

Experimental Study on Critical Flow of Supercritical CO₂

Yangle Wang¹, Yuan Zhou^{1*}, Junfeng Wang², Yanping Huang²

¹Nuclear Academy of Sichuan University, Chengdu Sichuan

²Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan

Email: *zhouyuan1911@126.com

Received: Jul. 7th, 2018; accepted: Jul. 17th, 2018; published: Jul. 24th, 2018

Abstract

The power conversion system of supercritical carbon dioxide is the frontier of the current international energy and power field. When the system is broken, the critical flow phenomenon occurs at the high temperature and high pressure in the system, and the safety of the nuclear power system operation has produced a huge threat, analysis of supercritical carbon dioxide critical flow of the system safety analysis is very important. The critical flow of supercritical carbon dioxide was studied by establishing a supercritical carbon dioxide critical flow experimental device. The influence of upstream stagnation temperature, upstream stagnation pressure and aspect ratio on critical flow was compared. It was found that the mass flow rate of carbon dioxide decreased with the increase of upstream stagnation temperature and aspect ratio, and increased with the increase of upstream stagnation pressure. The typical experimental phenomena are analyzed and the critical flow mechanism of supercritical carbon dioxide in the tube is discussed. The experimental results provide support and reference for further experimental research and theoretical research.

Keywords

Supercritical Carbon Dioxide, Critical Flow, Nuclear Safety, Leakage

超临界CO₂临界流实验研究

汪杨乐¹, 周源^{1*}, 王俊峰², 黄彦平²

¹四川大学核学院, 四川 成都

²中国核动力研究院, 四川 成都

Email: *zhouyuan1911@126.com

收稿日期: 2018年7月7日; 录用日期: 2018年7月17日; 发布日期: 2018年7月24日

*通讯作者。

摘要

以超临界二氧化碳工质的动力转换系统发生破口时, 由于系统内处于高压状态, 破口处会发生临界流现象, 对核电系统的安全运行产生了巨大的威胁, 分析超临界二氧化碳临界流动对该系统安全分析十分重要。建立超临界二氧化碳临界流实验装置, 实验研究超临界二氧化碳临界流现象, 比较上游滞止温度、上游滞止压力和长径比对临界流量的影响规律, 获得实验数据库。实验发现, 二氧化碳质量流量随着上游滞止温度和长径比的增加而减小, 随上游滞止压力的增加而增加。对典型实验现象进行分析, 探讨了超临界二氧化碳在管内的临界流机理, 实验结果为进一步开展实验研究和理论研究提供支持和参考。

关键词

超临界二氧化碳, 临界流, 核安全, 泄漏

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

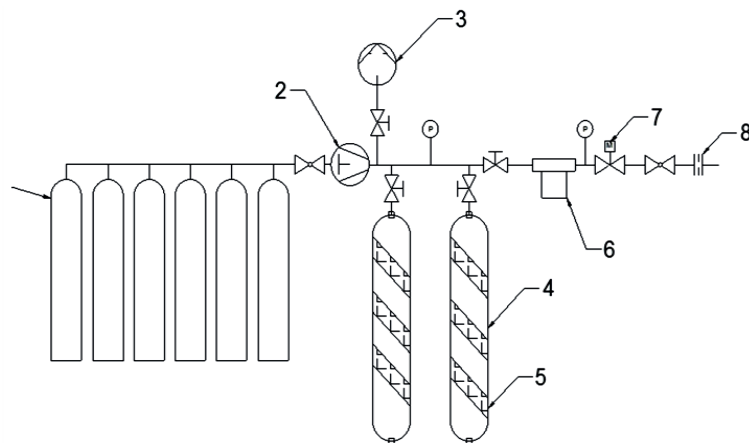
目前第四代反应堆的研制是核工程领域一个重要任务, 超临界二氧化碳布(S-CO₂)雷顿系统是第四代堆得发展方向之一。由于系统内处于高温高压(压力大于 7.38 MPa, 温度大于 400℃)状态, 当破口状况发生时, 破裂处会出现临界流现象, 严重威胁了核电系统的安全运行, 因此研究超临界二氧化碳在破口处的流失速率, 探究破口处超临界二氧化碳的流动现象对破口事故的预防和处理有着重要意义。

