

中文引用格式:郭庆,任万兴,王圣程,等. 基于气体核密度的采空区煤自燃危险区域划分[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(12): 96-102.

英文引用格式:GUO Qing, REN Wanxing, WANG Shengcheng, et al. Division of spontaneous combustion risk zones in coal mine gob areas using gas kernel density distribution[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 96-102.

基于气体核密度的采空区煤自燃危险区域划分^{*}

郭庆¹讲师, 任万兴^{**2}教授, 王圣程¹副教授, 汪皓³讲师

(1 徐州工程学院 土木学院, 江苏 徐州 221018; 2 中国矿业大学 安全学院, 江苏 徐州 221116; 3 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 200135)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.1445

基金项目:国家自然科学基金资助(52404230);国家重点研发计划项目(2022YFC3004701)。

【摘要】 为预防采空区煤自燃灾害,精准划分采空区煤自燃危险区域,通过统计分析现场采空区CO和O₂体积分数,得到气体体积分数随采空区长度的变化特征,确定煤自燃预警临界值范围,并提出基于气体体积分数核密度的采空区煤自燃危险区域划分方法。结果表明:采空区O₂体积分数符合线性变化且具有阶段性,拐点前的变化速率小于拐点后的变化速率;CO体积分数符合二次多项式变化特征;CO和O₂体积分数的核密度随着采空区长度的增加而降低,其最高核密度分布范围分别为0~10 m和0~30 m;拐点前O₂体积分数更加稳定,拐点后O₂体积分数波动性更大,拐点前后O₂体积分数的上、下可接受区间平均值分别为3.3%和6.3%;通过核密度划分煤自燃危险区域的CO和O₂体积分数临界值为0.009%和15.1%,将采空区划分为安全、潜在危险和危险3个危险等级4个象限。

【关键词】 煤自燃; 采空区; 危险区域; 核密度; 统计学特征

Division of spontaneous combustion risk zones in coal mine gob areas using gas kernel density distribution

GUO Qing¹, REN Wanxing², WANG Shengcheng¹, WANG Hao³

(1 School of Civil Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou Jiangsu 221018, China;

2 School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China;

3 College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

Abstract: To prevent coal spontaneous combustion disasters in the gob area and precisely delineate hazardous zones, the variation patterns of CO and O₂ volume fractions along the gob length were statistically analyzed based on field measurements. Critical warning threshold ranges for spontaneous combustion were established and a gob hazard zoning method based on gas volume fraction kernel density was proposed. The results demonstrate that O₂ volume fraction exhibits a linear variation with distinct stages, and the variation rate before the inflection point is lower than that after the point. The CO volume fraction follows a quadratic polynomial variation. The kernel densities of both CO and O₂ volume fractions

* 文章编号:1003-3033(2025)12-0096-07; 收稿日期:2025-05-21; 修稿日期:2025-08-05

** 通信作者:任万兴(1980—),男,河南封丘人,博士,教授,主要从事矿井灾害防治方面的研究。E-mail:rwxc@163.com。

decrease with increasing gob length. Their highest kernel density distributions occur within 0–10m and 0–30m, respectively. O₂ volume fraction is more stable before the inflection point but exhibits greater fluctuation afterward. The average upper and lower acceptable limits for O₂ volume fraction before and after the inflection point are 3.3% and 6.3%, respectively. The critical CO and O₂ volume fraction values for hazard zoning based on kernel density are 0.009% and 15.1%, which divides the gob area into four quadrants and three risk levels (safe, potentially hazardous, and hazardous).

