

# 钱营孜西翼煤柱工作面防灭火技术 参数优化研究

王浩<sup>1</sup>, 司俊鸿<sup>2</sup>, 王传义<sup>3</sup>, 程根银<sup>2</sup>, 张泉<sup>3</sup>, 罗松涛<sup>2</sup>

<sup>1</sup>皖北煤电集团生产技术部, 安徽 宿州

<sup>2</sup>华北科技学院, 应急技术与管理学院, 北京

<sup>3</sup>安徽恒源煤电股份有限公司钱营孜煤矿, 安徽 宿州

收稿日期: 2023年3月20日; 录用日期: 2023年4月21日; 发布日期: 2023年4月28日

## 摘要

采空区遗煤自燃一直是防灭火工作的重点。为研究钱营孜西翼煤柱工作面注二氧化碳与氮气对采空区遗煤自燃的惰化效果, 通过Fluent数值模拟软件建立西翼煤柱工作面物理模型, 分别研究了注二氧化碳与注氮气在不同注气位置、不同注气量下的惰化情况, 并对两种气体的惰化效果进行了对比。研究表明: 二氧化碳注气口距工作面40 m、注气量为1000 m<sup>3</sup>/h对采空区惰化效果最佳; 氮气注气口距工作面30 m、注气量为1000 m<sup>3</sup>/h时对采空区惰化效果最佳。注入二氧化碳后的氧化带宽度相比于注入氮气后的氧化带宽度平均减少了约3 m。

## 关键词

采空区, 煤自燃, 防灭火, 氮气, 二氧化碳

# Research on Optimization of Fire Prevention Technical Parameters of Zixi Wing Coal Pillar Working Face in Qianying

Hao Wang<sup>1</sup>, Junhong Si<sup>2</sup>, Chuanyi Wang<sup>3</sup>, Genyin Cheng<sup>2</sup>, Quan Zhang<sup>3</sup>, Songtao Luo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Production Technology Department, Wanbei Coal Power Group, Suzhou Anhui

<sup>2</sup>School of Environmental Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing

<sup>3</sup>Qianyingzi Coal Mine, Anhui Hengyuan Coal Power Co., Ltd., Suzhou Anhui

Received: Mar. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 21<sup>st</sup>, 2023; published: Apr. 28<sup>th</sup>, 2023

文章引用: 王浩, 司俊鸿, 王传义, 程根银, 张泉, 罗松涛. 钱营孜西翼煤柱工作面防灭火技术参数优化研究[J]. 矿山工程, 2023, 11(2): 317-325. DOI: 10.12677/me.2023.112038

## Abstract

Spontaneous combustion of coal left in goaf is always been the focus of fire prevention work. In order to study the inert effect of CO<sub>2</sub> and nitrogen injection on spontaneous combustion of coal left in goaf at the working face of Zixi wing coal pillar in Qianying, the physical model of the working face of the west wing coal pillar was established by Fluent numerical simulation software, and the inert situation of CO<sub>2</sub> and nitrogen injection at different gas injection positions and different gas injection volumes were studied respectively. The inerting effects of the two gases were compared. The results show that the best effect on goaf inerting is when the carbon dioxide injection port is 40 m away from the working face and the gas injection is 1000 m<sup>3</sup>/h. When the nitrogen injection port is 30 m away from the working face and the gas injection is 1000 m<sup>3</sup>/h, the effect on goaf inerting is the best. The width of the oxidation zone after CO<sub>2</sub> injection is reduced by about 3 m on average compared with that after nitrogen injection.

## Keywords

Goaf, Coal Spontaneous Combustion, Fire Prevention, Nitrogen, Carbon Dioxide

Copyright © 2023 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

采空区由于割煤技术问题会散落大量碎煤,随着采煤工作面的不断推进,遗煤不断被压实发生氧化还原反应,内部温度逐渐升高,在达到一定的温度以及有足够的氧气情况下便会发生自燃引起矿井火灾[1],对煤矿安全生产以及井下作业人员的安全造成极大影响。因此采空区煤自燃防治是一项极为重要的工作,可以从降低遗煤温度以及控制采空区氧气浓度两方面进行防治工作,但遗煤散落面积大,高温点位置多变,内部温度不易监测[2]。而降低采空区氧气浓度相对简单,便于监控且效果显著。

