

DOI: 10.19666/j.rlfed.202606031

超临界二氧化碳背压阀密封失效与调压特性实验研究

李德标¹, 宋豪², 李家宇², 杨旭¹, 刘金娥¹, 鲁元¹, 魏利平²
(1. 西安特种设备检验检测院, 陕西 西安 710065; 2. 西北大学化工学院, 陕西 西安 710068)

[摘要] 【目的】本文旨在解决超临界二氧化碳(S-CO₂)闭式循环系统中背压阀密封件易失效、宽压差调节稳定性不足等问题。【方法】基于自主搭建的封闭式 S-CO₂ 循环实验平台, 在 5~30 MPa 压力范围内开展阶梯升压、稳压与卸压实验。通过对比丁腈橡胶(NBR)与氢化丁腈橡胶(HNBR) O 形密封圈服役后的宏观损伤形貌, 分析高压 CO₂ 渗透、溶胀及快速减压对密封可靠性的影响; 同时结合阀前/阀后压力、温度与手轮圈数数据, 评价背压阀的压力稳定能力、动态响应特征和热力耦合效应。【结果】NBR 密封圈在高压 S-CO₂ 作用下发生显著体积膨胀、鼓包、裂纹和孔洞损伤, 失效机制主要表现为 CO₂ 溶解-扩散诱发的爆炸性减压破坏; HNBR 密封圈经相同工况后仅出现轻微溶胀, 表面完整性保持良好, 抗减压失效能力明显优于 NBR。所测试背压阀在 5~30 MPa 范围内能够实现基本稳压, 阀前压力与手轮圈数呈近似线性关系, 平均调节斜率约为 3.56 MPa/圈; 但在 30 MPa 高压差工况下, 阀后压力瞬态波动和升/降压迟滞现象增强, 阀前后外壁温差最高约 15.5 °C。【结论】研究结果可为高压 S-CO₂ 背压阀密封材料选型、结构优化及运行稳定性评价提供实验依据。

[关键词] 超临界二氧化碳; 背压阀; O 形密封圈; 爆炸性减压; 压力迟滞

[引用本文格式] (本段作者勿动) 作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(1): 起始页码-终止页码.

Experimental study on sealing failure and pressure-regulating characteristics of a supercritical carbon dioxide back-pressure valve

Li Debiaoli¹, Song Hao², Li Jiayu², Yang Xu¹, Liu Jin'e¹, Lu Yuan¹, Wei Liping²

(1. Xi'an Special Equipment Inspection Institute, Xi'an 710065, China;
2. School of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710068, China)

Abstract: [Objective] This study aims to solve the problems of easy failure of back pressure valve seals and poor stability of wide pressure difference pressure regulation in supercritical carbon dioxide closed cycle systems. [Methods] In this paper, sealing failure and pressure regulation characteristics tests were carried out to compare the service performance of two types of rubber seals, quantify the valve pressure regulation law and dynamic response, and provide experimental basis for sealing material selection and stable operation of high-pressure S-CO₂ back pressure valve. Based on the self-built closed S-CO₂ cycle experimental platform, the step-by-step pressure rise, pressure stabilization and pressure relief cycle tests were completed in the range of 5~30 MPa. The macroscopic damage morphology of nitrile rubber (NBR) and hydrogenated nitrile rubber (HNBR) O-ring after service was compared. The pressure before and after the valve, the temperature of the outer wall and the number of handwheels were collected synchronously. The linear relationship of pressure regulation, dynamic pressure fluctuation, pressure

收稿日期: 2026-06-08 修回日期: 2026-07-13 接受日期: 2026-07-27 网络首发日期: XXXX-XX-XX
基金项目: 陕西省重点研发计划一般项目(2024GX-YBXM-308); 陕西省创新能力支撑计划项目(2025JC-GXPT-035); 西安市科技计划项目(25ZDLYB00026)

Supported by: Project of Shaanxi Provincial Key Research and Development Program (2024GX-YBXM-308); Innovation Capability Support Program of Shaanxi Province (2025JC-GXPT-035); Xi'an Science and Technology Plan Project (25ZDLYB00026)

第一作者简介: 李德标(1983), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为特种设备检验检测, debiaoli@qq.com.

