

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.10.016

坡度对山地火蔓延影响的实验研究

赵艳秋, 王昌建, 张旭, 吴越, 於星

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章在坡度为 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的山地模型上开展火蔓延实验,研究不同的中心坡度和侧面坡度对火线轮廓、火线夹角、火焰长度和火蔓延速率(rate of fire spread, ROS)的影响,分析火焰对前方未燃烧的燃料的预热作用。研究发现:山脊火会形成水滴状火线,山谷火线在侧坡上呈V形;中心坡度和侧面坡度会对山地火蔓延行为产生重要影响,随着中心坡度增加,山谷火焰对流换热明显增强,ROS快速增加。

关键词:山地火;中心坡度;侧面坡度;火蔓延速率(ROS);预热阶段

中图分类号:S762.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)10-1401-08

Experimental study on the effect of slope on the spread of mountain fire

ZHAO Yanqiu, WANG Changjian, ZHANG Xu, WU Yue, YU Xing

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Fire spread experiments were carried out on mountain models with slopes ranging from 0° to 40° . The effects of different central slopes and lateral slopes on flame line profile, flame line angle, flame length and the rate of fire spread (ROS) are studied, and the preheating mechanism of the fuel in the unburned area in front of flame was analyzed. It is found that ridge fire forms a water-droplet-shaped flame line, and valley flame line are V-shaped on lateral slopes. The central slope and lateral slope will have an important impact on the spread behavior of mountain fire. With the increase of the central slope, the convection heat transfer of the valley flame is significantly enhanced, and the ROS increases rapidly.

Key words: mountain fire; central slope; lateral slope; rate of fire spread (ROS); preheating stage

0 引言

地形条件是影响森林地表火蔓延的重要因素,文献[1]的研究表明,世界各地由森林火灾引起的致命事故大都发生在山谷或者山脊中,而山谷和山脊地形在实际中很常见,因此研究山地火蔓延对预防和扑救森林火灾具有重要意义;文献[2]研究了地形条件对火蔓延特性的影响,结果表明地形的坡度是影响火灾行为非常重要的因素。目前,许多学者已经开展了坡度条件下火蔓延的实验研究和模型分析。文献[3-4]改变地形坡度

进行了地表火蔓延实验,测量了火焰长度、火焰倾斜角、火焰辐射和温度分布等特性,发现火焰在斜坡上蔓延时,辐射传热在火蔓延预热阶段占主导地位;文献[5]认为外界风和坡度可以改变辐射和对流传热效率,从而改变火蔓延速率(rate of fire spread, ROS),将实验得到的有坡度与无坡度时的ROS之比定义为坡度附加系数,并将坡度附加系数引入地表火灾蔓延数学模型中,使该模型适用于有坡度的地形;文献[6-7]研究了风和坡度对蔓延行为的作用,认为坡度对ROS的影响与环境风的影响相似;文献[8-10]通过线形火点燃的

收稿日期:2022-03-01;修回日期:2022-07-03

基金项目:安徽省重点研发计划资助项目(S202104b11020035)

作者简介:赵艳秋(1996—),女,江苏徐州人,合肥工业大学硕士生;

王昌建(1975—),男,四川仁寿人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: chjwang@hfut.edu.cn.

上坡火蔓延实验,分析了坡度对 ROS、火焰滞留时间、火焰温度和几何形状等火焰特性的影响,研究了火焰前锋对前方未燃烧区域的辐射和对流作用;文献[11-12]比较分析了点火源引燃和线形火点燃的火焰前锋的变化规律,结果发现辐射传热和对流传热在上坡火蔓延阶段共同作用,导致 ROS 不稳定,较大坡度时,对流加热效应的增强会引发爆发火;文献[13-14]在实验室和野外进行了实验,测量了上坡火蔓延过程中火焰前锋不同位置的热流,并观察了坡度对火焰动力学和火焰前方传热的影响。实验发现随着坡度增加,火焰动力和传热均发生显著变化。测得的总热流曲线与辐射热流曲线差距很小,即在该实验中,辐射传热对未燃烧的燃料的预热起主要作用。文献[15]在实验中将粒子图像测速(particle image velocity, PIV)技术测量系统与视频相结合,研究上坡火蔓延中火焰的动力学特性和燃烧机制;文献[16-18]通过在燃料床两侧布置相同高度的挡板抑制火焰的侧向卷吸,研究了沟槽地形的上坡火蔓延,实验结果表明,在较高的坡度下火焰会向燃料床表面附着,导致火蔓延加速,火焰前方产生热气流,增强对流加热作用从而引发爆发火;文献[19]研究了坡度对沟槽地形火灾行为的影响,结果表明坡度越大,爆发火喷射得越剧烈,达到最高温度的速度越快;文献[20-22]开展了一系列的实验,研究不同坡度下的下坡火灾行为,结果表明下坡 ROS 较低,随着坡度的增加,ROS 在 20°达到最小值,随后增加,其变化趋势呈抛物线形。前人关于山地火灾的实验研究主要集中在单一的地形,对复杂地形的火蔓延的实验和理论研究还不够完善。为了研究山地火灾的蔓延规律,本文利用一个山脊和山谷相连的模型进行实验,通过分析实验数据研究坡度对火灾行为和 ROS 的影响,并分析火焰前方的传热机理。