由于氮气、二氧化碳拥有生产成本低以及来源广等优势,目前常被用做惰性气体注入到采空区中防治遗煤自燃。王国芝等[3]进行了采空区注二氧化碳、注氮、注浆的现场试验,通过对比分析三种防灭火技术得出:二氧化碳具有灭火速度快、不易自燃且现场适用性强的特点。张长山等[4]直接向采空区自燃危险区域灌注液态二氧化碳,应用结果表明液态二氧化碳有效降低了采空区氧气浓度以及温度。韩兵等[5]提出氮气与二氧化碳复合惰性气体防灭火系统,并通过实践得出:将复合惰性气体注入采空区可以有效降低采空区温度以及氧气浓度。邵昊等[6]设计了煤自燃程序升温试验,验证了氮气和二氧化碳气体对煤的氧化反应产生的不同影响,得到二氧化碳气体比氮气能够更好的抑制煤自燃。姜奎等[7]研究了 CO<sub>2</sub> 在不同压注位置以及不同注气量情况下采空区的惰化情况。杨黎等[8]使用数值模拟软件研究了不同注氮方案下的采空区氧气浓度分布。

相关研究表明[9],二氧化碳比氮气有更好地抑制采空区煤炭自燃与降温效果。以钱营孜西翼煤柱工作面为原型,使用 Fluent 数值模拟技术进行参数优化,即为一种基于目标变量的优化方案,通过建立参数化结构然后在 Fluent 中进行分析,再联合优化工具进行响应分析得到最佳优化点。以此来研究采空区分别注入不同量的二氧化碳与氮气以及不同注气位置对采空区氧气浓度分布的影响。探究最佳注气位置与最佳注气量,为钱营孜西翼煤柱工作面防灭火工作提供相关依据,助力煤矿安全生产。

## 2. 采空区数值模型建立

### 2.1. 工作面概况

钱营孜煤矿位于安徽省宿州市西南方向，井田内可采煤层 8 层，其中主采煤层为 32、82 两个煤层，平均厚度为 4.67 m。本矿区 32 煤层标高-650 m 以浅为无突出危险区，标高在-650 m 以深为突出危险区，32 煤层为易自燃煤层。矿井为高瓦斯矿井、水文地质类型中等、地质类型复杂。

西翼煤柱工作面位于钱营孜煤矿西翼，煤层平均厚度为 2.79 m，属稳定煤层。工作面内断层构造较发育，工作面及附近主要发育有 20 条，整体形态呈一单斜构造。工作面机巷设计长度约 924 m，风巷设计长度约 945 m。

### 2.2. 采空区物理模型的建立

对钱营孜西翼煤柱工作面进行物理模型的建立并使用 ICME 进行网格划分，物理模型共分为四个区域，分别为采空区、工作面、进风巷与回风巷，如图 1 所示。物理模型具体参数见表 1 所示。

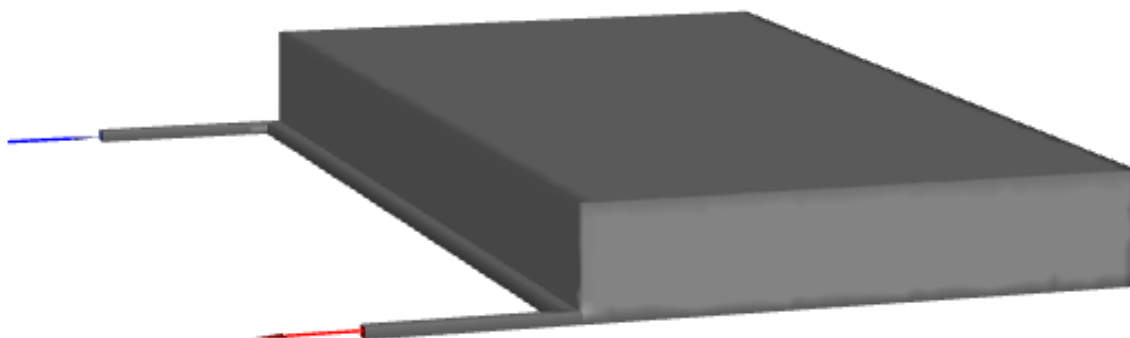


Figure 1. Physical model of goaf  
图 1. 采空区物理模型

Table 1. Physical model parameters  
表 1. 物理模型参数

区域	工作面体积参数/m
采空区	150 (深度) × 280 (宽) × 30 (高)
工作面	280 (长) × 5 (宽) × 3 (高)
进风巷	50 (长) × 4.5 (宽) × 3 (高)
回风巷	50 (长) × 4.5 (宽) × 3 (高)

