

# 多热源条件下采空区煤自燃CO分布规律研究

朱成军, 叶青, 丁文学, 滕洋洲, 刘 瞰

湖南科技大学, 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2023年12月20日; 录用日期: 2024年1月22日; 发布日期: 2024年1月29日

## 摘 要

为了研究多热源条件下采空区煤自燃CO浓度场分布规律, 结合煤自燃特性和采空区孔隙率分布规律, 建立采空区煤自燃升温产气多场耦合模拟模型, 采用FLUENT软件模拟在采空区回风侧多热源数量煤自燃升温产气变化过程, 对不同条件下采空区CO浓度场分布情况进行研究, 探究多热源条件下采空区煤自燃CO浓度场耦合变化规律。模拟结果表明: 采空区煤自燃CO浓度随着热源数量增多而增大。采空区单一热源条件下煤自燃CO气体分布主要向回风侧扩散, 距离采空区工作面越远采空区CO气体浓度越高。对比发现双热源和三热源条件下, 热源之间煤自燃CO气体扩散相互影响, 双热源和三热源条件下CO分布具有相似的耦合规律, 在热源温度和采空区漏风作用影响下, 采空区CO浓度分布随着温度升高具有阶段性变化, 由于不同热源之间煤自燃存在相互耦合扩散作用, 采空区CO浓度场呈现出“弱-强-弱-强”的耦合变化特征。综上所述, 多热源会使采空区煤自燃CO扩散规律变的更加复杂, 且对煤自燃具有促进作用。

## 关键词

煤自燃, CO, 多热源, 采空区漏风, 数值模拟

# Research on the Distribution Law of Coal Spontaneous Combustion CO in Goaf under the Condition of Multiple Heat Sources

Chengjun Zhu, Qing Ye, Wenxue Ding, Yangzhou Teng, Tun Liu

School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Dec. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: Jan. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In order to study the distribution law of CO concentration field of coal spontaneous combustion in

goaf under multi-heat source conditions, combined with the characteristics of coal spontaneous combustion and the distribution law of porosity in goaf, a multi-field coupling simulation model of coal spontaneous combustion temperature rise and gas production in goaf is established. FLUENT software is used to simulate the change process of coal spontaneous combustion temperature rise and gas production in the number of multi-heat sources on the return air side of goaf. The distribution of CO concentration field in goaf under different conditions is studied, and the coupling variation law of CO concentration field of coal spontaneous combustion in goaf under multi-heat source conditions is explored. The simulation results show that the CO concentration of coal spontaneous combustion in goaf increases with the increase of the number of heat sources. Under the condition of single heat source in goaf, the distribution of CO gas in coal spontaneous combustion mainly diffuses to the return air side, and the farther away from the working face in goaf, the higher the concentration of CO gas in goaf. It is found that under the conditions of double heat source and three heat sources, the diffusion of CO gas in coal spontaneous combustion between heat sources affects each other, and the distribution of CO under the conditions of double heat source and three heat sources has similar coupling rules. Under the influence of heat source temperature and air leakage in goaf, the distribution of CO concentration in goaf changes periodically with the increase of temperature. Due to the mutual coupling and diffusion of coal spontaneous combustion between different heat sources, the CO concentration field in goaf shows the coupling variation characteristics of “weak-strong-weak-strong”. In summary, multi-heat sources will make the CO diffusion law of coal spontaneous combustion in goaf more complicated and promote coal spontaneous combustion.

## Keywords

Coal Spontaneous Combustion, CO, Multiple Heat Sources, Air Leakage in Goaf, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

煤自燃是煤矿自燃灾害之一，随着煤炭开采量的增加，带来巨大经济效益的同时，煤自燃灾害也为煤炭安全生产带来巨大威胁，由于采空区瓦斯与煤自燃复合热动力灾害具有隐蔽性、耦合型、动态性、复杂性的主要特征[1] [2] [3]，煤氧化自燃过程中的气体产物与煤氧化状态之间存在复杂的非线性关系[4]，井下采空区煤自燃产生的 CO 气体严重影响煤炭工业的持续健康发展。国内外学者对采空区煤自燃灾害进行大量研究：M Onifade [5]指出煤的自热和自燃现象是许多复杂的物理化学过程的结果，煤自燃主要通过使用实验室和现场测试与煤的自热行为相关的一个或多个特征进行预测。张庆恒和李大怀[6] [7]提出以 CO 气体浓度变化为煤自燃特征，建立采空区遗煤自燃时火源位置的数学模型并进行计算，从而辨识采空区隐蔽火源点采空区隐蔽火源点辨识简易方法。Gao Fei [8]通过研究浅埋近距离煤层群开采中多源漏风条件下回风角 CO 的来源以及 CO 在采空区的迁移聚集规律，发现在多源漏风作用下，煤柱和采空区遗煤氧化产生的 CO 向回风侧扩散迁移，导致 CO 在采空区回风侧积累。凌紫城等[9]通过实验研究煤自燃产热产气特性对采空区瓦斯分布的影响，发现在升浮力作用下自燃点范围内部的 CH<sub>4</sub> 气体与 CO 气体形成上升热气流并形成负压区，在卷吸力作用下，自燃点外部的 CH<sub>4</sub> 与 CO 气体不断向负压区聚集。李宗翔等[10]通过模拟非均质多孔介质模型对比非均质阻化前后采空区气体场温度场变化，发现

