

煤炭地下气化资源条件的模糊层次综合评价

郑超*, 余岚, 张巨峰, 杨峰峰, 雷武林

(陇东学院 能源工程学院, 甘肃 庆阳 745000)

摘要:为了评价宁正矿区九龙川井田主采煤层实施煤炭地下气化的可行性,基于 FAHP 构建煤炭地下气化资源条件评价层次结构模型,建立 4 个一级评价指标和 9 个二级评价指标,采用层次分析法确定各级控制因素的权重,分析发现煤层特征是最关键的指标.根据煤炭地下气化资源条件评价指标隶属函数模糊等级划分情况,对九龙川井田煤层资源条件进行定量分析、赋值并计算隶属矩阵.最后通过权重矩阵与隶属矩阵相乘,根据隶属函数的隶属度最大原则,对比发现煤 6 层实施地下气化的可行性相对最高,煤 8 层最低,为宁正矿区九龙川井田实施煤炭地下气化提供了科学依据.

关键词:煤炭地下气化;资源条件;评价指标;模糊层次分析

中图分类号:TD841

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2019)01-0040-05

Fuzzy Hierarchy Comprehensive Evaluation on Resource Conditions for Underground Coal Gasification

Zheng Chao, Yu Lan, Zhang Jufeng, Yang Fengfeng, Lei Wulin

(School of Energy Engineering, Long Dong University, Qingyang 745000, China)

Abstract: In order to evaluate the feasibility of implementing underground coal gasification in the main coal seam of Jiulongchuan Minefield in Ningzheng Mining Area, this paper, based on FAHP of the hierarchical structure model of underground coal gasification is constructed about resource condition, establishing four first-level evaluation indicators and nine second-level evaluation indicators. The analytic hierarchy process (AHP) determines the weights of the control factors at all levels. It is found that the characteristics of coal and coal seams are the most critical indicators. According to the fuzzy classification of membership function of coal underground gasification resource evaluation index, the coal seam resource conditions of Jiulongchuan Minefield are quantitatively analyzed and assigned, and the membership matrix is calculated. Finally, by multiplying the weight matrix and the membership matrix, according to the principle of membership degree of the membership function, it is found that the feasibility of underground gasification is relatively high for the coal 6 seam, and the lowest coal layer is the coal 8 seam. Thus, the evaluation has provided a scientific basis for the underground coal gasification of the Jiulongchuan minefield in Ningzheng mining area.

Keywords: underground coal gasification; resource condition; evaluation index; fuzzy analytic hierarchy process

煤炭工业经过了 2002~2012 年 10 年的黄金期,如今随着国家能源产业政策调整 and 环境保护的强化,未来传统煤炭开采和利用方式将面临深刻的变革.煤炭地下气化(UCG)作为绿色低碳、安全高效的新型煤炭开发技术,1868 年由德国科学家威廉西门子(William Siemens)开创性的提出,实现了煤炭原位开采和清

收稿日期:2018-12-09

基金项目:陇东学院青年科技创新资助项目(XYZK1611);甘肃省安全生产科技资助项目(GAJ00017)

*通信作者,E-mail:513242367@qq.com

洁低碳利用,彻底颠覆了煤炭开采的传统方式,被誉为第二代采煤方法.谢和平^[1,2]院士等在深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想中提到了煤炭的地下气化,葛世荣^[3]等在深部煤炭化学开采技术中将煤炭地下气化列为3种化学开采方法之一,这充分体现煤炭地下气化在深部煤炭开采中的优越性,为深部煤炭开采提供了一种全新的解决方案.目前国内煤炭地下气化仅初步在残留煤体回收、低阶煤的开采等方面进行工业性试验,并未完全实现规模化开采^[4].若要开展煤炭的地下气化,其关键一步是进行可行性分析,实施煤炭地下气化的影响因素众多,其中资源条件是煤炭地下气化合理性和稳定性的重要因素,煤层赋存是分析煤炭地下气化反应空间的决定性指标^[5,6].因此基于模糊层次综合分析法建立煤炭地下气化资源条件评价是开采煤炭地下气化的前提基础且意义重大.