Keywords: coal spontaneous combustion; gob hazardous zone; coal fire early warning; kernel density; statistical characteristics

0 引言

2024 年,我国生产原煤 47.8 亿 t,煤炭消费量占能源消费总量比重为 53.2%^[1]。煤自燃是影响煤炭安全开采的主要灾害,易发生在采空区、高冒区等地点,其发生与发展受通风、采掘、地质构造等影响^[2-3]。采空区遗煤自燃兼具氧化缓慢、不易探测、治理难度高等特点,一旦发生煤自燃灾害,将带来重大损失。随着深地资源的快速发展,伴随高应力、高地温、高瓦斯等特征,共生灾害频发,煤自燃等复合灾害防治工作将更加严峻^[4]。

常用的采空区煤自燃危险区域划分方法主要包括以下 4 种:临界温度法、气体分析法、综合判定法和数值模拟法等^[5-8]。王德明等^[9]分析煤火等热动力灾害的发生特征,建立煤自燃过程的 13 个基元反应,揭示氧气在煤自燃中的反应机理;秦波涛等^[10]提出煤自燃过程特性和防治技术的未来研究方向,指出监测预警是防治煤自燃的关键;任万兴等^[11]构建基于气体和温度 2 个指标的煤自燃预警体系,分析了不同变质程度煤样指标气体及特征温度的统计学特征;邓军等^[12-13]建立多气体指标预警方法,并利用随机森林方法预测现场煤自燃危险区域分布;梁运涛^[14]分析煤矿火区发展蔓延的介尺度特性;郭庆等^[15]分析回采工作面一氧化碳和氧气的周期演化特征,指出利用统计学方法划分煤自燃危险区域的可行性;李增华等^[16]阐述煤低温氧化过程中大分子量气体产物的生成规律,指出大分子量气态产物携带着能够反映煤自燃进程的关键信息;李金虎等^[17]分析煤中高活性含碳固体自由基与煤自燃反应性的关系。上述研究从不同角度分析煤自燃氧化机理、气体变化特征等,对煤自燃危险区域划分具有指导意义。

传统方法在煤自燃监测预警中存在显著局限性,如温度指标易受环境干扰,工程应用受限,难以满足复杂采空区温度探测的实际需求。当前普遍采用气体体积分数及其变化特征作为危险区域划分的

核心依据,其优势在于气体具有流动性可实现动态监测。然而,采空区环境具有高度复杂性,单一气体特征难以全面反映自燃风险,现有方法在数据维度、模型适应性及临界值动态优化等方面仍存在改进空间^[18]。因此,笔者拟通过实测采空区气体体积分数,分析 O₂ 和 CO 体积分数的统计学特征,并利用核密度参数估计研究气体体积分数随采空区长度的变化特征,最终划分采空区煤自燃危险区域,以期为准精准防控采空区煤自燃提供参考。

1 核密度参数估计基本原理

核密度估计通过平滑处理离散数据估算整个数据集的概率密度函数^[19],基于核函数,以一定的带宽参数,加权平均每个数据点附近的核函数来估计数据点的概率密度。假设有 n 个样本数据: $x_1, x_2, \dots, x_n$,其累积分布函数 $F(x)$ 如下:

$$F(x_{i-1} < x < x_i) = \int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x) dx \tag{1}$$

式中: $F(x)$ 为累积分布函数; x_i 为第 i 个样本点; $f(x)$ 为核函数。

概率密度函数为 $f(x)$:

$$f(x_i) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(x_i + h) - F(x_i - h)}{2h} \tag{2}$$

式中 h 为核密度估计的带宽。

确定带宽 h 后,核函数 $f(x)$ 为:

$$f(x) = \frac{1}{2nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{|x - x_i|}{h}\right) \tag{3}$$

式中: n 为样本数量; $K(\cdot)$ 为具有某特征的核函数。

对于二维数据, $f(x, y)$ 可表示为:

$$f(x, y) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\text{dist}((x, y), (x_i, y_i))}{h}\right) \tag{4}$$

核密度估计过程包括以下步骤:

1) 选择核函数和带宽参数^[20]。选择高斯核函数,其方程为:

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{u^2}{2}) \tag{5}$$

式中 u 为样本均值。

2) 对于每个样本点,计算其周围样本点的密度贡献,将所有样本点的密度贡献相加,得到样本点处的概率密度估计值,遍寻所有样本,得到整个二维空间的概率密度估计。

2 工程背景及原始数据特征

2.1 工作面概况及采样方法

陕西彬长孟村矿主采 4 号煤层,I 类容易自燃,最短自然发火期 18 天。401103 综放工作面采空区布置束管采样系统,通过采集并分析气体体积分数,判定采空区煤自燃危险程度,每个支架后方共循环铺设 14 组束管,整个采样周期约 150 天,采样频率 3 次/d,工作面及束管布置方式如图 1 所示。

