



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2022.11.05.01

文章编号: 1674-5086(2025)03-0156-14

中图分类号: TE26

文献标志码: A

煤矿采空区天然气井完整性风险评价及对策研究

郭润生^{1,2*}, 余晓钟¹, 高 斐³

1. 西南石油大学经济管理学院, 四川 成都 610500

2. 中国石化华北油气分公司, 河南 郑州 450006

3. 长江大学石油工程学院, 湖北 武汉 430100

摘要: 鄂尔多斯盆地煤矿开采扰动和地层沉陷严重威胁着临近天然气井的井筒完整性, 导致近 30% 开发区生产井面临着天然气井下和地面泄漏的风险, 给该区域天然气和煤矿生产带来巨大的安全隐患。为了有效降低煤矿开采区天然气井安全生产风险, 在井筒完整性影响因素分析的基础上, 采用 WBS-RBS 矩阵构建井筒完整性结构单元要素与潜在风险因素耦合模型, 建立井筒完整性风险评价指标体系并利用层次分析法和熵权法综合确定其组合权重系数, 并基于后悔理论建立井筒完整性风险评估模型, 确定煤矿开采区天然气井井筒完整性的主控因素和风险等级。以 PG14 井为例进行模型验证分析, 并提出相应的治理对策。结果表明, 基于后悔理论的井筒完整性风险评估结果与现场实践基本一致, 说明该方法应用于煤矿开采区天然气井完整性风险评估领域是可行的, 且能够有效提高评估结果的客观性, 从而指导煤矿开采区天然气井完整性风险管理。

关键词: 煤矿开采; 井筒完整性; 风险评价; WBS-RBS 矩阵; 后悔理论; 对策

Integrity Risk Assessment and Countermeasures for Gas-coal Cooperative Exploitation of Sulfur Gas Wells

GUO Runsheng^{1,2*}, YU Xiaozhong¹, GAO Fei³

1. School of Economics and Management, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

2. North China Petroleum Bureau, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006, China

3. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China

Abstract: Coal mining disturbance and formation subsidence in Ordos Basin seriously threaten the wellbore integrity of adjacent natural gas wells, resulting in nearly 30% of production Wells in the development zone facing the risk of underground and surface leakage of natural gas, which brings huge security risks to the production of natural gas and coal mines in this region. In order to effectively reduce the safety production risks of natural gas wells in coal mining areas, based on the analysis of factors affecting wellbore integrity, the coupling model of structural unit elements and potential risk factors of wellbore integrity is constructed by using WBS-RBS matrix, and the index system of wellbore integrity risk evaluation is established. The combined weight coefficient is determined by analytic hierarchy process and entropy weight method. Based on the regret theory, the wellbore integrity risk assessment model is established to determine the main controlling factors and risk levels of natural gas wells in coal mining areas. The model validation analysis was carried out with Well PG14 as an example, and corresponding management countermeasures were proposed. The results show that the results of wellbore integrity risk assessment based on regret theory are basically consistent with field practice, indicating that the method is feasible in the field of natural gas well integrity risk assessment in coal mining areas, and can effectively improve the objectivity of evaluation results, so as to guide the integrity risk management of natural gas wells in coal mining areas.

Keywords: coal mining; wellbore integrity; risk assessment; WBS-RBS matrix; regret theory; countermeasure

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20240425.1408.002.html>

郭润生, 余晓钟, 高 斐. 煤矿采空区天然气井完整性风险评价及对策研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 156-169.

GUO Runsheng, YU Xiaozhong, GAO Fei. Integrity Risk Assessment and Countermeasures for Gas-coal Cooperative Exploitation of Sulfur Gas Wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2025, 47(3): 156-169.

* 收稿日期: 2022-11-05 网络出版时间: 2024-04-28

通信作者: 郭润生, E-mail: grs666@163.com

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U19B6003)

引言

鄂尔多斯盆地拥有丰富的煤炭、天然气等矿产资源,是中国重要的矿产资源生产、储备和调配基地。盆地内煤炭和天然气上下赋存,形成了较为典型的天然气、煤炭矿权资源叠置现象^[1]。随着中国经济的发展,对煤炭和天然气资源的需求量急剧增加,鄂尔多斯盆地也随之成为煤炭和油气资源交叉开采的重点区域,大量的天然气与煤矿开采拓展区域的巷道、采空区空间交叉关系愈发复杂,井筒完整性问题也逐渐开始显现^[2-7],如图1所示。煤矿开采过程中极易引起临近天然气井环空带压、近井地带及水泥环完整性破坏、井屏障密封失效、生产管柱及井口装置泄漏,甚至是井筒及生产管柱被误

掘断等问题^[8],导致天然气泄漏出地面或进入煤矿巷道和采空区,造成重大的安全事故,不仅严重影响到天然气井的安全生产,同时也威胁到煤矿的安全开采,甚至造成巨大的经济损失。因此,天然气井井筒完整性失效预防与治理成为鄂尔多斯盆地气煤交叉开采区重要的工作内容,也逐渐引起矿权所有者和研究人员的重视。针对煤矿开采区天然气井完整性的特点,如何开展风险识别并进行风险评估,是预防和治理井筒完整性的重要前提。通过建立天然气井完整性风险评估模型,从而确定重大风险井并为预防与治理该类井提供科学依据,以便及时采取措施,保证天然气井的正常生产,对于降低气煤交叉开采区安全生产风险和避免重大安全事故的发生具有重要意义^[9]。

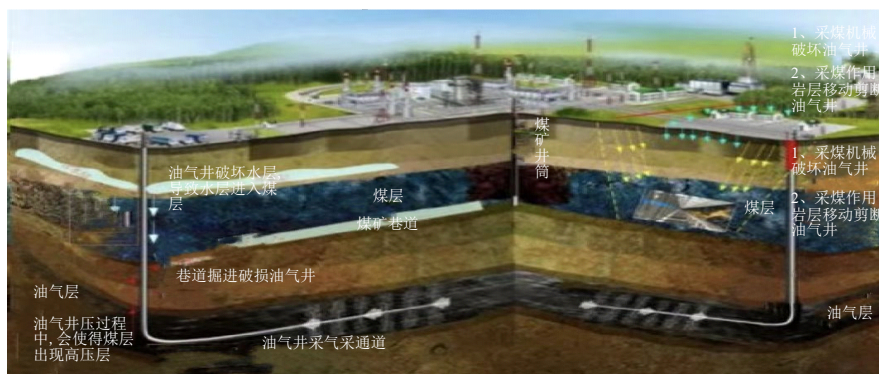


图1 煤矿开采区天然气井生产示意图

Fig. 1 Schematic diagram of natural gas well production in the coal mining area

随着油气田开发和安全事故的频发,国内外学者以及现场技术人员越来越重视井筒完整性的研究和应用。自2010年“深水地平线事件”后,挪威石油工业协会为了加强井筒完整性的重要性^[10],组织7大石油技术服务公司巨头英国石油公司(BP)、康菲石油公司(Conoco Phillips)、埃克森美孚(Exxon Mobil)等研究并制定了井筒完整性标准《OLF Com-mended Guidelines for Well Integrity》《Well Integrity in Drilling and Well Operations》和API 96《Deepwater Well Design and Construction》^[11-13],修改和完善了“油气井井筒完整性”的定义,即采用有效的技术、优化的设计及合理的管理模式来降低运行风险,保证油气井在达到废弃前运行周期内的安全可靠^[14-15];同时,API也给出了定义,即采用技术、操作和管理措施,使得油气井井筒在整个生命周期中保持稳定的、正常的流体注入状态和采出状态。从以上定义可以看出井筒的完整性就是采用一切有效

手段来防止油气泄漏,这为油气井井筒结构设计和安全评价指明了方向,而如何建立有效、准确的油气井井筒完整性评价方法成为了研究的重点。

国内外学者在这方面做了大量的研究,在井筒完整性分析、评价及管理方面积累了丰富的成果和经验。周松民等^[16]、张绍辉等^[17]、何汉平^[18]等从井口装置、井筒、管柱和管理等方面对井筒的完整性进行了分析,综合分析评价了采气树、套管、油管、水泥环及封隔器等多因素耦合作用对井筒完整性的影响。何雨等^[19]综合考虑了井筒完整性的风险设计因素和屏障因素,建立了井筒完整性风险设计系数预测模型和井屏障风险评估模型,评价了风险设计因素、一级屏障因素、二级屏障因素和其他屏障因素对生产阶段井筒完整性的影响。孙莉等^[20]建立了生产气井井筒完整性的评价指标体系和方法,并提出了加强井筒完整性管理的方法、所采用的屏障设备以及监测方式。张智等^[21]、胡顺渠等^[22]从

