

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.025

基于 FireFOAM 的火焰加速突变行为的数值模拟*

林一凡,张英,张威,廖明静

(武汉理工大学 安全科学与应急管理学院,武汉 430070)

摘要: 为了研究倾斜固体表面顺流火焰蔓延的突变行为特性,基于 OpenFOAM 开源计算流体软件的 FireFOAM 瞬态湍流火焰求解器,以典型可炭化材料瓦楞纸为原型,分析了倾斜角度为 0° 到 30° 范围内火焰形态、质量损失速率和固体表面热量分布的变化规律。结果发现火灾特性参数(火焰倾角和面积)随倾角增加而增加,且在倾斜角度为 10° 和 20° 之间存在突变区域。当倾角小于 10° 时,火焰行为及固体表面接收到的热量分布基本保持不变;当倾角大于 20° 时,火焰面积及火蔓延速度随时间增大,火焰倾角变化较大且热量分布随时间变化逐渐增加。通过判断未燃区热量分布和温度之间的特征比值的变化趋势,揭示了固体表面倾角与火蔓延突变及加速行为的影响机制。

关键词: FireFOAM; 数值模拟; 火蔓延; 倾斜表面; 加速突变; 热量传递

中图分类号: X932 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)02-0149-09

Numerical Simulation of Flame Acceleration Characteristics based on FireFOAM

LIN Yi-fan, ZHANG Ying, ZHANG Wei, LIAO Ming-jing

(School of Safety Science and Emergency Management,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to study the mutations characteristics of upward flame spread over the inclined solid surfaces, the FireFOAM transient turbulent flame solver of an open source computational fluid software OpenFOAM was applied to analysis the variation principle of flame shape, mass loss rate and heat distribution on solid surface of a typical carbonized corrugated paper within inclination angle in range of 0° to 30° . It was found that the flame angles and area was increased with the increase of the inclination angle, and there was an acceleration mutation between the inclination angle of 10° and 20° . Moreover, the distribution characteristics of the flame and heat on the solid surface remain basically unchanged when the inclination angle was less than 10° . Meanwhile, the flame area and the spread rate of flame was increased with time, the flame inclination was changed greatly and the heat distribution was increased gradually with time when the inclination angle was greater than 20° . The influence mechanism between flame acceleration and mutation with the inclination angles of solid surface was revealed through analyzing the characteristics of the ratio between the heat distribution and temperature of the unburnt zone.

Key words: fireFOAM; numerical simulation; flame spread; inclined surface; acceleration mutation; heat transfer

收稿日期:2020-02-26

作者简介:林一凡(1995-),男,硕士研究生,主要从事火灾安全方向研究,(E-mail)928994902@qq.com。

通讯作者:廖明静(1987-),女,硕士,武汉理工大学安全科学与应急管理学院讲师,主要从事火灾安全应急管理方向研究,(E-mail)1719755170@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金(51706164)

固体可燃物表面火蔓延是火灾的初期阶段,也是最重要的阶段,而火蔓延速度决定了火灾规模的大小以及可能带来的财产损失。实际火灾中,火蔓延速度受多种因素影响,其中最关键的因素则是固

体表面的倾斜角度。2019 年 3 月 3 日,四川省凉山州木里县雅砻江镇立尔村发生森林火灾。火灾的起火点位于上坡位置的一颗遭雷击的云南松,由于坡度影响,造成火蔓延加速现象,最终火灾面积达到 20 万公顷,共造成 200 多万元的财产损失和 30 名消防队员的伤亡。

为了减少各类倾斜火灾对社会造成的负面影响,应对固体可燃物倾斜表面火蔓延的特性进行必要的研究。De Ris 在 1973 年首次研究了纺织物的顺流火蔓延,并得到了可燃物表面火蔓延速度与热解位置的经验公式^[1]。2001 年,F Morandini 等人在实验的基础上,证实了在坡度的影响下,热解区产生的火焰会以对流和辐射两种方式对未燃区域提供热量,提出了预热区的概念^[2]。Zhang 等人在 2012 年通过白木燃烧实验,研究了固体表面火蔓延速度和倾角的规律^[3],通过判断随着倾角的增加,预热区长度也会随之改变,提出了火蔓延加速的具体倾角数值为 20°。Xie 和 Des Jardin 利用直接数值模拟(DNS)得到了顺流火蔓延火焰前锋处到未燃区域的热量分布^[4],并提出了热量分布会随火蔓延的发展而变化,呈指数衰减分布。

虽然诸多学者就倾斜表面火蔓延现象做了大量的实验,并在火蔓延加速现象产生的原因以及临界角度有了统一的认识。但由于火蔓延问题的复杂性,精确地模拟小尺寸顺流倾斜火蔓延实验仍有较大的挑战性。相较于实验,数值模拟不需要投入大量的人力物力,可以更好的理解导致倾斜表面火蔓延加速的物理过程。在可靠的理论模型上,数值模拟可以更直观的展现气相区域燃烧,固相区域的物质运输。更重要的是,数值模拟可以更为准确的测量出气相区域对固相区域的热量传递,瞬态计算区域流场的变化,以及热解区域的区间长度等,提供众多实验中较为难以测量的数据^[5,6]。

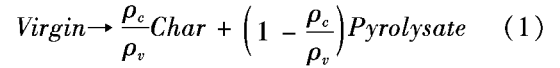
固体火蔓延数值模拟以单壁瓦楞纸作为固体燃料,取不同的定向角度为工况,开展了一系列固体表面火蔓延实验。在模拟工作方面,基于目前计算能力最为强大的开源软件 OpenFOAM,采用在 OpenFOAM 平台上开发出的以大涡模拟为背景的 FireFOAM 求解器开展模拟工作。模拟结果验证了 FireFOAM 求解器在火蔓延模拟中的可行性,并对不同倾斜角度下固体表面火蔓延的行为变化做出相应解释。