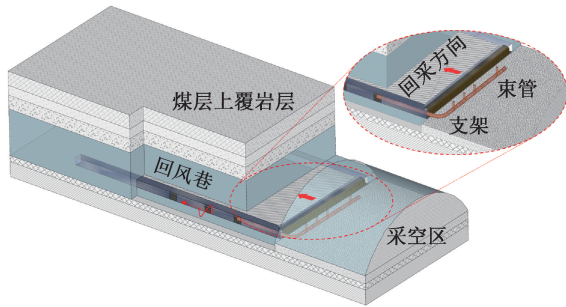


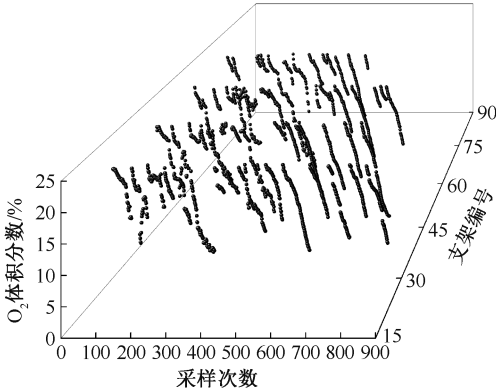
图 1 工作面及束管布置

Fig. 1 Layout of working face and tube system

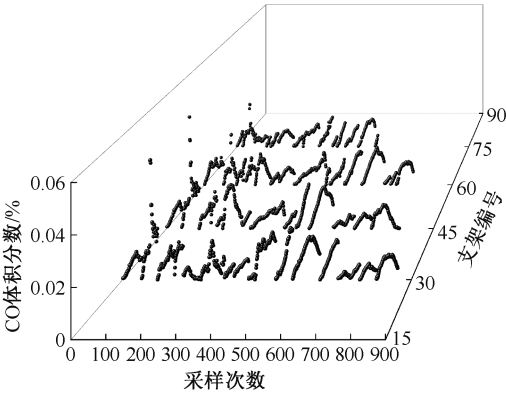
2.2 原始数据及其分布特征

不同支架采空区气体体积分数变化如图 2 所示,由图 2 可知: O_2 体积分数随着采空区长度的增加而降低,但是浅部区域的下降速率小于采空区;随着采空区长度的增加 CO 体积分数升高至峰值后降低。2 种气体体积分数均存在阶段性变化,原因在于,回采初期,采空区内部煤岩体、流场等处于非平衡状态,CO 和 O_2 体积分数波动性强;回采中后期,采动、通风、上覆岩层压力释放等均近似处于周期稳态变化过程,此时 CO 和 O_2 体积分数变化更具有稳定性和规律性^[18]。

CO 体积分数随采空区长度和 O_2 的变化如图 3 所示,由图 3 可知:20~40 m 范围内,CO 体积分数达到峰值,为高 CO 区域,采空区浅部和深部均存在低 CO 区域。其原因为采空区浅部 O_2 充足,遗煤氧化充分,CO 积累,在中部达到峰值,当采空区长度继续增加,遗煤处于贫氧状态,CO 生成量减少,因此,



(a) O_2 体积分数



(b) CO 体积分数

图 2 不同支架采空区气体体积分数变化曲线
Fig. 2 Curves of gases volume fractions in gobs with different supports