完整性设计和应用方法的角度,针对套管防腐、管柱防腐、井口装置密封等方面提出了要求。而国外学者针对井筒完整性方面的研究主要集中在安全事故频发的“三高”气田生产井方面,对于气煤交叉开采区天然气井井筒完整性的研究较少,并且缺乏定量的分析技术和评价指标^[23-24]。现场实践表明,对于气煤交叉开采来说,天然气井井筒完整性风险控制和管理难度更大,目前鄂尔多斯油气田仍未建立起有效的井筒完整性评价方法及管理体系。如何科学、合理地分析和评价煤矿开采区天然气井井筒完整性及其风险是提高气煤交叉开采技术安全管理水平的关键环节。

为此,通过煤矿开采区天然气井井筒完整性影响因素分析,建立 WBS-RBS 矩阵模型识别风险因素并构建井筒完整性评价指标体系,利用层次分析法和熵权法综合确定井筒完整性影响因素的组合权重,在此基础上,结合后悔理论建立风险评估模型,确定天然气井井筒完整性风险等级及主要风险因素,为鄂尔多斯盆地煤矿开采区天然气井安全管理与治理措施的制定提供理论依据。

1 井筒完整性风险评估指标体系构建

构建井筒完整性风险评估指标体系是全面、系统、精确地识别危害因素以及进行井筒完整性风险评估的基础。

根据井筒完整性理论,井筒完整性失效是由地层流体性质、井筒内外温压环境、井屏障结构组件性能特征和操作管理等多因素耦合作用的结果。气煤交叉开采背景下天然气井不仅受到井下环境及开采工程因素的影响,而且还受到临近煤矿开采扰动的影响,除了常规井口装置、套管、水泥环、完井管柱和封隔器等油气设施面临着完整性失效的风险外,煤矿采空区和巷道与天然气井之间的地层完整性也可能遭到耦合应力场的破坏,从而为天然气泄漏提供了通道。因此,对于气煤交叉开采区天然气井,可能会出现完井管柱、封隔器、井下安全阀、套管柱、水泥环、井筒围岩和井口装置密封失效等问题,从而引起天然气井下或地面泄漏,导致天然气井环空持续带压或有毒天然气发生井口和井下泄漏,产生火灾、爆炸或中毒和窒息的重大生产安全事故,故有必要针对鄂尔多斯盆地煤矿开采区天然

气井井筒完整性影响因素进行评价和管理。

针对天然气井,完井管柱、套管柱和井口设备在腐蚀穿孔、应力开裂及氢脆等多种腐蚀类型耦合作用下,不仅会导致油套管的穿孔、断裂甚至是报废,同时也会导致管柱丝扣断裂及密封失效、封隔器胶筒密封失效、油套管头和采气树泄漏等问题。同时随着煤矿回采工作面或巷道的推进,采掘扰动应力场范围逐渐扩大以及地表沉降,有可能引起一定范围内天然气井套管螺纹脱扣、套管变形错断、水泥环破坏剥落、生产管柱及封隔器密封失效、井口发生抬升、采气树与套管头和油管头密封失效等。

因此,气煤交叉开采区天然气井井筒完整性风险评估应重点考虑腐蚀及煤矿开采应力场对于井筒完整性的影响。根据对气煤交叉开采区天然气井失效形式的分析,总结了井筒发生失效的主要位置及形式,如图 2 和图 3 所示。

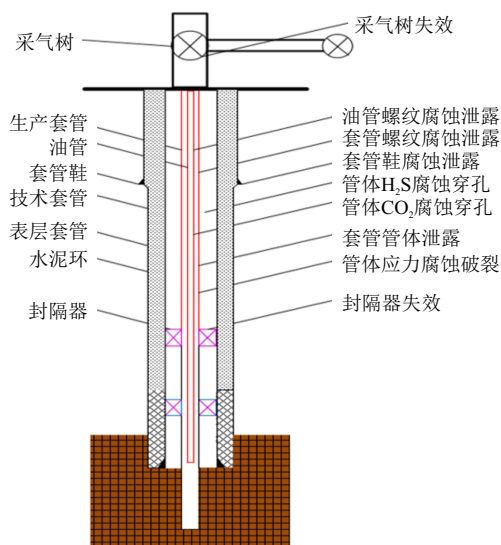


图 2 煤矿开采区天然气井风险分布

Fig. 2 Risk distribution of natural gas wells in coal mining areas

风险识别是构建井筒完整性风险评估指标体系的基础,目前主流的风险识别方法主要有检查表法、故障树分析法、专家调查法、SWOT 法和工作分解法(WBS-RBS)^[25]。由于气煤交叉开采不仅涉及天然气井井筒自身基本属性,而且还涉及煤矿开采工程特征,影响因素众多且复杂,天然气井井筒不同屏障部件的风险因素难以从整体上进行全面考虑存在的各种风险。若采用专家调查法、检查表法、故障树法等方法进行风险辨识,很容易出现风险因素辨识缺项漏项的情况。结合煤矿开采区天然气井

的特点,采用考虑了风险产生转化的规律和条件、逻辑清晰、内容全面的 WBS-RBS 方法,从多维度、多层面、多层次的角度,全面、系统性地辨识煤矿开采区天然气井的风险因素,同时在较大程度上避免了主观因素的影响。

煤矿开采区天然气井井筒完整性风险评估指

标体系构建可分为 3 个步骤:目标结构分解形成 WBS、风险结构分解形成 RBS 以及 WBS 和 RBS 两两耦合。WBS 主要为目标划分的结构单元或工作单元;RBS 考虑的是可能存在所有风险;WBS 和 RBS 两两耦合确定不同结构单元存在的风险点,最终基于风险点进行归类选取指标,构建指标体系。

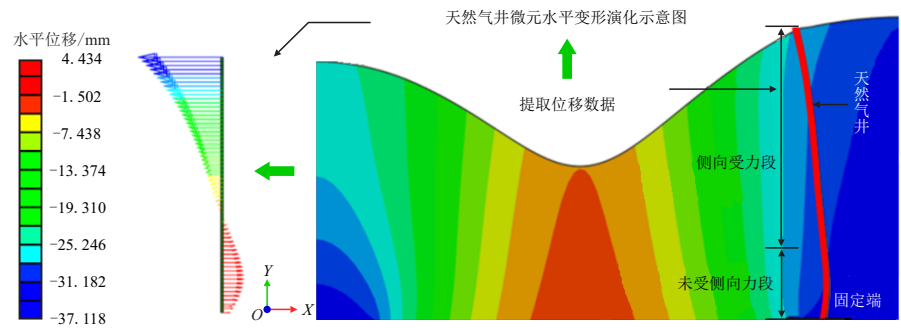


图 3 煤矿开采区天然气井受煤矿采空区沉降变形影响

Fig. 3 Natural gas wells in coal mining area are affected by the settlement and deformation of coal mine goaf