通信作者简介: 魏利平(1987), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为化工过程多相流热物理, weiliping@nwu.edu.cn.

rise and fall hysteresis and throttling thermal effect were analyzed. The repeatability of pressure regulation was tested four times under the condition of 30 MPa. [Results] The NBR sealing ring produces bulges, cracks and holes under the action of high pressure CO₂ infiltration, swelling and rapid decompression, and the failure mechanism is explosive decompression failure. The HNBR only swells slightly, the sealing surface is intact, and the ability to resist decompression failure is stronger. The pressure in front of the valve is approximately linear with the number of handwheel rings, and the adjustment slope is 3.56 MPa/ring. The pressure behind the valve fluctuates significantly under the high pressure difference of 30 MPa, and the maximum temperature difference of the outer wall of the valve body is 15.5 °C. When the pressure is increased, the pressure behind the valve goes down for a short time, and rises instantaneously when the pressure is relieved. There is obvious pressure regulation hysteresis in the process of pressure increase and decrease. HNBR is more suitable for high-pressure S-CO₂ sealing conditions, and NBR cannot withstand 30 MPa long-term cycles. The back pressure valve can achieve basic pressure stabilization in the range of 5~30 MPa, and the linear adjustment law can be used to predict the opening of the project. The unsteady flow of the fluid under high pressure difference, the friction of the valve core and the nonlinear thermal properties of S-CO₂ together aggravate the fluctuation and hysteresis. It is necessary to optimize the throttling structure, sealing pair and thermal management scheme to improve the long-term operation reliability of the valve. [Conclusion] The research results can provide experimental basis for the selection of sealing materials, structural optimization, and operational stability evaluation of high-pressure S-CO₂ back pressure valves.

Key words: supercritical carbon dioxide; back-pressure valve; O-ring seal; explosive decompression; pressure hysteresis

超临界二氧化碳 (supercritical carbon dioxide, S-CO₂) 兼具液体近似密度、气体近似黏度和较高传热能力, 适合构建结构紧凑、效率较高的闭式动力循环。近年来, S-CO₂ 布雷顿循环在核能、太阳能热发电、余热回收和化石能源低碳利用等场景中得到持续关注^[1-4]。与水蒸气或空气工质相比, S-CO₂ 在临界点附近热物性参数随温度、压力变化更加剧烈, 循环系统中压缩机、换热器、阀门及密封部件均面临明显的真实气体效应和高压运行约束^[5-6]。其中, 背压阀承担上游压力建立、工况切换和系统保压等功能, 其调压精度与稳定性直接影响闭式循环平台的安全运行和实验数据可靠性。

已有研究为 S-CO₂ 阀门流动与系统控制提供了重要基础。Yuan 和 Anderson^[7]针对 S-CO₂ 流经阀门的过程开展实验与数值研究, 指出传统气体阀门模型在低压比工况下难以准确预测质量流量, 需要考虑真实气体性质对阻塞流和流量系数的影响。Bian 等^[8]建立再压缩 S-CO₂ 布雷顿循环动态模型, 对不同控制阀方案进行比较, 表明阀门配置和开度调节会显著改变系统负荷响应和安全裕度。Wang 等^[9]进一步针对多级迷宫调节阀研究了 S-CO₂ 流动能量耗散机制, 认为近临界区热物性非线性会增加流量预测和阀芯结构设计难度。Huang 等^[10]关于 CO₂ 孔口临界流的实验也表明, 上游压力、温度及节流结构尺寸会显著影响临界流量和热非平衡程度。上述研究说明, S-CO₂ 阀门的流量调节、压力恢复和瞬态响应与介质热物性、节流结构及系统边界条件密切耦合, 不能简单套用常规气体或液体阀门经验。

除流动调节外, 密封材料失效也是高压 S-CO₂ 阀门长期运行中的关键问题。NBR、HNBR、FKM 等弹性体 O 形圈常用于阀门和管路密封, 但 CO₂ 分子在橡胶内部具有较强的溶解、扩散和溶胀作用。Khawaja 等^[11]通过分子模拟研究了 NBR 中小分子气体溶解行为, 指出 CO₂ 因与腈基等极性位点存在相互作用而具有较高溶解倾向。Ansaloni 等^[12]综述了 CO₂ 输运链中聚合物材料的服役问题, 认为高密度 CO₂ 会诱发弹性体溶胀、塑化和快速气体减压损伤。然而, 现有研究多针对材料试样、孔口流动或系统控制阀展开, 针对背压阀实际装配状态下密封失效、压力调节和升/降压迟滞的耦合实验仍相对不足。

基于上述问题, 本文以高压 S-CO₂ 背压阀为研究对象, 开展封闭循环条件下的密封材料对比与阶梯升/降压实验。首先分析 NBR 和 HNBR O 形圈在高压 S-CO₂ 作用后的损伤形貌及失效机理; 其次测试背压阀在 5~30 MPa 范围内的压力调节能力、阀后动态响应和热效应; 最后讨论手轮圈数与阀前压力之间的经验关系以及升/降压过程中的迟滞特征, 以期高压 S-CO₂ 阀门密封选材和稳定运行提供参考。