1 实 验

本文的所有实验均在一个长为 30.2 m、宽为 8.4 m、高为 6.5 m 的大厅内进行。实验时,大厅内的门窗处于关闭状态,排除气流对火蔓延过程的影响,模拟无风条件下的山地火蔓延。山地火蔓延实验在 1 个山脊和 1 个山谷相连的模型上进行,实验台是用 3 面 1.0 m×2.0 m 的相同尺寸金属板通过折页连接而成,山地的几何结构可以用中心坡度角 α 和侧面坡度角 δ 来描述,其中:中心坡度角 α 为山脊和山谷线与水平地面之间的夹

角;侧面坡度角 δ 为山脊和山谷倾斜底边与水平地面之间的夹角。

在实验台上铺设防火板,并在防火板上放置细钢丝网,以防止燃料滑落,使燃料铺设更均匀。实验中使用原产地四川的干松针作为燃料,燃料铺设厚度约 5 cm。实验前使用温湿度计以及含水率测定仪测得环境温度、空气相对湿度和燃料的含水率,实验参数见表 1 所列。每次实验时,同时开展实验台尺寸为 1.0 m×1.0 m 的平坡下的火蔓延实验,得到的火蔓延速率在 0.27 ~ 0.30 cm/s 范围内,重复性较好。因此,认为可以排除环境条件对实验的影响。

用浸有酒精的棉球点火,点火位置位于山脊中心线上距底部 20 cm。改变中心坡度角 α 为 0°、10°、20°、30°、40°,侧面坡度角 δ 为 0°、10°、20°、30°、40°,进行 10 种工况的重复实验。

表 1 实验参数

实验序号	$\alpha/(\circ)$	$\delta/(\circ)$	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/ $\%$	燃料含水率/ $\%$
1	0	0	8.20	59	11.40
2	0	0	8.20	62	10.40
3	0	30	10.50	42	10.50
4	0	30	8.50	45	11.20
5	10	30	7.00	46	9.80
6	10	30	9.00	85	10.50
7	20	30	12.60	82	10.00
8	20	30	7.50	83	10.40
9	30	30	6.20	84	10.10
10	30	30	7.80	89	11.70
11	40	30	8.20	87	10.00
12	40	30	11.00	85	10.30
13	30	0	9.90	87	11.60
14	30	0	7.00	87	10.90
15	30	10	8.90	79	10.70
16	30	10	10.40	78	10.50
17	30	20	8.00	78	9.40
18	30	20	8.50	68	10.40
19	30	40	11.60	67	10.60
20	30	40	8.00	69	9.20

实验仪器布置如图 1 所示,采用 K 型热电偶(直径为 1 mm,探头长度为 300 mm,测温范围为 -200~1 300 $^{\circ}\text{C}$,测温精度为 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$)测量不同位置处的火焰前沿温度。热电偶从燃料床下穿至燃料床表面上方 3 cm 处,沿山脊线和山谷线以 20 cm 等距离分布。使用 Captec 公司生产的 2 个 HS34-CB 总热流计,量程为 $\pm 200 \text{ kW/m}^2$,灵敏度

为 $2.5 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$)和 2 个 TS-34C 辐射热流计量程为 $\pm 200 \text{ kW}/\text{m}^2$,灵敏度为 $2 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$)测量火焰前方燃料表面接收到的总热量和辐射热量。在山脊和山谷延长线上,距离燃料床末端 40 cm 处分别安装 1 个总热流计和 1 个辐射热流计,测量窗口朝上。使用 NI 公司生产的 NI9213 热电偶输入模块(测量灵敏度为 $0.02 \text{ }^\circ\text{C}$,电压测量范围为 $\pm 78 \text{ mV}$)以及 C-7018 数据采集模块(电压范围为 $\pm 15 \text{ mV}$,采样频率为 10 次/s,精确度为 $\pm 0.1\%$)采集热电偶和热流计的信号。在燃料床侧面和前面架设 DV 数字摄像机来记录火焰的燃烧过程,视频记录格式为 25 帧/s。

