◀油气田开发工程▶

基于FAHP和CRITIC法的老井转注井井筒完整性评价方法*

吴庆瑶[1,2] 连 威[1,2] 李 军[1,2] 吴彦先[3] 王雪刚[3] 许 波[4]

（1. 新疆CO_2高效利用与封存重点实验室 2. 中国石油大学（北京）克拉玛依校区 3. 新疆油田采油工艺研究院 4. 中国石油西南油气田公司重庆气矿页岩气勘探开发管理中心）

吴庆瑶，连威，李军，等. 基于FAHP和CRITIC法的老井转注井井筒完整性评价方法[J]. 石油机械，2026，54（10）：109-117.

Wu Qingyao，Lian Wei，Li Jun，et al. A wellbore integrity evaluation method for old wells converted to injection wells based on FAHP and CRITIC[J]. China Petroleum Machinery，2026，54（10）：109-117.

摘要：针对现有井筒完整性评价研究多集中于常规油气井，以及老井转注CO_2前缺乏兼顾专家经验与现场数据的量化评价方法这一问题，构建了老井转注井井筒完整性评价指标体系及组合赋权模型，提出了综合评价法。以井口、井下密封装置及作业、套管及水泥环为一级指标，选取井口密封、环空带压及危险气体、安全阀性能和维护、封隔器坐封、下管柱规范施工、套管柱螺纹密封、固井水泥胶结强度和套管剩余强度等8项二级指标；采用模糊层次分析法（FAHP）确定主观权重，采用CRITIC法确定客观权重，并利用博弈论求取组合权重。研究结果表明：组合权重排序前3位依次为套管剩余强度（15.247%）、固井水泥胶结强度（14.511%）和安全阀性能及维护（13.631%），说明套管承载能力、水泥环封隔能力和井下安全控制装置是老井转注前应重点核查的环节。将该方法应用于新疆油田百21井区某老井，综合评价得分为73.82，井筒完整性等级为“合格”，与转注后的现场运行情况相符，同时识别出井口密封为该井的主要薄弱项。该方法能够实现老井转注CO_2前井筒完整性的定量评价，研究结果可为转注井筛选及风险防控措施制定提供依据。

关键词：老井转注CO_2；井筒完整性；模糊层次分析法；CRITIC法；博弈论；权重组合

中图分类号：TE357 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202511046

A Wellbore Integrity Evaluation Method for Old Wells Converted to Injection Wells Based on FAHP and CRITIC

Wu Qingyao[1,2] Lian Wei[1,2] Li Jun[1,2] Wu Yanxian[3] Wang Xuegang[3] Xu Bo[4]

（1. *Xinjiang Key Laboratory of Efficient Utilization and Sequestration of Carbon Dioxide*；2. *China University of Petroleum*（*Beijing*）*at Karamay*；3. *Oil Production Technology Research Institute*，*PetroChina Xinjiang Oilfield Company*；4. *Shale Gas Exploration and Development Management Centre*，*Chongqing Gas District*，*PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company*）

Abstract：Existing studies on wellbore integrity evaluation mostly focus on conventional oil and gas wells，and there is a lack of quantitative evaluation method that integrates both expert experience and field data prior to conversion of old wells to CO_2 injection wells. This paper establishes an evaluation index system and a combined weighting model for wellbore integrity of old wells converted to injection wells，and presents a comprehensive evalu-

* 基金项目：新疆维吾尔自治区重点研发项目“新疆CO_2咸水层永久封存与井筒完整性控制关键技术研究”（2024B01012）；新疆维吾尔自治区“一事一议”引进战略人才项目“新疆CO_2捕集、利用与封存研究”（XQZX20240054）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

ation method. The evaluation index system incorporates the primary indices such as wellhead, downhole sealing devices and operations, and casing & cement sheath, and eight secondary indices including wellhead sealing, sustained casing pressure (SCP) and hazardous gas, safety valve performance and maintenance, packer setting, standardized pipe-string running operation, casing thread sealing, cement bond strength, and remaining casing strength. The fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) was used to determine subjective weights, the criteria importance though intercrieria correlation (CRITIC) method was employed to determine objective weights, and the game theory was adopted to obtain the combined weights. The results show that the top three indices in terms of combined weights are remaining casing strength (15.247%), cement bond strength (14.511%), and safety valve performance and maintenance (13.631%), indicating that the casing load-bearing capacity, cement sheath sealing capacity, and downhole safety control devices are the key aspects to be inspected before old-well conversion. Application of this method to an old well in the Bai 21 block of Xinjiang Oilfield demonstrates the comprehensive evaluation score of 73.82 and the wellbore integrity level rated as "moderate", consistent with the field operation performance after conversion. Moreover, the wellhead sealing is identified as the main weak point of this well. This method enables quantitative evaluation of wellbore integrity before conversion of old wells to CO_2 injection wells, and the research results provide a basis for screening candidate injection wells and formulating risk prevention and control measures.

