

## 盖层对煤堆积床阴燃过程影响的小尺度实验研究

刘志航, 李君, 潘俊杰  
(天津大学机械工程学院, 天津 300350)

**摘要:** 为掌握盖层影响下煤火阴燃传播情况, 根据地下煤火的空间结构特征, 设计搭建了实验室小尺度煤堆积床阴燃实验装置, 在煤层上方放置多孔陶瓷模拟真实煤火中的上覆盖层. 通过改变盖层中的裂隙特征揭示了盖层对煤阴燃传播过程及烟气排放的影响. 结果表明, 煤层上方存在完整的气体通路, 是在盖层影响下阴燃成功点火和传播的必要条件. 改变盖层中裂隙之间的距离会影响裂隙向下方煤体供氧的能力, 从而影响煤阴燃到达峰值温度的时间. 盖层主要对浅层煤层阴燃产生影响. 随着盖层裂隙开度的减小, 煤层阴燃反应速率逐渐下降, 峰值温度逐渐降低; 在本实验条件下, 裂隙开度为 4 mm 时, 阴燃无法传播.

**关键词:** 地下煤火; 煤堆积床; 阴燃; 盖层; 温度场; 烟气排放

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2024)06-0600-09

## Small-Scale Experimental Study on Effects of Covering Layer on Smoldering in Packed Coal Beds

Liu Zhihang, Li Jun, Pan Junjie  
(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

**Abstract:** To grasp the smoldering propagation of coal fires under the effect of covering layer, based on the spatial structure characteristics of underground coal fires, a small-scale laboratory coal-packed bed smoldering experimental device was designed and built, and porous ceramics were placed above the coal seam to simulate the covering layer in the real coal fire. The effects of covering layer on coal smoldering propagation and flue gas emission are revealed by changing the crack characteristics in the covering layer. The results indicate that a complete gas path above the coal seam is necessary for the successful ignition and propagation of smoldering under the influence of the covering layer. Changing the distance between the cracks in the covering layer will affect the ability of the cracks to supply oxygen to the lower coal layer, thus affecting the time needed to reach the peak temperature of coal smoldering. The covering layer mainly affects the smoldering of the shallow coal layer. With the decrease of crack opening, the reaction rate and peak temperature of coal smoldering decrease gradually. Under the experimental conditions, when the crack opening is 4 mm, smoldering fails to propagate.

**Keywords:** underground coal fire; packed coal beds; smoldering; covering layer; temperature field; gaseous emission

地下煤炭通过物理和化学方法吸附氧气后发生 反应产生大量的热, 热量聚集到一定程度后导致煤自

收稿日期: 2023-12-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52276130).

作者简介: 刘志航(1999—), 男, 硕士研究生, lzh529@tju.edu.cn.

通信作者: 李君, 男, 博士, 副教授, lijun79@tju.edu.cn.

燃<sup>[1]</sup>,而在自燃发生后,高温破坏岩体形成供氧通道(当煤温在 200 °C、氧气体积分数为 3% 和保持适当供风量时,就可以维持煤氧复合反应),使火区不断延伸最终形成地下煤火<sup>[2]</sup>. 地下煤火发展一般经历 3 个阶段:潜伏期、自热期和燃烧期<sup>[3]</sup>. 地下煤炭在潜伏期和自热期与有限氧气接触缓慢氧化不断蓄积热量,此阶段内无明火产生,但煤炭温度会不断升高并产生大量烟气,造成地表热异常并严重污染空气. 据估计每年由煤火引起的碳排放约占全球碳排放总量的 3%<sup>[4]</sup>. 煤田火灾在世界范围内对生态环境和人类安全和健康都造成严重危害<sup>[5]</sup>.

针对煤火阴燃,国内外学者已经进行了大量实验研究. Qi 等<sup>[6]</sup>搭建煤阴燃实验装置,在恒定气流大小的条件下探究了传播方向不同对阴燃燃烧的影响. 王文才等<sup>[7]</sup>通过实验发现可以将 CO 作为阴燃稳定期的标志性气体. 王聪等<sup>[8]</sup>设计搭建了模拟煤田火灾的实验装置,发现 CO 体积分数与煤样温度的关系方程可以用来判断煤低温氧化的程度. Song 等<sup>[9]</sup>设计搭建一种 U 型实验装置,通过控制供氧以及分析烟气揭示了“烟囱效应”对于地下煤火持续燃烧的影响. Li 等<sup>[10]</sup>分析了不同粒径的煤粉在热板上的点火行为,发现最低点火温度趋于随粒径减小,且随着粒径的增大点火延迟时间增加. Hadden<sup>[11]</sup>对粒径为 7~45 mm 的煤堆阴燃进行了研究,发现煤堆最大阴燃温度为 720~930 °C,阴燃传播速率为 0.7 mm/min.

地下煤火是大气环境、地表盖层和地下煤层 3 者之间的物质和能量交换. 但现有针对地下煤火的实验研究大多是在开口系统中进行的,煤直接与空气接触,忽略了盖层对于煤阴燃传播的影响. 在煤田环境中,煤层上方的盖层中存在许多裂隙通道,空气通过这些通道以扩散和紊流的形式进入煤层,为煤氧化反应提供氧化剂. 裂隙由于开度大小以及曲折程度等的不同,供给氧气的的能力也各不相同,因而会影响下方煤体的阴燃,同时阴燃产生的烟气也通过这些裂隙逸出并扩散到大气中. 因此,为了反映真实地下煤火燃烧情况,有必要对施加盖层的煤火阴燃过程进行研究.

