

中文引用格式:张遵国,张宏虎,唐朝,等. 无煤柱开采工作面采空区漏风及瓦斯运移特征[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(11):119-130.

英文引用格式:ZHANG Zunguo, ZHANG Honghu, TANG Chao, et al. Characteristics of air leakage and gas migration in goaf of pillarless coal mining face [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(11):119-130.

无煤柱开采工作面采空区漏风及瓦斯运移特征*

张遵国^{1,2}副教授,张宏虎¹,唐朝¹,袁新立¹,陈永强¹

(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院,辽宁 葫芦岛 125105;

2 辽宁工程技术大学 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁 葫芦岛 125105)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.11.1721

【摘要】 为掌握无煤柱开采Y型通风工作面不同回采时期采空区漏风及瓦斯运移特征,以晋能控股装备制造集团有限公司寺河煤矿2号井97312工作面为研究对象。采用六氟化硫(SF₆)示踪气体法分别测定与相邻97311工作面采空区不同连通状态下97312工作面及回采巷道的漏风区域分布、漏风类型和漏风量。利用数值模拟分析采空区内部漏风流场分布及瓦斯运移特征。结果表明:97312工作面沿风流方向依次形成正压—负压—正压—负压4段漏风区域;主进风巷97222巷为正压漏风;回风巷97224巷沿空留巷段主要为负压漏风,但在抽采管附近及巷道变形严重区域易形成正压漏风;与相邻采空区的连通状态对采空区内部漏风流场及瓦斯运移均有影响,采空区连通后,新增了1条漏风路径;97311采空区漏风携带瓦斯向97312采空区运移,导致97312采空区、工作面及97224沿空留巷段处瓦斯体积分数升高;97311工作面封闭后,采空区连通段附近瓦斯体积分数降低。

【关键词】 无煤柱; 工作面; 采空区漏风; 瓦斯运移; Y型通风; 沿空留巷; 采空区连通状态

Characteristics of air leakage and gas migration in goaf of pillarless coal mining face

ZHANG Zunguo^{1,2}, ZHANG Honghu¹, TANG Chao¹, YUAN Xinli¹, CHEN Yongqiang¹

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: To understand the characteristics of goaf air leakage and gas migration in different mining periods of Y-type ventilation working face without coal pillar mining, 97312 working face in Sihe No. 2 coal mine of Jinneng Holding Equipment Manufacturing Group Co., Ltd. was selected. The sulfur hexafluoride (SF₆) tracer gas approach was used to determine the air leakage area distribution, air leakage type, and air leakage volume of 97312 working face and the roadways under different connectivity states with the adjacent 97311 working face goaf. The air leakage flow field distribution and gas migration characteristics in the goaf area were analyzed by numerical simulation. The results showed that 97312

working face had four air leakage areas of positive pressure-negative pressure-positive pressure-negative pressure along the wind direction. The main air intake roadway 97222 had positive pressure leakage. The air return roadway 97224 had mainly negative pressure air leakage along the gob-side entry retaining section, but positive pressure leakage was prone to occur near the extraction pipe and in the area where the roadway was severely deformed. After connectivity with the adjacent goaf area, an additional air leakage path was created. Moreover, the connection status with the adjacent goaf affected the internal air leakage flow field and gas migration of the goaf. Air leakage from the 97311 goaf area carried gas to the 97312 goaf, causing an increase in gas volume fraction in the 97312 goaf, working face, and the gob-side entry retaining section of the 97224 roadway. After the closure of the 97311 working face, the gas volume fraction near the connected goaf area decreased.

Keywords: pillarless; coal mining face; air leakage in goaf; gas migration; Y-type ventilation; gob-side entry retaining; connection state of goaf

0 引言

切顶卸压技术主动改变了巷道顶板和采空区顶板的结构形态,通过采空区顶板的垮落碎胀实现了沿空护巷和无煤柱开采,有效解决了沿空留巷围压高和支护难的问题^[1-2]。随着围岩变形破坏愈发严重,留巷段碎石帮受顶板覆岩压力影响,导致挡矸墙体严重变形,极易造成留巷段漏风现象^[3]。采空区漏风不仅减少了工作面的有效风量,还容易导致瓦斯积聚^[4-5],从而产生极大的安全隐患。因此,研究无煤柱 Y 型通风工作面采空区的漏风及瓦斯运移特征具有重要意义。

国内外学者针对 Y 型通风采空区漏风特征开展了大量研究。王炯等^[6]结合 Fluent 数值模拟软件,分析了不同通风方式、风量及留巷长度下 Y 型通风风流场分布特征及漏风情况,结果表明:相同配风量下,两进一回 Y 型通风方式下的采空区“三带”范围更小;不同风量下,“三带”范围随总配风量增大而增大;留巷长度小于 100 m 时,漏风严重。杜云飞^[7]构建了切顶卸压 Y 型通风模式下采空区空隙率与渗透率演变数学模型,研究切顶卸压留巷 Y 型通风模式下采空区漏风流场变化特征,发现随着配风比的增加,沿工作面倾向方向,漏风量占比略有增加;随着留巷长度的增加,沿工作面倾向方向,漏风量总体略有减小。对于 Y 型通风采空区漏风情况下,瓦斯运移特征的研究多以数值模拟为主,如 LI Tengting 等^[8]为揭示 Y 型通风下综采工作面采空区漏风及瓦斯分布特征,采用 Comsol 数值模拟软件模拟了采空区瓦斯分布特征,指出与 U 型通风相比,Y 型通风可降低工作面 and 上隅角的气体体积分数,采空区瓦斯的三维空间分布类似于采空区裂隙的 O

型圈理论,沿走向方向,深部采空区瓦斯体积分数逐渐增加;在倾斜方向上,采空区中部的气体体积分数高于采空区两侧的气体体积分数;在垂直方向上,气体体积分数逐渐增加。李艳昌等^[9]运用计算流体力学软件(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟了不同通风模式下采空区瓦斯体积分数,结果表明:两进一回式相较于一进两回式的通风模式,在漏风方面有明显改善,使得工作面回风隅角瓦斯积聚问题基本得到解决。ZHOU Xihua 等^[10]结合工作面实测参数,采用 CFD 模拟方法分析了 Y 型通风的漏风情况及采空区上隅角瓦斯体积分数超限问题,认为漏风气流会从沿空留巷向采空区移动,漏风量与采空区留巷长度呈正相关关系。综上,无煤柱 Y 型通风工作面采空区漏风及瓦斯运移特征的研究成果主要针对单一工作面,鲜有在与相邻采空区连通情况下,研究漏风和瓦斯运移特征的成果。

鉴于此,笔者以晋能控股装备制造集团有限公司寺河煤矿 2 号井(简称寺河煤矿 2 号井)97312 工作面为研究对象,利用 SF₆ 示踪气体法现场测定相邻 97311 工作面采空区封闭前和封闭后 97312 工作面的漏风情况,并结合 Fluent 数值模拟,分析不同回采时期工作面采空区漏风和瓦斯运移特征,以期为无煤柱开采工作面采空区漏风治理和瓦斯防治提供参考。