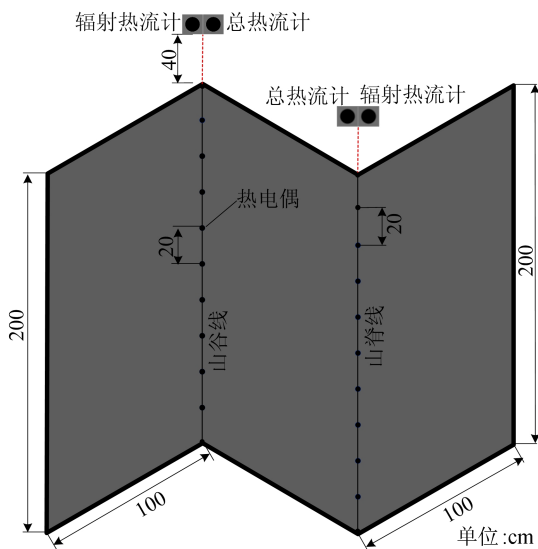


图 1 实验仪器布置图

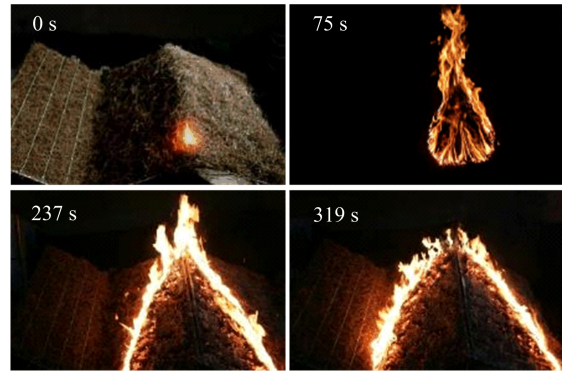
2 分析与讨论

2.1 火线轮廓

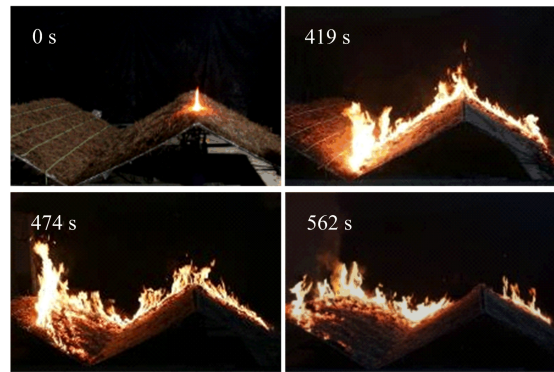
坡度为 0° 时的火蔓延过程如图 2a 所示,平坡时各方向的 ROS 相同,因此会形成以点火位置为圆心,半径不断扩大的半圆形火线。坡度条件下,山脊火蔓延过程如图 2b 所示,上坡 ROS 较快,火线呈现 V 形,火焰附着在燃料床上,自点火位置向其他方向的火蔓延速率较慢,火线呈现半圆形,因此山脊地形上的火线会形成水滴形,2 条火线之间的夹角会先逐渐增大直至稳定不变。山谷地形火蔓延过程如图 2c、图 2d 所示,山脊侧坡的火线继续蔓延至山谷线后,会迅速沿着山谷侧坡的上坡方向以及山谷线蔓延,在山谷的侧坡上形成 V 形火线。随着 α 的增加,侧坡上的火头会向上坡推移,快速蔓延至燃料床末端。



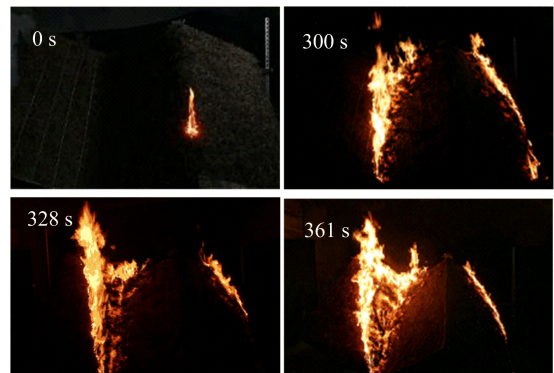
(a) $\alpha = 0^\circ, \delta = 0^\circ$



(b) $\alpha = 30^\circ, \delta = 30^\circ$



(c) $\alpha = 0^\circ, \delta = 30^\circ$



(d) $\alpha = 40^\circ, \delta = 30^\circ$

图 2 山脊和山谷火线轮廓随时间的变化

2.2 火蔓延速率

本文利用山脊线和山谷线上的热电偶阵来确定火焰前锋到达某点和离开该点的时间,将热电

偶的温度初次达到燃料着火温度(350 °C)对应的时刻作为火焰前锋到达这个热电偶的时刻,然后根据热电偶的位置坐标以及所对应的时刻,对这些数据点进行一次线性拟合,拟合曲线的斜率为 ROS。不同中心坡度下山脊、山谷火焰前锋位置与点火时刻的线性拟合曲线以及拟合曲线的斜率如图 3 所示。图 3 中, R 为 ROS 值,下同。

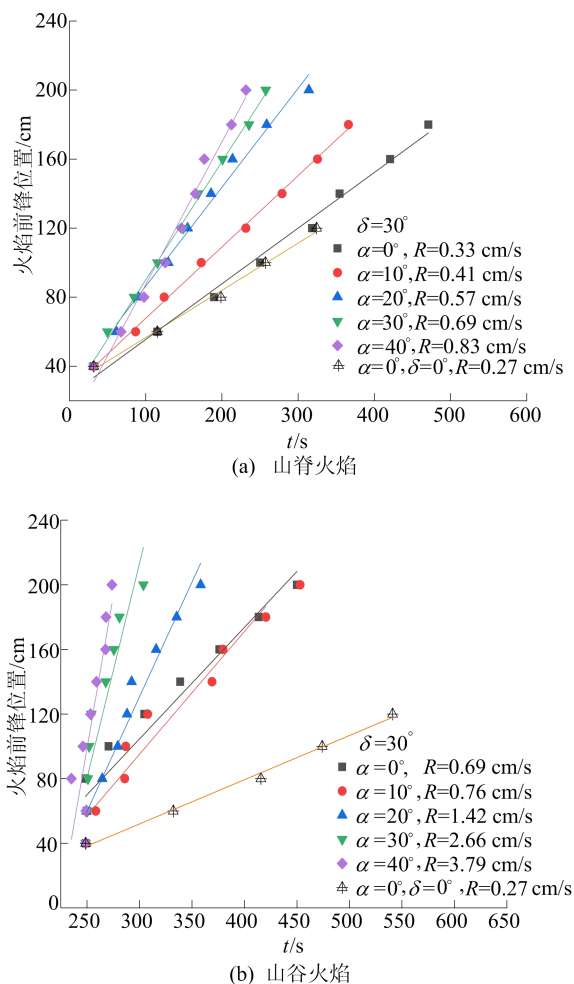


图 3 山脊、山谷火焰前锋位置与点火时刻的拟合曲线

因为线性回归的相关系数均大于 0.9,所以在这段距离内火焰前锋在山脊和山谷线上的蔓延速率是稳定的。对比图 3a、图 3b 可以看出,山脊火蔓延得比较缓慢、稳定,山谷 ROS 远高于山脊的。