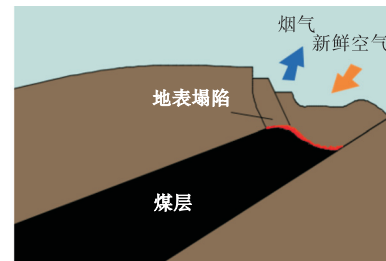
本文旨在施加盖层的条件下探究煤颗粒堆积床阴燃传播过程,分析其峰值温度、烟气排放等随着盖层布置和火源位置改变而产生的变化规律,对于实际地下煤火自燃监测和预防工作有着一定指导意义.

## 1 实验设计及实验方案

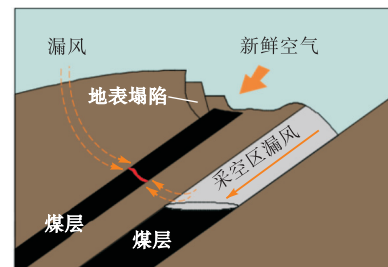
### 1.1 实验设计

图 1 是两种典型的地下煤火空间示意图. 露头型

煤火是最为常见的地下煤火,煤层的一侧暴露在大气中,而燃烧活动也在该侧发生. 采动影响型煤火主要是由于在人为采矿过程中破坏上层薄煤层结构,采空区的气流扩散引发上层煤层的蓄热升温,最终形成局部火源,火源位于煤层中部而非一侧. 根据图 1 所示的两种结构,设计并搭建实验室尺度阴燃反应槽.



(a) 露头型



(b) 采动影响型

图 1 两种典型地下煤火空间示意

Fig.1 Schematic diagram of two typical underground coal fire

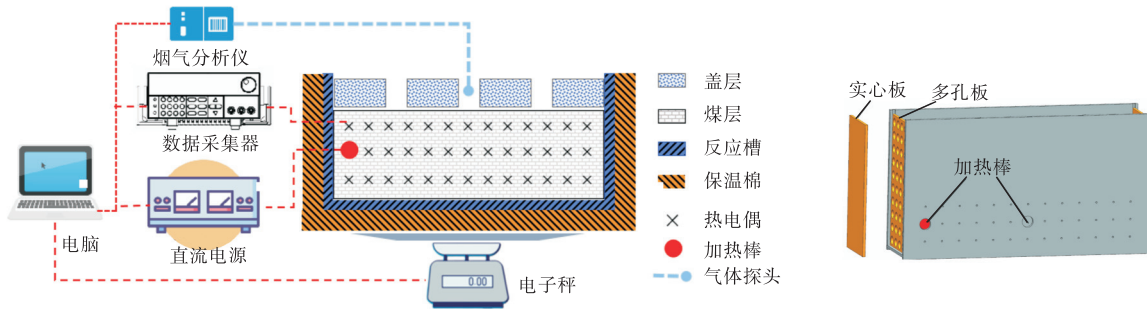
实验系统如图 2(a) 所示,主要由电子秤(昆山巨天 JW-A1)、直流电源(ITECH-IT6724B)、数据采集器(Agilent 34972A)、烟气分析仪(KANE 988)和阴燃反应槽组成. 反应槽放置于电子秤之上,通过电子秤记录实验过程中的质量损失;直流电源与加热棒相连,为加热棒提供稳定的功率输入;煤层温度变化情况通过与热电偶相连接的数据采集器显示.

反应槽是实验系统中模拟煤火传播过程的核心部件,其材质为 304 不锈钢,反应槽立体结构如图 2(b) 所示,反应槽前壁结构以及热电偶布置如图 2(c) 所示,可根据实验工况需要选择左侧点火或中部点火,反应槽侧面插板设计为可拆卸结构,可根据实验工况需要插入实心板或更换多孔板来改变侧面通风条件. 实验过程中,在反应槽周围以及底面包裹厚度约为 50 mm 的保温棉来减少热量损失.

本实验选取的煤样来自中国内蒙古张美厚煤矿,其工业分析和元素分析如表 1 和表 2 所示. 反应槽内部装填研磨筛选后粒径小于 0.5 mm 的煤样<sup>[12]</sup>,装填高度为 7.5 cm. 在煤层上方放置高度均为 50 mm 的氧化铝多孔陶瓷盖层,模拟实际地质结构中煤炭上方

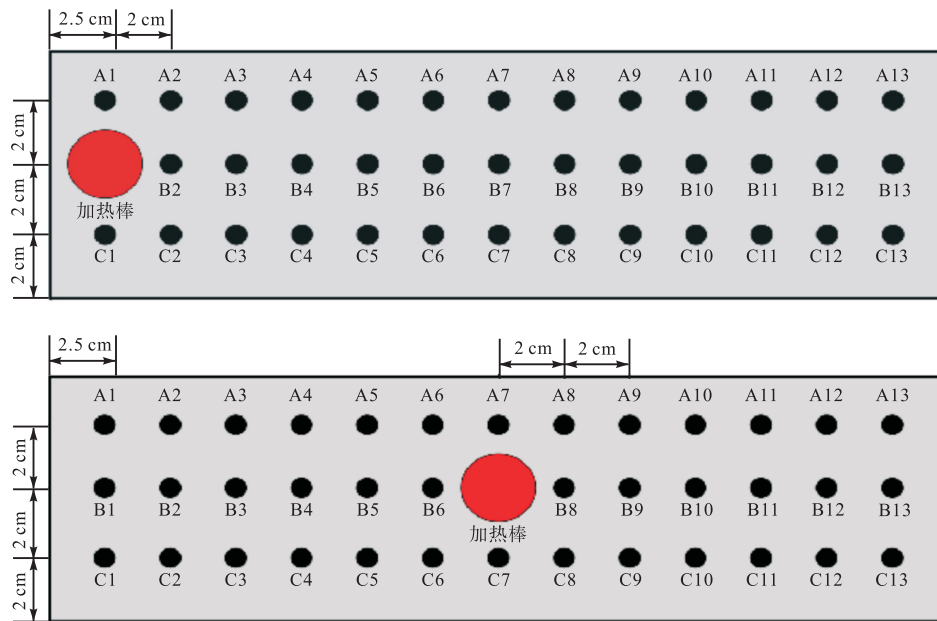
的覆盖层,其中氧化铝多孔陶瓷孔隙率为 90%,孔径大小为 10 ppi(2.54 mm). 实验中可通过更改盖层的

大小以及位置分布构造出不同的裂隙开度,模拟实际地层中尺寸不同的裂隙.



