

# 煤反向过滤燃烧波模型与反应-运输控制机制研究

张 浩, 宋泽阳, 赵重保, 惠绍棠, 党博源  
(西安科技大学安全科学与工程学院, 西安, 710054)

**摘要:**煤反向过滤燃烧涉及煤炭清洁燃烧、污染物和灾害防控,深入研究反向过滤燃烧波模型对我国实现碳中和以及可持续发展的目标有重要意义。但目前该模型研究尚存在几个待解决的关键问题:①传统氧气组分运输方程难以解决气固两相之间氧气非均衡的问题。②对于过滤燃烧波反向传播动态过程的动力学和供氧控制机制缺乏深入的分析。基于此,构建包含了五步反应体系的反向过滤燃烧波数值模型。同时采用 2 种不同煤样(烟煤 CC 和无烟煤 XA)在不同的流量条件下(8、32、64 L/min),对反向过滤燃烧进行试验研究。研究表明:通过试验对数值模型进行了验证,所构建的模型与试验吻合较好,且其成功预测了反向过滤燃烧波传播过程。随着流量降低,氧气的供应减弱,反应活性减小,峰值温度与传播速率随之减少。同时,峰值温度也受煤样种类的影响,在同一流量条件下,XA 煤样的温度要低于 CC 煤样。随着反应温度增加,反应速率加快,反向过滤燃烧的控制机制由动力学机制向氧气传输机制转变。

**关键词:**过滤燃烧;燃烧波;地下煤气化;阴燃;控制机制

**中图分类号:**TD75+2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2025)01-0164-09

## Reverse filtration combustion wave of coal and kinetic-transport regimes

ZHANG Hao, SONG Zeyang, ZHAO Chongbao, HUI Shaotang, DANG Boyuan

(College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, 710054)

**Abstract:** Coal reverse filtration combustion involves clean coal combustion, pollutant and disaster prevention and control. In-depth study of reverse filtration combustion wave model is of great significance for China to achieve carbon neutrality and sustainable development. In-depth study of the reverse filtration combustion wave model is of great significance for China to achieve the goal of carbon neutrality and sustainable development. However, there are still several key problems to be solved in this model: ① The traditional oxygen component transport equation is difficult to solve the problem of oxygen non-equilibrium between gas and solid phases. ② There is a lack of in-depth analysis of the dynamics and oxygen supply control mechanism of the reverse propagation dynamic process of filtration combustion wave. Based on this, a numerical model of reverse filtration combustion wave including five-step reaction system is constructed. At the same time, two different coal samples (bituminous coal CC and anthracite XA) were used to study the reverse filtration combustion under different flow conditions (8, 32, 64 L/min). The results show that: The model is in good agreement with the experiments, and it successfully predicts the propagation process of reverse filtration combustion wave. As the flow rate decreases, the reduction in oxygen supply leads to reduced reactivity, resulting in a decrease in both peak temperature and propagation rate. At the same time, the peak temperature is also affected by the type of coal sample. Under the same flow condition, the temperature of XA coal sample is lower than that of CC coal sample. As the reaction temperature increases, the reaction rate accelerates, and the limiting conditions of reverse filtration combustion from kinetic mechanism to oxygen transport mechanism.

**Key words:** filtration combustion; combustion wave; underground coal gasification; smoldering; control mechanism

收稿日期:2023-10-17;策划编辑:;责任编辑:李雅楠 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.23101701

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51804168);陕西省科技厅面上资助项目(2023-JC-YB-432);陕西省高层次青年科技人才项目和新疆重点研发资助项目(2022B03025-2)

作者简介:张 浩(1997—),男,山西临汾人,硕士。E-mail: haoz\_0807@163.com

通讯作者:宋泽阳(1986—),男,湖南长沙人,副教授。E-mail: zeyang.song@xust.edu.cn

引用格式:张浩,宋泽阳,赵重保,等.煤反向过滤燃烧波模型与反应-运输控制机制研究[J].洁净煤技术,2025,31(1):164-172.

ZHANG Hao, SONG Zeyang, ZHAO Chongbao, et al. Reverse filtration combustion wave of coal and kinetic-transport regimes[J].Clean Coal Technology, 2025, 31(1): 164-172.



## 0 引 言

在全球范围内,减少温室气体排放和应对气候变化已经成为各国共同关注的焦点。双碳目标为我国一项重要的倡议,旨在实现碳的净零排放以及可持续发展。在这一背景下,煤作为传统能源,其燃烧不仅排放大量的二氧化碳,还会释放出各种有害气体和颗粒物,对环境造成严重影响。因此,寻求煤的新型清洁利用方式尤为重要。

过滤燃烧指的是以多孔介质为载体的非均相与均相都包含的化学反应过程<sup>[1-2]</sup>。地下煤火为过滤燃烧的一种形式,主要状态为阴燃状态,其主要靠氧气攻击固体表面维持燃烧,多孔介质中的气体渗流则是过滤燃烧的一个潜在原因<sup>[3]</sup>。煤的反向过滤燃烧表现为火焰传播的方向与氧气供应方向相反<sup>[4]</sup>,地下煤气化技术就是利用反向过滤燃烧理论,将煤层反向燃烧,得到可燃气体<sup>[5-6]</sup>。作为一项可将煤炭转化为清洁燃料和化学品的创新技术,其大大减少了碳排放以及资源浪费。此外,反向过滤燃烧现象还存在于很多方面。在采空区域内,通过进风巷向工作面输送稳定的气流,未开采的煤层可能会蓄积热量,进而达到过滤燃烧条件,从而引发反向燃烧<sup>[7]</sup>。此外,大型的煤炭堆积也容易积聚热量,并在与周围空气接触的表面发生反应,从而引发过滤燃烧波反向传播的现象。因此,反向过滤燃烧的研究在煤矿安全和环保领域中变得至关重要。

