

中文引用格式:李敏,罗欧文,鲁义,等.再生顶板条件下煤自燃危险区域空间分布特征[J].中国安全科学学报,2024,34(3):129-136.  
英文引用格式:LI Min, LUO Ouwen, LU Yi, et al. Research on spatial distribution pattern of coal spontaneous combustion hazardous zone under condition of regenerated roof[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 129-136.

## 再生顶板条件下煤自燃危险区域空间分布特征\*

李敏<sup>1,2</sup>副教授,罗欧文<sup>1</sup>,鲁义<sup>1</sup>教授,施式亮<sup>1</sup>教授,李贺<sup>1</sup>副教授,林志军<sup>1</sup>

(1 湖南科技大学资源环境与安全工程学院,湖南湘潭411201;

2 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室,江苏徐州221116)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.03.0890

基金项目:国家自然科学基金资助(52104191, 52130411);湖南省杰出青年科学基金资助(2022JJ10026);湖南自然科学基金资助(2021JJ40204);湖南省研究生科研创新项目(CX20231050)。

**【摘要】** 为避免煤层开采过程中再生顶板遗煤自燃,明确其内部流场特性,探究煤自燃危险区域动态特征,以山东某矿再生顶板遗煤自燃特性分析为例,采用数值模拟方法,对比分析采空区及再生顶板在不同风量下的漏风特征,并结合再生顶板结构特性,基于氧气质量分数与漏风速度复合指标,采取投影叠加判定新方法,确定煤自燃危险区域范围。研究表明:采空区深度小于60 m时,氧气质量分数逐渐减小,60 m后氧气质量分数不再受风量影响;而再生顶板氧气质量分数分布具有非对称性,在回风巷尾端会形成一个“三角形”中空区域。采空区在倾向上20~40 m范围内发生漏风回流,而再生顶板漏风速度分布呈“U”型对称分布。采空区煤自燃危险区域变化特征与氧化带相类似,而再生顶板煤自燃危险区域范围主要分布在靠近进风巷中部及回风巷前中部内侧区域,且随风量的增加,危险区域面积逐渐增大并逐渐向尾部延伸。

**【关键词】** 再生顶板; 煤自燃; 危险区域; 采空区; 氧化带

### Research on spatial distribution pattern of coal spontaneous combustion hazardous zone under condition of regenerated roof

LI Min<sup>1,2</sup>, LUO Ouwen<sup>1</sup>, LU Yi<sup>1</sup>, SHI Shiliang<sup>1</sup>, LI He<sup>1</sup>, LIN Zhijun<sup>1</sup>

(1 School of Resource, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2 State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** In order to avoid the spontaneous combustion of residual coal from the regenerated roof during coal mining, the characteristics of interior fluid field were clarified, and the dynamic law of coal spontaneous combustion hazardous zone was explored. Taking the spontaneous combustion features of residual coal from the regenerated roof of a mine in Shandong province as an example, the numerical simulation method was used to simulate and compare the air leakage characteristics of goaf and regenerated roof under different air volume. Subsequently, based on the structural characteristics of the regenerated roof, the scope of coal spontaneous combustion hazardous zone was determined by adopting a new method of projection superposition judgment with oxygen concentration and air leakage speed as comprehensive indexes. The results of the study show that the oxygen mass fraction of goaf decreases gradually when the

depth is smaller than 60 m, while it's no longer affected by the air volume when the depth exceeds 60 m. The oxidation zone is asymmetrically distributed, forming a "triangle" hollow area at the end of the return airway. The air leakage and backflow occurs in the range of 20–40 m in dip direction of goaf, whereas the air leakage velocity of regenerated roof presents a U-shaped symmetrical distribution. The change features of coal spontaneous combustion hazardous zone in the goaf resemble those of the oxidation zone. In contrast, the coal spontaneous combustion hazardous zone in the regenerated roof is mainly distributed near the middle of the intake airway and the inner part of the front middle of the return airway, and the area of coal spontaneous combustion hazardous zone gradually expands and extends towards the tail with the increase in air volume.

**Keywords:** regenerated roof; coal spontaneous combustion; hazardous zone; goaf; oxidation zone

## 0 引言

煤自燃是煤矿生产过程中的 5 大灾害之一,而再生顶板裂缝漏风所引发的煤自燃是煤层复采、分层开采过程中发生的主要灾害之一<sup>[1-2]</sup>。煤层在开采过程中,垮落的顶板岩块经压实胶结形成再生顶板<sup>[3]</sup>。在开采扰动等因素作用下,顶板煤岩应力重新分布,诱导原生裂缝及伴生次生裂缝的产生。当风流经过回采工作面时,便会渗入裂缝中形成漏风通道,并与遗煤发生煤氧复合反应,从而引起煤氧化自燃灾害的发生<sup>[4-5]</sup>。因此,研究再生顶板漏风特性及煤自燃危险区域,对于防治煤自燃具有重大现实意义。