1 无煤柱开采工作面概况

1.1 无煤柱开采工作面巷道布置

寺河煤矿 2 号井 97 盘区共布置 5 个采煤工作面,均采用切顶卸压无煤柱自成巷技术。97312 工作面东南为 97311 工作面(已采完)、西北为 97313 工作面(未开采),97312 工作面与相邻采空区、工作

面关系(以 97312 采空区与 97311 采空区连通后状态为例)如图 1 所示。97312 工作面走向长度 1062 m,倾斜长度 220 m,平均采高 1.65 m。由于 97312 工作面走向长度大于 97311 工作面,因此,97312 工作面在回采过程中将会经历 3 个时期:①97312 采空区与 97311 采空区连通前(简称采空区连通前);②97312 与 97311 采空区连通后(97311 工作面处于拆架期间,尚未封闭,简称采空区连通后);③97311 工作面封闭后。

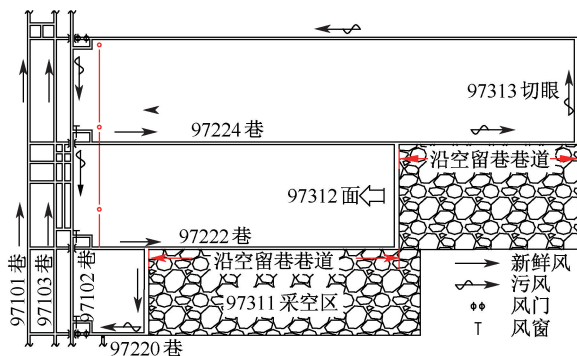


图 1 工作面巷道布置
Fig. 1 Working face roadway layout

1.2 开采工作面通风与瓦斯情况

97312 工作面采用 Y 型通风方式,设计投产时进风量为 1 285 m³/min,原煤瓦斯含量 6.71 m³/t,采取顶板高位钻孔抽采采空区瓦斯、顺层钻孔预抽采本煤层瓦斯。采空区连通后,97312 工作面绝对瓦斯涌出量为 13.21 m³/min;相邻 97311 工作面封闭后,97312 工作面绝对瓦斯涌出量为 20.06 m³/min,无突出危险性。

1.3 沿空留巷情况

97224 巷与 97222 巷沿空留巷段通过预裂切缝爆破,在局部范围切断工作面顶板应力传递,减弱巷道顶板压力。留巷后喷浆封堵挡矸支护侧,形成挡矸墙。现场常见由于巷道变形导致挡矸墙上产生裂隙,裂隙主要集中在挡矸墙与顶板交界处和喷浆不实处,因为内部矸石巷帮并不是完全压实状态,所以采空区与沿空留巷之间易产生漏风现象。

2 采空区漏风测定

2.1 示踪气体法测定原理

根据 MT/T 845—1999《煤矿巷道用 SF₆ 示踪气体检测漏风技术规范》^[11],巷道漏风分为正压与负压漏风 2 种类型(图 2),正压漏风为巷道向采空区

内漏风,负压漏风为采空区向巷道内漏风。由图 2 可知:测定正压漏风时采样点 M 不动,移动释放点 R_i;测定负压漏风时释放点 R 不动,移动采样点 M_i^[11],图中 k 表示释放点与采样点总数。根据在采样点测得 SF₆ 体积分数 c_i 和释放点释放流量 q; i+1 为测点号,测点号沿风流方向递增。由下式可计算 2 测点间的漏风量 ΔQ_i:

$$\Delta Q_i = q \frac{c_i - c_{i+1}}{c_{i+1}c_i} \quad (1)$$

式中:ΔQ_i 为 2 测点之间的漏风量, m³/min; q 为 SF₆ 示踪气体释放量, m³/min; c_i 为测点 R_i 或 M_i 对应的 SF₆ 气体体积分数, 10⁻⁶; c_{i+1} 为 R_{i+1} 或 M_{i+1} 沿风流方向下一测点 R_{i+1} 或 M_{i+1} 对应的 SF₆ 气体体积分数, 10⁻⁶。

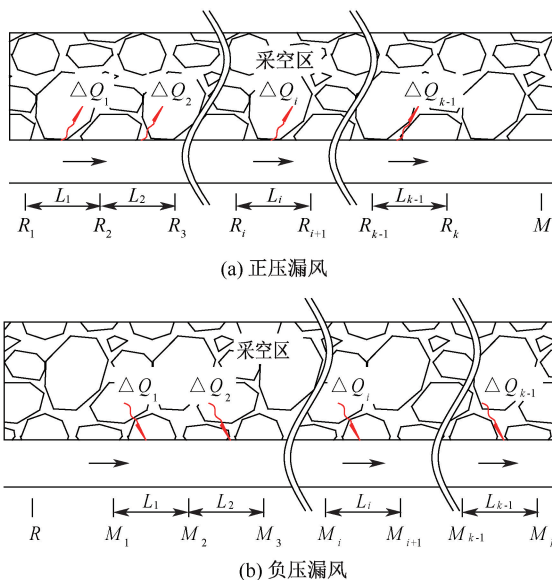


图 2 漏风类型及测定方法

Fig. 2 Air leakage types and measurement methods

2.2 测定结果与分析

采空区连通后,97222 巷进风量为 1 247 m³/min,97224 巷进风量为 688 m³/min;97311 工作面封闭后,97222 巷进风量为 1 252 m³/min,97224 巷进风量为 1 205 m³/min。漏风测定结果如图 3 所示,图中正值表示正压漏风量,负值表示负压漏风量。

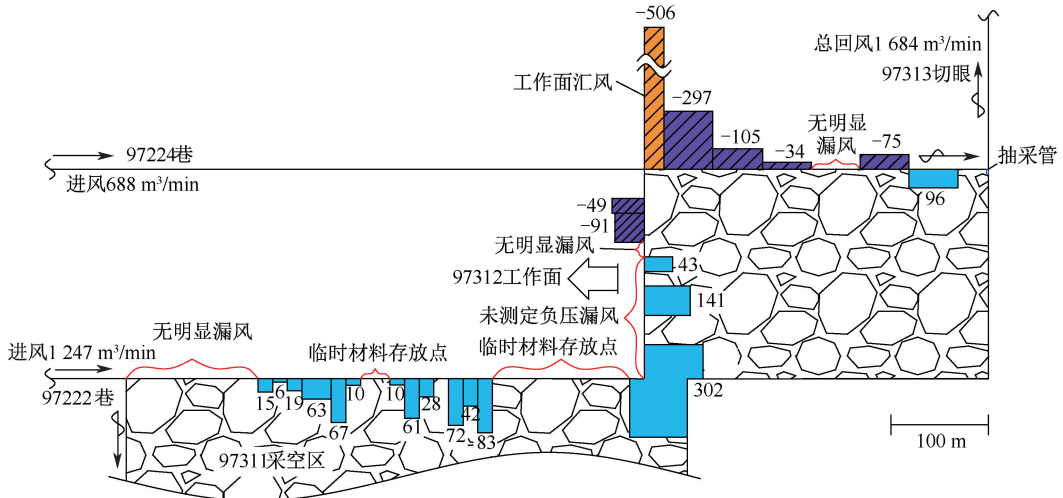
1) 97222 巷漏风特征。由图 3 看出,97222 巷在 2 个时期均为正压漏风。从图 3a 看出,采空区连通后,97222 巷沿空留巷段在距离 97311 工作面 0~135 m 范围内巷道维护状态较好,未测得明显漏风;135~240 和 270~375 m 范围巷道漏风量分别达到

