

中文引用格式:刘冰,郑霞文,罗贞焱,等. 浅埋煤层采空区漏风量主控因素探讨[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(8): 139-147.

英文引用格式:LIU Bing, ZHENG Xiawen, LUO Zhenyan, et al. Discussion on main controlling factors of air leakage in shallow coal seam goaf [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8): 139-147.

浅埋煤层采空区漏风量主控因素探讨^{*}

刘冰¹讲师, 郑霞文¹, 罗贞焱²讲师, 唐超^{**3}讲师, 张丽敏³副教授

(1 湖南工商大学 前沿交叉学院, 湖南 长沙 410205; 2 湖南工商大学 计算机学院, 湖南 长沙 410205; 3 湖南工商大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410205)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.1049

基金项目:国家自然科学基金资助(52304286);湖南省教育厅青年项目(22B0639)。

【摘要】 为深入分析浅埋煤层采空区漏风特征,选取采空区上覆岩层裂隙平均长度、上覆岩层裂隙平均宽度、上覆岩层孔隙率、上覆岩层厚度及井上下压力差等5个因素建立浅埋煤层采空区漏风影响指标体系,联合优势关系粗糙集和响应曲面法,构建采空区漏风特征及其因子作用分析模型,并以煤矿实例开展实证分析生成采空区漏风偏好类规则,提取出偏好类特征;通过3因素3水平响应曲面法,对浅埋煤层采空区漏风量进行回归函数拟合。结果表明:上覆岩层孔隙率、上覆岩层厚度及井上下压力差等3项指标为采空区漏风量主要控制因素,单因子的 F 值为96.06~226.82;交互因子作用中“上覆岩层孔隙率及上覆岩层厚度交互作用”与“上覆岩层孔隙率与井上下压力差交互作用”的 F 值分别为62.34和24.66。与单因子相比,在多因子交互作用中,上覆岩层孔隙率和上覆岩层厚度的交互作用对采空区漏风影响显著。因此,在进行浅埋煤层采空区漏风分析及防范防治时,不仅要重视单个因素指标的作用,还应特别关注对漏风有重要影响的因子交互作用。

【关键词】 浅埋煤层; 采空区; 漏风特征; 因子作用; 粗糙集; 响应曲面法

Discussion on main controlling factors of air leakage in shallow coal seam goaf

LIU Bing¹, ZHENG Xiawen¹, LUO Zhenyan², TANG Chao³, ZHANG Limin³

(1 School of Advanced Interdisciplinary Studies, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China; 2 School of Computer Science, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China; 3 School of Resource & Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha Hunan 410205, China)

Abstract: In order to conduct a comprehensive analysis of the air leakage characteristics in the goaf of shallow coal seams, five factors were selected, including the average length and width of overlying rock fractures, the porosity and thickness of overlying rock fractures, and the pressure difference above and below the well, to establish an index system for the impact of air leakage in the goaf of shallow coal seams. The dominance-based rough set and response surface method were combined to construct an analysis model for the air leakage characteristics and their factor effects in the goaf. Taking a coal mine as an example,

* 文章编号:1003-3033(2025)08-0139-09; 收稿日期:2024-12-29; 修稿日期:2025-05-06

** 通信作者:唐超(1985—),女,湖南永州人,博士,讲师,主要从事环境与健康、矿山安全管理等方面的研究。E-mail: akir0304@sina.cn。

empirical analysis was conducted to generate preference class rules for air leakage in the goaf and extract preference class features. Using the 3-factor 3-level response surface method, regression function fitting was performed on the air leakage volume in the goaf of shallow buried coal seams. The results indicate that the porosity of overlying rock layers, thickness of overlying rock layers, and pressure difference above and below the well are the core influencing factors of air leakage in goaf, with a single factor F-value of 96.06–226.82. The F values for the interaction factors of "interaction between overlying rock porosity and overlying rock thickness" and "interaction between overlying rock porosity and wellbore pressure difference" are 62.34 and 24.66, respectively. Compared with a single factor, in the interaction of multiple factors, the interaction between the porosity and thickness of overlying rock layers has a significant impact on air leakage in goaf. Therefore, when conducting analysis and prevention of air leakage in shallow coal seam goaf, it is important to pay attention to the role of individual factor indicators, as well as the interaction of factors that have a significant impact on air leakage.

Keywords: shallow buried coal seam; goaf; air leakage characteristics; factor effect; rough set; response surface method

0 引言

由于离表土层及全、强风化层较近,加之采矿活动的动力干扰,浅埋煤层的采空区顶板围岩裂隙发育,浅埋煤层采空区漏风较多,不仅会影响煤矿井下通风效果,而且会导致外部持续向采空区煤炭供氧和蓄热,从而引发煤炭自燃,严重威胁煤矿安全生产^[1-2]。鉴于浅埋煤层采空区漏风对于煤矿开采有严重不利影响,需要及早分析和防范。

