

# Y型通风工作面采空区自燃“三带”分布特性研究

郭辉<sup>1</sup>, 杨泽林<sup>2\*</sup>, 司俊鸿<sup>2</sup>, 程根银<sup>2</sup>, 王攀昊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>山西焦煤华晋沙曲一号煤矿, 山西 柳林

<sup>2</sup>华北科技学院应急技术与管理学院, 河北 三河

收稿日期: 2024年4月22日; 录用日期: 2024年5月24日; 发布日期: 2024年7月8日

## 摘要

为了研究Y型通风条件下采空区自燃“三带”分布, 提出综合指标判定法, 在采空区布置束管和温度探测头开展现场监测, 分析氧气、一氧化碳、二氧化碳和温度的空间变化特征, 综合划分采空区自燃“三带”范围。研究表明: 随着采空区深度增加, 氧气浓度降低, 一氧化碳和二氧化碳气体浓度先增高再降低, 温度存在上升趋势但并不显著。利用其变化特征划分自燃“三带”, 采空区进风侧散热带范围为0~25 m, 氧化带25~93 m; 窒息带大于93 m; 回风侧散热带为0~51 m, 氧化带51~101 m, 窒息带大于101 m。工作面最小推进速度为0.65 m/d。

## 关键词

Y型通风, 采空区, 煤自燃, 三带

# Study on Distribution Characteristics of Spontaneous Combustion “Three Zones” in Goaf of Y-Type Ventilation Working Face

Hui Guo<sup>1</sup>, Zelin Yang<sup>2\*</sup>, Junhong Si<sup>2</sup>, Genyin Cheng<sup>2</sup>, Panhao Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shaqu No.1 Coal Mine, Huajin Coking Coal Co, Liulin Shanxi

<sup>2</sup>School of Emergency Technology and Management, North China Institute of Science and Technology, Sanhe Hebei

Received: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2024; accepted: May 24<sup>th</sup>, 2024; published: Jul. 8<sup>th</sup>, 2024

\*通讯作者。

文章引用: 郭辉, 杨泽林, 司俊鸿, 程根银, 王攀昊. Y型通风工作面采空区自燃“三带”分布特性研究[J]. 矿山工程, 2024, 12(3): 375-381. DOI: 10.12677/me.2024.123045

## Abstract

To investigate the distribution of “three zones” of spontaneous combustion in goaf under Y-type ventilation conditions, a comprehensive index determination method is proposed. This involves the arrangement of ducts and temperature probes in the goaf for on-site monitoring. The spatial variation characteristics of oxygen, carbon monoxide, carbon dioxide, and temperature are analyzed to comprehensively delineate the range of the “three zones” of spontaneous combustion in the goaf. The research findings indicate that with the increase in goaf depth, the oxygen concentration decreases, while the concentrations of carbon monoxide and carbon dioxide gases initially increase and then decrease, with temperature showing a rising trend but not significantly. Based on these characteristics, the “three zones” of spontaneous combustion are divided as follows: the cooling zone on the inlet side of the goaf ranges from 0 to 25 meters, the oxidation zone ranges from 25 to 93 meters, and the suffocation zone is greater than 93 meters; on the return air side, the cooling zone ranges from 0 to 51 meters, the oxidation zone ranges from 51 to 101 meters, and the suffocation zone is greater than 101 meters. The minimum advancing speed of the working face is 0.65 meters per day.

## Keywords

Y-Type Ventilation, Goaf, Spontaneous Combustion of Residual Coal, Three Zones

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

火灾是煤矿重大自然灾害之一，特别是采空区内部发生的煤自燃火灾事故，使矿井遭受资源浪费和经济损失，且严重威胁井下工作人员的生命安全[1] [2]。将工作面通风方式由U型改变成Y型，解决工作面上隅角有害气体积聚，但巷道风流通过巷帮孔隙与采空区接触，风流交换增多，漏风强度增加，遗煤在漏风的高氧环境中氧化加快，且氧化带宽度较大[3]-[5]。