国内外学者对裂缝漏风及煤自燃危险区域分布特征作了大量研究。董子文等<sup>[6]</sup>基于变形几何方法,利用多物理场仿真软件(COMSOL),探究回采期间采空区自燃“三带”与发火期的动态演化。韩颖等<sup>[7]</sup>利用流体仿真软件(ANSYS FLUENT),探究了不同通风方式条件下采空区流场分布特征,得出漏风率大小 Y 型大于 U 型大于 W 型。黎经雷等<sup>[8]</sup>基于“横三带”、“竖三带”理论,利用 Fluent 模拟确定以氧气质量分数为指标下的自燃带范围,得出不同风速情况下,氧化带面积与其对应高度成正比。LI Jianwei 等<sup>[9]</sup>采用理论分析、数值模拟、现场观测相结合的方法,研究了浅埋煤层采动裂隙漏风规律,确定采空区自燃“三带”的分布范围和工作面加压通风的合理范围。BOLESLAV 等<sup>[10]</sup>利用 Fluent 模拟探究了破碎煤体内温度场随流场的变化情况。LEI Changkui 等<sup>[11]</sup>通过数值模拟的方法,研究工作面推进过程中采空区煤自燃氧化升温过程的动态演化,得到在推进过程中采空区煤自燃渗流场、氧浓度场、温度场、高温区域的演化运移特征。

现有研究主要针对采空区条件下煤自燃危险区

域的判定,对于再生顶板条件下煤自燃危险区域判定还鲜有研究,且判断依据大多采用氧气质量分数、漏风速度等单一控制指标。然而,单一的控制指标无法准确判定,需通过多重指标确定煤自燃危险区域。鉴于此,笔者基于山东某矿工程实况,利用 Fluent 模拟再生顶板条件下采空区及再生顶板内漏风过程,对比分析出再生顶板内氧气质量分数和漏风速度分布特征,结合氧气质量分数与漏风速度复合指标判定煤自燃火灾危险区域,探究不同风量条件下对煤自燃危险区域的影响,从而可根据危险区域空间行为变化特征采取针对性的预防措施,以期对再生顶板条件下煤自燃防治提供参考。

## 1 再生顶板流场数学模型

### 1.1 工作面概况

山东某矿工作面埋深 505~560 m,倾向 300~320°,倾角 9~15°,平均 13°,煤层平均厚度 8.1 m,采取顶分层开采方法,剩余平均煤层厚度 4.9 m,工作面采高 3 m,煤层工作面如图 1 所示。开采煤层为 II 类自燃煤层,自然发火期为 3~6 个月;矿井瓦斯绝对涌出量 1.66 m<sup>3</sup>/min,工作面回采期间瓦斯绝对涌出量 0.51 m<sup>3</sup>/min。

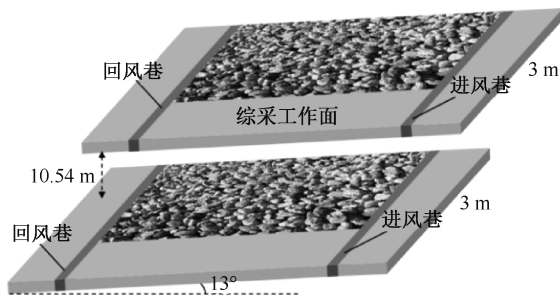


图 1 煤层工作面

Fig. 1 Working face of coal seam

## 1.2 再生顶板数学模型

1) 孔隙率分布方程。由于应力扰动在空间上为非均质分布,随着深度的增加,应力扰动逐渐衰减,且再生顶板上覆岩层具有明显的分层,故该孔隙

$$n^* = \varepsilon^{\frac{\varphi H_d}{h}} + \frac{\varepsilon^{\frac{\varphi H_d}{h}} \cdot \left[ 1 + \exp\left(-0.15\left(\frac{d}{2} - |y|\right)\right) \right] + \varepsilon^{\frac{\varphi H_d}{h}} \cdot \left\{ 1 - \frac{h_d}{h_d + H - [H - h_d(K_{pb} - 1)](1 - \exp^{-\frac{x}{2l}})} \right\} - \varepsilon^{\frac{\varphi H_d}{h}}}{1 + \sigma^{-1}\beta_1\gamma\left(\frac{d}{2} - y\right)\sin\alpha} \quad (1)$$