由于现场勘探存在巨大的困难和高度危险性,在管理地下煤火风险、优化地下煤气化过程中,数值模型是一种极为有效的研究工具。其通过数值计算流场的运动状态、温度场的分布以及气体成分的变化等参数,有效模拟反向过滤燃烧过程。因此,针对过滤燃烧问题,各位研究学者提出了不同的见解。BLINDERMAN 等<sup>[8]</sup>基于煤层气化阶段,通过数值计算对反向过滤燃烧以及正向过滤燃烧进行了对比,对过滤燃烧中不稳定因素进行了分析。BHUTTO 等<sup>[9]</sup>基于过滤燃烧的煤气化过程,对其动力学数值模型研究成果进行了总结。JIANG 等<sup>[6]</sup>对煤气化过程进行了数值模拟,结果表明过滤燃烧中反应动力学和热传递是其传播的限制因素。WAHLE 等<sup>[10]</sup>利用数值模型对反向过滤燃烧的气固不平衡问题进行了探讨。尹智成<sup>[11]</sup>对多尺寸颗粒堆积床内过滤燃烧特性进行试验与数值模拟研究。张森<sup>[12]</sup>推导了应用于煤炭地下气化中渗流气化阶段以及燃空区形成的早期阶段内的流动模型。尽管这些模型都探究了过滤燃烧过程中的影响因素以及规律,但仍存在一些局限性:一是传统模型并不能解决气固两相

之间的氧气非均衡问题。二是尚未对过滤燃烧过程中的控制机制进行分析。

本研究旨在解决上述模型中的不足,且在此基础上探究煤反向过滤燃烧的控制机制。笔者建立了过滤燃烧波的五步反应供氧控制模型(包含水分蒸发、热解以及三步氧化),整合了动力学和氧气传输控制机制。并从颗粒尺度的多孔介质气固两相的氧气组分运输方程出发,推导出了适用于燃料层尺度的动力学反应-供氧控制机制氧气组分运输方程,它将气固两相氧浓度非均衡方程简化为氧浓度均衡方程。同时,通过利用相似的煤过滤燃烧试验平台,研究了强对流条件下煤体温度的变化和过滤燃烧的传播行为,以此验证模型的可靠性。这些研究为过滤燃烧的潜在机制提供了理论基础,对煤炭清洁利用具有一定的现实意义。

## 1 试 验

### 1.1 试验系统

如图 1 所示,试验系统主要由点火系统、供风系统和温度测量系统所构成。试验在圆柱形燃烧室内进行,其直径为 12 cm,高度为 60 cm。在供风系统中加入稳压阀,确保风流的稳定供应。燃烧室底部铺设了砂石,以使进入反应区域的风流更加均匀。流量计用于监测、调节进入燃烧室的流量。通过实时监测流量计的读数,对流量进行精确控制。通过点火装置进行加热,使其满足初始温度。电脑连接数据采集器,监控、记录和输出试验数据。

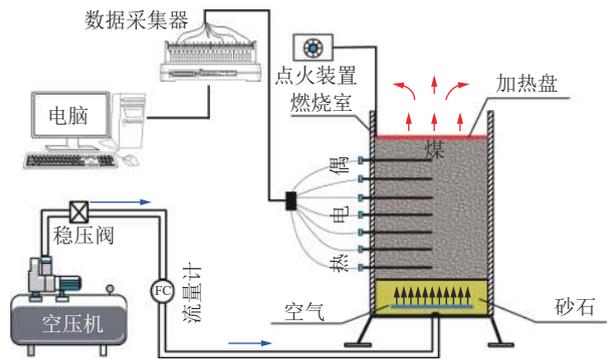


图 1 反向过滤燃烧试验装置

Fig. 1 Experimental device diagram of reverse filtration combustion

### 1.2 试验过程

1) 前期准备。对已经采集到的常村(CC)煤样和新安(XA)煤样进行破碎和筛选,得到 6 mm 粒径的煤样。仔细检查试验设备,包括确定是否需要更换热电偶、验证连接线路的完好性以及确保管道连接点的密封性。

2) 试验装填, 连接设备。首先将将剪裁好的保温棉塞入燃烧室内, 再将称量好的 6 mm 大小的 XA 或 CC 煤样装入燃烧炉, 并正确连接通气管道。在燃烧室的顶部安装 1 个点火器, 确保点火器的热通量在 15 ~ 25 KW/m<sup>2</sup> 之间。燃烧室的中心设有 7 个 K 型热电偶, 分别标记为 TC1 至 TC7, 用于测量过滤燃烧波传播过程中的温度变化。在燃烧室的底部设置供风装置, 并将流量计分别调整至 8、32、64 L/min 进行试验。

3) 开始试验。设定 TC1 的阈值为 600 °C, 当达到该阈值时点火装置自动关闭, 利用数据采集器实时记录 TC1 ~ TC7 温度的动态变化, 当温度传播到 TC7 时, 手动关闭空压机, 停止供风, 每组试验重复 2 次。

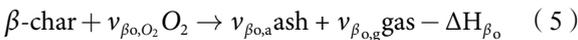
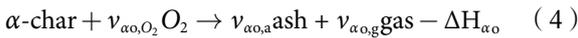
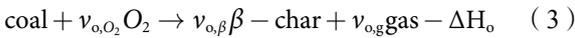
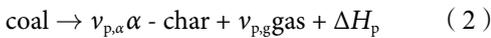
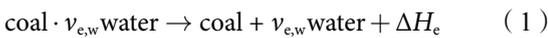
4) 试验结束。确保燃烧室内温度降至室温后, 收集燃烧室内残余灰分, 对其进行称量。保存好测量数据, 清理试验装置供下次使用, 每组试验重复 2 次。

## 2 数学模型

为了更好地解释试验结果并理解氧气传输和动力学控制机制在煤过滤燃烧过程中的作用, 本次研究选用了二维数值模型。该模型已经成功模拟了热浮力驱动下的地下煤火<sup>[13]</sup>。

### 2.1 五步反应步骤

煤过滤燃烧波区域的化学反应主要包括: 水蒸发 (w)、煤热解 (p)、碳氧化 (co)、β-碳氧化 (βo)、α-碳氧化 (αo):



