燃烧科学与技术
Journal of Combustion Science and Technology
2018，24(1)：021-026
DOI 10.11715/rskxjs.R201703038

材料厚度对火焰向下传播特性的影响

朱　凤[1,2]，王双峰[1,2]，李　丹[1,2]
（1. 中国科学院力学研究所，中国科学院微重力重点实验室，北京 100190；
2. 中国科学院大学工程科学学院，北京 100049）

摘　要：在常重力静止空气环境中对厚度连续变化的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)平板表面火焰向下传播进行实验研究，分析了材料厚度对火焰传播特性的影响. 结果表明，材料厚度增加时，火焰长度和材料热解长度单调增加，而当材料厚度减小时，材料热解长度和火焰长度先增加后减小. 在这两种情况下，均存在热薄材料和热厚材料的转变厚度，其值与文献中使用均匀厚度材料得到的实验结果及理论预测一致；材料厚度小于该转变厚度时，火焰传播速度与材料厚度呈反比关系，大于该厚度时，火焰传播速度不随材料厚度变化，这分别符合热薄材料和热厚材料火焰传播速度的理论模型.

关键词：火焰传播；热薄材料；热厚材料；转变厚度
中图分类号：TK16　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-8740(2018)01-0021-06

Effects of Fuel Thickness on Downward Flame Spread

Zhu Feng[1,2]，Wang Shuangfeng[1,2]，Li Dan[1,2]
（1. Key Laboratory of Microgravity，Institute of Mechanics，Chinese Academy of Sciences，Beijing 100190，China；
2. School of Engineering Science，University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100049，China）

Abstract：Experiments were conducted in a quiescent air environment at normal gravity to investigate downward flame spread over a polymethylmethacrylate（PMMA）sheet whose thickness varies continuously along its length，and the effect of fuel thickness on flame spread was analysed. The experimental results show that，with increasing fuel thickness，both flame length and pyrolysis length increase monotonically，while both parameters increase first and then decrease when the fuel thickness decreases. The transition between thermally-thin and thermally-thick fuel regime is found in both cases，and the transition thickness agrees well with both previously published experimental result obtained for uniform fuel samples and theory prediction. For the fuel section whose thickness is smaller than the transition thickness，the flame spread rate is inversely proportional to sample thickness，while for the thicker section the flame spread rate is independent of fuel thickness. The relationships between flame spread rate and fuel thickness revealed by the present experiments agree well with the theoretical models for thermally-thin fuel and thermally-thick fuel，respectively.

Keywords：flame spread；thermally-thin fuel；thermally-thick fuel；transition thickness

收稿日期：2017-03-20.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U1738117)；中国科学院空间科学战略性先导科技专项基金资助项目(XDA04020410；XDA04020202-10；XDA04078000).
作者简介：朱　凤（1988—　　），女，博士研究生，zhufeng@imech.ac.cn.
通讯作者：王双峰，男，博士，研究员，sfwang@imech.ac.cn.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

火焰沿着固体材料表面传播的特性受到材料属性的影响，如材料的形状、厚度等[1-8]. 关于材料厚度对火焰传播行为的影响，de Ris[1]首先通过理论计算推导出热薄材料和热厚材料表面火焰传播速度与厚度之间的关系，即热薄材料表面火焰传播速度随着材料厚度的增加而降低，火焰传播速度与材料厚度呈反比，而热厚材料表面火焰传播速度不受材料厚度变化的影响. 在相同的外界气流条件下，具有热厚特性的材料表面火焰传播速度要小于具有热薄特性的材料的表面火焰传播速度，这得到了实验证实[2-7].