### 2.3. 边界条件设置

将采空区设置为多孔介质，工作面、进风巷与回风巷设置为流体类型。进风巷入口设置为速度入口，其气体体积分数  $O_2$  占 21%， $N_2$  占 79%。注气管入口同样设置为速度入口，入口气体分别为二氧化碳和氮气。回风巷出口边界设置为自由出流。壁面边界为无滑移静态壁面。

对物理模型的网格划分是计算流体动力学分析的关键步骤，网格的疏密与质量将直接影响到计算结果的准确性。因此将进风巷、回风巷、工作面网格进行加密，注气口位置网格更加密集，采空区网格相对比较稀疏。体划分使用 Tet/Hybrid，即以四面体为主，在适当位置上包括六面体、楔形和锥型网格。类

型网格为 TGrid，即将网格指定为四面体元素，但在适当处可能包含六面体、楔形和金字塔形网格。然后对其进行网格划分。

求解器采用分离式求解器，湍流模型使用 standardk- $\epsilon$  两方程模型，使用 SIMPLE 算法，将迭代残差设置为  $10^{-6}$ 。

## 2.4. 基本数学模型

主要探究  $O_2$ 、 $CO_2$  以及  $N_2$  在采空区中的运移规律，运用的基本方程如下所示：

质量守恒方程[10]：

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_f u_i)}{\partial x_i} = s_m \quad (1)$$

式中， $\rho_f$ ——混合气体密度， $kg/m^3$ ； $u_i$ —— $i$  方向上采空区的平均速度分量， $m/s$ ； $s_m$ ——采空区内气体质量增加量， $kg/(m^3 \cdot s)$ 。

动量守恒方程[11]：

$$\frac{\partial (\rho_f u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_f u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \cdot \partial x_j} + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \rho_f g + s_i \quad (2)$$

式中， $P$ ——气体微元上的压强， $Pa$ ； $\mu$ ——粘度， $Pa \cdot s$ ； $g$ ——重力加速度， $9.81 m/s^2$ ； $s_i$ —— $i$  方向上气体在采空区多孔介质运移过程中附加的动量损失源项， $s_i = -(\mu/k)u_i$ ，其中， $k$ ——渗透率， $m^2$ 。

组分输运方程[12]：

$$\frac{\partial (\rho_f Y_n)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_f u_i Y_n)}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{J}_n}{\partial x_i} + R_n + S_n \quad (3)$$

式中， $Y_n$ ——采空区混合气体中组分  $n$  的质量分数； $\bar{J}_n$ ——采空区混合气体中组分  $n$  的扩散流量， $\bar{J}_n = -\rho_f \cdot D_n \cdot \Delta Y_n$ ，其中  $D_n$  为物质  $n$  的质量扩散系数， $m^2/s$ ； $R_n$ ——采空区混合气体中组分  $n$  的化学反应生产量， $kg/(m^3 \cdot s)$ ； $S_n$ ——采空区混合气体中组分  $n$  的源项， $kg/(m^3 \cdot s)$ 。