1.1 井筒完整性结构单元划分

为了系统研究煤矿开采区天然气井井筒完整性的问题,在识别导致井筒完整性失效影响因素的基础上,建立 WBS 模型。

根据油气井井筒结构特点及生产工艺过程,将

影响油气井井筒完整性结构单元分解为以下 3 个部分:井口装置、油气井筒和生产管柱。

由于油气井完整性设计参数多而杂,煤矿掘进过程给临近油气井带来较大的安全生产风险,故将设计参数列为一类指标,如图 4 所示。

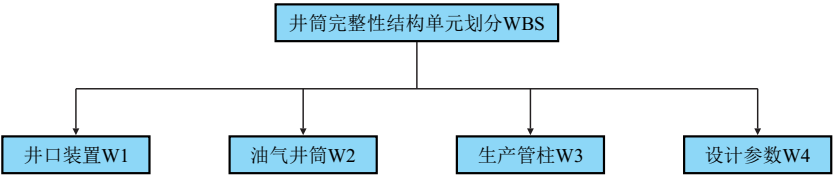


图 4 井筒完整性结构单元划分

Fig. 4 Division of wellbore integrity structural units

1.2 井筒完整性失效风险分解

通过对油气井井筒完整性失效机理、煤矿掘进施工过程和油气井井筒工况的分析,从技术风险、环境风险、管理风险 3 个方面逐步分解风险。

1) 技术风险

在气煤交叉开采过程中,不仅天然气井井筒结构、生产技术和方式会对井的安全生产产生直接的影响,而且煤矿开采施工巷道或煤矿开挖面岩体的挤压和卸载耦合作用、挖煤机破岩扰动、采空区造成的地层沉陷等,也都会对周围环境、地面油气设施以及地下油气井筒构成潜在的威胁。气煤交叉开采井筒完整性技术风险主要考虑的因素有油套环空保护液泄漏、液柱高度不够、管柱力学强度偏低、水泥返高不够、水泥环胶结质量、管柱腐蚀失效、管柱

配套工具密封失效、材料选择不合适、管柱丝扣密封失效和采空区或巷道与油气井距离过小等。

2) 环境风险

高矿化度地层水会对井筒管柱造成威胁,当地层水未被水泥封固时,套管可能会腐蚀穿孔,导致地层水倒灌,从而严重影响气井的安全生产^[26]。另外,油气井钻遇煤岩地层或者岩膏岩地层引起地层蠕变挤压井筒。因此,井筒完整性环境风险主要考虑的因素有高矿度地层水和岩层蠕变挤压等。

3) 管理风险

气煤交叉开采工艺复杂,煤矿开采施工管理和天然气井完整性管理风险因素相互耦合,必将增大天然气井安全生产风险。天然气井完整性管理风险主要考虑的因素有环空持续带压、专门管理机构缺

乏、未按制度执行、忽视了教育和培训和监督预警制度的缺失。

1.3 井筒完整性 WBS-RBS 风险耦合矩阵

以井筒完整性结构单元 WBS 分解树作为横向量, RBS 风险分解树作为纵向量, 然后将两者的基础单元进行逐一耦合, 确定可能产生风险单元, 若存在置“1”, 反之置“0”, 从而得到气煤交叉开采天然气井井筒完整性 WBS-RBS 风险耦合矩阵, 矩阵

元素如表 1 所示。

通过对风险因素的归类, 最终确定了煤矿开采区天然气井井筒完整性“油管(套管)悬挂器密封不严、油管(套管)腐蚀失效、油管(套管)连接密封失效、油管(套管)强度偏低、油管(套管)材质选择不合理、水泥胶结质量差、采空区或巷道与油气井采掘扰动、管理机构缺乏、操作错误及预警制度未建立”等 32 项风险评估指标。

表 1 煤矿开采区天然气井筒完整性 WBS-RBS 风险耦合矩阵元素
Tab. 1 WBS-RBS risk coupling matrix element of natural gas wellbore integrity in coal areas

风险类别	风险因素	井筒完整性结构单元划分 WBS			
		井口装置	油气井筒	生产管柱	设计参数
技术风险	油套环空保护液泄漏	1	1	0	0
	液柱高度不够	1	1	0	0
	管柱力学强度偏低	1	1	1	1
	水泥返高不够	0	1	0	1
	水泥环胶结质量差	1	1	0	0
	管柱腐蚀失效	0	1	1	0
	管柱配套工具密封失效	0	1	1	0
	材料选择不合理	1	1	1	1
	管柱丝扣密封失效	1	1	1	0
	采空区或巷道与油气井距离过小	1	1	1	1
环境风险	高矿度地层水	0	1	0	0
	岩层蠕变挤压	0	1	0	0
管理风险	环空持续带压	1	1	1	0
	专门管理机构缺乏	1	1	1	0
	未按制度执行	1	1	1	0
	忽视了教育和培训	1	1	1	0
	监督预警制度的缺失	1	0	1	0

2 指标综合权重

油气井井筒完整性影响因素众多, 属于多属性决策问题。每个风险因素所起的作用不同, 其指标权重也有所区别。以往研究中指标权重以专家打分、层次分析等为主的主观赋权方法, 虽然融合了专家经验, 但是缺少了科学理论依据, 导致结果可信度不高。而客观赋权法, 根据决策问题本身所包含的数据信息而确定指标权重, 但又缺少了主观能动性, 与实际脱节, 如熵技术法等。因此, 为了更贴合实际, 提高井筒完整性风险指标的影响程度的精确性, 采用层次分析法与熵权法耦合确定风险评估指标的组合权重, 不仅充分融合了技术专家的实践经验, 还充分考虑了基于客观标准的理论信息^[27-28]。

2.1 层次分析法确定权重

层次分析法主要是通过两两比较因素的重要性, 依据定量赋值原则(表 2), 构建判断矩阵, 归一化处理后采用式(1)和式(2)进行一致性检验, 从而

确定井筒完整性指标的主客观权重^[29]。

表 2 各项参数的重要程度比例标度
Tab. 2 Proportional scale of the importance of parameters

比例标度	各参数间重要程度
1	因素 i' 和因素 j' 同等重要
3	因素 i' 比因素 j' 稍微重要
5	因素 i' 比因素 j' 明显重要
7	因素 i' 比因素 j' 强烈重要
9	因素 i' 比因素 j' 绝对重要
2, 4, 6, 8	介于上述的相邻判断

$$C_R = \frac{C_1}{R_1}$$

(1)

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(2)

式中:

- C_R ——一致性比率;
- C_1 ——一致性指标;
- R_1 ——平均随机一致性指标, 见表 3;
- $\lambda_{\max}$ ——最大特征值;
- n ——因素个数。

表3 平均随机一致性指标
Tab. 3 Average random consistency index

n	R_1	n	R_1
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49
6	1.24	11	1.51
7	1.32	12	1.54

2.2 熵权法确定权重

熵权法是基于信息论,利用熵值所包含信息量的大小来确定系统某项属性的变异程度^[30],进而确定客观权重。若指标的信息熵值越小,则该指标的样本数据就越有序,样本数据间的差异就越大,指标变异程度就越大,提供的信息量就越多,在综合评价中所能起到的作用也就越大,其所代表的权重值就越大。该方法能够客观地反映数据与指标权重之间的关系,具有较高的可信度和精确度。针对确定的风险评估指标要求现场技术人员或专家按照表4构建判断矩阵,然后进行归一化处理,参照文献^[30]计算信息熵,从而确定指标的客观权重。

表4 因素指标重要性打分
Tab. 4 Importance score of factor indicators

重要性	分数
比较不重要	[0, 1]
不重要	(1, 2]
一般	(2, 3]
重要	(3, 4]
非常重要	(4, 5]

2.3 综合指标权重确定

基于离差平方和的最优组合赋权方法,综合各种赋权方法的特点^[31-32],采用组合赋权形式为

$$\mathbf{E}_c = \theta_1 \mathbf{E}_1 + \theta_2 \mathbf{E}_2 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{E}_c$ —最优组合赋权的系数向量;

$\mathbf{E}_1$ —主观权重向量;

$\mathbf{E}_2$ —客观权重向量;

θ_1, θ_2 —指标主、客观权重系数,满足约束条件
 $\theta_1 + \theta_2 = 1, \theta_1 \geq 0, \theta_2 \geq 0$ 。

设矩阵 $\mathbf{E} = (\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2)$, $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \theta_2)^T$, 则有

$$\mathbf{E}_c = \mathbf{E}\boldsymbol{\theta} \quad (4)$$

根据线性加权法则,通过组合赋权的系数向量所计算得到的综合评价价值可表示为

$$D_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} e_{cj}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中: D_i —第*i*个方案的综合评价价值;

b_{ij} —第*i*个决策方案的第*j*个因素的属性值;

e_{cj} —第*j*个因素的最优组合赋权系数;

m —决策方案个数。

将各方案评价值的离差平方构建成对称矩阵 $\mathbf{B}_1$, 则基于离差平方和的最优赋权组合可化为

$$\max F(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\theta}^T \mathbf{W}^T \mathbf{B}_1 \mathbf{W} \boldsymbol{\theta} / \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\theta} \quad (6)$$

