

超临界二氧化碳临界流理论研究

汪杨乐¹, 周源², 刘秀婷¹, 黄彦平¹, 王俊峰¹

¹中国核动力研究设计院, 四川 成都

²四川大学物理学院, 四川 成都

Email: 214927822@qq.com

收稿日期: 2021年5月17日; 录用日期: 2021年7月14日; 发布日期: 2021年7月21日

摘要

反应堆动力循环系统破口事故研究是反应堆安全分析的重要组成部分。针对伴随的临界流现象, 建立了均相热平衡模型(HEM)和均相松弛模型(HRM)进行分析。计算发现, 两个模型均能较好地计算超临界二氧化碳的临界流的质量流量, 最大误差不超过16.1%。其中, HEM模型的平均误差为5.5%, HRM模型的最低平均误差为3.9% ($\theta = 10^{-5}$)。HRM模型具有更好的计算精度。同时, 计算还得到了不同参数下出口含气率变化特性与管内物性参数变化过程。对相变延迟现象对超临界二氧化碳临界流流动的影响进行了更加深入的分析, 为破口事故安全分析提供理论支持和参考。

关键词

超临界二氧化碳, 临界流, 核安全

Theoretical Study of Supercritical Carbon Dioxide Critical Flow

Yangle Wang¹, Yuan Zhou², Xiuting Liu¹, Yanping Huang¹, Junfeng Wang¹

¹Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan

²College of Physics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

Email: 214927822@qq.com

Received: May 17th, 2021; accepted: Jul. 14th, 2021; published: Jul. 21st, 2021

Abstract

The leakage accident in reactor power system is an important problem in safety analysis. To analyze Critical Flow phenomenon in accidents better, a Homogeneous Equilibrium Model (HEM) and

a Homogeneous Relaxation Model (HRM) were established. After calculation, both models can accurately calculation mass flow rate of supercritical carbon dioxide. The maximum error is less than 16.1%. The average error of HEM model is 5.5%. The minimum error of HRM model is 3.9% ($\theta = 10^{-5}$). The HRM model has higher accuracy. At the same time, the mass vapor ratio at outlet and parameter changing process in the test section are also obtained. The effect of phase transition delay of supercritical carbon dioxide critical flow has further analyzed and it provides more reference for the nuclear safety analysis.

Keywords

Supercritical Carbon Dioxide, Critical Flow, Nuclear Safety

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. 概述

在反应堆动力循环系统中, 系统内处于高温高压状态。随着动力循环装置运行工况的提高, 当系统工质发生泄漏时, 往往伴随着临界流现象。因此该现象是反应堆安全分析的重要研究对象。临界流研究始于 20 世纪 60 年代, Faltetti 和 Moulton [1]发现均相平衡模型(HEM 模型)无法准确计算短管的临界流流量。Isbin 和 Dauz 等人[2]通过实验与理论计算发现, 随着流体在管道内相变程度增加, 均相模型的计算误差增加。Henry 和 Fauske [3]认为, 在喷管中, 由于流体流速极快, 流体无法充分进行现热量交换和相变, 流体的真实含气率与热平衡含气率将出现不同, 该现象也被称为相变延迟现象。该现象会显著影响临界流流动过程。J. Edlebeck [4]等人对 1 mm 破口喷放特性开展了实验研究, 获得了适用于超临界二氧化碳临界流的流量系数范围。Aleksiev [5], S. Brown [6]等人使用均相松弛模型(HRM 模型), 通过松弛系数对临界流热不平衡现象进行了描述, 对于密相态的二氧化碳临界流泄漏速率具有较为准确的预测结果。上海交通大学 J. P. Liu [7]等通过实验测量了二氧化碳临界流在喷管内部温度和压力分布的情况, 为研究临界流在管道内部流动过程提供了参考。

现有的临界流理论研究大多以超临界水为主, 以超临界二氧化碳为研究对象的研究较少。超临界二氧化碳的理论研究集中在低温区域(低于伪临界温度)的二氧化碳泄漏过程, 针对高于拟临界温度的超临界二氧化碳研究较少。

本文开展了临界流喷放实验, 基于实验数据对 HRM 模型和均相 HRM 模型的准确性进行评估, 并分析相变延迟现象对临界流流动过程的影响。准确的理论模型可以加深临界流流动机理的认识, 从而对反应堆工质流失进行精确的预测, 这对事故的预防和处理具有巨大的帮助。