式中: $n^*$ 为修正后孔隙率; $\varepsilon$ 、 $\varphi$ 为修正系数; $H_d$ 为导气裂隙带高度,m; $h$ 为不同带区垂直高度,m; $d$ 为倾向宽度,m; $x$ 、 $y$ 为走向、倾向方向坐标; $h_d$ 为直接顶厚度,m; $H$ 为开采高度,m; $\sigma$ 为相对轴向应力,MPa; $\beta_1$ 为回归系数; $\gamma$ 为垮落岩石容重,N/m<sup>3</sup>; $\alpha$ 为倾角,(°); $K_{pb}$ 为直接顶破碎岩体残余碎胀系数; $l$ 为基本顶破碎岩块长度,m。

2) 风流控制方程。将再生顶板视为多孔介质区域,顶板内渗流流体视为不可压缩流体,流体流动满足连续性方程及动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = S_m \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \nabla(\rho v v_i) = \nabla(\mu \cdot \nabla v_i) - \frac{\partial p}{\partial i} + S_i \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>; $t$ 为时间,s; $\nabla$ 为哈密尔顿算子; $v$ 为流体速度,m/s; $S_m$ 为气体质量源项,kg/(m<sup>3</sup>·s); $v_i$ 为流体微团在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的速度分量,m/s; $\mu$ 为气体动力黏度,Pa·s; $p$ 为流体单元所受压力,Pa; $S_i$ 为动量损失源项。

3) 多孔介质动量损失源项方程。动量方程中动量损失源项 $S_i$ 模拟顶板对气体流动的附加阻力,其附加阻力由黏性阻力和惯性阻力2部分组成,但由于再生顶板内流体流速相对较小,惯性阻力可忽略不计,方程如下<sup>[14]</sup>:

$$S_i = - \sum_{i=1}^3 \frac{150(1 - n^*)^2 \mu v_i}{D_m^2 n^{*3}} \quad (4)$$

式中 $D_m$ 为顶板煤岩平均粒径,m。

4) 遗煤耗氧控制方程。遗煤氧化为负指数函数衰减的变化特征,其耗氧速率与氧气质量分数呈正比<sup>[15]</sup>,函数关系如下:

$$v_0 = -\rho_0 \cdot \lambda_c [C(T) - C_b] \quad (5)$$

式中: $v_0$ 为耗氧速率,kg/(m<sup>3</sup>·s); $\rho_0$ 为O<sub>2</sub>密度,kg/m<sup>3</sup>; $\lambda_c$ 为氧浓度衰减率,s<sup>-1</sup>; $T$ 为煤氧化时间,s; $C(T)$ 为 $T$ 时刻O<sub>2</sub>体积分数,%; $C_b$ 为下限O<sub>2</sub>体积

率在垂直空间上呈非均匀分布。为区分不同带区之间孔隙率差异,基于上覆岩层三维孔隙率数学模型引入垂直修正系数<sup>[12-13]</sup>,修正后再生顶板孔隙率分布如下:

分数,%。

## 2 数值模型计算

### 2.1 物理模型及网格划分

山东某矿工作面煤层采高3 m,煤层直接顶为灰-灰黑色砂质泥岩,苏承东等<sup>[16]</sup>利用自制装置在电液伺服岩石力学试验系统上对砂质泥岩开展压实试验,测定砂质泥岩残余碎胀系数 $K_{pb}$ 取1.312。式(1)中 $\varepsilon$ 、 $\varphi$ 取决于再生顶板胶结程度,根据工作面性质,取修正系数 $\varepsilon = 1.1$ , $\varphi = 0.3$ 。胶结再生带高度取1倍采高,并根据经验公式计算得出胶结再生带高度为3 m,弱胶结压实带高度为7 m,裂隙带高度为30 m;即由于弯曲下沉带仅产生极其微小的裂隙,对模拟结果影响较小,故文中模拟不考虑弯曲下沉带。

将工作面简化建模,划分为进风巷、回风巷、工作面、胶结再生带、弱胶结压实带、裂隙带等6个区域,模型分布情况如图2所示。根据此工作面回采期间瓦斯涌出量、遗煤占比及模型尺寸计算,并忽略临近煤层瓦斯涌出量对此工作面的影响,得出各区域瓦斯涌出量,见表1。

表1 模型各区域尺寸

Tab. 1 Dimensions of each area of model

名称	长×宽×高/ m×m×m	瓦斯涌出量/ (kg·m <sup>-3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	遗煤含 量/%
进风巷	4×20×3	—	—
回风巷	4×20×3	—	—
工作面	180×10×3	1.13 × 10 <sup>-6</sup>	—
胶结再生带	180×200×3	9.78 × 10 <sup>-8</sup>	8
弱胶结压实带	180×200×7	2.62 × 10 <sup>-8</sup>	5
裂隙带	180×200×30	2.45 × 10 <sup>-9</sup>	2

