

## 阴燃临界供氧特性的研究进展与综述

秦蕴竹<sup>1</sup>, 林少润<sup>2</sup>, 陈玉莹<sup>1</sup>, 张轶超<sup>1</sup>, 黄鑫炎<sup>1</sup>

(1. 香港理工大学智慧消防与城市韧性研究中心, 香港 999077;  
2. 加州大学伯克利分校机械工程系, 伯克利 94720, 美国)

**摘要:** 阴燃是一种低温、缓慢、无焰的燃烧现象。阴燃既能引起地球上规模最大、持续时间最长的森林火灾, 也有望成为一种清洁、安全且低成本的固废处理新技术。然而, 当前学界对维持阴燃的临界供氧极限仍缺乏深入理解。该文章综述了文献中探索阴燃临界供氧极限的实验和数值模拟方法, 并从临界供氧浓度和临界供氧速率的角度, 探讨了不同燃料和供氧模式下的临界供氧特性及其影响因素, 以期对未来系统性研究及认识近极限条件下阴燃的临界供氧特性提供参考。

**关键词:** 固体燃烧; 异相反应; 火灾动力学; 固废处理

**中图分类号:** TK11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8740(2025)02-0174-14

## A Review of Critical Oxygen Supply Characteristics of Smoldering Combustion

Qin Yunzhu<sup>1</sup>, Lin Shaorun<sup>2</sup>, Chen Yuying<sup>1</sup>, Zhang Yichao<sup>1</sup>, Huang Xinyan<sup>1</sup>

(1. Research Centre for Smart Urban Resilience and Firefighting, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China; 2. Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, Berkeley 94720, USA)

**Abstract:** Smoldering is a slow, low-temperature, and flameless combustion phenomenon. Smoldering combustion can not only cause one of the largest and most persistent wildfires on Earth but also potentially serve as a clean, safe, and low-cost technology for solid waste treatment. However, our current understanding of its critical oxygen supply limits remains insufficient. This paper reviews the experimental and numerical simulation methods related to the critical oxygen supply limits of smoldering. It further discusses the characteristics and influencing factors of critical oxygen supply under different fuels and oxygen supply modes, from the perspectives of critical oxygen concentration and critical oxygen supply rate. This review aims to provide a reference for future systematic research and understanding of the critical oxygen supply characteristics of smoldering combustion under near-limit conditions.

**Keywords:** solid fuel combustion; heterogeneous reaction; fire dynamics; solid waste removal

在气候变化的背景下, 频发于全球的森林火灾对气候、生态系统和人类健康构成了重大威胁。明火和阴燃是森林火灾中的两种主要燃烧形式。其中, 明

火的火焰温度更高且易于观测, 因而文献中已有大量研究聚焦于发生于地表、树冠的明火。而对阴燃关注相对较少。阴燃作为地球上持续时间最长, 尺度最大

收稿日期: 2024-08-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52322610).

作者简介: 秦蕴竹(1999—), 男, 博士研究生, yunzhu.qin@connect.polyu.hk

通信作者: 黄鑫炎, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, xy.huang@polyu.edu.hk.

的燃烧现象,可以在地表和地下持续燃烧数月甚至数年,持续造成严重的碳损失和碳排放,并在温度、环境风等条件满足时蔓延至地表,甚至转化为新的明火. 阴燃可以在极端的环境条件下维持,例如在高含水率(干质量比 $>100\%$ )和极低的氧浓度(有部分实验检测到其临界氧体积分数 $<10\%$ )下稳定燃烧. 相比而言,维持明火通常需要 $14\% \sim 16\%$ 的氧气体积分数,而高效的阻燃材料需要高于大气氧体积分数(21%)的环境中才能维持燃烧<sup>[1]</sup>;然而,即使氧气体积分数较高,没有充足的气流,火焰也难以维持,如在微重力环境下<sup>[2-3]</sup>. 持续的阴燃火灾造成了严重的生态破坏,例如东南亚地区自1991年以来就深受阴燃林火的困扰,以1997、2006、2013及2015年最为严重<sup>[4]</sup>. 仅1997年厄尔尼诺事件期间,印度尼西亚的特大泥炭火就引发了特大跨国雾霾事件并持续超过了半年,在人口密集地区形成了严重的空气污染,对公共健康造成了恶劣影响<sup>[5]</sup>. 此外,阴燃泥炭火还频发于西伯利亚、北美洲等北方-寒带地区. 近年来,大量遥感监测<sup>[6]</sup>和实验证据<sup>[7-8]</sup>证明了“越冬火”的存在:即寒冷地区的阴燃火灾会在温度降低时在地底蛰伏,待次年气温升高、燃料干燥时重新蔓延至地表,甚至引发地表明火. 即使在地底蔓延过程中,阴燃火灾也在持续向大气中排放出大量 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 等温室气体,加剧北极地区的气候变化和“微温室效应”,进而导致冰川、永久冻土融化等全球问题<sup>[9-10]</sup>. 尽管地球尺度的阴燃火灾已经引起了学界的注意,但当前对其的理解还不深刻. 对于阴燃地下火的自然供氧,氧气从燃料表面向深层扩散,导致实际供氧量与燃料深度呈负相关<sup>[11]</sup>. 然而,即使大尺度的实验已经表明地下阴燃火可以在深度为1m的泥炭土层内维持数周<sup>[7]</sup>,尚未有研究探索供氧量随深度衰减对阴燃维持燃烧的极限深度的影响. 同时,由于目前对阴燃供氧极限的认识仍不全面,导致缺乏基于限制供氧的阴燃林火抑制方法的研究. 因此,深入理解阴燃临界供氧条件,对于理解阴燃林火特性和控制大规模自然灾害具有重要意义.

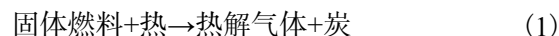
另一方面,深入理解阴燃临界供氧特性和影响机制有利于优化阴燃固废处理系统. 随着世界人口和经济的加速增长,城市固体废弃物也随之大量增加,包括厨余垃圾、木材废料和纸屑等. 传统固废处理手段主要包括垃圾填埋、生物转化(堆肥、厌氧消化、发酵等)、和热化学处理(热解、液化、气化、焚烧等)<sup>[12-13]</sup>. 例如,2020年澳大利亚接近50%的主要有机垃圾均通过简单的填埋处理<sup>[14]</sup>. 然而,这种方式会造成大量的温室气体(greenhouse gases, GHG)排放,

其中仅垃圾填埋产生的 $\text{CH}_4$ 就占人为总 $\text{CH}_4$ 排放的 $10\% \sim 15\%$ <sup>[15]</sup>. 同时,其他固废处理方式也常面临转化效率低、耗能高等难题. 相比之下,基于阴燃的固体废弃物处理技术则有诸多优势:①可自维持,无需类似热解过程持续注入氮气和大量热能<sup>[16]</sup>;②气( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ 等)、液(焦油等)、固相产物(生物炭等)均可作为清洁能源收集利用<sup>[13]</sup>;③反应温度相对较低( $\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ ),设备安全风险较小;④预处理步骤简单,仅需干燥、研磨等<sup>[16-17]</sup>. 当前,尽管阴燃固体废物处理技术的应用已经有大量理论、实验支持和广阔的发展空间,但如何提高其处理效率和优化能效仍是当前面临的问题. 供氧作为阴燃反应的主导机制,其可以有效地控制和改变阴燃反应的强度和效率<sup>[18]</sup>. 因此,深入理解阴燃临界供氧特性和影响机制有利于优化应用阴燃固废处理系统. 总之,无论是从大规模阴燃林火的控制角度还是高效清洁固废处理技术的进步,都需要更多深入的研究探索阴燃的临界供氧条件.

## 1 阴燃简介

### 1.1 化学反应机理

从燃烧形式的角度分类,火灾主要可以分为明火(flaming)和阴燃(smoldering)两种<sup>[19]</sup>. 阴燃是发生在可炭化多孔燃料中的一种低温、缓慢的燃烧现象,如泥炭、煤、木头、松针、聚氨酯泡沫的无焰燃烧. 阴燃主要以氧气与高温固体燃料表面发生的异相反应的形式维持. 与气相的明火相比,阴燃的反应不完全,其反应温度( $450 \sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ )、火蔓延速率(约 $1\text{ mm/min}$ )、热值( $6 \sim 15\text{ MJ/kg}$ )均低于明火<sup>[20]</sup>. 作为一种复杂的异相(heterogeneous)反应,阴燃过程包含了大量的化学反应和复杂的传热传质机制. 为了概括这些过程,阴燃常被简化为热解(pyrolysis)和炭氧化(char oxidation)两个步骤(见图1). 热解是发生阴燃反应的先决条件,该过程不需要氧气参与<sup>[20]</sup>,即



在此过程中,可炭化的固体燃料吸热分解,产生热解气体(主要为 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、水蒸气等<sup>[5]</sup>)、极细颗粒物(particulate matter)、以及含碳量较高的固体炭(char). 热解气体等物质的排出也进一步促成了炭的多孔结构. 燃料的热解温度受其性质的影响,热重分析显示,常见燃料(如木制品、泥炭等)的最低热解温度(热解反应开始发生的阈值温度)约为 $200\text{ }^\circ\text{C}$ ,而峰值热解温度(热解反应造成燃料最大质量损失速率的阈值温度)约 $320\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[21]</sup>. 在有氧条件下,热解的两种产物(热解气体和炭)可进一步发生氧化. 当热解气

