

# 不同稳压器布置方式对超临界二氧化碳自然循环流动不稳定性影响实验研究

胡伟, 周源, 袁园, 黄家坚, 罗乔

四川大学物理学院, 四川 成都

收稿日期: 2021年8月16日; 录用日期: 2021年9月14日; 发布日期: 2021年10月29日

## 摘要

流体的可压缩性是诱发流动不稳定性的必要条件。在反应堆系统中稳压器是利用流体的可压缩性稳定压力的主要设备。本文开展了不同稳压器布置方式, 包括稳压器接入冷段、热段、全接以及全关等四种情况下, 超临界二氧化碳自然循环流动不稳定性实验研究, 观察并记录了流动不稳定过程中瞬时温度、流量、压力等演化规律, 分析了不同的稳压器布置方式对自然循环流动不稳定性的影响机理。研究结果表明: 超临界二氧化碳在自然循环工况下, 稳压器接入冷段, 回路流量波动最大, 其余方式波动较小; 无论稳压器哪种布置方式, 回路出口温度皆有波动, 其中接入冷段波动最大; 综合来看稳压器接入热段时有助于抑制和消除自然循环回路中的振荡, 对控制回路的稳定性最有利。本文成果可为探明可压缩空间对不稳定的影响规律以及稳压器合理布置提供参考和借鉴。

## 关键词

稳压器布置方式, 超临界二氧化碳, 自然循环, 流动不稳定

# Experimental Investigation on Influences of Different Pressurizer Layout Patterns on Supercritical Carbon Dioxide Natural Circulation Flow Instability

Wei Hu, Yuan Zhou, Yuan Yuan, Jiajian Huang, Qiao Luo

Department of Physics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 16<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 14<sup>th</sup>, 2021; published: Oct. 29<sup>th</sup>, 2021

文章引用: 胡伟, 周源, 袁园, 黄家坚, 罗乔. 不同稳压器布置方式对超临界二氧化碳自然循环流动不稳定性影响实验研究[J]. 核科学与技术, 2021, 9(4): 177-186. DOI: 10.12677/nst.2021.94021

## Abstract

The compressibility of fluid is the essential condition to trigger flow instability. Pressurizer is the main equipment that takes advantage of fluid's compressibility to stabilize the pressure in a nuclear reactor system. This paper carried out experiments on supercritical carbon dioxide natural circulation flow instability with 4 different layout patterns of the pressurizer, including pressurizer accessing into the cold leg, hot leg, all in and all off, respectively. The evolution law of transient temperature, flow rate and pressure was observed and recorded, and the influences of the mechanism of different layout patterns of pressurizer on natural circulation flow instability were analyzed. In the natural circulation of supercritical carbon dioxide, the flow fluctuation of the loop is the largest when the pressureizer is accessing into the cold section, and the rest is small. There are temperature fluctuations at the outlet whatever the layout pattern is, among which when pressurizer accessing the cold leg has the highest fluctuations. On the whole, it will be helpful for restraining or eliminating oscillation in the natural circulation when the pressurizer accesses the hot leg, and which turns out to be the most beneficial for stability. The results in this study can be useful for the investigation on the flow instability of mechanisms and the reasonable layout patterns for the pressurizer.

## Keywords

Pressurizer Layout Patterns, Supercritical Carbon Dioxide, Natural Circulation, Flow Instability

Copyright © 2021 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. 引言

基于超临界二氧化碳工质的布雷顿动力转换系统是近年来提出的创新改概念，该技术采用超临界二氧化碳代替亚临界水作为循环工质，可利用拟临界区密度高、易压缩的特性解决常规闭式燃气轮机压缩功耗大、效率低的问题，其循环效率高于以水为工质的朗肯循环，且设备体积小、结构简单、建设成本低，有利于模块化建设，应用于核能有着较大优势。近年来，美国、欧盟、日本、韩国等核能发达国家及组织正在积极开展相关研究[1] [2] [3] [4]。

在核反应堆自然循环中，流体密度差作为唯一的驱动力推动系统运转，以超临界二氧化碳为工质的自然循环，拟临界点附近会发生物性畸变，其密度、比热等变化剧烈，物性畸变导致驱动力改变，系统的流动及传热也会随之改变，二者相互耦合迭代会造成流体发生流动不稳定，造成局部传热能力下降，部件疲劳损坏，剧烈的波动可能会导致传热恶化，危及整个核反应堆系统安全。

在自然循环过程中，流体的波动同时也与系统压力变化密切相关，稳压器是利用可压缩性稳定系统压力的主要设备，对一回路的冷却剂压力起着控制、调节和保护作用[5]。已有的压水堆稳压器运行经验表明，稳压器的布置方式对自然循环流动有一定的影响。在实验方面，Cheng [6]等人开展了棒束通道水回路自然循环流动实验，稳压器分别接入回路的冷段与热段，结果表明，当稳压器接入冷段会发生明显的压力降型振荡，接入热段后压力降振荡消失。Liu [7]等人在对流强迫水循环实验中发现，随着接在热段的稳压器体积减小，流动不稳定的周期也随着缩短。Zhang [8]在超临界二氧化碳自然循环实验发现，当稳压器与回路隔绝不稳定将消失。在数值计算方面，彭传新[9]采用 CATHARE 程序对自然循环水回路