峰值所在区域可作为划分煤自燃危险区域的临界区域。

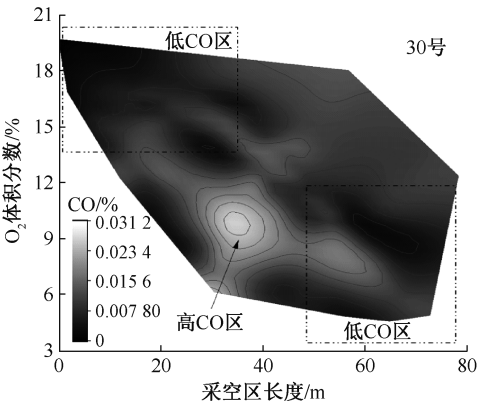


图 3 采空区 CO 体积分数气体分布
Fig. 3 Contour map of gas distribution in gob

3 气体核密度分布及危险区域划分

3.1 气体核密度分布特征

O_2 与 CO 体积分数核密度分布如图 4 所示,由

图 4 可知:浅部采空区 O_2 核密度最高,随着采空区长度的增加,核密度逐渐下降。 O_2 体积分数分布具有区间性:25~30 m 范围内, O_2 体积分数减小速率小于 30 m 之后的减小速率,说明该区域是 O_2 体积分数变化的拐点区域,且 O_2 体积分数具有上下限。以 0~30 m 采空区长度为例, O_2 的体积分数上限为 21%,下限为 14%,若 O_2 体积分数超过上下限,说明采空区存在煤自燃风险。随着采空区长度的增加, O_2 体积分数的波动区间越来越小且体积分数逐渐降低。随着采空区长度的增加,CO 体积分数逐渐增加后降低。与 O_2 分布类似,CO 体积分数分布同样具有区间性和集中性:采空区浅部,CO 体积分数体现为集中性,低 CO 体积分数出现的次数多,极少出现高 CO 体积分数;超过 30 m 后,CO 体积分数离散性显著,极差较大,说明 30 m 附近是 CO 体积分数变化的拐点区域。

3.2 气体体积分数区间预测

气体体积分数上下限之差表示气体体积分数可接受区间,记作 ΔL ,表示为:

$$\Delta L = L|_{l_1}^{l_2} \text{ 或 } L|_{l'_1}^{l'_2}$$

式中: $L|_{l_1}^{l_2}$ 和 $L|_{l'_1}^{l'_2}$ 为拐点前后气体体积分数的可接受区间; l 和 l' 为气体体积分数拟合线; l_i 和 l_i' 为上限线和下限线。

可接受区间分布如图 5 所示。由图 5 可知:分布在可接受区间内的体积分数表示采空区遗煤处于可控的氧化状态,可接受区间外,需要具体分析气体体积分数异常原因,如漏风可导致 O_2 体积分数增加或者遗煤氧化导致 CO 体积分数增加等。

CO 和 O_2 核密度在 25~40 m 范围内均出现显著变化,说明拐点分布在该范围,取拐点位置为 30 m,气体体积分数区间预测如图 6 所示。分别对拐点前后 2 个区域的 O_2 体积分数进行线性拟合,得到 O_2 体积分数随采空区长度的变化方程及区间预测,见表 1。

采空区 O_2 体积分数可接受区间分布如图 7 所示。由图 7 可知:随着采空区长度的增加,气体体积分数波动区间增大,由拐点前的 3.3% 增加至拐点后的 6.3%,说明采空区深部气体的不稳定性大于浅部。拐点之后,CO 体积分数的波动范围显著大于 O_2 的波动范围,在构建煤自燃预警指标时,可根据采空区长度确定指标优先级,拐点前, O_2 和 CO 具有相同的优先级;拐点后,优先选择 O_2 为主要指标,CO 为辅助指标。

