

数值研究温度对多孔介质填充的通道型正压标准漏孔泄漏率的影响

刘燧 胡馨丹 张忠立* 邬昕 蒋厚庸 刘贝贝

(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 Research on the Influence of Temperature on the Leakage Rate of Channel Type Positive Pressure Standard Leak Filled with Porous Media

LIU Yi, HU Xindan, ZHANG Zhongli*, WU Xin, JIANG Houyong, LIU Beibei
(Shanghai Institute of Measurement and testing Technology, Key Laboratory of Online Test and Control Technology of Shanghai, Shanghai 201203, China)

Abstract For channel-type positive pressure standard leak (CTPPSL) filled with porous media, it is difficult to control and obtain the variation of leakage rate with temperature in actual measurement due to the influence of temperature. This paper establishes a mathematical model using numerical simulation to describe the flow mechanism of fluid inside CTPPSL filled with porous media. The three-dimensional surface graph of the combined influences of different inlet temperatures and pressures, porosity, and pore diameter on the leakage rate of CTPPSL was analyzed, and the velocity field distribution was provided. The results show that the leakage rate of CTPPSL decreases with the increase of inlet temperature and increases with the increase of inlet pressure, porosity and pore diameter. When the inlet pressure is 700 kPa, for every 2 K difference in temperature, the relative error of the obtained leakage rate is 0.54%. While the inlet temperature is 291 K, the growth rate of the leakage rate obtained when the porosity ε increases from 0.85 to 0.95 is 63.5% higher than that obtained when the porosity ε increases from 0.55 to 0.65. Besides, within the same variation range of porosity, the growth rate of the leakage rate of CTPPSL increases with the increase of pore diameter. Based on the research results, the conclusion was drawn that the leakage rate of CTPPSL can be effectively controlled and adjusted under the combined action of temperature, pressure, porosity and pore diameter. This research provides valuable reference significance for the processing design of CTPPSL in the future and controlling the rate of change of the leakage rate.

Keywords Porous media, Channel type positive pressure standard leak, Temperature, Leakage rate, Numerical simulation

摘要 针对多孔介质填充的通道型正压标准漏孔(CTPPSL),在实际测量泄漏率时受温度的影响无法控制和获得泄漏率随温度变化的规律。文章采用数值模拟的方法建立数学模型,描述流体在多孔介质填充的CTPPSL内部流动机理。分析了不同进气温度和压力、孔隙率和孔径共同作用对CTPPSL泄漏率影响的三维曲面图,并给出了速度场分布。结果表明:CTPPSL的泄漏率随进气温度的升高而降低,随进气压力、孔隙率和孔径的增大而增大;当进气压力为700 kPa时,温度每相差2 K,获得泄漏率的相对误差为0.54%;当进气温度为291 K时,孔隙率 ε 从0.85增加到0.95获得的泄漏率增长速率比孔隙率 ε 从0.55增加到0.65获得的泄漏率增长速率高63.5%;此外,在相同的孔隙率变化幅度内,CTPPSL泄漏率的增长速率随孔径的增大而增大。基于研究结果得到了在温度和压力、孔隙率、孔径共同作用下可以有效控制和调节CTPPSL泄漏率大小的结论。该项研究对未来CTPPSL的加工设计,控制泄漏率变化快慢程度提供有价值的参考意义。

关键词 多孔介质 通道型正压标准漏孔 温度 泄漏率 数值模拟
中图分类号: TB774 **文献标识码:** A **doi:** 10.13922/j.cnki.cjvst.202405006

随着新技术革命的发展与更新,在人工智能信息、生物医学、高端装备制造、新能源、深空深海等方面科技的变革,这将对人类社会的发展产生极其重要的影响。近几年,在新技术革命浪潮的推动作用下,更多学科交叉融合促进新学科的产生以及科技的进步。通道型正压标准漏孔(CTPPSL)也被广泛应用于深空深海、半导体制造、制冷工业以及新能源汽车等密封系统和检漏领域^[1-3]。

