Science Research
2026, Vol. 14, No. 6, pp. 464–470
https://doi.org/10.11648/j.sr.20261406.21

Research Article

Study on the Multifield Coupling Response Mechanism of Coal Seam-Wellbore System in Supercritical Transformation Environment

Yishan Liu*, Xiaoxuan Li, Runxuan Sun, Honglin Zhang, Ming Feng, Aodong Li

CNPC Engineering Technology R&D Co. Ltd., Beijing, China

Abstract

The in-situ conversion of deep coal resources represents one of the most important and promising technological directions for the efficient and clean utilization of deep coal deposits. However, because such conversion processes are typically conducted under extreme and complex environments characterized by high temperature, high pressure, and the coupled action of multiple physical and chemical components, the coal seam-wellbore system is highly susceptible to structural instability, mechanical failure, and integrity damage. In view of these distinctive and challenging characteristics, there is an urgent need to reveal the underlying mechanisms by which the aforementioned factors influence the adaptability of the coal seam-wellbore system to supercritical conversion.The principal focus of this study is the effect mechanism of the thermo-poro-chemo-mechanical (temperature-pressure-seepage-reaction) multi-field coupled action on the entire coal-wellbore system. Accordingly, this paper establishes an evaluation methodology for the stability and integrity of the wellbore system under supercritical conversion conditions, and develops a comprehensive life-cycle evaluation system for the wellbore. By clarifying the coupling laws among thermal, hydraulic, mechanical, and chemical fields, the proposed method provides a theoretical foundation for the safe and efficient development of deep coal resources through in-situ conversion. This integrated framework is expected to support the design of wellbore engineering technical solutions and process measures tailored to coal in-situ conversion, and to contribute substantially to ensuring the safety, reliability, and quality of the entire underground coal gasification process. The research outcomes are of great significance for promoting the industrial application of underground coal gasification technology.

Keywords

In-situ Coal Conversion, Supercritical Conversion Environment, Multi-field Coupled Response, Wellbore Integrity

超临界转化环境中煤层—井筒系统多场协同响应机制研究

刘奕杉*，李晓璇，孙润轩，张洪霖，冯明，李敖东

中国石油集团工程技术研究院有限公司，北京市，中国

*Correspondence: Yishan Liu (lysdr@cnpc.com.cn)

Received: 8 October 2026; **Accepted:** 2 November 2026; **Published:** 10 November 2026

Copyright: © The Author(s), 2026. Published by Science Publishing Group. This is an **Open Access** article, distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

摘要

采用煤炭原位转化方式利用深部煤炭是重要的技术方向之一，但因其往往处于高温、高压、多组分耦合作用环境，极易造成结构失稳和完整性破坏等问题。针对上述特点，迫切需要揭示上述因素对煤层—井筒系统超临界转化适应性的影响机理。本文的研究重点是温压渗化多场耦合作用对整个系统的效应机理，因此，建立适用于超临界转化工况下的井筒系统稳定性及完整性评价方法，形成井筒全生命综合评价体系。这将有助于设计出适合煤炭原位转化的井筒工程技术方案及工艺措施，并有利于确保整个气化的安全可靠和质量保障。

关键词

煤炭原位转化，超临界转化环境，多场协同响应，井筒完整性

1. 引言

随着深层矿藏的开采，在安全、环保以及高回收率方面，传统采矿工艺都受到一定的制约，所以要将矿业开发的方向转变为原位加工技术和原位洁净利用技术。原位加工技术是在井下进行煤的加工方式，这将为发展无侵入、零排放的能源开采方法提供新的工程思路；井筒作为关键的工程单元之一，其构建稳定性及工作性能直接关系着转化的有效性及可靠性，在该超临界条件下，井筒体系的响应特性更为复杂。同时发生失稳甚至破坏的可能性增大。解决上述工程问题的关键在于研究煤层－井筒系统的多场耦合关系，在丰富井筒工程基础理论上促进煤炭原位转化的应用。