目前,学者们研究了浅埋煤层采空区漏风,张风林^[3]以示踪气体为载体和手段,检测工作面漏风和漏风量;李世雄等^[4]通过示踪气体,得到浅埋藏工作面漏风特征,并通过堵漏技术措施对比分析前后漏风,验证工作面堵漏效果;李鹏等^[5]在建立采空区三维渗透率分布模型的基础上,数值模拟压入式通风工作面采空区漏风规律;宋博等^[6]利用流体力学模拟软件分析不同漏风源采空区自燃“三带”分布特征;杨胜强等^[7]通过对煤矿工作面采空区自燃“三带”现场温度和气样观测,利用 FLUENT 软件数值模拟采空区漏风流场,以掌握采空区自燃“三带”分布及其自然发火规律;张杰等^[8]还原采煤工作面开采过程中的裂隙发展,分析和探究煤层开采过程中覆岩导气裂隙发育及漏风特征。

现有研究各因子对浅埋煤层采空区漏风影响仅局限于单独分析,可能导致浅埋煤层采空区漏风量化分析与实际结果存在误差。由于采空区漏风的影响边界、影响层面及影响逻辑存在紧密联系,浅埋煤层采空区漏风可能受某些因子的共同作用即交互作用,如采空区上覆岩层孔隙率和上覆岩层厚度分别

形成漏风通道的空间、面积及漏风通道的长度,其共同组成采空区漏风通道的空间路径,进而可能对浅埋煤层采空区漏风产生共同的交互影响。

因此,拟以优势关系粗糙集理论和响应曲面法联合,分析浅埋煤层采空区漏风特征和影响因子对采空区漏风的作用^[9-10],探究采空区漏风与影响因子之间的内在联系,以期为浅埋煤层采空区漏风的防治提供一定的参考。

1 工程背景及采空区漏风影响指标体系

1.1 工程背景

山西大同某煤矿主要开采不粘煤,该煤层大部分为缓倾斜煤层,煤层埋藏深度为 70~180 m,平均埋藏深度约 140 m。经多年开采,目前,矿山形成众多采空区,各采空区上覆岩层以砂岩层和土层为主,空区顶板裂隙呈 X 形,为构造型密闭裂隙,裂隙间距普遍为 0.6~0.9 m,较为发育。煤矿采用负压通风,由于部分采空区上覆岩层裂隙孔隙较多,孔隙率较大(最高近 80%),为空气流通提供可能通道,同时,煤层采动易引起上覆岩土层塌陷变形,且采空区上部下部之间存在井上下压力差(2~5 kPa),造成采空区漏风,存在遗煤自燃风险。

1.2 采空区漏风影响指标体系

整体上,浅埋煤层采空区漏风只受漏风通道与采空区内外压力差的影响。漏风通道和采空区的内外压力差由多种因素影响与决定,根据文献[11-13],采空区漏风的主要影响因素有采空区上覆岩

层裂隙的平均长度、平均宽度、上覆岩层孔隙率、上覆岩层厚度及井上下压力差等。其中,裂隙的平均长度和裂隙的平均宽度决定了浅埋煤层漏风通道的断面形状和断面周长;上覆岩层孔隙率与漏风通道的体积和面积关系密切;上覆岩层厚度直接决定了漏风通道的长度,这些都对采空区漏风压力差与漏风量之间的对应关系有重要影响,故以上述因素作为浅埋煤层采空区漏风的主要影响因素,建立浅埋煤层采空区漏风影响指标体系,如图 1 所示。

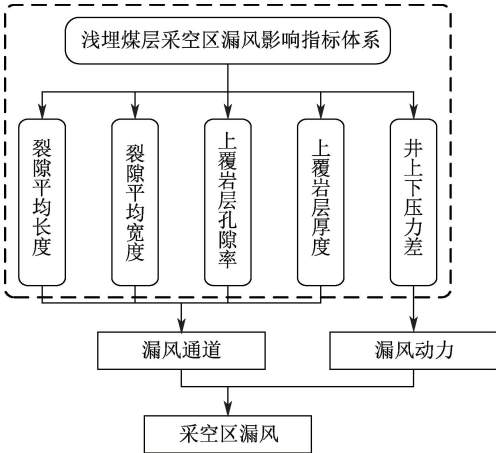


图 1 浅埋煤层采空区漏风影响指标体系

Fig. 1 Index system of air leakage impact in shallow buried coal seam goaf

2 分析理论基础

2.1 优势关系粗糙集理论

相较于传统的粗糙集理论,优势关系粗糙集理论可用“优势关系”来代替“不可分辨关系”的粗糙集理论^[14]。采用优势关系粗糙集理论分析采空区漏风特征时,能够对条件属性进行属性约简,从而简化系统特征分析时的复杂性^[15]。优势关系粗糙集理论生成的规则集为偏好类规则集,以优势关系粗糙集分析浅埋煤层采空区漏风特征有以下步骤^[16]：
①知识系统建立。以浅埋煤层采空区漏风影响因素实际值作为条件属性,以实际漏风量作为决策属性,构建漏风特征分析知识系统。
②数据离散。知识系统各属性从量化值到定性评价需要借助于数据离散。
③约简搜寻。对于偏好决策表中的条件属性和决策属性,根据偏好决策类划分论域,得到决策类并集。
④偏好类规则生成。以约简后的属性生成至少类偏好规则集和至多类偏好规则集。
⑤特征提取及应用。将具备一定支持数的规则提取为