CTPPSL 在高端设备点检和质量生产安全方面发挥着重要作用。CTPPSL 是指进气入口高于大气压的气体通过内部金属孔隙结构,从出口排出到大气环境的器件。目前对于 CTPPSL 泄漏率的研究,大多数主要集中于实验方法研究,例如分析不同类型气体、不同压力对漏孔泄漏率的影响,研究表明,CTPPSL 漏孔的泄漏率会根据不同气体的粘度的以及进气压力的变化而变化^[4-5]。与此同时,还有学者对标准漏孔校准方法和校准装置的进行研究和设计,通过在装置上增加温度补偿模块,实现对测量结果的准确性^[6-8]。CTPPSL 采用数值模拟方法研究其内在机理,将多孔泡沫金属填充在漏孔内部,发现标准漏孔的泄漏率随漏孔长度增大而减小,此外,还给出了气体在漏孔内部流动时流体的流态判断^[9]。

目前对于 CTPPSL 泄漏率的研究,主要集中于采用实验方法和数值模拟的方法,研究不同参数对 CTPPSL 泄漏率的影响。此外,还研制了标准漏孔校准装置等,实现了对泄漏率校准的准确性。在实际中,面对 CTPPSL 进气温度随环境温度而不断变化,很难控制和研究在一系列温度下 CTPPSL 泄漏率的变化规律。因此,本文在前人研究成果的基础上,将温度这一参数考虑在内,采用数值模拟的方法建立物理和数学模型,并与实验结果对照,证明其模型的正确性。在 CTPPSL 进气压力 100 kPa—700 kPa 的条件下,分别研究不同的漏孔进气温度和压力、温度与孔隙率、温度与孔径、孔隙率与孔径共同作用下对泄漏率的影响。此外,还给出了流体流动的速度场分布。该项研究对高端设备点检、CTPPSL 结构优化和设计、泄漏率的控制以及密封系统温度自动控制等提供有价值的参考意义。

1 物理和数学模型

1.1 物理模型

不同温度的空气,从直径 $D=6\text{ mm}$ 的 CTPPSL 进口进入,途经多孔介质,多孔介质的材料为金属铜,多孔介质区域与外壁之间为金属铝,其厚度 $D_w=1\text{ mm}$,多孔介质的孔径 d_p 分别为 40 nm、50 nm、60 nm、70 nm、80 nm,孔隙率 ε 分别为 0.55、0.65、0.75、0.85、0.95,CTPPSL 长度 $L=27\text{ mm}$,不同温度的空气最后从 CTPPSL 的出口排出,通过计算得到泄漏率。CTPPSL 的物理模型如图 1 所示。不同温度下空气的物性参数如下表 1 所示。

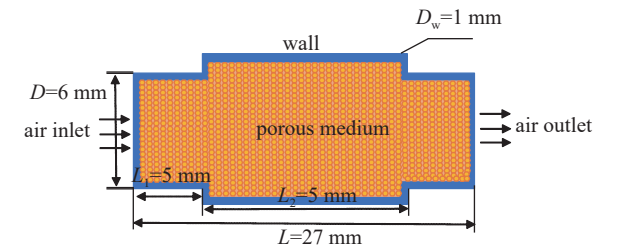


图1 通道型正压标准漏孔物理模型
Fig. 1 Channel type positive pressure standard leak physical model

表 1 空气在大气压为 100 kPa 下不同温度的物性参数
Tab. 1 Physical properties of air at different temperatures under atmospheric pressure of 100 kPa

空气温度/K	密度/(kg/m ³)	粘度/(kg/m·s)
283	1.206	1.7750×10 ⁻⁵
285	1.198	1.7848×10 ⁻⁵
287	1.189	1.7946×10 ⁻⁵
289	1.181	1.8044×10 ⁻⁵
291	1.172	1.8142×10 ⁻⁵
293	1.164	1.8240×10 ⁻⁵
295	1.158	1.8338×10 ⁻⁵
297	1.149	1.8437×10 ⁻⁵
299	1.142	1.8535×10 ⁻⁵
301	1.134	1.8633×10 ⁻⁵
303	1.127	1.8731×10 ⁻⁵

1.2 数学模型

本文主要研究了在大气压为 100 kPa 条件下,不同温度的空气通过 CTPPSL,在孔隙率和孔径以及压力的共同作用下对漏孔泄漏率的影响机理展开

研究。由于进气压力选取 100 kPa–700 kPa, 根据克努森数^[10] $K_n = K_b T_f / (D \sqrt{2} \pi d^2 p)$ 可以得出, $K_n < 0.001$, 即气体流态为粘滞流, 其中 K_b 为 Boltzmann 常数, T_f 为气体热力学温度, D 为 CTPPSL 的进口直径, d 为气体分子直径, p 为进出口的压力差。因此, 假设如下:

(1) 流体的流动为二维稳态、不可压缩流体, 流体的性质恒定;

(2) 多孔介质是均匀的、各向同性, 流体在多孔介质内的流动为粘滞流;

(3) 流体与固体间为无热量的传递, 考虑惯性阻力的影响。

在上述假设的基础上, 流体在多孔介质区域流动的控制方程如下^[11]:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\rho}{\varepsilon^2} \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\nabla p + \frac{\mu}{\varepsilon} \cdot \nabla^2 \vec{V} - \frac{\mu}{K} \vec{V} - \frac{\rho C_F \varepsilon}{\sqrt{K}} |\vec{V}| \vec{V} \quad (2)$$

CTPPSL 壁面的方程:

$$k_s \nabla^2 T = 0 \quad (3)$$

式 (1)–(3) 中, 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: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; k_s 表示壁面的导热系数, 单位: $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 其中 K 和 C_F 分别为多孔介质的渗透率和惯性系数^[12], 其中 K 的单位为: m^2 , 具体公式如下:

$$\frac{K}{d^2} = \frac{\varepsilon^2}{36\chi(\chi-1)} \quad (4)$$

$$F = \frac{2.05\chi(\chi-1)}{\varepsilon^2(3-\chi)} \cdot \frac{\sqrt{K}}{d} \quad (5)$$

式 (4) 和 (5) 中, d 表示立方代表性晶胞的宽度, 其计算公式如下^[12]:

$$d_p = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\chi}} \cdot d \quad (6)$$

$$\frac{1}{\chi} = \frac{3}{4\varepsilon} + \frac{\sqrt{9-8\varepsilon}}{2\varepsilon} \cdot \cos\left\{\frac{4\pi}{3} + \varphi\right\} \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{1}{3} \cdot \cos^{-1}\left[\frac{8\varepsilon^2 - 36\varepsilon + 27}{(9-8\varepsilon)^{\frac{3}{2}}}\right] \quad (8)$$

式 (6) 中, d_p 表示多孔介质的孔径, 单位: nm 。

边界条件:

气体进口:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$p = p, \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$T_{\text{inlet}} = T_f \quad (11)$$

气体出口:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (14)$$

2 数值方法

在本文中, 流体在多孔介质内的流动方程以及边界条件采用 SIMPLE 算法进行数值计算, 其中压力和动量方程采用二阶迎风格式, 设置收敛标准为 10^{-8} , 采用混合初始化。

为了验证网格的质量, 本次计算主要采用非结构化网格, 选取四种不同的网格数进行网格验证, 如表 2 所示。随着网格数从 1069 增加至 7816, 获得的 CTPPSL 泄漏率相对误差为 0.248%; 网格数从 7816 继续增大到 29682, CTPPSL 泄漏率的相对误差为 0.039%; 继续增大网格数至 115821, CTPPSL 泄漏率的相对误差为 0.016%。网格数的增加对泄漏率的影响逐渐降低, 继续增大网格对结果影响越小。因此, 为了节省内存和时间成本, 本文选取网格数为 29682 进行展开研究和分析。

表 2 网格独立性验证

Tab. 2 Grid independence

网格数	漏率/(mL/min)	相对误差/%
1069	7.6889	—
7816	7.7080	0.248
29682	7.7110	0.039
115821	7.7122	0.016

为了验证目前数学模型的正确性和可行性, 主要进行了实验和模拟结果的验证。在实验过程中, 使用 CTPPSL, 设置 CTPPSL 进气压力高于大气压, 即: 进气表压分别为 20 kPa、40 kPa、60 kPa、80 kPa、100 kPa, 出口为环境大气压 101.89 kPa, 空气温度 22℃ 的条件下进行泄漏率的校准, 本次实验过程中主要依据 JJF 1627-2017《皂膜流量计标准漏孔校准规范》对 CTPPSL 进行校准, 本次校准 CTPPSL 的装置结构示意图如图 2 所示。对同一进气压力下 CTPPSL 的泄漏率进行测量 6 次, 取其平均值作为 CTPPSL 在该压力下的泄漏率值。