在美国三哩岛事故发生之后, 美国和日本重点研究了亚临界水为流体的两相临界流, 为破口失水事故提供参考。Faltetti 和 Moulton 研究了喷管临界流现象, 建立两相均匀平衡模型[1]。Moody 则从能量方程导出了临界流理论模型, 通过实验, 发现该理论参数需要通过实验数据进行修正[2]。之后 Henry 和 Fauske 研究得到了能更好符合短管的理论计算公式[3]。后续有研究者们之前的模型进行修正, 提出自己对临界流动的看法和理论。国内西安交通大学针对中国的压水堆系统, 进行了两相临界流的实验[2]。中国原子能科学院基于喷嘴临界流实验, 对现有模型进行了评价[4]。针对第四代堆的超临界二氧化碳流体, 最早是美国威斯康星大学[5] [6]进行了针对超临界二氧化碳的研究实验, 实验结果得到了长径比、温度、压力对流体流量的影响, 观察到了超临界二氧化碳的临界流动特性。国内上海交通大学[7]也进行了二氧化碳在短管中的两相临界流实验研究, 并给出了相关的压力的沿程分布, 以及探讨了入口压力和温度对流动的影响。周源等人对超临界二氧化碳临界流进行了数值模拟, 探讨了临界流机理和数值研究可行性[8]。目前大部分实验与理论研究集中在超临界水领域, 相比于水, 超临界二氧化碳临界参数低, 物性不同, 需要更多的实验研究为其理论研究提供依据。

本文建立超临界二氧化碳临界流实验装置, 实验研究处于超临界状态的二氧化碳工质在不同的喷管及密封结构下的喷放特性, 通过高速摄像仪观察喷放过程中工质流动形态的变化特征, 测量临界流动发生时的上游热工参数, 获得临界流动流量随上游滞止压力、上游滞止温度和喷管长径比等因素的影响。

2. 实验装置

实验系统(图 1)主要由二氧化碳储存系统、测量控制系统、实验管段以及阀门开闭系统等组成。



1、低压气瓶组 2、增压泵 3、真空泵 4、高压气瓶组 5、加热带 6、流量计 7、电磁阀 8、实验段

Figure 1. Experimental equipment schematic diagram
图 1. 实验设备示意图

二氧化碳储存系统由高压气瓶组、缠绕式加热带、绝热保温层以及流体填充装置组成，用于提供达到实验时上游滞止条件所需的二氧化碳。实验管段提供不同长径比(L/D)，以便模拟多种具体流动情况。阀门开闭系统布置在实验段的上游处，用于启动和停止实验。真空泵功能是在储气罐充入二氧化碳前为保证罐内气体纯度，将储气罐抽成真空状态。

实验段是实验装置的重要组成部分。实验段根据长径比大小分成两种结构。上游管径为 13.0 mm，实验段管径为 1.0 mm，上游管段流动面积和实验段流动面积之比为 169。

小长径比(L/D < 20)实验段由法兰、圆型孔板、金属缠绕垫片构成，图 2 为小长径比实验段结构图。

圆形孔板外径 65 mm (如图 2)，在圆形孔板圆心处通过慢走丝切割加工直径为 1.0 mm 的小孔，小孔的长度 L 可由孔板的厚度决定。法兰夹持在孔板的两端，通过金属缠绕垫片实现密封。

大长径比实验段改用 30 mm 外径的不锈钢实心钢管作为实验段，上游管段内径 13 mm 在钢管圆心处加工 1.0 mm 直径圆形小孔，如图 3。实验段通过螺纹与上游阀门直接进行连接。

实验中的质量流量、上游滞止压力和上游滞止温度由加装与二氧化碳储存系统和实验段之间的科氏力质量流量计、压力传感器和 T 型热电偶及其相应信号采集处理装置传输至电脑完成采集保存。电脑采用 Labview 2014 软件实现与信号采集系统的连接。高压气瓶组内实验前二氧化碳预设质量由高精度电子秤进行测量。

具体实验步骤如下：

- 1) 使用真空泵将储气罐抽成真空状态；
- 2) 使用压缩机和增压泵，将二氧化碳缓慢充入储气罐容器，通过物性参数软件计算选定滞止参数下所需的质量，根据电子称的示数充入略小于预设质量的二氧化碳；
- 3) 使用加热片对储气罐进行加热，将管内二氧化碳流体加热至实验预设工况温度；
- 4) 使用压缩机和增压泵充气试系统压力达到预设值
- 5) 打开开关控制装置，开始临界流实验，阀门打开和关闭间隙约 30 s 时间，以方便获取稳定的质量流量值；进行温度压力等热工参数、流量计实时流量数据等采集；
- 6) 关闭开关控制系统，实验结束；
- 7) 切换实验工况，重复 b-e 实验步骤。

