

# 台阶型综放开采采空区自燃“三带”分布规律研究

毛庆福<sup>1\*</sup>, 王雷<sup>1</sup>, 谷廷华<sup>1</sup>, 刘丰源<sup>2</sup>, 刘笑<sup>2#</sup>

<sup>1</sup>济宁市金桥煤矿通防科, 山东 济宁

<sup>2</sup>山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2022年12月9日; 录用日期: 2023年1月10日; 发布日期: 2023年1月18日

## 摘要

台阶型煤体综放工作面由于周围存在大面积采空区, 漏风现象较为严重, 给工作面火灾防治工作带来极大挑战。以金桥煤矿1304工作面为例, 对该工作面采空区温度、CO浓度及O<sub>2</sub>浓度分布规律进行了测试研究。通过研究, 合理地确定了采空区不同位置自燃“三带”的分布范围, 进而通过计算得出了工作面的最小推进速度, 以确保该工作面顺利回采。研究结论对各类煤矿企业开展类似采煤工作面的回采灭火工作提供了理论和技术上的重要支撑。

## 关键词

自然三带, 最小推进速度, 防灭火, 台阶型煤体

# Study on Distribution Law of Spontaneous Combustion “Three Zones” in Goaf of Step Fully-Mechanized Top-Coal Caving Mining

Qingfu Mao<sup>1\*</sup>, Lei Wang<sup>1</sup>, Tinghua Gu<sup>1</sup>, Fengyuan Liu<sup>2</sup>, Xiao Liu<sup>2#</sup>

<sup>1</sup>Department of Communication and Prevention, Jinqiao Coal Mine of Jining, Jining Shandong

<sup>2</sup>College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

Received: Dec. 9<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jan. 10<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 18<sup>th</sup>, 2023

\*第一作者。

#通讯作者。

## Abstract

Due to the existence of a large area of goaf around the fully mechanized top-coal caving face with step briquette, the air leakage phenomenon is more serious, which poses a great challenge to the workface fire prevention and control. Taking the 1304 working face of Jinqiao coal mine as an example, the distribution pattern of temperature, CO concentration and O<sub>2</sub> concentration in the mining void area of this working face was tested and studied. Through the study, the distribution of the “three zones” of spontaneous combustion at different locations in the mining area was reasonably determined, and the minimum advance speed of the working face was calculated to ensure smooth recovery of the working face. The findings of the study provide important theoretical and technical support for the fire prevention and suppression work in similar coal mining face in various coal mining enterprises.

## Keywords

Three Zones of Spontaneous Combustion, Minimum Propulsion Speed, Fire Prevention and Suppression, Stepped Briquette

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

矿井火灾是煤矿开采所面临的“五大灾害”之一，由采空区遗煤自然发火导致的内因火灾是矿井火灾的主要原因[1]。矿井火灾不仅会使大量煤炭资源被埋藏地下无法开采，导致采煤区域面积减少，还可能危及井下人员生命安全、导致设备损坏、给煤矿生产带来严重经济损失[2] [3]。为预防采空区遗煤的自燃危险，需要对采空区进行“三带”的划分，其划分指标如表1所示[4] [5]。

**Table 1.** Classification standard of spontaneous combustion three zones in goaf

**表 1. 采空区自燃三带划分标准**

三带	漏风风速/m/min	氧气浓度/%	温升/°C/d
散热带	>0.24	>18	<1 的靠近工作面区域
氧化带	0.10~0.24	10~18	≥1 的区域
窒息带	<0.1	<10	<1 的采空区压实区域

国内各大煤矿和相关学者在采空区“自燃”三带分布规律方面做了大量的研究。孙珍平等[6]利用邻空巷道对采空区钻孔取气，对开采前后采空区自燃“三带”分布规律进行了研究。郝宇等[7]建立采空区多场耦合的数学模型，模拟研究不同通风量、瓦斯含量下采空区自燃“三带”分布特征。文虎等人[8]通过现场采样测定煤氧含量的变化规律，与数值模拟相结合，对煤层分层前后煤自燃“三带”的分布情况进行分析。沈志远[9]和刘忠全[10]等通过束管监测采空区内气体浓度，得到采空区自燃“三带”分布特征。为确定采空区“自燃”三带分布范围，李宗翔等[11]提出以采空区漏风流场与浓度场确定自燃“三带”的方法。徐精彩等[12]研究提出采空区煤炭自燃的定量标准，例如自燃发火最小浮煤厚度、最低氧气百分

