

# Numerical Simulation on the Flow and Heat Transfer of Supercritical CO<sub>2</sub> in Sudden Expansion Pipe under Cooling Condition

Chao Wang<sup>1</sup>, Xinrong Zhang<sup>2\*</sup>, Hao Bai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing

<sup>2</sup>College of Engineering, Peking University, Beijing

Email: wangchaommbj@163.com, \*xrzhang@coe.pku.edu.cn

Received: Dec. 11<sup>th</sup>, 2015; accepted: Dec. 26<sup>th</sup>, 2015; published: Dec. 31<sup>st</sup>, 2015

Copyright © 2015 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

---

## Abstract

The flow and heat transfer law of supercritical CO<sub>2</sub> in sudden expansion duct has important meaning on efficient design of technology and devices of new energy conversion system and recycling of waste resources. In this paper, the numerical method is finite volume method. The flow and heat transfer law of supercritical CO<sub>2</sub> in sudden expansion duct under cooling condition is studied in this paper by using numerical method of finite volume method. It is founded that the flow situation of supercritical CO<sub>2</sub> in sudden expansion pipe under cool condition is the same as that of under heat condition in this study. Compared with the condition of heating, the bifurcation phenomenon is easier to appear under cooling. And with the increase of wall cooling heat flux, the length of recirculation regions becomes smaller. It is a comparison and supplement to the previous studies, and sheds some light on the application of the law of flow and heat transfer of supercritical CO<sub>2</sub> as working fluid material in sudden expansion duct.

## Keywords

Supercritical CO<sub>2</sub>, Sudden Expansion Pipe, Flow and Heat Transfer, Flow Bifurcation

---

\*通讯作者。

# 冷却条件下超临界CO<sub>2</sub>在突扩管中流动及其换热的数值模拟

王 超<sup>1</sup>, 张信荣<sup>2\*</sup>, 白 皓<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京

<sup>2</sup>北京大学工学院, 北京

Email: wangchaommbj@163.com, \*xrzhang@coe.pku.edu.cn

收稿日期: 2015年12月11日; 录用日期: 2015年12月26日; 发布日期: 2015年12月31日

## 摘 要

超临界流体在突扩管中的流动换热规律对于新型能源转换系统、废弃物资源化回收利用等工艺与装置的高效设计具有重要意义。本文通过有限体积法数值计算方法, 研究了超临界CO<sub>2</sub>在突扩冷却条件下的流动与传热规律。研究发现, 在冷却条件下超临界CO<sub>2</sub>在突扩管中流动规律与其在加热条件下的流动规律基本上是一致的。但与加热条件下流动换热规律比较, 冷却条件下超临界CO<sub>2</sub>流动更易失稳。且随着冷却热流密度增大, 回流区长度变小。这既是与前人研究的对比又是补充, 对超临界CO<sub>2</sub>作为工作流体材料在突扩管中流动换热规律的工程应用有一定的指导意义。

## 关键词

超临界CO<sub>2</sub>, 突扩管, 流动换热, 流动分叉

## 1. 引言

作为一种自然制冷工质, 二氧化碳具有很好的环保性能和流动传热特性。这可以从根本上解决制冷系统工质替代问题, 有希望成为汽车空调、热泵、商业制冷、民用商用空调系统的制冷工质[1]。超临界CO<sub>2</sub>是处于临界温度和临界压力以上的流体, 具有很强的溶解能力和良好的流动、输运性质。

突扩管是研究流动分离和再附着现象的经典模型之一。在突扩管流中, 当流动雷诺数高于临界雷诺数时, 发生流动分叉现象, 由对称稳态向不对称稳态转化。这已经得到了其他研究者的证实[2]-[5]。此前关于突扩管流的研究[6]-[9]很多, 但多限于研究流动特性, 关于换热特性方面的研究很少。Nie 和 Armaly [6]对突扩管在流动对称区, 即流动雷诺数在临界雷诺数以下, 进行了三维的数值模拟。对于同样的数值模型, Thiruvengadam 等[10]研究了高于临界雷诺数时的情形, 即流体在流动分岔后的稳态非对称流动时的流动和换热特性。上述研究对象都是常规流体, 流体的流动是按照恒热物性处理的。对于超临界流体, 流体物性变化所带来的流动和换热影响需要得到充分的考虑。Guo [11]等研究了热效应对气体在突扩管中流动时回流区的影响, 证明了回流区的大小会随着壁面加热强度的增加而减小, 并指出了由于加热引起的流向的反向压力梯度导致了回流区的缩小。邓[12]的论文研究了超临界CO<sub>2</sub>在平面突扩管中进行对流换热的数值模拟, 关注了流体的流动分叉现象、雷诺数低于临界值时的对称稳态区域中加热热流密度对超临界CO<sub>2</sub>换热的影响。