系统开展了数值计算, 结果表明, 当稳压器接入系统冷段时, 自然循环回路与稳压器之间的压降震荡是导致流动不稳定出现的主要原因, 通过限制自然循环回路与稳压器之间的流量波动, 可以防止出现流动不稳定。鲁晓东[10]等人采用 RELAP5 程序开展了水回路自然循环工况相关数值计算, 研究了压力 7 MPa, 入口温度 180℃时, 稳压器接入热段和冷段两种不同布置方式对系统流动不稳定性的影响, 结果表明采用稳压器与系统上升段连接的布置方式更有利于系统稳定。

在超临界二氧化碳自然循环实验方面, 国内外开展较少, 实验数据较为匮乏, 为更加直观观察到超临界二氧化碳流动不稳定现象, 因此, 有必要开展实验研究, 进一步明晰稳压器布置对超临界二氧化碳自然循环流动不稳定影响规律, 探明可压缩空间对不稳定的影响规律, 为稳压器合理布置提供参考和借鉴。

## 2. 实验装置与实验方法

### 2.1. 实验装置回路

实验装置回路主要由加热段、加热器、冷却器、稳压器、增压泵、二氧化碳储存罐、真空泵及相应连接管线组成, 如图 1 所示。设计压力 30 MPa, 设计温度 500℃。回路高 3000 mm, 宽 3500 mm, 循环回路管道采用 S31608 不锈钢, 主管道尺寸  $\Phi 22.00 \times 3.50$  mm, 其中加热段长 1200 mm, 实验采用低电压大电流的直流电源对实验管段进行加热。稳压器设计压力 30 MPa, 设计温度 200℃, 容积 50 L, 筒体内径 200 mm, 总高度为 1800 mm, 通过充入和排除氮气, 调节主回路系统压力。二氧化碳经过竖直加热段后向上流动, 经过顶部水平布置的冷却器冷却后向下流动, 从而形成完整的回路, 通过开关 JZV-10 和 JZV-11 可实现稳压器接入位置的调整。