体与氧气的均相 (Homogeneous) 反应主导放热反应时, 燃烧过程表现为明火, 即

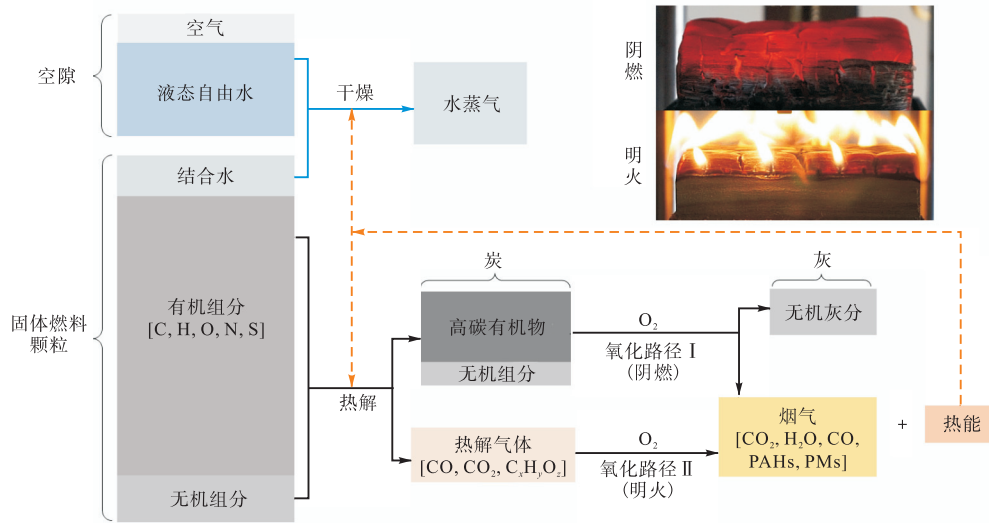
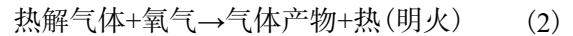
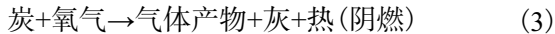


图 1 可炭化固体燃料发生明火和阴燃的化学路径示意与木材的阴燃、明火示例<sup>[20]</sup>

Fig.1 Reaction pathways of flaming and smoldering fires in charring fuels and examples of flaming, smoldering wooden samples<sup>[20]</sup>

明火的发生需满足热解气体和氧气的浓度条件及引发明火所需的足够的热量和温度<sup>[1]</sup>. 另一方面, 当固相的炭氧化主导了氧化过程, 燃烧过程则表现为阴燃:



炭发生氧化反应的特征温度较热解温度略高, 热重分析显示, 最低氧化温度 (氧化反应开始发生的阈值温度) 为 300 ~ 350 °C, 峰值氧化温度 (炭氧化造成燃料最大质量损失速率的阈值温度) 约为 440 °C<sup>[21]</sup>. 炭中含有的金属元素和矿物质会催化炭的氧化反应<sup>[22]</sup>, 而反应后这些无法被氧化的无机物和矿物质将会以灰分的形式成为燃烧固态残留物. 在整个阴燃过程中, 氧化反应放出的热量均用于平衡体系散热、燃料水分的蒸发、维持燃料温度与预热、以及维持吸热的热解反应.

### 1.2 阴燃的供氧形式

阴燃的供氧形式通常分为自然供氧 (图 2(a)) 和强制供氧两类 (图 2(b) ~ (d)). 在自然扩散供氧情形中, 空气 (氧气) 可以在自然对流 (natural/free convection) 和扩散 (diffusion) 的驱动下从外界环境输送到阴燃反应区. 例如对于忽略环境风时的地表阴燃火, 温度差异导致的浮力作用下的自然对流在供氧中起到了主导作用; 而当地下火蔓延至地下深层, 有限的氧气被消耗后形成的浓度梯度使氧气扩散成为了主导供氧形式<sup>[11]</sup>. 一维深层地下阴燃情形中, 则有

$$m''_{\text{ox}}(y) = -\bar{\nu}D \frac{\partial Y_{\text{O}_2}}{\partial y} \quad (\text{扩散供氧}) \quad (4)$$

式中:  $y$  为阴燃锋面与自由表面之间的距离;  $m''_{\text{ox}}(y)$  为不同深度下浓度梯度驱动的扩散供氧通量 ( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ );  $\bar{\nu}$  为多孔介质内部的平均孔隙率;  $D$  为多孔燃料中氧气的扩散系数, 受温度、多孔材料孔隙率等因素影响;  $\partial Y_{\text{O}_2} / \partial y$  为深度  $y$  处的氧气浓度梯度.

强制供氧包括气流流过 (图 2(b)) 或流向燃料表面 (图 2(c)) 的强制对流 (forced convection, 如环境风作用下的地表阴燃火灾), 或直接向多孔燃料内部通入空气 (如实验室阴燃实验或阴燃固体废弃物处理装置中通入的气流). 当外界气体被强制流向多孔燃料而不直接与一维阴燃反应锋面接触时 (图 2(c)), 深度  $y$  处的实际氧气通量  $m''_{\text{ox}}(y)$  可由达西定律估算:

$$m''_{\text{ox}}(y) = \frac{K\Delta p}{\mu y} \cdot Y_{\text{O}_2} \quad (\text{外部强制供氧}) \quad (5)$$

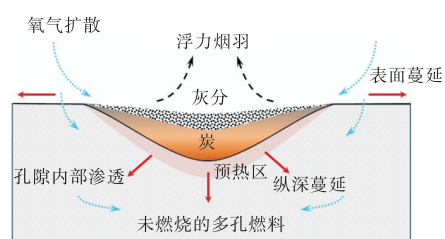
式中:  $K$  为多孔燃料的渗透性, 与材料孔隙率, 孔隙形状等性质有关;  $\mu$  为气体的动力学黏度, 与气体温度、浓度、成分等因素有关;  $Y_{\text{O}_2}$  为气体中氧气的质量分数,  $\Delta p$  为外部强制流速造成的深度为  $y$  处与燃料表面的压差.

而当含氧气体直接通入一维阴燃多孔燃料 (图 2(d)) 时, 阴燃反应得到的供氧量由气体流速直接控制, 即

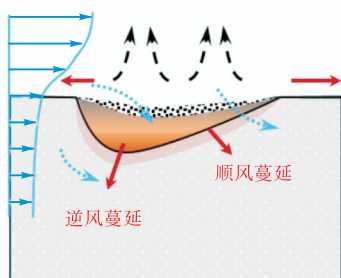
$$m''_{\text{ox}} = \psi \rho_g Y_{\text{O}_2} U \quad (\text{内部强制供氧}) \quad (6)$$

式中:  $m''_{\text{ox}}$  为孔隙内氧通量;  $\psi$  为多孔燃料孔隙率;  $\rho_g$  为通入气体密度;  $U$  为气体流速. 本文将基于以上基本的阴燃供氧模式, 总结当前不同尺度下阴燃临

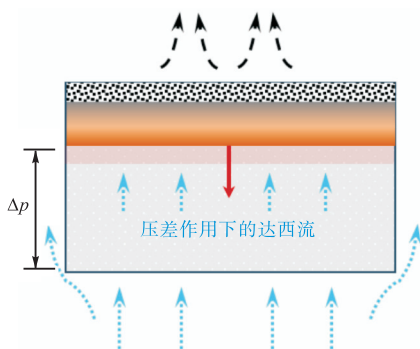
界供氧条件的实验研究及数值模拟。



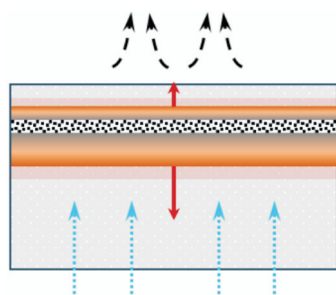
(a) 自然供氧



(b) 外部横向强制供氧



(c) 外部纵向强制供氧



(d) 内部强制供氧

图 2 不同供氧形式下的阴燃火蔓延

Fig.2 Two different oxygen supply scenarios of smoldering combustion

## 2 现有研究方法

### 2.1 实验研究

当前,实验研究是探索阴燃供氧特性的主要方

法,按照尺度可分为微尺度、小尺度和实验室大尺度实验。然而,当前仍未有研究通过实地燃烧实验探索阴燃临界供氧条件的影 响,原因是此类实验需要对供氧条件进行严格控制,而在场地燃烧实验中难以避免环境风的影响。因此,在可控条件下的微尺度和对燃料进行外部强制供氧的小尺度实验仍是当前阴燃临界供氧研究的主流。