本文是在邓[12]的论文的基础上, 进行深一步的探究工作, 研究在冷却条件下, 超临界CO<sub>2</sub>在突扩

管中的流动换热情况。

## 2. 数值计算模型

### 2.1. 物理模型

数值模拟的物理模型和坐标系统如图 1 所示, 台阶高度  $S = 1 \text{ mm}$ 。前方入口段和后方的突扩段的管径分别为  $d$  和  $D$ , 定义突扩比为  $ER=D/d$ 。参照文献[13] [14], 入口段长度取  $L1 = 20 d$ , 这足以保证来流充分发展。选取突扩段长度  $L2 = 60 S$ 。上下壁面均匀冷却, 热流密度分别为  $-100$ 、 $-250$ 、 $-500 \text{ W/m}^2$  均匀热流边界条件, 采用零厚度无滑移壁面。

入口温度均匀分布, 入口初始温度  $T_0$  为  $313.2 \text{ K}$ 。

### 2.2. 数学模型

本文采用二维、层流、稳态模型计算连续方程、动量方程及能量方程。数学控制方程如下:  
连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial (\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = \nabla (\mu \nabla V) - \nabla P \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V h) = \nabla \left( \frac{k}{C_p} \nabla h \right) \quad (3)$$

在方程(3)中,  $h$  是焓值, 其定义如下:

$$h = \int_{T_0}^T C_p dT + h_0 \quad (4)$$

其中,  $h_0 = 344.42 \text{ kJ/kg}$ , 是参照温度  $T_0$  时的焓值。

### 2.3. 边界条件

实际流体流动过程中, 在突扩截面处入口速度为抛物型。考虑为不可压缩问题[15], 所以入口处采用速度入口; 压力出口。边壁为固定无滑移条件。

本文采用的数值方法是有限体积法。计算工况以及网格生成参照邓[12]的文献。采用 SIMPLEC 算法求解, 动量和能量方程采用二阶迎风格式离散化。采用非均匀网格划分。网格独立性验证方面借鉴文献[15]的经验, 此处不再验证; 网格数量也参照该文献, 取  $300(x) \times 60(y)$  的网格。流体的热物性是采用 REFPROP 数据库[16], 采用分段函数拟合, 吻合度高达 99%。

## 3. 计算结果与讨论

### 3.1. 流动雷诺数的影响

参考文献[15]可知, 浮升力效应在本文的研究中可以忽略不计。选择  $Re$  分别为 150、220、280、340、450 进行模拟计算。图 2 为冷却条件下发生流动分叉后的流线图。可以看出, 当  $Re > 150$  时, 在突扩处流动发生分离。这是因为在突扩处压力突然减小, 所以会形成上下两个回流区。

