

多孔泡沫金属填充的通道型正压标准漏孔漏率的数值模拟

刘燧 刘贝贝 张忠立* 林正皓 蒋厚庸 周宇仁
(上海市计量测试技术研究院 上海市在线检测与控制技术重点实验室 上海 201203)

Numerical Simulation of Leak Rate of Channel Type Positive Pressure Standard Leak Filled with Porous Foam Metal

LIU Yi, LIU Beibei, ZHANG Zhongli*, LIN Zhenghao, JIANG Houyong, ZHOU Yuren
(Shanghai Institute of Measurement and testing Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract In order to address the mechanism of leakage rate variation for similar channel-type positive pressure standard leak holes under different operating conditions, a mathematical model was established by filling the channel-type leak holes with porous foam metal. Numerical simulations were conducted to analyze the impact of different operating conditions on the leakage rate of the channel-type positive pressure standard leak holes, and the velocity field distribution inside the foam metal was also provided. The results show that under constant air source pressure, compared with Air, He and D₂, H₂ has the largest leak rate, and the leak rate of the leak hole increases with the increase of air source pressure. Under the condition of constant pore diameter or porosity, the leakage rate of channel type positive pressure standard leak increases with the increase of pore diameter or porosity, and decreases with the increase of channel type positive pressure standard leak length. Nonlinear change of porosity can effectively improve and control the leakage rate. This study provides valuable reference significance for the production and development of positive pressure standard leaks, leak detection in metrology, and optimizing and designing sealing system performance by controlling leakage rates.

Keywords Porous media, Porosity, Particle diameter, Leak rate, Numerical simulation

摘要 针对同类通道型正压标准漏孔在不同工况下漏率的机理问题,将多孔泡沫金属填充于通道型正压标准漏孔中并建立数学模型。采用数值模拟的方法分别分析了不同工况条件下对通道型正压标准漏孔漏率的影响,同时给出泡沫金属内部速度场分布。结果表明,在恒定的气源压力下,与 Air、He 以及 D₂ 相比, H₂ 获得的漏率最大;漏孔的漏率随气源压力的增大而增大;对于恒定的孔径或孔隙率条件下,通道型正压标准漏孔的漏率随着孔径或孔隙率的增大而增大,随通道型正压标准漏孔长度的增加而降低;非线性变化孔隙率能够有效改善并控制漏率的大小。该项研究对正压标准漏孔的生产和发展、计量方面的检漏工作,以及控制漏率来优化和设计密封系统性能方面提供了有价值的参考意义。

关键词 多孔介质 孔隙率 孔径 漏率 数值模拟

中图分类号: TB774

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202212003

随着科学技术的进步与迅速发展,通道型正压标准漏孔广泛应用于电子工业、制冷、核工业、半导体以及航空航天等领域^[1-3]。将进口端压力大于大气压,出口端为一个大气压的漏孔,称之为正压标准漏孔,其中影响通道型正压标准漏孔漏率的因

素有很多,根据研究表明,正压标准漏孔漏率的大小与气体类型、进气压力以及漏孔自身结构等有关^[4,5]。

前人对不同类型的气体 and 不同压力条件下,正压标准漏孔漏率的研究已经做了很多工作,例如,

收稿日期: 2022-12-02

基金项目: 上海市市场监督管理局科研计划项目 (2022-03)

* 联系人: E-mail: zhangzl@simt.com.cn

在利用 H_2 、 He 、 D_2 三种气源进行研究标准漏孔漏率的变化规律, 研究发现漏率会随粘滞力的增大而降低^[6]。与此同时, 在高纯空气、高纯氮气、高纯氦气条件下, 通道型正压标准漏孔漏率随压力的变化, 实验结果表明, 在气源压力低于 40 kPa 的条件下, 漏孔的漏率值与压力成正比关系^[7]。此外, 还有学者研究了在不同的孔径大小条件下, 气体的状态具有不同的性质, 研究表明当漏孔的孔径大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时, 气体在正压标准漏孔内部的流动可以看作是粘滞流状态^[8]。

针对目前同类型的通道型正压标准漏孔, 在不同气源、不同孔隙率、不同孔径、不同正压标准漏孔长度条件下漏率的变化规律以及机理有待进一步展开研究。本文主要在前人研究成果的基础上, 将多孔泡沫金属填充于通道型正压标准漏孔中, 采用数值模拟方法并建立数学模型。在气源压力 1000 Pa–40000 Pa 的条件下, 分别研究不同气体, 即: Air 、 He 、 D_2 、 H_2 , 孔隙率、孔径以及正压标准漏孔的长度对漏孔漏率的影响。该项研究对工业的生产和发展、计量检漏工作、控制漏率以优化和设计密封系统等提供有价值的指导意义。