ROS 随 α 和 δ 的变化如图 4 所示。从图 4 可以看出,山脊和山谷 ROS 均会随着 α 的增加而增加,随着 δ 的增加而减小。山脊 ROS 随 α 和 δ 的变化较小,山谷 ROS 的变化较大。文献[14]的研究表明,火焰在上坡蔓延时,随着坡度增加,倾斜角减小,火焰向上坡方向的燃料床倾斜,ROS 增加。本文中,火焰在山脊和山谷上蔓延时,当 α 不

变, δ 不断增加,甚至大于 α 时,山脊和山谷火焰由向山脊线和山谷线倾斜转向侧坡倾斜,火蔓延方向随之发生改变,导致山脊和山谷线上的 ROS 随着 δ 的增加而减小。

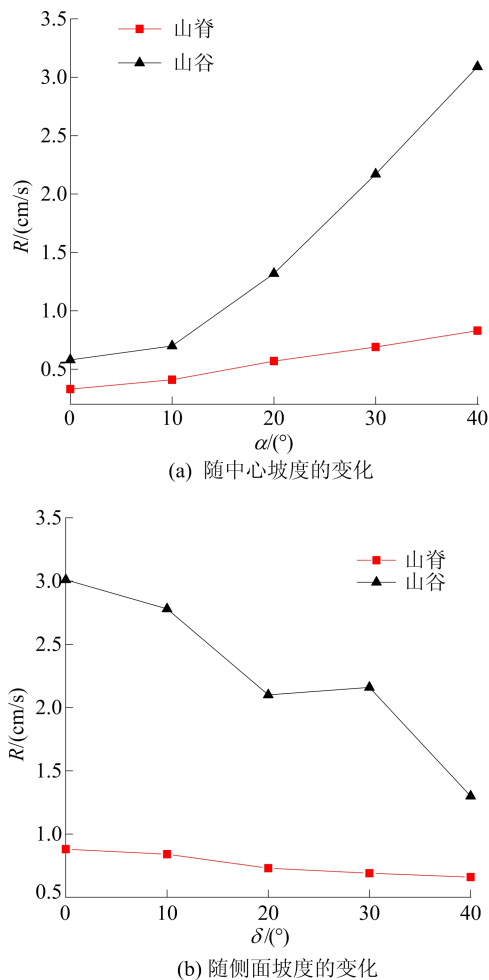
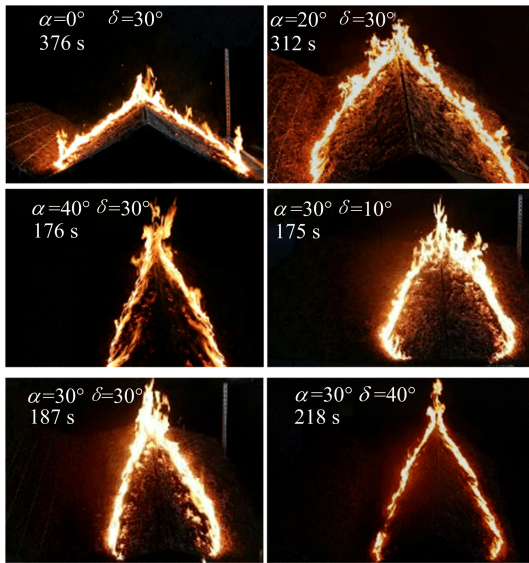


图 4 ROS 随中心坡度和侧面坡度的变化

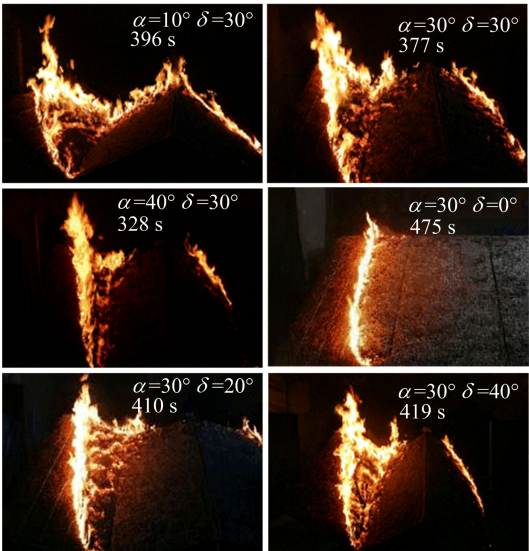
2.3 火线夹角

将 V 形火线之间的夹角定义为火线夹角。火焰蔓延至山谷线后向山谷侧坡上坡方向蔓延,侧坡上火线与山谷线之间形成的夹角也是 V 形,为了方便计算,将这个夹角作为山谷火焰的火线夹角的 1/2。通过对火线演化的研究发现, α 和 δ 是影响火线夹角的重要因素。从实验视频的图像中提取火蔓延达到稳定时的火线夹角如图 5 所示,山脊和山谷火线夹角随坡度的变化如图 6 所示。从图 5、图 6 可以看出,随着 α 的增加,山脊与山谷火线夹角明显减小;随着 δ 的增加,山脊火线夹角缓慢减小,而山谷火焰的火线夹角快速增加,这是因为侧面坡度低,中心坡度低,山脊侧坡的火线蔓延过山谷线后快速向上坡蔓延,而其他方向上的 ROS 较低,所以山谷火线夹角会随着 δ

