流密度轴向分布图

3.3 冷却剂流量对液膜冷却特性的影响

图 3 显示了不同冷却剂流量下界面热流密度和液膜长度的变化。由于辐射热流的大小受液膜和壁面条件的影响很小,所以本文主要比较对流热流、显热和潜热热流的变化。可以看出,冷却剂流量主要影响热流密度进口段的长度,当冷却剂流量增加时,进口段增长是因为液膜的加热需要更长的距离,而下游大部分区域热流密度的分布几乎相同。显热的这种变化引起潜热和对流热流的相应变化。从图中还可看出,随着液膜流量的增大,液膜长度显著增加,因为从总体来看,潜热热流变化不大,所以需要更长的距离液膜才会被蒸干。此外,图中热流密度在进口段先是急剧增加,之后减小,出现一个拐点,这是在进口位置燃气与液膜流动相互耦合、燃气流速和液

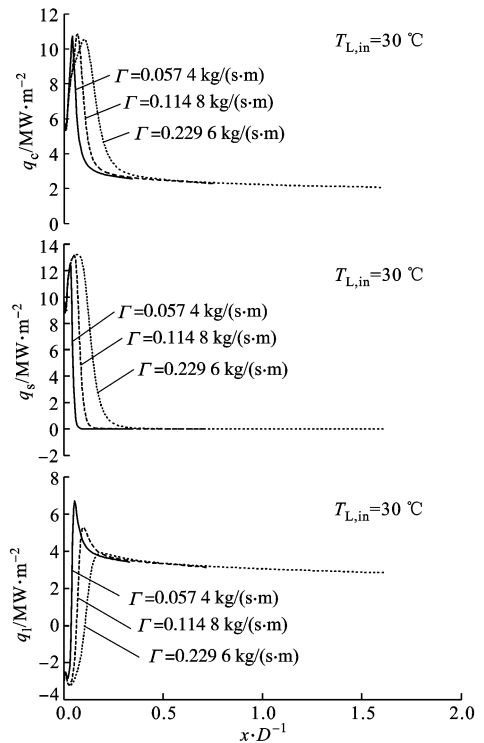


图 3 冷却剂流量对热流密度的影响

膜厚度进行调整的结果,而进口段潜热出现负的现象,是由于进口附近界面温度低,导致燃气中的水蒸气凝结而造成的。

3.4 冷却剂进口温度对液膜冷却特性的影响

图 4 显示了冷却剂进口温度对热流密度的影

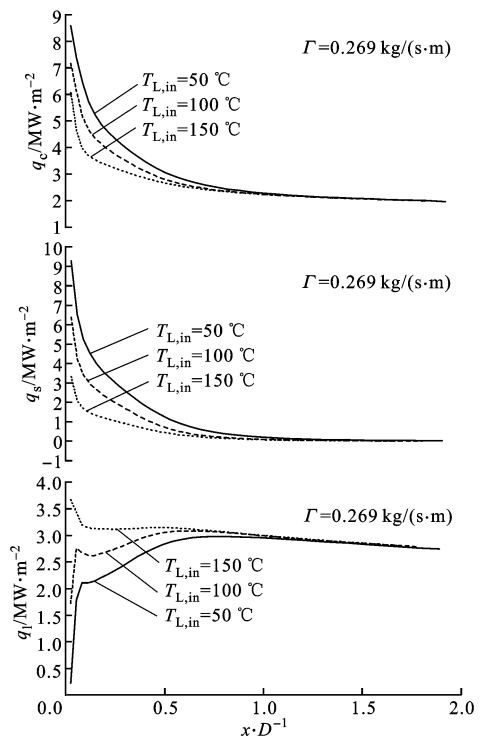


图 4 冷却剂进口温度对热流密度的影响

响.可以看出,液膜进口温度主要影响到进口段的热流密度分布,液膜进口温度增加,进口段燃气对流热流减小,液膜显热热流减小,潜热热流增加.进口段热流密度的这种差别主要是由显热变化引起的,当液膜进口温度增加时,显热相应减小,导致潜热热流增加,蒸发速率变大,而蒸发速率变大反过来使对流热流减小.从图中还可看出,随着液膜进口温度的增加,液膜长度有所减小,但并不显著,因为显热的变化量只占总热流的一小部分.