1 模型建立

1.1 物理模型

通道型正压标准漏孔的物理模型如图 1 所示。如图 1(a), 不同类型的气体包括: Air 、 He 、 D_2 、 H_2 , 从

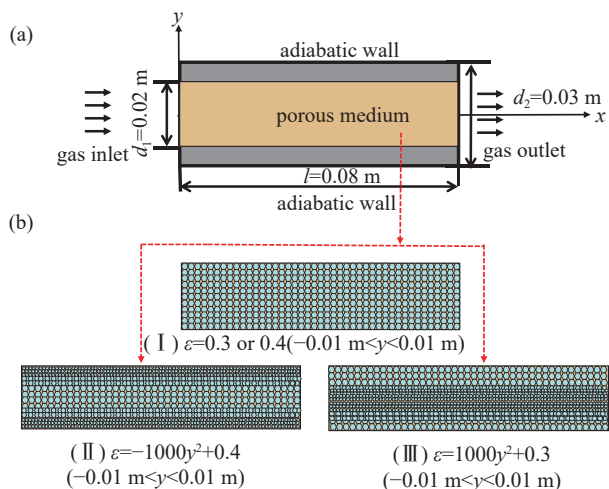


图1 通道型标准漏孔物理模型。(a)通道型标准漏孔几何尺寸, (b)多孔泡沫金属结构

Fig. 1 Channel type standard leak hole physical model. (a)Geometric dimensions of channel type standard leakage holes, (b)porous foam metal structure

表1 Air 、 He 、 D_2 、 H_2 在 298 K 条件下的物性参数

Tab. 1 Physical properties of air, helium, deuterium and hydrogen at 298 K conditions

	密度/ kg/m^3	粘度/ $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
空气	1.185	2.63×10^{-5}
氦气	0.164	1.96×10^{-5}
氘气	0.167	1.25×10^{-5}
氢气	0.081	8.92×10^{-6}

直径 $d_1=0.02\text{ m}$ 正压标准漏孔的进口端进入由微米级多孔泡沫金属填充的正压标准漏孔内部, 多孔泡沫金属的孔径 d_p 分别为 $6\text{ }\mu\text{m}$, $8\text{ }\mu\text{m}$, $10\text{ }\mu\text{m}$, 其中通道型正压标准漏孔的长度 l 分别设定为 0.08 m , 0.12 m , 0.16 m , 最后气体从正压标准漏孔出口端排出, 通过监测出口的质量流量从而计算出漏率的大小。多孔泡沫金属孔隙率的变化如图 1(b) 所示, 多孔泡沫金属分别具有恒定的孔隙率 $\varepsilon=0.3$ 或 0.4 , 先增后减以及先减后增变化的孔隙率。不同类型的气体的物性参数如下表 1 所示。

1.2 数学模型

本文主要研究 Air 、 He 、 D_2 、 H_2 通过多孔介质填充的正压标准漏孔内部机理进行探讨, 由于不同压力下通过漏孔所获得的流态不同, 因此, 需要通过克努森数^[9]来判断气体的流态。

$$K_n = \frac{\lambda}{L} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{K_b T}{\sqrt{2} \pi d^2 P} \quad (2)$$

K_n 表示分子自由程与几何特征尺度之比。其中式 (1) 中, λ 为气体分子平均自由程, L 为几何特征尺度, 本文中几何特征尺度为正压标准漏孔的直径 d_1 ; 式 (2) 中, K_b 为 Boltzmann 常数, T 为气体热力学温度 298 K, d 为气体分子直径, P 为进出口的压力差。

当 $K_n < 0.001$ 时, 流体的流动可以看作连续介质流动, 具有无滑移边界条件, 即为粘滞流; 当 $0.001 < K_n < 0.1$ 时, 经过无滑移边界条件处理, 可以看作连续介质流动; 当 $0.1 < K_n < 10$ 时, 为过渡流; 当 $K_n > 10$ 时, 为分子流。

针对 100 Pa–40000 Pa 压力下气体通过正压标准漏孔流态进行判断如下: 经过计算可得到, 当气体为空气且进口压力 $p > 300\text{ Pa}$ 时, $K_n < 0.001$, 为粘滞流; 当气体为氢气且进口压力 $p > 600\text{ Pa}$ 时,