采空区煤自燃阻化后整体耗氧能力下降, CO 分布区域缩小。闫沁阳[11]通过模拟对五阳煤矿火区气体生成和运移规律进行研究, 结果表明距离工作面越远 CO 浓度值越高, 在一定风速范围内风速越大, 采空区 CO 等值线向采空区内部凹陷越大, CO 浓度值整体呈现上升趋势。车强[12]研究采空区多场耦合规律, 发现采空区煤自燃热源区域及周围区域 CO 浓度增高较大, 且浓度增高范围越来越大, 数值模拟结果和实验、现场测试相符。彭茨等[13]通过模拟研究不同高温热源影响下的采空区气体流动场, 发现热源周围由于温度势差引起采空区气体的微小流动形成气流增速流动区域, 高温热源会增加气流阻力使气体流速降低形成气流减速流动区域。秦汝祥、沈静、宋亚新等[14] [15] [16] [17]针对采空区煤自燃生产 CO 问题, 通过实测探明 CO 体积分数沿工作面煤壁到架后采空区方向逐渐升高, 工作面 CO 主要来源于采空区遗煤氧化。程根银和于志金等[18] [19]通过模拟发现漏风强度和热源位置是采空区煤自燃多场演化的主要影响因素。

综上所述, 在不同条件下采空区 CO 分布规律不同, 本文针对多热源对采空区煤自燃生成 CO 气体的影响问题, 通过构建采空区煤自燃模拟模型, 利用 FLUENT 模拟研究在多热源条件下采空区煤自燃的 CO 分布规律, 探究多热源条件下采空区煤自燃 CO 场耦合作用规律, 为采空区煤自燃 CO 超限灾害的预防控制提供理论指导。

## 2. 构建采空区煤自燃数值模拟模型

### 2.1. 数学模型

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中:  $\rho$ ——流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$u, v, w$ —— $x, y, z$  方向上的速度分量,  $\text{m}/\text{s}$ 。

动量守恒方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla(\mu \text{grad}u) + S_u \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla(\mu \text{grad}v) + S_v \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla(\mu \text{grad}w) + S_w \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $S_u, S_v, S_w$ —— $x, y, z$  方向上的动量耗散源项,  $\text{p}_a/\text{m}$ ;

$p$ ——压力,  $\text{p}_a$ ;

$\mu$ ——动力粘度系数,  $\text{p}_a \cdot \text{s}$ ;

$k_g$ ——空气导热系数,  $\text{w}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;

$T$ ——采空区煤岩温度,  $\text{K}$ 。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial t(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u T) = \nabla \cdot \left( \frac{k_g}{C_p} \text{grad}T \right) + S_T \quad (3)$$

式中:  $S_T$ ——流体的能量源项,  $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;

$C_{ps}$ ——采空区煤岩比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ ;

$i$ —— $(x, y, z)$ 。

多孔介质模型:

$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu_i v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v_j| v_j \right) \quad (4)$$

式中:  $S_i$ ——多孔介质流动过程中的动量损失项;

$\mu_i$ 为动力粘度,  $\text{p}\cdot\text{s}$ ;  $v_j$ —— $(x, y, z)$ 方向的速度分量( $j=1, 2, 3$ ),  $\text{m/s}$ ;

$D_{ij}$ 和  $C_{ij}$ ——粘性阻力系数、惯性阻力系数。

采空区粘性阻力系数:

$$D_{ij} = \frac{1}{\alpha} = \frac{150(1-n)^2}{d_p^2 n^3} \quad (5)$$

式中:  $D_{ij}$ ——采空区粘性阻力系数;

采空区气体流动主要为粘性流动, 采空区惯性阻力较小忽略。

采空区渗透率:

$$\alpha = \frac{d_p^2 n^3}{150(1-n)^2} \quad (6)$$

式中:  $\alpha$ ——采空区渗透率;

$d_p$ ——平均煤粒直径。

采空区多孔介质孔隙率:

$$n = 1 - \frac{1}{K_p(x, y)} \quad (7)$$

式中:  $n$ ——采空区孔隙率。

采空区煤岩碎胀函数:

$$K_p(x, y) = K_{p, \min} + (K_{p, \max} - K_{p, \min}) \times \exp(-aX(1 - \exp(\varepsilon bY))) \quad (8)$$