目前关于材料厚度对火焰传播影响的研究仍不完善，火焰传播速度随着厚度变化的规律是使用单一厚度的样品进行实验得到的[3, 6-7, 9-13]. Ayani 等[13]对单一厚度的平板试样表面火焰传播进行了研究，证实了火焰传播速度与厚度倒数之间的线性关系. Bhattacharjee 等[6,11]通过实验和数值计算得出在空气中自然对流条件下，材料热薄和热厚的转变半厚度约为 5.2 mm. Jomaas 等[12]对具有一定形状结构的试样进行实验，结果表明，有凹槽的试样表面火焰传播速度是平板试样表面传播速度的 2 倍，随着凹槽宽度的增加，火焰传播速度先增加后降低；而试样厚度突然增加或突然降低时，火焰的形状结构之间也存在差别. 厚度连续变化是一种常见的材料构型，此时表面火焰传播的规律并不清楚，火焰传播对厚度变化的响应特性尤其值得关注.

本文对厚度连续变化的材料进行火焰传播实验，研究厚度变化对材料表面火焰传播特性的影响. 通过对不同厚度变化率的材料进行实验，获取材料由薄向厚变化和由厚向薄变化时的火焰传播现象，分析火焰传播速度、火焰长度和材料热解长度等的变化规律，以及火焰传播特性对厚度变化的响应.

1　实验方法

实验布置示意和试样的放置情况如图 1 所示.聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)试样总长 230 mm，宽度 60 mm、细端厚度 0.5 mm、粗端厚度从 13.75 ~ 23 mm 不等，细端的角度 θ 分别为 4°、5°和 6°，加工误差约 ± 0.4°. 实验所用试样的尺寸特征见表 1. 为了保证火焰的二维性，试样的两侧分别用不锈钢片夹住边缘，不锈钢片的宽度为 20 mm，因此用于燃烧的试样宽度为 20 mm. 同时，不锈钢片起到支架支撑作用. 试样底端距离实验台表面约 40 cm，以保证试样处于开放空间中. 为了避免实验时燃烧产物的污染，将装置放置在通风柜中，通风柜不密封，以保证氧气供给. 为了避免通风对实验的影响，实验时，关闭排风系统，实验结束后打开排风系统进行通风. 实验分两种情况：一种是试样细端向上放置，即材料由薄向厚变化($\Delta\tau>0$)；另一种是粗端向上放置，即材料由厚向薄变化($\Delta\tau<0$). PMMA 主要物理特性参数如表 2 所示.

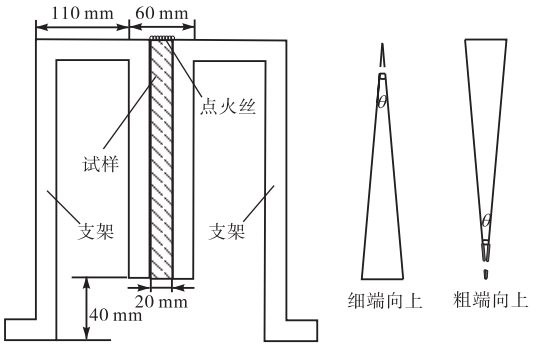


图 1　实验布置示意

Fig.1　Schematic of the experimental setup

实验时将试样固定在试样架上，利用点火丝对试样的上端进行点火，使火焰沿着试样表面逆风向下传播. 在现场观察记录的同时，用 CCD 摄像机从正面记录试样点燃和火焰传播的过程，用于进一步分析，图像记录频率为 25 帧/s. 通过图像可以分析得到火焰传播速度、热解长度和火焰长度等火焰特征参数. 同一条件下，实验重复进行 2~3 次. 在处理数据时，为了保证火焰达到稳定状态，试样上端 20 mm 长度的部分不进行处理.