$K_n < 0.001$, 为粘滞流; 当气体为氦气且进口压力 $p > 800$ Pa 时, $K_n < 0.001$, 为粘滞流; 当气体为氮气且进口压力 $p > 1000$ Pa 时, $K_n < 0.001$, 为粘滞流。本文主要假设流体为粘滞流条件下展开研究。因此, 选取进口气体压力范围 1000 Pa-40000 Pa 进行分析。

根据目前所研究的通道型正压标准漏孔漏率的问题, 作以下假设:

(1) 在通道型正压标准漏孔内的流动为二维稳态、不可压缩流体;

(2) 多孔泡沫金属是均匀的、各向同性、流体与固体间为无热量的传递;

(3) 流体的性质恒定, 忽略重力的影响;

(4) 泡沫金属内部流体流动为粘滞流状态, 惯性阻力被忽略。

基于以上假设, 流体在通道型正压标准漏孔泡沫金属区域的控制方程如下^[10]:

$$\frac{\partial u_f}{\partial x} + \frac{\partial v_f}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon^2} \left(u_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial u_f}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_f \frac{\partial u_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_f \frac{\partial u_f}{\partial y} \right) - \frac{\mu_f}{K} u_f \quad (4)$$

$$\frac{\rho_f}{\varepsilon^2} \left(u_f \frac{\partial v_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial v_f}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_f \frac{\partial v_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_f \frac{\partial v_f}{\partial y} \right) - \frac{\mu_f}{K} v_f \quad (5)$$

在式 (3)-(5) 中, u_f 和 v_f 分别代表 x 和 y 方向上的速度, 单位: m/s, f 表示流体。 ε 表示孔隙率, ρ 表示流体的密度, 单位: kg/m^3 ; p 表示压力, 单位: N/m^2 ; μ 表示动力粘度, 单位: $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; 其中 K 为泡沫金属内部的渗透率, 单位: m^2 , 具体公式如下:

$$K = \frac{d_p^2 \cdot \varepsilon^3}{150 \cdot (1 - \varepsilon)^2} \quad (6)$$

式 (6) 中, d_p 为多孔泡沫金属的孔径, 单位: μm ; ε 为无量纲数, 表示泡沫金属的孔隙率。

边界条件:

(1) 气体进口: $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0, p = p, \frac{\partial p}{\partial y} = 0$

(2) 气体出口: $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$

2 数值方法

本文的控制方程和边界条件采用 SIMPLE 算

法进行数值计算, 动量方程采用二阶迎风格式, 其中非线性变化的孔隙率采用用户自定义函数 (UDFs) 来实现, 同时, 设置收敛标准为 10^{-6} , 采用标准初始化。

在模拟的过程中, 计算域中使用非结构化网格。如表 2 所示, 为了验证网格的质量, 采用四种不同的网格数来分析网格数对通道型正压标准漏孔漏率的影响。从表 2 中可以发现, 随着网格数从 741 改变为 1127, 漏率值变化了 0.004%; 网格数从 1127 继续增大到 12243, 漏率值变化了 0.002%; 继续增大网格数至 237303, 漏率值变化了 0.001%。为了节省计算时间和成本, 选取网格数为 12243 进行计算和分析。

表 2 网格独立性验证

Tab. 2 Grid independence

网格数	漏率 (mL/min)	相对误差 (%)
741	889.5793	—
1127	889.5407	0.004
12243	889.5226	0.002
237303	889.5119	0.001

通道型正压标准漏孔的形状极为复杂, 对其进行准确的测量极为困难, 其中涉及漏孔内部金属孔隙以及金属丝的直径等多方面影响。为了验证目前的数学模型以及方法的正确性, 分别将数值模拟结果与已发表的两篇实验文章 [7,11] 进行对照。

(1) 在气源压力 10 kPa-40 kPa 的实验条件下, 研究高纯 He 通过通道型正压标准漏孔漏率的变化规律。如图 2 所示, 实验漏率值与模拟结果进行比

