

微重力下环境压力和辐射再吸收对火焰沿薄燃料表面传播的影响*

杜文锋^{①②**} 胡文瑞^①

(①中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080; ②中国人民武装警察部队学院消防工程系, 廊坊 065000)

摘要 当环境气体不具备辐射特性时(例如环境气体为 O_2-N_2), 在较小的环境压力下, 火焰向燃料表面的热传导是火焰传播的主要驱动力。但随着环境压力的增大, 火焰传播速度越来越大, 火焰对燃料表面的热辐射逐渐成为火焰传播的主要驱动力之一。当环境气体具有较强的辐射特性时(例如环境气体为 O_2-CO_2), 在较小的环境压力下, 火焰前沿环境气体的辐射再吸收将强化火焰对燃料表面的传热、热辐射和热传导在火焰传播机理中均起重要作用。随着环境压力的增大, 氧气向火焰的扩散加强, 燃烧反应加剧, 火焰传播加速。当环境压力大于一定值时, 进一步增大环境压力, 环境气体的辐射再吸收使火焰对燃料表面的热辐射减弱。因此, 火焰传播速度反而随着环境压力的增大而减小, 火焰向燃料表面的热传导逐渐成为火焰传播的主要驱动力。

关键词 火焰传播 辐射再吸收 微重力

Fernandez-Pello 等人^[1]用 Damkohler 数(表征特征停留时间与气相燃烧特征时间的比值)对正常重力下火焰沿燃料表面传播速度与环境压力 P_∞ 之间的关系进行了实验数据的关联, 结果表明, 火焰传播速度随 Damkohler 数的增大而增大, 并逐渐趋近于常数。在正常重力环境中, 当火焰沿燃料表面向下传播时, Damkohler 数与 $P_\infty^{2/3}$ 成正比关系。这意味着, 随着环境压力的增大, 火焰传播速度随之增大, 并趋近于常数。而在微重力下, Bhattacharjee 等人^[2]用数值模拟研究了环境压力对火焰传播的影响, 并在航天飞行器上进行了微重力实验。结果表明, 在静止的微重力环境中, 火焰传播速率对环境压力的变化更敏感, 但基本趋势并没有改变, 即火焰传播速度随环境压力的增大而增大。因此, 人们曾长期认为, 火焰沿燃料表面的传播速度随环境压力的增大而增大。本文的研究表明, 当环境气体具有热辐射特性时, 在一定条件下, 火焰传播速度先随环境压力的增大而增大, 之后, 进一步增大环境压力又将使火焰传播速度减小。

1 理论分析

火焰沿薄燃料表面的传播如图 1 所示。空气的流动方向与火焰传播方向相反。坐标系相对于火焰固定不变, 从而使火焰传播成为稳态问题。燃料表面相对于火焰的运动速度在数值上与火焰传播速度 V_f 相等, 而环境气体相对于火焰的运动速度 V_r 等于火焰传播速度 V_f 和空气流

2002-10-09 收稿, 2003-01-14 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 59986004)

** E-mail: wfdu6266@sina.com

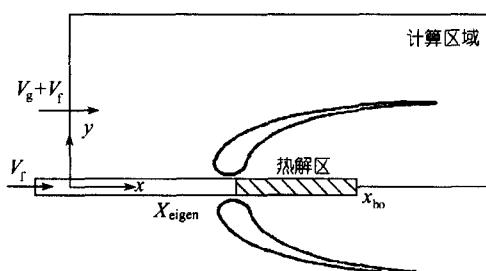


图 1 火焰传播示意图

速 V_g (本文中, 环境气体静止时, $V_g = 0$)之和, 即 $V_f = V_f + V_g$.

由热传导与热对流的平衡得到的火焰特征尺寸为 $L_g = \alpha_g / V_f = \lambda_g / (\rho_g C_g V_f)$. 当 Lewis 数等于 1 时, 火焰特征尺寸可以表示火焰内部各种反应物浓度梯度的大小. 火焰特征尺寸越小, 参与燃烧的物质的扩散速率越大, 越有利于燃烧的进行.