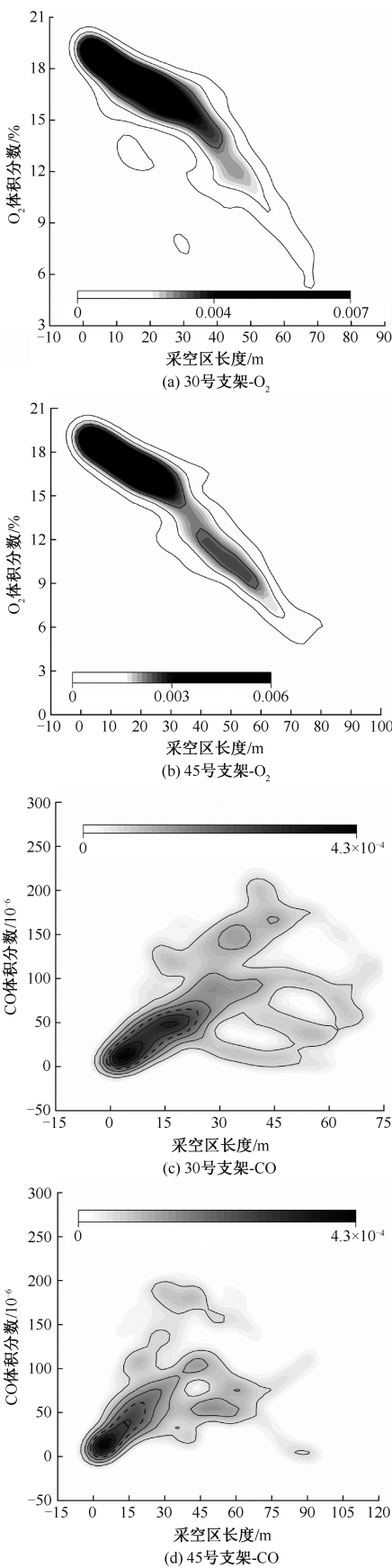


图 4 气体体积分数 2D 核密度分布

Fig. 4 2D kernel distribution of gases

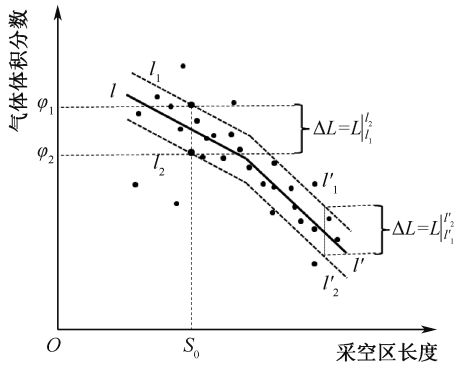


图5 气体随采空区长度变化的可接受区间
Fig. 5 Acceptable intervals for gas with length of gob

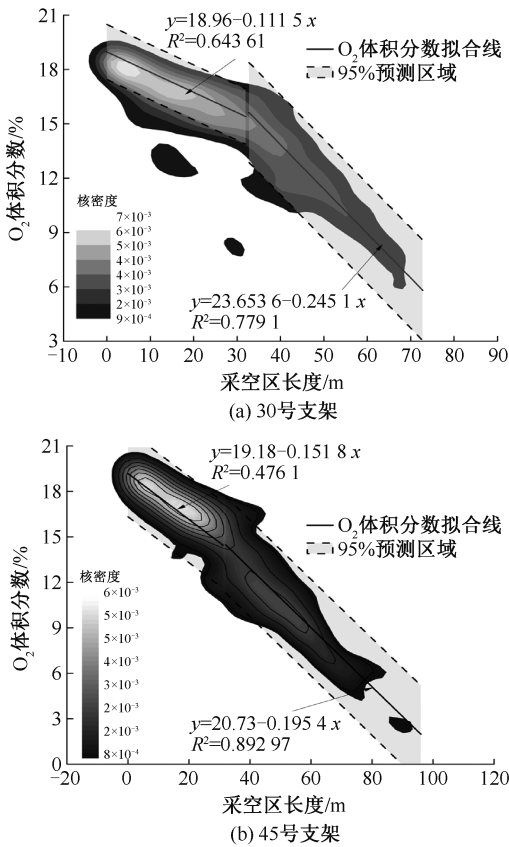


图6 气体体积分数区间预测
Fig. 6 Prediction of gas volume fraction intervals

表1 O₂ 线性拟合方程及可接受区间分布
Table 1 O₂ linear fitting equation and acceptable interval distribution

支架	变化方程	可接受区间/%
30 号	$y = 18.96 - 0.1115x, x < 30$	$L _{l_1}^{l_2} = 3.1$
	$y = 23.65 - 0.2451x, x > 30$	$L _{l_1}^{l_2} = 5.6$
45 号	$y = 19.18 - 0.1518x, x < 30$	$L _{l_1}^{l_2} = 5.8$
	$y = 20.73 - 0.1954x, x > 30$	$L _{l_1}^{l_2} = 6.4$