式中:  $K_p(x, y)$ ——采空区冒落碎胀函数;

$K_{p, \max}$ ——初始冒落的碎胀系数;

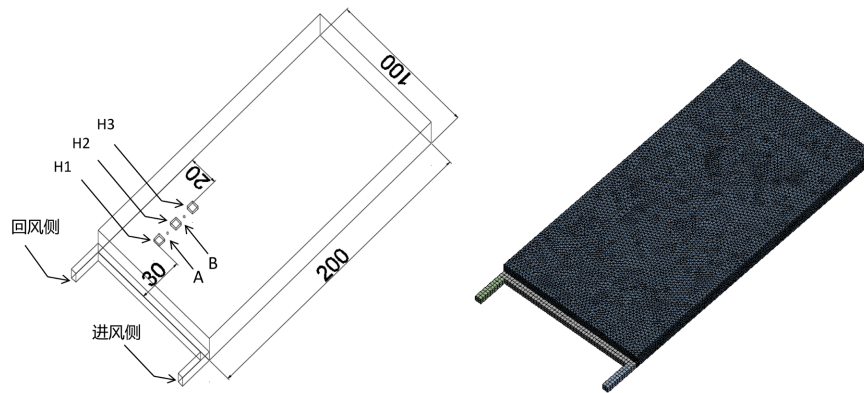
$K_{p, \min}$ ——冒落压实后的碎胀系数;

$a, b, \varepsilon$ ——采空区破碎煤岩碎胀倾向衰减率、走向衰减率和修正系数;

$X, Y$ ——点 $(x, y)$ 与固壁和工作面边界的距离。

## 2.2. 物理模型与网格划分

以某矿井采空区为例建立“U”型采空区物理模型如图1所示, 其中进回风巷道尺寸为  $20 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ , 采空区工作面尺寸为  $100 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ , 采空区尺寸为  $200 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ , 模型网格划分采用自动划分方法, 自动形成四面体与六面体网格, 模型总共被划分为 964,256 个网格。通过模拟采空区煤自燃三带范围, 如表1所示, 采空区氧化带中存在潜在煤自燃热源, 根据采空区煤自燃三带分布规律[20][21], 在回风侧采空区氧化带的浮煤层中设置大小为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的(H1, H2, H3) 3个热源项, 热源 H1 中心点位置(32.5, 77.5, 0.5), H2 中心点位置(47.5, 77.5, 0.5), H3 中心点位置(62.5, 77.5, 0.5)。



**Figure 1.** Coal spontaneous combustion model and grid division in goaf  
**图 1.** 采空区煤自燃模型与网格划分

**Table 1.** Three zone range of coal spontaneous combustion in goaf  
**表 1.** 采空区煤自燃三带范围

采空区位置	采空区煤自燃三带范围
进风侧	36 m~96 m
回风侧	0 m~38 m

### 2.3. 设置初始条件与物理参数

由于采空区煤岩混合结构是一种多孔介质结构，采空区流体运动存在紊流流动，本文采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型能够更好的描述气体流动情况，设置进风巷设置为速度入口(VELOCITY\_INLET)，回风巷设置为自由出流出口(OUTFLOW)，采空区接触界面设为内部界面(INTERIOR)，壁面边界设为无滑移静态壁面(WALL)。结合对煤自燃参数和采空区渗流场的研究[22] [23] [24]，包括遗煤氧化耗氧速率、放热强度和 CO 生成速率，以及三维采空区孔隙率空间分布函数，利用 FLUENT 用户自定义函数编写 UDF 文件，再导入 FLUENT 模拟软件进行数值模拟分析。初始条件与物理参数如表 2 所示。

**Table 2.** Related physical parameters  
**表 2.** 相关物理参数

物理参数	符号	数值
入口风流速(m·s <sup>-1</sup> )	$v$	1.5
初始温度(k)	$T$	300
工作面瓦斯源项(kg·m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	$Q_{ch4g}$	$1.01 \times 10^{-4}$
采空区瓦斯源项(kg·m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	$Q_{ch4c}$	$2.43 \times 10^{-5}$
煤岩密度(kg·m <sup>3</sup> )	$\rho$	1300
煤岩比热容(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$C_{ps}$	1045
煤岩导热率(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$k_s$	0.2284
空气比热容(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$C_{pg}$	1012
空气导热率(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$k_g$	0.026
初始冒落带碎胀系数	$K_{p,max}$	1.5

续表

冒落压实后的碎胀系数	$K_{p,min}$	1.15
倾向衰减率	$a$	0.0368
走向衰减率	$b$	0.0268
修正系数	$\varepsilon$	0.0233
平均煤粒直径	$d_p$	0.05