针对Y型工作面采空区自燃“三带”，诸多学者对此做出研究，贾廷贵等[6]建立流-化-热多场耦合数学方程，利用模拟软件研究，得出埋管抽采瓦斯影响氧化带宽度。张清清[7]利用束管采集气体，发现在留巷巷帮抽采瓦斯使回风巷侧散热带宽度增加，产生“拖尾”现象。李洪先等[8]通过COMSOL软件，得出氧化带自回风侧向进风侧大体呈L型分布。田垚等[9]借助数值模拟，发现采空区含氧量与距工作面和沿空留巷距离呈正相关关系，散热带、氧化带和窒息带呈L型分布，“三带”范围随高度增加而变化。桂小红等[10]通过束管采气，以O<sub>2</sub>浓度为主指标，将CO、CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>等气体浓度为辅助指标划分采空区自燃“三带”。

综上，目前的研究方法主要为现场实测和数值模拟，而现场实测多以气体浓度为关键指标。但数值模拟无法完全复现采空区内部特征，且氧气浓度指标过于单一。基于此，本文以沙曲一号煤矿4503工作面Y型通风采空区为工程背景，采用铺设束管和测温线路的方式进行现场测试，利用氧气、一氧化碳、二氧化碳浓度和温度值研究采空区自燃“三带”分布规律，为采空区防火措施的制定提供依据。

## 2. 采空区自燃“三带”划分

采空区自燃“三带”划分是采空区自燃防治措施的理论基础[11]。按照采空区漏风程度和遗煤自燃的

潜在倾向,划分为散热带、氧化带和窒息带。在采空区自燃“三带”区域判定中,划分采空区自燃“三带”的指标主要有氧气浓度、温度和漏风强度[12]-[14],对应数值分别为氧气浓度 8%~18%,温升速度  $1^{\circ}\text{C}/\text{d}$  和漏风风速  $0.1\sim 0.24\text{ m}/\text{min}$  [15]。

但在现场测试中,采空区内部条件复杂,风速测试困难,漏风测定误差大,所以漏风强度测定通常在计算机模拟中实现。煤体导热性较差,采空区内部传热过程缓慢,温度仅作为辅助性指标。采空区氧气浓度分布综合反映了漏风情况和遗煤氧化程度,在发生自燃的位置,遗煤耗氧量较大,氧气浓度变低,从而通过氧气含量判断煤体处于何种状态。此方法准确性较高,且气体浓度便于检测。一氧化碳和二氧化碳浓度在数值上可以反映采空区遗煤氧化程度。遗煤氧化反应剧烈,则两种气体的浓度增加,因此,在一定程度上有助于提高采空区自燃“三带”划分的准确性。

为提升采空区自燃“三带”划分的准确性,提出综合指标判定法,即氧气浓度为主要指标,一氧化碳、二氧化碳浓度和温度作为辅助指标,将气体浓度值与温度值变化的规律结合分析。在采空区现场预先铺设束管和测温线路,监测采空区内部温度和指标气体浓度。通过综合考虑气体浓度和温度的分布,划分采空区自燃“三带”,进而得出采空区遗煤自燃区域分布的真实状态。

### 3. 现场测试

#### 3.1. 工程概况

沙曲一号煤矿位于山西省吕梁市柳林县,沙曲一号煤矿资源丰富,核定生产能力 450 万吨/年,井田面积 68.3817 平方公里,可采储量 6.4 亿吨,服务年限 102 年。

4<sup>#</sup>煤层倾角  $2^{\circ}\sim 7^{\circ}$ ,平均煤厚 4.2 m,有益开采厚度为 4.1 m,地质条件相对简单。4503 工作面位于 4<sup>#</sup>煤层,采用单一倾斜长壁采煤法,煤种为焦煤,瓦斯压力最大为 1.06 MPa,最大原始瓦斯含量为  $8.96\text{ m}^3/\text{t}$ ,具有突出危险性,自然发火期为 104 天。该工作面轨道巷和胶带巷作为进风巷道,原 4504 轨道巷作为 4503 回风巷,形成 Y 型通风系统。