### 2.2 参数设定

由于再生顶板所处环境的复杂性,对模型作出假设以简化模型:①忽略巷道及工作面内设备产生

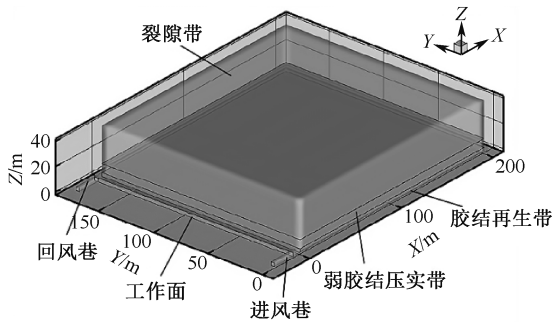


图2 三维物理模型

Fig. 2 Diagram of 3D physical model

的风阻影响;②再生顶板内孔隙率等符合经验公式;  
③在再生顶板内不考虑温度变化。

将工作面及巷道设为流体域,其顶板设为多孔介质域。为尽可能的突出再生顶板内流体运动特征,在模拟运算过程中需要加载相应的阻力源项,将多孔介质区域内的孔隙率、黏性阻力损失系数、氧气消耗速率编写用户自定义函数,并导入 Fluent 数值模拟软件求解。

模拟过程中流体区域材料选择空气混合物,进风巷设为速度入口,该工作面设计风量为  $250 \text{ m}^3/\text{min}$ ,为此,笔者模拟  $250$ 、 $550$ 、 $850 \text{ m}^3/\text{min}$  这3种供风量;回风巷设为自由出口;进回风巷与工作面、工作面与顶板、胶结带与压实带、压实带与裂隙带之间的面设为交界面,所有壁面边界条件设为无滑移。

## 3 煤自燃漏风流场分布特征

### 3.1 氧气质量分数分布特征

氧气质量分数分布特征如图3、图4所示。将20%氧气质量分数以上区域称为高氧气质量分数区域<sup>[6]</sup>。对于采空区而言,风量为  $250 \text{ m}^3/\text{min}$  时,采空区内高氧气质量分数区域主要集中在采空区前端,随着距离的深入氧气质量分数逐渐减小。当距工作面20 m时,氧气质量分数梯度主要受通风量的影响,当距离工作面20~45 m,氧气质量分数梯度逐渐增大并趋于稳定。距离工作面45 m后氧气质量分数梯度逐渐减小,60 m后不再受漏风的影响,氧气质量分数梯度逐渐减小到0。沿倾向上各位置均呈现相同的分布特征。

再生顶板的漏风方式与采空区的漏风方式不同,采空区的漏风入口主要位于工作面,而再生顶板漏风贯穿整个顶板。再生顶板内胶结带高氧浓度区域集中于进风侧及回风侧前端,沿回风侧氧气质量

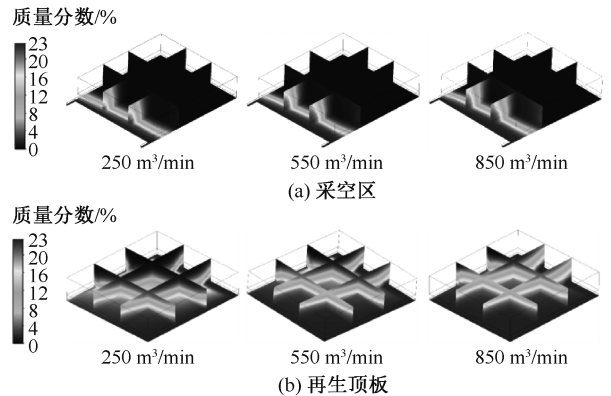


图3 不同风量氧气质量分数分布

Fig. 3 Distribution of oxygen mass fraction with different air volumes

分数逐渐减小。对于进风侧而言,胶结带与压实带氧气质量分数随风量的增加变化很小,而裂隙带氧气质量分数随着巷道的深入而逐渐减小。对于回风侧而言,胶结带变化与进风侧相同,压实带和裂隙带在深度小于170 m时,氧气质量分数逐渐减小,170 m后氧气质量分数快速增长,且随着通风量的增加,氧气质量分数梯度逐渐增大。再生顶板中部各带区均呈现与回风侧压实带和裂隙带相同的变化特征。

### 3.2 漏风速度分布特征

顶板漏风是客观存在的,为分析不同风量下不同带区的漏风特征,将倾向方向划分为  $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40 \text{ m}$  等9个的区域,统计不同风量下采空区和再生顶板各带区质量流量,统计结果如图5所示。以风量为  $250 \text{ m}^3/\text{min}$  为例,沿工作面倾向方向  $0 \sim 20 \text{ m}$  范围内,风流大量涌入采空区,在  $20 \sim 40 \text{ m}$  漏风重新进入工作面内,只有少部分风流进入顶板内,随后途径回风隅角侧进入回风巷,且随高度的增加,回流趋势逐渐减弱。当风量为  $250 \text{ m}^3/\text{min}$  时,只有胶结带在  $20 \sim 40 \text{ m}$  范围内发生回流;当风量逐渐增大至  $550$  及  $850 \text{ m}^3/\text{min}$ ,回流现象逐渐扩散到压实带,而裂隙带漏风始终保持逐渐减小的趋势。随着入口风量的增大,顶板内漏风量增大,回流量也随之增大。

