

Numerical Simulation of Supercritical CO₂ Critical Flow

Yuan Zhou¹, Zhaoyang Xia¹, Yangle Wang¹, Junfeng Wang²

¹Nuclear Engineering and Nuclear Technology, Sichuan University, Wangjiang Campus, Wangjiang Sichuan

²Nuclear power institute of China, Chengdu Sichuan

Email: zhouyuan1911@126.com

Received: Jul. 12th, 2017; accepted: Jul. 23rd, 2017; published: Jul. 26th, 2017

Abstract

The power conversion system using supercritical carbon dioxide is the frontier of the current international energy and power field. It is very important to analyze the critical flow of supercritical carbon dioxide. Based on FLUENT15.0, the critical flow of CO₂ under different aspect ratios and Stagnation parameters is numerically simulated. The numerical simulation results are compared with the experimental results of Wisconsin University, and the error range is between 15% and 25%, which validates the applicability of software simulation. The critical flow mechanism is discussed when the thermal parameters and phase changes of the pipeline are obtained when the critical flow occurs. The numerical simulation results provide support and reference for further experimental research and theoretical research.

Keywords

Supercritical CO₂, Critical Flow, FLUENT, Mass Flow Rate, L/D Ratio

超临界CO₂临界流数值模拟

周源¹, 夏兆阳¹, 汪杨乐¹, 王俊峰²

¹四川大学望江校区, 四川大学核工程与核技术, 四川 望江

²中国核动力研究设计院, 四川 成都

Email: zhouyuan1911@126.com

收稿日期: 2017年7月12日; 录用日期: 2017年7月23日; 发布日期: 2017年7月26日

摘要

采用超临界二氧化碳工质的动力转换系统是当前国际能源动力领域研究的前沿热点, 分析超临界二氧化

碳的临界流动对该系统安全分析十分重要。本文基于FLUENT15.0, 对不同长径比和滞止参数下的CO₂临界流动进行数值模拟, 数值模拟结果与美国威斯康星大学实验结果对比, 误差范围在15%到25%之间, 验证了软件模拟的适用性。通过获得临界流动发生时管道内热工参数和相态变化, 探讨了临界流动机理。数值模拟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, 临界流动, FLUENT, 质量流量, 长径比

Copyright © 2017 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

超临界流体指压力和温度都高于其临界点的流体。超临界二氧化碳因其合适的临界参数、稳定性和核物理性质受到关注, 加上其天然存在, 储量丰富, 易获取, 无毒等优势被认为是核能系统中最具应用前景的能量传输和能量转换工质之一。以超临界二氧化碳为工质的动力系统采用布雷顿热力循环, 特点是将压缩机入口温度控制在流体的拟临界温度附近, 使流体密度增大, 压缩性变好, 从而降低了压缩功耗, 提高了热力系统的净效率。利用二氧化碳布雷顿循环, 核反应堆的最佳出口温度在 450℃~650℃之间, 最佳堆芯进出口温差在 150℃~200℃之间, 远高于压水堆的设置温度[1]。超临界二氧化碳动力系统能获得更高的热效率, 缩小热力系统结构, 减小设备体积, 有效提高经济性。

然而对超临界二氧化碳动力转化系统来说, 高于传统动力装置的运行压力对系统密封材料制造和结构设计提出了更苛刻的要求, 增加了系统破口风险, 对安全性提出挑战。目前, 国内外对超临界二氧化碳的临界流动研究相对较少, 美国威斯康星大学 Guillaume P. Mignot 等人开展了超临界二氧化碳小破口喷放实验研究[2], 获得临界流动与长径比、滞止压力温度之间的影响关系, 但未对流动机理做深入探讨; 上海交通大学 J. P. Liu 等人基于空调冷却系统对短管 R744 (二氧化碳)两相临界流动进行研究[3], 得到管道沿程的压力和温度分布。

本文基于 FLUENT15.0 对超临界二氧化碳的临界流动进行数值模拟[4], 对比实验数据, 评估软件的适用性, 预测临界质量流量。研究了不同的热工参数条件下, 二氧化碳的压力、温度以及相态变化, 模拟得到微观的热工参数分布, 并探讨机理。数值模拟结果可以为具体实验和工程实施提供数据参考。