1 实验系统与方法

1.1 封闭式 S-CO₂ 循环实验平台

实验在自主搭建的封闭式超临界二氧化碳循环平台上进行。试验系统流程如图 1 所示, 主要由 CO₂ 供给与制冷单元、双增压泵、预热与加热单元、

保温段、被测背压阀、下游储气瓶、压力/温度/流量测量单元和数据采集系统组成。CO₂ 首先经制冷机液化，以满足增压泵入口工况要求；双增压泵用于控制循环流量，最大流量为 700 mL/min，系统最高稳压输出能力为 32 MPa。高压 CO₂ 依次通过预热器和加热器升温至超临界状态，经保温段后进入背压阀。增压泵出口、加热器出口及背压阀出口处分别布置压力传感器、温度传感器和流量测量装置，采集信号统一输入计算机终端。

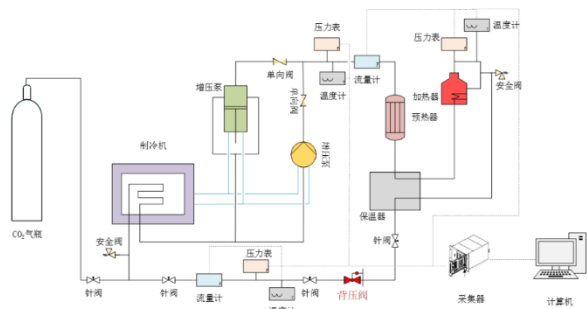
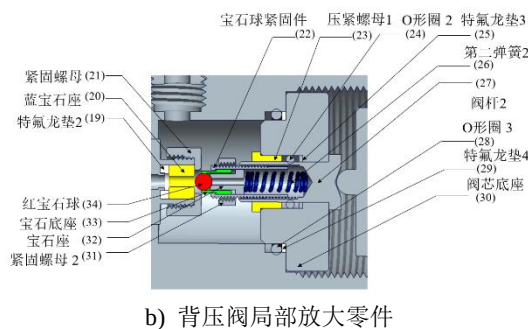
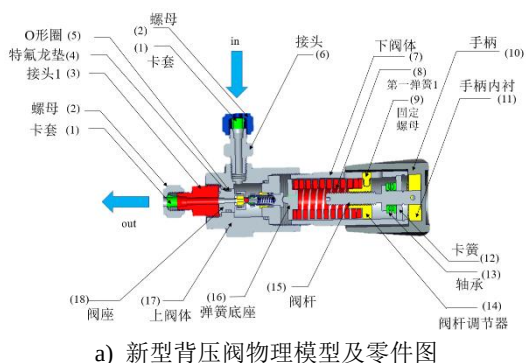


图 1 超临界二氧化碳背压阀封闭循环试验平台流程示意
Fig.1 Schematic diagram of the closed-loop test platform of the supercritical carbon dioxide back-pressure valve

被测背压阀结构与工作原理如图 2 所示。阀门通过改变阀芯(34)与阀座(20)之间的相对位置调节节流通道面积,从而实现上游压力控制。初始状态下,进口流体受阀芯阻挡;当上游压力产生的作用力超过弹簧(26)预紧力后,阀芯上移并形成流通间隙,流体经阀腔节流后排出。若上游压力不足以克服弹簧力,阀芯保持关闭状态。该结构具有响应较快、调节直观的特点,但在高压 S-CO₂ 快速升/降压工况下,对密封材料抗渗透能力和阀芯运动稳定性提出了更高要求。



c) 新型背压阀实物

图 2 背压阀物理模型

Fig.2 Physical model of the back pressure valve

1.2 实验工况与步骤

实验前检查阀门启闭状态、管路连接和各测量仪表,开启 CO₂ 气瓶、制冷机及加热单元,调节增压泵频率并启动数据采集系统。采样间隔为 6 s。背压阀初始处于全开状态,下游与储气瓶连通,系统初始压力由储气瓶压力决定。通过旋转背压阀手轮改变阀芯预紧状态和有效开度,以调节上游背压。加热炉最高工作温度为 300℃,保温器设定温度为 55.1℃。实验包括两部分:一是密封件循环测试,用于比较不同 O 形圈材料在 S-CO₂ 工况下的适用性;二是高压调压性能测试,用于获得背压阀压力稳压、卸压和重复性数据。预实验在 30 kg/h 流量下进行,压力数据平均误差为 0.37%,平均波动为 1.60%,最大波动为 3.23%;压力不确定度为 0.059 5 MPa,流量不确定度为 0.076 kg/h。

1) 密封件循环测试。背压阀初始采用 NBR O 形圈, 典型规格内径为 28、16、22.5 和 7.5 mm, 对应线径分别为 2.65、2.65、1.80 和 1.80 mm。实验时关闭背压阀, 使系统逐步升压并记录稳定数据, 随后进行多次升压, 降压循环, 最高压力为 30 MPa。实验结束后拆解阀门, 观察 O 形圈宏观形貌。NBR 密封失效后, 将密封材料更换为 HNBR, 并在相同操作流程下重复测试。