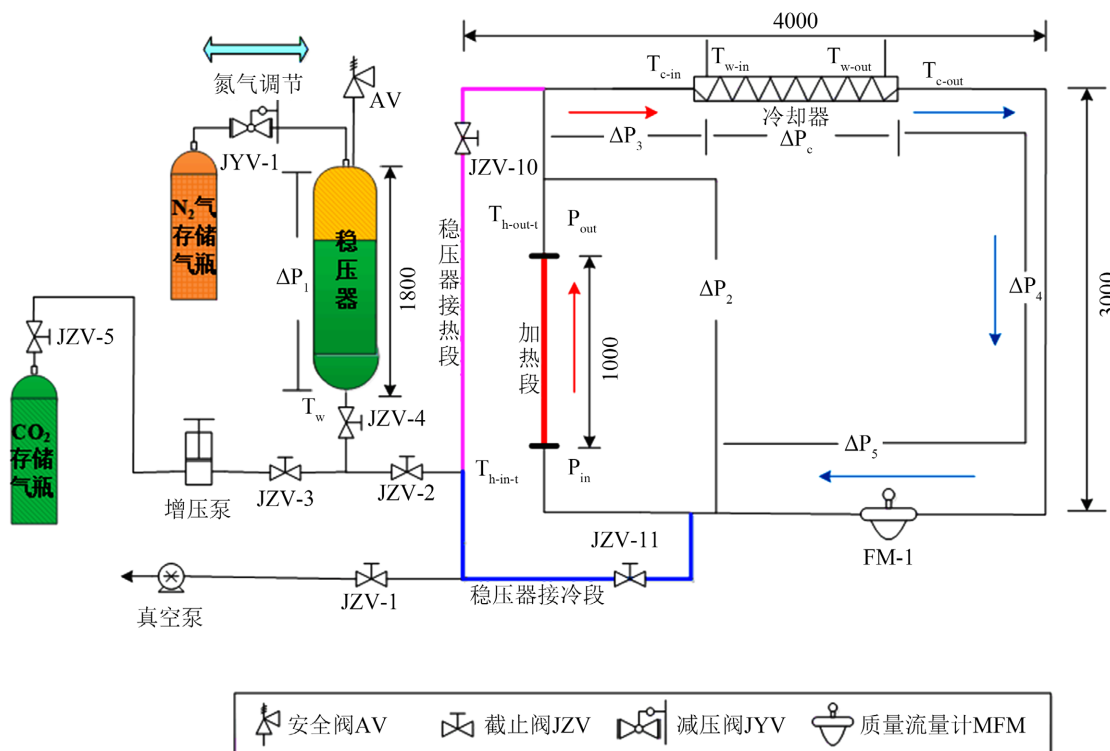


Figure 1. Flow chart of experimental loop

图 1. 实验回路流程图

## 2.2. 实验测量参数

本实验中测点分布详见图 1。压力压差测量：加热段进出口压力、稳压器压力；压力采用智能式压力变送器进行测量，量程范围 0~30 MPa。回路加热段压差、冷热段压差、冷却器压差；压差测点均采用智能差压变送器测量，量程为 0~20 KPa。流量测量：加热段流体流量，采用高精度低阻力的科里奥利质量流量计测量，量程为 0~500 kg/h；二次侧冷却水流量采用涡轮流量计测量，量程为 0~40 m<sup>3</sup>/h。温度测量：加热段进出口流体温度、冷却段进出口流体温度、加热段外壁温，实验过程中回路内流体温度不超过 150℃，因此流体温度的测量采用 Φ1 mm 的 I 级精度绝缘型 T 型铠装热电偶测量，测量范围 0℃~150℃。加热段外壁温采用 Φ1 mm 的 I 级精度绝缘型 N 型铠装热电偶测量，测量范围 0℃~500℃。实验中需要测量的电压信号包括加热段电压、加热段进出口绝缘电压。电压信号采用 0.1 级的直流电压变换器测量，测量范围 0~20 V，输出端电压 1~5 V。加热段均匀分布了 5 个温度测点和 1 个压降测点，详见图 2。

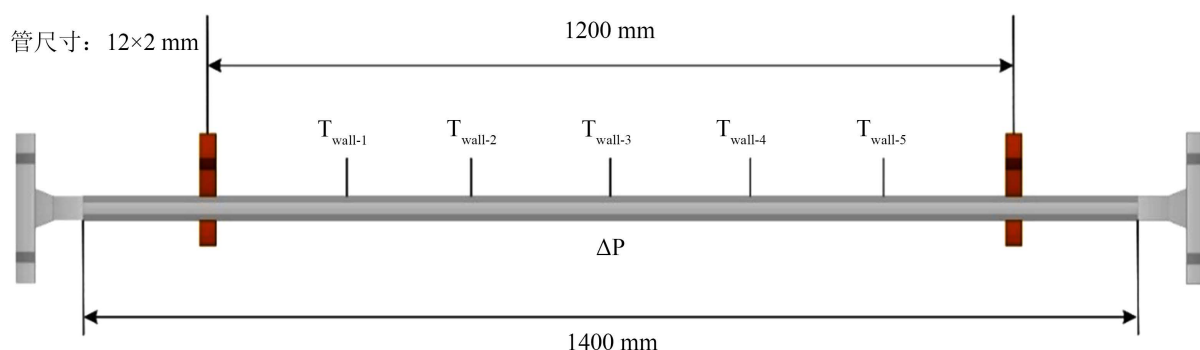


Figure 2. Figure of measurement point of heating section

图 2. 加热段测点图

本文主要符号对照表如表 1 所示。

Table 1. Main symbol comparison table

表 1. 主要符号对照表

符号	意义	单位
P	压力	MPa
t	时间	s
T	温度	℃
Q	功率	KW
T <sub>pc</sub>	临界温度	℃

## 2.3. 研究方法

首先回路抽真空，再使用增压泵从储存罐中往回路注入二氧化碳，稳压器顶部注入氮气待达到实验压力后静置后接入回路冷段。缓慢提升加热功率，数据采集系统记录压力、压差、温度、流量等信号，提升加热功率直至发生流动不稳定，待不稳定维持一段时间后，改变稳压器接入回路的方式(详见表 2)，观察回路运行情况，记录回路中流量、温度、压力等实验数据。