比等。金永飞等[13]以束管观测的方式,通过CFD软件对煤层采空区内注氮工作参数发生改变时,煤层自燃区域的变化情况进行模拟研究,以最终实现预防煤层发生自燃等灾害事故的目的。程卫民等[14]通过现场束管监测,依据鲁西煤矿采空区内氧气浓度及其分布的实际情况,对鲁西煤矿采空区内氧气自燃“三带”的范围进行了划分;邵磊[15]利用最新光纤测温技术,监视了采空区内遗煤温度变化,同时与氧气浓度相结合大致确定了潘一矿采空区内可能发生自燃的危险区。曹镜清等[16]通过现场观测,得到了CO、O<sub>2</sub>等气体的浓度,并采用数值拟合升温速率,确定了采空区自然发火的危险区域。

目前,随着煤矿开采的持续推进,为解决开采难度大、经济效益低等问题,越来越多的开采作业面采用台阶型综采工作面的布置方式,即综采工作面与两顺槽巷道间留有一个台阶,但此类工作面周围存在大面积采空区,漏风现象较为严重,给工作面火灾防治工作带来极大挑战。因此,本文以济宁市金桥煤矿(以下简称金桥煤矿)1304工作面为例,通过对1304工作面采空区温度、O<sub>2</sub>浓度及CO浓度分布规律进行测试研究,合理科学地给出了工作面自燃“三带”区域,并相应地求出该工作面的最小推进速度,以有效确保该工作面的顺利回采,同时为各煤矿企业类似工作面回采防灭火工作提供了重要的理论及技术支持。

## 2. 企业概况

金桥煤矿位于山东省济宁市金乡县,2002年1月建成投产,2022年7月经山东省能源局核准,核定生产能力为110万吨/年。自2017年1月济宁矿业集团接管金桥煤矿后,将原有分层开采工艺改为综放开采工艺。1304工作面是综采放顶煤工作面,东侧为1302上工作面采空区,西侧斜上方为1316上工作面采空区,北邻冲刷带无煤区、南邻西翼带巷和西翼轨道巷。煤层倾角为3~12°,平均倾角6°。厚度为1.5~8.7m,1304工作面上分层平均已开采煤层厚为2.7m,余下平均厚度为4.6m,呈台阶型煤体布置。与传统综放工作面的不同之处是,该工作面的东侧上方约111m处存在上分层的采空区,在分析采空区自燃“三带”分布规律时,应充分考虑上分层采空区对“三带”分布的影响。

## 3. 现场测试方案

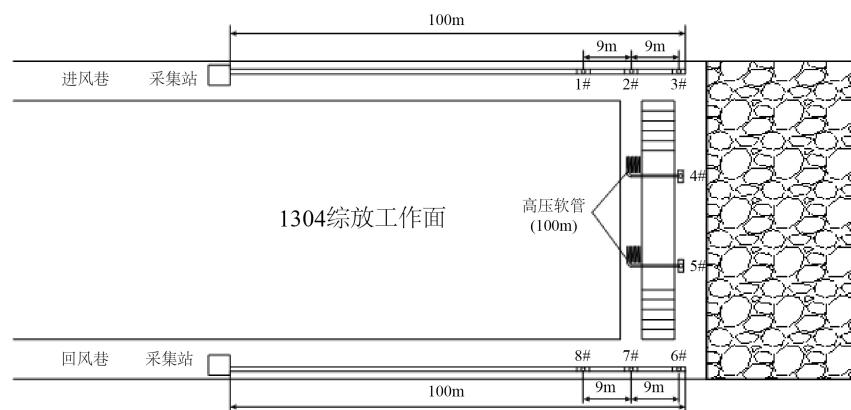
### 3.1. 测点布置

如图1所示,温度传感器和束管安装在1304综放工作面采空区内,用以监测及分析温度和气体。1#、2#和3#测点位于进风巷一侧,6#、7#和8#测点位于回风巷一侧,每个测点之间的距离约为9m;4#和5#测点则布置在1304上工作面两顺槽的以内约10m处。各测点均布置有温度传感器和束管,每个测点的温度传感器和束管将随着工作面的推进逐渐埋入采区内。

由于矿井环境条件恶劣,温度传感器必须要同时具备稳定性好、安全性能高、防潮、防腐蚀、抗静电冲击等优良特性,并且传感器信号必须能适应于远距离传送,且应达到安全、防爆的要求。此次温度传感器选用HX-RS-TP104-120M高精度铂电阻温度传感器,该传感器测温元件为德国原装进口PT100,测温范围-50~250℃,完全能够满足煤炭自燃的早期预测预报。束管气体采集使用便携式的气体采集仪进行采集。