## 2.4. 模拟方案设计

为研究多热源条件下煤自燃 CO 运移规律, 本文在采空区回风侧设置煤自燃热源项, 通过控制热源数量热源位置, 进行瞬态模拟不同工况下煤自燃变化过程, 随着热源项温度升高, 遗煤氧化产生的 CO 进行扩散蔓延, 对比研究不同工况时煤自燃 CO 气体运移规律, 模拟方案如表 3 所示。

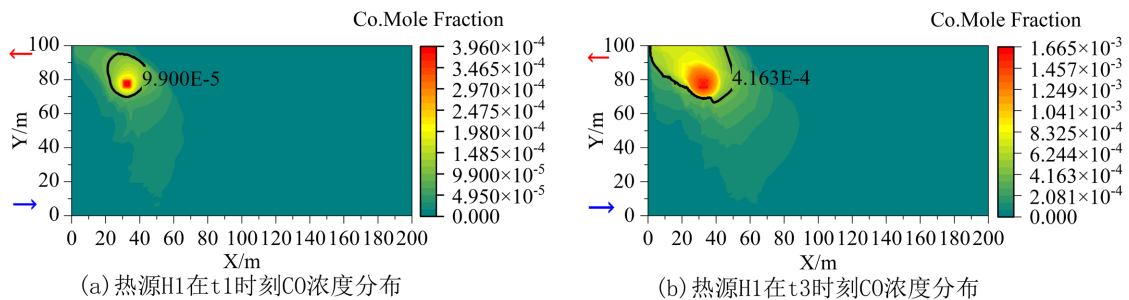
Table 3. Simulation scheme design

表 3. 模拟方案设计

方案	热源	监测点位置	监测参数
工况 1	H1		
工况 2	H2		
工况 3	H3	A (40, 77.5, 0.5), B (55, 77.5, 0.5)	Z = 0.5 面 CO 分布规律, 监测点温度和 CO 浓度
工况 4	H1、H2		热源温度与采空区最大 CO 浓度
工况 5	H1、H2、H3		

## 3. 单一热源采空区煤自燃模拟验证分析

单热源条件下 CO 气体运移模拟结果如图 2 所示, 为分别在 H1、H2、H3 单热源条件下随着模拟进行采空区 CO 浓度场分布云图, 随着煤自燃热源项放热煤温升高, 煤自燃反应逐渐增强 CO 浓度增大。又由于受到热源位置影响, 在不同热源条件下 CO 浓度在不同程度增大, 并且 CO 气体运移扩散方向也有所不同。由于热源与工作面的距离不同, 受到不同漏风作用使得 CO 浓度总体呈现出距离工作面越远采空区 CO 浓度约大的规律, 当热源距离工作面距离越远, 热源受漏风作用大小不均匀, 使得 CO 气体向回风侧进行扩散蔓延, 随风流进入采空区回风巷, 采空区 CO 扩散主要向采空区回风侧进行漂移积聚, 且热源温度越高, 回风侧 CO 浓度越高, 与其他学者研究结果相符[25] [26] [27]。通过模拟发现单热源条件下采空区 CO 浓度场运移简单并无耦合效应, 本文研究中发现对于单热源采空区煤自燃反应主要受到采空区风作用和煤温因素影响。





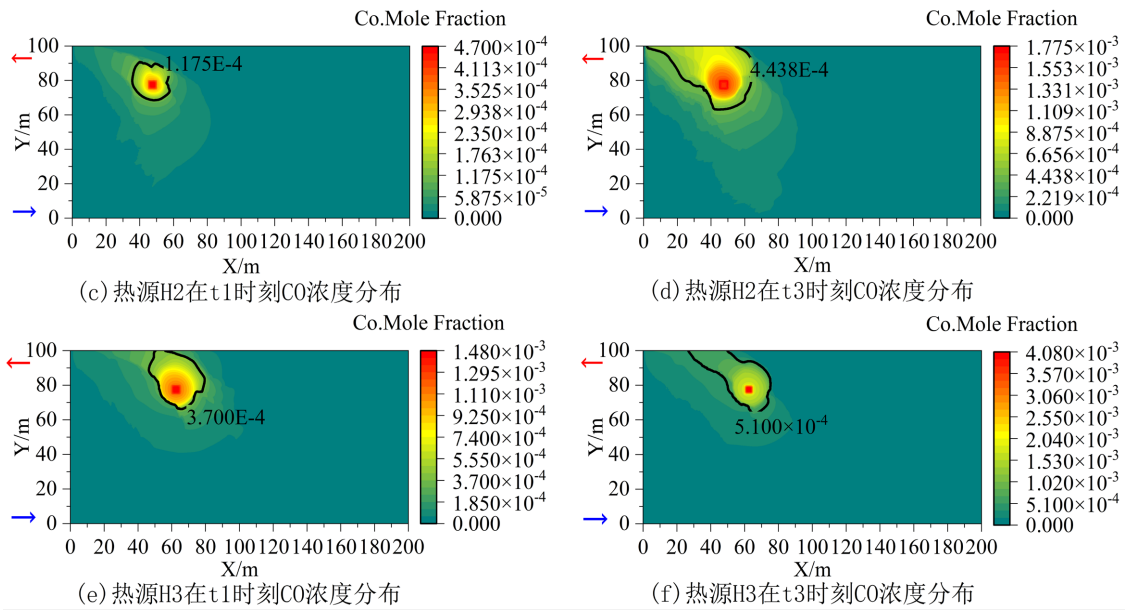
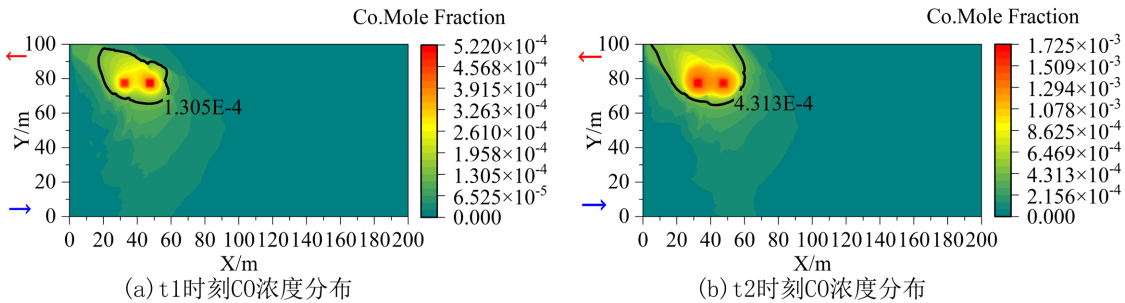


