

基于超临界二氧化碳梳齿密封泄漏实验 对现有计算模型评价

曾成天¹, 周源^{1*}, 黄彦平², 田耕源¹, 黄家坚¹, 臧金光², 王俊峰²

¹四川大学物理学院, 四川 成都

²中国核动力研究院, 四川 成都

Email: *zhouyuan1911@126.com

收稿日期: 2020年9月26日; 录用日期: 2020年10月13日; 发布日期: 2020年10月20日

摘要

超临界二氧化碳布雷顿循环系统凭借着效率高、结构紧凑等特点引起了全世界的关注。梳齿式密封作为循环系统旋转机械中非接触式密封形式之一, 密封性能决定着系统的循环效率和系统安全性。为了研究超临界二氧化碳系统直通式梳齿密封结构泄漏特性, 基于高压条件下梳齿密封结构27组实验数据, 评价了2种迭代式计算模型以及2种快速计算模型的预测能力, 给出了不同结构参数及热力学参数条件下的适用范围。

关键词

超临界二氧化碳, 布雷顿循环, 梳齿密封, 模型评估

Evaluation of Existing Models Based on Experiments of Supercritical Carbon Dioxide Flows through Labyrinth Seal

Chengtian Zeng¹, Yuan Zhou^{1*}, Yanping Huang², Gengyuan Tian¹, Jiajian Huang¹,
Jinguang Zang², Junfeng Wang²

¹College of Physics, Sichuan University, Chengdu Sichuan

²Nuclear Power Institute of China, Chengdu Sichuan

Email: *zhouyuan1911@126.com

Received: Sep. 26th, 2020; accepted: Oct. 13th, 2020; published: Oct. 20th, 2020

*通讯作者。

文章引用: 曾成天, 周源, 黄彦平, 田耕源, 黄家坚, 臧金光, 王俊峰. 基于超临界二氧化碳梳齿密封泄漏实验对现有计算模型评价[J]. 核科学与技术, 2020, 8(4): 193-202. DOI: 10.12677/nst.2020.84023

Abstract

The supercritical carbon dioxide Brayton power cycle system has attracted worldwide attention due to its high efficiency and compact structure. Labyrinth seal is one of the non-contact sealing forms in the rotating machine of the cycle system. The sealing performance determines the efficiency and safety of the system. In order to study the leakage characteristics of the labyrinth seal structure in the supercritical carbon dioxide system, the prediction capabilities of two iterative calculation models and two fast calculation models are evaluated, based on 27 groups of experimental data of the labyrinth seal structure. The applicable scope under different structural parameters and thermodynamic parameters are shown.

Keywords

Supercritical Carbon Dioxide, Brayton Power Cycle, Labyrinth Seal, Models Evaluation

Copyright © 2020 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

近十年来, 超临界二氧化碳动力循环系统引起了全世界的关注[1]。将二氧化碳作为动力循环工质能够避免循环中相变的发生, 减少透平机械体积, 提高系统体积功率密度和安全性, 因此超临界二氧化碳布雷顿循环被提出用于第四代反应堆系统以及太阳能系统的能源生产中[2]。能源循环系统中广泛存在着旋转机械, 旋转机械中轴端密封、围带密封的密封性能决定着循环系统的效率。过量的工质泄漏将导致循环输出效率降低、材料脆性老化加速以及环境污染等问题[3]。在现阶段的旋转机械轴端密封中, 梳齿式密封结构凭借着结构简单、密封性能可靠等优点适用于超临界二氧化碳布雷顿循环。

梳齿密封泄漏量的理论研究起源于将梳齿几何结构类比光轴结构的粗糙元思想。Martin [4]等人的理论研究假设压降在密封齿中是呈线性分布的, 流体动能在进入每一个腔内会全部耗散, 得到了形式简洁的计算泄漏量方程。该计算方程只需要几个简单的热力学参数就能计算得到工质泄漏量, 有利于工程应用条件下泄漏量的快速计算, 同时为后续研究提供了理论研究思路和基础。Egli [5]等人通过实验研究水蒸气流过交错式和直通式梳齿密封结构的泄漏量, 发现经过一次节流后增加的动能转化为三种能量: 一部分再转换为压力, 一部分消散转换为热能, 一部分被带入下一个腔室, 故在 Martin 研究的基础上引入动能携带系数增加模型精准度。后续 Hodkinson [6], Vermes [7], Zimmerman 和 Wolf [8] 等人相继在该模型基础上进行修正, 引入了梳齿结构几何参数等使得梳齿结构泄漏量研究更加完善。由于该类理论将梳齿结构视为整体, 通过梳齿结构进出口参数直接计算得到梳齿结构泄漏量, 本文将这类理论研究归类于快速计算模型, 这种快速简便就能得到泄漏量的特性有利于满足工程上对新的梳齿结构泄漏量预测的需求。