的增加而增加。

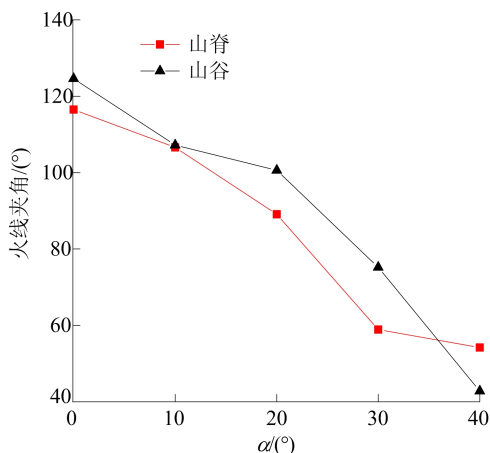


(a) 山脊

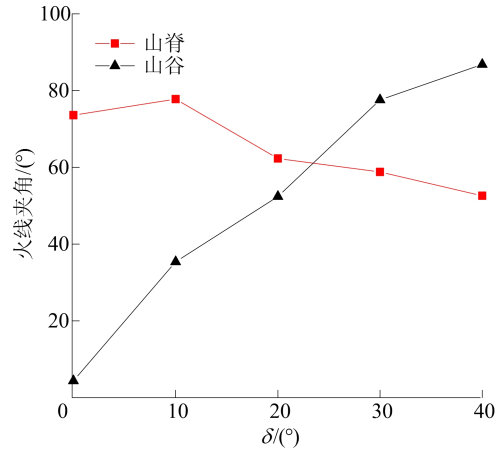


(b) 山谷

图 5 不同坡度下的火线夹角



(a) 随中心坡度的变化



(b) 随侧面坡度的变化

图 6 火线夹角随坡度的变化

2.4 火焰长度

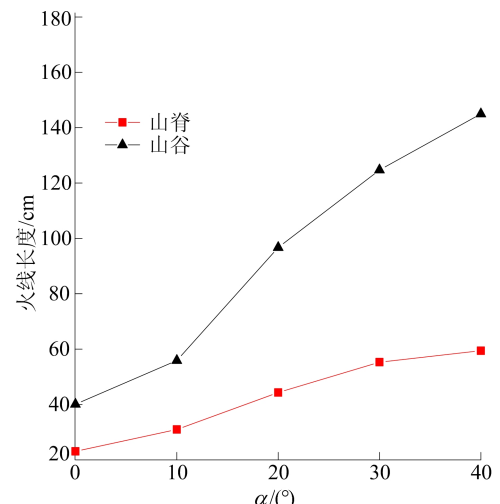
将火头位置与火焰底部中心之间的长度定义为火焰长度。文献[23]关于火焰长度的研究表明,火焰长度与火焰的强度呈正比关系,文献[24]给出火焰强度的经验公式,即

$$I_F = Q_f m_f R \tag{1}$$

其中: I_F 为火焰强度; m_f 为单位面积消耗的燃料质量; R 为 ROS; Q_f 为燃料的热值,对于大部分燃料,燃料热值的差别不大。

由式(1)可知,火焰长度会随着 ROS 的增加而增加。本文提取了山脊和山谷火蔓延达到稳定阶段的火焰长度,山脊和山谷火线长度随坡度的变化如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在坡度条件下,山谷火焰较长,其长度明显高于山脊火焰长度。随着 α 和 δ 的增加,山脊火焰长度缓慢增加,山谷火线长度迅速增加。



(a) 随中心坡度的变化

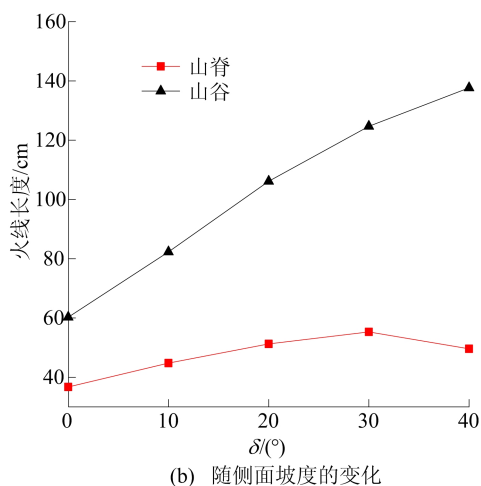


图 7 山脊和山谷火线长度随坡度的变化

平坡时,山脊线和山谷线上的火焰基本保持竖直,ROS 较小,火焰长度也小,随着 α 的增加,火焰向燃料床倾斜,ROS 加快,火焰长度明显增加,与式(1)得到的结论一致。 δ 增加时,火焰向燃料床侧坡的上坡方向倾斜,虽然 ROS 缓慢减小,但火焰长度仍然增加。

