

Small Scale Experimental Study of Supercritical Carbon Dioxide Decompression from Vessel

Gengyuan Tian¹, Yuan Zhou¹, Yanping Huang², Junfeng Wang², Chengtian Zeng¹, Jiajian Huang¹

¹College of Physics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

²Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan

Email: zhouyuan1911@126.com

Received: May 25th, 2020; accepted: Jun. 21st, 2020; published: Jun. 28th, 2020

Abstract

The accidental release is one of the main risks of carbon capture and storage (CCS) and supercritical carbon dioxide (S-CO₂) power cycle system. In this paper, supercritical CO₂ decompression experiments were studied based on a set of small-scale experimental equipment, the volume of vessel is 50 L. The initial states are 8.1 MPa, 38.0°C and 10.0 MPa, 38.0°C. In the experiment, thermohydraulic behaviors of decompression were analyzed by measuring pressure, fluid temperature, wall temperature, mass flow rate and external jet structure. From the experiment data, different initial state undergoes different decompression process. The external jet can be divided into three stages: the white jet's length increase stage, the temporary stable stage and the attenuation stage. In addition, experiments show that the lowest temperature at the bottom of vessel will reach -26.9°C (10.0 MPa, 38.0°C). The results of experiments are of great significance for understanding process of accident and model development.

Keywords

Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle System, Carbon Capture and Storage, Supercritical Carbon Dioxide, Blowdown, Leakage

超临界二氧化碳容器小尺度泄压喷放实验研究

田耕源¹, 周源¹, 黄彦平², 王俊峰², 曾成天¹, 黄家坚¹

¹四川大学物理学院, 四川 成都

²中国核动力研究设计院, 四川 成都

Email: zhouyuan1911@126.com

收稿日期：2020年5月25日；录用日期：2020年6月21日；发布日期：2020年6月28日

摘要

CO₂意外泄漏是超临界CO₂动力循环系统和碳捕获与存储系统主要安全问题之一。本文基于一套小规模实验装置研究超临界CO₂容器快速泄压的热力学特性和流动特点，压力容器体积为50 L。开展了初始工况为8.1 MPa, 38.0℃和10.0 MPa, 38.0℃的泄压实验。通过测量流体压力、流体温度、壁面温度、质量流量以及外部射流结构来分析超临界CO₂泄压特性。实验得到不同初始状态会经历不同的泄压过程。外部射流结构可以分为三个阶段：射流长度增加阶段，射流长度维持稳定阶段，射流长度减小阶段。此外，实验得到容器底部外壁温最低温度可以达到-26.9℃ (10.0 MPa, 38.0℃)。本文的实验结果对理解事故过程和模型开发具有重要意义。

关键词

S-CO₂动力循环系统, CCS, S-CO₂, 泄压喷放, 泄漏

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

近年来，全球气候变暖和能源危机逐渐引起全球各国的重点关注，各国正在积极开展相关研究。其中，碳捕获与存储(CCS) [1] [2]被认为是减少碳排放的最有效措施和各种减排中较为容易实现大规模工业化的技术。其主要包括捕获、运输和储存三步。为应对能源危机，S-CO₂ 布雷顿循环系统因为较好的能源可持续性，可靠性以及经济性得到美国，欧盟，日韩的重点关注[3]。目前，S-CO₂ 布雷顿循环因为可以提高热转换效率(热电转换效率可以达到45% [4])和缩小设备体积而被广泛应用于太阳能集热系统、下一代核反应堆、余热回收等系统。然而，CCS项目和S-CO₂动力循环系统依然面临众多挑战，其中管道和容器意外泄漏是重大安全挑战，在大规模应用前需要掌握系统泄漏特性，为系统安全设计和事故风险评估提供技术支持。

意外泄漏是CCS项目和S-CO₂动力系统的主要安全威胁。在实际应用中因为腐蚀、机械损伤、材料缺陷或者操作失误等可能引发泄漏。由于CO₂气体密度较大且为窒息气体，高压CO₂的泄漏会严重危害周围的群众和环境。此外，由于焦耳-汤姆逊效应[5]，CO₂泄漏以后，系统压力下降引起流体温度和容器壁面温度剧烈下降，造成材料低温损伤，引起更严重的泄漏事故[6] [7]。因此，清楚认识CO₂泄漏以后的流动特点与热力学特性等物理现象有助于泄漏检测系统建立和事故风险评估，将泄漏危害控制在最小范围。