### 3.2. 保护装置

为避免采空区冒落的煤岩砸坏温度传感器、取样胶管被挤压或因粉尘阻塞而不能提取气体样品,温度传感器和束管的端头必须加以保护。进风巷和回风巷的钢管尺寸为50~60mm,长约100m,温度传感器和束管位于钢管的两端头。并在其周围设置穿孔,以便气体进入。工作面的4#和5#测点,为了便于操作,采用高压软管进行保护,高压软管的尺寸为25mm,长度约200m。束管及温度传感器保护装置如图2所示。



**Figure 1.** 1304 layout of “Three Zones” observation pipeline for spontaneous combustion in goaf of working face

**图 1.** 1304 工作面采空区自燃“三带”观测管路布置图



**Figure 2.** Protection devices

**图 2.** 保护装置

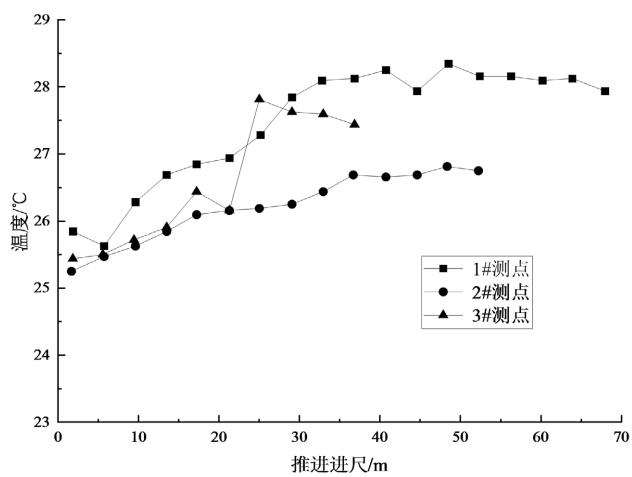
### 3.3. 测试方案

观测管路铺设完成后，在30天的观测时间内，每天同一时间对各测点进行数据采集，采集内容包括温度探头数据、采空区气样和工作面推进进尺，准确记录各测点数据，将气样带回地面，利用气相色谱仪分析气体成分变化。对采空区进风侧、中间位置和回风侧采集到的温度、CO浓度和O<sub>2</sub>浓度的相关数据进行分类、比较和分析，确定自燃“三带”范围。

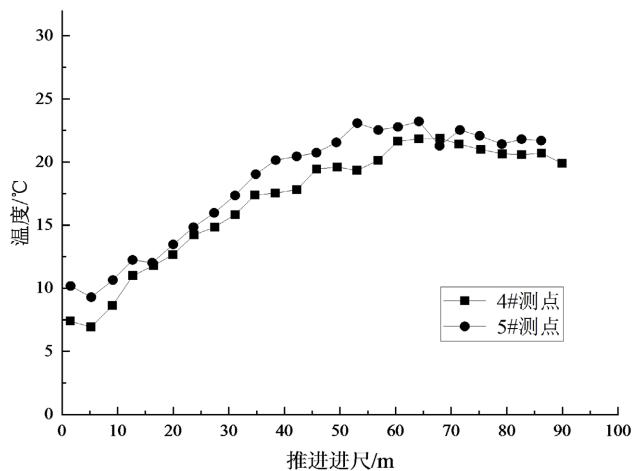
## 4. 测试结果及分析

### 4.1. 采空区温度分布规律

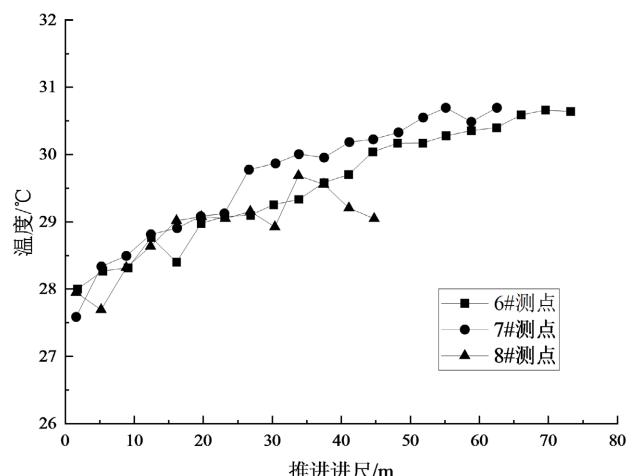
通过测试，得到1#~3#测点、4#和5#测点以及6#~8#测点温度随推进尺度的变化曲线，分别如图3~5所示。由图可知，在推进过程中进风侧1#~3#测点、采空区中部4#和5#测点以及回风侧6#~8#测点的温度变化规律基本一致，均是缓慢升高，达到一定温度后又趋于稳定。其中，进风侧1#~3#测点温度由最初的25.22℃~25.83℃缓慢上升至26.80℃~28.32℃；采空区中部4#和5#测点从初始温度27.27℃~27.87℃上升至30.08℃~30.21℃，随后温度逐渐趋于平稳，最高点的温度对应工作面的推进进尺为63.87m至66.6m；回风侧6#~8#测点的温度变化区间为27.57℃~30.65℃，而后趋于稳定。