特征。

2.2 响应曲面法原理

以多个浅埋煤层采空区漏风核心影响指标(最优约简)和对应的采空区漏风量结果,按照响应曲面法中效应面法(Box-Behnken)的因素水平设计对应拟合浅埋煤层采空区漏风试验方案^[17]。其以核心影响指标为多变量,以漏风量为因变量拟合回归方程,分析找到整个系统或局势中对应于漏风量极值的指标组合。浅埋煤层采空区漏风特征和影响因子交互作用影响建模流程如图 2 所示。

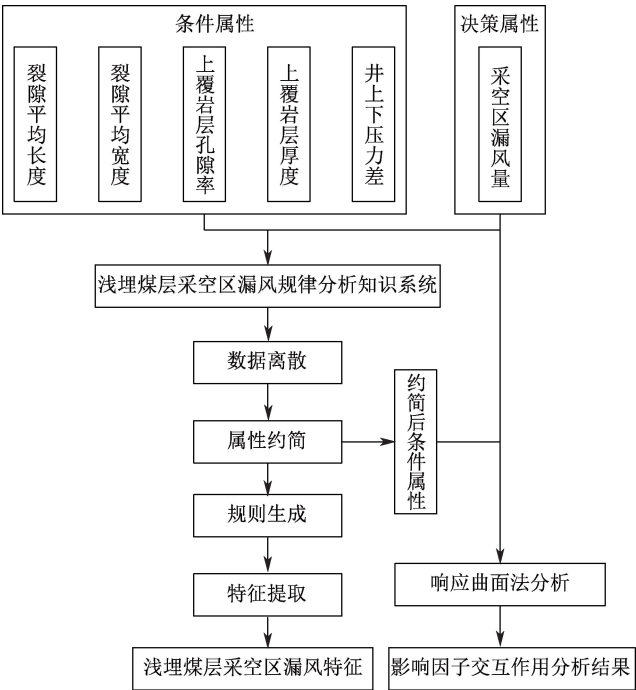


图 2 采空区漏风特征和影响因子交互作用影响建模流程

Fig. 2 Modeling process influenced by interaction between air leakage characteristics and influencing factors in goaf

3 采空区漏风特征及因子作用分析

3.1 采空区漏风特征分析

3.1.1 知识系统构建

按照矿区平面上均匀分布、垂直方向上各中段平均抽取的原则,选择若干采空区作为样本采空区,根据对各采空区顶板裂隙的观察,以及采空区顶板、周边及内部的监测和计算,收集并统计得到某煤矿井下具有代表性的采空区漏风影响指标信息和漏风量,构建浅埋煤层采空区漏风特征分析知识系统,见表 1。

表 1 采空区漏风特征分析知识系统

Table 1 Knowledge system for analyzing air leakage characteristics in goaf

采空区编号	条件属性					决策属性
	裂隙长度/m	裂隙宽度/m	上覆岩层孔隙率/%	上覆岩层厚度/m	井上下压力差/kPa	采空区漏风量/(m ³ ·s ⁻¹)
1	3.4	0.64	30	138	3.85	0.073
2	0.4	0.37	42	141	2.49	0.036
3	6.2	0.07	61	82	4.25	3.29
4	2.9	0.55	22	103	3.29	0.37
5	0.9	0.18	51	89	4.33	1.26
6	4.4	0.51	36	128	2.91	0.079
7	7.2	0.09	43	99	4.42	1.55
8	0.2	0.43	72	117	4.39	2.29
9	4.3	0.08	57	102	2.57	0.74
10	6.9	0.73	39	122	3.81	0.092
11	5.7	0.38	48	131	3.18	0.88
12	1.9	0.05	65	87	3.54	2.74
13	0.7	0.68	43	93	3.20	0.92
14	7.3	0.19	63	109	4.72	3.02
15	3.8	0.47	47	144	3.77	0.16
16	0.7	0.09	78	91	3.12	2.81
17	5.2	0.62	35	127	2.73	0.049
18	0.5	0.32	68	91	3.83	1.92
19	5.8	0.06	28	113	2.86	0.082

注:裂隙长度和裂隙宽度均为该采空区统计的算数平均值。

3.1.2 数据离散

对表 1 中的各属性进行数据离散,表 1 中,裂隙长度为 0.2~7.3 m;裂隙宽度为 0.05~0.73 m;上覆岩层孔隙率为 22%~78%;上覆岩层厚度为 82~144 m;井上下压力差为 2.49~4.72 kPa。参考文献[18~19],确定各属性数据离散原则如下:

- 1) 裂隙长度离散。[0,1.0)为短;[1.0,5.0)为较长;[5.0,+∞)为长。
- 2) 裂隙宽度离散。[0,0.1)为窄;[0.1,0.5)为较宽;[0.5,+∞)为宽。
- 3) 上覆岩层孔隙率离散。[20,40)为小;[40,60)为中;[60,80)为大。
- 4) 上覆岩层厚度。[0,100)为较薄;[100,120)为中;[120,+∞)为厚。
- 5) 井上下压力差。[2,3)为小;[3,4)为中;[4,5)为大。
- 6) 采空区漏风量。[0,0.1)为小;[0.1,1.0)为中;[1.0,+∞)为大。
- 7) 离散后的浅埋煤层采空区漏风特征分析知