化学反应 (燃料消耗) 速率由 Arrhenius 方程表示:

$$r_i = \rho_j Y_j^{n_i} Y_{\text{O}_2}^{m_i} A_i e^{-E_i/RT_s} \quad (6)$$

其中, 下标  $i$  表示化学反应; 下标  $j$  表示固体物质的分步反应: 水分蒸发、煤热解、碳氧化、α 碳以及 β 碳氧化;  $v_i$  表示化学计量数;  $r_i$  表示反应速率, kg/m<sup>3</sup> · s;  $\rho_j$  表示不同固体物质的密度;  $Y_j$  和  $Y_{\text{O}_2}$  分别表示固体组分和氧气的质量分数;  $T_s$  表示固体温度;  $A$ 、 $E$ 、 $n_i$  和  $m_i$  分别表示指前因子 (1/s)、活化能 (kJ/mol)、反应级数。值得注

意的是氧化反应和蒸发/热解的反应级数  $m$  分别为 1 和 0。

### 2.2 守恒方程

#### 2.2.1 氧气传输方程

$$\varphi \frac{\partial \rho_{\text{O}_2}}{\partial t} + \nabla \cdot (u \rho_{\text{O}_2}) = \varphi D_g \nabla^2 \rho_{\text{O}_2} - \sum_i \min(\rho_{\text{O}_2,i}^R, u \frac{\rho_{\text{O}_2}}{\delta}) \quad (i=\text{co}, \alpha o, \beta o) \quad (7)$$

其中,  $\rho_{\text{O}_2}$  为氧气的密度;  $D_g$  为气体扩散系数; 其中  $\delta$  为氧气浓度特征长度, 该数值在一定范围内随流量变化而变化。 $\rho_{\text{O}_2,i}^R$  为多次氧化反应的总耗氧量, 用 Arrhenius 公式表示为

$$\rho_{\text{O}_2,i}^R = v_{i,\text{O}_2} r_i = v_{i,\text{O}_2} \rho_j Y_j^{n_i} Y_{\text{O}_2}^{m_i} A_i e^{-E_i/RT_s} \quad (8)$$

因此反应过程中的燃料消耗率可用最小函数表示为

$$r_i' = \min\left(\rho_j Y_j^{n_i} Y_{\text{O}_2}^{m_i} A_i e^{-E_i/RT_s}, u \frac{\rho_{\text{O}_2}}{v_{i,\text{O}_2} \delta}\right) \quad (i=\text{co}, \alpha o, \beta o) \quad (9)$$

#### 2.2.2 固体质量守恒方程

化学反应方案涉及 5 种固体物质, 5 种固体的质量守恒方程如下:

$$\frac{(1-\varphi) \partial \rho_{\text{water}}}{\partial t} = -r_e \quad (10)$$

$$\frac{(1-\varphi) \partial \rho_{\text{coal}}}{\partial t} = -r_p - r_{\text{co}}' \quad (11)$$

$$\frac{(1-\varphi) \partial \rho_{\alpha\text{-char}}}{\partial t} = v_{p,\alpha} r_p - r_{\alpha o}' \quad (12)$$

$$\frac{(1-\varphi) \partial \rho_{\beta\text{-char}}}{\partial t} = v_{\text{co},\beta} r_{\text{co}}' - r_{\beta o}' \quad (13)$$

$$\frac{(1-\varphi) \partial \rho_{\text{ash}}}{\partial t} = v_{\alpha o,\text{a}} r_{\alpha o}' + v_{\beta o,\text{a}} r_{\beta o}' \quad (14)$$

$$\bar{\rho}_s = \rho_{\text{water}} + \rho_{\text{coal}} + \rho_{\alpha\text{-char}} + \rho_{\beta\text{-char}} + \rho_{\text{ash}} \quad (15)$$

式中:  $\varphi$  表示煤样中的孔隙率;  $\bar{\rho}_s$  表示总的固体物质密度。

#### 2.2.3 气体质量守恒方程

$$\frac{\varphi \partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (u \rho_g) = v_w r_w + (1 - v_{p,\alpha\text{-char}}) r_p + \sum (1 - v_{ij}) r_i' \quad (i = \text{co}, \alpha o, \beta o; j = \beta\text{-char}, \text{ash}) \quad (16)$$

式中:  $u$  为气体流动的速度, m/s。

#### 2.2.4 能量守恒方程

$$\bar{C}_{ps} = \sum C_{pj} Y_j \quad (17)$$

$$\bar{k}_s = \sum k_{sj} Y_j + k_{\text{rad}} = \sum k_{sj} Y_j + 16 \sigma d T_s^3 / 3 \quad (18)$$

$$(1-\varphi)(\bar{\rho}_s \bar{C}_{ps})_{\text{eff}} \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1-\varphi) \bar{k}_s \nabla^2 T_s + \sum_{i=e,p} r_i \Delta H_i + \sum_{i=\text{co}, \alpha o, \beta o} r_i' \Delta H_i - \frac{6h_{\text{sg}}(1-\varphi)}{d} (T_s - T_g) \quad (19)$$

其中,  $\bar{C}_{ps}$  和  $\bar{k}_s$  分别代表 5 种固体的比热容和导热系数;  $T_s$  为气体温度,  $T_g$  为气体温度。在式 (18) 中, 热辐射是一个传导项, 用 Rosseland 近似表示为  $k_{rad} = 16\sigma d T_s^3/3$ <sup>[14-16]</sup>。假设煤颗粒为球形, 则单位体积表面积计算为  $6(1-\phi)/d$ <sup>[16]</sup>, 见等式 (19)。

$$\begin{aligned} \phi \rho_g C_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial t} + C_{pg} \rho_g \cdot \nabla(u T_g) = \\ \phi k_g \nabla^2 T_g + \frac{6h_{sg}(1-\phi)}{d}(T_s - T_g) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} C_{pg} = (-3 \cdot 10^{-5} \times (T_g)^2 + 0.2261 \times (T_g) + 940.35) \\ k_g = (-1 \times 10^{-8} \times (T_g)^2 + 8 \times 10^{-5} \times \\ (T_g) + 4.3 \times 10^{-3}) \end{aligned} \quad (22)$$

