

# 林火蔓延突变形态的模拟实验研究\*

钟茂华 范维澄 王清安

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

**摘要** 通过燃料床模拟林火蔓延过程的实验, 观测不同坡度时的林火动态特征, 实验结果显示, 林地坡度的变化使林火蔓延过程呈现出突变形态。

**关键词** 林火形态 不同坡度 状态转变 突变现象

我国是一个多山地的国家, 森林大多集中在山区。所以我国的森林火灾和山地密切相关。森林火灾分为地表火、树冠火、飞火、火旋风等。据统计, 地表火发生最为频繁, 占林火总数的90%以上, 而且地表火容易引发树冠火, 从而扩大了林火的危险性。虽然山地林火存在很多不确定性的致灾因素, 但充分掌握火场的状况和趋势, 了解地形和山地条件下的林火形态特点, 特别是林地坡度变化对林火动态的影响, 对防灭林火具有重要的指导意义。因此, 对地表火进行研究是研究林火动态的重要内容。

文献[1]对林火动态特性做了大量的数值模拟和统计分析。研究发现, 单位面积上单位时间内发生林火次数与过火面积表现出分形关系, 其分形维数的理论计算是1.02~1.18, 而对一些实际情况的统计表明, 分形维数为1.31~1.49, 指出其中的偏差是由于环境因素、人的因素、树种类型、气象因子、防火效果等所致。长期以来, 国内外学者对于森林火灾的动力学特性、林火灾害统计分析等进行了大量研究, 获得了一些相当有价值的研究成果<sup>[2,3]</sup>。

本文通过对林火蔓延的实验研究, 分析林火的另一非线性特性即突变特性, 并应用突变理论<sup>[4,5]</sup>来说明林火的突跳方式。

## 1 实验装置

不同坡度时山地林火动态特征的实验装置主要由主燃料床、延伸燃料床、倾角变换机构、点火系统、摄像系统、热电偶、记录仪等组成。主燃料床是整套装置的核心, 能保证火线有足够的宽度, 并有足够的长度观察和测量火蔓延、贴壁燃烧、火卷吸的过程和现象, 如图1所示。燃料床以4层0.01 m厚的石膏板作底部, 该板的导热性能和一般的泥土相当。侧面是以0.01 m厚0.30 m高的绝热材料作挡板, 为了防止侧面的卷吸流, 也使可燃物放在燃料床上的高度更加均匀。燃料床固定在可转动的支撑架上, 当支撑架的角度变化时, 可模拟出不同坡度的林地。点火系统是用来点燃延伸燃烧床上的可燃物, 点火系统包括线式点火器、火花塞、升压电路和液化气瓶等。摄像系统用以记录实验时的典型现象及地表火的蔓延过程, 也可以为平板

1999-04-05 收稿, 1999-11-15 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号:59776018)

火蔓延速度和小角度时火蔓延速度提供参考速度,还可以作为火焰高度的测量依据之一。把铠装热电偶嵌入燃料床底板,每隔0.4 m一个。选择这个距离是因为在贴壁剧烈燃烧时,不会因为相邻的两热电偶距离太近而火蔓延速度过快使测量延迟影响误差太大,也不会因坡度过小时的缓慢燃烧而耗时太久。热电偶伸出底板0.18 m,比燃烧层略高,虽然不能测量火焰缓慢燃烧的最高温度,但是当火焰贴壁燃烧时,这时的测量温度就比较接近火焰最高温度。为了观察火焰从平面到山坡的变化过程,同时也为了比较平地火和上坡火的不同形态特征,设计了延伸燃料床。延伸燃料床长1.50 m,宽和两边挡板高度及材料均与主燃料床一样,如图2所示。实验时,所用的燃料为马尾松针,燃料床的可燃物厚度、载量等均和主燃料床的可燃物相应参数一样。

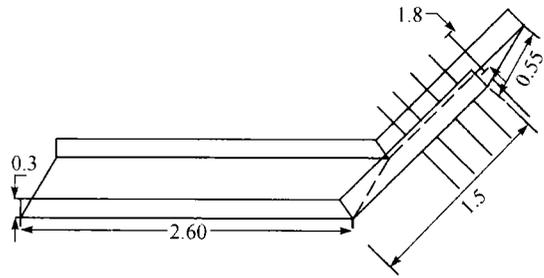


图1 主燃料床、延伸燃料床和热电偶示意图



图2 林火蔓延实验台

下的林火形态特征,这里将每次实验记录绘于同一坐标系中。火蔓延速度实验的有关参数见表1。

## 2 林火形态的实验分析

利用上述实验装置,进行了不同坡度情况下的林火实验,测量的主要参数为火焰高度、火蔓延速度。火焰高度亦即火焰长度,实验室中是通过照片测量的。图3(a)和(b)是无坡度和有坡度时的火焰情况。图4(a)和(b)分别是不同坡度时火蔓延速度和火焰高度随时间的变化曲线。图中的时间零点,是在点燃主燃料床上的可燃物后,并认为火焰基本稳定才开始记时的,并非刚点燃可燃物的时间就开始记时。为了分析不同坡度情况