**Figure 3.** Temperature change curve of 1#~3# measuring points  
**图 3.** 1#~3#测点温度变化曲线



**Figure 4.** Temperature change curves of 4#, 5# measuring points  
**图 4.** 4#、5#测点温度变化曲线



**Figure 5.** Temperature change curve of 6#~8# measuring points  
**图 5.** 6#~8#测点温度变化曲线

从进风侧(1#~3#)到回风侧(6#~8#), 1304 综放工作面采空区温度上升, 主要是因为漏风风流的存在, 在漏风风流的作用下, 温度从 25.22℃上升到 27.57℃。在进风侧, 进风风流起到了冷却降温作用, 因此在进风侧测点处, 所测得的温度相对较低; 回风侧的漏出风流会携带氧化热以及采空区高地温热量, 起到加热升温作用, 因此在回风侧测点处, 所测得的温度相对较高。

采空区遗煤在进入氧化区后, 由于煤氧化加热和采空区内部高温传热等因素的影响, 温度缓慢升高, 且在进风侧后方的温度相对稳定, 说明煤的氧化速度较慢, 处于潜伏期或预热期, 进入室熄区后, 其温度逐渐降低。上述温度指标的分析表明, 1304 综放工作面采空区的内部遗煤在观测过程中存在较强的自燃氧化现象, 其温度参数能够反映出采空区遗煤的氧化趋势, 但受围岩、周围温度的影响较大。所以在“三带”划分时只能将温度作为一个辅助因素, 不是主要的判断指标。

#### 4.2. 采空区 CO 浓度分布规律

通过测试, 得到 8 个测点在推进过程中 CO 浓度的变化曲线图, 分别如图 6~8 所示。

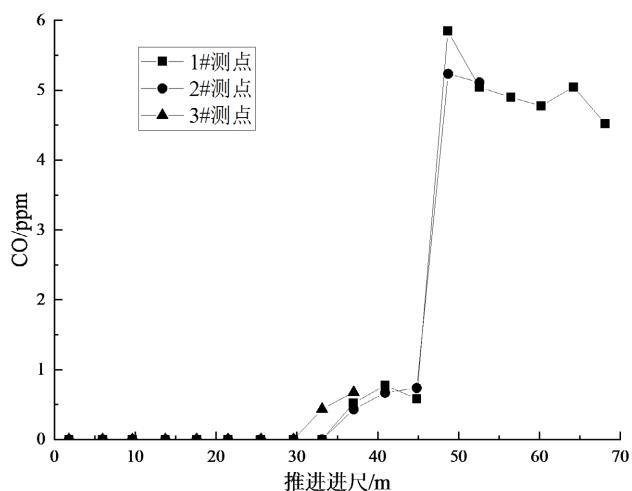


Figure 6. CO concentration change curve of 1#~3# measuring points  
图 6. 1#~3#测点 CO 浓度变化曲线

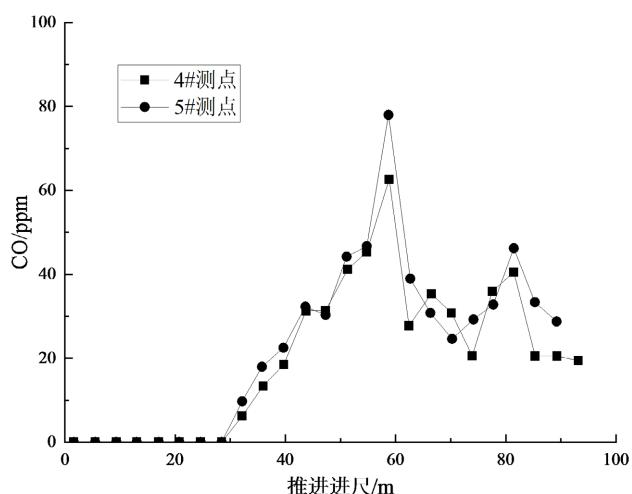


Figure 7. CO concentration change curves of 4#, 5# measuring points  
图 7. 4#、5#测点 CO 浓度变化曲线

由图6可知,当推进进尺推进至30 m后,进风侧的1#~3#测点开始出现低浓度的CO,随着工作面的推进,CO浓度开始逐渐增加,43 m后急剧增加,在离工作面约50 m处达到最大值5.82 ppm,此后出现下降趋势,但下降比较缓慢。造成该现象的可能原因是:一是由于漏风带及氧化带氧化过程中未完全氧化,CO随着漏风向采空区后部扩散;二是室熄带内遗煤未被充分氧化。