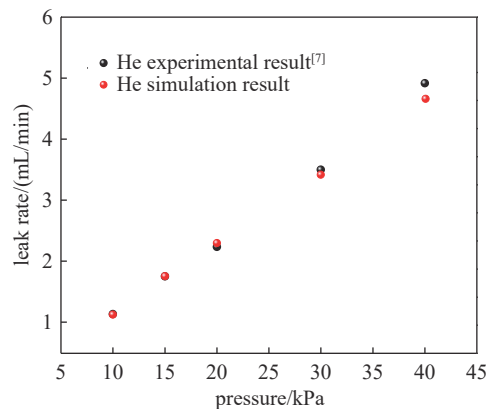


图2 He 通过通道型正压标准漏孔漏率变化曲线的实验结果^[7]和模拟结果

Fig. 2 Experimental data^[7] and simulated results of the variation curve of the leak rate of helium gas through a channel type positive pressure standard leak

较,可获得的最大相对误差为 8.17%。

(2) 在气源为 Air 且选取三种不同气源压力值,研究不同的正压标准漏孔的漏率变化,正压标准漏孔的实验漏率值与模拟结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,实验结果与模拟结果的最大相对误差为 8.58%。

表 3 在气源为 Air 的条件下,三种不同正压标准漏孔在不同压力下的漏率实验结果^[12]与模拟结果

Tab. 3 Experimental data^[12] and simulated leakage rates of three different positive pressure standard leak at various pressures under air as the gas source

气源压力值 (kPa)	实验结果 ^[12] (mL/min)	模拟结果 (mL/min)
5	101.3	100.32
10	10.48	11.38
100	187.8	186.08

由此可见,数值模拟结果与实验结果基本吻合,说明以上提及的数学方法和模型是可行的。

3 结果与讨论

本文主要采用多孔泡沫金属填充通道型正压标准漏孔并建立数学模型。主要研究了在气源压力: 1000 Pa–40000 Pa 条件下,不同气体类型、孔隙率以及孔径 $d_p=6\ \mu\text{m}$, $8\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, 漏孔长度、内部速度场分布等参数对通道型正压标准漏孔漏率的影响。

3.1 气体类型对漏率的影响

图 3 主要分析了在恒定孔隙率 $\varepsilon=0.3$, 恒定的通道型正压标准漏孔长度 $l=0.08\ \text{m}$, 不同 Air、He、 D_2 、 H_2 以及在不同压力条件下通道型正压标准漏孔漏

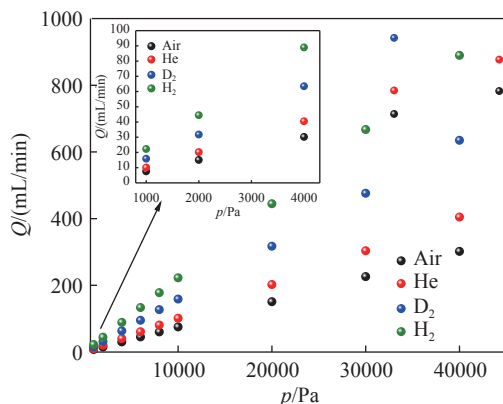


图3 不同压力和不同气源下漏孔漏率的变化

Fig. 3 Variation of leakage rates of leaks with different pressures and different gas sources

率的变化。从图 3 中可以看出,通道型正压标准漏孔的漏率随着气源压力的增大而增大,与此同时,在相同的气源压力下,与 Air、He 以及 D_2 相比, H_2 获得的漏率最大。在相同气源压力下,He 获得的漏率比 Air 提高 34.18%, D_2 比 Air 的漏率提高 110.40%, H_2 获得的漏率比 Air 提高 194.84%,这主要是因为相同的环境温度条件下,不考虑通道型漏孔壁面热量的传递, H_2 的动力粘度最小,从而在泡沫金属内部获得的渗透率最大,这导致更多的 H_2 更易通过泡沫金属内部而释放到漏孔外部。此外,还可以发现在本次气源压力范围内,通道型正压标准漏孔的漏率与压力成线性关系。

不同类型的气源对正压标准漏孔漏率的影响很大,气体的粘性越小,在相同的气源压力下获得的漏率越大。但是,在实际生产和密封系统设计中,漏率并非越大越好。因此,选择粘性较大的气源类型以减少泄漏率,这对于密封系统性能的优化和设计提供指导,同时,这对于计量方面的检漏工作,选择合适的气源类型 also 具有重要意义。