微尺度实验主要包括基于热重分析 TGA (thermogravimetric analysis)、电子共振自旋 ESR (Electron spin resonance) 及与傅里叶红外光谱 FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) 联用来探索热解、阴燃动力学机理。TGA 是研究燃烧和火灾热解化学的主要方式<sup>[23]</sup>,实验时需要将 mg 级样品放置在预先控制好的氧气浓度环境下,并提供可控的环境升温曲线(图 3(a)),以此得到燃料在不同温度下的质量损失速率,并联用 FTIR 分析气体排放<sup>[24-25]</sup>。TGA 分析中通常比较含氧与惰性气体环境下的反应质量损失曲线,来推测不同氧气浓度下的氧化反应速率,进而判断有无阴燃反应发生<sup>[26]</sup>。而 ESR 方法则用于分子尺度过程的分析,通过自旋谱图面积间接测量特定氧气环境下燃料的自由基浓度,以推测燃烧反应发生的可能性<sup>[27]</sup>。

阴燃小尺度研究方法已在前文系统阐述<sup>[23,28]</sup>,然而有关阴燃临界供氧特性的小尺度实验研究通常需要在原有实验基础上引入可控制流速、浓度的供氧系统。外部强制供氧实验通常直接将预先控制好的气体直接通向燃料表面(图 3(b))<sup>[29]</sup>,或利用基于 FPA (fire propagation apparatus) 的火灾标准测试方法来提供外部强制对流供氧和控制辐射点火功率(图 3(c))<sup>[30]</sup>。然而这种方法较难确定实际作用于多孔燃料内部阴燃锋面上的氧气量,也无法隔绝开放式容器表面氧气自然扩散的影响。因此小尺度实验也常使用内部强制供氧的方法,直接通过流量计测定通入阴燃系统的总供氧量(图 3(d))<sup>[31]</sup>。

在小尺度实验中,不同浓度的氧气气流通常由纯净空气和氮气/氩气混合得到。为了保证混合气体在管状容器中流动的均匀性,通常需要在入口或通入容器前设置由金属网、玻璃球、或砂石等组成的气体均匀层。对于近极限阴燃临界实验,点火条件的精准控制也对探索临界供氧条件非常重要。小尺度实验中常见的点火方式包括辐射点火<sup>[30]</sup>,可变功率线圈点火<sup>[26]</sup>,加热棒点火<sup>[32]</sup>等。不同点火方式通常均可通过控制外加辐射强度(辐射热通量)或点火器金属的导热温度来实现不同阴燃点火强度。除直接观察燃烧现象外,热电偶和红外相机也常用来探测温度,间接

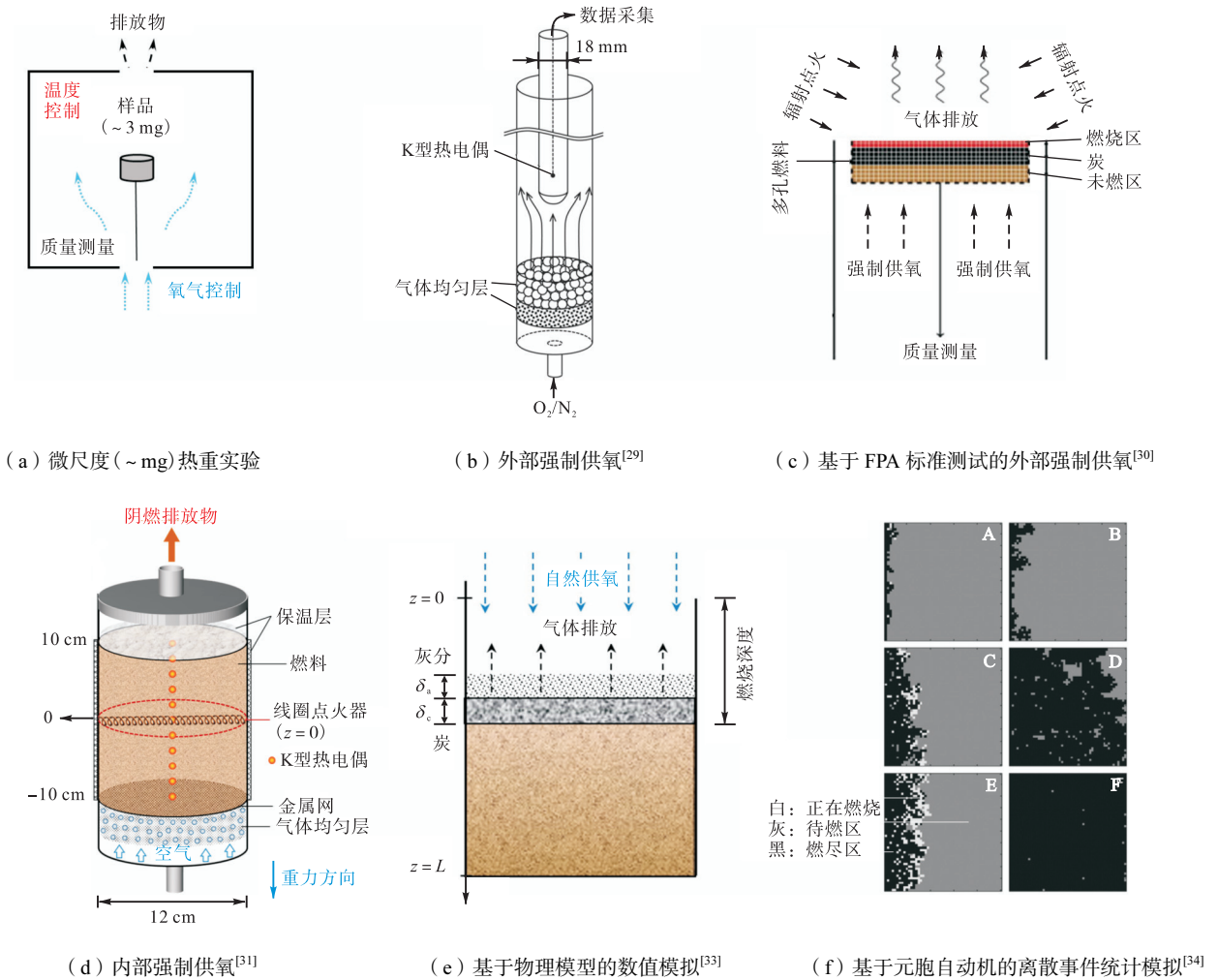


图3 现有代表性的阴燃临界供氧相关研究

Fig.3 Current representative experimental and computational studies on smoldering oxygen supply limits

推断当前供氧条件下是否足够维持阴燃。

由于阴燃难以监测和熄灭的特性,文献中的大尺度阴燃实验研究非常少。当前最大尺度的研究为开展于印度尼西亚的 GAMBUT 实验(10 m × 10 m)<sup>[35]</sup>。然而,由于难以在自然环境中较好地控制环境风来探索供氧的影响,此类研究侧重于观察阴燃火灾的点、火、蔓延、灭火和排放现象。当前,实验室中阴燃林火

实验的最大尺度为 24 cm × 24 cm × 100 cm,以模拟深层阴燃火的火蔓延(图 4)<sup>[7]</sup>。该实验中并未使用强制供氧,阴燃的维持仅依靠氧气的自由扩散。结果表明,即使不存在额外供氧,阴燃仍然可以在 1 m 深的泥炭土层里自维持燃烧超过一周。受制于实验尺度,这项研究并未通过实验测定扩散驱动下可支持阴燃燃烧的极限深度,但它证明了维持阴燃极低供氧阈值

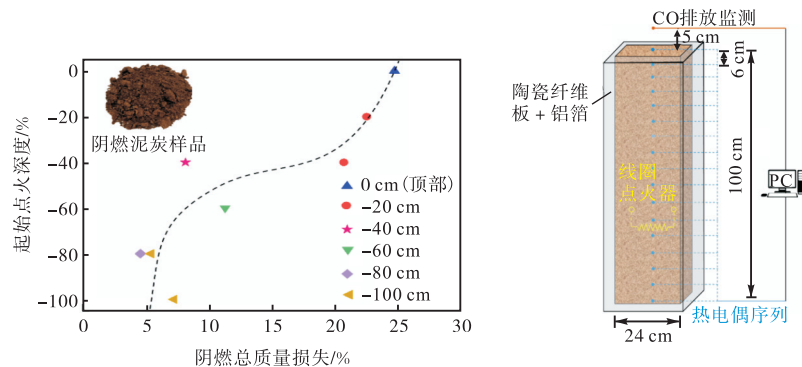


图4 实验室大尺度实验证明阴燃极低供氧阈值的存在

Fig.4 Experimental evidence in laboratory that the extreme low oxygen supply threshold for smoldering combustion

的存在。此外对阴燃后燃料总质量损失测定发现，起始点火深度越接近于自然扩散表面，燃烧造成的燃料总质量损失越高<sup>[7]</sup>。

## 2.2 数值模拟

有关阴燃供氧特性的数值模拟目前相对较少，可以分为基于传热传质的物理模型和基于离散事件模拟的统计模型。典型的一维阴燃物理模型如图 3(e) 所示，其已被广泛用来预测阴燃的点火、火蔓延和熄火等过程<sup>[36-37]</sup>。模型中包含了多孔介质内气固两相的异相化学反应和非稳态传热传质过程，并假设体系在同一位置热平衡：即多孔介质内部换热良好、同一网格内气相和固相温度相同。模型中主要的守恒方程形式与开源软件 Gpyro<sup>[38]</sup>一致，包括固相的质量守恒(式(7))、组分守恒(式(8))、能量守恒(式(9))以及气相的质量守恒(式(10))、组分守恒(式(11))、动量守恒(式(12))，达西定律求解)。