从图7中可以看出,采空区中部4#、5#测点当工作面向前推进20 m时,CO开始出现,然后CO浓度迅速上升,在离工作面60 m左右时达到最大值,为77.31 ppm,然后CO浓度逐渐降低。

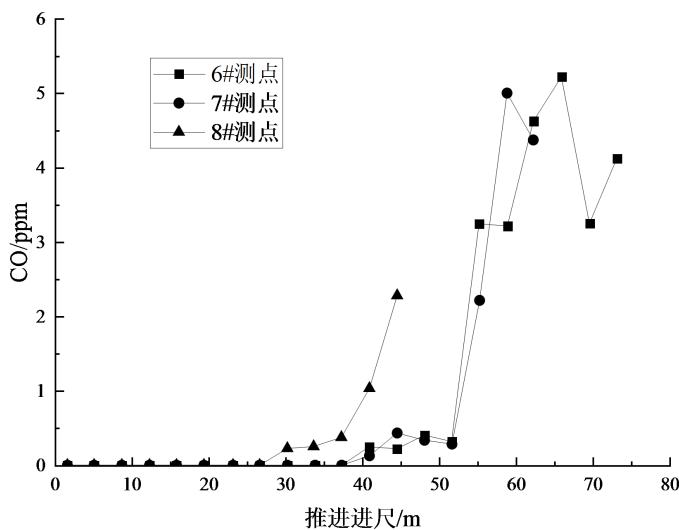


Figure 8. CO concentration change curve of measuring points 6#~8#

图8. 6#~8#测点 CO浓度变化曲线

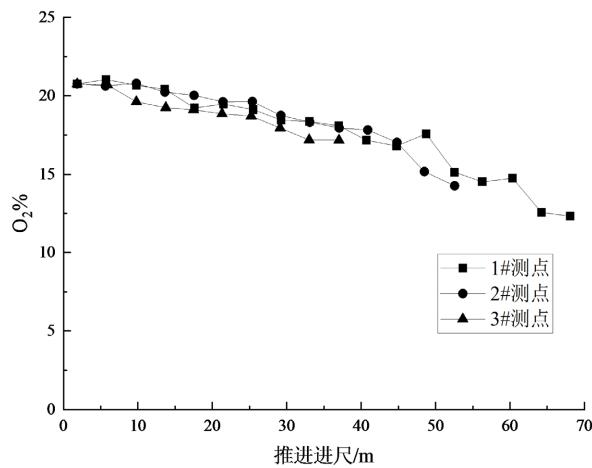
从图8中可以看出,回风侧6#~8#测点的CO浓度变化趋势与1#~3#测点相似,在工作面推进40 m左右时CO开始出现,随后逐渐增加,距工作面66.8 m左右时达到最大值,其浓度为5.19 ppm。采空区CO的形成以低温氧化为主,在回风隅角和回风流中的CO浓度处于正常状态,并不影响采空区的正常生产,反之,如果回风隅角和回风流中的CO浓度处于异常状态,需特别注意可能产生的煤自燃现象,防患于未然,采取相应措施进行预防。

### 4.3. 采空区O<sub>2</sub>浓度分布规律

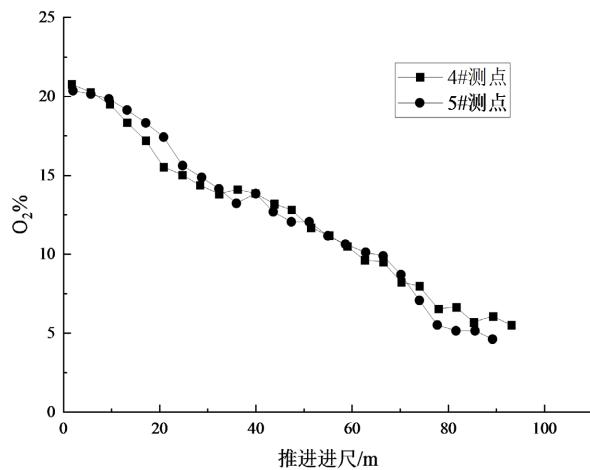
图9~11分别显示了1#~3#测点、4#和5#以及6#~8#测点的O<sub>2</sub>浓度随推进尺度的变化曲线。从图中可以看出,所有测点的O<sub>2</sub>浓度随着推进进尺的推进基本呈现逐渐降低的趋势。

