

双马一矿I02采区6煤层采空区自然发火 “三带”划分及防控技术研究

陶恩生, 代振华, 杨天兴, 宋 延, 康自海

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司双马一矿, 宁夏 银川

收稿日期: 2026年6月29日; 录用日期: 2026年7月25日; 发布日期: 2026年9月11日

摘 要

针对国家能源集团宁夏煤业双马一矿I02采区6煤层易自燃的特性, 采用束管监测 + 温度实测相结合的现场观测方法, 对I020601综采工作面采空区开展自然发火“三带”测定与划分。以氧气浓度为主要划分指标、温度为辅助指标, 确定采空区散热带、氧化带、窒息带分布范围; 结合煤层最短自然发火期, 计算工作面安全最小推进速度, 并据此提出配套防灭火措施。结果表明: 工作面回风侧散热带宽度18.0~21.6 m、氧化带宽度94.4~99.2 m, 进风侧散热带宽度27.2~29.4 m、氧化带宽度111.8 m; 采空区距离工作面大于139.0~141.2 m区域为窒息带; 工作面最小安全推进速度为3.5 m/d, 现场实际推进速度5.0 m/d, 满足防自燃要求。研究成果可为该矿井及同条件工作面采空区自燃防控提供技术参考。

关键词

采空区, 煤炭自燃, 三带划分, 束管监测, 推进速度, 防灭火

Study on “Three Zones” Division and Prevention and Control Technology of Spontaneous Combustion in Goaf of 6 Coal Seam in I02 Mining Area of Shuangma No. 1 Coal Mine

Ensheng Tao, Zhenhua Dai, Tianxing Yang, Yan Song, Zihai Kang

National Energy Group Ningxia Coal Industry Co., Ltd., Shuangma No. 1 Coal Mine, Yinchuan Ningxia

Received: June 29, 2026; accepted: July 25, 2026; published: September 11, 2026

文章引用: 陶恩生, 代振华, 杨天兴, 宋延, 康自海. 双马一矿 I02 采区 6 煤层采空区自然发火“三带”划分及防控技术研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(5): 1316-1324. DOI: 10.12677/me.2026.145130

Abstract

In view of the characteristics of spontaneous combustion of No. 6 coal seam in I02 mining area of Shuangma No. 1 Coal Mine of Ningxia Coal Industry Group, the field observation method combining beam tube monitoring and temperature measurement is used to measure and divide the “three zones” of spontaneous combustion in the goaf of I020601 fully mechanized mining face. Taking oxygen concentration as the main dividing index and temperature as the auxiliary index, the distribution range of heat dissipation zone, oxidation zone and suffocation zone in goaf is determined. Combined with the shortest spontaneous combustion period of coal seam, the minimum safety advance speed of working face is calculated, and the corresponding fire prevention and extinguishing measures are put forward. The results show that the width of the heat dissipation zone on the return air side of the working face is 18.0~21.6 m, the width of the oxidation zone is 94.4~99.2 m, the width of the heat dissipation zone on the inlet side is 27.2~29.4 m, and the width of the oxidation zone is 111.8 m. The area where the goaf is greater than 139.0~141.2 m from the working face is the suffocation zone; the minimum safe advance speed of the working face is 3.5 m/d, and the actual advance speed on site is 5.0 m/d, which meets the requirements of anti-spontaneous combustion. The research results can provide technical reference for the prevention and control of spontaneous combustion in the goaf of the mine and the working face under the same conditions.