3.2 孔隙率和孔径对漏率的影响

如图 4 所示,在气源为 H_2 且通道型正压标准漏孔长度 $l=0.08\ \text{m}$ 条件下,分别研究恒定变化孔隙率和非线性变化孔隙率以及不同孔径在不同压力下通道型正压标准漏孔漏率的变化。从图 4(a) 中可以看出,在相同的气源压力条件下,随着孔隙率从 0.3 增加至 0.4,通道型正压标准漏孔获得的漏率明显增大。这主要是因为相同的孔径条件下,孔隙率的增大,渗透率增大,气体的流动阻力降低,气体更容易通过泡沫金属间隙,从而获得较大的漏率。对于非线性变化的孔隙率,在泡沫金属内部孔隙率沿着纵轴方向从 0.3 逐渐变化到最大 0.4 再逐渐降低到 0.3 的过程中,在通道型正压标准漏孔的中轴线孔隙率最大为 0.4,由于靠近壁面的孔隙率相对于中间区域的孔隙率较小,从而两边获得的流速相对较小,中间获得的流速较大。然而,与孔隙率为 0.3 的泡沫金属相比,孔隙率 $\varepsilon = -1000y^2 + 0.4$ ($-0.01\ \text{m} < y < 0.01\ \text{m}$) 获得的漏率最大。对于非线性孔隙率 $\varepsilon = 1000y^2 + 0.3$ ($-0.01\ \text{m} < y < 0.01\ \text{m}$),在接近壁面处获得的孔隙率较大,在泡沫金属内部中间区域获得的孔隙率较小,更多的气体会从两边沿着壁面流向出口,由于曲率的差异,孔隙率 $\varepsilon = 1000y^2 + 0.3$ ($-0.01\ \text{m} < y < 0.01\ \text{m}$) 获得的漏率较小。从整体来看,非线性孔

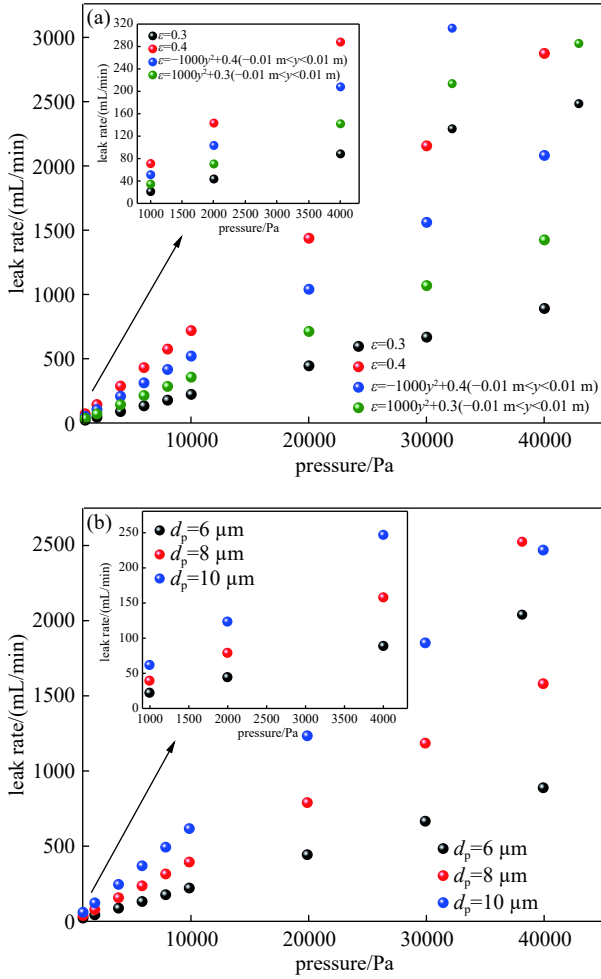


图4 在气源为 H_2 的条件下, 不同的 (a) 恒定孔隙率和非线性孔隙率以及 (b) 不同孔径获得的漏率随压力的变化

Fig. 4 Variation of leakage rates with pressure for different (a) constant porosity and non-linear porosity, and (b) different orifice diameters under H_2 gas as the source

隙率的变化介于 $\varepsilon=0.3$ 和 $\varepsilon=0.4$ 之间, 因此, 较大孔隙率获得漏率最大, 非线性变化的孔隙率可以有效控制漏孔漏率的大小。

在相同的孔隙率条件下, 不同的孔径对通道型正压标准漏孔漏率的影响, 如图 4(b) 所示。从图 4(b) 中可以看出, 在相同的气源压力条件下, 通道型正压标准漏孔的漏率随孔径 d_p 的增大而增大, 随着气源压力的逐渐提高, 漏率呈现上升的趋势。这主要是因为, 在相同的气源压力以及孔隙率条件下, 泡沫金属内部的渗透性随孔径的增大而增大, 气体在内部的流动阻力减小, 从而获得更多的动能。此外, 在相同的孔径条件下, 气源压力与获得的漏率成正比关系, 在相同的粘滞力条件下, 压力越大获得的动能越大。