再生顶板内高漏风区域主要分布在胶结带并靠近进回风巷位置处,沿高度方向上,裂隙带漏风量最小。这是因为再生顶板在高度方向上孔隙率呈梯度变化,故而胶结带中漏风量大于其他带区。以胶结带为例,在倾向方向上质量流量逐渐减小,在  $80 \sim 100 \text{ m}$  范围内质量流量减小到0,随后逐渐反向增长至入口流量同等程度,其余各带区均呈现相同的变化趋势。这是因为孔隙率沿倾向方向呈对称分布,因此再生顶

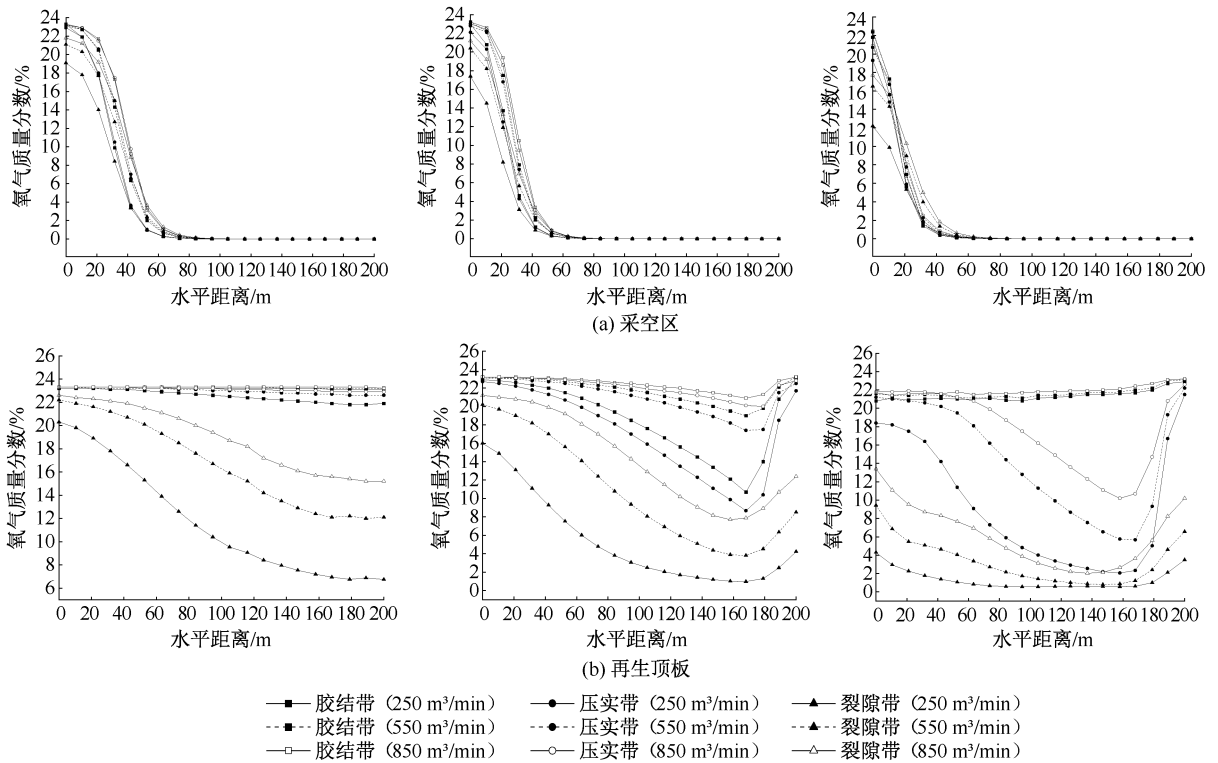


图4 不同风量下各带区不同位置氧气质量分数分布

Fig. 4 Distribution of oxygen mass fraction at different positions in different zones under different air volumes

板内各带区漏风均呈对称分布。随通风量的增加,再生顶板内各带区漏风量均有所增加,胶结带增幅程度最大,且主要集中在靠近进回风侧范围。

### 3.3 氧化带分布特征

采空区再生顶板遗煤自燃是一个连续动态的过程,根据自燃“三带”划分准则,以氧气质量分数11%~20%为划分标准<sup>[7-8]</sup>,以不同带区垂直方向的中心面( $Z = 1.5, 6.5, 25 \text{ m}$ )为研究对象,对比分析采空区氧化带分布特征,探究不同风量下再生顶板氧化带的变化情况,如图6、图7所示。采空区各带区氧化带分布均呈现非对称性,进风侧氧化带宽度略大于回风侧,由于氧气质量分数会在回风隅角发生聚集,故回风侧氧化带更靠近于工作面。沿垂向上,氧化带范围逐渐增大。当风量为 $250 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,裂隙带中氧化带范围集中在工作面附近,随着风量的增加,裂隙带氧化带范围先增大后减小,而其他带区均逐渐减小。

