

引文:莫丽,肖雄,李长俊,等. 高压 CO₂ 长输管道 O 形密封圈快速减压损伤模型[J]. 油气储运, 2025, 44(10): 1105–1115.

MO Li, XIAO Xiong, LI Changjun, et al. Development of a damage model for rapid decompression of O-ring seals in high-pressure and long-distance CO₂ pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(10): 1105–1115.

高压 CO₂ 长输管道 O 形密封圈快速减压损伤模型

莫丽¹ 肖雄¹ 李长俊² 贾文龙² 吴瑕² 陈超²

1. 西南石油大学机电工程学院; 2. 西南石油大学石油与天然气工程学院

摘要:【目的】长输管道作为碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)系统中大规模输送 CO₂ 的核心设施,其密封系统的可靠性直接影响技术流程的安全性及效率。尽管现有研究在高压 CO₂ 环境下橡胶 O 形密封圈(简称 O 形圈)损伤机制方面已取得一定进展,但快速减压过程中气体扩散与橡胶变形耦合作用机制这一关键问题仍未得到充分研究。【方法】基于菲克扩散定律、Mooney-Rivlin 超弹性本构模型及最大主应变损伤准则,建立考虑 CO₂ 溶解渗透、橡胶非线性变形及材料损伤演化的多物理场耦合模型,通过有限元方法实现模型参数化求解,系统研究了氢化丁腈橡胶(Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber, HNBR)、丁腈橡胶(Nitrile Butadiene Rubber, NBR)、三元乙丙橡胶(Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM)及天然橡胶(Natural Rubber, NR)4 种典型密封材料在快速减压下的性能响应规律,重点分析空腔尺寸、压缩率、压力水平及减压速度等因素的影响。【结果】4 种材料抵抗快速减压损伤能力从大到小依次为 HNBR、NR、NBR、EPDM。在 4 MPa 外部压力下,HNBR 抵抗快速减压性能最优,最大对数应变仅为 0.17;EPDM 应变峰值达 1.42,超过断裂伸长率而发生破裂。压缩率对 HNBR 的应变影响规律异于其他材料,源于其减压阶段空腔承受的特殊压力差特性与自身材料特性;对于 NBR、EPDM 及 NR,适度提升压缩率可降低快速减压阶段的应变。此外,空腔直径增大、外部压力升高及减压速度加快均会导致 O 形圈内部空腔的应变增加。【结论】所构建的数值模型能够精准预测高压 CO₂ 环境下 O 形圈在快速减压过程中的损伤行为,为管道密封系统的材料选型、结构参数设计以及运行维护策略制定提供可靠的理论支撑,推动“双碳”战略目标的实现。(图 14,表 2,参 25)

关键词: CCUS; 橡胶 O 形圈; 快速减压; 扩散-变形耦合模型; 材料性能

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)10-1105-11

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.10.003

Development of a damage model for rapid decompression of O-ring seals in high-pressure and long-distance CO₂ pipelines

MO Li¹, XIAO Xiong¹, LI Changjun², JIA Wenlong², WU Xia², CHEN Chao²

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University; 2. School of Oil & Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University

Abstract: [Objective] Long-distance pipelines are essential for large-scale CO₂ transportation within the Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) system, where the reliability of sealing systems directly influences safety and efficiency. While research has advanced the understanding of the damage mechanisms affecting rubber O-rings in high-pressure CO₂ environments, the coupling mechanism between gas diffusion and rubber deformation during rapid decompression remains underexplored. [Methods] In response to this issue, a multi-physics coupling model was developed, incorporating CO₂ dissolution and permeation, nonlinear rubber deformation, and material damage evolution. This model is based on Fick's law of diffusion, the Mooney-Rivlin hyperelastic constitutive model, and the maximum principal strain damage criterion. Utilizing the finite element method, a parametric solution was obtained to systematically investigate the performance response under rapid decompression of four typical sealing materials: Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber (HNBR), Nitrile Butadiene Rubber (NBR), Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM), and Natural Rubber (NR). The study focuses on analyzing the effects of factors such as the cavity size, compression ratio, pressure level, and decompression rate. [Results] The four materials' resistance to damage

during rapid decompression in order from high to low is HNBR, NR, NBR and EPDM. Under an external pressure of 4 MPa, HNBR demonstrated the best resistance to rapid decompression, exhibiting a maximum logarithmic strain of only 0.17, while EPDM's peak strain reached 1.42, surpassing its elongation at break and resulting in rupture. The influence of compression ratio on the strain of HNBR differed from that of other materials due to the unique pressure difference characteristics of the cavity during decompression and HNBR's material properties. In contrast, NBR, EPDM, and NR exhibited reduced strain during rapid decompression with a moderate increase in compression ratio. Furthermore, an increase in cavity diameter, higher external pressure, and a faster decompression rate would result in increased strain within the cavity of the O-ring. **[Conclusion]** The developed numerical model accurately predicts the damage behavior of O-rings during rapid decompression in high-pressure CO₂ environments, providing reliable theoretical support for material selection, structural parameter design, and the formulation of operational and maintenance strategies for pipeline sealing systems, thus facilitating the achievement of the "dual carbon" strategic goals. (14 Figures, 2 Tables, 25 References)

Key words: CCUS, rubber O-ring, rapid decompression, diffusion-deformation coupling model, material performance

在全球气候变暖加剧与温室气体排放持续增加的背景下,海平面上升、极端天气事件频发等环境问题日益严峻。碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术作为应对气候变化的关键策略,对实现“双碳”目标具有重要意义^[1-5]。特别在石油开采领域,CO₂驱油(Carbon Dioxide Enhanced Oil Recovery, CO₂-EOR)技术不仅能有效提高原油采收率,还可显著减少碳排放量,为环境保护作出重要贡献^[6]。在CCUS技术的应用中,长输管道密封系统的可靠性直接关系到整个系统的安全性与运行效率。O形圈作为管道系统中的关键密封元件,其性能对防止流体泄漏与保障系统正常运行具有决定性作用^[7]。然而,在高压CO₂环境下,管道系统不可避免地面临压力波动问题,尤其是在快速减压工况下,极易导致橡胶O形圈损伤,引发CO₂泄漏,不仅降低运输效率,还可能造成严重安全事故,极大地制约了CCUS技术的推广应用^[8]。快速减压下O形圈的膨胀破裂是工业应用中的重要失效模式,主要表现为橡胶材料长期暴露于高压气体环境后,当压力骤降时,溶解在橡胶内的气体迅速膨胀逸出,导致材料内部形成气泡并最终引发开裂或完全破裂^[9]。从微观机制分析,这一损坏现象源于CO₂在橡胶内部的扩散行为与材料变形之间的复杂相互作用,导致橡胶分子链断裂与交联点失效,最终引起O形圈性能劣化^[10]。针对这一问题,学者们已开展了多方面的研究。Chester等^[11-12]通过理论研究揭示了橡胶在高压气体环境中长期浸泡后遇压力骤减时,聚合物内部达到饱和状态的气体膨胀形成气泡或裂纹的损伤机制。Bayraktar等^[13]通过静态拉伸试验发现试样中心区域是空腔萌生与扩展的主要位置,较大

空腔最终导致材料损伤。Kulkarni等^[14-15]运用连续介质力学变形模型预测快速减压时空腔应力分布与损伤状况,分析了多空腔相互作用对损伤与应力场的影响。此外,采用高弹性损伤模型对橡胶失效过程进行模拟,发现炭黑填料可抑制损伤而增塑剂则会增加损伤风险。陈明战^[16]基于Python与ABAQUS软件,研究了空腔位置等因素对O形圈快速减压性能的影响。

