聚合物小尺寸燃烧中的传热阻碍

姜冯辉^{①②*}, 祁海鹰^①, de RIS J L^②, KHAN M M^②

① 清华大学 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;

② FM Global Engineering & Research 1151 Boston-Providence Turnpike P.O. Box 9102 Norwood MA 02062, USA

* E-mail: jiang.fenghui@fmglobal.com

收稿日期: 2011-01-11; 接受日期: 2011-04-01

摘要 固体燃面上方流动和扩散的气体-炭黑(soot)混合介质对火焰热量反馈(包括外界热源辐射传热)的阻碍作用称为火焰传热阻碍, 它影响着燃烧速率和释热速率. 这一影响应当在火灾蔓延理论模型中定量体现. 小尺寸燃烧的机理研究对于全面描述全尺寸火行为至关重要. 在火蔓延实验装置上, 以非直接测量方式定量研究了不同环境氧浓度时的火焰传热阻碍, 并提出了传热阻碍现象的实验证据和测量途径. 同时建立了独立于实验的、着重描述火焰介质吸收与发射的一维稳态扩散火焰模型, 进一步从物理本质上揭示了现象的机理和规律. 研究发现火焰的传热阻碍系数可高达0.3至0.4, 且基本不随外加辐射强度变化而变化, 但随环境氧浓度升高而增大. 实验数据与模型计算结果符合程度较好.

关键词

聚合物
火焰传热阻碍
气体-炭黑混合介质
气体吸收与发射
外加辐射热流
氧浓度

火焰传热阻碍效应是火灾燃烧中的一个基本物理现象. 固体燃烧时火焰本身和外界热源均向固体表面反馈热量, 使固体内部可燃挥发份析出, 在其表面与空气混合并燃烧, 形成气相火焰. 因此在固体表面上方火焰内存在着一定量的气体-炭黑(soot)混合介质, 包括可燃挥发份和燃烧产物. 大多数火灾燃烧情况下, 火焰和外界热源向燃面的热量反馈主要是以辐射传热的方式进行的. 那么, 燃面上方介质对向燃面的热量反馈来说是否“透明”? 炭黑和部分气相物质对热辐射有吸收和散射作用, 使穿透火焰介质的辐射强度衰减; 另一方面, 它们的发射和同向散射作用又使辐射强度增加, 这两种作用是否相互抵消, 或哪一种更强? 此外, 燃料表面处温度相对较低的挥发份蒸气析出及混合的传质过程对辐射与对流传热过程会产生何种影响?

因为燃烧中向燃面的热反馈决定着燃烧速率和释热速率, 而这两个物理量又是决定火势发展的关

键因素, 所以要准确模拟各种情况下的火势发展, 就必须准确估算火焰传热^[1-3]. 而如果对传热阻碍现象缺乏深入理解, 会影响燃烧和火蔓延模型的准确性. 因此定性和定量回答上述问题对深入认识与理解火焰传热、提高火灾蔓延理论模型准确性以及发展材料可燃性测试和认证技术等意义重大.

在以往和目前的大部分火灾模型及相关研究中, 火焰传热阻碍问题大都被忽略^[4-6]. 目前材料可燃性测试技术要求的迅速提高和火灾蔓延理论模型的快速发展使这一基础问题研究成为“瓶颈”^[7]. 因此在发展材料可燃性认证测试方法的过程中, 将这一需要关注和解决的重要基本问题提炼出来进行深入细致的研究是十分必要和迫切的.

对火焰传热阻碍现象的认识和研究目前已经经历了两个主要阶段, 即识别阶段和初步研究阶段. 最初早在上世纪七、八十年代, 火焰传热阻碍现象在很多与火灾相关的燃烧现象中被观察到, 如室内火灾^[8]、

池火^[9]、“炭黑云”(soot mantle)^[10]等。进入初步研究阶段后,最近一、二十年来,关于火焰传热阻碍现象的观测和计算已经取得了一定的进展。有研究发现甚至高达 40%的热量反馈可能被燃料表面上方的炭黑-气相层所阻碍^[11, 12]。但是目前可查阅到的文献还只是集中于若干个分立的专题,未形成广泛、深入的系统研究。近期有代表性的研究主要包括

1. 现象和数据观测方面的研究,如竖直墙面火焰传热阻碍现象的观测^[13]、燃料挥发份蒸气及燃烧产物气体吸收与发射特性的测试与研究^[14, 15]、火焰中炭黑生成、输运与消耗及其辐射特性^[16~20]的研究、小尺寸试件气化热的测量^[21, 22]以及以气体火焰模拟对辐射传热阻碍现象进行观测^[23]等。

2. 简化物理模型,如描述火焰传热阻碍现象的一维简化模型^[24]、包含传热阻碍概念的一维室内火灾模型^[25]以及模拟浸没于大尺度火焰中的“冷”物体/壁面附近相对低温的气体-炭黑介质层对火焰辐射传热阻碍现象的实用简化模型^[26, 27]等。虽然这些简化物理模型所侧重的问题各有不同,也还不够全面,但对于提高和加深对传热阻碍现象的认识有一定的帮助。

3. 数值计算分析,如 Baek 等人^[28]以及 Chen 等人^[29]针对火焰内燃面上方炭黑层的吸收和发射特性,在常物性和其它简化假设的基础上,联立求解一维能量守恒方程和辐射热流密度方程,从而分别分析温度分布和光学厚度变化对火焰传热阻碍系数的影响。Bedir 等人^[30]针对火焰辐射建立并求解了驻点几何条件下 PMMA 扩散火焰的数值模型,其中应用窄谱带气体辐射模型对 CO₂ 气体、水蒸汽和 MMA 蒸气的吸收和发射特性进行了计算,并给出了净辐射热流随火焰拉伸率的变化。该研究同时比较了 3 种气体在不同火焰拉伸率情况下对火焰辐射贡献的重要程度。这些数值计算方面的研究在揭示和解释现象本质及物理关联方面做出了一定的贡献,但其结果缺少实验佐证,且在研究的系统性和完整性方面也有所欠缺。

经过上述两个研究阶段,目前对于传热阻碍现象的成因、机理和程度都有了一定的认识。但研究中存在的主要问题在于:在研究深度方面,仅侧重于炭黑在吸收和辐射方面的作用,对气体在这方面的作用重视不够,主要原因在于气体辐射是一个难点。在研究手段方面,实验研究与理论模型研究分立或脱节,对于传热阻碍现象,由于难以直接测量,目前缺