能量守恒方程[13]：

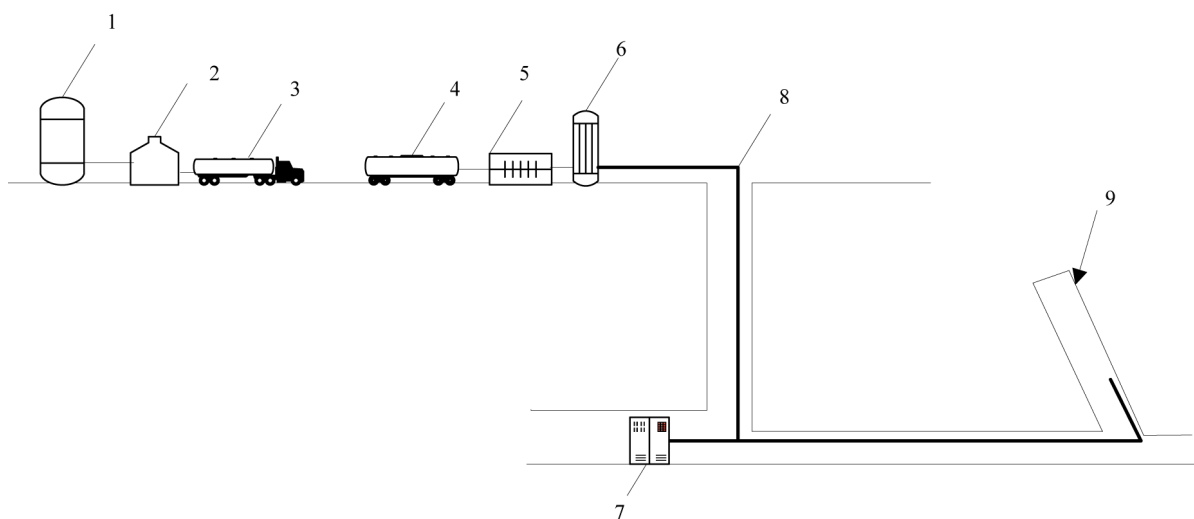
$$\frac{\partial (\epsilon \rho_f E_f + (1-\epsilon) \rho_s E_s)}{\partial t} + \frac{\partial (u_i (\rho_f E_f + P))}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_n h_n \bar{J}_n + \Phi + S_f^h \quad (4)$$

式中， $\epsilon$ ——采空区多孔介质孔隙率； $\rho_s$ ——多孔介质中固体物质的密度， $kg/m^3$ ； $E_f$ ——采空区混合气体所具有的总能量， $J/kg$ ； $E_s$ ——多孔介质中固体介质的总能量， $J/kg$ ； $k_{eff}$ ——多孔介质的有效热传导系数， $W/(m \cdot K)$ ； $\Phi$ ——粘性耗散函数； $S_f^h$ ——采空区单位时间内、单位体积上的煤自燃生成热， $J/(m^3 \cdot s)$ 。

## 3. 注 $CO_2$ 参数优选

### 3.1. $CO_2$ 灌注工艺

采空区遗煤自燃现象较为严重，通过向采空区压注惰性气体可以降低氧气浓度以及“三带”范围，达到防止遗煤自燃的效果。相关研究表明，与氮气相比，灌过  $CO_2$  后的煤样更不易自燃，且二氧化碳抑制煤炭自燃效果比氮气更佳，因此选用  $CO_2$  作为惰性气体抑制遗煤自燃。二氧化碳灌注工艺如图 2 所示，液态  $CO_2$  在地面被气化装置转化成气体，通过管路长距离运输到井下采空区。压注  $CO_2$  是重要的防灭火措施之一，其关键在于注气口的位置与注气量的大小，注气管设置在进风巷一侧，便于二氧化碳通过风流扩散，更好的达到惰化作用。



注：1——制液态二氧化碳机组；2——固定液态二氧化碳贮槽；3、4——汽车型液态二氧化碳槽车；5——汽化器；6——热交换器；7——智能调控装置；8——管路；9——采空区