1 理论基础

1.1 热解模型

在 FireFOAM 求解器中,使用了简化的热解模

型,在该模型中,将整个固体燃料区域不同方向的热解看作为只有沿固相区域与气相区域接触的表面法向热解。此模型忽略了在热解过程中,水分的蒸发,碳的氧化过程,固体体积变化以及固相熔融。化学反应模型采用单步 n 阶不可逆的阿仑尼乌斯反应模型^[7],反应方程式如下



$$\dot{\omega}_v'' = \left[\frac{\rho Y_v}{(\rho Y_v)_0} \right]^n (\rho Y_v)_0 A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{\omega}_v'' \Delta H_{p,y} - \dot{\omega}_v'' \Delta H_v + \dot{\omega}_v'' \Delta H_c \quad (3)$$

质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_v) = \dot{\omega}_v''' \quad (4)$$

式中: $Virgin$ 、 $Char$ 、 $Pyrolysate$ 分别表示原材料、炭化生成物和热解生成物; A 、 E_a 分别表示指前因子和活化能; ρ 表示材料密度; Y 表示质量分数; $\dot{\omega}_v''$ 表示反应生成速率; $\Delta H_{p,y}$ 为材料的热解潜热; ΔH 为每千克物质的完全燃烧热值。

1.2 辐射模型

在模拟工作中,将辐射强度视为空间位置和角度方向的函数,并作为辐射传递方程的解获得。FireFOAM 采用有限体积坐标离散模型(FvDom)求解辐射传递方程(RTE)。在本模型中,为了避免烟尘辐射建模的复杂性和不稳定性,同时假设使用非散射且不吸收的介质来简化热辐射的复杂性,基于辐射分数的方法对辐射的发射进行了构建^[8]。辐射源项由气体区域燃烧带来的热释放速率(HRR)的一部分提供,如下式所示

$$\frac{dl}{ds} = \left(\frac{\chi_{rad} \times \dot{q}_{comb}'''}{4\pi} \right) \quad (5)$$

$$\dot{q}_{comb}''' = \omega_p'' \times \Delta H_p \quad (6)$$

$$\dot{q}_{rad}''' = \int_0^{4\pi} (dl/ds) d\Omega = (\chi_{rad} \times \dot{q}_{comb}''') \quad (7)$$

式中: l 是辐射强度; \dot{q}_{comb}''' 是计算区域内由燃烧引起的总热释放速率; χ_{rad} 是固定的辐射分数,本模型中的瓦楞纸的燃烧辐射分数由实验测定^[9],设置为 0.25; \dot{q}_{comp}''' 是辐射热速率。

1.3 燃烧及湍流模型

模拟中采用的湍流模型为壁面适应局部涡粘模型(WALE)模型,相比起其他湍流模型,WALE 正确预测了壁面处应消失的湍流动能和亚网格尺度的涡流粘度,这对于固体火蔓延中火焰与固体壁面之间

接触的边界层提供了解析的可能^[10]。WALE 模型的计算如下式所示

$$v_{sgs} = (C_\omega \Delta^2) \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (8)$$

式中： v_{sgs} 为亚网格尺度 (SGS) 的涡流粘度； C_ω 为模型参数，这里取 $C_\omega = 0.55$ ； Δ 为大涡模拟 (LES) 的滤波尺寸； \tilde{S}_{ij} 为应变速率张量； S_{ij}^d 为特殊定义的张量，它的表达式为 $S_{ij}^d = (\tilde{S}_{ik} \tilde{S}_{kj}) + (\tilde{\Omega}_{ik} \tilde{\Omega}_{kj}) - \frac{1}{3} \delta_{ij} (\tilde{S}_{mn} \tilde{S}_{mn} - (\tilde{\Omega}_{mn} \tilde{\Omega}_{mn}))$ ，其中 $\tilde{\Omega}_{ij}$ 为旋转速率张量。

$$k_{sgs} = \frac{(v_{sgs} \Delta)^2}{C_k} \quad (9)$$

式中： k_{sgs} 为亚网格尺度的湍流动能； C_k 是模型系数， $C_k = 0.29$ 。

在 FireFOAM 中，燃烧是由经典的燃烧方程和涡流耗散模型 (EDC) 来描述的，在 EDC 中，燃料的化学反应速率 $\overline{\omega_F''}$ 可以表示为

$$\overline{\omega_F''} = C_{EDC} \frac{\rho}{\tau_{EDC}} \min[\tilde{Y}, (\tilde{Y}_{O_2}/r_s)] \quad (10)$$

式中： C_{EDC} 为模型参数， $C_{EDC} = 4$ ； τ_{EDC} 为燃料-空气混合时间尺度； $\bar{\rho}$ 为 LES 滤波后的密度； \tilde{Y}_F 、 \tilde{Y}_{O_2} 分别为燃料、氧气的质量分数； r_s 为氧气和燃料的化学计量比。

在层流区域，时间尺度如下式所示

$$\tau_{EDC} = C_{diff} (\Delta^2 / D_{th}) \quad (11)$$

式中： C_{diff} 是模型系数为 0.5； D_{th} 是热扩散率。

在湍流区域，湍流混合时间尺度为

$$\tau_{sgs} = \frac{C_\omega \Delta^2}{V_{sgs}} = \frac{(\tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}}{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}} \quad (12)$$