(a) 实验系统

(b) 反应槽



(c) 反应槽前壁结构

图 2 实验系统图及反应槽设计特征

Fig.2 Diagram of experimental system and design features of the reactor

表 1 煤样工业分析

Tab.1 Proximate analysis of coal sample

固定碳 $F_c, d/\%$	挥发分 $V_d/\%$	水分 $M_{ar}/\%$	灰分 $A_d/\%$	发热量 $Q/(MJ \cdot kg^{-1})$	
				高位热值	低位热值
55.85	33.19	23.20	10.96	27.40	26.51

表 2 煤样元素分析

Tab.2 Elemental analysis of coal sample

$w_C, d/\%$	$w_H, d/\%$	$w_O, d/\%$	$w_S, d/\%$	$w_{N_2}, d/\%$
69.75	4.31	12.86	1.38	0.74

### 1.2 实验方案

本研究共设计 4 个实验工况,实验工况、裂隙编号、烟气分析仪位置和陶瓷板长度布置如图 3 所示,工况设计内容如表 3 所示.

为了确定在施加盖层条件下能够成功点燃煤堆并使阴燃稳定向前传播的点火方案,设计工况 1,工

况 1 左侧盖层与煤层直接接触,右侧盖层与煤层间隔 5 mm;同时根据采动影响火源位置型煤火,设计工况 2,选择中部点火,左侧面采用多孔板,右侧放置一块长盖层,来探究裂隙间距对煤火阴燃影响;针对盖层以及裂隙开度大小对露头型煤火阴燃传播过程的影响,设计实验工况 3 和 4,其中工况 4 从左至右裂隙

开度逐渐减小。

具体实验步骤如下所示：

- (1) 启动数据采集器、烟气分析仪和电子桌称，将其数据保存频率均设置为 1 min/次；
- (2) 启动直流电源，设置输出功率 60 W (31.5 V, 1.91 A)，连续加热 4 h 后关闭电源；
- (3) 烟气分析仪测量烟气数据为零时，关闭烟气分析仪；
- (4) 当热电偶显示测点温度降至室温后，停止数据采集器以及电子秤数据保存，关闭电子秤及数据采集器电源。

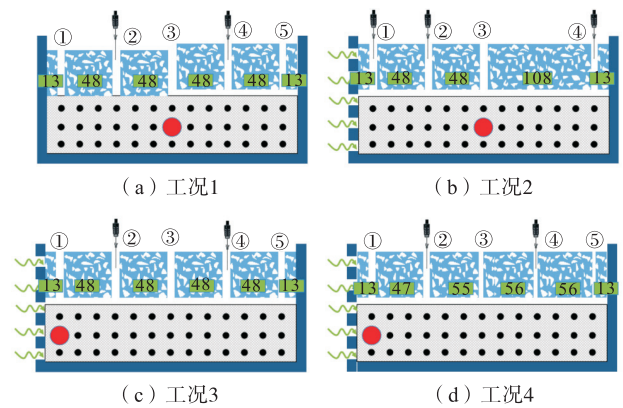


图 3 实验工况示意

Fig.3 Schematic diagram of experimental cases

表 3 实验工况设置

Tab.3 Settings of experimental cases

实验工况	点火位置	左侧板	裂隙开度(从左至右)/mm	熄火类型	研究目的
1	中	实心	①~⑤:12		探究点火方案
2	中	多孔	①~④:12	采动影响(图 1(b))	探究裂隙间距影响
3	左	多孔	①~⑤:12	露头型(图 1(a))	探究裂隙开度影响
4	左	多孔	①13、②10、③7、④4、⑤4	露头型(图 1(a))	探究裂隙开度影响

## 2 实验结果与分析

### 2.1 点火

在以往进行的实验室尺度煤阴燃传播实验中，煤床处于开口系统中，此时只需施加一段时间外加热源即可点燃煤粉。但在施加盖层条件下，经测试传统点火方案无法点燃煤床。表 4 为本研究开展之前进行的预实验点火方案，预实验中反应槽两侧插板选择实心板，但盖层与煤层直接接触。在预实验中，对加热棒位置、加热功率、加热时间、煤粉粒径和裂隙开度进

行调节，均无法点燃煤粉，同时阴燃也无法向前传播。加热棒正上方、裂隙正下方位置(同图 2(c)中 A1 或 A7 位置)煤粉通风及受热情况良好，最早发生阴燃，故绘制预实验中该位置测点温度变化曲线，如图 4 所示。其中预实验 2~5，在停火前温度变化受加热棒主导，停火后温度迅速下降。而对于无盖层的预实验 1，在停火前就已成功点燃煤粉，除受加热棒导热影响之外，自身阴燃也放出大量的热，导致温度在 1.8 h 与其他预实验工况分离，并在停火一段时间后温度不再下降而是停留在 430 °C 左右的温度平台。

表 4 预实验点火方案

Tab.4 Ignition scheme of pre-experiment

预实验	点火位置	点火功率/W	点火时间/h	煤粉粒径/mm	裂隙开度/mm	点火结果
1	左	85	4.0	≤0.5	无盖层	成功
2	左	87	7.5	≤0.5	1.2	失败
3	中	90	8.5	≤0.5	1.2	失败
4	左	90	8.0	≤0.5	10	失败
5	左	45(7 h 后增大功率)	17.5	0.5~1.0	10	失败