180、296 m³/min;240~270、375~515 m 范围由于材料堆放会对测试精度有较大影响,因此,不进行漏风测定。由图 3b 看出,97311 工作面封闭后,97222 巷自 97311 工作面终采线至 97312 工作面方向 60 m 范围内,向 97311 采空区总漏风量为 312 m³/min,漏风率达到 26.7%。

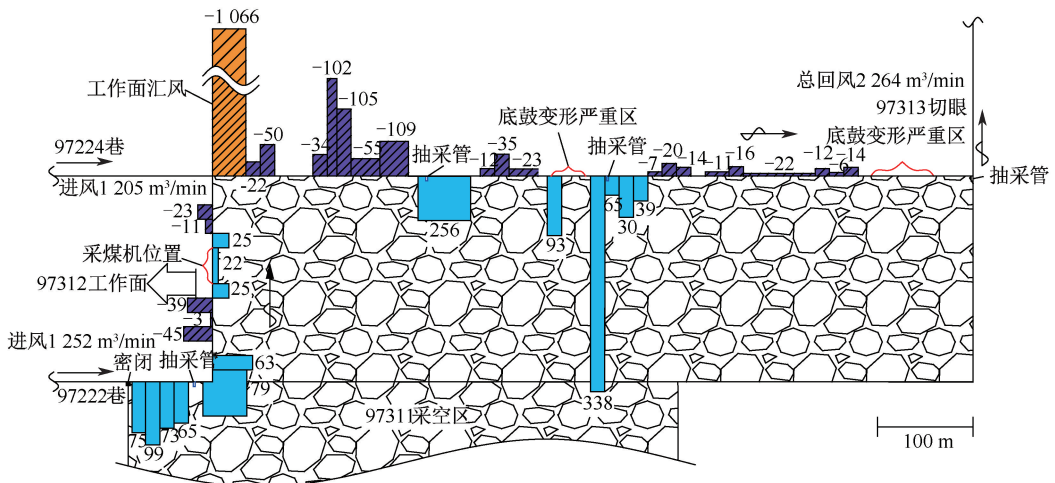
2) 97224 巷漏风特征。由图 3 看出,97224 巷沿空留巷段在 2 个时期主要为负压漏风,且沿风流方向,漏风量呈减小趋势,但在 97224 巷尾抽采管附近形成正压漏风。这是由于 97222 巷及 97312 工作面漏风流经采空区后汇入到 97224 巷沿空留巷段,形成负压漏风。97312 采空区靠近 97312 工作面附近区域,漏风通道短,且顶板垮落后尚未压密实,孔隙率较大,漏风较容易穿过采空区进入到 97224 巷沿空留巷段,导致该区域负压漏风量较大;在采空区

深部,采空区矸石垮落后逐渐压密压实,孔隙率降低,且漏风通道加长,风阻大,漏风量减小。在 97224 巷尾抽采管附近,受抽采负压影响,巷道内部分风流穿过挡矸墙裂隙进入采空区,导致 97224 巷尾部出现正压漏风。

97311 工作面封闭后,在 97224 巷沿空留巷段内距离 97312 工作面 220、420 m 处各增设了瓦斯抽采管,由图 3b 可以看出,受抽采负压影响,这 2 处区域由负压漏风转为正压漏风。受矿压作用,97224 巷沿空留巷段内距离 97312 工作面 355~390 m、690~755 m 区域底鼓变形严重,巷道断面减小,风阻增大,导致该区域由负压漏风转为正压漏风。97224 巷沿空留巷段内距离 97312 工作面 675~800 m 虽然也存在底鼓较为严重区域,但由于该处挡矸墙进行了复喷(浆)处理,封堵了漏风通道,因此无明显漏风。



(a) 采空区连通后漏风测定结果



(b) 97311工作面封闭后漏风测定结果

图 3 漏风测定结果

Fig. 3 Air leakage measurement results

3) 97312 工作面漏风特征。测定采空区连通后 97312 工作面漏风时,受现场采煤作业影响,未测定进风隅角至距离 97222 巷 125 m 区域负压漏风,但从图 3 看出,已测区域与 97311 工作面封闭后漏风特征基本一致,即工作面沿风流方向漏风类型依次为正压—负压—正压—负压。

采空区连通后进风隅角未设置挡风帘,在进风隅角处风流进入采空区内,为正压漏风,从 97222 巷距离 97312 工作面 15 m 到进入 97312 工作面 35 m 区域内,共向采空区漏风 $302 \text{ m}^3/\text{min}$,平均每米漏风 $6.04 \text{ m}^3/\text{min}$;97311 工作面封闭后,由于 97312 工作面进风隅角设置挡风帘,从 97222 巷距离 97312 工作面 10 m 到进入 97312 工作面 30 m 区域内,共向采空区漏风 $142 \text{ m}^3/\text{min}$,平均每米漏风 $3.55 \text{ m}^3/\text{min}$,平均每米漏风比采空区连通后漏风量减小 41.2%。

根据 97311 工作面封闭后漏风测定结果,97312 工作面距离 97222 巷 45~88 m 范围为负压漏风,漏风量为 $87 \text{ m}^3/\text{min}$ 。这是因为在进风隅角处存在较大的涡流^[12-13],影响了由进风隅角到工作面 0~88 m 区域漏风。在 0~30 m 范围风流经过转弯处后,由于流速较大且转弯曲率半径较小,惯性作用下,工作面部分风流由此进入采空区^[14];在 45~88 m 范围内,部分漏风流回到工作面内,形成负压漏风。随后 2 个时期在工作面内均出现一段正压漏风区域,采空区连通后,在 97312 工作面距离 97222 巷 65~125 m 区域为正压漏风,漏风量为 $184 \text{ m}^3/\text{min}$,平均每米漏风 $3.07 \text{ m}^3/\text{min}$;97311 工作面封闭后,在 97312 工作面距离 97222 巷 85~155 m 区域为正压漏风,漏风量为 $72 \text{ m}^3/\text{min}$,平均每米漏风 $1.03 \text{ m}^3/\text{min}$,相比采空区连通后,平均每米漏风量减小 66.4%。

在靠近工作面回风隅角处,受高位钻孔抽采负压影响,采空区内部分风流进入工作面内,为负压漏风。采空区连通后,97312 工作面内距离 97224 巷 30~75 m 区域为负压漏风,漏风量为 $140 \text{ m}^3/\text{min}$,平均每米漏风 $3.11 \text{ m}^3/\text{min}$;97311 工作面封闭后,97312 工作面内距离 97224 巷 30~60 m 区域为负压漏风,漏风量为 $34 \text{ m}^3/\text{min}$,平均每米漏风 $1.13 \text{ m}^3/\text{min}$,平均每米漏风量较采空区连通后减小 63.7%。