综合上述两式，整个流体区域的反应时间尺度应为

$$\tau_{EDC} = \min[\tau_{sgs}, C_{diff} (\Delta^2 / D_{th})] \quad (13)$$

2 几何模型及网格划分

2.1 网格划分

如图 1 所示，本文的模拟工作是在一个 $0.4 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 的矩形区域中开展的。固体可燃物的尺寸大小为 $300 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ，固体表面贴附于气体计算网格的边界处。 θ 角为固体可燃物与水平方向的倾角，正角度代表向上倾斜。点火区域为瓦楞纸板前端 2 cm 处 (红色区域)，点火源被施加了 30 kW/m^2 的辐射热通量，直到出现明显火焰后，撤去点火源。待瓦楞纸板上的火焰稳定蔓延后，重新计时为第零秒时刻。模拟工况共分为四种，固

体倾斜角度在 0° 到 30° 的范围内以 10° 为间隔，共四个角度。

Ren 等人发现^[11]，壁面上的第一个网格大小需要小于等于 3 mm 才能获得较为准确的传热值，在本模拟中，整个流体计算区域模型的网格被设置为： $\Delta y = 3 \text{ mm}$ ， $\Delta x = 5 \text{ mm}$ ， $\Delta z = 5 \text{ mm}$ 。固体区域在厚度方向的网格需要小于材料扩散率的平方根^[12]，即 $\Delta y_{solid} = 0.25 \text{ mm}$ 。

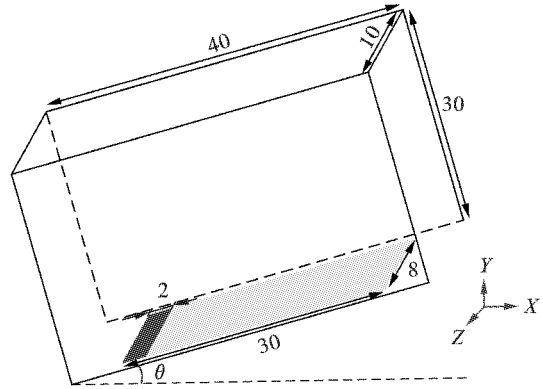


图 1 计算区域划分 (单位:m)

Fig. 1 The computational domain for case (unit:m)

2.2 物性参数及边界条件

固体区域由单一组分——可热解的原材料填充组成，忽略了实际情况下原材料中所含水分。固体表面被认为是无滑移边界，内部压力不会受到外界影响。在固体中的传热方式只有热传导，不考虑固体内部辐射带来的热量变化，物质的热物性参数如表 1 所示^[13]。

表 1 材料物性参数

Table 1 Material properties of the sample in cases

物性参数	单壁瓦楞纸板
$k_v / (\text{W/m} \cdot \text{K})$	0.134
$k_c / (\text{W/m} \cdot \text{K})$	0.397
$\rho_v / (\text{kg/m}^3)$	114.7
$\rho_c / (\text{kg/m}^3)$	11.5
ε_v	0.17
ε_c	0.85
$C_v / (\text{J/kg} \cdot \text{K})$	695.6
$C_c / (\text{J/kg} \cdot \text{K})$	611.3
$A / (\text{s}^{-1})$	7.83×10^{10}
$E_a / (\text{J/mol})$	1.27×10^5
$H_p / (\text{J/kg})$	-1.41×10^6

单壁瓦楞纸 (Virgin) 的完全燃烧热^[14] $\Delta H_v = 16.6 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ，炭化生成物 (Char) 的完全燃烧热 $\Delta H_c = 32.8 \times 10^6 \text{ J/kg}$ ，热解产物的燃烧热通过以下公式计算

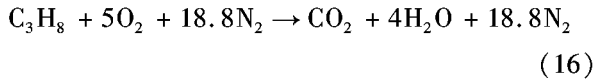
$$\rho_{pyrol} \cdot \Delta H_{pyrol} = \rho_v \cdot \Delta H_v - \rho_c \cdot \Delta H_c \quad (14)$$

热解生成的可燃气在流体区域被替换为具有等效热释放速率的丙烷气体

$$\dot{m}_{propane}'' = \dot{m}_{pyrot}'' / \Delta H_{prlpane} \quad (15)$$

式中： $\dot{m}_{propane}''$ 为替换后的丙烷质量流率； \dot{m}_{pyrot}'' 为热解产物的质量通量； $\Delta H_{prlpane}$ 为丙烷的燃烧热 $46.45 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 。

流体区域的丙烷被视作完全燃烧，燃烧产物由水和二氧化碳组成，不存在一氧化碳等产物，燃烧反应方程式如下



流体区域的初始气压为 10132 Pa ，与标准大气压强一致，初始温度为 25°C 。流体中的初始空气由质量分数为 0.23301 的氧气和质量分数为 0.76699 的氮气组成。流体区域的六个面边界条件设置为开放边界，在边界处考虑速度和物质的流出，同时也会有夹带气流的流入。

3 结果分析与讨论

3.1 火焰的几何形态特征

火焰形态是火蔓延过程中一个重要的参数，它与热释放速率，辐射特性和火焰传播特性密切相关。定义一个无量纲时间 t' ，表达式如式(17)所示

$$t' = \frac{t}{t_i} \quad (17)$$

式中： t_i 表示火蔓延过程总时间； t 为当前时刻。不同倾斜角度 θ 的火蔓延过程总时间分别为： 100 s 、 68 s 、 20 s 和 9 s 。图 2 给出了不同工况下的火蔓延时刻典型的火焰形态图片。

从图 2 可以明显看出，倾斜角度为 0° 和 10° 的火蔓延过程较为缓慢，发展比较平稳，火焰形态规则，接近于准稳态火蔓延。倾斜角度为 20° 和 30° 时的火蔓延速度较快，火焰形态较为紊乱。四种不同倾斜角度下的火焰面积也出现了差异，在倾斜角度为 0° 和 10° 时，平均火焰面积在蔓延过程中未出现较大改变，而在倾角为 20° 及以上时，平均火焰面积随时间变化增大。

