

# 超临界态二氧化碳直通式梳齿密封数值研究

王伟光<sup>1</sup>, 周源<sup>1\*</sup>, 黄彦平<sup>2</sup>, 曾成天<sup>1</sup>

<sup>1</sup>四川大学物理学院辐射物理及技术教育部重点实验室, 四川 成都

<sup>2</sup>中国核动力研究设计院, 四川 成都

收稿日期: 2022年6月7日; 录用日期: 2022年7月11日; 发布日期: 2022年7月18日

## 摘要

超临界态二氧化碳(Supercritical carbon dioxide, sCO<sub>2</sub>)梳齿密封技术是一项关系到sCO<sub>2</sub>先进动力系统中旋转机械运行高效、稳定的关键技术。为研究sCO<sub>2</sub>工质在梳齿密封内的流动特性, 本文使用Fluent对实验中的梳齿密封进行了数值模拟, 实验工况涵盖CO<sub>2</sub>的气相以及超临界相, 共计18组。利用实验数据评价了不同湍流模型对计算的影响, 分析了数值计算得到的密封内的流场分布以及能量转化过程。结果表明: 本文提出的数值模型可以模拟sCO<sub>2</sub>工质在梳齿密封中的流动过程, 在所研究的三种湍流模型中RNG k-ε模型的计算结果与实验数据吻合最好, 其最大误差约为21.71%, 平均误差约为7.43%。

## 关键词

超临界态二氧化碳, 直通式梳齿密封, 数值计算

# Numerical Study of the Supercritical CO<sub>2</sub> See-Through Labyrinth Seal

Weiguang Wang<sup>1</sup>, Yuan Zhou<sup>1\*</sup>, Yanping Huang<sup>2</sup>, Chengtian Zeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Radiation Physics and Technology Ministry of Education, College of Physics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 7<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jul. 11<sup>th</sup>, 2022; published: Jul. 18<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The supercritical carbon dioxide (sCO<sub>2</sub>) labyrinth sealing technology is a critical technology related to the efficient and stable operation of rotating machinery in the sCO<sub>2</sub> advanced power sys-

\*通讯作者。

文章引用: 王伟光, 周源, 黄彦平, 曾成天. 超临界态二氧化碳直通式梳齿密封数值研究[J]. 应用物理, 2022, 12(7): 431-438. DOI: 10.12677/app.2022.127050

tem. In order to study the flow characteristics of  $s\text{CO}_2$  in the see-through labyrinth seal, Fluent was used in this paper to simulate seals in the experiment. The experimental operating conditions include the supercritical to the gas phase of  $\text{CO}_2$ , totaling 18 sets. The influence of different turbulence models on the calculation was evaluated by the experimental data, and then the flow field and energy conversion process in the seal were analyzed. The results show that the numerical model in this paper is capable of simulating the flow process of  $s\text{CO}_2$  through the seal. Among the three turbulence models studied, the results of the RNG  $k-\varepsilon$  model agree best with the experimental data, with a maximum error of about 21.71% and an average error of about 7.43%.

## Keywords

Supercritical Carbon Dioxide, See-Through Labyrinth Seal, Numerical Calculation

Copyright © 2022 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

$s\text{CO}_2$  布雷顿循环以其布局简单、结构紧凑、尺寸小、功率高等优点，很有希望成为替代传统蒸汽朗肯循环的新一代功率转换循环[1] [2]。然而，由于  $s\text{CO}_2$  的密度高、粘性小且系统中的压缩机和涡轮等的叶片在具有小尺寸的同时还具有高转速，为使这些旋转机械能够稳定、高效地运行，泄漏控制就成了一个十分重要且新颖的问题[3] [4]。针对这一问题，Fuller 等人建议了两种密封形式：迷宫密封和干气密封[5]。