有别于快速计算模型研究, 迭代式计算模型研究起步较晚, 是将齿间每一级腔室作为一个计算节点。首先假设每一级腔室内热工参数从而计算得到流经每个齿间的泄漏量, 然后通过质量守恒条件约束每一级齿间的泄漏量收敛, 最后计算出每级腔室内热工参数以及泄漏量。在迭代收敛中能减少等熵

假设及忽略摩擦压降带来的误差,提升模型计算精度。De Saint Venant [9]等人基于一维水平流动的能量守恒方程,结合等熵假设和理想气体假设得到了梳齿结构流量方程。Neumann [9], Scharer [10], Esser 和 Kazakia [11]等人相继在该方程的基础上进行了修改,增加了流量系数与动能携带系数,提高了模型在不同条件下计算的精准度。现阶段迭代式计算模型与快速计算模型主要研究的工质对象是空气或者水蒸气等,并且在公式推演中基于理想空气假设,针对对于高压条件下超临界二氧化碳泄漏量理论模型研究是相对缺乏的。

本文基于已有梳齿密封结构实验参数,对现有2种迭代式计算模型以及2种快速计算模型进行评价。研究了4种模型在5种压比 Pr (1.1至1.3)、5种上游滞止压力 P_{in} (7.5 MPa至14 MPa)、4种腔长与间隙比 L/Cr (4.0至11.35)共27种不同结构参数及热力学参数条件下的预测能力和适用范围。通过数据评估获得合适的模型,对指导梳齿密封结构设计起到重要作用。

2. 实验装置和实验结果

2.1. 实验回路

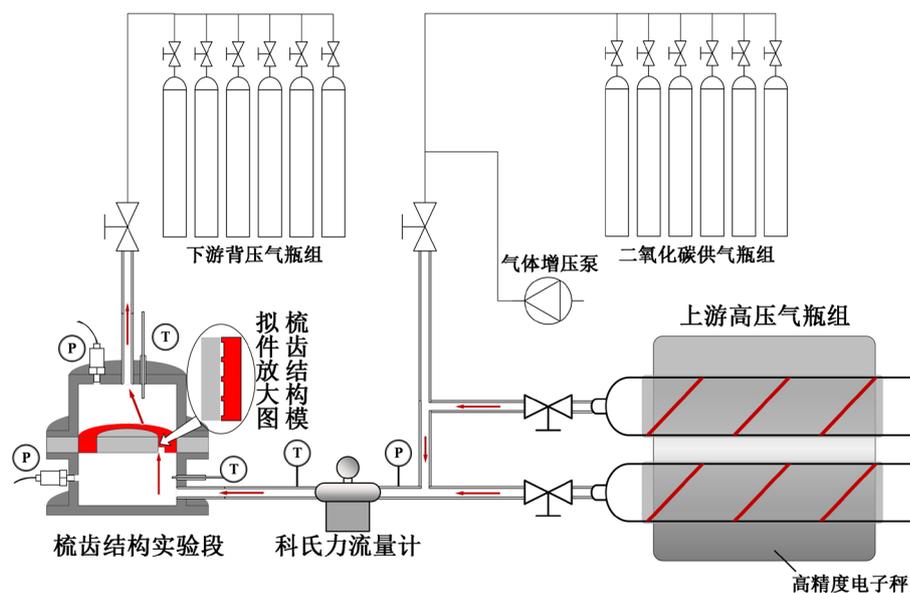


Figure 1. Schematic diagram of experimental loop
图 1. 实验回路示意图

实验回路主要由上游高压气瓶组,梳齿结构模拟件,下游高压气瓶组和二氧化碳供气装置组成,如图1所示。实验开始前,供气装置将纯度为99.5%以上的二氧化碳泵入上、下游高压气瓶组内,通过高精度电子秤以及加热带控制上、下游气瓶内的二氧化碳达到预设热工参数。上游气瓶组容积为100 L,下游气瓶组容积为240 L,较大的容积为整个实验保证了上游滞止压力以及背压的稳定性。进行实验时,将管道上球阀打开约20秒。因为上、下游压差的存在,上游二氧化碳将流经梳齿结构模拟件实验段。通过测量流体的质量流量即可得到相应热工参数条件下的实时泄漏量。