目前，为了认识超临界流体的泄压特性，研究人员进行了超临界氟利昂、CO₂以及H₂O的泄压特性研究，但是相关的实验研究较少。早期，UKAEA [8]测量了温度低于400℃，压力在临界压力附近的超临界水泄压喷放的流量和压力分布。Gebben等(1996) [9]以化工厂中泄流现象为背景进行研究，进行了压力容器顶部泄压实验，选择在泄压中会发生闪蒸现象的工况，得到了泄压过程中容器内的空泡份额，瞬态压力以及轴向流体温度，容器内温度最低可以下降到-50℃。Mignot等[10] [11] [12]运用理论和实验方法

对不同流体的临界流和泄压过程进行了初步研究。根据初始条件提出了三个泄压区域来研究泄压：第一个区域，流体从超临界到亚临界的泄压一直为单相；第二个区域会发生凝结；第三个区域会发生蒸发现象。他们的研究主要集中在临界流，泄压研究较少。Mohammad Ahmad 等(2013) [13] [14]研究了泄压过程中压力容器中的温度、压力和液位随破口直径的关系。张戈等[15]人进行超临界氟利昂跨临界容器泄压的研究，分析了不同初始温度、初始压力和压降速率下，超临界氟利昂跨临界泄压中的相变过程与压力变化。樊兴[16]搭建了研究超临界 CO₂ 泄漏特性的实验装置，得到了初始压力、温度和长径比对临界流量的影响，并根据实验数据得到了计算超临界 CO₂ 临界流的经验关系式。以及 Koeijer [17]、Cosham [18]、郭晓璐[19] [20]、喻建良等[21]、刘锋[22]、李康[23]等人进行了高压 CO₂ 管道泄漏实验研究。以上研究得到了部分泄压特性，但是研究主要针对超临界 CO₂ 临界流和管道泄压，超临界 CO₂ 容器泄压研究较少，缺乏超临界 CO₂ 容器泄压特性的认识，缺少实验数据进行理论模型的开发和验证。

本文开展了超临界 CO₂ 容器泄压实验。初步进行了两组典型工况的泄压实验。实验测量了泄压中 CO₂ 压力、温度、质量流量、壁面温度以及外部射流结构。分析得到了超临界 CO₂ 泄压中的相变特性，瞬态压力和质量流量特性以及瞬态外部射流结构演变。本文的实验数据有助于后续理论模型验证与开发，同时也为 CCS 系统和 S-CO₂ 动力循环系统安全设计和事故分析奠定实验基础。

2. 实验

2.1. 实验装置

图 1 为实验装置示意图。实验装置由 CO₂ 压力容器、流体填充系统、测量与控制系统、和实验段等四部分组成。CO₂ 压力容器体积为 50 L，压力容器外缠有三根功率为 1.2 kW 电加热带，加热带外层缠有绝热层。实验时，通过流体填充系统充入单次实验所需 CO₂ 质量，使用加热带将容器内流体温度加热到实验所需温度，通过球阀控制泄压实验启停。