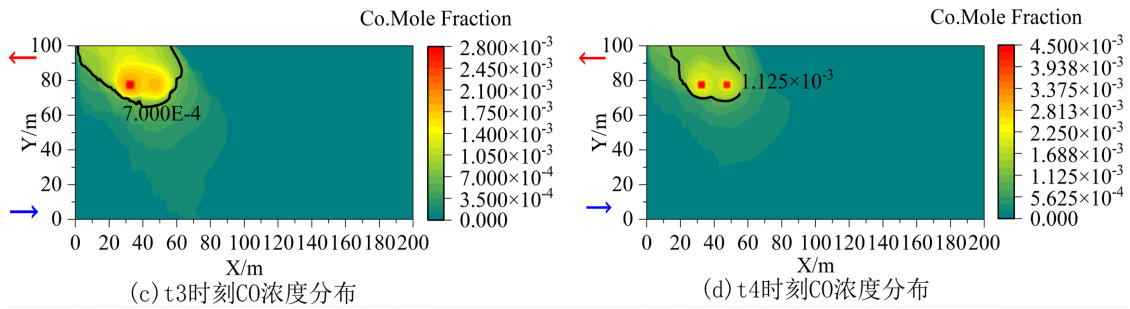
Figure 2. The distribution of CO concentration in goaf under the conditions of single heat source H1, H2 and H3 respectively