测量泄漏量选取科氏力质量流量计,加装在实验段的上游进行质量流量的测量,测量精度为 $\pm 0.2\%$ 。上游滞止压力由智能压力变送器进行测量,型号为HPS401-NHA3NN1N。测点位置位于高压气瓶出口,流量计上游管道上。测量精度为0.075%。上、下游腔室内分别布置有热电偶以及压力变送器对梳齿结构进出口温度和压力进行测量。腔室内温度由T型热电偶进行测量,精度为I级。压力由智能压力变送器

进行测量，型号为 MIK-P300，精度为 0.5 级。

2.2. 梳齿模拟件结构参数

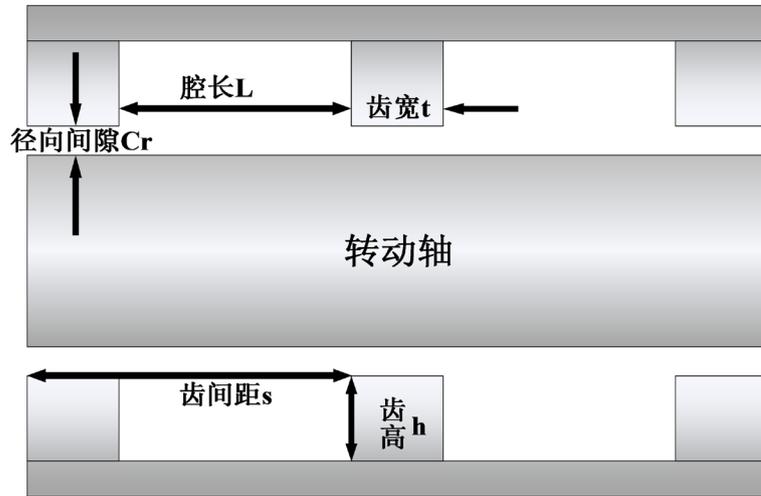


Figure 2. Schematic diagram of labyrinth seal structure
图 2. 梳齿结构示意图

图 2 是旋转机械中典型的梳齿式密封二维结构示意图，中间部分是转动轴，上下部分为梳齿状结构。图中给出了梳齿结构的主要结构参数，包括梳齿与转动之间的径向间隙 Cr ，齿厚 t ，齿高 h ，腔长 L ，齿间距 s 等。

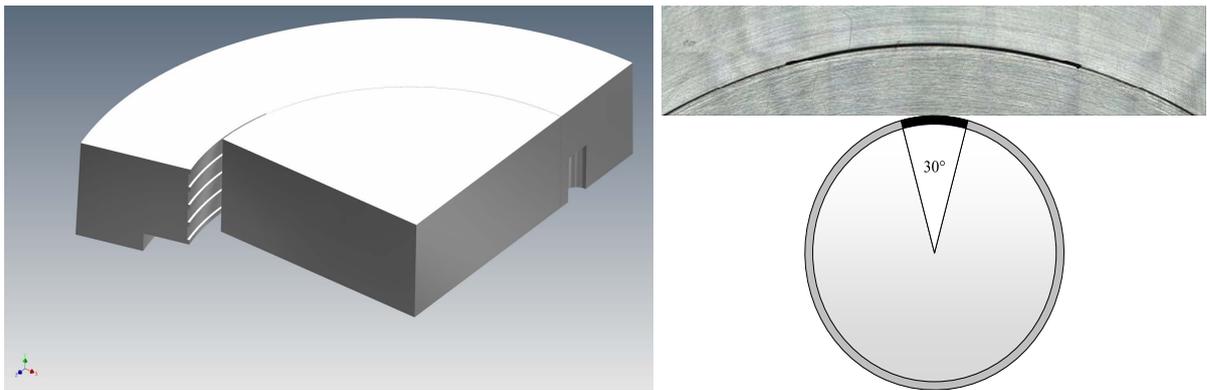


Figure 3. Schematic diagram of flow channel of labyrinth seal structure
图 3. 梳齿结构流道示意图

为了保证梳齿结构的对中度，保证实验段良好的密封性能以及便于根据实验需求更换实验段的需求，将梳齿密封结构模拟件设计为转子与定子一体式配合结构，将梳齿结构流道设计为 30° 开口，如图 3 所示。