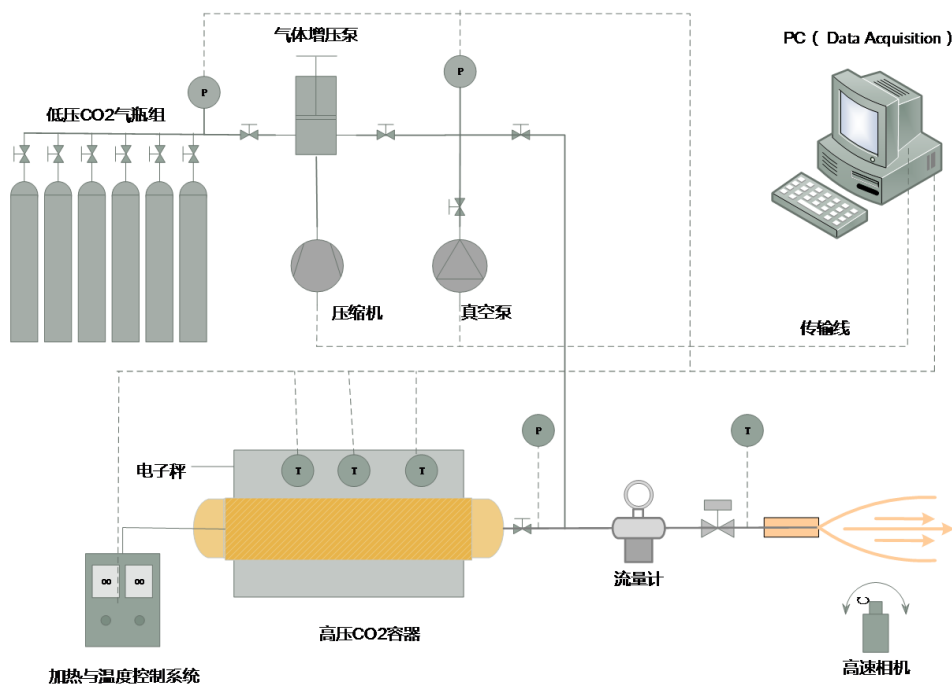


Figure 1. Schematic diagram of the experimental facility

图 1. 实验装置示意图

图 2 为实验段示意图。实验段由不锈钢制成，通过螺纹直接与实验装置连接。实验中使用的喷管内径为 1 mm，长径比为 5。

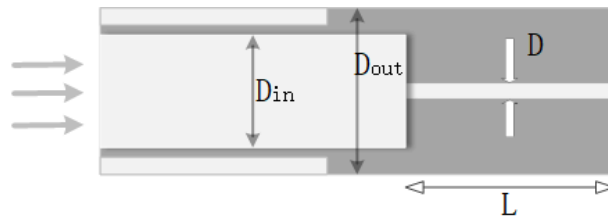


Figure 2. Test section
图 2. 实验段

2.2. 测控系统

实验测量了温度、压力、质量流量以及外部射流结构，测点如图 3 所示。采用 T 型热电偶测量流体温度和壁面温度，精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。流体温度测点布置在流量计出口，阀门上游管道上。压力容器外壁面每 45° 布置一个热电偶，共 5 个。采用科氏力流量计测量质量流量，精度为 0.2%。上游滞止压力由智能压力变送器进行测量，测量精度为 0.075%，测点位于高压气瓶出口，流量计上游管道上。通过高速相机拍摄泄压过程中实验段外瞬态射流结构。

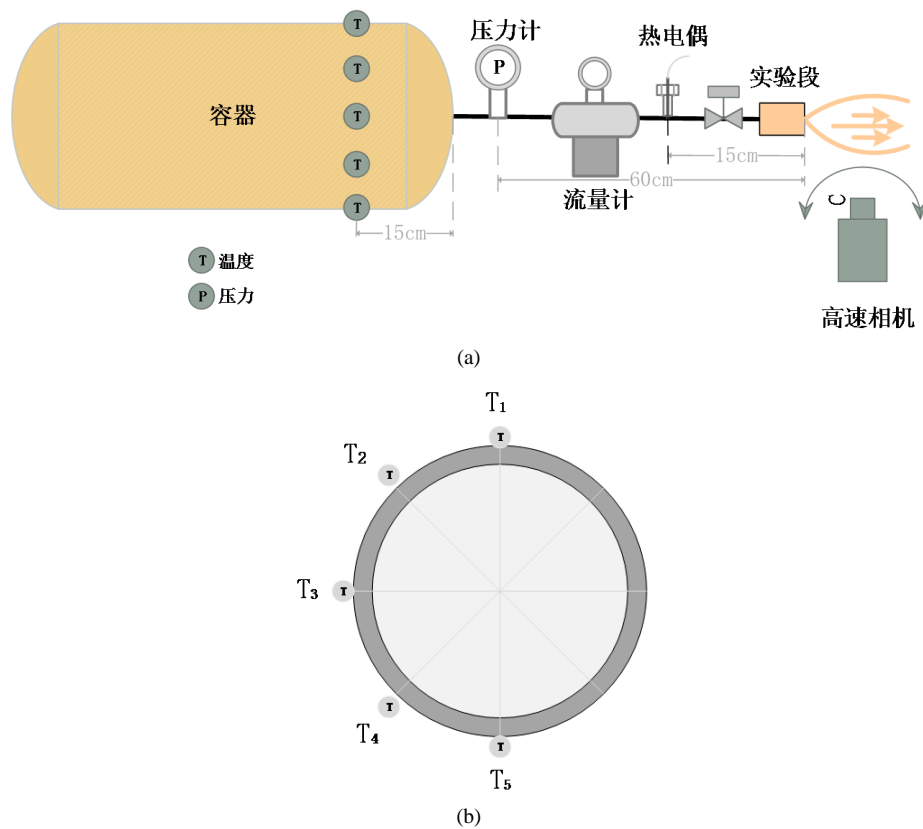


Figure 3. The location of measurements. (a) The location of measurements of pressure, flow rate and upstream stagnation temperature in the experiments; (b) The location of measurements of wall temperature

