

# 火焰沿层状疏松燃料的定常蔓延\*

朱中华 刘宪德

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

## 摘 要

本文从燃料预热角度出发, 建立了一个无风状态下火焰沿层状疏松燃料水平定常蔓延的物理模型。在该模型中, 假设环境无风, 从热学角度考虑燃料很薄。燃料加热机制包括火焰辐射, 燃料中的热辐射和热传导以及火焰通过扩散对流对其附近燃料的加热, 散热机制包括燃料上表面辐射散热和对流散热。计算得到了火焰蔓延速度同几个主要影响因素之间的关系, 并用曲线拟合技术得到了一个简单的函数表达式。该模型用实验进行了检验, 由于对燃料中的热辐射采用了辐射向量的处理方法, 同时, 考虑了火焰卷吸引起的强迫对流对散热的影响, 从而使计算结果同实验取得了较好的一致。

关键词 火蔓延 热传递 疏松燃料 物理模型

## 1. 引言

森林火灾给人类造成严重的危害, 因此, 人们需要认识它发生发展的规律, 以便控制和扑救。研究林火蔓延就是研究森林火灾的发展规律。半个世纪以来, 许多学者进行了大量的工作, 并提出了多种林火蔓延模型来预报和模拟火蔓延情况<sup>1</sup>。根据考虑物理过程的多少和分析方法不同, 这些模型可分为三类: 在观测野火或控制火烧得到经验关系的基础上建立起来的纯经验模型; 用实验数据和物理关系建立起来的半经验模型; 把林火蔓延抽象成一个物理过程, 用物理化学定律建立起来的物理模型。由于林火蔓延过程的复杂性, 已有的模型都具有一定的局限性。纯经验模型由于不考虑火蔓延的物理规律, 因而它的适用范围很狭窄。半经验模型也由于它未细致地考虑影响火蔓延的物理机制, 因而它的适用面也受到局限。物理模型的局限性在于它跟实际火灾情况有较大的差距。但把林火蔓延抽象成一个纯物理问题来研究, 可以为人们提供一条认识林火蔓延一般规律的途径, 因而近年来受到人们的关注。本文就是把林火蔓延过程抽象成火焰沿层状疏松燃料蔓延这样一个物理问题来研究。

\* 作者热忱感谢郑哲敏学部委员对本文工作的指导, 同时, 作者感谢金辉高级工程师、魏育民副研究员以及邱徐文先生在实验方面的大力协助。本文工作得到国家林火研究与开发基金资助。

一个理想的物理模型应该能够从燃料性质和燃烧的环境条件等方面的情况来预报火蔓延的特征,研究火蔓延规律应把燃料预热、燃料燃烧和空气运动统一起来考虑,但是,由于问题本身具有的难度,已有的物理模型大多只能从燃料预热角度来研究火蔓延规律。也就是说,假定燃烧过程和空气运动的结果是已知的,火焰能够维持并向前推进,燃烧区被处理成一个已知热源。在研究燃料预热过程时,由于传热机制燃料等的处理方法不同,因而提出了不同的模型。这些模型都各有其优点和不足,但都为探明火蔓延的规律作出了有益的贡献。

本文将林火蔓延抽象为火焰沿层状疏松燃料的蔓延,从考虑燃料预热角度出发,建立了一个无风状态下火焰沿均匀等厚度的燃料层定常蔓延的物理模型。在物理模型的基础上,通过计算得到了火焰蔓延速度跟几个主要因素之间的关系,并用曲线拟合技术得到了一个简单的函数表达式。设计了一批室内实验来检验模型的适用性,结果表明,由于在处理燃料中的热辐射时采用了辐射向量的处理方法来取代指数衰减假设,同时,考虑了火焰卷吸引起的强迫对流对散热的影响,从而使计算结果同实验取得了较好的一致。

## 2. 分析

假定一层均匀疏松等厚度的燃料铺在水平绝热平台上,在燃料的一端直线点火,火焰将沿着燃料向前蔓延,经过一段时间的加速蔓延后,火焰蔓延达到定常状态。这时,燃料从火焰吸收的净热量恰好等于燃料从原始状态到燃烧所需要的热量。在这个状态下,火焰蔓延的速度必然是某个特定的值。因此,研究燃料的热平衡过程便可求得火焰蔓延的速度。

对于铺在绝热平台上的疏松燃料,它的吸热散热不外乎以下几个途径:

- (1) 火焰对它的辐射;
- (2) 火焰扩散对流对其附近燃料的加热;
- (3) 燃料中的热交换;
- (4) 燃料向环境的辐射散热;
- (5) 燃料层上表面空气对流带走的热量。