2. 实验装置与结果

图 1 为超临界临界流喷放装置示意图和照片, 实验装置由高压气瓶组、加热装置、流体加压装置、数据测量和采集系统、实验段和阀门组成。增压泵使二氧化碳达到预设压力, 加热装置对实验装置进行加热使二氧化碳达到预设上游滞止温度。实验装置会对质量流量, 喷管进口附近的滞止压力和上游滞止温度进行测量。

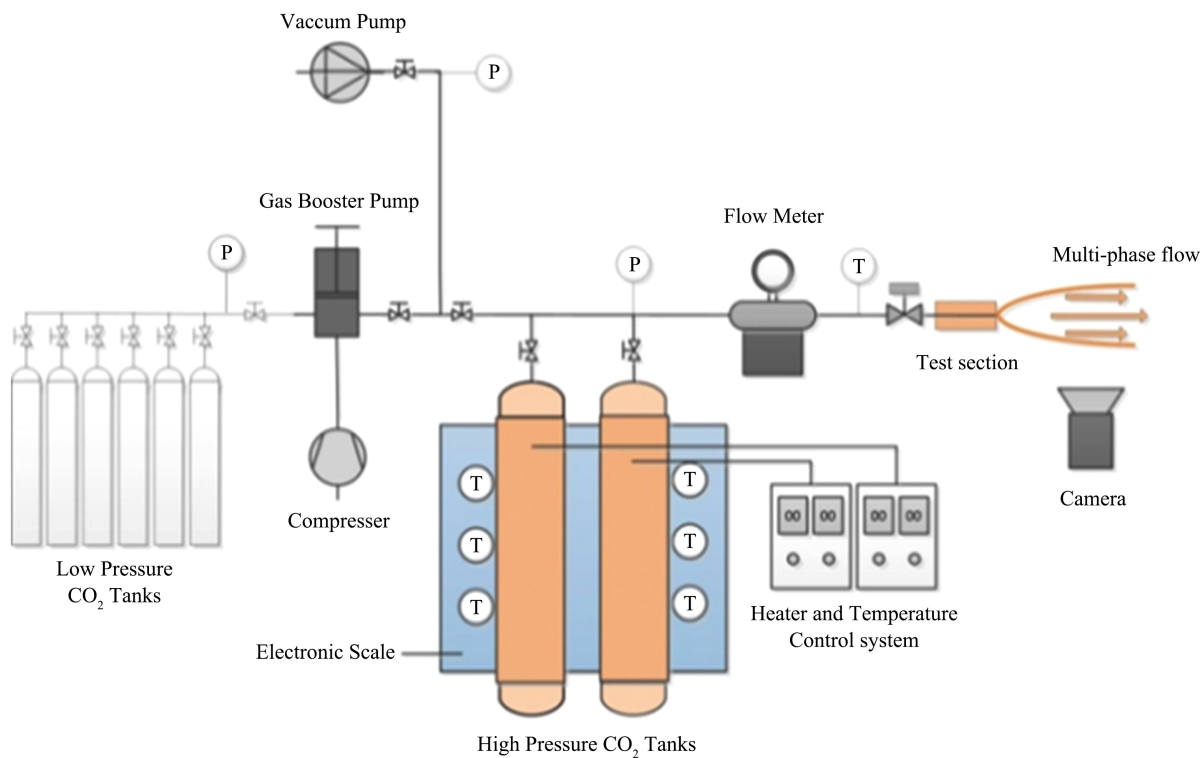


Figure 1. Critical flow experiment device

图 1. 临界流喷放装置

图 2 为实验段示意图，实验段为孔板结构，流道位于孔板圆心，直径均为 1 mm，通过使用不同厚度的孔板来开展不同长径比的临界流喷放实验。



Figure 2. Test section

图 2. 实验段

表 1 为超临界二氧化碳临界流喷放实验工况与质量流量表。实验上游滞止温度范围为 320.44~269.42 K，上游滞止压力范围为 8.13~10.71 MPa，实验段长径比为 1~100。从表中可以看出，临界流质量流量随上游滞止温度和长径比增加而减小，随上游滞止压力增加而增加。