Keywords

Goaf, Coal Spontaneous Combustion, Three-Zone Division, Beam Tube Monitoring, Propulsion Speed, Fire Prevention and Extinguishing

Copyright © 2026 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

煤炭自燃是煤矿生产过程中主要灾害类型之一，采空区遗煤自燃更是井下火灾的主要诱因，严重威胁矿井人员安全与正常生产秩序[1]。采空区自然发火“三带”（散热带、氧化带、窒息带）的精准划分，是研判遗煤氧化发展规律、锁定自燃危险区域、制定科学防灭火方案以及确定工作面合理推进速度的重要前提[2]-[4]。

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司双马一矿 I02 采区 6 煤层为矿井主力开采煤层，经检测该煤层自燃倾向性等级为 I 类，属于容易自燃煤层，最短自然发火期仅 40 天，同时煤尘具备爆炸性，工作面回采期间采空区自燃、煤尘爆炸双重风险突出[5]。为全面掌握 I020601 综采工作面采空区漏风分布、供氧条件与蓄热特征，本次采用束管气体监测 + 温度实时实测的综合观测手段，开展采空区自然发火“三带”现场测定与范围划分工作。结合煤层自燃基础参数，核算工作面防自燃最小安全推进速度，并依托实测结果与矿井开采实际，制定针对性综合防灭火技术措施[6]-[8]，有效防范采空区自然发火事故，保障工作面安全高效回采，同时也为该矿同煤层其他工作面及相似条件矿井的自燃防控工作提供实测依据与技术参考。

2. 矿井及工作面概况

2.1. 矿井基本条件

双马一矿位于宁夏灵武市东南约 60 km，井田构造中等，水文地质条件简单，采用分区式机械抽出式

通风。矿井为低瓦斯矿井，2023 年绝对瓦斯涌出量 2.87 m³/min，相对瓦斯涌出量 0.32 m³/t。井田内共有 11 层可采煤层，6 煤层为主采煤层之一，煤类为不粘煤，结构简单、层位稳定，属全区可采的稳定煤层。

2.2. I020601 综采工作面概况

I020601 工作面开采 6 煤层，采用走向长壁后退式综合机械化采煤，采空区全部垮落法管理顶板。工作面平均走向斜长 709.4 m，倾斜长度 264.2 m，煤层平均厚度 3.24 m，煤体容重 1.34 t/m³，工业储量 76.72 万 t，回采率 97%。工作面设计风量 1530~1584 m³/min，煤层倾角 8°~13°，平均 11°。

6 煤层鉴定为 I 类容易自燃煤层，最短自然发火期 40 d，煤尘火焰长度大于 500 mm，具备煤尘爆炸危险性。工作面邻近 F₁ 逆断层，但观测区域距断层较远，构造对本次“三带”观测无影响。

工作面煤层顶底板赋存情况如表 1 所示，直观反映工作面顶板垮落条件，为采空区漏风、空隙发育规律分析提供地质基础。

Table 1. Coal seam roof and floor occurrence table of working face
表 1. 工作面煤层顶底板赋存情况表

煤层顶底板情况	顶底板	岩石名称	厚度(m)	岩性特征	
	老顶	粗粒砂岩	$\frac{2.58 \sim 11.68}{6.85}$	灰白色，粗粒结构，块状，成份石英为主，次为长石和暗色矿物，分选中等，滚圆度次棱角状，较坚硬。	
	直接顶	泥岩	$\frac{3.91 \sim 7.47}{5.69}$	灰色，块状，具有滑面和黄铁矿，中间夹 0.52 米煤线，质软易碎。	
	伪顶	无	无		
	直接底	泥岩	$\frac{1.25 \sim 2.08}{1.69}$	深灰色，以泥物质为主，块状，有植物化石。泥岩结构 0.7 (0.19) 0.8，夹厚 0.19 米煤线。	
	老底	中粒砂岩	$\frac{3.44 \sim 11.1}{7.18}$	灰白色，以中砂粒为主，次为细粉砂粒，成份以石英、长石为主，分选性中等。	
普氏硬度	煤层(f)		夹矸(f)	直接顶(f)	直接底(f)
	1.4~2.3		2.7	1.9~3.3	1.9~3.3