迷宫密封或者梳齿密封，是一种广泛用于各类涡轮机械的密封形式。相较于干气密封，这种密封形式具有结构简单，易于与系统集成等优点[3]。关于以  $s\text{CO}_2$  为工质的梳齿密封研究，目前尚不是很多。Sandia 国家实验室[3] [4]、韩国能源研究所[6]以及 Bechtel 船用推进公司[7]等报道了梳齿密封在  $s\text{CO}_2$  动力装置中的一些使用情况，并指出这一密封形式仍有改进的空间。Haomin Yuan 等人[8]设计实验并结合 OpenFOAM 研究了以  $s\text{CO}_2$  为工质的直通式密封齿的泄漏特性。结果表明：减小间隙或增大腔长都能减小密封泄漏量；齿高的影响则是非线性的，存在最佳值。Min Seok Kim 等人[9]研究了简单迷宫喷管的泄漏特性，开展了相关的实验工作并提出了一个等熵  $\text{CO}_2$  临界流模型。模型和实验结果表明：增加间隙和减小腔长都会导致泄漏增加，并且在保持总长不变的情况下，存在一个最佳齿数使得密封泄漏量最小。Yang 等人[10]使用 Numeca 研究了具有直角梯形齿的梳齿密封的向心透平其泄漏特性与轴向力的变化。结果显示：减小间隙与增加齿数会减小泄漏；增加齿的高度，泄漏量会减小并最终阻塞。Yang 等人最后还比较了三角形、等腰梯形、直角梯形以及矩形空腔的密封的性能，结论为：空腔形状为等腰梯形的密封性能最好。

可以看到，目前对于  $s\text{CO}_2$  梳齿密封的研究还不是很多，还缺乏很多实验与数值计算工作，目前对于密封内流场结构的认识也不够充分，对  $s\text{CO}_2$  梳齿密封的泄漏特性与内在机制的认知还不够明确。因此，研究以超临界态二氧化碳为工质的梳齿密封是十分有必要的。

本文使用 Fluent 19.0 对实际实验中使用的直通式梳齿密封进行了数值模拟。研究了不同湍流模型对数值计算结果的影响，确定了研究  $s\text{CO}_2$  直通式密封的数值模型。本文的工作可以为  $s\text{CO}_2$  梳齿密封的机理研究以及设计优化等工作提供工具和数据支持。

## 2. 几何模型与计算工况

以直通式密封作为研究对象，建立二维数值分析模型；计算了实验中使用的六个具有不同结构参数的密封。其模型几何结构示意图如图 1 所示，计算中所有密封的齿数均为 5 个，在密封齿上下游分别设置了一定长度的流体域以减小数值边界对计算结果的影响。表 1 给出了作为研究对象的不同密封齿的结构参数以及热工参数。