在式 (20)~式 (22) 中,  $C_{pg}$  为气体的比热容;  $k_g$  为气体导热系数。在过滤燃烧中, 气体和固体之间的传热公式一直是待探究的问题, 而气固之间的热平衡以及热不平衡对于过滤燃烧的过程有不同的影响。本研究根据气固之间的热不平衡假说, 根据经验传热关联式<sup>[17]</sup> 得到使用的气-固界面传热系数 ( $h_{sg}$ ), 气固热交换系数如下所示:

$$h_{sg} = \frac{k_g Nu}{d} = \frac{k_g}{d} (0.001 Re^{1.97} Pr^{1/3}) \quad (23)$$

式中:  $Nu$  为努塞尔数;  $Re$  为雷诺数;  $Pr$  为普朗特数。

### 3 数值模拟

数值模拟主要采用 COMSOL Multiphysics 软件计算, 其主要调用传热模块和化学工程模块, 对能量守恒方程、质量守恒方程和气体组分扩散进行建模, 并选择迭代求解的方法, 使用带有自适应网格生成器的 GMRES 求解器。为了减少计算量, 笔者选择了二维轴对称模型, 仅计算域的右半域。模型采用自由三角形网络超细化划分, 单元数为 7 407 个, 最小单元质量为 0.668, 平均单元质量为 0.961 4。

数值计算初始条件如下:

$$\begin{cases} \rho_{O_2}|_{t=0} = \rho_{O_2} \\ \rho_{coal}|_{t=0} = (1 - Y_w) \rho_s \\ \rho_{water}|_{t=0} = Y_w \rho_s \\ \rho_{char/ash}|_{t=0} = 0 \\ T_s|_{t=0} = T_a \\ T_g|_{t=0} = T_a \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $Y_w$  表示煤中水分的质量分数。数值计算的边界条件如下:

$$\begin{cases} \rho_{O_2}|_{bottom} = \rho_{O_2} \\ T_g|_{bottom} = T_a \\ k_g \nabla T_g|_{bottom} = -h_{bottom}(T_g - T_a) \\ -\varepsilon \sigma (T_g^4 - T_a^4) \\ (k_s + k_{rad}) \nabla T_s|_{bottom} = -h_{bottom}(T_s - T_a) \\ -\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) \end{cases} \quad (25)$$

式 (25) 为数值模型的底部边界条件, 其中  $h_{bottom}$  为底边界换热系数。

$$\begin{cases} D_g \nabla \rho_{O_2}|_{top} = 0 \\ (k_s + k_{rad}) \nabla T_s|_{top} = \begin{cases} q' - h_{top}(T_s - T_a) \\ -h_{top}(T_s - T_a) \end{cases} \\ k_g \nabla T_g|_{top} = -h_{top}(T_g - T_a) \end{cases} \quad (26)$$

式 (26) 为数值模型的顶部边界条件, 其中  $h_{bottom}$  为底边界换热系数。

$$\begin{cases} D_g \nabla \rho_{O_2}|_{lateral} = 0 \\ k_g \nabla T_g|_{lateral} = -h_{lateral}(T_g - T_a) \\ -\varepsilon \sigma (T_g^4 - T_a^4) \\ (k_s + k_{rad}) \nabla T_s|_{lateral} = -h_{lateral}(T_s - T_a) \\ -\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) \end{cases} \quad (27)$$

式 (27) 为数值模型的侧边界条件, 其  $h_{lateral}$  为侧边界换热系数。

数值模型涉及的动力学参数和热值见表 1, 数值计算涉及的输入参数见表 2。本研究对 6 种不同工况进行了数值模拟, 见表 3。

## 4 结果与讨论

### 4.1 模型验证

为了更好的对比不同工况下的结果, 对试验以及数值模拟进行时间上的无量纲化处理, 公式如下<sup>[18]</sup>:

$$DT = (t - t_{ig})v_f/L \quad (28)$$

式中:  $DT$  为无量纲时间;  $t$  为试验或模拟的传播时间,  $t_{ig}$  为加热时间;  $v_f$ , 即传播速率, 其定义为 2 个热电偶或者探针之间的距离与其达到峰值温度所对应的时间差的比值<sup>[19]</sup>, 单位为 m/h;  $L$  为试验或者模拟的煤层高度。

数值模拟与试验结果的对比如图 2 所示, 其中图 2a—图 2c 和图 2d—图 2f 分别表示常村煤样与新安煤样在流量为 8、32、64 L/min 的对比结果。试验与模拟结果吻合较好, 在不同时刻试验和模拟的燃烧距离以及传播速率基本相同。相较于数值模型, 试验中的降温速率较为缓慢, 这种差异的根本原因可能在于试验过程中燃烧室底部存在稳定的风流砂石颗粒, 而数值模型中未考虑砂石颗粒的传热影响。

### 4.2 反向燃烧波特性的研究

随着流量增加, 煤过滤燃烧的传播速率呈现加快的趋势, 相应地, 峰值温度也随之升高, 这一趋势与之前马增益等<sup>[20]</sup> 和胡俊等<sup>[21]</sup> 的研究结果一致。如图 2a—图 2c 所示, 对于 CC 煤样, 当流量从 32 L/min 增至 64 L/min, 其峰值温度相较于前者升高约 150 °C, 而与流量为 8 L/min 时相比升高约

表 1 五步反应的动力学参数、化学计量数以及反应热

Table 1 Kinetic parameters, stoichiometric number and reaction heat of the five-step reaction