光学平均吸收长度是与环境气体中的辐射传递有关的一个重要参数, 反映热辐射在环境气体中的穿透距离. 光学平均吸收长度越小, 火焰的热辐射越不容易向外传递, 亦即热辐射更易被沿途气体吸收. 环境压力的变化对上述两个参数有重要影响, 从而影响火焰传播的特征.

当环境气体为透明气体, 不吸收和发射热辐射时, 气体的光学平均吸收长度为无穷大, 火焰具有光学厚度“薄”的特性. 在此条件下分析火焰的热辐射时, 可以忽略火焰及其周围环境气体的辐射再吸收的影响. 于是, 在较低的环境压力下, 火焰的特征尺寸较大, 氧气的扩散速率较小, 火焰内部的化学反应较弱, 同时, 火焰的热辐射率较低. 因此, 火焰对燃料表面的热辐射较弱, 火焰向燃料表面的传热将以导热为主. 随着环境压力的增大, 火焰的特征尺寸减小, 氧气扩散速率增大, 火焰内部燃烧加剧, 温度升高. 因此, 在火焰前沿处, 火焰对燃料表面的导热热通量将增大. 同时, 随着环境压力的增大, 燃烧产物的浓度升高, 因此, 火焰对燃料表面的辐射热通量上升. 这些都将使火焰传播加速.

当环境气体具有发射和吸收热辐射的特性时, 环境气体的辐射再吸收对火焰向燃料表面的传热具有两方面的作用: 一方面, 火焰不仅通过热传导和热辐射对燃料表面直接加热, 而且通过热辐射对火焰周围的环境气体进行加热, 而被加热的环境气体又会对燃料表面进行热传导和热辐射, 环境气体的辐射再吸收特性使火焰向燃料表面的总的传热速率有增大的趋势. 另一方面, 环境气体的辐射再吸收势必对火焰向燃料表面的直接热辐射具有阻碍作用. 于是, 环境压力越大, 气体的光学平均吸收长度越小, 辐射再吸收能力越强, 环境气体对火焰向燃料表面的热辐射的阻碍作用越强, 从而不利于火焰传播. 同时, 环境气体的辐射加热厚度减小, 使辐射加热层向燃料表面的导热减弱, 这也是不利于火焰传播的.

在较小的环境压力下, 特别是当环境压力接近极限压力(环境压力低于该压力时, 火焰熄灭)时, 化学反应受氧气供给速率的限制. 同时, 气体的光学平均吸收长度远大于火焰尺寸, 火焰具有光学“薄”的性质. 因此, 在分析火焰传播时, 可以忽略气体的辐射再吸收. 在此情况下, 随着环境压力的增大, 火焰的特征尺寸减小, 氧气的扩散速率增大, 燃烧加强, 火焰对燃料表面的热传导和热辐射增强, 因此, 火焰传播加速. 但随着环境压力的进一步增大, 气体的光学平均吸收长度逐渐减小. 当火焰尺寸与光学平均吸收长度具有可比性时, 火焰就不再具有光学“薄”的特性, 此时, 必须考虑辐射再吸收对火焰传播的影响. 在此情况下, 火焰传播速度随环境压力如何变化取决于环境压力对以上两方面影响的共同作用. 显然, 这是现有宏观理论难于做出肯定回答的问题, 本文将针对具体问题进行数值模拟的探讨.

2 数学模型

火焰传播模型由描述气体内部的能量守衡、组分守衡、质量守衡和动量守衡的气相模型及描述燃料分解的质量守衡和能量守衡的固相分解模型组成.

2.1 气相模型

气相方程的通用形式为

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + S_\phi, \quad (1)$$

其中 ϕ , Γ_ϕ 和 S_ϕ 的物理意义见表 1.