3.5 液膜流量等因素对壁温的影响

图5显示了液膜流量等不同因素对壁温的影响.可以看出,不同的液膜流量和液膜进口温度仅仅影响进口段的壁温分布,最终壁温会趋向同一个稳定的温度.由于壁面绝热,这一温度非常接近界面温度,只是随着冷却剂流量的增大和液膜进口温度的减小,达到这一稳定温度的距离增大.

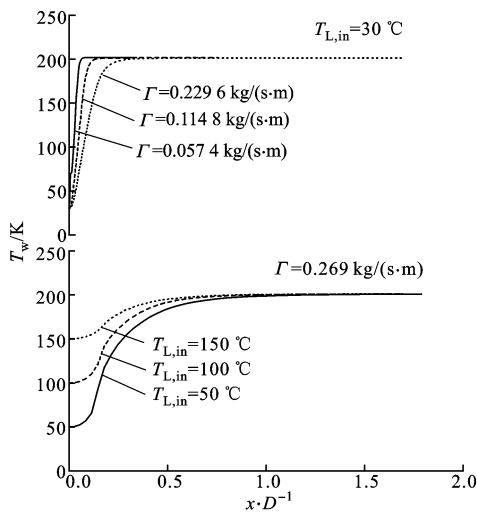


图5 不同因素对壁温的影响

4 结论

对液体火箭发动机燃烧室内的液膜冷却进行了数值模拟,得出以下主要结论.

(1) 在燃烧室液膜冷却中,当壁面绝热时,燃气对流传热和液膜蒸发所吸收的汽化潜热在界面热量传递中起主导作用,但燃气的辐射传热和液膜显热不能忽略.

(2) 燃气对流热流、液膜显热热流和潜热热流的

分布有一个明显的进口段,之后变化趋于平缓.燃气辐射热流在整个液膜段变化平缓并呈下降趋势.

(3) 不同的液膜流量主要影响热流密度进口段的长度,流量增加,进口段长度增大;不同的液膜进口温度影响进口段的热流密度分布,随着进口温度增大,进口段显热热流减小,潜热热流增大,对流热流减小.

(4) 液膜流量增加,液膜长度显著增大;液膜进口温度增大,液膜长度有所减小,但变化不大.

(5) 液膜流量和液膜进口温度影响壁温在进口段的分布.总的来看,在液膜冷却段壁温保持在一个相当低的水平,即低于燃烧室压力下液膜的饱和温度.

参考文献:

- [1] Ueda T, Tanaka H. Measurements of velocity, temperature and fluctuation distributions in liquid films [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1975, 2(3):261-272.
- [2] Wasden F K, Dukler A E. Insights into the hydrodynamics of free falling wavy films [J]. *AIChE J*, 1989, 35(2):187-195.
- [3] Gater R A, L'Euyer M R, Warner C F. Liquid-film cooling, its physical nature and theoretical analysis, AD627028 [R]. Lafayette, Indiana: Jet Propulsion Center, Purdue University, 1965.
- [4] William M G. Liquid film cooling in rocket engines, AD-D234 288 [R]. Arnold AFB, Tennessee: Arnold Engineering Development Center, 1991.
- [5] Yan Wei-Mon, Soong Chyi-Yeou. Numerical study of liquid film cooling in a turbulent gas stream [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1993, 36(16):3877-3885.
- [6] Yan Wei-Mon, Soong Chyi-Yeou. Convective heat and mass transfer along an inclined heated plate with film evaporation [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1995, 38(7):1261-1269.
- [7] Vargaftik N B. Tables on the thermophysical properties of liquid and gases in normal and dissociated states [M]. Washington: Hemisphere Pub. Corp., 1975.
- [8] Reid R C, Sherwood T K. The properties of gases and liquids [M]. New York: McGraw-Hill, 1966.
- [9] 卡里尔 E E. 燃烧室与工业炉的模拟 [M]. 陈熙, 周晓青, 译. 北京: 科学出版社, 1987.

(编辑 荆树蓉)