而燃料中的热交换主要包括以下几个途径:

- (a) 由于传导作用,通过固体燃料(当作连续介质)传递的热量;
- (b) 由于传导作用,通过空气(当作连续介质)传递的热量;
- (c) 由于对流作用,通过空气(当作连续介质)传递的热量;
- (d) 由于热弥散作用,通过空气传递的热量;
- (e) 热量从固体燃料迁移到空气;
- (f) 由于辐射作用造成固体燃料间的热量迁移。

其中(a)(b)两项可用等效导热系数来描述,(c)(d)(e)三项由于作用甚微可以忽略。

燃料从原始状态到燃烧需要的热量则包括:

- (1) 燃料内能增加;
- (2) 燃料热解气化潜热;
- (3) 若燃料含有水分,则还应包括水的内能增加和水的汽化热;

在以上分析的基础上,便可建立燃料的热平衡方程。

### 3. 数学模型

在建立数学模型前, 还需补充几条基本假设:

- (1) 从热学角度考虑燃料很薄, 厚度方向的温度分布在很短的时间内均匀;
- (2) 空气不吸收辐射热;
- (3) 燃料达到燃点前燃料层与大气间无物质交换;
- (4) 不考虑燃料中水分蒸发过程, 只认为水分的存在改变了燃料的比热;
- (5) 考虑无风状态(火焰卷吸风除外), 火焰自由定常蔓延。

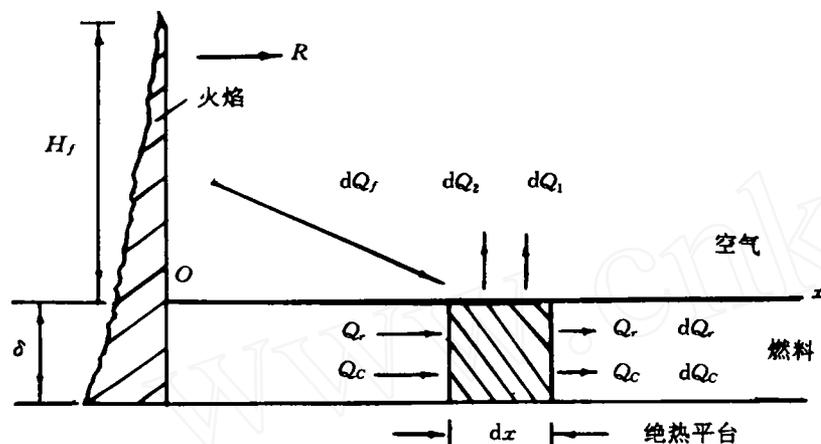


图1 火焰蔓延示意图

在图1所示的坐标系  $x$  下, 坐标原点固定在火焰阵面上, 选取某时刻  $t$ , 坐标为  $x(x > 0)$  的一个任意的单位宽微元体  $\delta dx$ ,  $\delta$  为燃料层厚度, 在  $dt$  时间内, 微元体从火焰辐射中吸收热量  $dQ_f$ , 从相邻燃料的辐射中吸收  $dQ_r$ , 通过热传导中吸收热量  $dQ_c$ , 由于上表面的辐射和对流, 微元体散失的热量分别为  $dQ_1, dQ_2$ , 在这段时间量, 微元体内能增加  $dE$ , 由能量守恒原理可得:

$$dE = dQ_f + dQ_r + dQ_c - dQ_1 - dQ_2 \quad (1)$$

下面对上式的各项进行具体的分析:

- (1)  $dE$ . 内能的增量等于燃料的比热  $C_f$ , 质量  $\rho_b \delta dx$  和温度增量  $dT$  的乘积, 即:

$$dE = C_f \rho_b \delta dx dT \quad (2)$$

其中  $\rho_b$  是燃料的体积密度, 等于单位体积燃料的质量。

对于含有水分的燃料, 燃料的比热由下式近似给出:

$$C_f = C_a + \frac{M}{1+M} [C_w(373 - T_a) + L] / (T_f - T_a) \quad (3)$$

其中  $C_a$  为燃料绝对干燥时的比热;  $C_w$  为水的比热;  $T_a$  为环境温度;  $L$  为 373K 时水的气化热;  $M$  为燃料的含水量, 等于燃料中水的质量除以燃料绝对干燥时的质量。