Keywords: conversion of old well to CO_2 injection well; wellbore integrity; FAHP; CRITIC; game theory; combined weight

0 引 言

利用CO_2驱油是油田落实"双碳"政策的有效手段。考虑到驱油过程中的经济性，油田常采用老井转注的方式向目标储层注入CO_2，在提高采收率的同时实现碳埋存。老井转注是将以往的采油采气井或注水井通过更换井口设备、油管、环空保护液等方式使其变为CO_2注入井，从而达到降本增效的目的。然而，部分老井转注后出现持续环空压力异常。环空压力异常通常反映井筒某一道或多道屏障的密封能力下降，若压力持续积聚，不仅会增加油管、套管、封隔器及井口装置的附加载荷，还可能推动CO_2沿管柱连接、封隔器或水泥环微环隙向上窜流，造成金属腐蚀和密封失效进一步发展，严重时可引发井口泄漏、井控风险及环境排放。如吉林油田、新疆油田百21井区等在转注一周以内环空压力可达7 MPa，环空泄压后压力逐步回升，气体组分检测结果显示其主要为CO_2。但环空压力异常只能反映井筒完整性可能受损，难以直接定位具体失效屏障及位置。因此，亟须在转注前识别井筒薄弱环节，并采取针对性的检测、维护和风险控制措施。

针对井筒完整性定量评价及控制方法方面的研究，Zhang等[1]系统梳理国际井筒完整性技术进展，指出现有标准体系主要聚焦于套管、水泥环、油管的完整性评估。谭永胜等[2]系统梳理了海上老井作为CO_2注入井时的井筒完整性失效机制与可行性评价方法。张绍辉等[3]、Liu等[4]、刘书杰等[5]使用风险矩阵与AHP相结合的方法，对陆上及海上油气井井筒完整性进行量化评价。Chen等[6]建立了基于层次分析法和模糊综合评价的套管腐蚀风险评估模型，可用于CO_2注入井套管安全评价与决策。张弘等[7]、袁俊亮等[8]、李成等[9]分别应用贝叶斯网络、混合机器学习、随机森林等方法建立了井筒完整性风险评估模型。Peng等[10]通过构建集成数值仿真、K-RBFN混合机器学习及蒙特卡罗模拟的综合风险评估框架，分析了CO_2地质封存封闭井筒的密封完整性。Patil等[11]和郭润生等[12]建立了定量风险评分与耦合矩阵体系。杨杰等[13]提出的博弈论组合赋权法，有效解决了主客观权重冲突问题。宋学锋等[14]和张静等[15]分别指出光纤传感和三维图像重构技术能显著提升套管壁厚和水泥环胶结强度等的检测精度。王邃等[16]通过密封材料的腐蚀试验评估了密封材料的抗腐蚀性能。钟志英等[17]通过室内模拟CO_2腐蚀试验，评估了不同管材的腐蚀性能。Khan等[18]量化了CO_2长期注入对水泥环的损伤。刘向斌等[19]、储胜利等[20]将层次分析法与现场监测数据结合，建立了可视化的风险评估系统。总体而言，当前井筒完整性研究多集中于常规油气井，针对老井转为注入井的量化评价较为欠缺。同时，现有主流

评价方法存在主观性强、易过拟合、稳定性不足的缺点。

为此，笔者提出了基于模糊层次分析法（FAHP）与CRITIC法相结合的综合评价法。首先从老井转注前可获取的井史资料、现场检测数据和作业信息出发，依据井筒屏障功能划分评价单元并构建指标体系；其次采用FAHP表征专家对各风险因素相对重要性的判断，采用CRITIC法提取现场数据的变异性与冲突性；再次进一步利用博弈论协调主、客观权重，形成综合权重；最后以新疆油田百21井区老井为例开展评价，并将评价结果与转注后的现场运行情况进行对比，以验证该方法的工程适用性。研究结果可为转注井筛选及风险防控措施制定提供依据。

1　井筒完整性评价指标体系构建

井筒组成部分如套管、水泥环、封隔器、安全阀等均为防止CO_2窜流至井口的屏障，然而老井井筒在长期服役过程中由于材料老化、腐蚀、应力疲劳等问题会导致屏障失效。

根据油田现场数据和专家经验[21]，综合考虑井筒屏障的空间位置、功能属性及转注前检测资料的可获得性，将井筒完整性划分为井口、井下密封装置及作业、套管及水泥环3个评价单元（见图1）。井口单元包括井口密封、环空带压及危险气体2项指标；井下密封装置及作业单元包括安全阀性能和维护、封隔器坐封、下管柱规范施工3项指标；套管及水泥环单元包括套管柱螺纹密封、固井水泥胶结强度、套管剩余强度3项指标。