图 3. 测点分布图。(a) 压力、流量和上游滞止温度测点分布；(b) 壁面温度测点分布

2.3. 实验条件

本文主要进行了初始状态位于超临界区的 CO_2 的泄压实验,以初步得到不同初始状态下的泄压特性。超临界流体在拟临界点附近物性变化较大,温度高于拟临界温度其为类气相,物性与气相接近,温度低于拟临界温度其为类液相,物性与液相接近。因此,本文选取初始温度高于拟临界温度(Test 1),以及初始温度低于拟临界温度(Test 2)这两个工况,工况参数如表 1 所示。

Table 1. Conditions of decompression tests
表 1. 工况参数

	Test 1	Test 2
初始压力(MPa)	8.1	10.0
初始温度($^{\circ}\text{C}$)	38.0	38.0
喷管内径(mm)	1	1
L/D	5	5

3. 实验结果讨论

选取上游滞止压力为 8.1 MPa, 10.0 MPa, 上游滞止温度为 38.0°C , 喷管尺寸为 1.0 mm 两个工况为典型工况研究超临界 CO_2 泄压特性。实验实时测量了流体压力、质量流量、温度以及压力容器壁面温度,通过高速相机得到了喷管外部射流结构。

3.1. 瞬态压力、质量流量和射流

图 4 为瞬态压力和质量流量曲线。Test 1 工况,因为初始温度远高于该压力下拟临界温度,整个泄压过程中没有发生相变,压力和质量流量逐渐减小。Test 2 工况,初始温度略低于该压力下的拟临界温度,泄压中会出现相变,整个泄压会比较复杂。整个泄压过程可以分为三个阶段:阶段 1,压力和质量流量迅速下降,此阶段通常为单相泄压,压力迅速下降。阶段 2,压力下降变缓,此阶段容器内进入饱和区,闪蒸出现,压力和质量流量下降变缓。阶段 3,压力下降速度略微增加,质量流量明显减小,这主要是由于容器内,气相增加,破口位置处空泡份额增大。

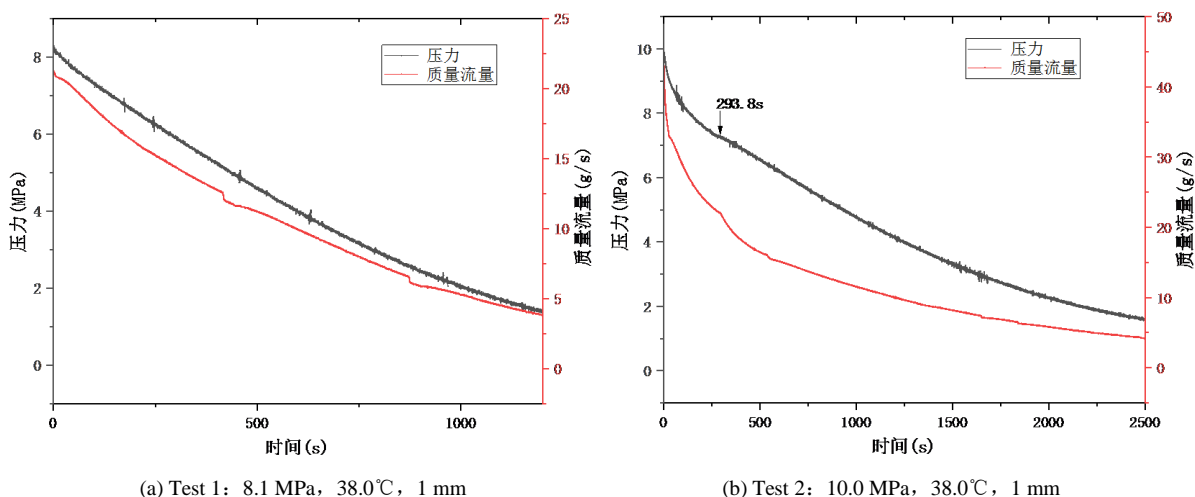


Figure 4. Pressure and mass flow rate curve

图 4. 瞬态压力和质量流量曲线

整个泄压过程中喷管外部射流结构如图 5 所示, 由于喷管进口较高的压力, 在出口会形成未充分膨胀射流结构。当压力较高时, 喷管外会形成桶状激波结构。高压工质从喷管喷出会发生剧烈的相态变化(闪蒸或冷凝), 此区域称为射流核心区。此区域由于焦耳 - 汤姆逊效应, 工质温度较低, 可能会产生干冰颗粒。射流核心区以外, 由于空气被卷吸进入射流中, 密度减小, 白色射流颜色逐渐消失。