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = -\dot{\omega}_{ig}'' \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}Y_i)}{\partial t} = \dot{\omega}_{fi}'' - \dot{\omega}_{di}'' \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}h)}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{m}''\bar{h}_g)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \sum \dot{\omega}_{di,k}'' \Delta H_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_g \bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m}''}{\partial z} = \dot{\omega}_{ig}'' \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}_g \bar{v} Y_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{m}'' Y_j)}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( \bar{\rho}_g \bar{v} D \frac{\partial Y_j}{\partial z} \right) + (\dot{\omega}_{fi}'' - \dot{\omega}_{dj}'') \quad (11)$$

$$\dot{m}'' = -\frac{\bar{K}}{v} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \quad (12)$$

$$\rho_g = \frac{P\bar{M}}{RT}$$

边界条件的设置取决于所需的点火、散热与供氧条件。例如若模拟阴燃表面点火，可在自由表面上设置不同的热通量作为能量方程的边界条件，并设置边界上的对流和辐射散热。模拟自然供氧时，体系内氧气仅来源于自然扩散，其余边界气体质量通量设置为零。扩散供氧通量由菲克定律计算(式(4))。而模拟强制供氧情形时，则可通过设置边界(如多孔燃料底部)上的氧气浓度和空气通量来直接改变体系供氧浓度和速率<sup>[39]</sup>。

除传统物理模型外，基于元胞自动机 (cellular automata, CA) 的离散统计模型也被用于研究阴燃临界供氧条件(图 3(f))<sup>[34]</sup>。元胞自动机包含大量的规则化单元，通过模拟相邻单元之间的局部交互来展现复杂的全局行为<sup>[40]</sup>。CA 模型不仅已在自然系统模拟、图像处理、群体行为模拟等领域已有广泛应用，其“相邻单元交互”的特性也使之非常适合模拟阴燃火蔓延行为。例如，现有阴燃 CA 模型已经实现变化含水率下的阴燃火蔓延<sup>[41-42]</sup>，场地尺度模拟<sup>[43]</sup>，指状蔓延 (fingering spread) 等复杂火蔓延行为<sup>[44]</sup>。基于 CA 的临界供氧研究首先设置 50 × 50 的网格范围，每个网格有待燃、正在燃烧、燃尽 3 种状态。模型还包含两个参数：局部火灾蔓延概率和局部火灾熄灭概率。根据两个参数的随机取值下的大量模拟与实验的比较，最终优化参数选择和验证模型可用性。

表 1 汇总了现有文献中有关阴燃临界供氧特性的微尺度、小尺度实验和模拟研究及所用的燃料类型、配置、供氧模式等。

表 1 文献中与阴燃临界供氧相关的研究

Tab.1 Experimental information on the limiting oxygen concentration of smoldering combustion

燃料	燃料配置	研究类型	供氧模式	临界氧气浓度 $X_{O_2}$	参考文献	备注
泥炭	2 ~ 3 mg	微尺度热重实验	外部强制供氧浓度 0 ~ 21% 固定流速 200 L/min	<2%	[26]	峰值氧化温度受 氧气浓度影响
泥炭	封闭圆柱容器, 燃料高度 20 cm, 直径 12 cm	小尺度实验	内部强制供氧 浓度 2% ~ 21% 变化流速最大 14.74 mm/s	<2%	[26]	氧气浓度与供氧速率关系
泥炭	开放圆柱容器, 燃料高度 30 mm, 直径 125 mm	小尺度实验	外部强制供氧 浓度 9% ~ 35% 固定流速 20 ~ 150 mm/s	10%	[30]	点燃后阴燃速率与外界 加热无关
泥炭	一维模型, 燃料高度 12 cm	数值模拟	不同氧气浓度下的 自然扩散	13%	[32]	临界氧气浓度与燃料临界 含水率关系
泥炭	模拟范围 10 cm × 10 cm 网格 50 × 50	离散事件模拟 (元胞自动机)	不同氧气浓度下的 自然扩散	16%	[34]	基于实验中燃烧速率和 时间的验证

续表 1

燃料	燃料配置	研究类型	供氧模式	临界氧气浓度 $X_{O_2}$	参考文献	备注
松木粉	开放方形容器, 燃料高度 12 cm, 横截面边长 3.8 cm	小尺度实验	内部强制供氧 浓度 5% ~ 21% 固定流速 15 mm/s	5%	[45]	极限浓度与外部加热的关系
松针 木粉 木片	封闭圆柱容器, 燃料高度 20 cm, 直径 12 cm	小尺度实验	内部强制供氧 固定浓度 21% 变化流速最大 5 mm/s		[31]	临界流速与粒径、堆积密度的关系
松针	计算域燃料高度 20 cm, 宽度 12 cm	数值模拟	模拟: 内部强制供氧 浓度 0 ~ 21% 变化流速 0 ~ 100 mm/s	3%	[39]	燃料密度、含水率、环境温度及氧浓度的影响
压缩 艾草	燃料棒直径 18 mm	小尺度实验	外部强制供氧 浓度 10% ~ 50% 固定流速 18 L/min	13.5%	[29]	淬熄是由于低氧下有限的炭氧化速率
木块	长宽高 8 cm × 8 cm × 3 cm	小尺度实验+ 数值模拟	实验: 外部强制供氧 浓度 0 ~ 21% 固定流速 200 L/min 模拟: 自然扩散	4% (点火)	[46]	氧气浓度极限受外加辐射强度影响
纸屑	开放圆柱容器, 直径 20 cm, 高度 15 cm	小尺度实验	内部强制供氧 固定浓度 21% 变化流速最大 18 cm/s		[32]	密度、加热棒温度的影响
煤	5 mg	ESR	外部强制供氧 浓度 3% ~ 21% 固定流速 50 mL/min	9%	[27]	通过测量自由基和反应速率判断燃烧极限
聚氨酯 泡沫	圆柱形燃料, 直径 13.2 cm, 长度 15 cm	小尺度实验 (微重力)	内部强制供氧 最大供氧率 3.66 g/(m <sup>2</sup> ·s)		[47]	微重力实验, 探索浮力在阴燃中的作用

注: 按照燃料类型、研究尺度排序; 常见固体燃料明火临界氧体积浓度为 18% (纸)<sup>[48]</sup>、19% ~ 20% (聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA))<sup>[49-50]</sup>。

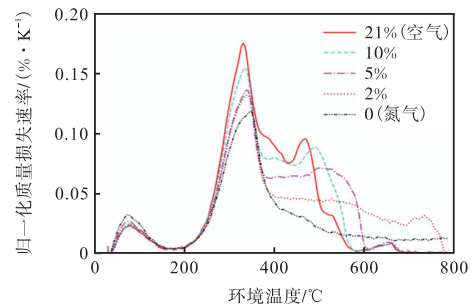
### 3 阴燃临界供氧浓度

明火的极限氧指数 (LOI) 已被普遍研究并广泛接受, 是指能够支持明火燃烧的最小氧气浓度, 以气体体积百分比表示, 又称为极限氧浓度 (LOC). 其与最低、最高燃烧浓度 (LFL 和 UFL)、最小点火能 (MIE) 等参数共同决定了燃料发生明火的难易程度<sup>[51-52]</sup>. 然而从火灾安全的角度, 仅理解燃料发生明火的极限条件并不足以确定其火灾风险性. 相比于明火, 阴燃的引发通常有更低的阈值<sup>[53]</sup>, 并且在特定环境和燃烧情况下阴燃很容易转化为明火, 为火灾的发生提供了捷径<sup>[20,22]</sup>. 有研究者统计了 102 起阴燃事故, 其中 64% 的阴燃可以转化为明火, 平均转化时间为 88 min, 而最短的仅 22 min<sup>[54]</sup>. 因此, 从火灾安全的角度考量, 理解阴燃的极限氧浓度同样重要.

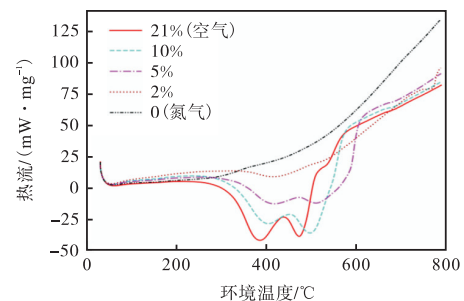
#### 3.1 微尺度实验

煤在 ESR 的微尺度实验表明: 当氧气浓度小于或等于 9% 时, 随着氧气浓度的升高, 自由基生成速度较慢. 当氧气体积分数高于 9% 时, 自由基的增长速度明显提高<sup>[27]</sup>. 而干泥炭样品的 TGA 结果表明, 随着氧气体积分数的不断降低, 氧化反应的峰值温度也逐渐增高, 但即使氧气体积分数降低至 2%, 氧化

反应仍在发生, 证明泥炭阴燃的临界氧体积分数小于 2% (图 5)<sup>[26]</sup>. 但微尺度实验的供氧条件与现实场景



(a) DTG 热重质量损失速率曲线



(b) DSC 差热扫描量热曲线

图 5 不同氧气气氛下泥炭样品热重曲线 (环境升温速率  $\beta = 30 \text{ K/min}$ <sup>[26]</sup>)

Fig.5 Thermogravimetric analysis results of peat sample under various ambient oxygen concentrations ( $\beta = 30 \text{ K/min}$ <sup>[26]</sup>)

中阴燃的供氧条件相差较大,需要利用其他尺度的实验来探究不同工况下的极限供氧条件.