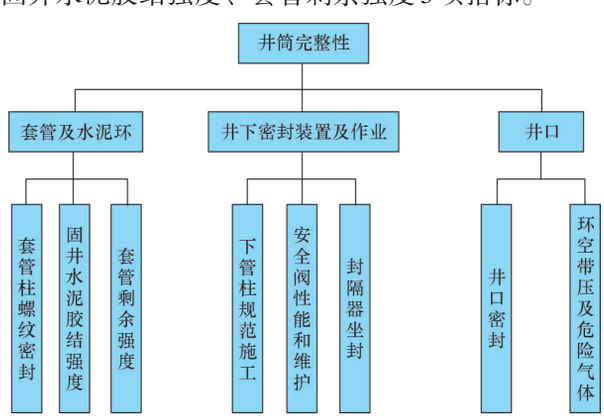


图1　井筒完整性评价指标体系

Fig. 1　Wellbore integrity evaluation index system

1.1　井口完整性评价

井口是注入井连接地面管汇并实施压力控制的关键屏障。井口本体、法兰、阀门、悬挂器及密封件发生腐蚀、磨损、松动或材料适应性不足时，可能形成泄漏通道，造成CO_2逸散，并削弱井口承压和应急关断能力。环空压力大小、泄压后的恢复速度及环空气体组分可用于判断油管、封隔器、套管和水泥环等井下屏障是否存在窜漏；若环空压力持续增加且气体中CO_2含量异常，应视为屏障密封能力下降的重要征兆。考虑到老井转注CO_2作业通常更换采油树，因此不对拟更换的采油树单独进行量化评价。

1.2　井下密封装置及作业完整性评价

安全阀是井下异常工况下切断流动通道的重要安全屏障，腐蚀、杂质卡阻和金属疲劳可能导致其动作失灵或密封失效；封隔器承担油套环空隔离功能，胶筒老化、腐蚀磨损、坐封载荷不足或机械锁损坏可能造成窜漏；下管柱过程中若未按设计执行上扣扭矩、扶正、试压和深度控制等要求，可能引起连接密封不良、管柱损伤或封隔器坐封位置偏差。

1.3　套管及水泥环完整性评价

套管及水泥环是维持井筒结构稳定、隔离不同地层并防止CO_2沿井筒窜流的重要屏障。老井长期服役过程中，受井筒流体腐蚀、井下工具磨损、温度压力变化及地层应力作用，套管可能出现壁厚减薄、局部点蚀、变形以及螺纹密封失效，导致其抗内压、抗外挤和密封能力下降。水泥环则可能因材料老化、收缩、温压循环及界面脱黏产生胶结强度降低、微环隙或局部窜流通道，削弱地层封隔效果。老井转注CO_2后，井筒压力及流体环境发生变化，原有缺陷可能进一步扩展，增加环空带压和层间窜流风险。其中，螺纹密封重点反映连接部位的泄漏风险，水泥胶结强度用于表征水泥环封隔能力，套管剩余强度用于判断其能否满足转注工况下的承载要求。由于老井转注作业通常会更换满足防腐和强度要求的新油管，原有油管不纳入量化评价。

2　权重分析

油气井井筒完整性影响因素多，各因素对完整性的影响程度不同，需要进行差异化赋权。老井转注前的评价信息既包含依赖专家经验的定性判断，也包含来源于现场检测和井史资料的定量数据。单一主观赋权法难以充分反映指标数据差异，单一客观赋权法又难以纳入工程经验中的隐性信息。因此，这里分别采用FAHP和CRITIC法

计算主观权重与客观权重，再利用博弈论确定组合系数并获得综合权重。

2.1　FAHP 主观赋权法

FAHP 是一种将层次分析法与模糊数学相结合的评价方法。该方法能够有效处理复杂决策问题中的不确定性信息，并准确地反映专家在评估过程中的模糊性判断。通过专家打分和现场数据构建模糊判断矩阵并进行指标权重的计算及层级权重的计算。

2.1.1　模糊判断矩阵构建

模糊层次分析中，需要确定模糊判断矩阵。采用指标间的两两比较判断，使用一个指标与另一个指标进行重要程度定量比较，可得到模糊判断矩阵，即原始输入数据矩阵：

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}0.5 & \cdots & a_{1n}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ a_{n1} & \cdots & 0.5\end{pmatrix} \tag{1}$$

数据标度指描述两两指标之间的相对重要程度，如表 1 所示。

表 1　各指标的重要性比例标度

Table 1　Proportional scale of importance for indices

标度	定义	说明
0.5	同等重要	2 个指标相比较同等重要
0.6	稍微重要	2 个指标相比较，前者稍微重要
0.7	明显重要	2 个指标相比较，前者明显重要
0.8	非常重要	2 个指标相比较，前者非常重要
0.9	极端重要	2 个指标相比较，前者极端重要
0.1，0.2，0.3，0.4	反比较	2 个元素交换顺序之后的比较结果

另外，邀请 50 位现场技术人员根据新疆油田百 21 井区井况，按照图 1 所示的井筒完整性评价指标体系及 FAHP 重要性比例标尺，对各层指标进行两两比较打分，并对 50 位技术人员构建的同类模糊判断矩阵取平均值。