通过对比不同倾角下火焰的几何形态，可以构建出一个顺流火蔓延物理模型，如图 3 所示。模型中一个分为三个区域，分别为炭化燃尽区 (x_b)，热解区 (x_p)，未燃区 (x_{pr})。固体表面产生的火焰与材料表面之间的倾斜夹角被定义为火焰倾斜角度 α ，固体与水平面之间的夹角被定义为 θ 。

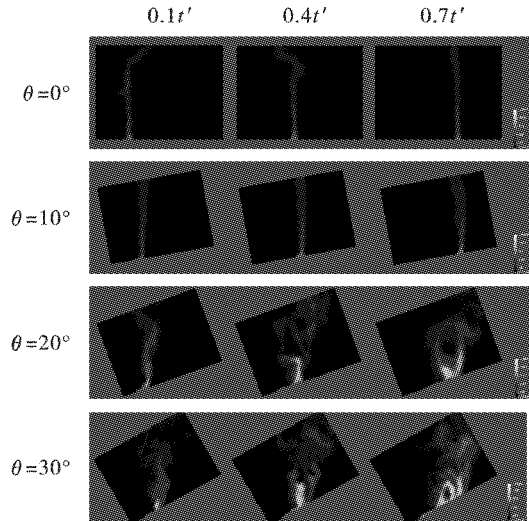


图 2 不同倾角下固体火蔓延时序图

Fig. 2 The flame spread over solid depend on time under inclination angles

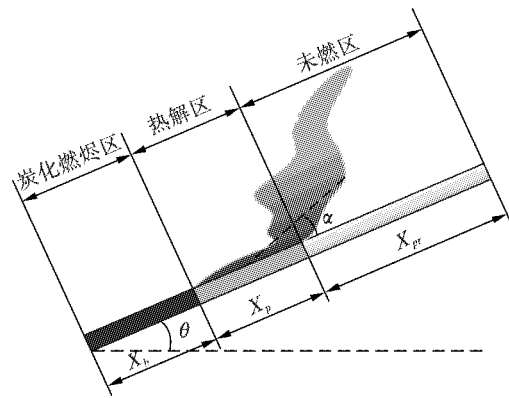


图 3 倾斜角度下顺流火焰物理模型

Fig. 3 Upward flame spread model over inclined solid surface

3.2 火蔓延速度

图 4 是在两个典型倾斜角度下，与小尺寸典型可炭化固体表面火蔓延实验的热解前锋位置无量纲比较^[15]。实验中样品尺寸为 300 mm (长) $\times 1 \text{ mm}$ (厚) $\times 8 \text{ mm}$ (宽)，与本文模拟中使用的样品尺寸近似，同为热薄材料。从图中可以明显看出，数值模拟与实验在水平情况下的火蔓延无量纲速度吻合度较高，模拟和实验的无量纲热解前锋位置都随时间线性变化，火蔓延速度相对稳定，呈准稳态蔓延。在 20° 倾斜角度下，数值模拟的结果与实验出现了一定的差异性，但总体规律保持了高度的相似，热解前锋位置随时间呈指数变化，模拟和实验在火蔓延过程中都未达到稳态，火蔓延速度随时间时刻变化。初步分析模拟与实验在相同无量纲时间上位置产生误差的原因是由于数值模拟中的固体厚度更小，固体内部的传热小于实验，导致蔓延速度大于实验。由

于固体表面火蔓延行为是气相传热和固相传质的相耦合共同形成的宏观现象,模拟和实验的蔓延行为在规律上的一致性证明了数值模拟的可靠性。

图5为是在不同放置角度下热解前锋位置随时间的变化曲线图。从图中可以明显看出,在角度为0°和10°时,火蔓延趋势较为稳定,与时间保持线性

关系,并未随时间发展出现较为明显的加速度。在角度为20°和30°时,热解前锋位置与时间不再保持线性关系,随着时间的增大而增大,并且增大趋势越来越快,火蔓延速度越来越快。这与之前倾斜角度下顺流火蔓延实验[3]保持了一致性,在大于20°倾角时,热解前锋与时间呈指数函数关系。

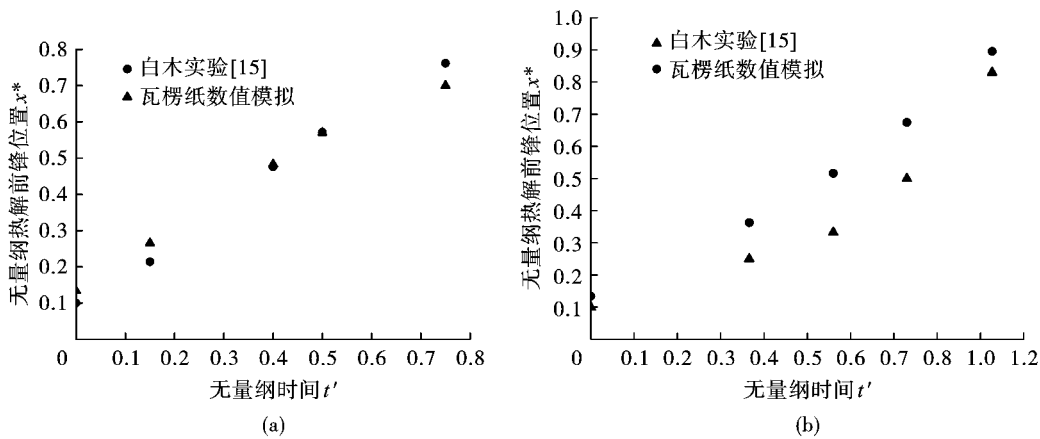


图4 不同倾角下实验与模拟结果对比(a:0°;b:20°)