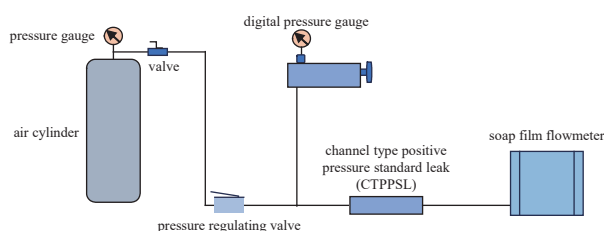


图2 通道型正压标准漏孔校准装置结构示意图

Fig. 2 CTPPSL calibration device structure diagram

通过计算获得的泄漏率的相对合成标准不确定度小于3%。将获得的实验数据与目前采用的数学模型和数学方法进行对照,得到的实验数据与模拟结果如表3所示。

表3 在22℃,大气压101.89 kPa下,泄漏率随压力变化的实验结果和模拟结果

Tab. 3 Experimental and simulation results of the leakage rate versus pressure at 22℃ and 101.89 kPa atmospheric pressure

气源压力值/kPa	实验结果/(mL/min)	模拟结果/(mL/min)
20	2.26	2.59
40	4.87	5.18
60	7.73	7.78
80	10.9	10.4
100	14.4	12.9

从表3中可以看出,实验获得的泄漏率与模拟结果相比较,获得的泄漏率最大相对误差为12.7%。

此外,还将数值模拟结果与已发表的实验文章^[5]进行对照。在温度(20.0±1.0)℃、相对湿度为35% RH~45% RH、大气压为102.30 kPa以及气源压力分别为10 kPa、15 kPa、20 kPa、30 kPa、40 kPa的实验条件下,研究空气通过CTPPSL漏率的变化规律。如图3所示,实验漏率值与模拟结果进行比较,获得的最大相对误差为5.65%。

因此,数值模拟结果与实验结果基本一致,说明上述提及的数学模型是正确可靠的。

3 结果与讨论

本文主要研究了在气源压力:100 kPa~700 kPa,大气压101.89 kPa,温度分别在283 K~303 K,孔径 $d_p=40$ nm, 50 nm, 60 nm, 70 nm, 80 nm,孔隙率 $\varepsilon=0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95$ 条件下,温度和压力、孔径、孔隙率,孔隙率和孔径共同作用下对CTPPSL泄漏率的影响,并给出了速度场分布。

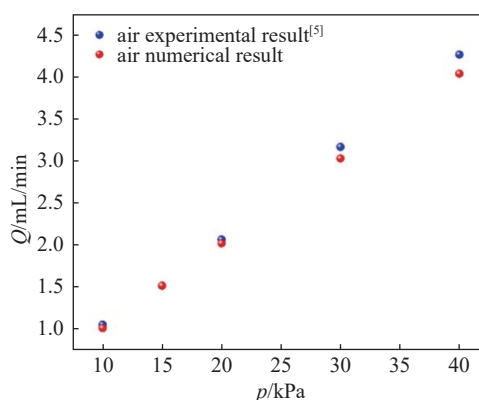


图3 不同气源压力通过CTPPSL获得漏率变化的实验结果^[5]和模拟结果。

Fig. 3 Experimental^[5] and simulation results of leakage rate changes obtained through CTPPSL under different gas source pressures.

3.1 温度和压力对泄漏率的影响

如图4所示,主要研究了在CTPPSL内部多孔介质孔隙率 $\varepsilon=0.65$,孔径 $d_p=80$ nm条件下,不同的温度和不同进气压力作用下对漏孔泄漏率影响的三维曲面。

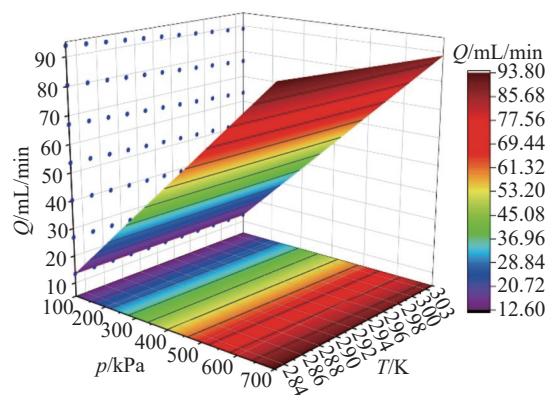


图4 泄漏率随温度和压力变化的三维曲面图

Fig. 4 Three-dimensional curved surface graph of leakage rate as a function of temperature and pressure