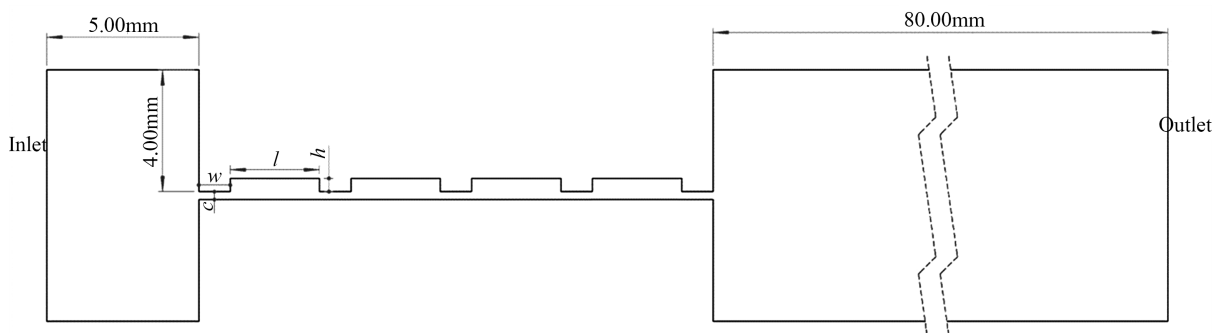


Figure 1. Schematic diagram of the see-through labyrinth seal

图 1. 直通式密封几何结构示意图

Table 1. Geometry parameters and thermodynamic parameters

表 1. 几何参数与热工参数

梳齿编号	几何参数(单位: mm)				热工参数			
	齿宽( $w$ )	齿高( $h$ )	腔长( $l$ )	径向间隙( $c$ )	进口		出口	
					压力(MPa)	温度(K)	压力(MPa)	温度(K)
一号	1.0347	0.4391	2.9362	0.2588	8.3	379.05	7.02	355.25
					8.3	349.55	6.91	334.25
					8.3	318.65	7.44	311.65
					8.3	316.65	6.22	299.85
					8.3	317.35	5.17	293.05
					7.5	317.85	5.74	304.75
					10.8	319.15	7.87	307.45
					14.06	321.05	12.7	318.95
二号	1.0339	0.4840	2.9659	0.3868	8.3	318.05	7.05	307.85
					8.3	317.05	7.6	311.65
三号	1.0257	0.1763	2.9802	0.2396	8.3	319.45	7.46	313.55
					8.3	317.35	6.51	304.55
四号	1.0099	0.7564	2.9903	0.2392	8.3	318.75	7.46	313.15
					8.3	319.75	5.96	302.15
五号	1.0136	0.4821	0.9827	0.2409	8.3	317.85	7.52	312.55
					8.3	317.55	6.34	303.45
六号	1.0336	0.4934	1.9400	0.2449	8.3	316.05	7.34	310.15
					8.3	317.25	6.09	301.45

### 3. 数值模型

计算对象为上文所示密封的稳态流动，进出口使用压力边界条件，壁面为绝热无滑移壁面。

使用 Aungier Redlich-Kwong 方程模拟真实的二氧化碳物性，该方程对临界点附近的蒸汽和超临界流体的预测进行了改进，是一个四参数方程，需要提供临界压力、临界温度、偏心因子以及临界比体积。判断收敛的依据为连续性残差小于  $10^{-3}$ ，其余残差小于  $10^{-5}$ ，且需进口质量流量随步长推进逐渐稳定。本文使用质量流速来表示密封的泄漏量。

#### 3.1. 网格敏感性

使用结构化网格。网格敏感性分析时使用 Standard k- $\epsilon$  模型。图 2 给出了二号密封件在第二个工况下的网格敏感性。综合考虑，本文后续研究使用的网格单元总数约为 70 万。最终网格示意图如图 3。