识系统评价决策表见表 2。

表 2 采空区漏风特征分析知识系统评价决策

Table 2 Evaluation and decision-making table for knowledge system of air leakage characteristics analysis in goaf

采空区编号	条件属性					决策属性
	裂隙长度	裂隙宽度	上覆岩层孔隙率	上覆岩层厚度	井上下压力差	采空区漏风量
1	较长	宽	小	厚	中	小
2	短	较宽	中	厚	小	小
3	长	窄	大	较薄	大	大
4	较长	宽	小	较厚	中	中
5	短	较宽	中	较薄	大	大
6	较长	宽	小	厚	小	小
7	长	窄	中	较薄	大	大
8	短	较宽	大	较厚	大	大
9	较长	窄	中	较厚	小	中
10	长	宽	小	厚	中	小
11	长	较宽	中	厚	中	中
12	较长	窄	大	较薄	中	大
13	短	宽	中	较薄	中	中
14	长	较宽	大	较厚	大	大
15	较长	较宽	中	厚	中	中
16	短	窄	大	较薄	中	大
17	长	宽	小	厚	小	小
18	短	较宽	大	较薄	中	大
19	长	窄	小	较厚	小	小

3.1.3 属性约简

根据表 2,采用具有自组织、自适应和自学习性特征的遗传算法,约简采空区漏风特征分析知识系统的属性。约简后得到 2 个约简集合:{裂隙长度、裂隙宽度、上覆岩层厚度}及{上覆岩层孔隙率、上覆岩层厚度、井上下压力差}。根据约简算法计算出采空区漏风量与各影响指标序列的景气指标相关数值,结果显示,上覆岩层孔隙率和井上下压力差与采空区漏风量的相关系数值为 0.251,远高于其他指标与采空区漏风量的相关系数值,故选择最优约简为{上覆岩层孔隙率、上覆岩层厚度、井上下压力差}。

3.1.4 规则生成和特征分析

为了分析浅埋煤层采空区漏风特征,根据最优约简规则得出的相关影响因子(上覆岩层孔隙率、上覆岩层厚度和井上下压力差),生成向上涵盖的至少类规则集 $D \geq$,见表 3;同时生成向下涵盖的浅埋煤层采空区漏风特征分析的至多类规则集 $D \leq$,见表 4。

表 3 至少类规则集 $D \geq$
Table 3 $D \geq$ decision rule set

至少类规则	支持数
孔隙率 $\geq$ 中;厚度 $\geq$ 较薄;压力差 $\geq$ 大;风量大	3
孔隙率 $\geq$ 大;厚度 $\geq$ 较厚;压力差 $\geq$ 大;风量大	3
孔隙率 $\geq$ 大;厚度 $\geq$ 较薄;压力差 $\geq$ 中;风量=大	4
孔隙率 $\geq$ 小;厚度 $\geq$ 较厚;压力差 $\geq$ 中;风量 $\geq$ 中	2
孔隙率 $\geq$ 中;厚度 $\geq$ 较厚;压力差 $\geq$ 小;风量 $\geq$ 中	2
孔隙率 $\geq$ 中;厚度 $\geq$ 厚;压力差 $\geq$ 中;风量 $\geq$ 中	3
孔隙率 $\leq$ 小;厚度 $\leq$ 厚;压力差 $\leq$ 中;风量=小	4
孔隙率 $\leq$ 中;厚度 $\leq$ 厚;压力差 $\leq$ 小;风量=小	3
孔隙率 $\leq$ 小;厚度 $\leq$ 较厚;压力差 $\leq$ 小;风量=小	3

注:鉴于上覆岩层厚度对采空区漏风量的影响,其偏好关系为厚<较厚<较薄,表 4 同。

表 4 至多类规则集 $D \leq$
Table 4 $D \leq$ decision rule set

至多类规则	支持数
孔隙率 $\geq$ 中;厚度 $\geq$ 较薄;压力差 $\geq$ 大;风量=大	3
孔隙率 $\geq$ 大;厚度 $\geq$ 较厚;压力差 $\geq$ 大;风量=大	3
孔隙率 $\geq$ 大;厚度 $\geq$ 较薄;压力差 $\geq$ 中;风量=大	4
孔隙率 $\leq$ 中;厚度 $\leq$ 较薄;压力差 $\leq$ 中;风量 $\leq$ 中	5
孔隙率 $\leq$ 小;厚度 $\leq$ 厚;压力差 $\leq$ 中;风量=小	4
孔隙率 $\leq$ 中;厚度 $\leq$ 厚;压力差 $\leq$ 小;风量=小	3
孔隙率 $\leq$ 小;厚度 $\leq$ 较厚;压力差 $\leq$ 小;风量=小	3

由表 3 和表 4 可知:19 个样本采空区漏风情况

表 5 试验方案各因子、各水平的实际取值

Table 5 Actual values of each factor and level in experimental scheme

水平	因子理论取值			因子模糊拟合取值		
	A/%	B/m	C/kPa	A/%	B/m	C/kPa
-1	30	90	2.5	28.5~31.5	85.5~94.5	2.375~2.625
0	50	110	3.5	47.5~52.5	104.5~115.5	3.325~3.675
1	70	130	4.5	66.5~73.5	123.5~136.5	4.275~4.725