乏有效的实验方法。定量测量的途径和手段以及实验方法还有待加强。在研究内容方面,对物理现象和本质的描述不全面,各有所侧重,未能有机地结合起来。

本文研究属基础理论研究,旨在拓展和深化对非匀质火焰中传热阻碍现象机理和规律的认识与理解。在实验方面,将发挥火蔓延实验装置(fire propagation apparatus, FPA)的特长,建立与完善揭示和测量火焰传热阻碍的实验方法,并进行定量测量。可望在以非直接测量手段建立关于火焰传热阻碍现象的实验理解方面有所创新。在物理模型方面,将根据传热学和燃烧学基础理论建立突出气体吸收和发射物理本质的一维稳态扩散火焰模型,对火焰内部的主要传热传质过程进行细致分析,以期发现、认识传热阻碍现象的机理和规律。在数学模型方面,将建立和求解由辐射传递方程、辐射热流密度方程和能量守恒方程联立的一维方程组,并探索精度可接受且简便的求解计算方法。创新性可望体现在提出和引用非匀质气体的吸收与辐射模型(包括关于燃料挥发份蒸气的“单宽带近似模型”)、构造含气体与炭黑吸收辐射模型和变物性参数的一维稳态扩散火焰模型并拓展其应用以及揭示外加辐射和燃烧环境氧浓度变化对火焰传热及燃烧速率的影响规律等 3 个方面。

本研究的另一个创新点在于实验与理论模型相结合。以往的研究中,实验与理论模型相结合、互相印证、互为补充的实例尚不多见。本研究的技术路线是以实验揭示火焰传热阻碍现象和规律,同时建立独立的理论模型,以实验结果和其他实验数据对理论模型进行各个层次和不同角度的验证,最终以经过检验的理论模型展开更深层次的细致研究。

1 火焰传热阻碍的定义与测量

实验研究在 FM Global Research (Norwood, MA, USA) 材料可燃性实验室的火蔓延装置(FPA)上完成。该装置是材料可燃性研究和测试方面的标准装置,执行标准为 ASTM E-2058。

实验中选择了两种黑色聚合物—聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚氧化聚甲醛(POM)作为燃烧试件,分别测量了不同燃烧环境氧浓度情况下(氧体积分数分别为 0, 18%, 21%, 30%和 40%)试件的质量损失速率(热解或燃烧速率)随外加辐射热流密度的变

化情况. 部分实验结果在文献[31]中给出.

实验观察发现: 1) 在 0 至 60 kW/m² 外加辐射热流密度范围内, 质量损失速率随外加辐射热流密度呈线性变化; 2) PMMA 火焰中存在一定炭黑, 且炭黑生成量随燃烧环境氧浓度不同变化显著; 而 POM 火焰中无可见炭黑产生, 火焰完全透明. 火焰辐射的部分、甚至全部来自气体的贡献. 因此, 火焰辐射方面气体的作用不应忽略, 而且后续的理论模型应更加偏重于气体吸收与发射特性的研究, 尤其是燃料挥发分蒸气.

1.1 气化热的测量

准确测量试件的气化热是认识和评估火焰传热阻碍现象的基础. 纯氮环境中, 试件在外加辐射作用下热解时, 存在如下燃料表面的热量平衡

$$\dot{q}_{\text{ext}}'' - \dot{q}_{\text{loss}}'' = \dot{m}_p'' \Delta H_g, \quad (1)$$

式中 $\dot{m}_p''$ 为热解质量损失速率(热解速率); ΔH_g 为气化热(kJ/g); $\dot{q}_{\text{ext}}''$ 代表外加辐射热流密度; $\dot{q}_{\text{loss}}''$ 代表燃料表面热损失(包括表面反射). 将(1)式两边同除以 ΔH_g 得到

$$\dot{m}_p'' = \frac{1}{\Delta H_g} \dot{q}_{\text{ext}}'' - \frac{\dot{q}_{\text{loss}}''}{\Delta H_g}. \quad (2)$$

通过实验得到热解速率 $\dot{m}_p''$ 随外加辐射热流 $\dot{q}_{\text{ext}}''$ 的线性变化, 而该直线的斜率 k_p 即为气化热的倒数, 即

$$\Delta H_g = 1/k_p. \quad (3)$$

该线性关系进一步证实气化热与外加辐射强度无关, 它是材料自身的特性参数.

1.2 传热阻碍系数的定义与测量

对一燃烧表面, 若有入射密度为 $\dot{q}_{\text{ext}}''$ 的辐射热流在穿透火焰、到达燃面时, 由于途中火焰内部气体与炭黑对热辐射的吸收、散射作用, 到达燃面时辐射热流密度衰减为 $\dot{q}_{\text{es}}''$, 这里定义 β_{ext} 为外界辐射热源向燃料表面辐射传热的阻碍系数

$$\beta_{\text{ext}} = \frac{\dot{q}_{\text{ext}}'' - \dot{q}_{\text{es}}''}{\dot{q}_{\text{ext}}''} = 1 - \frac{\dot{q}_{\text{es}}''}{\dot{q}_{\text{ext}}''}, \quad (4)$$

即外界辐射热流在穿透火焰过程中的衰减部分.

同时, 由于外界辐射的作用以及火焰内部气体与炭黑混合物对热辐射的吸收与发射作用, 火焰自

身向燃面的热量反馈较之于没有外界辐射作用时也发生了变化, 于是定义火焰自身向燃面热量反馈的阻碍系数为

$$\beta_{\text{int}} = \frac{\dot{q}_{\text{f-net}}''|_0 - \dot{q}_{\text{f-net}}''}{\dot{q}_{\text{ext}}''}. \quad (5)$$

这里 $\dot{q}_{\text{f-net}}''|_0$ 为“自由燃烧”($\dot{q}_{\text{ext}}'' = 0$) 时火焰向燃面的净传热量, 即热量反馈辐射分量与对流分量之和减去燃料表面热损失. 而 $\dot{q}_{\text{f-net}}''$ 则为外加辐射 $\dot{q}_{\text{ext}}''$ 作用时火焰向燃面的净传热量. 由于外界辐射热量的衰减部分实际上大部分被火焰介质吸收从而致使火焰辐射增强. 于是 $\dot{q}_{\text{f-net}}''$ 包含: 1) 强化的火焰辐射传热; 2) 由于质量燃烧速率增大而弱化的对流传热; 3) 燃料表面的热损失.