- (2)  $dQ_f$ . 在假设燃料不透明, 火焰及燃料都为黑体, 火焰前锋面是平面, 且垂直燃料

层表面,火焰宽度无穷大,忽略火焰厚度的前提下,微元体从火焰辐射获得的热量  $dQ_r$ ,可由 Stefan-Boltzmann 定律得到。

$$dQ_r = \sigma(T_f^4 - T^4)F(x)dxdt \quad (4)$$

角系数  $F(x)$  为

$$F(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{\frac{x}{H_f}}{\sqrt{1 + \frac{x^2}{H_f^2}}} \right] \quad (5)$$

其中  $T_f$  为火焰有效辐射温度,  $T$  为燃料的温度,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $H_f$  为火焰高度。

(3)  $dQ_r$ 。由于燃料之间存在辐射热交换,这样,沿着  $x$  方向的热流密度(辐射向量)为(伊萨琴科,1987)<sup>3</sup>:

$$q_r = -\frac{16}{3}\Lambda_r\sigma T^3 \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6)$$

其中  $q_r$  代表热流密度,  $\Lambda_r$  代表辐射的平均自由程长度,于是,  $dt$  时间内微元体从相邻燃料的辐射中吸收的热量  $dQ_r$  为

$$dQ_r = \frac{16}{3}\Lambda_r\sigma \frac{\partial}{\partial x} \left( T^3 \frac{\partial T}{\partial x} \right) \delta dxdt \quad (7)$$

(4)  $dQ_c$ 。微元体在  $dt$  时间内通过热传导吸收的热量  $dQ_c$  可由 Fourier 定律很容易地给出:

$$dQ_c = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \delta dxdt \quad (8)$$

其中  $k$  为燃料的有效导热系数,由  $k = \beta k_f + (1 - \beta)k_g$  算得。而  $k_f, k_g$  分别为燃料和空气的导热系数,  $\beta$  为压实度,近似由  $\beta = \rho_b / \rho_f$  求得,  $\rho_f$  是固体燃料的密度。

(5)  $dq_1$ 。微元体上表面辐射散热同样也满足 Stefan-boltzmann 定律,即:

$$dQ_1 = \sigma(T^4 - T_s^4)dxdt \quad (9)$$

(6)  $dQ_2$ 。空气对流的存在使微元体散失一部分热量,这部分热量可用 Newton 冷却公式写出,即:

$$dQ_2 = h(T - T_s)dxdt \quad (10)$$

其中  $h$  为对流冷却系数。

严格地讲,在火焰自由定常蔓延的过程中,由于火焰前方的温度场不均匀,离火焰不同距离处因火焰卷吸而引起的空气运动速度也不相同,因而对流冷却系数应随离火焰的距离而变化,也就是说,  $h$  应是  $x$  的函数,但在以上的分析中,我们作了近似处理,认为对流冷却系数  $h$  在整个区域内为常数。

综合以上的分析,方程(1)可以写成:

$$C_f \rho_b \delta dT = \sigma(T_f^4 - T^4)F(x)dt + \frac{16}{3}\delta\Lambda_r\sigma \frac{\partial}{\partial x} \left( T^3 \frac{\partial T}{\partial x} \right) dt + k\delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} dt - \sigma(T^4 - T_s^4)dt - h(T - T_s)dt \quad (11)$$

将上式写成微商形式则为:

$$C_i \rho_i \delta \frac{dT}{dt} = \sigma(T_f' - T_f')F(x) + \frac{16}{3} \delta \Delta_r \sigma \frac{\partial}{\partial x} (T^3 \frac{\partial T}{\partial x}) + k \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \sigma(T_f' - T_s') - h(T - T_s) \quad (11a)$$

而

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} \frac{dx}{dt}$$

对于火焰定常蔓延的情况,  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ ,  $\frac{dx}{dt} = -R = \text{常数}$ ,  $R$  为火焰蔓延速度。则方程(11a)为:

$$- \rho_i C_i \delta R \frac{dT}{dx} = \sigma(T_f' - T_f')F(x) + \frac{16}{3} \delta \Delta_r \sigma \frac{d}{dx} (T^3 \frac{dT}{dx}) + k \delta \frac{d^2 T}{dx^2} - \sigma(T_f' - T_s') - h(T - T_s) \quad (12)$$