**Table 2.** Table of pressurizer access sequence  
**表 2.** 稳压器接入顺序表

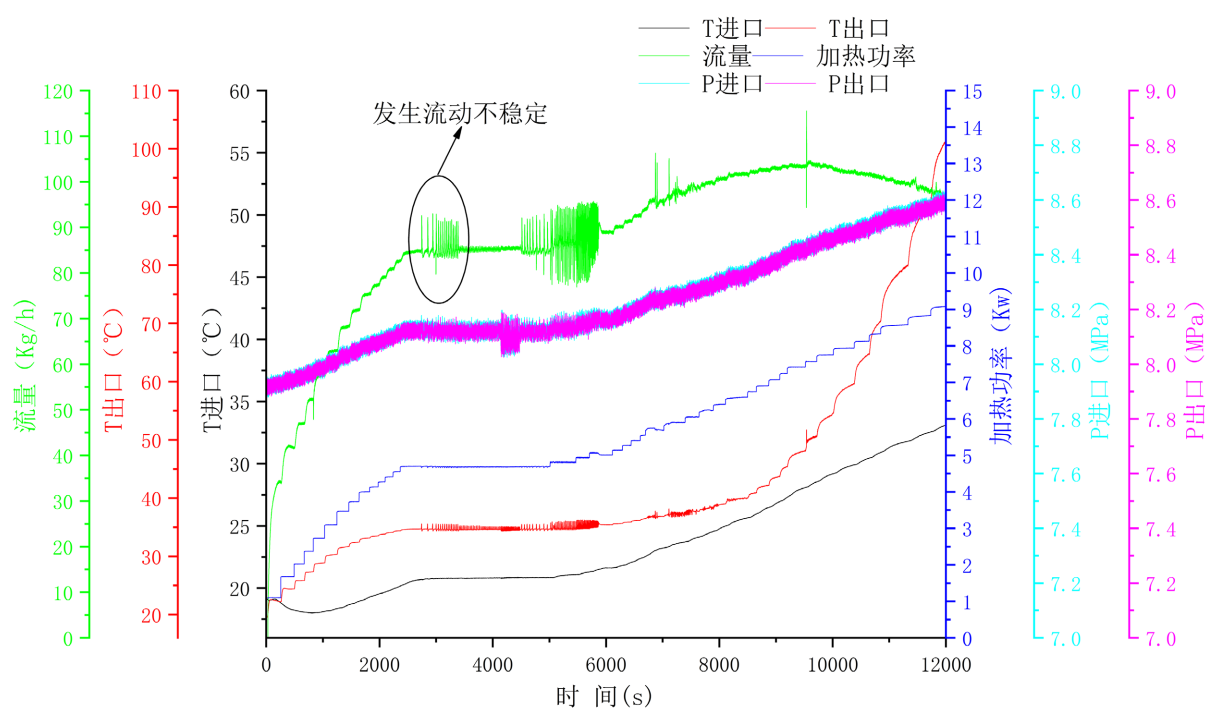
接入顺序	接入冷段	接入热段
1	√	×
2	√	√
3	×	√
4	×	×

注释：√表示接入，×表示不接。

### 3. 实验现象及分析

#### 3.1. 实验整体情况

回路的功率、流量、压力、温度变化如图 3 所示，可分为 4 个阶段。



**Figure 3.** Experimental parameter change diagram

**图 3.** 实验参数变化图

阶段 1, 0~3000 s: 实验初始压力为 7.8 MPa, 进口温度 19°C。随着加热功率的阶跃提升, 出口温度、流量也随加热功率阶跃提升;

阶段 2, 3000 s~5000 s: 当压力达到 8.1 MPa ( $T_{pc} = 35.123^{\circ}\text{C}$ ), 出口温度达到 34.5°C 时, 系统发生了明显的流动不稳定性, 流量与出口温度按照一定的周期波动。按照表 2 的顺序, 切换稳压器的接入回路方式, 可以看到不同的接入方式, 其波动的情况有一定的差异, 表现为振幅和周期不同;

阶段 3, 5000 s~9800 s: 随着加热功率的阶跃提升, 流动不稳定性消失, 出口温度、流量也随加热功率逐渐提升, 不过提升速度较阶段 1 更缓慢些, 到 9800 s 时, 流量达到峰值;

阶段 4, 9800 s~12000 s: 随着加热功率的增加, 流量逐渐下降, 当出口温度达到 100°C, 为确保安

全，停止加热，试验结束。

### 3.2. 流动不稳定现象

在阶段 2 中，3016~4974 s 之间，系统压力维持在 8.1 MPa，入口温度 20.75℃ 基本保持不变。按照表 2 稳压器接入顺序开展实验，回路的流量、出口温度及压力发生了波动，根据稳压器布置方式不同，划分了 4 个区域，具体详见图 4。

- 区域 1：3016~3394 s，稳压器接入冷段，系统流量、出口温度波动较大；
- 区域 2：3394~3788 s，稳压器接入冷热段，系统流量波动变小，出口温度有波动；
- 区域 3：3788~4136 s，稳压器接入热段，系统流量、出口温度波动都较小；
- 区域 4：4136~4471 s，稳压器不接入回路，系统压力开始波动，出口温度有波动。