2. 数值方法

2.1. 几何结构

采用凸扩凸缩的管道模型, 如图 1 所示。流体从入口流入, 经过凸缩界面, 流入截面积不变的直管段, 最后从截面积突扩的出口段流出。

计算采用二维轴对称模型, 如图 2。设定管道的边界条件为压力入口和压力出口。为研究流体流动受管道不同几何结构的影响, 表 1 给出计算所用不同的管道尺寸。

为了研究不同热工参数下, 流体在管道内的流动情形, 表 2 给出不同长径比下上游滞止参数。出口压力设为 0.1 MPa, 温度为 300 K。

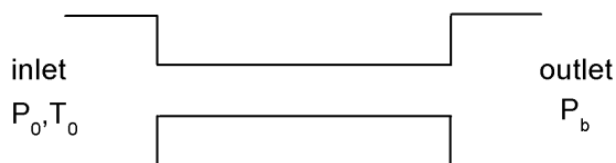


Figure 1. Sharp expansion and contraction pipe model
图 1. 凸扩凸缩管道模型

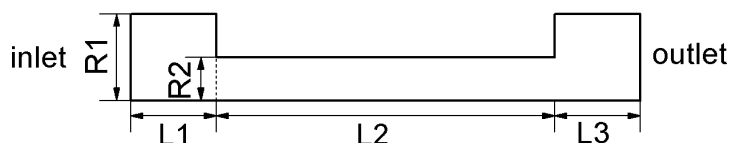


Figure 2. Two-dimensional axisymmetric model of pipeline
图 2. 管道二维轴对称模型

Table 1. Pipe geometry
表 1. 管道几何尺寸

长径比(L2/R2)	3.7	7.3	14.7	48
R1 (mm)	12.7	6.35	3.18	14
R2 (mm)	6.35	6.35	3.18	7
L1 (mm)	46.5	6	2	7
L2 (mm)	46.5	46.6	46.6	336
L3 (mm)	46.5	6	4	28
粗糙度(μm)	4.3	4.3	4.3	1.5

Table 2. Stagnation parameters of upstream of different pipelines
表 2. 不同管道的上游滞止参数

长径比	压力(MPa)	温度(K)
3.7	19.5	412.85
	19.2	536.85
7.3	19.5	411.15
	19.3	534.45
14.7	19.5	416.05
	19.2	531.75
	19.5	413.15
	19.2	533.15
48		343
		363
	10.1	378
		403

2.2. 相关模型

采用单相流动模型，计算方程包括连续性方程、动量方程和能量方程。管道中的流动工质为二氧化

碳, 二氧化碳的密度方程参照 Redlich-Kwong 真实气体方程(如公式 1)。湍流模型选择标准 k -epsilon 模型(如公式 2)和标准壁面模型。流体流动的计算使用 PISO 方法。空间梯度用单元最小二乘法离散, 压力用二阶插值法。动量和能量方程的对流项由高精度快速计算方法离散, 其他方程的对流项由一阶迎风格式的方法离散。公式 1 [5]中, a 、 b 分别为考虑到分子间的引力和分子固有体积引进的 R - K 物态方程中的修正参量; T_c 、 P_c 分别为气体的临界温度和临界压强; R 为气体普适恒量。

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{T^2 V_m (V_m + b)} \quad (1)$$

$$a = 0.4278 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$b = 0.0867 \frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

2.3. 网格划分及敏感性分析

网格敏感性测试选择长径比 3.7 (见表 1)的管道, 按照 6×66 , 10×111 , 20×222 , 40×444 , 80×888 的方法划分网格, 分别得到 330, 925, 3700, 14,800, 59,200 总网格数, 网格形状为正方形。

基准工况入口压力和温度设定为 19.2 MPa、536.85 K, 出口压力和温度为 0.1 MPa、300 K。不同网格划分方式的质量流密度计算结果如表 3。

网格数为 59,200 的计算质量流密度与实验相比误差最小, 其次是网格数为 14,800。综合考虑软件数据模拟的计算效率以及精确度, 选择 40×444 的划分方法, 最小网格尺寸约为 $0.32 \text{ mm} \times 0.32 \text{ mm}$ 。