反应	煤样种类	指前因子 $A_j/(s^{-1})$	活化能 $E_j/(kJ \cdot mol^{-1})$	反应级数 $n_i$	化学计量系数 $\nu_j$	反应热 $\Delta H/(MJ \cdot kg^{-1})$
水分蒸发	常村	$1.318 \times 10^8$	67.800	3	-	2.26
	新安	$1.318 \times 10^8$	67.800	2	-	2.26
煤热解	常村	$2.592 \times 10^{10}$	194.662	8	0.731-	0.335
	新安	$1.896 \times 10^8$	164.841	2	0.981-	0.335
碳氧化	常村	$3.291 \times 10^{14}$	220.612	1	$\nu_{o,O_2}=1.796$ $\nu_{o,\beta}=0.423$	23.527
	新安	$1.430 \times 10^8$	139.682	2	$\nu_{o,O_2}=1.877$ $\nu_{o,\beta}=0.848$	24.583
$\alpha$ 碳氧化	常村	$1.187 \times 10^{10}$	166.285	2	$\nu_{\alpha o,O_2}=2.164$ $\nu_{\alpha o,\alpha}=0.203$	28.351
	新安	$1.616 \times 10^8$	155.030	1	$\nu_{\alpha o,O_2}=2.108$ $\nu_{\alpha o,\alpha}=0.144$	27.612
$\beta$ 碳氧化	常村	$1.812 \times 10^{10}$	208.913	1	$\nu_{\beta o,O_2}=2.164$ $\nu_{\beta o,\alpha}=0.144$	28.351
	新安	$3.460 \times 10^9$	170.922	1	$\nu_{\beta o,O_2}=2.108$ $\nu_{\beta o,\alpha}=0.167$	27.612

表 2 反向过滤燃烧数值模型参数

Table 2 Numerical model parameters of reverse filtration combustion

参数	数值	参数	数值
孔隙率 $\varphi$	0.55(常村),0.45(新安)	传热系数 $k/(W \cdot (m \cdot K^{-1}))$	$k_{coal}=0.2$
加热功率 $q/(KW \cdot m^{-2})$	12(常村), 15(新安)		$k_{water}=0.6$
环境温度 $T_a/K$	293.15		$k_{char}=0.26$
煤体密度 $\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$	1 482(常村), 1 453(新安)		$k_{ash}=0.8$
气体密度 $\rho_g/(kg \cdot m^{-3})$	1.185	加热时间 $t/s$	$t_{ig}=1\ 200$
氧气密度 $\rho_{O_2}/(kg \cdot m^{-3})$	0.27	气体扩散系数 $D_g/(m^2 \cdot s^{-1})$	$1.5 \times 10^{-5}$
比热容 $C/(J \cdot (kg \cdot K^{-1}))$	$C_{p,coal}=1\ 320$ $C_{p,water}=4\ 186$ $C_{p,char}=1\ 260$ $C_{p,ash}=880$	边界散热系数 $h/(W \cdot (m^3 \cdot K)^{-1})$	$h_{bottom}=20$ $h_{top}=5$ $h_{lateral}=30$
斯忒藩-玻尔兹曼常数 $\sigma/(W \cdot (m^2 \cdot K^{-4}))$	$5.67 \times 10^{-8}$	煤样粒径 $\sigma/m$	0.006
		辐射系数 $\epsilon$	0.06

250 ℃。如图 2d—图 2f 所示, XA 煤样在流量为 8 L/min 时的峰值温度较 32 L/min 和 64 L/min 分别降低了约 250 ℃ 和 350 ℃。这种现象的主要原因在于, 较大的气体流量导致过滤燃烧区域氧气供应更为充足, 这进一步促使燃烧反应加剧, 氧化程度增

加, 从而释放更多热量, 导致峰值温度的升高。

在相同的流量条件下, 常村煤样的峰值温度较新安煤样要高, 这一观察结果与 SONG<sup>[13]</sup> 的研究一致。随着气体流量的变化, 这 2 种煤样之间的差异也呈现不同的变化趋势。如图 2a 和图 2c 所示, 在

表3 反向过滤燃烧数值模型工况

Table 3 Reverse filtration combustion numerical model conditions

编号	煤样种类	流量/(L·min <sup>-1</sup> )	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	氧浓度特征长度/m
1	CC(烟煤)	8	0.027	0.008
2	CC(烟煤)	32	0.106	0.003
3	CC(烟煤)	64	0.212	0.003
4	XA(无烟煤)	8	0.027	0.008
5	XA(无烟煤)	32	0.106	0.003
6	XA(无烟煤)	64	0.212	0.002

流量为 8 L/min 时, 常村煤样的峰值温度相较于新安煤样高出约 200 °C; 如图 2b 和图 2d 所示, 在 32 L/min 的流量条件下, 温度差约为 50 °C 左右; 如图 2c 和图 2f 所示, 当流量增至 64 L/min, 常村煤样的峰值温度相较于新安煤样高出约 120 °C 左右。由于烟煤和无烟煤的微观结构以及化学反应活性不同, 导致 2 种煤样温度存在差异。烟煤通常具有更多的孔隙结构, 提供了更多的反应表面积, 从而促进氧化反应产生, 且其反应活性比无烟煤更强。