因此, 由泡沫金属填充的通道型正压标准漏孔, 在相同的孔径 $d_p=6 \mu m$ 条件下, 正压标准漏孔的漏率值随着孔隙率的增大而增大, 非线性孔隙率 $\varepsilon=-1000y^2+0.4$ ($-0.01 m < y < 0.01 m$) 和 $\varepsilon=1000y^2+0.3$ ($-0.01 m < y < 0.01 m$) 获得的漏率值介于恒定孔隙率 0.3 和 0.4 之间获得的漏率值。在相同的孔隙率 $\varepsilon=0.3$ 条件下, 通道型正压标准漏孔的漏率随孔径的增大而增大。

不同的孔隙率或孔径能够有效控制正压标准漏孔的漏率。较大的孔隙率或孔径能够加速气体通过漏孔的速度, 线性变化的孔隙率这对与通道型正压标准漏孔未来结构的设计以及漏率的控制具有一定的指导意义。

3.3 漏孔长度对漏率的影响

图 5 主要分析了在恒定的孔隙率 $\varepsilon=0.3$ 和恒定孔径 $d_p=8 \mu m$ 以及相同的气源 H_2 条件下, 不同的通道型正压标准漏孔长度在不同进气压力下获得漏率的变化趋势。从图 5 中可以看出, 在气源压力 40000 Pa 的条件下, 漏孔长度由 $l=0.08 m$ 增加到 $l=0.12 m$, 在出口监测到的漏率降低了 33.89%, 随着漏孔长度增加至 $l=0.16 m$, 在出口监测到的漏率比 $l=0.12 m$ 下的漏率降低了 21.74%。在相同的进气压力条件下, 随着漏孔长度的增加, 在出口获得的漏孔漏率逐渐减小。这主要是因为漏孔长度的增加, 气体通过漏孔的阻碍程度随之增加, 气体分子碰撞次数增多, H_2 在通道型标准漏孔中停留的时间相对延长, 从而获得漏率减小。

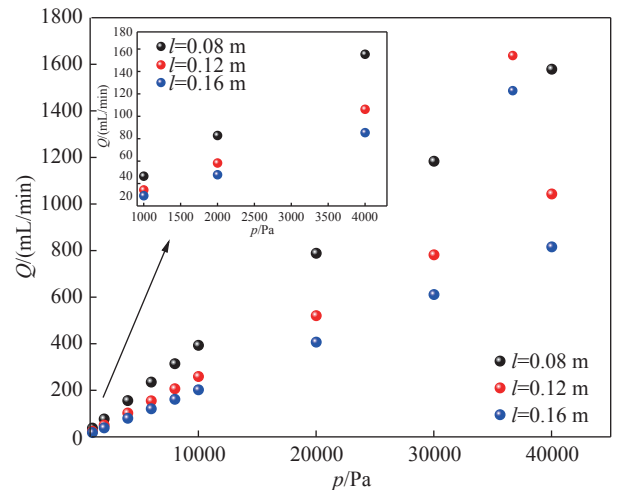


图5 不同漏孔长度以及气源压力条件下漏率的变化

Fig. 5 Variation of leakage rates with different leak lengths and gas source pressures

