

Study on influencing factors and evaluation methods of safe operation of depleted oil and gas reservoir storage

Yang Xiang¹ Ye Zhang^{2,3} Liming Ouyang^{2,3,4} Han Wang¹ Qing Hua¹

1. China Southwest Oil and Gas Field Company Chongqing Gas Mine, Chongqing, 401120, China

2. Key Laboratory of Shale Gas Exploration, Ministry of Natural Resources / Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing, 401120, China

3. National-Local Joint Engineering Research Center for Shale Gas Exploration and Development / Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing, 401120, China

4. Chongqing Huadi Zihuan Technology Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

Abstract

As a critical component of China's national natural gas strategic reserve system, underground gas storage facilities play an irreplaceable role in emergency peak-shaving and ensuring supply security. Their stable operation is vital to national economic development, public welfare, and social stability. This study focuses on analyzing two key factors affecting the safe operation of gas storage: fault sealing integrity and caprock sealing performance. Separate safety evaluation systems were established to assess the geological safety of gas storage facilities in Tongluoxia and Huangcaoxia gorges. The results demonstrate that the developed evaluation framework can be effectively applied to both construction and operational phases of gas storage projects. It enables early-stage geological safety assessments for target blocks and provides precise recommendations for optimal site selection during facility development.

Keywords

gas storage; fault sealing; cap sealing; evaluation method

枯竭油气藏储气库地质安全运行影响因素及评价方法研究

向阳¹ 张焯^{2,3} 欧阳黎明^{2,3,4} 王涵¹ 华青¹

1. 中国石油西南油气田公司重庆气矿, 中国·重庆 401120

2. 自然资源部页岩气勘探重点实验室 / 重庆地质矿产研究院, 中国·重庆 401120

3. 页岩气勘探开发国家地方联合工程研究中心 / 重庆地质矿产研究院, 中国·重庆 401120

4. 重庆华地资环科技有限公司, 中国·重庆 401120

摘要

地下储气库作为国家天然气战略储备系统的关键组成部分,在应急调峰与保障供应安全方面发挥着不可替代的作用,其稳定运行关乎国计民生与社会稳定。本文聚焦研究影响储气库安全运行的影响因素:断层封闭性和盖层密封性。并分别建立了安全评价体系,以铜锣峡与黄草峡两峡地区的储气库进行地质安全运行评价。结果表明,本文所建立的评价体系能够很好的应用到储气库的建设与运行中去,能够对建库目标区块提前做好地质安全运行评价,对储气库的建设选址给出精准的建议。

关键词

储气库; 断层封闭性; 盖层密封性; 评价方法

【基金项目】重庆市科技局绩效激励引导专项“川东双层含硫储气库安全监测及评价关键技术研究”(项目编号: CSTB2024JXJL-YFX0014)。

【作者简介】向阳(1993-),女,本科,工程师,从事气藏开发研究。

【通讯作者】张焯(1976-),男,博士,正高级工程师,从事非常规油气勘探开发技术研究。

1 引言

作为国家天然气战略储备、应急调峰的重要手段,地下储气库的建设和安全运行关系重大。相较于地面球罐等储存方式,地下储气库表现出以下显著优势:储气规模大、调度灵活、调峰能力突出;虽建设成本较高,但具有更长的使用寿命(通常可达30至50年甚至更长),经济性较为合理;同时安全性能远高于地面设施,具备较高的安全系数。进

入 21 世纪以来,我国天然气消费量保持年均 16% 以上的增长率。随着低碳经济模式的推进,天然气在能源结构中的主导地位日益明确。数据显示,2016 年全国天然气消费量达 2058 亿立方米,较 2015 年增长 150 亿立方米。预计在 2030 年前,我国天然气的生产、进口和消费仍将处于增长阶段,2030 年需求规模预计将达到约 3500 亿立方米。面对如此巨大的消费需求,若缺乏配套的储备与应急供气体系,一旦发生大规模“气荒”,其可能带来的社会与经济影响将不可估量。根据欧美等天然气利用较为成熟国家的经验,通常需建立相当于年消费量 10%–15% 的工作气量规模的储气库系统,以作为调峰和应急保障的核心手段^[1]。