1 煤炭地下气化资源主控指标

柳迎红^[5,6],王作棠,黄温刚^[7,8],刘淑琴^[9-11],赵岳^[12]等人结合国内外煤炭地下气化项目实施情况和煤气化性能实验从资源、技术、经济、环境、安全和能耗等6方面因素对煤炭地下气化的评价指标进行了分析整理,对部分评价指标进行数值化,为评价煤炭地下气化可行性提供了科学的依据.从资源条件分析地质构造满足中等条件^[12],为防止断层引起气化炉漏气、断层断距不得大于1/2平均煤层厚度^[13].从煤层赋存特征分析,煤层埋深的影响较小、煤层厚度褐煤厚度至少在2.0 m以上,烟煤最小保证0.8 m,并且煤层结构简单为宜,厚煤层夹矸层和煤层厚度之比应小于0.5,单层夹矸层的厚度最大不应超高0.5 m^[14].煤层倾角一般10°~70°均为有利的角度^[12],煤层倾角较大时煤层可保持良好的进风条件和煤气通导条件,燃烧面易于推进、气化的效果更好^[15].从水文地质特征分析,水文地质中等条件以上、正常状态下,褐煤允许进水0.3~1.0 m³/t,烟煤允许进水0.7~1.5 m³/t^[14];顶底板岩性以泥岩和粉砂岩等渗透性差的岩层为主、气化区内煤层与顶、底板岩层的渗透率之比应大于10^[13].从煤岩组分特征分析,半光亮型和亮型煤要比半暗和暗煤型煤更有利煤炭地下气化,煤的元素组成中碳氢应具备合理的比例^[15].煤中水分高将提高氧化剂的供应,降低气化效率和煤气热值,一般小于20%;硫分一般小于6%,灰分小于20%较为经济^[12,16].地下气化适合开采挥发分大于20%的煤层,煤的粘结性和结焦性低,高粘结性和膨胀性的焦煤在气化过程中析出的煤灰导致气流通道不畅^[12],鼓风阻力增加,破坏气化的最佳状态.

2 基于FAHP的层次分析体系

FAHP评价法是一种将模糊综合评价法和层次分析法相结合的评价方法,是一种定性与定量相结合的评价模型,一般是先用层析分析法确定因素集,然后用模糊综合评判确定评判效果.模糊法是在层次法之上,两者相互融合,对评价有着很好的可靠性^[17-20].

2.1 建立评价指标层次体系

通过对研究区资源条件进行系统分析,煤炭地下气化资源因素层次性明显,以煤炭地下气化的资源条件为目标层,通过分解和归类,准则层分为2的层次.首先目标层划分成4个一级指标,分别是地质构造特征(I)、煤层赋存特征(II)、水文地质特征(III)、煤岩煤质特征(IV).其中煤层赋存特征(II)划分成3个二级指标,分别是煤层埋深(II₁)、煤层厚度(II₂)、煤层倾角(II₃).水文地质特征(III)划分成2个二级指标,分别是地下水赋存(III₁)、顶底板岩性(III₂).煤岩煤质特征(IV)划分成3个二级指标,分别是煤岩组分特征(IV₁)、煤的化学性质(IV₂)、煤层工艺性能(IV₃).煤岩组分特征(IV₁)主要包含煤岩组分和煤的元素组成,煤的化学性质(IV₂)主要包含煤层水分、水分、挥发分和硫分,煤层工艺性能(IV₃)主要包含发热量和热值、粘结性、结焦性、煤灰熔性、结渣性等.据此构建了2个层次的评价指标系统,一级和二级评价指标13个,见图1.