2) 高压调压性能测试。在闭式循环条件下开展阶梯升压与卸压实验。背压阀初始全开, 下游与储气瓶连通, 瓶内压力约为 4.43~4.57 MPa。调节手轮圈数, 使上游压力逐级升至 5、15、20.5 和 30 MPa, 各压力平台保持在 3 000~5 000 s; 随后逐级卸压至

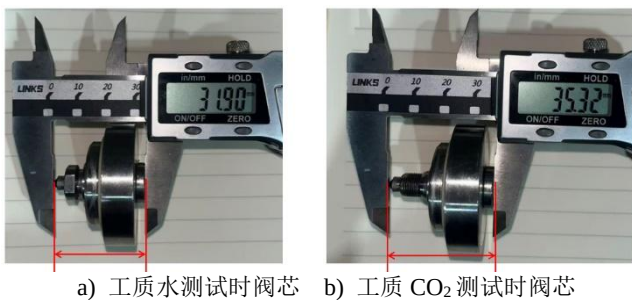
气瓶压力。实验过程中同步记录阀前压力 p_{in} 、阀后压力 p_{out} 、温度和流量。在实验中,始终是在泵的流量在 30 kg/h 下进行的,背压阀具有快开性特征,初始时阀门为全开,调整阀门开度,阀前压力开始逐步上升,而经过实验后已初步获取背压大小与手轮圈数的关系,因此在做升压与降压的稳压测试时,并不涉及升压与降压速率,但是经计算,升压速率最小为 0.0214 MPa/s,最大为 0.0926 MPa/s;降压速率最小为 0.039 7 MPa/s,最大为 0.092 7 MPa/s。在 30 MPa 工况下重复实验 4 次,以评价高压稳压重复性。阀前、阀后外壁温度采用测温仪测量,环境温度约为 21.4℃。

2 结果与讨论

2.1 密封件失效机制与材料改进

2.1.1 NBR 密封圈失效形貌及机理

以水为工质进行调试时,背压阀能正常建立压力;当工质更换为 CO_2 后,初始结构在低压阶段即出现背压建立困难。经调整阀芯与阀座初始间隙后(图 3b),阀门恢复调压功能。完成最高 30 MPa 的多次升/降压循环后,发现两种主要规格 NBR O 形圈(内径 28 mm 和 16 mm)均发生明显结构损伤,严重失效时阀门会出现介质泄漏和结霜现象:如图 4a)、图 4b)所示,密封圈外径由原始尺寸剧烈扩张至约 61.15 mm,表现出塑性伸长和体积膨胀;局部放大图可见表面密布鼓包、裂纹和孔洞,部分区域发生撕裂(如图 5a))。该现象在水介质测试中未出现,说明其与高压 CO_2 渗透和快速减压密切相关。



a) 工质水测试时阀芯 b) 工质 CO_2 测试时阀芯

图 3 不同介质背压阀阀芯

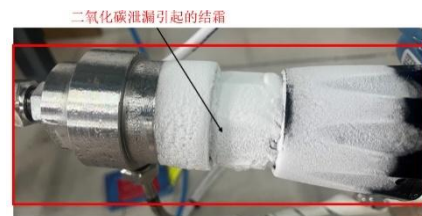
Fig.3 Valve cores of the back-pressure valve for different media



a) 内径 28 mm、线径 2.65 mm O 形圈失效



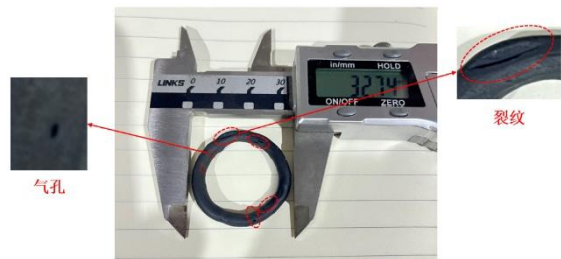
b) 内径 16 mm、线径 2.65 mm O 形圈失效



c) 超临界二氧化碳引起的失效结霜

图 4 背压阀在二氧化碳工质时的失效情况
Fig.4 Failure of the back-pressure valves with carbon dioxide as the working medium