方程(12)是一个关于  $T(x)$  的二阶非线性常微分方程, 有一个未知系数  $R$ , 求解它需要两个边界条件和一个约束条件, 下面将给出这三个条件。

(1) 燃点条件。燃料达到燃点温度时方能燃烧, 因此, 紧挨火焰的燃料温度应为燃料的燃点温度, 即:

$$T(0) = T_i \quad (13)$$

(2) 远处条件。燃料的温度升高是由燃烧区对它的加热而引起的, 在无穷远处, 燃料温度应保持为环境温度, 即:

$$T(\infty) = T_s \quad (14)$$

(3) 定常蔓延约束条件。紧挨火焰处的燃料达到了燃点温度并不意味着着火, 还需要热解气化, 热解气化需要足够的热量, 只有保证了热量的供给, 火焰才能蔓延。

假设燃料达到燃点温度  $T_i$ , 瞬间吸收足够的热量(热解气化热)并着火, 考虑一个紧挨火焰处的单位宽微元体  $\delta dx$ , 由(13)知该微元体的温度为  $T_i$ , 火焰蔓延速度为  $R$  时, 火焰推进  $dx$  距离所用的时间则为  $dt = dx/R$ , 在  $dt$  时间内, 微元体通过火焰辐射、火焰扩散、对流分别从燃烧区获得能量  $dQ_{b1}$  和  $dQ_{b2}$ , 通过燃料中的辐射和热传导, 微元体传递给邻近燃料的热量分别为  $dQ_{b3}$  和  $dQ_{b4}$ , 微元体热解气化消耗能量  $dQ_p$ , 由能量守恒得:

$$dQ_p = dQ_{b1} + dQ_{b2} - dQ_{b3} - dQ_{b4} \quad (15)$$

上式各项分别表示:

$$dQ_p = \lambda \rho \delta dx$$

$$dQ_{b1} = \sigma(T_f' - T_i') \delta dt$$

$$dQ_{b2} = h'(T_f - T_i) \delta dt$$

$$dQ_{b3} = - \frac{16}{3} \sigma \Delta_r T_i^3 \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} \delta dt$$

$$dQ_{b4} = - k \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} \delta dt$$

其中  $\lambda$  为单位质量燃料的热解气化潜热,  $h'$  为热交换系数。

将以上五式代入(15),便可得到如下的定常蔓延约束条件:

$$\lambda \rho_b R = \frac{16}{3} \sigma \Delta_r T_f^3 \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} + k \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} + \sigma (T_f^4 - T_a^4) + h'(T_f - T_a) \quad (15a)$$

综合以上的分析,火焰沿层状疏松燃料定常蔓延的物理模型数学表述如下:

$$-\delta \rho_b C_f R \frac{dT}{dx} = \sigma (T_f^4 - T_a^4) F(x) + \frac{16}{3} \Delta_r \delta \sigma \frac{d}{dx} \left( T^3 \frac{dT}{dx} \right) + k \delta \frac{d^2 T}{dx^2} - \sigma (T^4 - T_a^4) - h(T - T_a) \quad 0 < x < \infty$$

$$T(0) = T_f$$

$$T(\infty) = T_a$$

$$\lambda \rho_b R = \frac{16}{3} \Delta_r \sigma T_f^3 \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} + k \left( \frac{dT}{dx} \right)_{x=0} + \sigma (T_f^4 - T_a^4) + h'(T_f - T_a)$$

其中

$$F(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{\frac{x}{H_f}}{\sqrt{1 + \frac{x^2}{H_f^2}}} \right]$$