Figure 2. Carbon dioxide injection process system  
图 2. 二氧化碳灌注工艺系统

### 3.2. 不同注气口位置的影响

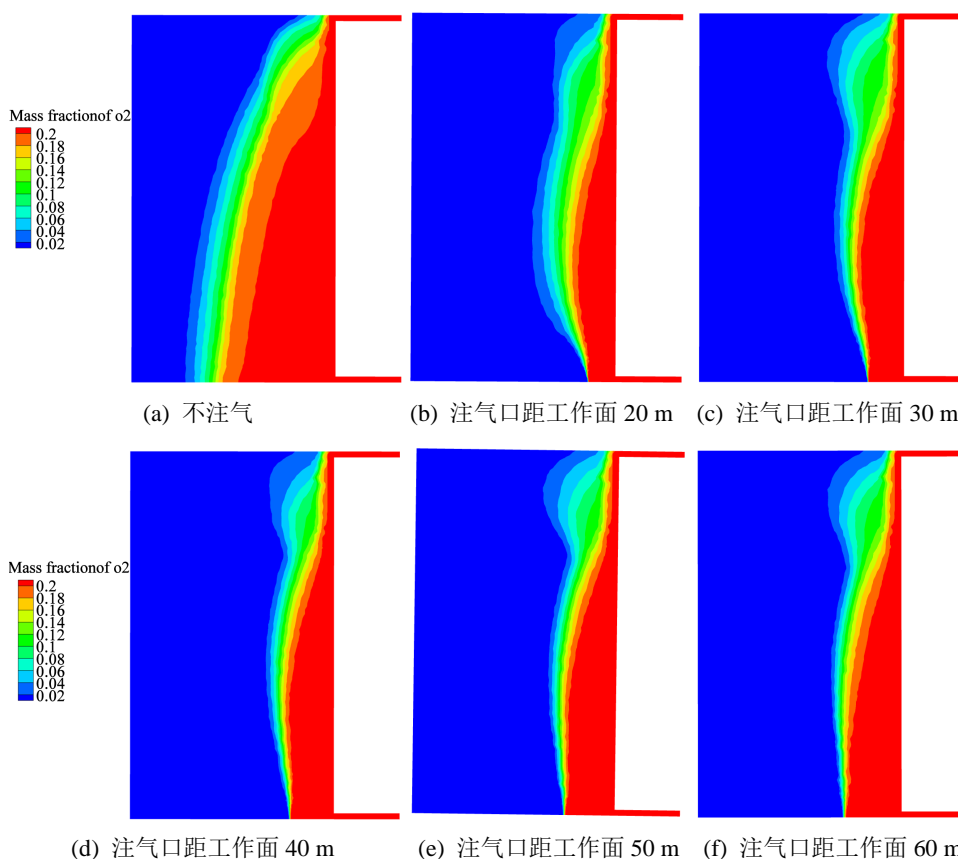


Figure 3. Cloud chart of oxygen volume fraction in goaf  
图 3. 采空区氧气体积分数云图

注气口位置对抑制采空区遗煤自燃起着重要作用,为探究最佳注气位置,同时结合钱营孜西翼煤柱工作面实测数据,分别设置了四个不同距离的注气口位置,分别距工作面的距离为30 m、40 m、50 m、60 m。由于 $\text{CO}_2$ 密度较大,因此将 $\text{CO}_2$ 注气口设置在距离煤层底板约1 m处,管道为直径1 m的圆管,有利于自下而上排挤采空区内低密度的气体,达到更好的惰化作用。结合西翼煤柱工作面实际,设置注气量为 $520 \text{ m}^3/\text{h}$ ,分别对不同的注气口位置进行模拟,选择距离煤层底板1 m处作为研究对象,得到 $\text{O}_2$ 浓度分布云图如图3所示。

由图3可知,当向采空区压注 $\text{CO}_2$ 后,采空区中氧气浓度相比于未注气时变化尤为明显,进风巷侧“三带”范围显著降低,回风巷侧“三带”变化较小。其平均自燃氧化带宽度与注气口位置之间的拟合关系曲线如图4所示。

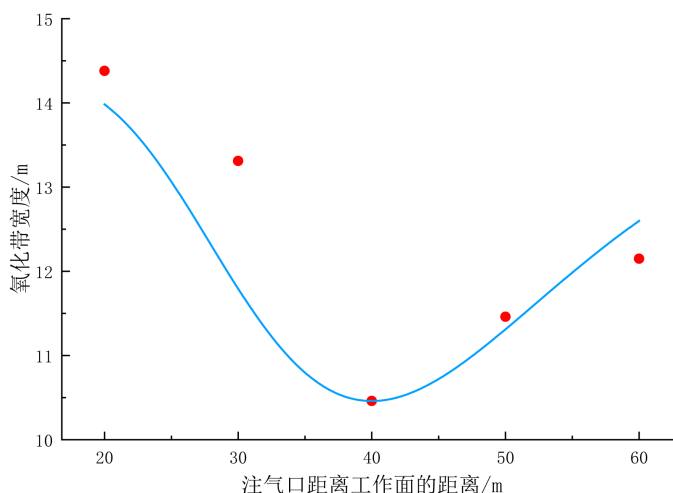


Figure 4. Fitting curve of relationship between oxidation zone width and distance from gas injection port to working face