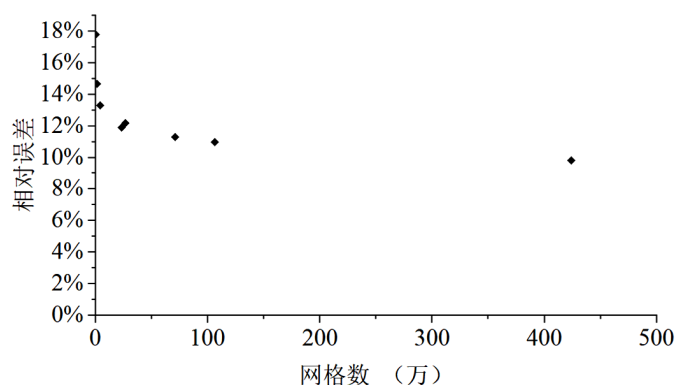


Figure 2. Grid sensitivity analysis

图 2. 网格敏感性

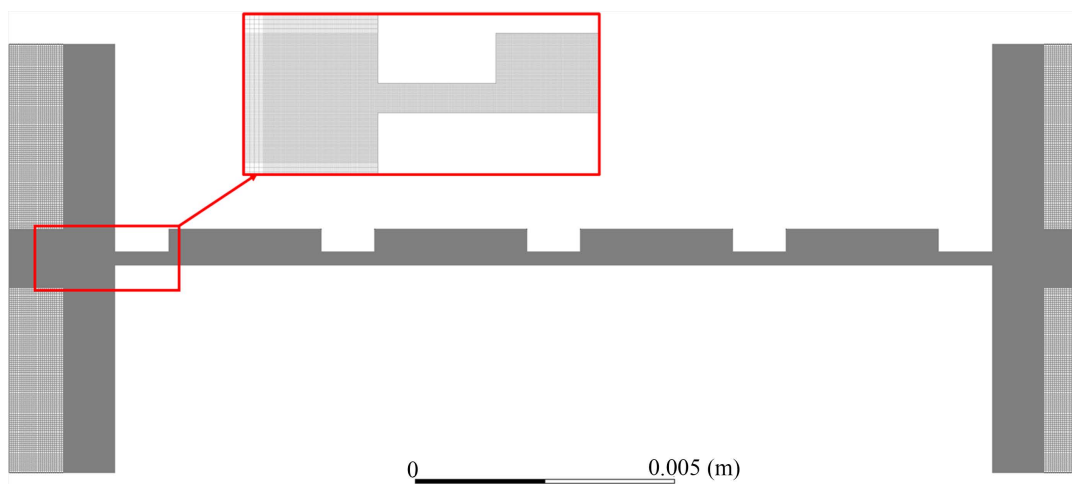
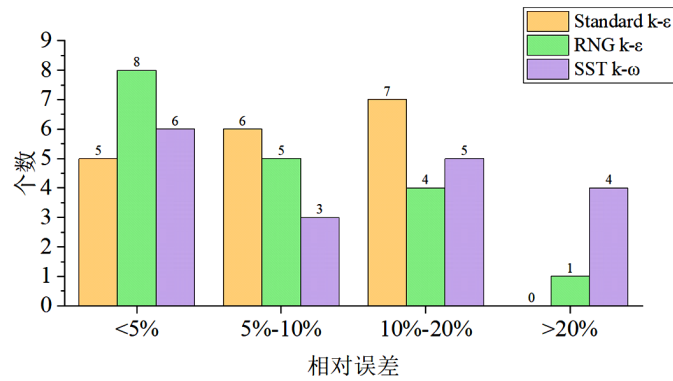


Figure 3. Computational mesh of seal 1 (0.75 million)

图 3. 一号梳齿件网格(75 万)

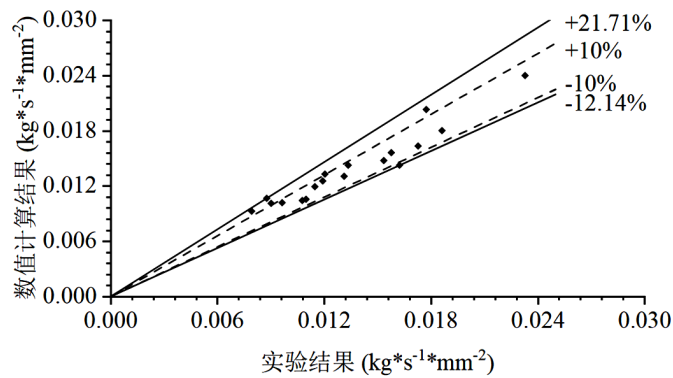
#### 3.2. 湍流模型的影响

本文比较了三种湍流模型对数值计算结果的影响，分别为：Standard k- $\epsilon$  湍流模型、RNG k- $\epsilon$  湍流模型以及 SST k- $\omega$  湍流模型。图 4 给出了三种湍流模型计算结果与实验结果误差的分布情况。



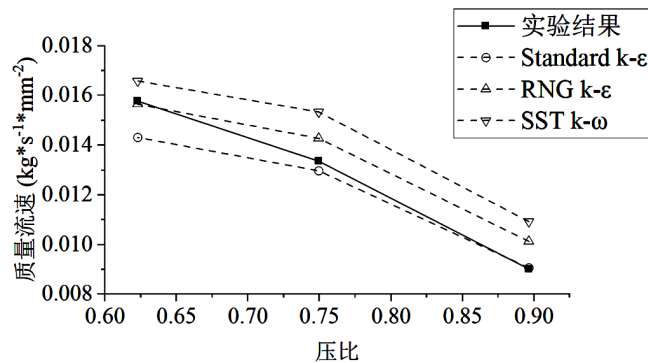
**Figure 4.** Errors of different turbulence model  
**图 4.** 不同湍流模型误差分布