### 3.2 自然扩散

小尺度研究中,较难通过实验探索自然扩散下的临界供氧浓度.因此现有文献均利用已验证的模型开展数值模拟来研究此类供氧方式.一项对木块的研究确定了不同加热通量下,燃料发生热解、阴燃和明火所需要的氧气体积分数区间(图 6(a)),即小于 4%(热解),4%~15%(阴燃)和大于 15%(明火).需要注意的是此研究仅讨论点火阶段的现象.

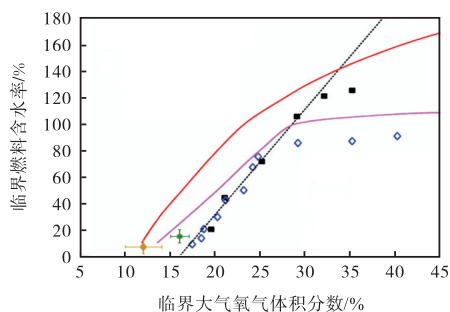
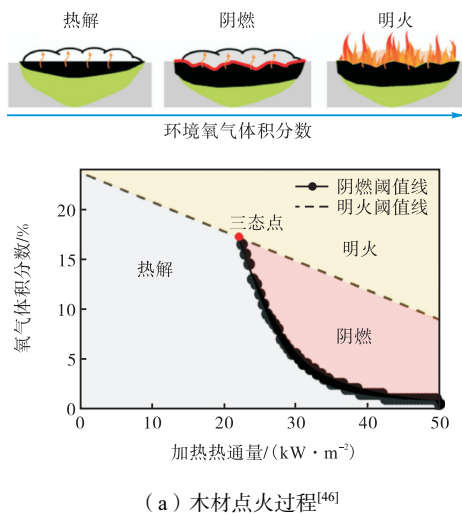


图 6 不同氧气体积分数下的木材点火现象及模拟揭示的泥炭临界含水率

文献[48]明火实验结果  
 ■ 熄火极限  
 ◆ 点火极限  
 ———  $MC^* = 8X_{O_2}^* - 128$  (趋势线)

文献[33]  
 ——— 熄火极限  
 ——— 点火极限

相关阴燃实验结果  
 ● 文献[34]  
 ◆ 文献[30]

(b) 临界含水率

图 6 不同氧气体积分数下的木材点火现象及模拟揭示的泥炭临界含水率

Fig.6 Wood ignition phenomena, and simulated critical moisture content of smoldering peat under different oxygen concentration

另一项基于物理模型的数值计算还确定了临界供氧体积分数( $X_{O_2}^*$ )和临界含水率( $MC^*$ )之间的关系<sup>[32]</sup>(图 6(b)).结果表明,随着水分含量的增加,阴燃点火和火蔓延的临界供氧体积分数均大幅增加.与明火相比,阴燃可以在更高的燃料含水率(常规供氧体积分数  $X_{O_2} = 21\%$ 时,阴燃的临界含水率高达

100%,而明火仅 40%)和更低氧气体积分数(阴燃  $X_{O_2}^* = 13\%$ ,明火 16%)下维持.而基于 CA 的模拟则得到了较高的结果:模拟发现阴燃反应会在氧气体积分数小于 18.5%时被抑制,而小于 16%时会完全停止反应.该研究还基于此重新评估了地球在过去 3.5 亿年间的可燃极限<sup>[34]</sup>.

### 3.3 内部强制供氧

针对内部强制供氧的工况,作者前期采用了密闭式管状容器,以避免氧气自然扩散的影响,使唯一供氧来自底部可控的强制供氧(图 2(d)、3(d)).实验开始时,在多孔燃料中部使用加热电阻丝点火 15 min 后,便开始从底部强制供氧.研究发现尽管在 2%的极低氧气浓度下,泥炭的阴燃火蔓延仍然可以维持数小时(图 7(a)).该发现与微尺度研究结果相符(图 5)<sup>[26]</sup>.相同工况下,松针燃料床中的模拟研究发现其临界氧气质量分数为 3%.当供氧浓度更低时,阴燃在所有流速下均无法维持<sup>[39]</sup>.另一项关注松木粉阴燃的研究使用了类似的内部强制供氧模式(图 2(d)、3(d))<sup>[45]</sup>,发现阴燃所需的临界氧气浓度与外部加热相关(图 7(b)),与自然扩散供氧情形下的规律类似(图 6(a)).只有氧气体积分数在 10%~21%之间时才能引发自维持的阴燃;当氧气体积分数低于 7.5%时,维持阴燃燃烧需要外部辐射加热的辅助;而当氧气体积分数等于或小于 5%时,即使在外部加热的辅助下也无法发生阴燃(临界氧气体积分数为 5%).

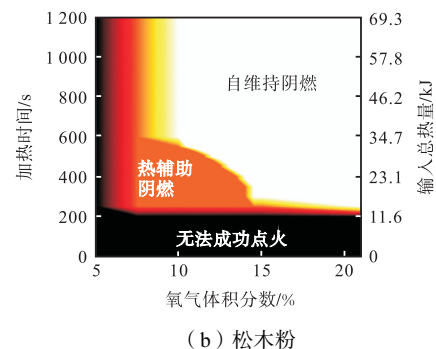
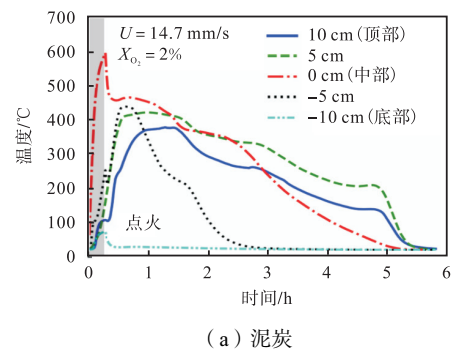


图 7 泥炭<sup>[26]</sup>和松木粉<sup>[45]</sup>的小尺度阴燃实验结果

Fig.7 Small scale experimental results of smoldering peat and wood dust

### 3.4 外部强制供氧

与内部强制供氧不同,外部强制供氧实际提供给阴燃反应锋面的氧通量比较有限,因此研究发现的临界氧浓度往往大于内部供氧的结果.代表性的研究包括直接将气流通向点燃后的燃料表面<sup>[29]</sup>(图 3(b))和借助 FPA 装置控制点火强度、供氧条件<sup>[30]</sup>(图 3(c)).两项研究分别针对压缩艾草和泥炭,并得出外部强制供氧的临界氧体积分数为 13.5%(图 8(a))和 10%,见(图 8(b)).相似的是,它们均发现在氧气浓度不足时淬熄的燃料中炭含量较高(图 8(b)),证明了炭氧化速率不足导致无法释放足够的热量是阴燃淬熄的主因.而随着氧气体积分数的升高,实验分别观测到了火蔓延速度和燃烧温度的升高以及燃料质量损失速率的增加.泥炭中的研究还发现阴燃持续时间会随着氧气体积分数的升高而减少<sup>[30]</sup>.这种不充分供氧条件下阴燃燃烧更持久的特性有助于解释阴燃火灾在地下深层持久燃烧的现象.

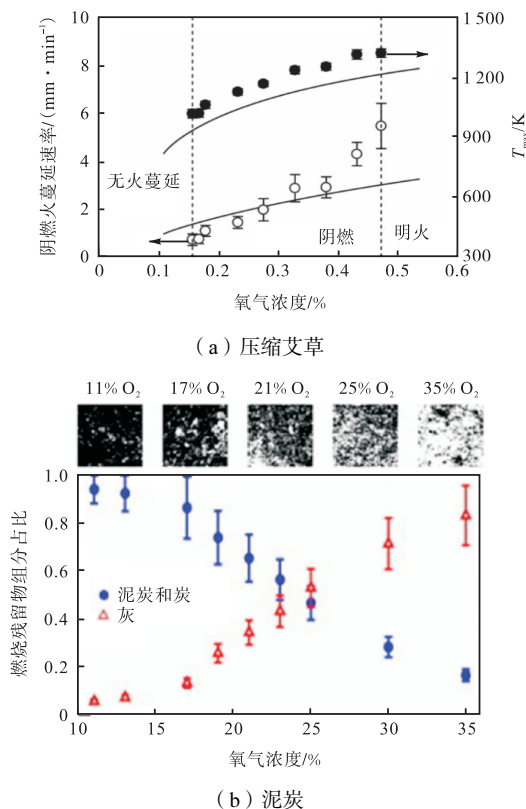


图 8 外部强制供氧条件下压缩艾草<sup>[29]</sup>和泥炭<sup>[30]</sup>的阴燃临界氧浓度

Fig.8 Critical (external forced) oxygen supply of moxa rod<sup>[29]</sup>and peat<sup>[30]</sup>

## 4 阴燃临界供氧速率

文献中有关阴燃临界供氧速率的研究大多基于容器内部强制供氧的情形,以便控制实际进入阴燃系

统的氧通量.因此本节仅讨论内部强制供氧模式下,与阴燃临界供氧速率相关的影响因素,主要包括氧气浓度、燃料类型、环境条件等.