图6、图7中,再生顶板胶结带和压实带氧化带主要分布在回风巷中部及顶板中部区域,在回风巷尾部形成一个“三角形”中空区域,随高度和风量的增加,所形成的中空区域范围逐渐减小直至消失。当风量为 $250 \text{ m}^3/\text{min}$ 时,裂隙带氧化带集中在进风巷入口处,与采空区不同的是随着风量的增加氧化

带范围逐渐增大,其他带区氧化带变化趋势与采空区相同,但其氧化带范围减小趋势大于采空区。这是由于风量较小时,受上覆岩层孔隙率等因素影响下,裂隙带中氧含量较小,随风量的增大,氧气扩散强度增大,胶结带和压实带整体氧气质量分数上升,使得氧化带深入回风巷尾端且范围变小。

## 4 煤自燃危险区域判定

判定再生顶板煤自燃危险区域较为困难,通常需结合多因素进行判定。为合理划分再生顶板煤自燃危险区域且最大限度地满足煤自燃防火要求,采取叠加的方法,即将氧气质量分数指标和漏风速度指标划分的氧化带范围投影至水平面,将重叠部分区域作为再生顶板煤自燃危险区域<sup>[13,17]</sup>。

### 4.1 煤自燃危险区域分布特征

基于上述叠加方法,得到不同风量下危险区域分布特征,如图8所示。采空区煤自燃危险区域分布与氧化带分布相似,其宽度进风侧大于回风侧,且回风侧危险区域更靠近于工作面,随通风量的增加,煤自燃危险区域范围逐渐增大。而再生顶板煤自燃危险区域范围相较于采空区有所扩大,分析再生顶板危险区域划分可知:以漏风速度为指标的投影氧化带呈“U”型对称分布。以氧气质量分数为指标的

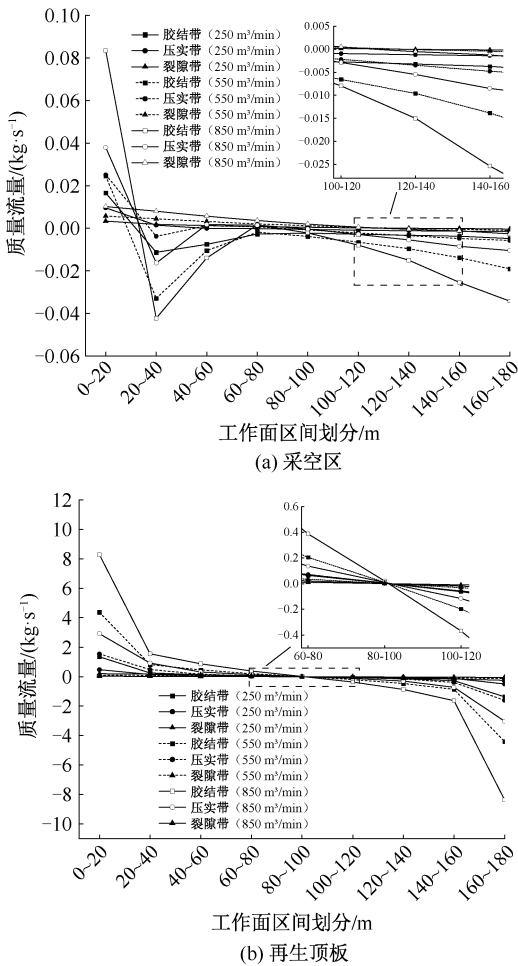


图5 质量流量对比分布  
Fig. 5 Comparison distribution of mass flow rate

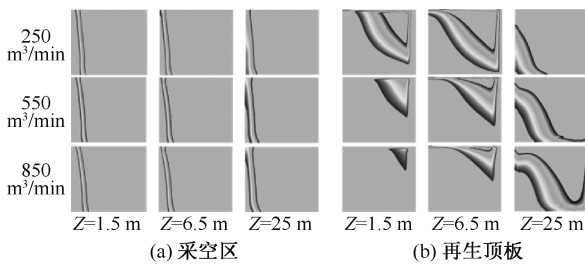


图6 不同带区氧化带分布  
Fig. 6 Distribution of oxidation zones in different zones

投影氧化带呈非对称分布,当风量为  $250 \text{ m}^3/\text{min}$  时,由于通风量较小,以氧气质量分数为指标的投影氧化带覆盖整个水平面,仅在回风巷尾部存在“三角形”中空区域。故而此时再生顶板煤自燃危险区域仅为漏风指标划分下的投影氧化带范围。当通风量增大至  $550 \text{ m}^3/\text{min}$  时,此时危险区域主要分布在靠近进风巷中部及回风巷前、中部内侧区域,回风巷侧危险区域面积大于进风巷侧。随着风量持续增加,危险