表 1 方程(1)中 ϕ , Γ_ϕ 和 S_ϕ 的物理意义^{a)}

方程	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
连续方程	1	0	0
动量方程	u	μ	$-\partial P / \partial x$
动量方程	v	μ	$-\partial P / \partial y$
燃料方程	m_f	μ / Pr	$-A_g \rho_g^2 m_f m_{Ox} e^{-E_g / RT}$
氧气方程	m_{Ox}	μ / Pr	$-s A_g \rho_g^2 m_f m_{Ox} e^{-E_g / RT}$
氮气方程	m_N	μ / Pr	0
能量方程	T	μ / Pr	$[-\Delta H A_g \rho^2 m_f m_{Ox} \exp(-E_g / RT) - q_f] / C_p$

a) u , v , m_f , m_{Ox} , m_N , T , P , μ 和 Pr 分别代表在 x 和 y 方向的气体速度、燃料气体质量分数、氧气质量分数、氮气质量分数、气体温度、环境气体压力、气体黏性系数和 Planck 数. A_g , E_g , s , ΔH , q_f 分别为气相反应指前因子、活化能、反应物之间当量系数、化学反应热和辐射热损失速率.

假定化学反应为单步、不可逆的二阶 Arrhenius 反应类型. 气相方程的边界条件为在 $x=0$ 处, $\phi=\phi_\infty$ ($u=V_f+u_\infty$, $v_\infty=0$). 在 $x=x_{\max}$ 处, $\partial\phi/\partial x=0$, $P=P_\infty$. 在 $y=y_{\max}$ 处, $\partial\phi/\partial y=0$, $P=P_\infty$. 在燃料的表面, $y=0$, $u=V_f$, $v=v_w$, $T=T_s$, 而对于各种组分有

$$(\rho_g v \phi - \Gamma_\phi \partial \phi / \partial y)_{y=0} = I_\phi,$$

其中, 对燃料气体, $I_\phi=m''$; 对氧气和氮气, $I_\phi=0$. 在燃毁点(见固相模型中的定义)之后, $\partial\phi/\partial y=0$, $v=0$. V_w , T_s 和 m'' 分别为固体燃料表面的分解气体喷射速度、表面温度和表面燃料分解气体的质量通量. 通过求解固相方程, 可以得到以上参数和火焰传播速度 V_f .

2.2 固相模型

假设固体燃料受热分解服从 Arrhenius 定律, 分解产物为纤维材料的单元分子($C_6H_{10}O_5$)气体, 则描述固体燃料热分解的连续方程、燃料分解方程和能量方程分别为

$$m'' = d(\rho_s \tau V_f) / dx, \quad (2)$$

$$m'' = A_s \rho_s \tau e^{-E_s / RT_s}, \quad (3)$$

$$q''_{gsc} + q''_{gsr} = -\rho_s \tau V_f C_s dT_s / dx + m'' [L_v^0 + (C_g - C_s)(T_s - T_\infty)], \quad (4)$$

式中, q''_{gsc} , q''_{gsr} 和 L_v^0 分别代表气体对燃料表面的导热热通量、辐射热通量和燃料的蒸发热. A_s , E_s , τ 和 ρ_s 分别代表固体分解反应的指前因子、活化能、薄燃料的半厚度和密度. 联立方程(2)~(4), 可以计算沿火焰传播方向, 燃料表面的温度分布 T_s 和密度分布 ρ_s , 并由此计算固体燃料表

面的分解气体喷射速度 V_w . 以上微分方程的边界条件为 $x = 0$ 时, $T_s = T_{s,\infty}$, $\rho_s = \rho_{s,\infty}$. 从火焰到燃料表面的导热通量 q''_{gsc} 和辐射热通量 q''_{gr} 由气体温度场求解.

最后, 为使数学模型封闭, 规定固体燃料计算区域的某点为特征点 x_{eigen} , 该点温度为特征温度 T_{eigen} , 给定合适的特征点和特征温度, 可以使计算得到的火焰位于计算区域的中心. 同时规定特征点下游燃料表面的某点为燃料的燃毁点 x_{bo} , 在燃毁点之后, 燃烧生成的残碳从燃料表面脱落.