3. 结果及分析

判断计算完成有三个条件: 1) 出入口质量流量不变, 保持稳定; 2) 出口质量流量与入口相同; 3) 物理变量的残差值至少达到收敛标准 10^{-3} 。

3.1. 管道参数变化与实验对比

上海交通大学 J. P. Liu 等人以 R744 (二氧化碳)工质作为空调制冷剂背景下开展相关实验, 研究 R744 在短管中流动状态, 并给出压力随管道轴向坐标变化。本文将对其实验进行建模计算, 对比管内的压力分布, 验证流动的软件模型合理性。

管道采用凸扩凸缩模型, 尺寸按照上海交通大学的实验设置, 见表 4。采用二维轴对称模型。管道边界条件设置见表 5。

Table 3. Grid sensitivity test results value

表 3. 网格敏感性测试结果数值

总网格数	质量流密度($\text{kg/s}\cdot\text{m}^{-2}$)		误差
	Fluent	实验	
330	36,489	31,800	14.7%
925	36,695	31,800	15.4%
3700	36,668	31,800	15.3%
14,800	36,259	31,800	14.0%
59,200	36,076	31,800	13.4%

管道内压力随轴向位置坐标变化的计算结果如图 3 曲线 2。其压力分布趋势可分为三部分，第一段为管道的入口段，压力迅速下降；第二段压力平缓下降；第三段为管道出口段，压力再次迅速下降。由于在试验段入口和出口处的实验数据点并没有特别多，不能详细得到直管道入口和凸扩段的压力数据分布的特点，并且在喷管进口处和出口处存在剧烈的膨胀，二氧化碳物性在很短的距离内发生了剧烈的变化，并且在管内发生相变[6] [7] [8] [9]，因此实验结果并不能精确地对比数值模拟。但最重要的变化趋势是一致的，这能说明软件模拟的正确性。

图 3 曲线 1 为压力 8.52 MPa，温度 309 K 时的实验结果，压力分布同样为三段，进口段压力迅速下降，中间段压力平缓下降，出口端迅速下降，计算和实验的压力变化趋势相同。

受到软件计算范围的影响，温度过低时的计算未成功，未得到温度为 309 K 的结果。考虑温度的影响，参考上海交通大学实验得到的结果(图 4)，随入口温度由 35.2℃ (309 K)向 45℃ (319 K)上升，直管段的压力逐渐下降。模拟结果在温度为 335 K 时直管段压力在 4.8 MPa 左右，实验得到在 309 K 温度下的压力在 6.0 MPa 附近，由图中压力分布随温度变化规律趋势预测，335 K 时直管段压力应低于 6.0 MPa，滞止温度 335 K 的模拟结果压力比实验的低符合压力随温度变化趋势。

由于实验数据点有限，不能观察到直管道入口和凸扩段的压力数据分布特点，计算结果不能得到很好的验证，但最重要的变化趋势是一致的，可说明模拟结果是合理的。

Table 4. Simulate the size of the pipeline of Shanghai Jiao Tong University

表 4. 模拟上交实验的管道尺寸

长径比	R1 (mm)	R2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)
9.6	2.72	1.36	1.36	13.056	5.44