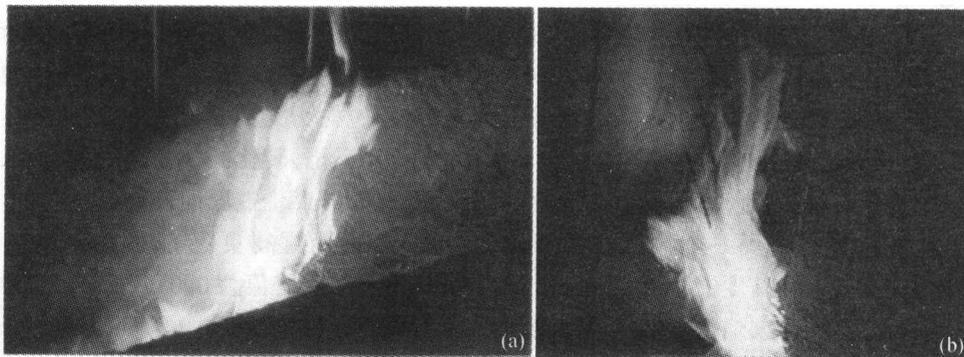


图3 不同坡度时的火焰

(a) 有坡度时的火焰;(b) 无坡度时的火焰

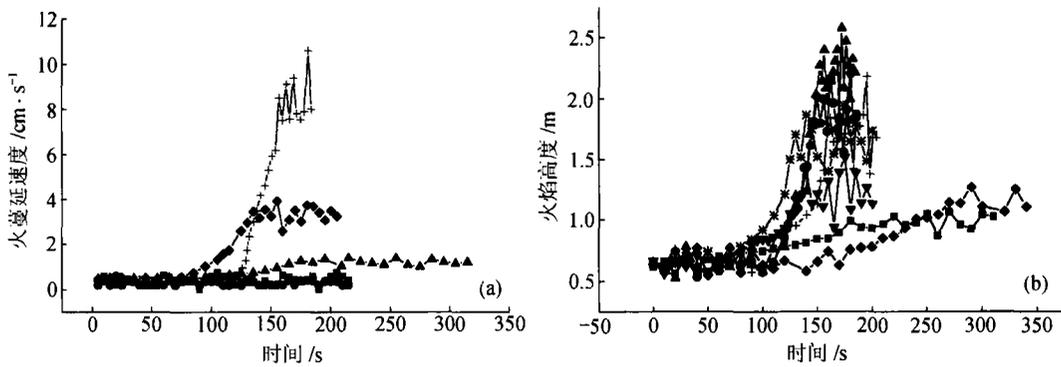


图 4 不同坡度时火焰高度随时间变化曲线

(a) 不同坡时火蔓延速度随时间变化曲线, ■为  $< 0^\circ$ , ●为  $0^\circ$ , ▲为  $20^\circ$ , ◆为  $35^\circ$ , + 为  $50^\circ$ ; (b) 不同坡度时火焰高度随时间变化曲线, ■为  $15^\circ$ , ◆为  $20^\circ$ , ▼为  $30^\circ$ , \* 为  $35^\circ$ , + 为  $45^\circ$ , ●为  $50^\circ$ , ▲为  $55^\circ$

表 1 火蔓延速度实验的有关参数

实验序号	角度/ $^\circ$	载量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	厚度/m	环境温度/ $^\circ\text{C}$	空气相对湿度/%
1	$< 0$	2.020			88
2	0	2.020			88
3	20	1.762	0.14	17.0	90
4	35	1.462	0.13	17.5	90
5	50	1.758	0.13	17.5	90

从图 4(a)和(b)可以得出如下一些结论:

(1) 坡度(含主燃料床倾斜向下)小于  $20^\circ$ 时,随坡度的增大,火焰高度和火蔓延速度在主燃料床和延伸燃料床上的燃烧全过程中,变化是相对平稳的,林火形态没有较大幅度的波动现象出现,小坡度范围内为稳定燃烧,火焰向壁面倾斜很小。

(2) 当坡度大于  $20^\circ$ 后,燃烧初始阶段,火焰高度和火蔓延速度比较稳定、波动幅度不大;随着燃烧的进一步发展,火势由平稳燃烧状态转变为抖动燃烧状态。当坡度为  $35^\circ$ 时,林火形态的突跳值等于火焰高度差  $0.97\text{ m}$ ,火蔓延速度差值为  $0.028\text{ m/s}$ 。在抖动燃烧阶段,出现了贴壁燃烧,此时火蔓延速度和火焰高度是在一平衡值上下抖动,抖动范围分别为  $0.009\text{ m/s}$  和  $\pm 0.25\text{ m}$ 。产生这种不稳定性现象的原因是,抖动情况下,受卷吸的影响,火焰被拉伸到壁面燃烧更激烈,空气很快不充足,于是火焰变小离开壁面,这时火焰又得到充分空气继续剧烈燃烧,由此重复便出现燃烧的抖动现象。当坡度大于  $20^\circ$ 后,林火形态(火焰高度和火蔓延速度)出现由一个平衡状态(平稳燃烧)向另一个平衡状态(抖动燃烧)转化。