2 储气库发展现状

2.1 储气库建设与运行现状

目前全球共有 693 座地下储气库,按其地质构造及建成特点,可划分为四种主要类型:枯竭油气藏型、含水层型、盐穴型及废弃矿坑型。枯竭油气藏储气库是目前应用最广泛且经济性较高的一种储气形式,通常利用已枯竭的油田或气田改建而成,具有建设成本低、运行稳定性好的优点。该类储气库在全球共计 558 座以上,约占地下储气库总数的 80.52%。含水层储气库是通过将高压气体注入具备封盖条件的含水层中,驱替孔隙水从而形成储气空间。该类储气库规模通常较大,是除枯竭油气藏外应用最多的一种地下储气形式。全球现有含水层储气库 80 余座,约占总数的 11.54%。盐穴储气库则通过水溶采盐方式在地下盐层中人造腔体,用于储存天然气。其单库容积通常远小于前述两种类型,且因造腔周期长、建设工艺复杂,单位容量的造价较高。但其优点在于储气效率高、注采响应速度快,且垫层气可完全回收。目前全球共有 44 座盐穴储气库,占比约 6.35%。废弃矿坑储气库利用符合地质条件的废弃矿井改造而成,实际数量较少,主要受限于原有结构的安全性、密封性及经济可行性等因素^[2]。

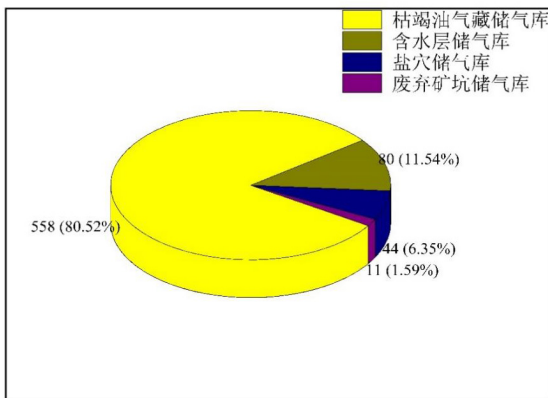


图 1 世界储气库现有数量及分类占比

2.2 储气库运行地质安全评价现状

地下储气库系统在运行过程中面临多种潜在风险,如

腐蚀、设备失效、冲蚀、水合物形成、机械损伤、自然灾害以及人为操作失误等,这些因素均可能削弱储气库的稳定性与安全可靠,甚至在极端情况下引发严重事故。据统计,国外储气库在运营期间共记录到 558 起事故,其中枯竭油气藏型、含水层型、盐穴型及废弃矿坑型储气库分别发生 104 起、66 起、358 起和 22 起,另有 5 起事故所属类型未明确。因此,必须高度重视注采井及储气库本体的安全防控,采取有效措施以降低各类危害因素的影响,预防事故的发生,并建立系统化的预防性维护体系,实现事前风险管控,已成为行业亟待解决的关键问题^[3]。

目前,国际已逐步形成较为完备的储气库设计与评价体系,涵盖从废弃油气藏改建储气库的评估方法到设计与运行的全流程技术体系。美国、加拿大等国已出台专门针对地下储气库建设的法律法规与技术标准;我国也相继制定了《油气藏型地下储气库安全技术规程》《盐穴地下储气库安全技术规程》等一系列行业规范,推动储气库建设的标准化与规范化。

尽管我国在气藏改建地下储气库技术方面已初步形成技术系列,但在部分关键技术仍处于持续研发与优化阶段。总体来看,我国储气库建设起步较晚、运营时间较短、实践经验相对有限,尤其在安全运行配套技术方面尚不能完全适应现阶段储气库快速发展的需求,亟需系统性地加强技术研发和工程应用能力^[4]。