#### 3.2. 现场施工

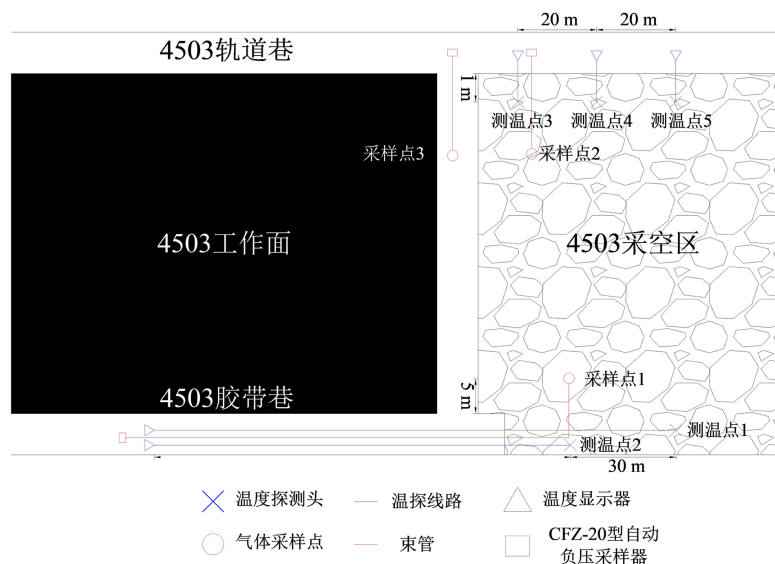


Figure 1. Arrangement of measuring points  
图 1. 测点布置示意

将采空区温度和气体浓度作为现场监测指标，共设计 3 个气体测点和 5 个温度测点。

1) 气体测点布置：沿采空区倾向预埋钻杆，并使用束管转接。在 4503 胶带巷，测点深入采空区 5 m，编号为 1-1；在 4503 回风巷，为减小漏风对气体浓度数据的影响，测点深入采空区 15 m，测点间距 20 m，编号为 1-2 和 1-3。观测过程中，使用 CFZ-20 型自动负压采样器抽取测点位置气体，之后通过球胆收集并运送至地面进行色谱分析测试。

2) 温度测点布置：在 4503 胶带巷，沿采空区走向布置 2 个温度测点，间距为 30 m，编号为 2-1 和 2-2；在 4503 回风巷，沿采空区倾向布置 3 个温度测点，间距与气体测点间距相同，编号为 2-3、2-4 和 2-5。选择矿用本安型 GWP200 温度传感器监测温度，通过矿用本安型三芯导线将传感器和显示器连通。气体测点和温度测点布置如图 1 所示。

### 3.3. 数据监测

#### 3.3.1. 气体浓度分布特性

实测日期为 38 天，工作面共推进 112 m。回采过程中，回风巷位置的测点 1-3 线路损坏，选择进风侧的气体测点 1-1 和回风侧的气体测点 1-2 进行气体浓度监测数据分析。