3.2.2 试验方案拟合

根据表 5 中的各因子、各水平的模糊拟合取值,统计对应的采空区漏风量,得到浅埋煤层采空区漏风响应曲面法试验方案及响应值,见表 6。

表 6 浅埋煤层采空区漏风响应曲面法试验方案及响应值
Table 6 Test scheme and response values of air leakage response surface method in shallow buried coal seam goaf

试验方案编号	试验因子水平			试验对应结果/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) R_1
	A	B	C	
1	0	1	-1	0.036
2	0	0	0	0.92
3	-1	0	1	0.58
4	0	-1	-1	0.74
5	0	0	0	0.91

全部分类正确,未出现规则的二义性或不兼容,分类质量 100%。且绝大多数偏好类规则的支持数均为 3 以上,规则支持数较大,可靠性较高。而利用传统不可分辨关系粗糙集得到的规则,其规则数虽然有 15 条,但仅有 4 条规则数为 2,其余规则数均为 1。由此可见:相较于传统粗糙集,基于优势关系粗糙集不仅能够降低规则分析的复杂性,还可以提高规则的支持数,进而确保规则可靠性^[20]。

根据经验,规则支持数为 3 及以上的规则可视为特征,得到本煤矿浅埋煤层采空区漏风特征的至少类偏好特征有 7 条。在对所选煤矿和相似条件煤矿进行采空区漏风分析时,可以只依据上覆岩层孔隙率、上覆岩层厚度及井上下压力差 3 个影响指标因素生成的 8 条偏好类特征对采空区漏风量进行上向涵盖和下向涵盖分析。

3.2 采空区漏风影响因子作用分析

3.2.1 试验因子和水平设计

根据上述约简得到浅埋煤层采空区漏风的核心影响指标:上覆岩层孔隙率、上覆岩层厚度及井上下压力差作为响应曲面法(效应面法)试验分析因子 A、B 和 C。根据矿山各试验因子的取值范围,采用模糊拟合的方式,以理论取值范围 $\pm 5\%$ 作为拟合试验方案各因子、各水平的实际取值,见表 5。

续表 6

试验方案编号	试验因子水平			试验对应结果/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) R_1
	A	B	C	
6	-1	0	-1	0.082
7	-1	1	0	0.082
8	0	0	0	0.93
9	1	-1	0	2.49
10	1	1	0	0.42
11	0	1	1	0.69
12	1	0	1	2.65
13	1	0	-1	0.85
14	0	-1	1	1.55
15	0	0	0	0.92
16	-1	-1	0	0.082
17	0	0	0	0.91

3.2.3 试验结果分析

采用试验设计专家(Design-Expert)软件方差,分析表6中的浅埋煤层采空区漏风量结果,得到浅埋煤层采空区漏风量 Y_1 与自变量上覆岩层孔隙率 X_1 、上覆岩层厚度 X_2 及井上下压力差 X_3 的回归解析式,浅埋煤层采空区漏风量方差分析结果见表7,表7中,分项 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2^2 的显著性系数 P 值低于0.05,表明以上单因子和双因子交互作用对浅埋煤层采空区漏风量影响较为显著。分析其响应曲面图,得到A、B、C的因子作用对浅埋煤层采空区漏风量影响的响应曲面如图3所示,等势线如图4所示。

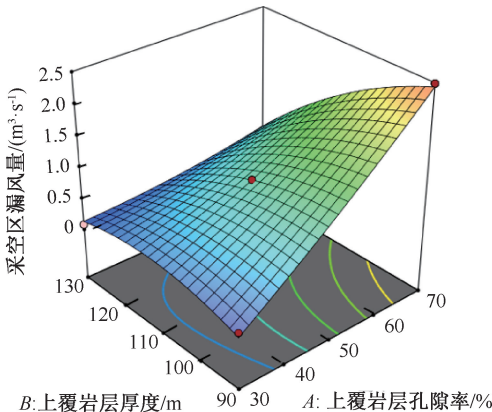
表7 浅埋煤层采空区漏风量方差分析结果

Table 7 Variance analysis results of air leakage in shallow buried coal seam goaf

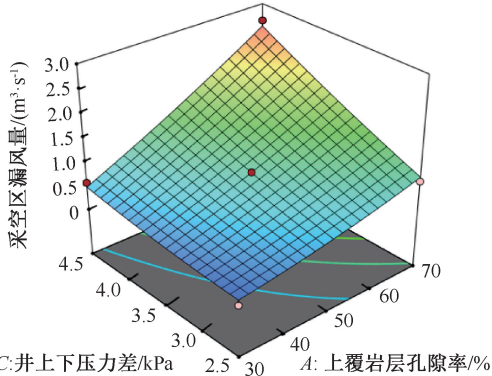
变异来源	分析指标 0			
	平方和	均方	F 值	P 值
回归解析式	9.04	1.00	58.46	<0.000 1
X_1	3.90	3.90	226.82	<0.000 1
X_2	1.65	1.65	96.06	<0.000 1
X_3	1.77	1.77	102.95	<0.000 1
X_1X_2	1.07	1.07	62.34	<0.000 1
X_1X_3	0.423 8	0.423 8	24.66	0.001 6
X_2X_3	0.006 1	0.006 1	0.354 1	0.570 6
X_1^2	0.019 8	0.019 8	1.15	0.319 2
X_2^2	0.200 1	0.200 1	11.64	0.011 3
X_3^2	0.012 3	0.012 3	0.714 5	0.425 9