从图4中可以看出,在进气温度恒定的条件下,泄漏率随进气压力的增大而增大。当进气温度 $T_i=291$ K时,进气压力从300 kPa增加到400 kPa时,泄漏率从39.3 mL/min变化至52.4 mL/min,泄漏率增长了33.3%;继续增大进气压力到500 kPa,泄漏率由52.4 mL/min变化至65.5 mL/min,泄漏率增长了25.0%。进气压力的增加,泄漏率的增长率在逐渐减小。这主要是因为,恒定的气体温度、孔径、孔隙率,导致气体的渗透率和惯性阻力恒定。因此,进气压力越大,会有更多的气体通过多孔介质,从

而在出口产生更大的泄漏率。当进气压力进一步增大, 由于多孔介质中惯性阻力的影响, 削弱了泄漏率的增长速率。此外, 从图 4 中还可以看出, 在进气压力恒定的条件下, 漏孔的泄漏率随进气温度的增大而减小。当进气压力为 700 kPa 时, 温度每相差 2 K, 获得的泄漏率相对误差约为 0.54%, 温度 $T_i=283$ K 时, 获得的泄漏率为 93.7 mL/min, 温度 T_i 增加至 303 K, 获得的泄漏率为 88.8 mL/min, 即温度变化 20 K, 在相同的设置条件下, 泄漏率的相对误差为 5.2%。这主要是因为, 在较大的进气压力下, 气体粘度对泄漏率影响减弱, 气体的密度作为主要的影响因素, 气体密度随温度的升高而降低, 在较大进气压力的作用下, 气体在多孔介质内部流动阻力增强, 单位时间内通过漏孔到达出口端的气体体积减小, 从而导致泄漏率的降低。

在温度和压力共同作用下, 进气压力对泄漏率的影响占主导因素, 而温度对泄漏率的影响为次要因素。因此, 对于泄漏率方面的校准, 规定合适的温度范围对漏孔泄漏率的校准以及量值溯源起到指导意义。

3.2 温度和孔隙率对泄漏率的影响

如图 5 所示, 主要研究了 CTPPSL 在进气压力 300 kPa, 多孔介质孔径 $d_p=80$ nm 条件下, 不同的进气温度以及不同孔隙率对漏孔泄漏率影响的三维曲面图。

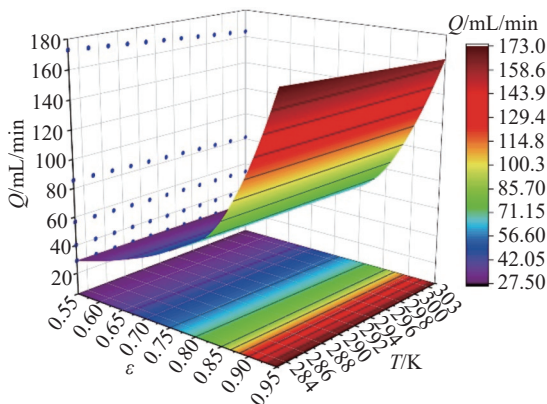


图5 泄漏率随温度和孔隙率变化的三维曲面图

Fig. 5 Three-dimensional curved surface graph of leakage rate as a function of temperature and porosity

从图 5 中可以发现, 在进气温度 $T_i=291$ K 条件下, CTPPSL 的泄漏率随着多孔介质孔隙率的增大而增大。当孔隙率 $\varepsilon=0.55$ 增加到 $\varepsilon=0.65$, 在漏孔的出

口获得的泄漏率分别为 28.4 mL/min、39.3 mL/min, 泄漏率提高了 38.3%。当孔隙率 $\varepsilon=0.85$ 增加到 $\varepsilon=0.95$, 在漏孔的出口获得的泄漏率分别为 83.8 mL/min、169.1 mL/min, 泄漏率提高了 101.8%。由此可见, 与孔隙率 $\varepsilon=0.55$ 增加到 $\varepsilon=0.65$ 的泄漏率增长速率相比较, 孔隙率 $\varepsilon=0.85$ 增加到 $\varepsilon=0.95$ 获得的泄漏率增长速率较大。这主要是因为, 在相同的孔径下, 多孔介质内部的渗透率随着孔隙率的增大而增大, 惯性阻力相对减小; 较大的孔隙率的多孔介质渗透率对泄漏率的影响占主导作用, 较小的孔隙率获得的泄漏率受渗透率和惯性阻力的共同影响。因此, 从图 5 中可以明显的看到, 在孔隙率 $\varepsilon=0.85$ 增加到 $\varepsilon=0.95$ 过程中, 获得的泄漏率急剧增大。此外, 图 4 中还可以发现, 在孔隙率 $\varepsilon=0.95$ 的条件下, 漏孔泄漏率随温度的增加而减小。这主要是因为, 在进气压力较小的情况下, 气体的粘度和密度都受到温度的影响, 气体密度随着温度的升高而降低, 气体粘度随着温度的增大而增大; 流体通过多孔介质阻力增大, 使得泄漏率进一步降低。