### 4.1 氧气浓度的影响

在内部强制供氧情形中,进入阴燃系统的实际氧通量  $\dot{m}_{ox}''$  由氧气体积分数  $X_{O_2}$  (或氧气质量分数  $Y_{O_2}$ ,  $X_{O_2} = (\rho_g / \rho_{O_2}) Y_{O_2}$ ) 和流速  $U$  共同决定(式(6)).一项从容器中部点火、并内部强制供氧的研究(图 2(d), 3(d))通过实验观测到点火后氧气充足条件下的双向蔓延和氧气相对不足条件下的单向蔓延,并发现维持阴燃所需的供氧流速 ( $U$ ) 与氧气浓度 ( $X_{O_2}$ ) 负相关(如图 9(a))<sup>[26]</sup>.因为在临界条件下,阴燃燃烧产生的热量全部用于平衡蒸发散热、内部对流冷却、环境散热,即

$$\dot{q}_{sm,min}'' = \dot{q}_{MC}'' + \dot{q}_{conv}'' + \dot{q}_e'' = \dot{m}_{ox,min}'' \Delta H_{ox} = \rho_g (U Y_{O_2})_{min} \Delta H_{ox} \quad (13)$$

$$U_{min} = \frac{\dot{q}_{MC}'' + \dot{q}_{conv}'' + \dot{q}_e''}{\rho_g Y_{O_2} \Delta H_{ox}} \propto \frac{1}{Y_{O_2}} \quad (14)$$

此外,当氧气质量分数  $Y_{O_2} > 10\%$  时,维持阴燃的临界供氧通量趋于定值  $\dot{m}_{ox,min}'' = 0.08 \pm 0.01 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,而不会随着  $Y_{O_2}$  而变化(图 9(b)).这是由于  $Y_{O_2} > 10\%$  时内部氧气流速较小 ( $U < 1 \text{ mm/s}$ ),式(14)中对流冷却项  $\dot{q}_{conv}''$  可以忽略.因此:

$$\dot{m}_{O_2,min}'' = \frac{\dot{q}_{MC}'' + \dot{q}_{conv}'' + \dot{q}_e''}{\Delta H_{ox}} \approx \frac{\dot{q}_{MC}'' + \dot{q}_e''}{\Delta H_{ox}} = \text{const} \quad (15)$$

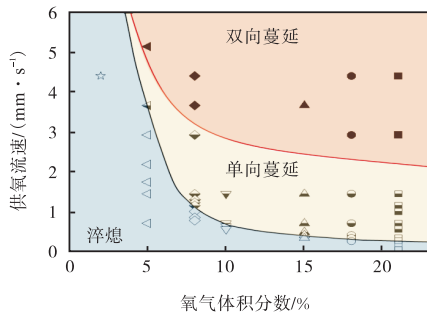
而在低氧浓度 ( $Y_{O_2} < 10\%$ ) 下,供氧流速增加,因此多孔燃料内部对流散热增强,导致所需临界供氧量增加:

$$\dot{m}_{O_2,min}'' = U_{min} \rho_g Y_{O_2} \propto \dot{q}_{conv}'' \propto U_{min}^m \propto (Y_{O_2})^{m-1} \quad (16)$$

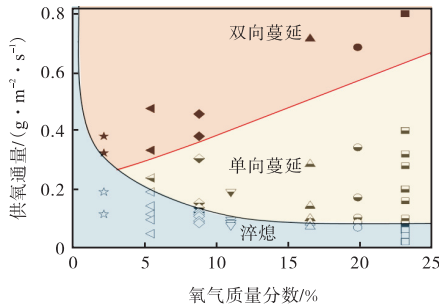
此外,模拟研究<sup>[39]</sup>也验证了松针中临界供氧流速与氧浓度呈负相关的趋势,与泥炭小尺度实验<sup>[26]</sup>中发现的规律相一致.该模拟研究还确定,当氧气质量分数  $Y_{O_2} > 10\%$  时,松针燃料床的临界供氧量  $\dot{m}_{ox,min}'' = 0.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .

### 4.2 燃料性质的影响

堆积密度是阴燃燃料的重要性质,会对燃料的临界供氧极限产生影响.两篇相关研究分别从点火<sup>[32]</sup>和火蔓延<sup>[31]</sup>角度探索了堆积密度对阴燃临界供氧速率的影响.阴燃点火研究选用废纸屑作为实验燃料,结果表明在低堆积密度燃料中,点火时多孔燃料间隙中有较充足的氧气,因此即使无额外供氧也能成功点火,而过高的空气流速反而会强化内部对流散热而使点火失败(图 10(a)).当堆积密度升高,供氧成为了



(a) 供氧流速随氧气体积分数的变化



(b) 供氧通量随氧气质量分数的变化

图9 阴燃临界供氧流速及供氧通量与氧气浓度的变化<sup>[26]</sup>Fig.9 Relationships between smoldering oxygen supply limits and oxygen concentrations<sup>[26]</sup>

控制点火成功的主要因素,表现为在供氧不足、流速过大情况下点火均无法成功(图 10(b)~10(c)的 U 形趋势)。

另一项关注阴燃火蔓延的研究进一步分析和比较了不同堆积密度、粒径对阴燃临界供氧速率的影响<sup>[31]</sup>。与先前泥炭中的现象<sup>[26]</sup>类似,研究者在松针、木片、木粉中也观察到相对缺氧下的单向阴燃火蔓延与氧气充足条件下的双向蔓延(同时形成顺风和逆风两个阴燃火蔓延锋面的现象),并发现维持阴燃传播的最小气流速度随体积密度的减小或颗粒尺寸的增大而增大(图 11)。这是由于在低流速多孔燃料阴燃中,热传导( $q''_{\text{cond}}$ )为火蔓延的主控传热方式<sup>[55]</sup>,即

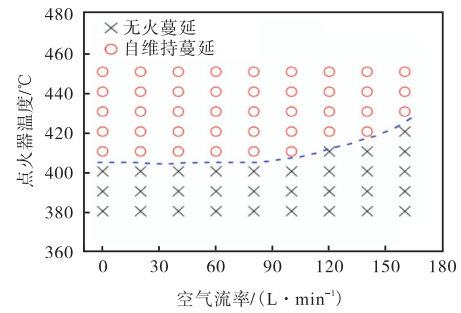
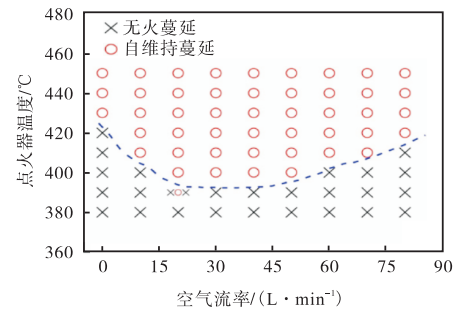
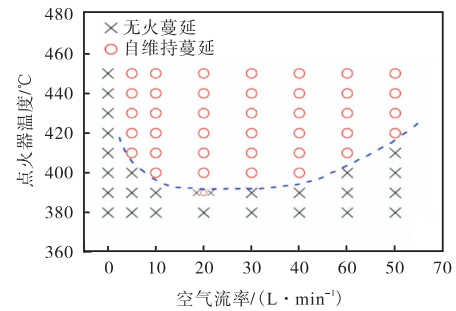
$$\dot{q}''_{\text{sm}} = \dot{m}''_{\text{O}_2, \text{min}} \Delta H_{\text{ox}} = \rho_g U_{\text{min}} Y_{\text{O}_2} \Delta H_{\text{ox}} \approx \dot{q}''_{\text{cond}} = k \frac{(T_{\text{sm}} - T_{\infty})}{\Delta x} \quad (17)$$

其中阴燃火蔓延临界供氧流速为

$$U_{\text{min}} = \frac{k(T_{\text{sm}} - T_{\infty})}{\rho_g Y_{\text{O}_2} \Delta H_{\text{ox}} \Delta x} \quad (18)$$

其中,  $k$  为多孔燃料内部的有效导热系数,可表示为:

$$k = k_s(T) + k_r(T) = k_0 \left( \frac{T}{T_r} \right)^{n_k} + \gamma \sigma T^3 \quad (19)$$

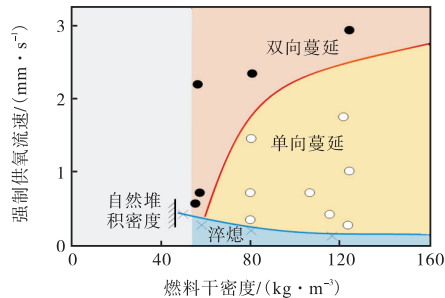
(a) 16.98 kg/m<sup>3</sup>(b) 25.5 kg/m<sup>3</sup>(c) 31.13 kg/m<sup>3</sup>图10 不同密度废纸屑阴燃点火实验中,点火温度与空气流率对点火行为的影响<sup>[32]</sup>Fig.10 Effects of ignition temperature and air flow rate on ignition behavior in the smoldering ignition experiment of waste paper with different densities<sup>[32]</sup>