式中: $F(\boldsymbol{\theta})$ —线性表系数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 的 Rayleigh 商;

$\mathbf{B}_1$ —各个方案评价值的离差平方所构建的对称矩阵。

根据矩阵理论,最终求得矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$, 求解最大特征值所对应的单位化特征向量 $\boldsymbol{\theta}^*$, 则最优组合赋权系数向量为

$$\mathbf{E}_c^* = \mathbf{E}\boldsymbol{\theta}^* \quad (7)$$

式中: $\mathbf{E}_c^*$ —最优组合赋权系数向量;

$\boldsymbol{\theta}^*$ —最大特征根所对应的单位化特征向量。

3 建立基于后悔理论的风险评估模型

3.1 后悔理论

在项目风险评估实践过程中,一直充斥着不同程度的主观性和任意性,在一定程度上削弱了风险评估结果的可信度。为了降低项目决策过程中专家的主观喜好和有限的理性行为对风险评估的影响,提高风险评估结果的客观性,文献^[33]中提到了一种行为决策理论,即后悔理论。该理论方法考虑到决策专家有限的理性行为,在风险意识描述的基础上进行随机决策,以提升风险评估的客观性和科学性。该理论方法已广泛应用于不同行业项目方案的优选和决策中^[34]。

评价专家在主观意识和心理因素的影响下总是下意识地欣喜自己选择的方案优于其他比较方案,而后悔自己选择的方案劣于其他比较方案。后悔理论根据这一特点,通过帮助决策专家规避后悔,使得所选方案尽可能与理想方案接近,从而提高决策的准确度。换言之,在风险评估领域,由于专家主观因素的存在,导致风险评价结果与实际状况有所差别。这在后悔理论中,该差别以专家的后悔程度来表征,后悔程度越大意味着评估结果的偏差越大。因此,只有通过一定的数学方法来规避这一偏差,才能使风险评价结果更接近于实际风险状况。

后悔理论建立的数学模型为一种感知效用函数。设 $\pm x_1$ 、 $\pm x_2$ 代表项目的两个方案, $\pm x_1$ 、 $\pm x_2$ 的

效用值分别为 $k(\pm x_1)$ 、 $k(\pm x_2)$ ， $M(k(\pm x_1) - k(\pm x_2))$ 为后悔-欣喜值。若 $M > 0$ ，表明选择方案令决策者感到满意。反之，令决策者感到失望，且 M 值的大小反映了决策者的后悔程度。基于该思路，规避后悔可以通过在原有效用值的基础上加上该 M 值来达到目的，使得所选方案更接近于理想方案，根据该过程可建立感知效用函数。假设 x^* 为理想方案，决策者选择了方案 $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ ，则其感知效用函数 $G(x_i)$ 可表示

$$G(x_i) = k(x_i) + M(k(x^*) - k(x_i)) \quad (8)$$

令 $k(x^*) = \min\{k(x_i)\}$ 即 $M(k(x^*) - k(x_i)) < 0$ ，后悔程度最大，使得规避后悔后的决策方案最接近理想方案。

3.2 构建基于后悔理论的风险评估模型

目标风险是系统各个因素风险的累积。因此为了确定项目的整体风险，就单一风险因素发生可能性和后果严重度进行评价，结合风险矩阵确定各因素的风险值，在此基础上建立指标的原始风险评价矩阵，开展基于后悔理论的煤矿开采区天然气井井筒完整性风险评估。具体步骤如下^[35]：

1) 确定单一因素的风险值。利用风险矩阵确定煤矿开采区天然气井井筒完整性单一失效风险因素的风险值。由现场工作人员或专家针对重点井井筒完整性失效风险因素进行评价，确定各风险因素的后果严重程度和发生可能性，进而确定各风险因素的风险值^[36]。借鉴张智等^[15]建立的井筒完整性风险评价模型，将目标井各风险因素的后果严重程度与发生的可能性按照表 5、表 6 进行评价。

表 5 风险因素的后果严重程度

Tab. 5 Severity of the consequences of the risk factors

严重级别	严重程度	严重程度量化指标
i	高	[16, 20]
ii	较高	[12, 16)
iii	一般	[8, 12)
iv	较低	[4, 8)
v	低	[0, 4)

依据《油气定量风险评估指南》定量风险评估的定义^[35]，确定风险值的计算公式

$$\text{风险值} = \text{后果严重程度} \times \text{可能性大小} \quad (9)$$

各因素的风险值可按风险值的计算公式求得。

根据石油天然气开采企业安全评估要求，结合现场技术人员和专家意见，将煤矿开采区天然气井井筒完整性风险等级分为 5 级，如表 7 所示。

表 6 风险因素的发生可能性

Tab. 6 Likelihood of occurrence of risk factors

可能性量化指标	发生可能性
[4, 5]	高
[3, 4)	较高
[2, 3)	一般
[1, 2)	较低
[0, 1)	低

表 7 煤矿开采区天然气井井筒完整性风险等级划分及其评分值表

Tab. 7 Classification of integrity and risk levels of natural gas wells in coal mining areas

风险等级	风险描述	风险评分值
I	极高风险	[80, 100]
II	高度风险	[60, 80)
III	中度风险	[40, 60)
IV	低度风险	[20, 40)
V	极低风险	[0, 20)

2) 构建因素指标原始风险评价矩阵 $H_{n \times u}$ 。将 u 位技术专家对 n 个因素指标按照表 4 和表 5 的评价结果依据式 (9) 计算的风险值构建成指标原始风险评价矩阵 $H_{n \times u}$ 。

3) 确定因素指标原始风险矩阵 $H_{n \times u}$ 的理想方案集 $P = (P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_n)$ 。根据前面效用函数取值可知 $k(x^*) = \min\{k(x_j)\}$ ，第 j 个指标的理想值 P_j 计算公式为

$$P_j = \min\{h_{ji}\} = \{h_j^*\} \quad (10)$$

式中： h_{ji} —第 i 个专家对第 j 个指标的评分， $i = 1, 2, \dots, u$ ；

h_j^* —第 j 个指标的评分理想值。

4) 构建因素指标原始评价效用值矩阵 $K_{n \times u}$ 。本研究以幂函数来表示原始评价效用值函数 f ，其公式为

$$f(h_{ji}) = (h_{ji})^\alpha \quad (11)$$

式中： α —决策者规避风险的程度， $0 < \alpha < 1$ ，参考文献^[37]，本文取 0.9。

5) 构建指标原始评分的后悔-欣喜函数矩阵 $M_{n \times u}$ 。同理，该后悔-欣喜函数也是单调递增函数，其计算公式为

$$M_{ji} = 1 - e^{-\beta(h_j^* - h_{ji})} \quad (12)$$

式中： β —决策者规避后悔的程度， $0 < \beta < 1.0000$ ，见文献^[37]，本文取 0.0133。

6) 构建指标原始评分的感知效用值矩阵 $G_{n \times u}$ 。

其中, g_{ji} 为感知效用值矩阵 $G_{n \times u}$ 的元素, 其计算公式为

$$g_{ji} = f_{ji} + M_{ji} \quad (13)$$

7) 风险评估结果。风险评估值为各因素指标原始评价的感知效用值矩阵元素与对应指标组合权重系数的加权平均值。其中井筒完整性结构第 t 个一级指标单元的风险评估值 S_t 的计算公式为

$$S_t = \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u (\omega_{t1} g_{1i} + \omega_{t2} g_{2i} + \cdots + \omega_{tm} g_{ni}) \quad (14)$$

式中:

S_t —第 t 个一级指标单元的风险评估值;

ω_m —第 t 个结构单元下的第 n 个指标的权重系数。

计算的风险评估值 S_t 可结合表 7 确定目标井的风险等级。

同理, 通过对各一级指标的风险评估值及其组合权重值加权求和, 可求得总风险评估值, 具体计算公式为

$$S = \sum_{t=1}^4 \omega_t S_t \quad (15)$$

式中:

ω_t —第 t 个结构单元的权重。

4 模型验证及应用

本研究以鄂尔多斯盆地大牛地气田含硫气井 PG14 井为例, 利用以上模型进行气煤交叉开采条件下的风险评估。由油田资料可知 PG14 井区块地层构造平缓, 断层不发育, 煤层埋藏深度 650~700 m, 平面展布范围广。气层中部温度 104 °C; 经近 10 a 的开发, 气层压力下降到 6.3 MPa, 压力系数仅为 0.2。该井硫化氢体积分数 582 cm³/m³, 二氧化碳含量 4.0%, 油套环空带压 0.8 MPa。距离煤矿巷道仅 47 m。邀请 5 位现场技术人员或专家根据 PG14 井井筒管柱结构、井下工况、周围环境和管理制度, 在建立的完整性风险评价指标系统基础上, 构建层次分析法和熵权法的判断矩阵, 确定风险指标组合权重, 并进行实例井的综合风险评估。

4.1 风险因素识别及指标体系建立

通过对 PG14 井井筒完整性影响因素进行分析, 结合表 1 建立 PG14 井的 WBS-RBS 风险耦合矩阵, 在此基础上识别了 PG14 井“油管(套管)悬挂

器密封不严、油管(套管)腐蚀失效、油管(套管)连接密封失效、油管(套管)强度偏低、油管(套管)材质选择不合理、水泥胶结质量差、采空区或巷道与气井采掘扰动、管理机构缺乏、操作错误及预警制度未建立”等 32 项风险因素, 同时构建井筒完整性的“井口装置、油气井筒、生产管柱、设计参数”等 4 项一级评价指标和 32 项二级评价指标体系。

4.2 风险因素指标权重

1) 层次分析法指标主观权重

以油气井筒结构单元与风险因素单元耦合建立的风险评估指标为例, 建立以油气井筒为一级指标、耦合因素为二级指标的风险层次结构, 并根据专家打分构建油气井筒二级指标的初始判断矩阵 B 为

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \frac{1}{6} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{2} & 1 & 2 & \frac{1}{7} & \frac{1}{6} & \frac{1}{8} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{8} & \frac{1}{7} & \frac{1}{9} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} & \frac{1}{6} \\ 6 & 7 & 8 & 1 & 2 & 12 & 6 & 5 & 4 & 3 \\ 5 & 6 & 7 & 12 & 1 & 13 & 5 & 4 & 3 & 2 \\ 7 & 8 & 9 & 2 & 3 & 1 & 7 & 6 & 5 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & \frac{1}{6} & \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & 12 & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} \\ 2 & 3 & 4 & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & 2 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 3 & 4 & 5 & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 4 & 5 & 6 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 4 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (16)$$

通过计算求得二级指标因素判断矩阵对应油气井筒的最大特征值 $\lambda_{\max}=10.42$, 根据表 3 可知, $n=10$ 对应的平均随机一致性指标 $R_1=1.49$, 结合式(1)和式(2)确定一致性比率 $C_R=0.03<0.10$, 表明该判断矩阵满足一致性要求。通过归一化处理, 得到了二级指标因素的主观权重值。同样的原理和计算方法, 可以确定井口装置、生产管柱、设计参数下的二级指标主观权重系数向量分别为 (0.04, 0.11, 0.02, 0.22, 0.02, 0.15, 0.30, 0.11, 0.05, 0.08)、(0.16, 0.33, 0.02, 0.23, 0.03, 0.05, 0.07, 0.11) 和 (0.25, 0.05, 0.55, 0.16)。

2) 熵权法指标客观权重

根据上述熵权法计算指标权重的方法和步骤求取各指标的客观权重系统。以上述油气井筒的二级

指标为例,将专家打分所构建的判断矩阵归一化获得矩阵 Q 为

$$Q = \begin{pmatrix} 0.06 & 0.07 & 0.02 & 0.04 & 0.04 \\ 0.06 & 0.06 & 0.04 & 0.05 & 0.05 \\ 0.04 & 0.04 & 0.03 & 0.06 & 0.07 \\ 0.17 & 0.13 & 0.14 & 0.17 & 0.17 \\ 0.14 & 0.14 & 0.13 & 0.11 & 0.14 \\ 0.19 & 0.18 & 0.17 & 0.17 & 0.12 \\ 0.06 & 0.07 & 0.09 & 0.04 & 0.06 \\ 0.08 & 0.08 & 0.08 & 0.10 & 0.10 \\ 0.10 & 0.11 & 0.14 & 0.08 & 0.14 \\ 0.11 & 0.11 & 0.15 & 0.16 & 0.10 \end{pmatrix} \quad (17)$$

然后,根据矩阵 Q 求得其信息熵为(0.14, 0.16, 0.15, 0.29, 0.27, 0.30, 0.18, 0.21, 0.24, 0.26),最终得到二级指标因素的客观权重系数为(0.11, 0.11, 0.11, 0.09, 0.09, 0.09, 0.11, 0.10, 0.10, 0.09)。采用同样的原理和计算方法,可以确定井口装置、生产管柱和技术参数因素下的二级指标客观权重系数分别为(0.11, 0.11, 0.11, 0.09, 0.11, 0.10, 0.09, 0.09, 0.10, 0.09)、(0.12, 0.11, 0.14, 0.12, 0.14, 0.13, 0.12, 0.12)和(0.23, 0.29, 0.23, 0.24)。

3) 指标组合权重系数

根据上述层次分析法和熵权法组合权重系数的计算方法和步骤,确定了油气井筒的二级指标的组权重系数为(0.07, 0.07, 0.06, 0.15, 0.12, 0.19, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10)。井口装置、生产管柱和技术参数因素下的二级指标主观权重系数分别为(0.08, 0.07, 0.08, 0.14, 0.08, 0.12, 0.17, 0.10, 0.08, 0.09)、(0.14, 0.23, 0.08, 0.18, 0.08, 0.09, 0.10, 0.11)和(0.24, 0.17, 0.39, 0.20)。

4.3 风险评估模型的应用

按照上述基于后悔理论的风险评估模型,对 PG14 井进行井筒完整性风险评估,并确定风险等级。根据现场技术人员和专家的风险因素的严重程度和风险因素的可能性评价,并结合式(9)构建油气井筒的二级指标原始评分矩阵 H_B , 见式(18)。

根据式(10),获得“油气井筒”的二级指标原始评分矩阵的理想方案 $P_B = (40, 47.5, 48, 60, 54, 30, 33, 54, 38, 40)$ 。根据式(11),可计算得到“油气井筒”的二级指标原始评分效用值矩阵 K_B 。

$$H_B = \begin{pmatrix} 54.0 & 80.0 & 84.0 & 40.0 & 51.0 \\ 51.0 & 66.5 & 90.0 & 47.5 & 80.0 \\ 91.2 & 68.0 & 48.0 & 73.6 & 75.6 \\ 64.0 & 85.5 & 70.5 & 76.8 & 60.0 \\ 54.0 & 72.0 & 68.4 & 72.0 & 78.9 \\ 67.5 & 30.0 & 60.0 & 76.5 & 36.0 \\ 54.0 & 48.0 & 34.0 & 81.7 & 33.0 \\ 55.9 & 90.0 & 82.8 & 54.0 & 60.0 \\ 73.1 & 38.0 & 45.0 & 90.0 & 58.5 \\ 80.0 & 64.0 & 75.6 & 81.7 & 40.0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$K_B = \begin{pmatrix} 51.89 & 76.57 & 80.36 & 38.55 & 49.03 \\ 49.03 & 63.77 & 86.04 & 45.70 & 76.57 \\ 87.18 & 65.19 & 46.18 & 70.50 & 72.40 \\ 61.39 & 81.78 & 67.56 & 73.54 & 57.59 \\ 51.89 & 68.99 & 65.57 & 68.99 & 75.48 \\ 64.72 & 29.00 & 57.59 & 73.25 & 34.73 \\ 51.89 & 46.18 & 32.82 & 78.18 & 31.87 \\ 53.70 & 86.04 & 79.22 & 51.89 & 57.59 \\ 70.03 & 36.64 & 43.32 & 86.04 & 56.17 \\ 76.57 & 61.39 & 72.40 & 78.18 & 38.55 \end{pmatrix} \quad (19)$$