不同的温度和孔隙率对漏孔的泄漏率有一定的影响, 较高的温度可以获得较低的泄漏率, 孔隙率的提高可以有效增大泄漏率。因此, 在不同的环境和不同的操作条件下, 可通过改变温度和孔隙率实现泄漏率的有效控制, 这对产品或密封系统的设计和加工具有借鉴意义。

3.3 温度和孔径对泄漏率的影响

如图 6 所示, 主要研究了 CTPPSL 在进气压力 300 kPa, 多孔介质孔隙率 $\varepsilon=0.85$ 条件下, 不同的进气温度和不同孔径对漏孔泄漏率影响的三维曲面图。

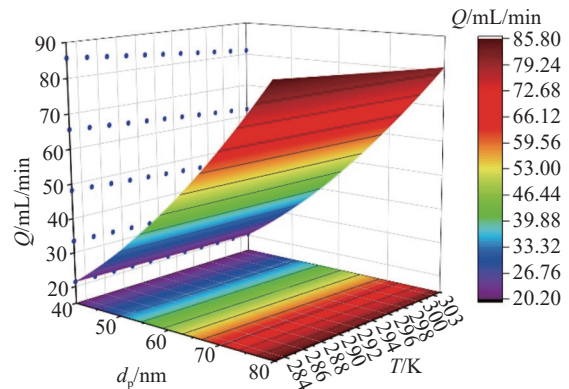


图6 泄漏率随温度和孔径变化的三维曲面图

Fig. 6 Three-dimensional curved surface graph of leakage rate as a function of temperature and aperture

从图6中可以看出,CTPPSL的泄漏率随着多孔介质孔径的增大而增大,随着漏孔进气温度的增大而减小,并且三维曲面图中泄漏率的增长呈现缓慢上升趋势,这表明孔径能够改善漏孔泄漏率的快慢。在漏孔进气温度 $T_i=283\text{ K}$ 条件下,多孔介质孔径从 $d_p=40\text{ nm}$ 增加到 $d_p=50\text{ nm}$ 时,漏孔出口获得的泄漏率提高了56.2%;相应地,进气温度 $T_i=303\text{ K}$ 条件下,多孔介质孔径从 $d_p=40\text{ nm}$ 增加到 $d_p=50\text{ nm}$ 时,漏孔出口获得的泄漏率也提高了56.2%。这表明,温度的变化,对于相同幅度变化的孔径来讲,获得泄漏率的上升速率是相同的。与此同时,CTPPSL内部孔径由 $d_p=70\text{ nm}$ 增加到 $d_p=80\text{ nm}$,漏孔出口获得的泄漏率提高了30.6%。这表明,孔径的增加能够有效提高漏孔的泄漏率,但较大的泄漏率增长速率需要在较小的孔径条件下获得。

不同温度和孔径对漏孔的泄漏率有不同的影响。泄漏率大小的有效控制,一方面能够满足工业生产需求;另一方面为确保密封系统的性能以及获得稳定的泄漏气体环境提供保障;其中,温度对漏孔泄漏率的影响也为在计量方面的校准工作提供参考意义。

3.4 孔隙率和孔径对泄漏率的影响

如图7所示,主要研究了CTPPSL在进气压力300 kPa,漏孔进口的进气温度 $T_i=293\text{ K}$ 条件下,不同孔隙率和不同孔径对CTPPSL泄漏率共同影响的三维曲面图。

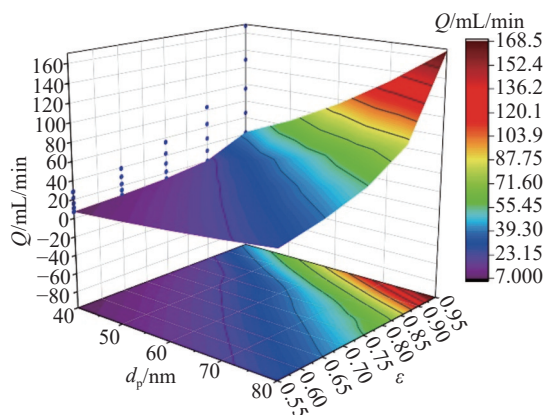


图7 泄漏率随孔隙率和孔径变化的三维曲面图

Fig. 7 Three-dimensional curved surface graph of leakage rate as a function of porosity and aperture