3. 观测方案与测试方法

3.1. 观测原理

采空区煤炭自燃的发生需要同时满足破碎松散遗煤、持续漏风供氧、稳定蓄热环境三大核心条件，三者缺一不可。工作面回采后顶板垮落形成大量松散浮煤，U 型通风产生的漏风持续向采空深部输送氧气，煤体与氧气发生物理吸附、化学吸附及低温氧化反应并释放热量；若漏风强度适中，氧化产热无法被风流及时带走，热量不断积聚，煤温持续升高，最终发展为自燃火灾。采空区内部漏风风速、氧气浓度沿走向呈现梯度变化，据此可将采空区划分为散热带、氧化带、窒息带，本次观测以氧气浓度作为核心划分指标，温度、特征气体浓度作为辅助校验指标，实现“三带”精准界定。

散热带：O₂ 浓度 > 18%，紧邻工作面支架后方区域，顶板垮落矸石空隙大，漏风流速高，空气流通性强。大量新鲜空气持续流经松散遗煤，虽然煤氧氧化反应持续发生，但氧化产生的热量会被高速漏风迅速带走，无法形成蓄热环境，不具备自燃条件。

氧化带： $5\% < \text{O}_2 \text{ 浓度} < 18\%$ ，散热带后方中间区域，随采空深度增加，垮落岩体逐步压实，孔隙率降低、风阻增大，漏风风速显著下降。氧气供给量适中，既可以维持煤体持续低温氧化，又不会因风流过大散失热量，热量持续堆积，是采空区自燃高危区域。

窒息带： $\text{O}_2 \text{ 浓度} < 5\%$ ，采空深部压实区，垮落岩石高度致密，漏风基本消失，氧气被前期氧化大量消耗，浓度降至临界值以下。煤体氧化反应缺少反应物，放热速率极低，已积聚的热量会通过围岩传导缓慢散失，丧失持续自燃能力。

同时结合采空区温度、CO 等指标气体变化，综合判定三带边界。采空区“三带”纵向分布逻辑与氧气浓度判定标准如图 1 所示。

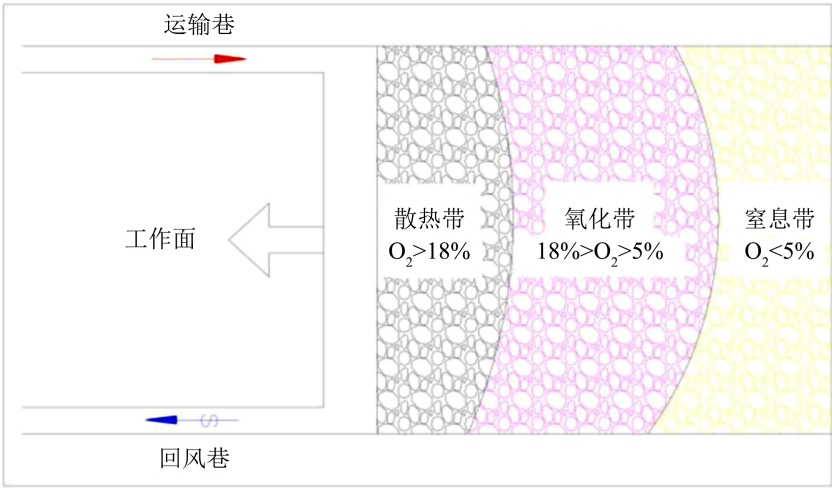


Figure 1. “Three zones” diagram of spontaneous combustion of coal oxidation in goaf
图 1. 采空区煤炭氧化自然发火“三带”示意图

3.2. 测点布置

在工作面进风顺槽、回风顺槽分别布置 3 路束管测点，共计 6 路束管(1#~6#)，相邻测点间距 6 m；同步布设 2 路温度传感器，分别与 1#、4#束管配套监测采空区温度。束管总长 150~162 m，测点端头加装钢管保护套管，防止冒落煤岩挤压、堵塞取样管路。

3.3. 观测方法

观测周期为 2025 年 2 月 9 日至 3 月 10 日，工作面保持正常回采，每日同步采集三项数据：工作面当日推进进尺、采空内部温度、束管抽取气样。温度采用井下防爆温度采集仪现场直读；气样密封转运至地面实验室，使用气相色谱仪全组分检测 O_2 、CO、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 浓度。每日整理深度-气体-温度对应数据，绘制变化曲线，跟踪采空纵深供氧与氧化演化规律，完整记录全周期原始观测数据，为三带定量划分提供实测依据。