NBR O 形圈发生孔洞和膨胀的主要原因可归结为 CO_2 溶解-扩散与快速减压耦合作用。在升压和稳压阶段,高压 CO_2 逐渐渗入橡胶自由体积并趋于溶解平衡;在泄压阶段,阀腔压力下降速度高于橡胶内部 CO_2 向外扩散释放速度,材料内外形成瞬态压力差。滞留于橡胶分子间隙中的 CO_2 快速膨胀并形成微气泡,当气泡压力超过局部材料强度极限时,微裂纹扩展并最终形成鼓包、孔洞和撕裂。这一过程符合高压气体密封材料中常见的爆炸性减压失效特征^[13]。



a) CO_2 渗透丁腈材质 O 形圈

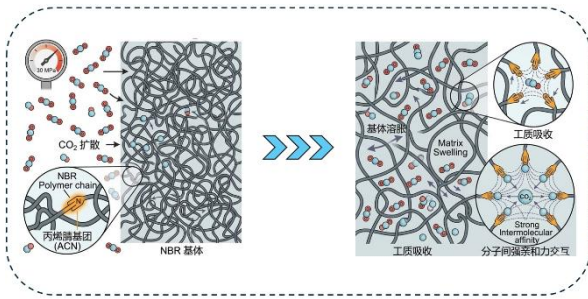
b) CO₂ 渗透丁腈 O 形圈原理

图 5 丁腈材质 O 形圈失效
Fig.5 Failure of the nitrile rubber O-ring

2.1.2 HNBR 密封圈改进效果

为提高密封件在高压 S-CO₂ 中的适用性, 将 O 形圈材料更换为 HNBR。HNBR 通过选择性氢化使 NBR 分子链中的不饱和碳碳双键转化为饱和结构, 材料耐热性、力学强度和抗介质侵入能力均有所提升。图 6 展示了 HNBR O 形圈实验前后的形貌。与 NBR 相比, HNBR 在相同循环工况后仅出现轻微物理溶胀, 外径增长量明显降低, 表面仍保持平整光滑, 未观察到鼓包、裂纹或孔洞。适度溶胀有助于提高密封接触压力, 实验过程中未出现卡滞或泄漏。后续正式调压实验均采用 HNBR 密封圈。



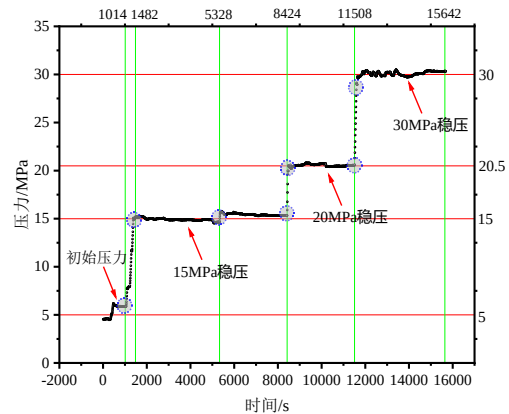
图 6 氢化丁腈材质 O 形圈试验情况
Fig.6 Experimental results of the hydrogenated nitrile rubber (HNBR) O-ring

2.2 背压阀调压性能

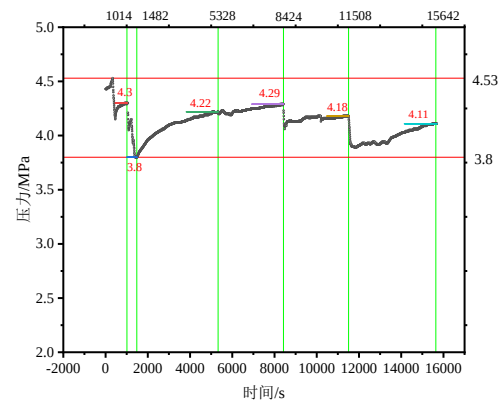
2.2.1 升压过程压力响应

图 7 给出了背压阀上游压力 p_{in} 和下游压力 p_{out} 随时间的变化规律。由图 7 可知, 实验采用分阶段阶梯升压方式, 上游压力由初始低压逐步提升至 5、15、20.5、30 MPa, 并在各压力平台保持约 3 000~5 000 s, 以考察不同压差条件下的稳压能力。整体来看, 背压阀能够在各平台维持上游压力相对稳定, 说明其具备高压压力建立和基本稳压能力。15 MPa

和 20.5 MPa 平台段压力波动较小, 曲线较为平稳, 表明阀门在中等压差范围内具有较好的静态调压性能。



a) 背压阀升压过程中压力随时间变化



b) 背压阀下游压力随时间变化

图 7 阶段升压过程阀前后压力变化

Fig.7 Changes of the pressure before and after the valve in the stage boost process