3 储气库安全运行影响因素

储气库运行过程中,地层压力系统动态变化,会对断层、盖层的密封性产生影响,需要开展相关研究。

3.1 断层密封性影响因素

在储气库运行过程中,周期性大流量的注采气会导致断层带远场和近场断层带两侧地层孔隙压力、有效应力发生频繁变化,注气过程中气水渗流导致原始地层水与拟断层发生复杂的水化反应,断层带的物性特征(孔渗特性)发生改变,当断层面的剪应力超过抗剪强度时,断层会发生剪切滑移破坏。先存断层的力学失稳与气体泄漏变化既受控于工程因素(流体注入速率与注入量、注入井距断层的位置等),又受地质条件和地质力学特征控制(包含储层岩石的物理力学性质、断层的展布与几何形态、断层带的物理性质、断层所在的区域地应力状态等),因此,明确地质因素和工程因素对断层带力学特征和渗流特征的影响机理是制定储气库优化注采方案,确保安全高效注采的关键^[5]。

表 1 断层密封性影响因素表

| | |
|------|--|
| 地质因素 | 储层物理力学性能的影响、区域地应力状态的影响、断层带的孔渗特性影响(①断层核的渗透性、②断层破碎带的渗透性) |
| 工程因素 | 注采速率、注采井距离断层位置的影响、注采作业制度 |

3.2 盖层密封性影响因素

物性封闭是盖层岩石封闭油气的根本机理，主要是依靠岩石自身的各种性质，如：盖层岩石结构致密、孔隙连通性差、规模比较大，来实现对气体的封闭。烃浓度封闭和超压封闭是岩石的另外两种密封机理，它们都需要依靠物性封闭才能更好的发挥作用。因此评价盖层的物性封闭能最根本的问题是评价盖层密封性能力，目前在评价岩石物性封闭能力时，主要就是围绕着岩石的突破压力实验开展，但是突破压力本身受到岩石的孔渗特性、中值半径、比表面积、盖层岩性等多种条件的影响。因此，储气库的盖层突破压力评价不应该局限于盖层密封性，也需要对影响盖层突破压力的其他各种因素进行综合分析，从而建立系统性的储气库盖层密封性机理和评价方法^[6]。

枯竭油气藏储气库的密封性能取决于盖层的密封性能。由于天然气的低密度，密封失效通常位于盖层中。储气库盖层一般是一种致密砂岩、粘土岩、膏岩和碳酸盐岩。盖层是使天然气稳定地储存在地下而不逸出或泄漏的关键部分^[7]。因此，储气库的封闭性评价必须以盖层封闭性研究为基础。从盖层封闭性能的角度来看，影响盖层封闭性能的因素可分为微观因素和宏观因素^[8]。

表 2 盖层密封性影响因素表

| | |
|------|-----------------------------|
| 微观因素 | 突破压力、孔隙度和渗透率、比表面积、中值半径、扩散系数 |
| 宏观因素 | 盖层厚度、盖层连续性、盖层韧性、沉积环境、埋深 |

3.2.1 微观因素

从盖层的微观角度分析，盖层的孔隙度、渗透率、突破压力、中值半径等都会影响到盖层的密封性，其中孔隙度

对盖层密封性的影响较小，渗透率和突破压力对盖层密封性的影响最大，并且大量研究表明，渗透率与突破压力之间存在着特定的函数关系，由于开展突破压力实验常用的驱替法在对密封性较好的岩样进行测试时耗时较长，所以可以直接测试岩样的渗透率，然后根据突破压力与渗透率的关系推断突破压力的大体范围。

3.2.2 宏观因素

从盖层的宏观因素分析，盖层的平均厚度、盖层的力学性质、断层等影响是应该封闭盖层的宏观因素^[9]。如果盖层厚度太薄，盖层下的气体压力可能突破盖层，可能导致封闭失败。同时，断层也是反映盖层封闭性能的关键指标。地质构造的差异可能导致盖层遭遇断层，断层切割盖层的深度会导致盖层封闭性能的差距较大。如果断层只是切入盖层内部，没有造成穿透，盖层的封闭性会在断层上部与盖层的汇合点聚集气体，不会对盖层的封闭性造成致命的破坏。如果断层穿过盖层，盖层的封闭性就会失效，气体就会沿着断层逸出到上覆地层中。盖层的岩性也会影响盖层的封闭性，岩石的不同矿物成分会影响岩石的毛细管力，进而影响盖层的封闭性^[10]。