4. 观测结果与“三带”划分

4.1. 温度监测结果

如图 2 所示，观测期间，采空区回风侧测点最高温度 30.8°C ，进风侧测点最高温度 29.8°C ，整体温度偏低；全程未检出 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_2H_2 等高温特征气体，CO 浓度始终维持在低温氧化正常区间。结果表明：观测时段内采空区遗煤仅处于低温缓慢氧化阶段，无高温异常及自燃前兆。

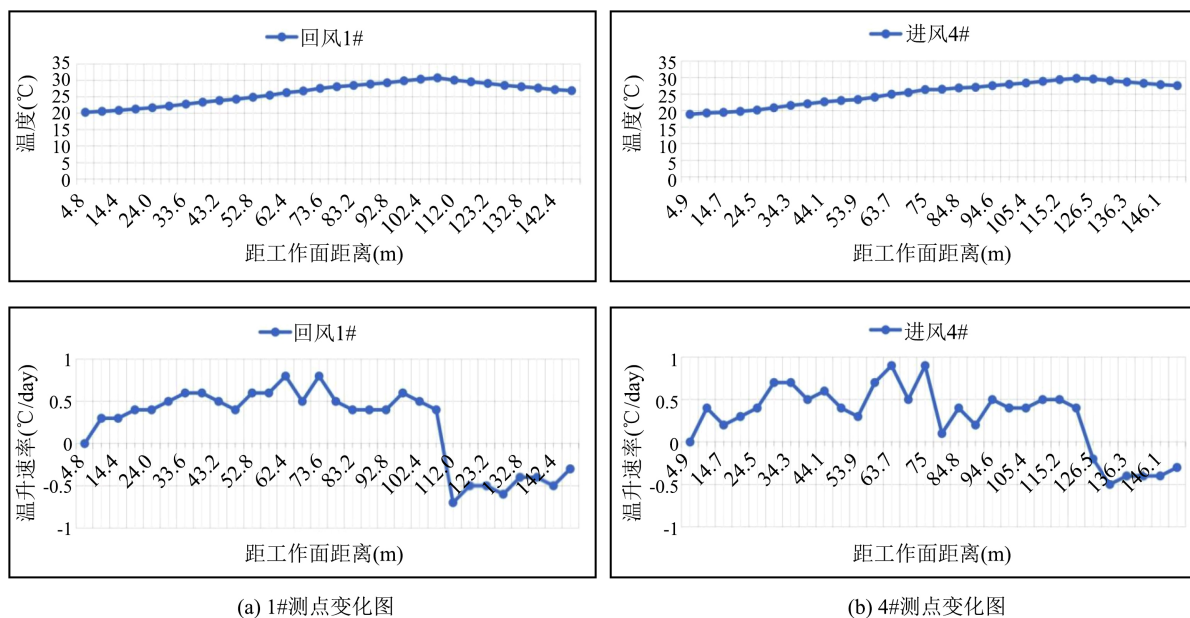
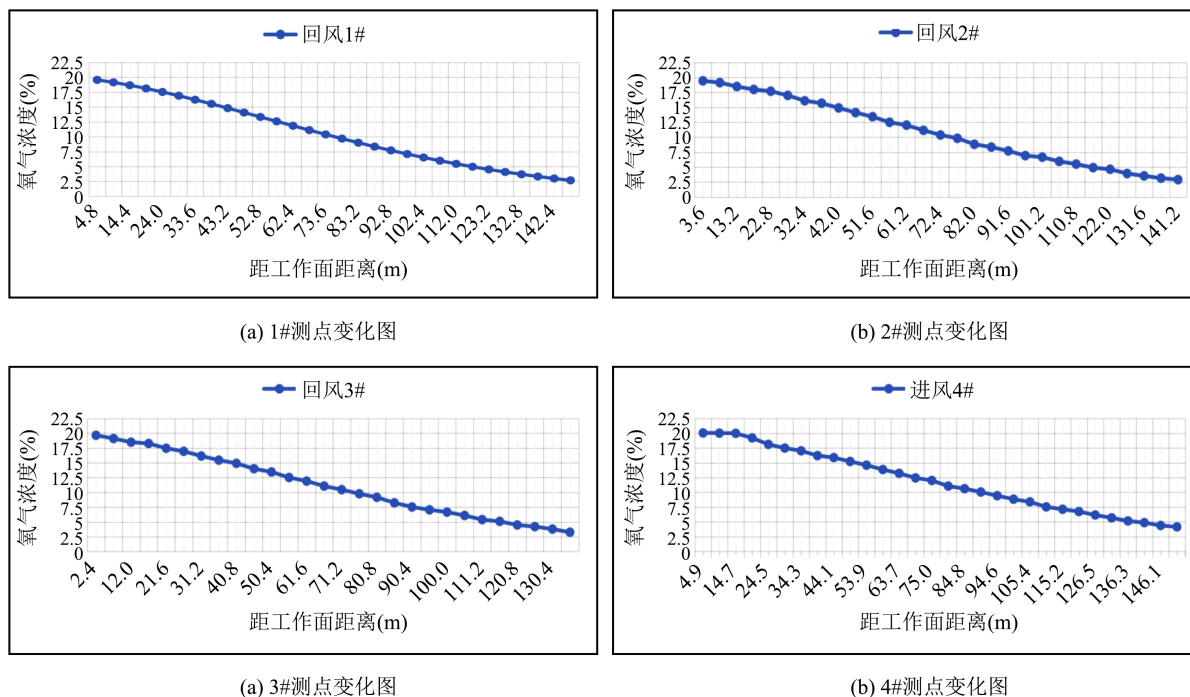