在误差允许范围内, TC1—TC6 以及模拟结果中测得的 6 个不同位置的峰值温度均基本保持一致。

此外, 从图中可以观察到, 随着流量的增大,

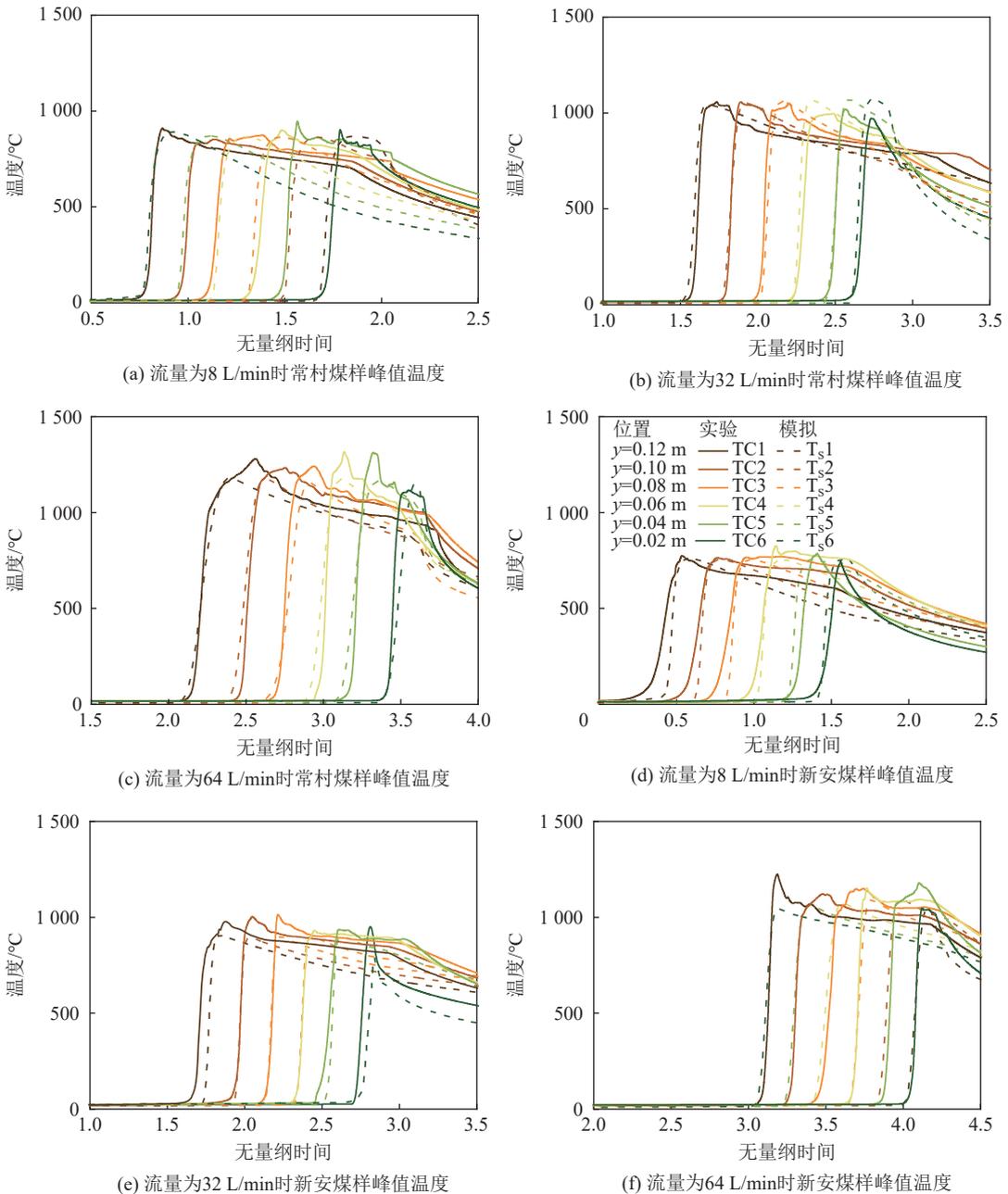


图2 反向过滤燃烧数值模型与试验对比

Fig. 2 Reverse filtration combustion numerical model and experimental comparison diagram

过滤燃烧波传播开始时间开始向后推迟。这个现象产生的原因是，随着流量的增大，燃烧区域内的散热增加，从而需要更长的加热时间才能达到过滤燃烧波传播的条件。

图 3a 和图 3b 分别为 CC 煤样和 XA 煤样在不同流量下的试验和模拟残余碳的质量分数。通过对

比发现，同一流量条件下，由于煤样内部结构以及化学活性不同，CC 煤样所剩残余碳的质量分数基本低于 XA 煤样，这可能与煤样本身所含碳含量有关，即无烟煤初始碳含量高于烟煤的碳含量，也可能由于 CC 煤样比 XA 煤样燃烧的更为充分，该推论与图 2 中的峰值温度规律吻合。

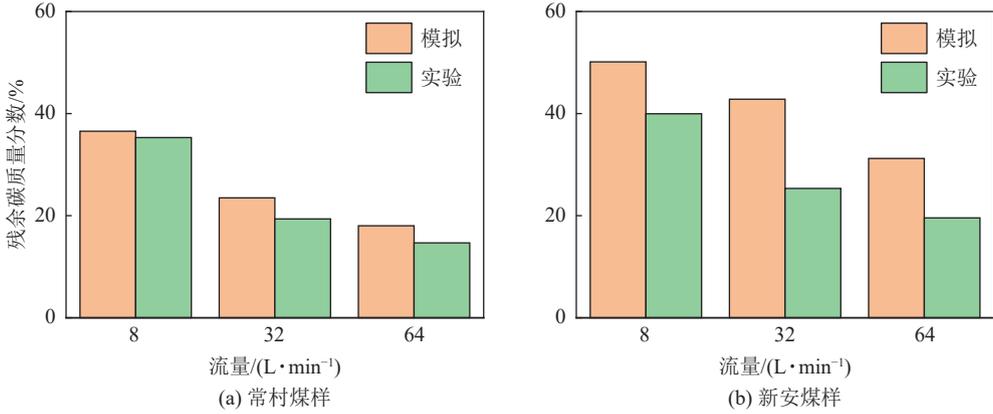


图 3 残余碳质量分数对比

Fig. 3 Residual carbon mass fraction comparison diagram

随着流量增加，氧气供应增加，化学反应也增强，2 种煤样残余碳的质量分数减少。数值模型中未考虑气体产物 CO 以及碳的反应等，导致模拟中残余碳的质量分数高于试验。此外，试验中残余碳的收集称量存在误差，这也是试验结果低于数值模拟结果的原因之一。

### 4.3 反向燃烧波控制机制研究

达姆科勒数是一个无量纲数，用于将化学反应

的时间尺度与氧气运输限制的运输时间尺度联系起来，来判别过程中的控制机制作用，其表达式如下：

$$Da = \frac{v_{i,O_2} \rho_j Y_j^{n_i} Y_{O_2}^{m_i} A_i e^{-E_i/RT_s}}{u \frac{\rho_{O_2}}{\delta}} \quad (29)$$

2 种煤样的动力学和氧传输限制机制分别如图 4—图 5 所示。从上至下分别是常村煤样和新安煤样的 3 个氧化阶段(碳氧化， $\alpha$ -碳氧化以及  $\beta$ -碳