式中:  $n_r$  为温度依赖指数;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数;  $\gamma$  为辐射电导率参数,  $m$ , 取决于孔隙形态和其他因素, 可通过表征孔径  $d_p$  估算, 即  $\gamma = 3d_p$ <sup>[56-57]</sup>。表征孔径与燃料颗粒表面积  $S$  和燃料堆积密度  $\rho_b$  的关系为  $d_p = 1/S\rho_b$ <sup>[56]</sup>。因此, 由式(18)和(19)可知, 随着燃料体积密度的增加,  $d_p$ 、 $\gamma$  和  $k$  将相应减小, 从而导致最小流速( $U_{\text{min}}$ )降低(图 11), 并在松针燃料床的阴燃模拟中得到验证(图 12(a))<sup>[39]</sup>。

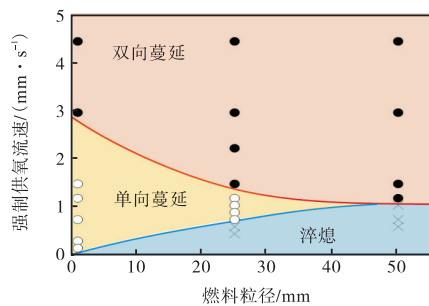
燃料含水率也会对阴燃蔓延和熄灭极限产生影响<sup>[33,37]</sup>。模拟研究验证了在不同堆积密度的松针燃料床中, 随燃料含水率增大, 临界供氧流速呈现增大的趋势(图 12(b))<sup>[39]</sup>。这是因为随着含水率的增高, 阴燃锋面需要更高的供氧条件以维持更强的氧化反

应,以释放更多的热量来克服水分蒸发造成的热量损失.例如在\*\*高密度松针床 ( $\rho_b = 150 \text{ kg/m}^3$ )

气质量会降低至  $0.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .这是由于移除重力会减弱浮力造成的热量损失,使阴燃能在更弱的供氧条件下维持.



(a) 松针密度的影响



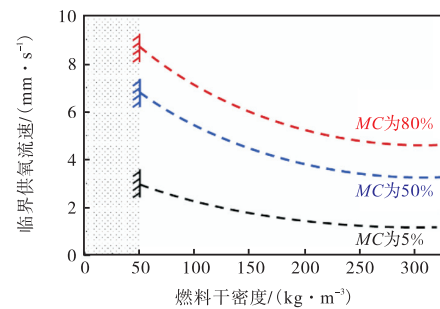
(b) 木制燃料粒径的影响

图 11 松针密度和木制燃料粒径对阴燃火蔓延临界供氧速率的影响<sup>[31]</sup>

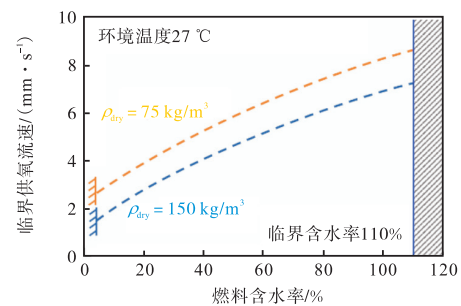
Fig.11 Internal airflow velocity vs. dry bulk density and particle size of wood samples<sup>[31]</sup>

### 4.3 环境条件的影响

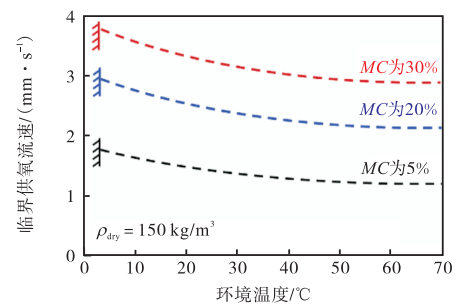
环境条件对阴燃临界供氧速率的影响主要体现在体系的边界散热上<sup>[17,58]</sup>.模拟研究验证了阴燃临界供氧速率和环境温度的负相关关系<sup>[39]</sup>,但其影响相对较小.例如在常见的环境温度变化范围(0~70℃)内,5%含水率的松针床阴燃临界供氧速率变化范围仅为1.4~1.7 mm/s(图12(c)).该趋势也可通过式(18)中 $U_{\min}$ 和 $T_{\infty}$ 关系解释,体系热损失由于环境温度的升高而减少,从而降低维持阴燃蔓延的最低供氧量.基于对流散热在近极限阴燃中的重要性,另一项对压缩熏香的研究还定量了供氧速率过高时阴燃被吹熄的速率极限<sup>[59]</sup>.此外,重力和浮力可能也会对强制供氧情形下的多孔燃料阴燃产生影响.一项研究使用聚氨酯泡沫作为燃料,将正常重力条件下的强制流测试结果与微重力条件下一系列环境压力和强制流的结果进行了比较<sup>[47]</sup>.结果表明,在正常重力条件下,这种配置下自持传播需要大约 $0.5 \sim 0.8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的临界空气质量通量.而在微重力条件下,该临界空



(a) 燃料干密度的影响



(b) 含水率的影响



(c) 环境温度的影响

图 12 松针燃料床阴燃模拟中燃料干密度、燃料含水率、和环境温度对临界供氧流速的影响<sup>[39]</sup>

Fig.12 Simulation results of the role of fuel dry bulk density, moisture content, and ambient temperature on oxygen threshold of smoldering combustion<sup>[39]</sup>

## 5 总结与展望

阴燃是燃烧的一种基本形式,既可能演变成地球上规模最大、持续时间最长的自然灾害,对人类健康和自然环境造成负面影响,同时也有望成为一种清洁、安全和低成本的固废处理新技术.无论是从控制大规模阴燃林火的角度,还是从提高阴燃固废处理的能效来看,理解阴燃燃烧的临界供氧条件这一基本科学问题都至关重要.

目前,关于阴燃临界供氧条件的研究还较为有

限. 由于实验设备、燃料类型和供氧模式的差异, 很难对这一基础问题达成统一的认知. 本文首先总结了现有研究中采用的实验和数值模拟方法, 概述了微尺度和小尺度实验、物理模型以及离散事件模拟的方法.

多孔燃料中的阴燃供氧量由氧浓度和供氧速率共同决定. 研究表明, 阴燃的临界氧浓度明显低于明火. 然而, 燃料类型和供氧条件等因素对阴燃的临界氧浓度影响显著. 例如, 在强制供氧的情况下, 内部供氧(2%~5%)的临界氧浓度通常比外部供氧(10%~13.5%)要低. 阴燃临界供氧速率的研究主要集中在内部强制供氧方面, 因为这种方法便于确定实际进入多孔燃料内部的氧气通量. 现有研究通过实验确定了燃料堆积密度、粒径等燃料自身性质的影响, 以及多孔燃料内部对流散热、外部热损失、重力和浮力等环境因素的影响.

未来需要进一步开展更多的实验和模拟研究, 系统探索燃料自身性质或多种燃料混合对阴燃临界供氧速率的影响. 此外, 应建立新的研究方法, 以比较相同燃料和环境条件下, 不同供氧模式导致的临界供氧量差异, 及临界供氧的尺度效应, 以将小尺度下的研究发现应用于真实火灾. 同时, 还需建立阴燃供氧条件的数据库和预测方法, 以科学评估燃料火灾的危险性, 并为固废处理的增效方法提供科学指导.

#### 参考文献:

- [1] Quintiere J G. *Principles of Fire Behavior*[M]. 2nd Ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016.
- [2] Fujita O. Solid combustion research in microgravity as a basis of fire safety in space[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 2487-2502.
- [3] Wu C, Huang X, Wang S, et al. Opposed flame spread over cylindrical PMMA under oxygen-enriched microgravity environment[J]. *Fire Technology*, 2020, 56(1): 71-89.
- [4] Koplitz S N, Mickley L J, Marlier M E, et al. Public health impacts of the severe haze in equatorial Asia in september-october 2015: Demonstration of a new framework for informing fire management strategies to reduce downwind smoke exposure[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(9): 094023.
- [5] 秦蕴竹, 胡玉琦, 黄鑫炎. 森林阴燃火排放特性: 研究前沿与展[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(4): 1118-1134.
- [6] Qin Yunzhu, Hu Yuqi, Huang Xinyan. A review of smoldering wildfire emission: Research advances and prospects[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(4): 1118-1134(in Chinese).
- [7] Scholten R C, Jandt R, Miller E A, et al. Overwintering fires in boreal forests[J]. *Nature*, 2021, 593: 399-404.
- [8] Zhang Y, Shu Y, Qin Y, et al. Deep peat fire persistently smouldering for weeks: A laboratory demonstration[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2022, 32(1): 86-98.
- [9] Hermesdorf L, Elberling B, D'Imperio L, et al. Effects of fire on CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O exchange in a well-drained arctic heath ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(16): 4882-4899.
- [10] Webb E E, Loranty M M, Lichstein J W. Surface water, vegetation, and fire as drivers of the terrestrial Arctic-boreal albedo feedback[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(8): 084046.
- [11] Palmer K N. Smouldering combustion in dusts and fibrous materials[J]. *Combustion and Flame*, 1957, 1(2): 129-154.
- [12] Lohri C R, Diener S, Zabaleta I, et al. Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products: a review with focus on low- and middle-income settings[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2017, 16(1): 81-130.
- [13] Chen Y, Lin S, Qin Y, et al. Carbon distribution and multi-criteria decision analysis of flexible waste biomass smouldering processing technologies[J]. *Waste Management*, 2023, 167: 183-193.
- [14] Pickin J, Wardle C, O'farrell K, et al. National Waste Report 2020[R]. Australia: Blue Environment Pty Ltd, 2020.
- [15] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [M]. Institute for Global Environmental Strategies, Japan, 2006.
- [16] Chen Y, Lin S, Liang Z, et al. Clean smoldering biowaste process: Effect of burning direction on smoke purification by self-sustained flame[J]. *Fuel Processing Technology*, 2022, 237: 107453.
- [17] Torero J L, Gerhard J I, Martins M F, et al. Processes defining smouldering combustion: Integrated review and synthesis[J]. *Progress in Energy and Combustion*