从图7中可以看出,在孔隙率或孔径恒定的条件下,检测到CTPPSL出口的泄漏率随着孔径或孔

隙率的增大而增大。在孔径 $d_p=40\text{ nm}$ 的条件下,当孔隙率从 $\varepsilon=0.55$ 增加到 $\varepsilon=0.95$ 的过程中,出口获得的泄漏率由 $Q=7.1\text{ mL/min}$ 增加到 $Q=42.1\text{ mL/min}$,泄露率提高了5.93倍左右。在孔径 $d_p=50\text{ nm}$ 的条件下,当孔隙率从 $\varepsilon=0.55$ 增加到 $\varepsilon=0.95$ 的过程中,出口获得的泄漏率由 $Q=11.0\text{ mL/min}$ 增加到 $Q=65.7\text{ mL/min}$,泄露率提高了5.97倍左右。这表明在相同的孔隙率变化幅度内,CTPPSL出口获得的泄漏率的增长速率随着孔径的增大而增大。这主要是因为恒定的孔隙率变化幅度,其内部多孔介质的渗透率和惯性阻力具有相同的变化幅度,孔径的增加导致流体能够在短时间内到达检测出口,从而获得相对较大的泄漏率。此外,从三维曲面图8中还可以看到,在孔径 $d_p=80\text{ nm}$ 时,随着孔隙率的逐渐增大,明显看到在孔隙率 $\varepsilon=0.85$ 之后获得的漏孔泄漏率迅速增大;在孔隙率 $\varepsilon=0.95$ 时,随着孔径的逐渐增大,在孔径 $d_p=60\text{ nm}$ 之后获得的漏孔泄漏率迅速增大。在孔隙率 $\varepsilon=0.55\sim 0.65$ 之间以及孔径 $d_p=40\text{ nm}\sim 60\text{ nm}$ 之间,获得的CTPPSL出口泄漏率增长速率缓慢。这主要因为多孔介质内较小的孔径和孔隙率获得的流动阻力以及渗透率较大,流体不能及时到达出口,从而导致泄漏率的降低。

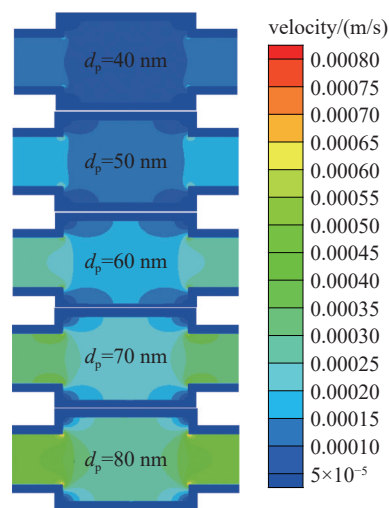


图8 不同孔径下CTPPSL内部速度场分布

Fig. 8 Distribution of velocity field inside CTPPSL with different apertures

不同的孔径和孔隙率对泄漏率会产生一定的影响。协调好孔径和孔隙率的大小,对CTPPSL在结构上的优化和加工,处理密封系统的自动调节控制,CTPPSL泄漏率的计量检测方面都具有参考价值。

3.5 速度场的分布

如图 8 所示, 主要研究了 CTPPSL 在进气压力和进气温度分别为 300 kPa 和 303 K, 多孔介质孔隙率 $\varepsilon=0.95$ 的条件下, 不同孔径变化对 CTPPSL 内部速度场分布的影响。

从图 8 中可以看出, CTPPSL 内部速度场随多孔介质孔径的增大而增大。CTPPSL 长度相同时, 孔径 $d_p=80$ nm 条件下流体流过 CTPPSL 所需要的时间最短, 获得的泄漏率最大。这主要因为较大的孔隙率具有较大的渗透率和较小的惯性阻力, 相同进气压条件下气体更容易在较大孔径下流过。此外, 从速度场分布图中还可以发现, CTPPSL 中间区域, 孔径 $d_p=80$ nm 下获得的流体速度是孔径 $d_p=40$ nm 下获得的流体速度的 2 倍。因此, 对于 CTPPSL 结构的设计和加工, 能够有效控制流体流动速度, 从而提供稳定的气流环境, 这为高端产品的制造和发展提供保障。