2.5 火焰预热机理

在地表火蔓延的预热阶段,火焰前锋对于前方未燃烧的燃料的预热作用是影响火焰特性的重要因素,因此研究火蔓延特性主要分析预

热阶段的传热机理。文献[25]将燃料层看作热薄型,认为在燃料床的厚度方向上没有温差,燃料床内部的热传导作用可以忽略。本文主要考虑来自火焰表面的辐射热、燃料表面与气体之间对流传热。

利用安装在燃料床末端 40 cm 处的总热流计和辐射热流计来模拟火焰前方未燃烧区域的燃料表面接收到的总热流和辐射热流。实验测得的热流曲线存在剧烈的波动,为了减小误差,数据分析时对热流曲线进行平滑处理。不同坡度下山脊和山谷的热流随时间的变化如图 8、图 9 所示。

对比图 8、图 9 中可知,辐射热流峰值总是高于总热流峰值,这表明山脊与山谷火蔓延预热阶段的对流传热表现为对流冷却作用。由图 8 可知,随着 α 和 δ 增加,对流冷却不断增加,然而辐射传热量远高于对流传热量,因此在山脊火蔓延预热阶段辐射传热占主导作用。由图 9 可知: α 和 δ 低于 30° 时,对流传热量很小,辐射传热在山谷火蔓延预热阶段占主导; α 和 δ 高于 30° 时,对流冷却作用明显增强;在 $\alpha=40^\circ, \delta=30^\circ$ 时,对流传热量与辐射热量相当;因此当 α 和 δ 高于 30° 时,在山谷火蔓延预热阶段辐射传热和对流传热共同作用。

