

超临界态二氧化碳梳齿密封泄漏特性数值研究

王伟光¹, 曾成天¹, 周源^{1*}, 黄彦平²

¹四川大学物理学院, 四川 成都

²中国核动力研究设计院, 四川 成都

收稿日期: 2023年4月17日; 录用日期: 2023年7月21日; 发布日期: 2023年7月28日

摘要

密封技术是一项关系到超临界二氧化碳(Supercritical carbon dioxide, S-CO₂)核动力系统中旋转机械能否高效、安全、可靠运行的关键技术。为尽可能地减小密封泄漏, 使用数值计算的手段研究了超临界二氧化碳直通式梳齿密封的泄漏特性。首先, 对密封的泄漏量进行无量纲化以便后续描述密封的泄漏特性。随后, 研究了密封上下游滞止工况以及密封几何参数对密封泄漏的影响。计算结果显示: 温度及压力等热力学参数对密封的无量纲泄漏量影响较小; 减小密封间隙, 增加密封腔长, 减小密封齿宽均会改善密封泄漏性能; 齿高对密封泄漏的影响是非线性的, 存在最优值, 该最优值在齿高比腔长约为0.13时出现; 增加齿数同样可以减小密封泄漏量, 但这一点无法反映在无量纲化后的泄漏量上。本文的研究表明: 本文采用的无量纲泄漏量可以比较准确地反映密封结构和泄漏之间的关系; 除了传统的梳齿密封所使用的减小密封泄漏的手段之外, 对于结构紧凑的超临界二氧化碳梳齿密封来说, 优化密封腔室结构, 调整齿高也可以有效降低密封泄漏。

关键词

超临界流体, 二氧化碳, 密封, 数值分析

Numerical Investigation on Flow Characteristics of Supercritical CO₂ Labyrinth Seals

Weiguang Wang¹, Chengtian Zeng¹, Yuan Zhou^{1*}, Yanping Huang²

¹College of Physics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

²Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan

Received: Apr. 17th, 2023; accepted: Jul. 21st, 2023; published: Jul. 28th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 王伟光, 曾成天, 周源, 黄彦平. 超临界态二氧化碳梳齿密封泄漏特性数值研究[J]. 核科学与技术, 2023, 11(3): 305-315. DOI: 10.12677/nst.2023.113032

Abstract

Sealing technology is a key technology related to the efficient, safe, and reliable operation of rotating machinery in supercritical carbon dioxide nuclear power systems. In order to reduce the seal leakage, the characteristics of the supercritical carbon dioxide see-through labyrinth seals are studied numerically. Firstly, a nondimensional leakage rate is used to describe the leakage characteristics of the seal. Then, the influence of the upstream and downstream conditions and the geometrical parameters on the seals' leakage is studied. The results show that the thermodynamic parameters such as temperature and pressure have little influence on the nondimensional leakage rate. Reducing the sealing clearance, increasing the cavity length and decreasing the tooth width can improve the sealing leakage performance. The effect of tooth height on seal leakage is nonlinear, and there is an optimal value, which appears when the ratio of tooth height to cavity length is about 0.13. Increasing the number of teeth can also reduce the sealing leakage, but this didn't be reflected in the nondimensional leakage rate. The calculation results show that the dimensionless leakage rate in this paper can accurately reflect the relationship between seal geometry and leakage. In addition to the methods of reducing the seal leakage by the traditional labyrinth seal, for the compact supercritical carbon dioxide labyrinth seal, optimizing the structure of the seal cavity and adjusting the tooth height can also effectively reduce the seal leakage.

Keywords

Supercritical Fluids, Carbon Dioxide, Seals, Numerical Analysis

Copyright © 2023 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

超临界态二氧化碳动力系统具有布局简单、结构紧凑、尺寸小、功率高等特点。目前随着四代堆技术的发展, S-CO₂ 动力系统在核能领域得到了十分广泛的关注, 是一种极具潜力的新型核能转换系统[1] [2] [3]。然而, 由于超临界二氧化碳的密度大、粘性小的特点以及 S-CO₂ 涡轮机械尺寸小且转速高等原因, 传统的一些控制工质泄漏的经验在 S-CO₂ 动力系统中将不再适用[4] [5]。针对这一问题, Fuller 等人给出的技术图表中建议了两种密封形式: 先进梳齿密封和干气密封[6]。相较于干气密封, 梳齿密封具有结构简单、易于集成等优点, 且已经有比较长的使用历史。然而, 传统工质的梳齿密封理论[7] [8] [9] [10]均基于理想气体模型, 这对于 S-CO₂ 而言是不适用的。