由表7中可知:单因子中上覆岩层孔隙率 X_1 的 F 值为226.82、上覆岩层厚度 X_2 的 F 值为96.06、井上下压力差 X_3 的 F 值为102.95,而交互因子中上覆岩层孔隙率与上覆岩层厚度交互 X_1X_2 的 F 值为62.34、上覆岩层孔隙率与井上下压力差交互 X_1X_3 的 F 值为24.66、上覆岩层厚度与井上下压力差交互 X_2X_3 的 F 值为0.35。由 F 值的大小可知:上覆岩层孔隙率与上覆岩层厚度交互及上覆岩层孔隙率与井上下压力差交互对浅埋煤层采空区漏风存在与单因子接近的重要作用。由单因子 F 值大小排序可知:因子交互作用对浅埋煤层采空区漏风量影响的重要程度由大到小分别为:上覆岩层孔隙率与上覆岩层厚度交互作用>上覆岩层孔隙率与井上下压力差交互作用>上覆岩层厚度与井上下压力差交互作用。

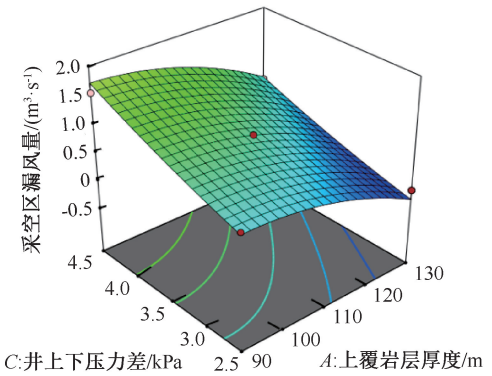
由图3可知:上覆岩层孔隙率和上覆岩层厚度交互作用的响应曲面图不仅坡度陡,曲面还出现复



(a) 上覆岩层孔隙率和上覆岩层厚度与采空区漏风量



(b) 上覆岩层孔隙率和井上下压力差与采空区漏风量



(c) 上覆岩层厚度和井上下压力差与采空区漏风量

图3 因子作用对浅埋煤层采空区漏风量影响的响应曲面

Fig. 3 Response surface of factor effect on air leakage in shallow buried coal seam goaf

杂的多面扭曲;说明这2因子交互作用对采空区漏风量影响程度高且复杂;上覆岩层孔隙率和井上下压力差交互作用的响应曲面图坡度陡而平顺,说明这2因子对采空区漏风量影响程度偏高;上覆岩层厚度和井上下压力差交互作用的响应曲面图坡度则相对较为平缓,平面单向平顺,说明这2因子对采空区漏风量影响相对次要。图4中,上覆岩层孔隙率和上覆岩层厚度的等势线不仅密集且扭曲幅度较

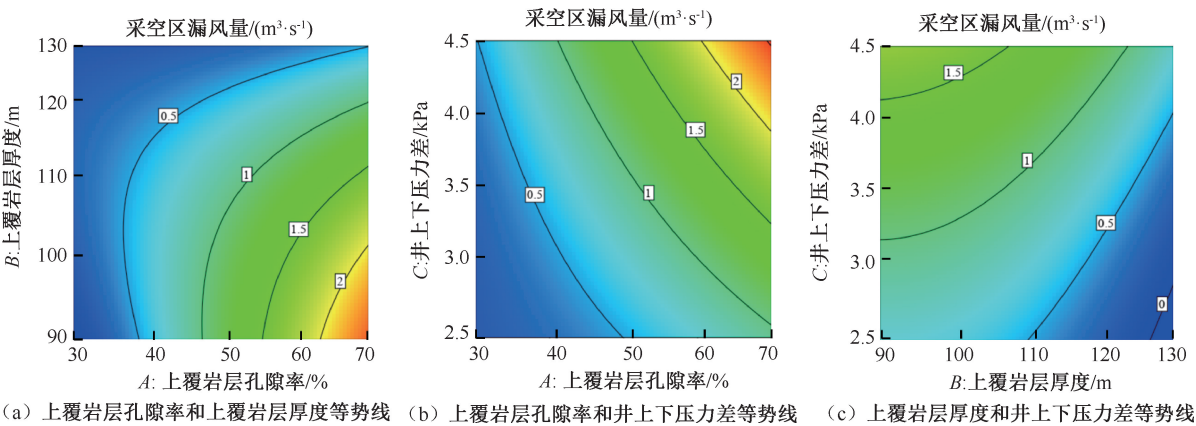


图 4 因子作用对浅埋煤层采空区漏风量影响的等势线

Fig. 4 Equipotential diagram of influence of factor effects on air leakage in shallow buried coal seam goaf