2. 国内外研究现状

2.1. 国外研究现状

国外关于煤炭原位转化及其井筒相关问题的研究主要集中在超临界气化反应机理、地下气化过程建模以及井筒结构稳定性分析等方面。Feng H 等[1]基于超临界水气化条件，研究了引入CO_2作为传质介质对煤气化制氢过程的调控作用，揭示了反应介质输运特性对气化效率与产物组成的影响规律，为超临界转化环境下的反应场演化研究提供了理论支撑。Jiang 等[2]围绕地下煤气化过程的建模方法展开系统分析，从热力学、渗流及反应动力学等角度构建多物理场耦合模型框架，强调模型参数选取与边界条件设定对气化过程预测精度的影响。针对井筒结构安全问题，Shahbazi M等[3]开展了地下煤气化水平井井筒的热—力耦合数值模拟研究，分析了高温条件下井壁应力演化及失稳特征，为井筒稳定性评价提供了方法依据。在超临界气化微观机理方面，Zhao S等[4]通过数值方法研究了不规则煤颗粒在超临界水中的气化特性，揭示了颗粒形态与反应传质过程之间的关联关系。国外研究在气化反应与数值模拟方面较为深入，但针对煤层—井筒系统多场协同响应及井筒全生命周期完整性评价的系统研究仍显不足。

就对煤的原位转化的认识及其与井筒的相关问题而言，国外研究主要集中于超临界气化反应机理、地下气化过程的数学模拟及井筒结构安全性评价等方面。H Feng et al利用超临界水的气化途径考察 CO_2作为传递剂对煤气生成的影响，也指出了反应介质运移特性及其对气化过程及产物组分的影响规律，可以用来解释超临界转化条件下反应场的变化特征[1]；L. Jiang et al.综合论述了地下煤气化的数学模拟方法，并基于热流和渗流传导角度构建一个多物理场耦合模型系统，同时重点关注了模型参数选取及边界条件设置的影响程度，在此基础上为了确保井筒构造安全[2]。M Shahbazi 等人对地下煤气化垂直井筒开展了热—力耦合计算分析并研究了高温条件下井壁压力变化规律及其失稳情况，为评定井筒稳定性提供了有效方法。[3]对于超临界气化的微观机理方面，Zhao S et al基于数学模型描述了非常规煤颗粒在 SCW 中解离的行为并揭示了形状与化学反应及传递之间的关系。[4]尽管国外学者对气相反应以及数值模拟有深入认识，在综合考虑煤－钻孔系统多种因素的影响和全生命周期评价上缺乏相关研究。

2.2. 国内研究现状

针对超临界介质的煤层反应特性和井筒工程特性等问题，国内学者开展了大量的系统研究工作，如陈倩等从超临界CO_2井筒泄漏过程中的物性变化及多物理场耦合作用等方面探讨了温度、压力以及流场之间的耦合关系对井筒安全性的影响。同时为其适应复杂环境提供了参考模型。[5]此外，丛日超等基于煤层气开发需求研究了超临界CO_2 聚能压裂技术应用于煤炭中的可行性，并详细阐述了超临界介质作用下，煤炭结构变化及渗透率条件调节过

程[6]；针对煤炭自身微观响应机理，王建美等对超临界CO_2条件下无烟煤的结构演变及高压吸附特征进行了分析，并探讨了煤炭孔隙结构变化对吸附性能的影响机理[7]；王帅峰等根据亚临界和超临界CO_2吸附差异性，综合分析了煤炭吸附特性和赋存规律，为超临界流体在较长时间尺度上作用到煤炭后，其反应行为的研究提供依据[8]。而在工程应用方面，刘勇等开展了自激振荡脉动式超临界CO_2喷射流形成机理研究，并分析了其工作过程中形成的高能脉动喷射流的动力特性[9]。虽然国内的研究在超临界介质的作用机理方面取得了很多进展，但是对煤层—井筒系统整体进行多场耦合响应，及完整性评价等方面的研究尚需进一步完善。

2.3. 研究评述

纵观国内外的研究进展，已取得对超临界介质作用机理、煤体结构响应及地下的煤气化过程模拟等方面的认识，这些认识为煤炭原位转化工艺的研发奠定了基础。已有工作多局限于反应动力学单场条件或具体工程问题分析层面，忽略了超临界转场环境中煤层—井口系统的全响应特征。井筒作为连接地面与地下的重要通道，在服役过程中受温度、压力、渗透率及化学反应等诸多因素影响，具有多参数耦合、阶段性等特点[10]。目前缺乏对多因素联合作用下井筒系统的可靠性评价的系统性研究，缺乏适用于超临界变化环境下的完整井筒完整性评价方法体系。针对该问题，应从多因素响应关系角度研究煤层－井筒系统机理，并构建适用于超临界转化环境下的井筒完整性评价技术体系。