尽管已有研究在O形圈高压CO₂损伤领域取得了一定成果,但在O形圈装配环节中,对于气体扩散与橡胶变形耦合机制的研究仍存在不足。在此,基于菲克扩散定律、Mooney-Rivlin超弹性本构模型及最大主应变损伤准则,构建扩散-变形耦合损伤模型,旨在精确预测快速减压过程中橡胶O形圈内部CO₂的分布与应变状态,进而准确评估橡胶的损伤情况。通过合理选择材料模型与参数,系统分析不同橡胶材料特性的影响,并全面探究空腔尺寸、压缩率、压力水平及减压速度等因素的作用规律,以期期为长输管道O形圈的设计选材与维护提供理论支撑。

1 理论基础

1.1 CO₂扩散模型

CO₂扩散基于气体扩散原理,当其在橡胶中扩散时,CO₂分子将从高浓度区域向低浓度区域迁移,直至浓度达到平衡(图1)。

菲克定律是气体扩散基本定律。菲克第一定律表明,当气体稳态扩散时,单位时间通过垂直扩散方向单位截面积的扩散通量与浓度梯度成正比。在二维上,其表达形式为^[15]:

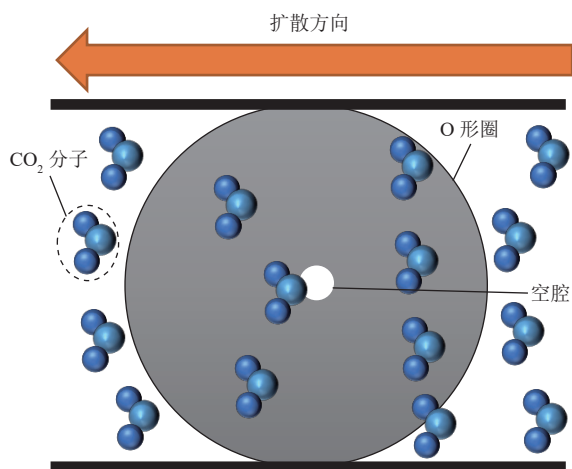


图1 CO₂ 分子在橡胶 O 形圈中扩散过程示意图
Fig.1 Schematic diagram of the diffusion process of CO₂ molecules in rubber O-rings

$$\mathbf{J} = -D \left(\frac{\partial \varphi}{\partial L_x} \mathbf{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial L_y} \mathbf{j} \right) \quad (1)$$

式中: \mathbf{J} 为扩散通量, m/s; \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 分别为 x 、 y 方向的单位矢量; D 为扩散系数, m²/s; φ 为 CO₂ 体积分数; L_x 、 L_y 分别为沿 x 、 y 扩散方向的距离, m。

在菲克第一定律的基础上, 利用质量守恒原则, 推导出菲克第二定律^[15]:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial L_x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial L_y^2} \right) \quad (2)$$

式中: t 为时间, s。

亨利定律主要表述在等温等压条件下, 挥发性溶质在溶液中的浓度与液面上该溶质的平衡压力成正比^[16]:

$$\varphi = Sp \quad (3)$$

式中: S 为溶解度, MPa⁻¹; p 为气体分压, MPa。

1.2 Mooney-Rivlin 模型

由于橡胶材料表现出显著的非线性力学特性, 传统线性弹性理论难以准确表征其在大变形条件下的应力-应变关系。Mooney-Rivlin 模型是一种在超弹性材料力学行为研究中广泛使用的橡胶本构模型, 其凭借其自身特点得以在橡胶材料相关研究中发挥作用, 为解决这一难题提供了有效的理论框架。对于不可压缩的超弹性材料, 其应变能函数 W 可表示为^[17]:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (4)$$

式中: C_{10} 、 C_{01} 为材料常数, MPa; I_1 、 I_2 分别为应变张量的第一、第二不变量。

1.3 扩散与变形的耦合

在高压 CO₂ 环境下, O 形圈内部会发生复杂的物

理化学过程。CO₂ 分子向空腔区域扩散, 导致空腔内 CO₂ 体积分数不断升高。随着 CO₂ 分子的持续进入, 橡胶分子链间距离因 CO₂ 分子的渗透作用而增大, 引发空腔膨胀变形。这种膨胀变形不仅会改变空腔的尺寸与形状, 还会产生显著的变形应变。在此过程中, 橡胶 O 形圈的总应变由以下 2 部分构成: ①由外部机械载荷与外部 CO₂ 流体压力引起的超弹性应变; ②由 CO₂ 扩散导致的膨胀变形应变。这 2 种应变的耦合作用决定了橡胶材料在高压 CO₂ 环境下的整体变形行为^[15]。

1.4 损伤模型

采用最大主应变破坏理论作为损伤判据, 通过评估材料在达到破坏点前应力作用下的应变状态来预测损伤情况。具体而言, 通过计算主应变并将其与材料的临界应变值进行比较, 当最大主应变超过临界值时, 判定材料已发生破坏。在二维条件下, 最大主应变可表示为:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \sqrt{\left[\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

式中: ε_{\max} 为任意点的最大应变; ε_x 、 ε_y 分别为 x 方向、 y 方向的正应变分量; γ_{xy} 为 xy 平面内的剪切应变分量。

如果在单轴拉伸试验中, 断裂伸长率为 δ , 那么根据最大主应变破坏理论, 材料点的断裂将在满足下式时发生:

$$\varepsilon_{\max} \geq \delta \quad (6)$$

2 有限元模型

2.1 模型建立

为准确模拟长输管道中 O 形圈的损伤行为, 建立一个综合考虑材料特性、内部缺陷尺寸、压缩率、外部 CO₂ 压力以及减压速度的二维模型(图 2, 其中 R 为圆角半径)。模型中 O 形圈内径 32 mm、横截面直径 Φ 为 3.53 mm^[18], 上端与密封轴接触, 下端与密封挡圈配合。为简化计算, 假设材料中存在直径为 1~20 μ m 的圆形空腔, 表征橡胶材料中原始孔隙或杂质颗粒^[8]。由于实际缺陷形状的不规则性与扩散路径的复杂性, 与假设情况相比, 真实情况可能导致更高的应力集中。鉴于 O 形圈截面中心空腔更易发生破裂^[9], 重点讨论截面中心空腔对 O 形圈性能的影响。

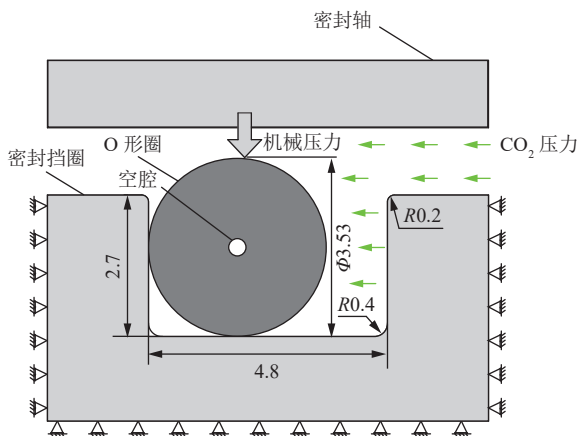


图 2 O 形圈装配工况有限元二维模型图(mm)
Fig. 2 Finite element 2D model diagram of O-ring assembly working condition (mm)