2.3 辐射与辐射再吸收计算

由于需要计算辐射再吸收, 因此, 必须对辐射传递方程进行求解. 如果不考虑介质对辐射的散射作用, 辐射传递方程为

$$s \cdot \nabla I(x, s) = k(x)[I_b(x) - I(x, s)],$$

这里, $I(x)$ 是辐射强度, $I_b(x)$ 是黑体辐射强度.

计算过程中只对 CO_2 与 H_2O 的辐射进行了求解.

将辐射热通量矢量定义为

$$q_r(x) = \int_s I(x, s) d\Omega,$$

则能量方程中的辐射热损失项为

$$-\nabla \cdot q_r(x) = k(x)[U(x) - 4\pi I_b(x)], \quad U(x) = \int_{4\pi} I(x, s) d\Omega.$$

上式表明, 微元体得到的净辐射能量等于微元体吸收的辐射能与发射的辐射能之差.

3 计算结果与讨论

3.1 火焰传播速度

图 2 表示的是在 $30\% \text{O}_2-70\%\text{N}_2$ 和 $30\% \text{O}_2-70\%\text{CO}_2$ (此处浓度为质量分数, 以下同)两种环境气体中, 环境压力对火焰传播速度的影响. 当环境气体为 $30\% \text{O}_2-70\%\text{N}_2$ 时, 随着环境压力的增大, 火焰传播速度单调上升. 而在 $30\% \text{O}_2-70\%\text{CO}_2$ 环境气体中, 当环境压力约为 2.5 kg/cm^2 时, 火焰传播速度最大. 环境压力小于 2.5 kg/cm^2 时, 火焰传播速度随环境压力的减小迅速减小, 并在压力为 1.2 kg/cm^2 时熄灭. 环境压力大于 2.5 kg/cm^2 时, 火焰传播速度随着环境压力的增大逐渐减小. 这与 Ronney 的实验结果^[3]在趋势上是一致的: 在静止微重力下, 当环境气体为 $28\% \text{O}_2-72\%\text{N}_2$ 时, 火焰传播速度随环境压力的变化出现峰值(环境压力为 $0.25, 0.5, 1.0, 1.5$ 和 2.0 kg/cm^2 时, 火焰传播速

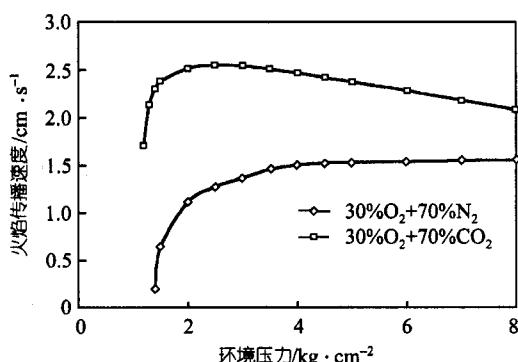


图 2 环境压力对火焰传播的影响

度分别为 $0.3, 0.7, 1.0, 0.9$ 和 0.7 cm/s). 在计算过程中, 环境气体的其他物理化学参数固定不变, 而只有环境气体中的二氧化碳浓度和氮气浓度有变化, 这在数学模型中表现为气体的 Planck 平均吸收系数有变化, 从而使火焰和环境气体的热辐射和辐射再吸收能力发生变化. 因此, 有理由相信, 环境气体的辐射再吸收是引起上述差异的主要原因之一.