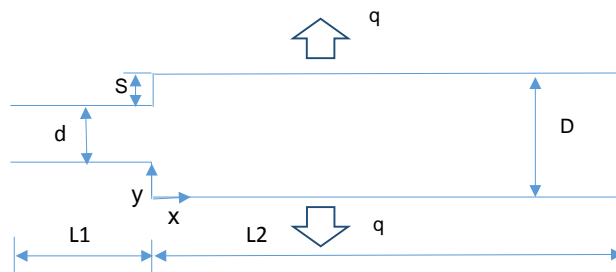


Figure 1. Physical model  
图 1. 物理模型

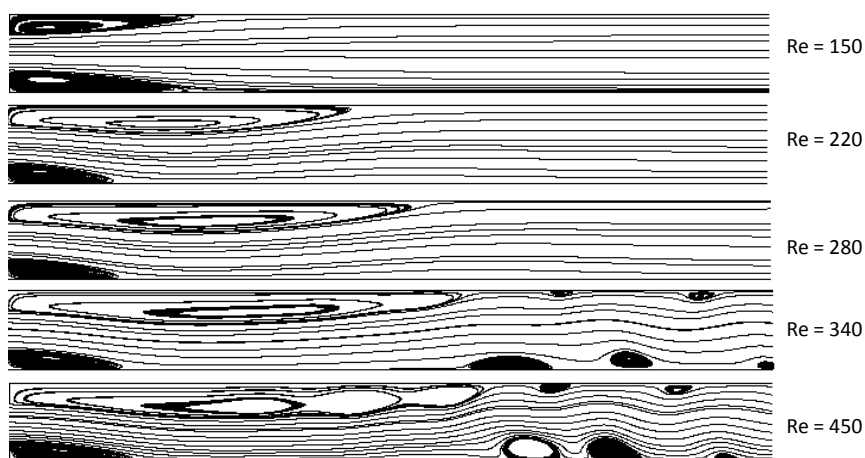


Figure 2. Streamline chart  $q = -100 \text{ W/m}^2$ ,  $ER = 2$   
图 2. 流线图  $q = -100 \text{ W/m}^2$ ,  $ER = 2$

入口雷诺数从一个较小值慢慢增大到一个较大值过程中, 存在一个临界雷诺数( $Re_{cr}$ ), 当流动雷诺数大于临界雷诺数时, 回流区由开始的上下对称, 发展到上下不对称, 即发生流动分离现象。雷诺数继续增大, 则大的回流区继续变大, 小的回流区继续变小。而当雷诺数高于某一个值时, 就会出现第三个回流区。这时的雷诺数称为转换雷诺数( $Re_{tr}$ )。从图 2 中可以发现, 在冷却条件下也符合上述规律。与图 3 显示的流动规律相比, 冷却条件下流动规律与加热时的规律基本是一致的。

由图 2 可知, 冷却条件下,  $Re_{cr}$  位于 150 附近,  $Re_{tr}$  则位于 280~340 之间。通过更多细致的模拟计算, 对  $Re$  在 150 附近取更多的数进行计算, 确定了上述两个雷诺数的准确值, 见表 1; 加热和不施加条件[15] 情况下的  $Re_{cr}$  和  $Re_{tr}$  也列于下表。

对表 1 中数据分析可知, 在相同的热流密度下, 冷却和加热时的临界雷诺数和转换雷诺数差异较大。在相同的条件下, 冷却时流动更易发生分叉。

### 3.2. 热流密度的影响

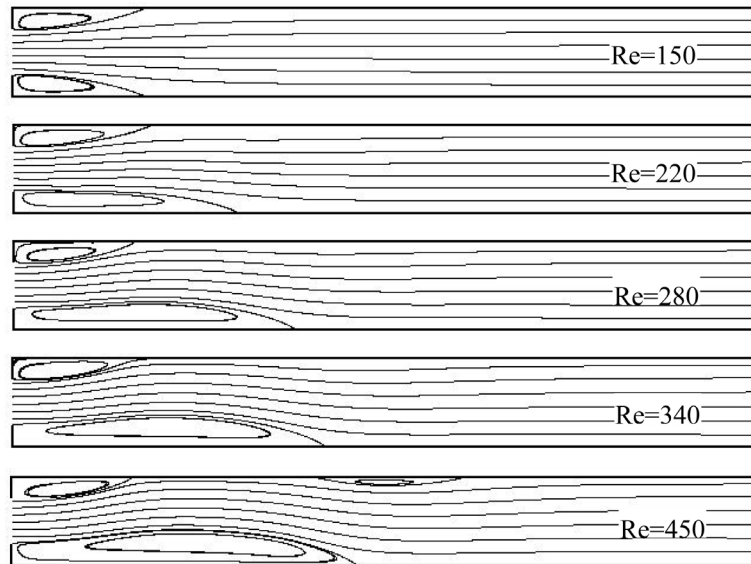
突扩管模型中, 回流区的大小是很重要的参数, 因为其决定了整个流场的特性, 相应的对流换热也与之交互影响。分离流体的再附着点距原点的距离定义为回流区的长度  $X_R$ 。图 4 给出了在冷却条件下无量纲的回流区长度( $X_R = X_r/S$ )在不同壁面热流条件下随雷诺数的变化。图 5 [15]则是加热情况的无量纲回流区长度随雷诺数的变化

对图 4 分析可知, 冷却条件下,  $Re$  一定时随着冷却热流密度的增大, 回流区长度减小。而图 5 显示的规律则与之相反, 随着加热热流密度的增大, 回流区长度也增大。