若假设燃料表面收到的所有热量全都被用于挥发份的取得, 则燃料表面处存在以下热量平衡

$$\dot{q}_{\text{es}}'' + \dot{q}_{\text{f-net}}'' = \dot{m}'' \Delta H_g. \quad (6)$$

从(4)和(5)式中分别求解 $\dot{q}_{\text{es}}''$ 和 $\dot{q}_{\text{f-net}}''$, 并代入(6)式可得

$$\dot{m}'' = \frac{(1 - \beta_{\text{ext}} - \beta_{\text{int}})}{\Delta H_g} \dot{q}_{\text{ext}}'' + \frac{\dot{q}_{\text{f-net}}''|_0}{\Delta H_g} = k_b \dot{q}_{\text{ext}}'' + \dot{m}_b''. \quad (7)$$

在 $\dot{m}'' \sim \dot{q}_{\text{ext}}''$ 的线性关系中, $\dot{m}_b''$ 表示任意氧浓度环境中没有外界辐射作用时的“自由燃烧”速率. 应用(3)式, 总阻碍系数 β 可以从该线性关系的斜率(k_b)中求出, 即

$$\beta = \beta_{\text{ext}} + \beta_{\text{int}} = \frac{\dot{q}_{\text{ext}}'' + \dot{q}_{\text{f-net}}''|_0 - (\dot{q}_{\text{es}}'' + \dot{q}_{\text{f-net}}'')}{\dot{q}_{\text{ext}}''} = 1 - k_b / k_p. \quad (8)$$

分子中 $\dot{q}_{\text{ext}}'' + \dot{q}_{\text{f-net}}''|_0$ 为外加辐射作用下可能向燃料表面“付出”的总热流密度, 而 $\dot{q}_{\text{es}}'' + \dot{q}_{\text{f-net}}''$ 为相应情况下燃料表面“收到”的“剩余”总热流密度, “付出”与“收到”二者之差则为“丢失”的能量. 因此 β 表示外加辐射作用下向火焰表面传热的相对总损失.

(8)式不但给出了向燃料表面传热总阻碍系数 β 的定义, 而且建立了理论模型与实验测量之间的“桥梁”. 等式的右边为不同氧浓度燃烧环境情况下的“燃烧线”斜率 k_b 与零氧浓度环境中的“热解线”斜率 k_p 之比, 可通过实验测量确定. 等式的左边为各种热流密度的和差比值, 可通过理论模型求得. 这一简单等式分别从理论和实验两个角度反映了对传热阻碍的理解, 也奠定了理论计算与实验结果对比的基

础.

此外, 在(8)式中, 火焰向燃面传热的净热流密度具有辐射和对流两个分量, 即

无外加辐射时

$$\dot{q}_{\text{f-net}}''|_0 = \dot{q}_{\text{rads}}''|_0 + \dot{q}_{\text{cons}}''|_0 - \dot{q}_{\text{loss}}'' . \quad (9)$$

有外加辐射时

$$\dot{q}_{\text{f-net}}'' = \dot{q}_{\text{rads}}'' + \dot{q}_{\text{cons}}'' - \dot{q}_{\text{loss}}'' . \quad (10)$$

下角标 rad, con 和 s 分别表示辐射、对流与燃料表面。在燃烧表面接近黑体的情况下, $\dot{q}_{\text{loss}}''$ 基本不因外加辐射热流不同而变化。将(9)和(10)式代入(8)式得到

$$\beta = \frac{(\dot{q}_{\text{ext}}'' - \dot{q}_{\text{es}}'') + (\dot{q}_{\text{rads}}''|_0 - \dot{q}_{\text{rads}}'') + (\dot{q}_{\text{cons}}''|_0 - \dot{q}_{\text{cons}}'')}{\dot{q}_{\text{ext}}''} = \beta_{\text{rad}} + \beta_{\text{con}}. \quad (11)$$

这里

$$\beta_{\text{rad}} = \frac{(\dot{q}_{\text{ext}}'' - \dot{q}_{\text{es}}'') + (\dot{q}_{\text{rads}}''|_0 - \dot{q}_{\text{rads}}'')}{\dot{q}_{\text{ext}}''}, \quad (12)$$

$$\beta_{\text{con}} = \frac{(\dot{q}_{\text{cons}}''|_0 - \dot{q}_{\text{cons}}'')}{\dot{q}_{\text{ext}}''}. \quad (13)$$

(11)~(13)式表明传热总阻碍系数也具有辐射和对流两个分量, 分别称为辐射传热阻碍系数和对流传热阻碍系数. 前者表征外加辐射热流的衰减和净火焰辐射热量反馈的强化($\dot{q}''_{\text{rads}} > \dot{q}''_{\text{rads}}|_0$)二者之间的博弈结果; 后者则表征由于质量燃烧速率增大而弱化的火焰对流热量反馈($\dot{q}''_{\text{cons}} < \dot{q}''_{\text{cons}}|_0$). $\beta_{\text{rad}} \approx 0$ 则表示火焰对热辐射近似“透明”.

总传热阻碍系数 β 可依据(8)式在实验中测得,然而,其各种分量 β_{ext} , β_{int} , β_{rad} 和 β_{con} 目前则只能由理论模型分析得出,这也体现出本研究技术路线的特色.

2 理论模型与研究

2.1 一维稳态扩散火焰模型概述与主要假设

如图1所示,重点针对火焰内燃料表面上方气体-炭黑混合介质的吸收与发射物理过程建立了如下二维稳态扩散火焰模型:

温度为 T_s 的无限大燃料表面位于 $x = 0$ 处, 火焰的热量反馈使燃料挥发份以恒定常数的质量流速 $\dot{m}''$ 从该表面析出. $x=d$ 处为与环境交界面, 该处保持

图 1 一维稳态扩散火焰模型

环境温度 T_{amb} 与环境氧浓度 Y_{∞} . 氧气与燃料蒸气分别从两侧向中间的火焰面扩散. 该火焰面无限薄, 温度为 T_f , 将整个一维火焰区域划分为燃料区和氧化区. 在燃料区内, 存在燃料挥发份、氮气以及燃烧产物(CO_2 , H_2O , 炭黑)的混合、流动或扩散, 但由于缺乏氧气而没有化学反应. 根据无限薄火焰面的假设, 在火焰面上化学反应足够快, 且消耗全部氧气和大部分燃料. 没有氧气穿越火焰面. 由于不完全燃烧, 极少部分未燃燃料蒸气穿越火焰面, 像惰性气体一样扩散横穿氧化区, 最终在环境界面处释放. 炭黑颗粒全部在火焰面上生成, 并向两边扩散, 且在横穿氧化区时被部分氧化、消耗. 最终在环境界面处释放的炭黑即为实验中所测得的火焰炭黑释放量(通常以炭黑产率表示). 为简化起见, 假设炭黑一直保持原燃料挥发份成分. 综上所述, 氧化区内含有氧气、氮气、燃烧产物(CO_2 , H_2O , 炭黑)以及“惰性”燃料蒸气. 炭黑的氧化反应是发生在氧化区内的唯一化学反应. 燃烧产生的热量和燃烧产物, 包括“惰性”燃料蒸气和未燃尽炭黑, 都在环境界面处向界外释放.

在外界辐射热流 $\dot{q}_{\text{ext}}''$ 穿过整个火焰区的行程中, 受到火焰内气体-炭黑混合介质对辐射的吸收、散射作用而逐渐减弱, 到达燃料表面时的“剩余”热流密度为 $\dot{q}_{\text{w}}''$.