根据式(12),可计算得出“油气井筒”准则层各二级指标原始评分的后悔-欣喜矩阵 M_B

$$M_B = \begin{pmatrix} -0.20 & -0.70 & -0.80 & 0 & -0.16 \\ -0.05 & -0.29 & -0.76 & 0 & -0.54 \\ -0.78 & -0.30 & 0 & -0.41 & -0.44 \\ -0.05 & -0.40 & -0.15 & -0.25 & 0 \\ 0 & -0.27 & -0.21 & -0.27 & -0.39 \\ -0.65 & 0 & -0.49 & -0.86 & -0.08 \\ -0.32 & -0.22 & -0.01 & -0.91 & 0 \\ -0.03 & -0.61 & -0.47 & 0 & -0.08 \\ -0.59 & 0 & -0.10 & -0.99 & -0.31 \\ -0.70 & -0.38 & -0.61 & -0.74 & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

根据式(12)可计算得出“油气井筒”准则层各二级指标原始评分的感知效用值矩阵 G_B

$$\mathbf{G}_B = \begin{pmatrix} 51.68 & 75.87 & 79.56 & 38.55 & 48.88 \\ 48.99 & 63.48 & 85.28 & 45.70 & 76.03 \\ 86.40 & 64.89 & 46.18 & 70.10 & 71.96 \\ 61.34 & 81.38 & 67.41 & 73.29 & 57.59 \\ 51.89 & 68.72 & 65.36 & 68.72 & 75.09 \\ 64.07 & 29.00 & 57.10 & 72.40 & 34.65 \\ 51.57 & 45.96 & 32.81 & 77.27 & 31.87 \\ 53.67 & 85.43 & 78.76 & 51.89 & 57.51 \\ 69.43 & 36.64 & 43.22 & 85.04 & 55.85 \\ 75.87 & 61.02 & 71.79 & 77.44 & 38.55 \end{pmatrix} \quad (21)$$

同理,可以计算得出“井口装置”“生产管柱”“设计参数”准则层各二级指标原始评分的感知效用矩阵 $\mathbf{G}_A$ 、 $\mathbf{G}_C$ 和 $\mathbf{G}_D$

$$\mathbf{G}_A = \begin{pmatrix} 39.65 & 47.46 & 31.86 & 33.29 & 41.39 \\ 35.33 & 39.74 & 49.37 & 52.74 & 41.13 \\ 42.08 & 36.24 & 38.12 & 48.38 & 37.42 \\ 37.44 & 49.77 & 53.48 & 39.79 & 49.27 \\ 51.55 & 48.70 & 59.94 & 51.55 & 51.55 \\ 55.67 & 59.34 & 46.95 & 58.23 & 59.89 \\ 49.26 & 48.12 & 53.11 & 54.63 & 51.53 \\ 39.76 & 36.24 & 46.68 & 51.09 & 40.22 \\ 46.51 & 57.10 & 48.99 & 54.31 & 58.22 \\ 42.48 & 52.24 & 40.74 & 44.04 & 53.42 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{G}_C = \begin{pmatrix} 32.43 & 53.56 & 37.58 & 49.00 & 27.08 \\ 50.43 & 46.15 & 53.75 & 38.54 & 50.43 \\ 27.85 & 25.17 & 34.72 & 28.99 & 27.08 \\ 51.85 & 53.75 & 46.15 & 37.58 & 48.43 \\ 22.10 & 67.03 & 69.12 & 58.69 & 46.15 \\ 37.58 & 43.30 & 61.34 & 55.27 & 36.63 \\ 37.58 & 46.15 & 60.40 & 40.06 & 46.15 \\ 30.90 & 53.75 & 50.71 & 51.85 & 45.77 \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{G}_D = \begin{pmatrix} 44.47 & 45.62 & 39.54 & 46.77 & 49.04 \\ 29.53 & 35.07 & 24.53 & 29.53 & 35.07 \\ 25.16 & 39.00 & 28.82 & 28.58 & 28.82 \\ 21.33 & 23.57 & 32.30 & 33.72 & 20.45 \end{pmatrix} \quad (24)$$

根据式(14),对“油气井筒”准则各二级指标的属性值进行加权求和,可得

$$S_B = \frac{\sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^n \omega_{2j} g_{ji}}{5} = 23.14 \quad (25)$$

式中: S_B —B结构单元下风险评估值;

w_{2j} —第二个结构单元下第 j 个指标的权重。

按照同样的步骤,可求得“井口装置”“生产管柱”“设计参数”准则层各二级指标的属性值加权求和值分别为 15.83、27.13 和 33.03。

最后根据式(15)对井口装置、油气管柱、生产管柱和设计参数的各种属性加权求和,可得到总的风险评估值为

$$S = \sum_{t=1}^4 \omega_t S_t = 26.21 \quad (26)$$

对照表 7 可知,该井整体处于低风险状态。

4.4 模型检验

为了验证基于后悔理论风险评估模型的准确性,本研究收集了气田相关资料,将 PG14 井分为井口、完井管柱及井筒 3 个部分进行完整性评价。

井口装置主要包括采气树、油管头和油管挂等部分,其作用是防止和控制地层流体的泄漏,保证气井安全生产。该井储层压力 6.3 MPa, H_2S 分压 11.64 kPa, CO_2 分压 0.25 MPa。采气树选用的材质为 EE-NL,压力等级为 35 MPa,油管头材质为 4130 碳钢,油管挂材质为 718 不锈钢,具有较强的抗腐蚀性,符合《石油天然气工业钻井和采油设备井口装置和采油树》^[38] 的相关要求。

完井管柱主要包括油管柱、变扣短接、封隔器以及其他附件和配套工具。该井完井管柱为 N80S EUE 扣油管,抗拉安全系数 2.24,抗外挤安全系数 2.35,抗内压安全系数 3.28,封隔器上下压差 17 MPa,满足安全设计要求,并具有较强的抗腐蚀性,取出油管结垢严重,腐蚀较轻微,见图 5。



图 5 PG14 井现场取出油管

Fig. 5 Field removal removal from Well PG14

井筒主要包括套管柱、固井质量和环空保护液。油层回接套管采用 N80S, TP-CQ 气密扣,抗拉安全系数 2.44,抗外挤安全系数 5.39,抗内压安

全系数 2.78, 满足安全设计要求。电磁探伤测井套管轻微腐蚀并且无明显变形。该井距离巷道 47 m, 通过地质力学模拟和数值模拟分析, 该井筒安全系数处于安全状态, 符合《套管柱强度设计方法》^[39]标准。固井质量良好, 水泥返至地面, 有效封固了地层水。现场天然气井建立有效的安全管理制度, 每三天进行一次巡检, 观察井口油压套压情况。

因此, 总体上来说 PG14 井处于低风险情况, 与风险评估结果一致。

5 煤矿开采区天然气井井筒完整性风险治理对策

通过风险评估, 确定了煤矿开采区天然气井影响井筒完整性的主控因素及风险等级, 为开展针对性的治理对策研究奠定了基础。

与常规油气井所不同的是气煤交叉开采条件下油气井完整性既受到油气井开采本身的影响, 又受到煤矿开采的影响。在这两种因素耦合作用下, 气煤交叉开采区天然气井井筒完整性要求更为严格且涉及的范围更广。因此, 气煤交叉开采区井筒完整性风险治理应该从技术、作业、管理等方面共同努力, 以确保气煤交叉开采安全进行。

1) 保持天然气井与煤矿采空区和巷道的安全距离, 避免天然气井受到煤矿开采的影响; 优选井口装置、管柱材质及耐压等级, 提高强度等级及防腐性能; 油管、油层套管及相关附件和配套工具采用气密封, 降低天然气泄漏的可能性; 井下封隔器应具有良好的抗腐蚀性能、坐封性能、解封性能、密封性能和耐温性能; 提高水泥浆顶替效率和界面胶结质量, 并返至地面, 有效封固天然气、煤和水层; 优化井身结构, 增加二级井屏障, 提高井筒抗煤矿开采的扰动能力; 在煤层以下安装井下安全阀防止有毒天然气井下泄漏进入煤层, 降低天然气井的安全生产风险。

2) 提高钻完井作业施工人员的技术素质, 严格执行作业规范, 保证施工质量。气密封管柱连接过程中应严格参照厂家推荐的上扣扭矩值, 并执行 5 根管柱进行一次氮气的气密封检测, 检测压力为管柱抗内压强度的 80%, 并稳压 15~20 s, 泄漏速度应不大于 1.0×10^{-7} (Pa·m³)/s; 所采用的变扣短节以及其他的配件应具有良好的抗腐蚀性能、气密封性能及避免电偶腐蚀, 并按照要求连接。