图2. 分别在单热源 H1、H2、H3 条件下采空区 CO 浓度分布

#### 4. 多热源采空区煤自燃模拟结果分析

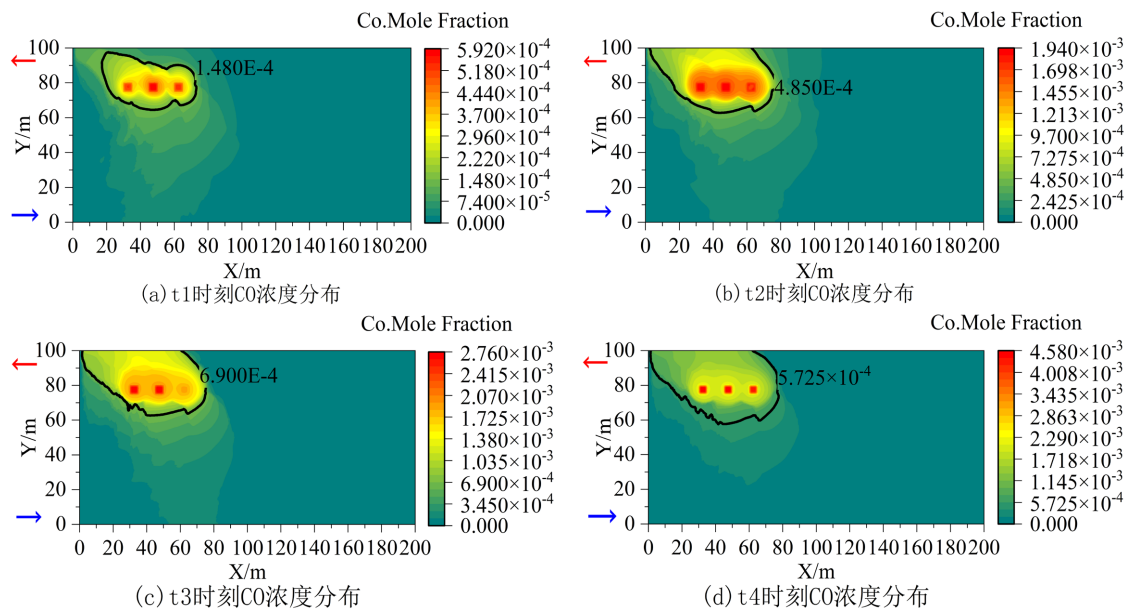
图3是热源为H1和H2,煤自燃过程中双热源条件下CO浓度分布图,采空区最大CO浓度随着温度升高而增大,同时受采空区漏风作用,使得CO气体越向回风侧进行扩散蔓延,采空区CO扩散主要向采空区回风侧进行漂移积聚,且随着热源温度越高,回风侧CO浓度越高。相比较单热源煤自燃,由于双热源受到不同采空区漏风作用和温度的影响,随着煤自燃反应的进行,双热源条件下CO气体扩散具有不同程度耦合效应,可将煤自燃反应过程分为四个阶段:在煤自燃反应初期由于热源H1较热源H2受到较强的漏风作用,热源H1的CO浓度场弱而H2处浓度场强,热源H2浓度场向热源H1形成的CO浓度场进行漂移扩散,热源H2形成的CO浓度场变形扩大,表现出弱耦合特征;随后煤自燃反应速率逐渐加快气体浓度增加,相比较热源H1与H2的CO浓度场处于相同水平,浓度场表征为强耦合效果。随着热源H1的煤自燃反应持续加快,并且热源H2受漏风作用影响CO气体向工作面方向进行漂移,使得热源H1大于H2的CO浓度,热源H1的CO浓度场变大并向热源H2进行扩散蔓延,再次呈现出弱耦合的特征;煤自燃后期进一步煤自燃反应,热源受漏风作用CO气体向回风侧扩散,热源H1的CO浓度场与H2的CO浓度场再次处于相同水平,并呈现出强耦合特征。在采空区煤自燃过程中,双热源条件下CO浓度场变化呈现出“弱-强-弱-强”耦合变化特征。





**Figure 3.** CO concentration distribution in goaf under the condition of double heat sources H1 and H2  
**图 3.** 双热源(H1 和 H2)条件下采空区 CO 浓度分布

如图 4 所示为采空区模拟煤自燃环境三热源下 CO 浓度场模拟结果,在三热源条件下采空区最大 CO 浓度也具有随着温度升高而增大的关系,采空区 CO 扩散主要向采空区回风侧进行漂移积聚,且热源温度越高,回风侧 CO 浓度越高。随着煤自燃反应进行,初期煤自燃升温产气速率低,采空区 CO 气体浓度低,同浓度的气体扩散面积小,另外受到采空区漏风影响,以 H2 热源为中心的三热源形成不规则浓度场,三热源 CO 浓度场耦合程度弱;热源温度升高煤自燃反应速率增大,三个热源形成的 CO 浓度场处于相同水平,浓度场表征为强耦合效果;随着热源煤自燃反应持续加快以及采空区漏风作用影响,热源 H3 的 CO 浓度场受漏风作用向热源 H1 和 H2 形成的强耦合浓度场进行偏移变形,再次呈现出弱耦合的特征;在后期热源受漏风作用影响,CO 浓度场再次处于相同水平,并呈现出强耦合特征。对比 CO 浓度场变化三热源与双热源具有相同的浓度场“弱-强-弱-强”耦合变化特征。

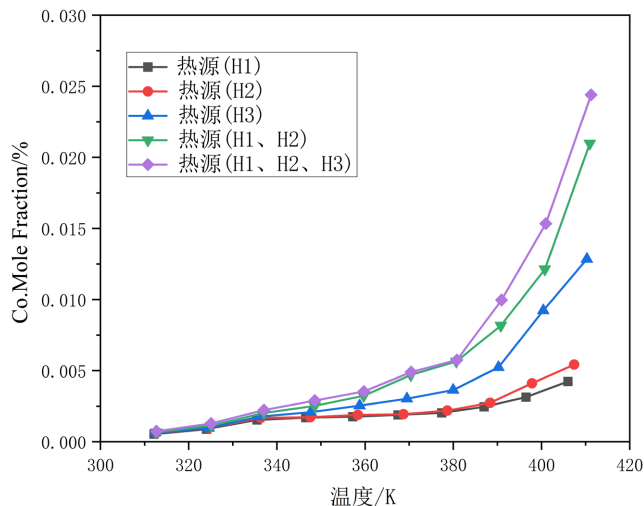


**Figure 4.** Distribution of CO concentration in goaf under three heat sources (H1, H2 and H3)  
**图 4.** 三热源(H1、H2 和 H3)条件下采空区 CO 浓度分布