Table 1. Experimental conditions and results
表 1. 实验工况与实验结果

序号	长径比	压力(MPa)	温度(K)	质量流量(g/s)
A1	1	9.97	322.5	31.61
A2	3	9.98	322.5587	30.77
A3	5	10	323.19	30.26
A4	8	10.02	323.85	29.13
A5	10	9.97	323.85	28.9
A6	15	9.98	323.4	28.76
A7	40	9.95	323.05	22.79
A8	100	9.99	322.95	20.96
B1	5	10.71	323.72	32.48
B2	5	9.97	323.85	30.26
B3	5	8.89	323.18	24.43
B4	5	8.13	322.82	21.27
C1	5	9.98	320.44	29.71
C2	5	9.94	323.79	27.96
C3	5	9.92	326.88	26.44
C4	5	10.08	334.13	24.47
C5	5	9.885	352.19	22.57
C6	5	9.92	369.42	21.26

3. 理论模型

基于临界流实验数据与实验现象，建立理论模型。对临界流质量流量进行预测，对比实验数据分析理论模型的准确性。与此同时，对实验段内部的流动理论分析，了解临界流流动特性。二氧化碳临界流在喷管内具有较高流动速度，汽液两相在管内搅浑，与此同时管内流动时间短，无法与管壁进行热量交换，因此假设临界流在喷管内时为等熵均相流动过程，流动方程如下：

质量守恒方程：

$$G = \frac{W}{A} \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\Delta P_{\text{total}} = P_0 - P_c = G^2 \frac{v_0}{2C_D^2} + G^2 (v - v_0) + \int_0^L \Delta P_f dz \quad (2)$$

$$\Delta P_f = \frac{4}{D} \cdot f \cdot v \cdot \frac{G^2}{2} \quad (3)$$

能量守恒方程：

$$h + \frac{u^2}{2} = h_0 \quad (4)$$

其中, f 为摩擦系数, C 是流量系数, 通过实验得到, 对于气态或超临界态流体, 该数值取 0.84, 对于液体或密相区流体取 0.61。热平衡质量含气率公式如下所示:

3.1. 均相平衡模型

若气液两相之间不存在热阻, 热量可以在一瞬间完成交换, 气液两相处在热力学平衡状态。守恒方程如下所示。

$$x_e = \frac{s - s_l}{s_g - s_l} \quad (5)$$

3.2. 均相松弛模型

在实际的临界流流动过程存在热不平衡现象。真实含气率与热平衡含气率存在一定偏差, 如公式(6)所示, 其中, θ 为松弛时间, 被用来描述热不平衡的程度, 气液两相之间热不平衡现象越明显, 该数值越大。在本文临界流计算中, 假设上游参数恒定不变, 流动为稳态流动, 因此可以忽略时间项得到以下方程:

$$\frac{\partial x}{\partial t} + u \frac{\partial x}{\partial z} = \frac{x_e - x}{\theta} \quad (6)$$

4. 结果与讨论

4.1. HEM 模型与 HRM 模型计算精度

图 3 为 HEM 模型和均相松弛模型(松弛时间分别为 10^{-5} 和 10^{-6})对圆形喷管临界流质量流量的计算误差。计算结果表明, HEM 模型和 HRM 均可以较好地计算超临界二氧化碳的临界流质量流量, 大部分工况的误差在 10% 以内。其中, HEM 模型的平均计算误差为 5.5%, 最大计算偏差为 16.1%。HRM 模型的平均误差分别为 5.1% ($\theta = 10^{-6}$)和 3.9% ($\theta = 10^{-5}$), HEM 模型具有更高的计算精度。与此同时, 松弛时间也较为明显地影响了计算结果, 当 $\theta = 10^{-5}$ 时, HRM 模型对超临界二氧化碳临界流质量流量计算更加准确。