射流长度随泄压进行逐渐变短, 初始压力较高阶段可以看到明显的桶状激波结构。白色射流结构会经历三个阶段, 初始白色射流长度增加, 膨胀角变大; 当上游达到饱和区时, 射流结构处于一个稳定状态。主要是因为上游压力变化缓慢。阶段 3, 白色射流结构长度逐渐减小。当为气相喷射时, 白色射流主要是由气态 CO_2 的冷凝、空气水蒸气的冷凝以及出口形成的干冰颗粒引起的。随着压力进一步降低, 射流温度下降幅度较小(高于冷凝温度), CO_2 冷凝消失, 只剩下气相 CO_2 。白色射流结构消失。此外, 在整个减压过程中, 在喷管出口附近可以看到固体颗粒的产生。

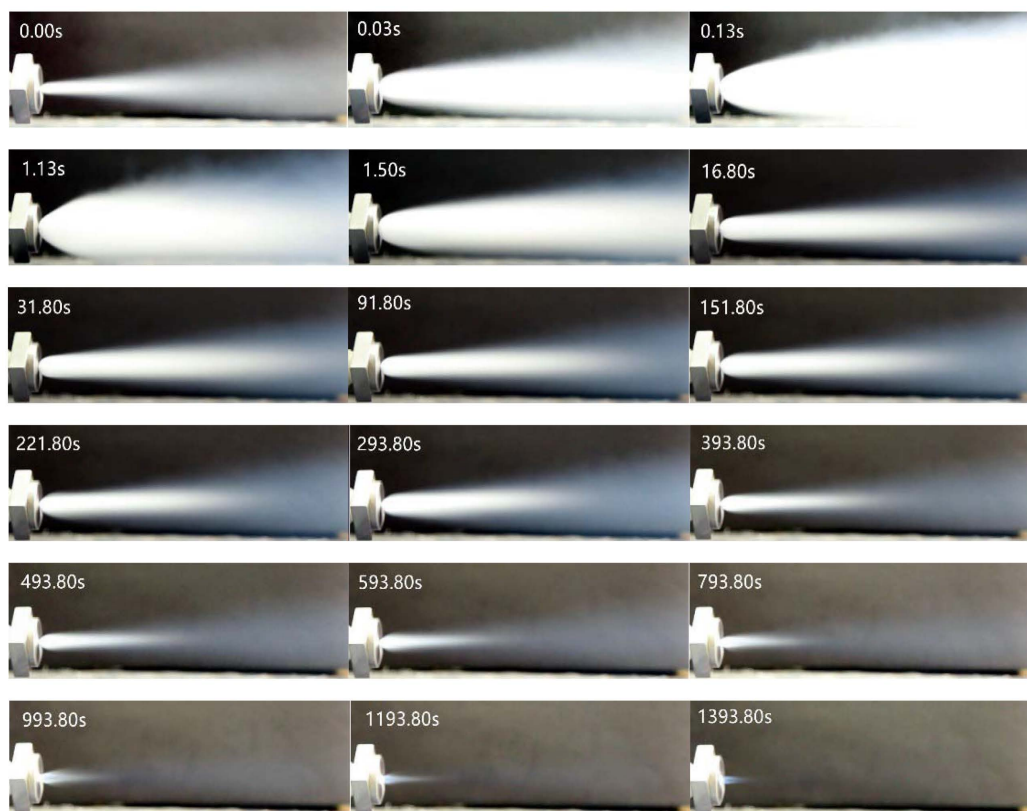


Figure 5. CO_2 jet flow (Test 2)

图 5. CO_2 射流结构(Test 2)