Table 5. Pipe boundary conditions

表 5. 管道边界条件

边界	压力(MPa)	温度(K)
入口	8.52	335
出口	0.1	300

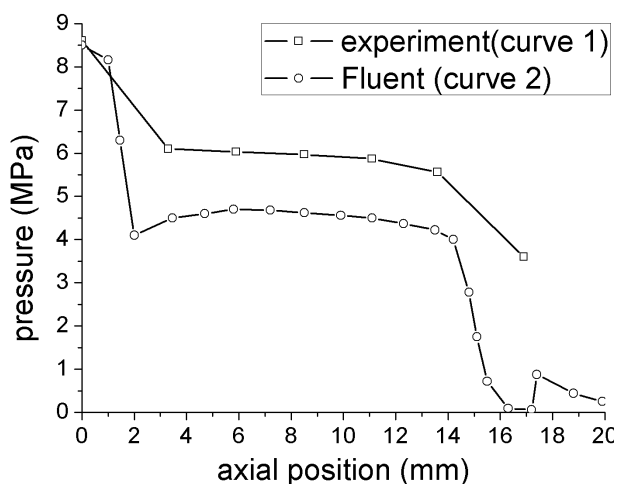


Figure 3. Pressure and position diagram

图 3. 压力随位置变化关系图

3.2. 参数影响

长径比和上游滞止参数是影响临界流动的主要参数，本文对不同长径比和滞止参数条件下临界流动进行计算，得到结果如表 6。

表 6 得到计算质量流密度与实验误差在 20% 以内。图 5 中，曲线 1、3 表示压力为 19.5 MPa，温度 413 K 时，计算质量流密度和实验质量流密度随长径比的变化；曲线 2、4 表示压力为 19.3 MPa，温度 534 K 时，计算质量流密度与实验质量流密度随长径比的变化。图 5 得到流体质量流密度随长径比的增加而减小。当长径比较短，质量流密度数值变化大；当长径比较长，质量流密度变化较小。在 L/D 较小时，模拟计算得到质量流密度随长径比的变化趋势与实验变化一致。

表 7 表示长径比为 48，相同压力不同温度下的计算结果。

表 7 得到计算质量流密度与实验的误差在 25% 以内。图 6 表示在长径比为 48，压力为 10.1 MPa 的条件下，质量流密度随温度的变化关系图。在 340 K 到 400 K 的温度范围内，质量流密度随着温度的增

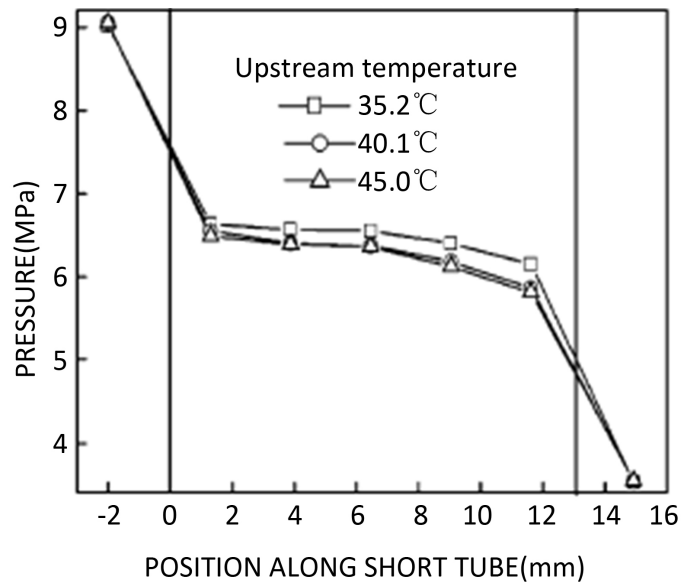


Figure 4. The relationship between pressure and inlet temperature [3]
图 4. 压力随入口温度变化关系图[3]

Table 6. Mass flow density calculation results

表 6. 质量流密度计算结果

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
长径比	3.7		7.3		14.7		48	
压力(MPa)	19.5	19.2	19.5	19.3	19.5	19.3	19.5	19.2
温度(K)	412.85	536.85	411.15	534.45	416.05	531.75	413.15	533.15
质量流率(kg/s)	24.9	18.57	1.52	1.14	0.36	0.27	1.75	1.30
面积(10^{-4} m^2)	5.07	5.07	0.317	0.317	0.079	0.079	0.385	0.385
Fluent 质量流密度($10^4 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$)	4.91	3.67	4.83	3.63	4.60	3.47	4.56	3.42
实验质量流密度($10^4 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$)	4.18	3.18	4.15	3.05	3.90	2.89		
误差	18%	15%	16%	19%	18%	20%		