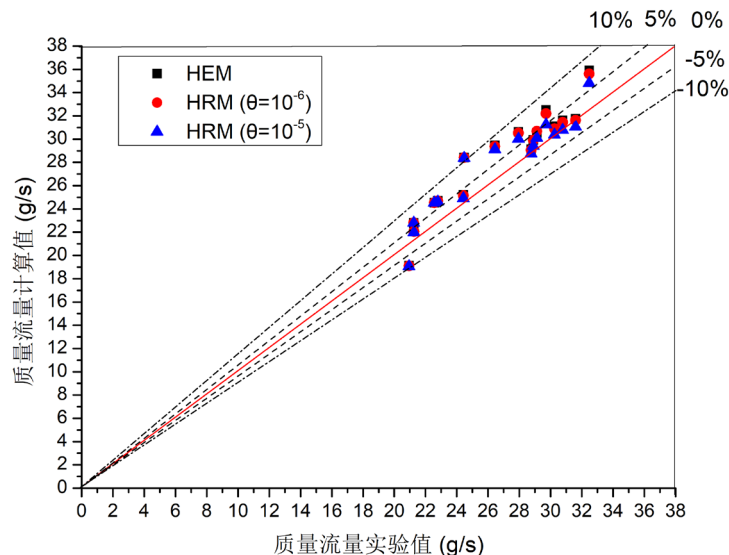


Figure 3. Error distribution of HEM model and HRM model

图 3. HEM 模型和 HRM 模型质量流量计算误差分布

4.2. 不同参数对流动相变的影响

实验段出口含气率是反映整个流动过程相变的关键参数。通过理论模型得到了不同工况喷管出口的质量含气率。图 4 为不同上游滞止温度下超临界二氧化碳临界流在喷管出口含气率的变化趋势。随着上游滞止温度的增加，出口质量含气率逐渐升高。当上游滞止温度接近伪临界温度时，二氧化碳的物性参数在流动过程中会出现剧烈变化，出口质量含气率随温度增加迅速上升，HRM 模型得到的含气率和 HEM 模型差异更大。随着上游滞止温度增加，物性参数变化平缓，HEM 和 HRM 模型计算差异逐渐降低。当上游滞止温度超过 335 K 后，出口质量含气率达到 1，此时喷管内流体为单相流动，两个模型计算结果趋于一致。图 5 为不同温度的实验结果，随着上游滞止温度升高，实验段出口喷雾现象逐渐消失(含气率增加)，当上游滞止温度上升到 335 K 以上后，喷雾现象基本消失，这也与计算结果基本一致。

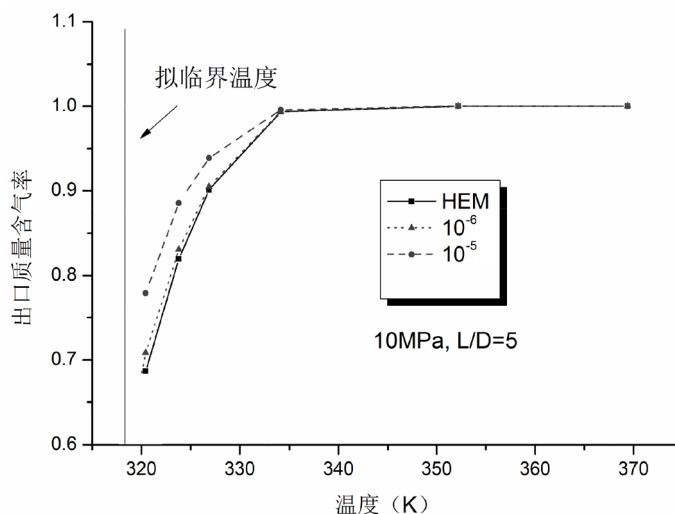


Figure 4. Effect of upstream stagnation temperature on mass vapor ratio at outlet
图 4. 上游滞止温度对出口质量含气率影响



Figure 5. Photo of test section's outlet [8]
图 5. 实验段出口[8]

图6为实验段长径比1~100实验段出口质量含气率。从图中可以看出,随着喷管流道延长,超临界二氧化碳临界流的质量含气率逐渐降低。这是因为流体在水平管道内存在型阻、加速和摩擦三种压降。当长径比较短时($L/D < 8$)随着长径比增加,流体在管道内流动加速距离延长,到出口后的加速压降增加。在实验段较长的时候,摩擦压降开始越来越明显作用于临界流,随着长径比增加,摩擦压降越大,实验段出口截面压力越低。焦耳-汤姆逊效应影响,压降越大伴随着的温降也越大,因此临界流相变更加剧烈,出口质量含气率也越低。