Fig. 4 The result construct of simulation and experiment under inclination angles(a:0°;b:20°)

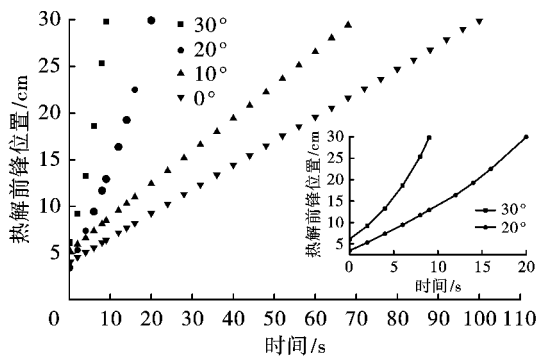


图5 不同倾角下热解前锋随时间变化曲线图

Fig. 5 Pyrolysis front position depend on time under inclination angles

图6为不同放置角度下,热解前锋蔓延随时间变化的瞬时速度图。对比不同倾角下的热解前锋蔓延速度图可以发现,0°和10°的热解前锋蔓延速度在一个非常小的速度区间内振荡,并未发现明显的加速或减速。20°和30°的热解前锋蔓延速度随着时间的发展,蔓延速度会出现一个较大的增长,后一个时刻的蔓延速度总是大于前一个时刻。通过模拟可以推断,固体火蔓延的稳定蔓延区为0°和10°,加速蔓延区为20°以上的倾斜角度。在大于20°的加速蔓延区中,角度越大,蔓延速度越快,蔓延的加速度也越大。

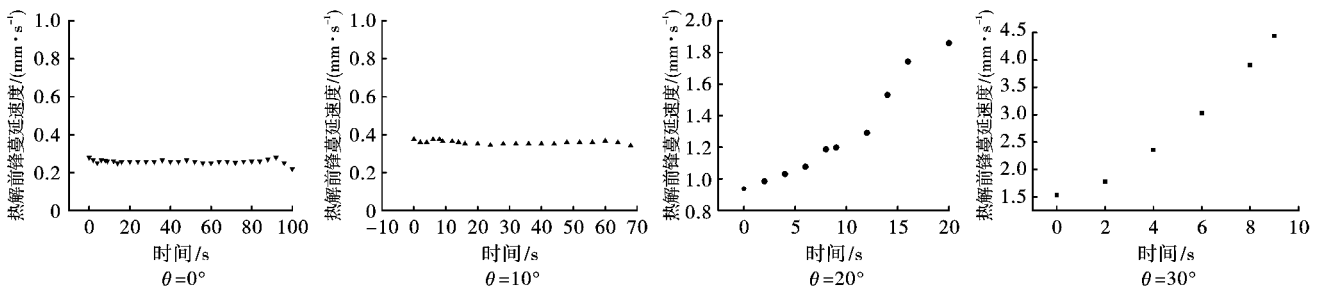


图6 不同倾角下瞬时火蔓延速度

Fig. 6 The instantaneous velocity of flame spread under inclination angles

3.3 质量损失速率

固体表面火蔓延本质上是气体区域和固体区域之间传热传质的一个过程。固体表面的燃烧是由于接受到气体区域给出的热量,并做出相应传质的反

馈。当固体表面火蔓延速度比较稳定时,质量损失也会呈现出稳定的趋势,当固体表面的燃烧速度较快时,固体的质量损失也会随之增加。图7为不同倾斜角度下样品的瞬时质量损失速率。

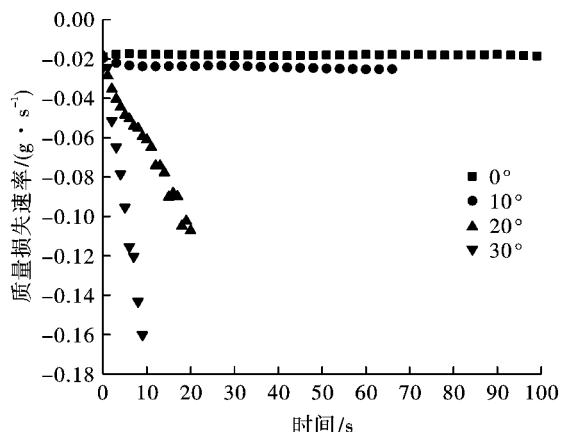


图7 不同倾角下质量损失速率

Fig. 7 Mass loss rate under inclination angles

从图7中可以看出,质量损失速率曲线有两种形态:一种较为平缓,总体变化较小;另一种则变化较大,随着时间发展,质量损失速率越来越大。如果在表面火蔓延过程中忽略固体在厚度方向的密度梯度变化,可以近似的认为固体区域的质量损失速率与热解区的长度的关系一致。当质量损失速率较为平缓时,热解区域长度也基本稳定,火蔓延速度较为稳定;当质量损失速率增长时,热解区域长度会相应增大,火蔓延速度发生加速^[16]。

4 加速及突变机理分析

4.1 火蔓延速度突变分析

造成火蔓延现象的发生是已燃区向未燃区不断推移的结果,未燃区的不同特性造成了火蔓延速度的不同。图8为不同放置角度下火蔓延平均速度,在0°和10°倾斜角度放置下,火蔓延速度随着倾斜角度的增大略有增加,但增长速度较为缓慢。当固体倾斜角度到达20°时,火蔓延速度急剧增大。从火焰形态上分析,如图中所示,不同倾斜角度下火焰与固体表面夹角差异性较大。在0°和10°倾斜角度下,火焰倾角的变化不大,接近于90°。但在20°的倾斜角度下,火焰倾角发生了较大的改变,这导致火焰锋面更贴近于固体表面,由火焰传递给未燃区域的热通量发生了较大的提升。火焰倾角的变化是由于附壁效应造成的,在较大倾角下,火羽流两侧出现了卷吸能力的非一致性。靠近固体表面的一侧火羽流在卷吸大量空气到上空后,得不到及时的空气补充,而远离固体表面的另一侧火羽流处于自由卷吸,不受影响。两侧不同的卷吸能力造成了一定的压力差,大气压会将火羽流推到更靠近固体表面的地方,形成火焰倾角^[17]。模拟实验中的固体较薄,若忽略固体内部的热传导,来自气体区域的火焰对流和辐