2.2 材料参数

为了确保研究的完整性与合理性,选取氢化丁腈橡胶(Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber, HNBR)、丁腈橡胶(Nitrile Butadiene Rubber, NBR)、三元乙丙橡胶(Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM)以及天然橡胶(Natural Rubber, NR)的所有材料参数^[8, 15, 17, 19-25](表 1)为例进行分析。

表 1 4 种橡胶材料关键性能参数表
Table 1 Key performance parameters of four rubber materials

材料	C_{10}/MPa	C_{01}/MPa	δ	$D/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	S/MPa^{-1}
HNBR	0.549 000	1.648 0	3.87	5.200×10^{-11}	39.00
NBR	-0.198 000	1.030 0	3.42	2.197×10^{-11}	7.41
EPDM	0.053 624	0.621 5	1.39	7.500×10^{-11}	13.40
NR	-0.350 000	1.200 0	2.67	3.100×10^{-11}	33.30

2.3 边界条件及网格划分

在有限元仿真过程中,采用差异化的网格单元类型与边界条件设置以确保计算精度。对于 CO_2 质量扩散分析,采用 DCAX4 单元进行网格划分;在静力学分析中,则采用 CAX4H 杂交单元,并通过进阶算法生成包含 9 189 个单元的精细网格(图 3)。在模拟过程中,通过施加位移边界条件实现密封轴随时间均匀向下压缩,O 形圈的压缩率则通过其横截面直径相对变化表征。同时,O 形圈下端挡圈设置为固定约束,其右边界施加随时间变化的 CO_2 穿透压力(图 4),并利用幅值模块实现加压、稳压及减压过程的精确控制。此外,考虑 CO_2 扩散效应,空腔内部将承受随时间变化的内压。为准确模拟接触行为,采用罚函数接触算法与库伦摩擦模型,其中,摩擦因数统一设置为 0.25。

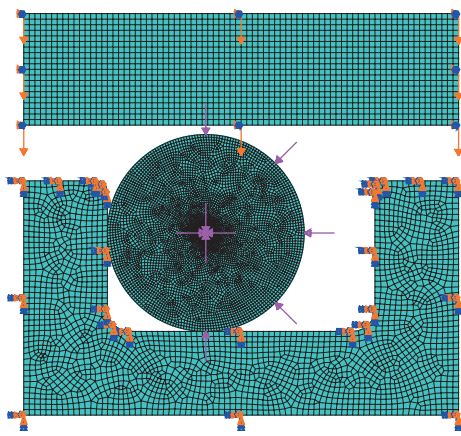


图 3 O 形圈装配二维仿真网格模型与边界设置图
Fig. 3 Diagram of the O-ring assembly simulation mesh model and boundary setting

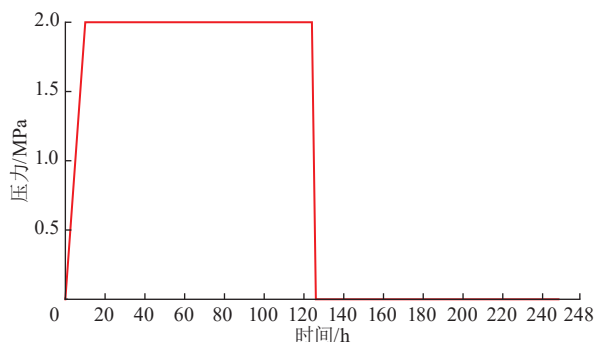


图 4 O 形圈右侧边界 CO_2 压力载荷时变曲线
Fig. 4 Time-varying curve of CO_2 pressure load at the right boundary of O-ring

2.4 分析步骤

采用多步骤耦合分析方法系统研究 O 形圈在高压 CO_2 环境下的性能演化规律:①通过机械压缩模拟获得 O 形圈的初始应力状态,并将压缩后的几何模型作为后续分析的有限元模型;②在有限元软件质量扩散模块中开展 CO_2 扩散行为分析,重点研究气体在橡胶基体中的扩散动力学特性;③基于式(3),将空腔内 CO_2 浓度场转换为压力场,为静力学分析提供边界条件;④在静力学分析阶段,重点关注空腔处的最大对数应变演化规律,并以材料断裂伸长率为判据评估损伤发生情况。

2.5 结果验证

2.5.1 网格独立性验证

为了确保仿真结果的准确性不受网格尺寸影响,对 O 形圈横截面模型进行网格灵敏度分析。采用从粗到细的网格划分策略,逐步增加单元数量,并监测 O 形圈横截面顶部的最大位移变化,该位移变化能直观体现 O 形圈在受力情况下的变形程度(表 2)。可见,随着网格数量增加,计算结果逐渐收敛,当网格节点数为

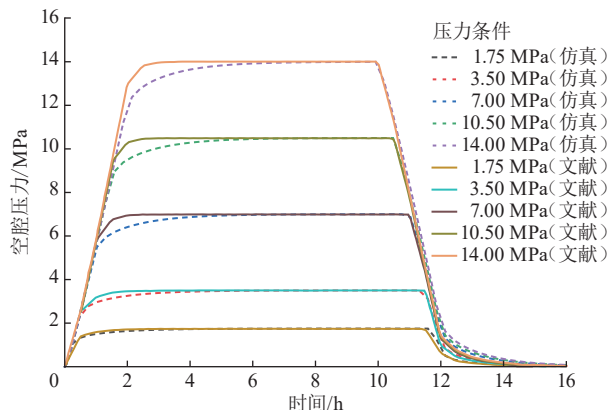
表 2 不同网格数量下 O 形圈横截面顶部位移统计表
Table 2 Vertex displacement statistics of O-ring cross-section with varying mesh counts

网格数量	位移/mm	相对误差
424	0.335 614	1.751 8%
3 730	0.329 853	0.005 2%
9 189	0.329 848	0.003 6%
36 750	0.329 836	—

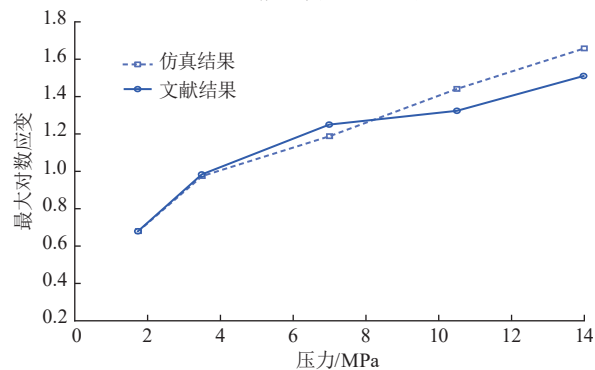
36 750 时, 认为绝对收敛。当网格节点数达到 9 189, 与绝对收敛值的相对误差为 0.003 6%, 满足仿真精度要求。因此, 所有仿真分析均采用网格节点数为 9 189 的模型, 以保证计算结果的可靠性与准确性。

2.5.2 模型验证

为了验证所构建模型及方法的可行性, 参考 Kulkarni 等^[15]关于氢气快速减压对 EPDM 损伤影响的研究参数, 将仿真结果与其研究结果进行对比分析(图 5)。对空腔压力进行分析可见, 在压力变化初始阶段, 二者的空腔压力均随时间推移逐渐升高, 且变化趋势基本一致, 表明所构建模型在模拟气体扩散导致空腔压力变化的初期阶段与文献^[15]具有良好的



(a) 空腔压力验证曲线



(b) 空腔最大对数应变验证曲线

图 5 仿真结果与引用文献结果对比图

Fig. 5 Comparison of the simulation results and the results from cited references