3) 编制气煤交叉开采方案, 有效避免天然气资源和煤矿资源开采的相互干扰; 构建法律、政策框架下的气井完整性协同管控机制, 确保井屏障系统有效性; 开展井屏障系统检查、监测、维护等控制管理, 不断调整井屏障系统的状态, 使气井完整性保持良好状态; 定期开展风险识别与评估。

6 结 论

1) 煤矿开采区天然气井完整性失效形势复杂多样, 利用 WBS-RBS 多因素耦合模型, 将井筒完整性结构划分成了井口装置、井筒、完井管柱及设计参数 4 个单元。结合构建的风险耦合矩阵, 确定了“油管(套管)悬挂器密封不严、油管(套管)腐蚀失效、油管(套管)连接密封失效、油管(套管)强度偏低、油管(套管)材质选择不合理、水泥胶结质量差、采空区或巷道与油气井采掘扰动、管理机构缺乏、操作错误及预警制度未建立”等 32 项风险评估指标。

2) 提出了基于层次分析法和熵权法组合权重系数计算方法, 该方法有效结合了现场技术专家的实践经验, 发挥了其主观能动性, 同时体现了信息数据的客观性。反映了风险因素指标体系权重的客观规律, 克服了两种方法的片面性, 使指标权重结果更接近真实情况。

3) 在风险评估矩阵的基础上, 采用后悔理论建立了风险评估模型。该模型有效克服了现场技术专家主观性评价的差异性, 体现了风险评估结果的客观性。应用实例结果表明基于后悔理论的风险评估方法所得到的风险评估等级与天然气井实际情况吻合, 说明该方法能有效指导现场风险评估工作, 真实可靠。

4) 提出了气煤交叉开采条件下含硫天然气井的治理对策, 应该从技术、作业和管理等方面共同努力, 以确保气煤交叉开采安全进行。

参考文献

- [1] 杨利伟, 王毅, 王传刚, 等. 鄂尔多斯盆地多种能源矿产分布特征与协同勘探[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 579-586. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2010.04.014
YANG Liwei, WANG Yi, WANG Chuangang, et al. Distribution and co-exploration of multiple energy minerals

- in Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(4): 579–586. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2010.04.014
- [2] 张智, 何雨, 王一婷, 等. 含硫气井井筒完整性风险评价研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(4): 101–107. doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.04.017
ZHANG Zhi, HE Yu, WANG Yiting, et al. Research on risk evaluation of well integrity for sour gas wells[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(4): 101–107. doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.04.017
- [3] 周仕明, 陆沛青. 井筒密封完整性监测与智能感知技术进展与展望[J]. *石油钻探技术*, 2024, 52(5): 35–41. doi: 10.11911/syztjs.2024097
ZHOU Shiming, LU Peiqing. Advancements and prospects of monitoring and intelligent perception technology for wellbore sealing integrity[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(5): 35–41. doi: 10.11911/syztjs.2024097
- [4] 刘国荣. 基于两轮内检测数据挖掘的管道完整性评价技术[J]. *世界石油工业*, 2023, 30(5): 62–68. doi: 10.20114/j.issn.1006-0030.20230627001
LIU Guorong. Pipeline integrity evaluation technology based on two-round internal detection data mining[J]. *World Petroleum Industry*, 2023, 30(5): 62–68. doi: 10.20114/j.issn.1006-0030.20230627001
- [5] 方俊伟, 贾晓斌, 游利军, 等. 深层断溶体油气藏钻完井储层保护技术挑战与对策[J]. *断块油气田*, 2024, 31(1): 160–167. doi: 10.6056/dkyqt202401020
FANG Junwei, JIA Xiaobin, YOU Lijun, et al. Challenges and countermeasures for reservoir protection in deep fault-karst reservoirs during drilling and completion[J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2024, 31(1): 160–167. doi: 10.6056/dkyqt202401020
- [6] 丁士东, 陆沛青, 郭印同, 等. 复杂环境下水泥环全生命周期密封完整性研究进展与展望[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(4): 104–113. doi: 10.11911/syztjs.2023076
DING Shidong, LU Peiqing, GUO Yintong, et al. Progress and prospect on the study of full life cycle sealing integrity of cement sheath in complex environments[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4): 104–113.
- [7] 霍宏博, 刘东东, 陶林, 等. 基于 CO₂ 提高采收率的海上 CCUS 完整性挑战与对策[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(2): 74–80. doi: 10.11911/syztjs.2023009
HUO Hongbo, LIU Dongdong, TAO Lin, et al. Integrity challenges and countermeasures of the offshore CCUS based on CO₂-EOR[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(2): 74–80. doi: 10.11911/syztjs.2023009
- [8] 马国锐, 许红林, 张智, 等. 注水井管柱完整性评价及注水参数优化研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(1): 143–150. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2020.04.24.01
MA Guorui, XU Honglin, ZHANG Zhi, et al. Pipe string integrity evaluation and water injection parameter optimization for injection wells[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2022, 44(1): 143–150. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2020.04.24.01
- [9] 王兵, 杨小莹, 赵春兰, 等. 基于贝叶斯网络的钻井作业现场风险评估[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 37(2): 131–137. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2014.09.01.02
WANG Bing, YANG Xiaoying, ZHAO Chunlan, et al. Drilling site risk assessment based on bayesian network[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2015, 37(2): 131–137. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2014.09.01.02
- [10] 刘铭刚, 李勇, 王廷春, 等. 基于 M-C 方法的复杂气井井筒完整性失效因素不确定性分析[J]. *安全、健康和环境*, 2019, 19(8): 44–48. doi: 10.3969/j.issn.1672-7932.2019.08.010
LIU Minggang, LI Yong, WANG Tingchun, et al. Uncertainty analysis of wellbore integrity failure factors based on M-C method for complex gas wells[J]. *Safety, Health and Environment*, 2019, 19(8): 44–48. doi: 10.3969/j.issn.1672-7932.2019.08.010
- [11] Norwegian Oil and Gas Association. OLF commended guidelines for well integrity: Offshore Norge[S]. Stavanger: Standard Nore, 2017.
- [12] LØKKE-SØREN T. Well integrity in drilling and well operations: NORSOK D-010[S]. Stavanger: Standard Nore, 2013.
- [13] American Petroleum Institute. Deepwater well design and construction: API RP 96—2013[S]. 1st Ed. API Publishing Services, 2013.
- [14] 刘铭刚, 王廷春, 李勇, 等. 复杂气井井筒完整性量化分级评价方法[J]. *中国矿业*, 2019, 28(10): 168–174.
LIU Minggang, WANG Tingchun, LI Yong, et al. Quantitative grading evaluation method for complex gas wellbore integrity[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(10): 168–174.
- [15] 张智, 周延军, 付建红, 等. 含硫气井的井筒完整性设计方法[J]. *天然气工业*, 2010, 30(3): 67–69, 133. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.03.017
ZHANG Zhi, ZHOU Yanjun, FU Jianhong, et al. A method of well integrity design for sour gas wells[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(3): 67–69, 133. doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.03.017
- [16] 周松民, 李军伟, 李瑾, 等. 基于权重分析法的海洋弃置井井筒完整性评价方法建立[J]. *钻采工艺*, 2019, 42(2): 10–13. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2019.02.03
ZHOU Songmin, LI Junwei, LI Jin, et al. Evaluation of in-