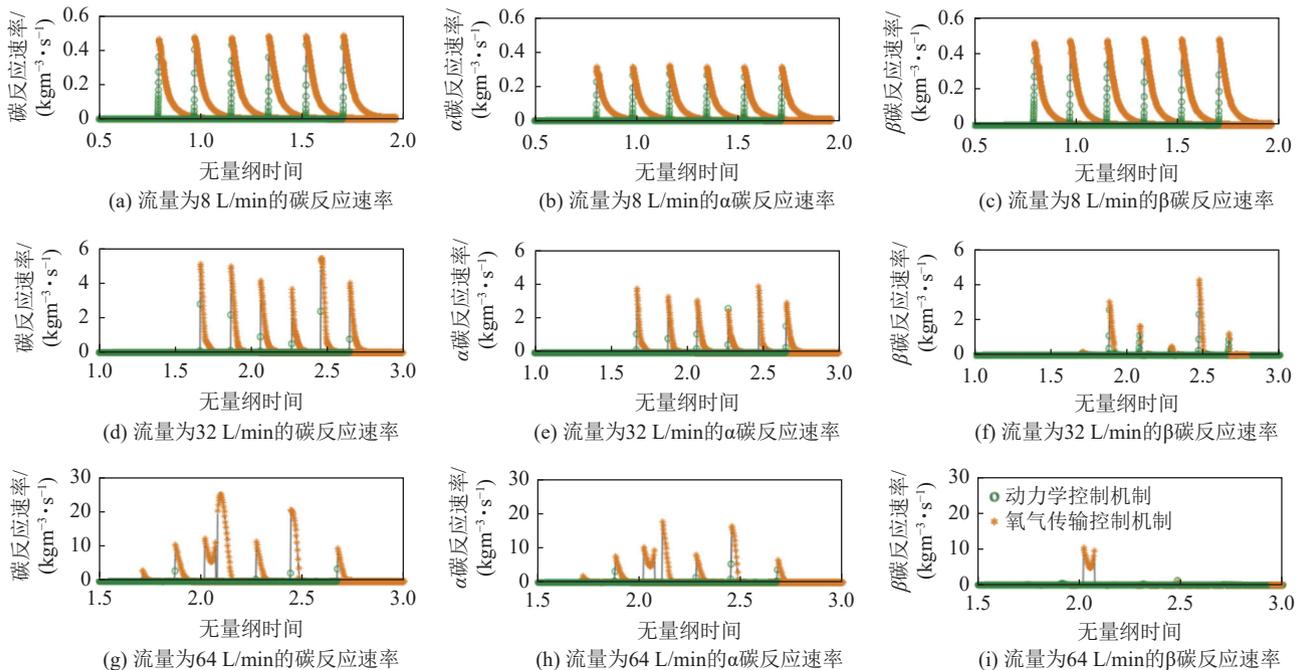


图 4 CC 煤样过滤燃烧反向传播控制机制

Fig. 4 CC coal sample filtration combustion reverse propagation control mechanism diagram

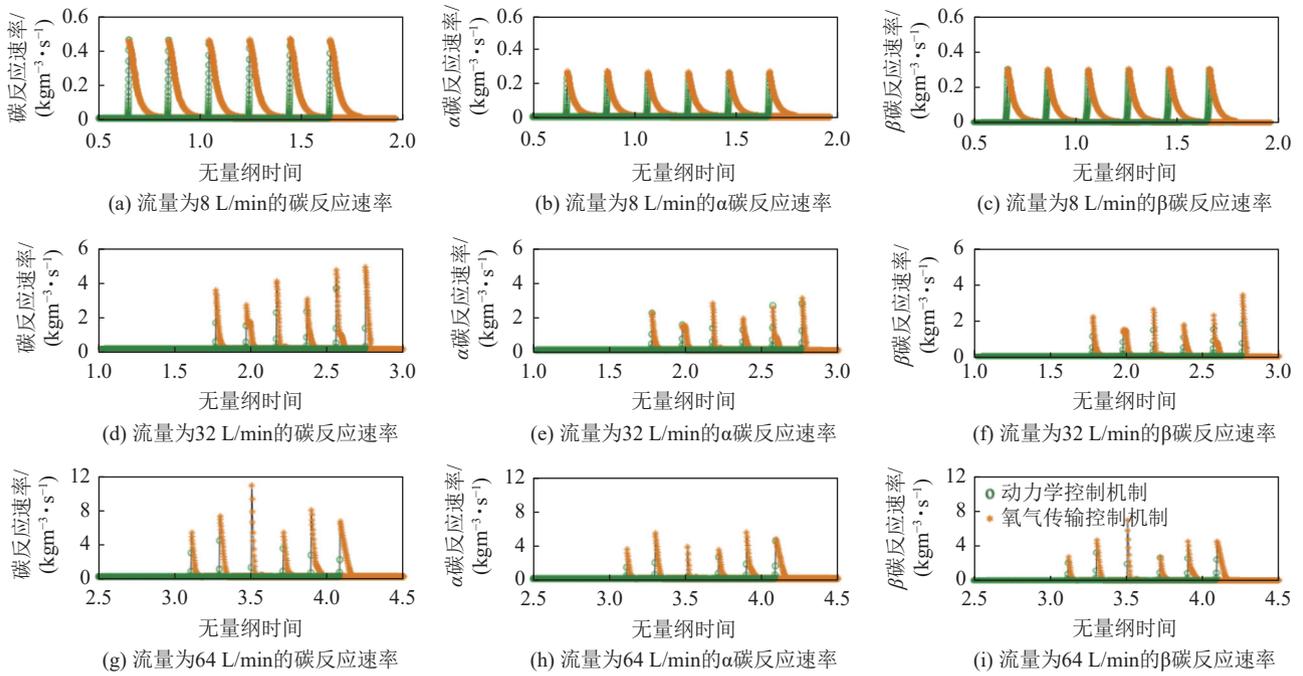


图5 XA煤样过滤燃烧反向传播控制机制

Fig. 5 XA coal sample filtration combustion reverse propagation control mechanism diagram

氧化)在不同流量下(从左至右)的反应速率示意图。2种煤样的反应速率随着流量的增大而增大,此外,CC煤样的碳氧化速率远大于大于XA煤样的碳氧化速率,这可能是导致CC煤样峰值温度大于XA煤样峰值温度的原因(如4.2节所示)。