4 储气库安全运行评价

面对储气库稳定性和安全性低，储气库运行过程中事故多发，甚至引发自然灾害的窘迫现状，如何有效、精确的评价储气库运行情况显得尤为重要，本文根据铜锣峡相关资料，对储气库所在圈闭内的盖层和断层进行归纳总结，分析断层与盖层在运行过程中的稳定性，并结合储气库所在区的地震活动特征，由此对储气库运行安全进行综合评价^[11]。

表 3 盖层密封性影响因素等级划分表

| 微观因素等级划分 | | | | | |
|--------------------------|--------|-----------|-----------|---------------|-----------|
| 等级 | I | II | III | IV | V |
| 突破压力 /MPa | 5-15 | 15-25 | 25-40 | 40-60 | > 60 |
| 孔隙度 /% | < 3 | 3-10 | 10-20 | 20-25 | > 25 |
| 渗透率 /mD | < 10-5 | 10-5~10-4 | 10-4~10-3 | 10-3~10-2 | 10-2~10-1 |
| 比表面各 /m ² /g | 15-30 | 30-40 | 40-60 | 60-90 | > 90 |
| 扩散系数 /cm ² /s | 10-9 | 10-8~10-8 | 10-8~10-7 | 10-7~10-6 | > 10-6 |
| 宏观因素等级划分 | | | | | |
| 等级 | I | II | III | IV | V |
| 厚度 /m | > 170 | 100-170 | 50-100 | 15-50 | < 15 |
| 连续性 /km ² | > 50 | 25-50 | 15-25 | 10-25 | < 10 |
| 岩性 (粘土矿物含量 %) | 盐岩 | 膏岩 | N > 50% | 50% > N > 20% | N < 20% |

4.1 储气库断层封闭性评价

通过对国内外学者研究成果的调研，可将断层封闭性研究方法归纳为以下几类：基于地震资料分析的方法（如地震速度频谱识别法）、基于测井响应的方法（如声波时差法）、基于流体分布的方法（如油水界面法）、基于力学机制的方法（如

断层应力分析法）、基于岩性及变形特征的方法（如断层面物质涂抹法、岩性配置识别法）、基于物化参数的方法（如物化性质指示法、断层横向封闭系数法），以及基于生产动态数据的动态分析法。这些方法各有其适用条件与局限性，需结合实际地质背景与数据基础进行选择和应用^[12]。

4.1.1 断层静态密封性评价

针对铜锣峡与黄草峡储气库采用岩性配置识别法与断层物质涂抹法进行了断层静态封闭性评价。根据地层层序结合地震剖面解释分析边界断层上盘长兴组对应下盘飞仙关组岩性为致密灰岩、泥页岩，为非渗透层，两盘岩性配置有利于断层封堵；根据断层物质涂抹分析法，分析泥岩厚度、断层SGR（泥岩比率）值，根据评价指标里的SGR值取值标准，进行封闭性评价^{[13][14]}。

表4 目标区块断层静态密封性评价

| 控藏断层 | 泥岩厚度/m | SGR值/% (> 70, 好; 50~70, 较好) | 评价 |
|------|--------|---------------------------------|----|
| 断层 A | 63~80 | 57~82 | 较好 |
| 断层 B | 56~85 | 54~83 | 较好 |

两种方法综合判断，铜锣峡储气库便捷断层封闭性好。

4.1.2 断层动态密封性评价

(1) 建立断层动态密封性评价指标体系

参考国内外在油气藏断层评价标准、枯竭油气藏型储气库评价、含水层型储气库选址评价标准等，依据地震、测

井和试井等现场测试成果，将断层带岩性、断层环境条件、断层力学因素、断层产状、断层滑移和注采制度这六个方面作为一级准则层，细分为14个二级评价指标(包括岩性对置、泥岩涂抹因子、盖层脆塑性、圈闭垂向密封性、储层横向连续性、盖层破坏程度系数、断层类型、闭合程度、断面倾角、断距、滑移距离、断层核渗透性、注气压力上限、注气压力下限)，利用层次分析法，通过对断层各评价指标分级赋值，得到断层的密封性等级，初步构建了气藏储气库断层封闭性评价指标体系^{[15][16]}，交变载荷下气藏储气库断层封闭性评价指标体系见表5。