3. 超临界转化环境下煤层—井筒系统的工程特征与理论基础

3.1. 煤炭原位转化井筒工程体系及其运行工况特征

煤炭原位转化井筒工程系统是核心工程建设主体，其组成及运行状态直接关系到整个系统的安全性以及长期性转变。煤炭原位转化井筒工程系统通常由注入井、生产井及其他附属管道设备构成，需要长期抵御高温、高压、多组分的化学环境影响。不同井筒因工作职能、荷载条件、介质性质的不同，所以其工作对象及稳定的要求也是不同的。为综合表征煤原位开采井筒的真实工况下的工程特性，需对井筒的工作对象、典型工作过程以及主要约束条件等方面进行归纳以总结出井筒工作特征。各类型井筒及其工作状况的主要内容，见表1所示。

表 1 煤炭原位转化井筒不同井型的功能定位与典型运行工况。

井型类别	工程功能	主要运行环境	关键工程约束
注入井	注入超临界介质与气化剂	高压、高温、连续流动	管柱承压与密封可靠性
生产井	采出粗煤气及反应产物	高温、多组分腐蚀性介质	套管稳定性与完整性
配套管柱	介质输送与井筒隔离	温压交变、多场耦合作用	力学响应与材料耐久性

3.2. 超临界转化环境的温压条件与介质物性特征

煤矿原位转化井筒工作时处于一个极端的工况下，其内温度及压力均高于常规石油或者天然气开采，导致流体状态介于气态－液态之间的特殊物态，在这种状态下，物性的密度、黏度、热力学性质随温压变化大。它将对井筒中的流型、传热传质形式及溶质输运产生重要影响[11]。由于超临界流体物性随临界点附近变化范围大，因而井中工况表现出很强的非线性特征。为定量表示超临界转场中温度－压力环境与介质属性之间的关系，一般采用状态方程表征介质状态，其表达形式如下：

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)} \quad (1)$$

式中，P表示物质的压力；T表示物质的热力学温度；V表示物质的摩尔体积；R表示气体常数；a和 b分别表示物质分子间作用力及分子占据体积大小的比例系数。该关系能表征物质随着不同温压条件下从气态到液态之间物理性能的演变过程，即超临界相变区间。并且为后续跨域协同作用机制的研究提供基础性数据支撑。

不同超临界转化环境的典型工况范围及介质物性变化特征的主要参数特征如表2所示。

表 2 超临界转化环境下典型温压条件及介质物性变化特征。

参数类型	典型范围	变化特征	工程影响
温度	高于临界温度	物性突变区明显	影响传热与反应速率
压力	高于临界压力	密度随压变化显著	影响流动与承压
密度	随温压强烈变化	非线性特征突出	影响介质输运
黏度	中低水平波动	对流动阻力敏感	影响井筒压降

3.3. 原位改性流体化采矿理论对井筒工程研究的支撑

煤层在地下状态下进行的结构改性和流态化的响应，是原位改性流体化开采方法的基本概念所在，其强调的是借助外界力量，以及载体对煤体物性特征，以及渗透率之间的相互作用关系加以调节，为这类煤炭原位转化工程提供了基础性的理论支撑。在超临界转相条件下，温度、压力和反应剂的作用下发生结构变化。此外它的孔隙结构及力学性质也处于变化之中；而井筒体系是重要的中间通道，在能量及介质传递中发挥重要作用，所以井筒工程响应直接关系到煤层改造过程[12]。基于原位改性流态化开采思路，可从多场耦合视角分析井筒随煤层改造各个阶段中的热压载荷、结构约束条件及其作业环境的变化，进而为它的可靠性及完整性评价奠定基础。为了直观反映原位改性流态开采法概念对煤层—井筒系统的工作模式以及工程相互作用机制的贡献，建立其核心作用框架模型，见图1。