因此,正压标准漏孔的长度对漏率的影响较大,在实际的工业生产中,可根据需求设计和生产不同长度的漏孔,这对设备的密封性测试以及不同场所的应用具有指导意义。

3.4 非线性变化孔隙率速度场的变化

在恒定的孔径 $d_p=6\text{ }\mu\text{m}$ 条件下,不同气源在泡

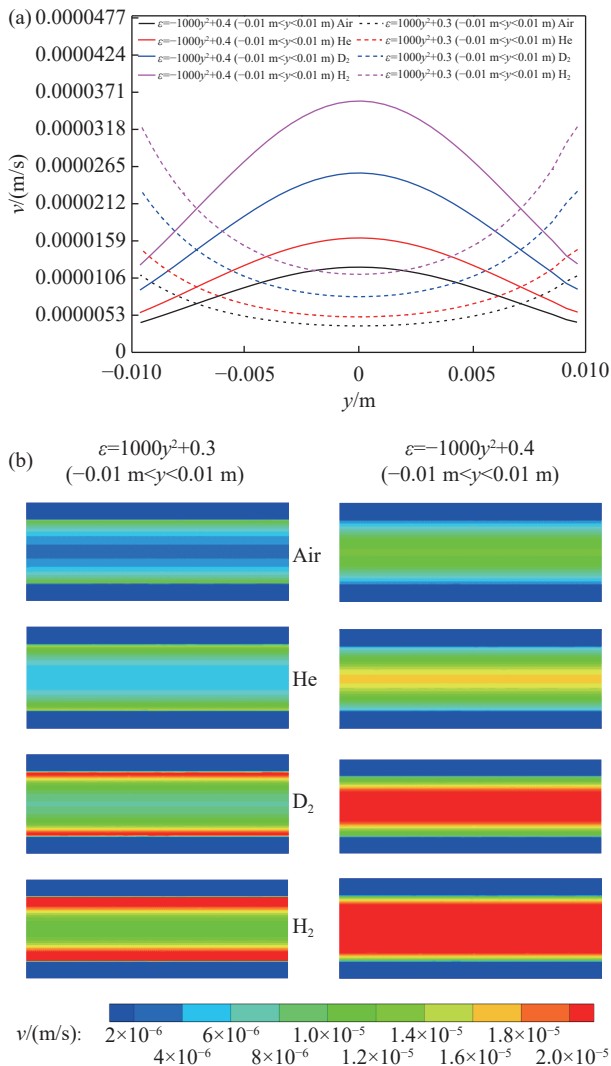


图6 非线性变化孔隙率条件下漏孔中沿纵轴方向上流速的变化以及速度场的分布。(a)不同气源以及非线性变化孔隙率条件下漏孔中沿纵轴方向上流速的变化; (b)不同气源条件下漏孔中气体速度场的变化

Fig. 6 Variation of flow velocity along the longitudinal axis and the distribution of velocity field in the leakage hole under the condition of non-linear variation of porosity. (a) Variation of flow velocity along the vertical axis in leak under different gas sources and non-linear porosity conditions, (b) variation of gas velocity field in leak under different gas source conditions

沫金属内部沿着 y 方向速度场的变化如图6(a)所示。从图6(a)中可以发现,对于开口向下的抛物线形变化的孔隙率,与空气相比, H_2 在泡沫金属多孔层中获得的流速较大。在 $-0.01\text{ m} < y < -0.005\text{ m}$ 和 $0.005\text{ m} < y < 0.01\text{ m}$ 之间,流速的变化相对于中间区域较小,这主要是因为流体在流道内流动边界层出存在粘滞力,另一方面中间区域孔隙率最大,获得的流动阻力相对减小,导致更多的流体更易通过。与此同时,相对于孔隙率的非线性变化,流体的性质占据主导地位。从图6(b)的速度场分布中可以发现,与Air、He、 D_2 相比,在气源为 H_2 且填充的泡沫金属孔隙率 $\varepsilon = 1000y^2 + 0.3$ ($-0.01\text{ m} < y < 0.01\text{ m}$)条件下,在通道型正压标准漏孔两侧区域流速较大;填充 $\varepsilon = -1000y^2 + 0.4$ ($-0.01\text{ m} < y < 0.01\text{ m}$)条件下,在通道型正压标准漏孔中间区域流速较大。这表明泡沫金属内部速度的大小与气体的粘度有关,粘度的大小会直接影响正压漏孔的漏率。

4 结论

本文主要将多孔泡沫金属填充于通道型正压标准漏孔内部,通入不同类型的气体,采用数值模拟的方法,研究其内部机理并建立数学模型。分别分析了不同类型的气源,孔隙率、孔径、正压标准漏孔长度等参数对漏率的影响,并给出了非线性变化孔隙率内部速度场分布。得到的主要结论如下:

(1) 在恒定的气源压力条件下,与Air、He以及 D_2 相比, H_2 获得的漏率最大。不同的气体类型通入通道型正压标准漏孔中对其漏率有较大的影响。气体的粘性越大,在相同的气源压力下获得的漏率越小,这是因为粘性的增大,导致流动阻力增大,从而在出口获得的气体量减少。因此,在实际生产和密封系统设计中,选择粘性较大的气源类型以减少泄漏率,这对于优化和设计密封系统具有指导意义。此外,对于计量方面的检测,明确气体类型也是十分重要的。

(2) 通道型正压标准漏孔的漏率随着孔径或孔隙率的增大而增大,不同的孔隙率或孔径能够有效控制正压标准漏孔的漏率。线性变化孔隙率对通道型正压标准漏孔结构上的设计以及漏率的控制具有一定的参考意义。