可以看到 RNG k-ε 模型误差分布相较于其他模型表现较好。图 5 给出了该模型与实验结果的比对结果。



**Figure 5.** Results of RNG k-ε model and experiment  
**图 5.** RNG k-ε 模型计算结果与实验值

在计算中发现，对于同样的工况，Standard k-ε 模型的计算结果较 RNG k-ε 模型总是小 0.2~0.3 kg/s，相对应的 SST k-ω 模型的计算结果相较 RNG k-ε 模型总是高 0.2~0.3 kg/s。图 6 给出了表 1 中一号密封件第三到五个工况不同湍流模型对计算结果的影响。结合上述因素，后续数值计算湍流模型选择使用 RNG k-ε 模型。



**Figure 6.** Results of different turbulence model  
**图 6.** 不同湍流模型的计算结果

## 4. 计算结果

### 4.1. 泄漏量计算结果

模型计算结果如图 5 所示。表 2 给出了各组工况的实验与数值计算的具体数值。模型的最大误差约为 21.71%，平均误差约为 7.43%。

Table 2. Calculation results of numerical works

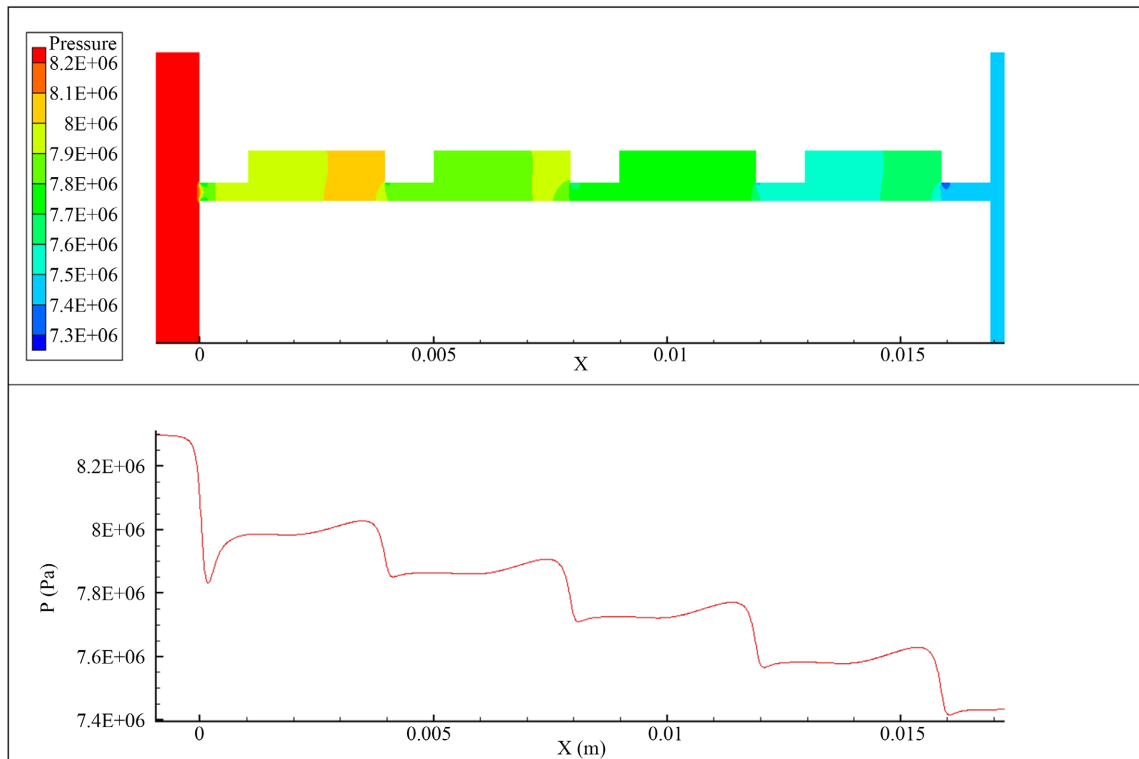
表 2. 数值计算结果

梳齿编号	热工参数				质量流速 kg/(s*mm <sup>2</sup> )		
	进口		出口		实验	数值计算	误差
	压力(MPa)	温度(K)	压力(MPa)	温度(K)			
一号	8.3	379.05	7.02	355.25	0.007928	0.009281	17.07%
	8.3	349.55	6.91	334.25	0.008762	0.010665	21.71%
	8.3	318.65	7.44	311.65	0.009013	0.010124	12.33%
	8.3	316.65	6.22	299.85	0.013352	0.01427	6.87%
	8.3	317.35	5.17	293.05	0.015772	0.015649	0.78%
	7.5	317.85	5.74	304.75	0.011474	0.01194	4.06%
	10.8	319.15	7.87	307.45	0.023282	0.024003	3.10%
	14.06	321.05	12.7	318.95	0.017733	0.020332	14.66%
二号	8.3	318.05	7.05	307.85	0.013119	0.013082	0.29%
	8.3	317.05	7.6	311.65	0.010767	0.010446	2.97%
三号	8.3	319.45	7.46	313.55	0.010971	0.010568	3.68%
	8.3	317.35	6.51	304.55	0.016231	0.014262	12.14%
四号	8.3	318.75	7.46	313.15	0.009643	0.010201	5.78%
	8.3	319.75	5.96	302.15	0.015339	0.014774	3.68%
五号	8.3	317.85	7.52	312.55	0.012045	0.0133	10.42%
	8.3	317.55	6.34	303.45	0.018623	0.018016	3.26%
六号	8.3	316.05	7.34	310.15	0.011909	0.012568	5.53%
	8.3	317.25	6.09	301.45	0.017271	0.016341	5.38%