一致性; 在压力达到峰值后, 虽然存在一定差异, 但两者的压力下降趋势较为相似, 初步验证了模型在模拟空腔压力变化方面的可行性。分析空腔最大对数应变可见, 在外部压力逐渐增大的过程中, 所构建模型与文献^[15]的空腔最大对数应变的变化趋势相近, 在 14 MPa 压力下, 仿真结果为 1.66, 与文献^[15]的结果 1.51 相比, 误差仅为 9.93%。因此, 所构建的扩散-变形耦合模型能够较为准确地模拟高压环境下橡胶 O 形圈的性能变化。

3 结果分析

3.1 基础工况下不同材料的表现

以 EPDM 为例, 条件设置为空腔直径 10 μm 、压力 2 MPa、减压速度 1 MPa/h、压缩率 9.35%, 分析 O 形圈在机械压缩结束、外部 CO₂ 加压结束、稳压结束、减压结束 4 个关键阶段的 CO₂ 体积分数分布情况(图 6)。可见, 当机械压缩结束时, O 形圈内部初始体积分数为 0; 当外部 CO₂ 加压结束后, 由于 CO₂ 扩散作用, O 形圈内部开始出现 CO₂, 且靠近 CO₂ 源的右侧边缘体积分数高于左侧, 表明 CO₂ 从右侧边界向内部扩散; 在稳压阶段结束后, CO₂ 在 O 形圈横截面达到体积分数平衡, 表明此时 CO₂ 扩散基本稳定; 当减压结束时, CO₂ 开始逸出, 整体体积分数下降, 但内部区域仍保持较高体积分数, 这主要归因于 CO₂ 扩散系数较低, 在 2 h 减压时间内无法完全扩散。

对 O 形圈横截面在 4 个阶段的最大对数应变与空腔形状演变(图 7)进行分析可见, 当机械压缩结束时, O 形圈因机械压缩产生均匀分布的应变; 在外部 CO₂ 加压结束后, 由于 O 形圈左侧与挡圈接触并受到挤压、摩擦作用, 接触区域出现明显的应力集中现象; 在稳压阶段, 相比加压阶段, 空腔的应变分布与几何形态已发生显著变化, 这源于 CO₂ 持续扩散达到压力平衡后, 其膨胀效应部分抵消了机械压缩产生的应变, 导致空腔内部应变逐渐减小, 空腔几何形状显著恢复; 当减压结束时, 由于气体快速逸出, 造成空腔区域压力梯度急剧增大, 应变随之显著增加。

对不同材料空腔内 CO₂ 体积分数与空腔压力随时间变化曲线(图 8)进行分析可见, EPDM 空腔体积分数在较短时间内达到稳定状态, 减压结束后其空腔体积分数迅速降为 0; 其空腔压力迅速上升至 2.0 MPa,

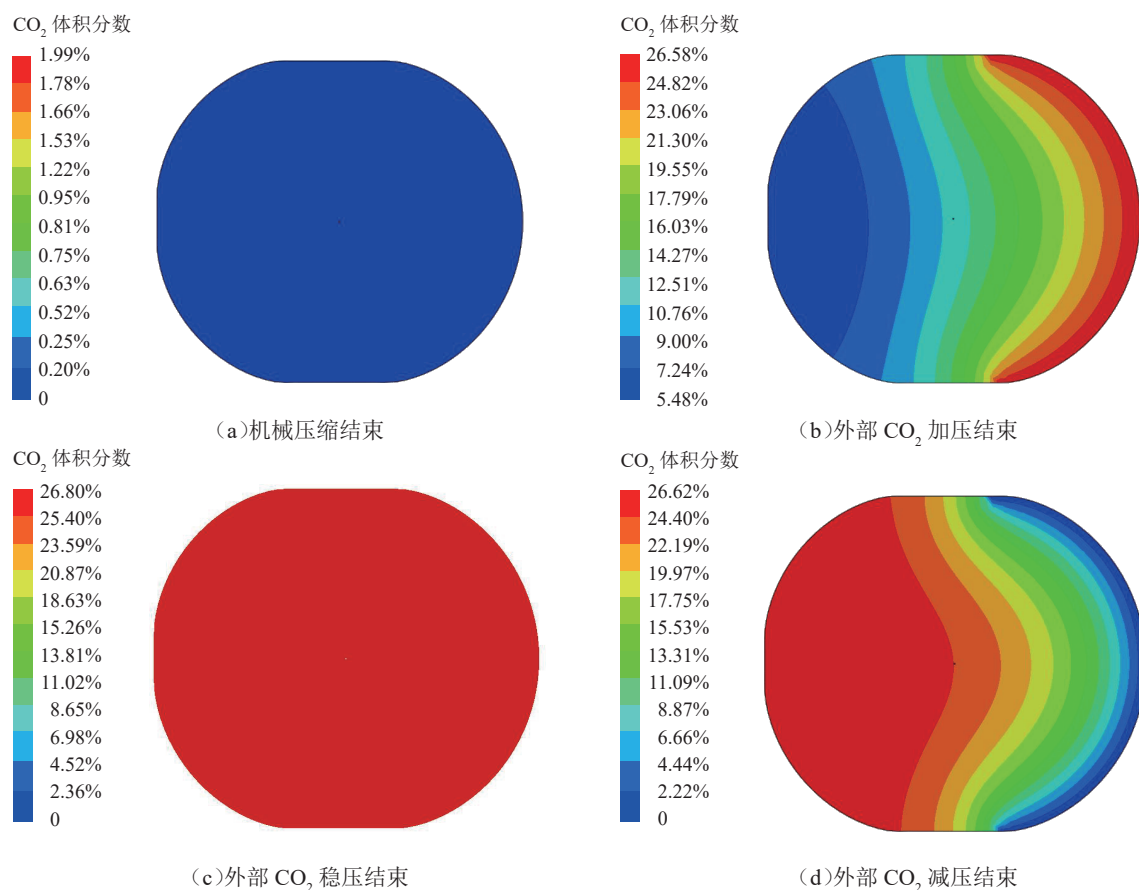


图 6 EPDM 橡胶不同阶段的 CO₂ 体积分数分布云图
Fig. 6 Nephograms of CO₂ volume fraction at different stages of EPDM rubber