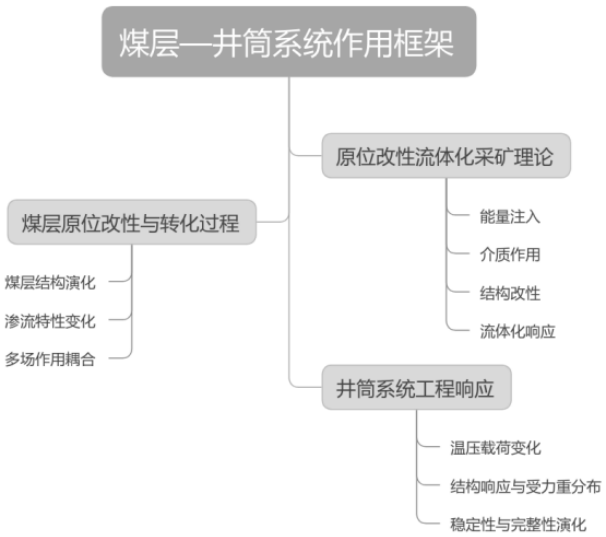


图 1 原位改性流体化采矿理论支撑下煤层—井筒系统作用框架示意图。

4. 超临界转化条件下煤层—井筒系统多场协同响应机制

4.1. 多场耦合作用下煤层—井筒系统响应演化过程

煤层—井筒系统在大于临界点的条件下，在时间长的情况下受温度、压力、泄漏及化学反应等多种物理解释过程影响，因此该系统响应方式有时间空间性特征。当注入超临界流体后，井口附近煤温明显升高，局部区域形成高温差环境，导致煤体发生热胀冷缩以及物性变化。随着反应的持续进行，在煤层中会产生新的压强场及渗流场，产生的气体将沿着井筒流动，原有的应力状态发生变化，受多场耦合作用的影响，煤层结构变化会改变井壁稳定性，导致整体体系由初始的热力学及动力学小幅扰动演化到全方位的重构过程，并表现出显著的阶段性特征。随转化程度加深，煤体内部孔隙结构继续演变，提升其渗透性的同时也将影响井周范围内介质流动以及能量传递通道，致使体系响应转归以结构改造为主导并伴随多场响应过程。

为描述煤层—井筒系统受多场耦合作用后响应演化规律，可利用多场耦合控制方程表征该系统的状态变化情况[13]，其基本形式可表示为：

$$\partial u/\partial t = f(T,p,\sigma,c) \tag{2}$$

式中，u表示系统响应状态变量，表示煤体及整个矿场的响应特征体现；t表示时间变量，T表示热场变化，p表示压力场变化，σ表示应力场变化，c表示化学物质（成分数值）变化，f(.）是各物理量在多因素耦合作用下的综合效应函数。该模型描述了煤体变形发展过程及气化炉井筒受力状态以及其与多学科之间的关系，为后续建立多学科耦合反馈机制分析方法和可靠性评价方案提供理论基础。

4.2. 多场协同作用驱动的结构响应与失稳机制

超临界状态条件下，煤层－井筒系统的运动过程受温度场、应力场、渗流及化学反应等多种复杂因素影响，呈现出高度非线性及耦合特征；高温作用下井筒材料及周围

介质弹性模量和屈服强度减小，温度差引起的热形变在井口附近急剧增大。与此同时，在压力及渗流场作用下，井壁附近气体压强也将发生变化，有效应力状态随之改变；而且由于化学反应及介质腐蚀的作用，材料内禀性质可能发生劣化而使其承载能力下降。在上述诸多因素的综合作用下，井壁结构响应则是热变形、渗流致应力重分布以及材料性能劣化的耦合结果，而且这一过程具有鲜明的时间先后性和空间上的不平衡性。

为反映多场耦合作用下的整个井筒系统响应情况，可以采用考虑热-渗-化综合作用的有效应力方程进行表征，一般可表示为：

$$\sigma_ij = C_ijkl(\varepsilon_k l - \alpha_T \Delta T \delta_k l) - \beta p \delta_i j - \gamma c \delta_i j \quad (3)$$

式中，σij是结构有效应力分量；Cijkl表示材料弹性模量；εkl是应变分量；αT是热膨胀系数；ΔT为温差；δij表示克罗内克函数；p和 c分别为孔隙压力和反应流体浓度。β和γ分别是压力及化学作用下的耦合系数，因多重影响因素叠加而导致结构内应力积累加剧，当系统总荷载不能承受外加的综合荷载，则稳定性状态失稳[14]。在考虑多场耦合作用下的井筒稳定性可采用能量判别法进行表示：

$$\Pi = \int_V (W_e + W_T + W_c) dV - \int_V W_e x t dV \quad (4)$$

其中Π是系统的总势能，We表示弹性体的应变能密度，WT 表示热引起的附加能项，Wc表示化学反应引起的能量变化项，Wext表示外界负载做功，V表示所讨论对象体积。当整个系统的潜能达到不稳定平衡状态时这样该管件结构就由稳定状态发展至不稳定状态并逐步发生破坏扩展现象，进而影响整机安全使用性能。上述分析说明了多因素耦合作用下筒形锻件的响应及失稳发展规律的物理解释。