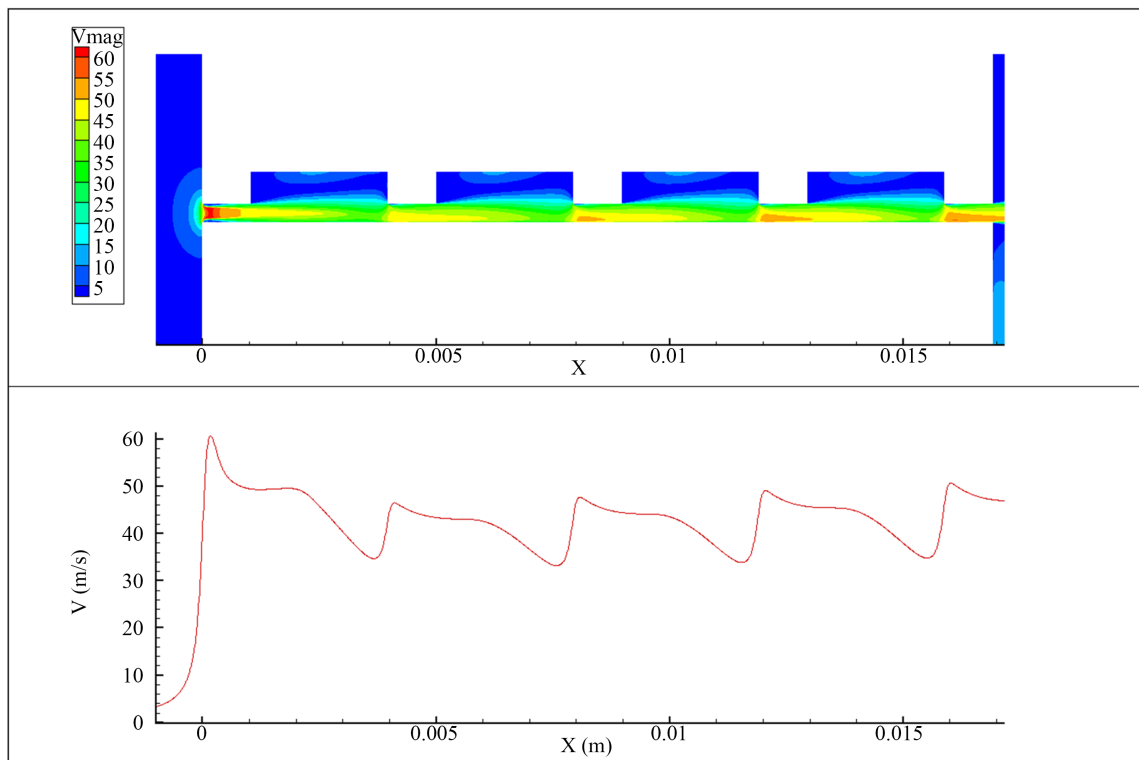
### 4.2. 密封流场分析

图 7 给出了密封 1 在第三个工况下的压力分布以及压力沿密封间隙中线的变化情况。图 8 则是相对应的速度分布以及速度沿密封间隙中线的变化情况。

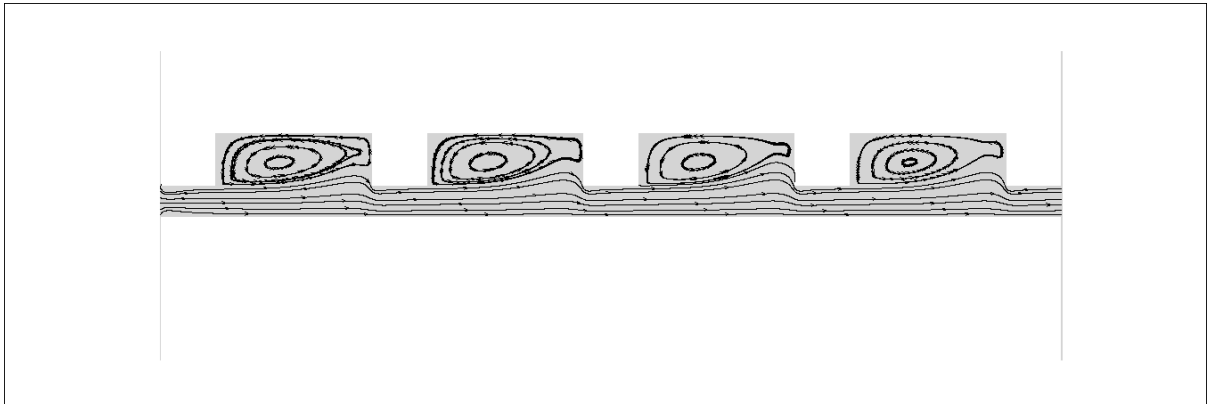
结合图 7 和图 8 可以发现：流体进入密封后，首先在齿顶处发生节流作用，压力能转化为动能，此时流体速度增加，压力减小。流体进入空腔后，在漩涡的作用下，动能被耗散掉转化为内能，此时速度下降。图中还可以观察到：对于直通式密封，流体经过密封齿后会形成射流并以一定的速度进入下一个密封齿，流体动能并不会在空腔内被全部耗散掉。这一现象也被称为动能携带效应。图 9 给出了密封内的流线图，从该图中可以观察到密封内的涡动耗散的过程。



**Figure 7.** Pressure field of seal 1 ( $P_{in} = 8.3 \text{ MPa}$ ,  $P_{out} = 7.44 \text{ MPa}$ ,  $T_{in} = 318.65 \text{ K}$ )  
**图 7.** 密封 1 的压力分布( $P_{in} = 8.3 \text{ MPa}$ ,  $P_{out} = 7.44 \text{ MPa}$ ,  $T_{in} = 318.65 \text{ K}$ )



**Figure 8.** Velocity field of seal 1 ( $P_{in} = 8.3 \text{ MPa}$ ,  $P_{out} = 7.44 \text{ MPa}$ ,  $T_{in} = 318.65 \text{ K}$ )  
**图 8.** 密封 1 的速度分布( $P_{in} = 8.3 \text{ MPa}$ ,  $P_{out} = 7.44 \text{ MPa}$ ,  $T_{in} = 318.65 \text{ K}$ )