Figure 2. The change of temperature and temperature rise rate of measuring points with the advancing distance of working face
图 2. 测点温度和温升速率随工作面推进距离的变化图

4.2. 气体浓度变化规律

如图 3 所示, 随采空区深度增加, 所有测点氧气浓度持续衰减, CO、CO₂、CH₄ 浓度同步逐步上升。受工作面 U 型通风漏风影响, 进风侧漏风强度大于回风侧, 氧气衰减速率更慢: 回风侧距工作面 18.0~21.6 m 处氧气浓度降至 18% 以下, 进风侧则在 27.2~29.4 m 处达到该临界值; 当采空区深度达到 116.0~117.2 m (回风侧)、139.0~141.2 m (进风侧) 时, 氧气浓度低于 5%, 进入窒息带。



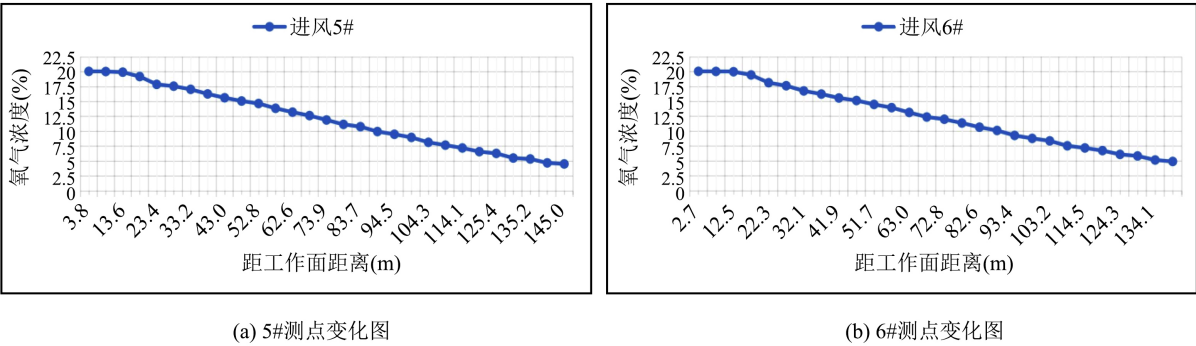


Figure 3. The variation of oxygen concentration at the measuring point on the air inlet side with the advancing distance of the working face
图 3. 进风侧测点氧气浓度随工作面推进距离的变化图

