

研究报告

# 细水雾作用下固体表面火蔓延速度变化规律 的小尺度实验研究

林霖, 房玉东, 廖光焯, 秦俊

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027)

**[摘要]** 通过模拟实验进行了细水雾作用下不同固体材料表面火蔓延特性的小尺度实验研究。实验在小型风洞中进行, 在有细水雾和无细水雾作用的情况下, 分别在不同来流速度条件下深入研究了4种典型固体材料表面火蔓延的规律, 定性的描述了细水雾对不同固体材料表面火蔓延的抑制作用, 通过对比分析, 揭示了细水雾作用下不同类型固体材料表面火蔓延的变化规律, 为细水雾的实际工程应用提供参考。

**[关键词]** 细水雾; 火蔓延; 风洞

**[中图分类号]** P7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)06-0069-04

## 1 引言

细水雾灭火技术具有无环境污染、灭火迅速、用水量少等特点, 可以有效地抑制固体火焰的发展, 目前被公认为卤代烷系列灭火剂的主要替代品。自上世纪80年代开始, 世界各国对细水雾灭火技术开展了广泛深入的研究工作, 并取得了一系列重要成果<sup>[1-3]</sup>。研究表明当细水雾直接喷射或被卷吸进火焰区的时候, 由于表面积与体积之比相对较大, 快速吸收热量并迅速气化, 体积扩大大约1600倍。大量水蒸气存在稀释了反应区的氧气浓度, 大量的气化吸热降低了气相燃料和氧化剂的温度, 另外细水雾以及蒸汽能吸收部分热辐射, 降低对燃料的辐射热反馈, 减少其气化蒸发, 从而降低反应区可燃气体的生成速率, 以上因素都会降低燃烧速度, 有效地抑制火蔓延。

固体可燃物表面火蔓延是森林火灾、建筑火灾和工业火灾中普遍存在的典型燃烧现象。就木材等固体可燃物而言, 物理和化学性质比较复杂, 火焰的蔓延特性受到材料种类、含水率、木纹方向、几何尺寸、空间方位以及环境等因素的影响。研究

表明, 固体可燃物点火后, 气流速度、湍流强度、氧气浓度以及辐射等外界因素对其燃烧过程影响很大, 尤其是来流速度对火蔓延的影响非常显著<sup>[4-7]</sup>。在固体表面火蔓延过程中, 气相和凝固相之间物质的运输、燃料的蒸发以及燃料蒸气与气体氧化剂的化学反应之间存在着复杂的相互作用<sup>[8,9]</sup>, 因此科学的认识固体可燃物表面火蔓延机理和规律对于火灾的防治具有十分重要的意义<sup>[10-13]</sup>。

作者分别在不同来流速度及不同来流方向的情况下, 通过模拟实验, 研究了水平放置的4种典型固体材料表面火蔓延特性及在细水雾作用下固体材料表面火蔓延规律, 为细水雾的实际工程应用提供参考。

## 2 实验系统及火蔓延速率计算方法

### 2.1 实验系统

实验装置主要由小型风洞、细水雾发生装置、温度测量系统构成。小型风洞结构如图1所示, 整个风洞装置可分为4部分: 动力及输送段、稳定整流段、收缩段与实验段。动力及输送段由离心风机

**[收稿日期]** 2005-02-06

**[基金项目]** 国家重点基础研究发展规划资助项目(2001CB409609)

**[作者简介]** 林霖(1978-), 男, 四川成都市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

和相连的管路构成。其中 2 个 90°弯管将空气来流方向改变 180°。整流段主要是由多层纱网组成的格栅，其作用是降低气流的湍流度。纱网的网格都很细，它将较大的旋涡分割成小旋涡，有利于衰减。实验中使用网孔边长为 1 mm 的细铁丝网。考虑到网后有一定距离的衰减旋涡，两层网之间的距离设定为 40 cm。实验中采用了超声波细水雾发生装置，与其他的细水雾发生装置相比，产生水雾粒径比较均匀，且小于 20 μm，能够较均匀地随着来流分布于风洞中并与燃烧物发生作用。实验环境温度为 22.5 °C。