从图中可以看出,随着长径比增加,HRM模型与HRM模型之间含气率计算差异也越低。这是因为随着长径比增加,流体流动时间延长,相变发生后气液两相有更长时间进行热交换,因此实际的流体越接近热平衡状态。

图7为不同上游滞止压力的实验段出口含气率,随着上游滞止压力增加,出口含气率逐渐降低。这是因为当上游滞止压力增加,相同实验段内临界流压降更大,受焦耳-汤姆逊效应影响在相同温度下,流体温降更大,在喷管内将经历更加剧烈的相变,因此具有更低的出口质量含气率。

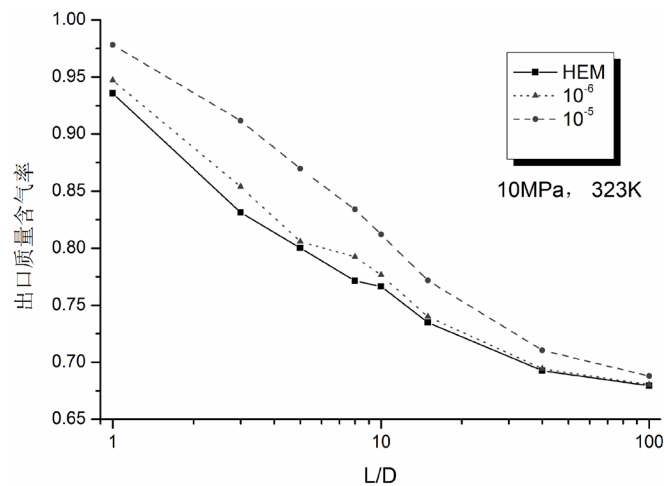


Figure 6. Effect of length to diameter on mass vapor ratio at test section outlet

图6. 实验段长径比对出口质量含气率影响

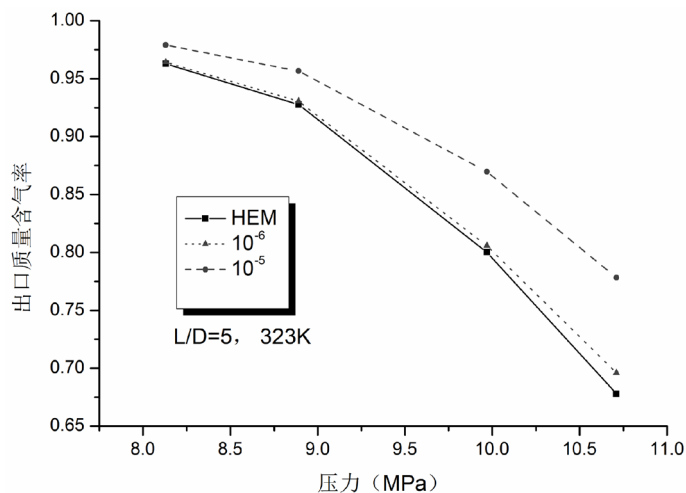


Figure 7. Effect of upstream pressure on mass vapor ratio at test section's outlet

图7. 上游滞止压力对出口含气率影响

4.3. 临界流管内流动过程

通过理论模型, 还得到了喷管内部二氧化碳压力和含气率的分布情况。如图 8 所示, 当流体进入长径比为 15 的圆形喷管时, 在喷管入口附近, 流体受到节流效应影响, 压力出现剧烈下降, 此时流体还处于临界压力以上, 并未出现相变。随着流体的进一步流动, 压力缓慢降低。在流动至距出口截面 4 mm 位置处, 流体含气率发生剧烈下降。临界流出现冷凝, 随着流动继续进行, 含气率和压力继续降低。在管道内, 流体经历了超临界态 - 气态 - 两相态三种状态的转变。