(3) 大坡度 ( $> 50^\circ$ )时,不仅具有抖动燃烧的现象,此时的燃烧过程同样是由一个相对稳定状态(平稳燃烧)转变到另一个状态(抖动燃烧),转变的时间已显得更短了,而且林火形态的突跳差值也变大了,火焰高度突跳差值为  $1.8\text{ m}$ ,火蔓延速度突跳差值为  $0.085\text{ m/s}$ 。随着坡度的增大,抖动燃烧阶段的火焰高度和火蔓延速度的波动幅度也越大,坡度为  $50^\circ$ 时,抖动范围分别为  $\pm 0.45\text{ m}$  和  $0.25\text{ m/s}$ ,抖动的周期也越来越短了。

### 3 林火形态的尖点突变分析

对于上述不同坡度情况下的林火形态的不稳定性现象,可以用尖点突变模型进行分析.尖点突变模型由两个控制变量和一个状态变量构成.把山地的坡度  $M$  和燃料燃烧进程  $H$  作为两个控制变量,把林火形态特性  $F$  作为状态变量.图5为林火形态的尖点突变模型.曲面的上叶表示平稳燃烧的平衡状态,燃烧特性波动幅度不大.下叶表示抖动燃烧的平衡状态,燃烧特性波动幅度大.从上叶到下叶就是燃烧系统由一个平衡状态向另一平衡状态转变的过程.当坡度  $M$  与燃料燃烧进程  $H$  同时变化时,就有可能使林火形态  $F$  发生变化,如图5中的曲线  $a_i b_i c_i d_i$  ( $i=1,2$ ),其中  $b_i \rightarrow c_i$  ( $i=1,2$ )是燃烧系统的状态变量  $F$  产生突跳,变化量为  $\Delta F = F(H_{b_i}, M_{b_i}) - F(H_{c_i}, M_{c_i})$  ( $i=1,2$ ),反映在分叉集上是一条经过分叉集边缘的曲线.若坡度增加到一定值后,当坡度  $M$  的取值不同,虽然  $H$  的变化过程一样,林火形态特性  $F$  产生的突跳程度也不一样.燃烧过程  $a_1 b_1 c_1 d_1$  的突跳量为  $\Delta F_1 = F(H_{b_1}, M_{b_1}) - F(H_{c_1}, M_{c_1})$ ,而燃烧过程  $a_2 b_2 c_2 d_2$  的突跳数量值表示为  $\Delta F_2 = F(H_{b_2}, M_{b_2}) - F(H_{c_2}, M_{c_2})$ .显然,  $\Delta F_1 < \Delta F_2$ ,亦即后者的林火形态的突跳程度大于前者的突跳程度.反映到突变模型的分叉集上是两条跨越分叉集程度不一样的曲线.当燃烧系统的发展过程不经过分叉集时,如过程  $ab$ ,即在小坡度或燃料床倾斜向下时,燃烧系统的燃烧过程是相对平稳的,以渐变的方式发生变化,燃烧系统的状态没有发生大的突跳.对于林火发展过程为渐变的,火势易于控制.一旦地势变化坡度大,林火形态的突跳程度就增大,火势控制的难度就加大了.上述这些分析结果与前面的实验过程基本一致.

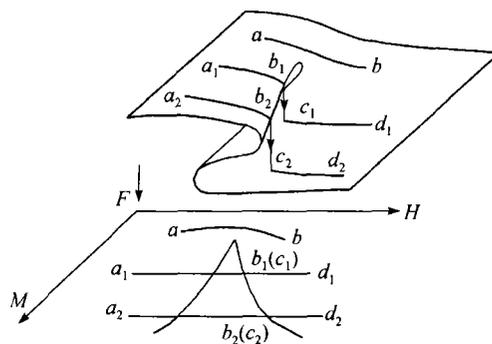


图5 林火形态的尖点突变描述

### 参 考 文 献

- 1 Malamud B D, Morein G, Turcotte D L. Forest fire: an example of self-organized critical behavior. *Science*, 1998, 281(18): 1 840
- 2 Jiang L, Yang L, Zhou J. Fractal model of forest fire spread in the initial stage. *Fire Safety Science*, 1994, 3(1): 1
- 3 Jiang L. Fractal model of forest fire spread in the initial stage. In: *Proceedings of the First Asian Conference on Fire Science and Technology*, Hefei, China. Beijing: International Academic Publishers, 1992. 111 ~ 116
- 4 Poston T, Stewart I. *Catastrophe Theory and Its Applications*. London: Pitman Publishing Limited, 1978. 99 ~ 122
- 5 Zeeman E C. *Catastrophe Theory: Selected Papers (1972 ~ 1977)*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1977. 1 ~ 32