续表 1

支架	变化方程	可接受区间/%
60 号	$y = 18.91 - 0.1165x, x < 30$	$L _{l_1}^{l_2} = 3.5$
	$y = 20.27 - 0.1788x, x > 30$	$L _{l_1}^{l_2} = 6.9$
75 号	$y = 18.96 - 0.1387x, x < 30$	$L _{l_1}^{l_2} = 3.1$
	$y = 16.81 - 0.1061x, x > 30$	$L _{l_1}^{l_2} = 6.1$

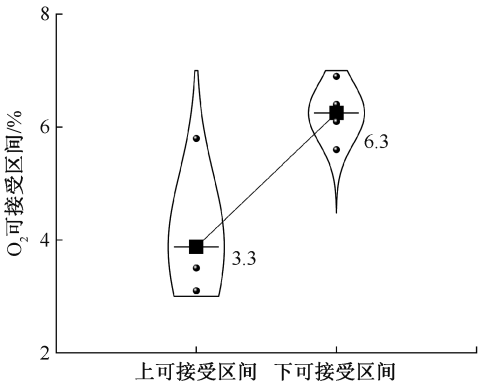


图7 O₂ 体积分数的可接受区间
Fig. 7 Acceptable intervals of O₂ volume fraction

3.3 基于气体核密度的煤自燃区域划分

拐点的存在说明气体在该区域发生显著变化,由于CO和O₂体积分数反映的是煤自燃程度,说明拐点前后煤自燃状态存在差别,基于此,根据拐点前后气体的体积分数划分采空区煤自燃危险区域。拐点将采空区划分为4个象限,其中第1和第3象限为安全状态(常规状态)、第2象限为危险状态、第4象限为潜在危险状态,煤自燃危险等级象限如图8所示。

以45号支架为例,具体划分结果如下:①第1象限与第3象限(安全区域)。稳定通风条件下,O₂体积分数随采空区长度逐渐下降,CO体积分数逐渐上升;②第2象限(危险区域)。该象限对应低O₂体积分数和高CO体积分数,说明O₂消耗速率较大,遗煤与O₂发生化学反应速率增快,存在煤自燃危险;③第4象限(潜在危险区域)。该区域内O₂体积分数较高,CO体积分数较低,不符合采空区气体分布的普遍特征,说明存在漏风现象,而漏风是导致采空区发生煤自燃的首要因素,因此出现该现象时说明采空区处于潜在危险状态。

3.4 采空区煤自燃“三带”划分O₂临界值探讨

《煤矿防灭火细则-解读》规定^[18],采空区煤自燃“三带”划分依据对应的O₂体积分数是18%和5%。基于O₂体积分数拐点将气体变化分为2个阶

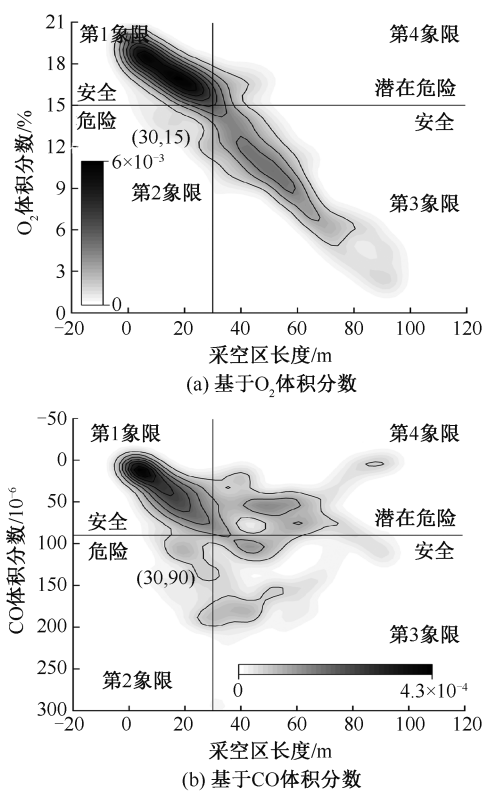


图 8 采空区危险状态象限

Fig. 8 Quadrant diagram of dangerous state of gob

段,以 30 m 为拐点,代入表 1 中的拟合方程,得到 4 组支架后拐点处 O₂ 体积分数为 15.6%、14.6%、15.4%和 14.8%,远小于 18%的规定。说明受各种因素的影响,煤自燃“三带”分布复杂多变,给定的划分临界值无法适应所有条件的矿井,应根据各矿的特点确定“三带”分布范围。