如图9所示,在1#测点由26.6 m推进至31.4 m时,O<sub>2</sub>浓度从18.24%降低到17.87%,由散热带进入氧化带。工作面推进70 m左右,采空区O<sub>2</sub>浓度仍保持在10%以上,未达到室熄带内,说明进风巷采空区氧化带宽度较宽。

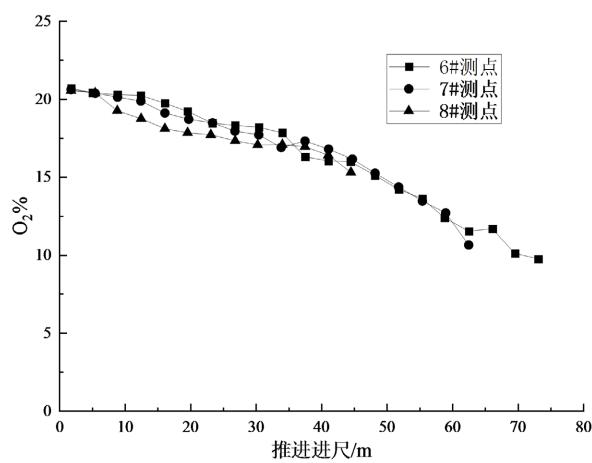
从图10中可以看出,随着推进尺度的增加,采空区中部4#和5#测点的O<sub>2</sub>浓度均发生了比较显著的下降。其中,4#测点在推进至15.3 m处时,O<sub>2</sub>浓度降低到17.07%,进入氧化带,在工作面推进至62 m时,O<sub>2</sub>浓度降低到9.65%,进入室熄带;5#测点在推进17.7 m后,O<sub>2</sub>浓度降低到17.40%,进入氧化带,在工作面推进至66.6 m时,O<sub>2</sub>浓度降低到9.81%,进入室熄带。这是因为两个测点均在采空区的中心位置,直接顶板为粗砂岩,比较破碎。工作面推进后,采空区可以得到很好的压实。漏风通道少,从而减少了漏风,造成残煤氧化较差,从而导致O<sub>2</sub>浓度迅速下降,进入窒息带。



**Figure 9.** Change curve of  $O_2$  concentration at 1#~3# measuring points  
**图 9.** 1#~3#测点  $O_2$  浓度变化曲线



**Figure 10.** Change curves of  $O_2$  concentration at 4# and 5# measuring points  
**图 10.** 4#、5#测点  $O_2$  浓度变化曲线



**Figure 11.** Change curve of  $O_2$  concentration at measuring points 6#~8#  
**图 11.** 6#~8#测点  $O_2$  浓度变化曲线

在回风端,  $O_2$  浓度随着工作面的不断推进而逐渐降低, 分析原因可以得出: 这是由于采矿区的遗煤被逐渐氧化, 在此过程中  $O_2$  被逐渐消耗, 而新鲜风流无法通过漏风通道补充  $O_2$  所造成的。从图 11 中可以看出, 6#测点在工作面推进至 26 m 处时,  $O_2$  浓度为 17.94%, 进入室熄带, 推进 75.6 m 处时,  $O_2$  浓度为 9.61%, 进入阻熄区; 7#测点在推进至 27.6 m 处时,  $O_2$  浓度为 17.77%, 进入氧化带; 8#测点在推进至 23.8 m 时,  $O_2$  浓度为 17.83%, 进入氧化带。

## 5. 自燃“三带”及最小推进度确定

### 采空区自燃“三带”范围确定

通过对上述采空区不同区域自燃发火“三带”的分析, 得到金桥煤矿 1304 综放面采空区自燃“三带”的分布情况, 如表 2 所示。

**Table 2.** 1304 distribution law of spontaneous combustion “Three Zones” in goaf of fully mechanized caving face  
**表 2.** 1304 综放工作面采空区自燃“三带”分布规律

采空区位置	散热带/m	氧化带/m	室熄带/m
进风侧	0~35.60	35.60~	/~ $\infty$
中部(靠进风侧)	0~15.30	15.30~62.00	62.00~ $\infty$
中部(靠回风侧)	0~17.70	17.70~66.60	66.60~ $\infty$
回风侧	0~25.80	25.8~75.60	75.60~ $\infty$

结果表明: 采空区内散热带分布范围约为 15 m, 但在进风巷和回风巷采空区差异较大, 其中散热带在进风巷约为 35.6 m, 在回风巷的采空区约是 25.8 m。主要是因为工作面巷道和采空区冒落岩石的压实程度不同, 两道都在煤柱的悬臂支护范围内, 锚网等支撑导致孔隙率更大, 渗透性更好。并且矿井在进、回风侧, 工作面每推进 15~20 m 左右垒挡风墙, 在一定程度上减少了漏风, 回风侧散热带宽度要短于进风侧。