考虑到实际地质结构中，煤层与各岩层之间存在储气空腔及导气通道使其相互连通<sup>[13]</sup>，因此设计实验工况 1(见图 3)，为了对比更直观并减少外界因素的干扰，将工况 1 左右侧进行对比，加热棒左侧盖层与煤层直接接触，右侧盖层与煤层间隔 5 mm，在煤层与盖层之间构成一个气体通路，左右两侧盖层大小与裂隙开度完全相同，对比分析左右侧煤体阴燃情况。

选取距加热棒均为 4 cm 的测点 A5 和 A9 绘制温度曲线，如图 5 所示。这两个测点位置与裂隙距离较近，通风相对较好，同时与加热棒距离较远，温度变化受加热棒影响较小。A9 测点峰值温度为 550 °C，而 A5 测点峰值温度仅为 282 °C。在开始加热后 2.4 h 内，两处测点升温趋势一致，表明该时段内左右两侧煤均未发生反应，温度升高受加热棒放热影响。而在此之后，A5 处煤依然未发生反应，其温度变化受加

热棒控制,因此在停火 0.25 h 后温度就迅速下降.而右侧煤在停火之前就被点燃,在加热棒放热以及煤自身氧化放热的影响下温度继续升高,在停火 5.9 h 后温度才开始下降.由温度数据可以看出,将盖层与煤层分隔开的实验方法可以成功点燃煤粉.

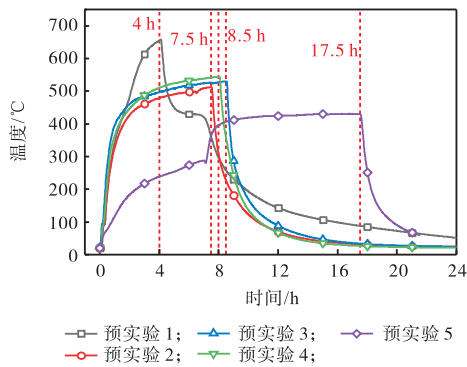


图4 预实验加热棒上方测点温度变化

Fig.4 Temperature change at the measuring point above the heating rod in pre-experiment

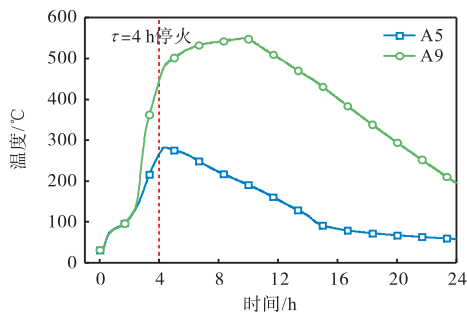


图5 工况1中A5与A9温度曲线

Fig.5 Temperature curves of A5 and A9 in case 1

绘制工况1中裂隙2和裂隙4出口烟气变化曲线,如图6所示.对于工况1第7列到第10列煤粉,裂隙3、煤层上方5 mm 气体通路、裂隙4以及外界大气共同构成了一条气体流动的通道,同时满足了阴燃发生与传播所需要的“氧气供给”与“烟气排放”.对于裂隙4,在3~6 h,出口O<sub>2</sub>与烟气均发生突变,使其供氧能力减弱,在该时间段内发挥“排烟”功能;在0~3 h及6 h之后,其出口气体中O<sub>2</sub>基本在21%左右,而烟气数值基本为零.同时在2 h时,A7煤粉已被点燃,此时A7温度已达到455 °C,阴燃放热使裂隙3内气体温度升高,在热浮力的作用下,裂隙3中气体加速向上流动,而此刻裂隙4下方A10温度仅为81 °C,在自然通风条件下,A7与A10的温度差会造成其上方气体密度产生差异,从而形成一定的压力差,在压差作用下,裂隙4中气体流速增加,供氧能力增强,使得A7处发生的阴燃能够维持并向右传播.

而对于工况1左侧,在A7处煤粉发生阴燃时,

由于盖层与煤层直接接触,氧气无法直接通过裂隙2进入煤体并到达A7位置,使得阴燃无法从A7向左侧传播.同时由于煤中水分受热蒸发和煤粉氧化反应损失一部分质量,煤体积收缩在表面形成许多不规则裂缝,这些裂缝随着阴燃传播不断蔓延扩张,而煤层上方空气通路中的氧气则可以通过这些裂缝进入下方煤体,为阴燃传播不断补充氧气,进一步促使阴燃的发生和向右侧的发展.而当煤层上方不存在气体通路时,如工况1左侧,则氧气无法及时维持阴燃的传播.

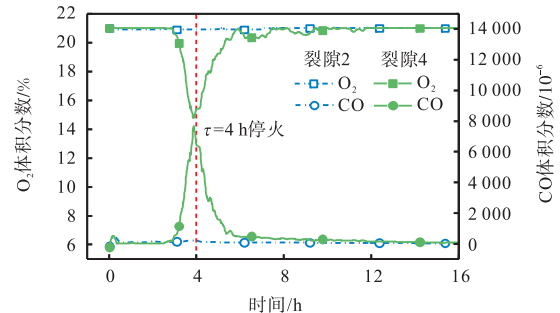


图6 工况1裂隙2与裂隙4出口烟气对比

Fig.6 Comparison of gas emission at the exit of crack 2 and crack 4 in case 1

综上所述,煤上方存在完整的气体通路,是在施加盖层情况下点燃煤粉并使阴燃稳定传播的关键.针对工况2~4,均采用此点火方案,即将盖层与煤层分隔5 mm.