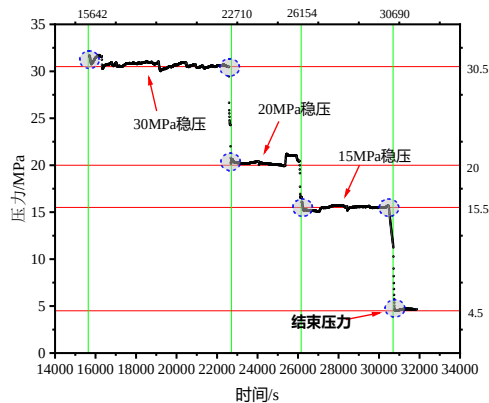
2.2.2 卸压过程压力响应

图 8a)为背压阀上游压力 p_{in} 在卸压过程中的变化规律。系统上游压力由约 30.5 MPa 依次降至 20、15.5 和 4.5 MPa, 并在各压力平台保持一定时间。卸压过程中各平台段压力曲线整体较平稳, 尤其在高压平台附近, 压力波动幅值较升压初期有所减弱, 说明经历高压稳态运行后, 阀体、阀芯及附近流体温度场逐渐趋于稳定, 流动扰动和结构响应的耦合波动得到一定缓和。

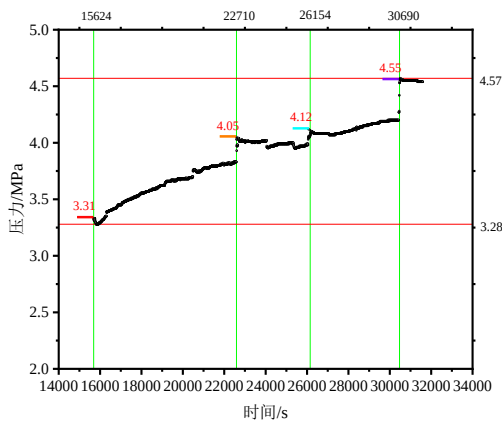
图 8b)为卸压过程中背压阀下游压力 p_{out} 的动态响应。与升压过程中下游压力出现短时下探不同, 卸压阶段在上游压力阶跃下降时, 下游压力表现出瞬时回升。例如, 在 $t=22710$ s 附近, 当上游压力由 30.5 MPa 降至 20 MPa 时, 下游压力由稳定值附近快速上升至约 4.05 MPa, 随后进入新的缓慢调整过程。类似现象在后续 20 MPa 降至 15.5 MPa、

15.5 MPa 降至 4.5 MPa 的过程中同样存在, 说明在闭式循环边界条件下, 阀后压力对上游压力卸载具有明显瞬态响应。

从卸压全过程看, 下游压力总体呈阶跃回升并逐步接近储气瓶压力的变化趋势。至 $t=30690\text{ s}$ 时, p_{out} 约为 4.55 MPa, 与该阶段储气瓶压力 4.57 MPa 较为接近。该结果表明, 随着上游压力降低, 阀前后压差逐步减小, 阀后压力最终回归由系统末端容腔决定的边界压力水平; 同时, 背压阀及闭式循环系统在经历高压运行后仍具备压力恢复能力, 未出现明显不可逆失稳。



a) 背压阀泄压过程中压力随时间的变化



b) 背压阀下游压力随时间的变化

图 8 阶段降压过程阀前后压力变化

Fig.8 Changes of the pressure before and after the valve in the stage step-down process

2.2.3 压力迟滞特征

对比图 7 和图 8 可知, 在相近上游压力条件下, 升压与卸压过程中的下游压力响应并不完全重合, 表现出一定路径相关性。例如, 升压阶段 p_{in} 约为 15 MPa 时, p_{out} 稳定值约 4.29 MPa; 而卸压阶段 p_{in} 约为 15.5 MPa 时, p_{out} 稳定值约为 4.12 MPa。二者在相近压力平台下存在偏差, 说明背压阀在往复调压过程中具有迟滞特征。当上游压力进一步升高至 30

MPa 后, 压力曲线中的波动明显增强, 并出现较为显著的高频扰动特征。为此本研究在相同工况下重复了 4 次 30 MPa 实验, 并记录数据, 如图 9 (b), 可以看出阀门的出口的压力波动强弱, 也会随实验次数发生变化; 这也表明在极高压差条件下, 阀内流动状态趋于复杂, 局部高速节流引起的流体作用力、流场非定常性以及阀芯附近的流动扰动均明显增强, 导致阀门动态稳定性有所下降。

迟滞现象可能由机械摩擦、热惯性和 S-CO₂ 非线性热物性共同导致。从机械角度看, 阀芯、阀杆及导向部件在高压差作用后可能存在微小摩擦滞后, 使回程过程中的有效流通面积与升压过程不完全一致; 从热力学角度看, S-CO₂ 节流产生的温降会改变阀体、阀芯和密封副附近温度分布, 热惯性使流体密度、黏度及局部声速等参数在卸压瞬间难以立即恢复, 从而影响阀门回程流量特性^[14]。