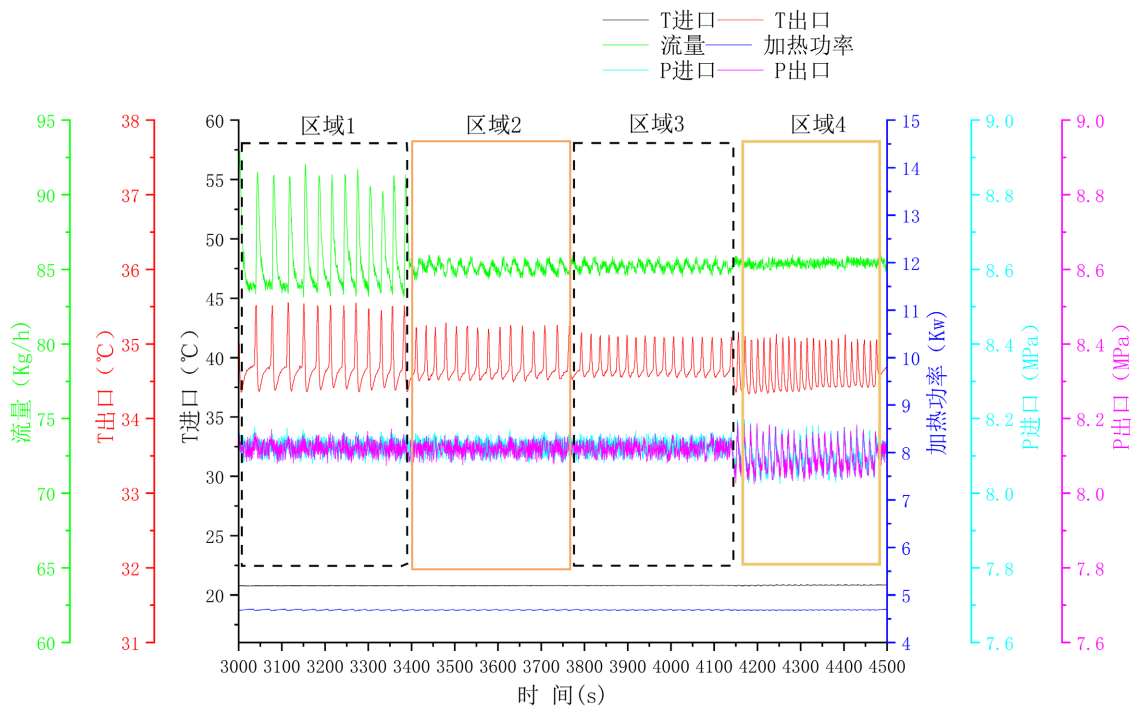


Figure 4. Flow diagram of 4 different layout patterns of the pressurizer

图 4. 四种稳压器布置方式回路流动图

4 个区域波动周期及幅值情况，具体详见表 3。

Table 3. Fluctuation period and amplitude of 4 different layout patterns of the pressurizer

表 3. 四种稳压器布置方式回路波动周期、振幅

区域	时间	稳压器接入方式	幅值(%)			周期(s)		
			流量	温度	压力	流量	温度	压力
1	3016~3394	接冷段	7.41%	2.36%	<1%	31	31	-
2	3394~3788	接冷热段	<1%	1.61%	<1%	-	25	-
3	3788~4136	接热段	<1%	1.18%	<1%	-	20	-
4	4136~4471	不接入回路	<1%	1.15%	1.10%	-	15	15

(注：-表示波动较小)