射换热起主要热传递作用。而火焰倾角 α 则可以间接表征对流换热和辐射传热的大小,倾角越小,对流换热区域越大,辐射热通量也随之变大,火焰对未燃区的热量贡献更大。

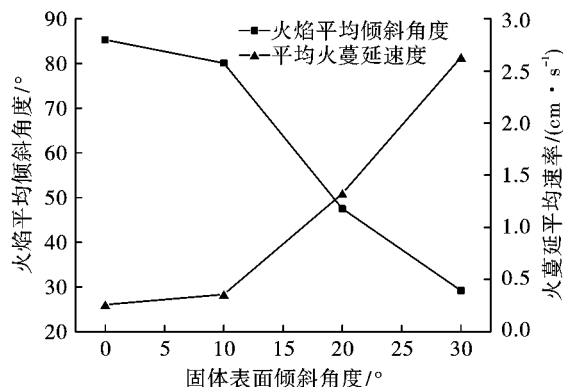
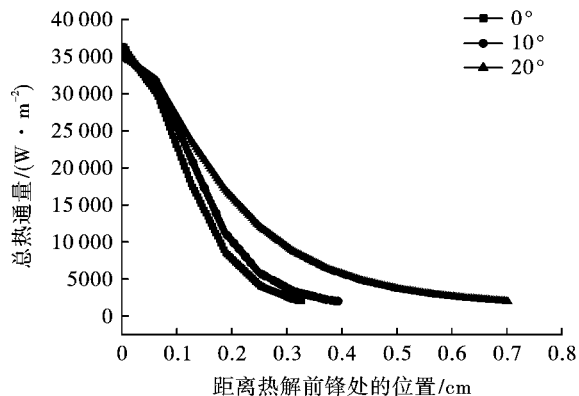


图8 不同倾角下火焰平均倾斜角度和火蔓延平均速率变化规律

Fig. 8 The mean flame inclined angles and velocity of flame spread at inclination angles

图9为不同角度下,0.5t'时刻前锋到未燃区的总热通量随位置的分布曲线。通过分析可知,随着倾斜角度的增加,火焰倾角的减小,未燃区所接受的热量也呈现出增加的趋势。在倾斜角度为0°和10°时,由于倾角的改变较小,未燃区接受到的总热通量变化不大。在倾斜角度为20°时,由于倾斜角度的较大改变,热通量相较于之前也发生了急剧的提升。未燃区域接受到的热通量越大,升温趋势越快,达到热解温度的时间则越短,已燃区向未燃区的推进越快。数值模拟中,未燃区所接受的热通量在热解前锋以前较近区域迅速下降,较远区域缓慢下降,这与小尺寸固体火蔓延实验中的未燃区热通量分布保持了一致性^[18]。

图9 未燃区接收到的总热通量分布规律
Fig. 9 Distribution of total heat flux in unburnt zone at inclination angles

4.2 加速机理分析

在放置角度为 0° 或 10° 时, 火蔓延速度基本保持不变, 在固体倾斜角度达到 20° 时, 发生了加速蔓延的现象。造成这种现象的根本原因是不同倾角下, 随着时间的变化, 火焰和未燃区域之间的热量传递发生了相应变化, 从而导致火蔓延速度的变化。从 Quintiere 提出的火蔓延速度的基本公式开始分析^[19]

$$v_p = \frac{\int_{x_p}^{x_{pr}} \dot{q}_f''(x) dx}{\rho c_p d (T_{ig} - T_s)} = \frac{1}{\rho c_p d} \cdot \frac{\int_{x_p}^{x_{pr}} \dot{q}_f''(x) dx}{T_{ig} - T_s} \quad (18)$$

式中: ρ 为材料密度; c_p 为材料比热容; d 为材料厚度; T_{ig} 为材料的着火温度; T_s 为未燃区域的温度, 这些参数是物质的材料特性, 在火蔓延中不会发生改变; x_p 为热解前锋所在位置; x_{pr} 为未燃区长度; $\dot{q}_f''(x)$ 是入射的火焰对流和辐射热通量的总和。从公式中可以得出, 火蔓延速度与两个变量相关, 分别是热解前锋以外的未燃区域接收到的总热通量 $\int_{x_p}^{\infty} \dot{q}_f''(x) dx$ 和当前时刻下未燃区的温度分布与点燃温度之间的差值 $T_{ig} - T_s$ 。

从上文的热量分布曲线图可以看出, 热解前锋前一点到未燃区域的热通量分布呈指数衰减, 这里定义大于 5 kW/m² 的为有效热通量, 低于 5 kW/m² 的热通量对未燃区域产生的影响较小, 可以被忽略。图 10 为固体倾斜角度 30° 时不同时刻热解前锋处到未燃区域的热通量分布曲线, 从图中可以明显看出, 随着时间的变化, 热解前锋后每一点的热通量都处于增加趋势, 且有效热通量能够影响的范围更远。这表明在火焰加速蔓延的状态下, 出现了火焰与固体区域热传递的“正反馈”^[20]。当出现较小火焰倾角时, 火焰对固体的热量贡献增大, 固体吸收较大的热量后, 质量损失速率加大, 热解产物增多, 造成产生的火焰热释放速率更大。热释放速率更大的火焰反馈给固体的热量会进一步增大, 热解产物的生产速率加速, 使得火蔓延速度更快。