梳齿结构的几何结构参数在三坐标仪的尺寸检测下，得到了如表 1 的几何机构参数。影响梳齿密封效果的主要结构参数包含腔长与径向间隙。径向间隙参数直接影响过流面积以及齿顶节流效应；腔长参数主要影响流体在空腔中的涡动耗散。该 5 个梳齿结构模拟件主要是为了研究腔长与径向间隙对泄漏量的影响规律。如 1、2 号主要结构差别在径向间隙不同；1、3、4 号主要结构差别在腔长不同。

Table 1. Structural parameters of the labyrinth seal
表 1. 梳齿模拟件结构参数

结构参数	1号梳齿模拟件	2号梳齿模拟件	3号梳齿模拟件	4号梳齿模拟件
齿数 N	5	5	5	5
轴直径(mm)	98	97.9668	98.003	98.0315
径向间隙 Cr (mm)	0.2588	0.3868	0.24085	0.20005
腔长 L (mm)	2.9362	2.965925	0.982725	1.967125
齿宽 t (mm)	1.03474	1.03394	1.01356	1.03546
流道开口	30°	30.1498°	30.1891°	30.2485°
结构参数	1号梳齿模拟件	2号梳齿模拟件	3号梳齿模拟件	4号梳齿模拟件

3. 计算模型

3.1. 快速计算模型

3.1.1. Hodkinson 计算模型[6]

Hodkinson 后来在 Egli 方程的基础上进行修正, 引入一个半经验系数代替 Egli 方程的动能携带系数, 见式(1), 式(2)。Hodkinson 考虑了气体射流结构的影响, 假设齿顶的喷流的形状是一个小角度的锥形, 其中一部分射流撞击在下游梳齿上使流体动能耗散, 部分没有耗散的动能被带入到下一个腔室中。研究中假设气体喷射角度是密封结构的函数。Hodkinson 给出了以下泄漏量计算半经验公式:

$$\dot{m} = \mu_i \frac{A * P_{in}}{\sqrt{R * T}} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^2}{n - \ln\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)}} \quad (1)$$

$$\mu_i = \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{n-1}{n}\right) * \left(\frac{Cr_i/L_i}{(Cr_i/L_i) + 0.02}\right)}} \quad (2)$$

3.1.2. Vermes 计算模型[7]

Vermes 利用射流边界层理论推导了动能携带系数, 对 Martin 方程进行了非绝热条件下的修正。式(3)即 Martin 方程原型, 式(4)即考虑了梳齿结构中径向间隙, 齿间距, 齿宽等参数对动能携带系数的影响。

$$\dot{m} = \mu_i \frac{A * P_{in}}{\sqrt{R * T}} \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)^2}{n - \ln\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right)}} \quad (3)$$

$$\mu_i = \sqrt{\frac{1}{1 - \alpha_i}} \quad \text{其中} \quad \alpha_i = \frac{8.52}{\frac{s_i - t_i}{Cr_i} + 7.23} \quad (4)$$

3.2. 迭代式计算模型

3.2.1. De Saint Venant 计算模型[9]

Vennard 和 Street [12]推导出一个一维流动的能量守恒方程，其一维模型如图 4 所示，同时获得了欧拉方程(5)。将方程中高度势能项 $g dz$ 忽略掉，并且将等熵关系方程(6)代入到欧拉方程中得到速度项表达式(8)。

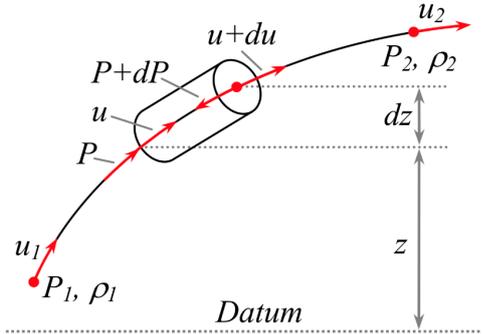


Figure 4. Conservation of differential fluid energy on a streamline [9]