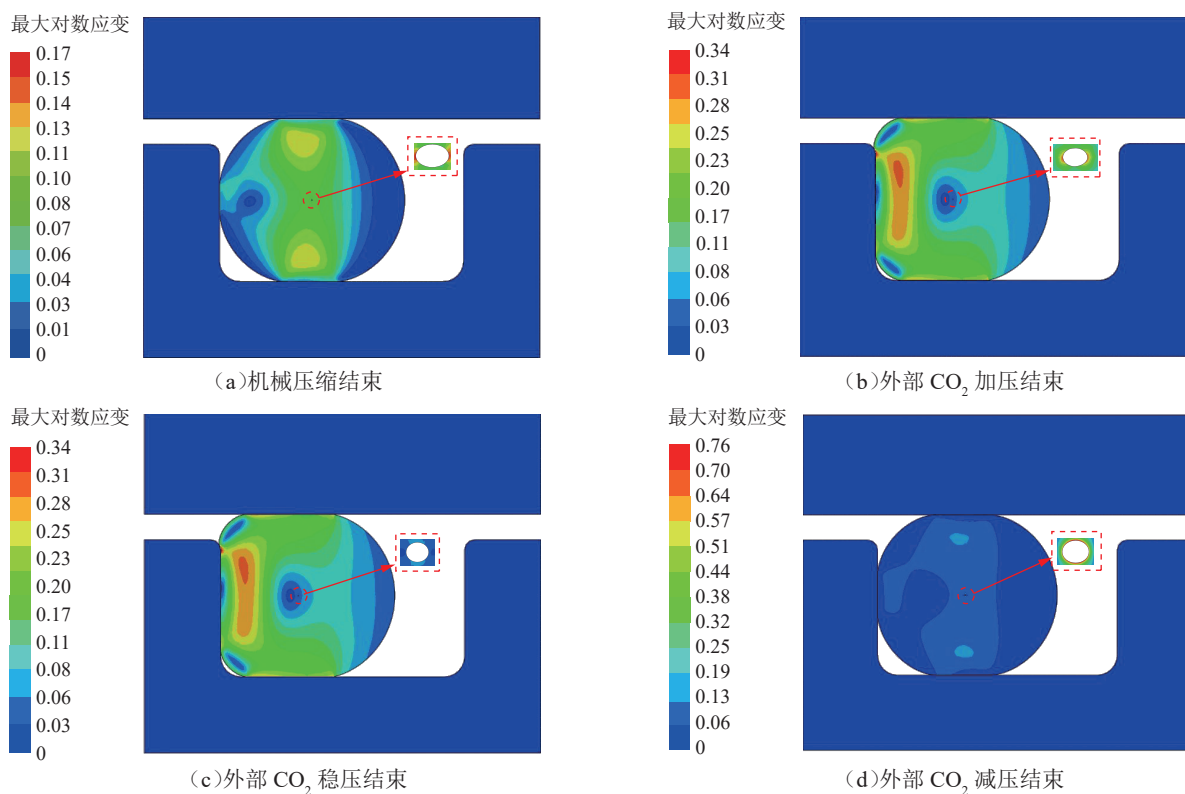


图 7 EPDM 橡胶不同阶段的最大对数应变分布云图
Fig. 7 Nephograms of maximum logarithmic strain at different stages of EPDM rubber

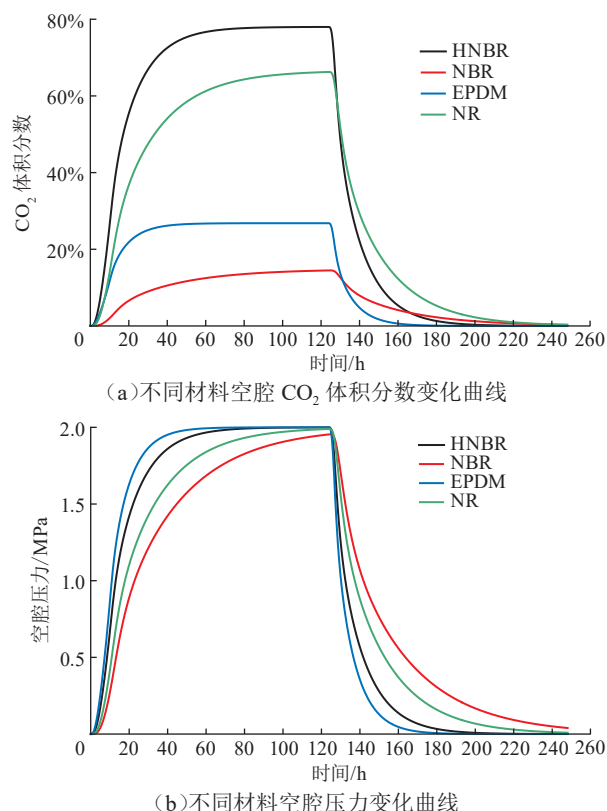


图 8 不同材料空腔浓度与压力随时间变化曲线

Fig. 8 Curves of the concentration and pressure in the cavity versus time for different materials

并在达到峰值后以最快速度下降,这是由于 CO₂ 在 EPDM 中具有最大的扩散系数。进一步分析不同材料空腔最大对数应变随时间变化曲线(图 9),可见 HNBR 在初期阶段最大对数应变略微上升然后趋于平稳,仅在 124~126 h(减压期间)出现微小波动,这得益于 CO₂ 在 HNBR 中较快的扩散系数与材料自身的优异性能。相比之下, NBR、EPDM 及 NR 在快速减压阶段的最大对数应变均达到峰值,其中 EPDM 应变值最高、其次是 NBR、最后是 NR,但均未超过断裂伸长

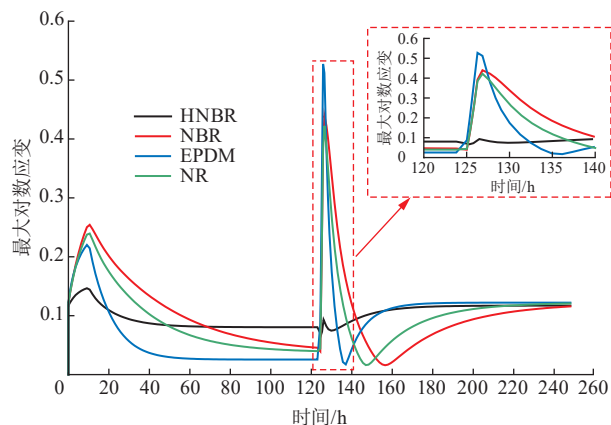


图 9 不同材料空腔最大对数应变随时间变化曲线

Fig. 9 Curves of the maximum logarithmic strain in the cavity versus time for different materials

率,即未发生破裂。综合材料性能表现,HNBR 在抗快速减压方面表现最优,而 EPDM 的表现较差。

3.2 空腔直径的影响

在压力、减压速度及压缩率相同的条件下,随着空腔直径从 5 μm 逐渐增至 20 μm ,4 种橡胶材料内部的应力集中现象愈发显著(图 10)。其中,HNBR 的最大对数应变始终维持在较低水平,且增长趋势平缓,表明该材料具有较强的抗变形能力,能够有效应对空腔直径变化带来的结构挑战。相比之下,NBR 与 NR 的最大对数应变随空腔直径增大呈快速上升趋势,在较大空腔直径下达到较高水平,表明 NBR 与 NR 对空腔直径变化极为敏感;EPDM 则对空腔直径变化表现出更高的敏感性。当空腔直径为 20 μm 时,NBR 的应变小于 NR,但在小于 15 μm 的空腔直径下,NBR 的应变则大于 NR。综合评估各种材料最大的对数应变,其抵抗快速减压损伤的能力从大到小依次为 HNBR、NR、NBR、EPDM。可见,空腔直径的增大不仅导致应变快速上升,还会加剧材料内部的应力分布不均匀性,显著增加变形与破裂风险。在实际应用中,应严格控制橡胶材料内部的原始孔隙或杂质尺寸,以提升 O 形圈在快速减压环境下的可靠性。同时,在材料设计与选用过程中,需要特别关注橡胶的微观结构与空腔尺寸,以优化其性能并提高使用安全性。

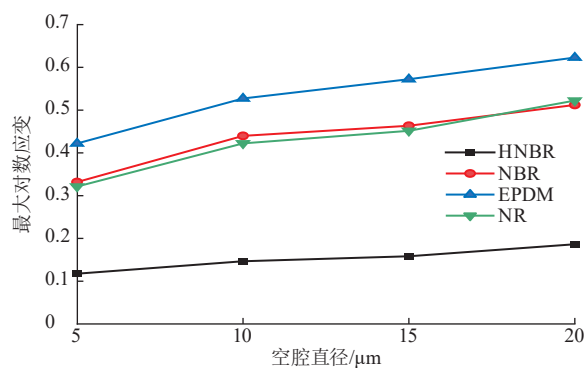


图 10 不同材料空腔最大对数应变随空腔直径变化曲线

Fig. 10 Curves of the maximum logarithmic strain in the cavity versus cavity diameter for different materials