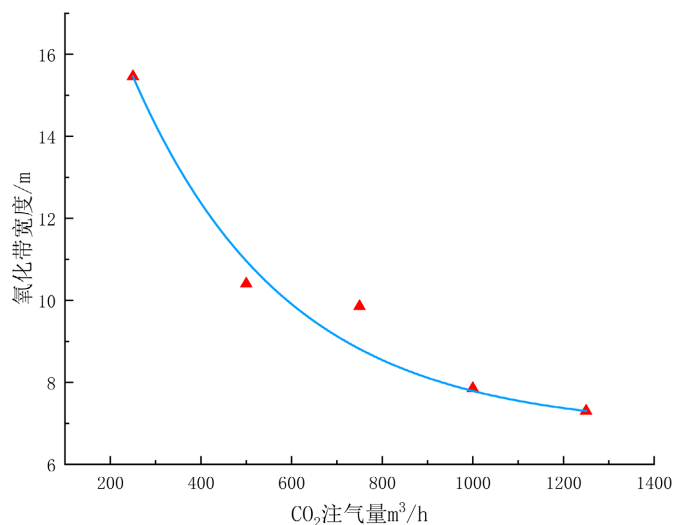
图4. 氧化带宽度与注气口距工作面距离关系拟合曲线

由图4可知,当注气量均为 $520 \text{ m}^3/\text{h}$ 而注气口距离工作面的距离不同时,注气口距工作面距离在20 m~40 m范围之内,其采空区平均氧化带宽度由宽逐渐变窄。随着注气口距工作面距离的增加,在40 m~60 m时,氧化带宽度逐渐由窄变宽。因此,当二氧化碳注气量为 $520 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,注气口距离工作面40 m时采空区平均氧化带宽度达到最低,为最佳注气位置。

### 3.3. 不同注气量的影响

注入采空区的的惰性气体越多,驱替采空区 $\text{O}_2$ 的作用越强,能有效降低采空区“三带”宽度,对抑制遗煤自燃效果越好。但过多的注入惰性气体会导致其进入到回风巷以及工作面,使相应地点的气体浓度超标,同时也不符合经济效益,浪费经济成本。因此选用合理的注气量是关键,根据模拟结果,注气口距工作面的距离选用最适宜的50 m,设定四种不同的二氧化碳注气量分别为 $250 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $500 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $750 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ ,得到采空区平均氧化带宽度与不同注气量之间的关系拟合曲线如图5所示。

由图5可知,随着二氧化碳注气量的不断增加,采空区氧化带平均宽度逐渐降低。二氧化碳注气量从 $250 \text{ m}^3/\text{h}$ 至 $500 \text{ m}^3/\text{h}$ 期间氧化带宽度变窄速率较大,氧化带宽度缩短了5 m;注气量在 $500 \text{ m}^3/\text{h}$ 至 $750 \text{ m}^3/\text{h}$ 之间氧化带仅缩短了0.5 m;注气量从 $750 \text{ m}^3/\text{h}$ 增至 $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,氧化带缩短了2 m。此时再增加注气量后,对氧化带宽度变化的影响极小,浪费经济成本且易导致二氧化碳溢出到工作面,因此,当注气口距工作面40 m时,二氧化碳注气量为 $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ 达到最佳防灭火效果。



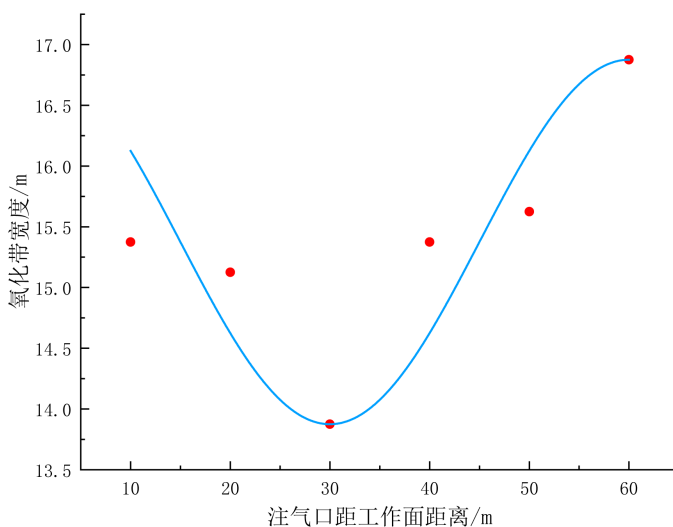
**Figure 5.** Fitting curve of relationship between oxidation zone width and gas injection rate