图 4. 流线上的微分流体能量守恒[9]

$$\frac{dP}{\rho} + u \cdot du + g \cdot dz = 0 \tag{5}$$

$$\frac{P_i}{\rho_i^\gamma} = \frac{P_{i+1}}{\rho_{i+1}^\gamma} \tag{6}$$

$$\frac{u_i^2 - u_{cav}^2}{2} = \int_{P_{i+1}}^{P_i} \frac{dP}{\rho} = \frac{P_i}{\rho_i} \cdot \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right] \tag{7}$$

$$u_i = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot P_i}{\gamma-1 \cdot \rho_i} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right]} \tag{8}$$

$$\dot{m}_i = \rho_i \cdot A_i \cdot u_i \tag{9}$$

$$\dot{m}_i = \frac{P_i \cdot A_i}{\sqrt{R \cdot T_i}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma-1} \cdot \left[\left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \tag{10}$$

对于流体流过密封结构，在密封结构上游的空腔中流体的速度和密封间隙中流速相比小到可以忽略。得到了 St. Venant 流量公式，其中速度项定义为(8)。简化后得到了最终的流量公式(10)。

3.2.2. Neumann 计算模型[9]

Neumann 建立了一个泄漏量的经验公式(12)。包含了半经验流量系数 C_f 和动能携带系数 μ ，如式(13)(14)。 C_f 是利用气体方程计算出来，解释了流体流过梳齿的进一步收缩。

$$\dot{m} = C_f \cdot \mu \cdot A_i \sqrt{\frac{P_i^2 - P_{i+1}^2}{RT}} \tag{12}$$

$$Cf_i = \frac{\pi}{\pi + 2 - 5\beta_i + \beta_i^2} \text{ 其中 } \beta_i = \left(\frac{P_i}{P_{i+1}}\right)^{\gamma} - 1 \quad (13)$$

$$\mu_i = \sqrt{\frac{n}{n*(1-\alpha_i) + \alpha_i}} \text{ 其中 } \alpha_i = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{16.6 * Cr_i}{s_i}\right)^2}$$

4. 实验数据与现有计算模型比较结果

将上述实验装置开展得到的 5 种压比 Pr (1.1 至 1.3)、5 种上游滞止压力 P_{in} (7.5 MPa 至 14 MPa)、4 种腔长与间隙比 L/Cr (4.0 至 11.35) 共计 27 种工况条件下得到的实验数据与 4 种计算模型对比评估。

4.1. 不同压比参数下模型评估

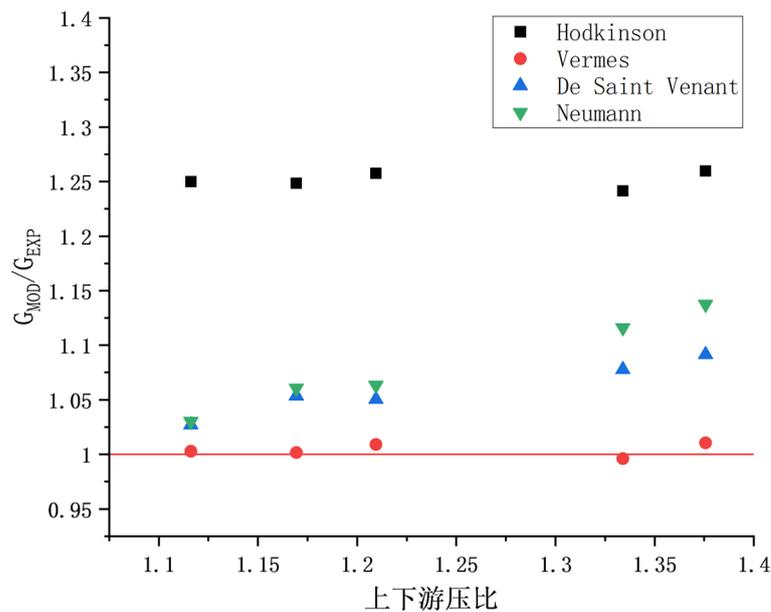


Figure 5. Comparison of models under different pressure ratio parameters
图 5. 不同压比参数下模型比较示意图

将在上游滞止压力条件为 8.3 MPa，温度为 318.15 K，压比从 1.1 到 1.3，梳齿模拟件 1 等参数条件下泄漏量数据 G_{EXP} 与模型计算得到数据 G_{MOD} 进行对比，得到了不同压比参数下模型比较示意图，如图 5 所示。

压比参数对 2 种快速计算模型的计算误差影响不大。Vermes 模型精准度最高误差不超过 1.1%，Hodkinson 模型计算准确度相对较低约有 25% 误差。快速计算模型公式考虑的是梳齿结构外上下游压比参数，因此该参数对快速计算模型误差影响不大。Hodkinson 模型计算值相对于 Vermes 模型偏高，是由于 Vermes 模型针对绝热假设条件进行了模型修正。