4.3. 多场协同响应在气化过程中的传递与反馈特征

在超临界转化条件下，煤的气化作用不是孤立进行的，在煤层－井筒系统中多场存在相互影响及渗透过程；沿井筒运移的化学组分会通过对流扩散产生热量传递与质量传递，并对煤的热胀力、力学特性等参数造成影响，同时，也会影响周围环境，并将这种影响传递到井筒结构上，使其发生应力状态的变化；产生的气体将在煤层孔洞和裂隙网中流动并导致压力场变化以及渗透率的变化，反过来又会作用于注入化学品的供给和产物排放方式。其中各领域之间的互动为梯阶式，从而导致了整个系统的反应由点及面，形成多尺度多路径的整体性传播方式。

随着筒体结构改造程度加深，孔隙连通性增强，导流能力提升，气相转化环境改善，有利于促进反应活性以及产物释放性能的提高；同时反应活性升高又加剧了热量、压力集中效应，让井口附近构造承受更为复杂的应力状况。假设构造响应同气体变化力度之间有着良好的互动关系，则此系统处于加强状态；但是如果构造承载力及媒介传递力遭到抑制，则负向反馈机制开始成为主体存在形式，表现为某些化学作用无法进行或是构造稳定度出现下降现象。以上转变及反馈特性决定了气态转换过程的可控性和稳定性，是制约煤层－井筒体系稳定运行及转换效率的关键因素。

4.4. 多场协同响应对系统整体稳定性的控制机理

在超临界转变条件下，影响全煤层—井筒系统稳定性的各场量是相互联系共同制约调控的，并不是各个单一物理因素独立作用之和，而是不同时空下各种场量之间相互制约协同的体现。温度升高造成的物性热形变累积及力学性能劣化，另外，压力和渗透率变化会反过来影响井筒及周围岩石有效应力场；化学作用场所产生的介质腐蚀和结构改造也会对物质微构造成分产生影响。这些多领域反馈在井筒周围形成不同层次的影响区域，导致此系统稳定性的空间非均一性特征明显。在转变过程中会出现一些局部不稳定的区沿着井筒纵向或横向扩展，在没有适当控制的情况下会导致危险性的不稳定性影响整个系统的情况。

因此，整个系统的稳定性控制可由各个场景下的力量及承受能力平衡方程进行表示[15]。为体现系统的整体稳定，在多场耦合下可构建综合稳定度控制函数表达式为：

$$S = \frac{\int_V (E_r - E_d) dV}{\int_V E_l dV} \quad (5)$$

式中，S表示整个系统的稳定性控制因子；Er表示系统面对多方面的影响仍能够正常工作的能力；Ed和 El分别表示受多方面的因素共同作用产生的破坏消耗能力和外界有效工作量的能力；V是研究区范围。如果S在一定范围内，则能够保证系统的稳定；但如果S减少并趋向于极限状态，则主要是由于各影响因素联合作用产生的破坏累积而使得系统整体稳定性骤降。该调控机理揭示了能流层面的多因素耦合关联性对煤层－井筒系统鲁棒性的限制规律，为我们在进行稳控管理和工程设计时提供了理论依据。

5. 超临界转化环境下井筒系统稳定性与完整性评价方法

5.1. 基于多场协同响应的井筒系统稳定性评价方法

由于井筒系统是在一个温度、压力、渗透以及化学反应等综合作用下进行超临界转换过程，其稳健性发展受诸多因素影响，单纯地基于单一物理参数表征不能准确反映其在超临界转换过程中真实的工作状态。为此，提出了一种新的方法，也就是说应用多场耦合作用分析判断总体稳

定性。该方法以各工序响应特征为基础，通过对多因素耦合关键参数进行分析，实现对全井系统稳定性的判定。

基于上述思路，可以按“多场输入-响应分析-判断稳”的方法评价井筒系统稳定性，在该过程中，需要关注超临界转换状态下温压条件以及流体性质及工作参数，并对其开展多场耦合反应分析，评价井筒构造内应力应变的变化规律及损伤演化特征；构建稳定指标并给出综合评述。为更加形象地表达该评价方法的过程和流程，其过程流程图如图2所示。