大;上覆岩层孔隙率和井上下压力差的等势线则较为密集,而上覆岩层厚度和井上下压力差的等势线则较为稀疏,进一步证明各单因子和各因子交互作用对浅埋煤层采空区漏风的相对重要关系。

4 结 论

- 1) 经优势关系粗糙集分析,浅埋煤层采空区漏风的主要控制因素为上覆岩层孔隙率、上覆岩层厚度及井上下压力差。此 3 个指标在一定程度上能够降低浅埋煤层采空区漏风分析的复杂性和难度。
- 2) 以最优约简{上覆岩层孔隙率、上覆岩层厚度、井上下压力差}生成 9 条至少类规则和 7 条至多类规则,提取出 7 条至少类特征和 7 条至多类特征,进

而合并成 8 条偏好类特征。相较传统的粗糙集理论,优势关系粗糙集得到的规则支持数多,也更加可靠。

3) 经响应曲面法分析,多因子交互作用具有与单因子对浅埋煤层采空区漏风相近重要的影响或作用,在浅埋煤层采空区漏风分析时不可忽视其影响。单因子对采空区漏风影响排序为:上覆岩层孔隙率>井上下压力差>上覆岩层厚度;在多因子交互作用中,上覆岩层孔隙率和岩层厚度的交互作用对采空区漏风影响显著,而上覆岩层孔隙率与井上下压力差的交互作用对采空区漏风也有较大影响。因此,在进行浅埋煤层采空区漏风分析及防范防治时,不仅要重视单个因素指标的作用,还应特别关注对漏风有重要影响的因子交互作用。

参 考 文 献

[1] 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.
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.

[2] 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.

[3] 张风林. 大采高综放工作面漏风规律研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(8): 148-151.
ZHANG Fenglin. Study on law of air leakage in fully mechanized coal face with large mining height[J]. Coal Technology, 2020, 39(8): 148-151.

[4] 李世雄, 卢斌, 褚廷湘. 浅埋藏工作面漏风特征及堵漏效果检验[J]. 煤炭工程, 2017, 49(10): 91-93.
LI Shixiong, LU Bin, CHU Tingxiang. Air leakage characteristics and the stoppage practice in shallow buried working face[J]. Coal Engineering, 2017, 49(10): 91-93.

[5] 李鹏, 戴广龙, 叶庆树, 等. 压入式通风条件下浅埋煤层工作面采空区漏风规律研究[J]. 煤矿安全, 2019, 50(9): 174-178.
LI Peng, DAI Guanglong, YE Qingshu, et al. Study on air leakage law in gob of shallow buried coal seam under forced ventilation[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(9): 174-178.

- [6] 宋博,王大鹏,李雨成,等. 基于不同漏风源浅埋煤层采空区自燃“三带”分布规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(6): 38-44.
SONG Bo, WANG Dapeng, LI Yucheng, et al. Study on distribution law of spontaneous combustion "three zones" in goaf of shallow-buried coal seam based on different air leakage sources[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(6): 38-44.
- [7] 杨胜强,徐全,黄金,等. 采空区自燃“三带”微循环理论及漏风流场数值模拟. 中国矿业大学学报, 2009, 38(6): 769-773.
YANG Shengqiang, XU Quan, HUANG Jin, et al. The "three zones" microcirculation theory of goaf spontaneous combustion and a numerical simulation of the air leakage flow field[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2009, 38(6): 769-773.
- [8] 张杰,张建辰,刘清洲,等. 浅埋综采工作面覆岩裂隙发育及漏风规律研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(3): 118-123.
ZHANG Jie, ZHANG Jianchen, LIU Qingzhou, et al. Crack development and air leakage law of overburden rock in shallow fully mechanized face[J]. Coal Engineering, 2021, 53(3): 118-123.
- [9] 翁世洲,朱俊,王超,等. 区间粗糙数序信息系统下的优势关系粗糙集模型[J]. 模糊系统与数学, 2021, 35(3): 133-144.
WENG Shizhou, ZHU Jun, WANG Chao, et al. Rough set model of dominance relation under interval rough number order information system[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2021, 35(3): 133-144.
- [10] 赵敏捷,方建军,张铁民,等. 响应曲面法优化某氧化铜矿硫化浮选[J]. 过程工程学报, 2017, 17(3): 532-538.
ZHAO Minjie, FANG Jianjun, ZHANG Tiemin, et al. Optimization of copper oxide by sulphidizing flotation based on response surface methodology[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(3): 532-538.
- [11] 朱兴攀,王洋,任晓伟,等. 不同季节条件下浅埋煤层采空区地表垂直漏风规律研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(10): 104-109.
ZHU Xingpan, WANG Yang, REN Xiaowei, et al. Research on vertical air leakage law of surface in goaf of shallow coal seams under different seasonal conditions[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(10): 104-109.
- [12] 卓辉. 浅埋藏近距离煤层群开采裂隙漏风及煤自然发火规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
ZHUO Hui. Research on the law of fissure air leakage and coal spontaneous combustion in the mining of shallow buried close distance coal seam group[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [13] 刘雷政. 浅埋藏近距离煤层群开采上覆采空区煤自燃危险区域判定[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
LIU Leizheng. Dangerous region judgment of spontaneous combustion in overlying goaf of excavation in shallow depth contiguous seams group[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016.
- [14] 张文修,仇国芳. 基于粗糙集的不确定决策[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 90-99.
ZHANG Wenxiu, QIU Guofang. Based on rough sets of uncertain decision[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 90-99.
- [15] 莫俊文,王锐锐,滕仓国. 高海拔铁路工程施工人员不安全行为评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8): 30-38.
MO Junwen, WANG Ruirui, TENG Cangguo. Assessment of unsafe behavior of construction personnel in high-altitude railway projects[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8): 30-38.
- [16] 王国胤. Rough 集理论与知识获取[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001: 117-138.
WANG Guoyin. Rough sets theory and knowledge acquisition[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 117-138.
- [17] 师中华,王亚楠,陈振,等. 基于响应曲面建模和模糊灰色关联分析的高质高效铣削协同优化研究[J]. 机械设计, 2023, 40(9): 87-93.
SHI Zhonghua, WANG Ya'nan, CHEN Zhen, et al. Research on collaborative optimization of milling for high quality and high efficiency based on response surface modeling and fuzzy gray relational analysis[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(9): 87-93.
- [18] 张立国. 浅埋深近距离易自燃煤层群复合采空区漏风规律研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(增1): 5-13.
ZHANG Ligu. Study on air leakage laws in complex goaf of shallow buried depth and close distance spontaneous combustion coal seams[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(S1): 5-13.
- [19] 杨玉贵,尚润凡,黄炳香,等. 煤铝共采岩层运动与裂隙发育规律的颗粒离散元研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(1): 58-66.
YANG Yugu, SHANG Runpeng, HUANG Bingxiang, et al. Study on the law of overburden rock movement and fissure