表 1　试样尺寸

Tab.1　Configuration of test samples

工　况	细端厚度/mm	粗端厚度/mm	变化角度/(°)	有效宽度/mm
1	0.50	14.0	4	20
2	0.50	18.6	5	20
3	0.50	22.8	6	20

表 2　PMMA 物理特性参数

Tab.2　Physical properties of PMMA

参　数	数　值	参考文献
密度 ρ/(kg · m^{-3})	1 190	[13]
比热 c/(J · kg^{-1} · K^{-1})	1 465	[13]
热传导率λ_s/(W · m^{-1} · K^{-1})	0.21	[13]
热解温度 T_v/K	673	[13]
参考热扩散速率α^*/(cm^2 · s^{-1})	2.13	[8]

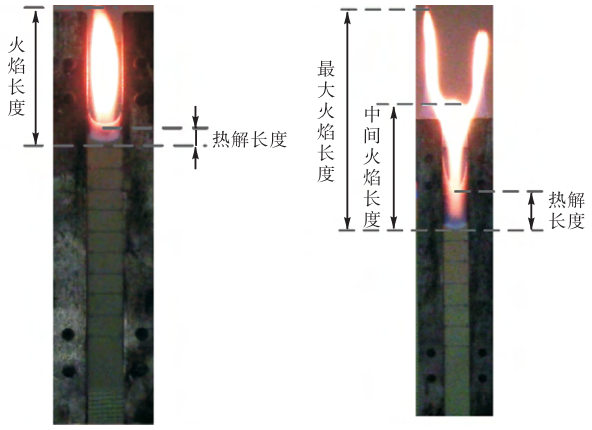
2　结果分析与讨论

2.1　火焰传播现象

图 2 是火焰传播过程中的典型火焰形态，对应的是细端向上($\theta=5°$)和粗端向上($\theta=4°$)的情况. 在本

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

文的研究中，火焰长度和材料热解长度的定义如图 2 所示，对细端向上的试样，由于在火焰传播过程中，火焰形态基本为层流火焰，以 PMMA 表面火焰传播方向上的最大火焰长度为火焰长度，可以观测到的热解部分的上边缘到火焰前锋位置为热解长度. 对粗端向上的试样，火焰向下逆风传播过程中，试样的边缘被夹板夹住的部分也会出现火焰，由于浮力的作用，使得火焰燃烧剧烈，出现“Y”形火焰，火焰中间平面至火焰前锋的距离定义为中间火焰长度，火焰的最大长度定义为最大火焰长度.



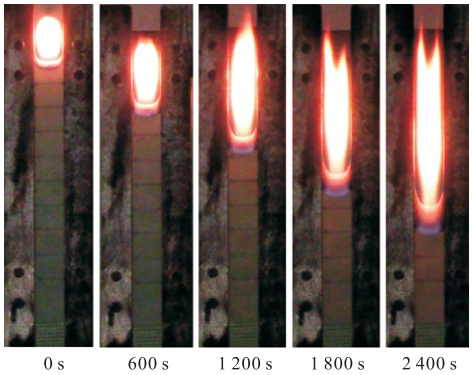
（a）细端向上，$\theta=5°$　　（b）粗端向上，$\theta=4°$

图 2　火焰特征尺寸和材料热解长度的定义

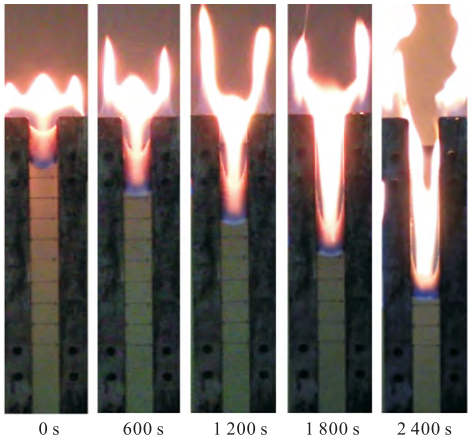
Fig.2　Definition of the characteristic flame length and pyrolysis length