3.2 火焰结构

分析火焰结构随环境压力的变化有助于了解环境压力对火焰传播速度的影响。图3给出了在 $30\%O_2+70\%N_2$ 和 $30\%O_2+70\%CO_2$ 两种环境气体中，不同环境压力下火焰结构的变化。在 $30\%O_2+70\%N_2$ 中，环境压力的增大使火焰的尺寸增大。而在 $30\%O_2+70\%CO_2$ 中，环境压力的增大使火焰周围环境气体的被加热厚度减小。

为讨论方便，定义在火焰传播方向上，400 K的温度等值线离开火焰前沿(此处气体对燃料表面的导热通量最大)的距离为火焰对周围气体的加热厚度。

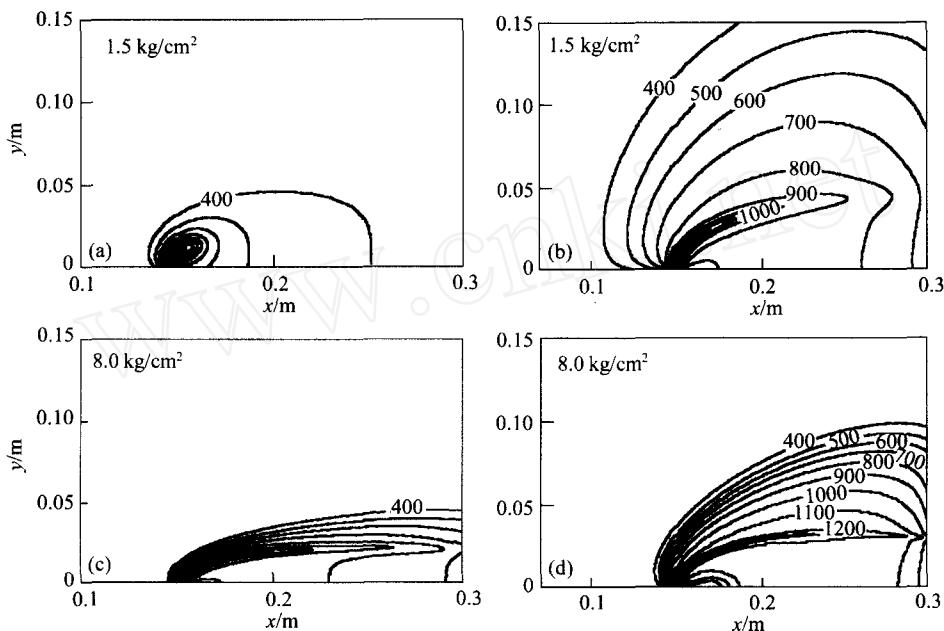


图3 环境压力对火焰结构的影响

(a)和(c)在 $30\%O_2+70\%N_2$ 气体中, (b)和(d)在 $30\%O_2+70\%CO_2$ 气体中

当环境气体为 $30\%O_2+70\%N_2$ 时，火焰尺寸受火焰内部化学反应放热速率和热损失速率控制。在静止微重力下，氧气主要通过扩散进入火焰。随着环境压力的增大，氧气的扩散速率增大，从而使化学反应增强，火焰温度上升。另一方面，当环境压力增大时，气体的辐射率增大。因此，火焰的辐射热损失也会增大。但综合作用的结果，火焰温度上升，因此，火焰传播速度和火焰尺寸都会增大。特别是在压力较小时，氧气的扩散速率很小，因此，火焰内部的化学反应速率几乎完全受氧气供给速率的控制，此时，火焰温度和尺寸等参数随环境压力的变化非常敏感。不过，由于环境气体没有辐射再吸收的能力，火焰只能通过热传导对周围气体加热，因此，环境气体的加热厚度很小。

当环境气体为 $30\%O_2+70\%CO_2$ 时，由于 CO_2 对特定波长的热辐射具有吸收作用(本文假定 CO_2 具有灰体特性)，因此，火焰通过热辐射对整个可视气体空间加热。此时，火焰对周围气体的加热厚度明显增大。当环境压力较大时，由于辐射再吸收的作用，辐射热将主要被与火焰紧密相连的环境气体吸收，即与火焰相连的环境气体对火焰的热辐射有屏蔽作用。环境压力越大，屏蔽作用越明显，因此，火焰周围的环境气体的加热厚度随着环境压力的增大而减小。图

中当环境压力从 1.5 kg/cm^2 上升到 8 kg/cm^2 时, 环境气体的加热厚度从 4 cm 下降到 1.5 cm .