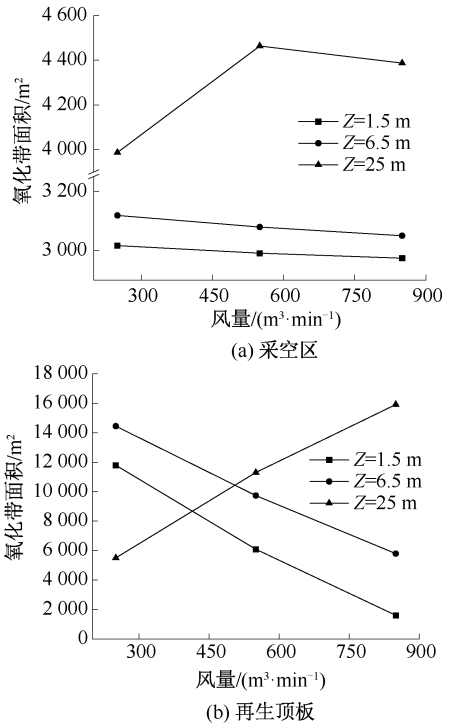


图7 氧化带面积分布特征  
Fig. 7 Distribution characteristics of oxidation zone area

区域面积逐渐增大,其中回风侧危险区域范围增长幅度大于进风侧,且逐渐向巷道尾部区域移动。

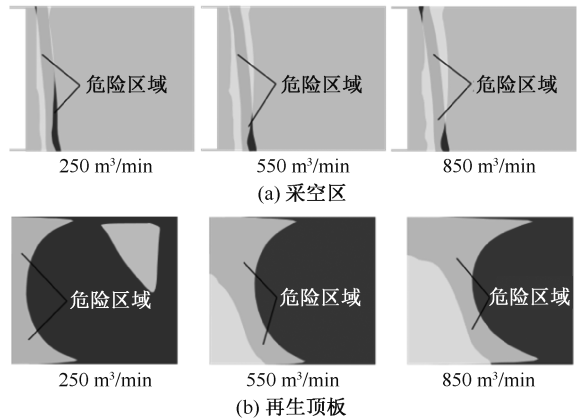


图8 危险区域分布  
Fig. 8 Distribution of hazardous zones

### 4.2 模拟结果验证

统计采空区煤自燃危险区域范围见表2。根据现场采空区遗煤自燃结果来验证采空区模拟结果的准确性,从而验证再生顶板模拟结果的合理性。根据现场工作面巷道顶板出现自然发火征兆,分别采用热电偶和W测温仪、束管抽气系统监测采空区温度及气体,确定在实际风量为  $250 \text{ m}^3/\text{min}$  时,顶板  $7\sim 8 \text{ m}$  处遗煤氧化自燃升温,高温区域由上而下经

热传导引燃顶煤,确定巷道进风巷入口处 10~35 m,纵向 0~7 m 为煤自燃区域。当风量为 250 m<sup>3</sup>/min 时,模拟所确定煤自燃危险区位于进风侧 9.5~34.2 m 处,与现场实测结果存在一定的误差,整体平均误差为 3.6%。且由于裂隙带中遗煤量较小,故在垂向上煤自燃危险区域主要位于胶结带与压实带。综上所述,上述模拟结果较为符合实际情况,因此模拟结果准确有效。

表 2 采空区进回风侧危险区两端范围

Tab. 2 Range at both ends of dangerous zone on intake and return air sides of goaf

风量/(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	进风侧/m	回风侧/m
250	9.5~34.2	3.6~23.5
550	11.8~39.8	4.0~31.6
850	13.4~43.8	6.1~34.9

## 5 结 论

1) 采空区及再生顶板流场分布特征不同。氧气质量分数均呈非对称分布;采空区漏风速度为非对称分布且发生回流现象,再生顶板漏风速度呈“U”型对称分布。

2) 不同带区氧化带面积随风量变化趋势不同。胶结带和压实带氧化带面积随风量增加而减小,裂隙带氧化带面积随风量增加而增大。

3) 通风量对煤自燃危险区域影响较大。当通风量较小时,危险区域只受漏风指标的影响;随风量增加,再生顶板危险区域从进风巷中部及回风巷前中部内侧向尾部移动。因此,对其煤自燃防治应考虑送风量对危险区域的影响,并加强监控进风巷中端及回风巷前中端区域的气体监控。