3.2. 相态变化

图 6 为两个工况的压力 - 温度曲线。Test 1: 整个泄压过程中, 压力和温度缓慢减小, 没有与饱和线相交, 容器内没有发生相变。(压力 - 温度曲线上出现凸起主要是因为管道内温度补偿没有做好, 局部流体温度过低, 该部分流体流过热电偶导致该时间段内温度偏低。) Test 2: 位于超临界区的 CO_2 , 温度随压力的下降而减小, 此阶段由于泄压较快, 而不能把热量释放出来, 温度下降幅度较小。当压力达到 7.21 MPa 时, 进入饱和区, 容器内发生相变, 压力和温度沿着饱和线变化。最后转变为气相泄压。(压力温度曲线开始阶段温度上升是因为管道内温度补偿没有做好, 管道内温度较低, 因此泄压开始一段时间温度会上升。)

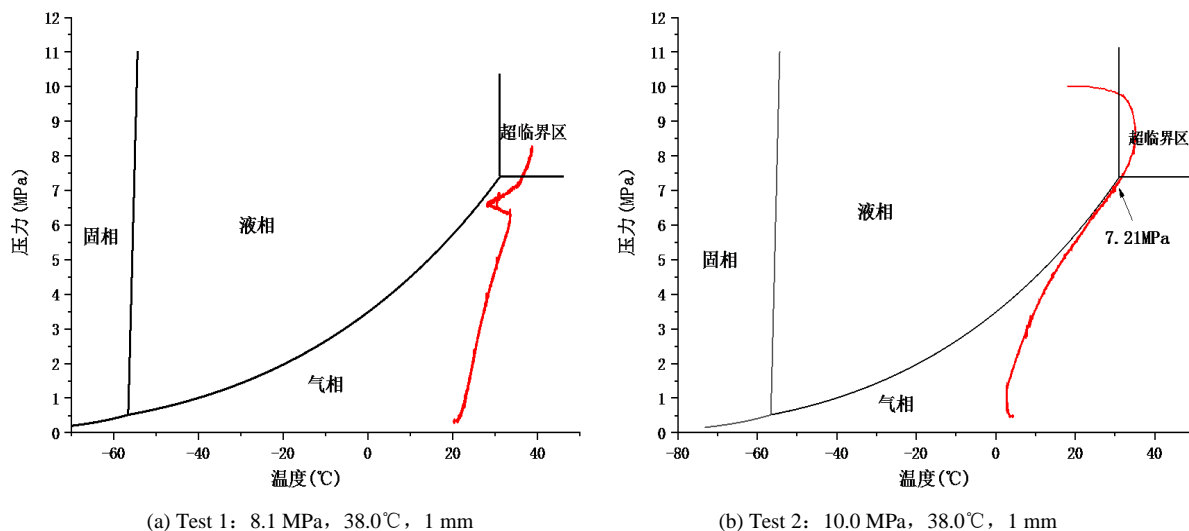


Figure 6. Pressure-Temperature curve of CO₂
图 6. 压力 - 温度曲线

3.3. 瞬态壁温变化

图 7 为瞬态容器周向壁面温度变化曲线, T1~T5 分别对应从容器顶部到底部容器壁面温度, 如图 3 所示。Test 1 工况, 容器周向壁面温度随流体温度下降而逐渐下降。随着泄压的进行, 周向壁面温度不会出现较大梯度。Test 2 工况: 泄压初始阶段, 壁面温度随着 CO₂ 温度下降而逐渐下降。当容器内达到饱和区, 相变发生。由于气液相密度差, 气相 CO₂ 逐渐向容器顶部扩散, 逐渐聚集在容器顶部。容器底部由于液相的蒸发, 流体温度会逐渐降低。压力容器周向壁面温度呈现较大的温度梯度。

从实验中还可以得到, Test 2 工况, 在整个泄压过程中容器底部最低温度为-26.9°C。实验后期壁面温度的回升主要由于压力下降速率变慢, 与环境的热交换使得壁面温度升高。