下面为流量、出口温度、压力变化的详细情况：

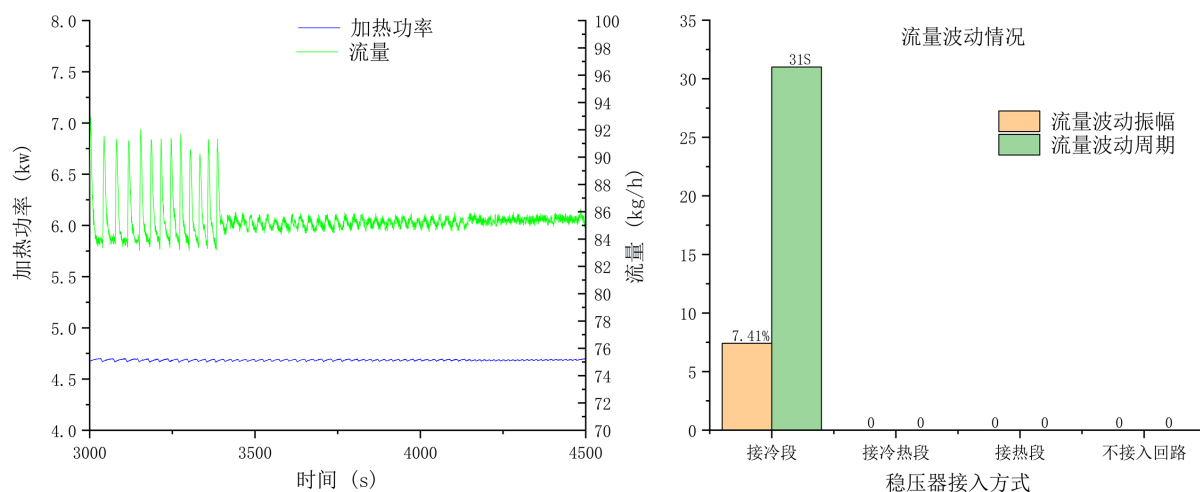


Figure 5. Flow fluctuation diagram

图 5. 流量波动图

如图 5 所示，稳压器接入冷段回路波动最大，达到 7.41%。其余方式流量波动较小。

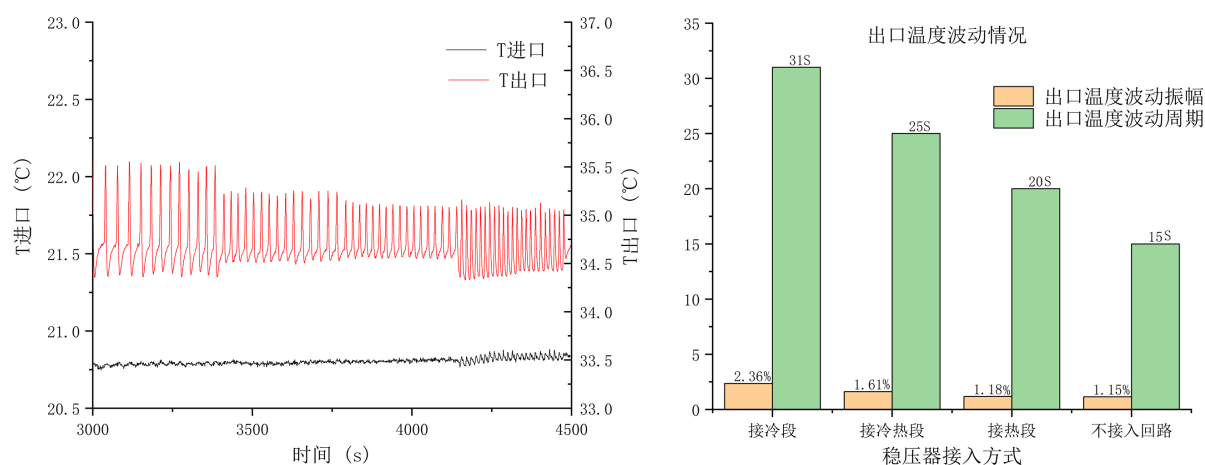


Figure 6. Temperature fluctuation diagram

图 6. 温度波动图

如图 6 所示，出口温度波动从大到小依次为：接入冷段 2.36%，接冷热段 1.61%，接入热段 1.18%，不接入回路 1.15%。

如图 7 所示，仅稳压器不接入系统时，回路压力有波动，振幅达 1.1%，其余情况下，回路压力几乎无波动。

### 3.3. 实验数据分析

以往的研究表明：超临界二氧化碳在拟临界点附近时，密度等物性参数会发生剧烈变化，密度的变化会导致其压降发生变化，实验初始条件：入口温度 20.75℃，压力 8.1 MPa。8.1 MPa 对应的拟临界温度为 35.123℃，我们观察到，当出口温度达到 34.5℃，回路发生了波动，这个是与以往研究相符的。稳



压器在系统内提供了较大的可压缩空间，其接入方式的不同，对系统的影响与反馈也不同，实验中可以看到稳压器不同的接入方式，波形亦不同，这个说明是超临界二氧化碳密度剧烈变化与稳压器提供的可压缩空间相互迭代，共同造成了流动不稳定。

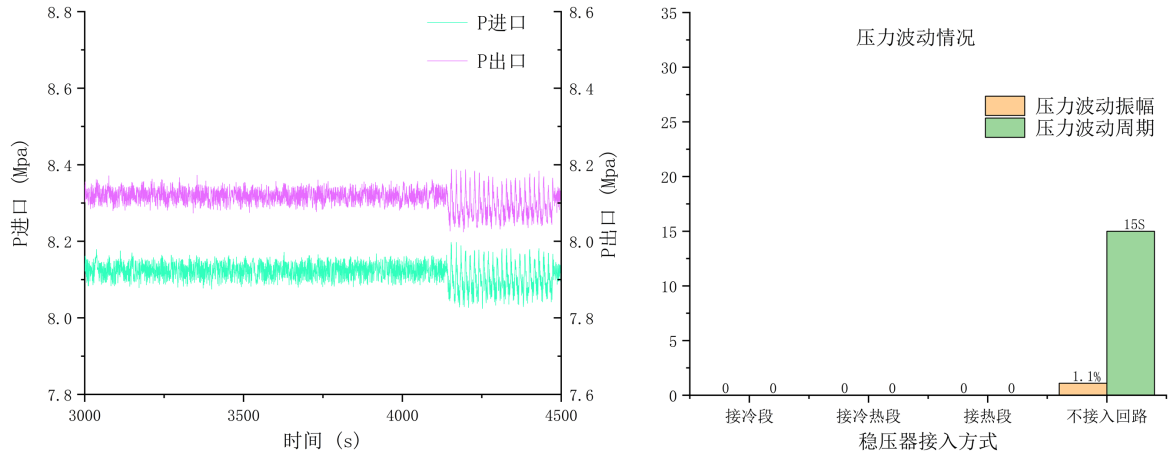


Figure 7. Pressure fluctuation diagram  
图 7. 压力波动图

实验过程中，实验段入口温度低于拟临界温度，进口流体近似为不可压缩高密度流体，随着实验段热流密度增加，实验段出口温度接近拟临界温度，出口流体密度快速下降，形成易压缩低密度流体流动，整个实验段近似于亚临界压力下的两相沸腾状态。低密度易压缩流体类似于机械系统的弹簧，若系统稍加一微小扰动，经过压降 - 密度 - 份额之间延迟反馈，就可能形成高低密度流体依次流动可持续的振荡[11]。