2.1.2　指标权重和层级权重计算

下层各指标对其隶属的上一层指标主观权重为 F_i，计算如下：

$$F_i=\frac{\sum_{j=1}^{n}a_{ij}+\frac{n}{2}-1}{n(n-1)} \tag{2}$$

式中：a_{ij}为指标 i 相对于指标 j 的重要程度，n 为下层指标元素个数。

各层级指标相对其他评价层级和目的层的主观权重大小为：

$$F_{CA}=F_{CB}\times F_{BA} \tag{3}$$

式中：F_{CA}为二级指标层对目标层的权重，F_{CB}为二级指标层对一级指标层的权重，F_{BA}为一级指标层对目标层的权重。

2.1.3　模糊一致性检验

在构建完模糊评价矩阵并得到各层级指标权重后，需保证各指标权重的合理性，此处引入一致性比率 C_R 指标，当 C_R<0.1 时，即为满足合理性。具体计算如下：

$$C_R=\frac{1}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left|a_{ij}+b_{ji}-1\right| \tag{4}$$

$$b_{ij}=\frac{F_i}{F_i+F_j} \tag{5}$$

式中：b_{ij}为由权重 b_i 和 b_j 构造的特征矩阵元素；b_{ji}为反向比较矩阵元素，且 $b_{ij}+b_{ji}=1$。

FAHP 计算得到各指标权重结果如表 2 所示。由表 2 可知，指标重要性排序前三名分别是套管及水泥环、井下密封装置及作业、井口。但是，单纯依赖 FAHP 可能导致权重过度偏向专家经验，尤其是一级指标包含二级指标数量不均时，权重分配可能出现结构性偏差。因此，需引入客观赋权法进行校正。

表 2　FAHP 计算各指标权重结果

Table 2　Weight calculation results by FAHP

一级指标	一级权重	二级指标	权重/%
套管及水泥环	0.418	套管柱螺纹密封	11.086
		固井水泥胶结强度	15.199
		套管剩余强度	15.548
井下密封装置及作业	0.335	下管柱规范施工	7.873
		安全阀性能和维护	13.456
		封隔器坐封	12.172
井口	0.247	井口密封	14.553
		环空带压及危险气体	10.113

2.2　CRITIC 法客观赋权法

CRITIC 法是一种用于客观确定评价指标权重的方法。在计算权重时，这种方法特别强调了评价指标的变异性和冲突性。与熵权法、变异系数法、灰色关联分析法等客观赋权技术相比，CRITIC 法不仅关注评价指标的差异性，还兼顾了它们的相互关联性。通过专家打分获取的数据，计算指标变异性、冲突性和信息量，从而确定指标权重。

2.2.1　数据获取

（1）井口。井口单元包括井口密封和环空带压及危险气体 2 部分，其中根据 API RP 90 的内容，按环空压力的不同确定 4 个风险级别，并根据风险等级确定量化评价范围，如表 3 所示。

环空压力最大允许阈值取待评价套管抗内压强度的 50%、抗外挤强度的 75%，考虑到表层套管

是最后一道安全屏障，取其抗内压强度的30%。以上述计算所得最小值作为老井环空带压最大允许带压值，根据表3进行打分。

井口密封性能根据API SPEC 6A《井口装置和采油树设备规范》中提到的井口材料要求以及产品规范级别进行打分。考虑老井转注CO_2的酸性环境，优先选择井口材料等级为DD、EE、FF、HH的井口装置，大部分老井在设计之初并未考虑该情况，故绝大多数井口均为AA、BB、CC等级材料。通过确定详细的井口装置配件，根据PSL等级进行打分。其中，重要部件PSL等级越高，以及PSL等级高的材料数量越多，分数越高，如表4所示。

表3　注气井环空带压风险级别判别标准

Table 3　Risk rating criteria for SCP in gas injection wells

风险级别	判别标准	评价范围
Ⅰ级（安全）	环空带压值小于或等于0.69 MPa，且泄压后环空关闭一段时间，环空压力为0或一放即无	75~100
Ⅱ级（低风险）	环空带压值大于0.69 MPa，但小于其最大允许带压值，且泄压后环空关闭一段时间，环空压力增长缓慢；环空卸压时，油基环空保护液返出，且停注时，油压降幅低于套压降幅或套压降幅低于油压降幅	50~75
Ⅲ级（较高风险）	环空带压值大于0.69 MPa，但小于其最大允许带压值，且泄压后环空关闭一段时间，环空压力迅速增加	25~50
Ⅳ级（高风险）	环空带压值大于0.69 MPa，但小于其最大允许带压值，环空泄压时，环空压力无法降为0；当环空带压值大于允许带压值、油基环空保护液渗漏严重，且环空泄压时，环空压力无法降为0	0~25

表4　井口材料要求

Table 4　Wellhead materials

材料等级	本体、阀盖、端部和出口连接	芯轴悬挂器、阀孔密封机构、节流阀调节件、阀杆	评价范围
AA	碳钢或低合金钢或不锈钢或CRA[d]	碳钢或低合金钢或不锈钢或CRA[d]	0~20
BB	碳钢或低合金钢或不锈钢或CRA[d]	不锈钢或CRA[d]	20~40
CC	不锈钢或CRA[d]	不锈钢或CRA[d]	40~60
DD	碳钢或低合金钢或CRA[bd]	碳钢或低合金钢或CRA[bd]	60~70
EE	碳钢或低合金钢或CRA[bd]	不锈钢或CRA[d]	70~80
FF	不锈钢或CRA[bd]	不锈钢或CRA[d]	80~90
HH	CRA[bcd]	CRA[bcd]	90~100