图 11 为从热解前锋处到未燃区域的温度分布曲线, 从图中可以看出随时间变化, 未燃区的温度逐步上升, 距离着火温度越来越近, $T_{ig} - T_s$ 不断被缩小。

定义特征比值 $\phi = \frac{\int_{x_p}^{x_{pr}} \dot{q}_f''(x) dx}{T_{ig} - T_s}$, x_{pr} 取特征长度

$L_{pr} = x_p + 1, T_{ig}$ 根据典型可炭化材料着火温度取 600 K, 在特征长度内 $T_{ig} - T_s$ 取平均值, 通过判断未燃区域在不同时刻接收热量和温度之间的比值变化可以直观得出火蔓延速度的变化趋势。固体表面火蔓延公式可以写为

$$v_p = C \cdot \phi \quad (19)$$

式(19)中 C 为大于零的常数, 若 $\frac{d\phi}{dt} = 0$, 则

$\frac{dv_p}{dt} = 0$, 火蔓延速度保持不变。若 $\frac{d\phi}{dt} > 0$, 则 $\frac{dv_p}{dt} > 0$, 火蔓延速度发生加速。

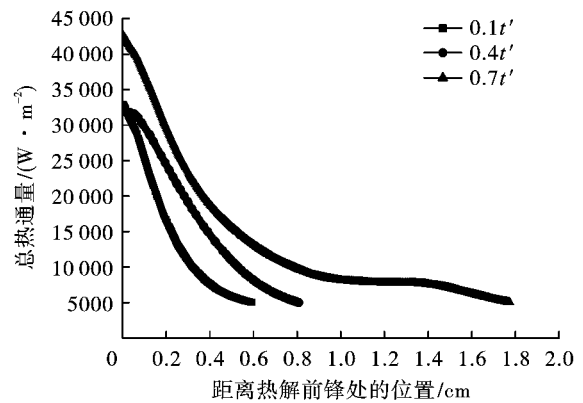


图 10 倾斜角度为 30° 未燃区接收到的总热通量随时间变化规律

Fig. 10 Distribution of total heat flux in unburnt zone under inclination angle $\theta = 30^\circ$

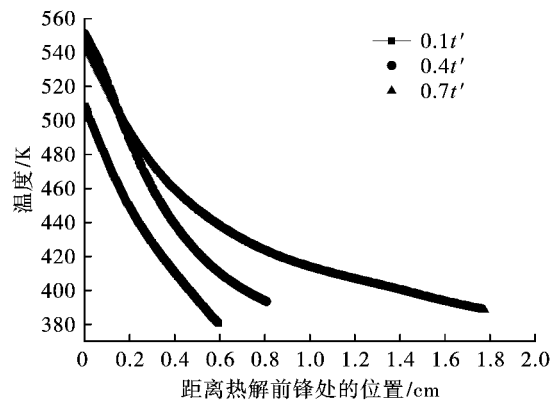


图 11 倾斜角度为 30° 未燃区的温度随时间变化规律

Fig. 11 Distribution of temperature in unburnt zone under inclination $\theta = 30^\circ$

图 12 为不同倾斜角度为特征长度 L_{pr} 内特征比值 ϕ 随无量纲时间变化的曲线图, 可以明显看出, 在倾斜角度为 0° 和 10° 时, ϕ 基本不随时间变化, 也就是 $\frac{d\phi}{dt} \approx 0$, 这代表火蔓延速度也基本趋向于平稳。

而倾斜角度为 20° 和 30° 时, ϕ 随时间逐渐变大, 且直线斜率越来越大, 说明火蔓延速度加速。由上述分析可知, 火蔓延速度由未燃区的温度分布和接收到的热量分布所控制。若未燃区的热通量随时间变化较小且温度保持一致, 则火蔓延速度基本不发生变化。若由于固体放置倾角而带来的“正反馈”导致未燃区的热通量随时间增大, 温度逐渐接近于点火温度, 则火蔓延速度会发生加速突变。

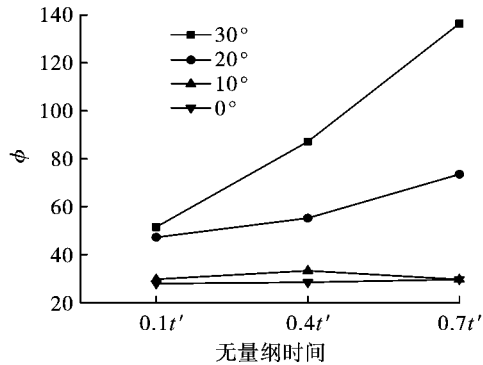


图 12 不同倾角下特征比值随时间变化规律

Fig. 12 The characteristics ratio depend on time in unburnt zone under inclination angles

5 结论

利用 OpenFOAM 为平台开发出的瞬态湍流火焰 FireFOAM 求解器研究了不同倾斜角度下固体表面顺流火蔓延的行为和特性变化, 得出以下结论:

在固体火蔓延模拟中所得到的火蔓延速度, 质量损失速率及热量分布等结果与先前学者所做实验和模拟在规律上保持了较好的一致性^[21], 验证了 FireFOAM 在固体火蔓延中模拟的可靠性。

随着倾斜角度的增加, 气态火焰与固体表面之间的倾角会逐渐减小, 在倾斜角度为 20° 时, 由于附壁效应火焰倾角会发生较大改变, 进而造成能量传递的差异, 火蔓延速度发生突变。

在固体表面倾斜角度到达 20° 以上时, 由于气态火焰与未燃区域之间的“正反馈”作用, 火蔓延速度会发生加速。通过判断未燃区热量分布和温度之间的特征比值的变化趋势, 加速现象发生的根源在于热量传递与热解时间的变化。