在压比参数条件的影响下，2 种迭代式模型约有 10% 的计算误差增长。在压比较低条件下，迭代式模型可信度较高，随着压比增加迭代式模型误差有增大趋势。其中 De Saint Venant 模型，最大误差不超过 14%，Neumann 模型计算误差不超过 10%。

4.2. 不同上游滞止压力参数下模型评估

在上游滞止压力条件为 7.5 MPa、8.3 MPa、9.8 MPa、10.8 MPa、14 MPa，温度为 318.15 K，压比为 1.1，

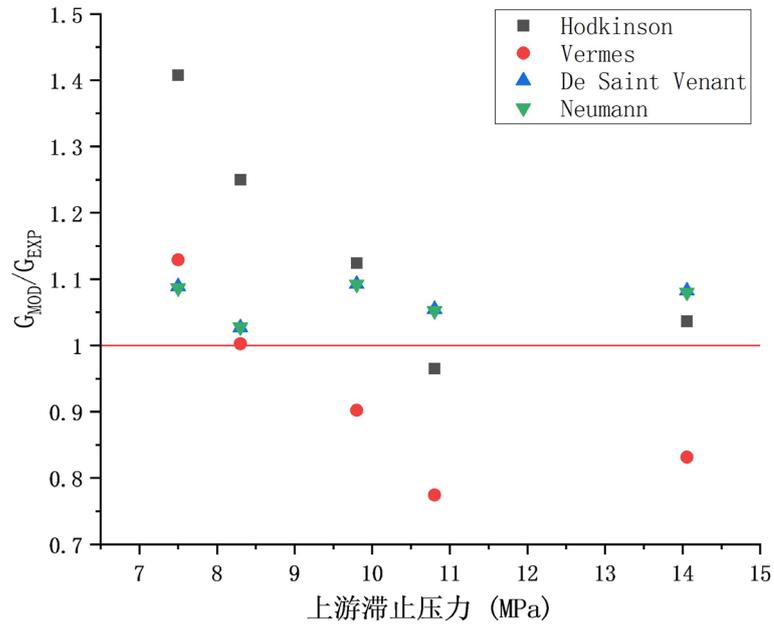


Figure 6. Comparison of models under different upstream stagnation pressure parameters

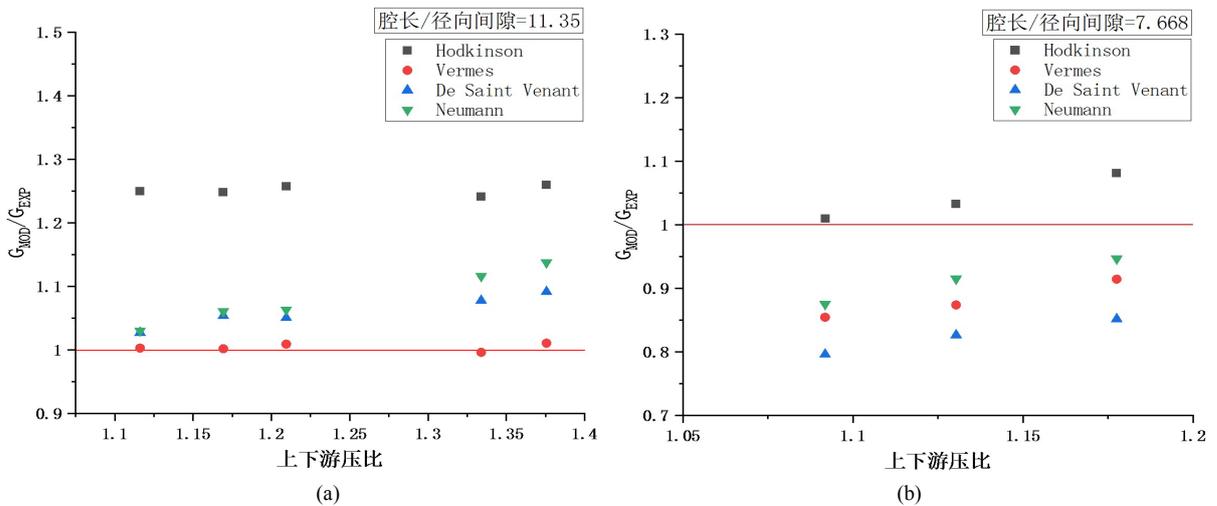
图 6. 不同上游滞止压力参数下模型比较示意图

梳齿模拟件 1 等参数条件下泄漏量数据 G_{EXP} 与模型计算得到数据 G_{MOD} 进行对比, 得到了不同上游滞止压力参数下模型比较示意图, 如图 6 所示。