3.3 压缩率的影响

在快速减压阶段,压缩率影响橡胶 O 形圈性能,在此重点分析 O 形圈在不同压缩率下减压结束时的应变特性(图 11)。可见,HNBR 的最大对数应变随压缩率增大逐渐增加,这主要归因于在减压阶段其空腔承受的压力差较小。相比之下,NBR、EPDM 及 NR 的最大对数应变则随着压缩率增加,呈现先下降后上升

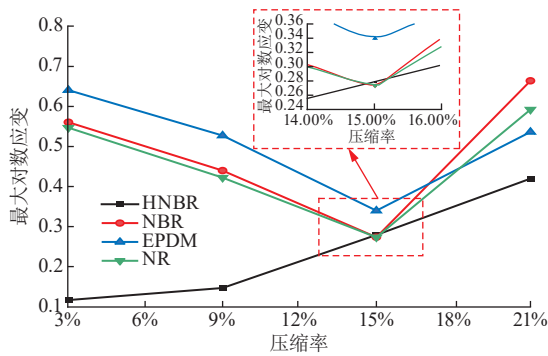


图 11 不同材料空腔最大对数应变随压缩率变化曲线
Fig. 11 Curves of the maximum logarithmic strain in the cavity versus compression ratio for different materials

的非单调变化趋势,表明材料的应变特性不仅取决于其固有属性,还与压缩程度密切相关,且不同材料对压缩率的响应机制存在显著差异。机理分析表明,在高压 CO_2 环境中,压缩率的变化直接影响橡胶分子链的排列状态^[9]。当压缩率为 3.68% 时,橡胶分子间相互作用较弱;当压缩率提升至 15.01% 时,分子链间距减小,相互作用力增强。这种分子链的紧密排列在快速减压过程中发挥关键作用:在减压开始后,气体迅速膨胀,但由于高压压缩率下分子链的紧密结构限制了变形程度,应变增长得到有效抑制。然而,当压缩率达到 20.68% 时,分子链的重新排列、交联点应力状态改变以及材料内部微观结构变化等因素导致材料形变能力增强,应变再次上升。仿真数据显示,在 15.01% 压缩率下,不同橡胶材料的最大对数应变从大到小依次为 EPDM、HNBR、NBR、NR;而在 20.68% 压缩率下则从大到小依次为 NBR、NR、EPDM、HNBR。基于以上研究结果,在 O 形圈材料选择方面,建议优先考虑 HNBR。在密封结构设计时,可适当提高压缩率以增强 O 形圈在快速减压环境下的稳定性,但需避免过高的压缩率可能导致的材料疲劳寿命缩短、密封面摩擦力增大等问题。在实际应用中,需要综合考虑减压性能、材料寿命及密封效果,确定既能满足快速减压性能要求,又能保证 O 形圈整体使用寿命的最佳压缩率。

3.4 CO_2 压力的影响

在减压速度、压缩率及空腔直径相同的条件下,随着 CO_2 压力增大,不同橡胶材料的最大对数应变呈现显著差异(图 12)。可见,NR、NBR 及 EPDM 的最大对数应变均随 CO_2 压力的升高而增加,呈现近似线性增长趋势。其中,NBR 在较低压力(如 1 MPa)时最大对数应变值较低,但随着压力升高,其应变增长速度加快,在 4 MPa 时达到 4 种材料中的最大值。相比

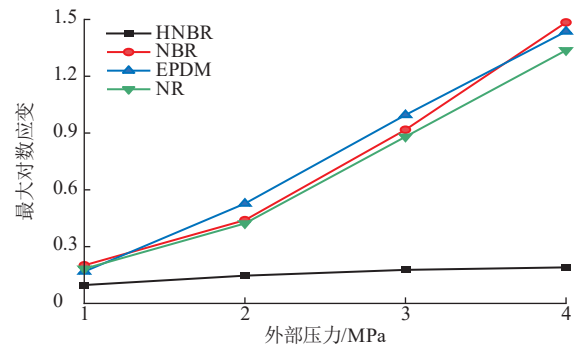


图 12 不同材料空腔最大对数应变随外部压力变化曲线
Fig. 12 Curves of the maximum logarithmic strain in the cavity versus external pressure for different materials

之下,HNBR 表现出独特的性能特征,即在整体 CO_2 压力变化范围内,其最大对数应变始终维持在较低水平,表现出对 CO_2 压力变化的高度稳定性。值得注意的是,HNBR 的最大对数应变在加压结束时达到峰值,而非减压阶段,这主要归因于 CO_2 在该材料中的高扩散性降低了减压时的压力差,且材料本身性能优异。EPDM 在 4 MPa 外部压力下表现欠佳,减压结束后其最大对数应变达到 1.42,超过表 1 中的断裂伸长率 1.39,表明该工况下空腔将发生破裂;HNBR 在相同条件下最大对数应变仅为 0.17,展现出优异的抗压性能。基于上述结果,在 4 MPa 外部压力下,4 种橡胶材料的最大对数应变从大到小依次为 NBR、EPDM、NR、HNBR。在 CCUS 技术的管道密封系统应用中,考虑到 CO_2 捕集与封存过程中的压力波动,建议在高压环境下既要优选材料性能,还应优化密封结构设计,如增加密封层数或采用辅助密封装置。

3.5 减压速度的影响

通过设置不同的减压速度,对 O 形圈在高压 CO_2 环境下的性能进行耦合分析。对比 NBR、NR、EPDM 及 HNBR 在不同减压速度下的空腔最大对数应变(图 13)可见,NBR、NR 及 EPDM 的最大对数应变与减压速度呈正相关关系,HNBR 的应变则几乎不受减压速度的影响,表现出优异的抗快速减压能力,能够有效承受快速减压过程中的应力波动。其中,EPDM 在较高减压速度下性能大幅下降,表明该材料在快速减压环境中易受到过大局部应力作用的影响,存在较高破裂风险。可见,在减压过程中,不同材料的力学性能存在显著差异,材料选择对承受减压工况的部件至关重要。4 种橡胶材料的空腔最大对数应变从大到小依次为 EPDM、NBR、NR、HNBR。基于以上研究结果,提出两点建议:①安装减压速度调控装置,即通过精确控制减

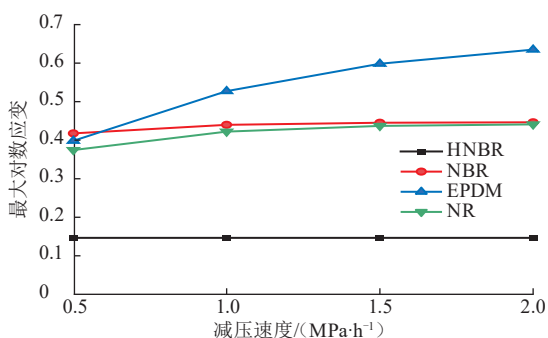


图 13 不同材料空腔最大对数应变随减压速度变化曲线
Fig. 13 Curves of the maximum logarithmic strain in the cavity versus depressurization rate for different materials