development in coal and aluminum co-mining based on particle discrete element method[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(1): 58-66.

[20] 李长明, 赵开功, 张晓蕾, 等. 煤矿智能化项目风险评价云模型及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 168-174.

LI Changming, ZHAO Kaigong, ZHANG Xiaolei, et al. Cloud model for risk evaluation of coal mine intelligent projects and its application[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 168-174.

作者简介: 刘冰 (1987—),男,湖北潜江人,博士,讲师,主要从事矿山安全、工程管理、资源综合利用等方面的研究。E-mail:2758@hutb.edu.cn。



2026 年《中国安全科学学报》征订启事

Ei Compendex 收录期刊
中国科技期刊卓越行动计划入选期刊
安全科学领域高质量科技期刊分级目录 T1 级
美国化学文摘社 (CAS) 数据库收录期刊

Scopus 数据库收录期刊

CSCD 核心期刊
全国中文核心期刊
中国科技核心期刊
WJCI 报告 Q2 区期刊

学术性 权威性 应用性

立足安全科技前沿

信息性 国内外公开发行业

服务国家重大需求

本刊竭诚为从事安全生产、应急管理、职业安全与卫生、防灾防损、个体防护等方面的专业人员,为注册安全工程师、科研人员、管理干部、安技人员,为高等院校有关师生,为与安全科学技术有关的专家、学者以及职业安全健康中介机构的评价师等服务。刊登主要内容有:

1) 安全科学基础理论和学科建设探讨,国内外安全科学进展及评述,新学科创建及理论。

2) 防尘、防毒、噪声与振动控制、辐射防护、个体防护、锅炉与压力容器、防火防爆、矿业工程、机电等安全工程与职业卫生工程方面的新见解、新理论、新成果。

3) 矿业、冶金、建筑、交通、石化工业、能源、航空航天工业、江河海运、公路铁路运输、军工及火炸药产业、机械、水利电力、电子信息产业、有害物质储运、保险等领域的安全与卫生工程实践的新见解、新方法、新成果。

4) 安全系统工程、安全人机工程、安全管理科学、安全信息科学、安全人体工程学。

5) 安全经济学、安全教育学、安全心理学、安全生理学、安全思维学、安全行为学、安全风险学。

6) 应急救援、应急管理、防灾减灾、消防安全的理论与实践研究。

7) 安全监察理论及实践,安全伦理学,安全法学,现有安全生产、职业卫生方面的法律、法规、条例及标准研究。

8) 新技术应用在能量转换、交通运输、人为排放物质等领域风险辨识、风险评估、风险控制、风险后的平复等理论和实践,风险中人的作用研究,重大危险源的评估理论及实践。

9) 企业安全生产管理及企业(行业)安全与健康评价理论的探讨及实践,企业安全文化、职业安全健康管理體系等。

10) 安全文化、安全哲学、安全史学、安全社会学的研究与实践。

《中国安全科学学报》(CN 11-2865/X;ISSN 1003-3033;CODEN ZAKXAM),全年 12 期,每月底出刊,大 16 开本,国内每册售价 40.00 元,全年 480.00 元。

【订阅方法】下载征订回执单(见附件),按要求填写清楚后发送至编辑部邮箱。

联系人:秦繁华 电 话:86-10-64464783

电子信箱:csstlp@263.net 网址:www.cssjj.com.cn

【银行汇款】户 名:中国职业安全健康协会

账 号:0200006309026400165

开户行:中国工商银行股份有限公司北京惠新支行