由图 5 可知,随着温度升高采空区 CO 浓度增大,煤自燃过程中采空区 CO 浓度场变化可以分为二个阶段:第一阶段为 310 K~380 K,在该阶段随着温度升高,煤自燃产生 CO 速率缓慢增加,采空区 CO 浓度缓慢增大;第二阶段为 380 K~400 K,煤自燃反应产生 CO 速率明显加快,采空区 CO 浓度显著变大,模拟煤自燃变化规律与实际情况相符,随着煤自燃热源项放热煤温升高,煤自燃反应逐渐增强,并且采



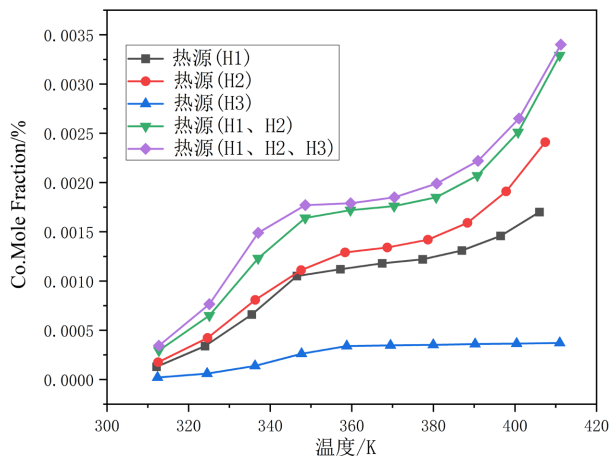
空区 CO 浓度大小随着热源数量增加而增大，综上所述多热源对煤自燃具有促进作用。



**Figure 5.** The variation curve of maximum CO concentration with temperature in goaf under different heat source conditions

**图 5.** 多热源条件下采空区最大 CO 浓度随温度变化曲线

由图 6 可知，煤自燃过程中 CO 浓度场变化受到采空区漏风和温度作用影响，单热源条件下采空区 CO 气体进行扩散蔓延，多同热源条件下的浓度场发生复杂的耦合变化，由 A、B 点监测结果可以将多热源采空区煤自燃环境 CO 浓度场变化分为四个阶段：采空区 CO 浓度在小于 320 K 时缓慢增加，此阶段以热源温度低煤氧反应程度低，受采空区漏风作用，距离工作面越近的热源形成的 CO 浓度场越低并形成浓度差，高 CO 浓度场向低浓度场偏移扩散，多热源条件下 CO 浓度场表征为“弱”耦合；在 320 K~350 K 阶段，随着温度升高煤自燃反应加快，煤自燃反应程度与采空区漏风作用达到动态平衡，使得采空区不同热源 CO 浓度大小相同，浓度场表征为“强”耦合；在 350 K~380 K 缓慢增加由于温度升高煤自燃反应进一步加快，采空区漏风作用对煤自燃影响减弱，此阶段煤自燃主要影响因素为热源温度，采空区 CO 浓度场表征为“弱”耦合；在 380 K 以上快速增加，此阶段中煤自燃反应速率显著加快，热量快速积累，煤岩内部发生强烈的氧化还原反应，释放出大量气体，在多热源条件时 CO 浓度场表征为“强”耦合。



(a) A点CO浓度随温度变化曲线

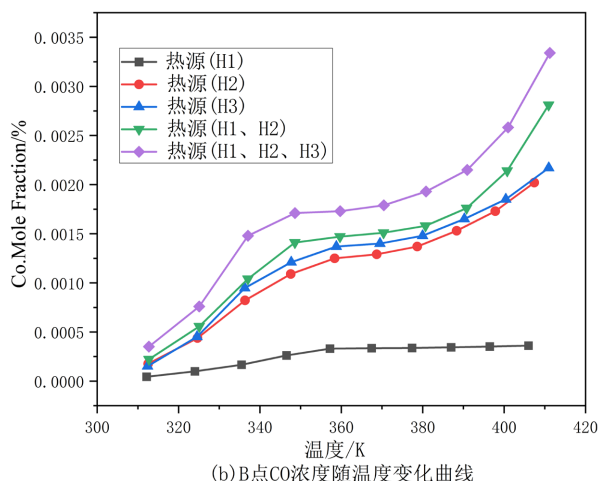


Figure 6. Curves of CO concentration versus temperature at points A and B under different heat source conditions  
图 6. 不同热源条件下 A、B 点 CO 浓度随温度变化曲线

## 5. 结论

1) 分析发现单一热源采空区煤自燃 CO 气体主要向回风侧扩散, 单一热源采空区 CO 扩散不存在相互耦合作用扩散方式单一, 在单热源条件下随着温度升高采空区 CO 浓度增大, 验证采空区煤自燃模拟模型具有可靠性。