97311 工作面封闭后相对于采空区连通后 97312 工作面漏风量减小的原因主要有 2 方面。一方面,因为风帘的设置减少了工作面向采空区的漏风量,同时也使得由采空区漏回到工作面的风量降低^[15];另一方面,主进风巷侧隅角处产生的涡流区

域大小是影响工作面漏风量的关键因素^[16],相对于采空区连通后,97311 工作面封闭后工作面配风比进行了调整,调整前主、副进风巷配风比为 2.6 : 1,调整后配风比为 1 : 1,主进风巷进风量减小同样导致了漏风强度降低。

3 采空区流场数值模拟

为探究不同开采时期采空区内部流场分布变化,采用 Fluent 数值模拟软件模拟 3 个时期的采空区漏风流场分布。将采空区视为多孔介质模型,气体流动遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒。为了便于建模和计算,作如下假设:

- 1) 采空区内流动的气体为不可压缩流体,符合多孔介质渗流定律。
- 2) 将采空区看作各向同性的多孔介质,流动的气体近似为恒温、稳定的不可压缩流动过程。
- 3) 不考虑采空区中温度变化影响和化学反应。

3.1 主要参数设定

- 1) 碎胀系数和孔隙率分布。采空区垮落岩石在 x (倾向) 和 y (走向) 2 个方向的碎胀系数分布函数为^[17]:

$$K_p(x, y) = K_{p, \min} + (K_{p, \max} + K_{p, \min}) \times \exp\{-a_1 d_1 \cdot [1 - \exp(k_1 \cdot a_0 d_0)]\} \quad (2)$$

式中: k_1 为调整系数; $K_{p, \max}$ 为初始垮落碎胀系数; $K_{p, \min}$ 为垮落岩石压实时碎胀系数; a_0, a_1 为距离煤壁和工作面的衰减率, m^{-1} ; d_0, d_1 为点 (x, y) 与煤壁和工作面边界的距离, m 。

对应的采空区垮落带孔隙率:

$$n = 1/K_p(x, y) \quad (3)$$

式中 n 为孔隙率, %。

为模拟沿空留巷侧挡矸墙的不同漏风程度,巷道与采空区之间建立相应的挡矸墙,并利用 UDF 控制挡矸墙孔隙率。97224 巷、97222 巷沿空留巷段挡矸墙孔隙率分布,见表 1。

- 2) 渗透率。采空区渗透率可由采空区的平均粒径和孔隙率计算得出^[18]:

$$k = \frac{d_p^2 n^3}{150(1-n)^2} \quad (4)$$

式中 d_p 为多孔介质颗粒平均直径,取 0.05 m 。

- 3) 黏性阻力系数 C_1 和惯性阻力系数 C_2 。多孔介质模型需要在动量方程中增加源项来替代流体的流动阻力,该源项包括黏性阻力系数和惯性阻力系数,可按下式计算^[19]:

表 1 沿空留巷段挡矸墙孔隙率分布

Table 1 Porosity distribution of gangue retaining wall in gob-side entry retaining section

	97224 巷与 97312 面距离/m			n/%
	采空区连通前	采空区连通后	97311 封闭后	
97224 巷	(0,150]	(0,200]	(0,200]	5
	(150,250]	(200,300]	(200,400]	6
	(250,280]	(300,330]	(400,600]	8
	(280,320]	(330,370]	(600,800]	12
97222 巷	采空区连通后 97222 巷与 97311 面距离/m	n/%	97311 工作面封闭后 97222 巷与 97311 面距离/m	n/%
	(0,300}	5	(0,100}	5
	(300,530}	4	(100,570}	1.5
	(530,570}	1.5	-	-

$$C_1 \frac{150(1-n)^2}{d_p^2 n^3} \quad (5)$$

$$C_2 \frac{3.5(1-n)}{d_p n^3} \quad (6)$$

4) 垮落带、裂隙带高度计算。97312 工作面煤层平均采高 1.65 m,煤层顶板为细砂岩,中硬岩层,采空区垮落带和裂隙带高度可通过下式计算^[20]：

$$H_m = \frac{100 \sum M}{4.7 \sum M + 19} \pm 2.2 \quad (7)$$

$$H_h = \frac{100 \sum M}{1.6 \sum M + 3.6} \pm 5.6 \quad (8)$$

式中： H_m 为垮落带高度, m; H_h 为裂隙带高度, m; $\sum M$ 为累计采厚, m。

通过式 (7)、式 (8) 计算垮落带高度为 (6.2 ± 2.2) m, 取 8 m; 裂隙带高度为 (26.4 ± 5.6) m, 取 32 m。

3.2 数值模拟方案

1) 三维模型及网格划分。忽略工作面采煤设备对气体流动的影响,将采空区、采煤工作面、进风巷、沿空留巷和回风巷均设为矩形断面,模型尺寸见表 2。网格划分时,先采用四面体网格进行网格划分,再将四面体网格转化为多面体网格。

表 2 采空区几何参数

Table 2 Geometric parameters of goaf

开采时期	几何名称	长×宽×高/(m×m×m)	几何名称	长×宽×高/(m×m×m)
采空区连通前	97222 巷	50×5×2.6	97312 采空区	320×215×40
	97224 巷	370×5×2.6	顶板高位钻孔抽采孔	0.113×0.113
	97312 工作面	220×5×1.65	采空区埋管抽采孔	0.457×0.457
采空区连通后	97222 巷	580×5×2.6	97311 采空区	570×175×40
	97224 巷	470×5×2.6	97312 采空区	370×215×40
	97311 工作面	175×4×1.9	顶板高位抽采孔	0.113×0.113
97311 工作面封闭后	97312 工作面	220×5×1.65	采空区埋管抽采孔	0.457×0.457
	97222 巷	150×5×2.6	97311 采空区	570×170×40
	97224 巷	860×5×2.6	97312 采空区	800×215×40
	97311 工作面	170×4×1.9	顶板高位抽采孔	0.113×0.113
	97312 工作面	220×5×1.65	采空区埋管抽采孔	0.475×0.475

2) 边界条件。将进风口设定为速度入口,出风口设定为压力出口,温度为 300 K,气体质量组分设定为:氧气:21%,氮气:79%,重力加速度为 9.8 m/s²,瓦斯抽采管路直径为 0.475 m,抽采流量为 9 m³/min,巷道和采空区与挡矸墙的交界面均设置为内部,模型外部固体边界面设为壁面,模型整体均为流体。不同时期 97222 巷与 97224 巷进风量设置见表 3。

表 3 不同时期 97222 巷与 97224 巷进风量设置

Table 3 Air intake setting of 97222 roadway and 97224 roadway in different periods

回采时期	97222 巷进风量/(m ³ ·min ⁻¹)	97224 巷进风量/(m ³ ·min ⁻¹)
采空区连通前	1 174	725
采空区连通后	1 664	628
97311 工作面封闭后	1 252	1 205