4.3. 采空区“三带”范围划分

根据表 2、表 3，采空区不同区域自然发火“三带”划分，得出了 I020601 综采工作面采空区自然发火“三带”分布的范围如图 4 所示：靠近进风巷侧的散热带宽度为 27.2 m~29.4 m，氧化带宽度为 111.8 m，距工作面距离大于 139.0 m~141.2 m 为窒息带；靠近回风巷侧的散热带宽度为 18.0 m~21.6 m，氧化带宽度为 94.4 m~99.2 m，距工作面距离大于 116.0 m~117.2 m 为窒息带。整体来看，进风侧漏风范围更大，散热带、氧化带宽度均大于回风侧，自然危险区域范围更广。

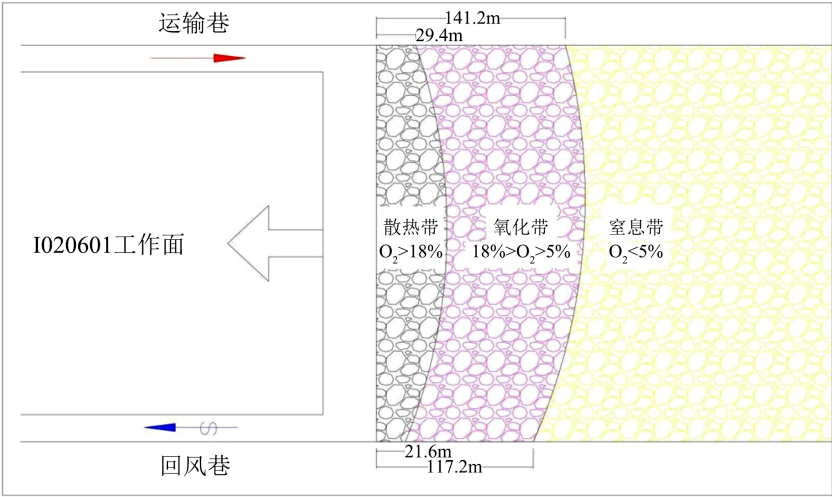


Figure 4. I020601 fully mechanized working face spontaneous combustion “three zones” division diagram
图 4. I020601 综采工作面自然发火“三带”划分示意图

Table 2. Division table of spontaneous combustion “three zones” range of 1#~3# measuring points on the return air side of goaf
表 2. 采空区回风侧 1#~3#测点自然发火“三带”范围划分表

测点编号	散热带/m	氧化带/m	窒息带/m	氧化带宽度/m
1#	0~19.2	19.2~116.8	116.8~∞	97.6
2#	0~18.0	18.0~117.2	117.2~∞	99.2
3#	0~21.6	21.6~116.0	116.0~∞	94.4

Table 3. Division table of spontaneous combustion “three zones” range of 4#~6# measuring points on the air inlet side of goaf
表 3. 采空区进风侧 4#~6#测点自然发火 “三带” 范围划分表

测点编号	散热带/m	氧化带/m	窒息带/m	氧化带宽度/m
4#	0~29.4	29.4~141.2	141.2~∞	111.8
5#	0~28.3	28.3~140.1	140.1~∞	111.8
6#	0~27.2	27.2~139.0	139.0~∞	111.8

4.4. 工作面最小推进速度计算

工作面最小推进速度计算公式：

$$V = K \cdot \frac{L_{\text{氧}}}{T_{\text{min}}}$$

式中：V 为最小推进速度，m/d；K 为安全系数，取 1.0； $L_{\text{氧}}$ 为氧化带最大宽度，取 141.2 m； T_{min} 为煤层最短自然发火期，40 d。

I020601 工作面位于鸳鸯湖冯记沟背斜西翼，其上部为 I0104102、I0104301 工作面采空区，下部为未开拓煤岩系地层，东部为 I020602 (设计工作面)，西部为 I02 采区边界泄水巷 I 段，北部为 I02 采区回风、辅运、带式输送机三条大巷，南部为 I02 采区边界泄水巷 II 段。综合以上因素，选取安全系数 $K = 1.0$ 。