$$C_f = C_a + \frac{M}{1+M} [C_w(373 - T_a) + L] / (T_f - T_a)$$

方程(12)结合(13),(14),(15)可以用有限差分法解得  $R$  和  $T(x)$ 。

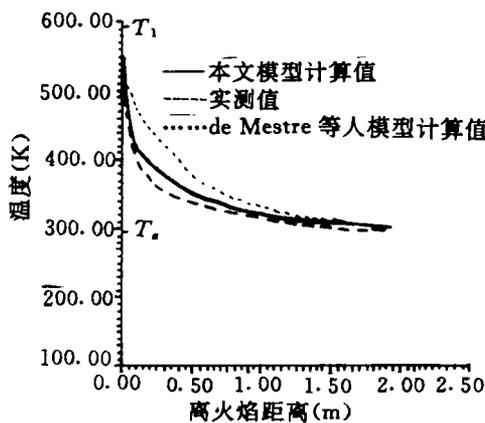


图2 燃料的温度分布

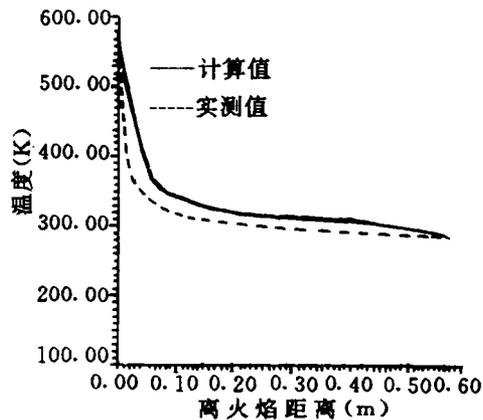


图3 计算结果与实验对比

#### 4. 结果与讨论

为了检验模型的适用性,有必要将数值计算结果同实验数据进行比较。让我们来考虑 De Mestre 等人(1989)<sup>5</sup>的一次室内实验。在  $3\text{m} \times 1\text{m}$  的水平台上均匀地铺一层枯死松针,在无风状态下,在燃料一端直线点火。火焰开始时加速蔓延,然后达到定常状态,火焰定常蔓延速度为  $0.0049\text{m/s}$ 。本文模型中所需参数大多数是已知的或是可以在实验中测

定的, 这些参数是:  $\rho_b = 32.1 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_f = 509 \text{ kg/m}^3$ ,  $\sigma = 5.68 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ,  $C_w = 4187 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $L = 2.254 \times 10^6 \text{ Jkg}^{-1}$ ,  $T_i = 593 \text{ K}$ ,  $k = 0.05 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $C_a = 1370 \text{ Jkg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $T_a = 296 \text{ K}$ ,  $T_f = 882 \text{ K}$ ,  $H_f = 0.70 \text{ m}$ ,  $M = 0.077$ ,  $\lambda$  与  $h'$  的值分别引自 Roberts (1971)<sup>6</sup> 和 Emmons 等人 (1971)<sup>7</sup>,  $\lambda = 2.5 \times 10^5 \text{ Jkg}^{-1}$ ,  $h' = 240 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ 。至此, 只有两个参数  $\Delta_r$  和  $h$  不易确定, 幸好火焰蔓延速度 (ROS) 和温度分布  $T(x)$  可以在实验中容易地测定, 并可用来检验  $\Delta_r$  和  $h$  应取多大。就象是解两个联立方程求两个未知数,  $\Delta_r$  和  $h$  可以适当地调整并确定。当  $\Delta_r = 0.29 \text{ m}$ ,  $h = 80 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$  时, 计算得  $R = 0.0049 \text{ m/s}$ , 温度分布曲线如图 2。

我们仿效 de Mestre 等人 (1989)<sup>5</sup> 的实验铺了一层  $1.55 \text{ m} \times 0.65 \text{ m}$ , 厚为  $4 \text{ cm}$  的干枯松针叶, 部分参数作了改变, 这些参数是  $\rho_b = 24.6 \text{ kg/m}^3$ ,  $M = 0.150$ ,  $T_a = 286 \text{ K}$ ,  $T_f = 823 \text{ K}$ ,  $H_f = 0.30 \text{ m}$ ,  $\delta = 0.04 \text{ cm}$  火焰定常蔓延速度为  $0.003 \text{ m/s}$ 。若  $\Delta_r, h$  仍分别取为  $0.29 \text{ m}, 80 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , 计算得到  $R = 0.0043 \text{ m/s}$ , 温度分布也与实验测量的相差较多。若  $\Delta_r$  仍取  $0.29 \text{ m}$ ,  $h$  取值为  $145 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$ , 解得  $R = 0.003 \text{ m/s}$ , 而温度分布曲线也与实验所得符合很好, 如图 3 所示。

de Mestre 等人 (1989) 给出  $\Delta_r$  的值为  $\Delta_r = 1.1 \text{ cm}$ , 比本文采用的值小。原因可能是在本文物理模型中的燃料中辐射项包含了其他近距离加热机制。de Mestre (1989) 给出的  $h$  值是  $23.2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , 因为只考虑了自然对流的散热, 实际上, 由火焰卷吸而引起的强迫对流是重要的散热因素, 这种强迫对流的热交换系数一般在  $25-300 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  之间, 本文所用  $h$  值均在此范围内。