3.3 数值模拟结果

采空区漏风流场分布模拟结果如图 4、图 5 所示。

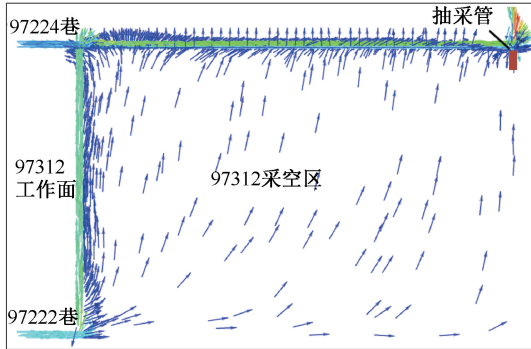


图 4 采空区连通前 97312 采空区漏风流场分布
Fig. 4 Distribution of air leakage flow field in goaf of 97312 working face before goaf connection

3.4 97311 采空区漏风特征

由图 5a 看出, 97222 巷在采空区连通后和 97311 工作面封闭后均为正压漏风, 但在 97311 采

空区内的漏风流场分布存在一定差异。

采空区连通后, 97222 巷漏入到 97311 采空区的漏风流以弧形路径运移, 靠近 97311 工作面的漏风流整体向 97311 工作面回风隅角运移; 其他大部分漏风流经 97311 采空区与 97312 采空区连通段进入到 97312 采空区内; 受瓦斯抽采负压影响, 经过抽采管附近的漏风流被瓦斯抽采管抽走。

97311 工作面封闭后, 97222 巷漏入到 97311 采空区的漏风流整体以较大幅度弧形路径向 97311 采空区深部运移; 受瓦斯抽采负压影响, 经过抽采管附近的漏风流被瓦斯抽采管抽走。在 2 采空区连通段靠近 97312 工作面区域, 有少量漏风流由 97312 采空区进入到 97311 采空区, 并与 97311 采空区原有漏风流汇合后经 97311 采空区与 97312 采空区连通段深部进入 97312 采空区。

3.5 97312 采空区漏风特征

1) 采空区连通前漏风流场分布。由图 4 看出, 采空区连通前, 漏风流由 97312 工作面进风隅角进入到采空区后形成 2 条漏风路径, 一条由 97312 工

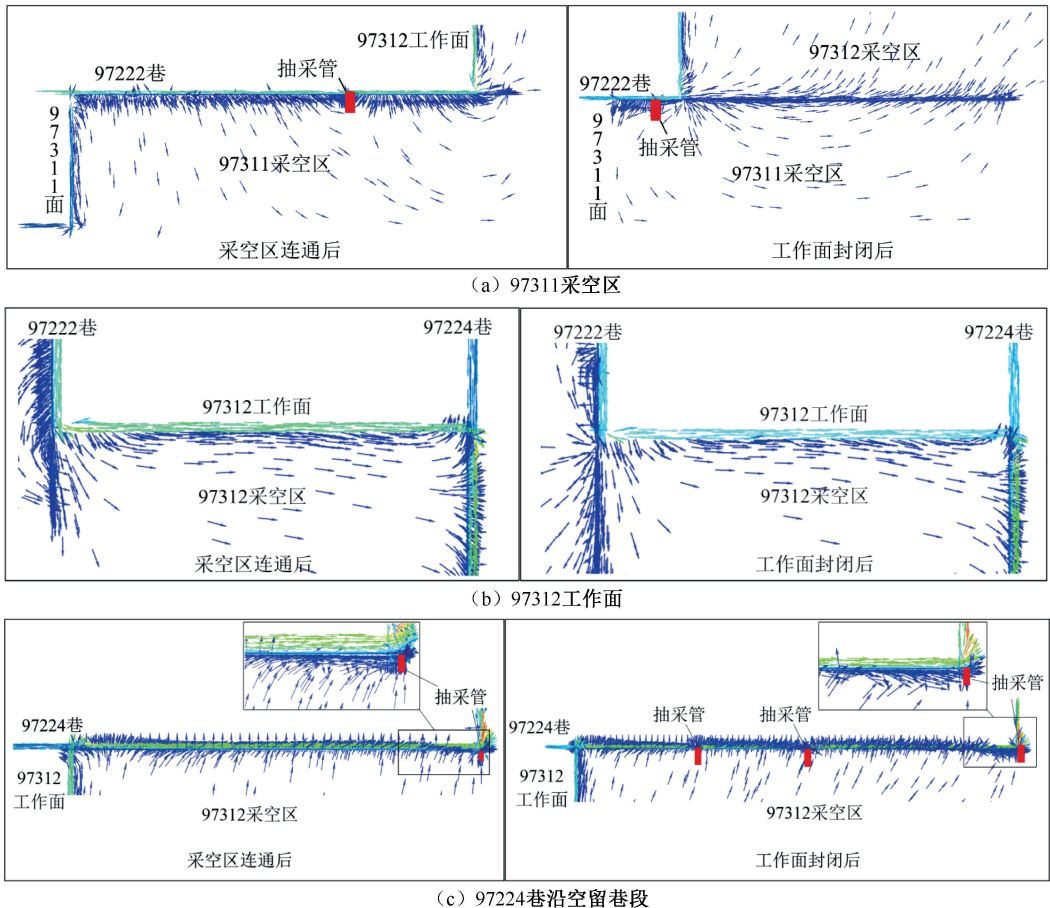


图 5 采空区连通后、97311 工作面封闭后采空区漏风流场分布

Fig. 5 Air leakage flow field distribution in goaf after goaf connected and 97311 working face closed

作面进风隅角向采空区深部运移最终到达 97224 巷沿空留巷段;另一条受 97312 工作面进风隅角涡流影响,部分漏风流回到工作面内,或在采空区内沿工作面方向运移。在靠近工作面回风隅角处,受高位钻孔抽采负压影响,部分风流由工作面进入到采空区内形成正压漏风,并在回风隅角处回到工作面内(负压漏风)。97312 工作面沿风流方向漏风类型依次为正压—负压—正压—负压 4 段。由图 4 可知:采空区连通前 97224 巷沿空留巷段主要为负压漏风,97312 采空区内漏风流经挡矸墙裂隙进入 97224 巷内;在靠近巷尾位置距离 97312 工作面 293 m 后,受瓦斯抽采负压影响,97224 巷内部分风流进入到 97312 采空区内形成正压漏风。

2) 采空区连通后漏风场分布。由图 5b 看出,与采空区连通前相同,97312 工作面沿风流方向依次形成正压—负压—正压—负压 4 段漏风区域。由图 5c 看出,采空区连通后,97224 巷沿空留巷段漏风特性与连通前一致,在靠近巷尾位置距离 97312 工作面 338 m 后,97224 巷形成正压漏风。采空区连通后,97311 采空区与 97312 采空区连通段走向长 40 m,在连通段新增 1 条漏风路径。采空区连通段,漏风流先自 97312 采空区向 97311 采空区运移;随后漏风流又由 97311 采空区回到 97312 采空区。