## 2.2 可重复性测试

为了测试本实验系统的可重复性,对实验工况3进行了两次独立测试.图7为工况3两次实验瞬时质量与初始质量的比值变化曲线.两次实验质量损失分别为42%和42.3%,差值仅为0.3%;停止加热时,两次实验质量损失分别为14.4%和15.4%,最大差值为1%,结合质量损失曲线可以看出,两次实验质量损失吻合较好.

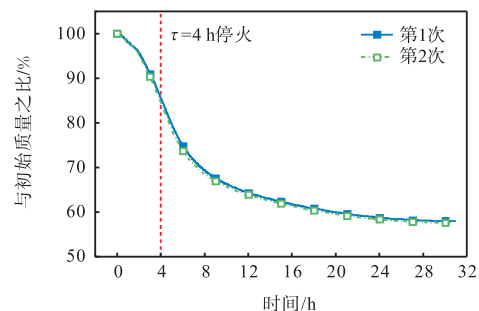


图7 工况3质量损失重复性测试

Fig.7 Repeatability test of mass loss under case 3

考虑到B层和C层受限于氧气浓度,煤阴燃反应不充分,而A层中A1、A2受加热棒影响较大,A13受壁面影响较大,绘制工况3两次实验A层3~

12 列各测点温度, 进行对比分析, 其结果图 8 所示. 各个测点温度变化趋势基本一致, 忽略由于煤床堆积密度不同等因素造成的差异, 结合质量变化情况, 认为实验系统及实验方法具有较高的可重复性.

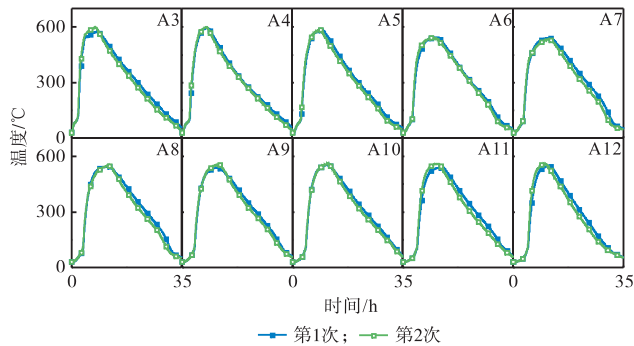


图 8 工况 3 温度重复性测试

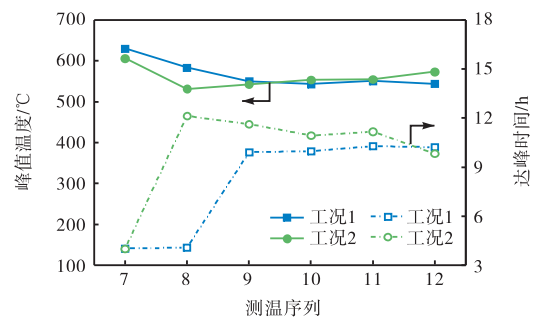
Fig.8 Temperature repeatability test under case 3

### 2.3 盖层裂隙间距对阴燃过程的影响

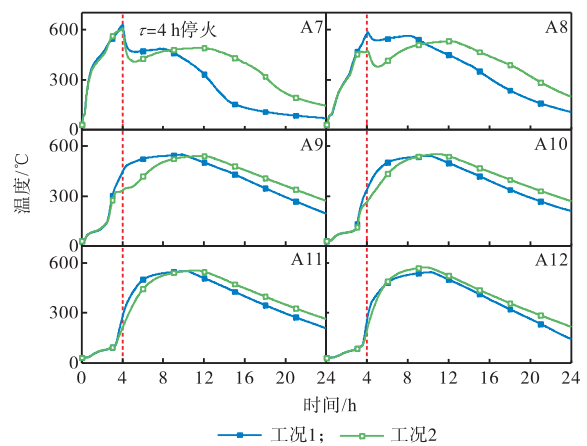
为了研究相邻裂隙间距对煤阴燃影响, 设计工况 2. 对比工况 1 和工况 2 右侧 A 层测点峰值温度和到达峰值温度的时间 (简称达峰时间) 如图 9(a) 所示. 两个工况 A7 由于位于加热棒上方, 受加热棒导热影响较大, 因而同时在停火时刻到达峰值温度; A7 和 A8 在加热棒导热和自身反应放热的影响下, 其温度高于 A 层其余测点. 峰值温度在 A9 ~ A12 基本一致, 稳定在 550 °C 左右, 体现出阴燃稳定传播的特性. 从峰值温度大小来看增大裂隙间距对阴燃结果影响不大. 但从图中可以看出工况 1 和工况 2 达峰时间并没有像峰值温度那样体现出很好的一致性. 工况 1 中达峰时间最长为 10.8 h, 出现在 A12, 体现了阴燃从左至右逐渐蔓延的规律; 而工况 2 中达峰时间最长为 12.1 h, 出现在 A8 位置. 同时从 A9 到 A12, 工况 1 达峰时间近似线性增加, 而工况 2 中达峰时间则近似线性减小.

如图 9(b) 所示, 可以明显看出在 A7 ~ A9 测点, 工况 1 与工况 2 温度曲线发生分离, 变化趋势产生差异, 而在 A10 ~ A12, 温度变化趋势较为一致. 其中 A7 温度变化差异发生在 8 h 之后, 工况 2 的 A7 温度高于工况 1 的 A7. 通过图 10(a) 工况 2 的 3 条裂隙出口 O<sub>2</sub> 变化情况可以看出, 在 8 h 之后, 与 A7 距离较近的裂隙 2 和裂隙 4 出口, O<sub>2</sub> 维持在 21% 左右, 供给氧气能力较好; 而工况 1 中左侧盖层与煤层直接接触, 裂隙 2 无法为 A7 阴燃供给氧气, 故在 8 h 之后, 工况 2 的 A7 可以在高温阶段维持更长时间, 而工况 1 的 A7 则较早进入降温阶段, 造成温度变化上的差异. 对于 A8 和 A9, 温度差异主要发生在 3 ~ 8 h, 其中 A8 位置依旧受加热棒影响较大, 故以 A9 为例绘

制图 10(b).