（2）井下密封装置及作业。井下密封装置及作业包括安全阀性能及维护、封隔器坐封、下管柱规范施工。其中安全阀性能检测可通过升压式在线校验，结合GB/T 12241—2021《安全阀一般要求》与现场经验对安全阀进行离线检测评价。其中：安全阀密封性在线检测可通过在额定压力的85%~95%进行保压，检查阀座是否有泄漏；并根据其在线检测的保压结果按照0~100进行打分。

封隔器密封性能可采用SY/T 5734—2024《分采、分注井井下封隔器验封测试规程》中提到的验封方法进行密封性能检测。除此之外还应检测封隔器机械锁是否损坏，若损坏则无法使用，默认为封隔器失效，打分为0分；并在评价过程中，将封隔器额定工作压力作为100分，地层压力作为0分，作为封隔器密封性能打分范围，根据检测结果进行打分。

下管柱规范施工情况可根据完井报告及修井报告等依据进行打分，根据其施工过程中的作业情况与设计初的作业要求相比较，得到评价结果。

（3）套管及水泥环。套管柱螺纹密封可以通过气密封检测判定。根据SY/T 7338—2016《石油天然气钻井工程　套管螺纹连接气密封现场检测作业规程》，连接泄漏率不大于1.0×10^{-7} Pa·m³/s时判定为密封合格，大于1.0×10^{-7} Pa·m³/s时判定为密封不合格。以密封合格的连接数量占连接总数量的比例作为该指标得分。

由于老井套管被水泥封固在井底，故无法对老井套管直接进行强度校验，但可通过对套管腐蚀情况进行检测，间接反映套管剩余强度是否符合转注作业。套管腐蚀情况可以通过多臂井径仪进行检测，并以平均腐蚀深度作为评价。在对套管腐蚀程度进行判定时，参照管体腐蚀损伤评价方法（SY/T 6151—2022《钢质管道金属损失缺陷评价方法》），具体评价如表5所示。

表5　套管腐蚀损伤评价

Table 5　Casing corrosion damage evaluation

平均腐蚀程度/%	评价范围
0~10	70~100
10~20	30~70
20~30	0~30

水泥环性能的优劣会影响地层封固效果及套管抗挤毁变形的能力，从而影响事故发生的风险概率，有必要对水泥环的性能进行评价，以便综

合评价相应井段井筒完整性风险。水泥环性能最关键的影响因素是水泥胶结程度，其次是水泥胶结界面状态。鉴于目前对界面评价还存在困难，而且其对井筒完整性影响较小，故不作具体的评价分析。利用声幅测井仪（CBL）对水泥胶结性能进行评价。根据相关文献及油田现场测井经验，水泥胶结程度越好，CBL 曲线值越低。具体评价时，以测量处声幅值与自由套管标度值之间的比值作为评价指标，即为：

$$\mu_d = \frac{E_d}{E_{d0}} \times 100\% \tag{6}$$

式中：μ_d为在井深d处的声幅比率，%；E_d为井深d处的声幅测井值，mV；E_{d0}为自由套管的声幅测井值，mV。

任意井深d处的水泥胶结性能完整性状态表征为：

$$K_d = 1 - \mu_d = 1 - \frac{E_d}{E_{d0}} \times 100\% \tag{7}$$

式中：K_d为井深d处的水泥胶结性能完整性系数，无量纲。

根据声幅比率得到的结果，建立表 6 所示的胶结性能评价表。

表 6　水泥环性能评价

Table 6　Cement sheath performance evaluation

风险级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
μ_d/%	0~19	20~39	40~54	55~69	70~100
K_d	0.81~1.00	0.61~0.80	0.46~0.60	0.31~0.45	0~0.30
胶结程度	较好	胶结不好	部分胶结	少量胶结	无胶结
评价范围	81~100	61~80	46~60	31~45	0~30

2.2.2　无量纲化处理

考虑到井筒不同屏障如套管、水泥环、封隔器在密封能力及强度等方面的差异性，使用正向化的方法对各指标进行无量纲化处理，得到标准化矩阵。

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{8}$$

式中：Y_{ij}为第i个评价对象在第j项指标上的标准化值，X_{ij}为第i个评价对象对第j个评价指标的原始打分，$X_{\max}$为第j个指标的最大值，$X_{\min}$为第j个指标的最小值。

2.2.3　指标权重计算

（1）计算指标变异性。指标变异性指的是同一指标在不同评价方案之间取值的差异程度，通常用标准差来表示。标准差越大，说明该指标在不同方案中的取值差距越大，即该指标的数值差异越大。变异性较大时，在权重分配时该指标应被赋予更高的权重。用第j个指标的标准差S_j衡量各指标数值的差异情况，其计算公式为：