材料由薄向厚变化($\Delta\tau>0$)时，火焰传播过程中的典型图像如图 3(a)所示. 在火焰传播初期，是稳定的层流燃烧火焰，随着试样厚度的增加，火焰出现跳动，直接表现为火焰长度的变化. 热解长度和火焰长度随厚度的变化如图 4 所示. 结果表明，随着火焰逆风向下传播，热解长度随着厚度的增加不断增加，火焰长度也随之增加. 在特定的厚度时，热解长度的变化速率随着厚度变化率的增加而减小. 随着火焰向下传播，火焰长度也逐渐增加. 这种变化表明，在火焰传播过程中，热解长度和火焰长度都没有达到稳定. 在材料厚度小于 5 mm 时，火焰长度几乎线性增加，但随着材料厚度的增加，火焰出现跳动，火焰长度出现波动. 结果还表明，在特定的厚度时，随着厚度变化率的增加，火焰的长度变短. 热解长度和火焰长度随厚度及厚度变化率的变化表现出相同的变化趋势.

材料由厚向薄变化($\Delta\tau<0$)时，火焰传播过程中的典型图像如图 3(b)所示. 与厚度连续增加($\Delta\tau>0$)时不同，在着火后的初始阶段，就形成了剧烈燃烧的火焰，火焰燃烧过程中出现明显的随机跳动现象，火



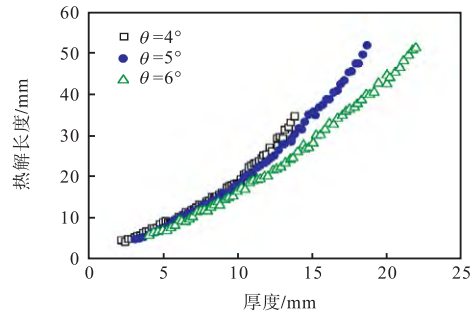
（a）材料由薄向厚变化($\Delta\tau>0$)



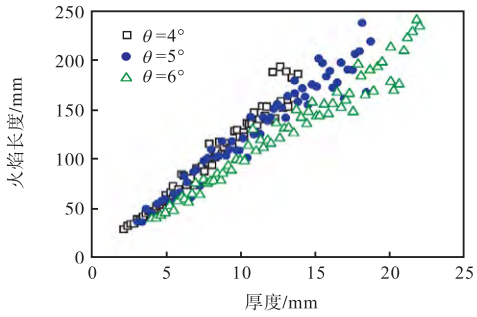
（b）材料由厚向薄变化($\Delta\tau<0$)

图 3　火焰传播过程中的典型图像

Fig.3　Typical images of a spreading flame



（a）热解长度



（b）火焰长度

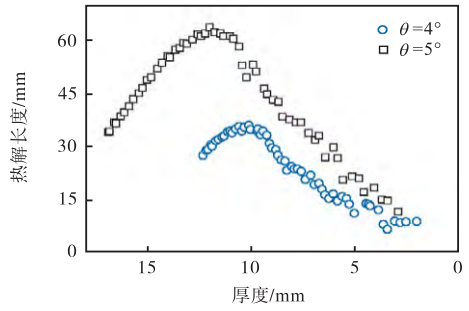
图 4　材料由薄向厚变化时材料热解长度和火焰长度随厚度的变化

Fig.4　Variation of pyrolysis length and flame length with increasing fuel thickness

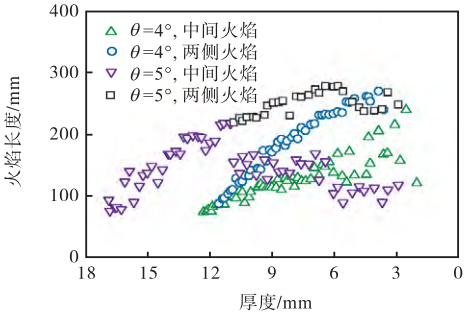
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

焰更加旺盛，火焰长度随机变化. 这种现象一直持续到燃烧结束. 热解长度和火焰长度随着厚度的变化如图 5 所示. 为了显示火焰传播随着时间的变化，在给出两个特征尺度与厚度的变化关系时，采用了逆序的横轴坐标. 对 $\theta = 6°$的试样，火焰由热厚向热薄传播时，火焰长度的不规则跳动更加明显，所以此处没有统计火焰长度. 当火焰传播至试样厚度 10 mm 左右时，火焰包裹了试样，热解区长度不能明确读出，所以也没有统计热解长度的变化.