(2) 构建交变载荷下断层动态封闭性各级判断矩阵

通过调研国内外流体注采相关工程中断层封闭性问题，结合选址评价指标体系和断层密封性评价经验值得到指标层权重系数，获取同级影响因素间相对重要性比值，构建交变载荷下断层动态封闭性各级判断矩阵，交变载荷下断层动态封闭性质量判断得分见表6。

(3) 进而计算出各评价指标的具体权重值

绘制各指标具体权重值，交变载荷下断层封闭性各评价指标的权重值见表7。

表5 交变载荷下气藏储气库断层封闭性评价指标体系

| 评价分类 | 评价指标 | 等级划分 | | | |
|--------|--------------|------------|---------------|----------------------|------------|
| | | 好 (j=4) | 较好 (j=3) | 中等 (j=2) | 差 (j=1) |
| 断层带岩性 | 岩性对置 | 砂岩与泥岩对接 | 砂岩与低渗透地层对接 | 不同时代砂岩对接 | 砂岩与同期砂岩对接 |
| | 泥岩涂抹因子 | < 1.25 | 1.25~2.5 | 2.5~4 | > 4 |
| | 盖层脆塑性 | 塑性能力强 | 塑性较强 | 脆塑性 | 脆性 |
| 断层环境条件 | 圈闭垂向密封性 | 强 | 较强 | 一般 | 差 |
| | 储层横向连续性 | 好 | 较好 | 一般 | 差 |
| | 盖层破坏程度系数 | > 0.75 | 0.5~0.75 | 0.25~0.5 | < 0.25 |
| 断层力学因素 | 断层类型 | 压扭性、压性 | 扭性、同生逆断层 | 张扭性、正断层 | 张性断裂 |
| | 闭合程度 | 强 | 较强 | 一般 | 差 |
| 断层产状 | 断面倾角 (°) | < 30 | 30°~45° | 45°~60° | > 60° |
| | 断距 (m) | < 15 | 15~120 | 120~210 | > 210 |
| 断层滑移 | 滑移距离 | << H/sin θ | < 0.5*H/sin θ | 0.5*H/sin θ ~H/sin θ | >> H/sin θ |
| | 断层核渗透性 (mD) | < 0.001 | 0.001~0.01 | 0.01~0.1 | > 0.1 |
| 注采制度 | 注气压力上限 (MPa) | 压差 < 3 | 3 < 压差 < 6 | 9 < 压差 < 12 | 压差 > 12 |
| | 注气压力下限 (MPa) | 压差 < 3 | 3 < 压差 < 6 | 9a < 压差 < 12 | 压差 > 12 |

注：H 为注入储层段的上层面与断层交界点到断层另一侧渗透层底界面的垂直高度；θ 为断层的倾角。

表 6 交变载荷下断层动态封闭性质量判断得分

| 准则层 | 指 标 | 指标序号 i | 得分 | | | |
|-----------|-----------------|--------|-----|-----|-----|-----|
| | | | j=4 | j=3 | j=2 | j=1 |
| 断层带岩性 B1 | 岩性对置 C1 | 1 | 7 | 4 | 3 | 1 |
| | 泥岩涂抹因子 C2 | 2 | 5 | 4 | 3 | 1 |
| | 盖层脆塑性 C3 | 3 | 7 | 4 | 3 | 1 |
| 断层环境条件 B2 | 圈闭垂向密封性 C4 | 4 | 7 | 3 | 3 | 1 |
| | 储层横向连续性 C5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 1 |
| | 盖层破坏程度系数 C6 | 6 | 7 | 5 | 3 | 1 |
| 断层力学因素 B3 | 断层类型 C7 | 7 | 7 | 5 | 3 | 1 |
| | 闭合程度 C8 | 8 | 7 | 5 | 3 | 1 |
| 断层产状 B4 | 断面倾角 (°) C9 | 9 | 5 | 5 | 3 | 1 |
| | 断距 (m) C10 | 10 | 5 | 5 | 3 | 1 |
| 断层滑移 B5 | 滑移距离 C11 | 11 | 7 | 5 | 3 | 1 |
| | 断层核渗透性 (mD) C12 | 12 | 7 | 5 | 3 | 1 |
| 注采制度 B6 | 注气压力上限 C13 | 13 | 7 | 5 | 3 | 1 |
| | 注气压力下限 C14 | 14 | 7 | 5 | 3 | 1 |