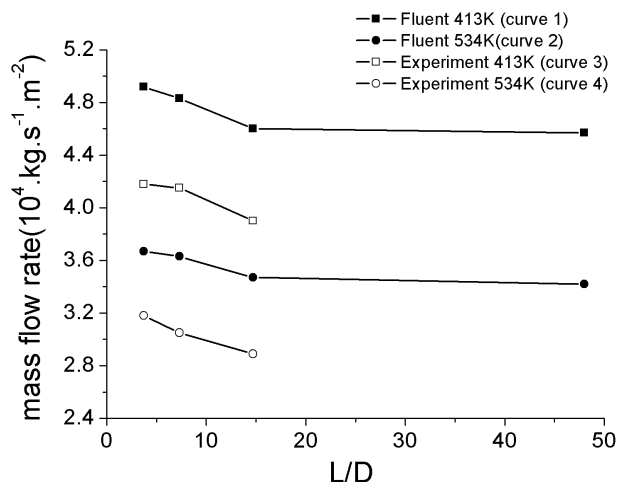


Figure 5. The change of mass flow density with aspect ratio

图 5. 质量流量密度随长径比的变化图

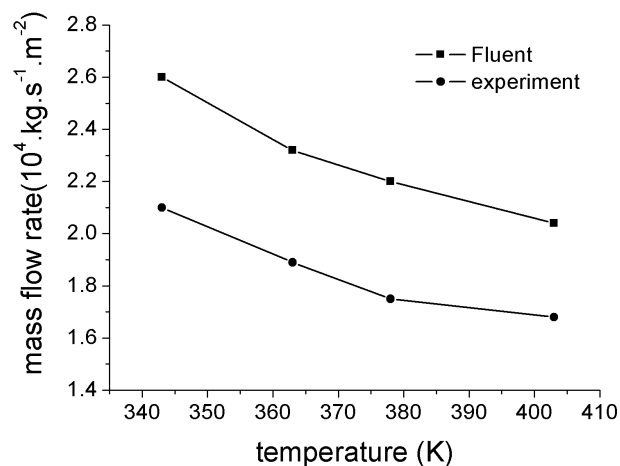


Figure 6. The change of mass flow density at different diameters of 48 at different temperatures

图 6. 长径比为 48 不同温度下的质量流密度变化图

Table 7. Length to diameter ratio of 48 different temperature mass flow density results

表 7. 长径比为 48 不同温度下质量流密度结果

编号	1	2	3	4
长径比		48		
压力(MPa)		10.1		
温度(K)	343	363	378	403
质量流率(Kg/s)	1.00	0.89	0.84	0.78
面积(10^{-5} m^2)	3.85	3.85	3.85	3.85
Fluent 质量流密度($10^4 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$)	2.60	2.32	2.20	2.04
实验质量流密度($10^4 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$)	2.10	1.89	1.75	1.68
误差	24%	23%	25%	22%

加而降低，计算与实验的变化趋势一致。随着温度的增加，流体密度下降，从而影响质量流密度下降，计算结果与理论相符。

4. 结论

基于 Fluent 15.0 模拟超临界二氧化碳临界流现象，从数值计算角度给临界流研究提供新的思路和参考。模拟结果与实验结果对比，定性上具有相同的压力分布规律以及出口流动形态，对于临界流密度的定量预测误差在 25% 以内，对比结果表明数值计算模型是合理的，计算得到的相关参数结果具有参考价值。

超临界二氧化碳临界流数值模拟结果表明质量流密度受到长径比和温度的影响，随着长径比的增加，质量流密度下降；随温度的上升，质量流密度下降。

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 (References)

- [1] 黄彦平, 王俊峰. 超临界二氧化碳在核反应堆中的应用[J]. 核动力工程, 2012, 33(3): 21-27.
- [2] Mignot, G., Anderson, M. and Corradini, M. (2009) Measurement of Supercritical CO₂ Critical Flow: Effect of L/D and Surface Roughness. *Nuclear Engineering and Design*, **239**, 949-955.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.10.031>
- [3] Liu, J.P., Niu, Y.M., Chen, J.P. 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>
- [4] 周俊波. FLUENT6.3 流场分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 1-315.
- [5] 赵汝顺, 王开明. Redlich-Kwong 实际气体转换温度的研究[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(4): 504-506.
- [6] 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.
- [7] 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): 622-626.
- [8] 杭立群. 两相临界流[J]. 核动力工程, 1982, 3(2): 36-41.
- [9] 苏光辉, 姜志军, 贾斗南. 直边入口直通通道临界流的理论研究[J]. 原子能科学技术, 1996, 30(yz): 346-350.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

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

期刊邮箱: nst@hanspub.org