对于氧化带的范围, 在进风侧, 工作面进风隅角连续供给新鲜空气, 并且在煤壁的支撑下, 渗透率高, 氧化带特别宽, 未出现窒息带。而在回风侧, 渗透情况与进风侧基本一致, 但没有新鲜风流供给, 只有采空区氧化后的乏风排放, 其氧化带比进风巷小。采空区的内部自燃范围大约在 15.3~66.6 m 的区间内。

随着工作面的持续推进, 氧化带、窒息带随之向前推进, 采空区遗煤的滞留时间也随之缩短, 氧化、聚热的时间愈短, 自然发火的危险愈小。为了确保矿井安全, 必须加快推进速度, 确保矿井的正常运行, 这是预防煤层自燃发火的关键。

依据采空区自燃“三带”的分布, 结合工作面的实际条件, 得出最小推进速度, 可以有效地预防采空区的自燃。

1304 综放工作面的最小推进速度由下式(1)确定, 式中各符号的含义如表 3 所示。

$$V = K \cdot \frac{L_{\text{氧}}}{T_{\min}} \quad (1)$$

在确定氧化带长度时, 考虑该工作面上部为 1304 上工作面采空区, 采空区倾向长度为 111 m, 走向长度为 718.3 m, 其上部 1304 上工作面两顺槽的遗煤量较多, 有一定的自燃风险, 因此, 氧化带的长度以 4#和 5#测点中的最大值为准, 选择 47.9 m。

**Table 3.** Meaning of each symbol in the formula (1)  
**表 3.** (1)式中各符号含义

$V$	工作面最小推进速度, m/d
$K$	安全系数, 根据工作面遗煤量、地质特点等因素综合判定
$L_{\text{氧}}$	采空区自燃“三带”中氧化带长度, m
$T_{\min}$	煤层煤样的最短自然发火期, d

1304 工作面在 1304 上工作面的下部, 其工作面和两个巷道的位置局部重叠。目前工作面无断裂、陷落柱等地质结构。推进过程中, 切眼、两巷变坡点、1304 上工作面皮顺以下等部位遗煤量大, 存在着较大的自然发火风险。通过上述对各项因素的分析, 确定了安全系数  $K$  为 1.8。

绝热条件下煤层自然发火期的数学计算模型如式(2)所示[17] [18] [19] [20]。式中各符号含义如表 4 所示。对金桥煤矿 1304 采煤工作面煤样进行最短自然发火期实验, 根据煤样升温氧化实验结果, 由式(2)可得到 3 煤层的最短自然发火期为 62 天。由式(1)知金桥煤矿 1304 综放工作面在工作面长度 151 m、采高 2.8 m、平均放高 1.8 m 的条件下, 其最小推进速度为 1.46 m/d。

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{\left( C_p^{t_i} + C_p^{t_{i+1}} \right) (t_i - t_{i+1}) / 2 + \Delta W \lambda / 100 + \Delta \mu Q'}{1440 [q(t_i) + q(t_{i+1})] / 2} \quad (2)$$

**Table 4.** Meaning of each symbol in the formula (2)  
**表 4.** (2)式中各符号含义

$T$	最短自然发火期, d
$C_p^{t_i}$ 、 $C_p^{t_{i+1}}$	煤样在温度为 $t_i$ 和 $t_{i+1}$ 时的比热容, KJ/(kg·K)
$\Delta W$	$t_i$ 至 $t_{i+1}$ 温度段内煤样水分蒸发量, %
$\lambda$	水蒸发吸热量, 取 $2.26 \times 10^6$ J/kg
$\Delta \mu$	为实验条件下 $t_i$ 至 $t_{i+1}$ 时间瓦斯解析量, $m^3/kg$
$Q'$	瓦斯解析热, 取 $1.26 \times 10^7$ J/ $m^3$
$q(t_i)$ 、 $q(t_{i+1})$	煤样在温度为 $t_i$ 和 $t_{i+1}$ 时的放热速率, J/(Kg·min)

按照 1304 工作面开采设计方案, 在工作面长度 151 m、采高 2.8 m、平均放高 1.8 m 的条件下, 日推进速度为 3.0 m/d, 比可能出现自燃的最大推进速度要大得多。所以, 根据开采设计方案的推进速度, 采空区内无自然发火隐患。

需要指出的是, 1.46 m/d 的推进速度是均衡采空区自然发火风险因素的理论值。工作面通过地质构造、变坡点等区域时遗煤量较大, 因此, 在通过这些地区时, 必须调整生产进度, 合理地提高推进速度, 并提前采取相应的防火技术措施, 以有效保证工作面的安全。