受到热不平衡现象导致的相变延迟影响, HRM 模型得到的相变点位置明显滞后于 HEM 模型得到的相变点位置, 相同位置的含气率也更高。

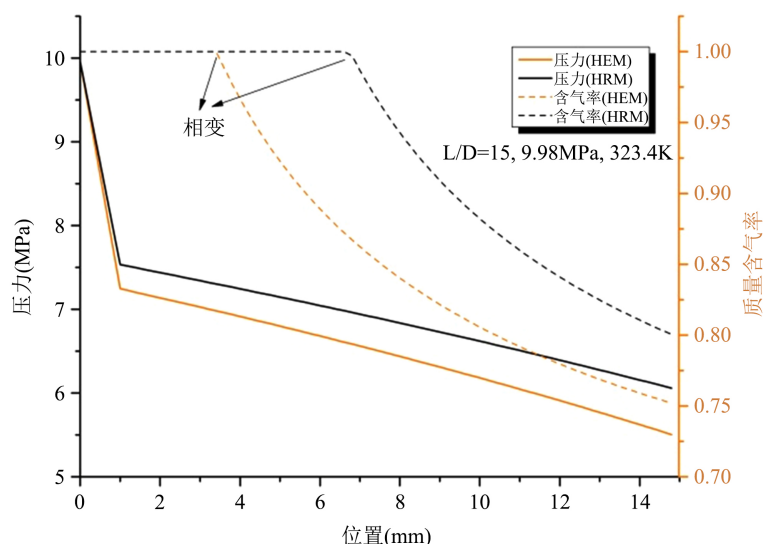


Figure 8. Pressure and mass vapor ratio distribution in test section
图 8. 实验段内压力与含气率分布

5. 结论

研究建立临界流喷放实验并建立了超临界二氧化碳临界流计算程序, 基于实验数据, HEM 模型和 HRM 模型的精度进行了评估, 同时对临界流流动特性进行了理论分析。结论如下:

- 1) 超临界二氧化碳临界流质量流量随上游滞止温度和长径比增加而减小, 随上游滞止压力增加而增加。
- 2) HEM 模型和 HRM 模型均能较好地计算超临界二氧化碳在喷管的泄露速率。其中 HRM 模型考虑到了两相流体热不平衡现象, 因此具有更高的计算精度。
- 3) 随着上游滞止温度升高, 临界流在出口的质量含气率随之升高, 管道内相变减弱, HRM 计算结果逐渐接近 HEM 模型。随着长径比增加, 流体相变程度加深, 但流体逐渐趋近于热平衡状态, HEM 模型与 HRM 模型计算差异降低。随着上游滞止压力增加, 临界流管内压降增加, 相变现象更加明显。
- 4) 热不平衡效应会显著影响管内临界流动, 管道内相同位置压力和含气率与 HEM 模型相比存在较为明显的差异。

致 谢

本论文的研究得到国家重点研发计划(NO.2018YFE0116100)的资助。

参考文献

- [1] Faletti, D.W. and Moulton, R.W. (1963) Two-Phase Critical Flow of Steam-Water Mixtures. *Aiche*, **9**, 247-253. <https://doi.org/10.1002/aic.690090222>
- [2] Isbin, H.S. (1980) Some Observations on the Status of Two-Phase Critical Flow Models. *Multiphase Flow*, **6**, 131-137. [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(80\)90043-9](https://doi.org/10.1016/0301-9322(80)90043-9)
- [3] Henry, R.E. and Fauske, H.F. (1971) The Two-Phase Critical Flow of One Component Mixtures in Nozzles, Orifices, and Short Pipes. *ASME Heat Transfer*, **93**, 179-187. <https://doi.org/10.1115/1.3449782>
- [4] Edlebeck, J. and Nellis, G.F. (2014) Measurement of the Flow of Supercritical Carbon Dioxide through Short Orifices. *Journal of Supercritical Fluids*, **88**, 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.01.008>
- [5] Alekseev, S.B., Bezlepkin, V.V., Svetlov, S.V. and Sidorov, V.G. (2010) Development of Choking Models for Computer Thermohydraulic Codes. *Atomic Energy*, **108**, 405-414. <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9309-9>
- [6] Brown, S., Martynov, S., Mahgerefteh, H., Chen, S. and Zhang, Y. (2014) Modelling the Non-Equilibrium Two-Phase Flow during Depressurization of CO₂ Pipelines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **30**, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.08.013>
- [7] Liu, J.P., Niu, Y.M., Chen, J.P., Chen, Z.J. and Feng, X. (2004) Experimentation and Correlation of R744 Two-Phase Flow through Short Tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **28**, 576-573. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2003.08.004>
- [8] Fan, X., Wang, Y.L., Zhou, Y., Chen, J.T., Huang, Y.P. and Wang, J.F. (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>