材料厚度由厚向薄变化($\Delta\tau<0$)时，火焰热解长度随着厚度的减小出现先增加后减小的变化规律. 火焰传播过程中，火焰中间部分的长度随着厚度的变化规律与热解长度相同. 最大火焰长度随着火焰向下传播不断增加. 与前一种情况相比，厚度连续减小($\Delta\tau < 0$)时，火焰长度的变化更加明显，这就表明随着火焰向下传播，剧烈燃烧的火焰引起的浮力作用更加强烈.



（a）热解长度



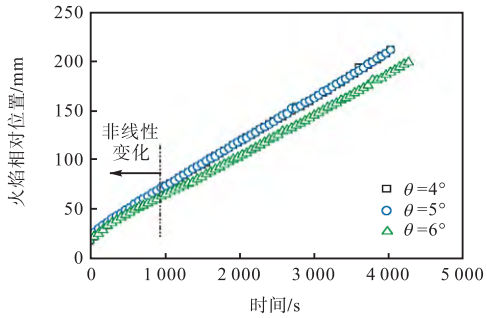
（b）火焰长度

图 5　材料由厚向薄变化时材料热解长度和火焰长度随厚度的变化

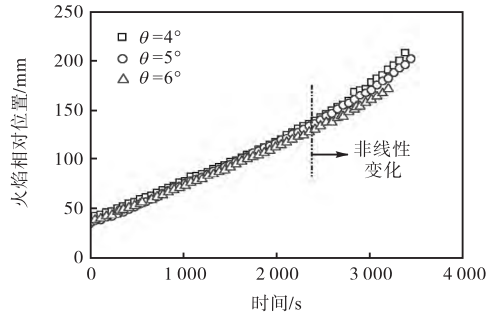
Fig.5　Variation of pyrolysis length and flame length with decreasing fuel thickness

2.2　火焰传播速度

根据火焰传播过程的图像记录，可以获得不同时刻火焰锋面位置，从而计算火焰传播速度. 对实验获得的图像，选取火焰的中心线对火焰锋面进行跟踪，从而得到火焰位置随时间的变化. 在读取火焰位置随时间的变化时，选取火焰离开试样上端大于 20 mm 距离后的时间作为初始时间. 图 6(a)和(b)分别给出了厚度连续增加的 3 种试样和厚度连续减小的 3 种试样(θ 为 4°、5°、6°)的火焰锋面相对位置随时间的变化. 对厚度连续增加的材料表面的火焰传播实验，在火焰稳定传播后的 1 000 s 内，火焰位移随时间的增加速率逐渐减小，这表明在试样厚度较小时火焰的传播速度随厚度的增加逐渐减小. 在大约 1 000 s 后，火焰稳定向前传播，火焰位置与时间存在较好的线性关系，即随着试样厚度的增加，火焰保持稳定的传播速度. 当材料厚度连续减小时，在火焰稳定传播后大约 2 400 s 内，火焰位移随时间线性增加，即随着试样厚度的降低，火焰保持稳定的传播速度. 大约 2 400 s 后，火焰位移随着时间的增加速率变大，这表明随着试样厚度的减小，火焰传播速度增加. 在火焰位移随时间线性变化区域，对数据进行线性拟合，拟合直线的斜率即表示火焰的传播速度. 火焰锋面位移随时间不是线性变化的部分，对曲线拟合后，求取各点的斜率，得到火焰传播的瞬时速度.