**图 5.** 氧化带宽度与注气量关系拟合曲线

## 4. 注 N<sub>2</sub> 参数优选

### 4.1. 不同注气口位置的影响

注氮防灭火也是采空区防灭火技术的重要组成部分,为探究最佳注气位置,共设置六个注气口,距工作面距离分别为 10 m、20 m、30 m、40 m、50 m、60 m,同样选取注气量为 520 m<sup>3</sup>/h 进行最佳注气口位置研究,对模拟结果进行分析,得到平均氧化带宽度与注气口距工作面距离之间的拟合关系曲线如图 6 所示。



**Figure 6.** Fitting curve of relationship between oxidation zone width and distance from gas injection port to working surface

**图 6.** 氧化带宽度与注气口距工作面距离关系拟合曲线

由图 6 可知,注气口位置在距工作面 10 m 到 30 m 期间时,氧化带宽度减小速率由慢至快,距离达到 30 m 时氧化带宽度降低到最窄宽度,此时再增加注气距离,氧化带宽度又开始逐渐增加,因此,当注入氮量为 520 m<sup>3</sup>/h 时,注气口距工作面距离为 30 m 时达到最佳防灭火效果。



## 4.2. 不同注气量的影响

根据对不同注气口位置进行模拟得到最佳注气口距工作面距离为 30 m, 在此处分别设置不同的注氮量研究最佳惰化效果, 注氮量分别为 250 m<sup>3</sup>/h、500 m<sup>3</sup>/h、750 m<sup>3</sup>/h、1000 m<sup>3</sup>/h、1250 m<sup>3</sup>/h。通过对模拟结果进行数据提取分析, 绘制出氧化带平均宽度与注氮量之间的关系拟合曲线如图 7 所示。

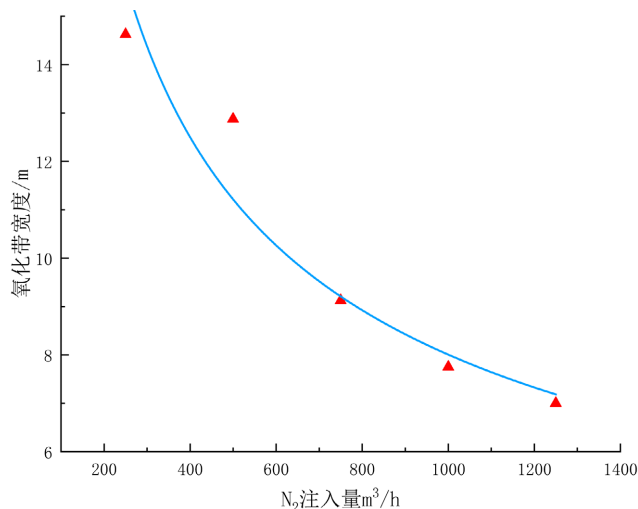


Figure 7. Fitting curve of relationship between oxidation zone width and gas injection rate

图 7. 氧化带宽度与注气量关系拟合曲线

由图 7 可知, 随着注氮量的增加, 氧化带宽度逐渐降低, 当注气量由 250 m<sup>3</sup>/h 增至 750 m<sup>3</sup>/h 时氧化带宽度降低速率较快。注氮量大于 750 m<sup>3</sup>/h 后, 氧化带宽度降低速率越来越慢。注氮量达到 1000 m<sup>3</sup>/h 后, 再增加注气量对氧化带宽度的减少作用在消弱, 此时再增加注氮量不符合经济效益, 浪费成本。因此当注气口距工作面 30 m 时, 注氮量为 1000 m<sup>3</sup>/h 达到最佳惰化效果。