目前, Sandia 国家实验室、韩国能源研究所以及 Bechtel 船用推进公司等均有对 S-CO₂ 梳齿密封的使用情况的一些报道[4] [5] [11] [12]。然而, 这些报告仅指出其仍有改进空间并未给出更详细的研究内容。Yuan 等人使用 OpenFOAM 对 S-CO₂ 直通式梳齿密封进行了较为详细的研究并开展实验对数值模型进行了验证, 结果表明: S-CO₂ 梳齿密封的泄漏特性与传统工质存在相似之处, 但最终的设计优化两者存在不同[13]。Yuan 等人的工作测试了多种密封几何参数, 然而, 其工作中部分结构参数之间相互耦合且其文章中仅提供了一个进口条件下的实验和数值计算结果。Kim 等人开展实验研究了简单梳齿喷管的泄漏特性, 并提出了一个等熵 CO₂ 临界流模型[14]。Kim 等人的研究设计参数较少且研究对象为孔板结构与梳齿密封的实际结构存在一定差异。Zhang 等人采用数值手段研究了阶梯式梳齿密封的流场以及湍流耗

散率的变化,提出了一个几何参数和改进的泄漏模型[15]。Li 等人比较了包括梳齿密封在内的三种环形气封的泄漏性能及转子动力学特性[16]。总的来说,目前关于 S-CO₂ 梳齿密封的研究还处于探索阶段,仍有许多实验和数值工作需要补充和开展。

本文将使用数值计算的方式对直通式 S-CO₂ 梳齿密封的泄漏特性进行研究,将在宽范围工况下,对密封结构和泄漏特性间的关系进行研究。本文的工作也将为 S-CO₂ 梳齿密封的设计优化提供建议。

2. 数值模型

2.1. 几何模型与网格

为减小对计算资源的消耗,密封被简化为二维结构,同时密封的上下游划分有一定长度的计算域以减小数值边界对计算结果的影响。模型的进出口边界为压力边界,其余边界为绝热无滑移壁面。几何模型最终如图 1(a)所示。

使用 ANSYS ICEM 划分结构化网格并对密封所在区域进行了加密处理,如图 1(b)所示。图 2 展示了一组实验工况的网格敏感性。结果表明:数值计算的结果在网格数大于 25 万后基本不再改变。考虑计算精度和成本之间的平衡,本文使用的网格数约在 70 万左右。