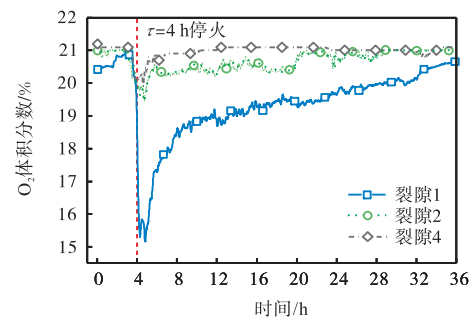
(a) A 层峰值温度及达峰时间对比



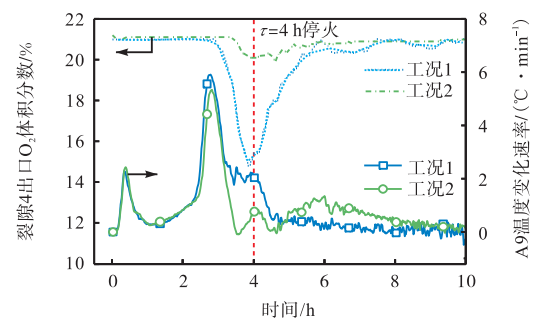
(b) 温度

图 9 工况 1 和 2 中 A 层测点对比

Fig.9 Comparison of layer A under cases 1 and 2



(a) 工况 2 裂隙出口 O<sub>2</sub>



(b) 裂隙 4 出口 O<sub>2</sub> 及 A9 温度变化速率对比

图 10 工况 1 和 2 裂隙出口烟气

Fig.10 Gas emission at crack outlet under cases 1 and 2

可以看出,两工况中 A9 温度变化速率曲线与裂隙 4 出口 O<sub>2</sub> 曲线产生差异的时间大致相同. 认为当工况 1 的裂隙 4 出口 O<sub>2</sub> 体积分数数值迅速下降,此裂隙充当烟气出口时,加热棒上方的裂隙 3 可以为下方煤阴燃供给充足的氧气,此时 A8 和 A9 能够与相对充足的氧气接触,煤氧化反应速率更快也更充分,因此在 3.26~4 h 之间,工况 1 的 A9 温度变化速率维持在 2 °C/min 附近,A9 温度继续上升,到达峰值温度的时间更短. 而相对于工况 1 右侧,工况 2 右侧本身就缺少一条裂隙,其供氧能力相对较差,且裂隙 4 出口 O<sub>2</sub> 体积分数除了在 4 h 左右产生波动、最低降至 19% 之外,大部分时间维持在 21%,因此认为此裂隙主要作为氧气入口为下方阴燃传播供给氧气,故 A12 位置供氧条件更好,煤阴燃反应速率更快,而 A8 和 A9 由于距离裂隙 4 较远,因此氧气供给出现时间上的滞后,致使 A8 和 A9 温度曲线与工况 1 对应点温度曲线发生分离,也因此 A12 比 A8 更早达到峰值温度,这也是为何从 A9 到 A12,工况 1 与工况 2 达峰时间变化趋势恰好相反. 尽管工况 2 右侧供氧条件不如工况 1 右侧,但由于其存在完整的气体通路,因此最终氧气供给会满足煤阴燃需要. 在 8 h 之后,工况 1 与工况 2 的 A8 与 A9 温度曲线变化趋势

基本相同,工况 2 右侧测点也同样达到了与工况 1 测点相近的峰值温度.

综上所述,发现无论裂隙间距长短,只要构成气体通路,下方煤均可以发生阴燃并稳定传播. 增大裂隙间距不影响阴燃最终峰值温度,但由于不同位置氧气供给的差异,会对距离供氧裂隙较远的煤阴燃反应过程产生影响.

### 2.4 盖层裂隙开度对阴燃过程影响

对比工况 3 和工况 4 研究开度不同的裂隙对煤阴燃过程的影响.

工况 3 温度曲线如图 11 所示. 加热棒周围 A1、B2 和 C1 测点处煤粉均被点燃,在加热棒导热及自身氧化放热的共同作用下,峰值温度能达到 580~660 °C 的高温. 同时也由于距离加热棒较近,在停止加热后温度突降,但由于煤粉已被成功点燃,故在一段时间后温度又出现不同程度的上升. 其中 A1 通风条件相对较好,煤粉反应更充分,停火后温度能维持在 520 °C 附近,而 B2 和 C1 由于其埋藏深度供氧条件较差,停火后温度仅维持在 370~400 °C 之间. A1 和 C1 距离侧壁较近,散热效应明显,在 10 h 左右就进入降温熄灭阶段,B2 距离侧壁面相对较远,保温效果较好,在 20 h 左右才进入降温阶段.