表 7 交变载荷下断层封闭性各评价指标的权重值

| 准则层 | 准则层权重值 | 指 标 | 指标层在相应的准则层内权重 | 指标层总体权重 (wi) |
|-----------|--------|-----------------|---------------|--------------|
| 断层带岩性 B1 | 0.15 | 岩性对置 C1 | 0.3 | 0.045 |
| | | 泥岩涂抹因子 C2 | 0.4 | 0.06 |
| | | 盖层脆塑性 C3 | 0.3 | 0.045 |
| 断层环境条件 B2 | 0.15 | 圈闭垂向密封性 C4 | 0.3 | 0.045 |
| | | 储层横向连续性 C5 | 0.3 | 0.045 |
| | | 盖层破坏程度系数 C6 | 0.4 | 0.06 |
| 断层力学因素 B3 | 0.2 | 断层类型 C7 | 0.4 | 0.08 |
| | | 闭合程度 C8 | 0.6 | 0.12 |
| 断层产状 B4 | 0.1 | 断面倾角 (°) C9 | 0.4 | 0.04 |
| | | 断距 (m) C10 | 0.6 | 0.06 |
| 断层滑移 B5 | 0.2 | 滑移距离 C11 | 0.5 | 0.1 |
| | | 断层核渗透性 (mD) C12 | 0.5 | 0.1 |
| 注采制度 B6 | 0.2 | 注气压力上限 C13 | 0.5 | 0.1 |
| | | 注气压力下限 C14 | 0.5 | 0.1 |

(4) 目标断层动态密封性评价

依据铜锣峡与黄草峡储气库区块地震、测井和试井等测试结果,对断层各指标进行分级打分,通过归一化得到密封性量化参数。等级划分标准分为四级,其中 0~0.25 为高风险、0.25~0.50 为较高风险、0.50~0.75 是较低风险和 0.75~1.0 则为安全。目标断层动态密封性评价见表 8。

结果显示,铜锣峡储气库得分为 0.781,黄草峡得分为 0.681,根据指标标准,铜锣峡储气库断层为安全,黄草峡

储气库为较低风险^[17]。

4.2 盖层密封性评价方法

4.2.1 盖层静态密封性评价

按照天然气封盖层封闭能力分级评价标准对目标盖层进行密封性评价,综合黄草峡盖层厚度、孔隙度、渗透率、排替压力、微观结构、孔隙结构、突破压力与扩散系数等指标分析,盖层总体为 I 类盖层,封闭能力强。天然气封盖层封闭能力分级评价标准见表 9。