## 参 考 文 献

- [1] 李敏,林志军,王德明,等. 我国煤矿重特大火灾事故统计分析[J]. 中国安全科学学报, 2023,33(1):115-121.  
LI Min, LIN Zhijun, WANG Deming, et al. Statistical analysis of major coal mine fire accidents in China[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(1): 115-121.
- [2] GU Wangxin, LU Yi, YAN Zhihong, et al. Spontaneous combustion of coal in regenerated roof and its prevention technology[J]. Fuel, 2023, 346: DOI:10.1016/j.fuel.2023.128280.
- [3] 鲁义,陈健,邵淑珍,等. 再生顶板煤自燃漏风裂隙控制机理[J]. 煤炭学报, 2023,48(2):795-805.  
LU Yi, CHEN Jian, SHAO Shuzhen, et al. The mechanism of the control mechanism of the self-ignition leakage of the regenerative roof coal[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 795-805.
- [4] WANG Yongyin, TAHERI A, XU Xianbi. Application of coal mine roof rating in Chinese coal mines[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(3): 491-497.
- [5] CHEN Jian, LU Yi, TANG Guoxin, et al. Research and prevention of upper remaining coal spontaneous combustion induced by air leakage in multi-inclination regenerated roof: a case study in the Luwa coal mine, China[J]. Energy, 2023, 275: DOI:10.1016/j.energy.2023.127484.
- [6] 董子文,齐庆杰,韩光,等. 采空区氧化带与发火期动态演化规律模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(7):45-51.  
DONG Ziwen, QI Qingjie, HAN Guang, et al. Numerical simulation study on dynamical evolution rule of spontaneous combustion oxidation zone and period[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(7): 45-51.
- [7] 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.  
HAN Ying, LIU Debao. Study on distribution law of oxygen and gas in goaf under different ventilation modes[J]. Coal Technology, 2023, 42(1): 115-118.
- [8] 黎经雷,牛会永,鲁义,等. 风速对近距离煤层采空区漏风及煤自燃影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2019,47(3): 156-162.  
LI Jinglei, NIU Huiyong, LU Yi, et al. Study on effect of wind speed to air leakage and spontaneous combustion in goaf of contiguous seams[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 156-162.
- [9] LI Jianwei, LI Xintian, LIU Changyou, et al. Study on the air leakage characteristics of a goaf in a shallow coal seam and spontaneous combustion prevention and control strategies for residual coal[J]. PloS One, 2022, 17(6): DOI:10.1371/journal.pone.0269822.

- [10] MOISÉS O B R, ALAN J D A, BAENA P B. A study of fire propagation in coal seam with numerical simulation of heat transfer and chemical reaction rate in mining field[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(6): 873–879.
- [11] LEI Changkui, JIANG Lijuan, BAO Ruoyu, et al. Study on multifield migration and evolution law of the oxidation heating process of coal spontaneous combustion in dynamic goaf[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(15): 14 197–14 207.
- [12] 鲁义, 杨帆, 王涛, 等. 再生顶板煤自燃危险区域分布研究[J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(9): 135–141.  
LU Yi, YANG Fan, WANG Tao, et al. Research on risk area distribution of coal spontaneous combustion in regenerated roof [J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(9): 135–141.
- [13] 王少锋, 王德明, 曹凯, 等. 采空区及上覆岩层空隙率三维分布规律[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2014, 45(3): 833–839.  
WANG Shaofeng, WANG Deming, CAO Kai, et al. Distribution law of 3D fracture field of goaf and overlying strata [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2014, 45(3): 833–839.
- [14] WU Kan, CHENG Gonglin, ZHOU Dawei. Experimental research on dynamic movement in strata overlying coal mines using similar material modeling[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8(9): 6 521–6 534.
- [15] 李宗翔, 温永宇, 张金玉. 煤样封闭耗氧试验及其参数测定分析[J]. *安全与环境学报*, 2009, 9(1): 116–119.  
LI Zongxiang, WEN Yongyu, ZHANG Jinyu. An experiment with oxygen consumption and parameter-defining for sealed coal samples[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2009, 9(1): 116–119.
- [16] 苏承东, 顾明, 唐旭, 等. 煤层顶板破碎岩石压实特征的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(1): 18–26.  
SU Chengdong, GU Ming, TANG Xu, et al. Experiment study of compaction characteristics of crushed stones from coal seam roof[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(1): 18–26.
- [17] LU Yi, YAN Zhihong, SHI Shiliang, et al. Delineation and prevention of the spontaneous combustion dangerous area of coal in a regenerated roof: a case study in the Zhoujing coal mine, China [J]. *Energy & Fuels*, 2020, 34(5): 6 401–6 413.

作者简介: 李敏 (1989—), 男, 湖南涟源人, 博士, 副教授, 主要从事火灾防治、风险评估、作业安全方面的研究。E-mail: cumtlimin@163.com。