**Table 1.**  $Re_{cr}$  and  $Re_{tr}$  of supercritical  $CO_2$  in sudden expansion duct under different heat transfer conditions ( $ER = 2$ )

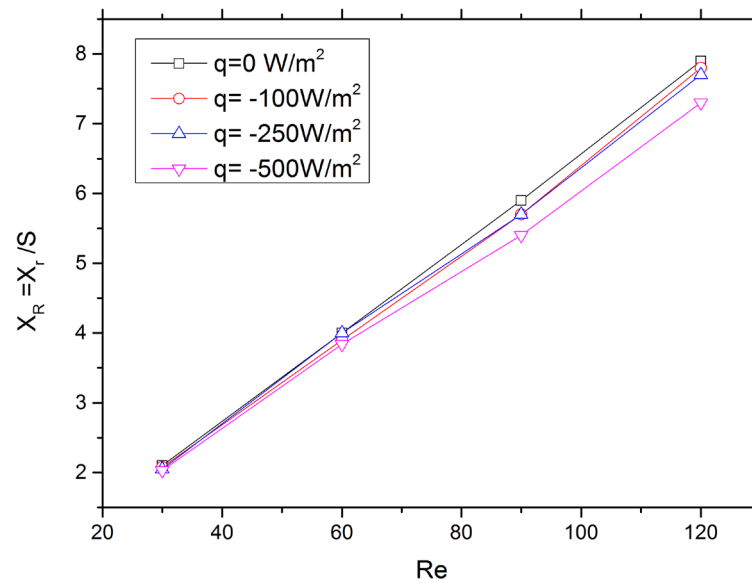
**表 1.** 不同换热条件下超临界  $CO_2$  在突扩管中的  $Re_{cr}$  和  $Re_{tr}$  ( $ER = 2$ )

换热条件	$Re_{cr}$	$Re_{tr}$
$q = 100 \text{ W/m}^2$	212.5	377
$q = 0$	216	383
$q = -100 \text{ W/m}^2$	133	320



**Figure 3.** Streamline chart  $q = 100 \text{ W/m}^2$ ,  $ER = 2$  [15]

**图 3.** 流线图  $q = 100 \text{ W/m}^2$ ,  $ER = 2$  [15]



**Figure 4.** Variation of reattachment length with Reynolds at different wall flux under cooling condition

**图 4.** 冷却条件下, 不同壁面热流下回旋区长度随雷诺数的变化

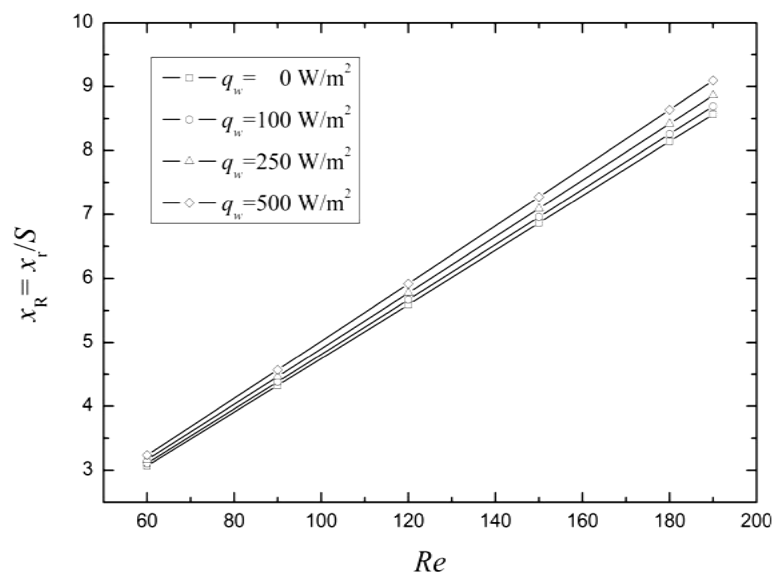


Figure 5. Variation of reattachment length with Reynolds at different wall flux under heating condition [15]

图 5. 加热条件下, 不同壁面热流下回流区大小随雷诺数的变化[15]

#### 4. 结论

本文研究了超临界  $\text{CO}_2$  在平面对称突扩管中, 在冷却条件下的流动换热。这是在前人研究的基础上的深入和验证, 得到以下结论:

1) 冷却条件下, 与超临界  $\text{CO}_2$  加热条件下的规律基本一致, 随着流动雷诺数的增大, 流动由对称发展为不对称, 进而出现第三个或者更多的回流区。这是对常规流体流动规律和超临界  $\text{CO}_2$  加热条件下流动规律的补充。

2) 在冷却条件下超临界  $\text{CO}_2$  的流动情况, 和在加热条件下对应的情况比较, 临界雷诺数和转换雷诺数都明显减小。这意味着在冷却条件下超临界  $\text{CO}_2$  流动更易失稳, 易发生流动分叉。

3) 在冷却条件下, 随着冷却热流密度的增大, 回流区长度减小。

#### 致 谢

感谢国家自然科学基金项目(项目号: 51476001)的支持。

#### 参考文献 (References)

- [1] 董其武, 赵松伟, 刘敏. 超临界二氧化碳管内流动及其换热特性分析研究[J]. 制冷与空调, 2008, 22(1): 1-5.
- [2] Durst, F., Melling, A. and Whitelaw, J.H. (1974) Low Reynolds Number Flow over a Plane Symmetric Sudden Expansion. *Journal of Fluid Mechanics*, **64**, 111-128. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112074002035>
- [3] Cherdron, W., Durst, F. and Whitelaw, J.H. (1978) Asymmetric Flows and Instabilities in Symmetric Ducts with Sudden Expansions. *Journal of Fluid Mechanics*, **84**, 13-31. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112078000026>
- [4] Durst, F., Pereira, J.C.F. and Tropea, C. (1993) The Plane Symmetric Sudden-Expansion Flow at Low Reynolds Numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, **248**, 567-581. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112093000916>
- [5] Fearn, R.M., Mullin, T. and Cliffe, K.A. (1990) Nonlinear Flow Phenomena in a Symmetric Sudden Expansion. *Journal of Fluid Mechanics*, **211**, 595-608. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112090001707>
- [6] Shapira, M., Degani, D. and Weihs, D. (1990) Stability and Existence of Multiple Solutions for Viscous Flow in Suddenly Enlarged Channel. *Computers & Fluids*, **18**, 239-258. [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7930\(90\)90009-M](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7930(90)90009-M)
- [7] Battaglia, F., Travener, S.J., Kulkarni, A.K. and Merkle, C.L. (1997) Bifurcation of Low Reynolds Number Flows in

- Symmetric Channels. *AIAA Journal*, **35**, 99-105. <http://dx.doi.org/10.2514/2.68>
- [8] Hawa, T. and Rusak, Z. (2000) Viscous Flow in a Slightly Asymmetric Channel with a Sudden Expansion. *Physics of Fluids*, **12**, 2257-2267. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1287610>
- [9] Nie, J.H. and Armaly, B.F. (2004) Three-Dimensional Forced Convection in Plane Symmetric Sudden Expansion. *ASME Journal of Heat Transfer*, **126**, 836-839. <http://dx.doi.org/10.1115/1.1795242>
- [10] Thiruvengadam, M., Nie, J.H. and Armaly, B.F. (2005) Bifurcated Three-Dimensional Forced Convection in Plane Symmetric Sudden Expansion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **48**, 3128-3139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.02.019>
- [11] Guo, Z.Y., Li, D.Y. and Liang, X.G. (1996) Thermal Effect on the Recirculation Zone in Sudden-Expansion Gas Flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **39**, 2619-2624. [http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00371-1](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(95)00371-1)
- [12] Zhang, X.R., Deng, B.-L. and Yamaguchi, H. (2010) Bifurcation Phenomenon for Forced Convection of Supercritical CO<sub>2</sub> Sudden Expansion Flow and Heat Transfer in Symmetric Regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **53**, 4467-4473. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.06.047>
- [13] 赵海燕, 贾雪松, 等. 突扩管分离流场的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(17): 5238-5239.
- [14] 周再东, 魏长柱, 孙明艳, 刘帅. 突扩管流动形态的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(30): 7983-7985.
- [15] 邓毕力. 超临界二氧化碳密闭回路自然对流循环研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京大学, 2012.
- [16] Lemmon, E.W., Huber, M.L. and McLinden, M.O. (2007) NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties—REFPROP. NIST Standard Reference Database 23, Version 8.0.