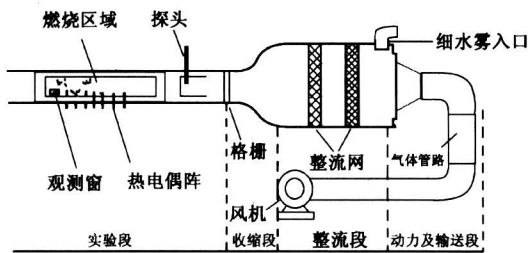


图 1 实验系统示意图

Fig.1 Mini type wind tunnel

实验中，分别选取了薄纸片、三合板、五合板及厚纸板 4 种典型的固体材料。为了减少试样自身因素如含水率，木纹方向等对实验结果的影响，实验中选用的木材都经过统一加工。对薄纸片研究了顺流和逆流情况，对其余 3 种材料，由于在零风速的条件下火焰都不能够蔓延并很快熄灭，必须在顺风的情况下火焰才能维持蔓延，因此只进行顺风情况下的火蔓延实验研究。实验工况列于表 1。

表 1 实验工况

Table 1 Case of experiment

工况	细水雾	来流方向	材料类型	材料尺寸
1	不施加	顺流	薄纸片	4.0 cm × 28.0 cm
2	施加	顺流	薄纸片	4.0 cm × 28.0 cm
3	不施加	逆流	薄纸片	4.0 cm × 28.0 cm
4	施加	逆流	薄纸片	4.0 cm × 28.0 cm
5	不施加	顺流	三合板	4.3 cm × 35.5 cm
6	施加	顺流	三合板	4.3 cm × 35.5 cm
7	不施加	顺流	普通五合板	4.3 cm × 35.5 cm
8	施加	顺流	普通五合板	4.3 cm × 35.5 cm
9	不施加	顺流	厚纸板	3.5 cm × 39.5 cm
10	施加	顺流	厚纸板	4.3 cm × 35.5 cm

## 2.2 火蔓延速率计算方法

实验测量参数主要有来流速度、火焰温度。使用 TSI 空气速度仪测量来流速度，探头为一体积很小的探针，可认为不破坏流场的流动；采用热电偶测量燃烧区域的温度，在风洞实验段的下表面，每隔 5 cm 布设一根直径为 1 mm 的镍铬—镍硅铠装热电偶。用数据采集软件每隔 1 s 实时采集实验数据。考虑到在固体材料燃烧的过程中，固定材料的铁制物体传热对燃烧可能产生较大影响，采用一个铁丝架支撑火蔓延材料，从而减少对热传导和流场的影响（见图 2）。用红外热相机对火蔓延过程作直观显示。

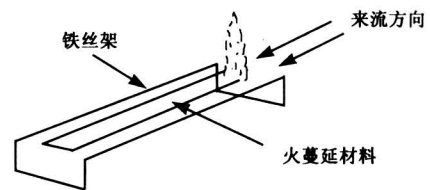


图 2 架设纸片的铁丝架

Fig.2 Wire shelf with paper

利用火焰前锋在经过 2 个温度测量点时出现的 2 个峰值信号的时间间隔  $\Delta t$  和他们之间的距离  $\Delta s$ ，通过计算可以得到火蔓延的平均速度  $\bar{V} = \Delta s / \Delta t$ 。最后取几个测量区间的平均速度的均值作为平均火蔓延速度。

$$\bar{V} = (\bar{V}_1 + \bar{V}_2 + \dots) / n \quad (1)$$

## 3 实验数据分析

表 2~表 6 给出了实验中 10 种不同工况下的火蔓延速度。图 3 给出了顺风情况下薄纸片在有、无细水雾作用下火蔓延速度随来流速度变化的曲线，在顺风情况，流速小于 48 cm/s 的时候，都是关闭风机靠增加雾通量使得流速增大，而大于 48 cm/s 的时候，则保持雾通量和风机的空气流量成等比，因此可以粗略的认为初始的氧气浓度相等。

表 2 工况 1, 2 火蔓延速度

Table 2 The fire spread velocity of case1 and case 2

	来流速度							
	10	15	25	31	48	71	80	160
工况 1 火蔓延速度	0.52	0.52	0.81	1.53	1.76	3.70	3.70	4.16
工况 2 火蔓延速度	0.39	0.34	熄灭	熄灭	熄灭	1.41	2.72	3.83