2.2 FAHP评级指标的权重系数

根据已构建的评价指标层次体系,通过分析九龙川井田煤炭勘查成果及类比国内外煤炭地下气化试验资料,采用层次分析法确定各级控制因素的权重.首先分析一级指标层4个指标对目标层的重要程度,进行正交对比分析,构建判别矩阵,判别矩阵的特征向量为权重系数,采用特征值进行判别矩阵的一致性检验,得到 C_1 为0.01;查看一致性指标值, $n=4$ 时, R_1 为0.9,则 $C_R=C_1/R_1=0.011<0.1$,因此判别矩阵的结

果可以接受.同理得到二级指标的权重系数,最终将一、二级指标层的权重系数相乘得到的综合权重.通过评价指标权重系数计算,发现对煤炭地下气化影响最关键的指标是煤岩煤质特征(0.385),其次是水文地质特征(0.284),影响力最小的是地质构造特征(0.115),见表 1.

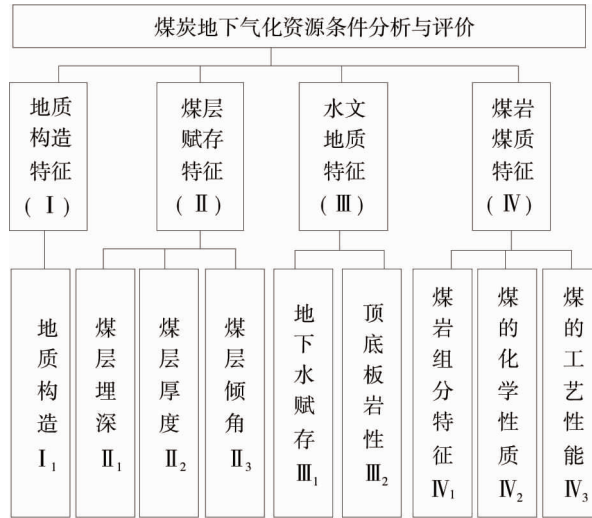


图 1 煤炭地下气化评价指标层次体系

表 1 煤炭地下气化资源条件评价指标权重系数

目标层	一级指标层	权重	二级指标层	权重	综合权重		
煤炭地下 化资源条件	地质构造特征(I)	0.115	地质构造(I ₁)	1.000	0.115		
			煤层埋深(II ₁)	0.273	0.059		
			煤层厚度(II ₂)	0.437	0.094		
	煤层赋存特征(II)	0.216	煤层倾角(II ₃)	0.290	0.063		
			水文地质特征(III)	0.284	地下水赋存(III ₁)	0.541	0.154
					顶底板岩性(III ₂)	0.459	0.130
	煤岩煤质特征(IV)	0.385	煤岩组分特征(IV ₁)	0.264	0.102		
			煤的化学性质(IV ₂)	0.377	0.145		
			煤层工艺性能(IV ₃)	0.359	0.138		

3 构建模糊层次综合体系

3.1 评价指标的隶属函数和模糊等级

为了确定研究区不同煤层实施煤炭地下气化的资源条件综合评价结果,首先构建分级评语集 $V = (V_1, V_2, V_3, \dots, V_n)$, 根据研究区的具体状况将评语集 $V = (V_1, V_2, V_3)$ 划分为可行、基本可行和不可行 3 个等级^[7,8];其次根据煤炭地下气化评价指标特点,选择线性梯形隶属函数 $A(x)$ ^[12].根据各个指标性质转化为效益型、中间型和成本型隶属函数, $A(x)$ 取值均在 0~1 之间,根据隶属函数 $A(x)$ 及控制因素优劣,进行评价指标隶属函数模糊等级划分,其中 r_1, r_2, r_3 为效益型和成本型隶属函数等级值,根据中间型隶属函数特点,增加了 r' 和 r'' 2 个等级值,见表 2.

3.2 研究区的评价指标值

研究区为甘肃宁正矿区九龙川井田,该井田地质构造简单、勘探揭示无明显层间断裂及褶皱发育,也无岩浆活动痕迹.含煤地层为侏罗系中统延安组,含可采煤层 5 层,分别煤 5-1 层、煤 5-2 层、煤 6 层、煤 8-1 层、煤 8 层,其中煤 5-1 层、5-2 层平均厚度在 0.5 m 左右,地下气化可行性低、不参与评价.煤 6 层中有 1 层夹矸、煤 8-1 层中有 3 层夹矸、煤 8 层中有 2 层夹矸,煤层结构简单-中等复杂.煤 6 层、煤 8-1 层、煤 8 层煤质均属低中-灰分、低硫-中高硫、中高挥发分、高热值的不黏煤.煤层赋存区域地下水较丰富、对开采