压速度, 避免因减压过快导致材料损伤; ②优化材料选择, 即优先选用具有优异抗快速减压性能的材料, 以降低减压过程中产生过大应力的风险。

3.6 空腔直径与压缩率的交互影响

为了系统研究空腔直径与压缩率对 O 形圈性能的综合影响, 针对 EPDM, 分别设计了 4 组压缩率 (3.68%、9.35%、15.01%、20.68%) 与 4 种空腔直径 (5 μm 、10 μm 、15 μm 、20 μm) 的工况组合 (图 14)。可见, 最小应变值出现在空腔直径 5 μm 、压缩率 15.01% 的工况组合, 而最大应变值则出现在空腔直径 20 μm 、压缩率 3.68% 的工况组合。其原因是在较低压缩率条件下, O 形圈内部橡胶分子链排列相对疏松, 空腔尺寸变化对 O 形圈性能影响较大, 应变增长幅度明显。然而, 在高压缩率条件下, 当空腔直径较小时, 高压缩率促使分子链紧密排列, 有效抑制了应变增长; 当空腔直径增大至 20 μm 时, 过高的压缩率会使橡胶内部结构在高压缩应力与大空腔尺寸的协同作用下发生显著改变, 同样会降低 O 形圈性能, 增加损坏风险。

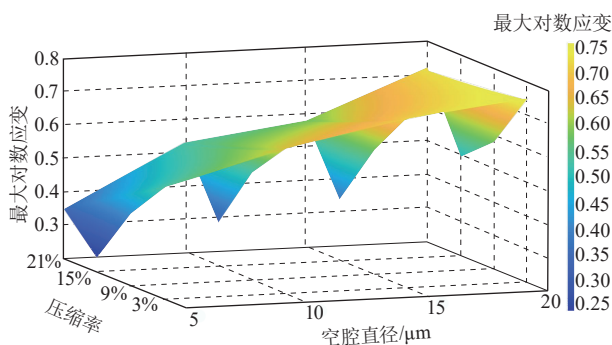


图 14 EPDM 橡胶在空腔直径与压缩率协同作用下的响应结果图

Fig. 14 Diagram of the synergistic effect of cavity diameter and compression ratio on the performance of EPDM rubber

由此可见, 设计 O 形圈时必须充分考虑空腔直径与压缩率的交互作用。对于存在较大内部缺陷的橡胶

材料, 适当提高压缩率可在一定程度上弥补因空腔导致的强度下降, 但压缩率的提升幅度需严格把控, 以避免在大空腔直径工况下因过高压缩率引发更严重的性能劣化问题。在实际工程应用中, 通过优化橡胶材料制备工艺, 减少内部孔隙与杂质, 并将空腔直径限制在较小范围内; 其次, 设计合理的压缩率, 提高 O 形圈在快速减压环境下的可靠性与稳定性。

4 结论

基于菲克扩散定律、Mooney-Rivlin 超弹性本构模型及最大主应变损伤准则, 构建了高压 CO₂ 环境下 O 形密封圈的扩散-变形耦合损伤模型, 实现了快速减压过程中橡胶内部 CO₂ 分布与应变状态的精准预测, 突破了传统研究中气体扩散与橡胶变形单独分析的局限性, 揭示了压力场-流体场耦合作用下 O 形圈的损伤演化机制。主要结论如下:

1) 材料抗损伤性能存在显著差异。HNBR 表现出最优的抗快速减压性能, 4 MPa 外压下最大对数应变仅为 0.17; EPDM 因应变 (1.42) 超过断裂伸长率发生破裂, 表现出最弱的抗损伤能力; 基于仿真数据可见, 4 种橡胶材料的抗快速减压损伤性能从大到小排序为 HNBR、NR、NBR、EPDM。

2) 不同材料对压缩率的响应特性存在显著差异。适当提高压缩率可有效降低 NBR、EPDM 及 NR 在快速减压过程中的应变水平, 而 HNBR 则呈现相反的变化趋势; 此外, 空腔直径增大、外界压力升高以及减压速度加快均会导致 O 形圈内部空腔的应变增加。

3) 模拟结果为 CCUS 管道密封系统提供了理论设计框架与选型指导, 但仍存在局限性。首先, 数值模型基于空腔为理想圆形的简化假设, 未能充分考虑实际 O 形圈内部存在的几何缺陷不规则性; 其次, 研究未涉及多空腔相互作用下的损伤累积效应。针对上述局限, 后续研究将重点开展多空腔耦合损伤试验, 深入探索温度场-压力场-流体场多物理场耦合作用机制, 以进一步完善密封系统的可靠性评估方法。

参考文献:

- [1] 吴珮璐. 双碳背景下 CO₂ 输送系统的集成与应用策略[J]. 油气储运, 2025, 44(2): 145–152. DOI: 10.6047/j.ssn.1000-8241.2025.02.003.

- WU P L. Strategies for the integration and application of CO₂ transportation system in the context of “dual carbon” goals[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2025, 44(2): 145–152.
- [2] 胡其会, 李玉星, 张建, 俞欣然, 王辉, 王武昌, 等. “双碳”战略下中国 CCUS 技术现状及发展建议[J]. *油气储运*, 2022, 41(4): 361–371. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.001).
HU Q H, LI Y X, ZHANG J, YU X R, WANG H, WANG W C, et al. Current status and development suggestions of CCUS technology in China under the “Double Carbon” strategy[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(4): 361–371.
- [3] 曹宇光, 甄莹, 刘媛媛, 张振永, 白芳. 超临界 CO₂ 管道止裂韧性预测模型研究[J]. *石油机械*, 2024, 52(7): 28–35. DOI: [10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.07.004](https://doi.org/10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2024.07.004).
CAO Y G, ZHEN Y, LIU Y Y, ZHANG Z Y, BAI F. Prediction model for crack arrest toughness of supercritical CO₂ pipeline[J]. *China Petroleum Machinery*, 2024, 52(7): 28–35.
- [4] 雍锐. 西南油气田 CCUS/CCS 发展现状、优势与挑战[J]. *天然气工业*, 2024, 44(4): 11–24. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2024.04.002](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2024.04.002).
YONG R. Development status, advantages and challenges of CCUS/CCS in PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(4): 11–24.
- [5] 胡婷, 芮振华. CO₂ 地质利用与封存中碳迁移及其相态分布规律[J]. *天然气工业*, 2024, 44(4): 56–67. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2024.04.006](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2024.04.006).
HU T, RUI Z H. Carbon migration and phase distribution patterns in CO₂ geological utilization and storage[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(4): 56–67.
- [6] 王峰, 黎政权, 张德平. 吉林油田 CCUS-EOR 技术攻关与实践新进展[J]. *天然气工业*, 2024, 44(4): 76–82. DOI: [10.3787/j.issn.1000-0976.2024.04.008](https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2024.04.008).
WANG F, LI Z Q, ZHANG D P. New research and practice progresses of CCUS-EOR technology in Jilin Oilfield[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(4): 76–82.
- [7] 朱建鲁, 张捷, 李玉星, 刘翠伟, 宁元星. 纯氢/掺氢管道密封圈与密封垫性能研究进展[J]. *油气储运*, 2024, 43(7): 730–739. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.002](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.002).
ZHU J L, ZHANG J, LI Y X, LIU C W, NING Y X. Research progress on seal ring and gasket for pure hydrogen/hydrogen-enriched compressed natural gas pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(7): 730–739.
- [8] 陈明战, 王素玲, 姜民政, 李金波. 气体快速减压橡胶失效计算模型建立及分析[J]. *石油机械*, 2020, 48(10): 142–148. DOI: [10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2020.10.021](https://doi.org/10.16082/j.cnki.issn.1001-4578.2020.10.021).
CHEN M Z, WANG S L, JIANG M Z, LI J B. The establishment of computational model and analysis of elastomer failure induced by rapid gas decompression[J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(10): 142–148.
- [9] MO L, XIAO X, CHEN Y S, FANG M R, XIAO S B, YONG H, et al. A rapid decompression failure mechanism model coupling diffusion-deformation of O-ring sealing rubber exposed to high-pressure carbon dioxide[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2025, 170: 109271. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2025.109271](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109271).
- [10] TALAMINI B, MAO Y W, ANAND L. Progressive damage and rupture in polymers[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 111: 434–457. DOI: [10.1016/j.jmps.2017.11.013](https://doi.org/10.1016/j.jmps.2017.11.013).
- [11] CHESTER S A, ANAND L. A coupled theory of fluid permeation and large deformations for elastomeric materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2010, 58(11): 1879–1906. DOI: [10.1016/j.jmps.2010.07.020](https://doi.org/10.1016/j.jmps.2010.07.020).
- [12] JARAVEL J, CASTAGNET S, GRANDIDIER J C, BENOÎT G. On key parameters influencing cavitation damage upon fast decompression in a hydrogen saturated elastomer[J]. *Polymer Testing*, 2011, 30(8): 811–818. DOI: [10.1016/j.polymertesting.2011.08.003](https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2011.08.003).
- [13] BAYRAKTAR E, ISAC N, BESSRI K, BATHIAS C. Damage mechanisms in natural (NR) and synthetic rubber (SBR): nucleation, growth and instability of the cavitation[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2008, 31(2): 184–196. DOI: [10.1111/j.1460-2695.2007.01213.x](https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01213.x).
- [14] KULKARNI S S, CHOI K S, KUANG W B, MENON N, MILLS B, SOULAMI A, et al. Damage evolution in polymer due to exposure to high-pressure hydrogen gas[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(36): 19001–19022. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2021.03.035](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.035).
- [15] KULKARNI S S, CHOI K S, MENON N, SIMMONS K. A diffusion-deformation model with damage for polymer undergoing rapid decompression failure[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2023, 178: 105348. DOI: [10.1016/j.jmps.2023.105348](https://doi.org/10.1016/j.jmps.2023.105348).
- [16] 陈明战. 气体快速减压下橡胶破裂失效机理研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2021.