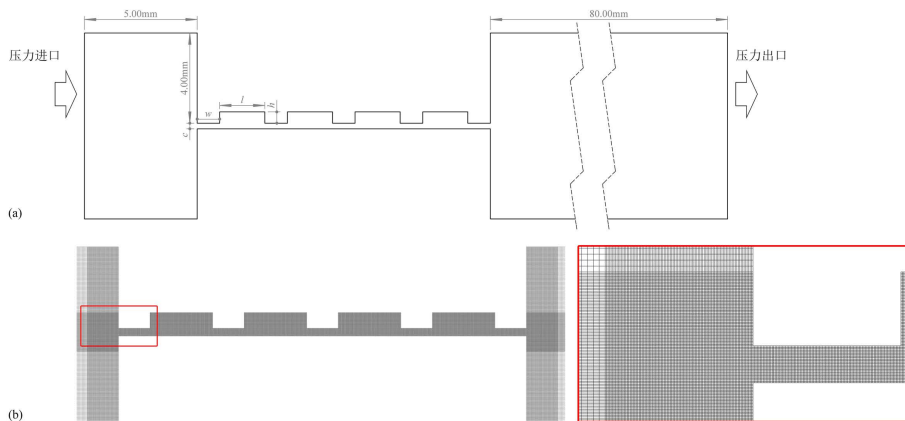


Figure 1. Calculation model and mesh
图 1. 计算模型与网格

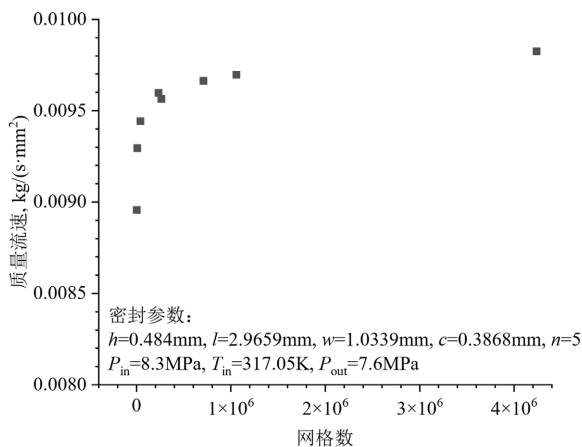


Figure 2. Mesh independence
图 2. 网格敏感性

2.2. 湍流模型与物性方程

对于 S-CO₂ 在梳齿密封中的流动应充分考虑湍流效应。经过前期工作的开展和实验验证[17]，本文选择在 Standard k-ε、RNG k-ε 以及 SST k-ω 三种模型中表现较好的 RNG k-ε 湍流模型。

使用 Aungier Redlich-Kwong 方程预测超临界二氧化碳的物性，该方程对临界点附近的气体和超临界流体的预测进行了改进[18]。

本文数值计算为定常流动，离散格式采用二阶迎风格式。数值计算工具为 Fluent 19.0。

3. 结果与分析

3.1. 密封泄漏量的无量纲化

为描述密封泄漏特性，除了密封泄漏量这一参数外，常有文章使用流量系数 Cd 这一无量纲量。对于以往的密封理论，该系数的定义为：

$$Cd = \frac{m}{\frac{AP_{in}}{\sqrt{T_{in}}} \sqrt{\frac{2k}{R_g(k-1)} \left(Pr^{\frac{2}{k}} - Pr^{\frac{k+1}{k}} \right)}} \quad (1)$$

该式基于理想气体方程，对于 S-CO₂ 工质并不适用。参考 Kim 等人的工作[14]，本文对于 S-CO₂ 工质定义了一个无量纲量 m/m_{ideal} 以描述密封的泄漏特性。其中， m_{ideal} 的定义为：

$$m_{ideal} = A \sqrt{P_{in} \rho_{avg}} \sqrt{\frac{1 - Pr^2}{n - \ln Pr}} \quad (2)$$

本文所使用的符号定义在表 1 中给出。

Table 1. Nomenclature

表 1. 符号表

符号	含义	符号	含义
A	密封的流动面积	P_{out}	出口压力
c	密封间隙	Pr	压力比, $Pr = P_{out}/P_{in}$
Cd	泄漏系数	R_g	气体常数
h	密封齿高	T_{in}	进口温度
k	热容比	w	密封齿宽
l	密封腔长	x	动能传递分数
m	实验或数值计算的密封泄漏率	γ	动能携带系数
m_{ideal}	理想密封泄漏率	ρ_{avg}	平均密度, $\rho_{avg} = (\rho_{in} + \rho_{out,s})/2$
n	密封齿数	ρ_{in}	进口密度
P_{in}	进口压力	$\rho_{out,s}$	等熵条件下的出口密度

3.2. 密封上下游工况对泄漏的影响

图 3 和图 4 展示了前期实验的一组密封在不同压力、压比及温度下的数值计算和实验结果。可以看出：对于该密封，本文使用的无量纲泄漏率约为 1。该无量纲泄漏量的样本标准差对于图 3 约为 0.0457 (4.19%)，对于图 4 约为 0.0197 (1.95%)。这表明，本文定义的无量纲泄漏量是一种描述密封形状对其泄

漏影响的理想参数。

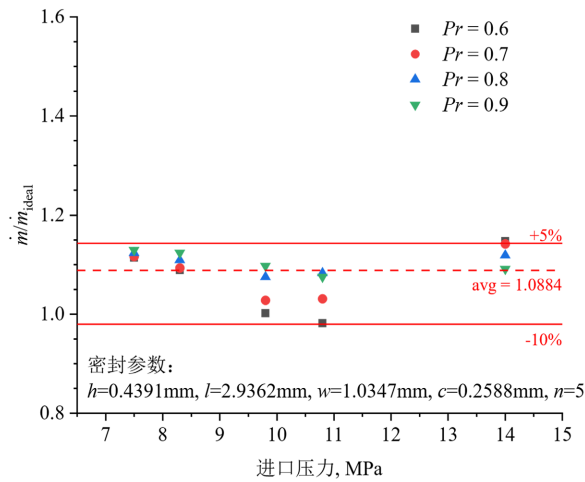


Figure 3. The effect of inlet pressure and pressure ratios on seal leakage by numerical calculation ($T_{in} = 318.01 \text{ K}$)
图 3. 数值计算得到的进口压力及压比对密封泄漏的影响 ($T_{in} = 318.01 \text{ K}$)