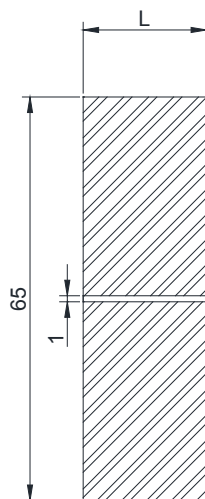


Figure 2. Test Section

图 2. 试验段

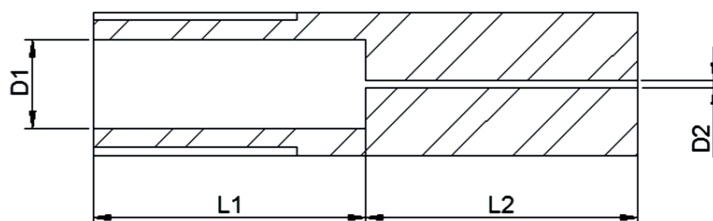


Figure 3. Test Section

图 3. 实验段结构图

3. 实验结果

3.1. 实验现象

选取上游滞止压力 10 Mpa，滞止温度为 50℃ 进行实验，当上游滞止压力和温度分别达到 10 Mpa 和 50℃ 后，打开阀门开始实验，喷放约 25 s 后关闭阀门，完成该工况实验，期间记录质量流量、压力和温度随时间变化规律，并在约 20 s 时刻拍摄喷嘴出口二氧化碳喷放现象。图 4 是实验段喷嘴照片，实验段出口处由于二氧化碳快速膨胀，由于气液两相共存，出现白色喷雾状，整体结构像流星状，这种现象随着上游滞止温度的升高而逐渐消失。

图 5 分别记录实验开始到实验结束时刻质量流量、上游滞止温度和上游滞止压力变化曲线。阀门在 0 s 时刻打开，在 25 s 时刻关闭。整个过程可以分为 3 个阶段，刚开阀门阶段、稳定阶段、阀门关闭阶段

1) 刚开阀门阶段(0~10 s): 当阀门开启后，通过实验段向环境喷放的质量流量迅速增加，在 8 s 左右质量流量达到最大值，然后略有下降，在 10 s 左右流量达到稳定。期间温度先是快速上升(0~6 s)，然后上升速度减小。

因为实验前给高压气瓶进行精确控温加热，中心管内温度并没有精确控制，加之散热的作用，在实验初始时刻，实验段前中心管内的温度略低于高压气瓶内二氧化碳温度。实验开始时刻打开阀门，先是存储在中心管内的二氧化碳被排放，然后由气瓶内二氧化碳补充，因此在实验过程初期，实验段上游测得的温度逐渐上升。在 8 s 时刻质量流量达到最大的原因是，初始中心管内二氧化碳温度略低于气瓶温度，密度略大于气瓶内二氧化碳密度，喷放的质量流量略大。