3) 97311 工作面封闭后漏风场分布。由图 5b 看出,与前 2 个阶段相同,97312 工作面沿风流方向依次形成正压—负压—正压—负压 4 段漏风区域。由图 5c 看出,97311 工作面封闭后,97224 巷沿空留巷段除 220 和 420 m 处抽采管附近和 720 ~ 800 m 巷尾范围为正压漏风外,其余区域均为负压漏风。97311 工作面封闭后,采空区连通段走向长 470 m。在距离工作面 0~130 m 范围内,漏风流自 97312 采空区向 97311 采空区运移;随后连通段大部分漏风由 97311 采空区向 97312 采空区运移。

4 采空区瓦斯运移特征

利用 CFD 软件模拟采空区瓦斯体积分数分布特征,并与现场实测数据对比,见表 4。结果表明:采空区瓦斯体积分数分布模拟结果可以有效反映巷道与工作面内瓦斯体积分数分布特征,因此,将以此为基础开展后续研究。不同时期采空区及巷道内瓦斯体积分数分布如图 6—图 9 所示(图 7—图 9 中瓦斯体积分数监测线设置在距离顶板 0.1 m 处、距离采空区 0.2 m 处位置)。可以看出,不同时期瓦斯

分布整体类似,但局部有所不同。

表 4 瓦斯体积分数实测与模拟结果对比

Table 4 Comparison of methane concentration

measurement and simulation results				%
开采时期	校验点	现场瓦斯体积分数	模拟瓦斯体积分数	误差
采空区连通前	97312 工作面回风隅角	0.22~0.26	0.22~0.27	0.01
	97224 巷尾	0.20	0.19	0.01
采空区连通后	97312 工作面进风隅角	0.06~0.08	0.06~0.07	0.01
	97224 巷胶带机头	0.04	0.04	0
	97224 巷尾	0.20~0.38	0.20~0.34	0.04
97311 工作面封闭后	97224 巷沿空留巷段距离 97312 工作面 300m	0.20	0.25	0.05
	97224 巷沿空留巷段距离 97312 工作面 600m	0.30	0.27	0.03

4.1 采空区连通前瓦斯体积分数分布

由图 6a 看出,采空区连通前,97312 采空区 97222 巷侧瓦斯体积分数处于较低水平,在距离工作面 310 m 处(临近开切眼)瓦斯体积分数最高,为 3.48%。由 97222 巷沿空留巷侧向 97224 巷侧方向,采空区内瓦斯体积分数逐渐上升,并在 97224 巷沿空留巷侧形成明显的高体积分数区域。一方面,这是因为在工作面进风隅角处为正压漏风,漏风流运移方向是由 97222 巷到 97224 巷,采空区内遗煤释放的瓦斯也被带到 97224 巷侧,进而在 97224 巷沿空留巷侧聚集;另一方面,在采空区深部,孔隙率降低,且漏风通道加长,风阻大,漏风量减小,带出的瓦斯也少。在 97224 巷沿空留巷侧中部位置,采空区内瓦斯聚集最为严重,采空区瓦斯体积分数最高为 13.3%,主要原因是在巷尾设置有瓦斯抽采管,靠近巷尾处,受抽采作用瓦斯体积分数逐渐降低,采空区内瓦斯体积分数沿风流方向有所降低,形成了两头低、中间高的瓦斯体积分数分布特征。

由图 7a 看出,97224 巷沿空留巷段内的瓦斯体积分数变化与 97224 巷沿空留巷侧采空区内瓦斯体积分数变化趋势相似,即先增大后减小,最高瓦斯体积分数为 0.56%。由图 7b 看出,97312 工作面瓦斯体积分数在回风隅角处波动较大,在回风隅角处为负压漏风,采空区内瓦斯涌出至工作面导致工作面瓦斯体积分数升高,最高瓦斯体积分数为 0.20%,随后受 97224 新鲜风流的稀释作用,瓦斯体积分数

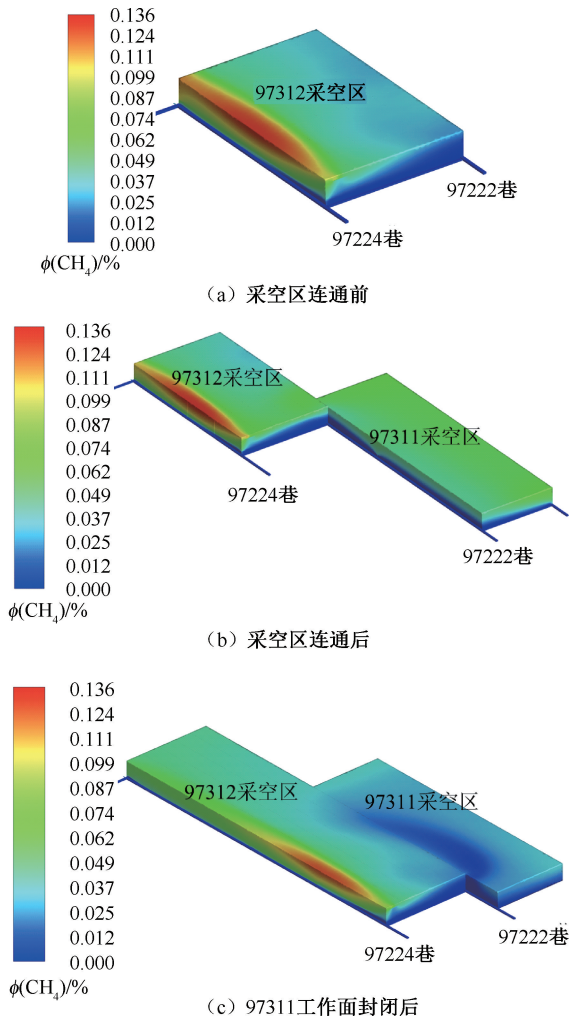


图 6 采空区瓦斯体积分数分布云图

Fig. 6 Cloud map of methane concentration distribution in goaf

又迅速降低。

4.2 采空区连通后瓦斯体积分数分布

由图 6b 看出,采空区连通后,97312 采空区 97222 巷侧瓦斯体积分数在靠近工作面进风隅角区域较高,越往深部瓦斯体积分数有明显降低趋势,在距离工作面 64 m 处瓦斯体积分数最高,达到 6.22%,最高瓦斯体积分数是采空区连通前的 1.79 倍。这是由于 2 采空区连通后,新增了一条瓦斯运移通道,漏风流携带 97311 采空区内瓦斯进入到 97312 采空区,导致 97312 采空区内瓦斯体积分数升高。还可看出,97224 巷沿空留巷侧瓦斯采空区最高瓦斯体积分数为 13.6%,比采空区连通前最高瓦斯体积分数略有增加,瓦斯总体分布特征基本一致。