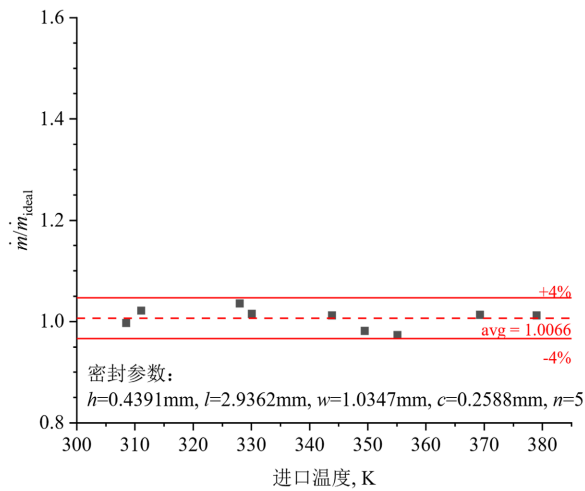


Figure 4. The effect of inlet temperature on seal leakage by experiment ($P_{in} \approx 8.3 \text{ MPa}$, $Pr \approx 0.84$)
图 4. 实验得到的进口温度对密封泄漏的影响 ($P_{in} \approx 8.3 \text{ MPa}$, $Pr \approx 0.84$)

3.3. 密封结构对泄漏的影响

本节将研究密封不同的结构参数对密封泄漏的影响。在此之前，先定义如下的密封标准件： $h = 0.5 \text{ mm}$ ， $l = 3 \text{ mm}$ ， $w = 1 \text{ mm}$ ， $c = 0.25 \text{ mm}$ ， $n = 5$ 。在后续的研究中，除研究对象的参数外，其他四个参数将保持不变。本文数值计算的密封工况为： $P_{in} = 8.3 \text{ MPa}$ ， $T_{in} = 318.15 \text{ K}$ 以及 $P_{out} = 7.55 \text{ MPa}$ 。

3.3.1. 密封间隙

计算了五个具有不同间隙的密封，计算结果如图 5 所示。随着间隙的增加，密封的泄漏也在增加。

这也符合一般的认知：更大的间隙意味着有更多流体流过密封，泄漏将会增加。

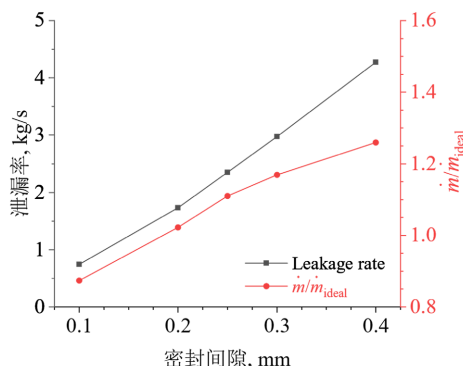


Figure 5. The effect of seal clearance on leakage
图 5. 间隙对密封泄漏的影响

3.3.2. 密封腔长

图 6 展示了密封泄漏随腔室长度的变化：随着腔长的增加，密封泄漏随之减小。图 7 展示了不同腔长的密封内流线的分布情况。可以看到随着腔长的增加，密封的射流膨胀增加。根据 Hodkinson 的理论，射流膨胀增加会导致密封从上一个齿传递之下一个齿的动能减小(也被称为动能携带), 这会使得密封的泄漏量减小[9]。