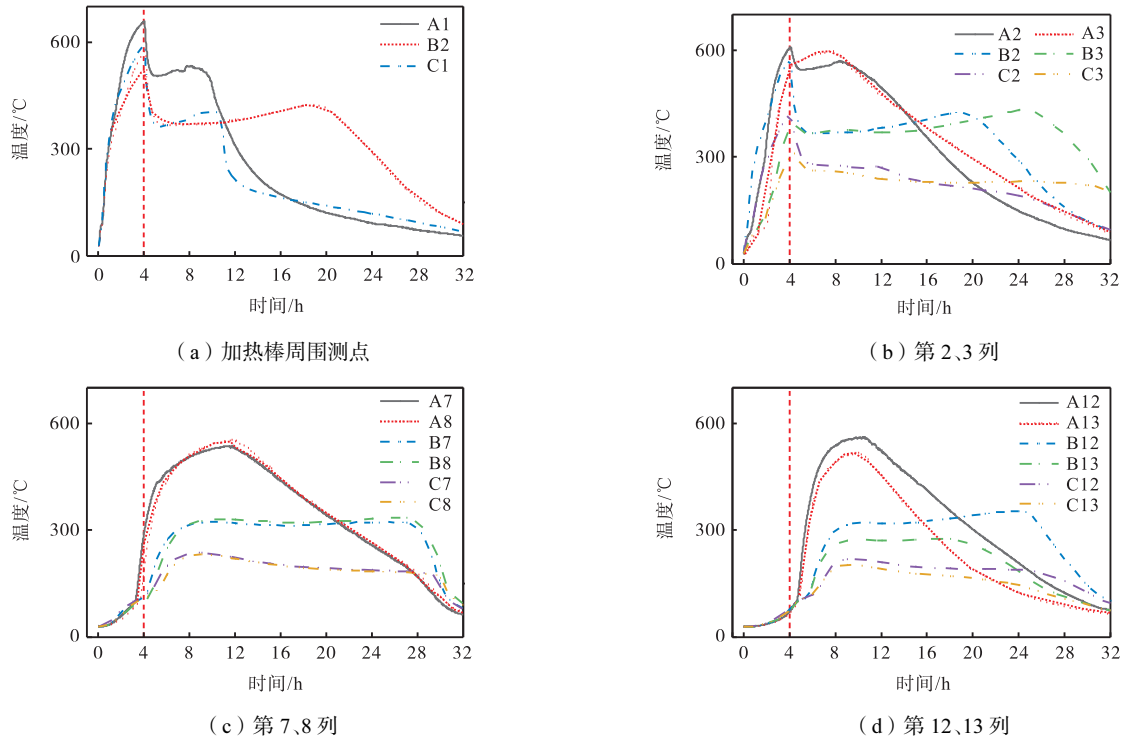


图 11 工况 3 各层温度变化

Fig.11 Temperature change of each layer under case 3

A 层通风较好,到第 3 列已摆脱加热棒影响,在停火前其自身氧化放热已超过加热棒导热,成为温度变化的主导因素,故 A3 温度曲线较为光滑,在停火

后温度未下降,反而继续升高. 而 B、C 两层受限于氧浓度,反应不充分,到第 3 列依旧受加热棒影响较大,停火时温度曲线出现明显转折,其中 B3 峰值温

度为 433 °C, 而 C3 峰值温度仅为 313 °C, 同时得益于良好的保温效果, B 层和 C 层测点进入降温熄灭阶段的时间较晚. 到了第 7~8 列, 即阴燃稳定传播的区间, A、B、C 3 层第 7 列与第 8 列测点温度变化趋势基本一致. 而在第 12~13 列, 温度曲线产生较大差异, 由于距离侧壁面较近, 受反应槽壁面导热效应影响, 各层第 13 列测点温度均低于第 12 列.

可以看出, 阴燃主要发生在 A 层, 因而盖层的影响也主要在 A 层, 减小裂隙开度对浅层煤温度影响最大. 故绘制出工况 3 与工况 4 的 A 层峰值温度及达峰时间对比如图 12 所示. 其中, 工况 3 由于盖层的存在, 对峰值温度的传播稳定性造成一定影响, 导致不同测点之间峰温产生一定差异, 最大差值达到 65 °C. 同时发现, 随着阴燃传播, 工况 3 达峰时间呈现“凸”形变化趋势, 与无盖层情况下线性变化趋势<sup>[12]</sup>有着较大差异. 而工况 4 在盖层以及渐变裂隙的影响下, 峰值温度均低于工况 3.

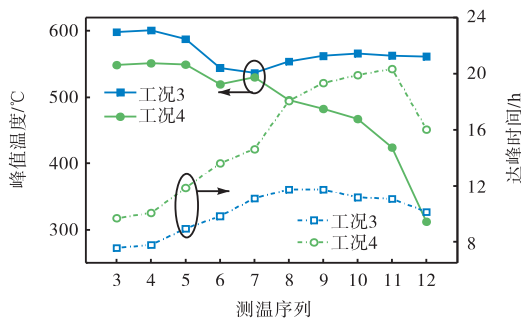


图 12 工况 3 和 4 中 A 层峰值温度及达峰时间对比

Fig.12 Comparison of peak temperature and time needed to reach peak temperature of layer A in cases 3 and 4

工况 3 与工况 4 从 A3 到 A12 温度曲线对比如图 13 所示. 可以看出, 减小裂隙开度, 对阴燃过程影响非常显著. 随着裂隙开度的减小, 工况 4 温度曲线与工况 3 温度曲线差异逐渐增加. 在工况 4 中, 裂隙 2 开度为 10 mm, 小于工况 3 裂隙 2 的 12 mm 开度, 此时 A3~A5 峰值温度维持在 550 °C 左右, 依然能够体现峰值温度稳定传播的特性; 而从 A6~A11, 受限于氧气浓度, 阴燃反应速率逐渐降低, 峰值温度的稳定传播特性遭到破坏, 峰温大小不断降低, 但阴燃依旧能够向前传播; 而到了 A12, 裂隙开度降低至 4 mm 时(裂隙 4 和 5), 阴燃已无法向前传播. 随着开度的减小, 裂隙的供氧能力逐渐降低, 阴燃传播稳定性逐渐遭到破坏, 阴燃峰值温度降低, 达峰时间也随之呈现线性增加趋势, 而 A12 达峰时间少于 A11, 说明 A12 处煤粉燃烧已十分不充分, 提前进入降温熄灭阶段.