表 3 工况 3, 4 火蔓延速度

Table 3 The fire spread velocity of case3 and case 4  
( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

来流速度	10	13	18	25	30	35	48	60
工况 3 火蔓延速度	0.33	0.25	0.23	0.20	0.20	0.18	0.15	0.11
工况 4 火蔓延速度	0.28	0.20	熄灭	熄灭	熄灭	熄灭	熄灭	熄灭

表 4 工况 5, 6 火蔓延速度

Table 4 The fire spread velocity of case5 and case 6  
( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

来流速度	30	41	60	80	100	120	133	145
工况 5 火蔓延速度	0.08	0.20	0.25	0.37	0.40	0.47	0.53	0.55
工况 6 火蔓延速度	熄灭	0.08	0.21	0.28	0.40	0.33	0.47	0.50

表 5 工况 7, 8 火蔓延速度

Table 5 The fire spread velocity of case7 and case 8  
( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

来流速度	15	30	40	60	80	100	120	140
工况 7 火蔓延速度	熄灭	熄灭	熄灭	0.12	0.14	0.24	0.30	0.35
工况 8 火蔓延速度	熄灭	熄灭	熄灭	熄灭	熄灭	熄灭	0.08	0.10

表 6 工况 9, 10 火蔓延速度

Table 6 The fire spread velocity of case9 and case 10  
( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )

来流速度	10	20	40	60	80	100	120	140
工况 9 火蔓延速度	0.08	0.10	0.13	0.14	0.29	0.38	0.50	0.79
工况 10 火蔓延速度	熄灭	熄灭	熄灭	0.13	0.20	0.30	0.30	0.33

由图 3 可知，在无细水雾作用的情况下，薄纸片火蔓延速度随着来流速度的增大而增加。在相同的来流速度情况下，施加了细水雾之后，薄纸片火蔓延速度有所降低，当来流速度超过 100  $\text{cm/s}$  之后，火蔓延速度增大的趋势变小，这是因为随着流速增大，增强了氧气的供应量，强化了燃烧过程，与此同时来流作用到薄纸片火的根部，破坏火焰燃烧稳定性，因此火蔓延速度增大的趋势有所降低。图 4 给出了逆流情况下薄纸片在有、无细水雾作用下火蔓延速度随来流速度变化的曲线。从图 4 可以看出，在没有施加细水雾的情况下，薄纸片火蔓延速度随着来流速度的增加而减小，施加细水雾后，在低来流速度下，火蔓延速度变化不大，增加流速到超过 10  $\text{cm/s}$ ，细水雾抑制作用明显增强，当来流速度超过 20  $\text{cm/s}$ ，细水雾基本上可以熄灭薄纸片火。