3.3 火焰向燃料表面的传热

图 4 给出了在 $30\% \text{O}_2 + 70\% \text{N}_2$ 和 $30\% \text{O}_2 + 70\% \text{CO}_2$ 两种环境气体中, 在火焰前沿附近, 火焰对燃料表面的导热热通量和辐射热通量的分布。显然, 对 $30\% \text{O}_2 + 70\% \text{N}_2$ 和 $30\% \text{O}_2 + 70\% \text{CO}_2$ 两种环境气体, 环境压力对火焰向燃料表面的导热和辐射热通量的影响是不同的。

从火焰传播的机理考虑, 辐射与辐射再吸收对火焰传播的影响体现在两个方面。一方面, 如果环境气体具有辐射再吸收的特性, 则环境气体的辐射再吸收使火焰上游环境气体的被加热厚度增大, 导致气体对燃料表面的总导热通量增大, 火焰传播加速。另一方面, 当环境气体具有热辐射性质时, 火焰的热辐射能力得到加强, 火焰对燃料表面的辐射热通量增大, 这也是有利于火焰传播的。但与此同时, 火焰内部的峰值温度由于辐射热损失的增大而减小, 从火焰传播的导热机理和辐射机理来看, 又是不利于火焰传播的。

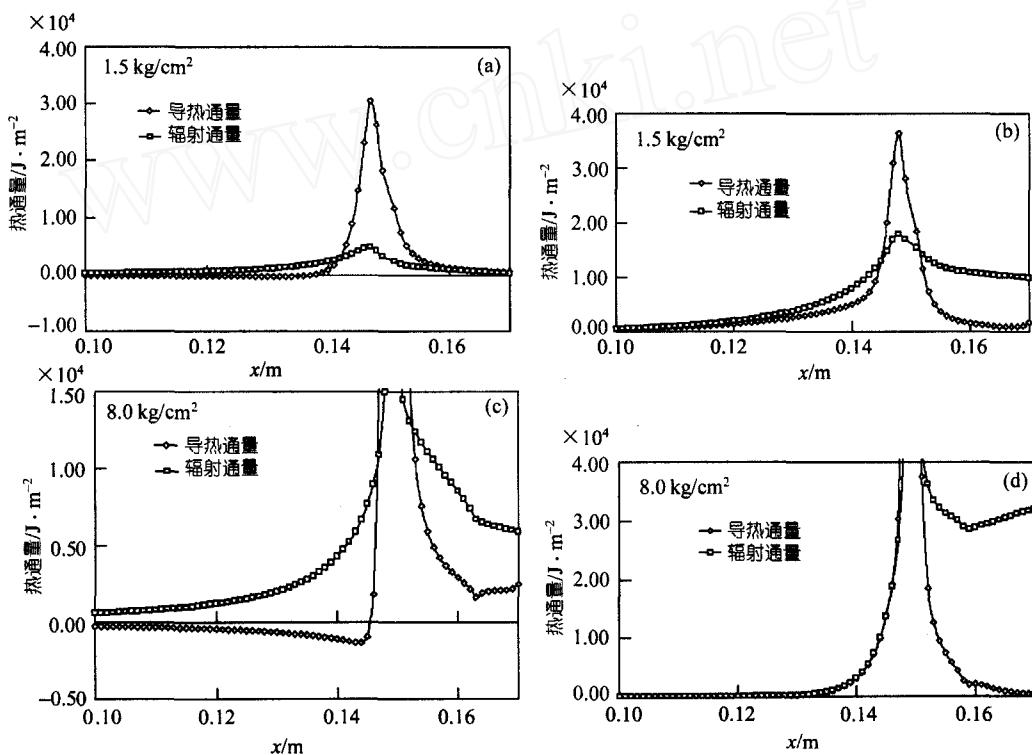


图 4 环境压力对火焰向燃料表面的导热热通量和辐射热通量的影响

(a)和(c)在 $30\% \text{O}_2 + 70\% \text{N}_2$ 气体中, (b)和(d)在 $30\% \text{O}_2 + 70\% \text{CO}_2$ 气体中