由图 8 看出,97312 工作面与 97224 巷沿空留巷段瓦斯体积分数变化趋势与采空区连通前基本一

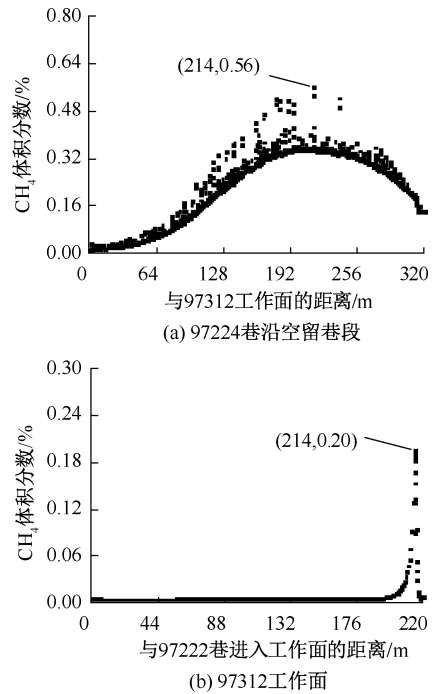


图 7 采空区连通前工作面及巷道瓦斯体积分数分布
Fig. 7 Methane concentration distribution of working face and roadways before connecting goaf

致。由于采空区连通后 97311 采空区漏风流进入到 97312 采空区内导致的 97312 采空区 97222 巷侧瓦斯体积分数升高进而导致了 97312 工作面瓦斯体积分数的升高,沿空留巷段最高瓦斯体积分数为 0.75%,工作面最高瓦斯体积分数为 0.29%。此外,随着工作面推进,采空区内遗煤增多,瓦斯释放量增大,这也是导致 97224 巷沿空留巷段内瓦斯体积分数相对采空区连通前增大的原因。显然,沿空留巷巷道比采煤工作面瓦斯超限风险更大。

4.3 97311 工作面封闭后瓦斯体积分数分布

由图 6c 看出,97311 工作面封闭后,97312 采空区与 97222 巷侧瓦斯体积分数随采空区深度增大呈先升后降再升高的变化趋势,整体出现 2 个瓦斯体积分峰值,第 1 个峰值在距离工作面 107 m 处,瓦斯体积分数为 2.78%,整个连通段瓦斯体积分数较采空区连通后明显降低;第 2 个峰值出现在距离工作面 800 m 处,即开切眼处,瓦斯体积分数达到 5.03%,最高瓦斯体积分数是采空区连通前的 1.45 倍,采空区连通后的 0.81 倍。根据 3.3 节分析可知:这是因为随着 2 采空区连通范围的增大,由 97312 工作面进风隅角进入到 97311 采空区的漏风范围扩大(图 5b),97311 采空区漏风流携带瓦斯进一步向采空区深部运移,从而导致进风隅角处采空区瓦斯体积分数下降。由图 6c 还可看出,97224 巷

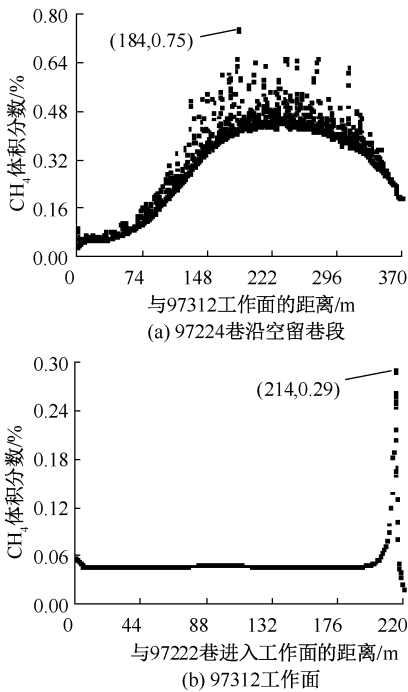


图8 采空区连通后工作面及巷道瓦斯体积分数分布
Fig. 8 Methane concentration distribution of working face and roadways after goaf connected

沿空留巷侧采空区瓦斯最高体积分数为 12.7%，比采空区连通后降低 0.9%。由图 9a 可看出，由于在 97224 巷沿空留巷段距离工作面 220、420 m 处增设了瓦斯抽采管进行采空区瓦斯抽采，97224 巷沿空留巷段瓦斯体积分数在瓦斯抽采处有明显下降，尽管风流经过巷道内抽采管位置后瓦斯体积分数又逐渐上升，但最高瓦斯体积分数仅为 0.57%，较采空区连通后最高瓦斯体积分数 0.75% 明显要低。由图 9b 看出，97312 工作面瓦斯体积分数分布特征与 2 采空区连通后基本一致，工作面最高瓦斯体积分数为 0.10%，也较采空区连通后最高瓦斯体积分数 0.29% 明显要低。

5 讨论

综上所述，97312 工作面回采过程中，97222 巷侧 97312 采空区瓦斯体积分数分布受相邻采空区连通状态（连通范围）影响较大，实际上仍受漏风流控制。分析采空区流场可知：采空区连通前进风隅角处一部分漏风由 97312 采空区 97222 巷侧进入到 97312 采空区深部，另一部分则会回流到 97312 工作面，对工作面内瓦斯体积分数分布造成直接影响；采空区连通后，97311 采空区漏风流携带瓦斯经连通段进入到 97312 采空区，导致 97312 采空区、97312 工作面及 97224 巷沿空留巷段瓦斯不同程度

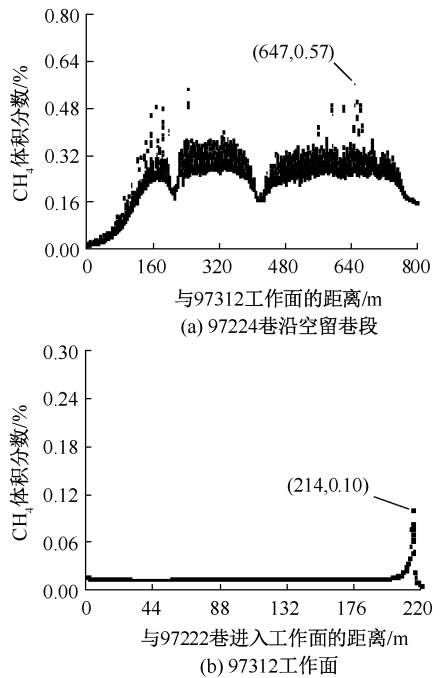


图9 97311 工作面封闭后工作面及巷道瓦斯体积分数分布
Fig. 9 Methane concentration distribution of working face and roadways after 97311 working face closed

升高，导致工作面及巷道瓦斯超限风险增大；97311 工作面封闭后，随着连通范围的扩大，采空区连通段漏风流发生改变，同时得益于采空区瓦斯抽采措施的加强，有效降低 97224 巷沿空留巷段瓦斯体积分数。在无煤柱工作面实际生产中，需要注意与相邻采空区连通状态，预防工作面瓦斯超限。尤其是作为回风巷的沿空留巷巷道主要为负压漏风，易受采空区瓦斯涌出影响，应加强沿空留巷巷道漏风及瓦斯治理，避免巷道内瓦斯超限。