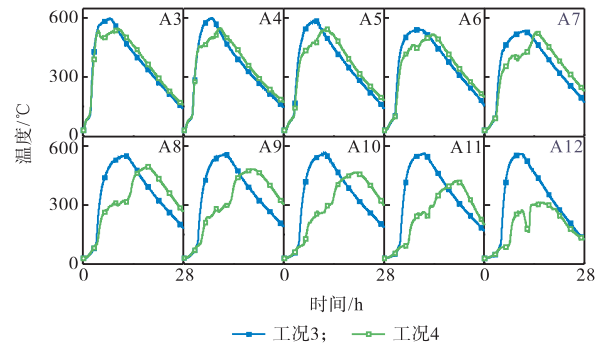


图 13 工况 3 和 4 中 A 层测点温度对比

Fig.13 Temperature comparison at layer A in cases 3 and 4

### 3 结论

(1) 在施加盖层条件下, 若要成功点燃煤床并使阴燃稳定传播, 需要构造一条气体通路, 即需要同时满足排放烟气与供给氧气的需要.

(2) 增大盖层裂隙之间的距离, 不会影响煤阴燃最终结果, 阴燃能够达到相近的峰值温度, 但会影响裂隙向下方煤层输送氧气的能力. 在工况 2 中, 距离供氧裂隙较远的 A8 和 A9 阴燃过程受到影响, 最长达峰时间出现在 A8 位置, 同时从 A9~A12 达峰时间逐渐减少, 不同于工况 1 逐渐增大的变化趋势.

(3) 盖层主要对浅层煤体产生直接影响, 并会影响阴燃峰值温度传播的稳定性.

(4) 随着裂隙开度逐渐减小, 煤阴燃反应速率逐渐下降. 在前 7 列(裂隙开度从 12 mm 变至 7 mm), 阴燃峰值温度传播较为稳定; 当裂隙开度继续减小时, 其稳定性遭到破坏, 峰值温度逐渐降低, 达峰时间也逐渐增大; 在本实验条件下, 裂隙开度为 4 mm 时, 阴燃无法传播.

### 参考文献:

- [1] Tang Z, Xu G, Yang S, et al. Fire-retardant foam designed to control the spontaneous combustion and the fire of coal: Flame retardant and extinguishing properties[J]. *Powder Technology*, 2021, 384: 258-266.
- [2] 邓 军, 屈高阳, 任帅京, 等. 地下煤火火源探测研究[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(6): 68-77.  
Deng Jun, Qu Gaoyang, Ren Shuaijing, et al. Research on underground coal fire source detection[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49(6): 68-77 (in Chinese).
- [3] 张少停. 煤层自燃: 地下的生态灾难[J]. *生态经济*, 2021, 37(4): 5-8.  
Zhang Shaoting. Spontaneous combustion of coal

- seam: Underground ecological disaster[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(4): 5-8 (in Chinese).
- [4] 张学庆, 张渝, 于明达, 等. 新疆煤田火区的危害与治理挑战[J]. 中国矿业, 2014, 23(S2): 93-95.  
Zhang Xueqing, Zhang Yu, Yu Mingda, et al. Hazards and management challenges of coal fire areas in Xinjiang [J]. *China Mining*, 2014, 23(S2): 93-95 (in Chinese).
- [5] Su H, Zhou F, Shi B, et al. Causes and detection of coalfield fires, control techniques, and heat energy recovery: A review[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2020, 27(3): 275-291.
- [6] Qi Guansheng, Lu Wei, Qi Xuyao, et al. Differences in smoldering characteristics of coal piles with different smoldering propagation directions[J]. *Fire Safety Journal*, 2018, 102: 77-82.
- [7] 王文才, 张培, 任春雨, 等. 煤田露头火区标志性气体确定的试验研究及应用[J]. 煤田科学技术, 2016, 44(3): 55-59, 128.  
Wang Wencai, Zhang Pei, Ren Chunyu, et al. Experiment study and application of indicated gas determination to fire area in outcrop of coalfield[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(3): 55-59, 128 (in Chinese).
- [8] 王聪, 李君, 付彭宾. 煤自燃过程中的温升及CO生成特性[J]. 燃烧科学与技术, 2017, 23(5): 458-464.  
Wang Cong, Li Jun, Fu Pengbin. Temperature evolution and CO formation during self-ignition of coal[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2017, 23(5): 458-464 (in Chinese).
- [9] Song Z, Huang X, Kuenzer C, et al. Chimney effect induced by smoldering fire in a U-shaped porous channel: A governing mechanism of the persistent underground coal fires[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 136: 136-147.
- [10] Li B, Li M, Gao W, et al. Effects of particle size on the self-ignition behaviour of a coal dust layer on a hot plate[J]. *Fuel*, 2020, 260: 116269.
- [11] Hadden R M. Smouldering and Self-Sustaining Reactions in Solids: An Experimental Approach [D]. Edinburgh, UK: University of Edinburgh, 2011.
- [12] Li J, Pan J, Li J. An experimental study on smouldering coal particles: Effects of air leakage and burning position in underground coal fires[J]. *Fire Safety Journal*, 2022, 133: 103665.
- [13] 黄晖, 蒋法文, 韩必武, 等. 淮南矿区A组煤层底板灰岩钻孔瓦斯喷孔综合探查分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(11): 1988-1992.  
Huang Hui, Jiang Fawen, Han Biwu, et al. Comprehensive detection analysis on the reason of abnormal gas blow-out from the drilling hole through the floor limestone of a group coal seam in Huainan mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013, 38(11): 1988-1992 (in Chinese).