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_{ij} - \overline{Y}_j)^2}{n-1}} \tag{9}$$

式中：S_j为第j项指标标准化值的标准差，$\overline{Y}_j$为第j项指标标准化值的均值。

（2）计算指标冲突性。指标冲突性指的是不同指标之间的相关程度。具体来说，指标之间的冲突性是通过相关系数来表示。如果 2 个指标之间具有较强的正相关性，说明它们之间的冲突性较小。这是因为正相关性较高的指标在评价过程中提供的信息有较大的相似性，所以它们在评价中的重要性会相对降低。指标冲突性用第j个指标的相关系数R_j表示，其计算公式为：

$$R_j = \sum_{i=1}^{n}(1 - h_{ij}) \tag{10}$$

式中：R_j为第j项指标的冲突性，h_{ij}为第i个指标对第j个指标的相关系数。

（3）计算指标信息量。指标信息量指每个指标在评价过程中所能提供的信息量大小。具体来说，指标信息量通过对比强度和冲突性来综合衡量。指标信息量与指标的关系在于，信息量越大说明该指标在评价中提供的独立信息越多，因此在权重分配时应给予更高的权重。通过这种综合考虑，CRITIC 法能够更准确地反映每个指标在评价体系中的重要性。

指标信息量C_j计算公式为：

$$C_j = S_j \times R_j \tag{11}$$

（4）计算权重。根据计算得到的指标信息量进行归一化处理，得到指标权重W_j，结果如表 7 所示。由表 7 可知，井筒完整性评价重要性前 3 个指标排序为封隔器坐封、套管剩余强度、安全阀性能和维护。CRITIC 法虽能基于数据变异性与冲突性客观赋权，但其假设指标间为线性相关，且对数据质量和样本量较为敏感。在老井转注场景中，部分关键指标数据可能缺失，

表 7　CRITIC 法计算各指标权重结果

Table 7　Weight calculation results by CRITIC

指标	套管柱螺纹密封	固井水泥胶结强度	套管剩余强度	下管柱规范施工	安全阀性能和维护	封隔器坐封	井口密封	环空带压及危险气体
权重/%	9.527	13.090	14.625	10.528	13.991	15.870	10.773	11.595

仅依赖CRITIC法可能导致权重结果无法充分反映工程实际中的隐性风险。因此，需结合FAHP进行主客观权重融合，以提升权重体系的工程适用性。

2.3　基于博弈论法组合权重

为克服FAHP与CRITIC法各自的局限性，并实现专家经验与现场数据的有机融合，采用博弈论组合赋权法。该方法将FAHP与CRITIC法视为2个决策主体，通过寻找最小化两者离差的均衡解，实现主客观权重的动态调和。这种组合方式既避免了FAHP对专家经验的过度依赖，又弥补了CRITIC法在数据不足或非线性关系下的不足，尤其适用于老井转注井筒完整性评价中异构信息的协同处理。

博弈论是研究具有斗争或竞争性质现象的数学理论和方法。该方法的核心在于协调各方利益冲突，通过构建以和的离差最小化为目标的优化模型，在多方博弈中寻求最优平衡解。该理论框架的数学本质可表述为：在满足决策主体间纳什均衡约束的条件下，寻找使主客观赋权结果差异最小化的帕累托最优解集。采用l种指标赋权法对评价指标赋权，指标权重集为$\boldsymbol{W}=(W_{k1}, W_{k2}, W_{k3}, \cdots, W_{kn})$，组合权重$W_i$对$l$种权重之间的线性组合$\sum_{k=1}^{l} a_k \boldsymbol{W}_{ki}^{\mathrm{T}}(a_k>0)$。基于博弈论，不同的权重之间进行博弈，最理想的状态为W_i与W_{ki}之间的离差值极小，求解理想状态的组合系数a_k，进一步得出最优的综合权重，即$\min\left\|\sum_{k=1}^{l} a_k \boldsymbol{W}_{ki}^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{W}_{ki}\right\|^2$。通过矩阵微分的性质，可以得到下式的最优化一阶导数：$\sum_{k=1}^{l}|a_k| a_k \boldsymbol{W}_{ki}\boldsymbol{W}_{ki}^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{W}_{ki}\boldsymbol{W}_{ki}^{\mathrm{T}}$。归一化组合系数$a_k^*$计算如下：

$$a_k^* = \frac{|a_k|}{\sum_{k=1}^{l}|a_k|} \tag{12}$$

通过计算求解，再将结果归一化，得到评价指标的权重组合$\boldsymbol{W}_i^*$，计算如下：

$$\boldsymbol{W}_i^* = \sum_{k=1}^{l} a_k^* \boldsymbol{W}_{ki}^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