Figure 4. The phenomenon at outlet of the Nozzle
图 4. 实验喷口现象

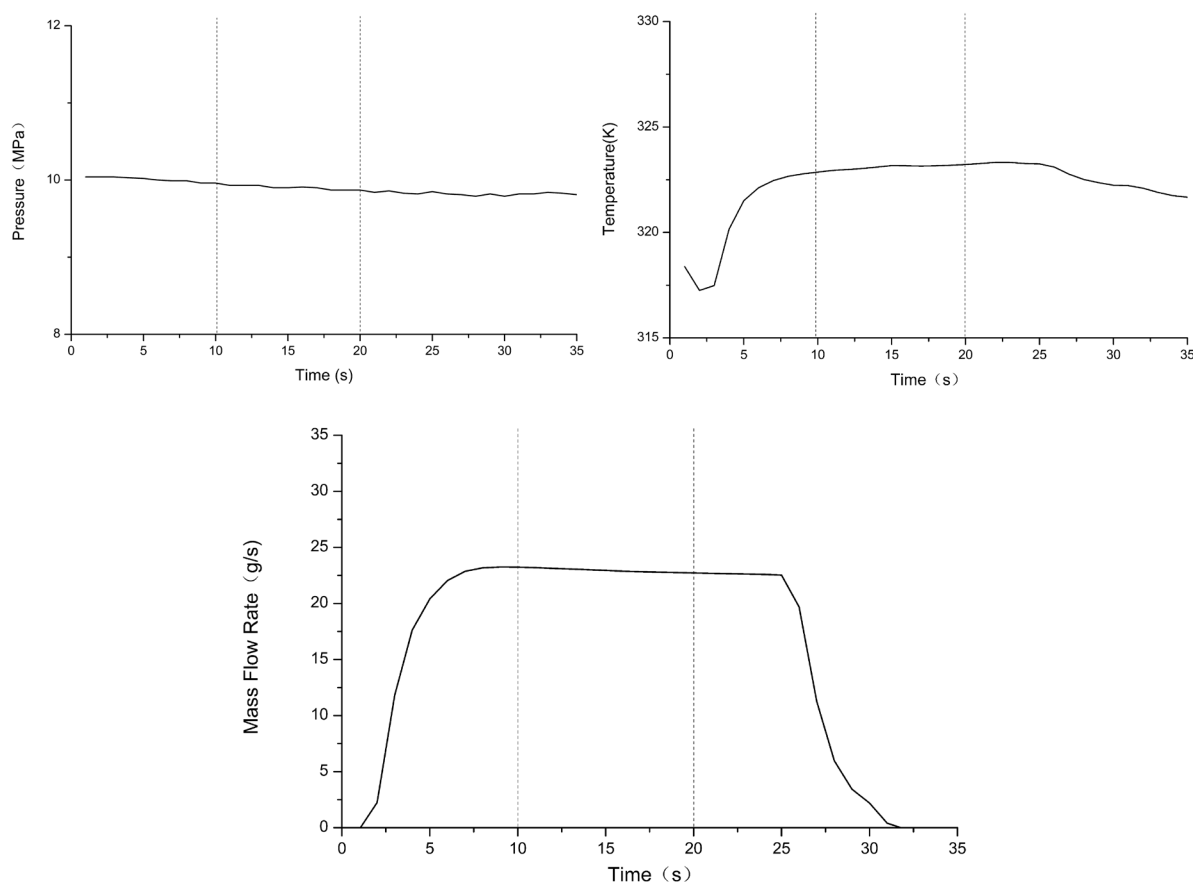


Figure 5. Thermal parameters with time curve when $L/D = 40$, 10 Mpa, 50°C
图 5. $L/D = 40$, 10 Mpa, 50°C 热工参数随时间变化曲线

2) 稳定阶段(8 s~25 s): 在此阶段质量流量、温度和压力参数基本维持不变, 在此期间温度上升不超过 1°C , 压力变化不超过 0.1 Mpa, 质量流量基本不变。因此该阶段可以认为达到准稳态情况。

3) 阀门关闭阶段(25 s~33 s): 当阀门在 25 s 时执行关闭时, 质量流量迅速减小, 在 33 s 时刻质量流量减小至 0。该工况实验结束。

3.2. 质量流量随上游滞止温度的变化

长径比为 40 的实验段选取 35°C ~ 100°C 温度进行实验, 压力设置在 8 Mpa。

图 6 为滞止温度与质量流量的关系曲线。随着温度升高，超临界二氧化碳的质量流量会减小。在低温区域，质量流量随着温度的升高迅速下降，当温度大于 70℃ 时，随着温度的增加，临界流量减小较为缓慢。这主要与二氧化碳的物性密切相关，图 7 为二氧化碳密度随温度变化曲线，临界流量随温度变化曲线与密度随温度变化曲线规律基本一致。由临界流质量流量方程(公式 1)可知，当上游滞止压力不变时，超临界二氧化碳的质量流量与密度呈正比，而同一压力下二氧化碳的密度随温度的升高而减小，在靠近临界点时，密度等物性随温度变化剧烈，从而导致质量流量在临界点附近变化较快。因此二氧化碳的密度对其质量流量有着重要影响。