**Figure 9.** Stream line plot of seal 1 ( $P_{in} = 8.3$  MPa,  $P_{out} = 7.44$  MPa,  $T_{in} = 318.65$  K)

**图 9.** 密封 1 的流线( $P_{in} = 8.3$  MPa,  $P_{out} = 7.44$  MPa,  $T_{in} = 318.65$  K)

## 5. 总结

本文利用 Fluent 对以超临界二氧化碳为工质的直通式迷宫密封实验进行了数值模拟, 利用实验数据比较了不同湍流模型对数值计算的影响, 建立了适用于  $s\text{CO}_2$  直通式迷宫密封的数值计算模型, 分析了梳齿密封内部的流动情况。结果表明:

- 1) RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型在三种湍流模型中表现最好, 其最大误差为 21.71%, 平均误差约为 7.43%;
- 2) 超临界流体进入密封后, 首先在齿顶处发生节流作用, 压力能转化为动能, 此时流体速度增加, 压力减小, 当流体进入空腔后, 在旋涡的作用下, 动能被耗散掉转化为内能, 表现为速度下降;
- 3) 对于直通式梳齿密封, 存在比较明显的动能携带效应。

## 参考文献

- [1] Dostal, V., Hejzlar, P. and Driscoll, M.J. (2006) The Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle: Comparison to Other Advanced Power Cycles. *Nuclear Technology*, **154**, 283-301. <https://doi.org/10.13182/NT06-A3734>
- [2] Dostal, V., Hejzlar, P. and Driscoll, M.J. (2006) High-Performance Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next-Generation Nuclear Reactors. *Nuclear Technology*, **154**, 265-282. <https://doi.org/10.13182/NT154-265>
- [3] Conboy, T. (2012) An Approach to Turbomachinery for Supercritical Brayton Space Power Cycles. *Proceedings of Nuclear and Emerging Technologies for Space 2013*, Albuquerque, NM, 25-28 February 2013, 124-131.
- [4] Iverson, B.D., Conboy, T.M., Pasch, J.J. and Kruizenga, A.M. (2013) Supercritical  $\text{CO}_2$  Brayton Cycles for Solar-Thermal Energy. *Applied Energy*, **111**, 957-970. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.020>
- [5] Fuller, R., Preuss, J. and Noall, J. (2012) Turbomachinery for Supercritical  $\text{CO}_2$  Power Cycles. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, Copenhagen, 11-15 June 2012, 961-966. <https://doi.org/10.1115/GT2012-68735>
- [6] Cho, J., et al. (2016) Development of the Turbomachinery for the Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle. *International Journal of Energy Research*, **40**, 587-599. <https://doi.org/10.1002/er.3453>
- [7] Clementoni, E.M., Cox, T.L. and King, M.A. (2016) Off-Nominal Component Performance in a Supercritical Carbon Dioxide Brayton Cycle. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **138**, Article ID: 011703. <https://doi.org/10.1115/1.4031182>
- [8] Yuan, H., Pidaparti, S., Wolf, M., Edlebeck, J. and Anderson, M. (2015) Numerical Modeling of Supercritical Carbon Dioxide Flow in See-Through Labyrinth Seals. *Nuclear Engineering and Design*, **293**, 436-446. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.08.016>
- [9] Kim, M.S., Bae, S.J., Son, S., Oh, B.S. and Lee, J.I. (2019) Study of Critical Flow for Supercritical  $\text{CO}_2$  Seal. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **138**, 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.040>
- [10] Yang, J., Zhao, F., Zhang, M., Liu, Y. and Wang, X. (2021) Numerical Analysis of Labyrinth Seal Performance for the Impeller Backface Cavity of a Supercritical  $\text{CO}_2$  Radial Inflow Turbine. *CMES—Computer Modeling in Engineering and Sciences*, **126**, 935-953. <https://doi.org/10.32604/cmcs.2021.014176>