经计算，工作面最小安全推进速度为 3.5 m/d；现场实测工作面平均日推进速度 5.0 m/d，大于临界值，可有效缩短遗煤在氧化带的滞留时间。

5. 防灭火措施与分级预案

结合 I020601 工作面采空区 “三带” 分布特征、工作面束管、温度实测数据、6 煤层 40 d 最短发火期、3.5 m/d 临界推进速度，建立常态管控、一级预警、二级危险三级防控体系，配套兜底应急处置方案，全流程管控采空遗煤氧化风险。

(1) 常态基础防控措施

工作面布置 6 路束管覆盖进风 4#~6#、回风 1#~3# 全部三带观测测点，覆盖散热带、氧化带、窒息带全纵深，每日完整采集 O_2 、CO、烃类气体，完整捕捉氧化带 0~141.2 m 危险区间气体变化，工作面隅角为散热带前沿漏风集中区域，每班检测可第一时间捕捉漏风增大、氧气异常升高前兆，通风队长每日审核台账。区分三带差异化注氮：进风氧化带 111.8 m，管路滞后工作面 30~40 m，回风氧化带 94.4~99.2 m 减少远端注氮，注氮纯度 $\geq 97\%$ ，间歇 150 m³/h (注 2 h 停 1 h)。每 10 m 喷洒 20% 氯化镁阻化液，每 50 m 土水比 1:4 预防性注浆，日常保障日推进 5.0 m，连续 3 天低于 3.5 m 立即升级管控，定期封堵巷道漏风裂隙。

(2) 一级预警处置措施

触发条件：CO 连续升高、采空温升速率加快。

量化论证：1) 束管加密至 4 h 一次：针对氧化带 0~141.2 m 危险区间高频监测，快速锁定升温、CO 升高段位于进风 111.8 m 氧化带还是回风 94.4~99.2 m 氧化带；2) 注氮流量提升至 250 m³/h：加大惰化强度，快速将氧化带 O_2 浓度降至 5% 窒息标准；进风增设分支管路，匹配进风侧更宽氧化带；3) 检修压缩、断层地段日进尺提至 5.5 m：断层区域遗煤增多，缩短氧化带滞留时间， $141.2 \div 5.5 \approx 25.7$ d，进一步低于 40 d 发火期。

措施：束管采样加密至 4 h 一次，10 min 内上报通防队，注氮流量提升至 250 m³/h，进风氧化带增设分支管路，24 h 内全面封堵支架、高冒漏风，调度压缩检修时间，过断层地段日进尺提至 5.5 m，隐患 24 h 整改并复查销号。

(3) 二级危险处置措施

触发条件：检出乙烷、局部温度超 35℃。

量化论证：乙烷出现代表煤体进入中温加速氧化阶段，对应氧化带内部蓄热严重；下调风量 10%~15%，降低漏风携氧能力，减少向 111.8 m 进风氧化带供氧；定向钻孔覆盖氧化带全域同步注浆 + 连续注氮，持续惰化压实垮落区，2 h 一次气样监测追踪 O₂、CO 衰减趋势。

措施：工作面风量下调 10%~15%，施工定向钻孔同步注浆、连续注氮，通防人员 24 h 跟班，每 2 h 采集气样，回风侧配齐密闭、堵漏物资，超标数据第一时间上报总工程师，当日编制专项防火方案。

(4) 自燃兜底应急方案

触发条件：检出乙烯、乙炔等剧烈氧化气体。

量化论证：乙烯、乙炔出现说明氧化带内部已形成高温蓄热火源，48 h 密闭阻断漏风通道，隔绝向 141.2 m 氧化带供氧；密闭后持续注氮，连续 7 d 温度回落至 30.8℃本底、CO 回归原始低温区间，且无烃类气体检出，火区稳定 45 d 后方可复工，双重时间标准匹配 40 d 最短发火期安全冗余。