式中：W_{ki}^{T}为使用k种方法构建的评价指标矩阵，无量纲。

根据上述公式，结合FAHP和CRITIC法计算获得的各指标权重，得到最终权重结果，如表8所示。由表8可知，套管剩余强度、固井水泥胶结强度和安全阀性能及维护指标的权重分别为综合权重最高的3项指标，说明老井转注前应重点核查套管承载能力、水泥环封隔能力及井下安全控制装置。组合权重综合了FAHP的专家经验信息与CRITIC法的数据差异信息，降低了单一赋权结果偏向某一类信息的风险。

表 8　基于博弈论法各指标权重

Table 8　Weights of indexes based on the game theory

指标	套管柱螺纹密封	固井水泥胶结强度	套管剩余强度	下管柱规范施工	安全阀性能和维护	封隔器坐封	井口密封	环空带压及危险气体
权重/%	10.577	14.511	15.247	8.739	13.631	13.378	13.320	10.597

3　案例分析

利用以上方法对新疆油田百21井区老井转注井进行井筒完整性评价，以期为转注CO_2作业提供可行性参考。该区块3口井于2022年4月进行检修，检修结果显示：该井区老井与邻井油气层部分连通；产出气及伴生气主要为甲烷、乙烷、丙烷，未发现有硫化氢等有毒气体；井深分别为2 279.69、2 296.80、2 303.74 m，区块同层近期地层深度为2 294.05 m时的地层压力为27.2 MPa，压力系数为1.21；预测井口最高关井压力15.1 MPa，井控风险级别为三级；井内管柱由ø90 mm喇叭口和ø73.02 mm×5.51 mm N80防腐油管组成。

对该井的井口密封、管柱螺纹密封等指标进行分析，现场技术人员根据客观赋权法中的标准进行打分。结合百分制评价习惯及评价计算结果与现场的反馈情况，将60分设为满足基本转注条件的下限，结果分别为不合格、合格、良好、优

秀，对应的得分范围为[0，60)、[60，75)、[75，90)、[90，100]。

井筒完整性评价结果T计算如下：

$$T = \sum_{i=1}^{n} W_i^* \times X_i \tag{14}$$

式中：W_i^*为博弈论组合后各指标权重，X_i为现场技术人员对指标i的打分。

现场技术人员对该井各指标打分如下：(83，81，78，96，65，80，46，69)，根据式（14）计算T=73.82，结合该井转注后未出现井口带压，表明该井井筒完整性合格，与评价方法得到的结果相符。同时根据指标得分可知，该井井口密封存在较大问题，应重点关注并维护，以保障转注作业安全。

4　结　论

（1）综合考虑井筒屏障的空间位置、功能属性及转注前检测资料的可获得性，构建了由井口、井下密封装置及作业、套管及水泥环3个一级单元组成的评价体系。并以井口密封、环空带压及危险气体、安全阀性能和维护、封隔器坐封、下管柱规范施工、套管柱螺纹密封、固井水泥胶结强度和套管剩余强度等8项指标表征老井转注前的密封、承压和作业质量。

（2）FAHP、CRITIC法与博弈论组合赋权结果表明，套管剩余强度、固井水泥胶结强度、安全阀性能和维护指标的综合权重分别为15.247%、14.511%、13.631%，说明转注前应重点核查套管承载能力、水泥环封隔能力及井下安全控制装置。

（3）百21井区某老井综合评价得分为73.82，井筒完整性等级为“合格”，与转注后未出现环空带压的现场运行结果相符；井口密封得分最低，是该井的主要风险项，应重点关注并维护，以保障转注作业安全。

参　考　文　献

[1] Zhang Zhi，Zhao Yuanjin，Cai Nan，et al. Research status and development prospect of wellbore integrity in China[J]. SPE Journal，2024，29（1）：35-54.

[2] 谭永胜，庞照宇，李琦，等. 海上老井井筒完整性失效机制及二氧化碳注入可行性研究进展[J]. 环境工程学报，2024，18（10）：2754-2763.
Tan Yongsheng，Pang Zhaoyu，Li Qi，et al. Research progress on mechanism of wellbore integrity failure and feasibility of CO_2 injection for existing wells of offshore CO_2 geological storage[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2024，18（10）：2754-2763.

[3] 张绍辉，张成明，潘若生，等. CO_2驱注入井井筒完整性分析与风险评价[J]. 西安石油大学学报（自然科学版），2018，33（6）：90-95，123.
Zhang Shaohui，Zhang Chengming，Pan Ruosheng，et al. Integrity analysis and risk assessment of wellbore in CO_2 flooding[J]. Journal of Xi'an Shiyou University（Natural Science），2018，33（6）：90-95，123.

[4] Liu Ying，Huang Xueli，He Long，et al. Research on the integrity of nitrogen injection wellbore based on AHP and risk matrix[C]//Proceedings of the International Field Exploration and Development Conference 2022，Urumqi，China，2023：3336-3349.

[5] 刘书杰，马传华，唐龙，等. 深水高温高压气井井筒服役安全状态评价[J]. 石油管材与仪器，2023，9（3）：58-64.
Liu Shujie，Ma Chuanhua，Tang Long，et al. Well integrity risk assessment of deep-water high-temperature and high-pressure gas wells[J]. Petroleum Instruments，2023，9（3）：58-64.