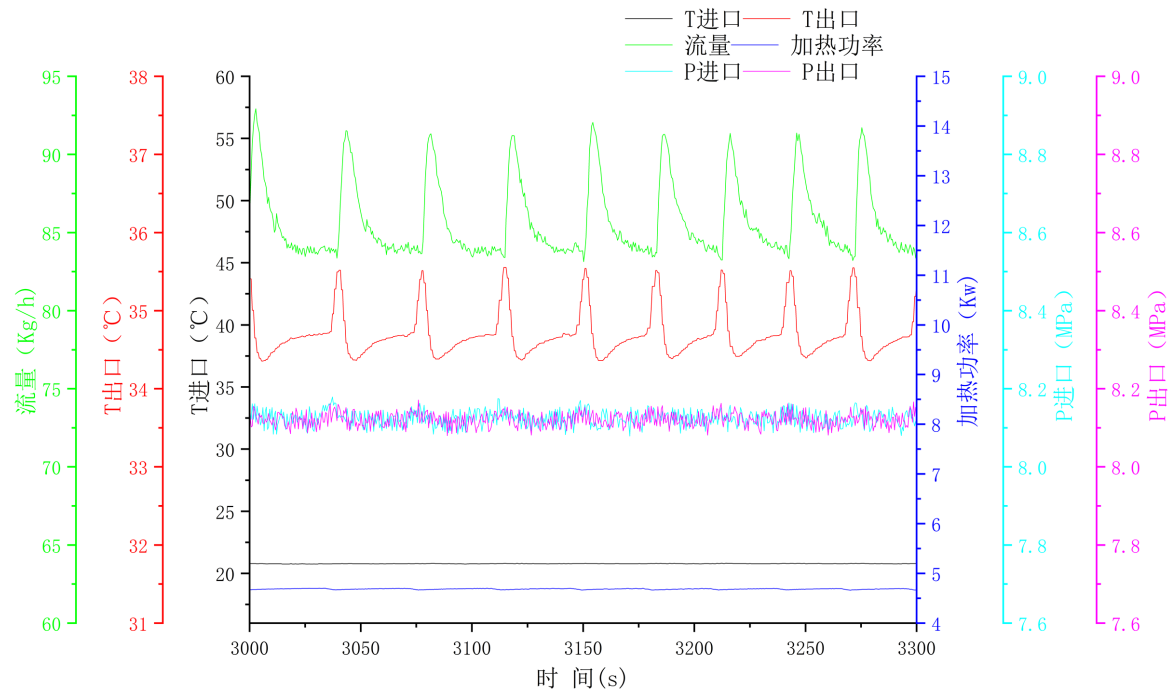


Figure 8. Pressurizer access cold section diagram  
图 8. 稳压器接入冷段图



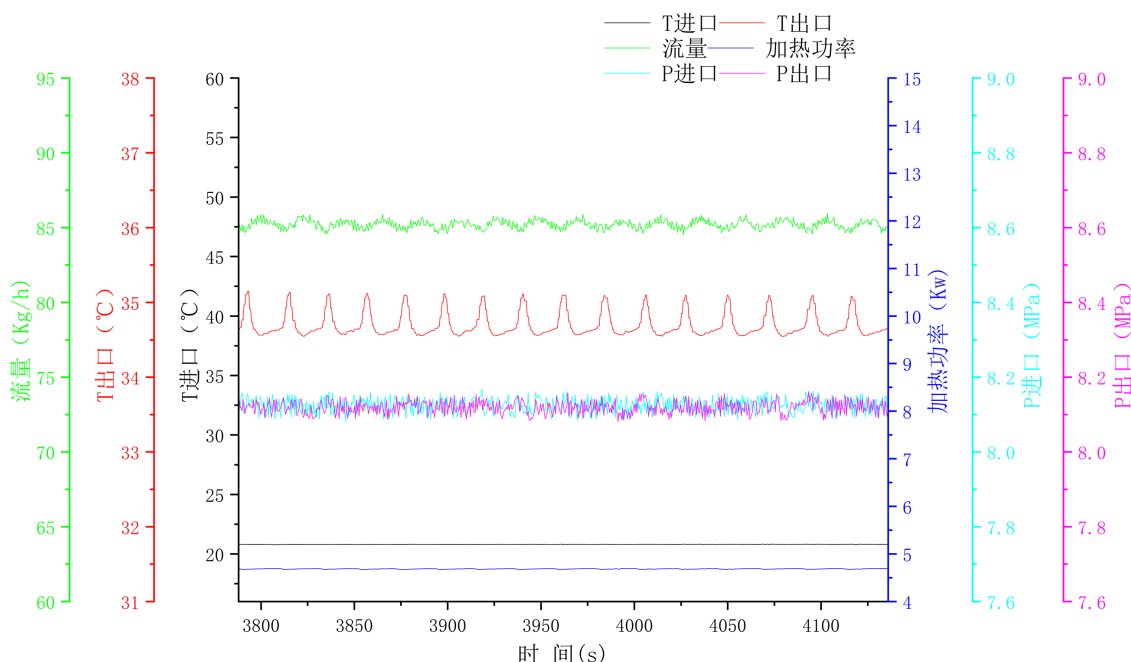


Figure 9. Pressurizer access hot section diagram  
图 9. 稳压器接入热段图

当稳压器不接入系统时, 流体在实验段出口、上升段以及换热器进口中, 流体为低密度可压缩流体, 不稳定扰动主要在该区间产生。下降段为近似不可压缩高密度流体, 可压缩性差, 流动扰动传播以声速传播, 不存在延迟反馈, 对整个系统的流动起到稳定作用。实验结果也表明, 整个系统流量不波动, 只有实验段出口温度波动, 这个与 Zhang [8] 试验的结果是相似。