表 8 目标断层动态密封性评价

| 准则层 | 指标 | 铜锣峡储气库 | | 黄草峡储气库 | |
|-----------|------------|--------|----------|--------|----------|
| | | 指标层得分 | 指标层归一化得分 | 指标层得分 | 指标层归一化得分 |
| 断层带岩性 B1 | 岩性对置 | 7 | 0.045 | 7 | 0.045 |
| | 泥岩涂抹因子 | 4 | 0.048 | 4 | 0.048 |
| | 盖层脆塑性 | 4 | 0.026 | 4 | 0.026 |
| 断层环境条件 B2 | 圈闭垂向密封性 | 7 | 0.045 | 7 | 0.045 |
| | 储层横向连续性 | 5 | 0.045 | 3 | 0.027 |
| | 盖层破坏程度系数 | 7 | 0.060 | 5 | 0.043 |
| 断层力学因素 B3 | 断层类型 | 5 | 0.057 | 5 | 0.057 |
| | 闭合程度 | 5 | 0.086 | 5 | 0.086 |
| 断层产状 B4 | 断面倾角(°) | 3 | 0.024 | 5 | 0.040 |
| | 断距(m) | 5 | 0.060 | 3 | 0.036 |
| 断层滑移 B5 | 滑移距离 | 5 | 0.071 | 5 | 0.071 |
| | 断层核渗透性(mD) | 5 | 0.071 | 3 | 0.043 |
| 注采制度 B6 | 注气压力上限 | 5 | 0.071 | 5 | 0.071 |
| | 注气压力下限 | 5 | 0.071 | 3 | 0.043 |
| 合计得分 | | 0.781 | | 0.681 | |

表 9 天然气封盖层封闭能力分级评价标准

| 孔隙度 | > 7% | > 7% | > 5% | > 2% | 1.5% |
|-----------|------|------|------|------|-------|
| 绝对渗透率(mD) | 10 | 1.0 | 0.1 | 0.01 | 0.001 |
| 排替压力(MPa) | < 1 | 1-5 | 5-10 | > 10 | |
| 等级 | IV | III | II | I | |
| 封闭能力 | 差 | 一般 | 较好 | 好 | 最好 |

4.2.2 盖层动态密封性评价

综合铜锣峡储气库与黄草峡储气库盖层的资料，根据建立的盖层封闭性评价方法，提取相关因子指标，建立盖层动态封闭性的评价标准和方法，并用模糊综合评价法对储气库封闭性进行合理评价。选取除断层外的六个因素作为最终

评价指标，进行最终评价和判断^[18]，目标储气库详细信息汇总见表 10。

采用两级比例法将定性指标转化为定量指标，将定性指标转化为定量指标方法见表 11。

表 10 目标储气库详细信息汇总

| 参数类别 | 简写 | 黄草峡储气库 | 铜锣峡储气库 |
|-----------|----|---------|---------|
| 岩性 | | 泥灰岩、膏岩 | 泥灰岩、页岩 |
| 突破压力(MPa) | A | 9.59 | 10 |
| 渗透率(mD) | B | 0.00213 | 0.003 |
| 盖层平均厚度(m) | C | 70 | 100-200 |
| 岩石脆性 | D | 脆性 | 脆性 |
| 裂缝发育程度 | E | 少量发育 | 发育 |
| 孔隙度(%) | F | 0.779 | 0.8 |

表 11 定性指标转化为定量指标方法

| | 0 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 10 | 包括元素 |
|-------|----|----|---|----|---|----|----|---------|
| 成本类元素 | 最高 | 很高 | 高 | 平均 | 低 | 很低 | 最低 | B/D/E/F |
| 收益类元素 | 最低 | 很低 | 低 | 平均 | 高 | 很高 | 最高 | A/C |

其中，定性指标主要包括盖层的侧向连续性，断层贯穿程度和岩石脆性以及裂缝发育程度，其中盖层侧向连续性越好，盖层封闭性越好，因此属于收益类元素；断层贯穿程度是越小越好，盖层完整性可以得到保证。同理，岩石脆性和裂缝发育程度也属于成本类元素。根据上述方法，将数据进行转换，得到量化矩阵：

$$U = \begin{bmatrix} 70 & 100 \\ 5 & 7 \\ 7 & 7 \\ 9.59 & 10 \\ 0.779 & 0.8 \\ 0.0021 & 0.003 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据上述数据，将其进行归一化处理，得到归一化矩阵：

$$W = \begin{bmatrix} 0.70 & 1.0 \\ 0.5 & 0.7 \\ 0.7 & 0.7 \\ 0.95 & 1.0 \\ 1.02 & 1.0 \\ 0.7 & 1.0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

6个影响因素对应的权重为：

$$Z = [0.4291 \quad 0.2157 \quad 0.1370 \quad 0.0816 \quad 0.0893 \quad 0.0473] \quad (3)$$