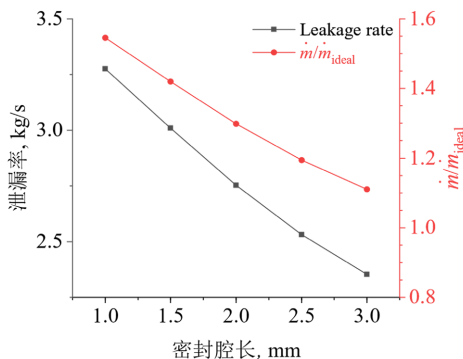


Figure 6. The effect of cavity length on leakage
图 6. 腔长对密封泄漏的影响

3.3.3. 密封齿高

图 8 展示了齿高对密封泄漏的影响：齿高对密封泄漏的影响是非线性的，存在最佳值。图 9 给出了不同齿高的密封内的流线情况。可以发现当齿高较小时，射流膨胀尽管较为明显，但腔室本身将对射流膨胀起抑制作用。随着腔室深度增加，腔室对射流膨胀的抑制减小，但同时密封内涡流的发展也随之增加，并逐渐对射流膨胀的抑制起主导作用。这就意味着存在一个过渡情况，这时射流膨胀既不被腔室本身抑制，也不被腔室内的涡流充分抑制。此时，密封泄漏将达到最小，齿高达到最佳值。

3.3.4. 密封齿宽

图 10 反映了密封泄漏随齿宽的变化。随着齿宽的增加，密封泄漏也将增加并趋于稳定。图 11 的密封流线表明，当密封齿较窄时将射流膨胀产生影响。随着齿宽的增加这一影响将逐渐减小。

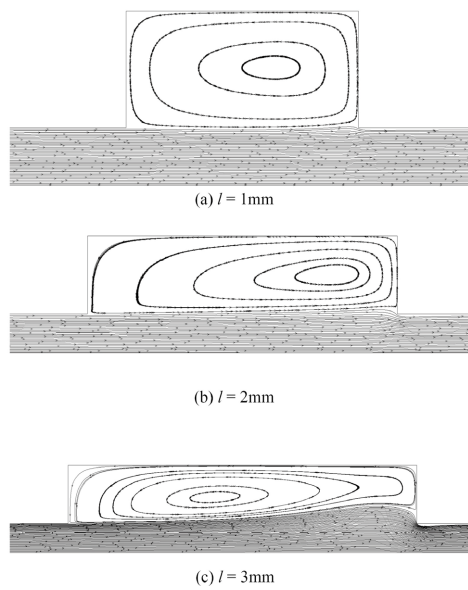


Figure 7. The streamlines of seals with different cavity length
图 7. 不同腔长下密封的流线

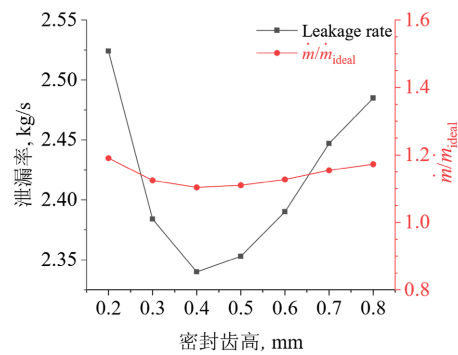


Figure 8. The effect of tooth height on leakage
图 8. 齿高对密封泄漏的影响

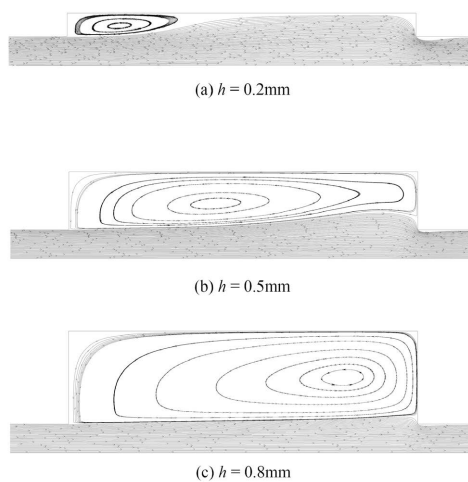


Figure 9. The streamlines of seals with different tooth height
图 9. 不同齿高下密封的流线

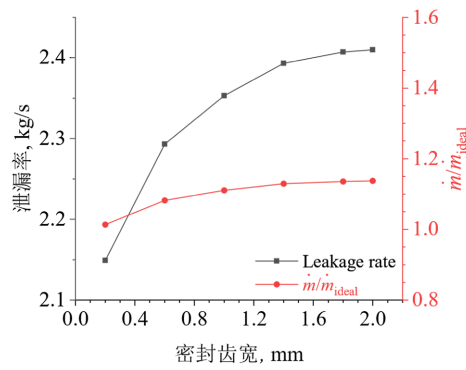
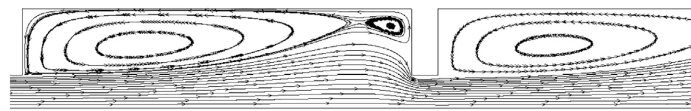
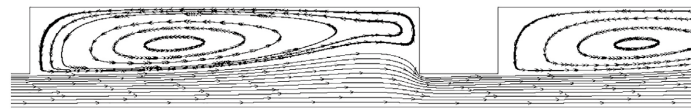