## 6. 结语

- 1) 采用温度传感器和束管监测 1304 工作面采空区内 CO 浓度、温度、O<sub>2</sub> 浓度等参数的变化情况, 对各个测点各参数的分布情况进行分析, 以此为依据确定了采空区不同位置自燃“三带”的分布。
- 2) 结合金桥煤矿自燃“三带”的分布特点、工作面实际条件, 确定了 1304 综放工作面长约为 151 m, 采高 2.8 m, 平均放高 1.8 m 时, 其最小推进速度为 1.46 m/d。根据 1304 工作面开采设计方案的推进速度,

采空区内无自然发火隐患。

3) 台阶型煤体综放工作面由于漏风等问题, 火灾防治工作难度加大, 在工作面通过地质构造、变坡点等区域时, 要合理地对生产计划进行调整, 采取有效措施, 例如可加快推进速度或采取相应技术措施来降低火灾发生概率。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(52174193)。

## 参考文献

- [1] Li, J., Li, Z., Yang, Y., *et al.* (2019) Room Temperature Oxidation of Active Sites in Coal under Multi-Factor Conditions and Corresponding Reaction Mechanism. *Fuel*, **256**, Article ID: 115901. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115901>
- [2] Wen, H., Wang, H., Liu, W.Y., *et al.* (2020) Comparative Study of Experimental Testing Methods for Characterization Parameters of Coal Spontaneous Combustion. *Fuel*, **275**, Article ID: 117880. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117880>
- [3] 梁运涛, 罗海珠. 中国煤矿火灾防治技术现状与趋势[J]. 煤炭学报, 2008, 33(2): 126-130.
- [4] 谢军, 薛生. 综放采空区空间自燃三带划分指标及方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 65-68.
- [5] Deng, J. (2013) Quantitative Determination for the “Three Zones” of Coal Spontaneous Combustion in Gobs Based on Probability Function. *Disaster Advances*, **6**, 210-218.
- [6] 孙珍平. 基于邻空巷钻孔技术的特厚煤层均压工作面采空区自燃“三带”研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(12): 140-143. <https://doi.org/10.13347/j.cnki.mkaq.2019.12.032>
- [7] 郝宇, 逢锦伦. 不同风量和瓦斯条件下采空区自燃“三带”分布规律[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(2): 40-44. <https://doi.org/10.19835/j.issn.1008-4495.2020.02.008>
- [8] 文虎, 张泽, 赵庆伟, 等. 煤层分层前后采空区自燃“三带”的数值模拟[J]. 煤矿安全, 2017, 48(3): 178-181.
- [9] 沈志远, 齐庆杰, 张海洋, 郭晓天. 瑞安煤矿双巷束管监测技术优化及采空区“三带”划分[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(6): 62-65.
- [10] 刘忠全, 郝宇. 综放采空区自燃“三带”分布影响因素研究[J]. 煤炭工程, 2017, 49(10): 94-96.
- [11] 李宗翔, 许端平, 刘立群. 采空区自然发火“三带”划分的数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(5): 545-548.
- [12] 徐精彩, 文虎, 张辛亥, 等. 综放面采空区遗煤自燃危险区域判定方法的研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(6): 39-44.
- [13] 金永飞, 杨正伟, 孙超, 等. 基于 FLUENT 的注氮参数对采空区煤自燃防治的影响研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(11): 230-233.
- [14] 程卫民, 孙路路, 张孝强. 基于氧气浓度分布规律的综采工作面采空区自燃“三带”的特征研究[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(5): 7-10, 99.
- [15] 邵磊. 采空区自燃“三带”的实测分析及数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
- [16] 曹镜清, 邬剑明, 周春山, 等. 低位放顶煤采空区自燃区域划分与注氮口位置确定[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(2): 89-94.
- [17] 孙喜贵, 徐长富, 姚海飞, 张群, 吴海军. 门克庆煤矿 3-1 煤层最短自然发火期实验研究[J]. 煤矿开采, 2016, 21(4): 130-133. <https://doi.org/10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2016.04.033>
- [18] 朱建芳, 秦跃平, 李俊鸿, 薛村矿 2 号煤最短自然发火期的研究[J]. 中国矿业, 2007(3): 74-76.
- [19] 余明高, 黄之聪, 岳超平. 煤最短自然发火期解算数学模型[J]. 煤炭学报, 2001(5): 516-519.
- [20] 魏超, 单文选, 陈江龙, 孙际宏. 某煤层标志性气体与最短自然发火期实验研究[J]. 华北科技学院学报, 2021, 18(4): 36-40+66. <https://doi.org/10.19956/j.cnki.ncist.2021.04.006>