- CHEN M Z. Mechanism research of rubber fracturing failure induced by rapid gas decompression[J]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2021.
- [17] 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008, 55(8): 467–471. DOI: [10.3969/j.issn.1000-890X.2008.08.004](#).
- HUANG J L, XIE G J, LIU Z W. FEA of hyperelastic rubber material based on Mooney-Rivlin model and Yeoh model[J]. China Rubber Industry, 2008, 55(8): 467–471.
- [18] LI X X, WANG B Q, PENG X D, LI Y T, LI X L, CHEN Y, et al. Effect of nitrile butadiene rubber hardness on the sealing characteristics of hydraulic O-ring rod seals[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2024, 25(1): 63–78. DOI: [10.1631/jzus.A2200612](#).
- [19] TAN J H, CHEN C L, LIU Y W, WU J Y, WU D, ZHANG X, et al. Molecular simulations of gas transport in hydrogenated nitrile butadiene rubber and ethylene-propylene-diene rubber[J]. RSC Advances, 2020, 10(21): 12475–12484. DOI: [10.1039/d0ra00192a](#).
- [20] ANDRIO A, COMPAN V, REIS-NUNES R C, LÓPEZ M L, RIANDE E. Influence of cellulose reinforcers on gas transport through natural rubber[J]. Journal of Membrane Science, 2000, 178(1/2): 65–74. DOI: [10.1016/S0376-7388\(00\)00476-2](#).
- [21] 秦正贵. 盾构隧道 EPDM 橡胶密封垫本构参数试验研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(7): 816–821. DOI: [10.3973/j.issn.1672-741X.2017.07.006](#).
- QIN Z G. Experimental study of constitutive parameters of ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) rubber gasket used in shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(7): 816–821.
- [22] 华剑, 马忠杰, 袁志强, 黄天成, 胡家浩, 王林虎. 超高压压裂管汇由壬接头预紧特性分析[J]. 润滑与密封, 2024, 49(4): 58–65. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0150.2024.04.008](#).
- HUA J, MA Z J, YUAN Z Q, HUANG T C, HU J H, WANG L H. Analysis on preload characteristics of ultra-high pressure fracturing manifold union[J]. Lubrication Engineering, 2024, 49(4): 58–65.
- [23] 樊超, 何强, 金文德, 韩钰, 田一, 赵凯美. 油浸式电抗器用阻尼橡胶材料压缩阻尼特性与本构模型[J]. 合成橡胶工业, 2022, 45(6): 469–473. DOI: [10.19908/j.cnki.ISSN1000-1255.2022.06.0469](#).
- FAN C, HE Q, JIN W D, HAN Y, TIAN Y, ZHAO K M. Compressive damping characteristics and constitutive model of damping rubber material for oil immersed shunt reactor[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2022, 45(6): 469–473.
- [24] 杜正鹏, 李世昆, 李道壮, 王凤玲, 蔡荣强, 夏贤良, 等. HZMMA 离子聚合物增强 HNBR 及其在超临界 CO₂ 介质中的耐腐蚀性能[J]. 弹性体, 2024, 34(3): 17–22. DOI: [10.3969/j.issn.1005-3174.2024.03.004](#).
- DU Z P, LI S K, LI D Z, WANG F L, CAI R Q, XIA X L, et al. Investigation of reinforcement mechanism of Ionic polymer from HZMMA in HNBR matrix and its corrosion behaviour in supercritical CO₂ medium[J]. China Elastomerics, 2024, 34(3): 17–22.
- [25] 张青海, 汪扬涛, 曾安蓉. 改进竹纤维/NR 复合材料界面相容性的探究[J]. 莆田学院学报, 2017, 24(2): 60–65. DOI: [10.3969/j.issn.1672-4143.2017.02.014](#).
- ZHANG Q H, WANG Y T, ZENG A R. Study on the improvement interfacial compatibility of bamboo fiber/NR composite[J]. Journal of Putian University, 2017, 24(2): 60–65.
- (编辑: 胡香凝)
-
- 基金项目:**国家自然科学基金资助项目“管道橡胶密封材料掺氢天然气渗透-损伤机理跨尺度研究”, 52402433; 国家自然科学基金资助项目“基于管道仿真与数值反演的天然气管道阻塞检测研究”, 52372344; 国家自然科学基金资助项目“X70/X80 钢掺氢天然气管道泄漏燃爆机制与灾害演化模型研究”, 52474083。
- 作者简介:**莫丽, 女, 1968 年生, 教授, 2005 年硕士毕业于西南石油大学机械制造及自动化专业, 现主要从事机械密封专业方向的研究工作。地址: 四川省成都市新都区新都大道 8 号, 610500。电话: 15328851010。Email: moli3913@126.com
- 通信作者:**陈超, 男, 1991 年生, 教授, 2021 年博士毕业于荷兰代尔夫特理工大学安全科学专业, 现主要从事非常规介质储运设备损伤机理与安全防护专业方向的研究工作。地址: 四川省成都市新都区新都大道 8 号, 610500。电话: 18782950228。Email: chenchaoswpu@gmail.com
- Received: 2025-02-18
 - Revised: 2025-03-31
 - Online: 2025-04-07