计算出 $CI=0.1245$ ， $CR=0.0988$ ，一致性满足要求。通过模糊综合评价进行计算为：

$$F = Z \times W \quad (4)$$

经过计算，铜锣峡储气库评价结果为 0.894，黄草峡储气库评价结果为 0.706，此评价指标在值大于 0.7 时，均为好的盖层，由此可以判断，两个储气库的盖层在动态注采气过程中，封闭性良好。

5 结论

(1) 储气库运行过程中，地层压力系统动态变化，对断层，盖层的密封性产生影响，受工程因素、地质条件和地质力学特征的影响，变化可能导致断层带发生力学失稳从而诱发气体泄漏。制定储气库优化注采方案，确保安全高效注采关键要明确地质因素和工程因素对断层力学特征和渗流特征的影响机理。

(2) 建立完善的安全运行评价体系，能够有效的降低

储气库建造运行过程中的风险。本文中所建立的评价体系能够很好的对储气断层封闭性和盖层密封性评价，给出最佳的建库和运行建议。

(3) 对铜锣峡与黄草峡储气的断层进行静态与动态密封性评价。结果显示，断层密封性良好，动态运行过程中，铜锣峡储气库断层为安全，黄草峡储气库为较低风险。

参考文献

- [1] 程佳薪, 付晓飞, 孟令东. 雷61储气库边界断层封闭能力评价[J/OL]. 甘肃科学学报, 1-6[2024-06-11].
- [2] 鲁宇涛, 张引弟, 徐刘伟, 等. 基于遗传算法的盐穴储气库注气能力方案优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(11):4472-4478.
- [3] 侯秉仁, 牛耀辉, 上官拴通, 等. 宁晋超深盐穴储气库盐系地层地应力测定分析[J]. 盐科学与化工, 2024, 53(04):5-8+13.
- [4] 王建夫, 王斌, 王玮, 等. 基于U型盐穴储气库的新型CCUS方法[J]. 盐科学与化工, 2024, 53(04):14-18.
- [5] 李春, 闵忠顺, 何海燕, 等. 国内地下储气库库址变化新趋势与发展建议[J/OL]. 石油钻探技术, 1-10[2024-06-11].
- [6] 陈祥胜, 熊天恺, 李银平, 等. 层状盐岩地下储气库运行压力设定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(05):1139-1151.
- [7] 贾聚全. 吉林油田枯竭型气藏储气库固井技术[J]. 科技与创新, 2024, (02):88-90.
- [8] 孙胜宇, 田野, 郭世超, 等. 双坨子储气库密封性评价[J]. 石油知识, 2024, (01):56-57.
- [9] 骆正山, 宁清云, 骆济豪. 盐岩储气库稳定性评估模型与应用研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(01):43-48+55.
- [10] 周春明, 施金伶, 叶萍, 等. 大港油田驴驹河储气库注采渗流机理研究[J]. 录井工程, 2023, 34(04):27-34.
- [11] 赵鹏飞. 水平盐穴储气库长期安全性分析与评价[D]. 西安建筑科技大学, 2023.
- [12] 张莎莎. 气藏储气库裂缝储层稳定性评估研究[D]. 西安建筑科技大学, 2023.
- [13] 唐立根. 断裂发育气藏型储气库高速注采渗流理论与监测方法及工程应用[D]. 北京科技大学, 2023.
- [14] 何田. 基于围岩长期稳定性的地下罐式储气库结构形式研究[D]. 重庆交通大学, 2023.
- [15] 陈萍. 松辽盆地S储气库储层动态分析及数值模拟研究[D]. 东北石油大学, 2023.
- [16] 刘侯轩. 考虑夹层沉积韵律特性的盐穴储气库矿柱稳定性研究[D]. 中国矿业大学, 2022.
- [17] 秦奕. 枯竭油藏型储气库盖层密封性研究[D]. 常州大学, 2022.
- [18] 雷兴林, 苏金蓉, 王志伟. 四川盆地南部持续增长的地震活动及其与工业注水活动的关联[J]. 中国科学:地球科学, 2020, 50(11):1505-1532+1-8.