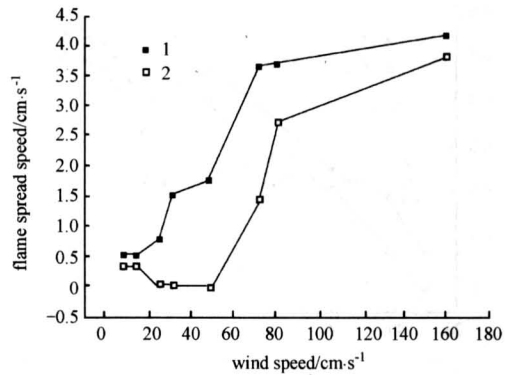


图 3 工况 1, 2 火蔓延速度比较图

Fig.3 The fire spread velocity comparative curve of case1 and case2

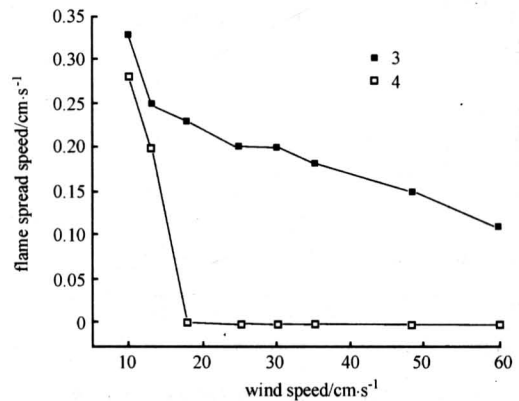


图 4 工况 3, 4 火蔓延速度比较图

Fig.4 The fire spread velocity comparative curve of case3 and case4

图 5 给出了顺流情况下三合板在有、无细水雾作用下火蔓延速度随来流速度变化的曲线。由于实验中都是顺风情况，因此可以认为在相同风速情况下施加了细水雾之后的氧浓度与没有施加细水雾时的氧气浓度相等。从图 5 可以看出，在施加了细水雾之后三合板的火蔓延速率有所降低，随着来流速度的增加细水雾抑制火蔓延速率的作用在减小。在有、无细水雾作用下，其变化规律基本相同。图 6 给出了顺流情况下五合板在有、无细水雾作用下火蔓延速度随来流速度变化的曲线。在来流速度低于 100  $\text{cm/s}$  情况下，施加细水雾都能熄灭火焰。当来流速度低于 40  $\text{cm/s}$  时，没有细水雾作用下五合板也难以燃烧，当风速大于 100  $\text{cm/s}$  时燃烧才能持续进行，并且随着来流速度的增大火蔓延速度也随之增大。同薄片纸的实验相比，在相同的来流速度下三合板以及五合板的火蔓延速度较小。

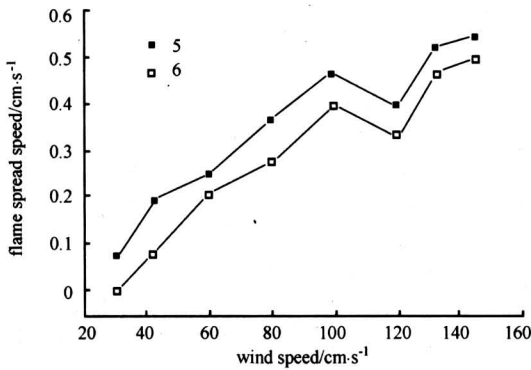


图 5 工况 5, 6 火蔓延速度比较图

Fig.5 The fire spread velocity comparative curve of case 5 and case 6

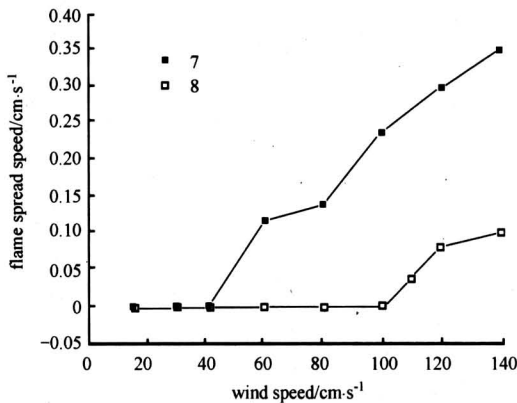


图 6 工况 7, 8 火蔓延速度比较图

Fig.6 The fire spread velocity comparative curve of case 7 and case 8

图 7 给出了顺流情况下厚纸板在有、无细水雾作用下火蔓延速度随来流速度变化的曲线。在相同的来流速度下有细水雾时火蔓延速度小于无细水雾时的速度。随着来流速度增大, 火蔓延速度不断增加, 当施加了细水雾之后, 风速小于 40 cm/s 时, 厚纸板火焰会熄灭, 当风速大于 40 cm/s 后, 厚纸板火可以持续蔓延, 并且随着来流速度的增大, 细水雾的抑制火蔓延的作用增强。同图 6 相比可以看出细水雾抑制厚纸板火蔓延的效果没有细水雾抑制五合板火蔓延的效果好。

#### 4 结论

- 1) 材料是决定火蔓延速度大小的关键因素;
- 2) 施加细水雾之后, 在相同的来流速度下, 4 种材料火蔓延速度明显降低, 细水雾可以有效的抑制火蔓延速度, 大大稀释火焰周围的氧气浓度, 从而抑制燃烧反应过程;