## 5. CO<sub>2</sub> 与 N<sub>2</sub> 惰化效果对比

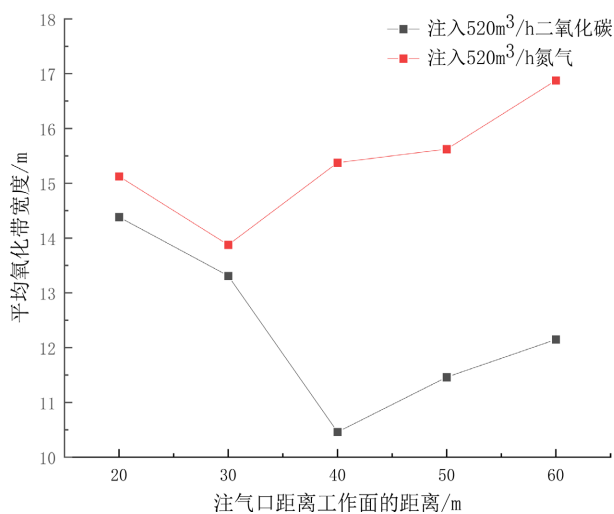


Figure 8. Comparison of inerting effects of carbon dioxide and nitrogen

图 8. 二氧化碳与氮气惰化效果对比图



二氧化碳与氮气常作为惰性气体用于采空区防灭火,其理化性质各不相同,因此惰化效果也有所差异。选取注气量均为 520 m<sup>3</sup>/h 时在注气口距工作面 20 m~60 m 处的惰化效果进行分析,得到分别注入两种气体后的采空区平均氧化带宽度,其对比如图 8 所示。

由图 8 可知,在任意注气口分别注入相同量的氮气与二氧化碳后,注入二氧化碳后的采空区平均氧化带宽度低于注入氮气后的宽度,由此可见二氧化碳惰化效果比氮气惰化效果更加显著。同时相关研究表明,在火区内注入氮气后,达到阻爆临界点需要氧气浓度达到 12%,氧气浓度达到 9.5% 才能熄灭明火。而注入二氧化碳后,阻爆临界点的氧浓度为 14.6%,氧浓度为 11.5% 就能熄灭明火。因此,二氧化碳相比于氮气更适合作为惰性气体进行采空区防灭火工作。

## 6. 结论

(1) 结合钱营孜西翼煤柱工作面实际情况,利用 Fluent 模拟软件建立了采空区注二氧化碳与氮气模型,研究了不同注气条件下(不同注气类别、不同注气量以及不同注气口位置)采空区的惰化情况。确立了注二氧化碳时选择注气口位置距工作面 40 m,注气量为 1000 m<sup>3</sup>/h 时达到最佳惰化效果,注氮气时选择注气口位置距工作面 30 m,注气量为 1000 m<sup>3</sup>/h 时达到最佳惰化效果。

(2) 在相同注气条件下对二氧化碳与氮气惰化效果进行对比分析,二氧化碳更能有效降低采空区氧化带宽度,防灭火效果优于氮气。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(52074122)。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 苏凯. 冯家塔矿 1401 面采空区火源探测及煤自燃防治技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2012.
- [3] 王国芝, 姜奎, 王怡, 等. 二氧化碳防灭火技术在采空区发火治理中的应用研究[J]. 金属矿山, 2021(10): 214-220.
- [4] 张长山, 张辛亥. 罐装液态二氧化碳直接防灭火技术[J]. 煤矿安全, 2016, 47(9): 82-84.
- [5] 韩兵, 杨宏伟, 高宏, 等. 复合惰性气体采空区自然发火防治技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(3): 73-76.
- [6] 邵昊, 蒋曙光, 吴征艳, 等. 二氧化碳和氮气对煤自燃性能影响的对比试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2244-2249.
- [7] 姜奎, 王怡, 任广意, 等. 姚桥煤矿 8059 工作面采空区注 CO<sub>2</sub> 防灭火技术参数优化模拟与应用研究[J]. 矿业安全与环保, 2021, 48(3): 74-78.
- [8] 杨黎, 郑万成, 赵波, 等. 注氮对相邻采空区自燃“三带”影响模拟研究[J]. 能源与环保, 2022, 44(6): 312-318.
- [9] 邓军, 程超, 吴晓春. 煤矿可燃性气体爆炸氧浓度的实验研究[J]. 煤矿安全, 2007, 38(6): 5-7.
- [10] 周发明. 基于数值模拟的采空区瓦斯分布规律研究[J]. 现代矿业, 2013, 29(1): 55-57+63.
- [11] 韩颖, 刘德宝. 不同通风方式条件下采空区氧气与瓦斯分布规律研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(1): 115-118.
- [12] 白铭波, 蔡国斌, 高军伟, 等. 基于 FLUENT 数值模拟的综合采面采空区自燃“三带”研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(11): 143-146.
- [13] 胡锦涛, 刘泽功. 基于 FLUENT 对银洞沟 110201 综采工作面采空区自燃“三带”的数值模拟[J]. 煤炭技术, 2021, 40(8): 111-115.