全程实验结果还表明, 上游压力阶跃变化时, 下游压力存在显著瞬态响应: 升压阶段表现为短时下降, 下游压力由约 4.43 MPa 降至约 3.8 MPa; 卸压阶段表现为瞬时回升, 并逐步恢复至约 4.55 MPa。虽然下游储气瓶对阀后压力具有缓冲作用, 但阀口节流区局部流动状态仍会因压差突变而快速重构, 并在系统容积效应和流体热力状态调整的共同作用下达到新的平衡。因此, 评价 S-CO₂ 背压阀调压性能时, 不仅应关注机械开度和弹簧预紧力, 还应考虑近临界区热物性变化对阀门动态响应的影响。

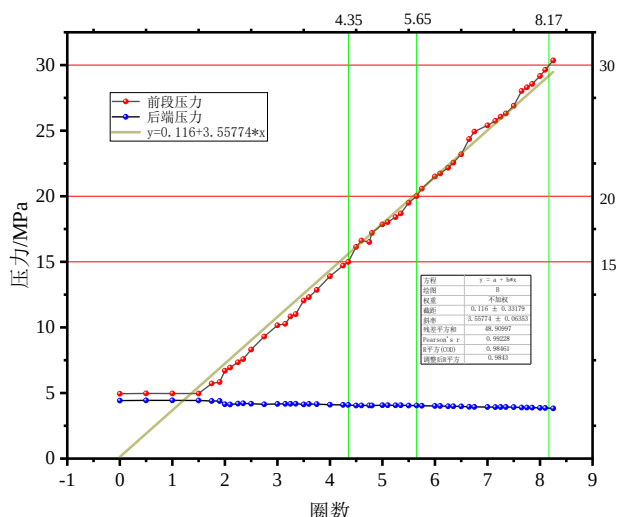
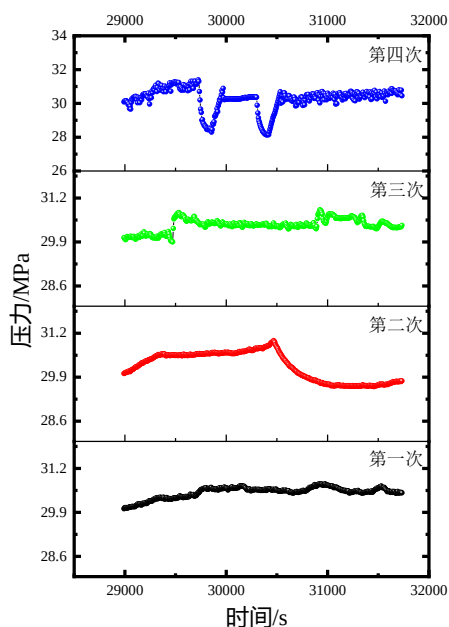
2.2.4 压力调节特性

在闭式 S-CO₂ 循环系统中, 对背压阀手轮开度进行了连续调节试验。实验过程中, 背压阀下游直接与储气瓶连通, 阀后压力主要受储气瓶压力边界控制, 整体维持在约 4.43 MPa 附近。在此条件下, 逐步增加手轮圈数, 使阀门开度由 0 圈增至 8.17 圈, 并同步记录阀前、阀后压力变化, 以分析机械调节量与系统压力响应之间的对应关系。

图 9a) 为背压阀手轮圈数与阀前、阀后压力之间的关系。随着手轮圈数增加, 阀前压力整体呈单调上升趋势, 最高可达 30.5 MPa; 阀后压力变化幅度较小, 始终保持在 4 MPa 量级附近, 说明在本实验边界条件下, 背压阀的机械调节作用主要体现在阀前压力建立与维持。采用最小二乘法对阀前压力与手轮圈数进行线性拟合, 可得到经验关系式为

$$p_{\text{in}} = 0.116 + 3.55774n$$

式中: p_{in} 为阀前压力, MPa; n 为背压阀手轮圈数。

a) 背压阀在 CO₂ 工况时压力随手轮圈数的变化

b) 重复 4 次背压 30 MPa 时阀出口稳定性情况对比

图 9 压力与手轮圈数关系及重复实验情况

Fig.9 Relationship between the pressure and the number of handwheel turns and repeated experiments

拟合结果表明,在本试验范围内,阀前压力与手轮圈数具有较好的线性对应关系,平均每增加 1 圈手轮开度,阀前压力约提高 3.56 MPa。该关系可为背压阀开度设定和初始工况匹配提供参考。但在高压段,部分数据相对拟合线存在偏离,说明随着压差升高,阀内流动非定常性和热耦合作用增强,阀门响应不再满足理想线性假设。图 9b)所示 30 MPa 重复实验中,出口压力波动存在一定差异,也进一步反映了高压差工况下阀内流动稳定性下降。