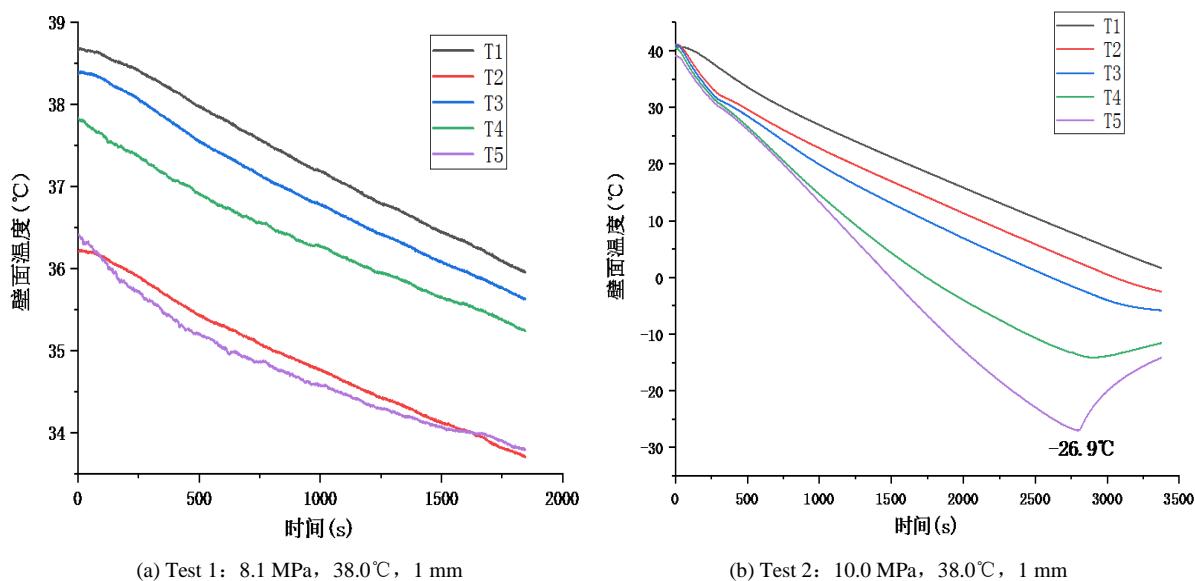


Figure 7. Wall temperature changes with time
图 7. 壁面温度曲线

4. 结论

本文开展了超临界 CO₂ 容器泄压实验, 研究瞬态泄压特性。实验中测量了两个工况下的流体压力、温度、壁面温度以及外部射流结构。根据实验研究, 得出以下主要结论:

1) 不同的初始状态会经历不同的泄压过程。Test 1: 压力和质量流量缓慢较小。Test 2: 泄压过程可以分为三个阶段: 阶段 1, 压力快速下降, 为单相泄压; 阶段 2, 压力下降变缓, 此阶段为两相泄压; 阶段 3, 破口位置处空泡份额增大, 压力下降略微增加, 质量流量明显减小。

2) 初始状态为 10.0 MPa, 38.0°C, 泄压中容器内发生相变, 容器周向壁面温度出现梯度, 容器底部外壁温最低可以达到-26.9°C。

3) 实验中瞬态射流结构可以分为三个阶段(Test 2): 阶段 1, 白色射流长度增加, 膨胀角增大, 持续时间较短; 阶段 2, 白色射流长度基本维持不变; 阶段 3, 白色射流长度逐渐减小, 膨胀角减小。在整个泄压过程中, 喷管附近可以观察到固体颗粒的产生。