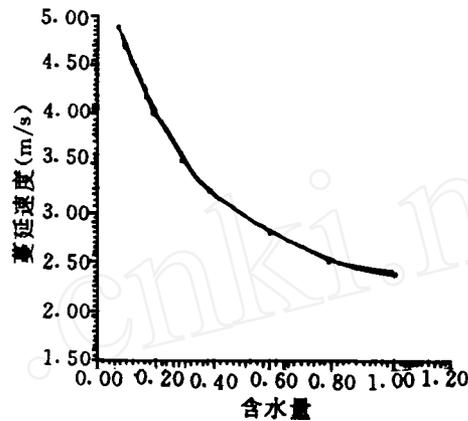


图 4 蔓延速度同含水量的关系

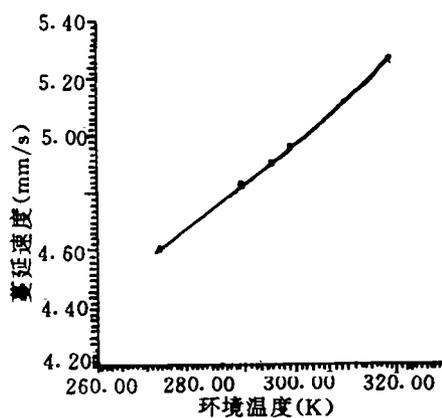


图 5 蔓延速度同环境温度的关系

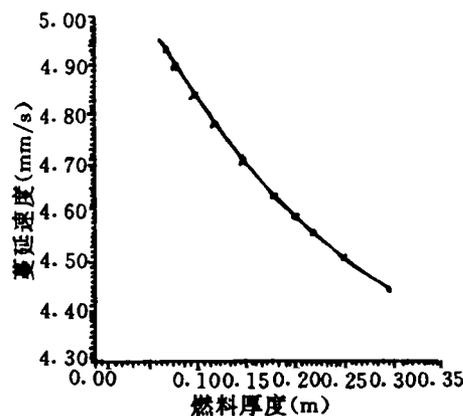


图 6 蔓延速度同燃料厚度的关系

我们在 de Mestre (1989) 实验提供的数据的基础上, 用方程 (12)~(15) 计算了几个主要因素单独变化时对火焰蔓延速度的影响。图 4~图 10 反映了这种影响。图中的点为计

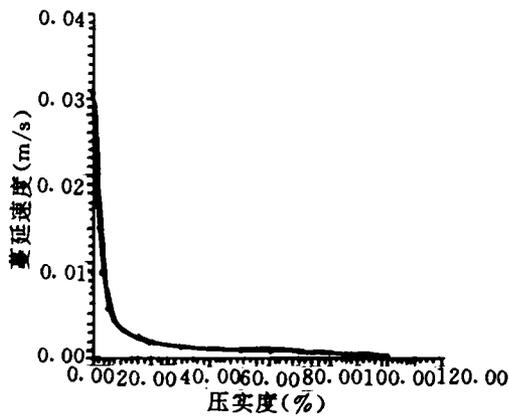


图7 蔓延速度同压实度的关系

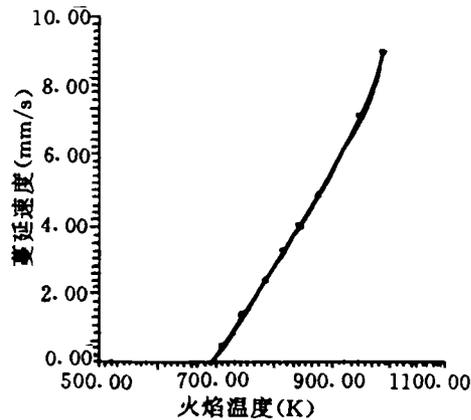


图8 蔓延速度同火焰温度的关系

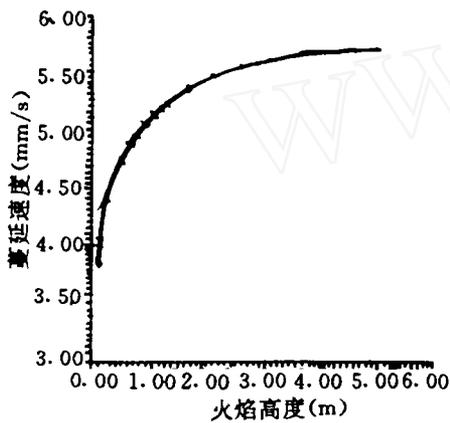


图9 蔓延同火焰高度的关系

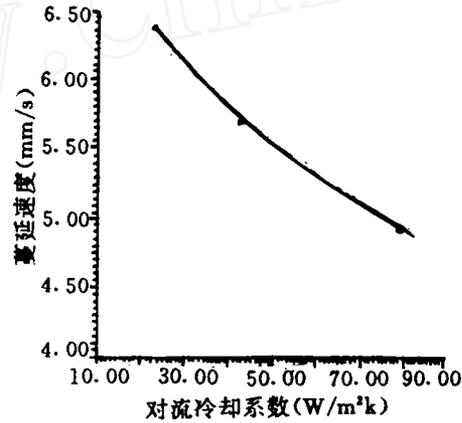


图10 蔓延速度同对流冷却系数的关系

算结果。用曲线拟合技术可以得到如下的函数式：

$$R = Ce^{-0.0047h}(1 + 1.53e^{-3.51M})\beta^{-1}\delta^{-0.073}T_a^{0.85}H_f^{0.12}(T_f - 693.5)^{-1.13} \quad (16)$$