火焰内气体-炭黑混合介质对于热辐射既吸收又发射,其发射所形成的火焰辐射热流在这里独立于外加辐射热流单独考虑. 净火焰辐射 $\dot{q}_r^* = \dot{q}_r^+ - \dot{q}_r^-$ 分别有向内(燃料表面) $\dot{q}_r^+$ 和向外(环境界面) $\dot{q}_r^-$ 两个

分量. 向内的火焰辐射热流穿过火焰区到达燃料表面形成入射热流密度 $\dot{q}_{\text{rads}}'' = \dot{q}_r''(0)$. 同时, 燃料表面也向外发射辐射热流 $\dot{q}_{\text{loss}}'' = \dot{q}_r''(0)$, 包括表面辐射和对入射辐射能量的反射. 于是燃料表面接收的净辐射热流密度为 $\dot{q}_{\text{rads}}'' - \dot{q}_{\text{loss}}''$. 本模型中假设燃料表面为兰贝特表面, 即漫发射表面, 且发射率 $\varepsilon_s = 1$. 在环境界面处, 火焰向外释放的辐射热流为 $\dot{q}_{\text{radd}}'' = \dot{q}_r''(d)$.

整个火焰区内火焰面温度最高. 由于温度梯度加之物性分布不均匀, 火焰产生的热量以导热方式自火焰分别向内和向外传播, 最终到达燃料表面的热流为 $\dot{q}_{\text{cons}}''$; 而到达环境界面处向外释放的热流为 $\dot{q}_{\text{cond}}''$. 同时, 来自燃料表面的质量流以对流换热的方式从燃料表面携走热量而在环境界面处向外释放.

实验中对于火焰释放的一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO₂)气体浓度进行了测量. 但在模型研究中忽略了 CO 的生成. 这一假设的目的在于使理论模型中的化学与数学问题得以简化. 实际上, 以往研究和实验证实多数燃烧反应中 CO 的生成相对于 CO₂ 是小量, 尤其是在燃烧环境氧浓度较高的情况下. 如此使忽略 CO 的假设不会造成难以接受的误差. 此外, 对于模型中所涉及的气相物质, 应用了理想气体的假设.

2.2 一维模型的物理数学方程

综上所述, 所建立的一维稳态扩散火焰理论模型为包含化学反应的传热传质物理过程相互耦合, 从而决定整个火焰区的温度分布、组分分布、光学厚度分布等, 其重点在于描述外加辐射和火焰辐射的相互作用. 辐射热流密度及其变化则主要取决于温度和光学厚度分布. 因此由物理问题所产生的数学模型实际上是一维辐射传递方程、辐射热流密度方程以及能量守恒方程这 3 个主要方程的联立对温度分布求解.

2.2.1 能量守恒方程

模型所涉及的燃烧体系中, 能量的转换、传输与释放由扩散、对流与辐射过程所耦合和控制. 以下关于总焓的守恒方程在火焰两侧的整个区域内成立

$$\dot{m}'' \frac{dh_T}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{k}{c_p} \frac{dh_T}{dx} \right) + \frac{d\dot{q}_R''}{dx}. \quad (14)$$

这里 k 与 c_p 分别为气体导热系数和定压比热, 皆

随温度和空间坐标变化. h_T 为混合气体总焓, 即显焓 h_s 与化学焓 h^0 的代数和

$$h_T(x, T) = h_s(x, T) + h^0(x). \quad (15)$$

$\dot{q}_R''$ 为总辐射热流密度, 朝燃料表面方向符号为正, 反之为负. 它包括两个分量: 外加辐射热流 $\dot{q}_e''$ 和火焰辐射热流 $\dot{q}_r''$, 即

$$\dot{q}_R''(x, T) = \dot{q}_e''(x, T) + \dot{q}_r''(x, T). \quad (16)$$

这里将 $\dot{q}_R''$ 的展开包含在变物性参数的经典一维稳态扩散火焰模型之中. 为了从数学上使问题简化, 先引入了两个辅助坐标系: 1) 初始燃料混合比, Z , 定义为燃烧之前初始混合气体中燃料蒸气的质量分数;

2) 无量纲质量输运参数: $\eta(x) = \dot{m}'' \int_0^x \frac{dx}{\rho D} = \dot{m}'' \int_0^x \frac{c_p}{k} dx$.

随后建立了化学反应方程和组分守恒方程, 从而获得所有组分浓度及其热物性等的一维分布.

2.2.2 火焰介质辐射特性

能量守恒方程(14)中辐射热流密度项 $\dot{q}_R''(x, T)$ 的展开取决于火焰介质的吸收与发射特性. 火焰介质主要包括气体与炭黑. 气体对热辐射的吸收与发射是模型研究中的重点和难点, 尤其是燃料蒸气. 作为前期工作, 文献[31]中详述了气体和炭黑吸收与发射特性的研究及求解. 针对燃料挥发份蒸气吸收与发射的光谱选择性, 采用了单宽带近似假设; 进而运用基于窄谱带模型的 RADCAL 程序对混合气体的吸收与发射特性进行了计算和研究; 最终应用 Curtis-Godson 近似描述非匀质混合气体的光学厚度. 而对于炭黑的吸收和发射, 则应用了灰体假设和他人的实验测量数据^[32].

2.2.3 辐射传递方程和辐射热流密度方程

1) 向外的辐射热流密度

对于给定温度分布 $T(x)$ 和光学厚度分布 $\zeta(x)$ 的气体-炭黑混合介质团, 向外方向上的辐射热流密度可由以下通用辐射传递方程及边界条件描述^[33]

$$\begin{cases} \mu \frac{dI^+}{d\zeta} + I^+ = \frac{\sigma T^4}{\pi}, \\ I^+(x=0, \mu) = \frac{\dot{q}_{\text{loss}}''}{\pi}, \end{cases} \quad (17)$$

这里 $\mu = \cos \theta$, θ 为射线与法向夹角. 燃料表面

假设为兰贝特(Lambert)表面. $\dot{q}_{\text{loss}}''$ 为离开燃料表面的辐射热流, $\dot{q}_{\text{loss}}''/\pi$ 则为燃料表面处沿 θ 方向的辐射强度. 温度分布 $T(x)$ 最终由能量守恒方程求得, 光学厚度分布 $\xi(x)$ 由文献[31]中(27)式计算.