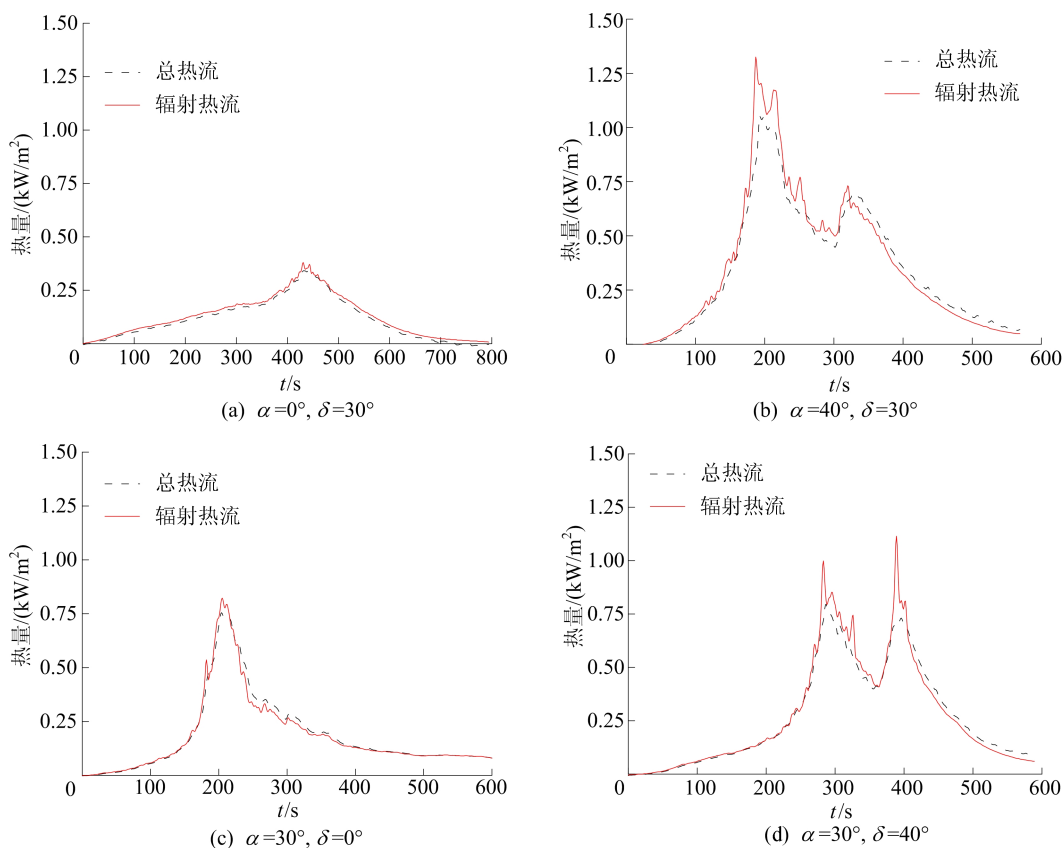


图 8 不同坡度下山脊火热流随时间的变化

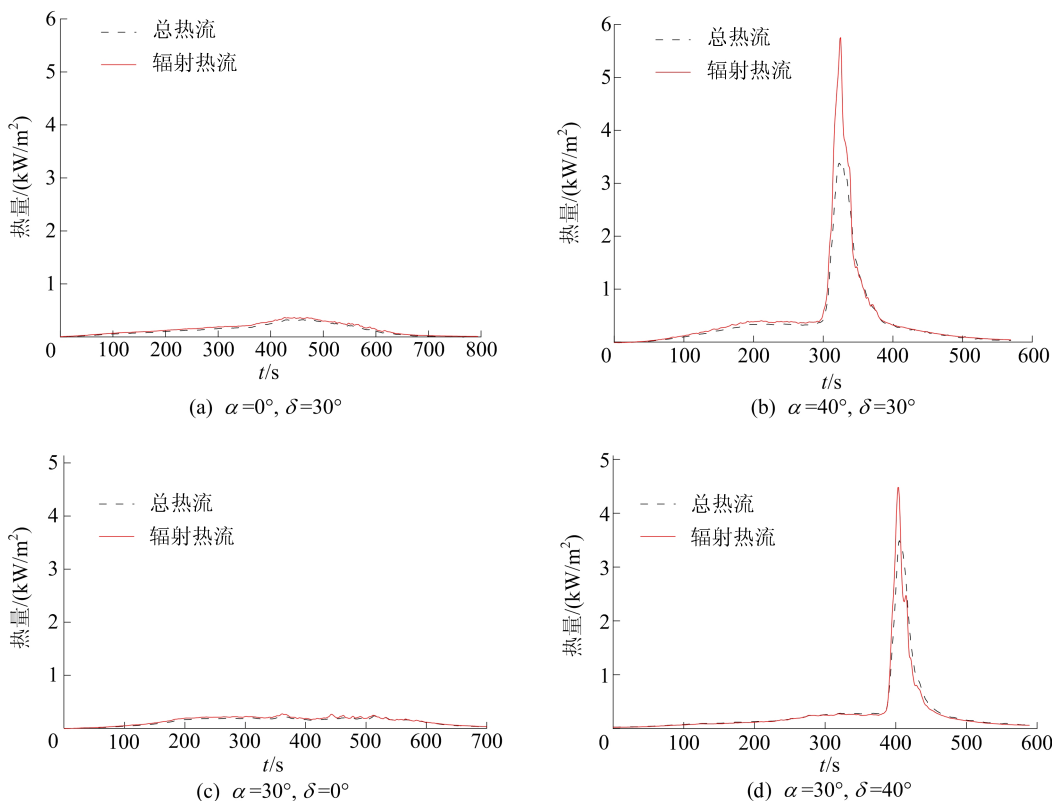


图 9 不同坡度下山谷火热流曲线随时间的变化

山脊火和山谷火的辐射热流峰值随中心坡度和侧面坡度的变化如图 10 所示。由图 10 可知,随着 α 和 δ 的增高,火焰辐射热流峰值增大,当 α

和 δ 大于 20° ,山脊火辐射热流峰值缓慢增长,山谷火的辐射热流峰值快速增长,且山谷火焰辐射热量远高于山脊火焰。

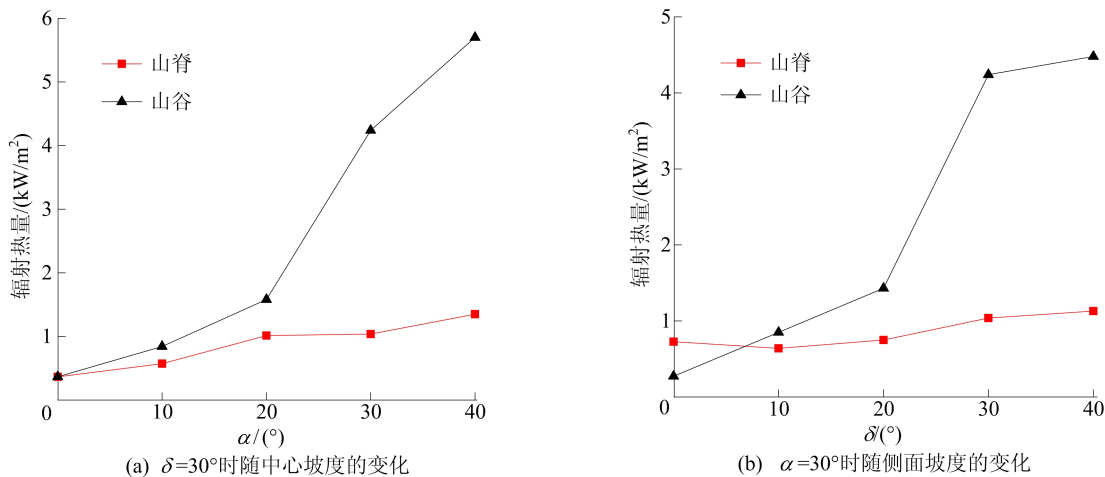


图 10 辐射热量峰值随中心坡度和侧面坡度的变化

3 结 论

本文改变中心坡度和侧面坡度,开展了较高坡度下的山脊和山谷火蔓延特性实验研究,得出如下结论:

1) 山脊火在坡度条件下会形成水滴形火线,

上坡 V 形火线夹角会逐渐增大直至保持稳定,山脊侧坡火线蔓延至山谷线后会快速沿着山谷侧坡上坡和山谷线蔓延,在山谷侧坡上形成 V 形火线。

2) 中心坡度角 α 和侧面坡度角 δ 都对火蔓延行为特性产生影响。随着 α 的增加,山脊 ROS 缓慢增加,山谷 ROS 快速增加,山脊和山谷的火

线夹角快速减小、火线长度明显增加。随着 δ 的增加,山脊和山谷 ROS 减小,火焰长度增加;山脊火线夹角减小,而山谷火焰前锋向侧坡快速蔓延,导致火线夹角增加。

3) 辐射传热在山脊火蔓延的预热阶段占主导地位,当 α 和 δ 低于 30° 时,辐射传热在山谷火蔓延起主要作用;高于 30° 时,对流传热量明显增加,辐射和对流传热共同作用。当 α 和 δ 高于 20° 时,山谷火焰对燃料的辐射作用明显增强,远高于山脊火。因此山谷 ROS、火焰长度和火焰辐射热量远高于山脊火。

【参 考 文 献】

- [1] VIEGAS D X, PITA L P. Fire spread in canyons[J]. International Journal of Wildland Fire, 2004, 13(3): 253-274.
- [2] INCENDIOS S C, INCENDIOS E D, FUEGO C D, et al. La defensa contra incendios forestales fundamentos y experiencias[M]. New York: McGraw-Hill, 2000: 21-30.
- [3] VAN WAGNER C E. Fire behaviour mechanisms in a red pine plantation: field and laboratory evidence[C]//Congress of the international Union of Forest Research Organizations. [S. l. : s. n.], 1967: 6-26.
- [4] 陶奇, 谢小冬, 张林鹤, 等. 点火源引燃的上坡火蔓延实验研究[J]. 火灾科学, 2018, 27(2): 92-99.
- [5] ROTHERMEL R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels[Z]. Ogden, UT: U. S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972: 2-24.
- [6] VIEGAS D X. Some thoughts on the wind and slope effects on fire propagation[J]. International Journal of Wildland Fire, 1994, 4(2): 63-64.
- [7] WEISE D R, BIGING G S. Effects of wind velocity and slope on fire behavior[J]. Fire Safety Science, 1994, 4(4): 1041-1051.
- [8] DUPUY J L, MARECHAL J. Slope effect on laboratory fire spread: contribution of radiation and convection to fuel bed preheating[J]. International Journal of Wildland Fire, 2011, 20(2): 289-307.
- [9] DUPUY J L, MARECHAL J, PORTIER D, et al. The effects of slope and fuel bed width on laboratory fire behaviour[J]. International Journal of Wildland Fire, 2011, 20(2): 272-288.
- [10] DUPUY J L. Slope and fuel load effects on fire behavior: laboratory experiments in pine needles fuel beds[J]. International Journal of Wildland Fire, 1995, 5(3): 153-164.
- [11] VIEGAS D X. Slope and wind effects on fire propagation[J]. International Journal of Wildland Fire, 2004, 13(2): 143-156.
- [12] VIEGAS D X. Fire line rotation as a mechanism for fire spread on a uniform slope[J]. International Journal of Wildland Fire, 2001, 11(1): 11-23.
- [13] SILVANI X, MORANDINI F. Fire spread experiments in the field: Temperature and heat fluxes measurements[J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(2): 279-285.
- [14] SILVANI X, MORANDINI F, DUPUY J L. Effects of slope on fire spread observed through video images and multiple-point thermal measurements [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 41: 99-111.
- [15] MORANDINI F, SILVANI X, DUPUY J L, et al. Fire spread across a sloping fuel bed: flame dynamics and heat transfers[J]. Combustion and Flame, 2018, 190: 158-170.
- [16] DOLD J W, ZINOVIEV A. Fire eruption through intensity and spread rate interaction mediated by flow attachment [J]. Combustion Theory and Modelling, 2009, 13(5): 763-793.
- [17] LIU N A, WU J M, CHEN H X, et al. Effect of slope on spread of a linear flame front over a pine needle fuel bed: experiments and modelling [J]. International Journal of Wildland Fire, 2014, 23(8): 1087-1096.
- [18] XIE X D, LIU N A, LEI J, et al. Upslope fire spread over a pine needle fuel bed in a trench associated with eruptive fire[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36(2): 3037-3044.
- [19] CHEN C, NIE Y, ZHANG Y. Experimental study on flame spread over poplar plywood in inclined trench: phenomenon of flame injection[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 146: 253-263.
- [20] VAN WAGNER C E. Effect of slope on fires spreading downhill[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1988, 18(6): 818-820.
- [21] VIEGAS D X. On the existence of a steady state regime for slope and wind driven fires[J]. International Journal of Wildland Fire, 2004, 13(1): 101-117.
- [22] YANG Z, ZHANG H M, ZHANG L H, et al. Experimental study on downslope fire spread over a pine needle fuel bed[J]. Fire Technology, 2018, 54(6): 1487-1503.
- [23] FERNANDES P M, BOTELHO H S, REGO F C, et al. Empirical modelling of surface fire behaviour in maritime pine stands [J]. International Journal of Wildland Fire, 2009, 18(6): 698-710.
- [24] BYRAM G M. Combustion of forest fuels. forest fire: control and use[M]. New York: McGraw-Hill, 1959: 61-89.
- [25] MESTRE N J D, CATCHPOLE E A, ANDERSON D H, et al. Uniform propagation of a planar fire front without wind [J]. Combustion Science and Technology, 1989, 65(4): 231-244.

(责任编辑 张 镛)