参考文献 (References)

[1] MARKSTEIN G H, RIS J D. Upward fire spread over textiles[J]. Symposium on Combustion, 1973, 14(1): 1085-

- 1097.
- [2] MORANDINI F, SANTONI P A, BALBI J H. The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope[J]. Fire Safety Journal, 2001, 36(6): 519-543.
- [3] ZHANG Y, JI J, WANG Q, et al. Prediction of the critical condition for flame acceleration over wood surface with different sample orientations[J]. Combustion and Flame, 2012, 159(9): 2999-3002.
- [4] XIE W, DESJARDIN P E. An embedded upward flame spread model using 2D direct numerical simulations[J]. Combustion and Flame, 2009, 156(2): 522-530.
- [5] KAIYUAN Li, SIMO Hostikka. Embedded flame heat flux method for simulation of quasi-steady state vertical flame spread[J]. Fire Safety Journal, 2019, 104: 117-129.
- [6] DING Yan-ming, KAZUI Fukumoto, OFODIKE A Ezekoye, et al. Experimental and numerical simulation of multi-component combustion of typical charring material[J]. Combustion and Flame, 2020, 211: 417-429.
- [7] N Grange, K Chetehouna, N Gascoin, et al. One-dimensional pyrolysis of carbon based composite materials using FireFOAM[J]. Fire Safety Journal, 2018, 97: 66-75.
- [8] IVAN Sikic, SIAKA Dembele, JENNIFER Wen. Non-grey radiative heat transfer modelling in LES-CFD simulated methanol pool fires[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2019, 234: 78-89.
- [9] ZENG D, CHAOS M, KHAN M, et al. Radiation Characteristics of Corrugated Cardboard Flames[J]. Fire Safety Science, 2014, 11: 97-110.
- [10] KAZUI Fukumoto, WANG Chang-jian, JENNIFER Wen. Large eddy simulation of upward flame spread on PMMA walls with a fully coupled fluid solid approach[J]. Combustion and Flame, 2018, 190: 365-387.
- [11] REN N, WANG Y, VILFAYEAU S, et al. Large eddy simulation of turbulent vertical wall fires supplied with gaseous fuel through porous burners[J]. Combustion and Flame, 2016, 169: 194-208.
- [12] ZEINALI D, GUPTA A, MARAGKOS G, et al. Study of the importance of non-uniform mass density in numerical simulations of fire spread over MDF panels in a corner configuration[J]. Combustion and Flame, 2019, 200: 303-315.
- [13] CHAOS M, KHAN M M, KRISHNAMOORTHY N, et al. Evaluation of optimization schemes and determination of solid fuel properties for CFD fire models using bench-scale pyrolysis tests[J]. Proceedings of the Combustion

- Institute,2011,33(2):2599-2606.
- [14] NING Ren, JAAP de Vries, ZHOU Xiang-yang, et al. Large-scale fire suppression modeling of corrugated cardboard boxes on wood pallets in rack-storage configurations[J]. Fire Safety Journal,2017,91:695-704.
- [15] ZHANG Y, CHEN X, SONG Y, et al. The deceleration mechanism and the critical extinction angle of downward flame spread over inclined cellulosic solids[J]. Applied Thermal Engineering,2017,124:185-190.
- [16] 高云骥. 典型薄织物材料表面顺流火蔓延及突变行为研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
- [16] GAO Yun-yi. Concurrent flame spreading and mutation behaviors over typical thin fabric fuel surfaces [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese)
- [17] 吕云欢. 坡度条件下火焰附壁的实验模拟研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2019.
- [17] LU Yun-huan. Experimental simulation study on flame attachment under slope condition [D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2019(in Chinese)
- [18] ZHANG Y, SUN J H, HUANG X J, et al. Heat transfer mechanisms in horizontal flame spread over wood and extruded polystyrene surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2013,61:28-34.
- [19] QUINTIERE J G. The effects of angular orientation on flame spread over thin materials[J]. Fire Safety Journal, 2001,36(3):291-312.
- [20] 张英. 典型可炭化固体材料表面火蔓延特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2012.
- [20] ZHANG Ying. Flame spread behavior characteristics over typical charring solid surfaces [D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2012. (in Chinese)
- [21] 张毅,杨满江,唐凯旋,等. 狭长受限空间火灾突变行为倾角效应的数值模拟[J]. 爆破,2017,34(3):20-24.
- [21] ZHANG yi, YANG Man-jiang, TANG Kai-xuan, et al. Numerical simulation of inclination effect on sudden-change of fire behaviors in long-narrow confined space [J]. Blasting,2017,34(3):20-24. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

科技论文写作小知识——影响因子

影响因子 (Impact Factor, IF) 是汤森路透 (Thomson Reuters) 出品的期刊引证报告 (Journal Citation Reports, JCR) 中的一项数据。即某期刊前两年发表的论文在该报告年份 (JCR year) 中被引用总次数除以该期刊在这两年内发表的论文总数。这是一个国际上通行的期刊评价指标。

影响因子现已成为国际上通用的期刊评价指标,它不仅是一种测度期刊有用性和显示度的指标,而且也是测度期刊的学术水平,乃至论文质量的重要指标。影响因子是一个相对统计量。

影响因子在发展的过程中形成了两个指标:复合影响因子和综合影响因子。

复合影响因子是以期刊综合统计源文献、博硕士学位论文统计源文献、会议论文统计源文献为复合统计源文献计算。

综合影响因子主要是指文、理科综合,是以科技类期刊及人文社会科学类期刊综合统计源文献计算。

这两者都是按被评价期刊前两年发表的可被引文献在统计年的被引用总次数与该期刊在前两年内发表的可被引文献总量之比。