（a）材料由薄向厚变化($\Delta\tau>0$)



（b）材料由厚向薄变化($\Delta\tau<0$)

图 6　火焰锋面位置随时间的变化

Fig.6　Position of flame leading edge as a function of time

图 7(a)和(b)分别是由厚向薄变化($\Delta\tau<0$)和由薄向厚变化($\Delta\tau>0$)两种情况时不同厚度变化率的试样表面火焰传播速度随厚度的变化，图中同时给出了 Ayani 等[13]对单一厚度的试样(最大厚度 10 mm，最小厚度 1 mm)逐一测试得到的火焰传播速度结果. 两种情况下，在厚度小于 10 mm 的范围内，测量的火焰传播速度与用单一厚度的试样测得的火焰传播速度几乎相同，在厚度变化率不同时，测量的火焰

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

传播速度差别不大，几种情况下火焰传播速度的微小差别是由于实验误差引起的.

de Ris[1]给出的热薄材料和热厚材料热区表面火焰传播速度的计算公式为

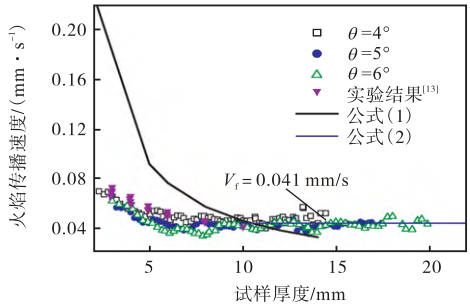
$$V_{\mathrm{f,thick}} \approx \frac{\lambda_{\mathrm{g}}\rho_{\mathrm{g}}c_{\mathrm{g}}}{\lambda_{\mathrm{s}}\rho_{\mathrm{s}}c_{\mathrm{s}}}\left(\frac{T_{\mathrm{f}}-T_{\mathrm{v}}}{T_{\mathrm{v}}-T_{\infty}}\right)^{2}V_{\mathrm{eqv}} \tag{1}$$

$$V_{\mathrm{f,thin}} \approx \frac{\lambda_{\mathrm{g}}}{\tau\rho_{\mathrm{s}}c_{\mathrm{s}}}\left(\frac{T_{\mathrm{f}}-T_{\mathrm{v}}}{T_{\mathrm{v}}-T_{\infty}}\right) \tag{2}$$

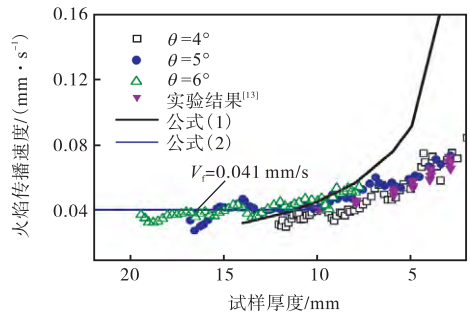
式中：λ_{g} 为气相热传导率；ρ_{g} 为气相密度；c_{g} 为气相比热容；λ_{s} 为燃料热传导率；ρ_{s} 和 c_{s} 为燃料密度和比热容；T_{f} 为绝热火焰温度；T_{v} 为燃料热解温度；T_{∞} 为环境温度；V_{eqv} 为等效气流速度，表示火焰前锋位置处的流动速度. 对垂直平板，de Ris[1]给出了等效气流速度的计算公式为

$$V_{\mathrm{eqv}} = c_{\mathrm{BC}}\left(\frac{\alpha_{\mathrm{g}}g(T_{\mathrm{g,c}}-T_{\infty})}{T_{\infty}}\right)^{1/3} \tag{3}$$

公式(1)和(2)预测的火焰传播速度随厚度的变化曲线也标示在图 7 中. 对于薄材料，在厚度变化率不同时火焰传播速度随厚度变化趋势与理论预测一致，即火焰传播速度随着厚度的增加而降低，整体来看，火焰传播速度与厚度倒数呈线性关系，即 $V_{\mathrm{f}} \propto 1/\tau$. 实验结果小于理论预测结果是由于理论计算模型中假设了气流速度均匀分布以及火焰附着在固体材料表面等，这种假设会给火焰传播速度的理论预测带来严重的误差，与实验结果相比，最大可达 10 倍[5].