解此定解问题可求得向外的辐射强度为

$$I^+(\xi, \mu) = \frac{\dot{q}_{\text{loss}}''}{\pi} e^{-\xi/\mu} + \int_0^{\xi/\mu} \frac{\sigma T^4}{\pi} e^{-(\xi-\xi')/\mu} d\left(\frac{\xi'}{\mu}\right). \quad (18)$$

由此可见, 在 ξ/μ 处沿 θ 方向向外的辐射强度由两项构成. 其物理意义分别为: 前一项表示“入射”的初始辐射强度 $\dot{q}_{\text{loss}}''/\pi$ 沿 θ 方向经光学厚度 ξ/μ 的衰减、该射线抵达 ξ/μ 处的剩余能量. 第二项表示沿 θ 方向的整个光学厚度 ξ/μ 中, 每一厚度为 $(\xi-\xi')/\mu$ 的介质在 ξ/μ 点上沿 θ 方向上的发射, 并考虑此点后面介质对射线能量的衰减, 该射线抵达 ξ/μ 处的剩余能量. 于是, 向外的辐射热流密度便可通过对辐射强度在半球内(θ 从 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$)积分求得, 即

$$\begin{aligned} \dot{q}_{\text{r-out}}''(\xi) &= -2\pi \int_0^1 I^+(\xi, \mu) \mu d\mu \\ &= -2\dot{q}_{\text{loss}}'' \int_0^1 \mu e^{-\xi/\mu} d\mu - 2 \int_0^{\xi} \sigma T^4 \left[\int_0^1 e^{-(\xi-\xi')/\mu} d\mu \right] d\xi'. \end{aligned} \quad (19)$$

由于“向内”的方向(即朝向燃料表面的方向)定义为正, 因此向外的(即背向燃料表面的)辐射热流则取负值. 于是, 以上积分可简化为

$$\dot{q}_{\text{r-out}}''(\xi) = -2\dot{q}_{\text{loss}}'' E_3(\xi) - 2 \int_0^{\xi} \sigma T^4(\xi') E_2(\xi - \xi') d\xi'. \quad (20)$$

这里 E_2 和 E_3 分别为二阶和三阶指数积分函数. 在辐射问题中通常采用指数核近似(kernel approximation)来简化指数积分函数.

在燃料表面处, $x=0$ 且 $\xi(0)=0$, 于是 $\dot{q}_{\text{r-out}}''(0) = -\dot{q}_{\text{loss}}''$, $\dot{q}_{\text{loss}}''$ 即为离开燃料表面的净辐射热流, 它实际上是燃料表面的有效辐射

$$\dot{q}_{\text{loss}}'' = \epsilon_s \sigma T_s^4 + (1 - \epsilon_s)(\dot{q}_{\text{r-ads}}'' + \dot{q}_{\text{cs}}''). \quad (21)$$

这里右边第一项为燃料表面自身辐射力. $\dot{q}_{\text{r-ads}}'' + \dot{q}_{\text{cs}}''$ 为燃料表面处来自于气体-炭黑混合介质和外界热源的入射辐射热流. 若 $\epsilon_s = 1$, 意味着对投入辐射的反射为零, $\dot{q}_{\text{loss}}''$ 则为燃料表面的“纯”辐射热损

失. 为简化起见, 模型中取 $\epsilon_s = 1$. 这一假设的合理性来自于实验得到的 $\dot{q}_{\text{loss}}''$ 与 T_s 大致吻合.

在环境界面处 ($x=d$), 令 $\xi = \xi_d$, 可求得火焰辐射释热速率

$$\begin{aligned} \dot{q}_{\text{r-ads}}'' &= \dot{q}_{\text{r-out}}''(\xi_d) \\ &= 2\dot{q}_{\text{loss}}'' E_3(\xi_d) + 2 \int_0^{\xi_d} \sigma T^4(\xi') E_2(\xi_d - \xi') d\xi'. \end{aligned} \quad (22)$$

2) 向内的辐射热流密度

令 $y = d-x$, 类似地可得到向内方向上的辐射传递方程及边界条件

$$\begin{cases} \mu \frac{dI^-}{d\zeta} + I^- = \frac{\sigma T^4}{\pi}, \\ I^-(y=0, \mu) = 0. \end{cases} \quad (23)$$

这里向内的光学厚度分布 $\zeta(y)$ 可由文献[31]中(28)式给出. 解此定解问题可求得向内的辐射强度为

$$I^-(\zeta, \mu) = \int_0^{\zeta/\mu} \frac{\sigma T^4}{\pi} e^{-(\zeta-\zeta')/\mu} d\left(\frac{\zeta'}{\mu}\right). \quad (24)$$

由此可见, 在 ζ/μ 处沿 θ 方向向内的辐射仅来自于气体-炭黑混合介质的发射, 即沿 θ 方向的整个光学厚度 ζ/μ 中, 每一厚度为 $(\zeta-\zeta')/\mu$ 的介质在 ζ'/μ 点上沿 θ 方向上的发射, 并考虑此点后面介质对射线能量的衰减, 该射线抵达 ζ/μ 处的剩余能量.

同样, 向内的辐射热流密度可通过对半球内所有方向上(θ 从 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$)的辐射强度积分求得, 即

$$\begin{aligned} \dot{q}_{\text{r-in}}''(\zeta) &= 2\pi \int_0^1 I^-(\zeta, \mu) \mu d\mu = 2 \int_0^{\zeta} \sigma T^4 \left[\int_0^1 e^{-(\zeta-\zeta')/\mu} d\mu \right] d\zeta' \\ &= 2 \int_0^{\zeta} \sigma T^4(\zeta') E_2(\zeta - \zeta') d\zeta'. \end{aligned} \quad (25)$$

进而在(25)式中, 令 $\zeta = \zeta_d$, 可求得燃料表面处来自于气体-炭黑混合介质的入射辐射热流

$$\dot{q}_{\text{r-ads}}'' = \dot{q}_{\text{r-in}}''(\zeta_d) = 2 \int_0^{\zeta_d} \sigma T^4(\zeta') E_2(\zeta_d - \zeta') d\zeta'. \quad (26)$$

结合(20)和(25)式, 可求得如下一维净辐射热流分布:

$$\dot{q}_{\text{r}}''(x) = \dot{q}_{\text{r-in}}''(\zeta) - \dot{q}_{\text{r-out}}''(\xi). \quad (27)$$

在环境界面处, $x=d$ ($y=0$), $\zeta(y=0)=0$ 且 $\xi(x=d)=\xi_d$, 由(22)式可知向外界环境的净辐射释热速率:

$$\dot{q}_r''(x=d) = -\dot{q}_{\text{rad}}'' \quad (28)$$

而在燃料表面处, $x=0$ ($y=d$), $\zeta(y=d) = \zeta_d$ 且 $\zeta(x=0) = 0$, 由方程(20)和(26)可知向燃料表面的净火焰辐射热量反馈

$$\dot{q}_r''(x=0) = \dot{q}_{\text{rad}}'' - \dot{q}_{\text{loss}}'' \quad (29)$$

3) 外加(入射)辐射热流密度

在外加辐射热流穿过气体-炭黑混合介质到达燃料表面之前, 由于介质对热辐射的吸收作用, 辐射热流的强度在行进中逐渐衰减. 这种辐射强度的衰减可简单地由布格尔(Bouguer)定律描述, 即

$$\dot{q}_e''(x) = \dot{q}_e''(y) = \dot{q}_{\text{ext}}'' e^{-\zeta(y)} \quad (30)$$

这里 $\dot{q}_{\text{ext}}''$ 为外加(入射)辐射热流.