本文初步进行了超临界 CO₂ 泄漏特性的研究, 实验数据可以用于安全分析和理论模型的验证。后续还要开展不同初始状态、破口尺寸、干冰的产生以及泄压理论研究。

致 谢

本论文的研究得到国家自然科学基金(No. 51506134)的支持。作者们对这些支持表示真诚感谢。

参考文献

- [1] Haszeldine, R.S. (2009) Carbon Capture and Storage: How Green Can Black Be? *Science*, **325**, 1647-1652. <https://doi.org/10.1126/science.1172246>
- [2] Iribarren, D., Petrakopoulou, F. and Dufour, J. (2013) Environmental and Thermodynamic Evaluation of CO₂ Capture, Transport and Storage with and without Enhanced Resource Recovery. *Energy*, **50**, 477-485. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.021>
- [3] Huang, Y.P. and Wang, J.F. (2012) Applications of Supercritical Carbon Dioxide in Nuclear Reactor System. *Nuclear Power Engineering*, **133**, 21-27.
- [4] Dostal, V., Driscoll, M.J. and Heizlar, P. (2004) A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors. MIT-ANP-TR-100.
- [5] Quattrocchi, F., Boschi, E., Spena, A., Buttinelli, M., Cantucci, B. and Procesi, M. (2013) Synergic and Conflicting Issues in Planning Underground Use to Produce Energy in Densely Populated Countries, as Italy: Geological Storage of CO₂, Natural Gas, Geothermics and Nuclear Waste Disposal. *Applied Energy*, **101**, 393-412. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.028>
- [6] Mahgerefteh, H., Zhang, P. and Brown, S. (2016) Modelling Brittle Fracture Propagation in Gas and Dense-Phase CO₂ Transportation Pipelines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **46**, 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.12.021>
- [7] Martynov, S., Brown, S., Mahgerefteh, H., Sundara, V., Chen, S.Y. and Zhang, Y.C. (2014) Modelling Three-Phase Releases of Carbon Dioxide from High-Pressure Pipelines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **92**, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2013.10.004>
- [8] Lee, D.H. and Swinerton, D. (1983) Evaluation of Critical Flow for Supercritical Steam-Water, EPRI-NP 3086. Electric Power Research Institute, Palo Alto.
- [9] Gebbeken, B. and Eggers, R. (1996) Blowdown of Carbon Dioxide from Initially Supercritical Conditions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **9**, 285-293. [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(96\)00021-6](https://doi.org/10.1016/0950-4230(96)00021-6)
- [10] Mignot, G., Anderson, M.L. and Corradini, M.L. (2007) Critical Flow Experiment and Analysis for Supercritical Fluid. *Nuclear Engineering and Technology*, **40**, 133-138. <https://doi.org/10.5516/NET.2008.40.2.133>
- [11] Mignot, G., Anderson, M. and Corradini, M.L. (2004) Initial Study of Supercritical Fluid Blowdown. *The 16th ANS Topic Meeting on Fusion Energy*, Madison, 14-16 September 2004, 574-580.
- [12] Mignot, G., Anderson, M. and Corradini, M.L. (2009) Measurement of Supercritical CO₂ Critical Flow: Effects of L/D and Surface Roughness. *Nuclear Engineering and Design*, **239**, 949-955. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.031>

- [13] Ahmad, M., Bögemann-van Osch, M., Buita, L., Florisson, O., Hulsbosch-Dam, C., Spruijt, M. and Davoliob, F. (2013) Study of the Thermohydraulics of CO₂ Discharge from a High Pressure Reservoir. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **19**, 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.08.004>
- [14] Ahmad, M., Bögemann-van Osch, M., Buita, L., Florisson, O., Hulsbosch-Dam, C., Spruijt, M. and Davoliob, F. (2013) Experimental Investigation of CO₂ Outflow from a High-Pressure Reservoir. *Energy Procedia*, **37**, 3005-3017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.187>
- [15] 张戈. 跨临界过程相变行为的实验和数值研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [16] Fan, X., Wang, Y.L., Zhou, Y., Chen, J.T. and Huang, Y.P. (2018) Experimental Study of Supercritical CO₂ Leakage Behavior from Pressurized Vessels. *Energy*, **150**, 342-350. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.147>
- [17] Koeijer, G.D., Borch, J.H., Jakobsenb, J. and Drescher, M. (2009) Experiments and Modeling of Two-Phase Transient flow during CO₂ Pipeline Depressurization. *Energy Procedia*, **1**, 1683-1689. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.220>
- [18] Cosham, A., Jones, D.G., Armstrong, K., Allason, D. and Barnett, J. (2012) The Depressurization Behaviour of Carbon Dioxide in the Dense Phase. *Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference*, Calgary, 24-28 September 2012, 447-464. <https://doi.org/10.1115/IPC2012-90461>
- [19] Guo, X.L., Yan, X.Q., Yu, J.L., Zhang, Y.C., Chen, S.Y. and Mahgerefteh, H. (2016) Pressure Response and Phase Transition in Supercritical CO₂ Releases from a Large-Scale Pipeline. *Applied Energy*, **178**, 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.026>
- [20] Guo, X.L., Yan, X.Q., Yu, J.L., Zhang, Y.C., Chen, S.Y. and Mahgerefteh, H. (2017) Pressure Responses and Phase Transitions during the Release of High Pressure CO₂ from a Large-Scale Pipeline. *Energy*, **118**, 1066-1078. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.133>
- [21] 喻建良, 郑阳光, 闫兴清, 郭晓璐, 曹琦, 等. 工业规模 CO₂ 管道大孔泄漏过程中的射流膨胀及扩散规律[J]. 化工学报, 2017, 68(6): 2298-2305.
- [22] 刘锋. 超临界压力 CO₂ 管道泄漏特征与扩散规律[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2016.
- [23] 李康. 小尺度超临界二氧化碳泄漏过程物理机理研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.