综合来看,背压阀在闭式 S-CO₂ 循环系统中具

有较好的压力建立能力和基本稳压功能,阀前压力与手轮圈数之间在实验范围内呈近似线性关系,体现出较好的机械可调性。但随着工况由中压向高压、由稳态向动态切换,其调节过程逐渐表现出非线性、瞬态波动和回程迟滞等特征。

3 结论

本文基于封闭式 S-CO₂ 循环实验平台,研究了高压超临界二氧化碳背压阀的密封失效机制、调压性能及动态响应特征,主要结论如下:

1) NBR O 形圈在高压 S-CO₂ 中发生显著膨胀、鼓包、裂纹和孔洞损伤,主要失效机制为 CO₂ 渗透、溶胀和快速减压共同诱发的爆炸性减压破坏。HNBR 因分子链饱和度和力学稳定性较高,在相同工况下仅出现轻微溶胀,表面保持完整,更适合作为高压 S-CO₂ 背压阀密封材料。

2) 背压阀在 5~30 MPa 范围内能够实现压力建立和基本稳压。阀前压力与手轮圈数呈近似线性关系,平均调节斜率约为 3.56 MPa/圈,可作为工程开度设定和压力预估的依据;但在 30 MPa 高压差工况下,压力波动明显增强,说明阀内流动稳定性随压差升高而下降。

3) 升压和卸压过程中,阀后压力对阀前压力阶跃变化表现出不同瞬态响应:升压阶段出现短时下降,卸压阶段出现瞬时回升;相近压力平台下降/降压路径不完全重合,表明背压阀存在明显迟滞特征。该现象与阀芯摩擦滞后、系统容积效应、节流温降及 S-CO₂ 近临界热物性变化有关。

4) 背压阀在高压 S-CO₂ 工况下不仅是机械调压元件,也是强流动-热力耦合过程发生区域。阀前后外壁温差最高约 15.5 °C,重复高压实验中出口压力波动存在差异,提示后续设计应重点优化阀口节流结构、密封副材料及热管理措施,以提高长期运行稳定性。

[参考文献]

- [1] Brun K, Friedman P, Dennis R. Fundamentals and applications of supercritical carbon dioxide (sCO₂) based power cycles[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.
- [2] Crespi F, Gavagnin G, Sánchez D, et al. Supercritical carbon dioxide cycles for power generation: a review[J]. Applied Energy, 2017, 195: 152.
- [3] White M T, Bianchi G, Chai L, et al. Review of supercritical CO₂ technologies and systems for power generation[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 185: 116447.
- [4] Wang E H, Peng N J, Zhang M R. System design and application of supercritical and transcritical CO₂ power cycles: a review[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 723875.

- [5] 张磊, 刘芳宙, 贾威, 等. 超临界二氧化碳离心压缩机损失分析研究进展[J]. 工程热物理学报, 2026, 47(3): 845.
Zhang L, Liu F Z, Jia W, et al. Research progress of loss analysis in sCO₂ centrifugal compressors[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2026, 47(3): 845.
- [6] 毛宗强, 王诚, 余皓. 绿色制氢技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024.
Mao Z Q, Wang C, Yu H. Green hydrogen production technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2024.
- [7] Yuan H M, Anderson M. Experimental and numerical study of supercritical carbon dioxide flow through valves[J]. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2016, 2(3): 031004.
- [8] Bian X Y, Wang X, Wang R, et al. A comprehensive evaluation of the effect of different control valves on the dynamic performance of a recompression supercritical CO₂ Brayton cycle[J]. Energy, 2022, 248: 123630.
- [9] Wang J P, Zhang E B, Bai B F. Flow prediction model for multi-stage labyrinth regulating valve based on supercritical CO₂ energy dissipation mechanism[J]. Energy, 2025, 335: 138035.
- [10] Huang J J, Wang Y L, Huang Y P, et al. Effect of geometry and upstream stagnation thermodynamic parameters on CO₂ choked flow through orifices[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 165: 108789.
- [11] Khawaja M, Sutton A P, Mostofi A A. Molecular simulation of gas solubility in nitrile butadiene rubber[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2017, 121(1): 287.
- [12] Ansaloni L, Alcock B, Peters T A. Effects of CO₂ on polymeric materials in the CO₂ transport chain: a review[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020, 94: 102930.
- [13] 马龙, 杜亚君. 化工储罐区氮封装置失效模式识别及安全联锁控制参数优化[J]. 流程工业, 2025(9): 16.
Ma L, Du Y J. Identification of failure modes and optimization of safety interlock control parameters for nitrogen sealing devices in chemical storage tank areas[J]. Process, 2025(9): 16.
- [14] Brown S, Martynov S, Mahgerefteh H, et al. Modelling the non-equilibrium two-phase flow during depressurisation of CO₂ pipelines[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2014, 30: 9.

(责任编辑 李园)