$$m = C\sqrt{2\rho(P_0 - P_b)} \quad (1)$$

其中 C 为流量系数， P_0 为上游滞止压力， P_b 为背压。

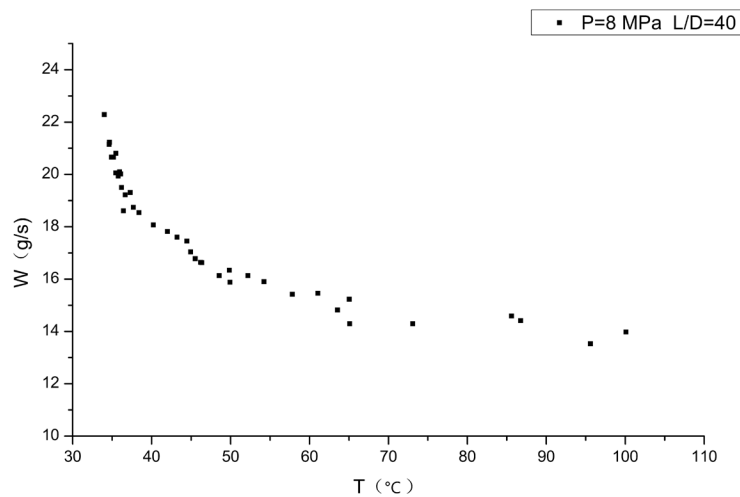


Figure 6. The mass flow rate changes with the upstream stagnation temperature

图 6. 质量流量随上游滞止温度变化

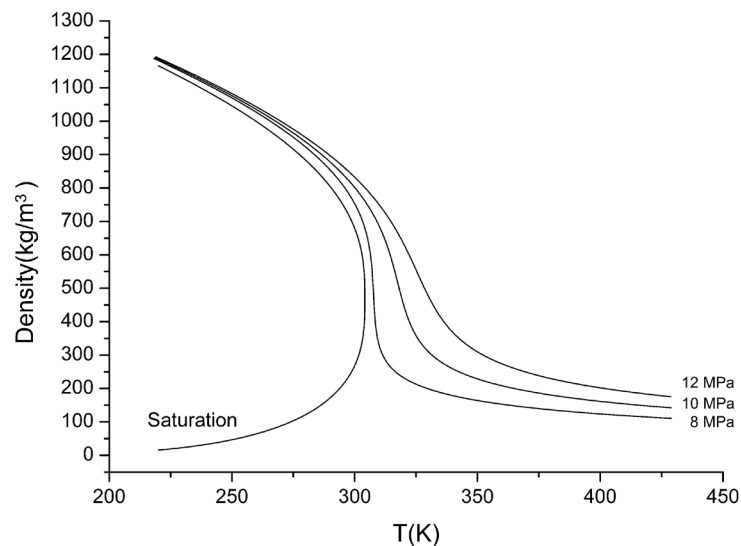


Figure 7. Carbon dioxide density varies with temperature

图 7. 二氧化碳密度随温度变化曲线

3.3. 上游滞止压力对临界流量影响

选取 11 Mpa、10 Mpa、9 Mpa 和 8.1 Mpa 压力进行实验，压力设置在 50℃。实验段的直径为 1.0 mm，长度为 5.0 mm。

图 8 是不同滞止压力下的质量流量，可以看出，二氧化碳质量流量随上游滞止压力下降而下降。

3.4. 长径比对临界流量的影响

图 9 为 1~100 范围内通过不同长径比的实验段超临界二氧化碳的质量流量，上游滞止压力为 10 Mpa，上游滞止温度选取为 50℃。

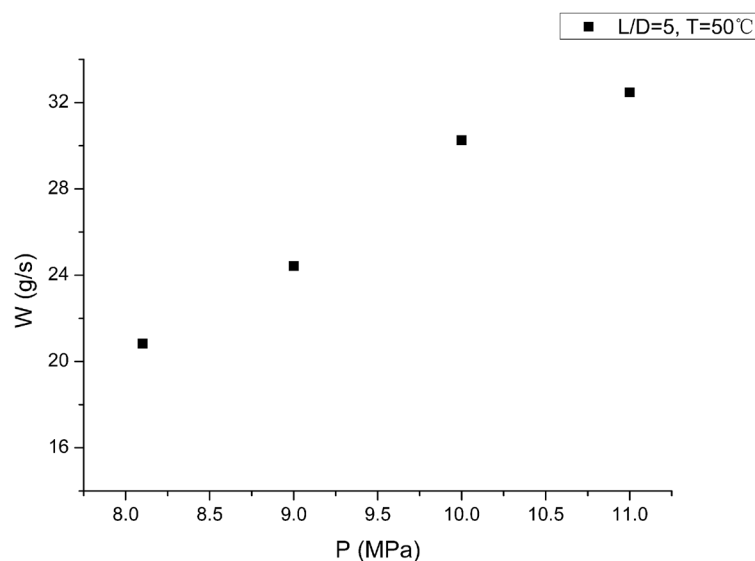


Figure 8. The mass flow rate changes with the upstream stagnation pressure

图 8. 质量流量随上游滞止压力变化

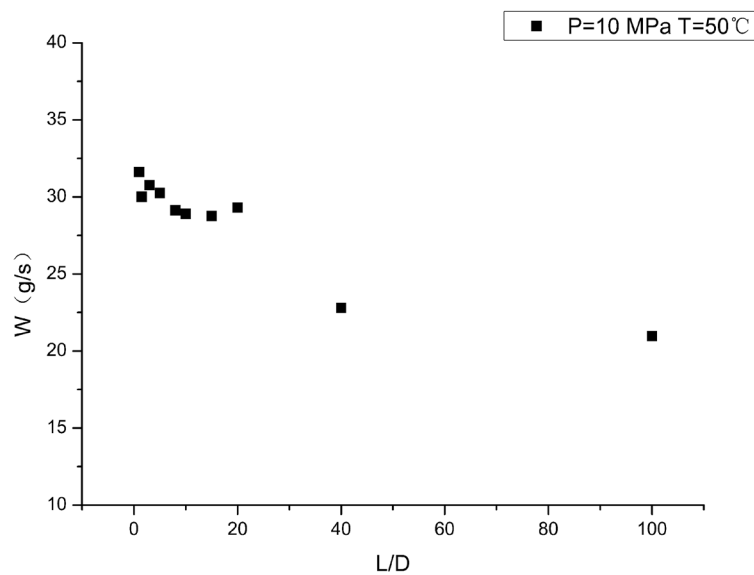


Figure 9. The relationship between the mass flow and the aspect ratio

图 9. 质量流量随长径比的变换关系

图 9 显示通过实验段的超临界二氧化碳质量流量随着长径比的增大而减小。实验段为短管时($L/D < 20$), 质量流量随长径比的变化较为明显, 随着长径比增加, 质量流量随长径比变化放缓。影响规律与水临界流现象相似。

4. 结论

建立了超临界二氧化碳临界流实验装置, 实验研究不同上游参数、长径比等因素对超临界二氧化碳质量流量的影响。主要结论如下:

1) 长径比 40 时, 随着上游滞止温度的增加, 超临界二氧化碳的质量流量逐渐减小, 当上游滞止温度接近实验压力对应的拟临界温度, 超临界二氧化碳质量流量随温度变化更加剧烈, 并随着上游滞止温度的提升, 质量流量变化趋于平缓。通过相机拍摄了每个工况的喷管出口照片, 在喷口处出现了明显的雾化现象, 发现当上游温度升高, 喷口处的雾化现象逐渐消失。