(3) 通道型正压标准漏孔的漏率随其长度的增加而降低,这主要因为漏孔长度的增加,导致气体

分子碰撞次数增多, 气体不能及时从出口排出。这对于漏孔内部结构的优化和设计提供帮助。

综上所述, 对于同种型号的正压标准漏孔, 明确气体类型对计量方面的检漏工作是十分重要的。此外, 控制和调节孔隙率、孔径、漏孔长度等参数, 能够改变正压标准漏孔漏率的大小, 这对于未来漏孔生产的发展以及密封系统性能的优化和设计提供有价值的参考意义。

参 考 文 献

- [1] Li D T. Recent advances in vacuum metrology[J]. *Shanghai Metrology and Testing*, 2003(05): 4-10 (李得天. 真空计量的新进展 [J]. *上海计量测试*, 2003(05): 4-10(in chinese))
- [2] Da D A. Vacuum design handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004, 1311-1314; 98-132 (达道安. 真空设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社. 2004, 1311-1314; 98-132(in chinese))
- [3] Lu Y W, Chen X, Li D T, et al. Portable vacuum leak hole calibration device[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2013, 33(12): 1179-1183 (卢耀文, 陈旭, 李得天, 等. 便携式真空漏孔校准装置 [J]. *真空科学与技术学报*, 2013, 33(12): 1179-1183(in chinese))
- [4] Liu C X, Zhang D X, Feng Y, et al. Study on the leakage rate of metal flattened positive pressure leak hole at different pressures[J]. *Vacuum and Low Temperature*, 2011, 17(04): 218-223 (刘赐贤, 张涤新, 冯焱, 等. 金属压扁型正压漏孔不同压力下的漏率研究 [J]. *真空与低温*, 2011, 17(04): 218-223(in chinese))
- [5] Cui X X, Liu H G, Sun B, et al. Uncertainty evaluation of channel type standard leak hole measurement results[J]. *Industrial Metrology*, 2018, 28(3): 76-78 (崔尧尧, 刘红光, 孙搏, 等. 通道式标准漏孔测量结果不确定度评定 [J]. *工业计量*, 2018, 28(3): 76-78(in chinese))
- [6] Zhong B Y, Wang W, Li F F, et al. Influence of different gases and pressures on the leakage rate of vacuum leak holes[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2017, 37(4): 345-350 (钟博扬, 王维, 李芳芳, 等. 不同气体和压力对真空漏孔漏率的影响 [J]. *真空科学与技术学报*, 2017, 37(4): 345-350(in chinese))
- [7] Liu Y, Liu B B, Zhou Y R, et al. Analysis of leakage rate of channel-type positive pressure standard leak holes under different gases and pressures[J]. *Shanghai Metrology and Testing*, 2022, 49(01): 31-33 (刘焱, 刘贝贝, 周宇仁, 等. 基于不同气体和压力下通道型正压标准漏孔漏率的分析 [J]. *上海计量测试*, 2022, 49(01): 31-33(in chinese))
- [8] Yan Z P, Huang S Y. Study on the relationship between leakage rate and pressure[J]. *Chinese Journal of Space Science and Technology*, 1999(02): 44-48 (闫治平, 黄淑英. 漏率与压力关系的研究 [J]. *中国空间科学技术*, 1999(02): 44-48(in chinese))
- [9] Xu Y Z, Zhu H R, Zheng J. The role of Knudsen number in the study of microscale similar flow characteristics[J]. *Journal of Aerodynamics*, 2013, 28(08): 1752-1758 (许艳芝, 朱惠人, 郑杰. 克努森数在微尺度相似流动特性研究中的作用 [J]. *航空动力学报*, 2013, 28(08): 1752-1758(in chinese))
- [10] Narayanan S, Fedorov A G, et al. Heat and mass transfer during evaporation of thin liquid films confined by nanoporous membranes subjected to air jet impingement, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 58(2013) 300-311
- [11] Liu Y, Chen W. Thermal analysis in the evaporation of flowing thin liquid film confined by gradient or double-layered porous layer subjected to air jet impingement, *International Journal of Thermal Sciences*, 2022(179): 1290-0729
- [12] Zhang S L, Xu H, Hong B, et al. Calibration device for positive pressure standard leak holes[J]. *China Measurement and Testing*, 2015, 41(S1): 6-9 (张书令, 许红, 洪扁, 等. 正压标准漏孔校准装置 [J]. *中国测试*, 2015, 41(S1): 6-9(in chinese))