可能造成影响的含水层为直罗组、延安组砂岩复合承压含水层和洛河组砂岩类孔隙、裂隙承压含水层,富水性为弱-中等富水性.煤 6 层和煤 8-1 层顶底板均有一定厚度的泥岩和粉砂岩、渗透性较差,煤 8 层顶板为 5.84 m 的中砂岩和细砂岩、底板为 8.21 m 的粉砂岩和泥岩.煤 6 层、煤 8-1 层、煤 8 层灰分平均值 15.72%,其中除煤 6 的灰分平均值大于 18%外,其余 2 层煤均小于要求值.煤 6 层的硫分为 1.02%,煤 8-1 层、煤 8 层均为 0.6%左右.热稳定(TS₊₆)测试的平均值 89.86%,且所有样品测试的热稳定性(TS₊₆)均大于 70%.煤灰熔融性软化温度(ST)的平均值 1 219~1 255 °C,煤对二氧化碳的反应性在 950 °C 时 CO₂ 还原率平均为 35.5%~44.0%.根据煤炭地下气化资源条件评价指标隶属函数模糊等级划分情况^[7,8],对九龙川井田煤层资源条件进行定量分析并赋值^[12],见表 3.

表 2 煤炭地下气化资源条件评价指标隶属函数模糊等级划分

评价指标	单位	模糊等级划分值					指标类型
		r ₁	r'	r ₂	r''	r ₃	
地质构造(I ₁)	分	30.0		50.0		70	成本型
煤层埋深(II ₁)	m	100.0	200.0	600.0	1 000	1 500	中间型
煤层厚度(II ₂)	m	0.8	2.5	3.5	5	8	中间型
煤层倾角(II ₃)	°	10.0	20.0	30.0	40	55	中间型
地下水赋存(III ₁)	分	40.0		60.0		80	成本型
顶底板岩性(III ₂)	分	30.0		50.0		70	效益型
煤岩组分特征(IV ₁)	分	30.0		60.0		80	效益型
煤的化学性质(IV ₂)	分	30.0		60.0		80	效益型
煤的工艺性质(IV ₃)	分	30.0		60.0		80	效益型

表 3 九龙川井田煤层地下气化评价指标值

煤层	地质构造(I ₁) /分	煤层埋深(II ₁) /m	煤层厚度(II ₂) /m	煤层倾角(II ₃) /(°)	地下水赋存(III ₁) /分	顶底板岩性(III ₂) /分	煤岩组分特征(IV ₁) /分	煤的化学性质(IV ₂) /分	煤的工艺性质(IV ₃) /分
煤 6	40	930.4	1.85	12	60	80	75	80	80
煤 8-1	50	951.7	7.11	10	70	75	60	75	75
煤 8	45	967.6	6.29	8	80	60	65	75	80

3.3 研究区评价指标隶属度计算

将 3 个煤层的指标值代入对应的隶属函数获得各评价等级的隶属度 r_{ij},得到可行,基本可行和不可行 3 个等级的隶属矩阵 R,权重矩阵与隶属矩阵相乘得到 B_n = W^T × R = (b_{ij})_{n×n} (i, j = 1, 2, 3, ..., n)^[12],见表 4.根据隶属函数的隶属度最大原则,对比发现煤 6 层实施地下气化的可行性相对最高,煤 8 层最低.