- Science*, 2020, 81: 100869.
- [18] Yermán L, Wall H, Torero J, et al. Smoldering combustion as a treatment technology for feces: Sensitivity to key parameters[J]. *Combustion Science and Technology*, 2016, 188(6): 968-981.
- [19] Rein G, Huang X. Smoldering wildfires in peatlands, forests and the arctic: Challenges and perspectives[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2021, 24: 100296.
- [20] 黄鑫炎, 林少润, 刘乃安. 林火中的阴燃现象: 研究前沿与展望[J]. *工程热物理学报*, 2021, 42(2): 512-528.
- Huang Xinyan, Lin Shaorun, Liu Naian. A review of smoldering wildfire: Research advances and prospects[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(2): 512-528 (in Chinese).
- [21] Chen Y, Wang Z, Lin S, et al. A review on biomass thermal-oxidative decomposition data and machine learning prediction of thermal analysis[J]. *Cleaner Materials*, 2023, 9: 100206.
- [22] Rein G, Cleaver N, Ashton C, et al. Smoldering combustion[G]//*SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*[M]. Fifth Ed. New York, NY: Springer, 2016: 581-603.
- [23] Christensen E, Hu Y, Restuccia F, et al. Experimental methods and scales in smoldering wildfires[G]//Pereira P. *Fire Effects on Soil Properties*[M]. Australia: CSIRO Publishing, 2019: 267-280.
- [24] Anca-Couce A, Zobel N, Berger A, et al. Smoldering of pine wood: Kinetics and reaction heats[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(4): 1708-1719.
- [25] Cancellieri D, Leroy-Cancellieri V, Leoni E, et al. Kinetic investigation on the smoldering combustion of boreal peat[J]. *Fuel*, 2012, 93: 479-485.
- [26] Qin Y, Chen Y, Lin S, et al. Limiting oxygen concentration and supply rate of smoldering propagation[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 245: 112380.
- [27] Zhou B, Yang S, Jiang X, et al. The reaction of free radicals and functional groups during coal oxidation at low temperature under different oxygen concentrations[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 150: 148-156.
- [28] 林少润, 黄鑫炎. 探索泥炭林火的小尺度实验方法[J]. *燃烧科学与技术*, 2021, 27(6): 613-620.
- Lin Shaorun, Huang Xinyan. Small-scale experimental methods to investigate the smoldering wildfires in peatland[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2021, 27(6): 613-620 (in Chinese).
- [29] Kadowaki O, Suzuki M, Kuwana K, et al. Limit conditions of smoldering spread in counterflow configuration: Extinction and smoldering-to-flaming transition[J]. *Proceedings of Combustion Institute*, 2021, 38(3): 5005-5013.
- [30] Hadden R M, Rein G, Belcher C M. Study of the competing chemical reactions in the initiation and spread of smoldering combustion in peat[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2547-2553.
- [31] Qin Y, Zhang Y, Chen Y, et al. Minimum oxygen supply rate for smoldering propagation: Effect of fuel bulk density and particle size[J]. *Combustion and Flame*, 2024, 261: 113292.
- [32] Yan H, Fujita O. Experimental investigation on the smoldering limit of scraps of paper initiated by a cylindrical rod heater[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 4099-4106.
- [33] Huang X, Rein G. Interactions of Earth's atmospheric oxygen and fuel moisture in smoldering wildfires[J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 572: 1440-1446.
- [34] Belcher C M, Yearsley J M, Hadden R M, et al. Baseline intrinsic flammability of Earth's ecosystems estimated from paleoatmospheric oxygen over the past 350 million years[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(52): 22448-22453.
- [35] Santoso M A, Christensen E G, Amin H M F, et al. GAMBUT field experiment of peatland wildfires in Sumatra: from ignition to spread and suppression[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2022, 31(10): 949-966.
- [36] Lin S, Yuan H, Huang X. A computational study on the quenching and near-limit propagation of smoldering combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 238: 111937.
- [37] Huang X, Rein G, Chen H. Computational smoldering combustion: Predicting the roles of moisture and inert contents in peat wildfires[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 2673-2681.
- [38] Lautenberger C, Fernandez-Pello C. Generalized pyrolysis model for combustible solids[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(6): 819-839.
- [39] Qin Y, Chen Y, Zhang Y, et al. Modeling smothering limit of smoldering combustion: Oxygen supply, fuel density, and moisture content[J]. *Combustion and*

- Flame*, 2024, 269: 113683.
- [40] Wolfram S. Statistical mechanics of cellular automata[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1983, 55(3): 601.
- [41] Purnomo D M J, Christensen E G, Fernandez-Anez N, et al. BARA: Cellular automata simulation of multidimensional smouldering in peat with horizontally varying moisture contents[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2024, 33(2): 1-11.
- [42] Purnomo D M J, Apers S, Bechtold M, et al. KAPAS II: Simulation of peatland wildfires with daily variations of peat moisture content[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2023, 32(6): 823-835.
- [43] Purnomo D M J, Bonner M, Moafi S, et al. Using cellular automata to simulate field-scale flaming and smouldering wildfires in tropical peatlands[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 5119-5127.
- [44] Fernandez-Anez N, Christensen K, Frette V, et al. American Physical Society, 2019 Simulation of fingering behavior in smoldering combustion using a cellular automaton[J]. *Physical Review E*, 2019, 99(2): 1-13.
- [45] Wang H, van Eyk P J, Medwell P R, et al. Effects of oxygen concentration on radiation-aided and self-sustained smoldering combustion of radiata pine[J]. *Energy and Fuels*, 2017, 31(8): 8619-8630.
- [46] Richter F, Jervis F X, Huang X, et al. Effect of oxygen on the burning rate of wood[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 234: 111591.
- [47] Bar-Ilan A, Rein G, C. walther D, et al. The effect of buoyancy on opposed smoldering[J]. *Combustion Science and Technology*, 2004, 176(12): 2027-2055.
- [48] Watson A J, Lovelock J E. The dependence of flame spread and probability of ignition on atmospheric oxygen: an experimental investigation[G]// Belcher C M. *Fire Phenomena and the Earth System: An Interdisciplinary Guide to Fire Science*[M]. UK: John Wiley & Sons, 2013: 273-287.
- [49] Johnston M C, T'ien J S. Gravimetric measurement of solid and liquid fuel burning rate near and at the low oxygen extinction limit[J]. *Fire Safety Journal*, 2017, 91: 140-146.
- [50] Kumar A, T'ien J. Numerical modeling of limiting oxygen index apparatus for film type fuels[J]. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, 2012, 4(4): 299-322.
- [51] Simmons R F, Wolfhard H G. Some limiting oxygen concentrations for diffusion flames in air diluted with nitrogen[J]. *Combustion and Flame*, 1957, 1(2): 155-161.
- [52] Zlochower I A, Green G M. The limiting oxygen concentration and flammability limits of gases and gas mixtures[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(4): 499-505.
- [53] Lin S, Sun P, Huang X. Can peat soil support a flaming wildfire?[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2019, 28(8): 601-613.
- [54] Babrauskas V, Krasny J F. Upholstered furniture transition from smoldering to flaming[J]. *Journal of Forensic Science*, 1997, 42(6): 1029-1031.
- [55] Torero J L, Fernandez-Pello A C. Forward smolder of polyurethane foam in a forced air flow[J]. *Combustion and Flame*, 1996, 106(1/2): 89-109.
- [56] Huang X, Rein G. Thermochemical conversion of biomass in smoldering combustion across scales: The roles of heterogeneous kinetics, oxygen and transport phenomena[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 207: 409-421.
- [57] Yu F, Wei G, Zhang X, et al. Two effective thermal conductivity models for porous media with hollow spherical agglomerates [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2006, 27(1): 293-303.
- [58] Carvalho E R, Gurgel Veras C A, Carvalho J A. Experimental investigation of smoldering in biomass [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2002, 22(4): 283-294.
- [59] Lin S, Chow T H, Huang X. Smoldering propagation and blow-off on consolidated fuel under external airflow[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 234: 111685.