如图4—图5所示,在不同的流量条件下,3个氧化阶段的速率变化趋势保持一致,控制机制也由开始的动力学机制控制转变为氧气传输控制机制控制。这是由于在反向燃烧初期阶段,氧气供应充足,氧化反应由动力学机制控制。然而随着燃烧的进行,反应温度增加,反应速率增加较快,当反应进行到一定程度时,化学反应速率大于供氧速率,因而反向燃烧波的传播逐渐受到氧气传输控制机制的控制。

## 5 结 论

1) 通过构建五步反应方案对反向过滤燃烧波传播过程进行了研究。本次研究考虑了气体固体之间的热不平衡,解决了传统模型中遇到的氧气非均衡问题,并通过试验验证了数值模型的有效性。

2) 峰值温度以及传播速率都受到流量的影响,随其增大而增大。同时,峰值温度也受到煤样的影响,常村煤样要比新安煤样的峰值温度高。

3) 在反向过滤燃烧过程中,过滤燃烧的限制条件由动力学控制机制向氧气传输控制机制转变。

数值模型中的氧气浓度特征长度尚未有具体的数值定义公式,因此需要进行进一步的试验来深入

探究。当前构建的数值模型未考虑气相均相反应以及碳的反应等,需要进一步研究和完善。通过这些改进,模型的适用范围将会得到显著提升。

本次研究为反向过滤燃烧提供了新的理论支持,该数值模型也可用于地下煤气化和地下煤火,对于改善煤矿安全生产、保护环境和生态以及实现双碳目标具有重要意义。

## 参考文献 (References):

- [1] LEBEDEV A D, SUKHOV G S, YARIN L P. Stability of filtration combustion[J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1976, 12(6): 775-779.
- [2] TOLEDO M, ARRIAGADA A, RIPOLL N, et al. Hydrogen and syngas production by hybrid filtration combustion: Progress and challenges[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 177: 113213.
- [3] OHLEMILLER T J. Modeling of smoldering combustion propagation[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1985, 11(4): 277-310.
- [4] OHLEMILLER T J, LUCCA D A. An experimental comparison of forward and reverse smolder propagation in permeable fuel beds[J]. *Combustion and Flame*, 1983, 54(1-3): 131-147.
- [5] 张庆贺, 王晓蕊, 袁亮. 煤炭地下气化多场耦合数值模拟程序开发及多场演化规律[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(6): 2506-2518.  
ZHANG Qinghe, WANG Xiaorui, YUAN Liang. Development of a multi-field coupled numerical simulation program for underground coal gasification and multi-field evolution laws[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(6): 2506-2518.
- [6] JIANG L L, CHEN Z X, FAROUQ ALI S M. Modelling of reverse combustion linking in underground coal gasification[J]. *Fuel*,

- 2017, 207: 302–311.
- [7] 王文才, 王瑞智, 张朋, 等. 巷道中煤层阴燃状态的判定 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(5): 54–57.  
WANG Wencai, WANG Ruizhi, ZHANG Peng, et al. Determination of seam smoldering in mine gateway[J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(5): 54–57.
- [8] BLINDERMAN M S, SAULOV D N, KLIMENKO A Y. Forward and reverse combustion linking in underground coal gasification[J]. *Energy*, 2008, 33(3): 446–454.
- [9] BHUTTO A W, BAZMI A A, ZAHEDI G. Underground coal gasification: From fundamentals to applications[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, 39(1): 189–214.
- [10] WAHLE C W, MATKOWSKY B J, ALDUSHIN A P. Effects of gas-solid nonequilibrium in filtration combustion[J]. *Combustion Science and Technology*, 2003, 175(8): 1389–1499.
- [11] 尹智成, 王平, 姜霖松, 等. 随机堆积床内过滤燃烧特性的试验研究 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(11): 115–121.  
YIN Zhicheng, WANG Ping, JIANG Linsong, et al. Experimental study on filtration flame characteristics in randomly packed beds[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(11): 115–121.
- [12] 张森. 基于渗流模型的煤炭地下气化数值模拟及优化 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.  
ZHANG Sen. Numerical simulation and optimization of underground coal gasification based on seepage model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [13] SONG Z Y. Modelling oxygen-limited and self-sustained smoldering propagation: Underground coal fires driven by thermal buoyancy[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 245: 112382.
- [14] ZANONI M A, WANG J H, GERHARD J I. Understanding pressure changes in smoldering thermal porous media reactors[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 412: 128642.
- [15] ZANONI M A B, TORERO J L, GERHARD J I. Determining the conditions that lead to self-sustained smoldering combustion by means of numerical modelling[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 4043–4051.
- [16] ZANONI M A B, TORERO J L, GERHARD J I. The role of local thermal non-equilibrium in modelling smoldering combustion of organic liquids[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 3109–3117.
- [17] ZANONI M A B, TORERO J L, GERHARD J I. Determination of the interfacial heat transfer coefficient between forced air and sand at Reynold's numbers relevant to smoldering combustion[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 114: 90–104.
- [18] ZANONI M A B, TORERO J L, GERHARD J I. Experimental and numerical investigation of weak, self-sustained conditions in engineered smoldering combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2020, 222: 27–35.
- [19] 何天澄, 朱学良, 范浩然, 等. 城市固废自维持阴燃处理的调控因素试验研究 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41(9): 2333–2344.  
HE Tiancheng, ZHU Xueliang, FAN Haoran, et al. Self-sustaining smoldering treatment of municipal solid wastes: Controlling parameters[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2020, 41(9): 2333–2344.
- [20] 马增益, 李月宁, 黄群星, 等. 水平强迫气流下木屑逆向阴燃过程的试验研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2004, 10(6): 497–500.  
MA Zengyi, LI Yuening, HUANG Qunxing, et al. Experimental study of opposed smolder of the horizontal oriented sawdust in a forced air flow[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2004, 10(6): 497–500.
- [21] 胡俊, 亓冠圣, 李敏, 等. 煤火竖直反向阴燃特性研究 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(6): 173–176.  
HU Jun, QI Guansheng, LI Min, et al. Study on characteristics of vertical reverse coal smoldering[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(6): 173–176.