表 4 九龙川井田煤层地下气化综合评价结果

评价指标	综合权重	煤 6			煤 8-1			煤 8		
		可行	基本可行	不行	可行	基本可行	不行	可行	基本可行	不行
地质构造(I ₁)	0.115	0.500	0.500	0.000	1.000	0.000	0.000	0.250	0.750	0.000
煤层埋深(II ₁)	0.059	0.175	0.825	0.000	0.148	0.877	0.000	0.083	0.917	0.000
煤层厚度(II ₂)	0.094	0.000	0.618	0.382	0.000	0.297	0.703	0.000	0.570	0.430
煤层倾角(II ₃)	0.063	0.000	0.200	0.800	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	1.000
地下水赋存(III ₁)	0.154	0.000	1.000	0.000	0.000	0.500	0.500	0.000	0.000	1.000
顶底板岩性(III ₂)	0.130	1.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.500	0.500	0.000
煤岩组分特征(IV ₁)	0.102	0.750	0.250	0.000	0.000	1.000	0.000	0.250	0.750	0.000
煤的化学性质(IV ₂)	0.145	1.000	0.000	0.000	0.750	0.250	0.000	0.750	0.250	0.000
煤的工艺性质(IV ₃)	0.138	1.000	0.000	0.000	0.750	0.250	0.000	1.000	0.000	0.000
评价结果		0.557	0.356	0.086	0.467	0.328	0.206	0.371	0.372	0.287

4 结论

- 1)对煤炭地下气化影响最关键的指标是煤岩煤质特征,其次是水文地质特征,影响力最小的是地质构造特征.
- 2)煤6层实施地下气化的可行性相对最高,煤8层最低.
- 3)为宁正矿区九龙川井田实施煤炭地下气化提供了科学依据.

参考文献:

- [1] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J].煤炭学报,2017,42(3):547-556.
- [2] 谢和平,鞠杨,高明忠,等.煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J].煤炭学报,2018,43(5):1210-1219.
- [3] 葛世荣.深部煤炭化学开采技术[J].中国矿业大学学报,2017,46(4):679-691.
- [4] 李怀展.无井式煤炭地下气化岩层移动机理与控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
- [5] 柳迎红,李伟民.阜新煤炭地下气化试验[J].煤矿安全,2003(6):15-17.
- [6] 柳迎红,梁新星,梁杰,等.影响煤炭地下气化稳定性生产因素[J].煤炭科学技术,2006(11):79-82.
- [7] 黄温钢,王作棠,辛林.从低碳经济看我国煤炭地下气化的前景[J].矿业研究与开发,2012,32(2):32-36.
- [8] 黄温钢,王作棠.煤炭地下气化变权-模糊层次综合评价模型[J].西安科技大学学报,2017,37(4):500-507.
- [9] 刘淑琴,张军,梁杰,等.煤炭地下气化的综合利用前景[J].煤炭科学技术,2003(7):50-53.
- [10] 刘淑琴,梁杰,余学东,等.不同煤种地下气化特性研究[J].中国矿业大学学报,2003(6):28-32.
- [11] 刘淑琴,陈思,李金刚,等.深部煤层地下气化及其应用前景[J].煤炭转化,2007(3):79-81.
- [12] 赵岳,黄温钢,徐强,等.煤炭地下气化地质条件评价研究——以江苏省朱寨井田为例[J].河南理工大学学报(自然科学版),2018,37(3):1-11.
- [13] 刘淑琴,张尚军,牛茂斐,等.煤炭地下气化技术及其应用前景[J].地学前缘,2016,23(3):97-102.
- [14] 刘淑琴,周蓉,潘佳,等.煤炭地下气化选址决策及地下水污染防治[J].煤炭科学技术,2013,41(5):23-27.
- [15] 赵理中.煤炭地下气化的地质条件[J].中国煤炭,1995(7):67-68.
- [16] 步学朋,任相坤,崔永君.煤炭气化技术对煤质的选择及适应性分析[J].神华科技,2009,7(5):73-77.
- [17] 吴春生,黄翀,刘高焕,等.基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价[J].生态学报,2018,38(13):4584-4595.
- [18] 徐杨,周延,孙鑫,等.基于模糊层次分析法的矿井安全综合评价[J].中国安全科学学报,2009,19(5):147-152.
- [19] 段军,梁智广,岳洪辉.基于模糊层次分析法的采矿方法优选[J].化工矿物与加工,2017,46(12):53-56.
- [20] 郝长胜,盛军坤,樊雪敏,等.基于模糊层次分析法的矿山安全综合评价模型[J].煤炭技术,2016,35(2):234-236.