快速计算模型如 Hodkinson 模型及 Vermes 模型的精确度随着上游滞止压力条件变化有着明显的变化趋势。2 种快速计算模型随着上游压力增大, 都呈现出模型误差减小的情况。上游滞止压力超过 10.8 MPa 范围内 Hodkinson 模型误差不超过 4%。Vermes 模型在上游滞止压力低于 10.8 MPa 范围内误差不超过 12.9%。

在压比为 1.1 条件下, 迭代式计算模型变化趋势更为平缓, 整体误差不超过 9.3%。同时可以看出 De Saint Venant 模型与 Neumann 模型计算值非常接近, 在 8.3 MPa 时精准度最高。在该结构参数条件下, 低压比的迭代式计算模型在不同上游滞止压力条件下适用性更好。

4.3. 不同腔长与径向间隙比参数下模型评估



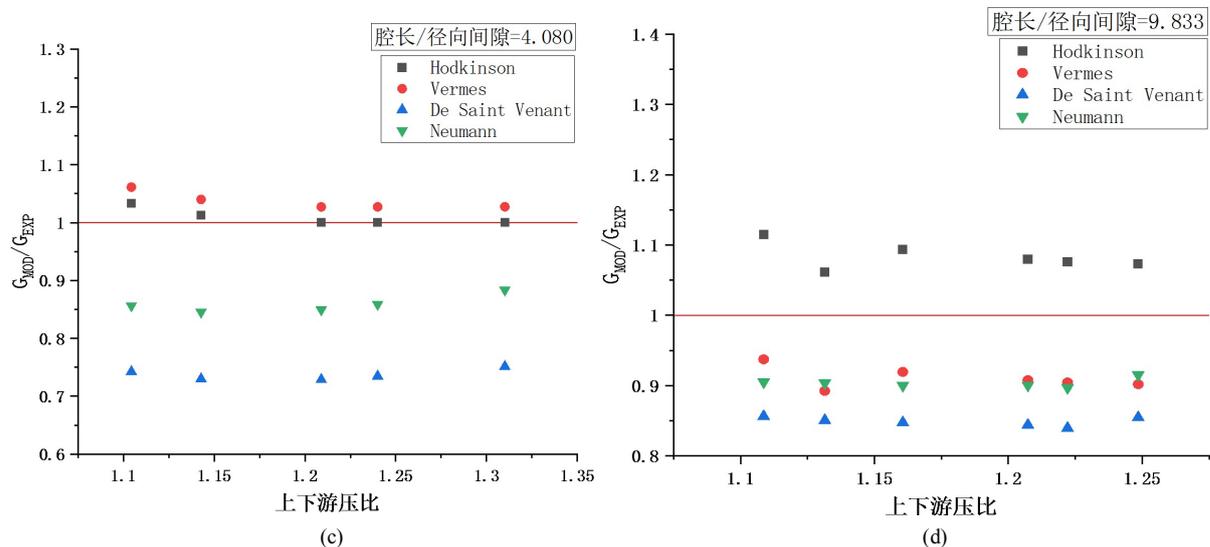


Figure 7. Comparison of models under different L/Cr

图 7. 不同腔长与径向间隙比下模型比较示意图

在上游滞止压力条件为 8.3 MPa，温度为 318.15 K，压比为 1.1 至 1.3，梳齿模拟件 1、梳齿模拟件 2(径向间隙为 0.3868 mm)、梳齿模拟件 3(腔长为 0.982725 mm)、梳齿模拟件 4(腔长为 1.967125 mm)等参数条件下泄漏量数据 G_{EXP} 与模型计算得到数据 G_{MOD} 进行对比，得到了不同腔长径向间隙比下模型比较示意图，如图 7 所示。

在腔长与径向间隙比为 11.35 时，Hodkinson 模型误差约为 25%，其余 3 个模型仅略高于实验值，四种模型中 Vermes 模型在该结构参数下误差最小适用性最好，误差不超过 1.1%，如图 7(a)所示。