##### 1) 氧气浓度分布特性

利用实测数据，绘制氧气浓度变化曲线，如图 2 所示。

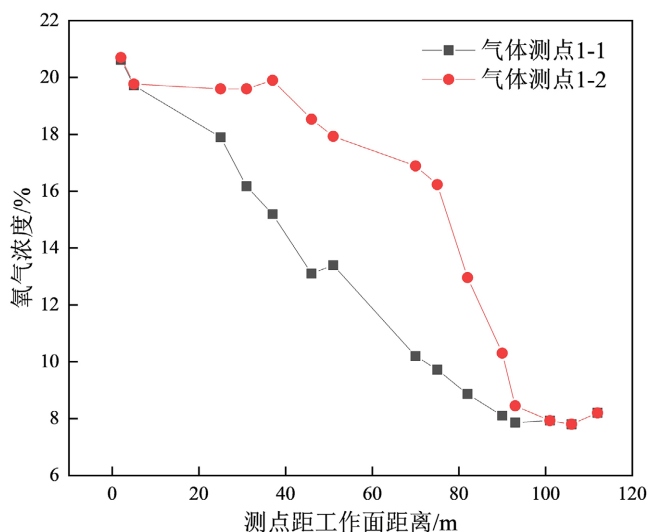


Figure 2. Oxygen concentration monitoring data

图 2. 氧气浓度监测数据

由图 2 可知，随着工作面开采推进，气体测点 1-1 和 1-2 进入采空区深部，氧气浓度值逐渐下降。在采空区进风侧，恒阻锚杆支护导致顶板延迟垮落，当测点距离工作面 25 m 时，氧气浓度降至 17.9%，进入氧化带范围；当测点距离工作面 93 m 时，氧气浓度降至 7.85%，进入窒息带范围。因此，采空区进风侧 25~93 m 为氧化带范围，该区域自然氧化剧烈、热量积聚，自然发火可能性较大。

4503 采空区回风侧靠近工作面区域应力较小，裂隙与孔隙发达，漏风较多，当测点距工作面 51 m 时，氧气浓度下降，进入氧化带范围；测点距工作面 101 m 时，处于采空区压实程度较大的位置，氧气浓度降至 8% 以下。51~101 m 之间确定为氧化带范围，与散热带相比，该处位置的孔隙较为密集，气体流通受阻，耗氧补充不及时，氧气浓度降低，是矿井防灭火工作的重点关注区域。

##### 2) 一氧化碳浓度分布特性

利用束管采集采空区气体，进风侧与回风侧一氧化碳浓度数据如图3所示。

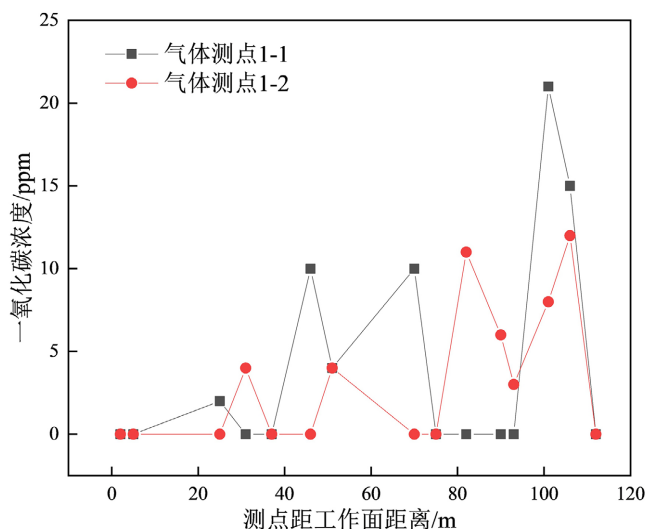


Figure 3. Carbon monoxide concentration monitoring data

图3. 一氧化碳浓度监测数据

由图3可知，气体测点距离工作面较近时，未测到一氧化碳气体，该位置处于散热带范围。随着测点距工作面距离增加，两侧一氧化碳浓度整体呈现上升趋势，且进风侧的一氧化碳浓度较高。在采空区进风侧25~106 m，一氧化碳浓度较高，遗煤氧化升温现象明显，最大浓度值为21 ppm，表明该范围大多属于氧化带。在回风侧31 m位置处，检测到一氧化碳气体存在，之后降为零；在51~106 m范围内，多次检测到一氧化碳气体存在，最大浓度值为12 ppm，表明进入氧化带范围，遗煤开始氧化且氧化程度不断加剧。在采空区深部，环境条件不利于遗煤氧化。一氧化碳浓度逐渐减小，进入窒息带。