在 $30\% \text{O}_2 + 70\% \text{N}_2$ 气体中, 当环境压力为 1.5 kg/cm^2 时, 在火焰前沿附近, 火焰对燃料表面的导热热通量大于辐射热通量, 热传导是火焰传播的主要驱动力, 见图 4。当环境压力增大时, 由于火焰的特征尺寸减小, 各种物质的扩散加速, 从而使燃烧强化, 火焰传播加速。此时, 由于火焰内部温度增大, 且辐射产物的浓度增大, 使得火焰对燃料表面的辐射强度增大。在图 4 中, 当环境压力为 8 kg/cm^2 时, 火焰前沿上游的辐射热通量大于导热热通量。因此, 随着环境压力的增大, 火焰对燃料表面的辐射加热逐渐成为火焰传播的主要机理之一。

在 $30\%O_2+70\%CO_2$ 中, 当环境压力为 1.5 kg/cm^2 时, 在火焰前沿附近, 除了紧邻火焰前沿的部分外, 火焰对燃料表面的辐射热通量大于导热热通量, 火焰对燃料表面的加热延伸到火焰上游很远的地方。因此, 辐射传热是火焰传播的主要驱动力。由于辐射再吸收, 火焰上游的环境气体被辐射加热, 造成气体温度大于燃料表面温度。因此, 气体对燃料表面的导热热通量大于零。在火焰前沿附近, 虽然气体对燃料表面的导热热通量还是大于辐射热通量, 但辐射热通量的峰值已经接近导热热通量。当环境压力为 8 kg/cm^2 时, 导热热通量和辐射热通量的分布发生了很大的变化。首先, 在火焰前沿, 辐射热通量虽然仍然小于导热热通量, 但在火焰前沿的下游, 燃料表面的辐射热通量比导热热通量大得多。其次, 在火焰前沿的上游, 火焰对燃料表面的加热长度明显缩短, 这是气体光学平均吸收长度减小的结果。

图 5 给出了在 $30\%O_2+70\%N_2$ 和 $30\%O_2+70\%CO_2$ 两种环境气体中, 在火焰前沿上游燃料表面的总辐射热通量 Q_{rad} 和总导热热通量 Q_{cond} 随环境压力的变化。

在 $30\%O_2+70\%N_2$ 中, 当环境压力较小时, 总导热热通量 Q_{cond} 比总辐射热通量 Q_{rad} 大, 火焰向燃料表面的导热是火焰传播的主要驱动力。随着环境压力的增大, 总辐射热通量 Q_{rad} 逐渐增大, 而总导热热通量 Q_{cond} 在达到最大值后有下降的趋势。最后, 总辐射热通量 Q_{rad} 在较大的环境压力时超过总导热热通量 Q_{cond} , 成为火焰传播的主要驱动力。从图 4 可以看出, 当环境压力为 8.0 kg/cm^2 时, 在火焰前沿处, 火焰向燃料表面的总导热热通量 Q_{cond} 仍然大于总辐射热通量 Q_{rad} 。之所以会出现燃料表面的总导热热通量 Q_{cond} 随环境压力的增大而减小, 主要是因为在紧邻火焰前沿的地方, 由于辐射加热, 燃料表面的温度大于与表面相邻的气体的温度, 从而使气体向燃料表面的导热热通量出现了负值的结果。