- tegrity of offshore abandon wells based on weighting analysis[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(2): 10–13. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2019.02.03
- [17] 张绍辉, 张成明, 潘若生, 等. CO₂ 驱注入井井筒完整性分析与风险评估[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(6): 90–95. doi: 10.3969/j.issn.1673-064X.2018.06.014
- ZHANG Shaohui, ZHANG Chengming, PAN Ruosheng, et al. Integrity analysis and risk assessment of wellbore in CO₂ flooding[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2018, 33(6): 90–95. doi: 10.3969/j.issn.1673-064X.2018.06.014
- [18] 何汉平. 油气井井筒完整性系统风险评估方法[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(3): 72–76. doi: 10.11911/syztjs.-201703013
- HE Hanping. Techniques for systematic risk assessment of borehole integrity of oil and gas wells[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2017, 45(3): 72–76. doi: 10.11911/syztjs.201703013
- [19] 何雨, 郑友志, 夏宏伟, 等. 井筒完整性风险评价模型研究[J]. 钻采工艺, 2020, 43(S1): 12–16. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2020.增.04
- HE Yu, ZHENG Youzhi, XIA Hongwei, et al. Study on risk assessment model for wellbore integrity[J]. *Drilling & Production Technology*, 2020, 43(S1): 12–16. doi: 10.3969/J.ISSN.1006-768X.2020.增.04
- [20] 孙莉, 樊建春, 孙雨婷, 等. 气井完整性概念初探及评价指标研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(10): 79–84. doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.10.014
- SUN Li, FAN Jianchun, SUN Yuting, et al. Discussion on concept and evaluation index of gas well integrity[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(10): 79–84. doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.10.014
- [21] 张智, 宋闯, 冯潇霄, 等. 井筒屏障完整性及其优化设计——以 CO₂ 吞吐井为例[J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(3): 318–328. doi: 10.13639/j.odpt.2019.03.010
- ZHANG Zhi, SONG Chuang, FENG Xiaoxiao, et al. Wellbore barrier integrity and design optimization: A case study on CO₂ huff and puff well[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(3): 318–328. doi: 10.13639/j.odpt.2019.03.010
- [22] 胡顺渠, 陈琛, 史雪枝, 等. 川西高温高压气井井筒完整性优化设计及应用[J]. 海洋石油, 2011, 31(2): 82–85. doi: 10.3969/j.issn.1008-2336.2011.02.082
- HU Shunqu, CHEN Chen, SHI Xuezhi, et al. Optimal design of well integrity and its application in HPHT gas well in western region of Sichuan[J]. *Offshore Oil*, 2011, 31(2): 82–85. doi: 10.3969/j.issn.1008-2336.2011.02.082
- [23] MOHAMMED A I, OYENEYIN B, ATCHISEN B, et al. Casing structural integrity and failure modes in a range of well types — A review[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 68: 102898. doi: 10.1016/j.jngse.-2019.05.011
- [24] DETHLEFS J, CHASTAIN B. Assessing well integrity risk: A qualitative model[C]. *Proceedings of SPE/ICo TA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition*, 2011: 256–266.
- [25] LI Q, QIAN H, PEI J, et al. Safety risk analysis of bridge rhombic hanging basket construction based on WBS-RBS and rough set theory[J]. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020, 780(7): 072033. doi: 10.1088/1757-899X/780/7/072033
- [26] 李强, 武治强, 何英明, 等. 海上气井环空带压管理方案研究及应用[J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 140–146. doi: 10.11935/j.issn.1673-1506.2019.03.017
- LI Qiang, WU Zhiqiang, HE Yingming, et al. Research and application of management program for annular pressure in offshore gas wells[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2019, 31(3): 140–146. doi: 10.11935/j.issn.1673-1506.2019.03.017
- [27] 周延, 余敦先, 夏军, 等. 基于水文水动力模型的 LID 措施对城市内涝风险的影响研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2022, 55(11): 1090–1101. doi: 10.14188/j.1671-8844.202211002
- ZHOU Yan, SHE Dunxian, XIA Jun, et al. Study on the risk of LID measures based on the hydrological hydrodynamic model[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2022, 55(11): 1090–1101. doi: 10.14188/j.1671-8844.202211002
- [28] 刘刚, 金业权. 层次分析法在井控风险可控诱因分析中的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(2): 137–141. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.-2011.02.024
- LIU Gang, JIN Yequan. The application of AHP method in well control risk evaluation by controllable factor analysis[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2011, 33(2): 137–141. doi: 10.3863/j.issn.1674-5086.2011.02.024
- [29] WANG Tao, CHEN Jiansheng, WANG Ting, et al. Entropy weight-set pair analysis based on tracer techniques for dam leakage investigation[J]. *Natural Hazards*, 2014, 76: 747–767. doi: 10.1007/s11069-014-1515-7
- [30] 王庆栋, 汪鹏飞, 王子帅, 等. 冲积扇油气管道坡面侵蚀灾害因子分析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2018, 40(6): 157–164. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2017.12.08.01
- WANG Qingdong, WANG Pengfei, WANG Zishuai, et al. Analysis of disaster factors of slope erosion for oil and gas pipelines crossing alluvial fans[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*,

- 2018, 40(6): 157–164. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.-2017.12.08.01
- [31] 卫宇杰, 于博文, 潘浩, 等. 基于组合赋权法的中国物流业质量发展指数研究[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(2): 190–197. doi: 10.19495/j.cnki.1007-5429.2019.-02.025
- WEI Yujie, YU Bowen, PAN Hao, et al. Research on quality development index of China's logistics industry based on combination weighting method[J]. Industrial Engineering and Management, 2019, 24(2): 190–197. doi: 10.19495/j.cnki.1007-5429.2019.02.025
- [32] 梁缘毅, 吕爱锋. 中国水资源安全风险评价[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 775–789. doi: 10.18402/resci.2019.-04.14
- LIANG Yuanyi, LÜ Aifeng. Risk assessment of water resources security in China[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 775–789. doi: 10.18402/resci.2019.04.14
- [33] 谭春桥, 张晓丹. 基于后悔理论的不确定风险型多属性决策 VIKOR 方法[J]. 统计与决策, 2019, 35(1): 47–51. doi: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2019.01.010
- TAN Chunqiao, ZHANG Xiaodan. VIKOR method for uncertain risky multi-attribute decision making based on regret theory[J]. Statistics and Decision, 2019, 35(1): 47–51. doi: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2019.01.010
- [34] 涂圣文, 赵振华, 邓梦雪, 等. 基于组合赋权-后悔理论的城市综合管廊运维总体风险评估[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(6): 160–167. doi: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2020.06.023
- TU Shengwen, ZHAO Zhenhua, DENG Mengxue, et al. Overall risk assessment for urban utility tunnel during operation and maintenance based on combination weighting and regret theory[J]. Safety and Environmental Engineering, 2020, 27(6): 160–167. doi: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2020.06.023
- [35] 中国船级社. 油气定量风险评估指南[EB/OL]. (2020–06–01) [2023–11–05]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/file/download?fileid=202403250445833296>.
- China Classification Society. Guidelines for oil and gas quantitative risk assessment[EB/OL]. (2020–06–01) [2023–11–05]. <https://www.ccs.org.cn/ccswz/file/download?fileid=202403250445833296>.
- [36] 陈晓, 张贵峰, 张巍, 等. 基于风险矩阵的输电线路直升机巡检作业安全风险评价方法[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 58–64. doi: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2015.11.009
- CHEN Xiao, ZHANG Guifeng, ZHANG Wei, et al. Risk matrix based safety risk assessment of overhead line helicopter patrol inspections[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 58–64. doi: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2015.11.009
- [37] 郭隆鑫, 李希建, 刘柱. 基于后悔理论-集对势分析的矿山紧急避险系统安全评价[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(4): 85–90.
- GUO Longxin, LI Xijian, LIU Zhu. Safety evaluation of mine emergency system based on regret theory and set pair potential analysis[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(4): 85–90.
- [38] 国家标准化委员会. 石油天然气钻采设备—井口装置和采油树: GB/T 22513—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- National Standardization Management Committee. Petroleum and natural gas drilling and production equipment—Wellhead and tree equipment: GB/T 22513—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [39] 国家石油和化学工业局. 套管柱强度设计方法: SY/T 5322—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- State Bureau of Petroleum and Chemical Industry. Design method of casing string strength: SY/T 5322—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

作者简介



郭润生, 1971 年生, 男, 汉族, 山西晋中人, 高级工程师, 博士, 主要从事煤与天然气协同共采风险管理方面的研究工作。E-mail: grs666@163.com



余晓钟, 1961 年生, 男, 汉族, 四川广安人, 教授, 博士, 主要从事能源工程管理方面的研究工作。E-mail: 2637415033@qq.com



高斐, 1982 年生, 男, 汉族, 湖北孝感人, 讲师, 博士, 主要从事岩石力学与钻井工程方面的研究工作。E-mail: fgat163@163.com

编辑: 王旭东

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>