6 结论

1) 综合 SF₆ 示踪气体现场实测和数值模拟结果，97312 工作面沿风流方向依次形成正压—负压—正压—负压 4 段漏风类型；主进风巷 97222 巷为正压漏风；回风巷 97224 巷沿空留巷段主要为负压漏风，但在抽采管附近区域及巷道变形严重区域易形成正压漏风。

2) 相对于采空区连通前，采空区连通后新增了 1 条漏风路径，97311 采空区瓦斯经连通段向 97312 采空区内运移，导致 97312 采空区、97312 工作面及 97224 巷沿空留巷段瓦斯体积分数不同程度升高，沿空留巷段存在较大瓦斯超限风险；97311 工作面封闭后，采空区连通段靠近 97312 工作面处向

97311 采空区的漏风范围增大,瓦斯体积分数降低。

3) 与相邻采空区连通状态对采空区内部漏风流场及瓦斯运移均有影响,在瓦斯治理时需要注意

与相邻采空区连通状态,并加强对沿空留巷段漏风和瓦斯治理,通过采取埋管瓦斯抽采措施,能够有效控制沿空留巷巷道瓦斯体积分数。

参 考 文 献

- [1] 何满潮,马新根,牛福龙,等. 中厚煤层复合顶板快速无煤柱自成巷适应性研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2 641-2 654.
HE Manchao, MA Xin'gen, NIU Fulong, et al. Adaptability research and application of rapid gob-side entry retaining formed by roof cutting and pressure releasing with composite roof and medium thick coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(12): 2 641-2 654.
- [2] 杨红运,刘延保,李勇,等. 近距离煤层群切顶留巷覆岩应力及变形响应研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(1): 8-13, 19.
YANG Hongyun, LIU Yanbao, LI Yong, et al. Study on strata stress and deformation response of contiguous seams under cutting roof for entry retaining [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(1): 8-13, 19.
- [3] 闫肃. 深部厚硬顶板厚煤层切顶成巷综采工作面采空区漏风规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
YAN Su. Research on the law of air leakage in the goaf of fully mechanized coal mining face in deep thick hard roof thick coal seam[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.
- [4] 王琰,周建,王元. 高地温综放工作面采空区漏风规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(增 2): 155-158.
WANG Yan, ZHOU Jian, WANG Yuan. Study on air leakage law of goaf in fully mechanized top coal caving face with high ground temperature[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S2): 155-158.
- [5] 赵文彬,刘方顺,石新岩,等. 放顶煤工作面立体自燃带动态变化特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(3): 65-74.
ZHAO Wenbin, LIU Fangshun, SHI Xinyan, et al. Research on dynamic change characteristics of three-dimensional spontaneous combustion zone in caving coal face[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(3): 65-74.
- [6] 王炯,刘鹏,姜健,等. 切顶卸压沿空留巷回采工作面 Y 型通风漏风规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 625-633.
WANG Jiong, LIU Peng, JIANG Jian, et al. Y-shaped ventilation air leakage law of working face of gob-side entry retaining by cutting roof to release pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(3): 625-633.
- [7] 杜云飞. 切顶卸压留巷 Y 型通风模式下采空区漏风特性研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2018.
DU Yunfei. Study on the characteristics of air leakage in the goaf under a Y type ventilation system using cutting roof and release pressure method mining[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018.
- [8] LI Tengting, WU Bing, LEI Baiwei, et al. Study on air leakage and gas distribution in goaf of Y-type ventilation system[J]. Energy Sources Part A Recovery Utilization and Environmental Effects, 2020, 46(1): 8 632-8 645.
- [9] 李艳昌,靖泽浩,费进章. 切顶卸压沿空留巷“Y”型通风模式下采空区漏风规律研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 184-189.
LI Yanchang, JING Zehao, JIA Jinzhang. Study on the air leakage law of goaf under the "Y" ventilation mode of gob-side entry retaining with roof cutting and pressure relief[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(3): 184-189.
- [10] ZHOU Xihua, JING Zehao, LI Yanchao. Research on controlling gas overrun in a working face based on gob-side entry retaining by utilizing ventilation type "Y"[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): DOI:10. 1038/s41598-023-36464-y.
- [11] MT/T 845—1999, 煤矿巷道用 SF₆ 示踪气体检测漏风技术规范[S].
MT/T 845-1999, Technical specification of leakage detection with SF₆ tracer gas in roadways of coal mines[S].
- [12] 杨明,高建良,冯普金. U 型和 Y 型通风采空区瓦斯分布数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5): 227-230.
YANG Ming, GAO Jianliang, FENG Pujin. Numerical simulation of gas distribution in goaf with U-type and Y-type ventilation[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(5): 227-230.
- [13] 陶远,秦汝祥,庞文华. U 型综采工作面采空区流场数值模拟[J]. 煤矿安全, 2014, 45(1): 186-188, 191.

- TAO Yuan, QIN Ruxiang, PANG Wenhua. Numerical simulation of goaf flow field for U-type fully mechanized working face[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(1): 186-188,191.
- [14] 陈向军, 刘金钊, 司朝霞, 等. 切顶卸压留巷开采模式下工作面及采空区内风流运移特性[J]. 河南理工大学学报:自然科学版, 2020, 39(6): 1-9.
- CHEN Xiangjun, LIU Jinzhao, SI Zhaoxia, et al. Characteristics of air flow in working face and goaf under the mining mode of pressure relief by roof cutting of retaining gateway[J]. Journal of Henan Polytechnic University :Natural Science, 2020, 39(6): 1-9.
- [15] 王春霞, 艾德春, 杨付领, 等. 风帘对采空区漏风及工作面瓦斯分布的影响[J]. 煤炭技术, 2019, 38(6): 101-102.
- WANG Chunxia, AI Dechun, YANG Fuling, et al. Influence of wind curtain on distribution of air leakage in gob and gas in working face[J]. Coal Technology, 2019, 38(6): 101-102.
- [16] 杨永亮. 110 工法工作面采空区漏风及煤自燃与瓦斯复合灾害研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
- YANG Yongliang. Study on air leakage and coal spontaneous combustion and gas compound disaster in the mining area of 110 working face[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023.
- [17] 刘宇. 采空区瓦斯与自燃灾害关联 3D 数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
- LIU Yu. Three-dimensional numerical simulation research on correlation of gas and spontaneous combustion disaster in goaf[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2014.
- [18] CARMAN P C. Permeability of saturated sands, soils and clays[J]. The Journal of Agricultural Science, 1939, 29(2): 263-273.
- [19] 高光超, 李宗翔, 张春, 等. 基于三维“O”型圈的采空区多场分布特征数值模[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(3): 931-936.
- GAO Guangchao, LI Zongxiang, ZHANG Chun. Numerical simulation for multi-field distribution characteristic features of the goaf based on 3D "O" type circle[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(3): 931-936.
- [20] 国家安全监管总局, 国家煤炭安监局, 国家能源局, 等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[L]. 2017-05-17.

作者简介: 张遵国 (1986—),男,重庆人,博士,副教授,主要从事矿井灾害防治和 CO₂ 地质封存方面的研究。E-mail:zhang_zung@163.com。