在环境界面处, $y=0$ ($x=d$) 且 $\zeta(y=0) = 0$, 于是 $\dot{q}_e''(x=d) = \dot{q}_e''(y=0) = \dot{q}_{\text{ext}}''$. 而在燃料表面, $y=d$ ($x=0$) 且 $\zeta(y=d) = \zeta_d$, 于是实际到达燃料表面的“剩余”外加辐射热流可简单地表示为

$$\dot{q}_{\text{es}}'' = \dot{q}_{\text{ext}}'' e^{-\zeta_d} \quad (31)$$

将(27)与(30)式代入(16)式, 即得到总辐射热流 $\dot{q}_r''(x)$. 这便是能量守恒方程(14)中的辐射源项. 它包含温度分布与光学厚度分布, 而后者却也由温度分布和组分分布决定^[31]. 于是, 利用能量守恒方程, 便可最终对一维温度分布进行数值解, 从而使整个问题得以求解.

2.3 一维火焰模型向小尺度锥形火焰的拓展

应用一维扩散火焰模型, 旨在估算燃料表面上方气体-炭黑混合介质中的传热过程以及拓展和深化对小尺度燃烧中传热阻碍现象的理解. 火焰传热实际上受几何因素影响很大, 尤其是辐射传热. 一维模型便是最简化的几何体. 而实验中的 FPA 火焰实际为浮力驱动的湍流扩散火焰, 为了简化问题, 其火焰形状被理想化为底面相同的圆锥形. 为了将理论模型分析结果与 FPA 实验结果进行合理的对比, 有必要通过建立从机理和规律上反映火焰几何形状对实际辐射传热影响的“桥梁”——将一维火焰的分析进一步向锥形火焰拓展.

对于理想化的同底锥形火焰, 火焰高度是唯一决定火焰形状的关键参数. 对于浮力驱动的湍流扩散火焰, 沿火焰中心线的纵向气流速度可由下式简单估算

$$v \propto \sqrt{gL} \quad (32)$$

这里 L 为距燃料表面的纵向距离, g 为重力加速度 (9.8 m/s^2). 于是, 在水平方向上火焰周围新鲜“空气”的卷吸速度可近似表示为

$$v_e \approx v_0 v = v_0 \sqrt{gL} \quad (33)$$

这里系数 v_0 约为常数. 对于理想化的锥形火焰, 沿纵向距离 L 火焰的侧面积微元可近似表示为

$$\frac{dA_f}{dL} = \phi(Y_{\infty}) \pi \delta \left(1 - \frac{L}{L_f}\right) \quad (34)$$

这里 A_f 为火焰侧面积, L_f 为火焰高度, δ 为燃料表面直径. $\phi = \phi(Y_{\infty})$ 为火焰形状因子, 其定义为实际火焰侧面积与正圆锥形火焰侧面积之比, 即

$$\phi = \phi(Y_{\infty}) = \frac{A_{f,\text{actual}}}{A_{f,\text{conical}}} \quad (35)$$

它表征受环境氧浓度的影响, 实际火焰面位置和火焰形状偏离理想化正圆锥形的程度. $\phi=1$ 表示正圆锥形火焰.

由(33)和(34)式可得到周围新鲜“空气”卷吸的体积流量

$$\begin{aligned} V_e &= \int_0^{L_f} v_e \frac{dA_f}{dL} dL = \pi v_0 \delta \phi(Y_{\infty}) \sqrt{g} \int_0^{L_f} \sqrt{L} \left(1 - \frac{L}{L_f}\right) dL \\ &= \frac{4\pi}{15} v_0 \delta \phi(Y_{\infty}) \sqrt{g} L_f^{3/2} = \frac{4\pi}{15} v_0 \delta \phi(Y_{\infty}) \sqrt{g} L_f^{3/2} \quad (36) \end{aligned}$$

氧气对燃料的质量化学当量比定义为

$$f = \frac{\dot{m}_{\text{O}_2}}{\dot{m}} = v_{\text{O}_2} \frac{M_{\text{O}_2}}{M_F} \quad (37)$$

这里 M 为分子量, v_{O_2} 为化学反应方程式中的耗氧系数. 例如对 PMMA, $f = 1.92$. 前人的研究发现燃烧中实际空气的卷吸量常常数倍于化学当量比, 即

$$f_0 f = \frac{f_0 \dot{m}_{\text{O}_2}}{\dot{m}} = \frac{V_e \rho_{\infty} Y_{\infty}}{\pi \frac{\delta^2}{4} \chi_A \dot{m}''} \quad (38)$$

这里系数 f_0 为一小于 10 的常数, χ_A 为燃烧效率. 将(36)式所表示的 V_e 代入(38)式并求解火焰高度

$$L_f = \left(\frac{15 f_0 f \chi_A \delta}{16 v_0 \sqrt{g} \rho_{\infty} Y_{\infty} \phi(Y_{\infty})} \right)^{2/3} \dot{m}''^{2/3} \quad (39)$$

(39)式给出了火焰高度与质量燃烧速率之间的

关系, 其系数是环境氧浓度 Y_{∞} 的函数. 在本文研究中已取得火焰高度与燃烧速率实验数据的情况下, 该系数可通过数据拟合的方法确定. 令

$$\left(\frac{15f_0 f \chi_A \delta}{16\nu_0 \sqrt{g \rho_{\infty} Y_{\infty} \phi(Y_{\infty})}} \right)^{2/3} = \frac{a}{(1+bY_{\infty})^{2/3}}. \quad (40)$$

于是火焰高度与燃烧速率之间的关系式可简化如下

$$L_f = \frac{a \dot{m}''^{2/3}}{(1+bY_{\infty})^{2/3}}. \quad (41)$$

这里系数 a 与 b 为待定常数, 可通过实验数据最佳拟合的方法来确定.

已知锥形火焰高度, 可求得火焰的平均射线行程长度及其向燃料表面热量反馈的角系数, 利用这两个辐射方面的重要参数可将一维火焰模型的应用向锥形火焰延伸. 即

$$1) \quad \frac{x_{\text{cone}}}{x_{\text{one-dim}}} = \frac{\ell_{\text{cone}}}{\ell_{\text{one-dim}}}. \quad (42)$$

式中 x 为几何坐标, ℓ 为平均射线行程长度^[8], 下角标 cone 和 one-dim 分别表示锥形和一维火焰;

$$2) \quad m'' \Delta H_g = F q''_{\text{rad}} + q''_{\text{cons}} + q''_{\text{es}} - q''_{\text{loss}}. \quad (43)$$

(43)式为燃烧时燃料表面热量平衡, 式中 F 为新引入的辐射角系数. 对于一维火焰, $F=1$; 而对于理想化的锥形火焰, $F_{\text{cone}} < 1$. 式中所有热流密度 $\dot{q}''$ 均从一维模型中求得, 燃烧速率 $\dot{m}''$ 则根据 F 的取值确定. 关于 ℓ_{cone} , $\ell_{\text{one-dim}}$ 和 F_{cone} 的具体定义分别在文献[8]中的(33)式和表 1-4.2 及 1-4.1 中给出.