[6] Chen Shengshan，Wang Hanxiang，Jiang Hao，et al. Risk assessment of corroded casing based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Petroleum Science，2021，18（2）：591-602.

[7] 张弘，申瑞臣，袁光杰，等. 基于贝叶斯网络的气井井筒完整性风险评价[J]. 中国安全生产科学技术，2017，13（9）：132-138.
Zhang Hong，Shen Ruichen，Yuan Guangjie，et al. Risk evaluation on wellbore integrity of gas well based on Bayesian network[J]. Journal of Safety Science and Technology，2017，13（9）：132-138.

[8] 袁俊亮，谢仁军，李文拓，等. 基于随机森林机器学习的井筒完整性失效预判研究[J]. 科技通报，2022，38（2）：55-60.
Yuan Junliang，Xie Renjun，Li Wentuo，et al. Research on prediction of wellbore integrity failure based on random forest machine learning algorithm[J]. Bulletin of Science and Technology，2022，38（2）：55-60.

[9] 李成，管志川，黄哲，等. 基于参数不确定性的井筒失效风险评价研究[J]. 石油机械，2023，51（8）：43-50.
Li Cheng，Guan Zhichuan，Huang Zhe，et al. Evaluation on wellbore failure based on parameter uncertainty[J]. China Petroleum Machinery，2023，51（8）：43-50.

[10] Peng Haoyan，Xu Zhaodong，Lu Hongfang，et al. Risk assessment framework for closed wellbore sealing

integrity failure under corrosion environment in CO_2 geological sequestration[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 254: 214064.

[11] Patil P A, Hamimi A M, Bakar M A B A, et al. Scrutinizing wells integrity for determining long-term fate of a CO_2 sequestration project: an improved and rigorous risk assessment strategy[C]//The International Petroleum Technology Conference, 2022: 4363-4374.

[12] 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.

[13] 杨杰，官臣彬，李朝辉，等. 陆上油气钻井作业风险评价的指标权重方法应用研究[J]. 安全. 健康和环境，2023，23（8）：44-49.
Yang Jie, Guan Chenbin, Li Zhaohui, et al. Study on the application of index weight method in risk assessment of onshore oil and gas drilling operation[J]. Safety Health & Environment, 2023, 23(8): 44-49.

[14] 宋学锋，李志彬，刘金铭，等. 深层深井井筒完整性检测技术发展现状[J]. 新疆石油天然气，2024，20（4）：8-18.
Song Xuefeng, Li Zhibin, Liu Jinming, et al. Development status of wellbore integrity inspection technology for deep strata and deep wells[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(4): 8-18.

[15] 张静，樊建春，王培玺，等. 套管损伤磁记忆检测信号的量化识别方法[J]. 石油机械，2012，40（8）：24-28.
Zhang Jing, Fan Jianchun, Wang Peixi, et al. Quantitative identification method for magnetic memory detection signal of casing damage[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(8): 24-28.

[16] 王邃，宋少华，陈森，等. CCUS井封隔器胶筒耐二氧化碳腐蚀性能评价[J]. 新疆石油天然气，2024，20（4）：50-59.
Wang Sui, Song Shaohua, Chen Sen, et al. CO_2 corrosion resistance evaluation of packer rubber in CCUS wells[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2024, 20(4): 50-59.

[17] 钟志英，罗天雨，邬国栋，等. 新疆油田呼图壁储气库气井管柱腐蚀实验研究[J]. 新疆石油天然气，2012，8（3）：82-86.
Zhong Zhiying, Luo Tianyu, Wu Guodong, et al. Experimental study on pipe string corrosion of gas well in hutubi gas storage of Xinjiang oilfield[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2012, 8(3): 82-86.

[18] Khan A J, Michael A. Mechanistic modeling of wellbore integrity during CO_2 injection in deep saline aquifers[C]//SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control, 2024: SPE-217873-MS.

[19] 刘向斌，黄伟明，马文海，等. 水驱老井转CCUS注入井风险评价方法[J]. 石油钻采工艺，2022，44（6）：752-757.
Liu Xiangbin, Huang Weiming, Ma Wenhai, et al. Risk evaluation method for converting previous water injection wells to CCUS injection wells[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(6): 752-757.

[20] 储胜利，樊建春，张来斌，等. 套管段井筒完整性风险评价方法研究[J]. 石油机械，2009，37（6）：1-4.
Chu Shengli, Fan Jianchun, Zhang Laibin, et al. Research on the risk assessment method for wellbore integrity in casing section[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(6): 1-4.

[21] 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.
Zhou Songmin, Li Junwei, Li Jin, et al. Evaluation of the integrity of offshore abandon wells based on weighting analysis[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(2): 10-13.

第一作者简介：吴庆瑶，生于2002年，现为在读硕士研究生，研究方向为井筒完整性。地址：（834000）新疆克拉玛依市。email：2556294605@qq.com。

通信作者：连　威，副教授。email：lianweidyx@163.com。

修改回稿日期：2026-04-25

（本文编辑　任　武）