4 结论

本文主要采用数值模拟的方法, 分析漏孔内部机理并建立数学模型。通过与实验结果对照来说明目前模拟方法和数学模型的正确性。将温度这一参数考虑在内, 分别分析了不同进气温度、进气压力、孔隙率、孔径之间的共同作用对 CTPPSL 泄漏率的影响。此外, 也给出了速度场分布。得到的主要结论如下:

(1) 在进气温度恒定的条件下, CTPPSL 出口的泄漏率随进气压力、孔径、孔隙率的增大而增大。温度恒定下, 气体在漏孔内部的流动主要受多孔介质渗透率和惯性阻力的影响。因此, 对于密封系统的优化设计, 可以采用较小的孔径和孔隙率, 从而获得小的泄漏率以确保生产安全。

(2) 在恒定的进气压力、恒定的孔径、恒定的孔隙率条件下, CTPPSL 的泄漏率随进气温度的升高而降低。漏孔中多孔介质的渗透率和惯性阻力恒定, 气体的粘度随着温度的升高而升高, 气体的密度随着温度的升高而降低。粘度的增加导致流体在多孔介质内部停留时间较长, 相同时间内不能及时到达出口, 密度的降低导致漏孔出口获得的气体质量降低, 在两者共同作用下, 获得的泄漏率相对降低。温度每升高 2 K, 漏率结果会产生 0.54% 的误差。因此, 在一些高端制造业、CTPPSL 的计量检

漏方面、密封系统的设计和加工方面都应将温度考虑在内。

(3) 进气温度和进气压力不变时, 在相同的孔隙率变化幅度下, CTPPSL 出口获得的泄漏率增长率随孔径的增加而提高。在较大幅度变化的孔径和较大幅度变化的孔隙率下, 获得的泄漏率增长率缓慢。孔隙率和孔径的共同作用能够达到对泄漏率的有效控制, 这为未来 CTPPSL 在结构上的设计和加工以及保证生产质量安全提供借鉴意义。

综上所述, 在实际生产和发展中, 控制好适当的温度, 对计量方面的检漏、密封系统的设计、高端制造业的发展、生产安全等尤为重要。此外, 通过改变进气压力、协调好孔隙率和孔径之间的关系, 对未来 CTPPSL 的加工设计, 控制泄漏率变化快慢程度, 都有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Li D T. Recent advances in vacuum metrology[J]. *Shanghai Metrology and Testing*, 2003(5): 4-10 (李得天. 真空计量的新进展 [J]. *上海计量测试*, 2003(5): 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] Wei B M. Research on controllable manufacturing of porous aluminum oxide standard leakage holes[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019 (魏本猛. 多孔氧化铝型标准漏孔可控制作研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019 (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(4): 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(4): 218-223 (in Chinese))
- [5] 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(1): 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(1): 31-33 (in Chinese))
- [6] Yu H J, Sun T. Automatic pressure compensation calibration method for small flow positive pressure standard

- leakage holes[J]. *Standardization and Metrology of Instruments and Meters*, 2023(03): 20–21+27 (俞和君, 孙涛. 小流量正压标准漏孔的自动补压式校准方法 [J]. *仪器仪表标准化与计量*, 2023(03): 20–21+27 (in Chinese))
- [7] Liu B, Ding L L, Zhang L. Performance study of positive pressure leak calibration device[J]. *Vacuum and Low Temperature*, 2018, 24(03): 162–166 (刘波, 丁立莉, 张蕾. 正压漏孔校准装置性能研究 [J]. *真空与低温*, 2018, 24(03): 162–166 (in Chinese))
- [8] Zhang S L, Xu H, Hong B, et al. Positive pressure standard leak calibration device[J]. *China 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))
- [9] Liu Y, Liu B B, Zhang Z L, et al. Numerical simulation of channel type positive pressure standard leak rate filled with porous foam metal[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2023, 43(11): 931–937 (刘隸, 刘贝贝, 张忠立, 等. 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 [J]. *真空科学与技术学报*, 2023, 43(11): 931–937 (in Chinese))
- [10] 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(8): 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(8): 1752–1758 (in Chinese))
- [11] 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[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013(58): 300–311
- [12] Shadi M, Kambiz V. A synthesis of fluid and thermal transport models for metal foam heat exchangers[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008(51): 3701–3711