（a）材料厚度连续增加



（b）材料厚度连续减小

图 7　火焰传播速度随试样厚度的变化

Fig.7　Flame spread velocity as a function of fuel thickness

对热厚材料，外界环境条件(氧气浓度和气流速度)一定时，火焰传播速度与厚度无关，根据公式(2)和(3)计算出的火焰传播速度为 0.041 mm/s. 本文实验结果表明，在试样的热厚部分火焰传播速度约为 0.041 mm/s，并在一个较小的范围内波动，这与理论预测相符合. Fernandez-Pello 等[2]对厚度为 10 mm 的 PMMA 进行实验，测得的火焰传播速度约为 0.042 mm/s，也与本文结果一致.

2.3　热薄材料和热厚材料之间的转变

由图 7 可知，火焰沿厚度连续变化的固体材料表面传播过程中，存在一个转变厚度，试样厚度小于该厚度时，火焰传播速度随着厚度的增加而减小；大于该厚度时，火焰传播速度不随厚度的变化而变化. 该厚度即材料由热厚向热薄转变的厚度.

当热薄材料厚度达到其厚度的上限时，材料将会向热厚材料转变，此时利用热薄材料火焰传播速度理论的预测结果应与用热厚材料火焰传播速度预测结果相等. Bhattacharjee 等[6]得到热薄和热厚的转变半厚度为

$$\tau_{\mathrm{crit}} = 2\frac{\tau V_{\mathrm{f,thin}}}{V_{\mathrm{f,thick}}} \tag{4}$$

无量纲化后得到

$$\eta = \frac{V_{\mathrm{f,thin}}}{V_{\mathrm{f,thick,EST}}} = \min\left(1,\frac{1}{\Gamma}\right)$$

$$\Gamma = \frac{\tau}{\tau_{\mathrm{crit}}} \tag{5}$$

利用式(4)计算得到的临界厚度约为 5.1 mm，用式(5)对图 7 中的实验数据进行处理，得到无量纲的火焰传播速度与试样厚度之间的关系，如图 8 所示. Bhattacharjee 等[6]理论预测结果高于实验结果，这是由于实际的化学反应受到有限化学反应速率的影响. 在 $\Gamma \geqslant 1$ 时，火焰传播速度保持不变，当 $\Gamma < 1$ 时，火焰传播速度随着 Γ 的增加而降低. 这种变化规律对所有厚度变化率的试样都适用. 也就是说，对所有

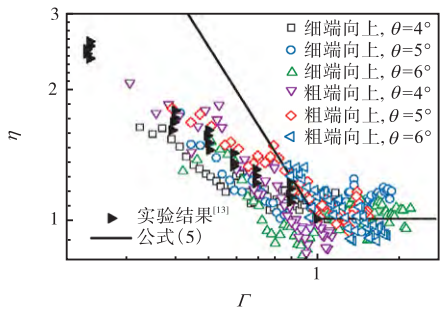


图 8　无量纲火焰传播速度随无量纲材料厚度的变化

Fig.8　Non-dimensional flame spread velocity as a function of non-dimensional fuel thickness

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

厚度变化率的试样，不管材料厚度连续增加还是连续降低，热厚和热薄的转变半厚度都约为 5.1 mm. Bhattacharjee 等[11]在热区火焰传播理论的基础上，推导出自然对流条件下热厚和热薄材料的转变厚度计算公式，PMMA 材料的转变半厚度为 5.2 mm，这与实验结果符合得很好.