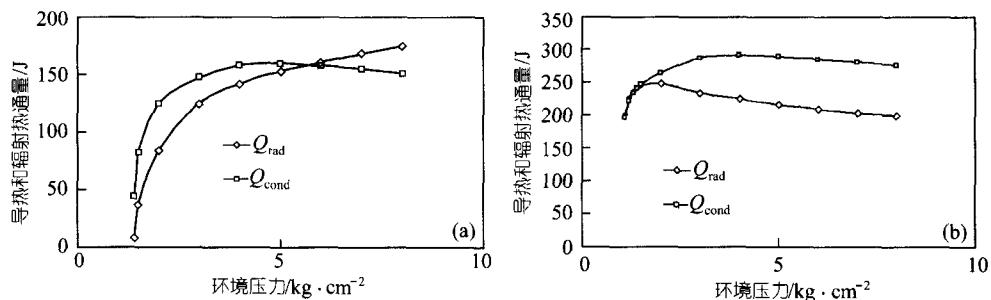


图 5 环境压力对燃料表面的总导热热通量 Q_{cond} 和总辐射热通量 Q_{rad} 的影响

(a) $30\%O_2+70\%N_2$, (b) $30\%O_2+70\%CO_2$

在 $30\%O_2+70\%CO_2$ 中, 当环境压力较小时, 火焰对燃料表面的总辐射热通量 Q_{rad} 和总导热热通量 Q_{cond} 几乎相等, 因此, 火焰对燃料表面的热辐射和热传导是火焰传播的主要驱动力。但随着环境压力的增大, 由于环境气体的辐射热屏蔽效应的增强, 火焰对燃料表面的辐射热通量 Q_{rad} 逐渐减小。同时, 辐射热屏蔽现象的增强使火焰前沿附近被加热气体的厚度也随之减小, 从而使被加热气体对燃料表面的导热热通量也减小, 结果气体对燃料表面的总导热热通量 Q_{cond} 也出现了减小的趋势。至此, 回答了在理论分析中提出的问题: 在具有较强辐射特性的环境气体中, 火焰沿燃料表面传播时, 环境压力的变化如何影响火焰传播?

4 结论

以上计算与分析表明, 当环境气体具有不同的辐射特性时, 环境压力对火焰沿薄燃料表

面传播具有不同的影响。当环境气体为 $30\%O_2+70\%N_2$ 时，在较小的环境压力下，火焰主要通过热传导向燃料表面传热。随着环境压力的增大，环境气体中氧气向火焰的扩散速率增大，燃烧增强，温度升高。同时，辐射性气体的浓度增大，气体的辐射率增大。因此，火焰向燃料表面的导热通量和辐射热通量均增大，结果热传导和热辐射成为火焰传播的主要驱动力，火焰传播随着环境压力的增大而加速。当环境气体为 $30\%O_2+70\%CO_2$ 时，在较小的环境压力下，火焰向燃料表面的热辐射和热传导在火焰传播机理中几乎具有相同的重要性。由于燃烧受氧气供给速率的限制，因此，随着环境压力的增大，氧气供给加速，燃烧加强，火焰传播加速。但随着环境压力的进一步增大，环境气体对火焰热辐射的屏蔽作用逐渐增大，火焰对上游燃料表面的热辐射强度越来越弱，火焰对燃料表面的热传导逐渐成为火焰传播的主要驱动力。同时，由于环境气体的被加热厚度的减小，气体对燃料表面的导热热通量也逐渐减小。因此，随着环境压力的增大，火焰传播速度逐渐减小。

参 考 文 献

- 1 Fernandez-Pello A C, Ray S R, Glassman I. Flame spread in an opposed forced flow: the effect of ambient oxygen concentration. In: Eighteenth Symposium (Intl) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1981. 579~589
- 2 Bhattacharjee S, Altenkirch R A, Sacksteder K. The effect of ambient pressure on flame spread over thin cellulosic fuel in a quiescent, microgravity environment. Transactions of the ASME—J of Heat Transfer, 1996, 118: 181~190
- 3 Honda L K, Ronney P D. Effect of ambient atmosphere on flame spread at microgravity. Combustion Science and Technology, 1998, 133: 267~291
- 4 Bhattacharjee S, Altenkirch R A. Radiation-controlled, opposed-flow flame spread in a microgravity environment. In: Twenty-Third Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1990. 1627~1633
- 5 Rogg B, Wang W. RUN-IDL, The Laminar Flame and Flamelet Code. User Manual, Germany, 1994