其中  $C$  为与燃料相关的常数，式中各有量纲参数的单位均为国际单位。

表1反映了假设  $h$  = 常数时用(16)式预报火蔓延速度的情况，表2第10列是在未测火焰温度的情况下，假定  $h$  = 常数，用(16)式反推出来的火焰有效辐射温度  $T_f$  的值。根据已有的知识知道， $T_f$  一般在 700~1300K 范围内，反推出的  $T_f$  值均在这个范围内。对于 Wilson(1982)<sup>8</sup> 的一组实验，表3反映了在假设  $T_f, h$  均为常数时，用式(16)预报火焰蔓延速度，并与实测的蔓延速度进行比较的情况。

表 1 实验结果及与预报结果的比较(1)

实验号	室温 (°C)	相对湿度 (%)	含水量	压实度	厚度 (cm)	载量 (kgm <sup>-2</sup> )	焰高 (cm)	实验 ROS (mms <sup>-1</sup> )	焰温 (°C)	预报 ROS (mms <sup>-1</sup> )	误差 (%)
9	14	28	0.062	0.024	10.0	1.2	80	6.4	680	*	*
4	12	28	0.062	0.039	3.0	0.6	30	3.0	650	2.9	-2.7
8	14	28	0.062	0.012	11.0	1.2	70	6.8	680	7.1	5.1
11	14	30	0.062	0.035	10.0	1.8	120	7.1	800	7.1	-3
16	15	30	0.285	0.036	8.0	1.2	25	1.4	540	1.2	-16.7
19	15	30	0.140	0.031	8.0	1.2	40	2.5	560	2.1	-15.4
25	19	16	0.300	0.041	3.5	.6	15	1.0	520	1.0	-2
26	16	10	0.173	0.041	3.2	.6	12	1.4	580	1.7	23.0
27	28	8	0.079	0.034	3.5	.6	30	3.2	540	3.1	-1.6
31	17	48	0.285	0.041	10.5	1.8	50	2.2	600	1.9	-12.6
32	17	5	0.232	0.039	10.5	1.8	45	1.8	540	1.4	-24.9
34	27	10	0.193	0.035	7.5	1.2	45	3.0	560	2.9	-3.7
35	28	8	0.095	0.032	7.5	1.2	50	4.2	560	3.9	-7.3

注: 常数 C 由实验 9 算得

表 2 实验结果及与预报结果的比较(2)

实验号	室温 (°C)	相对湿度 (%)	含水量	压实度	厚度 (cm)	载量 (kgm <sup>-2</sup> )	焰高 (cm)	实验 ROS (mms <sup>-1</sup> )	焰温 (°C)
1	11	28	0.062	0.049	.8	0.2	5	1.5	605
2	223	32	0.062	0.049	1.2	0.3	12	2.5	576
3	24	30	0.062	0.049	1.2	0.3	10	2.3	563
5	22	46	0.062	0.039	3.0	0.6	20	2.8	566
6	20	8	0.062	0.039	4.5	0.9	45	4.6	650
7	22	5	0.062	0.039	4.5	0.9	40	4.4	628
10	18	18	0.062	0.029	8.0	1.2	90	5.2	626
12	17	43	0.062	0.035	10.0	1.8	100	12.4	969
13	14	18	0.572	0.041	8.5	1.2	0	0.0	0
14	18	46	0.333	0.049	6.0	1.2	20	1.2	568
15	17	31	0.369	0.030	10.0	1.2	25	1.2	525
17	21	8	0.155	0.032	8.0	1.2	35	2.4	549
18	24	33	0.151	0.039	6.5	1.2	40	2.0	535
20	14	28	0.062	0.059	4.0	1.2	50	2.9	703
21	14	30	0.062	0.079	3.0	1.2	30	2.6	765
22	17	10	0.062	0.067	3.5	1.2	45	3.7	760

表2—续表

实验号	室温 (°C)	相对湿度 (%)	含水量	压实度	厚度 (cm)	载量 (kgm <sup>-2</sup> )	焰高 (cm)	实验 ROS (mms <sup>-1</sup> )	焰温 (°C)
23	20	5	0.062	0.067	3.5	1.2	45	3.6	714
24	17	31	0.368	0.061	2.5	0.6	0	0.0	0
28	13	25	0.062	0.059	2.0	0.6	25	1.9	632
29	14	10	0.062	0.062	1.9	0.6	20	2.5	692
30	20	22	0.404	0.044	10.5	1.8	35	1.1	540