措施：立即撤出全部人员，切断生产电源，48 h 内构筑临时密闭，预留注浆、观测孔，密闭后持续注氮，连续 7 d 指标平稳回落。火区需稳定 45 d 无高温气体，经竣工验收评估后方可复工，矿井每年开展一次本工作面自燃应急演练。

整套分级措施贴合本工作面三带分布规律，兼顾日常预防、动态预警与突发火灾处置，可系统性防控采空区自然发火隐患。

6. 结论

(1) 采用预埋束管 + 温度监测综合观测方法完成 I020601 工作面采空区自燃“三带”实测。以 O₂ 浓度为核心指标、温度为辅助指标，量化划分三带空间范围：回风侧散热带 18.0~21.6 m、氧化带 94.4~99.2 m，纵深 > 116.0~117.2 m 为窒息带；进风侧散热带 27.2~29.4 m、氧化带 111.8 m，纵深 > 139.0~141.2 m 为窒息带。受工作面 U 型漏风压差与表 1 顶底板岩性、垮落压实特性共同控制，直接顶泥岩质软易破碎、压实速率进回风两侧存在明显差异，进风侧漏风通道维持高渗透率区间更长，最终表现为进风侧散热带、氧化带宽度均大于回风侧，自燃高危区域范围更大。

(2) 观测周期内，采空区最高温度仅 30.8℃，全程未检测出乙烯、乙烷、乙炔等高温自燃特征气体，一氧化碳浓度维持在正常区间，表明采空区遗煤仅处于低温缓慢氧化状态，未出现高温异常与自然发火征兆，工作面现阶段氧化环境整体安全。

(3) 结合 6 煤层 40 d 的最短自然发火期，依据氧化带最大宽度计算得出，该工作面防治自燃所需最小安全推进速度为 3.5 m/d。工作面现场实际平均推进速度为 5.0 m/d，高于理论临界值，可有效缩短遗煤在高风险氧化带内的滞留时间，从而推进速率层面规避采空区自燃风险。

(4) 综合煤层赋存条件、地质构造及自燃特性分析，工作面穿越断层、变坡点等特殊地段时，遗煤量会大幅增加，自燃风险随之上升。建议在此类区域进一步加快工作面推进速度，并同步落实预防性注浆、注氮、喷洒阻化剂、堵漏风等综合防火措施。本次实测得到的三带分布规律与防控参数，可为双马一矿 6 煤层后续工作面，以及国内同类型易自燃煤层矿井的采空区自燃防治、通风管理、生产组织提供可靠的实测数据与技术参考。工作面过断层、变坡点遗煤量增大，等效拓宽有效氧化带宽度，需将日推进速度提升至 5.5 m/d，同步加密注浆、阻化喷洒频次，抵消氧化带扩大带来的自燃风险提升。

参考文献

- [1] 蔡江, 贾瑞荣, 黄晓伟, 等. 煤矿采空区自燃“三带”划分及注氮防灭火技术研究[J]. 陕西煤炭, 2026, 45(4): 32-38.
- [2] 刘冬堂, 高峰, 高冯亮, 等. 自燃煤层回采工作面“三带”实测研究与应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2026(3): 120-122.
- [3] 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.
- [4] 谢非, 吴志忠. 综采工作面采空区自燃“三带”划分及最小推进速度确定[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(11): 86-89.
- [5] 张孝金, 孙汤凯, 高志新, 等. 采空区流场三维演化规律与自燃危险区域判定研究[J]. 陕西煤炭, 2025, 44(6): 21-27.
- [6] 赵旭光, 原海波, 李辉. 煤自燃特性参数试验分析及自燃指标分级预警体系研究[J]. 劳动保护, 2025(2): 84-86.
- [7] 吴明. 淮南矿区 U 型底板巷综采面采空区煤自燃多维防治技术研究[J]. 能源技术与管理, 2025, 50(6): 117-119.
- [8] 姜聚宇, 于斌, 曹兰柱, 等. 露天煤矿含地下高温采空区边坡稳定性研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-14.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2402.td.20260428.1008.002>, 2026-06-09.