针对锥形火焰, (42)式根据气体的容积辐射特性和沿途吸收效应, 修正了火焰的光学厚度和物理厚度, 使之能够接近真实地反映气体-炭黑混合介质中辐射传热阻碍的机理和程度. 而(43)式则根据几何形状上的差异, 修正了一维火焰的辐射热量反馈和质量燃烧速率, 从而将一维燃烧模型的应用拓展到 FPA 实验中的小尺度燃烧. 尽管上述两个方程非常简单, 模型研究表明, 它们能够给出与实验数据相吻合的结果.

3 结果对比与讨论

(8)式建立了模型结果与实验数据对比的“桥梁”. 图 2 显示模型计算与实验研究关于总传热阻碍系数

图 2 模型计算与实验研究关于传热阻碍系数的对比

的对比. 纵坐标轴表示该方程左边的传热阻碍系数, 得自于模型计算的各种热流密度; 横坐标轴表示该方程右边的传热阻碍系数, 得自于实验取得的 $\dot{m}'' \sim \dot{q}''_{\text{ext}}$ 直线斜率比值. 图中数据点对应于每个单一实验点, 即不同外加辐射热流密度和燃烧环境氧浓度条件下的实验点.

由图 2 可见: 首先, 所有数据点均分布在对称线上或附近, 实验与模型二者符合程度尚令人满意. 其次, 若燃烧环境氧浓度增大, 传热阻碍系数也随之增大. 再者, 同样条件下, PMMA 的传热阻碍系数略高于 POM. 此外, 模型计算结果显示传热阻碍系数几乎不随外加辐射热流变化(环境氧浓度相同的数据点基本上都处在相同水平线). 而从实验角度看, 数据点存在一个小的变化范围, 这并非说明传热阻碍系数随外加辐射热流变化, 而是因为实验点在精度范围内略有的上下移动就会造成斜率的变化.

图 3 给出了 PMMA 和 POM 火焰传热阻碍系数及其分量 β_{ext} 和 β_{int} 随燃烧环境氧浓度的变化. 实验测得的总阻碍系数也在图 3 中给出, 以示对比. 随着燃烧环境氧浓度的增加, 传热阻碍系数及其分量均增大.

由于两种试件火焰在辐射能力上的差异形成了如下不同表现: 对于 PMMA, 由于其火焰介质光学厚度相对较大, 其对外加辐射的阻碍系数在总传热阻碍系数中占主要比例. 而对于 POM 火焰, 情形却恰恰相反. 其光学厚度相对较小, 对外加辐射的吸收也较小. 于是火焰自身热量反馈阻碍系数 β_{int} 占主导地位. 由于其火焰辐射能力相对不强, 可预见 β_{int} 中应以对流分量的贡献为主.

图 4 分别给出 PMMA 和 POM 火焰的总传热阻

图3 燃烧环境氧浓度对传热阻碍系数的影响
(a) PMMA; (b) POM

碍系数及其辐射和对流分量(β_{rad} 和 β_{con})。不同外加辐射强度情况下数据点基本重合或非常接近,表明传热阻碍系数及其辐射和对流分量几乎不随外加辐射强度变化,但它们随燃烧环境氧浓度升高而增大。

从机理上说,对流和辐射传热两方面的贡献均会促使传热阻碍系数随环境氧浓度增大。两种试件表现出的共性在于对流传热阻碍方面,在氧浓度增加的情况下,火焰面温度升高,燃面质量运输加强,燃面附近温度下降,导致到达燃面的对流热量反馈的降低幅度进一步增加。而它们表现出的个性则在于辐射传热阻碍方面,对于 PMMA 火焰,在氧浓度增加的情况下,炭黑浓度随之增加,加之火焰面温度升高,火焰光学厚度相应增加,对热辐射的吸收增强。而对于 POM 火焰,由于没有炭黑生成,其光学厚度及辐射传热阻碍系数较小且基本不随环境氧浓度变化。因此炭黑生成成为辐射传热阻碍随环境氧浓度变化的主要驱动力。

此外,还可以清楚地看出 PMMA 与 POM 火焰之间的不同。对于 PMMA 火焰,以辐射传热阻碍为主,

图4 传热阻碍系数随燃烧环境氧浓度的变化
(a) PMMA; (b) POM;

同时伴随对流传热阻碍;而对于 POM 火焰,传热阻碍几乎全部源于对流分量的贡献,辐射传热阻碍接近为零,表明 POM 的淡蓝色火焰对热辐射基本“透明”,即由于火焰介质对外加辐射的吸收而强化的净火焰辐射传热几乎可以弥补这种吸收作用所造成的外加辐射能量的损失。

由此可见,燃烧中火焰对流传热阻碍总是存在的,它可以理解为相对低温的燃料挥发份蒸气从燃料表面不断吸收并带走热量。而辐射传热阻碍的大小则依赖于火焰自身的吸收与发射特性,可能存在较大差别。依据辐射传热阻碍系数 β_{rad} 可对火焰的“透明性”进行刻画,即基本“透明”火焰和非“透明”火焰。计算结果表明,小尺度燃烧时 PMMA 火焰属于非透明火焰,而 POM 火焰则属于基本“透明”火焰。

4 结论

1) 火焰传热阻碍是燃烧中的基本物理现象。但

对它进行定量测量则存在着较大的困难, 有效的实验测量方法尚不多见. 本文实验研究在准确测量固体火焰传热阻碍系数方面进行了尝试和探索, 针对非直接测量, (8)式不但给出了向燃面传热阻碍系数的定义, 而且揭示了燃烧中传热阻碍的实验证据, 同时还建立了理论模型与实验观测之间对比的“桥梁”.

2) 实验和理论模型研究发现 PMMA 和 POM 火焰的总传热阻碍系数分别高达 0.4 和 0.3, 且 PMMA 火焰的传热阻碍效果略强于 POM 火焰. 同时还发现火焰的光学厚度和传热阻碍系数几乎不随外加辐射热流变化而变化, 但随燃烧环境氧浓度的升高而增大.