为对比基于统计学的采空区煤自燃“三带”与采用定值划分煤自燃“三带”的区别,以 15%和 5% O₂ 体积分数为临界值,得到不同支架后采空区煤自燃“三带”的分界点见表 2。根据上述 4 组值划分采空区“三带”,与单一数据组划分结果相比,2 种方法

表 2 煤自燃“三带”分界点

Table 2 Demarcation point of "three zones" for coal spontaneous combustion

支架编号	O ₂ 体积分数指标对应分界点/m	
	15%	5%
30	35.5	76.1
45	27.5	80.5
60	33.6	85.4
75	28.6	111.3

不同之处主要体现“散热带”的范围(表 3),30 号支架后方,单一数据组划分的“散热带”范围比本方法划分范围长 26.5 m,45 号支架后方散热带之差为 37.5 m,存在显著的差距,且“散热带”内单一数据组的平均 CO 体积分数已经超过 200×10^{-6} ,显然与“散热带”特征不符。

表 3 2 种方法“散热带”分布范围

Table 3 Range of heat dissipation zones for two methods

支架编号		30	45	60	75
散热带/m	传统方法	62	65	47	34
	基于核密度	35.5	27.5	34	28

4 结 论

1) CO 和 O₂ 体积分数分布具有显著的统计学特征,其核密度随着采空区长度的增加而减小,CO 核密度在架后 10 m 附近达到峰值,O₂ 最高核密度分布范围为架后 25~40 m,平均值约为 30 m;核密度拐点可划分煤自燃危险区域的临界区域。

2) 通过气体统计学特征确定,孟村矿 401103 回采工作面煤自燃预警临界采空区长度约为 30 m,对应的平均临界 O₂ 体积分数为 15.1%,CO 体积分数为 0.009%。

3) 探讨基于气体核密度分布与传统方法判定煤自燃危险区域的优势,根据 O₂ 体积分数临界点将采空区划分为安全、潜在危险和危险 3 个状态。

参 考 文 献

[1] ZHU Hongqing, WANG Jiashuo, LI Rui, et al. Experimental and quantum chemical study of synergistic inhibitor based on physicochemical interaction in the prevention of coal spontaneous combustion[J]. Fuel, 2025,392: DOI: 10.1016/j.fuel. 2025. 134839.

[2] 肖阳,张二川,尹岚,等. 地下煤火灾害机理及热动力演化与热能利用研究进展[J]. 煤矿安全,2024,55(11): 1-18. XIAO Yang, ZHANG Erchuan, YIN Lan, et al. Research progress of underground coal fire disaster mechanism, thermodynamic evolution and thermal energy utilization[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(11): 1-18.

[3] 张巨峰,施式亮,鲁义,等. 矿井瓦斯与煤自燃共生灾害:耦合关系、致灾机制、防控技术[J]. 中国安全科学学报, 2020,30(10): 149-155. ZHANG Jufeng, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Symbiotic disasters of mine gas and coal spontaneous combustion: coupling relationship, disaster mechanism, prevention and control technology[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10):