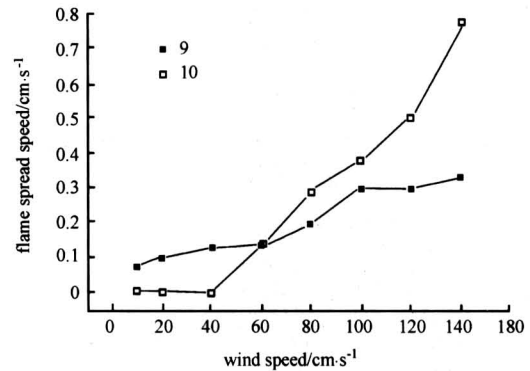


图 7 工况 9, 10 火蔓延速度比较图

Fig.7 The fire spread velocity comparative curve of case 9 and case 10

3) 施加细水雾之后, 对于厚纸板顺流火, 随着来流速度的增加, 细水雾抑制火蔓延作用增强, 细水雾对三合板和薄纸片顺流火的抑制作用随着来流速度增加相应的降低。

#### 参考文献

- [1] Grant G, Brenton J, Drysdale D. Fire suppression by water sprays [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2000, 26(2): 79 ~ 130
- [2] Cdbuzu C, Ananth R. On water mist fire suppression Mechanisms in a gaseous diffusion flame [J]. Fire Safety Journal. 1998, 31(3): 253 ~ 276
- [3] 崔正心, 廖光焯. 细水雾抑制障碍物稳定火焰的实验研究[J]. 火灾科学. 2001, 10(3): 174 ~ 177
- [4] Fernandez-Pello A C, Williams F A. A theory of laminar flame spread over flat surfaces of solid combustibles [J]. Combust. Flame. 1977, 70: 291 ~ 305
- [5] Frey A E, T'ien J S. Near-limit flame spread over paper samples [J]. Combust Flame. 1976, 257 ~ 266
- [6] Kanary A M. Thermal decomposition kinetics of wood pyrolysis [J]. Combust Flame, 1972, 8: 75 ~ 86
- [7] Kashiwagi T. A radiative ignition model of a solid fuel [J]. Combust Sci Technol, 1974, 8: 225 ~ 238
- [8] Kindelan M, Williams F A. Gas-phase ignition of a solid with in-depth absorption of radiation [J]. Combust. Sci. Technol, 1977, 16: 47 ~ 54
- [9] Modak A T. Nonluminous radiation from hydrocarbon-air diffusion flames [J]. Combust. Sci. Technol, 1975, 10: 245 ~ 254
- [10] 王清安, 傅维镛, 张永康. 燃烧学[M]. 北京: 高等教育出版社. 1987
- [11] 葛新石, 王义方, 郭宽良. 传热的基本原理[M]. 合肥: 安徽教育出版社. 1985 (下转第 82 页)

## Study on Cumulative Energy Effect in Directional Fracture Controlled Blasting in Rock

Luo Yong, Shen Zhaowu

(*Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

[**Abstract**] In order to solve the problems of stone exploitation, the mechanism of crack initiation and its expansion of directional fracture controlled blasting with linear cavity effect cutter in rock were roughly studied based on the theories of cumulative energy effect, mechanics of explosive and rock fracture mechanics, then the blasting parameters were designed and tested by model test in laboratory and field. The experimental results show that the energy from blasting can be directionally concentrated by the cumulative energy jet. The directional expansion of crack is satisfactory. Model test and field test suggest that the directional fracture controlled blasting with linear cavity effect cutter is a good means in excavating tunnels or cutting rock. It points out that the prospect of this method is promising. All these will give beneficial references to related theoretical study and field application.

[**Key words**] cumulative energy effect; directional fracture controlled blasting; model test; liner; fracture

(上接第 72 页)

[12] 姚 斌, 廖光焯, 范维澄. 受限空间内细水雾与火相互作用的实验研究[J]. 火灾科学, 1997, 6(2): 46

~ 52

[13] 王喜世, 廖光焯, 秦 俊. 热灾害实验诊断方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 2001

## Small Scale Experimental Research on Fire Propagation Over Combustible Solid Surface Under Water Mist Condition

Lin Lin, Fang Yudong, Liao Guangxuan, Qin Jun

(*State key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

[**Abstract**] With experimental measurement and analytical technology, the research of fire propagation over the surface of some combustible solid is conducted. Within mini-typed wind tunnel, the fire propagation over some typical solid surface under different air stream is studied. Four types of materials were studied: thin paper, typical upholstery wood (three-ply, five-ply) and the commonly used thick paper for packing. The effect with the conditions of water mist loading is analyzed and some results are gained, which may give some instruction for the project work.

[**Key words**] water mist; fire propagation; wind tunnel