2) 通过改变热源数量模拟多热源煤自燃 CO 分布规律, 多热源条件下采空区 CO 浓度场具有复杂的耦合变化, 多热源采空区 CO 扩散存在“弱-强-弱-强”相互耦合特征。

3) 对比分析单一热源和多热源条件下采空区 CO 浓度, 发现采空区 CO 浓度随热源数量增加而增大, 采空区 CO 扩散面积增大, 证明多热源对煤自燃具有促进作用。

## 基金项目

国家自然科学基金项目“矿井瓦斯爆炸能量释放转化特性及热冲击能量损耗研究”(编号: 52174177)、“矿井多爆源瓦斯爆炸传播特性及热冲击动力学机制研究”(编号: 52174178)。

## 参考文献

- [1] 林柏泉, 李庆钊, 周延. 煤矿采空区瓦斯与煤自燃复合热动力灾害多场演化研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1715-1726.
- [2] 周福宝. 瓦斯与煤自燃共存研究(I): 致灾机理[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 843-849.
- [3] 蓝航, 陈东科, 毛德兵. 我国煤矿深部开采现状及灾害防治分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 39-46.
- [4] 郭军, 刘华, 金彦, 等. 地下煤自燃隐蔽火源探测方法综述及新技术展望[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(8): 111-119.
- [5] Onifade, M. and Genc, B. (2020) A Review of Research on Spontaneous Combustion of Coal. *International Journal of Mining Science and Technology*, **30**, 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.001>
- [6] 张庆恒. 井下火源探测及煤自燃防治技术研究发展方向探讨[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(6): 82-83+86.
- [7] 李大怀. 浅谈工作面采空区隐蔽火源点辨识方法[J]. 煤炭科技, 2020, 41(3): 86-88.
- [8] Gao, F., Chen, S.J., Cao, J., Li, X.T. and Li, J.W. (2022) Study on Generation, Migration and Accumulation of CO in the Mining Goaf of Shallow-Buried Close Distance Coal Seam Group. *Scientific Reports*, **12**, Article Number: 14424. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18804-6>
- [9] 凌紫城, 施式亮, 鲁义, 等. 煤自燃热效应对采空区瓦斯分布的影响机理[J]. 矿业工程研究, 2023, 38(2): 58-64.

- [10] 李宗翔, 衣刚, 武建国, 等. 基于“O”型冒落及耗氧非均匀采空区自燃分布特征[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 484-489.
- [11] 闫沁阳. 五阳煤矿火区气体生成与运移规律研究[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(3): 113-116.
- [12] 车强. 采空区气体多场耦合理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 83-146.
- [13] 彭荧, 王海桥, 陈世强, 等. 高温热源对采空区气体微流动场影响模拟研究[J]. 煤, 2017, 26(8): 1-4+9.
- [14] 秦汝祥, 陈国栋, 骆大勇, 等. 羊场湾大采高易自燃工作面 CO 分布规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(1): 126-131.
- [15] 沈静. 煤矿井下多源一氧化碳运移规律及积聚判别条件研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- [16] 宋亚新, 王帅, 李建伟, 等. 采空区下综采面回风隅角 CO 来源及超限防治技术[J]. 煤炭技术, 2022, 41(2): 93-96.
- [17] 陈辉. 浅埋厚煤层易燃综放工作面 CO 主要来源判定[J]. 矿业安全与环保, 2016, 43(1): 85-88.
- [18] 程根银, 罗松涛, 司俊鸿, 等. 采空区多孔介质内流体传热研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 71-76.
- [19] 于志金, 文虎, 陈晓坤, 等. 大型煤自燃试验的火源演化特征模拟[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 89-93, 141.
- [20] 朱红青, 和超楠, 秦晓峰, 等. 不同煤自燃特性参数下采空区“三带”分布规律的研究[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(3): 54-57.
- [21] 孟宪锐, 常振兴, 王永望, 等. 综放面采空区自燃“三带”分布规律研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(9): 128-130.
- [22] 邓军, 张敏, 雷昌奎, 等. 不同变质程度煤自燃特性及低温氧化动力学分析[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(1): 94-100.
- [23] 周西华, 白刚, 聂荣山, 等. 不同变质程度煤自燃特征参数实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 37-42.
- [24] 姜延航, 周露函, 韩明旭. 一面四巷瓦斯抽采对采空区遗煤自燃影响数值模拟研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20230922.1512.001>, 2023-09-25.
- [25] 夏海斌. 灵武矿区易自燃煤层综放面采空区 CO 运移规律研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- [26] 丁鹏翔. 采空区隐蔽热源的气热场特性研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [27] 张娇, 王筱冬. 采空区自燃发火 CO 蔓延规律仿真研究[J]. 煤矿机械, 2018, 39(5): 55-57.