Figure 10. The effect of tooth width on leakage

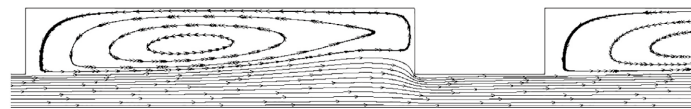
图 10. 齿宽对密封泄漏的影响



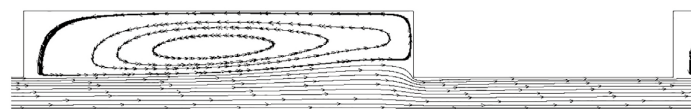
(a) $w = 0.2\text{mm}$



(b) $w = 0.6\text{mm}$



(c) $w = 1\text{mm}$



(d) $w = 2\text{mm}$

Figure 11. The streamlines of seals with different tooth widths

图 11. 不同齿宽下密封的流线

3.3.5. 密封齿数

分别计算了齿数为 3、5、7 时密封的泄漏情况，结果如图 12 所示。这里可以观察到密封实际泄漏量的变化和无量纲泄漏之间存在差异。要解释该现象，首先应明确密封实际泄漏量的减小是由密封内节流数的增加导致的。这也反映在式(2)的定义之中。那么无量纲泄漏量的增加应是密封结构中其他因素导致的。

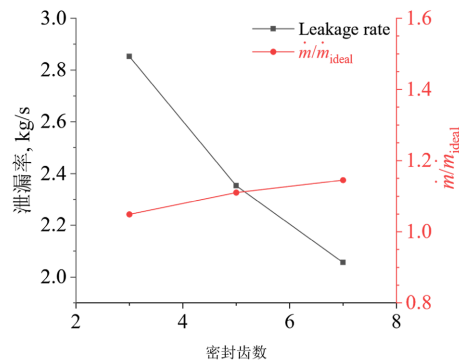


Figure 12. The effect of tooth number on leakage
图 12. 齿数对密封泄漏的影响

考虑 Hodkinson 对动能携带系数的定义[9]:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{n-1}{n}x}} \quad (3)$$

从该式可以看出随着密封齿的增加，动能携带系数也将增加。而 Hodkinson 的理论表明密封泄漏正比于动能携带系数，所以这也是无量纲泄漏量增加的原因。

最后需要说明的是尽管齿数增加导致了无量纲泄漏量的增加，但增加齿数仍是减小密封泄漏的重要手段。

3.4. 密封空腔结构的优化

上一节的研究发现，密封的齿高存在最佳值，且这一最佳值是伴随着密封内流场结构的转变而产生的。本节将进一步研究该最佳值产生的时机。

根据之前的研究会影响密封腔室内流场的结构参数有：腔长、齿高以及齿宽。而齿宽对密封流场的影响只在其比较小时才有体现，但最佳值对于齿宽较大的场合也是存在的。所以可以认为该最佳值的产生与齿高和腔长的比值有关。图 13 展示了不同密封的 h/l 的泄漏情况。可以看到密封泄漏达到最小时， h/l 基本约为 0.13。所以，为尽可能的减小密封泄漏，在确定了密封腔长后应使齿高与腔长的比值保持在 0.13 左右。

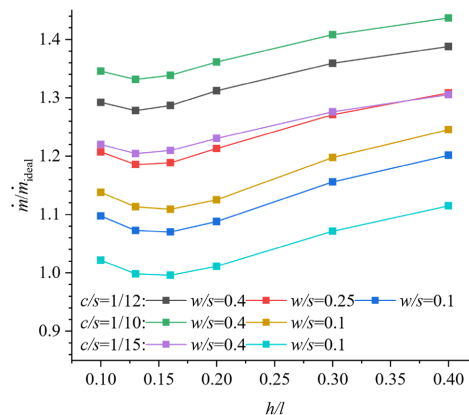


Figure 13. The effect of h/l on leakage
图 13. h/l 对密封泄漏的影响

4. 总结

本文采用数值计算的方法研究了密封滞止工况及结构参数对密封泄漏的影响,并在此基础上对密封腔室结构的优化设计提供了建议。本文的研究结果表明:

1) 由于在定义中已经充分考虑了密封滞止工况的影响,密封上下游参数对本文定义的无量纲泄漏率影响较小,该无量纲数可以准确反映密封结构对密封泄漏的影响。

2) 减小间隙、增加腔长、减小齿宽、增加齿数均能减小密封泄漏。但这几种措施也会受到密封总体尺寸以及材料强度等因素的限制。

3) 除了上述措施外,为进一步减小密封泄漏,还可以将通过采取将齿高与腔长的比值保持在 0.13 左右的措施来实现。

基金项目

感谢国家自然科学基金(No. 11605193, No. 51506134)的资助。

参考文献

- [1] Dostal, V., Hejzlar, P. and Driscoll, M.J. (2006) High-Performance Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next-Generation Nuclear Reactors. *Nuclear Technology: A Journal of the American Nuclear Society*, **154**, 265-282. <https://doi.org/10.13182/NT154-265>
- [2] Dostal, V., Hejzlar, P. and Driscoll, M.J. (2006) The Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle: Comparison to Other Advanced Power Cycles. *Nuclear Technology: A journal of the American Nuclear Society*, **154**, 283-301. <https://doi.org/10.13182/NT06-A3734>
- [3] Bae, S.J., Lee, J., Ahn, Y. and Lee, J.I. (2015) Preliminary Studies of Compact Brayton Cycle Performance for Small Modular High Temperature Gas-Cooled Reactor System. *Annals of Nuclear Energy*, **75**, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.041>
- [4] Conboy, T. (2013) An Approach to Turbomachinery for Supercritical Brayton Space Power Cycles. *Nuclear and Emerging Technologies for Space Topical Meeting (NETS 2013)*, Albuquerque, 25-28 February 2013, 124-131.
- [5] Iverson, B.D., Conboy, T.M., Pasch, J.J. and Kruiuzenga, A.M. (2013) Supercritical CO₂ Brayton Cycles for Solar-Thermal Energy. *Applied Energy*, **111**, 957-970. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.020>
- [6] Fuller, R., Preuss, J. and Noall, J. (2012) Turbomachinery for Supercritical CO₂ Power Cycles. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012*, Copenhagen, 11-15 June 2012, 961-966. <https://doi.org/10.1115/GT2012-68735>
- [7] Martin, H.M. (1908) Labyrinth Packings. *Engineering*, **85**, 35-36.
- [8] Egli, A. (1935) The Leakage of Steam through Labyrinth Seals. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, **57**, 115-122. <https://doi.org/10.1115/1.4019911>
- [9] Hodgkinson, B. (1939) Estimation of the Leakage through a Labyrinth Gland. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, **141**, 283-288. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1939_141_037_02
- [10] Vermes, G. (1961) A Fluid Mechanics Approach to the Labyrinth Seal Leakage Problem. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **83**, 161-169. <https://doi.org/10.1115/1.3673158>
- [11] Cho, J., Choi, M., Baik, Y.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>
- [12] 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>
- [13] Yuan, H.M., 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>
- [14] Kim, M.S., Bae, S.J., Son, S., Oh, B.S. and Lee, J.I. (2019) Study of Critical Flow for Supercritical CO₂ Seal. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **138**, 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.040>
- [15] Zhang, E.B., Xu, H.C., Li, J. and Bai, B.F. (2022) Turbulence Dissipation of Leakage Flow in Supercritical CO₂ Labyrinth Seals. *Progress in Nuclear Energy*, **151**, Article ID: 104336. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104336>

-
- [16] Li, Z.G., Li, Z.C., Li, J. and Feng, Z.P. (2021) Leakage and Rotordynamic Characteristics for Three Types of Annular Gas Seals Operating in Supercritical CO₂ Turbomachinery. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, **143**, Article ID: 101002. <https://doi.org/10.1115/1.4051104>
- [17] 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. <https://doi.org/10.12677/APP.2022.127050>
- [18] Aungier, R.H. (1995) A Fast, Accurate Real Gas Equation of State for Fluid Dynamic Analysis Applications. *Journal of Fluids Engineering*, **117**, 277-281. <https://doi.org/10.1115/1.2817141>