如图 7(b)~(d)所示，在腔长与径向间隙比较小的情况下，Hodkinson 模型的误差随着腔长与径向间隙比减小而减小。在腔长与径向间隙比为 9.833 时，Hodkinson 模型最大误差不超过 11.5%；在腔长与径向间隙比为 7.668 和 4.080 条件下，误差分别不超过 8%和 4%。Vermes 模型则在四种腔长与径向间隙比条件下误差均不超过 10%。迭代式计算模型在腔长与径向间隙较小的情况下，都呈现出低于实验值的情况，其中 Neumann 模型误差范围在 5%至 15%之间；De Saint Venant 模型范围在 15%至 25%之间。

5. 结论

本文基于已有梳齿密封结构实验数据，对现有 De Saint Venant 模型、Neumann 模型、Vermes 模型 Hodkinson 模型进行评价。研究了 4 种模型在 5 种压比 Pr (1.1 至 1.3)、5 种上游滞止压力 P_m (7.5 MPa 至 14 MPa)、4 种腔长与间隙比 L/Cr (4.0 至 11.35)共 27 种不同结构参数及热力学参数条件下的预测能力和适用范围。得到以下结论：

- 1) 压比约为 1.1 时，De Saint Venant 模型与 Neumann 模型适用性较好，误差均不超过 9.3%。
- 2) 在压比超过 1.1 情况下，上游滞止压力超过 10.8 MPa 范围内 Hodkinson 模型误差不超过 4%。Vermes 模型在上游滞止压力低于 10.8 MPa 范围内误差不超过 12.9%。
- 3) 在上游滞止压力条件 8.3 MPa 条件下，腔长与径向间隙比为 11.35 时，Vermes 模型预测与实验值契合度较高，误差不超过 1.1%。腔长与径向间隙比小于 11.35 时，Hodkinson 模型预测能力最优，误差不超过 11.5%。

以超临界二氧化碳为工质的梳齿结构理论模型评估，弥补了现有理论模型仅在水、水蒸气、空气等低压条件下适用的问题，将模型适用性范围拓展至高压条件下超临界二氧化碳。在工程实际应用中通过

本文研究结果可以快速选择适用参数条件下的理论模型，快速得到精准度较高的泄漏量预测，进而指导设计梳齿密封结构，为准确评估整个循环系统的泄漏量提供理论支持。

参考文献

- [1] USDoE (2002) A Technology Roadmap of Generation IV Nuclear Energy Systems. *Proceedings of Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum*, Issy-les-Moulineaux.
- [2] Dostal, V., Driscoll, M.J. and Hejzlar, P. (2004) A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors. MIT-ANP-TR-100.
- [3] Pidaparti, S.R. (2013) A Computational Study on the Leakage of Supercritical Carbon Dioxide through Labyrinth Seals. Texas A&M University, College Station.
- [4] Martin (1908) H. M. Labyrinth Packings. *Engineering*, 35-36.
- [5] Egl, A. (1935) The Leakage of Steam through Labyrinth Seals. *Transactions of the ASME*, **57**, 115-122.
- [6] Hodkinson, 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
- [7] Vermes, G. (1961) A Fluid Mechanics Approach to the Labyrinth Seal Leakage Problem. *ASME Transactions—Journal of Engineering for Power*, **83**, 161-169. <https://doi.org/10.1115/1.3673158>
- [8] Zimmerman, H. and Wolff, K.H. (1987) Comparison between Empirical and Numerical Labyrinth Flow Correlations. ASME 87-GT-86. <https://doi.org/10.1115/87-GT-86>
- [9] Mohamed, A. and Eldin, G. (2007) Leakage and Rotordynamic Effects of Pocket Damper Seals and See-Through Labyrinth Seals. Texas A&M University, College Station.
- [10] Childs, D.W. and Scharer, J. (1988) Theory versus Experiment for the Rotordynamic Coefficient of Labyrinth Gas Seals: Part II—A Comparison to Experiment. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, **110**, 281-287. <https://doi.org/10.1115/1.3269514>
- [11] Esser, D. and Kazakia, J. Y., 1995 Air Flow in Cavities of Labyrinth Seals. *International Journal of Engineering Science*, **33**, 2309-2326. [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(95\)00072-6](https://doi.org/10.1016/0020-7225(95)00072-6)
- [12] Vennard, J.K. and Street, R.L. (1982) *Elementary Fluid Mechanics*. John Wiley& Sons, New York.