### 3) 二氧化碳浓度分布特性

采空区两侧二氧化碳浓度数据如图4所示。

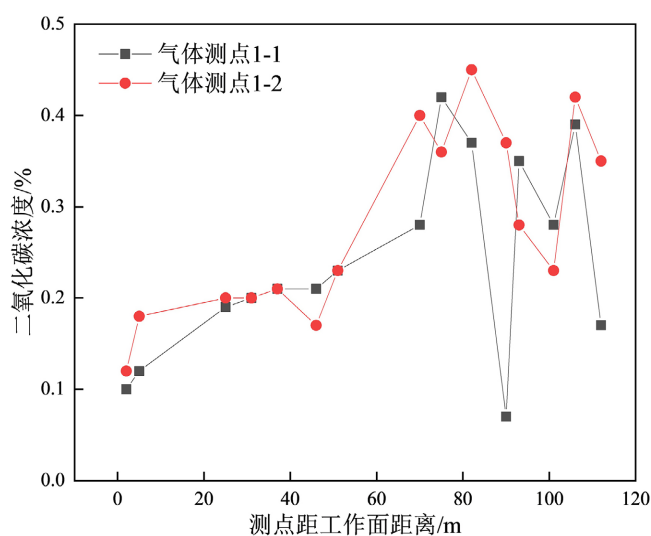


Figure 4. Carbon dioxide concentration monitoring data

图4. 二氧化碳浓度监测数据

由图4可知,采空区两侧二氧化碳浓度值整体呈现先上升后下降趋势。在采空区进风侧25 m位置,二氧化碳浓度有明显上升趋势,表明该处位置存在进入氧化带的倾向;在采空区进风侧75 m位置,二氧化碳浓度达到最大,浓度值为0.42%,该位置处于氧化带范围。在回风侧46~51 m,二氧化碳浓度升至0.23%,增幅明显,表明氧化带和散热带分界位置存在于此范围内;在回风侧82 m位置处,监测到最大浓度值为0.45%,该位置处于氧化带范围。在采空区深部,上覆顶板已经基本垮落且垮落后压实程度较好,漏风强度和煤岩孔隙较小,导致氧化带产生的二氧化碳难以扩散到窒息带区域。由此推断,二氧化碳气体大范围分布且浓度值存在上升迹象的区域为氧化带,散热带和窒息带的二氧化碳气体较少。

### 3.3.2. 温度分布特性

统计采空区温度数据,温度随采空区深度变化如图5所示。

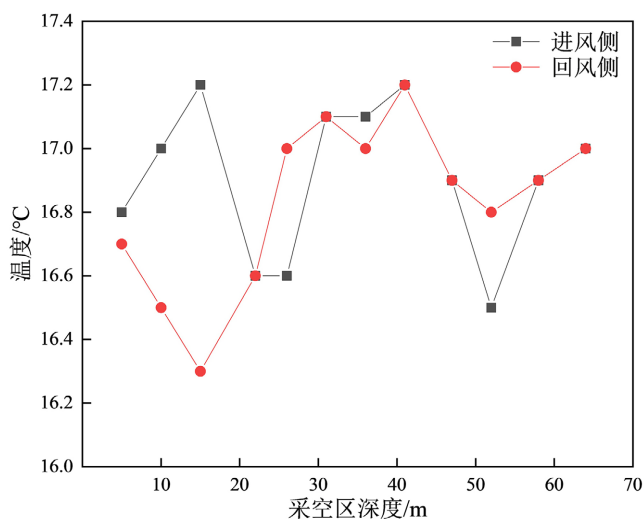


Figure 5. The variation law of goaf temperature with depth  
图5. 采空区温度随深度变化规律

由图5可知,在采空区进风侧22~26 m位置,存在较好的蓄热条件,温度存在上升趋势,表明该位置是散热带和氧化带的交界处。在采空区回风侧,分别在15 m和52 m位置存在温度上升趋势。采用Y型通风的工作面采空区漏风较大,且15 m距离工作面较近,确定52 m附近区域是散热带和氧化带分界位置。温度变化在一定程度上可以反映遗煤的自热规律。即随着采空区深度的增加,遗煤氧化放出热量,热量积聚,表现为温度上升。