2) 实验使用长径比为 5 的实验段, 上游滞止温度设定为 50°C 得到了上游滞止压力分别为 8.1 Mpa, 9 Mpa, 10 Mpa 和 11 Mpa 下的质量流量, 二氧化碳质量流量与上游滞止压力呈正比。

3) 实验使用 1~100 共 10 个长径比的实验段进行实验, 上游滞止压力为 10 Mpa, 上游滞止温度为 50°C 。当长径比较小时, 超临界二氧化碳质量流量随长径比的明显减小。随着长径比的增加, 质量流量变化较为缓慢。

基金项目

本论文的研究得到国家自然科学基金(No. 51506134, 11605193)资助。

参考文献

- [1] 徐进良, 陈听宽, 陈学俊, 宋纪元. 两相临界流[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 77-84.
- [2] 陈听宽, 徐进良, 罗毓珊. 两相临界流实验研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(5): 623-626.
- [3] 杭立群. 两相临界流[J]. 核动力工程, 1982, 3(2): 36-41.
- [4] 陈玉宙, 杨春生, 张曙明, 赵民富, 杜开文, 毕可明. 基于喷嘴临界流实验对现有物理模型的评价[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(6): 485-490.
- [5] Edlebeck, J. and Nellis, G.F. (2014) Measures of the Flow of Supercritical Carbon Dioxide through Short Orifices. *The Journal of Supercritical Fluids*, **88**, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.01.008>
- [6] 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)
- [7] 陈江平, 刘军朴, 金纪峰, 陈芝久. 跨临界节流短管流量特性实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(8): 1214-1217.
- [8] 周源, 夏兆阳, 汪杨乐, 王俊峰. 超临界 CO_2 临界流数值模拟[J]. 核科学与技术, 2017, 5(3): 177-184.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2332-7111，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：nst@hanspub.org