- 149–155.
- [4] 张家林,杨帆,张望,等. 深部资源开采创新成效分析与思考[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(3): 450–461.
ZHANG Jialin, YANG Fan, ZHANG Wang, et al. Innovation effectiveness analysis and technology management reflection of deep resource exploitation[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 450–461.
- [5] 董宪伟,崔静,董轩萌,等. 不同氧体积分数影响预氧化煤自燃特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(7): 62–69.
DONG Xianwei, CUI Jing, DONG Xuanmeng, et al. Effect of different oxygen volume fractions on spontaneous combustion characteristics of pre-oxidized coal[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(7): 62–69.
- [6] 信亚男. 高抽巷抽采条件下采空区瓦斯与煤自燃耦合灾害的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
XIN Ya'nan. Study on coupling disasters of gas and coal spontaneous combustion in goaf under the condition of high drainage roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [7] YAN Qingqiong, LU Yi, WANG Qiao, et al. Research progress and development trend of coal spontaneous combustion prevention technology[J]. Combustion Science and Technology, 2025, 197: DOI: 10.1080/00102202.2024.2331752.
- [8] 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.
GUO Jun, LIU Hua, JIN Yan, et al. Summary of underground hidden coal spontaneous combustion fire source detection methods and prospect of new technologies[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(8): 111–119.
- [9] 王德明. 煤矿热动力灾害及特性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 137–142.
WANG Deming. Thermodynamic disaster in coal mine and its characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 137–142.
- [10] 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.
QIN Botao, ZHONG Xiaoxing, WANG Deming, et al. Research progress of coal spontaneous combustion process characteristics and prevention technology[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 66–99.
- [11] 任万兴,郭庆,石晶泰,等. 基于标志气体统计学特征的煤自燃预警指标构建[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1747–1758.
REN Wanxing, GUO Qing, SHI Jingtai, et al. Construction of early warning indicators for coal spontaneous combustion based on statistical characteristics of index gases[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1747–1758.
- [12] LEI Changkui, DENG Jun, CAO Kai, et al. A comparison of random forest and support vector machine approaches to predict coal spontaneous combustion in gob[J]. Fuel, 2018: DOI: 10.1016/j.fuel.2018.11.006.
- [13] 邓军,李青蔚,肖旸,等. 原煤和氧化煤的低温氧化特性[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(1): 1–7.
DENG Jun, LI Qingwei, XIAO Yang, et al. Characteristics of low-temperature oxidation of raw and oxidized coals[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2018, 38(1): 1–7.
- [14] LIANG Yuntao, YANG Yalan, GUO Sida, et al. Combustion mechanism and control approaches of underground coal fires: a review[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2023, 10: DOI: 10.1007/S40789–023–00581–W.
- [15] GUO Qing, REN Wanxing, LU Wei. New classification method of coal spontaneous combustion three zones in the goaf based on non-parametric kernel density estimation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30: DOI: 10.1007/S11356–022–22528–5.
- [16] 李增华,苗国栋. 煤自燃大分子量气态产物生成规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1119–1128.
LI Zenghua, MIAO Guodong. Study of the emission law of higher-molecular-weight gases during coal spontaneous combustion[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1119–1128.
- [17] 李金虎,黄珏洁,陆伟,等. 煤中高活性含碳固体自由基与煤自燃反应性的相关关系[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 127–142.
LI Jinhu, HUANG Juejie, LU Wei, et al. Correlation between highly active carbon-containing solid free radicals and spontaneous combustion reactivity of coal[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 127–142.
- [18] 梁运涛,王伟,王刚,等. 《煤矿防灭火细则》编制原则及要点解读[J]. 煤矿安全, 2022, 53(5): 230–235.
LIANG Yuntao, WANG Wei, WANG Gang, et al. Compilation principle and key points interpretation of Coal Mine Fire Prevention and Control Rules[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(5): 230–235.
- [19] 曹凯,杨海宇,李长红,等. 基于最适带宽的核密度估计源搜索方法[J]. 计算机仿真, 2024, 41(3): 441–447.
CAO Kai, YANG Haiyu, LI Changhong, et al. Source search method for kernel density estimation based on optimal bandwidth[J]. Computer Simulation, 2024, 41(03): 441–447.
- [20] 牛文铁,才福友,付景静. 基于自适应带宽核密度估计的载荷外推方法研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 375–384.
NIU Wentie, CAI Fuyou, FU Jingjing. Load extrapolation method based on adaptive bandwidth kernel density estimation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 375–384.

作者简介: 郭庆 (1989—),男,河南永城人,博士,讲师,主要从事煤矿火灾防控、粉尘防治等方面的研究。E-mail: zgkdqg@163.com。