注：常数  $C$  由实验 9 算得

表3 实验结果及与预报结果的比较 (3)

fire	Ta (K)	M	$\beta$	$\delta$ (cm)	H <sub>i</sub> (cm)	R1 (mpm)	R2 (mpm)	error (%)
1	304.7	0.025	0.010	5.08	45.94	0.790	*	*
2	302.4	0.025	0.010	5.08	47.35	0.824	0.788	-4.4
3	302.4	0.027	0.010	5.08	46.45	0.802	0.783	-2.4
4	300.2	0.056	0.010	5.08	34.92	0.554	0.709	28.0
5	300.2	0.059	0.010	5.08	38.90	0.634	0.714	12.6
6	302.4	0.061	0.010	5.08	33.88	0.677	0.725	7.1
7	294.1	0.101	0.010	5.08	38.94	0.683	0.648	-5.1
8	300.2	0.131	0.010	5.08	31.50	0.542	0.611	12.7
9	300.2	0.200	0.010	5.08	29.83	0.416	0.542	30.3
10	303.0	0.285	0.010	5.08	20.40	0.409	0.464	13.4
11	300.2	0.315	0.010	5.08	23.40	0.437	0.451	3.2

注：1. 常数  $C$  由实验 1 算得

2. R1: 为实测蔓延, R2 为预报蔓延速度, 单位“mpm”意即“米每分钟”。

## 5. 结论

通过理论分析, 数值计算和实验对比, 本文得到如下结论:

(1) 火焰蔓延过程中, 火焰辐射是主要加热机制之一, 同时, 燃料中辐射和火焰的扩散、对流传热也起重作用。上表面的辐射散热和对流散热是必须考虑的散热机制。

(2) 对燃料中的辐射, 由于选用了辐射向量的处理方法, 使数学模型的计算结果与实验符合更好。

(3) 即使在环境无风的情况下, 由于火焰卷吸造成的对流也应考虑。这种对流是强迫对流。对流冷却系数在不同情况下可能会变化。

(4) 在数学模型的基础上, 用拟合数值计算结果的方法, 得到了关于蔓延速度的一个函数表达式。用它来预报蔓延速度并与室内实验比较的结果表明, 预报结果基本上令人满意。

## 参 考 文 献

- [1] Weber, R. O., *Prog. Energy Combust. Sci.*, **17** (1991), 67
- [2] Zhu Zhonghua, Liu Xiande, *Proceedings of the 1st Asian Conference on Fire Science and Technology*, Fan Weicheng, Fu Zhuman (Eds), International Academic Publishers, Beijing, (1992), 176
- [3] 伊萨琴科, 王丰译, 传热学, 高等教育出版社, 北京, (1987)
- [4] Fujii, M., Hasegawa, J., Pallop, L. and Sakawa, Y., *Appl. Math. Modelling*, **4**, (1980) 176
- [5] de Mestre, N. J., Catchpole, E. A., Anderson, D. H. and Rothermel, R. C., *Combust. Sci. Technol.* **65**, (1989) 231
- [6] Roberts, A. F., 13th Symp. (Int.) on Combust. (1971) 893
- [7] Emmons, H. W., and Shen, T., 13th Symp. (Int.) on Combust. (1971) 917
- [8] Wilson, R. A., Jr., Forest Service USDA Res. Pap. INT-289, (1982)

## Steady Spreading of a Flame Through Laminal Porous Fuel

Zhu Zhonghua      Liu Xiande

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

### ABSTRACT

A physical model is proposed from the point of view of fuel preheating to describe the horizontally steady spreading of a flame through laminal porous fuel. It is assumed that there is no ambient wind, the fuel layer is thermally thin. The mechanisms of heating contain the radiation from the flame, the radiation and the conduction through the fuel layer, and the diffusion, convection of the flame. The cooling mechanisms including radiative cooling from the upper surface of fuel layer and convective cooling induced by the flame are also considered. The relationships between the rate of spread and the major influential factors are given by numerical computation. Using curve fitting technique with computational data, a simple formula for the rate of spread is obtained. The model is tested against laboratory experiments. Due to the adoption of radiation vector to treat the radiation through fuel layer and the consideration of the forced convection induced by the flame, the computational results get in essential agreement with the experiments.

**Key Words:** flame spread, heat transfer, porous fuel, physical model