T'ien 等[8]考虑材料热传导的特征厚度以及特征时间尺度，通过量纲分析得到热薄和热厚材料的转变半厚度为

$$\tau_{\mathrm{crit}} = \sqrt{\alpha^{*}\alpha_{\mathrm{s}} / (V_{\mathrm{g}} V_{\mathrm{f}})} \tag{6}$$

将表 2 中 PMMA 材料的物理特性参数代入该式可得 $\tau_{\mathrm{crit}} = 5.7$ mm，与本文结果基本相同. 这表明，用厚度连续变化的试样测试得到的热厚和热薄的转变厚度与用均匀厚度试样逐一进行测试的结果是一致的，从而可提供一种确定热厚和热薄材料转变厚度的快捷方法.

3 结 论

(1) 当材料厚度连续增加时，火焰长度和材料热解长度单调增加，而当材料厚度连续减小时，火焰长度和材料热解长度先增加后减小.

(2) 厚度连续增加或减小时，对于空气环境中向下传播的火焰而言热薄和热厚 PMMA 之间发生转变的临界半厚度均约为 5.1 mm，与文献中使用均匀厚度材料得到的实验结果以及相应的理论预测结果一致.

(3) 当材料厚度小于转变厚度时，火焰传播速度与材料厚度呈反比关系，大于该厚度时，火焰传播速度与材料厚度无关，这符合热薄材料和热厚材料火焰传播速度的理论模型.

参考文献：

[1] de Ris J N. Spread of a laminar diffusion flame[C]// *Twelfth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, USA, 1969: 241-252.

[2] Fernandez-Pello A C, Williams F A. Laminar flame spread over PMMA surfaces[C]// *Fifteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, USA, 1975: 217-231.

[3] Fernandez-Pello A C, Ray S R, Glassman I. Flame spread in an opposed forced flow: The effect of ambient oxygen concentration[C]// *Eighteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, USA, 1981: 579-589.

[4] Wichman I S. Flame spread in an opposed flow with a linear velocity gradient[J]. *Combustion and Flame*, 1983, 50: 287-304.

[5] Bhattacharjee S, West J, Altenkirch R A. Determination of the spread rate in opposed-flow flame spread over thick solid fuels in the thermal regime[C]// *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, USA, 1996: 1477-1485.

[6] Bhattacharjee S, Matthew D K, Takahashi S, et al. Downward flame spread over poly(methyl)methacrylate [C]//*Twenty-Eighth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, USA, 2000: 2891-2897.

[7] Quintiere J. *Fundamentals of Fire Phenomena*[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2006.

[8] T'ien J S, Shih H Y, Jiang C B, et al. Mechanisms of flame spread and smolder wave propagation[G]//In Ross H D. *Microgravity Combustion: Fire in Free Fall*. San Diego, USA: Academic Press, 2001: 299-418.

[9] 张 夏，于 勇. 热薄材料表面火焰传播的三维效应[J]. 燃烧科学与技术，2010，16(2)：137-142.
Zhang Xia, Yu Yong. Three-dimensional effects of flame spread over thermal thin solid materials[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2010, 16(2): 137-142 (in Chinese).

[10] Zhang Xia, Yu Yong. Experimental studies on the three-dimensional effects of opposed-flow flame spread over thin solid materials[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158: 1193-1200.

[11] Bhattacharjee S, Laue M, Carmignani L, et al. Opposed-flow flame spread: A comparison of microgravity and normal gravity experiments to establish the thermal regime[J]. *Fire Safety Journal*, 2016, 79: 111-118.

[12] Jomaas G, Torero J, Eigenbrod C, et al. Fire safety in space-beyond flammability testing of small samples[J]. *Acta Astronautica*, 2015, 109: 208-216.

[13] Ayani M B, Esfahani J A, Mehrabian R. Downward flame spread over PMMA sheets in quiescent air: Experimental and theoretical studies[J]. *Fire Safety Journal*, 2006, 41: 164-169.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net