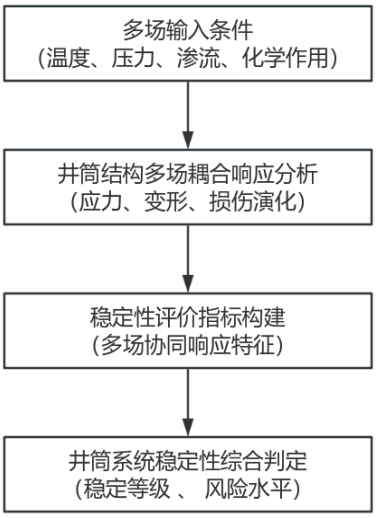


图 2 基于多场协同响应的井筒系统稳定性评价流程图

该方法基于多轮次协同反馈，实现了井筒结构响应分析和稳定性判别一体化，可定量评价井筒系统的稳定情况，并可用于指导井筒结构的设计选型及工况改善等工作，具有良好的工程实用性。

5.2. 多场耦合条件下井筒结构完整性分析方法

地下气化炉系统在超临界转化环境中，不仅取决于其初始构造特征，而且受到长期作用下跨领域的多场耦合作用的影响，因温度引起的热膨胀及物性变化，因压力和渗透率变化引起的有效载荷再分配，加之化学反应介质对物质的侵蚀作用，均成为地下气化炉系统稳定的控制因素。为掌握并预测地下气化炉系统的稳定性，需要从整体上及关键薄弱环节两个层面进行分析，并需掌握各物理场影响下各构件（如套管、管柱、井壁）的动力学响应以及承载能力与损伤累积过程。通过对不同物理场对结构形变、承载能力及损伤累积影响进行分析比较，可确定诱发失稳过程的主要作用因素，为结构安全性评估提供依据。

以井筒在多场耦合作用下的结构整体性为研究对象，考虑其不同尺度的响应特征，并结合物理原理及规范标准对结构工作状态进行判断。为此建立了反映温压化作用下结构响应特性的计算分析模型；随后利用该模型对井筒的应力、变形及破坏演化情况进行评价，同时依据材料性能退化规律对其剩余承压能力进行判别；再结合结构完整性评判准则将井筒各服役阶段状态划分为不同级别予以评判，从而实现井筒结构完整性的动态演化过程跟踪分析。为我们的后续风险预估以及全生命周期内进行管理提供了一个科学依据。

5.3. 多场作用影响下井筒系统失效风险评价方法

超临界转场过程中，井筒系统失效风险是由不同作用力相互作用形成的受力响应及材料老化，以及工况变化导致的综合结果，具有多样性和不确定性特征；对其评价需从风险辨识、影响因素分析直至风险等级划分等方面进行。明确每种失效模式的关键影响因素；将温度、应力、渗流能力以及腐蚀等因素纳入我们的风险评价框架中来评估井筒系统失效的危害性，并据此掌握井筒系统受不同作用力下最可能发生的失效模式及危害特征。并对之进行归纳总结，如表3所示。

表 3 多场作用影响下井筒系统主要失效模式及风险评价要素。

失效模式	主要影响场	风险特征	评价关注点
热致失稳	温度场	变形集中、应力升高	热应变与强度退化
承压破坏	压力场	局部破裂	承载能力裕度
渗流破坏	渗流场	结构侵蚀	渗透性变化
化学腐蚀	化学反应场	材料劣化	腐蚀速率与程度

5.4. 井筒全生命周期完整性综合评价方法

全生命周期评价以井筒各阶段服役状态为评价对象，重点关注随时间增加的功能劣化规律及特征，并考虑到在超临界过渡工况下井筒系统使用寿命呈累积性、阶段性衰减的特点，需从全生命周期角度开展井筒安全综合评价工作。该评价方法是基于每一周期中装备响应及损伤状态，并综合考虑多方面影响而得到的静力测试结果、完整性测试结果及失效风险性的评价结果进行井筒服役状态的整体评判。

按照全过程综合评价方法，建立各阶段的评价指标及整体判据，实现井筒系统不同阶段安全状态的分级管控，在此基础上根据井筒服务期以及服务特征选取对应的评价指标并跟踪监测关键部件的变化趋势。然后再结合这些信息进行风险级别的判断，这样能够得到总体上的评价，为我们在井筒构造的设计优化、作业环境调控及风险防控