当稳压器接入冷端时, 见图 8, 相当于为下降段提供了一个可压缩性流动旁路, 当扰动在下降段传播时, 会有部分流体流入流出稳压器, 增加了进口流动可压缩性能, 削弱了不可压缩高密度流体的稳定性能, 故接入冷端时流量温度波动振幅最大。当稳压器接入热段时, 见图 9, 稳压器对实验段出口低密度易压缩流体流动形成的扰动起到缓冲、吸收、调和的作用, 降低了流动不稳定性波动特性, 故稳压器接入热段有助于抑制和消除自然循环回路中的振荡, 这个与 Cheng [6] 等人试验结果是类似的, 与鲁晓东 [10] 等人的数值化模拟也是相吻合的。

#### 4. 结论及建议

实验选取初始压力为 7.8 MPa, 初始温度 19°C 为典型工况, 开展了稳压器布置方式对超临界二氧化碳自然循环流动不稳定性影响实验研究, 观察到了流动不稳定性现象, 对实验数据进行分析, 得出结论如下:

- 1) 稳压器接入系统冷段, 回路流量波动振幅达到 7.41%, 周期 30s; 其他接入方式流量波动较小;
- 2) 无论稳压器哪种布置方式, 回路出口温度皆有波动, 按照振幅从大到小依次为: 稳压器接入冷段 2.36%, 接冷热段 1.61%, 接入热段 1.18%, 不接入回路 1.15%;
- 3) 稳压器不接入系统, 回路压力有波动, 达到 1.1%, 其余几种方式回路压力皆无波动;

综上所述, 超临界二氧化碳在自然循环工况下, 稳压器接入系统热段时有助于抑制和消除自然循环回路中的振荡, 对控制回路的稳定性最有利。本文成果可为探明可压缩空间对不稳定性机理以及稳压器合理布置提供参考和借鉴。

## 参考文献

- [1] Oka, Y. and Koshizuka, S. (2001) Supercritical-Pressure, Once-Through Cycle Light Water Cooled Reactor Concept. *Journal of Nuclear Science and Technology*, **38**, 1081-1089. <https://doi.org/10.1080/18811248.2001.9715139>
- [2] Gibbs, J.P. (2005) Power Conversion System Design for Supercritical Carbon Dioxide Cooled Indirect Cycle Nuclear Reactors. Ph.D. Thesis, United States Merchant Marine Academy, New York.
- [3] Akbari, A.D. and Mahmoudi, S.M.S. (2014) Thermo-economic Analysis & Optimization of the Combined Supercritical CO<sub>2</sub> (Carbon Dioxide) Recompression Brayton/Organic Rankine Cycle. *Energy*, **78**, 501-512. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.037>
- [4] Department of Energy (2016). FY 2016 Congressional Budget Request. DOE/CF-0108, **2**, 249-250.
- [5] 贺士晶. 核动力装置参数优化设计[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- [6] Cheng, K., Meng, T., Tian, C.P., Yuan, H.S. and Tan, S.C. (2018) Experimental Investigation on Flow Characteristics of Pressure Drop Oscillations in a Closed Natural Circulation Loop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **122**, 1162-1171. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.030>
- [7] Liu, H.T. and Kakac, S. (1991) An Experimental Investigation of Thermally Induced Flow Instabilities in a Convective Boiling Upflow System. *Wärmeund Stoffübertragung*, **26**, 365-376. <https://doi.org/10.1007/BF01591669>
- [8] Zhang, L., Chatoorgoon, V. and Derksen, R. (2017) Experimental Flow Instability Study of a Natural Circulation Loop with Supercritical CO<sub>2</sub>. In: Jiang, H., Ed., *Proceedings of the 20th Pacific Basin Nuclear Conference*, Springer, Singapore, 121-141. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2314-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2314-9_10)
- [9] 彭传新, 卓文彬, 咎元峰, 徐建军, 鲁晓东, 黄彦平. 两相自然循环系统压降震荡流动不稳定性研究[J]. 核动力工程, 2017, 38(4): 178-181.
- [10] 鲁晓东, 陈炳德, 王艳林, 咎元峰, 黄彦平. 稳压器位置对自然循环系统流动不稳定性的影响研究[J]. 中国科学技术进展报告, 2017(5): 373-378.
- [11] 于平安, 朱瑞安, 等. 核反应堆热工分析[M]. 第3版. 上海: 上海交通大学出版社, 2002: 133.