## 4. 采空区自燃“三带”研究结果

根据采空区“O形圈”理论,采空区越向深部发展,压实程度越大,孔隙率很小,漏风流场呈现流速很慢的层流态,因此,氧气无法到达采空区更深位置,氧气浓度不断下降。通过现场实测以及数据分析,得出采空区自燃“三带”的位置,见表1。

Table 1. The location of spontaneous combustion ‘three zones’ in goaf  
表1. 采空区自燃“三带”位置

位置	散热带/m	氧化带/m	窒息带/m	氧化带宽度/m
进风侧	<25	25~93	>93	68
回风侧	<51	51~101	>101	50

加快工作面推进速度是预防采空区遗煤自燃的有效技术措施。最小推进速度为,

$$v_{\min} = L_{\max} / t_{\min} \quad (1)$$

式中,  $L_{\max}$ ——采空区氧化带最大宽度, m;  $v_{\min}$ ——工作面最小推进速度, m/d;  $t_{\min}$ ——煤的最短自然发火期, d。

4<sup>#</sup>煤的最短自然发火期为 104 天。现场实测氧化带最大宽度为 68 m。利用公式(4-1)计算最小推进速度为 0.65 m/d。建议 4503 综采工作面推进速度超过 0.65 m/d, 使氧化带区域在短期内转为窒息带, 抑制遗煤氧化反应, 防治自燃灾害。

## 5. 结论

1) 确定采空区自燃“三带”划分的关键指标。提出以氧气浓度值为主要指标, 一氧化碳、二氧化碳浓度值为辅助指标, 并加以温度值作为辅助手段。通过分析其变化趋势, 确定采空区自燃“三带”分布。

2) 设计 4503 采空区自燃“三带”实测方案。在 4503 采空区的进、回风侧选取气体和温度测点位置, 通过铺设束管和测温线路采集现场数据。

3) 根据实测结果确定自燃“三带”范围。4503 综采工作面采空区进风侧散热带位于 0~25 m; 氧化带位于 25~93 m; 窒息带大于 93 m; 回风侧散热带位于 0~51 m; 氧化带位于 51~101 m; 窒息带大于 101 m。建议工作面推进速度超过 0.65 m/d。

## 基金项目

河北省在读研究生创新能力培养资助项目(CXZZSS2024158)。

## 参考文献

- [1] 秦波涛, 仲晓星, 王德明, 等. 煤自燃过程特性及防治技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 66-99.
- [2] 贾宝山, 汪伟, 祁云, 等. 晋牛矿 1303 综放面采空区注氮方案研究及数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(3): 82-88.
- [3] 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.
- [4] 杜明. Y 型通风工作面采空区漏风封堵技术应用[J]. 江西煤炭科技, 2023(3): 196-198.
- [5] 李昶, 蔡峰. Y 型通风采空区漏风流场数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(4): 126-129.
- [6] 贾廷贵, 李颜兵, 娄和壮, 等. Y 型通风方式瓦斯与煤自燃耦合模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 390-395.
- [7] 张清清. Y 型通风抽采条件下采空区自燃“三带”研究[J]. 煤, 2023, 32(1): 57-60.
- [8] 李洪先, 王国芝, 朱明凯, 等. Y 型通风下采空区瓦斯与自然发火耦合危险区域划分研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(8): 105-109.
- [9] 田焱, 汤思敏, 王佳俐, 等. 基于示踪检测法与数值模拟的 Y 型通风工作面采空区漏风规律研究[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(5): 40-45.
- [10] 桂小红, 蔚世鹏. 综放工作面 Y 型通风方式下的采空区自燃“三带”研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(2): 49-53.
- [11] 刘伟, 秦跃平, 杨小彬, 等. 采空区自然发火的能量迁移理论[J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 906-910.
- [12] 周健, 刘泽功. 采空区三维耦合场数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(6): 116-121.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王文才, 刘涛涛, 王政, 等. 双标准划分综采工作面采空区自燃“三带”[J]. 煤炭技术, 2018, 37(6): 138-140.