3) 在小尺度燃烧时, 气体的吸收与发射在火焰辐射中占据非常重要的地位, 尤其是燃料表面存在大量未燃挥发份且挥发份蒸气具有较强吸收与发射能力. 对于小尺度 FPA 中的 PMMA 和 POM 火焰, 气

体的吸收和辐射较之于炭黑或许更为重要. 当燃烧环境氧浓度增加时, 炭黑在火焰辐射中的重要性增强, 炭黑生成成为辐射传热阻碍随环境氧浓度变化的主要驱动力.

4) 传热阻碍系数不仅可用来定义火焰传热阻碍, 还可用来刻画火焰对热辐射的“透明性”. 根据新定义的辐射传热阻碍系数, 发现 PMMA 火焰属于非透明火焰, 而 POM 火焰则属于基本“透明”火焰. 传热阻碍系数不仅可用来定义火焰传热阻碍, 还可用来刻画火焰对热辐射的“透明性”. 根据新定义的辐射传热阻碍系数, 发现小尺度燃烧时 PMMA 火焰属于非透明火焰, 而 POM 火焰则属于基本“透明”火焰.

5) 本文模型计算结果与实验数据符合程度较好. 模型研究在一定程度上揭示了物理现象的本质和规律.

参考文献

- de Ris J L. Fire radiation—A review. In: Proceedings of the Seventeenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh: The Combustion Institute, 1979. 1003–1011
- Jiang F H. Flame radiation from polymer fires. Fire Saf J, 1998, 30: 383–395
- Hamins A, Fischer S J, Kashiwagi T, et al. Heat feedback to the fuel surface in pool fires. Combust Sci Technol, 1994, 97: 37–62
- Tewarson A, Ogden S D. Fire Behavior of polymethylmethacrylate. Combust Flame, 1992, 89: 237–259
- Hopkins Jr D, Quintiere J G. Material fire properties and predictions for thermoplastics. Fire Saf J, 1996, 26: 241–268
- Beaulieu P, Dembsey N A. Flammability characteristics at applied heat flux levels up to 200 kW/m². Fire Mater, 2007, 10: 1002
- de Ris J L, Markstein G H, Orloff L, et al. Flame Heat Transfer Part I: Pyrolysis Zone. United States, Norwood, MA: FM Global Internal Technical Report, J.I. 0D0J9.MT. 2005
- Tien C L, Lee K Y, Stretton A J. Radiation Heat Transfer, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. United States, Quincy, MA: The National Fire Protection Association Press, 2002
- Markstein G H. Measurements on gaseous-fuel pool fires with a fiber-optic absorption probe. Combust Sci Technol, 1984, 39: 215–233
- Gregory J J, Keltner N R, Mata Jr R. Thermal measurements in large pool fires. Trans ASME, 1989, 111: 446–454
- de Ris J L, Orloff L. Flame heat transfer between parallel panels. In: Proceedings of the Seventh Symposium (International) on Fire Safety Science, London: International Association of Fire Safety Science, 2006. 999–1010
- Zhou Y P, Yang L Z, Dai J K, et al. Attenuation of incident heat flux by pyrolysis volatiles when heated using resistance element radiation heater. J Fire Sci, 2009, 27: 447–464
- de Ris J L, Markstein G H, Orloff L, et al. Similarity of turbulent wall fires, In: Proceedings of the Seventh Symposium (International) on Fire Safety Science, London: International Association of Fire Safety Science, 2005. 259–270
- Park S H, Stretton A J, Tien C L. Infrared radiation properties of methyl methacrylate vapor. Combust Sci Technol, 1988, 62: 257–271
- Wakatsuki K, Jackson G S, Hamins A et al. Effects of fuel absorption on radiative heat transfer in methanol pool fires. In: Proceedings of the Thirty-First Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh: The Combustion Institute, 2007. 2573–2580
- 张慧, 祁海鹰, 吕子安, 等. 通风对火灾烟气中 CO₂ 和 CO 释放的影响机理的分析. 清华大学学报, 2004, 44: 1087–1091
- 王皆腾, 祁海鹰, 李宇红, 等. 关于碳氢燃料燃烧过程中的烟炱生成. 中国工程热物理学会第十届年会, 青岛, 2001. 463–468
- Lou C, Chen C, Sun Y P, et al. Review of soot measurement in hydrocarbon-air flames. Sci China Tech Sci, 2010, 53: 2129–2141
- 王宇, 姚强, 何旭, 等. 用激光诱导可见光法测量电场影响下火焰碳烟颗粒浓度的分布变化. 中国电机工程学报, 2008, 28: 34–39
- Pagni P J, Okoh C I. Soot generation within radiating diffusion flames. In: Proceedings of the Twentieth Symposium (International) on Combustion, Pittsburgh: The Combustion Institute, 1984. 1045–1054

- 21 Staggs J E J. The heat of gasification of polymers. *Fire Saf J*, 2004, 39: 711–720
- 22 Tewarson A. Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. United States, Quincy, MA: The National Fire Protection Association Press, 2002
- 23 Beaulieu P A. Flammability characteristics at heat flux levels up to 200 kW/m² and the effect of oxygen in flame heat flux. Dissertation of Doctoral Degree, Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 2005
- 24 Lee K Y, Zhong Z Y, Tien C L. Blockage of thermal radiation by the soot layer in combustion of condensed fuels. In: *Proceedings of the Twentieth Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh: The Combustion Institute, 1984. 1629–1636
- 25 Lee K Y, Tien C L. Radiation-induced ignition of condensed fuels in a ceiling fire including the effects of radiation blockage. *Int J Heat Mass Transfer*, 1986, 29: 1237–1244
- 26 Nicolette V F, Larson D W. The influence of large, cold objects on engulfing fire environments. *Heat Mass Transfer Fires*, 1990, 141: 63–71
- 27 Gritzo L A, Nicolette V F. Coupling of large fire phenomenon with object geometry and object thermal response. *J Fire Sci*, 1997, 15: 427–442
- 28 Baek S W, Lee C. Heat transfer in a radiating medium between flame and fuel surface. *Combust Flame*, 1989, 75: 153–163
- 29 Chen S L, Ma H K, Chen D Y. radiation blockage by the interaction of thermal radiation with conduction and convection in the combustion of condensed fuel. *Int Comm Heat Mass Transfer*, 1993, 20: 145–157
- 30 Bedir H, Tien J S. A computational study of flame radiation in pmma diffusion flames including fuel vapor participation. In: *Proceedings of the Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh: The Combustion Institute, 1998. 2821–2828
- 31 Jiang F H, de Ris J L, Qi H Y, et al. Radiation blockage in small scale PMMA combustion. In: *Proceedings of the Thirty-third Symposium (International) on Combustion*, Pittsburgh: The Combustion Institute, 2011, 2657–2664
- 32 Beier R A, Pagni P J. Soot volume fraction profiles in forced-combusting boundary layers. *J Heat Transfer*, 1983, 105: 159–165
- 33 Sparrow E M, Cess R D, *Radiation Heat Transfer*. Augmented Ed. New York: McGraw Hill, 1978