等方面提供决策依据，提升煤矿施工现场转换井筒的长期运用安全性能和施工稳定性。

结语：综上所述，本文对超临界状态条件下煤层－井筒系统的安全开采进行了系统地研究。重点是对煤层改造过程中的复杂机理及与井筒响应之间的内在联系进行分析，并得出在超临界转态条件下温度场、应力场、渗流场、反应场等多种场耦合作用下，结构响应决定了井筒系统的稳定状态及完整性演化规律。基于多场耦合响应分析方法构建了考虑结构响应－稳定性评价－风险预测的一体化综合评价方法，为复杂工况下井筒系统服役状态评估提供了有效手段。本项工作不但丰富了煤炭原位转化井筒工程理论知识，而且提升了井筒工作的安全性以及延长使用寿命，并有利于促进煤炭清洁高效化开采。

基金项目

本文为国家自然科学基金联合基金重点支持项目《深部煤层原位超临界水气化关键技术基础研究》（U23B2088）、中国石油天然气股份有限公司科技项目《三塘湖深层煤岩油气内源热解开采关键技术研究及先导试验》（2025ZS61）的阶段性成果之一。

参考文献

[1] Feng H, Ren Y, Jin H, et al. Regulation mechanism of hydrogen production through supercritical water gasification of coal by introducing CO_2 as transport agent [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(73): 31255-31268. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.077

[2] Jiang L, Feng L, Gao W, et al. Modelling underground coal gasification: What to start with [J]. Natural Gas Industry B, 2023, 10(6): 626-637. https://doi.org/10.1016/j.ngib.2023.11.006

[3] Shahbazi M, Najafi M, Marji M F, et al. A thermo-mechanical simulation for the stability analysis of a horizontal wellbore in underground coal gasification [J]. Petroleum, 2024, 10(2): 243-253. https://doi.org/10.1016/j.petlm.2023.11.003

[4] Zhao S, Zhang R, Huang H, et al. Numerical investigation on gasification characteristics of irregularly-shaped coal particles in supercritical water for hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 124(Suppl. C): 304-317. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.034

[5] 陈倩, 樊建春, 张来斌, 等. 超临界 CO_2 井筒泄漏相变多物理场特征研究 [J]. 石油机械, 2025, 53(3): 59-67. https://doi.org/10.12473/CPM.202403081

[6] 丛日超, 王海柱, 李根生, 等. 超临界 CO_2 聚能压裂开发煤层气可行性研究 [J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3162-3171. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.SS22.1224

[7] 王建美, 梁卫国, 牛栋, 等. 超临界 CO_2 作用下无烟煤结构响应特征及高压吸附机理 [J]. 天然气工业, 2024, 44(4): 115-125. https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2024.04.012

[8] 王帅峰, 韩思杰, 桑树勋, 等. 煤层亚临界/超临界 CO_2 吸附特征与封存模式 [J]. 天然气工业, 2024, 44(6): 152-168. https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2024.06.015

[9] 刘勇, 崔家玮, 魏建平, 等. 自激振荡脉冲超临界二氧化碳射流发生机制 [J]. 煤炭学报, 2022, 47(7): 2643-2655. https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2021.1209

[10] Bhutto A W, et al. Underground coal gasification: From fundamentals to applications [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 189-214. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.09.004

[11] 杨榛, 梁杰, 李秀珍, 等. 煤炭地下气化燃烧过程影响因素及控制方法 [J]. 煤炭转化, 2002, 25(4): 32-49. https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4248.2002.04.008

[12] 坎尼扎提, 陈龙, 等. 准噶尔盆地西北缘煤炭地下气化(UCG)可行性探讨 [C]//2018 油气田勘探与开发国际会议(IFEDC 2018)论文集. 西安: 西安石油大学, 陕西省石油学会, 2018.

[13] 尹振勇, 许浩, 汤达祯, 等. 准东地区煤炭气化地质评价与有利区预测 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 3845-3851. https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-1815.2020.10.007

[14] 刘奕杉, 黄顺潇, 袁光杰, 等. 煤炭地下气化高温井筒温度场研究 [J]. 煤炭转化, 2022, 45(1): 58-64. https://doi.org/10.19726/j.cnki.ebcc.202201007

[15] 宋洵成, 韦龙贵, 何连, 郭永宾, 管志川. 气液两相流循环温度和压力预测耦合模型 [J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(6): 5-9.